



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

**Διερεύνηση Θεμάτων Φθοράς και Αποκατάστασης της
Επιφάνειας Κύλισης Σιδηροδρομικών Τροχών**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΑΝΔΡΟΥΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑΣ

Επιβλέπων : Αθανάσιος Μπαλλής
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν και με στήριξαν σε αυτήν την πορεία.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Αθανάσιο Μπαλλή, για την πολύτιμη καθοδήγηση και την αμέριστη υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κώστα Λυμπέρη γιατί με ενέπνευσε από τα μαθήματά του κατά τη διάρκεια των σπουδών, συμβάλλοντας καθοριστικά στο ενδιαφέρον που έχω αναπτύξει για το αντικείμενο της Σιδηροδρομικής.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χρήστο Μαμαλουκάκη της AMEL για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου παρείχε σχετικές το Μετρό και τη βοήθειά του στην επίλυση των αποριών που προέκυπταν στην πορεία της εκπόνησης της εργασίας.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Τσιάκα της AMEL για τις επιπλέον πληροφορίες για το Μετρό και το ενδιαφέρον του για την εργασία μου, τον κ. Σκούρα του ΗΣΑΠ για τη βοήθειά του στα θέματα που αφορούσαν τον ΗΣΑΠ, αλλά και τον κ. Μπουργάνη, εκπρόσωπο της εταιρείας του μηχανήματος του Τόρνου, για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου παρείχε.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τις διδάκτορες κ. Εύη Σφακιανάκη και κ. Τατιάνα Μοσχόβου και τον εξωτερικό επιστημονικό συνεργάτη της σχολής Ιωσήφ Καρούσο, που επίσης συνεισέφεραν σε θέματα γενικού περιεχομένου της εργασίας. Επίσης, την υπονήφια διδάκτορα Τατιάνα Γιαλαμά για τη βοήθεια που μου παρείχε ως προς τη βιβλιογραφία της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και το προσωπικό της AMEL που χειρίζεται το μηχάνημα του τóρνου για την επίδειξη του μηχανήματος και τη διάθεσή τους για την επίλυση των αποριών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Περίληψη

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της φθοράς και της αποκατάστασης της επιφάνειας κύλισης του σιδηροδρομικού τροχού και στοχεύει στον εντοπισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν του ρυθμό φθοράς και την αξιολόγηση της πρακτικής που ακολουθείται στη συντήρηση των τροχών των συρμών του Μετρό Αθηνών. Ελέγχεται αν θα ήταν προτιμότερο οι διαδικασίες τόννευσης των τροχών να γίνονται συχνότερα. Η διαδικασία συντήρησης περιλαμβάνει τον περιοδικό έλεγχο της φθοράς των τροχών και την τόννευσή τους, όταν η φθορά ξεπεράσει τα όρια που θέτει ο κατασκευαστής.

Στο εισαγωγικό τμήμα της εργασίας παρουσιάζονται τα είδη φθοράς που εμφανίζονται στον τροχό εξαιτίας της κύλισής του στη σιδηροτροχιά. Στη συνέχεια, γίνεται η συλλογή και η επεξεργασία στοιχείων της AMEL (δείγμα: 25 συρμοί), σε μία προσπάθεια εύρεσης της σχέσης που συνδέουν τη μεταβολή του ρυθμού φθοράς του τροχού σε σχέση με τη διανυθείσα απόσταση και τη φορά κίνησης του συρμού.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι ο ρυθμός φθοράς των τροχών των συρμών του Μετρό (απομείωση διαμέτρου τροχών), είναι της τάξεως των 2,8mm/100.000km και δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη διάμετρο του τροχού, η οποία μεταβάλλεται μετά από κάθε τόννευση. Αντίθετα, επηρεάζεται από τη φορά κίνησης των συρμών. Προτείνεται η αλλαγή του μετώπου κίνησης των συρμών σε τακτά διαστήματα, διαδικασία που αν και προβλέπεται, δεν ακολουθείται συστηματικά.

Ο υπολογισμός κόστους έδειξε ότι η τρέχουσα πρακτική που τηρείται στο Μετρό (τόννευση περίπου κάθε 80.000 χιλιόμετρα) είναι σωστή.

Λέξεις Κλειδιά: «σιδηροδρομικός τροχός, φθορά, τόννος, τόννευση, σιδηροτροχιά, Μετρό»

Abstract

This paper is a study in wear and restoration of the running surface of the railway wheel and its purpose is to determine the factors that affect wear rate and to evaluate the pattern used for the restoration of the wheels at the Athens subway. We examine whether the re-profiling procedure of the wheel should be performed more often. Maintenance procedure includes the periodic check of the wheel's wear and their re-profiling, when the wear breaks the manufacturer's limitations.

In particular, this paper opens with a presentation of the different types of wheel wear, which are caused from its scrolling on the rail. Subsequently, we collect and use AMEL data, to find the connection between the change in wheel's wear rate to the distance traveled, and the movement direction of the train.

The results showed that the wheel's wear rate on the subway (due to reduction in wheel's diameter), is at the magnitude of 2,8mm/100.000km and is not severely affected by the wheel's diameter, which is altered after each re-profiling. However, it is affected by the movement direction of the train. The change in the train's direction is recommended on regular basis, a procedure which is not followed systematically, even that is planned.

The cost analysis showed that the current pattern at the subway (re-profiling every 80.000km) is correct.

Keywords: «railway wheel, wear, leathe, re-profiling, rail, Metro»

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Ο σιδηρόδρομος και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει.....	1
1.2	Αντικείμενο και στόχος της διπλωματικής.....	2
1.3	Οργάνωση εργασίας.....	3
2	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	4
2.1	Διατομή σιδηροδρομικού τροχού - Φθορά Τροχού.....	4
2.2	Είδη φθοράς τροχού-σιδηροτροχιάς.....	6
2.2.1	<i>Διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς.....</i>	<i>6</i>
2.2.2	<i>Μηχανισμοί που προκαλούν φθορά στη διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς.....</i>	<i>8</i>
2.2.3	<i>Αναλυτική παρουσίαση του μηχανισμού φθοράς της κόπωσης εξ επαφής.....</i>	<i>11</i>
2.2.4	<i>Τυπική φθορά τροχών λόγω του μηχανισμού φθοράς της κόπωσης εξ επαφής και αντίστοιχα μέτρα αποκατάστασης.....</i>	<i>13</i>
3	Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	26
4	Περιγραφή συστήματος της Α.Μ.Ε.Λ. για τον έλεγχο και την τόννευση των τροχών.....	35
4.1	Προληπτικές μετρήσεις.....	36
4.2	Επιτρεπόμενες διαφορές στις διαμέτρους τροχών συρμού.....	38
4.3	Τόρνος – Δυνατότητες και λειτουργία.....	40
5	Συλλογή και επεξεργασία στοιχείων.....	42
5.1	Εντοπισμός των τροχών που εμφανίζουν μεγαλύτερη φθορά.....	44
5.1.1	<i>Σύγκριση φθοράς μεταξύ τροχών ιθυντήριου και πρώτου κινητήριου οχήματος (βαγονιού).....</i>	<i>45</i>
5.1.2	<i>Σύγκριση τροχών πρώτου άξονα του πρώτου βαγονιού της μίας κατεύθυνσης και της άλλης κατεύθυνσης (πρώτο και τελευταίο βαγόνι).....</i>	<i>49</i>
5.1.3	<i>Σύγκριση τροχών αριστερά-δεξιά του ίδιου άξονα.....</i>	<i>52</i>
5.2	Σχέση φθοράς και χιλιομετρικής διάνυσης.....	58
5.2.1	<i>Ρυθμός απομείωσης της διαμέτρου από την αρχή της ζωής του τροχού μέχρι τις τελευταίες μετρήσεις.....</i>	<i>58</i>

5.2.2	<i>Ρυθμός φθοράς πέλματος στο διάστημα μεταξύ διαδοχικών τორνεύσεων</i>	59
5.2.3	<i>Στατιστικός έλεγχος (έλεγχος υποθέσεων)</i>	66
5.3	Μεταβολή διαμέτρου τροχών λόγω τórνευσης	68
5.4	Κόστος τórνευσης και αντικατάστασης των τροχών ενός συρμού	72
5.4.1	<i>Υπολογισμός κόστους τórνευσης των τροχών ενός συρμού</i>	72
5.4.2	<i>Υπολογισμός κόστους αντικατάστασης τροχών ενός συρμού</i>	72
6	Η σιδηροδρομική γραμμή και η φθορά των τροχών στον ΗΣΑΠ	74
6.1	Οι Τροχοί των συρμών του ΗΣΑΠ	74
6.1.1	<i>Παλαιά γραμμή (ξύλινοι στρωτήρες με έρμα)</i>	75
6.1.2	<i>Νέα γραμμή (στρωτήρες σκυροδέματος σε σταθερή διατομή)</i>	75
6.2	Η σιδηροδρομική επιδομή του Μετρό	76
6.3	Σύγκριση φθοράς των τροχών στο Μετρό και στον ΗΣΑΠ	76
7	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εργασίας	77
8	Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα	79
	Βιβλιογραφία	81

1

Εισαγωγή

1.1 Ο σιδηρόδρομος και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει

Η έλξη των σιδηροδρομικών συρμών στα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης του σιδηροδρόμου γινόταν με ατμάμαξες, των οποίων η τεχνολογία βελτιωνόταν με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, μετά τη λήξη του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου έγινε σαφές στις εταιρίες σιδηροδρόμων ότι το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ήταν πολύ υψηλό. Γι' αυτό και σταδιακά οι ατμάμαξες άρχισαν να αντικαθίστανται από μηχανές έλξης ντίζελ (μια διαδικασία που, διεθνώς πλέον, έχει επονομαστεί "dieselisation"). Μετά το 1950 άρχισε η κίνηση των συρμών και με ηλεκτρική ενέργεια, με εξαίρεση τους αστικούς σιδηροδρόμους (μετρό), οι οποίοι ήταν εξ αρχής ηλεκτροκίνητοι. Τη δεκαετία του '70, με την πρώτη κρίση του πετρελαίου εντάθηκαν οι προσπάθειες για την ηλεκτροκίνηση των συρμών, η οποία έχει σήμερα διεθνώς επικρατήσει, αν και σε αρκετές περιοχές, σε όλες σχεδόν τις χώρες του κόσμου, η κίνηση των συρμών γίνεται ακόμη με μηχανές ντίζελ.

