

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Σύστημα μετρήσεων και παρακολούθησης για τη συντήρηση
αναρτήσεων τροχαίου υλικού»*



Του φοιτητή: Λύχνα Απόστολου
Αρ. Μητρώου: elem52015

Επιβλέπων
Όνοματεπώνυμο : Τσιακμάκης
Κυριάκος
Βαθμίδα : Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία : 30/9/2025



SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF INFORMATION AND ELECTRONIC SYSTEMS
ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

«Measurement and monitoring system for the maintenance of rolling stock suspensions»



By The Student: Apostolos Lychnas

Student ID: elem52015

Supervisor: Tsiakmakis Kiriakos

Rank: Professor

Date : 30/9/2025

Τίτλος Δ.Ε. : Σύστημα μετρήσεων και παρακολούθησης για τη συντήρηση αναρτήσεων τροχαίου υλικού

Κωδικός Δ.Ε. : 22320

Όνοματεπώνυμο φοιτητή : Λύχνας Απόστολος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή : Τσιακμάκης Κυριάκος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. : 30/10/2022

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. : 30/09/2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Απόστολου Λύχνα που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σιδηροδρομική βιομηχανία αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς μεταφορών, όπου η αξιοπιστία και η ασφάλεια είναι καθοριστικής σημασίας. Ένα από τα κύρια τεχνικά ζητήματα που αντιμετωπίζουν τα σιδηροδρομικά δίκτυα είναι η κόπωση των μεταλλικών υλικών στις αναρτήσεις, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μηχανικές αστοχίες και αυξημένο κόστος συντήρησης. Η εφαρμογή προηγμένων μεθόδων παρακολούθησης και προγνωστικής συντήρησης καθίσταται ολοένα και πιο αναγκαία, διασφαλίζοντας τη λειτουργική αποδοτικότητα και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα των σιδηροδρομικών συστημάτων.

Η εργασία εξετάζει τη μηχανική κόπωση των μεταλλικών υλικών στις σιδηροδρομικές αναρτήσεις, τους παράγοντες που την επηρεάζουν, καθώς και τις σύγχρονες μεθόδους ανίχνευσης και αντιμετώπισης. Αναλύονται οι κυκλικές φορτίσεις, η γεωμετρία των εξαρτημάτων, οι θερμοκρασιακές μεταβολές και η επιφανειακή κατεργασία. Παρουσιάζονται οι βασικές τεχνικές παρακολούθησης, όπως η ακουστική εκπομπή, οι υπέρηχοι και η θερμογραφία, καθώς και ο ρόλος των αισθητήρων τάσης, επιτάχυνσης και θερμοκρασίας στις αναρτήσεις.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην προγνωστική συντήρηση, η οποία χρησιμοποιεί τεχνολογίες όπως το Internet of Things (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση για την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, εξετάζονται τα διεθνή σιδηροδρομικά πρότυπα, όπως τα EN 50126 και ISO 13374, που καθορίζουν τις προδιαγραφές σχεδιασμού και συντήρησης των εξαρτημάτων.

Καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των αναρτήσεων, να μειώσει το κόστος συντήρησης και να αυξήσει την ασφάλεια του δικτύου. Μελλοντικές εξελίξεις, όπως η ενσωμάτωση cyber-physical systems, αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων, συμβάλλοντας σε ένα πιο αξιόπιστο και αποδοτικό σιδηροδρομικό περιβάλλον.

Λέξεις – Κλειδιά: Μεταλλουργία, Μεταλλικά Υλικά, Τροχαίο Υλικό, Ελατήρια, Κόπωση, Εφελκυσμός και Θλίψη, Σιδηροδρομικό δίκτυο, Αποφυγή Αστοχίας, Αυτόματα Συστήματα Παρακολούθησης.

ABSTRACT

The railway industry is one of the most critical sectors of transportation, where reliability and safety are of paramount importance. One of the main technical challenges faced by railway networks is the fatigue of metallic materials in suspensions, which can lead to mechanical failures and increased maintenance costs. The implementation of advanced monitoring methods and predictive maintenance is becoming increasingly necessary to ensure the operational efficiency and long-term sustainability of railway systems.

This study examines the mechanical fatigue of metallic materials in railway suspensions, the factors influencing it, and modern detection and mitigation methods. It analyzes cyclic loadings, component geometry, temperature variations, and surface treatments. The study presents key monitoring techniques such as acoustic emission, ultrasonic testing, and thermography, as well as the role of strain, acceleration, and temperature sensors in suspension systems.

Particular emphasis is placed on predictive maintenance, which utilizes technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and machine learning for real-time data analysis. Additionally, international railway standards, such as EN 50126 and ISO 13374, are examined, defining the design and maintenance specifications of railway components.

The study concludes that the utilization of modern technologies can improve suspension performance, reduce maintenance costs, and enhance network safety. Future advancements, such as the integration of cyber-physical systems, are expected to further enhance the effectiveness of these systems, contributing to a more reliable and efficient railway environment.

Keywords: Metallurgy, Metallic Materials, Rolling Stock, Springs, Fatigue, Tension and Compression, Railway Network, Failure Prevention, Automated Monitoring Systems.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί το επιστέγασμα μιας απαιτητικής αλλά συναρπαστικής διαδρομής, η οποία δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη συμβολή και τη στήριξη σημαντικών ανθρώπων, στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Τσιακμάκη Κυριάκο, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την αδιάκοπη υποστήριξη και τις γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου σε όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής. Η υπομονή του, οι συμβουλές του και η επιστημονική του καθοδήγηση υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της μελέτης.

Επίσης, εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες στο Τμήμα και σε όλους τους καθηγητές που συνέβαλαν στην ακαδημαϊκή μου πορεία. Οι πολύτιμες γνώσεις και η επιστημονική τους κατάρτιση διαμόρφωσαν το γνωστικό μου υπόβαθρο και μου παρείχαν τα εφόδια για να ανταποκριθώ στις απαιτήσεις αυτής της ερευνητικής προσπάθειας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους και τους συγγενείς μου, που στάθηκαν δίπλα μου με κατανόηση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η συμπαράστασή τους αποτέλεσε πηγή δύναμης στις πιο απαιτητικές στιγμές αυτής της διαδρομής.

Τελευταία έχω αφήσει δύο από τα πιο σημαντικά πρόσωπα της ζωής μου. Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη αναγνωρίζω στη σύζυγό μου Έρση, που με υπομονή, αγάπη και αμέριστη στήριξη στάθηκε δίπλα μου σε κάθε στάδιο αυτής της προσπάθειας. Οι ενθαρρυντικές της κουβέντες και η κατανόηση της σημασίας αυτής της διαδρομής έδωσαν σε εμένα το κίνητρο να συνεχίσω ακόμα και στις πιο δύσκολες στιγμές.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ δεν μπορώ να παραλείψω στη βαφτισιμιά μου, που με το χαμόγελό της και την ανεμελιά της μου υπενθύμιζε πάντα την ομορφιά της ζωής πέρα από τα βιβλία και την έρευνα.

Σε όλους εσάς, ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς!

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	14
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	14
2.1 Ιστορική Αναδρομή Μεταλλουργίας	14
2.3. Μεταλλουργικά Υλικά και Εφαρμογές	18
2.4 Τύποι και Ιδιότητες Μετάλλων ως Τροχαίο Υλικό	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	26
ΚΟΠΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΕΣ ΑΝΑΡΤΗΣΕΙΣ	26
3.1 Η Έννοια της Κόπωσης των Μεταλλικών Στοιχείων	26
3.2 Διαδικασία της Κόπωσης των Μεταλλικών Στοιχείων	27
3.3. Σιδηροδρομικές Αναρτήσεις και η Σχέση τους με την Κόπωση	29
3.4 Επίδραση της Κόπωσης στα Ελατήρια	32
3.5 Μέθοδοι Ανίχνευσης Κόπωσης	34
3.6 Μέθοδοι Ανάλυσης της Κόπωσης	36
3.7 Εφελκυσμός και Θλίψη στις Σιδηροδρομικές Αναρτήσεις	39
3.8 Δοκιμές Εφελκυσμού και Θλίψης.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	44
ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ	44
4.1 Ορισμός και Εφαρμογές Προγνωστικής Συντήρησης	45
4.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	46
4.3 Παραδείγματα Εφαρμογής	47
4.4 Προοπτικές Εξέλιξης	50
4.5 Αισθητήρες και Αυτόματα Συστήματα Παρακολούθησης	51
4.6 Τύποι Αισθητήρων Παρακολούθησης Ελατηρίων	52
4.7 Κριτήρια Επιλογής Αισθητήρων	54
4.8 Εφαρμογές Αισθητήρων σε Συστήματα Ανάρτησης Τροχαίου Υλικού	54

4.9 Διεθνή Σιδηροδρομικά Πρότυπα και Κανονισμοί	56
4.10 Προκλήσεις και Προοπτικές Εξέλιξης.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	61
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	61
5.1 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΠΩΣΗΣ	61
5.2 Hardware της Εφαρμογής.....	63
5.3 Cloud Server.....	65
5.4 ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ESP8266 MODULE	70
5.4.1 Βιβλιοθήκες.....	70
5.4.2 Ρυθμίσεις WIFI	70
5.4.3 Ρυθμίσεις σύνδεσης με τον SERVER.....	70
5.4.4 Status σύνδεσης	71
5.4.5 Σύνδεση στον SERVER και αποστολή πακέτων δεδομένων.....	71
5.4.6 Διαμόρφωση της οθόνης υγρών κρυστάλλων	72
5.4.7 Διαμόρφωση του Αισθητήρα θερμοκρασίας	73
5.5 PYTHON SERVER	74
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.	Μεταλλουργία στην Εποχή του Χαλκού.	Πηγή:
	https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Φαίλ:Schmidt-1568.png	14
Εικόνα 2.	Η Μεταλλουργία στην Βιομηχανική Επανάσταση.	Πηγή:
	https://vlkz.com.ua/?p=306	15
Εικόνα 3.	Ελατήρια Χάλυβα σε Αμαξοστοιχία Τραίνου.	Πηγή:
	https://depositphotos.com/gr/photos/rail-freight-wheels.html	16
Εικόνα 4.	Τύποι Μεταλλουργίας Γενικά.	Πηγή:
	https://byjus.com/chemistry/processes-of-metallurgy/	17
Εικόνα 5.	Στάδια Εφαρμογής και Επεξεργασίας Μετάλλων.	Πηγή:
	https://www.linkedin.com/pulse/metallurgy-nanotechnology-powerful-partnership-sabhavath-jaipal-cm4ff	20
Εικόνα 6.	Χαλύβδινες Ράγες Σιδηροδρομικού Δικτύου.	Πηγή:
	http://www.railway-fasteners.com/news/steel-rails-for-sale.html	21
Εικόνα 7.	Σκελετός Βαγονιού από Κράματα Αλουμινίου.	Πηγή:
	https://www.intechopen.com/chapters/75650	22
Εικόνα 8.	Δισκόφρενα Αμαξοστοιχίας από Χυτοσίδηρο.	Πηγή:
	https://www.istockphoto.com/search/2/image-film?phrase=train+brakes	23
Εικόνα 9.	Συστήματα Ανάρτησης και Τροχών από Κράματα Τιτανίου.	Πηγή:
	https://investacast.com/news/why-use-nickel-base-superalloys/	24
Εικόνα 10.	Σημαντικότητα της προσεκτικής Επιλογής των Υλικών.	Πηγή:
	https://www.redbubble.com/i/sticker/Train-Emoji-by-HippoEmo/28808693.EJUG5 25	
Εικόνα 11.	Αποτέλεσμα Κόπωσης Μεταλλικών Στοιχείων	Πηγή:
	https://www.researchgate.net/figure/Fracture-of-train-wreck-due-to-metal-fatigue-failure-of-rail-from-Wikipedia_fig75_312022469	26
Εικόνα 12.	Διαδικασία Κόπωσης έως και την Θραύση.	Πηγή:
	https://www.researchgate.net/figure/Three-stages-of-fatigue-failure_fig4_354425761	28
Εικόνα 13.	Αναρτήσεις Αμαξοστοιχίας Τραίνου.	Πηγή:
	https://www.youtube.com/watch?v=tiabje5LCWQ	31
Εικόνα 14.	Πλαϊνή Απεικόνιση Ανάρτησης Αμαξοστοιχίας.	Πηγή:
	https://en.wikipedia.org/wiki/Bogie	31

Εικόνα 15.	Αποτελέσματα Κόπωσης.	Πηγή: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/rs-12-2023-0048/full/html	32
Εικόνα 16.	Στάδια Εφαρμογής Διεσδυτικού Υγρού.	Πηγή: http://users.uniwa.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/308MethYgrwn.html	34
Εικόνα 17.	Μέτρηση Ρωγμών με Διάθλαση Υπερήχων.	Πηγή: http://users.uniwa.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/305Yperixoi.html	35
Εικόνα 18.	Σειρά Παλμών Ακουστικής Εκπομπής.	Πηγή: http://users.uniwa.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/305Yperixoi.html	35
Εικόνα 19.	Πειραματική Διάταξη Ερπυσμού.	Πηγή: Σημειώσεις Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Στεργιούδη.	38
Εικόνα 20.	Διάγραμμα Ερπυσμού Παραμόρφωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο.	Πηγή: Σημειώσεις Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Στεργιούδη.	38
Εικόνα 21.	Εφελκυσμός και Θλίψη.	Πηγή: Σημειώσεις Μαθήματος "Ιδιότητες των Υλικών", ΑΠΘ, Ν. Μιχαηλίδης.	40
Εικόνα 22.	Όλκιμη και Ψαθυρή Θραύση Μετάλλων.	Πηγή: https://learnmech.com/introduction-brittle-failure-brittle-failure-occurs/	41
Εικόνα 23.	Μηχανή Εφελκυσμού.	Πηγή: Σημειώσεις Μαθήματος "Ιδιότητες των Υλικών", ΑΠΘ, Ν. Μιχαηλίδης.	42
Εικόνα 24.	Προγνωστική Συντήρηση και Αυτοματα Συστήματα.	Πηγή: https://www.voestalpine.com/railway-systems/en/company/news/predictive-railway-monitoring/	44
Εικόνα 25.	Predictive Maintenance Vs Preventive Maintenance.	Πηγή: https://www.prometheusgroup.com/resources/posts/reactive-vs-preventive-vs-predictive-maintenance	45
Εικόνα 26.	Προγνωστική Συντήρηση και Εξέλιξη.	Πηγή: https://www.servicepower.com/blog/preventive-vs-predictive-maintenance	50
Εικόνα 27.	Αυτόματα Συστήματα Παρακολούθησης στις Σιδηροδρομικές Ράγες.	Πηγή: https://www.linkedin.com/pulse/smart-railway-tracking-system-dr-karthikeayan-r-m	52
Εικόνα 28.	Διαφορετικά Συστήματα Παρακολούθησης σε Σιδηροδρομική Αμαξοστοιχία.	Πηγή: https://septrainose.gr/article/4358	53

Εικόνα 29. Κανονισμοί ISO στον Σιδηρόδρομο.

Πηγή:

<https://www.bioworld.com/blogs/2-bioworld-medtech-perspectives/post/515748-goldilocks-or-bust-the-fdas-regulatory-harmonization-dilemma>.....57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεταλλουργία, ως θεμελιώδης επιστήμη της επεξεργασίας και χρήσης μετάλλων, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη των βιομηχανιών και της τεχνολογίας. Από την αρχαιότητα έως σήμερα, η συνεχής πρόοδος στη γνώση των μεταλλικών υλικών έχει οδηγήσει στην παραγωγή ανθεκτικών, ευέλικτων και αποδοτικών συστημάτων που υποστηρίζουν έναν τεράστιο αριθμό εφαρμογών. Ένα από τα πλέον απαιτητικά περιβάλλοντα χρήσης των μετάλλων είναι οι σιδηροδρομικές μεταφορές, όπου η αντοχή, η αξιοπιστία και η συντήρηση των εξαρτημάτων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία.

Ο σιδηρόδρομος αποτελεί έναν από τους πιο αξιόπιστους και βιώσιμους τρόπους μεταφοράς, με μακρά ιστορία και συνεχή εξέλιξη. Η αντοχή και η απόδοση του τροχαίου υλικού εξαρτώνται από τη σωστή συντήρηση των βασικών εξαρτημάτων του, όπως οι αναρτήσεις, οι οποίες παίζουν κρίσιμο ρόλο στη σταθερότητα, την άνεση και την ασφάλεια των σιδηροδρομικών συστημάτων. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι σιδηροδρομικές αναρτήσεις είναι η κόπωση των μεταλλικών στοιχείων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες με σοβαρές επιπτώσεις στη λειτουργία του συστήματος. Η ανάγκη για αξιόπιστες μεθόδους ανίχνευσης της κόπωσης και πρόληψης των αστοχιών καθιστά επιτακτική τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών παρακολούθησης και προγνωστικής συντήρησης.

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τη διερεύνηση των μηχανισμών κόπωσης στις σιδηροδρομικές αναρτήσεις, την ανάλυση των μεθόδων παρακολούθησης και διάγνωσης της φθοράς, καθώς και την αξιολόγηση της συμβολής των σύγχρονων τεχνολογιών στην αποτελεσματική συντήρηση του τροχαίου υλικού.

Παράλληλα, η εφαρμογή των αυτόματων ασύρματων συστημάτων παρακολούθησης έχει αναδειχθεί σε σημαντικό εργαλείο για την πρόληψη των βλαβών, ενισχύοντας τη δυνατότητα για προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance). Η εργασία αυτή αναλύει θεωρητικά το φαινόμενο της κόπωσης, τα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά των υλικών, τις ιδιότητες των

ελατηρίων, καθώς και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των εξαρτημάτων.

Το θεωρητικό πλαίσιο χωρίζεται σε δύο βασικά σκέλη: το πρώτο εστιάζει στις μεταλλουργικές ιδιότητες και τους μηχανισμούς κόπωσης, ενώ το δεύτερο αναλύει την εφαρμογή των σύγχρονων τεχνολογιών παρακολούθησης και την επίδραση της προγνωστικής συντήρησης στη σιδηροδρομική βιομηχανία. Μέσω αυτής της ανάλυσης, επιδιώκεται η παροχή ενός πλήρους και τεκμηριωμένου πλαισίου, το οποίο θα αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω ερευνητική εργασία και πειραματικές εφαρμογές.

Κατόπιν εστιάζει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος μέτρησης και παρακολούθησης για τη συντήρηση των αναρτήσεων τροχαίου υλικού. Το συγκεκριμένο σύστημα επιδιώκει να ανιχνεύει εγκαίρως σημάδια κόπωσης των ελατηρίων, ώστε να προλαμβάνονται βλάβες που ενδέχεται να επηρεάσουν την ασφάλεια των μεταφορών. Το πρόβλημα της κόπωσης των μεταλλικών υλικών είναι καίριο στη βιομηχανία, καθώς σχετίζεται με την αποτυχία των εξαρτημάτων εξαιτίας επαναλαμβανόμενων φορτίσεων και εκφόρτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Ιστορική Αναδρομή Μεταλλουργίας

Η μεταλλουργία αποτελεί μια από τις αρχαιότερες τεχνολογικές δραστηριότητες του ανθρώπου, με την εξέλιξή της να σηματοδοτεί σημαντικά στάδια στην ανάπτυξη των πολιτισμών. Οι πρώτες ενδείξεις κατεργασίας μετάλλων χρονολογούνται από την Προϊστορική κιάλας περίοδο, και πιο συγκεκριμένα γύρω στο 6000 π.Χ., με την κατεργασία του χαλκού να σηματοδοτεί την απαρχή της Εποχής του Χαλκού. Οι αρχαίοι πολιτισμοί, όπως εκείνοι της Μεσοποταμίας, της Αιγύπτου και της Ινδίας, ανέπτυξαν τεχνικές που τους επέτρεψαν να κατασκευάσουν εργαλεία, όπλα και διακοσμητικά αντικείμενα από μέταλλα. Η σφυρηλάτηση, η χύτευση και η ανάμιξη φυσικών κραμάτων, όπως ο χρυσός και ο χαλκός, που από εκείνα τα χρόνια βρισκόταν ελεύθερα στην φύση, αποτέλεσαν τα πρώτα βήματα για την ανάπτυξη της μεταλλουργικής τεχνολογίας, η οποία έθεσε τα θεμέλια για τη βιομηχανική επανάσταση πολλούς αιώνες αργότερα (Αγγελόπουλος, 2005).



Εικόνα 1. Μεταλλουργία στην Εποχή του Χαλκού.

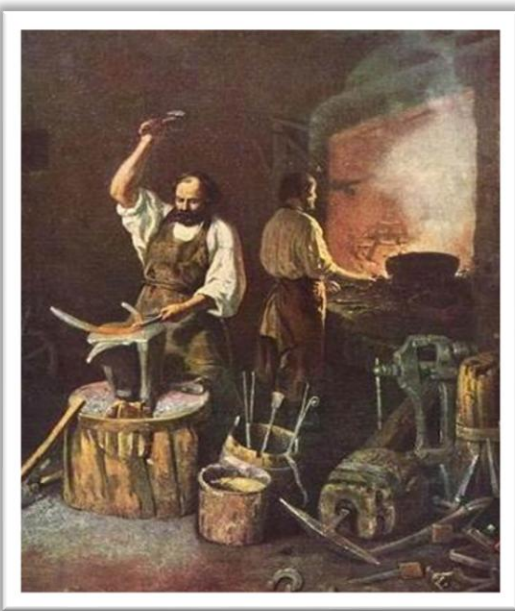
Πηγή:

<https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Φαῦν:Schmidt-1568.png>

Η επανάσταση αυτή, που σχετιζόταν άμεσα με την μεταλλουργία, σηματοδοτήθηκε κατά την μετάβαση του πολιτισμού στην Εποχή του Χαλκού, το 1200-500 π.Χ., όπου ο άνθρωπος κατάφερε και ανέπτυξε τεχνικές επεξεργασίας του σιδήρου από τα διάφορα μεταλλεύματά του, ύστερα από χρήση αναγωγικών φούρνων. Ο σίδηρος είχε τότε το σημαντικό το πλεονέκτημα ότι ήταν πιο άφθονος από τον χαλκό και παρείχε μεγαλύτερη αντοχή στα εργαλεία και στα όπλα. Η βελτίωση των τεχνικών κατεργασίας, όπως η διαδικασία θερμικής σκλήρυνσης, οδήγησε στη δημιουργία ατσάλινων κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αρχαιότητα από

τους Ρωμαίους και τους Κινέζους για την κατασκευή εργαλείων, όπλων και κατασκευών (Findlay, 2010).

Με την πάροδο των αιώνων, η μεταλλουργία τελικά εξελίχθηκε, και κατά την περίοδο της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας παρατηρείται σημαντική πρόοδος στη χρήση κραμάτων, όπως ο ορείχαλκος (κράμα χαλκού και ψευδαργύρου), ο μπρούτζος (λευκός και μολυβδούχος) και ο μόλυβδος. Το Μεσαίωνα, οι Ευρωπαίοι μεταλλουργοί βελτίωσαν περαιτέρω τις τεχνικές τους, χρησιμοποιώντας καμίνια υψηλής θερμοκρασίας για την κατεργασία του σιδήρου και του ατσάλιου. Η ανακάλυψη του χάλυβα ως ενός ανθεκτικού κράματος σιδήρου αποτέλεσε ορόσημο στην ιστορία της μεταλλουργίας και επηρέασε καθοριστικά την εξέλιξη των μηχανικών συστημάτων (Cahn, 1994).



Εικόνα 2. Η Μεταλλουργία στην Βιομηχανική Επανάσταση. Πηγή: <https://vlkz.com.ua/?p=306>

μεταλλικών στοιχείων ήταν αναγκαία (Cahn, 1994).

Στη σύγχρονη εποχή, η μεταλλουργία έχει εξελιχθεί σε μια επιστήμη που βασίζεται στη φυσική, τη χημεία και τη μηχανική, με τη χρήση προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας, όπως η νανοτεχνολογία και η μεταλλουργία πλάσματος. Οι εφαρμογές της εκτείνονται σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της αεροναυπηγικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των σιδηροδρομικών μεταφορών, όπου οι ειδικά σχεδιασμένες μεταλλικές δομές προσφέρουν αυξημένη αντοχή, ελαφρότητα και βελτιωμένη απόδοση (Θεοδωρόπουλος, 2013).

Σχετικά με το πλαίσιο της μεταλλουργικής εξέλιξης, τα ελατήρια αποτελούν ένα σημαντικό κεφάλαιο στη μηχανική σχεδίαση και στη βιομηχανική παραγωγή. Οι πρώτες μορφές

ελατηρίων εμφανίστηκαν στην Αρχαία Ελλάδα και τη Ρώμη, κυρίως με τη μορφή τόξων και άλλων όπλων που βασίζονταν στην αποθήκευση δυναμικής ενέργειας. Ωστόσο, η σύγχρονη χρήση ελατηρίων απογειώθηκε με την έλευση της βιομηχανικής επανάστασης, όταν οι βιομηχανικές εφαρμογές άρχισαν να απαιτούν μηχανικά συστήματα απορρόφησης κραδασμών, αποθήκευσης ενέργειας και διατήρησης σταθερότητας (Οικονόμου, 2021).

Τα ελατήρια κατασκευάζονται κυρίως από χάλυβα υψηλής αντοχής και προσφέρουν ελαστικότητα και ανθεκτικότητα σε συστήματα που δέχονται συνεχή μηχανική φόρτιση. Οι ιδιότητές τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά του υλικού, όπως η δομή των κρυστάλλων, οι αντοχές σε εφελκυσμό και θλίψη, καθώς και η ανθεκτικότητα στη θερμική καταπόνηση. Ειδικότερα στον τομέα των σιδηροδρόμων, τα ελατήρια παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απορρόφηση κραδασμών και τη διατήρηση της σταθερότητας των συστημάτων ανάρτησης (Fray, 2000).



Εικόνα 3. Ελατήρια Χάλυβα σε Αμαξοστοιχία Τραίνου.
Πηγή: <https://depositphotos.com/gr/photos/rail-freight-wheels.html>

ελατηρίων στη φθορά και την κόπωση (Λαμπρόπουλος, 2017).

Τέλος, η ανάπτυξη τεχνολογιών παρακολούθησης και μέτρησης έχει ανοίξει νέους δρόμους για τη βελτίωση της αντοχής και της απόδοσης των μεταλλικών στοιχείων, ειδικά στις εφαρμογές που αφορούν τη βαριά βιομηχανία και τις μεταφορές. Οι σύγχρονοι αισθητήρες και τα συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο επιτρέπουν την ακριβή ανάλυση της φθοράς και της κόπωσης των ελατηρίων, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για την εφαρμογή στρατηγικών προληπτικής συντήρησης (predictive maintenance) και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής των κρίσιμων εξαρτημάτων (Λαμπρόπουλος, 2017).

Στο πέρασμα των χρόνων, η τεχνολογία των ελατηρίων εξελίχθηκε σημαντικά. Στην σημερινή εποχή χρησιμοποιούνται προηγμένα κράματα, όπως οι χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, τα οποία προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή και διάρκεια ζωής. Επιπλέον, οι νέες τεχνολογίες παραγωγής, όπως η θερμική κατεργασία, οι επιφανειακές επεξεργασίες και οι επικαλύψεις, έχουν βελτιώσει σημαντικά την ανθεκτικότητα των

2.2 Τύποι Μεταλλουργίας



Εικόνα 4. Τύποι Μεταλλουργίας Γενικά.
Πηγή: <https://byjus.com/chemistry/processes-of-metallurgy/>

Η μεταλλουργία αποτελεί έναν κλάδο της επιστήμης των υλικών που ασχολείται με την παραγωγή μετάλλων και κραμάτων από μεταλλεύματα ή άλλες πρώτες ύλες, καθώς και με την επεξεργασία τους για την τροποποίηση των ιδιοτήτων τους. Ανάλογα με το αντικείμενο μελέτης, η μεταλλουργία διακρίνεται σε εξαγωγική μεταλλουργία και φυσική μεταλλουργία.

Η εξαγωγική μεταλλουργία επικεντρώνεται στις μεθόδους εξαγωγής μετάλλων από τα μεταλλεύματα. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη θραύση και άλεση των μεταλλευμάτων, τον εμπλουτισμό τους μέσω φυσικών ή χημικών διεργασιών, και τελικά την ανάκτηση των μετάλλων μέσω πυρομεταλλουργικών ή υδρομεταλλουργικών τεχνικών. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τη φύση του μεταλλεύματος και τις ιδιότητες του μετάλλου που πρόκειται να εξαχθεί (Δημητρίου, 2008).

Η φυσική μεταλλουργία, γνωστή και ως μεταλλογνωσία, ασχολείται με τη μελέτη της μικροδομής των μετάλλων και των κραμάτων, καθώς και με τις μεθόδους βελτίωσης των μηχανικών τους ιδιοτήτων μέσω θερμικών και μηχανικών κατεργασιών. Αυτές οι κατεργασίες περιλαμβάνουν διαδικασίες όπως η ανόπτηση, η βαφή και η σκλήρυνση, οι οποίες στοχεύουν στη βελτίωση της αντοχής, της σκληρότητας και της ανθεκτικότητας των υλικών (Ζαφειρόπουλος, 2011).