Τα τρένα θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα τρένα υψηλών ταχυτήτων (TGV), και τα τρένα των αστικών περιοχών. Τις πυκνοκατοικημένες περιοχές των πόλεων εξυπηρετούν, συνήθως, τρία διαφορετικά δίκτυα λειτουργίας σιδηροδρόμων, το τραμ με εναέρια ηλεκτροδότηση, το μετρό με επίγεια ηλεκτροδότηση και ο Περιφερειακός ή Προαστιακός Σιδηρόδρομος με σύνθετη ηλεκτροδότηση ([1],[2]).

Το Μετρό (ή μητροπολιτικός σιδηρόδρομος) κινείται ηλεκτρικά, μέσω χαλύβδινων τροχών, σε διάδρομο κυκλοφορίας που στο μεγαλύτερο ποσοστό του μήκους του είναι υπόγειος ([1]).

Χαρακτηρίζεται σε σχέση με τα άλλα αστικά μέσα μεταφοράς, από:

- Υψηλή συχνότητα δρομολογίων
- Μεγάλη μεταφορική ικανότητα
- Κίνηση σε υπόγειο αποκλειστικό διάδρομο κυκλοφορίας
- Μεγάλο κόστος κατασκευής.

Το Μετρό της Αθήνας, το πιο σύγχρονο μέσο μαζικής μεταφοράς στην Ελλάδα, εξυπηρετεί μέσω 34 σταθμών πάνω από 700.000 επιβάτες σε καθημερινή βάση. Σήμερα, οι δύο Γραμμές του Μετρό έχουν συνολικό μήκος περίπου 51,7km (συμπεριλαμβανομένων των 20,7km γραμμής του προαστιακού από τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας προς Αεροδρόμιο) ([4]).

Ένα από τα θέματα που αφορούν στη λειτουργική απόδοση των σιδηροδρομικών οχημάτων, είναι ο έλεγχος της ποιότητας της επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς, ο οποίος μεταξύ άλλων απαιτεί, επαρκή κατανόηση των μηχανισμών φθοράς των τροχών και των συνεπειών της μεταβολής της διατομής τους με σχέση με τη δυναμική του οχήματος. Η πρόβλεψη της φθοράς στη διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς είναι ένα θεμελιώδες πρόβλημα στον τομέα των σιδηροδρόμων, που σχετίζεται κυρίως με το σχεδιασμό των παρεμβάσεων συντήρησης, την ευστάθεια του οχήματος και τη δυνατότητα έρευνας συγκεκριμένων στρατηγικών για τη βελτιστοποίηση της διατομής του τροχού και της σιδηροτροχιάς.

1.2 Αντικείμενο και στόχος της διπλωματικής

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της φθοράς και της αποκατάστασης της επιφάνειας κύλισης του σιδηροδρομικού τροχού με δειγματικό χώρο το μετρό Αθηνών (ανάλυση στοιχείων 25 συρμών στο διάστημα 2007-2012). Στόχος της εργασίας είναι ο εντοπισμός των παραμέτρων που επηρεάζουν του ρυθμό φθοράς και η αξιολόγηση της πρακτικής που ακολουθείται στη συντήρηση των τροχών των συρμών του Μετρό Αθηνών.

1.3 Οργάνωση εργασίας

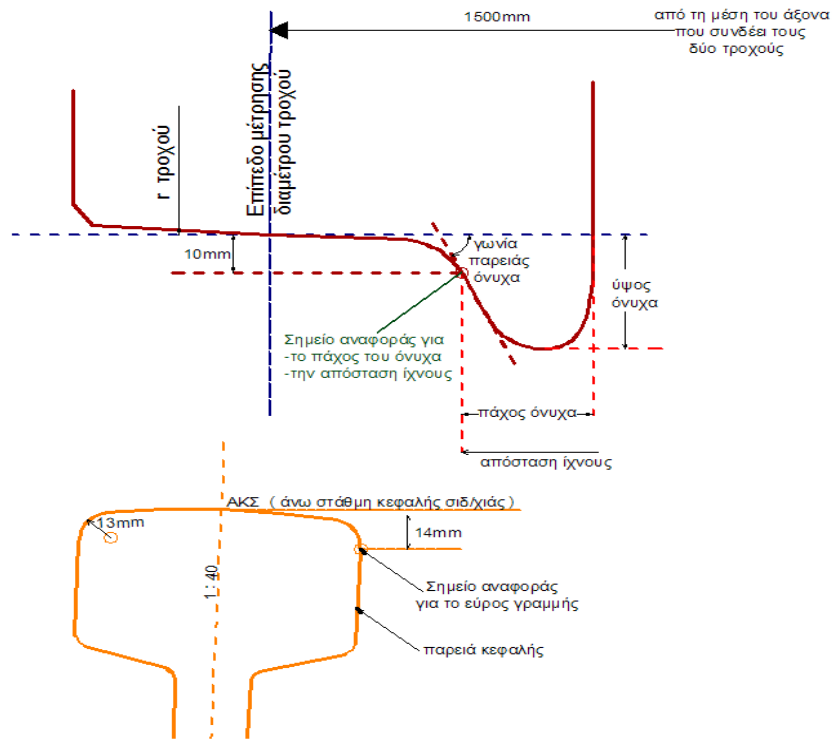
Το θεωρητικό υπόβαθρο που είναι χρήσιμο για την κατανόηση της εργασίας αυτής, όπως είναι ο ορισμός της φθοράς, τα είδη της, και οι μηχανισμοί που την προκαλούν, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2. Το Κεφάλαιο 3 αφορά στη βιβλιογραφική επισκόπηση του θέματος. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία συντήρησης των τροχών από την ΑΜΕΛ. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το δείγμα των μετρήσεων που έχουν συγκεντρωθεί από την ΑΜΕΛ στο διάστημα 2007-2012 για 25 συρμούς καθώς και η επεξεργασία των μετρήσεων. Το κεφάλαιο 6 αναφέρεται συνοπτικά στις φθορές των τροχών που αντιμετωπίζει ο ΗΣΑΠ. Τα αποτελέσματα της εργασίας βρίσκονται στο κεφάλαιο 7. Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα. Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία και το Παράρτημα.

2

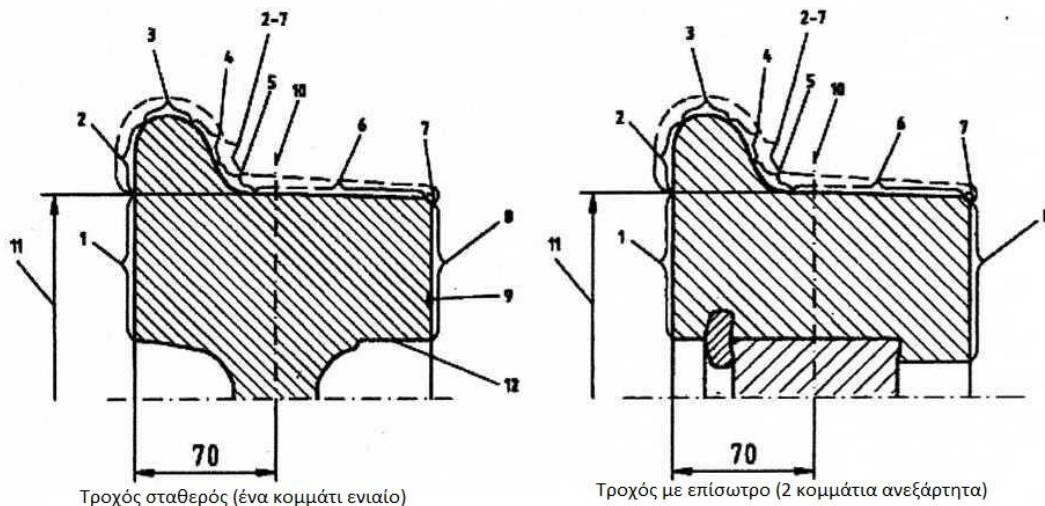
Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Διατομή σιδηροδρομικού τροχού - Φθορά Τροχού

Ο τροχός κυλίνει με την περιμετρική επιφάνειά του επί της *άνω στάθμης της κεφαλής* της σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ) και οδηγείται στις καμπύλες από την εσωτερική παρειά των σιδηροτροχιών μέσω του *όνυχα* (Εικόνα 2.1). Ο τροχός και η κεφαλή της σιδηροτροχιάς πρέπει να εναρμονίζονται ως προς τη μορφή τους στην περιοχή επαφής. Η επιφάνεια κύλισης των τροχών (επίσωτρο) τόσο των μηχανών έλξης όσο και των ελκυσόμενων οχημάτων, έχει ενιαία διατομή, η οποία διαμορφώνεται με βάση την ερευνητική εμπειρία από τις παρατηρηθείσες φθορές προγενέστερων μορφών. Η τελευταία εξέλιξη του τροχού είναι ο S1002. Η Εικόνα 2.1 που ακολουθεί, περιγράφει τα σημαντικότερα μέρη των διατομών ενός τροχού και μίας σιδηροτροχιάς και η Εικόνα 2.2 αναφέρεται πιο αναλυτικά στα μέρη ενός ενιαίου και ενός τροχού με επίσωτρο.



Εικόνα 2.1: Διατομή τροχού, σιδηροτροχιάς [5]



Αριθμός	Ορολογία των μερών σταθερού τροχού (μονομπλόκ) και τροχού με επίσωτρο (2 μέρη)
1	εσωτερικό μέτωπο ζάντας / επισώτρου τροχού
2	εσωτερικό μέτωπο όνυχα τροχού
3	πάτημα όνυχα
4	μέτωπο όνυχα τροχού
5	αυλάκωση επισώτρου
6	πέλημα τροχού
7	λοξότμηση πέλιατος
8	εξωτερικό μέτωπο ζάντας / επισώτρου τροχού
9	λειτουργικό όριο αυλάκωσης
10	επίπεδο μέτρησης διαμέτρου τροχού
11	μετρούμενη διάμετρος (πραγματική διάσταση)
12	άκρο σύσφιξης
2 - 7	διατομή τροχού

Εικόνα 2.2: Χαρακτηριστικά μέρη ενός ενιαίου τροχού και ενός τροχού με επίσωτρο [6]

Ο όρος «φθορά τροχού» περιλαμβάνει οποιαδήποτε βλάβη προκύπτει στην επιφάνεια κυλίσεως των σιδηροδρομικών τροχών, συμπεριλαμβανομένου και της απώλειας υλικού. Αυτή μπορεί να προκληθεί από την επίδραση της φθοράς λόγω τριβής, την κόπωση εξ επαφής κατά την κύλιση και, σε μικρότερο βαθμό, από τη μετατόπιση υλικού εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης [6].

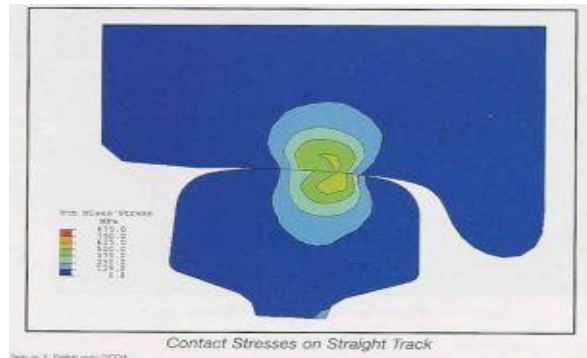
Η φθορά της διατομής των τροχών είναι ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα που επηρεάζουν το κόστος και τις επιδόσεις των σιδηροδρομικών συστημάτων μεταφοράς. Από τον πρώτο καιρό των σιδηροδρόμων, η διατομή των τροχών είχε διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να αυξάνεται η αντοχή και να μειώνεται η φθορά, καθώς και να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η απόδοση του οχήματος. Η φθορά των τροχών έχει πολύ μεγάλη επίδραση στη δυναμική των οχημάτων, καθώς μεταβάλλει τη διατομή του τροχού σε σχέση με την πρότυπη μορφή που ορίστηκε από τον κατασκευαστή, με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις από την πρότυπη διατομή να πρέπει να αντιμετωπίζονται με τόννευση του τροχού, ώστε η φθαρμένη διατομή να επανέλθει στην πρότυπη. Είναι προφανές, ότι ο αριθμός των δυνατών επαναλήψεων της τόννευσης για ένα τροχό είναι περιορισμένος, καθώς ορίζεται από τον κατασκευαστή τελική ωφέλιμη διάμετρος του τροχού. Όταν επιτευχθεί το όριο, ο τροχός πρέπει να αντικατασταθεί. Η τόννευση και η αντικατάσταση του τροχού έχουν πολύ μεγάλες επιπτώσεις στα κόστη συντήρησης και ως εκ τούτου διεξάγεται μεγάλος αριθμός ερευνών για την μείωση του προβλήματος και την επιβράδυνση της εξέλιξης της φθοράς.

2.2 Είδη φθοράς τροχού-σιδηροτροχιάς

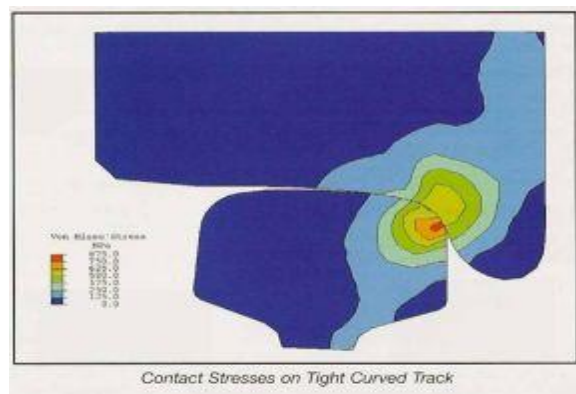
Η διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς δημιουργεί σοβαρές καταπονήσεις τόσο στον τροχό όσο και στη σιδηροτροχιά. Αρχικά, περιγράφονται όλοι οι μηχανισμοί που δημιουργούνται από την διεπαφή και έπειτα αναλύεται αυτός που προκαλεί την σημαντικότερη φθορά στους τροχούς των συρμών, τα τυπικά είδη φθοράς των τροχών και τα μέτρα αντιμετώπισης του κάθε είδους [6].

2.2.1 Διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς

Είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουμε ότι η περιοχή επαφής αλλάζει, όταν εμφανίζεται φθορά στον τροχό και τη σιδηροτροχιά. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι θέσεις επαφής τροχού και σιδηροτροχιάς, όταν ο τροχός κινείται σε ευθυγραμμία (Εικόνα 2.3) και όταν κινείται σε καμπύλη (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.3: θέση επαφής κατά την κίνηση του συρμού σε ευθυγραμμία [7]



Εικόνα 2.4: θέση επαφής κατά την κίνηση του συρμού σε καμπύλη [7]

Κατά την κύλιση αναπτύσσονται στον τροχό και την σιδηροτροχιά σημαντικές κατακόρυφες και οριζόντιες δυνάμεις, που προκαλούν υψηλές διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια του πέλματος του τροχού καθώς και στην επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς. Παράλληλα, η σχετική κίνηση μεταξύ τροχού-σιδηροτροχιάς προκαλεί διαμήκη και πλευρική ολίσθηση, με αποτέλεσμα το υλικό να υπόκειται όχι μόνο σε μηχανική αλλά και σε θερμική καταπόνηση.

Τα διάφορα είδη των φθορών που παρατηρούνται στο πέλμα ενός σιδηροδρομικού τροχού και στην επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς μπορούν να περιγραφούν λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό αλληλεπίδρασης μεταξύ των τεσσάρων μηχανισμών φθοράς: της φθοράς λόγω τριβής, της πλαστικής παραμόρφωσης, της κόπωσης του σημείου επαφής του τροχού και της θερμικής καταπόνησης που επηρεάζουν τα υλικά του τροχού και της σιδηροτροχιάς.

2.2.2 Μηχανισμοί που προκαλούν φθορά στη διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς

2.2.2.1 Πλαστική παραμόρφωση

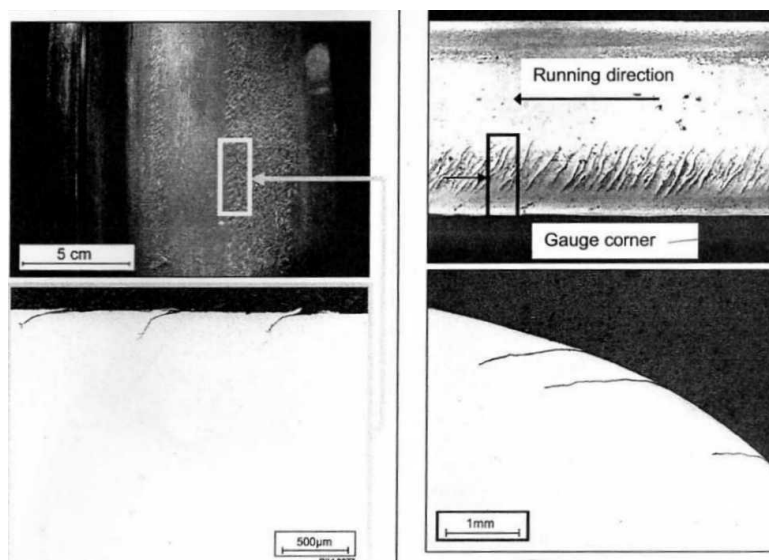
Οι πιέσεις που αναπτύσσονται στη διεπαφή τροχού/σιδηροτροχιάς προκαλούν πλαστική παραμόρφωση κοντά στην επιφάνεια μικροδομής των υλικών του τροχού και της σιδηροτροχιάς (Εικόνα 2.6α). Η περιοχή στην οποία, η πλαστική παραμόρφωση εμφανίζεται στις διαμήκεις και πλευρικές διευθύνσεις είναι ανάλογη με το μέγεθος των διαμηκών και πλευρικών δυνάμεων αντίστοιχα που ασκούνται στην διεπαφή τροχού/σιδηροτροχιάς. Το βάθος της παραμόρφωσης ποικίλει, καθώς εξαρτάται από τη σύνθεση των υλικών από τα οποία έχουν κατασκευαστεί οι τροχοί και οι σιδηροτροχιές. Η έκταση της πλαστικής παραμόρφωσης εξαρτάται επίσης από τα χαρακτηριστικά του οχήματος (π.χ. αξονικά φορτία) αλλά και της μόνιμης διαδρομής (π.χ. καμπύλες) [6].

2.2.2.2 Φθορά λόγω τριβής

Η φθορά λόγω τριβής αφορά στην αφαίρεση υλικού λόγω καταπόνησης του. Γίνεται εμφανής με τη μορφή κοίλης φθαρμένης επιφάνειας στο πέλμα του τροχού και στη γωνία αναφοράς (Εικόνα 2.6β). σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα διαμήκους φθοράς στον τροχό, με αποτέλεσμα ο τροχός να μετατρέπεται σε «πολυγωνικό» [6].

2.2.2.3 Κόπωση εξ επαφής κατά την κύλιση

Η κόπωση εξ επαφής κατά την κύλιση (Rolling Contact Fatigue-RCF) δημιουργείται λόγω της συνεχούς παραμόρφωσης της μικροδομής στην επιφάνεια του πέλματος του τροχού και της επιφάνειας κύλισης της σιδηροτροχιάς, ιδιαίτερα στη γωνία αναφοράς (Εικόνα 2.6β). Η καταπόνηση αυτή οδηγεί στο σχηματισμό ρωγμών που μπορεί να καταλήξουν σε θρυμματισμό ή αποφλοίωση του υλικού (Εικόνα 2.6γ). Η μορφή των ρωγμών περιλαμβάνει μία ζώνη από συνεχόμενες παράλληλες ρωγμές που εμφανίζονται τόσο στον τροχό όσο και στη σιδηροτροχιά. Οι ρωγμές εμφανίζονται συνήθως υπό γωνία $30^\circ - 50^\circ$ ως προς το διαμήκη άξονα της κίνησης του επηρεαζόμενου στοιχείου. Η θέση στην οποία εμφανίζονται οι ρωγμές εξαρτάται από τη γεωμετρία της διεπαφής τροχού-σιδηροτροχιάς. Η εμφάνισή τους γίνεται κυρίως στη γωνία αναφοράς της σιδηροτροχιάς και στο πέλμα του τροχού, σε αποστάσεις περίπου 50mm και 90-100mm από την εσωτερική πλευρά του τροχού. Όταν αυτές οι ρωγμές εμφανίζονται στους τροχούς, ονομάζονται ρωγμές μορφής «ψαροκόκαλου», ενώ όταν εμφανίζονται στη σιδηροτροχιά, αναφέρονται ως «σημάδια κεφαλής» [6].