Εκτός από τα σιδηρούχα μέταλλα, όπως ο χάλυβας και ο χυτοσίδηρος, η μεταλλουργία ασχολείται και με τα μη σιδηρούχα μέταλλα, όπως ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος και το νικέλιο. Αυτά τα μέταλλα έχουν ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τομείς λόγω των μοναδικών

τους ιδιοτήτων, όπως η υψηλή αγωγιμότητα του χαλκού ή η χαμηλή πυκνότητα του αλουμινίου. Η παραγωγή τους περιλαμβάνει εξειδικευμένες μεθόδους εξαγωγής και επεξεργασίας, προσαρμοσμένες στις ιδιαίτερες χημικές και φυσικές τους ιδιότητες (Ζαφειρόπουλος, 2011).

Στην εποχή που διανύουμε μέχρι και σήμερα, σε έναν πιο σύγχρονο και εξελισσόμενο κόσμο, ο κλάδος αυτός μοιάζει να έρχεται αντιμέτωπος με νέες, καινοτόμες προκλήσεις που σχετίζονται με την αειφορία και την περιβαλλοντική ευθύνη. Η ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων εξαγωγής και επεξεργασίας μετάλλων, η ανακύκλωση μεταλλικών υλικών και η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στις μεταλλουργικές διεργασίες αποτελούν βασικούς στόχους της σύγχρονης έρευνας στον τομέα (Σαμαράς, 2024).

2.3. Μεταλλουργικά Υλικά και Εφαρμογές

Τα μεταλλουργικά υλικά αποτελούν το θεμέλιο της σύγχρονης βιομηχανικής ανάπτυξης, έχοντας καίριο ρόλο σε ένα πλήθος εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων και των σιδηροδρομικών αναρτήσεων. Ο ρόλος τους στην παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής αντοχής είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς απαιτούνται συγκεκριμένες μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των σιδηροδρόμων. Επιπλέον, η χρήση κατάλληλων υλικών μειώνει τις ανάγκες συντήρησης, αυξάνει την ανθεκτικότητα στην κόπωση και τη φθορά και βελτιώνει τη συνολική διάρκεια ζωής των συστημάτων αυτών (Βασιλείου, 2010).

Οι κυριότερες κατηγορίες μεταλλουργικών υλικών διακρίνονται σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν υλικά που περιέχουν σίδηρο ως βασικό συστατικό. Ο χυτοσίδηρος, για παράδειγμα, διακρίνεται για την υψηλή αντοχή του στη θλίψη, αν και παρουσιάζει περιορισμένη αντοχή στην εφελκυστική κόπωση, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε συμπιεστικές δυνάμεις. Ο χάλυβας, από την άλλη πλευρά, αποτελεί ένα κράμα σιδήρου και άνθρακα, που συνδυάζει υψηλή αντοχή, ευκαμψία και αυξημένη ανθεκτικότητα στην κόπωση, καθιστώντας τον ιδανικό για κατασκευές που υπόκεινται σε συνεχή φορτία και έντονη μηχανική καταπόνηση (Ζαφειρόπουλος, 2011).

Στη δεύτερη κατηγορία, τα μη σιδηρούχα μέταλλα, περιλαμβάνονται υλικά που δεν περιέχουν σίδηρο ως κύριο συστατικό. Το αλουμίνιο, για παράδειγμα, χαρακτηρίζεται από το χαμηλό βάρος και την εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές

που απαιτούν αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Ο χαλκός προσφέρει εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα και χρησιμοποιείται κυρίως σε εξαρτήματα που απαιτούν υψηλή θερμική αντοχή, ενώ το νικέλιο παρουσιάζει ανθεκτικότητα στη διάβρωση και σε υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας το ιδανικό για περιβάλλοντα με έντονες θερμικές καταπονήσεις (Νικολαΐδης, 2019).

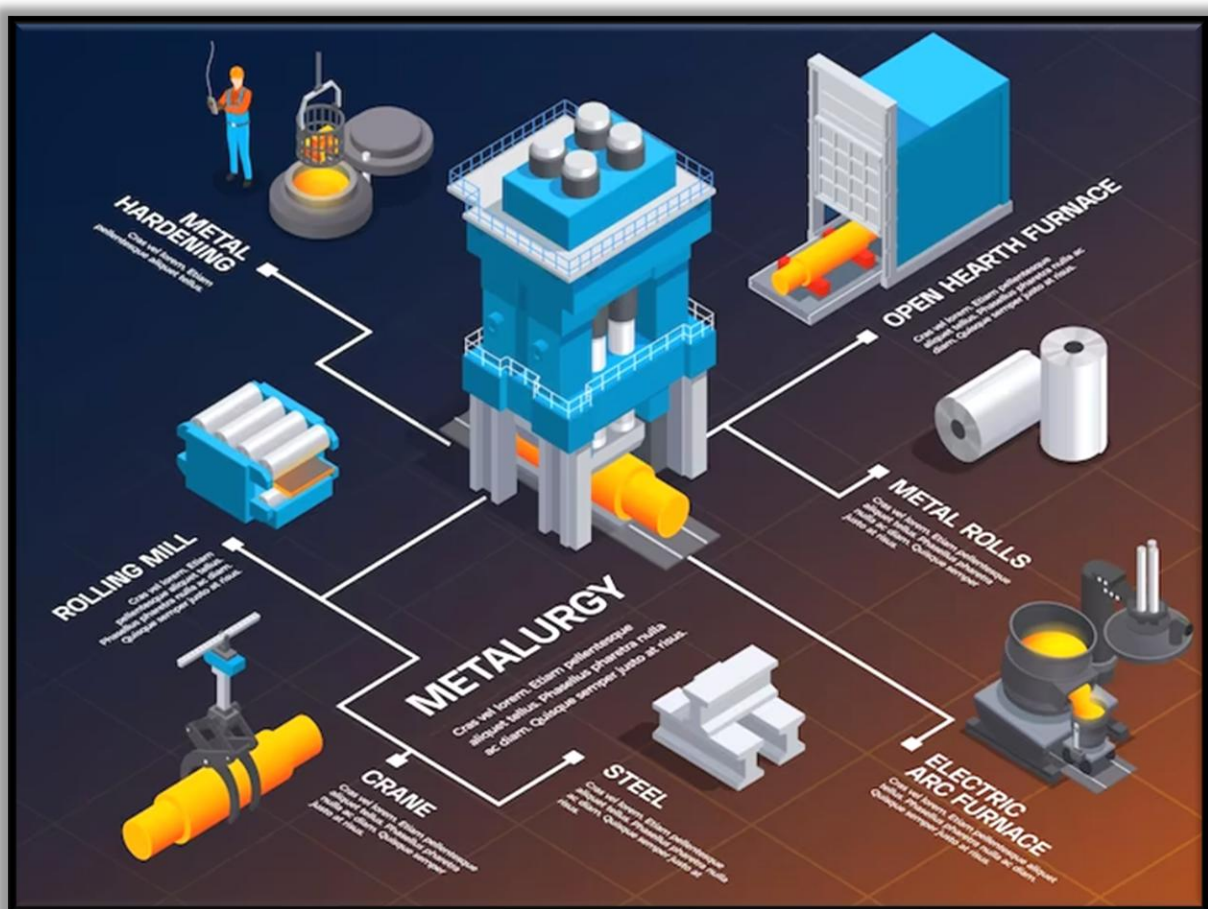
Οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των υλικών καθορίζουν τη συμπεριφορά τους όταν υποβάλλονται σε διάφορες συνθήκες φόρτισης και καταπόνησης. Οι σημαντικότερες από αυτές περιλαμβάνουν την αντοχή σε θλίψη, η οποία περιγράφει την ικανότητα του υλικού να αντέχει συμπιεστικές δυνάμεις, καθώς και την αντοχή σε εφελκυσμό, η οποία ορίζει τη μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει το υλικό πριν σπάσει υπό δύναμη που το επιμηκύνει. Επιπλέον, η σκληρότητα, που εκφράζει την αντίσταση του υλικού στη διείδυση ή στη φθορά, και η ελαστικότητα, που αναφέρεται στην ικανότητά του να επανέρχεται στην αρχική του μορφή μετά την άρση της δύναμης, αποτελούν κρίσιμες ιδιότητες για τη μακροχρόνια αντοχή των εξαρτημάτων (Ηλιόπουλος, 2009).

Πέραν των μηχανικών, οι χημικές ιδιότητες των μετάλλων είναι εξίσου κρίσιμες για την αντοχή τους με την πάροδο του χρόνου. Η αντοχή στη διάβρωση και η ανθεκτικότητα στην οξείδωση εξασφαλίζουν τη μακροχρόνια απόδοση των μεταλλικών στοιχείων, ιδιαίτερα σε υγρά ή χημικά επιθετικά περιβάλλοντα. Η αντοχή στα χημικά εξασφαλίζει ότι το υλικό δεν θα υποστεί δομικές αλλοιώσεις όταν έρθει σε επαφή με όξινα ή αλκαλικά μέσα, ένα χαρακτηριστικό ιδιαίτερα σημαντικό για τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε σιδηροδρομικά συστήματα (Νικολαΐδης, 2019).

Οι εφαρμογές των μεταλλουργικών υλικών στις σιδηροδρομικές αναρτήσεις είναι πολυδιάστατες. Τα ελατήρια, για παράδειγμα, κατασκευάζονται από ανθεκτικά κράματα χάλυβα και πρέπει να αντέχουν συνεχείς μηχανικές φορτίσεις, ενώ διατηρούν τις ιδιότητές τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τα αμορτισέρ, που αποτελούν βασικά συστήματα απόσβεσης κραδασμών, ενσωματώνουν μεταλλικά στοιχεία σε συνδυασμό με υδραυλικά συστήματα για τη μείωση των δονήσεων. Επιπλέον, οι άξονες και οι συνδέσεις, κατασκευασμένοι από ισχυρά κράματα, παρέχουν μηχανική αντοχή και προστασία από τη φθορά που προκαλείται από τις δυνάμεις τριβής (Ιωαννίδης, 2016).

Στη σύγχρονη εποχή, η σιδηροδρομική βιομηχανία προσανατολίζεται όλο και περισσότερο στην ανάπτυξη και χρήση προηγμένων κραμάτων που προσφέρουν υψηλή αντοχή με μειωμένο βάρος. Η νανοτεχνολογία έχει ανοίξει νέους δρόμους, εισάγοντας ενισχυμένα νανοσωματίδια που αυξάνουν την αντοχή των υλικών στη φθορά. Παράλληλα, η χρήση σύνθετων κραμάτων με στοιχεία όπως το τιτάνιο προσφέρει αυξημένη αντοχή στη διάβρωση και στις υψηλές θερμοκρασίες. Οι επεξεργασίες επιφανειών, όπως η ανόπτηση ή οι επιστρώσεις σκληρού άνθρακα, επιμηκύνουν τον χρόνο ζωής των εξαρτημάτων, καθιστώντας τις σιδηροδρομικές αναρτήσεις ανθεκτικές σε ακραίες συνθήκες χρήσης (Καραγιάννης, 2014).

Αυτό το πλέγμα φυσικών, χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών διαμορφώνει το ιδανικό υπόβαθρο για τη χρήση μεταλλουργικών υλικών στις σύγχρονες σιδηροδρομικές εφαρμογές. Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε σε μια αναλυτική διερεύνηση του φαινομένου της κόπωσης των μεταλλικών υλικών, με επίκεντρο τις επιπτώσεις τους στις αναρτήσεις και τα συστήματα του τροχαίου υλικού.



Εικόνα 5. Στάδια Εφαρμογής και Επεξεργασίας Μετάλλων.

Πηγή: <https://www.linkedin.com/pulse/metallurgy-nanotechnology-powerful-partnership-sabhavath-jaipal-cm4ff>

2.4 Τύποι και Ιδιότητες Μετάλλων ως Τροχαίο Υλικό

Στον κλάδο των σιδηροδρομικών μεταφορών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η επιλογή των κατάλληλων μετάλλων είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια, την αντοχή και την αποδοτικότητα του τροχαίου υλικού. Τα βασικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τον χάλυβα, τα κράματα αλουμινίου και σε ειδικές περιπτώσεις, τα κράματα τιτανίου και τον χυτοσίδηρο.

Ο χάλυβας αποτελεί ένα από τα κυρίαρχα μέταλλα στις σιδηροδρομικές εφαρμογές λόγω της εξαιρετικής μηχανικής αντοχής και της ανθεκτικότητάς του στη φθορά. Χρησιμοποιείται ευρέως στις ράγες, στους τροχούς, στις αμαξοστοιχίες και στα συστήματα ανάρτησης των βαγονιών. Ο υψηλής αντοχής χάλυβας, από την άλλη, περιλαμβάνει μικροκρυστατωμένα κράματα, τα οποία περιέχουν στοιχεία όπως το νικέλιο, το μολυβδαίνιο και το βανάδιο, προσφέροντας αυξημένη ανθεκτικότητα στην κόπωση και τις υψηλές καταπονήσεις που υφίστανται οι σιδηροδρομικές δομές. Τα υψηλά επίπεδα ελαστικότητας, επίσης, που προσδίδουν στον χάλυβα τα στοιχεία αυτά, είναι ικανά να προσδώσουν επιπλέον αντοχή στα κατασκευαστικά υλικά των τρένων έναντι των δυναμικών φορτίσεων που υφίστανται κατά την κίνηση αυτών. Τέλος, παρουσιάζει κατάλληλο λόγο Poisson, όριο διαρροής και όριο θραύσης, χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην ανθεκτικότητά του υπό συνθήκες έντονης καταπόνησης (Γεωργίου, 2012).



Εικόνα 6. Χαλύβδινες Ράγες Σιδηροδρομικού Δικτύου.

Πηγή: <http://www.railway-fasteners.com/news/steel-rails-for-sale.html>

Η σωστή επιλογή του κατάλληλου τύπου χάλυβα για το τροχαίο υλικό είναι ζωτικής σημασίας, καθώς επηρεάζει καθοριστικά τόσο την απόδοση όσο και την ασφάλεια των σιδηροδρομικών συστημάτων. Οι ιδιότητες του υλικού αυτού, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη, η σκληρότητα και η ανθεκτικότητα στη φθορά, καθορίζουν την ικανότητά του να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της σιδηροδρομικής βιομηχανίας (Ελευθεριάδης, 2015).

Τα κράματα αλουμινίου είναι επίσης ένα σημαντικό μέρος τροχαίου υλικού. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε ελαφριές κατασκευές, όπως τα αμαξώματα των επιβατικών βαγονιών και των τρένων υψηλής ταχύτητας. Η χαμηλή πυκνότητα του αλουμινίου επιτρέπει τη μείωση του συνολικού βάρους των αμαξοστοιχιών, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση και μειώνοντας τη φθορά των τροχών και των ραγών. Επιπλέον, το αλουμίνιο παρουσιάζει υψηλή αντοχή στη διάβρωση, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ακραία κλιματολογικά περιβάλλοντα (Μακρής, 2018).

Γενικότερα έχουν καθιερωθεί ως βασικά υλικά στην κατασκευή τροχαίου υλικού, όπως σιδηροδρομικά οχήματα, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους. Η προσθήκη στοιχείων όπως χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο και ψευδάργυρος στο αλουμίνιο οδηγεί στη δημιουργία κραμάτων με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, καθιστώντας τα κατάλληλα για απαιτητικές εφαρμογές.



Εικόνα 7. Σκελετός Βαγονιού από Κράματα Αλουμινίου.
Πηγή: <https://www.intechopen.com/chapters/75650>

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των κραμάτων αλουμινίου είναι η υψηλή αντοχή σε συνδυασμό με το χαμηλό βάρος. Αυτή η ιδιότητα συμβάλλει στη μείωση του συνολικού βάρους των οχημάτων, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση και μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον, τα κράματα αλουμινίου παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, γεγονός που αυξάνει τη διάρκεια ζωής των κατασκευών και μειώνει τις ανάγκες συντήρησης (Ξανθόπουλος, 2020).

Συγκεκριμένα, τα κράματα της σειράς 6000, όπως το 6061, περιέχουν μαγνήσιο και πυρίτιο, προσφέροντας καλές μηχανικές ιδιότητες και δυνατότητα θερμικής κατεργασίας. Αυτά τα κράματα χρησιμοποιούνται ευρέως σε δομικές εφαρμογές λόγω της ισορροπίας μεταξύ αντοχής, κατεργασιμότητας και αντοχής στη διάβρωση. Επιπλέον, τα κράματα της σειράς 7000, με κύριο στοιχείο τον ψευδάργυρο, όπως το 7075, προσφέρουν ακόμη υψηλότερες μηχανικές αντοχές, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται μέγιστη αντοχή, όπως σε ορισμένα εξαρτήματα σιδηροδρομικών οχημάτων. Η δυνατότητα των κραμάτων αλουμινίου, από την άλλη, να υποβάλλονται σε διάφορες μορφές κατεργασίας, όπως η διέλαση και η χύτευση, επιτρέπει την κατασκευή σύνθετων γεωμετριών που ανταποκρίνονται στις ειδικές απαιτήσεις του τροχαίου υλικού. Η ανακυκλωσιμότητα του αλουμινίου, επιπροσθέτως, συμβάλλει στη βιωσιμότητα, καθιστώντας το μια περιβαλλοντικά φιλική επιλογή για τη βιομηχανία μεταφορών (Ράπτης, 2023).



Εικόνα 8. Δισκόφρενα Αμαξοστοιχίας από Χυτοσίδηρο.
Πηγή: <https://www.istockphoto.com/search/2/image-film?phrase=train+brakes>

βρίσκονται σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα (Παπαδόπουλος, 2022).

Μία από τις κύριες ιδιότητες του χυτοσιδήρου είναι η αντοχή του σε εφελκυσμό, η οποία είναι σημαντική για τη χρήση του σε εφαρμογές όπου το υλικό υπόκειται σε τάσεις έλξης. Επιπλέον,

Ο χυτοσίδηρος, γνωστός και ως μαντέμι, είναι ένα κράμα σιδήρου με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, το οποίο χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων του. Στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών, ο χυτοσίδηρος έχει βρει εφαρμογή σε εξαρτήματα όπως οι δίσκοι φρένων και ορισμένα άλλα, δομικά, μέρη των αμαξοστοιχιών, όπου η θερμική αγωγιμότητα και η αντοχή στη φθορά

η σκληρότητα του χυτοσιδήρου τον καθιστά κατάλληλο για εξαρτήματα που απαιτούν αντοχή στη φθορά, όπως οι δίσκοι φρένων των τρένων.

Παρά τα πλεονεκτήματά του, ο χυτοσίδηρος παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως η ευθραυστότητά του, η οποία μπορεί να περιορίσει τη χρήση του σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε κρούση. Ωστόσο, με την ανάπτυξη νέων κραμάτων και τη βελτίωση των μεθόδων παραγωγής, ο χυτοσίδηρος συνεχίζει να αποτελεί σημαντικό υλικό στη βιομηχανία των σιδηροδρομικών μεταφορών (Σχοινάς, 2019).

Τα κράματα τιτανίου αποτελούν ένα επίσης αναπόφευκτο υλικό του τομέα αυτού. Ως υλικά φαίνεται πως έχουν αναδειχθεί για την υψηλή απόδοσή τους σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένου και του τροχαίου υλικού. Η αξιοποίησή τους σε σιδηροδρομικά οχήματα οφείλεται στις εξαιρετικές ιδιότητές τους, όπως η υψηλή ειδική αντοχή και η αντοχή στη διάβρωση (Τζανής, 2024).



Εικόνα 9. Συστήματα Ανάρτησης και Τροχών από Κράματα Τιτανίου. Πηγή: <https://investacast.com/news/why-use-nickel-base-superalloys/>

Η υψηλή ειδική αντοχή των υλικών αυτών, δηλαδή ο λόγος αντοχής προς βάρος, τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές όπου η μείωση του βάρους είναι κρίσιμη χωρίς να θυσιάζεται η αντοχή. Αυτή η ιδιότητα συμβάλλει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των σιδηροδρομικών οχημάτων, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων (Νικολαΐδης, 2019).

Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία ή παρουσία χημικών ουσιών. Αυτή η αντοχή στη διάβρωση μειώνει τις ανάγκες συντήρησης και αυξάνει τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων, καθιστώντας τα οικονομικά αποδοτικά μακροπρόθεσμα (Νικολαΐδης, 2019).

Πέραν των θετικών επιδράσεων, η χρήση των κραμάτων τιτανίου στο τροχαίο υλικό παρουσιάζεται περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής και κατεργασίας τους. Ωστόσο, σε εφαρμογές όπου η απόδοση και η ανθεκτικότητα είναι πρωταρχικής σημασίας, τα κράματα τιτανίου αποτελούν εξαιρετική επιλογή. Η ευρεία χρήση του μπορεί να μειώσει το βάρος των οχημάτων, να αυξήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα και να μειώσει τις απαιτήσεις συντήρησης (Σχοινάς, 2019).

Κλείνοντας το κομμάτι του κεφαλαίου αυτού, εκτός από τον χάλυβα και το αλουμίνιο, νέοι τύποι υλικών μοιάζει να ενσωματώνονται τα τελευταία χρόνια στη βιομηχανία των σιδηροδρομικών μεταφορών, με αξιόλογη εφαρμογή. Τα υπερκράματα Νικελίου για παράδειγμα αποτελούν υλικό που χρησιμοποιείται σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών λόγω της εξαιρετικής αντοχής του στη θερμική κόπωση, ενώ το μέταλλο «Βηρύλλιο – Χάλυβας», συνδυάζει με μεγάλη επιτυχία την αντοχή του χάλυβα με την εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα του βηρυλλίου, βελτιώνοντας την αντοχή σε υψηλές ταχύτητες (Σχοινιάς, 2019).



Εικόνα 10. Σημαντικότητα της προσεκτικής Επιλογής των Υλικών.
Πηγή: <https://www.redbubble.com/i/sticker/Train-Emoji-by-HippoEmo/28808693.EJUG5>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΟΠΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΕΣ

ΑΝΑΡΤΗΣΕΙΣ

Η κόπωση των μεταλλικών υλικών αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο που έχει μελετηθεί διεξοδικά στον τομέα της μηχανολογίας. Στον τομέα των σιδηροδρομικών συστημάτων, η κατανόηση της κόπωσης είναι κρίσιμη, καθώς το τροχαίο υλικό εκτίθεται σε επαναλαμβανόμενα μηχανικά φορτία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Αυτά τα φορτία, παρόλο που δεν είναι πάντα αρκετά υψηλά ώστε να προκαλέσουν άμεση θραύση, με την πάροδο του χρόνου προκαλούν συσσωρευτική φθορά στα μεταλλικά εξαρτήματα, με σοβαρές επιπτώσεις στη δομική ακεραιότητα και την ασφάλεια του συστήματος.

3.1 Η Έννοια της Κόπωσης των Μεταλλικών Στοιχείων



Εικόνα 11. Αποτέλεσμα Κόπωσης Μεταλλικών Στοιχείων
Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Fracture-of-train-wreck-due-to-metal-fatigue-failure-of-rail-from-Wikipedia_fia75_312022469

Η κόπωση είναι το αποτέλεσμα της σταδιακής φθοράς ενός υλικού όταν αυτό υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις. Αυτές οι φορτίσεις προκαλούν μικρορωγμές στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό της μεταλλικής δομής, οι οποίες διευρύνονται με τον χρόνο μέχρι να οδηγήσουν σε ολική αστοχία. Το φαινόμενο μπορεί να εκδηλωθεί ακόμα και όταν η τάση που εφαρμόζεται στο υλικό είναι σημαντικά μικρότερη από την αντοχή θραύσης του. Αυτό καθιστά την κόπωση έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη διάρκεια ζωής ενός μεταλλικού εξαρτήματος (Anderson, 1995).

Η κόπωση μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες, όπως η ποιότητα της επιφάνειας, οι δομικές ατέλειες, η θερμοκρασία λειτουργίας και η συχνότητα των κυκλικών φορτίσεων. Στα σιδηροδρομικά συστήματα, οι δονήσεις που προκαλούνται από την επαφή των τροχών με τις σιδηροτροχιές, οι αλλαγές στο φορτίο κατά τη διάρκεια της διαδρομής και οι θερμικές διακυμάνσεις αποτελούν παράγοντες που επιταχύνουν την κόπωση. Ως εκ τούτου, ο

εντοπισμός των πρώιμων ενδείξεων φθοράς είναι κρίσιμος για την πρόληψη δυσλειτουργιών (Smith, 1970).

Επιπλέον, η κόπωση δεν εξελίσσεται με γραμμικό τρόπο. Στα αρχικά στάδια, η φθορά εξελίσσεται αργά και οι μικρορωγμές είναι συχνά δύσκολο να ανιχνευθούν με γυμνό μάτι ή ακόμα και με συμβατικές μεθόδους επιθεώρησης. Ωστόσο, όσο οι κύκλοι φόρτισης συνεχίζονται, η ταχύτητα ανάπτυξης των ρωγμών αυξάνεται εκθετικά, με αποτέλεσμα την τελική αστοχία του εξαρτήματος σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η κατανόηση αυτής της δυναμικής είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό στρατηγικών προληπτικής συντήρησης (Fuchs & Stephens, 1980).

Τέλος, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις σιδηροδρομικές αναρτήσεις επιλέγονται με βάση την αντοχή τους στην κόπωση. Κράματα χάλυβα με βελτιωμένα χαρακτηριστικά, όπως αυξημένη αντοχή και σκληρότητα, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ελατηρίων, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μειώνοντας τις απαιτήσεις για συντήρηση. Παρ' όλα αυτά, ακόμα και τα πιο ανθεκτικά κράματα υπόκεινται τελικά σε κόπωση, καθιστώντας την παρακολούθηση της κατάστασής τους απαραίτητη (Bannantine et al., 1990).

3.2 Διαδικασία της Κόπωσης των Μεταλλικών Στοιχείων

Οι μηχανισμοί της κόπωσης περιλαμβάνουν μικροσκοπικές μεταβολές στη δομή του υλικού, οι οποίες εξελίσσονται σταδιακά μέχρι να οδηγήσουν σε αστοχία. Στην αρχική φάση, παρατηρούνται μικρορωγμές στην επιφάνεια του υλικού, κυρίως σε σημεία όπου συγκεντρώνεται υψηλή τοπική τάση, όπως γωνίες, εσοχές ή περιοχές με ατέλειες. Οι ρωγμές αυτές μπορεί να είναι αόρατες ακόμα και με ειδικές τεχνικές ανίχνευσης (Gere & Timoshenko, 1999).

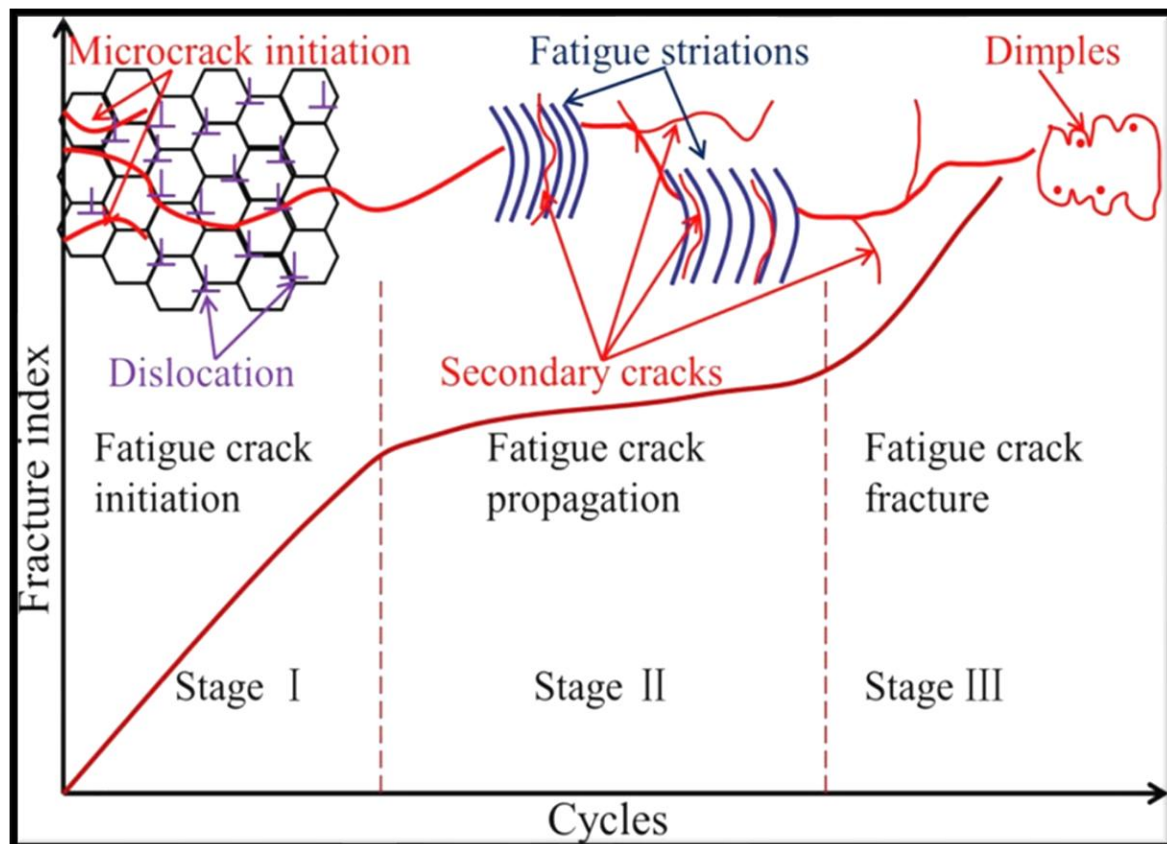
Καθώς η καταπόνηση συνεχίζεται, οι μικρορωγμές αρχίζουν να συνενώνονται, δημιουργώντας μεγαλύτερα ρήγματα που επεκτείνονται στο εσωτερικό του υλικού. Αυτό το στάδιο ονομάζεται φάση ανάπτυξης των ρωγμών, όπου η φθορά γίνεται σταδιακά εμφανής και επηρεάζει την αντοχή του εξαρτήματος. Η εξάπλωση των ρωγμών εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου, τον αριθμό των κύκλων φόρτισης και την ποιότητα του υλικού (Beden et al., 2009).