Εικόνα 2.5: RCF, α) φθορά μορφής "ψαροκόκαλο" στο πέλμα του τροχού και β) σημάδια κεφαλής στη γωνία αναφοράς της σιδηροτροχιάς [6]

2.2.2.4 Τροποποίηση μικροδομής / Θερμική καταπόνηση

Η επιβολή πολύ μεγάλων δυνάμεων στην διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς οδηγεί στην ανάπτυξη μεγάλων πιέσεων που προκαλούν απότομη τοπική αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού (που ακολουθείται από ταχεία επαναφορά στην αρχική θερμοκρασία). Οι πολύ υψηλές αυτές πιέσεις μπορεί να προκληθούν είτε από απότομη πέδηση (αφορά τροχούς με μηχανισμό φρένου, που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εμπορευματικούς συρμούς), είτε από υπερβολική ολίσθηση του τροχού, κατά την επιτάχυνση ή κατά την επιβράδυνση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό του λεγόμενου «λευκού στρώματος», στην μικροδομή των επιφανειών του τροχού και της σιδηροτροχιάς (Εικόνα 2.6δ).

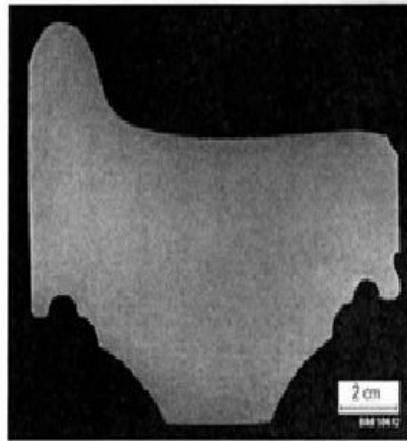
Η απότομη άνοδος και ταπείνωση της θεοκρασίας προκαλεί θερμική κόπωση σε περιοχές που είχαν ήδη υποστεί βλάβη, οδηγώντας σε βαθιές ρωγμές και θρυμματισμό (Εικόνα 2.6γ). Σοβαρές περιπτώσεις θρυμματισμού εξαιτίας της θερμικής καταπόνησης συναντώνται περισσότερο στους τροχούς, σε σύγκριση με τις σιδηροτροχιές, και ειδικότερα στους τροχούς που έχουν μηχανισμό φρένου, καθώς η πιθανότητα της επαναλαμβανόμενης θέρμανσης στο συγκεκριμένο σημείο του πέλματος του τροχού, είναι μεγαλύτερη, λόγω της περιορισμένης περιφέρειας του τροχού [6].

2.2.2.5 Εναπομένουσες τάσεις

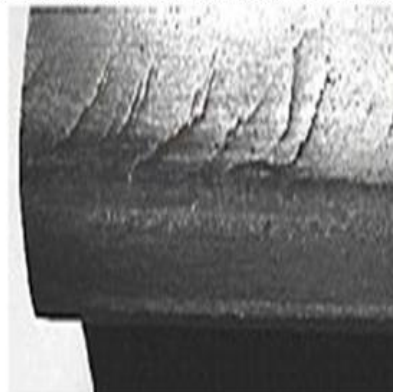
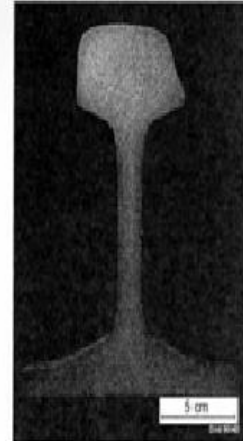
Οι εναπομένουσες τάσεις εφελκυσμού είναι αναπόφευκτες στην κατασκευή των σιδηροδρομικών τροχών, των τροχών με επίσωτρο και των σιδηροτροχιών. Στις παραμένουσες τάσεις εφελκυσμού προστίθενται τάσεις από την τοποθέτηση των επισώτρων (για τους τροχούς) ή την τοποθέτηση της γραμμής επί των στρωτήρων (για την περίπτωση των σιδηροτροχιών) [6].



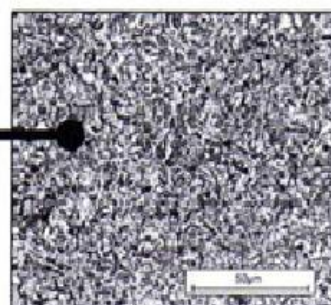
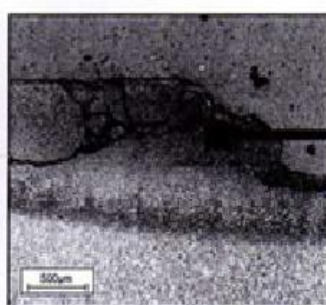
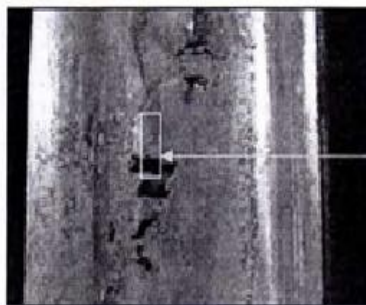
α) Πλαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια κύλισης του τροχού



β) Εμφάνιση κοίλης επιφάνειας στο πέλμα του τροχού και απομείωση της κεφαλής της σιδηροτροχιάς αντίστοιχα



γ) Κόπωση εξ επαφής κατά την κύλιση στη σιδηροτροχιά, εστίαση στη γωνία αναφοράς της σιδηροτροχιάς



δ) Τροποποίηση μικροδομής, θερμική καταπόνηση

Εικόνα 2.6: Συνήθεις μορφές φθοράς σε τροχούς και σιδηροτροχιές [6],[7]

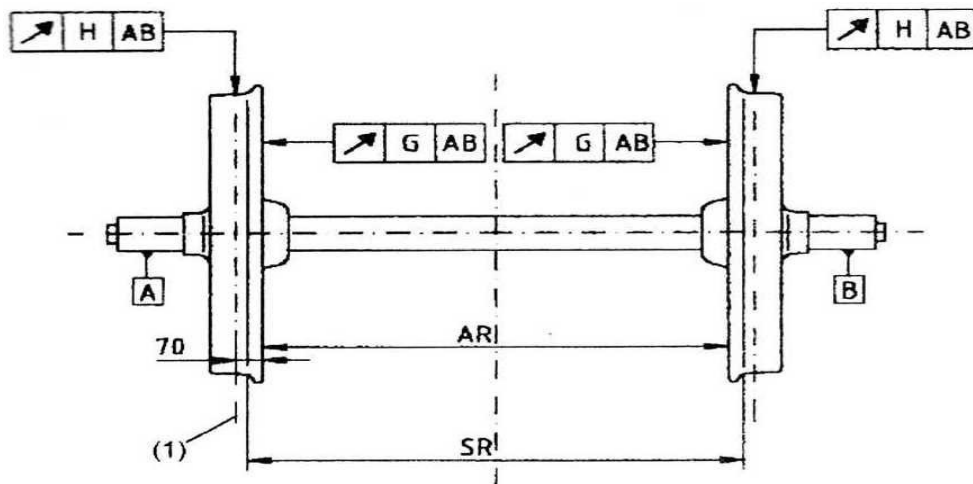
2.2.3 Αναλυτική παρουσίαση του μηχανισμού φθοράς της κόπωσης εξ επαφής

Ο συνηθέστερος μηχανισμός φθοράς στους συρμούς του υπόγειου σιδηρόδρομου της Αττικής, είναι η κόπωση εξ επαφής που δημιουργείται κατά την κύλιση. Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζονται τα μέρη και οι διαστάσεις ενός τυπικού ζεύγους τροχών, οι ανοχές των διαστάσεων και τα όρια για άξονες τροχών επιβατικών σιδηροδρομικών οχημάτων. Στη συνέχεια της παραγράφου αναλύονται τα είδη φθοράς που εμφανίζονται στους τροχούς εξαιτίας του συγκεκριμένου μηχανισμού.

Οι προδιαγραφές που ακολουθούν (Εικόνα 2.7) ισχύουν υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

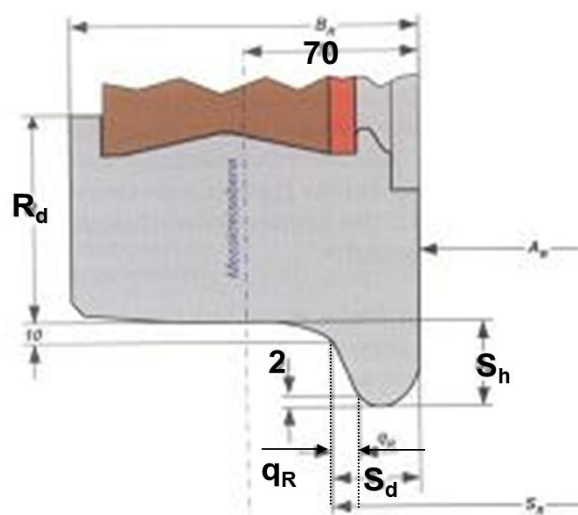
$$V_{\max} = 80\text{km/h}$$

$$\text{Αξονικό φορτίο} < 20\text{t}$$



Συνομογραφία	Διάσταση
SR	απόσταση μεταξύ των ονύχιων (απόσταση ίχνους)
AR	απόσταση μεταξύ των εσωτερικών μετώπων των τροχών
G	εκκενρότητα άξονα
H	ακτινική εκκενρότητα στο επίπεδο μέτρησης της διαμέτρου του τροχού
(1)	επίπεδο μέτρησης της διαμέτρου του τροχού

εξάρτημα / λειτουργία	ελάχιστη αποδεκτή διάσταση (mm)	μέγιστη αποδεκτή διάσταση (mm)
Απόσταση ίχνους (SR)	1415	1426
Απόσταση μεταξύ των μετώπων των τροχών (AR)	1359	1363
Πάχος φλάντζας τροχού (Sd)	27,5	33,0
Διάσταση του μετώπου της φλάντζας του τροχού (qR)	6,5	–
Πλάτος της ζάντας/ ελαστικού τροχού (BR)	130	150
Ύψος φλάντζας τροχού (Sh)	26,0	36,0
Ακτινική εκκενρότητα (H)	–	0,7
Αξονική εκκενρότητα ανά τροχό (G)	–	1,0
Διαφορά διαμέτρου τροχών ίδιου άξονα (δεξιά προς αριστερά)	–	0,5



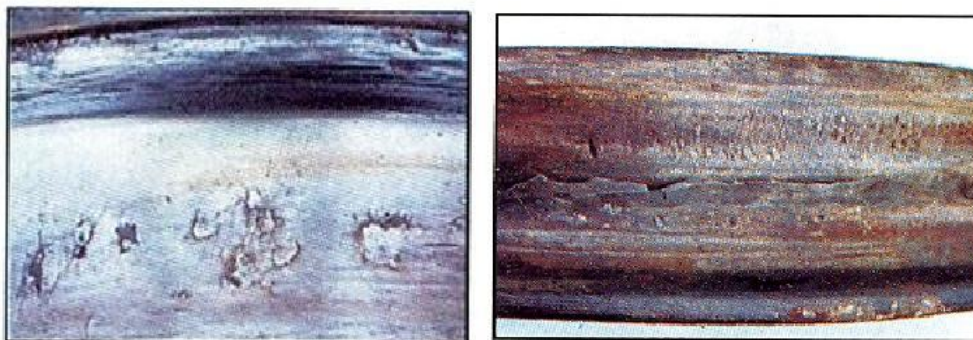
Εικόνα 2.7: Μέρη ενός τροχοφόρου άξονα (άνω εικόνα), Τιμές ανοχής και όρια των διαστάσεων σε ένα άξονα (μεσαία εικόνα) και παράμετροι φθοράς q_R , S_h , S_d (κάτω εικόνα) (Σύνθεση από τις πηγές [5], [6] και [6])

2.2.4 Τυπική φθορά τροχών λόγω του μηχανισμού φθοράς της κόπωσης εξ επαφής και αντίστοιχα μέτρα αποκατάστασης

Τα είδη φθοράς των τροχών που εμφανίζονται εξαιτίας της κόπωσης εξ επαφής κατά την κύλιση, συναντώνται είτε στην επιφάνεια κύλισης (αφορά όλους τους τροχούς) είτε στο επίσωτρο του τροχού (αφορά μόνο τους τροχούς με επίσωτρο). Ο θρυμματισμός (αποφλοιώση), οι επιπεδότητες, οι εγκάρσιες ρωγμές, οι ρωγμές με μορφή «ψαροκόκαλο», η μερική ή η περιμετρική προεξοχή του πέλματος, είναι συνήθεις τύποι φθοράς που εμφανίζονται στην επιφάνεια κύλισης του τροχού. Παράλληλα, μπορεί να δημιουργηθεί ασυνέχεια υλικού κάτω από το πέλμα. Τα είδη φθοράς που παρατηρούνται επιπρόσθετα στους τροχούς με επίσωτρο, είναι η φθορά λόγω εκτοπισμένων εκ περιστροφής ή χαλαρών επισώτρων, η φθορά στην εσωτερική πλευρά του επισώτρου καθώς και η ρηγμάτωση του επισώτρου σε ανοιγμένη οπή. Πρέπει να σημειωθεί ότι μερικοί τύποι φθορών παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα να υπάρχει σύγχυση κατά την επισήμανση της φθοράς. Οι μέθοδοι ελέγχου των φθορών αυτών, είναι είτε με οπτική επιθεώρηση είτε με άλλους ελέγχους, όπως το τεστ υπερήχων (ultrasonic testing), ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (magnetic particle testing) ή με δινορεύματα (Eddy current testing). Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των τύπων φθοράς στα επόμενα εδάφια.

2.2.4.1 Θρυμματισμός (αποφλοίωση)

Ο **θρυμματισμός** αφορά στην κατάσταση όπου υλικό από την επιφάνεια του πέλματος του τροχού αποσπάται, αφήνοντας αιχμηρές περιοχές εν γένει στο μέσο του πέλματος. Η ανίχνευση αυτού του τύπου φθοράς γίνεται με οπτική επιθεώρηση. Θρυμματισμός μπορεί να προκύψει όταν το υλικό του τροχού υποβάλλεται σε υπερβολική θερμική ή μηχανική καταπόνηση η οποία εμφανίζεται κατά την ολίσθηση εξαιτίας της πέδησης ή της εκκίνησης του συρμού (σπινάρισμα) που δημιουργείται λόγω της υπερβολικής ολίσθησης του τροχού. Η εμφάνιση φθοράς αυτού του τύπου στον τροχό, έχει ως συνέπεια τη μειωμένη άνεση επιβατών κατά τη διάρκεια της κίνησης, εξαιτίας της παραγωγής θορύβου και της μη-ομαλής κύλισης (συμπτώματα που εμφανίζονται και στην περίπτωση της επιπεδότητας του τροχού). Οι κανονισμοί λειτουργίας της AMEL ορίζουν ότι εφόσον διαπιστωθεί θρυμματισμός, η διατομή του τροχού θα πρέπει να ξανασηματιστεί (με τόννευση) το συντομότερο δυνατό. Ωστόσο, ο τροχός μπορεί να συνεχίσει να χρησιμοποιείται εάν δεν έχει υποστεί βλάβη μεγαλύτερη από 40 mm σε μήκος (ή σε πλάτος) [6].

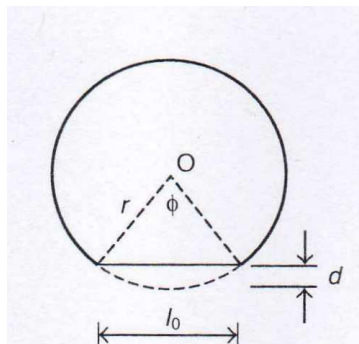


Εικόνα 2.8: Θρυμματισμός πέλματος τροχού (αριστερά), ζάντας (δεξιά) [7]

Τύπος φθοράς	Θρυμματισμός
Αίτια	υπερβολική θερμική ή μηχανική καταπόνηση εξαιτίας της ολίσθησης κατά την πέδηση και κατά την εκκίνηση (σπινάρισμα)
Επιπτώσεις	μειωμένη άνεση επιβατών, παραγωγή θορύβου

2.2.4.2 Επιπεδότητες τροχού

Επιπεδότητα είναι η τοπική εξομάλυνση του πέλματος του τροχού (Εικόνα 2.9). Τα όρια της δεν μπορούν να προσδιοριστούν επακριβώς (οπτικά εμφανίζεται με μορφή έλλειψης). Επιπεδότητες μπορούν να εμφανιστούν μεμονωμένες ή συνεχόμενες, στην περιφέρεια του τροχού. Συνήθως, παρατηρούνται στην ίδια θέση και των δύο τροχών ενός άξονα. Ωστόσο,



Εικόνα 2.9: Τροχός με επιπεδότητα μήκους l_0 και βάθους d [9]

είναι πιθανό να εμφανίζονται μόνο στον ένα από τους τροχούς ή και στους δύο τροχούς αρχικά, αλλά στη συνέχεια να εξελίσσονται διαφορετικά σε κάθε τροχό. Στα όρια της επιπεδότητας του τροχού μπορεί να εμφανιστούν ενδείξεις πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού του τροχού. Η ανίχνευση των επιπεδοτήτων γίνεται με οπτική επιθεώρηση. Η φθορά αυτή δημιουργείται κατά την ολίσθηση ενός τροχού επί της σιδηροτροχιάς (π.χ. όταν δεν υπάρχει σύστημα για το αντιμπλοκάρισμα των τροχών κατά την πέδηση) και έχει ως συνέπεια την μειωμένη άνεση των επιβατών κατά την

κίνηση, εξαιτίας της παραγωγής θορύβου και της μη-ομαλής κύλισης. Στην περίπτωση που ο τροχός συνεχίσει να χρησιμοποιείται, τα στοιχεία της ελλειπτικής μορφής του τροχού ενισχύονται (ο τροχός τείνει να γίνει «οβάλ») και εμφανίζεται θρυμματισμός και ρωγμές στα σημεία όπου υπάρχει η επιπεδότητα. Όπως έχει αναφερθεί και ανωτέρω, τα συμπτώματα της επιπεδότητας συγγέονται με αυτά από τον θρυμματισμό. Οι κανονισμοί λειτουργίας της AMEL αναφέρουν ότι οι επιπεδότητες των τροχών είναι αποδεκτές μέχρι ένα μέγιστο μήκος που αντιστοιχεί σε 60mm ή ένα μέγιστο βάθος της τάξης των 0,8mm, όποιο από τα δύο δημιουργηθεί πρώτο [6].

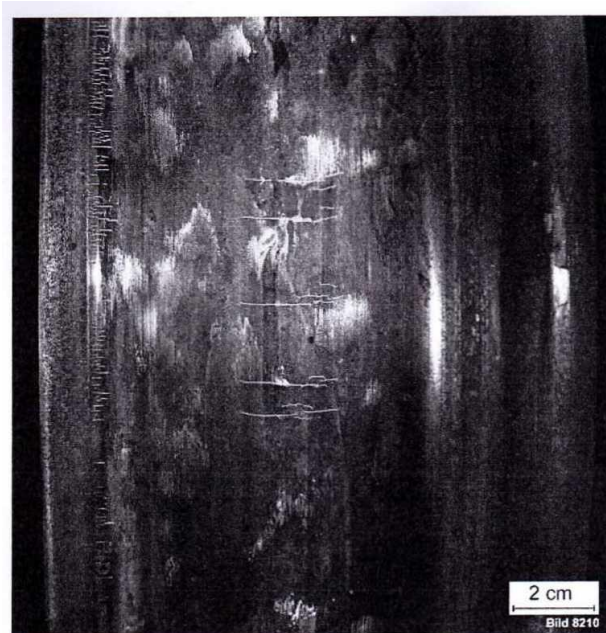
Τύπος φθοράς	Επιπεδότητες
Αίτια	Ολίσθηση τροχού στη σιδηροτροχιά (σε τροχούς με μηχανισμό φρένου, ανεπαρκές σύστημα αντιμπλοκαρίσματος τροχών κατά την πέδηση)
Επιπτώσεις	<ul style="list-style-type: none"> • μειωμένη άνεση επιβατών, παραγωγή θορύβου • ενίσχυση των στοιχείων της φθοράς (τροχός τείνει να γίνει «οβάλ») • εμφάνιση θρυμματισμού και ρωγμών



Εικόνα 2.10: Τροχοί με επιπεδότητα στο πέλαμα [7]

2.2.4.3 Εγκάρσιες ρωγμές στο πέλμα του τροχού

Οι εγκάρσιες ρωγμές είναι ρωγμές στο πέλμα του τροχού με κλίση περίπου 90° (κάθετες) στην περιφερειακή διεύθυνση και είναι ως επί το πλείστον ευθείες. Εμφανίζονται είτε ως μεμονωμένες είτε ως πολλαπλές ρωγμές καταναμημένες στην περίμετρο του τροχού. Η ανίχνευση αυτού του τύπου φθοράς γίνεται με διάφορες μεθόδους, όπως είναι ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια, με δινορεύματα, ή η οπτική επιθεώρηση, ιδιαίτερα μετά από τόννευση του τροχού. Οι ρωγμές αυτές εμφανίζονται σε τροχούς με μηχανισμό φρένου, κατά την πέδηση, καθώς υπερθερμαίνεται η ζάντα του τροχού. Επίσης, οι πλευρικές ρωγμές εξελίσσονται εξαιτίας της επιπεδότητας του τροχού ή του θρυμματισμού (αποφλοΐωσης) που μπορεί να έχουν αναπτυχθεί. Σοβαρή συνέπεια μιας πλευρικής ρωγμής είναι η διάρρηξη (θραύση) του τροχού. Συνήθως, υπάρχει σύγχυση του φαινομένου αυτού με τις γραμμικές εσοχές ή τις ρωγμές μορφής «ψαροκόκαλο». Οι κανονισμοί λειτουργίας της ΑΜΕΛ απαγορεύουν τις εγκάρσιες ρωγμές στο πέλμα του τροχού και αναφέρουν ότι μόλις εντοπιστούν πρέπει να αφαιρεθούν άμεσα με τόννευση του τροχού [6].