Στο τελικό στάδιο, οι ρωγμές φτάνουν σε κρίσιμο μέγεθος, με αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού, η οποία μπορεί να γίνει ξαφνικά και χωρίς προειδοποίηση. Σε σιδηροδρομικά

συστήματα, τέτοιες αστοχίες μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά ατυχήματα, καθιστώντας απαραίτητη την παρακολούθηση των εξαρτημάτων μέσω αισθητήρων και άλλων τεχνικών ανίχνευσης (Lee et al., 2005).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των φαινομένων κόπωσης είναι ότι αυτά ενδέχεται να επηρεαστούν από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Για παράδειγμα, η παρουσία υγρασίας ή διαβρωτικών ουσιών μπορεί να επιταχύνει τον ρυθμό εξάπλωσης των ρωγμών. Επομένως, η προστασία των μεταλλικών επιφανειών από εξωτερικές επιδράσεις είναι καθοριστική για την αύξηση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων (Vermes, 1973).

Επιπλέον, η γεωμετρία των εξαρτημάτων παίζει σημαντικό ρόλο στον ρυθμό εξέλιξης της κόπωσης. Εξαρτήματα με αιχμηρές γωνίες ή απότομες αλλαγές στην τομή τους τείνουν να συγκεντρώνουν υψηλότερες τάσεις, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο ανάπτυξης μικρορωγμών. Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των εξαρτημάτων μπορεί να περιορίσει την εμφάνιση τέτοιων κρίσιμων σημείων, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα αστοχίας (Μακρής, 2008).



Εικόνα 12. Διαδικασία Κόπωσης έως και την Θραύση.

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Three-stages-of-fatigue-failure_fig4_354425761

3.3. Σιδηροδρομικές Αναρτήσεις και η Σχέση τους με την Κόπωση

Οι σιδηροδρομικές αναρτήσεις διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία και την απόδοση των τρένων, καθώς επηρεάζουν άμεσα την άνεση των επιβατών, τη σταθερότητα του οχήματος και τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων. Βασικός τους στόχος είναι η απορρόφηση των κραδασμών και των δυνάμεων που μεταδίδονται από τις ράγες στο τροχαίο υλικό, διατηρώντας την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Η συνεχής έκθεση των εξαρτημάτων της ανάρτησης σε δυναμικά φορτία οδηγεί αναπόφευκτα σε φαινόμενα κόπωσης, τα οποία απαιτούν προσεκτική μελέτη και διαχείριση για την αποφυγή αστοχιών (Klingbeil, 2003).

Οι αναρτήσεις των σιδηροδρομικών οχημάτων αποτελούνται από δύο κύρια επίπεδα. Η πρωτεύουσα ανάρτηση βρίσκεται μεταξύ του άξονα και του πλαισίου των τροχών, μειώνοντας τους κραδασμούς που προκαλούνται από την ανομοιομορφία της τροχιάς. Αντίστοιχα, η δευτερεύουσα ανάρτηση παρεμβάλλεται μεταξύ του κύριου σώματος του συρμού και του πλαισίου των τροχών, εξασφαλίζοντας βελτιωμένη σταθερότητα και απορροφώντας δυνάμεις μεγαλύτερου εύρους, συμβάλλοντας σημαντικά στην άνεση των επιβατών. Ο συνδυασμός αυτών των δύο επιπέδων αναρτήσεων συμβάλλει στη συνολική απόδοση του οχήματος και στη μείωση των καταπονήσεων που υφίστανται τα εξαρτήματα (Budynas & Nisbett., 2011).

Το σύστημα ανάρτησης αποτελείται από πολλά κρίσιμα εξαρτήματα, καθένα από τα οποία επιτελεί συγκεκριμένη λειτουργία στη διαχείριση των φορτίων και των κραδασμών. Τα ελατήρια είναι το πιο βασικό στοιχείο, καθώς απορροφούν και διαχέουν τις κατακόρυφες φορτίσεις που δέχεται το τροχαίο υλικό. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ελατηρίων, με τα ελικοειδή να αποτελούν την πιο συνηθισμένη επιλογή λόγω της αντοχής τους και της ικανότητάς τους να επανακτούν το αρχικό τους σχήμα μετά από συμπίεση. Σε βαριές σιδηροδρομικές εφαρμογές συναντώνται επίσης φυλλοειδή ελατήρια, τα οποία κατασκευάζονται από στρώματα μεταλλικών φύλλων και διανέμουν ομοιόμορφα τα φορτία, καθώς και αεροελατήρια, που χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερη απορρόφηση κραδασμών και βελτίωση της οδηγικής άνεσης (Hertzberg, 1996).

Εκτός από τα ελατήρια, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα αμορτισέρ, τα οποία περιορίζουν τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και ελέγχουν την επαναφορά των ελατηρίων μετά από κάθε παραμόρφωση. Αυτά διακρίνονται σε υδραυλικά και ιξώδης αντίστασης, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε θερμική και μειώνουν τις διακυμάνσεις του συστήματος ανάρτησης. Τα υδραυλικά αμορτισέρ χρησιμοποιούν ρευστό

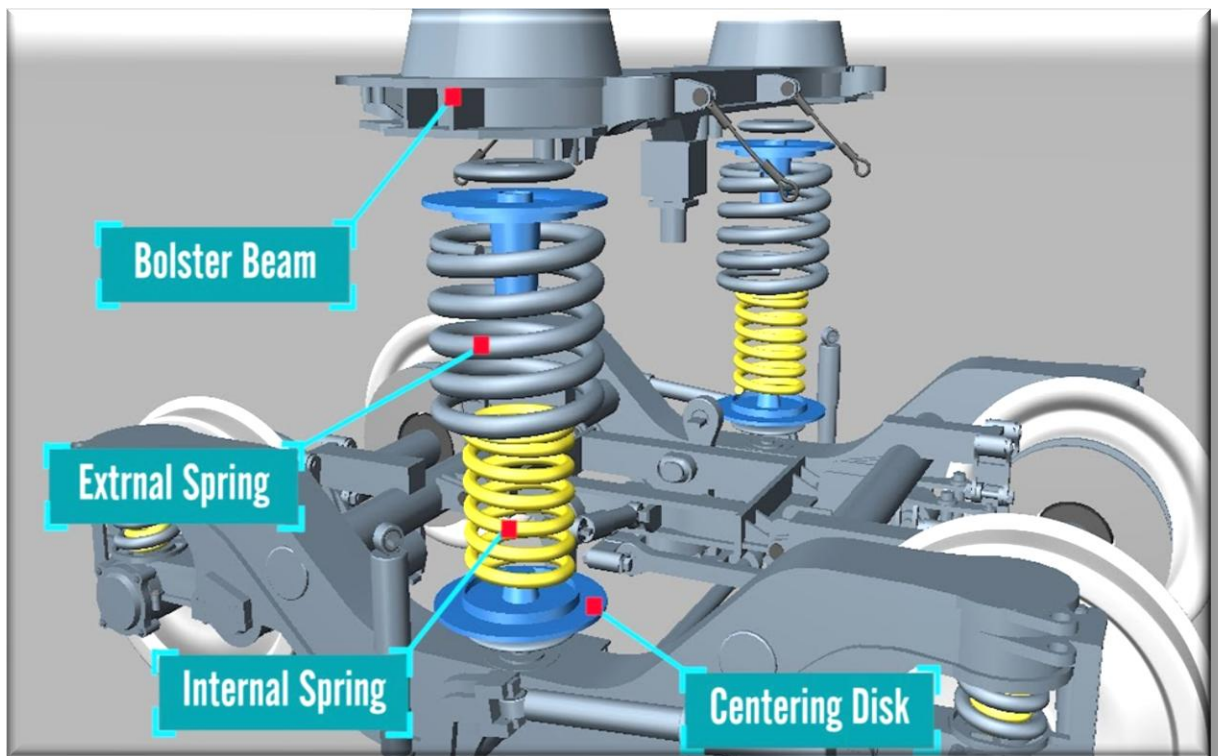
για να προσφέρουν αντίσταση στην κίνηση, ενώ τα ιξώδη αποσβεστήρια βασίζονται στη διαφυγή παχύρρευστων υλικών μέσα από ελεγχόμενα ανοίγματα για την απορρόφηση της ενέργειας. Συμπληρωματικά, τα ελαστικά στοιχεία απόσβεσης παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην εξασθένηση των κραδασμών, ενώ οι ράβδοι σταθεροποίησης και οι σύνδεσμοι ενισχύουν τη δομική ακεραιότητα του συστήματος και περιορίζουν τις πλευρικές κινήσεις του οχήματος (Μακρής, 2008).

Η λειτουργία του συστήματος ανάρτησης βασίζεται στη συνδυασμένη δράση όλων αυτών των εξαρτημάτων, ώστε να μειωθούν οι δυνάμεις που μεταφέρονται στο όχημα μέσω των τροχών. Η πρωτεύουσα ανάρτηση φιλτράρει τις αρχικές δονήσεις από την επαφή των τροχών με τις ράγες, ενώ η δευτερεύουσα ανάρτηση διαχειρίζεται τις μεταβολές στη δυναμική συμπεριφορά του συρμού, συμβάλλοντας στη συνολική σταθερότητα και την ομαλή κίνηση του οχήματος. Η απορρόφηση των φορτίων και η ελεγχόμενη διάχυση της ενέργειας καθιστούν την ανάρτηση ένα από τα πιο σημαντικά συστήματα για τη διατήρηση της απόδοσης και της ασφάλειας των σιδηροδρομικών μεταφορών (Klingbeil, 2003).

Η συνεχής έκθεση των μεταλλικών εξαρτημάτων της ανάρτησης σε δυναμικά φορτία και δονήσεις τα καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτα σε φαινόμενα κόπωσης. Τα ελατήρια, τα οποία φέρουν επαναλαμβανόμενες καταπονήσεις λόγω συμπίεσης και επαναφοράς, είναι από τα πιο επιρρεπή στοιχεία στην ανάπτυξη μικρορωγμών, που με την πάροδο του χρόνου μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρές αστοχίες. Ομοίως, τα αμορτισέρ και τα συνδετικά στοιχεία της ανάρτησης αντιμετωπίζουν σημαντικά φορτία, γεγονός που απαιτεί ειδική σχεδίαση και συνεχή παρακολούθηση για την αποτροπή βλαβών (Klingbeil, 2003).

Για την αντιμετώπιση της κόπωσης και την αύξηση της αντοχής των εξαρτημάτων της ανάρτησης, εφαρμόζονται προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας των υλικών, όπως η θερμική κατεργασία και η ενίσχυση των επιφανειακών στρώσεων μέσω shot peening. Παράλληλα, η εισαγωγή νέων συνθετικών υλικών και κράματων μετάλλων προσφέρει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, επιτρέποντας στα εξαρτήματα να αντέχουν μεγαλύτερες καταπονήσεις χωρίς απώλεια αντοχής. Επιπλέον, η χρήση σύγχρονων μεθόδων ανίχνευσης φθορών, όπως η υπερηχογραφία και η θερμογραφία, επιτρέπει την παρακολούθηση της κατάστασης των εξαρτημάτων σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας στην πρόληψη αστοχιών πριν αυτές εξελιχθούν σε σοβαρά προβλήματα (Μητρόπουλος, 2012).

Η κατανόηση της λειτουργίας των σιδηροδρομικών αναρτήσεων και των μηχανισμών κόπωσης που επηρεάζουν τα εξαρτήματά τους είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των συστημάτων αυτών. Η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνολογιών συμβάλλει στη δημιουργία πιο αποδοτικών και ανθεκτικών συστημάτων, τα οποία διασφαλίζουν τη μακροχρόνια λειτουργία και την ασφάλεια των σιδηροδρομικών μεταφορών. Σε αυτό το πλαίσιο, η ανάλυση της κόπωσης των ελατηρίων, η οποία ακολουθεί, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που πρέπει να εξεταστούν, προκειμένου να βελτιωθούν οι στρατηγικές συντήρησης και να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής των κρίσιμων εξαρτημάτων της ανάρτησης (Μακρής, 2008).



Εικόνα 13. Αναρτήσεις Αμαξοστοιχίας Τραίνου.

Πηγή: <https://www.youtube.com/watch?v=tiabje5LCWQ>

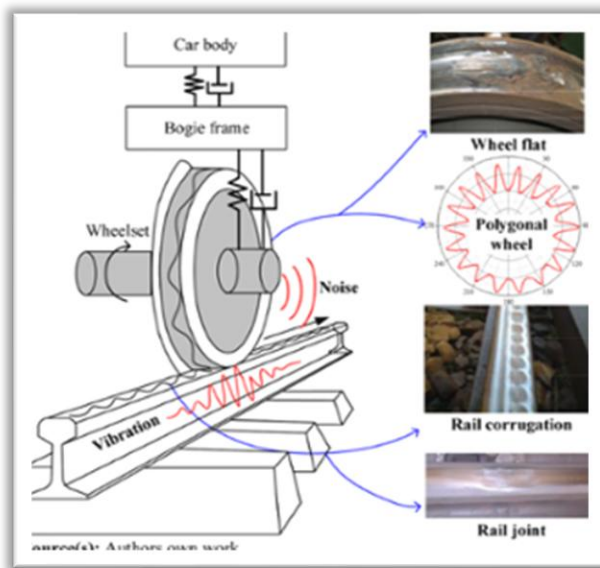


Εικόνα 14. Πλαϊνή Απεικόνιση Ανάρτησης Αμαξοστοιχίας.

Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bogie>

3.4 Επίδραση της Κόπωσης στα Ελατήρια

Τα ελατήρια είναι από τα πιο ευαίσθητα εξαρτήματα σε φαινόμενα κόπωσης, καθώς υπόκεινται σε συνεχή εναλλασσόμενη φόρτιση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, από τις αναρτήσεις των σιδηροδρομικών οχημάτων έως τις μηχανικές διατάξεις και τα βιομηχανικά μηχανήματα. Η συνεχιζόμενη έκθεση των ελατηρίων σε φορτία θλίψης και εφελκυσμού μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία ρωγμών κόπωσης, οι οποίες αρχικά είναι αόρατες αλλά με τον καιρό αναπτύσσονται σε κρίσιμα σημεία του υλικού (Dowling, 2007).



Εικόνα 15. Αποτελέσματα Κόπωσης. Πηγή: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/rs-12-2023-0048/full/html>

Η κόπωση των ελατηρίων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η γεωμετρία του ελατηρίου, το υλικό κατασκευής του, η επιφανειακή κατεργασία, καθώς και η ένταση και η συχνότητα των φορτίσεων. Τα ελατήρια που υποβάλλονται σε υψηλές ταχύτητες φόρτισης, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στις αναρτήσεις των σιδηροδρομικών αμαξοστοιχιών, είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε κόπωση λόγω των επαναλαμβανόμενων μηχανικών φορτίων που υφίστανται (Broek, 1982).

Μία από τις κύριες αιτίες αστοχίας των ελατηρίων λόγω κόπωσης είναι η συγκέντρωση τάσεων σε ορισμένα σημεία του ελατηρίου, ιδιαίτερα στις περιοχές των άκρων ή στις περιοχές όπου υπάρχει επαφή με άλλα εξαρτήματα. Οι ρωγμές συνήθως ξεκινούν από μικροατέλειες στην επιφάνεια του υλικού ή από ανωμαλίες στη δομή του. Για να μειωθεί η πιθανότητα κόπωσης, χρησιμοποιούνται τεχνικές επιφανειακής σκλήρυνσης, όπως η βαφή και η συμπίεση επιφανειών μέσω θερμικών ή μηχανικών διαδικασιών (Καρκάλου, 2019).

Ως φαινόμενο φαίνεται να αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των ελατηρίων. Τα ελατήρια, ως μηχανικά στοιχεία που υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες ή κυκλικές φορτίσεις, είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε φαινόμενα κόπωσης, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία ή θραύση.

Κατά τη λειτουργία των ελατηρίων, η συνεχής εφαρμογή φορτίων προκαλεί μικροσκοπικές παραμορφώσεις στο υλικό τους. Αυτές οι παραμορφώσεις, αν και αρχικά είναι ελαστικές και το ελατήριο επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα μετά την αφαίρεση του φορτίου, με την πάροδο του χρόνου μπορεί να εξελιχθούν σε πλαστικές. Η επαναλαμβανόμενη αυτή διαδικασία οδηγεί στη συσσώρευση ζημιών στο εσωτερικό της δομής του υλικού, δημιουργώντας μικρορωγμές. Οι μικρορωγμές αυτές, υπό συνεχιζόμενες κυκλικές φορτίσεις, μπορούν να αναπτυχθούν και να συνενωθούν, οδηγώντας τελικά σε μακροσκοπικές ρωγμές και, εν τέλει, σε θραύση του ελατηρίου (Callister, 2007).

Η αντοχή ενός ελατηρίου στην κόπωση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το υλικό κατασκευής, τη γεωμετρία του, την ποιότητα της επιφάνειας και τις συνθήκες λειτουργίας. Για παράδειγμα, τα ελατήρια που κατασκευάζονται από χάλυβα 51CrV4 παρουσιάζουν συγκεκριμένες ιδιότητες κόπωσης, οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν μέσω κατάλληλων θερμικών επεξεργασιών και επιφανειακών κατεργασιών, όπως το shot peening. Σύμφωνα με μελέτες, η εφαρμογή του shot peening σε ελατήρια από χάλυβα 51CrV4 μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αντοχή τους στην κόπωση, καθώς η διαδικασία αυτή εισάγει θλιπτικές παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια του υλικού, οι οποίες εμποδίζουν την έναρξη και την ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης (Παπαδόπουλος, 2015).

Επιπλέον, η γεωμετρία του ελατηρίου παίζει καθοριστικό ρόλο στην αντοχή του στην κόπωση. Σημεία με απότομες μεταβολές στη διατομή ή με αιχμηρές γωνίες λειτουργούν ως συγκεντρωτές τάσεων, όπου οι τοπικές τάσεις μπορεί να υπερβαίνουν κατά πολύ τις ονομαστικές, διευκολύνοντας την έναρξη ρωγμών. Η προσεκτική σχεδίαση και η αποφυγή τέτοιων γεωμετρικών ανωμαλιών μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της αντοχής στην κόπωση (Anderson, 2005).

Η ποιότητα της επιφάνειας του ελατηρίου είναι επίσης κρίσιμη. Επιφανειακές ατέλειες, όπως χαρακίες, μικρορωγμές ή εγκλείσματα, μπορούν να λειτουργήσουν ως εστίες έναρξης ρωγμών κόπωσης. Διαδικασίες όπως η λείανση, η στίλβωση ή το shot peening μπορούν να βελτιώσουν την επιφανειακή ποιότητα και, κατά συνέπεια, την αντοχή στην κόπωση.

Οι συνθήκες λειτουργίας, όπως το εύρος και η συχνότητα των εφαρμοζόμενων φορτίων, η θερμοκρασία και το περιβάλλον, επηρεάζουν επίσης την αντοχή στην κόπωση. Για παράδειγμα, η λειτουργία σε διαβρωτικά περιβάλλοντα μπορεί να επιταχύνει την ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης μέσω μηχανισμών όπως η διάβρωση-κόπωση. Η προστασία των ελατηρίων

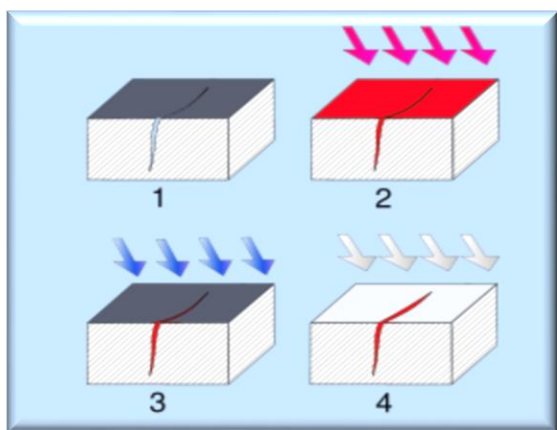
από τέτοιες συνθήκες, μέσω κατάλληλων επιστρώσεων ή προστατευτικών μέτρων, είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας απόδοσής τους (Καρτσάκλη, 2012).

Συνοψίζοντας, η κόπωση αποτελεί έναν από τους κύριους μηχανισμούς αστοχίας των ελατηρίων. Η κατανόηση των παραγόντων που την επηρεάζουν και η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων σχεδίασης, κατασκευής και συντήρησης μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της αντοχής των ελατηρίων στην κόπωση και στη διασφάλιση της αξιοπιστίας τους σε μακροχρόνια χρήση.

3.5 Μέθοδοι Ανίχνευσης Κόπωσης

Η ανίχνευση της κόπωσης στα σιδηροδρομικά εξαρτήματα αποτελεί ζωτικής σημασίας διαδικασία για τη διατήρηση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας του τροχαίου υλικού. Για την παρακολούθηση και την έγκαιρη διάγνωση της κόπωσης, εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι, οι οποίες διακρίνονται σε καταστρεπτικές και μη καταστρεπτικές. Οι μη καταστρεπτικές τεχνικές προτιμώνται ιδιαίτερα, καθώς παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την κατάσταση των εξαρτημάτων χωρίς να απαιτείται η καταστροφή τους (Crossland, 1956).

Μία από τις πιο βασικές αλλά σημαντικές μεθόδους είναι η οπτική επιθεώρηση. Αυτή πραγματοποιείται είτε με το γυμνό μάτι είτε με τη βοήθεια μεγεθυντικών εργαλείων και στοχεύει στον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών, χρωματικών αλλοιώσεων ή άλλων ενδείξεων φθοράς. Παρόλο που η διαδικασία αυτή είναι απλή και άμεσα εφαρμόσιμη, περιορίζεται στην αναγνώριση μόνο ορατών ατελειών, αφήνοντας ανιχνεύσιμες μικροσκοπικές ή εσωτερικές ρωγμές.



Εικόνα 16. Στάδια Εφαρμογής Διεσδυτικού Υγρού.

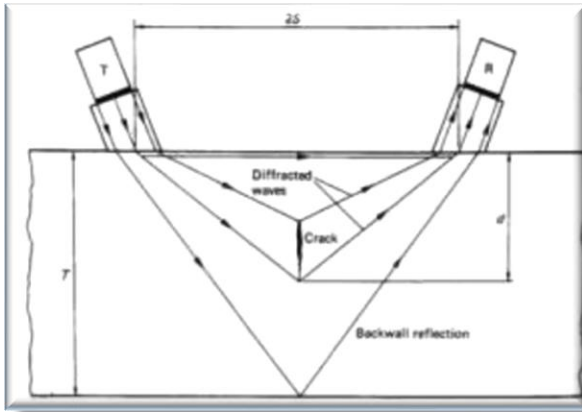
Πηγή:

<http://users.uniwa.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/308MethYqrwn.html>

να μπορεί να εντοπίσει βαθύτερες φθορές. Αντίθετα, για την ανίχνευση τόσο επιφανειακών όσο

Για την καλύτερη ανίχνευση των επιφανειακών ατελειών, εφαρμόζεται η δοκιμή διεσδυτικών υγρών (LPT), η οποία εκμεταλλεύεται τις φυσικές ιδιότητες των υγρών με χαμηλή επιφανειακή τάση. Το διεσδυτικό υγρό εισέρχεται στις ατέλειες και, μέσω της χρήσης ενός εμφανιστή, αυτές καθίστανται ορατές. Παρά την αποτελεσματικότητά της, η συγκεκριμένη τεχνική περιορίζεται αποκλειστικά στις επιφανειακές ρωγμές, χωρίς

και υποεπιφανειακών ατελειών σε σιδηρομαγνητικά υλικά, χρησιμοποιείται η μέθοδος του μαγνητικού ελέγχου σωματιδίων (MPT). Αυτή βασίζεται στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο εξεταζόμενο υλικό, με αποτέλεσμα τυχόν ατέλειες να διαταράσσουν το πεδίο και να συγκεντρώνουν μαγνητικά σωματίδια στις προβληματικές περιοχές. Έτσι, επιτυγχάνεται η έγκαιρη ανίχνευση ρωγμών που ενδέχεται να επηρεάσουν τη μηχανική αντοχή του εξαρτήματος (Manson & Halford, 2006).



Εικόνα 17. Μέτρηση Ρωγμών με Διάθλαση Υπερήχων.

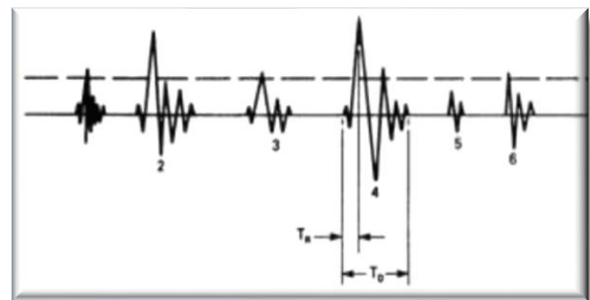
Πηγή:

<http://users.uniwa.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/305Yperixoi.html>

βλαβών, αν και απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και έμπειρο προσωπικό.

Μια εναλλακτική λύση για την ανίχνευση εσωτερικών ρωγμών είναι ο ακτινογραφικός έλεγχος (RT), ο οποίος χρησιμοποιεί ακτίνες X ή γάμμα για τη χαρτογράφηση των εσωτερικών δομών του υλικού. Οι ατέλειες απορροφούν διαφορετικές ποσότητες ακτινοβολίας, επιτρέποντας τη δημιουργία μιας σαφούς εικόνας των εσωτερικών ατελειών. Παρά την υψηλή ακρίβεια της μεθόδου, η χρήση της ιονίζουσας ακτινοβολίας απαιτεί προφυλάξεις και ειδικό εξοπλισμό.

Μια πιο δυναμική προσέγγιση αποτελεί η μέτρηση ακουστικής εκπομπής (AET), η οποία βασίζεται στην ανίχνευση ηχητικών κυμάτων που παράγονται από τη δημιουργία ή την εξέλιξη ρωγμών. Οι αισθητήρες που τοποθετούνται στην επιφάνεια του υλικού καταγράφουν τα ηχητικά σήματα, παρέχοντας πληροφορίες για τη διαρκή επιδείνωση του υλικού. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή μπορεί να επηρεαστεί από εξωτερικούς θορύβους, γεγονός που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την εφαρμογή της (Maddox, 1991).



Εικόνα 18. Σειρά Πάλμων Ακουστικής Εκπομπής. Πηγή:

<http://users.uniwa.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/305Yperixoi.html>

Η χρήση της θερμογραφίας υπέρυθρων (IRT) παρέχει επίσης πολύτιμες πληροφορίες για την κόπωση των υλικών. Μέσω της καταγραφής των θερμικών προφίλ, η μέθοδος αυτή εντοπίζει περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων, οι οποίες μπορεί να αποτελούν σημεία αυξημένου κινδύνου για ρωγμές. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη συνεχή παρακολούθηση εξαρτημάτων που υφίστανται έντονες καταπονήσεις.

Πέρα από τις μη καταστρεπτικές μεθόδους, υπάρχουν και οι καταστρεπτικές τεχνικές που εφαρμόζονται κυρίως σε εργαστηριακές συνθήκες. Η μικροσκοπική ανάλυση μέσω ηλεκτρονικών μικροσκοπίων επιτρέπει την εξέταση της εξέλιξης των ρωγμών, παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες για τη δομή και τη συμπεριφορά του υλικού υπό συνθήκες κόπωσης. Επιπλέον, η μελέτη των S-N καμπυλών βοηθά στην κατανόηση της σχέσης μεταξύ της έντασης του φορτίου και του αριθμού των κύκλων μέχρι την αστοχία (Suresh, 1998).

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ανίχνευσης κόπωσης έχουν βελτιώσει σημαντικά την αξιοπιστία των σιδηροδρομικών εξαρτημάτων, μειώνοντας τον κίνδυνο απρογραμμάτιστων βλαβών. Στο πλαίσιο της προγνωστικής συντήρησης, η χρήση αισθητήρων και ανάλυσης δεδομένων επιτρέπει τον έγκαιρο εντοπισμό πιθανών προβλημάτων, συμβάλλοντας στην επέκταση της διάρκειας ζωής των κρίσιμων εξαρτημάτων και ενισχύοντας τη συνολική απόδοση των σιδηροδρομικών δικτύων.

3.6 Μέθοδοι Ανάλυσης της Κόπωσης

Ενώ οι μέθοδοι ανίχνευσης της κόπωσης επικεντρώνονται στον εντοπισμό και την αξιολόγηση των υφιστάμενων ατελειών σε μεταλλικά εξαρτήματα, οι μέθοδοι ανάλυσης έχουν ως στόχο την κατανόηση των μηχανισμών που οδηγούν στην ανάπτυξη και εξέλιξη των ρωγμών. Η ανάλυση της κόπωσης επιτρέπει όχι μόνο την εκτίμηση της διάρκειας ζωής ενός υλικού αλλά και την πρόβλεψη της αστοχίας του υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Με τη χρήση προηγμένων πειραματικών και θεωρητικών προσεγγίσεων, οι μηχανικοί μπορούν να σχεδιάσουν υλικά ανθεκτικά στην κόπωση και να προτείνουν στρατηγικές βελτίωσης της δομικής ακεραιότητας των εξαρτημάτων (Zhang & Mahadevan, 2000).

Μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι η ανάλυση των καμπυλών S-N (Stress-Number of cycles), οι οποίες καταγράφουν τη σχέση μεταξύ του εύρους τάσης και του αριθμού των κύκλων έως την αστοχία. Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν από πειραματικές δοκιμές, κατά τις οποίες μεταλλικά δοκίμια υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση μέχρι να εμφανιστούν ρωγμές ή να οδηγηθούν σε πλήρη θραύση. Η μελέτη αυτών των δεδομένων

επιτρέπει την κατανόηση της ανθεκτικότητας των υλικών και συμβάλλει στον σχεδιασμό εξαρτημάτων με αυξημένη αντοχή στη δυναμική φόρτιση (Smith et al., 1970).

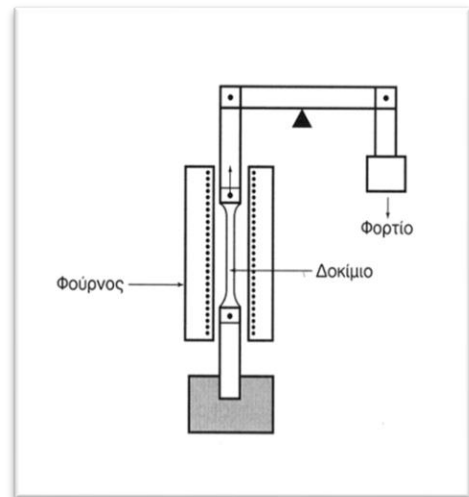
Παράλληλα, η ανάλυση μικρορωγμών αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την εξέταση της έναρξης και της ανάπτυξης των ρωγμών σε μικροδομικό επίπεδο. Η χρήση τεχνικών όπως η μικροσκοπία ηλεκτρονίων σάρωσης (SEM) και η φασματοσκοπία ακτίνων X (XRD) επιτρέπει τη λεπτομερή μελέτη των μηχανισμών που ευθύνονται για τη φθορά των υλικών. Μέσα από αυτές τις μεθόδους, εντοπίζονται περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, όπου είναι πιθανότερο να εμφανιστούν ρωγμές, επιτρέποντας έτσι τη βελτίωση των διαδικασιών κατασκευής και την επιλογή πιο ανθεκτικών κραμάτων.

Η συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών υπό κυκλική φόρτιση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις μηχανικές τους ιδιότητες. Παράμετροι όπως η σκληρότητα, η ολκιμότητα, η εφελκυστική αντοχή και η δυσθραυστότητα επηρεάζουν τη δυνατότητα των υλικών να αντέχουν επαναλαμβανόμενες καταπονήσεις. Για παράδειγμα, υλικά με υψηλή σκληρότητα εμφανίζουν αυξημένη αντοχή στη φθορά, αλλά είναι συχνά πιο εύθραυστα, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα αστοχίας λόγω ψαθυρής θραύσης. Αντιθέτως, υλικά με υψηλή ολκιμότητα μπορούν να απορροφήσουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, γεγονός που τα καθιστά πιο ανθεκτικά στην κόπωση (Liu & Mahadevan, 2005).

Η εφελκυστική αντοχή είναι επίσης κρίσιμη για τη συμπεριφορά ενός υλικού. Τα πειράματα θραύσης δείχνουν ότι διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας επηρεάζουν σημαντικά την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης των μετάλλων. Σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, παρατηρείται συχνά το φαινόμενο του ερπυσμού, το οποίο μπορεί να επιταχύνει την ανάπτυξη ρωγμών και να μειώσει τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων που εκτίθενται σε υψηλά φορτία για μεγάλες χρονικές περιόδους (Levenson et al., 2003).

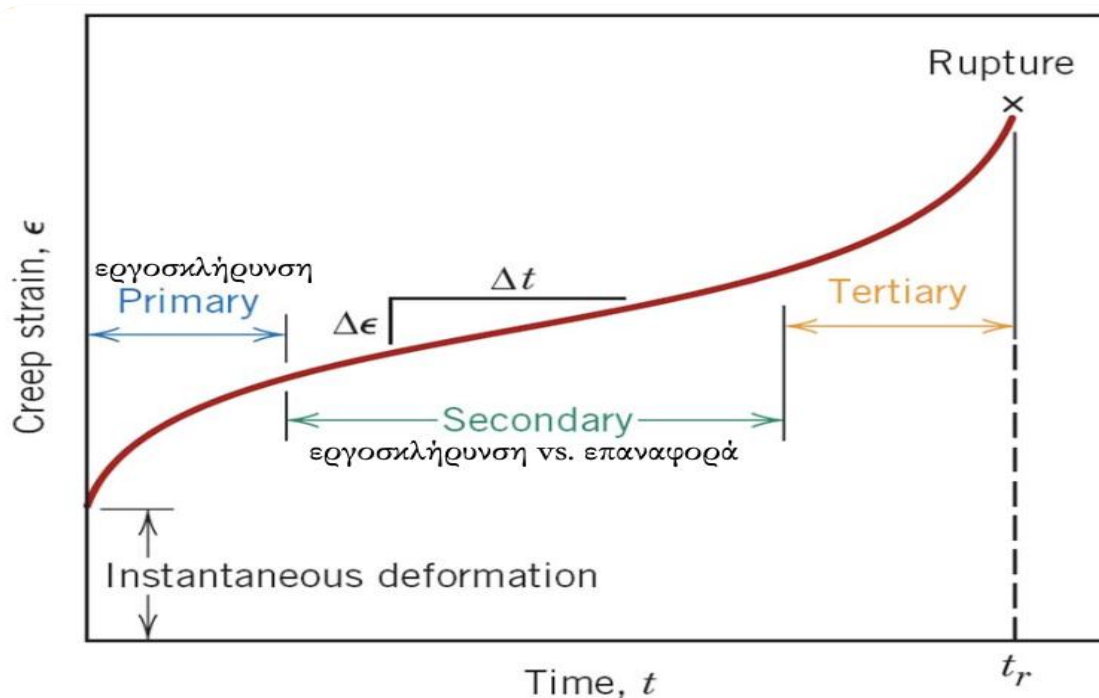
Ο ερπυσμός, ως φαινόμενο, σχετίζεται άμεσα με την κόπωση των μετάλλων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου τα υλικά υπόκεινται σε συνεχείς τάσεις και υψηλές θερμοκρασίες. Κατά τη διάρκεια του ερπυσμού, το υλικό υφίσταται αργή αλλά σταδιακή πλαστική παραμόρφωση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε διαρθρωτικές αλλαγές και αστοχία. Εξαρτήματα όπως ελατήρια, άξονες και συστήματα πέδησης στα σιδηροδρομικά οχήματα είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε αυτό το φαινόμενο, καθώς λειτουργούν σε απαιτητικά θερμικά και μηχανικά περιβάλλοντα.

Η εξέλιξη του ερπυσμού καθορίζεται από τη θερμοκρασία και το εφαρμοζόμενο φορτίο. Σε χαμηλότερες τάσεις και υψηλές θερμοκρασίες, η παραμόρφωση συμβαίνει λόγω διάχυσης ατόμων μέσα στη μεταλλική δομή, ενώ σε υψηλότερες τάσεις επικρατεί η πλαστική παραμόρφωση μέσω μετακίνησης αταξιών. Για να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις του ερπυσμού, οι μηχανικοί αναπτύσσουν κράματα υψηλής αντοχής, όπως υπερκράματα νικελίου, και εφαρμόζουν θερμικές επεξεργασίες που αυξάνουν την ανθεκτικότητα των υλικών σε αυτές τις συνθήκες (Levenson et al., 2003).



Εικόνα 19. Πειραματική Διάταξη Ερπυσμού.
 Πηγή: Σημειώσεις Εργαστηρίου Μεταλλογνώσιας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Στεργιούδη.

Η ανάλυση της κόπωσης και των μηχανισμών που την προκαλούν, σε βάθος, προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτίωση των σιδηροδρομικών κατασκευών. Ο συνδυασμός των πειραματικών και αριθμητικών προσεγγίσεων επιτρέπει όχι μόνο τη διαπίστωση των αιτιών αστοχίας αλλά και την ανάπτυξη προληπτικών στρατηγικών για την αύξηση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων. Μέσω συνεχούς έρευνας και εφαρμογής σύγχρονων τεχνικών, η βιομηχανία των μεταφορών επιτυγχάνει τη βελτίωση της ασφάλειας και της απόδοσης των μεταλλικών στοιχείων που υπόκεινται σε κυκλικές καταπονήσεις.



Εικόνα 20. Διάγραμμα Ερπυσμού Παραμόρφωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο.
 Πηγή: Σημειώσεις Εργαστηρίου Μεταλλογνώσιας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Στεργιούδη.

3.7 Εφελκυσμός και Θλίψη στις Σιδηροδρομικές Αναρτήσεις

Οι σιδηροδρομικές αναρτήσεις αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για την ασφάλεια και την αποδοτικότητα των τρένων, καθώς απορροφούν και διαχειρίζονται τις μηχανικές καταπονήσεις που προκύπτουν από την κίνηση πάνω στις ράγες. Τα μεταλλικά εξαρτήματα αυτών των συστημάτων, όπως τα ελατήρια, υφίστανται συνεχείς κυκλικές φορτίσεις που περιλαμβάνουν εφελκυσμό και θλίψη. Ο εφελκυσμός αναφέρεται στη δύναμη που προσπαθεί να τεντώσει το υλικό, προκαλώντας αύξηση του μήκους του, ενώ η θλίψη είναι η αντίθετη δύναμη που το συμπιέζει, μειώνοντας το μήκος του. Αυτές οι επαναλαμβανόμενες καταπονήσεις οδηγούν σε σταδιακή υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, μειώνοντας την αντοχή τους στην κόπωση και αυξάνοντας τον κίνδυνο αστοχίας (Stephens et al., 2000).

Η ανάλυση των τάσεων που αναπτύσσονται στα εξαρτήματα κατά τη φόρτιση με εφελκυσμό και θλίψη απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένων μαθηματικών μοντέλων. Μέσω αυτών, οι μηχανικοί μπορούν να προβλέψουν την εμφάνιση μικρορωγμών και να εκτιμήσουν την εξέλιξή τους σε πιο σοβαρές φθορές. Παράλληλα, σύγχρονα λογισμικά προσομοίωσης επιτρέπουν τη μελέτη της συμπεριφοράς των μεταλλικών εξαρτημάτων σε ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας, εντοπίζοντας περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων που χρήζουν ενίσχυσης ή τροποποίησης του σχεδιασμού (Stephens et al., 2001).

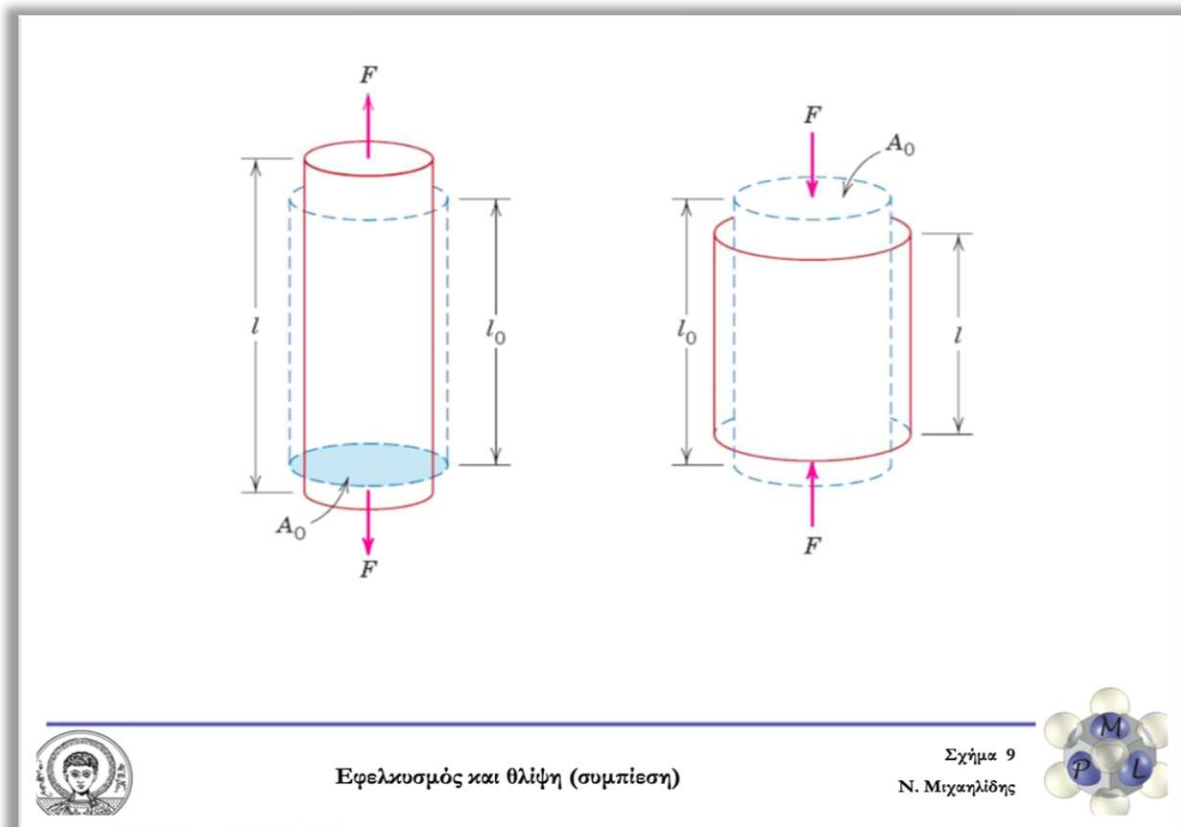
Ένα βασικό πρόβλημα που σχετίζεται με αυτές τις καταπονήσεις είναι η σταδιακή αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού λόγω της επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Με τον καιρό, το μέταλλο μπορεί να χάσει την αρχική του ελαστικότητα και να εμφανίσει φαινόμενα όπως η «συσσώρευση παραμόρφωσης» (strain accumulation). Όταν φτάσει σε αυτό το στάδιο, η ικανότητά του να απορροφά μηχανική ενέργεια μειώνεται σημαντικά, αυξάνοντας την πιθανότητα αστοχίας. Αυτό καθιστά απαραίτητη την παρακολούθηση των εξαρτημάτων και την αντικατάστασή τους πριν οδηγηθούν σε επικίνδυνη μείωση της απόδοσής τους (Poole, 2007).

Η κατανόηση της δυναμικής αυτών των δυνάμεων είναι ζωτικής σημασίας για τη σχεδίαση ανθεκτικών συστημάτων ανάρτησης. Μέσω εξειδικευμένων προσομοιώσεων, οι κατασκευαστές μπορούν να αναλύσουν τη συμπεριφορά των μεταλλικών εξαρτημάτων υπό διαφορετικά φορτία και συνθήκες λειτουργίας. Αυτές οι προσομοιώσεις βοηθούν επίσης στον

προσδιορισμό των περιοχών υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, επιτρέποντας την ανασχεδίαση των εξαρτημάτων για την αύξηση της αντοχής τους.

Οι μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης αποτελούν ακόμη έναν παράγοντα που επηρεάζει την κόπωση των υλικών. Το βάρος του φορτίου, η ταχύτητα του τρένου και οι ανωμαλίες της γραμμής επηρεάζουν τις δυνάμεις θλίψης και εφελκυσμού που ασκούνται στα ελατήρια, δημιουργώντας πολύπλοκες καταπονήσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε απρόβλεπτες αστοχίες. Η χρήση υλικών υψηλής αντοχής, όπως ειδικά επεξεργασμένα κράματα χάλυβα, σε συνδυασμό με τεχνικές θερμικής κατεργασίας, όπως η σκλήρυνση μέσω θερμικών κύκλων, συμβάλλει στην ενίσχυση της δομής των εξαρτημάτων και στην αύξηση της διάρκειας ζωής τους (Schijve, 2009).

Εκτός από τις εσωτερικές ιδιότητες των υλικών, σημαντικός είναι και ο ρόλος των περιβαλλοντικών συνθηκών. Παράγοντες όπως η υγρασία, οι ακραίες θερμοκρασίες και η παρουσία διαβρωτικών ουσιών μπορούν να επιδεινώσουν την κόπωση, επιταχύνοντας τη διαδικασία αστοχίας. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόζονται τεχνικές όπως οι αντιδιαβρωτικές επιστρώσεις και η χρήση ειδικών λιπαντικών, οι οποίες προστατεύουν τα μεταλλικά εξαρτήματα από τις δυσμενείς επιδράσεις του περιβάλλοντος.



Εφελκυσμός και θλίψη (συμπύση)

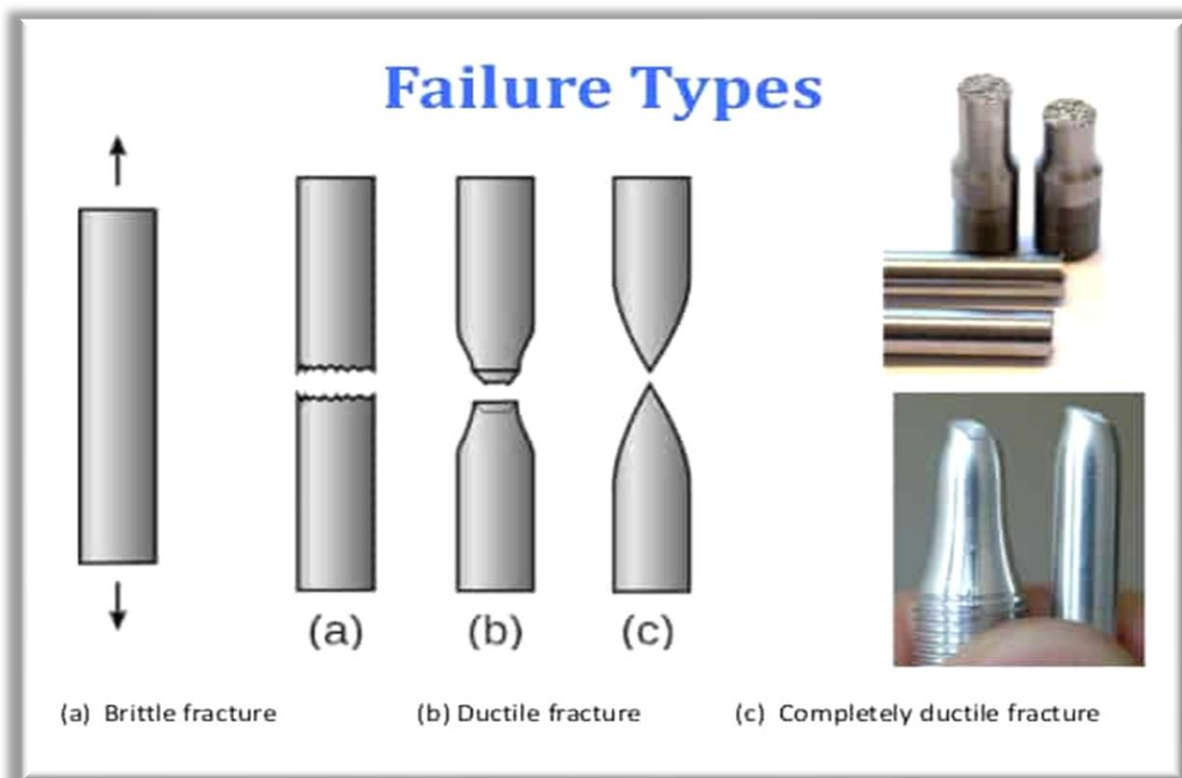
Εικόνα 21. Εφελκυσμός και Θλίψη.

Πηγή: Σημειώσεις Μαθήματος "Ιδιότητες των Υλικών", ΑΠΘ, Ν. Μιχαηλίδης.

3.8 Δοκιμές Εφελκυσμού και Θλίψης

Για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών εξαρτημάτων, πραγματοποιούνται δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης. Στη δοκιμή εφελκυσμού, ένα δοκίμιο υποβάλλεται σε μονοαξονική τάση μέχρι την αστοχία, μετρώντας παραμέτρους όπως το όριο διαρροής, η εφελκυστική αντοχή και η επιμήκυνση. Αντίστοιχα, στη δοκιμή θλίψης, το υλικό υποβάλλεται σε συμπιεστικά φορτία, αξιολογώντας την αντοχή του και τη συμπεριφορά του υπό πίεση. Αυτές οι δοκιμές παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την αντοχή των υλικών και βοηθούν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης (Μαυρίδης, 2010).

Η θραύση των μετάλλων μπορεί να είναι όλκιμη ή ψαθυρή, ανάλογα με την μορφή της αστοχίας. Στην όλκιμη θραύση, το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά πριν αστοχήσει, ενώ στην ψαθυρή θραύση, η ρωγμή αναπτύσσεται γρήγορα χωρίς προειδοποίηση. Η ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης σχετίζεται άμεσα με τον συντελεστή έντασης τάσης και την παρουσία συγκεντρώσεων τάσεων. Σύμφωνα με τη θεωρία του Griffith, η διάδοση των ρωγμών εξαρτάται από την ενεργειακή ισορροπία του υλικού, ενώ σε υψηλά φορτία, οι ρωγμές εξελίσσονται ταχύτερα, οδηγώντας σε ξαφνική αστοχία (Μαυρίδης, 2010).



Εικόνα 22. Όλκιμη και Ψαθυρή Θραύση Μετάλλων.
Πηγή: <https://learnmech.com/introduction-brittle-failure-brittle-failure-occurs/>

Η ανίχνευση μικρορωγμών σε πρώιμο στάδιο μπορεί να αποτρέψει σημαντικές βλάβες. Χρησιμοποιούνται μη καταστρεπτικές μέθοδοι όπως η υπερηχογραφία, ο μαγνητικός έλεγχος σωματιδίων και η θερμογραφία υπερέυθρων, οι οποίες επιτρέπουν τη διάγνωση πιθανών ατελειών πριν αυτές οδηγήσουν σε σοβαρές αποτυχίες. Επιπλέον, τεχνικές όπως το shot peening, η θερμική κατεργασία και οι ειδικές επιστρώσεις ενισχύουν την αντοχή στην κόπωση, μειώνοντας την πιθανότητα αστοχίας.

Οι δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης πραγματοποιούνται σε εξειδικευμένα εργαστήρια, όπου χρησιμοποιούνται προηγμένες συσκευές δοκιμής, όπως μηχανές δυναμικής φόρτισης, αισθητήρες παραμόρφωσης και θερμικές κάμερες για την καταγραφή των αντιδράσεων των υλικών σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η ανάλυση επιτρέπει την ανάπτυξη βελτιωμένων κραμάτων και την εφαρμογή θερμικών ή επιφανειακών επεξεργασιών για την αύξηση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων (Paruga, 2011).



Εικόνα 23. Μηχανή Εφελκυσμού.
Πηγή: Σημειώσεις Μαθήματος "Ιδιότητες των Υλικών", ΑΠΘ, Ν. Μιχαηλίδης.

Επιπλέον, οι τεχνικές ενίσχυσης της αντοχής στην κόπωση, όπως το shot peening και οι θερμικές κατεργασίες, αξιολογούνται μέσω δοκιμών ώστε να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητά τους. Η επίδραση παραγόντων όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα εφαρμογής του φορτίου και η διάρκεια των κυκλικών φορτίσεων μελετάται εκτενώς, δίνοντας πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά των υλικών υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (Dokas et al., 2018).

Η ανάλυση της κόπωσης των υλικών πραγματοποιείται με τη χρήση καμπυλών S-N (Stress-Number of cycles), οι οποίες αποτυπώνουν τη σχέση μεταξύ του αριθμού κύκλων φόρτισης και της αντοχής του υλικού. Οι δοκιμές αυτές είναι θεμελιώδεις για τον προσδιορισμό του ορίου αντοχής στην κόπωση, το οποίο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη σχεδίαση εξαρτημάτων που υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενα φορτία. Με τη χρήση αυτών των δεδομένων, οι μηχανικοί μπορούν να προβλέψουν τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων και να ενσωματώσουν βελτιώσεις στον σχεδιασμό τους (Tada et al., 2000).

Επιπλέον, η ανίχνευση μικρορωγμών σε πρώιμο στάδιο είναι ζωτικής σημασίας για τη λήψη προληπτικών μέτρων, καθώς επιτρέπει την αποφυγή αστοχιών πριν αυτές εξελιχθούν σε κρίσιμες βλάβες. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόζονται μη καταστρεπτικές μέθοδοι όπως η υπερηχογραφία, ο μαγνητικός έλεγχος σωματιδίων και η θερμογραφία υπερύθρων, οι οποίες προσφέρουν τη δυνατότητα διάγνωσης πιθανών ατελειών χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργικότητα του υλικού (Μαυρίδης, 2010).

Για τη βελτίωση της αντοχής των μεταλλικών εξαρτημάτων στην κόπωση, χρησιμοποιούνται, όπως είπαμε και παραπάνω, διάφορες βιομηχανικές τεχνικές, όπως το shot peening, κατά το οποίο μικροσκοπικά σφαιρίδια υψηλής ταχύτητας προσκρούουν στην επιφάνεια του υλικού, δημιουργώντας θλιπτικές τάσεις που μειώνουν την πιθανότητα ανάπτυξης ρωγμών. Παράλληλα, η θερμική κατεργασία (βαφή, ανόπτηση) επιδρά στη μικροδομή του υλικού, βελτιώνοντας την αντοχή του σε κυκλικές φορτίσεις. Επιφανειακές επικαλύψεις, όπως κεραμικά ή μεταλλικά στρώματα, παρέχουν πρόσθετη προστασία από τη φθορά και τη διάβρωση, ενισχύοντας τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα των εξαρτημάτων (Norton, 2006).

Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας στη μελέτη της κόπωσης είναι η ανάλυση των μικρορωγμών, που επιτρέπει την εις βάθος κατανόηση της εξέλιξης των αστοχιών. Μέσω τεχνικών όπως η μικροσκοπία ηλεκτρονίων σάρωσης (SEM), οι ερευνητές μπορούν να εξετάσουν την έναρξη και τη διάδοση ρωγμών σε μικροσκοπικό επίπεδο. Επιπλέον, η φασματοσκοπία ακτίνων X (XRD) συμβάλλει στην ανάλυση των κρυσταλλικών δομών και των φάσεων που ενδέχεται να επηρεάζουν την αντοχή του υλικού κατά την κόπωση. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την ανάπτυξη πιο ανθεκτικών υλικών και τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης των εξαρτημάτων, περιορίζοντας την πιθανότητα μηχανικής αποτυχίας (Taylor, 1999).

Η συνεχής έρευνα και η πρόοδος στις τεχνικές ανάλυσης της κόπωσης επιτρέπουν τη βελτίωση της σχεδίασης των σιδηροδρομικών εξαρτημάτων, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής τους και μειώνοντας τις ανάγκες συντήρησης. Με την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών και καινοτόμων υλικών, οι σιδηροδρομικές αναρτήσεις καθίστανται πιο ανθεκτικές, διασφαλίζοντας την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα των μεταφορών (Dokas et al., 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΑ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Η εξέλιξη των τεχνολογιών παρακολούθησης και μέτρησης έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στις διαδικασίες συντήρησης βιομηχανικού εξοπλισμού, ιδιαίτερα στον τομέα των σιδηροδρομικών συστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, τα αυτόματα συστήματα παρακολούθησης αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για τη συνεχή εποπτεία της κατάστασης των εξαρτημάτων, διασφαλίζοντας την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών προβλημάτων. Ειδικότερα, στον τομέα των τρένων, τα ασύρματα συστήματα παρακολούθησης παρέχουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την πρόβλεψη των φθορών και την εφαρμογή κατάλληλων στρατηγικών συντήρησης (Susto et al., 2015).

Η σημασία αυτών των τεχνολογιών γίνεται ακόμα πιο εμφανής στο πλαίσιο της εφαρμογής του predictive maintenance, μιας προσέγγισης που στοχεύει στην πρόβλεψη των πιθανών βλαβών προτού αυτές συμβούν. Η χρήση αισθητήρων που καταγράφουν κρίσιμα δεδομένα λειτουργίας, όπως οι δονήσεις, η θερμοκρασία και η πίεση, επιτρέπει την έγκαιρη διάγνωση των προβλημάτων, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος και τον χρόνο διακοπής λειτουργίας των συστημάτων. Αυτή η διαδικασία διασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία του σιδηροδρομικού εξοπλισμού, ενισχύοντας την ασφάλεια και την αποδοτικότητα του συστήματος (Susto et al., 2015).



Εικόνα 24. Προγνωστική Συντήρηση και Αυτόματα Συστήματα.