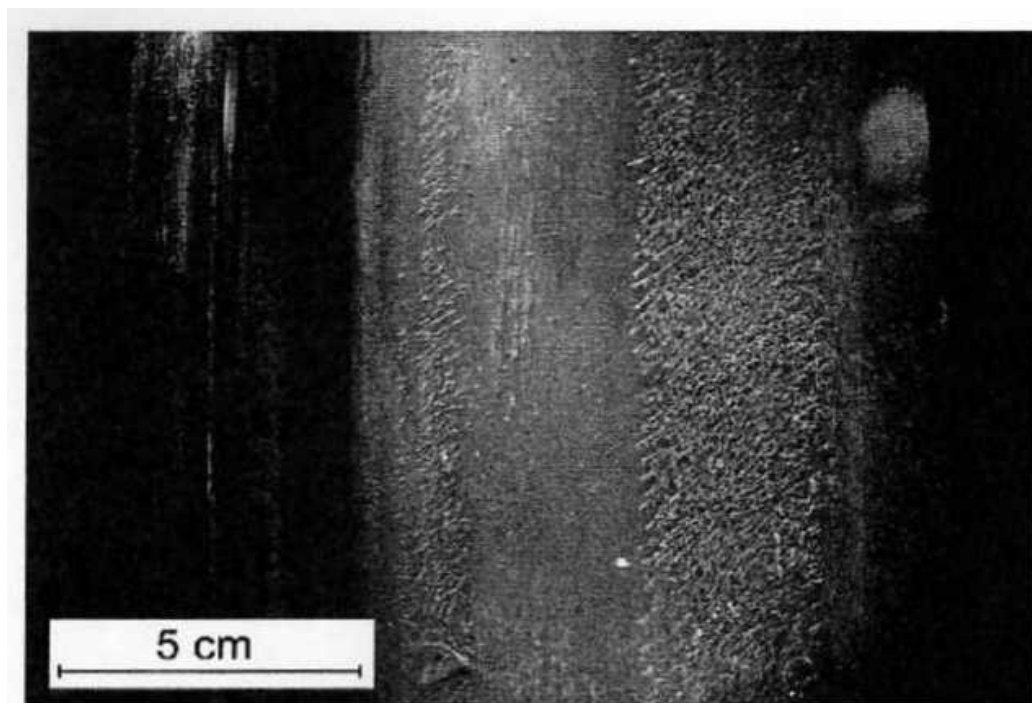


Εικόνα 2.11: Πέλμα τροχού με εγκάρσιες ρωγμές [6]

Τύπος φθοράς	Εγκάρσιες ρωγμές
Αίτια	<ul style="list-style-type: none">Υπερθέρμανση ζάντας τροχού (σε τροχούς με μηχανισμό φρένων)Επιπεδότητα ή θρυμματισμός τροχού
Επιπτώσεις	Διάρρηξη τροχού

2.2.4.4 Πέλμα τροχού με μοτίβο «ψαροκόκαλο»

Οι ρωγμές μορφής «ψαροκόκαλο» είναι λεπτές, παράλληλες ρωγμές στην επιφάνεια του πέλματος του τροχού που εμφανίζονται υπό γωνία 45° στη διεύθυνση της κύλισης. Διανέμονται στην περίμετρο του τροχού σε δύο ζώνες, τη Ζώνη 1, που είναι στην εσωτερική παρειά του όνυχα στην μεταβατική ζώνη μέχρι το πέλμα και τη Ζώνη 2, που εμφανίζεται περίπου 90-120 mm από την εσωτερική επιφάνεια του τροχού. Τα μοτίβα ψαροκόκαλου εμφανίζονται γενικώς μόνο σε τροχούς που δεν έχουν μηχανισμό φρένου με «τακάκια». Κανονικά, επηρεάζονται και οι δύο τροχοί του άξονα παρόμοια. Ενίοτε, οι ρωγμές μορφής «ψαροκόκαλο» σχηματίζονται υπό γωνία 90° προς τη διεύθυνση της κίνησης. Ο εντοπισμός αυτού του τύπου φθοράς γίνεται με έλεγχο με μαγνητικά σωματίδια ή με οπτική επιθεώρηση. Οι ρωγμές μορφής «ψαροκόκαλο» είναι αποτέλεσμα της επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς και έχουν ως συνέπεια το θρυμματισμό του πέλματος του τροχού. Σύγκυση μπορεί να υπάρξει με τις εγκάρσιες ρωγμές στο πέλμα του τροχού. Οι κανονισμοί λειτουργίας της ΑΜΕΛ επισημαίνουν πως οι ρωγμές μορφής «ψαροκόκαλο» είναι ανεκτές εφόσον δεν συνυπάρχουν με άλλου τύπου φθορές, όπως είναι ο θρυμματισμός ή οι εγκάρσιες ρωγμές. Σε αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει να τορνευτεί ο τροχός [6].

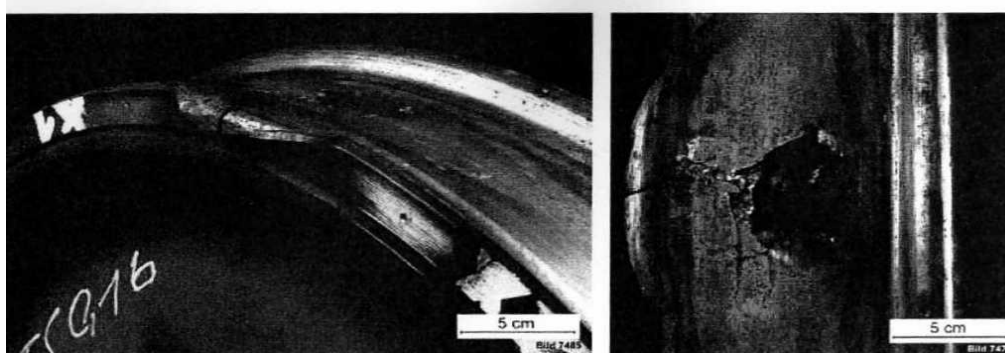


Εικόνα 2.12: Φθορά με μοτίβο "ψαροκόκαλο" [6]

Τύπος φθοράς	Ρωγμές μορφής «ψαροκόκαλο»
Αίτια	Επαφή τροχού – σιδηροτροχιάς
Επιπτώσεις	Εμφάνιση θρυμματισμού

2.2.4.5 Μερική προεξοχή / μεμονωμένη ισοπέδωση

Με τον όρο **μερική προεξοχή / μεμονωμένη ισοπέδωση** εννοείται η μεταφορά του υλικού του πέλματος του τροχού πέρα από την άκρη της όψης του τροχού. Η περιοχή που επηρεάζεται είναι περιορισμένου μήκους και δεν εκτείνεται γύρω από ολόκληρη τη στεφάνη του τροχού. Η μερική προεξοχή μπορεί επίσης να αναπτυχθεί από επιπεδότητα στον τροχό. Η ανίχνευσή της γίνεται με οπτική επιθεώρηση. Δημιουργείται από εξομάλυνση του τροχού (επιπεδότητα), από ανομοιογένεια υλικού γύρω από την περίμετρο του τροχού ή από ανεπαρκή αντοχή υλικών και έχει ως συνέπεια εμφάνιση ρωγμών ή ακόμα και θρυμματισμό στην εξωτερική επιφάνεια του τροχού. Παράλληλα, μπορεί να επιφέρει βλάβες στα φρένα του συρμού και μειωμένη άνεση επιβατών κατά τη διάρκεια της κίνησης, εξαιτίας της παραγωγής θορύβου και της ασταθούς, άνισης κίνησης. Οι κανονισμοί λειτουργίας της ΑΜΕΛ αναφέρουν τα ισχύοντα όρια: πλάτος προεξοχής μετρημένο από την εξωτερική επιφάνεια του τροχού ≤ 5 mm. Παράλληλα πρέπει να ικανοποιούνται και τα ισχύοντα όρια για την ακτινική εκκεντρότητα και για το πλάτος του τροχού [6].

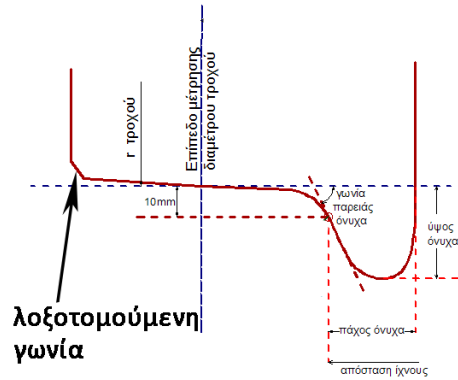


Εικόνα 2.13: Μερική προεξοχή [6]

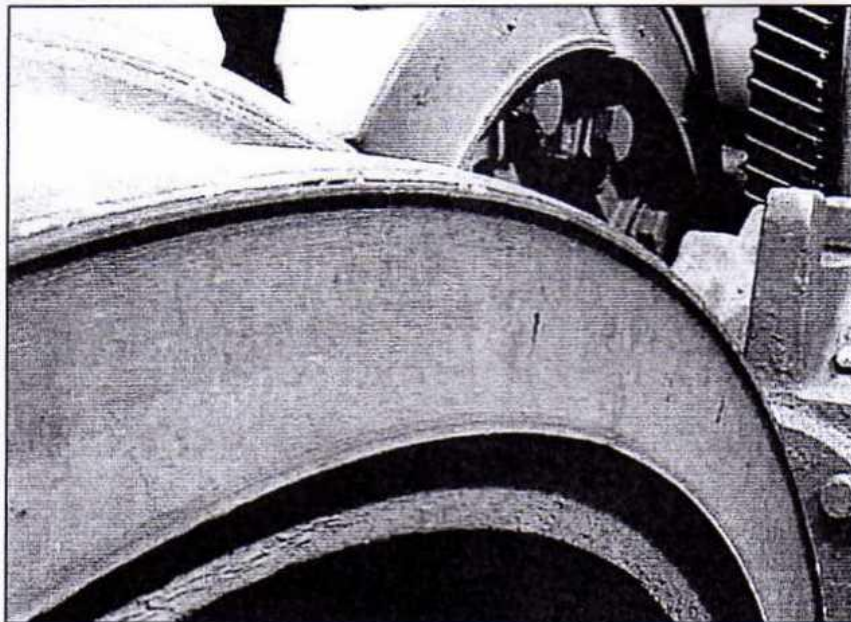
Τύπος φθοράς	Μερική προεξοχή / μεμονωμένη ισοπέδωση
Αίτια	<ul style="list-style-type: none">• Εξομάλυνση του τροχού (επιπεδότητα)• Ανομοιογένεια υλικού στην περίμετρο του τροχού• Ανεπαρκή αντοχή υλικών
Επιπτώσεις	<ul style="list-style-type: none">• Εμφάνιση ρωγμών ή/και θρυμματισμού• Βλάβες στα φρένα του συρμού• Μειωμένη άνεση επιβατών, παραγωγή θορύβου (επιπτώσεις θρυμματισμού)

2.2.4.6 Περιμετρική προεξοχή

Η **Περιμετρική προεξοχή** αναφέρεται ως μεταφορά του υλικού του πέλματος του τροχού πέρα από την άκρη του τροχού στην εξωτερική όψη του. Οπτικά αναγνωρίζεται επειδή η λοξοτομούμενη γωνία (Εικόνα 2.14) είναι δυσδιάκριτη. Η περιμετρική προεξοχή προκαλείται από υψηλή πλευρική ολίσθηση τροχών που προέρχεται από μεγάλα αξονικά φορτία, από εσφαλμένη ρύθμιση των αξόνων στο φορείο ή από ανεπαρκή αντοχή υλικών. Μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή των φρένων του συρμού και την ανάπτυξη πλευρικών ρωγμών στη λοξοτομούμενη γωνία. Οι κανονισμοί λειτουργίας της ΑΜΕΛ επισημαίνουν ότι πρέπει να εφαρμόζεται το όριο λειτουργίας για το πάχος του επισώτρου ή της κεφαλής του τροχού και ότι το πλάτος του που μετράται από την εξωτερική όψη του τροχού, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 5mm [6].



Εικόνα 2.14: Λοξοτομούμενη γωνία στον τροχό [5]

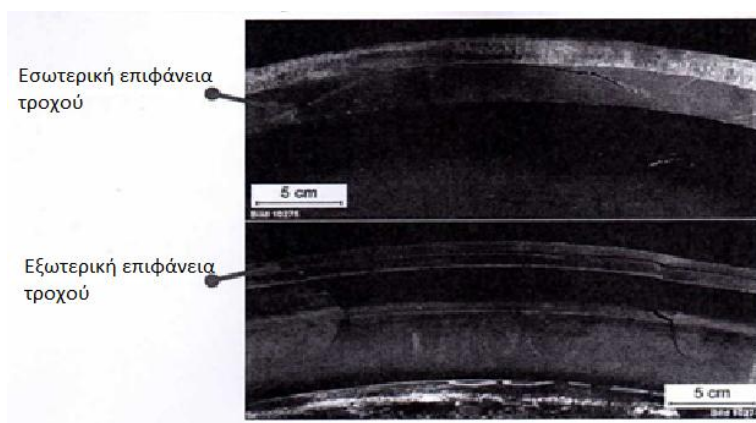


Εικόνα 2.15: Περιμετρική προεξοχή [6]

Τύπος φθοράς	Περιμετρική προεξοχή
Αίτια	υπερβολική θερμική ή μηχανική καταπόνηση, λόγω της ολίσθησης κατά την πέδηση ή κατά την εκκίνηση (σπινάρισμα)
Επιπτώσεις	μειωμένη άνεση επιβατών, παραγωγή θορύβου

2.2.4.7 Ασυνέχεια υλικού κάτω από το πέλμα

Η **ασυνέχεια υλικού** εμφανίζεται σε σταθερό βάθος κάτω από την επιφάνεια της κεφαλής ή του πέλματος του τροχού. Αυτό το ελάττωμα δεν είναι αρχικά ορατό. Όταν η φθορά βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο, οι ρωγμές εμφανίζονται στις όψεις του επισώτρου του τροχού ή της κεφαλής του, και μπορεί να οδηγήσουν σε θρυμματισμό μεγάλης έκτασης. Οι ασυνέχειες υλικού κάτω από το πέλμα βρίσκονται κατά κύριο λόγο στους τροχούς που έχουν σύστημα πέδησης με δισκόφρενα. Η ανίχνευση της ασυνέχειας γίνεται είτε με έλεγχο υπερήχων είτε με οπτική επιθεώρηση, εφόσον ο τροχός έχει υποστεί βλάβη προχωρημένου επιπέδου. Η βασική αιτία της ασυνέχειας υλικού είναι τα σφάλματα κατά την χύτευση του μετάλλου του τροχού. Οι ασυνέχειες υλικού μπορεί να προκαλέσουν το σχηματισμό επιπεδότητας, η οποία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την άνεση της οδήγησης και να προκαλέσει αυξημένη αίσθηση της ταχύτητας κυλίσεως. Σε προχωρημένο στάδιο της φθοράς, μπορεί να αφαιρεθούν μεγάλα κομμάτια του υλικού από την κεφαλή ή το πίσωτρο του τροχού, με αποτέλεσμα να προκαλέσουν εκτροχιασμό. Οι κανονισμοί λειτουργίας της ΑΜΕΛ επισημαίνουν ότι μεγάλης έκτασης ασυνέχειες υλικού δεν είναι επιτρεπτές.

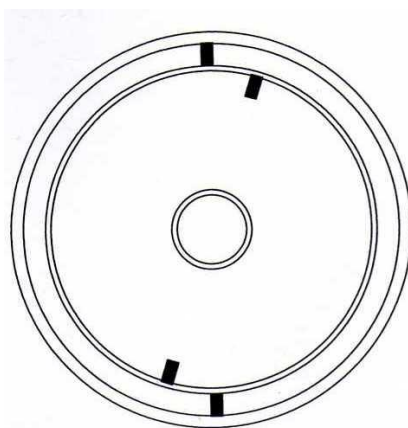


Εικόνα 2.16: Ρωγμές λόγω ασυνέχειας υλικού στην εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια του τροχού [6]

Τύπος φθοράς	Ασυνέχεια υλικού κάτω από το πέλμα
Αίτια	Κατασκευαστικά σφάλματα (μη μεταλλικά εγκλείσματα, εσωτερικά ελαττώματα, ανομοιογένειες της μικροδομής)
Επιπτώσεις	<ul style="list-style-type: none">• Σχηματισμός απλής ισοπέδωσης• Μειωμένη άνεση στην οδήγηση• Αυξημένη αίσθηση ταχύτητας κυλίσεως• Εκτροχιασμός (προχωρημένο στάδιο φθοράς)

2.2.4.8 Μετατοπισμένα εκ περιστροφής ή χαλαρά επίσωτρα τροχών

Τα Χαλαρά ή εκ περιστροφής μετατοπισμένα επίσωτρα τροχών αναγνωρίζονται επειδή τα ειδικά σημάδια τροχού και επισώτρου δεν συμπίπτουν (Εικόνα 2.17). Ένα χαλαρό ή μετατοπισμένο επίσωτρο μπορεί να προκύψει από ένα ρηγματωμένο επίσωτρο. Η ανίχνευση αυτών των επισώτρων γίνεται με οπτική επιθεώρηση. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται είτε λόγω χαλαρής συναρμογής τροχού και επισώτρου, είτε εξαιτίας αύξησης της διαμέτρου του επισώτρου του τροχού, που συμβαίνει λόγω υπερθέρμανσης ή λόγω ρηγμάτωσης αυτού. Η συνάφεια μεταξύ τροχού και επισώτρου, αποδυναμώνεται εξαιτίας της τριβής, προκαλώντας δευτερογενείς φθορές, όπως είναι η πλευρική μετατόπιση του επισώτρου, η οποία δημιουργεί κίνδυνο εκτροχιασμού. Οι κανονισμοί λειτουργίας της ΑΜΕΛ αναφέρουν ότι χαλαρά ή ευθυγραμμισμένα εκ περιστροφής επίσωτρα τροχών δεν επιτρέπονται [6].

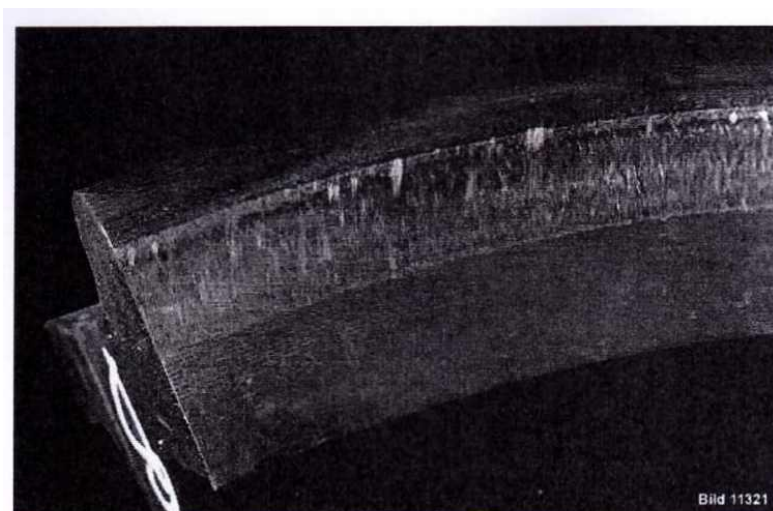


Εικόνα 2.17: Εκτοπισμένα εκ περιστροφής επίσωτρα [6]

Τύπος φθοράς	Μετατοπισμένα εκ περιστροφής ή χαλαρά επίσωτρα τροχών
Αίτια	<ul style="list-style-type: none">• Χαλαρή συναρμογή τροχού και επισώτρου• Αύξηση διαμέτρου του επισώτρου λόγω υπερθέρμανσης• Ρηγμάτωση του επισώτρου
Επιπτώσεις	<ul style="list-style-type: none">• Αποδυνάμωση της συνάφειας μεταξύ τροχού και επισώτρου• Δευτερογενείς φθορές (πλευρική μετατόπιση του επισώτρου, κίνδυνος εκτροχιασμού)

2.2.4.9 Φθορά στην εσωτερική πλευρά της κεφαλής ή στο επισώτρο του τροχού

Φθορά με τη μορφή εγκοπής ή επιφανειακών ατελειών μπορεί να εμφανιστεί στην **εσωτερική πλευρά της κεφαλής ή στο επισώτρο** του τροχού. Αυτή η φθορά βρίσκεται συνήθως σε μεγάλο τμήμα της περιμέτρου του τροχού. Είναι σύνηθες, να επηρεάζεται ολόκληρη η περιφέρεια του τροχού. Η φθορά αυτή ανιχνεύεται με οπτική επιθεώρηση. Εμφανίζεται εξαιτίας της μηχανικής φθοράς με στοιχεία συνήθους διαδρομής, π.χ. μία αντιτροχιά. Η συγκεντρωμένη πίεση μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό ρωγμών, γεγονός που μπορεί τελικά να προκαλέσει τη θραύση του τροχού ή του επισώτρου. Οι κανονισμοί λειτουργίας της AMEL αναφέρουν ότι οι εκδορές στην εσωτερική όψη της κεφαλής του τροχού ή του επισώτρου είναι επιτρεπτές, μόνο όταν δεν αναπτύσσεται ρηγμάτωση. Επομένως, οι ρωγμές δεν είναι επιτρεπτές [6].