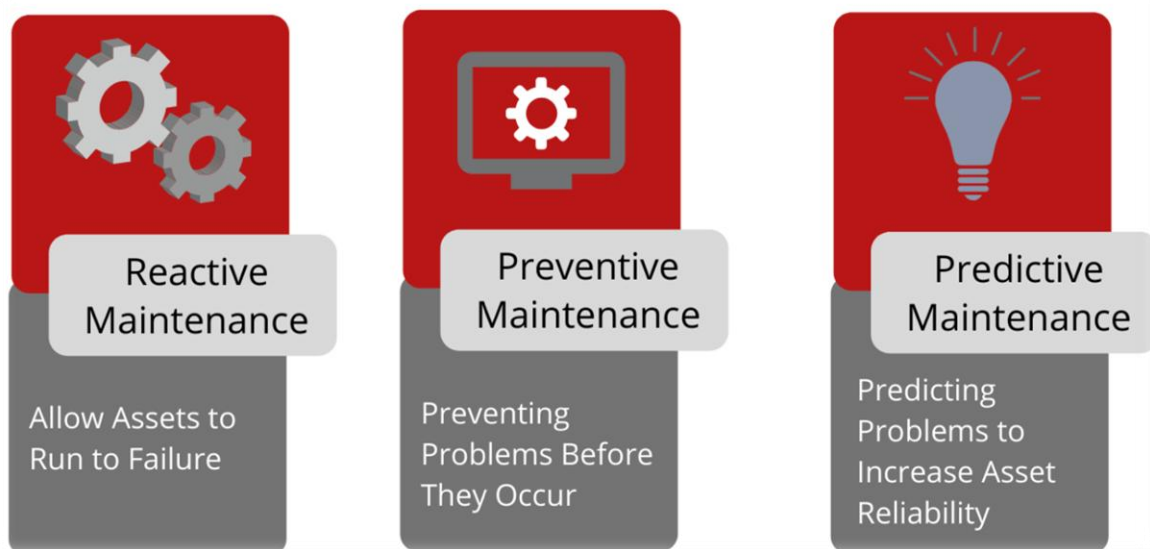
Πηγή: <https://www.voestalpine.com/railway-systems/en/company/news/predictive-railway-monitoring/>

4.1 Ορισμός και Εφαρμογές Προγνωστικής Συντήρησης

Η προγνωστική συντήρηση (Predictive maintenance) αποτελεί μια σύγχρονη τεχνική διαχείρισης συντήρησης που βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης των εξαρτημάτων και στην πρόβλεψη των βλαβών που ενδέχεται να παρουσιαστούν στο μέλλον. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους συντήρησης, οι οποίες βασίζονται σε προκαθορισμένα διαστήματα ελέγχου (preventive maintenance) ή την επέμβαση μετά την εμφάνιση της βλάβης (corrective maintenance), η προγνωστική συντήρηση επιδιώκει να προβλέψει τις φθορές προτού αυτές οδηγήσουν σε αστοχία (Mobley, 2002).

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη συνεχή συλλογή δεδομένων μέσω αισθητήρων και άλλων συστημάτων παρακολούθησης, τα οποία αναλύονται με τη χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και στατιστικών μοντέλων. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να εντοπιστεί η σταδιακή επιδείνωση της απόδοσης ενός εξαρτήματος, επιτρέποντας τον έγκαιρο προγραμματισμό της συντήρησης. Στον τομέα των σιδηροδρομικών συστημάτων, το predictive maintenance χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση κρίσιμων εξαρτημάτων, όπως οι αναρτήσεις, οι τροχοί και τα φρένα (Karagulian et al., 2019).

Οι εφαρμογές της προγνωστικής συντήρησης εκτείνονται πέρα από τον σιδηροδρομικό τομέα, καλύπτοντας διάφορους κλάδους της βιομηχανίας, όπως η αεροπορία, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ενέργεια. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, ο στόχος παραμένει ο ίδιος: η μείωση του κόστους συντήρησης και η αύξηση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού (Mobley, 2002).



Εικόνα 25. Predictive Maintenance Vs Preventive Maintenance.

Πηγή: <https://www.prometheusgroup.com/resources/posts/reactive-vs-preventive-vs-predictive-maintenance>

4.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Η υιοθέτηση του predictive maintenance προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα για τις επιχειρήσεις και τους οργανισμούς που διαχειρίζονται πολύπλοκα συστήματα. Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη είναι η μείωση του κόστους συντήρησης, καθώς οι παρεμβάσεις πραγματοποιούνται μόνο όταν υπάρχει πραγματική ανάγκη, αποφεύγοντας έτσι τις περιττές δαπάνες. Επιπλέον, η έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων μειώνει τον κίνδυνο αστοχίας των εξαρτημάτων, προλαμβάνοντας δαπανηρές επισκευές ή αντικαταστάσεις (Poore et al., 2019).

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η αύξηση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού. Μέσω της συνεχούς παρακολούθησης, μπορούν να εντοπιστούν πρώιμα σημάδια φθοράς, επιτρέποντας την εφαρμογή προληπτικών μέτρων που παρατείνουν τον κύκλο ζωής των εξαρτημάτων. Η εφαρμογή της προγνωστικής συντήρησης συμβάλλει επίσης στη μείωση του χρόνου διακοπής της λειτουργίας των συστημάτων, καθώς οι επισκευές προγραμματίζονται όταν είναι πιο βολικό, αποφεύγοντας έτσι απρόβλεπτες καθυστερήσεις (Cinar et al., 2020). Η χρήση τέτοιων τεχνολογιών ενισχύει την ασφάλεια του συστήματος. Στον σιδηροδρομικό τομέα, η συνεχής παρακολούθηση των κρίσιμων εξαρτημάτων, όπως οι αναρτήσεις, διασφαλίζει ότι οι επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές πραγματοποιούνται με τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια.

Παρά τα πλεονεκτήματα, η εφαρμογή του predictive maintenance συνοδεύεται και από ορισμένα μειονεκτήματα και προκλήσεις. Η αρχική επένδυση σε τεχνολογικό εξοπλισμό και αισθητήρες μπορεί να είναι υψηλή, γεγονός που καθιστά δύσκολη την υιοθέτηση της τεχνολογίας από μικρότερες επιχειρήσεις. Επιπλέον, η εγκατάσταση και η συντήρηση των συστημάτων παρακολούθησης απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό και τεχνογνωσία (Dalzochio et al., 2020).

Μια άλλη πρόκληση είναι η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να είναι τεράστιου όγκου και πολύπλοκα, καθιστώντας δύσκολη την επεξεργασία τους χωρίς τη χρήση εξελιγμένων εργαλείων ανάλυσης, όπως οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης. Επιπλέον, η αξιοπιστία των προβλέψεων εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται και την ακρίβεια των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση.

Τέλος, υπάρχουν και ζητήματα ασφάλειας δεδομένων, καθώς η χρήση ασύρματων συστημάτων παρακολούθησης αυξάνει την πιθανότητα κυβερνοεπιθέσεων. Η προστασία των

ευαίσθητων δεδομένων απαιτεί την εφαρμογή αυστηρών πρωτοκόλλων ασφαλείας, γεγονός που μπορεί να αυξήσει περαιτέρω το κόστος της τεχνολογίας (Liu et al., 2021).

4.3 Παραδείγματα Εφαρμογής

Η προγνωστική συντήρηση αποτελεί μια σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση της συντήρησης εξοπλισμού, με στόχο την πρόβλεψη πιθανών βλαβών πριν αυτές συμβούν, επιτρέποντας έτσι την έγκαιρη λήψη μέτρων για την αποτροπή τους. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανημάτων μέσω της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αξιοποιώντας τεχνολογίες όπως το Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IIoT) και αλγορίθμους μηχανικής μάθησης (Moblely, 2002).

Η λειτουργία της προγνωστικής συντήρησης περιλαμβάνει την εγκατάσταση αισθητήρων σε κρίσιμα σημεία του εξοπλισμού, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα σχετικά με παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, οι δονήσεις, η πίεση και άλλες λειτουργικές μεταβλητές. Τα δεδομένα αυτά μεταφέρονται σε πλατφόρμες ανάλυσης, όπου προηγμένοι αλγόριθμοι επεξεργάζονται τις πληροφορίες για να εντοπίσουν ανωμαλίες ή αποκλίσεις από τη φυσιολογική λειτουργία. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η πρόβλεψη πιθανών βλαβών και η προγραμματισμένη συντήρηση πριν από την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων (Moblely, 2002).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της προγνωστικής συντήρησης είναι η παρακολούθηση υδραυλικών και ηλεκτρικών συστημάτων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Μέσω της συνεχούς ανάλυσης των δεδομένων λειτουργίας, το σύστημα μπορεί να αναγνωρίσει πρότυπα που υποδηλώνουν επικείμενες βλάβες, επιτρέποντας την έγκαιρη παρέμβαση των τεχνικών συντήρησης. Αυτή η προσέγγιση μειώνει τον απρόβλεπτο χρόνο διακοπής λειτουργίας και βελτιώνει τη συνολική αποδοτικότητα της παραγωγής (Peng et al., 2010).

Στον τομέα των σιδηροδρομικών δικτύων, για παράδειγμα, η προγνωστική συντήρηση έχει υιοθετηθεί για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας των τρένων. Μέσω της εγκατάστασης αισθητήρων σε κρίσιμα εξαρτήματα, όπως οι τροχοί, οι άξονες και τα συστήματα πέδησης, συλλέγονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τη φθορά, τις δονήσεις και τη θερμοκρασία. Αυτά τα δεδομένα αναλύονται για την πρόβλεψη πιθανών βλαβών και τον προγραμματισμό συντήρησης πριν από την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων (Tsang, 1995). Ύστερα από εξονυχιστικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, ο Οργανισμός Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ) έχει αναπτύξει πληροφοριακό σύστημα προγνωστικής

συντήρησης για τη διαχείριση του τροχαίου υλικού του, με στόχο τη μείωση των απρογραμματίστων διακοπών λειτουργίας και τη βελτίωση της αποδοτικότητας.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, επιπλέον, οι κατασκευαστές ενσωματώνουν συστήματα προγνωστικής συντήρησης στα οχήματά τους για την παρακολούθηση της κατάστασης του κινητήρα, των φρένων και άλλων κρίσιμων συστημάτων. Μέσω της ανάλυσης δεδομένων από αισθητήρες, οι οδηγοί ενημερώνονται για την ανάγκη συντήρησης πριν από την εμφάνιση βλαβών, βελτιώνοντας έτσι την ασφάλεια και μειώνοντας το κόστος επισκευών (Si et al., 2011).

Στο κομμάτι της αεροπορίας, η προγνωστική συντήρηση εφαρμόζεται για την παρακολούθηση της κατάστασης των αεροσκαφών. Συστήματα συλλογής δεδομένων καταγράφουν πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των κινητήρων, των συστημάτων προσγείωσης και άλλων κρίσιμων εξαρτημάτων. Αυτά τα δεδομένα αναλύονται για την πρόβλεψη πιθανών βλαβών και τον προγραμματισμό συντήρησης, διασφαλίζοντας την ασφάλεια των πτήσεων και μειώνοντας τον χρόνο εκτός λειτουργίας των αεροσκαφών (Vachtsevanos et al., 2006).

Η υιοθέτηση της προγνωστικής συντήρησης προσφέρει πολλαπλά οφέλη, όπως η μείωση του κόστους συντήρησης, η αύξηση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού και η βελτίωση της παραγωγικότητας. Επιπλέον, συμβάλλει στη βελτίωση της ασφάλειας, καθώς οι πιθανές βλάβες εντοπίζονται και αντιμετωπίζονται πριν εξελιχθούν σε επικίνδυνες καταστάσεις. Η ενσωμάτωση αυτής της μεθόδου στις βιομηχανικές διαδικασίες αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση της έξυπνης και αποδοτικής διαχείρισης των πόρων.

Με μία πιο ολοκληρωμένη ματιά, επιτυγχάνοντας την πρόβλεψη πιθανών βλαβών σε μηχανολογικές εγκαταστάσεις, και κυρίως σε ότι αφορά το σιδηροδρομικό δίκτυο που εξυπηρετεί καθημερινά έναν μεγάλο αριθμό του πληθυσμού της χώρας, βελτιώνεται η ασφάλεια τόσο των επιβατών, όσο και των οδηγών, λόγω της έγκαιρης ανίχνευσης πιθανών επικίνδυνων καταστάσεων που μπορεί να προκύψουν. Με την πρόβλεψη των βλαβών, επιπροσθέτως, δίνεται η δυνατότητα κατάλληλου προγραμματισμού των εργασιών συντήρησης που απαιτούνται, μειώνοντας έτσι τον απρογραμματίστο χρόνο που πιθανόν να μείνει εκτός λειτουργίας κάποιο όχημα (Heng et al., 2009).

Μία έγκαιρη ανίχνευση του προβλήματος, επίσης, μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος επισκευής, καθώς δίνεται η δυνατότητα έγκαιρης επέμβαση προτού το πιθανό μικρό πρόβλημα εξελιχθεί σε σοβαρή βλάβη.

Η ανάλυση των δεδομένων λειτουργίας, τέλος, μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση της απόδοσης των οχημάτων, οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και εκμεταλλεύσιμων πόρων (Jardine et al., 2006).

Παρά τα σημαντικά της οφέλη, ωστόσο, η εφαρμογή της προγνωστικής συντήρησης αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις, που πρέπει να ληφθούν υπόψιν με μεγάλη σοβαρότητα. Η εγκατάσταση αισθητήρων και η συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και τεχνολογία. Η ανάλυση των δεδομένων για την πρόβλεψη βλαβών απαιτεί, επίσης, προηγμένα αναλυτικά εργαλεία και εξειδικευμένο προσωπικό. Η ενσωμάτωση των νέων συστημάτων προγνωστικής συντήρησης με τα υπάρχοντα πληροφοριακά συστήματα μπορεί σε τελικό βαθμό να παρουσιάσει τεχνικές και οργανωτικές δυσκολίες (Wang & Zhang, 2008).

Η προγνωστική συντήρηση αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη διαχείριση του τροχαίου υλικού, προσφέροντας σημαντικά οφέλη σε όρους αξιοπιστίας, ασφάλειας και κόστους, παρά τις όλες προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή (ISO, 2004).

Η εισαγωγή της τεχνητής νοημοσύνης (AI) στην προγνωστική συντήρηση έχει αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η διάγνωση των προβλημάτων στο τροχαίο υλικό. Η χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης επιτρέπει την ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων από αισθητήρες, εντοπίζοντας μοτίβα που προηγουμένως δεν μπορούσαν να ανιχνευθούν από ανθρώπινους αναλυτές (Lee et al., 2014).

Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των κραδασμών και των θερμοκρασιών των μηχανικών εξαρτημάτων, επιτρέποντας την πρόβλεψη αστοχιών πριν αυτές συμβούν. Ένα παράδειγμα εφαρμογής AI στη συντήρηση των σιδηροδρόμων είναι τα συστήματα predictive analytics, τα οποία χρησιμοποιούν ιστορικά δεδομένα για να εντοπίσουν τάσεις και να προτείνουν βελτιστοποιημένα προγράμματα συντήρησης (Lee et al., 2014).

4.4 Προοπτικές Εξέλιξης



Εικόνα 26. Προγνωστική Συντήρηση και Εξέλιξη.

Πηγή: <https://www.servicepower.com/blog/preventive-vs-predictive-maintenance>

θα παρέχουν ακριβέστερα δεδομένα, επιτρέποντας την ανίχνευση φθοράς σε ακόμα πιο πρώιμα στάδια (Cocconcelli & Rizzo, 2018).

Πιο συγκεκριμένα, το IoT System επιτρέπει τη δημιουργία έξυπνων δικτύων αισθητήρων που επικοινωνούν μεταξύ τους και αποστέλλουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σε κεντρικά συστήματα επεξεργασίας, ενώ η χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI) και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (machine learning) επιτρέπει την ανάλυση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων, αναγνωρίζοντας μοτίβα φθοράς και προβλέποντας με ακρίβεια πότε θα χρειαστεί συντήρηση. Αυτό μειώνει το λειτουργικό κόστος και αυξάνει την αποδοτικότητα των εργασιών συντήρησης (Galar et al, 2012).

Τεχνολογίες όπως τα «big data» και «cloud computing» προσδίδουν την ικανότητα στις εταιρείες να διαχειρίζονται και να αναλύουν δεδομένα από διαφορετικές τοποθεσίες σε πραγματικό χρόνο, για αυτό και επιλέγονται χωρίς δεύτερη σκέψη. Πρόκειται για εξελίξεις που ανοίγουν νέες προοπτικές για την αυτοματοποίηση της συντήρησης, επιτρέποντας την πρόβλεψη βλαβών με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία (Famurewa et al., 2015).

Επιπλέον, αναπτύσσονται νέες λύσεις για τη βελτίωση της συμβατότητας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων παρακολούθησης, επιτρέποντας την καλύτερη συνεργασία μεταξύ των εταιρειών συντήρησης, των κατασκευαστών εξαρτημάτων και των διαχειριστών των σιδηροδρομικών συστημάτων. Οι εξελίξεις αυτές αναμένεται να αλλάξουν ριζικά το τοπίο της συντήρησης στους σιδηροδρόμους, καθιστώντας τα συστήματα ασφαλέστερα, πιο αποδοτικά και οικονομικά βιώσιμα (Cocconcelli & Rizzo, 2018).

Η προγνωστική συντήρηση αναμένεται να διαδραματίσει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στο μέλλον των σιδηροδρομικών και βιομηχανικών συστημάτων. Οι νέες τεχνολογίες, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Internet of Things (IoT) και η τεχνητή νοημοσύνη (AI), υπόσχονται να βελτιώσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια των προβλέψεων. Οι αισθητήρες νέας γενιάς

Οι προοπτικές αυτές καθιστούν το predictive maintenance έναν τομέα συνεχούς ανάπτυξης και καινοτομίας, με στόχο την περαιτέρω μείωση του κόστους συντήρησης και την αύξηση της ασφάλειας των συστημάτων. Ειδικότερα για τον σιδηροδρομικό τομέα, οι νέες αυτές τεχνολογίες θα μπορούσαν να επιφέρουν ριζικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζονται οι εταιρείες τη συντήρηση και την ασφάλεια των τρενών (Galar et al, 2012).

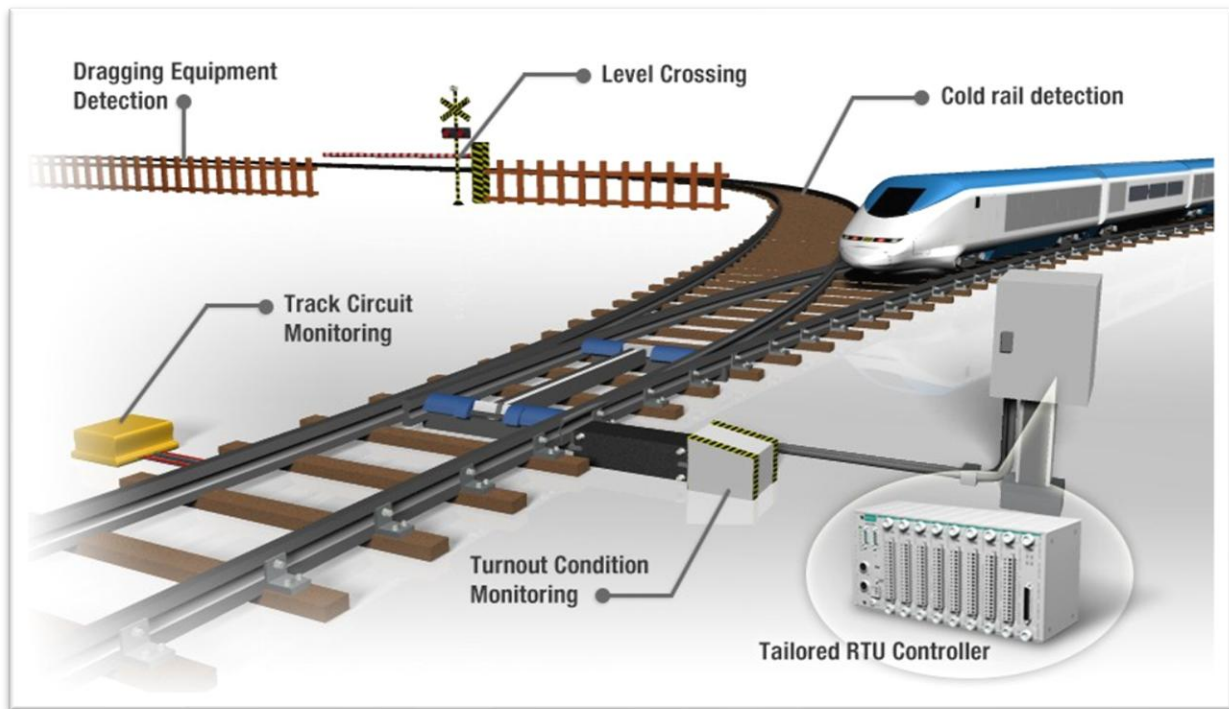
4.5 Αισθητήρες και Αυτόματα Συστήματα Παρακολούθησης

Η παρακολούθηση της απόδοσης και της φθοράς των ελατηρίων στις αναρτήσεις των τρένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας των σιδηροδρομικών μεταφορών. Τα αυτόματα συστήματα παρακολούθησης, που βασίζονται σε τεχνολογίες αιχμής, προσφέρουν τη δυνατότητα ανίχνευσης πρόωρων φθορών και προβλέπουν με ακρίβεια τον χρόνο συντήρησης. Αποτελούν δηλαδή γενικότερα την καρδιά της προληπτικής συντήρησης στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών. Στόχος αυτών των συστημάτων είναι η συνεχής παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανικών εξαρτημάτων, όπως των ελατηρίων, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία και να αποφεύγονται δαπανηρές αστοχίες. Αυτά τα συστήματα συνδυάζουν αισθητήρες υψηλής ακρίβειας, αλγορίθμους επεξεργασίας δεδομένων και τεχνολογίες επικοινωνίας για την έγκαιρη ανίχνευση βλαβών (Garcia et al., 2010).

Η χρήση αισθητήρων σε εφαρμογές σιδηροδρομικής παρακολούθησης έχει εξελιχθεί ραγδαία την τελευταία δεκαετία, ενσωματώνοντας λύσεις όπως η ασύρματη μετάδοση δεδομένων, η χρήση Internet of Things (IoT) και οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης για την πρόβλεψη πιθανών αστοχιών. Τα δεδομένα που συλλέγονται από αυτά τα συστήματα παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για τη φθορά των ελατηρίων, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στην αποδοτικότερη συντήρηση των συστημάτων αναρτήσεων (Tsunashima et al., 2014).

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές μπορούν να μετρούν παραμέτρους όπως οι τάσεις, οι δονήσεις, η θερμοκρασία και η παραμόρφωση. Τα δεδομένα που συλλέγονται από αυτούς τους αισθητήρες αποστέλλονται σε κεντρικά συστήματα για ανάλυση σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας έτσι τον άμεσο εντοπισμό φθορών και την αποτροπή πιθανών αστοχιών. Η υιοθέτηση τέτοιων συστημάτων μειώνει το κόστος συντήρησης, αυξάνει την ασφάλεια και βελτιώνει την αξιοπιστία των σιδηροδρομικών υπηρεσιών (Tsunashima et al., 2014).

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθιστούν αυτά τα συστήματα αποτελεσματικά είναι η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης, χωρίς την ανάγκη παύσης της λειτουργίας του τρένου. Αυτό επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συνόλου του δικτύου. Επιπλέον, η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την ανάλυση τάσεων και τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης για μελλοντικές ανάγκες συντήρησης (Bruni et al., 2007).



Εικόνα 27. Αυτόματα Συστήματα Παρακολούθησης στις Σιδηροδρομικές Ράγες.
Πηγή: <https://www.linkedin.com/pulse/smart-railway-tracking-system-dr-karthikeayan-r-m>

4.6 Τύποι Αισθητήρων Παρακολούθησης Ελατηρίων

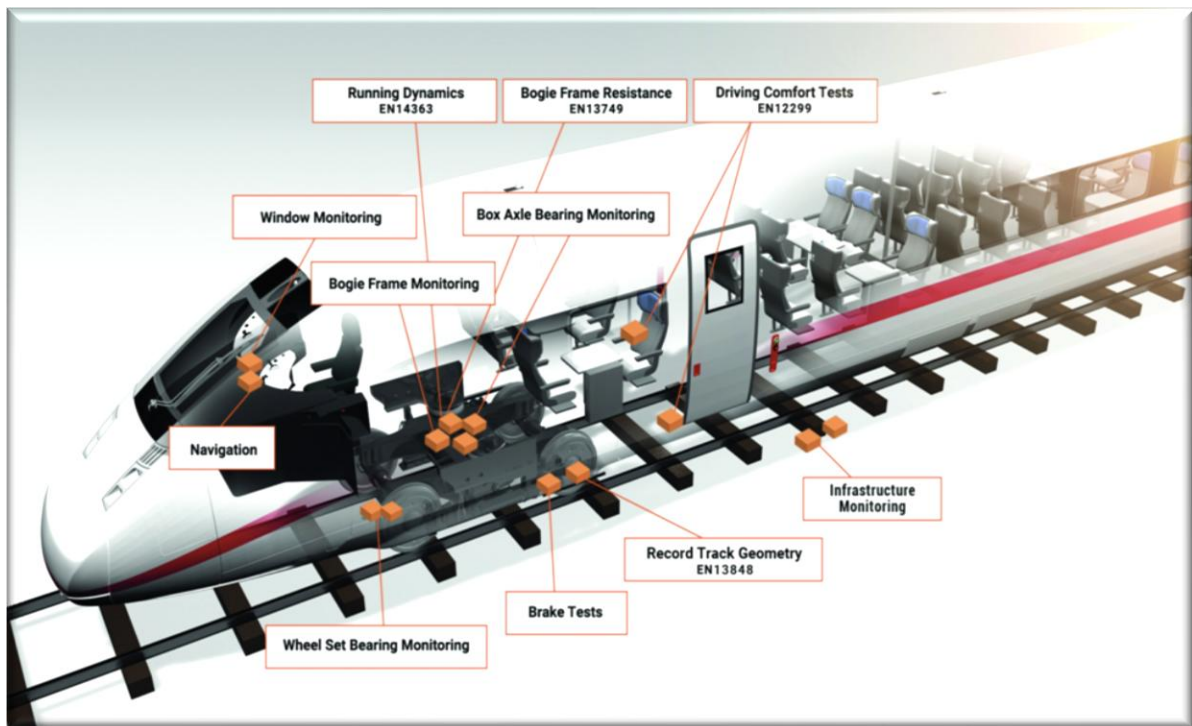
Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης των ελατηρίων μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τις παραμέτρους που μετρούν. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι αισθητήρων περιλαμβάνουν τους αισθητήρες τάσης, τους αισθητήρες δόνησης, τους αισθητήρες θερμοκρασίας και τους επιταχυνσιόμετρα.

Οι αισθητήρες τάσης είναι υπεύθυνοι για τη μέτρηση των μηχανικών τάσεων που δέχεται το ελατήριο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Μέσω της ανάλυσης αυτών των τάσεων, μπορεί να προβλεφθεί ο χρόνος ζωής του ελατηρίου και να ανιχνευτούν ενδείξεις κόπωσης. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται συνήθως σε κρίσιμα σημεία του ελατηρίου, όπου αναμένονται οι μεγαλύτερες τάσεις (διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <https://velomat.de/el/w->

[20/%CE%91%CE%B9%CF%83%CE%B8%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82%20%CF%87%CE%B5%CE%B9%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D\).](#)

Οι δόνησης, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ανωμαλιών στη λειτουργία του συστήματος ανάρτησης. Οι ασυνήθιστες δονήσεις μπορεί να υποδηλώνουν την ύπαρξη ρωγμών ή άλλων μορφών φθοράς στο ελατήριο. Μέσω της ανάλυσης των συχνοτήτων δόνησης, οι μηχανικοί μπορούν να εντοπίσουν προβλήματα πριν αυτά οδηγήσουν σε σοβαρές αστοχίες (Barbosa et al., 2023).

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας παρακολουθούν τις μεταβολές της θερμοκρασίας στο ελατήριο, δεδομένου ότι οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να επιταχύνουν τη φθορά του μετάλλου και να μειώσουν την αντοχή του σε κόπωση. Τέλος, τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των επιταχύνσεων που ασκούνται στο σύστημα ανάρτησης, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την απόκριση του συστήματος σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας (Barbosa et al., 2023).



Εικόνα 28. Διαφορετικά Συστήματα Παρακολούθησης σε Σιδηροδρομική Αμαξοστοιχία.

Πηγή: <https://septrainose.gr/article/4358>

4.7 Κριτήρια Επιλογής Αισθητήρων

Η επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων για τη συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το είδος των μετρήσεων που απαιτούνται, η ακρίβεια που επιθυμείται και το περιβάλλον λειτουργίας. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η ακρίβεια μέτρησης, δεδομένου ότι οι αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με την κατάσταση του ελατηρίου (Αντωνίου, 2019).

Η αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελεί επίσης κρίσιμο κριτήριο. Οι αισθητήρες που τοποθετούνται σε τρένα πρέπει να αντέχουν σε συνθήκες υψηλών κραδασμών, μεταβολών θερμοκρασίας και υγρασίας. Επιπλέον, η ανθεκτικότητα σε σκόνη, βρωμιά και διαβρωτικά στοιχεία είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της μακροχρόνιας λειτουργίας των αισθητήρων (Παπαδόπουλος, 2021).

Η κατανάλωση ενέργειας είναι επίσης σημαντικός παράγοντας, ιδίως για ασύρματα συστήματα παρακολούθησης. Οι αισθητήρες πρέπει να έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ώστε να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς την ανάγκη συχνής συντήρησης. Τέλος, η συμβατότητα με τα υφιστάμενα συστήματα επικοινωνίας και ανάλυσης δεδομένων αποτελεί σημαντική παράμετρο στην επιλογή του αισθητήρα (Μακρής, 2012).

4.8 Εφαρμογές Αισθητήρων σε Συστήματα Ανάρτησης Τροχαίου Υλικού

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ανάρτησης του τροχαίου υλικού αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την παρακολούθηση και την ανάλυση της απόδοσης των μεταλλικών εξαρτημάτων, με στόχο την πρόληψη αστοχιών και την εφαρμογή προβλεπτικής συντήρησης (predictive maintenance). Η ενσωμάτωση σύγχρονων αισθητήρων στις ανάρτησεις επιτρέπει την ακριβή καταγραφή δεδομένων σχετικά με την κατάσταση των ελατηρίων, τα φορτία που ασκούνται, τις δονήσεις και τις αλλαγές στη θερμοκρασία. Οι πληροφορίες αυτές είναι ουσιώδεις για την πρόληψη φθορών και τη βελτίωση της ασφάλειας των σιδηροδρομικών συστημάτων (Xu et al., 2018).

Οι αισθητήρες τάσης (strain gauges) είναι από τους πιο διαδεδομένους τύπους αισθητήρων στα συστήματα ανάρτησης. Τοποθετούνται απευθείας στα ελατήρια ή στις μεταλλικές δομές της ανάρτησης και μετρούν την παραμόρφωση που προκαλείται από τα μηχανικά φορτία. Αυτές οι μετρήσεις επιτρέπουν τον ακριβή υπολογισμό των τάσεων που ασκούνται στο σύστημα, ενώ μέσω της ανάλυσης των δεδομένων μπορεί να εκτιμηθεί η κόπωση των υλικών και η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων (Ghofrani et al., 2018).

Ένας άλλος σημαντικός τύπος αισθητήρων είναι οι επιταχυνσιόμετρα, τα οποία μετρούν τις δονήσεις και τις επιταχύνσεις που υφίστανται τα συστήματα ανάρτησης κατά τη λειτουργία των τρένων. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων βοηθά στον εντοπισμό αστοχιών, όπως ανωμαλίες στη διαδρομή, κακή ευθυγράμμιση ή φθορά στα εξαρτήματα της ανάρτησης. Επιπλέον, συμβάλλουν στον εντοπισμό προβλημάτων που μπορεί να επηρεάσουν την άνεση των επιβατών ή την αποτελεσματικότητα του τροχαίου υλικού (Xu et al., 2018).

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας παρακολουθούν τις θερμικές συνθήκες των συστημάτων ανάρτησης, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή των μεταλλικών υλικών και να επιταχύνουν την κόπωση τους. Μέσω αυτών των αισθητήρων, μπορούν να ληφθούν προληπτικά μέτρα για την αποτροπή θερμικών αστοχιών, ειδικά σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες ή σε καταστάσεις έντονης χρήσης του συστήματος.

Τα συστήματα παρακολούθησης που βασίζονται σε τεχνολογίες Internet of Things (IoT) επιτρέπουν την ασύρματη μεταφορά δεδομένων από τους αισθητήρες προς τα κέντρα ελέγχου και συντήρησης. Η χρήση αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την άμεση ανάλυση των δεδομένων και την εφαρμογή προβλεπτικής συντήρησης με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Το κύριο πλεονέκτημα των IoT συστημάτων είναι η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης των ανάρτησεων σε πραγματικό χρόνο, χωρίς την ανάγκη για φυσική επιθεώρηση (Niu et al., 2010).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί και στη συμμόρφωση των αισθητήρων με τα διεθνή σιδηροδρομικά πρότυπα, τα οποία καθορίζουν τις απαιτήσεις ποιότητας, ακρίβειας και αξιοπιστίας των μετρήσεων. Τα πρότυπα αυτά διασφαλίζουν ότι τα συστήματα παρακολούθησης πληρούν τις προδιαγραφές ασφαλείας και λειτουργικής απόδοσης που απαιτούνται για τη χρήση σε σιδηροδρομικά δίκτυα (Corman & Kecman, 2018).

Τέλος, η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες. Μέσω προηγμένων αλγορίθμων, μπορεί να γίνει έγκαιρη ανίχνευση ανωμαλιών και πρόβλεψη πιθανών αστοχιών, επιτρέποντας την έγκαιρη συντήρηση των συστημάτων ανάρτησης. Αυτό μειώνει το κόστος συντήρησης, αυξάνει τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων και βελτιώνει την ασφάλεια του σιδηροδρομικού δικτύου (Corman & Kecman, 2018).

4.9 Διεθνή Σιδηροδρομικά Πρότυπα και Κανονισμοί

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει ένα κοινό κανονιστικό πλαίσιο για την ασφάλεια των σιδηροδρόμων μέσω της Οδηγίας (ΕΕ) 2016/798, η οποία αναδιατυπώνει και αντικαθιστά την προηγούμενη Οδηγία 2004/49/ΕΚ. Αυτή η οδηγία καθορίζει τις απαιτήσεις για τη διαχείριση της ασφάλειας, την πιστοποίηση των σιδηροδρομικών επιχειρήσεων και των διαχειριστών υποδομής, καθώς και τις διαδικασίες για τη διερεύνηση ατυχημάτων. Στόχος είναι η διατήρηση και η συνεχής βελτίωση της ασφάλειας στο ευρωπαϊκό σιδηροδρομικό σύστημα (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2016).

Επιπλέον, ο Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 1371/2007 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου αφορά τα δικαιώματα και τις υποχρεώσεις των επιβατών σιδηροδρομικών γραμμών. Αυτός ο κανονισμός ενισχύει τα δικαιώματα των επιβατών, διασφαλίζοντας την παροχή πληροφοριών πριν και κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, την αποζημίωση σε περίπτωση καθυστερήσεων, καθώς και την πρόσβαση σε υπηρεσίες για άτομα με αναπηρία ή μειωμένη κινητικότητα (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2006).

Σε εθνικό επίπεδο, η Ελλάδα έχει εναρμονίσει τη νομοθεσία της με την Οδηγία 2012/34/ΕΕ μέσω του Νόμου 4408/2016, ο οποίος καθορίζει το πλαίσιο για τη δημιουργία ενιαίου ευρωπαϊκού σιδηροδρομικού χώρου. Αυτός ο νόμος ρυθμίζει θέματα όπως η αδειοδότηση των σιδηροδρομικών επιχειρήσεων, η κατανομή της χωρητικότητας της υποδομής και η τιμολόγηση, καθώς και η λειτουργία του ρυθμιστικού φορέα για τον σιδηροδρομικό τομέα (Ελληνική Δημοκρατία, 2016).

Τα διεθνή πρότυπα, όπως τα πρότυπα της σειράς EN, καθορίζουν τις τεχνικές προδιαγραφές για τα σιδηροδρομικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων για την αντοχή σε κόπωση των υλικών, τις διαδικασίες δοκιμών και τις προδιαγραφές για τα συστήματα σηματοδότησης και ελέγχου. Η συμμόρφωση με αυτά τα πρότυπα είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας και της ασφάλειας των σιδηροδρομικών συστημάτων (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2016).

Ένα από τα βασικά διεθνή πρότυπα που ακολουθούνται στη σιδηροδρομική βιομηχανία είναι το EN 50126, το οποίο καλύπτει τον κύκλο ζωής των συστημάτων, από τον σχεδιασμό έως την απόσυρση. Το πρότυπο αυτό εστιάζει στην αξιοπιστία, τη διαθεσιμότητα, τη συντηρησιμότητα και την ασφάλεια (RAMS). Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ανάρτησης πρέπει να συμμορφώνονται με αυτές τις απαιτήσεις για να διασφαλίζεται η μακροχρόνια βιωσιμότητα και αποτελεσματικότητά τους (CENELEC, 1999).

Επιπλέον, το EN 50155 καθορίζει τις προδιαγραφές για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε τροχαίο υλικό. Αυτό το πρότυπο ορίζει τα όρια για τη θερμοκρασία λειτουργίας, την υγρασία, τους κραδασμούς και την αντοχή στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι αισθητήρες που παρακολουθούν την κόπωση των ελατηρίων και άλλα κρίσιμα μέρη της ανάρτησης πρέπει να συμμορφώνονται με αυτά τα κριτήρια για να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία τους υπό διαφορετικές συνθήκες (CENELEC, 2007).



Εικόνα 29. Κανονισμοί ISO στον Σιδηρόδρομο.

Πηγή: <https://www.bioworld.com/blogs/2-bioworld-medtech-perspectives/post/515748-goldilocks-or-bust-the-fdas-regulatory-harmonization-dilemma>

προβλεπτικής συντήρησης (International Organisation for Standardization, 2003).

Αξίζει να σημειωθεί πως η συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνική αρτιότητα των αισθητήρων, αλλά επεκτείνεται και στην ασφάλεια των δεδομένων που συλλέγονται. Η προστασία των δεδομένων αυτών είναι σημαντική, ιδίως όταν πρόκειται για ασύρματα συστήματα παρακολούθησης που βασίζονται σε τεχνολογίες IoT. Τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες πρέπει να κρυπτογραφούνται και να προστατεύονται από πιθανές επιθέσεις στον κυβερνοχώρο, όπως προβλέπεται από τα πρότυπα ασφάλειας πληροφοριών, όπως το ISO/IEC 27001 (International Organisation for Standardization, 2013).

Η συμμόρφωση με αυτά τα πρότυπα είναι ουσιώδης για την επίτευξη ενός ασφαλούς και αποδοτικού συστήματος παρακολούθησης. Επιπλέον, εξασφαλίζει ότι το σιδηροδρομικό τροχαίο υλικό μπορεί να λειτουργήσει σε διαφορετικά δίκτυα και χώρες, ενισχύοντας τη διεθνή συνεργασία και διευκολύνοντας τις μεταφορές σε παγκόσμιο επίπεδο (International Union of Railways, 2020).

Τέλος, η συμμόρφωση με τα σιδηροδρομικά πρότυπα αποτελεί βασικό κριτήριο και για τη βελτίωση της εμπορικής αποδοτικότητας. Οι φορείς διαχείρισης σιδηροδρομικών δικτύων και

οι εταιρείες συντήρησης εξαρτώνται από αξιόπιστες τεχνολογίες που τηρούν τα διεθνή πρότυπα για να μειώσουν το κόστος συντήρησης, να προλάβουν αστοχίες και να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής του τροχαίου υλικού (European Railway Agency, 2018).

4.10 Προκλήσεις και Προοπτικές Εξέλιξης

Η ανάπτυξη και υιοθέτηση συστημάτων παρακολούθησης ανάρτησης στα σιδηροδρομικά δίκτυα αντιμετωπίζει μια σειρά από προκλήσεις, οι οποίες αφορούν τόσο τεχνολογικούς όσο και οικονομικούς παράγοντες. Παρά τις δυσκολίες, οι προοπτικές εξέλιξης των συστημάτων αυτών είναι σημαντικές, ιδιαίτερα με την πρόοδο της τεχνητής νοημοσύνης, του Διαδικτύου των Πραγμάτων και της μηχανικής μάθησης, που συμβάλλουν στη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας τους (Brake et al., 2005).

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις αφορά την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι αισθητήρες που παρακολουθούν την κόπωση των ελατηρίων πρέπει να προσφέρουν ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, εξωτερικοί παράγοντες όπως οι κραδασμοί, οι μεταβολές της θερμοκρασίας και η υγρασία μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια των δεδομένων, δημιουργώντας προβλήματα στην αξιοπιστία των μετρήσεων. Επιπλέον, η συντήρηση των ίδιων των αισθητήρων αποτελεί επίσης πρόκληση, καθώς αυτά τα συστήματα λειτουργούν σε ιδιαίτερα απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως οι σιδηροδρομικές γραμμές, και απαιτούν περιοδικό έλεγχο και συντήρηση για να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία τους. Η ανάγκη για συχνή συντήρηση αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα της διαχείρισης αυτών των συστημάτων, καθιστώντας τη μακροχρόνια αξιοποίησή τους απαιτητική (Cordero et al., 2018).

Πέρα από τις τεχνολογικές δυσκολίες, η οικονομική διάσταση αποτελεί έναν ακόμη παράγοντα που καθιστά δύσκολη την υιοθέτηση αυτών των συστημάτων. Η υψηλή αρχική επένδυση είναι ένα από τα βασικά εμπόδια, καθώς οι εταιρείες σιδηροδρόμων πρέπει να διαθέσουν σημαντικούς πόρους για την ανάπτυξη νέων υποδομών, την εγκατάσταση αισθητήρων και τεχνολογικού εξοπλισμού, καθώς και για την εκπαίδευση εξειδικευμένου προσωπικού που θα αναλάβει την ανάλυση των δεδομένων. Το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των συστημάτων αυτών παραμένει σημαντικό, γεγονός που καθιστά το εγχείρημα οικονομικά δύσκολο, ιδιαίτερα για μικρότερες εταιρείες. Παράλληλα, η απόδοση της επένδυσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς, αν και η προληπτική συντήρηση μπορεί να μειώσει

μακροπρόθεσμα το κόστος των επισκευών, η αρχική δαπάνη και ο χρόνος απόδοσης μπορεί να αποθαρρύνουν πολλούς οργανισμούς από την υιοθέτησή τους (Brake et al., 2005).

Ένα ακόμη ζήτημα είναι η συμμόρφωση με τα διεθνή και εθνικά πρότυπα, η οποία αποτελεί σημαντική πρόκληση για τις εταιρείες που επιδιώκουν την υιοθέτηση συστημάτων παρακολούθησης ανάρτησης. Η εναρμόνιση των συστημάτων αυτών με τα σιδηροδρομικά πρότυπα, όπως τα EN 50126 και EN 50155, απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία και προσαρμογή των τεχνολογικών λύσεων στις προδιαγραφές που προβλέπονται. Η αποτυχία συμμόρφωσης μπορεί να οδηγήσει σε νομικά και λειτουργικά προβλήματα, ιδιαίτερα σε διεθνείς σιδηροδρομικές γραμμές όπου η συμβατότητα των συστημάτων είναι απαραίτητη για την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία.

Παρά τις προκλήσεις, οι προοπτικές εξέλιξης των συστημάτων παρακολούθησης ανάρτησης είναι αισιόδοξες. Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης επιτρέπει τη βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων. Η ανάλυση δεδομένων που συλλέγονται από αισθητήρες μπορεί να εντοπίσει μοτίβα φθοράς και να προβλέψει πότε απαιτείται συντήρηση, μειώνοντας έτσι τις απρογραμματίστες βλάβες και βελτιώνοντας τη συνολική αξιοπιστία των σιδηροδρομικών συστημάτων. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) προσφέρει επίσης νέες δυνατότητες διασύνδεσης μεταξύ αισθητήρων και κεντρικών συστημάτων παρακολούθησης, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, οι εταιρείες μπορούν να ανταποκρίνονται άμεσα σε πιθανά προβλήματα, ενισχύοντας τη λειτουργικότητα και μειώνοντας το λειτουργικό κόστος (Cordero et al., 2018).

Επιπλέον, η ανάπτυξη cyber-physical systems αναμένεται να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στον τομέα της παρακολούθησης των σιδηροδρομικών συστημάτων. Αυτά τα συστήματα ενσωματώνουν τον φυσικό κόσμο με τον ψηφιακό, επιτρέποντας την αυτοματοποίηση διαδικασιών και τη μείωση του ανθρώπινου λάθους. Η πρόοδος στη νανοτεχνολογία και η χρήση προηγμένων υλικών θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ακόμη μικρότερους και πιο ευαίσθητους αισθητήρες, με μειωμένο κόστος παραγωγής και αυξημένη αντοχή στις δύσκολες συνθήκες των σιδηροδρομικών γραμμών (Bigi et al., 2018).

Η μελλοντική εξέλιξη των συστημάτων αυτών ενδέχεται να επεκταθεί σε ακόμη πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως η ανίχνευση ανωμαλιών στις ράγες και στην επιφάνεια κύλισης μέσω αισθητήρων δόνησης υψηλής ανάλυσης. Παράλληλα, η ανάπτυξη αυτόνομων

συστημάτων συντήρησης που θα βασίζονται σε δεδομένα από αισθητήρες παρακολούθησης μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω βελτιώσεις. Αυτά τα συστήματα θα μπορούσαν να προσαρμόζουν αυτόματα τις παραμέτρους των αναρτήσεων ή να προειδοποιούν το προσωπικό συντήρησης για άμεση επέμβαση (Bruni et al., 2007).

Η τεχνολογική πρόοδος και η αυξανόμενη επένδυση σε προηγμένα συστήματα παρακολούθησης ανοίγουν τον δρόμο για ένα πιο αξιόπιστο, αποδοτικό και ασφαλές σιδηροδρομικό δίκτυο. Οι οργανισμοί που θα επενδύσουν σε αυτές τις καινοτομίες θα είναι σε θέση να μειώσουν το κόστος συντήρησης, να βελτιώσουν την απόδοση και να προσφέρουν υψηλότερα επίπεδα ασφάλειας στους επιβάτες και το προσωπικό τους. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, η προληπτική και προβλεπτική συντήρηση θα καταστεί ακόμα πιο ακριβής, επιτρέποντας στα σιδηροδρομικά δίκτυα να λειτουργούν με μεγαλύτερη αξιοπιστία και βιωσιμότητα (Li et al., 2021).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

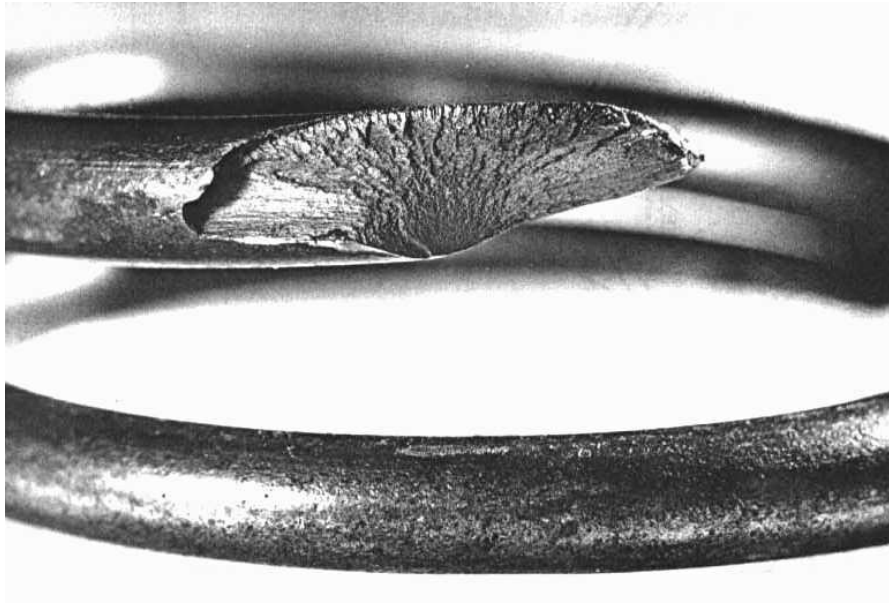
Η βασική ιδέα του πειραματικού μέρους της εν λόγω εργασίας είναι η κατασκευή μίας ΙΟΤ ασύρματης συσκευής η οποία θα μπορεί να καταγράφει δύο φυσικές τιμές μέσω δύο αισθητήρων.

1. Καταγραφή της καταπόνησης μέσω ενός strain sensor, για την συγκεκριμένη καταγραφή χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας STRAIN GAUGE.
2. Καταγραφή της θερμοκρασίας, όπου ο αισθητήρας θερμοκρασίας εγκαταστάθηκε στο λιποκιβώτιο του τροχού του φορείου και είναι τύπου DS18B20, ο οποίος είναι τεχνολογίας one wire bus interface.

5.1 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΠΩΣΗΣ

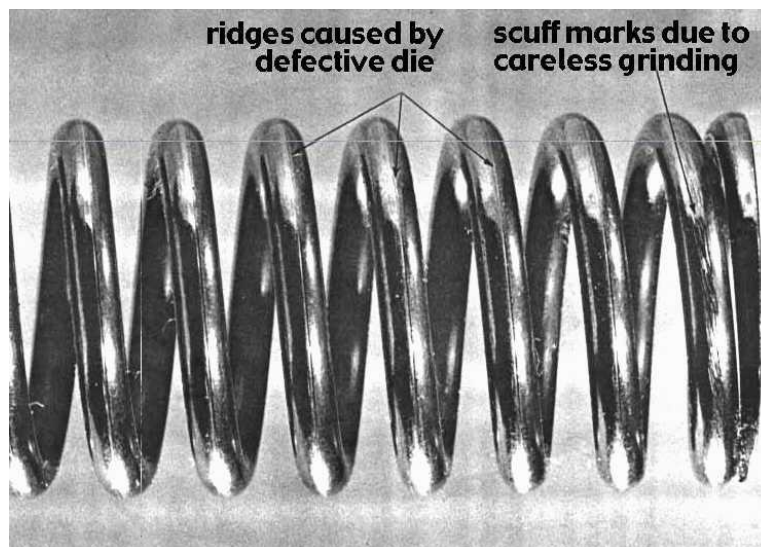
Η καταγραφή της καταπόνησης το οποίο είναι και το μείζον μέγεθος το οποίο θέλουμε να μετρήσουμε ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε και να καταγράψουμε κατά την πάροδο του χρόνου την κόπωση που έχουν υποστεί οι μεταλλικές σπειροειδείς αναρτήσεις του συρμού. Στην ουσία η συσκευή ΙΟΤ θα καταγράφει τους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης του ελατηρίου ώστε να επιβλέπετε και να προβλέπετε η φθορά του και να αντιμετωπίζεται αναλόγως με το πλάνο συντήρησης ή ακόμη και να προβλέπετε η αντικατάσταση του. Ο βασικός λόγος για τον οποίο είναι σημαντική η επιτήρηση της κόπωσης των αναρτήσεων είναι ότι ένα μεταλλικό εξάρτημα όταν υποβληθεί σε εναλλασσόμενες περιοδικές και συνεχείς καταπονήσεις, είναι δυνατόν να οδηγηθεί σε θραύση για τιμές τάσεων κατά πολύ μικρότερες της αντοχής του σε εφελκυσμό ή ακόμη και του ορίου διαρροής του. Η θραύση η οποία προκαλείται από κόπωση επέρχεται χωρίς προηγούμενη παραμόρφωση και είναι άκρος βίαιη διότι το μεταλλικό στοιχείο παρουσιάζει χαρακτηριστική όψη σε δύο ζώνες. Δευτερευόντως, η διάταξη αυτή θα μπορεί να εξάγει σημαντικές πληροφορίες εκτός από τους συντηρητές του συρμού αλλά και για τους συντηρητές της επίγειας εγκατάστασης, δηλαδή τις γραμμές και τα σκύρα, όπου όταν θα υπάρχει μία έντονη δόνηση η οποία θα εμφανίζεται συστηματικά σε συγκεκριμένα σημεία της διαδρομής, δηλαδή δημιουργείτε κάποιο pattern τότε το συμπέρασμα θα είναι ότι το συγκεκριμένο σημείο θα πρέπει να ελεγχθεί και να επισκευαστεί. Έτσι με αυτό τον τρόπο επιτήρησης θα υπάρχει μεγαλύτερη ασφάλεια για τυχόν εκτροχιασμούς και το κόστος συντήρησης των τροχών θα μειωθεί και αυτό.

Στην εικόνα παρακάτω παρουσιάζεται ελατήριο το οποίο έχει υποστεί θραύση λόγω κόπωσης, η μακροσκοπική εικόνα αποδεικνύει την βίαιη χωρίς προειδοποίηση θραύση.



Εικόνα 30 : Μακροσκοπική εικόνα θραύσης ελατηρίου αναρτήσεως τραίνου. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.

Αρκετές όμως είναι και οι περιπτώσεις που θα πρέπει να εξεταστεί μία θραύση η οποία δεν συνδέεται με την κόπωση αλλά έχει επέλθει χωρίς να έχει περάσει το UTS (ultimate tensile stress). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι οποίες μπορεί να προέχονται από κατασκευαστική αστοχία θα πρέπει να μπορεί αν υπάρχει ιχνηλασιμότητα και με την συσκευή της καταγραφής της καταπόνησης θα δίνεται η δυνατότητα να ιχνηλατούντα και οι περιπτώσεις αυτές και να ενημερώνεται ο κατασκευαστής ώστε να αποτρέψει και να διορθώσει την τυχόν αστοχία στην παραγωγική διαδικασία του ελατηρίου. Στην εικόνα παρακάτω απεικονίζονται αστοχίες επάνω στο ελατήριο λόγο ελαττωματικής μήτρας κατά την διάρκεια του εφελκυσμού η οποία δημιούργησε αυλακώσεις στην επιφάνεια του ελατηρίου καθώς και σημάδια λόγω μη σωστής διαδικασίας κατά την λείανση.



Εικόνα 31: Εικόνα ελαττωματικού ελατηρίου μετά από την παραγωγή. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.

Τα IOT συστήματα μαζί με τον συνδυασμό της στατιστικής επιστήμης έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν συνθήκες ώστε μέσω υπολογισμών να εκτελούν σήματα προγνωστικής συντήρησης,

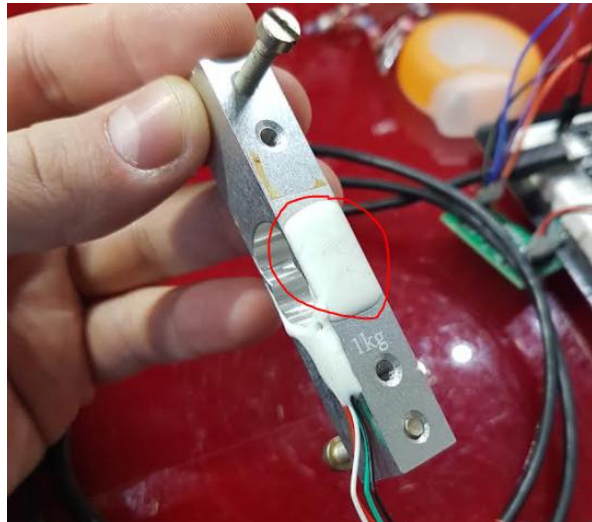
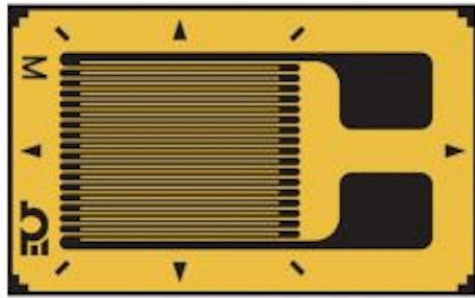
1. όπου θα μειώνεται ο χρόνος της προληπτικής συντήρησης.
2. Θα υπάρχει συνεχής παρακολούθηση της εξέλιξης μίας επισκευής.
3. Θα είναι πιο γρήγορα αντιληπτές οι βλάβες.
4. Θα μπορεί ο τεχνίτης να παρακολουθεί από οποιοδήποτε σημείο στον κόσμο την κατάσταση του τροχαίου υλικού.
5. Θα μπορεί το τμήμα συντήρησης των τροχιών (ράγες – γραμμές) να έχει πλήρη εικόνα για τις σημειακές βλάβες στο δίκτυο και να τις επισκευάσει.

5.2 Hardware της Εφαρμογής

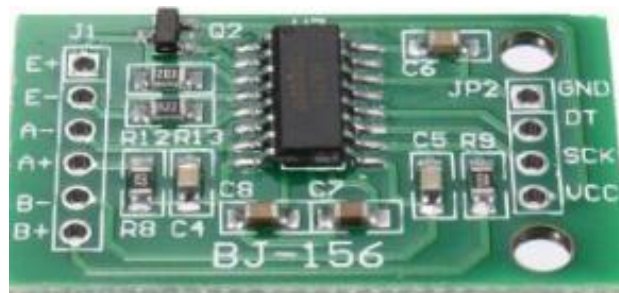
Το wireless IoT το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της εφαρμογής είναι το ESP8266 (εικόνα 32) με πλατφόρμα προγραμματισμού την Arduino IDE καθώς και ένας αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20 με πρωτόκολλο επικοινωνίας One-wire-bus. Και για την μέτρηση της μεταβολής τη ελαστικότητας του ελατηρίου χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας strain gauge ο οποίος είναι τοποθετημένος σε σχεδόν άκαμπτο μπλόκ αλουμινίου (εικόνα 33) και ένας ενισχυτής σήματος μεταβλητής αντίστασης τύπου HX711 (εικόνα 34). Για τον έλεγχο της σύνδεσης στο διαδίκτυο τοποθετήθηκε οθόνη LCD 16x2 (εικόνα 35) η οποία καταγράφει την επιτυχή σύνδεση στο διαδίκτυο καθώς και την τρέχουσα τιμή άσκησης πίεσης στο ελατήριο σε MPa.



Εικόνα 32: Απεικόνιση του ESP8266 module. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 33: Εικόνα του αισθητήρα strain-gauge. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 34: Εικόνα της ενισχυτικής διάταξης HX711. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 35: Εικόνα της LCD οθόνης 16x2.. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.

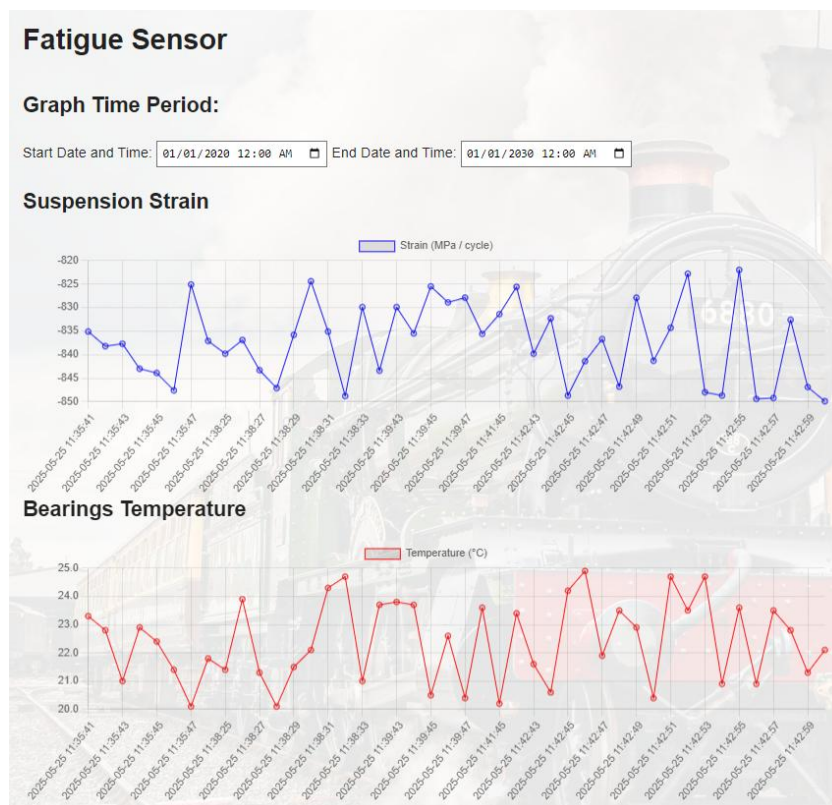
5.3 Cloud Server

Ο **cloud server** που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας, έγινε προκειμένου ο χρήστης να έχει ένα τρόπο διεπαφής με το μετρητικό σύστημα. Για την υλοποίηση αυτής της διεπαφής χρειάστηκε να αναπτυχθεί ένας **python web server**, με τη χρήση της βιβλιοθήκης **flask** και μία **html** σελίδα <http://fatigue.dynv6.net:1111/> . Ο web server εκτελείται σε έναν υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα **Linux**, ο οποίος έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Ο **python web server** έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει μηνύματα από το μετρητικό σύστημα της μορφής HTTP request. Όταν το μετρητικό σύστημα στείλει το πακέτο πληροφορίας στον Web server, ο web server το αναλύει και αποθηκεύει το λαμβανόμενο μήνυμα σε ένα αρχείο τύπου CSV, τοπικά, στον υπολογιστή όπου εκτελείται. Όταν λοιπόν ο χρήστης επισκεφτεί την html σελίδα, ο web server θα αναζητήσει τις πληροφορίες που πρόκειται να παρουσιάσει στη σελίδα σε αυτό το τοπικό αρχείο **csv**. Ο Python web server αποτελεί το **back-end** της διεπαφής με τον χρήστη, που εξυπηρετεί όλα τα αιτήματα λήψης πληροφορίας και παρουσίασης στο χρήστη και η html σελίδα αποτελεί το **front-end**.

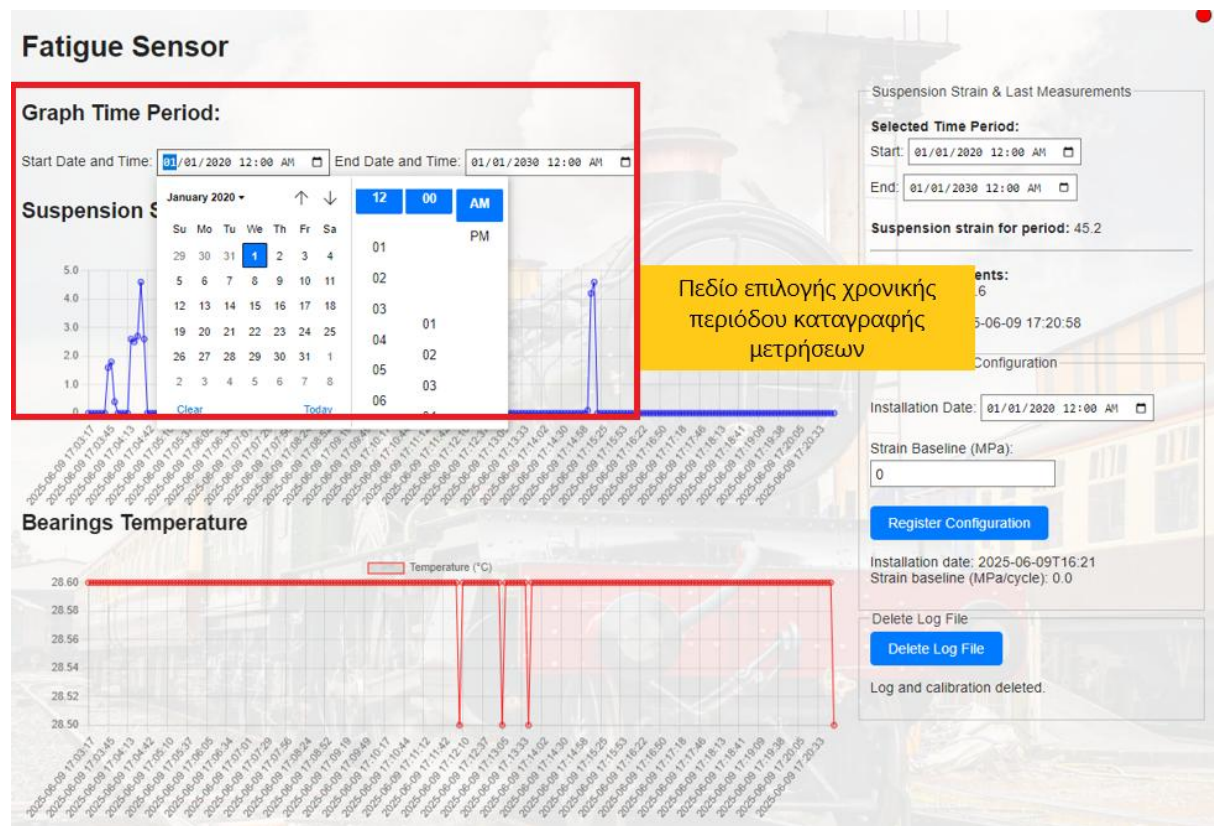
Η html σελίδα που αναπτύχθηκε, προσφέρει τις εξής δυνατότητες στον χρήστη:

1. Να ελέγχει σε πραγματικό χρόνο την κόπωση ανά κύκλο (strain MPa/Cycle) σε συνάρτηση του χρόνου καθώς και την θερμοκρασία του λιποκιβωτίου σε συνάρτηση του χρόνου (εικόνα 36).



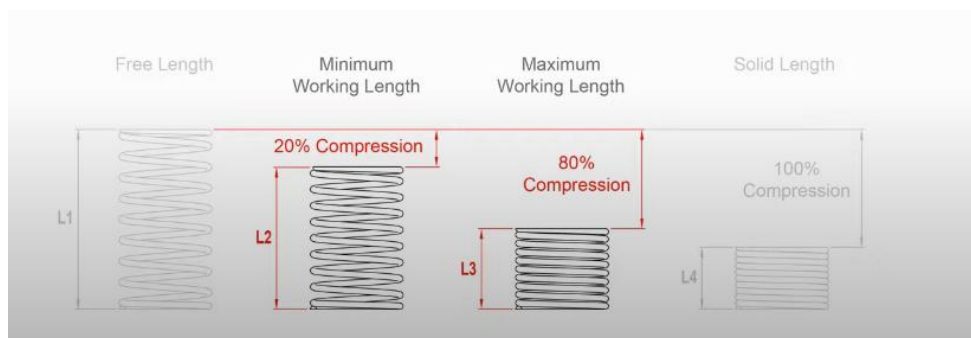
Εικόνα 36: Απεικόνιση του temperature and strain template στην εφαρμογή του χρήστη. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.

2. Επίσης έχει την δυνατότητα να μπορεί να ελέγξει παλαιότερες μετρήσεις οι οποίες έχουν αποθηκευτεί στο cloud έχοντας έτσι τον πλήρη έλεγχο και το ιστορικό της θερμοκρασίας των λιποκιβωτιών του τραίνου (εικόνα 36).

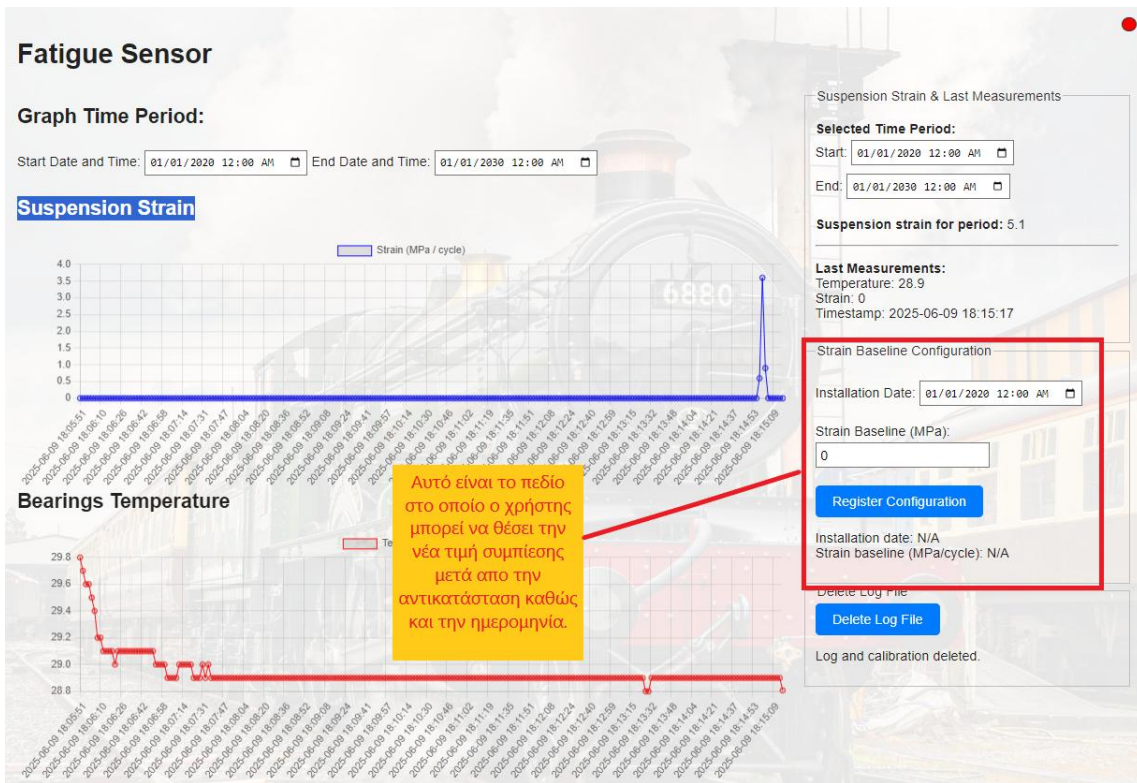


Εικόνα 37: Απεικόνιση της επιλογής χρονικής περιόδου καταγραφής μετρήσεων.. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.

3. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα από το πεδίο **“Strain Base Line Configuration”** να θέσει την νέα τιμή συμπίεσης όταν γίνεται αντικατάσταση του ελατηρίου και την ημερομηνία που έγινε η αντικατάσταση. Ο λόγος που πρέπει να τεθεί αυτή η νέα τιμή όταν γίνεται αντικατάσταση ελατηρίου είναι διότι τα χαρακτηριστικά του καινούριου ελατηρίου είναι διαφορετικά από αυτά του παλαιού καθώς και ότι το ελατήριο όταν τοποθετηθεί στο φορείο και έπειτα επικαθήσει το βαγόνι συνδεθεί με το φορείο τότε το ελατήριο υπόκειται σε μία μόνιμη πίεση λόγω του βάρους του βαγονιού (εικόνα 38-39).

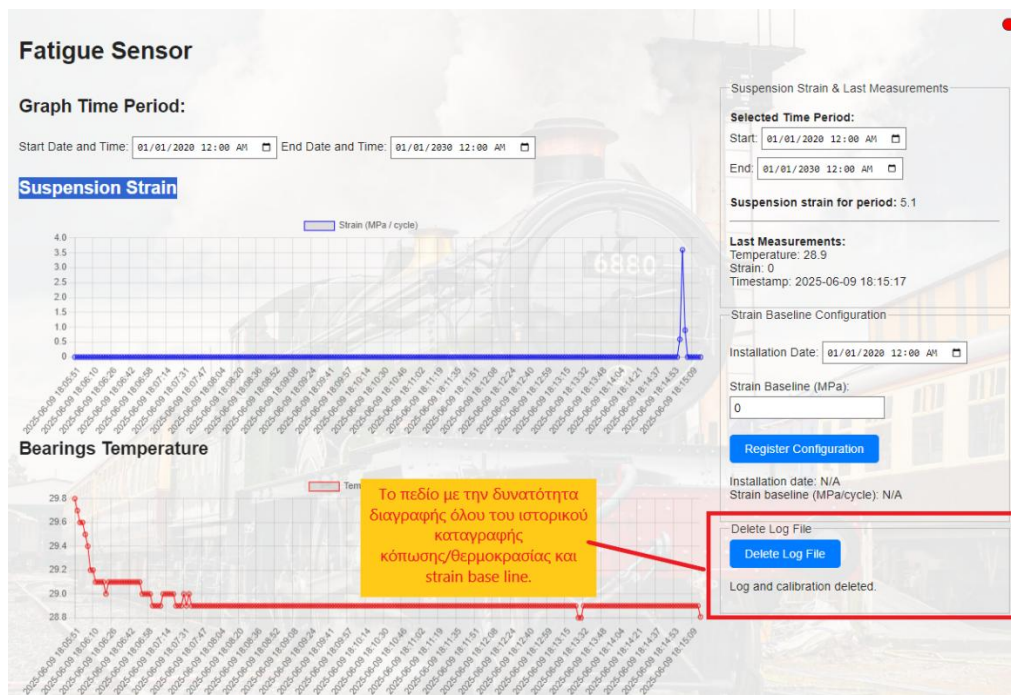


Εικόνα 38: Τα στάδια συμπίεσης του ελατηρίου. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 39: Το πεδίο αλλαγής της νέα τιμής συμπίεσης και της ημερομηνίας αντικατάστασης του νέου ελατηρίου. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.

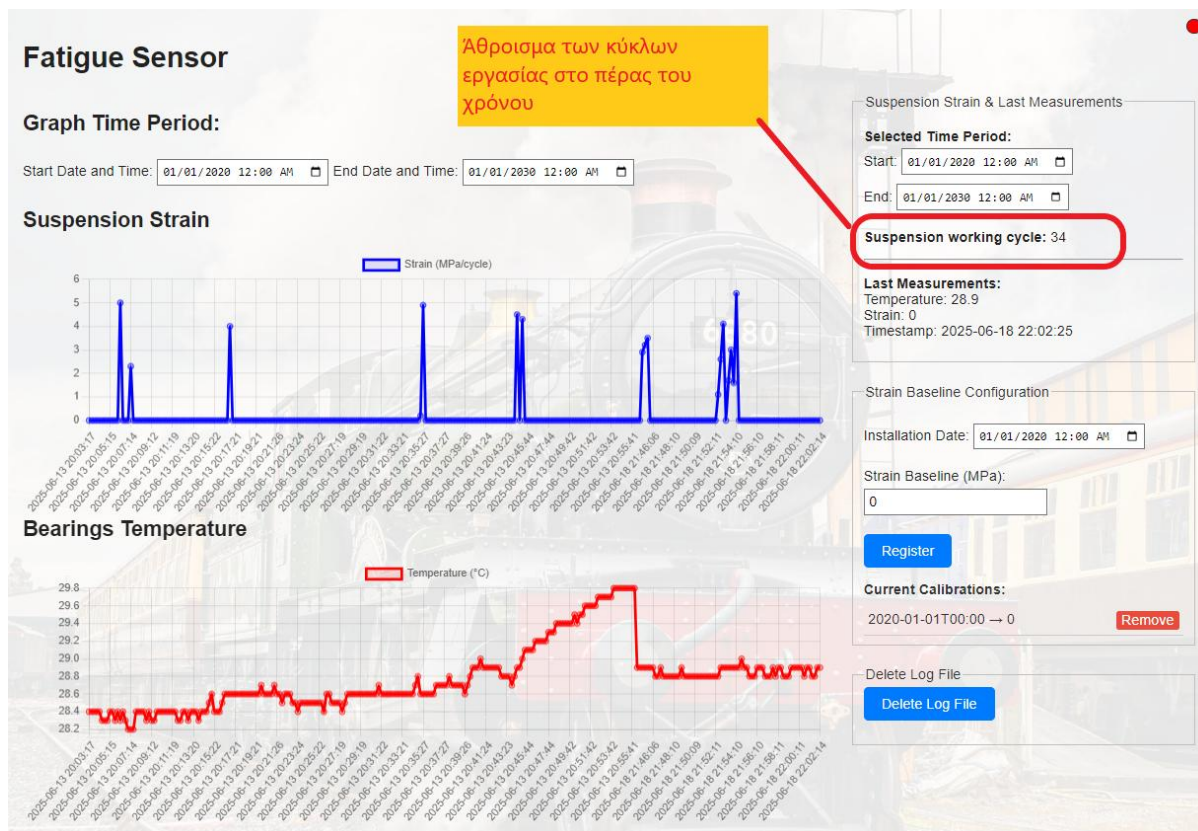
4. Στο πεδίο "Delete Log File" ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διαγράψει όλο το ιστορικό καταγραφής θερμοκρασίας και κόπωσης και της τιμής strain base line (εικόνα 40).



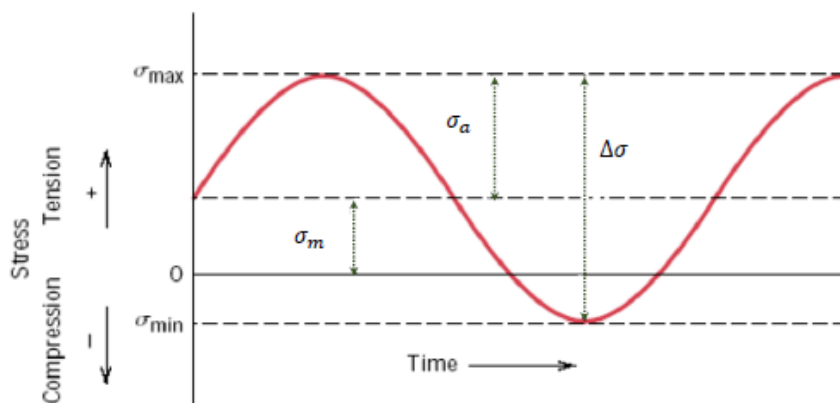
Εικόνα 40: Το πεδίο για την δυνατότητα διαγραφής ιστορικού. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.

5. Στο πεδίο "Suspension Working Cycle" υπολογίζεται προσθετικά το πλάτος των τάσεων ανά κύκλο (εικόνα 41) : $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ (εικόνα 42) ένας κύκλος ορίζεται μία πλήρης θετική λήψη τιμής πίεσης ή μία αρνητική μέχρι τον μηδενισμό της.

- Όπου $\Delta\sigma$ είναι το εύρος των τάσεων.
- Όπου σ_{max} , η μέγιστη τάση του κύκλου.
- Όπου σ_{min} , η ελάχιστη τάση του κύκλου.

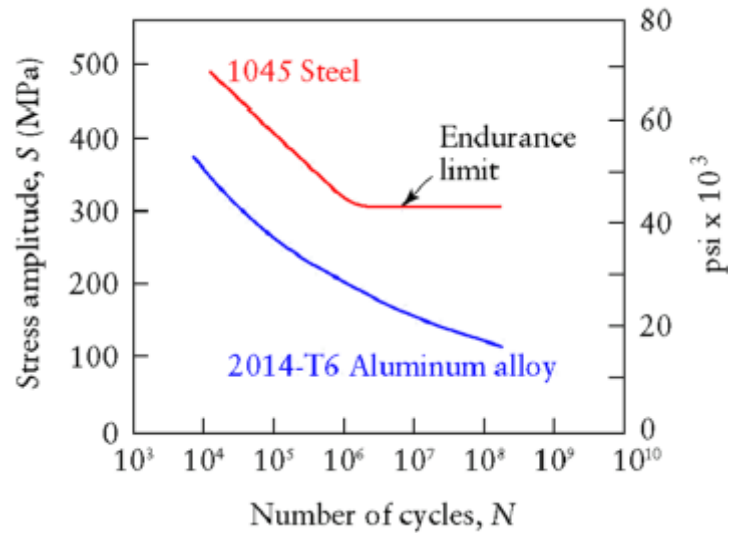


Εικόνα 41: Άθροισμα κύκλων καταπόνησης ελατηρίου.. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 42: Διάγραμμα τάσης σε συνάρτηση του χρόνου. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.

Ένα τυπικό παράδειγμα το οποίο μας δείχνει το όριο κόπωσης ενός υλικού σε συνάρτηση των τάσεων που υπόκειται και του χρόνου είναι τα διαγράμματα S-N ή καμπύλη Wohler. Στο διάγραμμα της εικόνας 42, είναι δύο μεταλλικά κράματα τα οποία αναφέρουν το όριο κόπωσης τους στο χρόνο :



Εικόνα 44: Διάγραμμα Wohler των κραμάτων, χάλυβα 1045 και αλουμίνιο 2014-T6. Πηγή : Προσωπικό αρχείο.

Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι ο χάλυβας 1045 εμφανίζει όριο κόπωσης σε αντίθεση του αλουμινίου.

5.4 ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ESP8266 MODULE

5.4.1 Βιβλιοθήκες

```
1 |
2 | #include <ESP8266WiFi.h>
3 | #include <WiFiClient.h>
4 | #include <NTPClient.h>
5 | #include <WiFiUdp.h>
6 | #include "HX711.h"
7 | #include <LiquidCrystal_I2C.h>
8 | #include <OneWire.h>
9 | #include <DallasTemperature.h>
```

Εισαγωγή των βιβλιοθηκών που χρησιμοποιήθηκαν.

1. Βιβλιοθήκη του ESP8266.
2. Βιβλιοθήκη της σύνδεσης WIFI.
3. Βιβλιοθήκη WiFiUdp, η οποία επιτρέπει να αποστέλλονται πακέτα δεδομένων μέσω WIFI (User Datagram Protocol).
4. Βιβλιοθήκη για την σύνδεση σε NTPC server.
5. Βιβλιοθήκη LiquidCrystal_I2C, η οποία είναι υπεύθυνη για την λειτουργία και την επικοινωνία της εξωτερικής οθόνης υγρών κρυστάλλων με πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C.
6. Βιβλιοθήκη HX711, είναι το πρωτόκολλο επικοινωνίας Avia Semiconductor **HX711** 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC).
7. Βιβλιοθήκη OneWire, είναι το πρωτόκολλο επικοινωνίας για τους αισθητήρες DALLAS One Wire protocol.
8. Βιβλιοθήκη DallasTemperature, είναι το πρωτόκολλο επικοινωνίας για τον αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20.

5.4.2 Ρυθμίσεις WIFI

```
19 | // Wifi settings
20 | const char* ssid = "apostolos";
21 | const char* password = "2310782547";
22 | WiFiClient client;
23 |
```

Σε αυτό το πεδίο εισαγάγουμε το όνομα του WIFI δικτύου καθώς και το PassWord.

5.4.3 Ρυθμίσεις σύνδεσης με τον SERVER

```
24 | // Define NTP parameters to get the timestamp
25 | const char* ntpServer = "pool.ntp.org";
26 | const long gmtoffsetInSeconds = 0; // Replace with your time zone offset in seconds (e.g., 3600 for UTC+1)
27 | const int daylightOffsetInSeconds = 3600; // Replace with daylight saving offset if applicable
28 | WiFiUDP ntpUDP;
29 | NTPClient timeClient(ntpUDP, ntpServer, gmtoffsetInSeconds);
30 |
31 | // Replace this with the IPv4 address of your Python web server
32 | const char* serverIP = "65.21.1.44";
33 | const int serverPort = 1111;
.. |
```

Σε αυτό το πεδίο ορίζουμε το πρωτόκολλο επικοινωνίας το οποίο είναι IPV4 , την IP του SERVER καθώς και την PORT του Server.

5.4.4 Status σύνδεσης

```
48 bool check_connection_status(WiFiClient& client)
49 {
50     if(!client.connected())
51     {
52         return false;
53     }
54     else
55     {
56         return true;
57     }
58 }
59
```

Σε αυτό το πεδίο ελέγχεται εάν έχει επιτευχθεί η σύνδεση στο δίκτυο WIFI.

5.4.5 Σύνδεση στον SERVER και αποστολή πακέτων δεδομένων

```
void sendToServer(WiFiClient& client, String data) {
    // Check if the client is connected
    if (!check_connection_status(client)) {
        // Attempt to connect to the server
        int connectionAttempts = 0;
        while (!client.connect(serverIP, serverPort)) {
            connectionAttempts++;
            if (connectionAttempts >= maxConnectionAttempts) {
                Serial.println("Failed to connect to server after multiple attempts.");
                return; // Exit the function if maximum attempts are reached
            }

            delay(80); // Wait for 0.1 second before retrying
        }

        // Connected to server, send data
        client.print("POST /data_send HTTP/1.1\r\n");
        client.print("Host: ");
        client.print(serverIP);
        client.print("\r\n");
        client.print("Content-Length: ");
        client.print(data.length());
        client.print("\r\n");
        client.print("Content-Type: text/plain\r\n");
        client.print("\r\n");
        client.print(data);
        client.print("\r\n");
        client.flush(100);
        Serial.println("Data sent to server!");
    }
}
```

Σε αυτό το πεδίο πλέον έχουμε το loop με στο οποίο προσπαθεί να συνδεθεί το ESP με τον cloud server καθώς και όταν αυτό επιτευχθεί ξεκινάει η αποστολή των δεδομένων τάσης και θερμοκρασίας.

5.4.6 Διαμόρφωση της οθόνης υγρών κρυστάλλων

```
93 void setup()
94 {
95     Serial.begin(115200);
96     pinMode(rbutton, INPUT_PULLUP);
97     scale.begin(D5, D6);
98     scale.set_scale();
99     scale.tare(); //Reset the scale to 0
100    long zero_factor = scale.read_average();
101    lcd.begin(16,2);
102    lcd.init();
103    lcd.backlight();
104    lcd.setCursor(6,0);
105    lcd.print("IOT");
106    lcd.setCursor(1,1);
107    lcd.print("Fatigue Scale");
108    delay(3000);
109    lcd.clear();
110    lcd.print("Connecting Wifi");
111    WiFi.begin(ssid, password);
112    delay(1000);
113    //Serial.print(".");
114    lcd.clear();
115    //Serial.println("");
116    Serial.println("WiFi connected");
117    lcd.clear();
118    lcd.print("WiFi connected");
119
120    delay(2000);
121    startTime = millis();
122 }
```

Σε αυτό το πεδίο του compiler έχουμε την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης της οθόνης υγρών κρυστάλλων.

5.4.7 Διαμόρφωση του Αισθητήρα θερμοκρασίας

```
143 // Get temperature from ds18b20
144 ds18b20.requestTemperatures(); // Send the command to get temperatures
145 float temperature = ds18b20.getTempCByIndex(0);
146 // Send the command to get temperatures
147 //float temperature = random(2500, 2701) / 100.0;
148 // Create a single string to send to the server
149 // Create a JSON payload
150 String jsonPayload = "{"temperature':" + String(temperature) +
151                      ", 'weight':" + String(weight) +
152                      ", 'timestamp':" + String(current_time) + "}";
153 // Send the data to the Python web server
154 sendToServer(client, jsonPayload);
155
156 // Check if calibration button is pressed
157 if ( digitalRead(rbutton) == LOW)
158 {
159     scale.set_scale();
160     scale.tare(); //Reset the scale to 0
161 }
162
163 // Measurement period is 1 second. After measuring, just wait here.
164 while(millis() - startTime < 1000)
165 {
166     delay(10);
167 }
168 startTime = millis();
169 }
```

Σε αυτό το πεδίο του κώδικα είναι η διαμόρφωση του αισθητήρα θερμοκρασίας DALLAS DS18b20.

5.5 PYTHON SERVER

Ο python web server τρέχει σε ένα linux virtual machine (Linux υπολογιστή) από το hetzner.com. Αυτός ο υπολογιστής έχει συγκεκριμένη ip, την οποία αν γράψουμε στον Browser, θα εμφανιστεί η html σελίδα με τις μετρήσεις. Η ip αυτή είναι: 135.181.204.173. Για να μη θυμόμαστε τα νούμερα, μέσω της σελίδας dynv6.com μπορούμε να κάνουμε link αυτή την ip με ένα όνομα ιστοσελίδας (DNS – domain name server). Το όνομα της ιστοσελίδας στην προκειμένη είναι: <http://hos-sensor.dynv6.net:1111/>. Άρα είτε γράψουμε 135.181.204.173:1111 είτε <http://hos-sensor.dynv6.net:1111/> στον Browser μας, είναι ακριβώς το ίδιο πράγμα.

Ο τρόπος λειτουργίας του Flask server, βασίζεται στο χαρακτηριστικό της Python, που ονομάζεται decorator. Μέσω της χρήσης των decorators, ο Flask server “γνωρίζει” ποια συνάρτηση θα εκτελέσει, κάθε φορά που πραγματοποιείται ένα http request, με στόχο τη διεύθυνση του online server (τη διεύθυνση IP). Αντίστοιχα, για την αλληλεπίδραση με τον server, ο χρήστης πρέπει να πραγματοποιήσει http request, τύπου POST. Το **HTTP** σημαίνει **HyperText Transfer Protocol** και είναι το βασικό πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων στον Παγκόσμιο Ιστό (Web). Οι HTTP Requests (ή αιτήματα HTTP) είναι ένας βασικός τρόπος με τον οποίο επικοινωνούν μεταξύ τους οι υπολογιστές στο διαδίκτυο – συγκεκριμένα, ένας client, όπως ένας browser, επικοινωνεί με έναν διακομιστή (server) για να ζητήσει πληροφορίες. Ένα **HTTP Request** είναι ένα **αίτημα** που στέλνει ένας πελάτης (π.χ. ο browser σου) σε έναν εξυπηρετητή (server), ζητώντας κάποιο πόρο – όπως μια ιστοσελίδα, μια εικόνα, ή δεδομένα από ένα API.

Για την πληρέστερη κατανόηση της δια-λειτουργικότητας του back-end και του front-end, θα μελετηθούν 2 από τα βασικά APIs:

1. Όταν το Arduino στέλνει δεδομένα στον server, στην πραγματικότητα είναι ένα POST request, στην IP διεύθυνση του server, στη διαδρομή /data_send. Ο python decorator:

```
@app.route('/data_send', methods=['POST'])
δίνει την εντολή στον Flask server να εκτελέσει τη συνάρτηση receive_message():
@app.route('/data_send', methods=['POST'])
def receive_message():
    """
    Endpoint for sensor/device to POST data messages.
    Expects message body as Python dict string literal, e.g.:
    {'temperature':25.3,'weight':3.4,'timestamp':1686585600}
    Parses via ast.literal_eval for safety, writes to DATA_LOG_FILE,
    and updates last_receive_ts for liveness checks.
    """
    global last_receive_ts
    try:
        # Safely parse incoming literal
        d = ast.literal_eval(request.data.decode())
        last_receive_ts = int(datetime.datetime.utcnow().timestamp())
```

```

d['timestamp'] = int(d['timestamp'])
# Append to CSV
with open(DATA_LOG_FILE, 'a', newline='') as f:
    writer = csv.DictWriter(f, fieldnames=d.keys())
    writer.writerow(d)
return "All ok"
except Exception as e:
    # Return error details for debugging
    return f"Error: {e}", 400

```

η οποία λαμβάνει και αποθηκεύει τα δεδομένα τοπικά στον server.

2. Όταν ο χρήστης πατήσει το κουμπί Delete log file:



Ο python decorator:

```

@app.route('/delete_log', methods=['POST'])
οδηγεί τον Flask server στο να εκτελέσει τη συνάρτηση:
@app.route('/delete_log', methods=['POST'])
def delete_log():
    """
    Utility endpoint to clear both data log and calibration file,
    and reset in-memory state. Use with caution.
    """
    global last_receive_ts
    for fn in (DATA_LOG_FILE, CALIBRATION_FILE):
        if os.path.exists(fn):
            os.remove(fn)
    calibration_dict.clear()
    last_receive_ts = None
    return "Log and calibration deleted."

```

Και έτσι ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διαγράψει όλες τις μετρήσεις και τα calibration που έχουν γίνει, στην ουσία η συνάρτηση διαγράφει όλο το αρχείο data_log.csv.

3. Όταν ο χρήστης πατήσει το κουμπί Remove :

Εκτελείται η παρακάτω συνάρτηση όπου διαγράφονται μόνο οι τιμές και οι ημερομηνίες των calibration που έχει θέσει ο χρήστης.



```

@app.route('/delete_calibration', methods=['POST'])
def delete_calibration():
    """
    Remove calibration(s) for a given timestamp (exact match).
    Rewrites CSV & in-memory lists accordingly.
    Returns success or 404 if timestamp not found.
    """
    global calibration_dict, calibration_times, calibration_offsets

```

```

ts_str = request.form['calibration_date']

if ts_str in calibration_dict:
    del calibration_dict[ts_str]

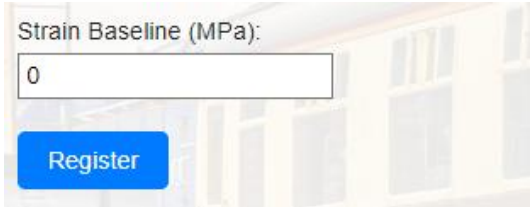
    # Rebuild entries & file as above
    entries = []
    for k, offset in calibration_dict.items():
        ts_int = int(datetime.datetime.strptime(k, "%Y-%m-%dT%H:%M").timestamp())
        entries.append((ts_int, k, offset))
    entries.sort(key=lambda x: x[0])
    with open(CALIBRATION_FILE, 'w', newline='') as f:
        writer = csv.DictWriter(f,
fieldnames=['calibration_date', 'calibration_offset'])
        for _, k, offset in entries:
            writer.writerow({'calibration_date': k, 'calibration_offset':
offset})

    # Update lookup lists
    calibration_times = [e[0] for e in entries]
    calibration_offsets = [e[2] for e in entries]
    return "Calibration removed."
else:
    return "Timestamp not found.", 404

```

4. Όταν ο χρήστης πατήσει το κουμπί Register :

Ο web server εκτελεί την παρακάτω συνάρτηση και αποθηκεύει την τιμή στο πεδίο αναγραφής Strain base line το οποίο στην ουσία είναι το calibration offset.



```

@app.route('/register_calibration', methods=['POST'])
def register_calibration():
    """
    Accepts form data:
        calibration_date (ISO string), calibration_offset (float)
    Updates the in-memory dict, rewrites the CSV file sorted,
    rebuilds lookup lists, and returns success message.
    """
    global calibration_dict, calibration_times, calibration_offsets

    # Read form values
    cd = request.form['calibration_date']
    co = float(request.form['calibration_offset'])

```

```

# Overwrite or add new entry
calibration_dict[cd] = co

# Rebuild sorted entries list
entries = []
for ts_str, offset in calibration_dict.items():
    ts_int = int(datetime.datetime.strptime(ts_str, "%Y-%m-%dT%H:%M").timestamp())
    entries.append((ts_int, ts_str, offset))
entries.sort(key=lambda x: x[0])

# Rewrite CSV file in order
with open(CALIBRATION_FILE, 'w', newline='') as f:
    writer = csv.DictWriter(f,
fieldnames=['calibration_date', 'calibration_offset'])
    for _, ts_str, offset in entries:
        writer.writerow({'calibration_date': ts_str, 'calibration_offset':
offset})

# Update lookup lists
calibration_times = [e[0] for e in entries]
calibration_offsets = [e[2] for e in entries]

return "Calibration registered successfully." # Simple text response

```

5. Με την παρακάτω συνάρτηση ο webserver θέτει την μόνιμη επιβολή βάρους (από το βαγόνι) μετά από μία αλλαγή ελατηρίου :

```

@app.route('/get_calibration')
def get_calibration():
    """
    Return the most recently written calibration entry (last line of CSV),
    or empty JSON if none exists.
    """
    if not os.path.exists(CALIBRATION_FILE):
        return jsonify({})
    # Read all rows; return last
    rows = list(csv.DictReader(open(CALIBRATION_FILE),
fieldnames=['calibration_date', 'calibration_o
ffset']))
    return jsonify(rows[-1] if rows else {})

```

6. Η παρακάτω συνάρτηση αρχικά κάνει fetch την πληροφορία ημερομηνίας και ώρας που έχει επιλέξει ο χρήστης. Μετά διαβάζει το data_log.csv (όπου ο web server έχει αποθηκεύσει όλη τη λαμβανόμενη πληροφορία από το Arduino) και κρατάει μόνο τις μετρήσεις που έχουν ληφθεί τη χρονική περίοδο που έχει επιλέξει ο χρήστης. Αφού τις πάρει αυτές τις πληροφορίες από το data_log.csv, τότε τις προωθεί στην html σελίδα.

```
# Fetch downsampled data for charts
s2 = request.args.get('start_datetime_temp')
e2 = request.args.get('end_datetime_temp')
temps2, wts2, ts2, lt, lw, lts = get_data_from_csv(s2, e2)

# Build JSON response
return jsonify({
    'timestamps':      ts2,
    'temperatures':   temps2,
    'weights':         wts2,
    'last_timestamp': lts,
    'last_weight':    lw,
    'last_temperature': lt,
    'strain':          calc_strain,
    'alive':           alive_flag
})
```

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η ανάλυση του συστήματος μέτρησης και παρακολούθησης για τη συντήρηση των αναρτήσεων τροχαίου υλικού ανέδειξε τον κρίσιμο ρόλο που διαδραματίζουν τα συστήματα παρακολούθησης σε σύγχρονα σιδηροδρομικά δίκτυα. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως οι αισθητήρες, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και οι τεχνικές μηχανικής μάθησης οδηγούν σε σημαντικές βελτιώσεις στην ασφάλεια, την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα της προληπτικής συντήρησης. Η παρακολούθηση της κόπωσης των μεταλλικών ελατηρίων των αναρτήσεων είναι θεμελιώδης για την αποτροπή απρογραμμάτιστων βλαβών και την αύξηση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων. Το predictive maintenance αναδεικνύεται ως μια εξαιρετικά αποτελεσματική στρατηγική, προσφέροντας σημαντική μείωση του κόστους συντήρησης, καλύτερη αξιοποίηση του τροχαίου υλικού και ενίσχυση της ασφάλειας των σιδηροδρομικών δικτύων. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών συναντά αρκετές προκλήσεις, όπως το υψηλό αρχικό κόστος, οι τεχνικές δυσκολίες στη συντήρηση των αισθητήρων και οι αυστηρές απαιτήσεις συμμόρφωσης με τα διεθνή πρότυπα. Επιπλέον, η διαχείριση και ανάλυση των μεγάλων όγκων δεδομένων που παράγονται από τα συστήματα παρακολούθησης απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό και προηγμένες τεχνολογικές λύσεις.

Για να διασφαλιστεί η επιτυχής εφαρμογή και αξιοποίηση των συστημάτων παρακολούθησης των αναρτήσεων, προτείνονται τα εξής. Οι εταιρείες σιδηροδρομικών μεταφορών πρέπει να επενδύσουν σε καινοτόμες τεχνολογίες, εστιάζοντας σε αισθητήρες υψηλής ακρίβειας, τεχνολογίες ανάλυσης δεδομένων και συστήματα που συνδυάζουν την τεχνητή νοημοσύνη με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Η κατάρτιση των τεχνικών συντήρησης και των μηχανικών δεδομένων θα πρέπει να αποτελέσει βασικό άξονα των επενδύσεων. Το εξειδικευμένο προσωπικό θα είναι σε θέση να διαχειριστεί πολύπλοκα δεδομένα και να προγραμματίσει τη συντήρηση με βάση τα ευρήματα των συστημάτων παρακολούθησης. Η συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα, όπως τα EN 50126 και EN 50155, πρέπει να αποτελεί βασική προτεραιότητα για τις εταιρείες σιδηροδρόμων, ώστε να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η διαλειτουργικότητα των συστημάτων σε διεθνές επίπεδο.

Η ανάπτυξη συστημάτων που βασίζονται σε αλγορίθμους AI μπορεί να βελτιώσει την πρόβλεψη βλαβών και να προτείνει βέλτιστες στρατηγικές συντήρησης, μειώνοντας

ταυτόχρονα τον χρόνο απόκρισης σε πιθανά προβλήματα. Οι κυβερνήσεις και οι οργανισμοί μεταφορών μπορούν να προωθήσουν την ευρεία εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών, προσφέροντας κίνητρα για επενδύσεις και επιδοτήσεις, διευκολύνοντας έτσι τις μικρότερες εταιρείες να υιοθετήσουν σύγχρονες τεχνολογικές λύσεις. Η συνεργασία με ακαδημαϊκούς φορείς και ερευνητικά κέντρα μπορεί να οδηγήσει σε καινοτόμες λύσεις, ενώ παράλληλα προωθεί τη διαρκή εξέλιξη των τεχνολογιών παρακολούθησης. Οι υπάρχουσες στρατηγικές συντήρησης πρέπει να επανεξεταστούν και να αναβαθμιστούν με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται από τα συστήματα παρακολούθησης. Αυτό θα επιτρέψει στις εταιρείες να υιοθετήσουν μοντέλα προληπτικής συντήρησης, προσαρμοσμένα στις πραγματικές ανάγκες του τροχαίου υλικού.

Η ενσωμάτωση των συστημάτων παρακολούθησης των αναρτήσεων τροχαίου υλικού στο πλαίσιο της προγνωστικής συντήρησης (predictive maintenance) αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς τον εκσυγχρονισμό του σιδηροδρομικού τομέα. Παρά τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η υιοθέτησή τους, οι τεχνολογικές εξελίξεις, η ανάπτυξη και η βελτίωση των διαδικασιών συντήρησης υπόσχονται καλύτερη απόδοση, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων και υψηλότερη ασφάλεια για τους επιβάτες και το προσωπικό. Με σωστό σχεδιασμό, επενδύσεις σε καινοτομία και συνεργασίες με φορείς που ειδικεύονται στην τεχνολογική ανάπτυξη, οι σιδηροδρομικές εταιρείες μπορούν να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες των συστημάτων αυτών και να διασφαλίσουν τη βιώσιμη ανάπτυξη και τον εκσυγχρονισμό του τομέα των μεταφορών στο μέλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

- Αγγελόπουλος, Ν. (2005). *Ιστορία της Μεταλλουργίας: Από την Αρχαιότητα έως τη Σύγχρονη Εποχή*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπαζήση.
- Αντωνίου, Γ. (2019). *Χαρακτηριστικά αισθητήρων*. Εκδόσεις Τζιολα, Θεσσαλονίκη.
- Βασιλείου, Κ. (2010). *Μεταλλουργικά Υλικά και Εφαρμογές τους στα Μέσα Μεταφοράς*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Γεωργίου, Π. (2012). *Ιδιότητες των Μετάλλων και οι Εφαρμογές τους στη Βιομηχανία*. Πάτρα: Εκδόσεις Πεδίο.
- Δημητρίου, Α. (2008). *Τύποι Μεταλλουργίας και οι Τεχνολογικές τους Εξελίξεις*. Ηράκλειο: Εκδόσεις Κρήτης.
- Ελευθεριάδης, Σ. (2015). *Μεταλλουργία και Τροχαίο Υλικό: Υλικά και Τεχνολογίες*. Λάρισα: Εκδόσεις Γραφή.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2016). *Νόμος 4408/2016: Εναρμόνιση της νομοθεσίας με την Οδηγία 2012/34/ΕΕ για τη δημιουργία ενιαίου ευρωπαϊκού σιδηροδρομικού χώρου. ΦΕΚ Α' 135/27.07.2016*.
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2016). *Οδηγία (ΕΕ) 2016/797 σχετικά με τη διαλειτουργικότητα του σιδηροδρομικού συστήματος στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*.
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο. (2007). *Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 1371/2007 σχετικά με τα δικαιώματα και τις υποχρεώσεις των επιβατών σιδηροδρομικών γραμμών. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*.
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο. (2016). *Οδηγία (ΕΕ) 2016/798 για την ασφάλεια των σιδηροδρόμων. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*.
- Ζαφειρόπουλος, Μ. (2011). *Σύγχρονες Μέθοδοι Μεταλλουργίας και Εφαρμογές τους*. Ιωάννινα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
- Ηλιόπουλος, Γ. (2009). *Μεταλλικά Υλικά: Ιδιότητες, Επεξεργασία και Χρήσεις*. Καβάλα: Εκδόσεις Τεχνολογίας.
- Θεοδωρόπουλος, Δ. (2013). *Ιστορική Εξέλιξη της Μεταλλουργίας και οι Προκλήσεις του Μέλλοντος*. Βόλος: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

- Ιωαννίδης, Χ. (2016). *Μεταλλουργικά Υλικά στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς: Ιδιότητες και Προδιαγραφές*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη.
- Καραγιάννης, Ν. (2014). *Τεχνολογίες Μεταλλουργίας και οι Εφαρμογές τους στη Βιομηχανία*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Κυριακίδη.
- Κάρκαλου, Ν. Ε. (2019). *Μελέτη της εγκάρσιας συμπεριφοράς σιδηροδρομικών οχημάτων*. Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Καρτσάκλη, Μ. (2012). *Εγκάρσιες και διαμήκεις δυνάμεις ασκούμενες στη σιδηροδρομική υποδομή*. Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Παπαδόπουλος, Ν. (2015). *Πολυκυκλική κόπωση χάλυβα ελατηρίων 51CrV4 με εγκοπές*. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Λαμπρόπουλος, Α. (2017). *Μεταλλουργία: Θεωρία και Πράξη*. Πάτρα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- Μακρής, Θ. (2008). *Μηχανική των υλικών*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία
- Μακρής, Σ. (2012). *Επιλέγοντας αισθητήρα: CCD ή CMOS*; Εκδόσεις Security Manager, Αθήνα.
- Μακρής, Π. (2018). *Ιδιότητες των Μετάλλων και η Σημασία τους στην Κατασκευή Τροχαίου Υλικού*. Ηράκλειο: Εκδόσεις Κρήτης.
- Μαριολάκος, Ι. (2013). *Μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα των Ελλήνων κατά την αρχαιότητα*. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 50(1), 1-14.
- Μαυρίδης, Π. (2010). *Τεχνολογία μετάλλων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Μητρόπουλος, Κ. (2012). *Δοκιμές υλικών και αντοχή*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Νικολαΐδης, Σ. (2019). *Σύγχρονες Τάσεις στη Μεταλλουργία και οι Εφαρμογές τους*. Λάρισα: Εκδόσεις Γραφή.
- Ξανθόπουλος, Κ. (2020). *Μεταλλουργικά Υλικά: Από την Παραγωγή στην Εφαρμογή*. Ιωάννινα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
- Οικονόμου, Γ. (2021). *Ιστορία της Μεταλλουργίας: Τεχνολογικές Καινοτομίες και Εξελίξεις*. Καβάλα: Εκδόσεις Τεχνολογίας.
- Παπαδόπουλος, Δ. (2021). *Εφαρμογές μετρήσεων: Επιλογή αισθητήρα*. Εκδόσεις eClass, Ηράκλειο.
- Παπαδόπουλος, Δ. (2022). *Μεταλλουργία και Τροχαίο Υλικό: Νέα Υλικά και Τεχνολογίες*. Βόλος: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.
- Ράπτης, Α. (2023). *Ιδιότητες των Μετάλλων και οι Εφαρμογές τους στη Σύγχρονη Βιομηχανία*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη.

- Σαμαράς, Ν. (2024). *Τύποι Μεταλλουργίας και οι Επιπτώσεις τους στο Περιβάλλον*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Κυριακίδη.
- Σχοινάς, Ν. Κ. (2019). *Μηχανική Σιδηροδρομικών Συστημάτων*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας.
- Τζανής, Π. (2025). *Μεταλλουργικά Υλικά: Καινοτομίες και Προοπτικές*. Πάτρα: Εκδόσεις Πεδίο.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Amruthnath, N., & Gupta, T. (2018). *A research study on unsupervised machine learning algorithms for fault detection in predictive maintenance*. 2018 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), 1–9.
- Amruthnath, N., & Gupta, T. (2018). *Fault class prediction in unsupervised learning using model-based clustering approach*. 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 355–361.
- Anderson, T. L. (1995). *Fracture mechanics: Fundamentals and applications*. CRC Press.
- Anderson, T. L. (2005). *Fracture mechanics: Fundamentals and applications* (3rd ed.). CRC Press.
- Bannantine, J. A., Comer, J. J., & Handrock, J. L. (1990). *Fundamentals of metal fatigue analysis*. Prentice Hall.
- Barbosa, B., Serrador, A., & Casaleiro, J. (2023). *Condition monitoring maintenance in train bogie: A low-cost acceleration sensor proposal*. Centre Technology and Systems-CTS, NOVA School of Science & Tech, Caparica, Portugal.
- Barke, D., & Chiu, W. K. (2005). A review of the effects of rolling contact fatigue on railway track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 219(5), 325-342. SAGE Publications.
- Beden, S. M., Abdullah, S., & Ariffin, A. K. (2009). *Review of fatigue crack propagation models for metallic components*. *European Journal of Scientific Research*, 28(3), 364-397.
- Bigi, A., Mueller, M., Grange, S. K., Ghermandi, G., & Hueglin, C. (2018). *Performance of NO, NO2 low-cost sensors and three calibration approaches within a real-world application*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 3717–3735.

- Broek, D. (1982). *Elementary engineering fracture mechanics* (3rd ed.). Martinus Nijhoff Publishers.
- Bruni, S., Goodall, R., Mei, T. X., & Tsunashima, H. (2007). *Control and monitoring for railway vehicle dynamics*. *Vehicle System Dynamics*, 45(7-8), 743-779.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's mechanical engineering design* (9th ed.). McGraw-Hill.
- Cahn, R. W. (1994). Trends in physical metallurgy. In S. Banerjee & R. V. Ramanujan (Eds.), *Advances in Physical Metallurgy* (pp. 1–5). Gordon & Breach Publishers.
- Callister, W. D. (2007). *Materials science and engineering: An introduction* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- CENELEC. (1999). *EN 50126: Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability, and safety (RAMS)*.
- CENELEC. (2007). *EN 50155: Railway applications - Electronic equipment used on rolling stock*. European Committee for Electrotechnical Standardization.
- Çınar, Z. M., Abdussalam Nuhu, A., Zeeshan, Q., Korhan, O., Asmael, M., & Safaei, B. (2020). *Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in Industry 4.0*. *Sustainability*, 12(19), 8211.
- Cocconcelli, M., & Rizzo, R. (2018). *Predictive maintenance in railway transportation systems based on big data streaming analysis*. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 9, 1-12.
- Corman, F., & Kecman, P. (2018). Real-time detection and monitoring for railway track maintenance: A predictive analytics approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 599-615. Elsevier.
- Cordero, J. M., Borge, R., & Narros, A. (2018). *Using statistical methods to carry out in-field calibrations of low-cost air quality sensors*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 267, 245–254.
- Crossland, B. (1956). *Effect of large hydrostatic pressures on the torsional fatigue strength of an alloy steel*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 165(1), 138–148. SAGE Publications.
- Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., & Barbosa, J. (2020). *Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges*. *Computers in Industry*, 123, 103298.

- Dokas, I., Zeleskidis, A., & Papadopoulos, B. (2018). *Dynamic determination and calculation of the safety level in major hazard accident systems: A proposed mathematical model*. *SafeKozani 2018, 5th International Conference on Civil Protection & New Technologies*, Kozani, Greece, 31 Oct – 3 Nov, 262–273.
- Dowling, N. E. (2007). *Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue* (3rd ed.). Pearson.
- European Council. (2004). *Regulation (EC) No 881/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 establishing a European Railway Agency (Agency Regulation)*. *Official Journal of the European Union*, 164, 1–43.
- European Railway Agency (ERA). (2018). *Guide to European railway standards and interoperability*. Valenciennes, France: ERA Publications.
- Famurewa, S. M., Asplund, M., & Kumar, U. (2015). *Optimisation of maintenance track possession time: A tamping case study*. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 16(2), 139-155.
- Findlay, C. (2010). *History of steelworks' plant and equipment*. Wayback Machine.
- Fray, D. J. (2000). Aspects of technology transfer. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 31B, 1153–1162.
- Fuchs, H. O., & Stephens, R. I. (1980). *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons.
- Galar, D., Kumar, U., & Stenström, C. (2012). *Hybrid approach for railway condition monitoring based on wireless sensor networks*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(4), 512-527.
- García Márquez, F. P., Schmid, F., Collado, J. C., & Perea, M. (2010). *Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods*. *Renewable Energy*, 46, 169-178.
- Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1999). *Mechanics of materials* (4th ed.). PWS Publishing Company.
- Ghofrani, F., He, Q., Goverde, R. M. P., & Liu, X. (2018). *Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 90, 226-246.
- Goriveau, R., Medjaher, K., & Zerhouni, N. (2016). *From prognostics and health systems management to predictive maintenance 1: Monitoring and prognostics*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- Hertzberg, R. W. (1996). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials* (4th ed.). John Wiley & Sons.

- Heng, A., Zhang, S., Tan, A. C. C., & Mathew, J. (2009). *Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities. Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(3), 724-739.
- International Organization for Standardization. (2003). *ISO 13374-1: Condition monitoring and diagnostics of machines - Data processing, communication, and presentation*. Geneva, Switzerland: ISO.
- International Organization for Standardization. (2013). *ISO/IEC 27001: Information technology - Security techniques - Information security management systems - Requirements*. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO 13381-1:2004. (2004). *Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics – Part 1: General guidelines*. International Organization for Standardization.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
- Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., & Borowiak, A. (2019). *Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. Atmosphere*, 10, 506.
- Klingbeil, N. W. (2003). *A total fatigue life model for metallic structures under arbitrary loading. International Journal of Fatigue*, 25(2), 117-128.
- Lee, Y. L., Pan, J., Hathaway, R. B., & Barkey, M. E. (2005). *Fatigue testing and analysis: Theory and practice*. Butterworth-Heinemann.
- Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). *Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology, and applications. Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2), 314–334.
- Leveson, N., Daouk, M., Dulac, N., & Marais, K. (2003). *Applying STAMP in accident analysis. Working Paper Series, Engineering Systems Division, Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, MA.
- Li, M., Wang, P., Zhou, Y., & Luo, S. (2021). Recent advances in predictive maintenance for railway tracks: A review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 129, 103244. Elsevier.
- Liu, Y., & Mahadevan, S. (2005). *Multiaxial high-cycle fatigue criterion and life prediction for metals. International Journal of Fatigue*, 27(7), 790-800.

- Liu, W., Zhang, Y., Lin, H., Sun, X., & Yang, S. (2021). *AutoML-based predictive maintenance in smart manufacturing: A comprehensive review*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(6), 1343–1360.
- Maddox, S. J. (1991). *Fatigue strength of welded structures* (2nd ed.). Abington Publishing.
- Manson, S. S., & Halford, G. R. (2006). *Fatigue and durability of structural materials*. ASM International.
- Meggiolaro, M. A., & Castro, J. T. P. (2004). *Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions*. *International Journal of Fatigue*, 26(5), 463-476.
- Miner, M. A. (1945). *Cumulative damage in fatigue*. *Journal of Applied Mechanics*, 12(3), A159-A164.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- Niu, G., Yang, B., & Pecht, M. (2010). *Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance*. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(7), 786-796.
- Norton, R. L. (2006). *Machine design: An integrated approach* (3rd ed.). Pearson.
- Papuga, J. (2011). *A survey on evaluations of fatigue limit under multiaxial loading*. *International Journal of Fatigue*, 33(2), 153-165.
- Peng, Y., Dong, M., & Zuo, M. J. (2010). *Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: A review*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50, 297–313.
- Pook, L. P. (2007). *Metal fatigue: What it is, why it matters*. Springer.
- Poor, P., Ženišek, D., & Basl, J. (2019, August). *Historical overview of maintenance management strategies: Development from breakdown maintenance to predictive maintenance in accordance with four industrial revolutions*.
- Schijve, J. (2009). *Fatigue of structures and materials* (2nd ed.). Springer.
- Si, X. S., Wang, W., Hu, C. H., & Zhou, D. H. (2011). *Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches*. *European Journal of Operational Research*, 213(1), 1-14.
- Smith, K. N., Watson, P., & Topper, T. H. (1970). *A stress-strain function for the fatigue of metals*. *Journal of Materials*, 5(4), 767–778. ASTM International.
- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). *Metal fatigue in engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

- Stephens, R. I., & Fuchs, H. O. (2001). *Metal fatigue in engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Susto, G. A., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone, S., & Beghi, A. (2015). *Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(3), 812–820.
- Tada, H., Paris, P. C., & Irwin, G. R. (2000). *The stress analysis of cracks handbook* (3rd ed.). ASME Press.
- Taylor, D. (1999). *Fatigue of materials*. University Press.
- Tsang, A. H. C. (1995). *Condition-based maintenance: Tools and decision making*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 1(3), 3-17.
- Tsunashima, H., Naganuma, Y., & Matsumoto, A. (2014). *Condition monitoring of railway track and rolling stock*. *Vehicle System Dynamics*, 52(sup1), 380-394.
- UIC (International Union of Railways). (2020). *International railway standards and harmonization processes*. Paris, France: UIC Publications.
- Vachtsevanos, G., Lewis, F. L., Roemer, M., Hess, A., & Wu, B. (2006). *Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems*. Wiley.
- Vermes, C. (1973). *Fatigue design procedures*. John Wiley & Sons.
- Wang, W., & Zhang, W. (2008). *An asset residual life prediction model based on expert judgments*. *European Journal of Operational Research*, 188(2), 496-505.
- Xu, P., Ding, Y., Li, P., & Huang, Y. (2018). A comprehensive review of intelligent railway condition monitoring systems based on IoT and machine learning. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 8(2), 157-173. Elsevier.
- Yung-Li, L., Pan, J., Hathaway, R. B., & Barkey, M. E. (2005). *Fatigue testing and analysis: Theory and practice*. Elsevier.
- Zhang, J., & Mahadevan, S. (2000). *Fatigue reliability analysis using an integrated Kriging and finite element method*. *International Journal of Fatigue*, 22(9), 735–745.