Εικόνα 2.18: Φθορά στην εσωτερική πλευρά του επισώτρου [6]

Τύπος φθοράς	Φθορά στην εσωτερική πλευρά της κεφαλής ή του επισώτρου
Αίτια	Μηχανική φθορά με αίτια συνήθους διαδρομής (αντιτροχιά)
Επιπτώσεις	<ul style="list-style-type: none">• Σχηματισμός ρωγμών• Θραύση τροχού ή επισώτρου

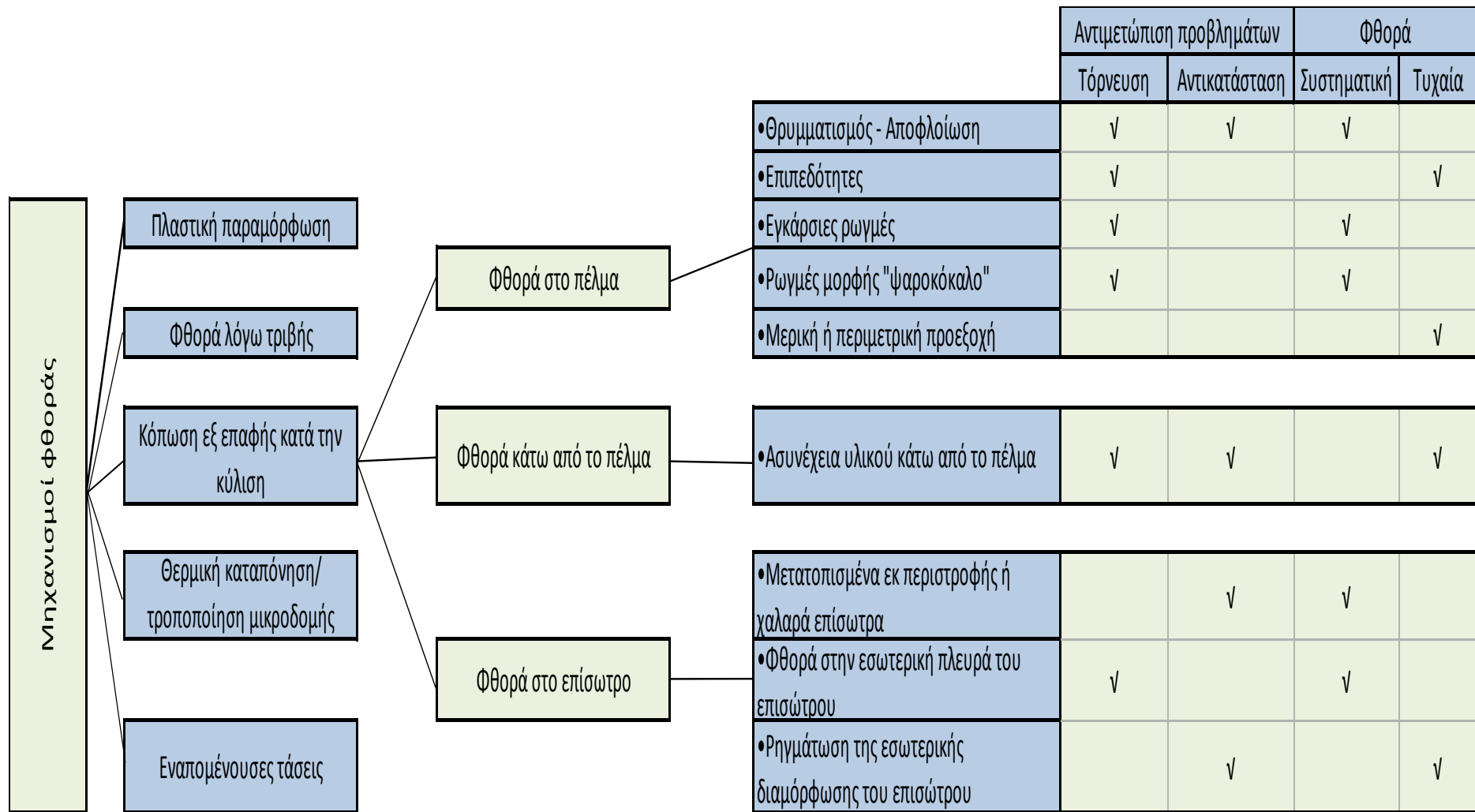
2.2.4.10 Ρηγμάτωση της εσωτερικής διαμόρφωσης του επισώτρου

Μεμονωμένες **εγκάρσιες ρωγμές** μπορεί να εμφανιστούν σε εσωτερικές επιφάνειες της διαμόρφωσης του επισώτρου όπως ο δακτύλιος σύνδεσης τροχού – επισώτρου (Εικόνα 2.2). Οι ρωγμές αυτές γενικά εκκινούν από σημεία που ευνοούν την συγκέντρωση τάσεων, όπως είναι μία εγκοπή ή μία αιχμηρή ακμή. Η ρηγμάτωση γενικά δεν είναι ορατή εξωτερικά, με εξαίρεση αυτής που έχει επεκταθεί μέχρι την εσωτερική ή την εξωτερική επιφάνεια του επισώτρου του τροχού. Η ανίχνευση γίνεται με έλεγχο με υπέρηχους. Οι κανονισμοί λειτουργίας της AMEL αναφέρουν ότι εγκάρσιες ρωγμές στην οπή του επισώτρου δεν επιτρέπονται [6].



Εικόνα 2.19: Ανοιγμένη οπή, ρηγμάτωση επισώτρου [6]

Τύπος φθοράς	Ρηγμάτωση της εσωτερικής διαμόρφωσης του επισώτρου
Αίτια	<ul style="list-style-type: none">• Φθορά στην επιφάνεια της ανοιγμένης οπής του επισώτρου• Κατασκευαστικά σφάλματα ή σφάλματα συναρμολόγησης• Μη μεταλλικά εγκλείσματα
Επιπτώσεις	Θραύση επισώτρου του τροχού



Εικόνα 2.20: Μηχανισμοί φθοράς

3

Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η πρόβλεψη της φθοράς στη διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς είναι ένα βασικό πρόβλημα στον τομέα των σιδηροδρόμων, το οποίο σχετίζεται κυρίως με τον προγραμματισμό των παρεμβάσεων συντήρησης, την ευστάθεια του οχήματος και τη δυνατότητα έρευνας συγκεκριμένων στρατηγικών για την βελτιστοποίηση των διατομών του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Η θεωρία του Hertz αποτελεί την κλασική βάση για την ανάλυση των προβλημάτων επαφής που αφορούν κυρτά σώματα όπως κυλίνδρους, σφαίρες, στοιχεία κύλισης κυλισεδράνων, οδοντωτούς τροχούς κτλ. Στη θεωρία αυτή η επαφή των ελαστικών σωμάτων αντιμετωπίζεται ως ένα ελαστοστατικό πρόβλημα που ακολουθεί συγκεκριμένους περιορισμούς [10]. Ακριβέστερες προσεγγίσεις του θέματος έγιναν μεταγενέστερα με την γραμμική θεωρία του Kalker [15] και την μη γραμμική θεωρία επαφής.

Η αλλαγή του σχήματος της διατομής επηρεάζει σε βάθος τα δυναμικά χαρακτηριστικά των σιδηροδρομικών οχημάτων, όπως είναι η σταθερότητα και η άνεση των επιβατών και σε προχωρημένες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει εκτροχιασμό. Επομένως, έχει μεγάλη οικονομική σημασία η ανάπτυξη ενός λογισμικού το οποίο να είναι σε θέση να προβλέψει την εξέλιξη της διατομής του τροχού εξαιτίας της φθοράς, ώστε να είναι χρήσιμο στην αποτελεσματική αξιολόγηση των διαστημάτων ανάμεσα στις διαδικασίες συντήρησης, τη βελτιστοποίηση των σιδηροδρομικών οχημάτων με νέες και χρησιμοποιημένες διατομές. Ένα μοντέλο πρόβλεψης της φθοράς των τροχών είναι ένα πολύπλοκο μαθηματικό εργαλείο, καθώς συνδυάζει πολλές διαδικασίες, όπως η προσομοίωση της δυναμικής του οχήματος, το μοντέλο της τοπικής επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς και το μοντέλο τοπικής φθοράς, κάθε μία από τις οποίες φέρει τις δικές της αβεβαιότητες. Επιπλέον, κάθε μεμονωμένη εργασία μπορεί

να επιλυθεί με διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο ακριβείς, και αντίστοιχα να απαιτείται υψηλότερη ή χαμηλότερη υπολογιστική προσπάθεια. Γι' αυτό το λόγο, όλο και περισσότεροι ερευνητές ασχολούνται με το θέμα αυτό, τα τελευταία χρόνια.

Μία από τις πρώτες προσπάθειες για την προσομοίωση της φθοράς των σιδηροδρομικών τροχών, έγινε από τους Pearce και Sherratt [11]. Το μοντέλο τους είναι πολύ απλό, προκειμένου να επιτευχθεί ένα λογικό χρονικό διάστημα προσομοίωσης. Υπολογίζεται η ποσότητα του υλικού που αφαιρέθηκε, μέσω ενός δείκτη φθοράς (αργότερα ονομάζεται «συντελεστής φθοράς Derby»). Η στρατηγική που ακολουθήθηκε για την τόννευση των τροχών είχε ως κριτήριο το μέγιστο αριθμό χιλιομέτρων. Το βέλτιστο μήκος της διαδρομής για την επόμενη τόννευση, βρέθηκε ίσο με 1100 χιλιόμετρα.

Ο Zobory [12] χρησιμοποίησε τη θεωρία του Hertz για την επίλυση του προβλήματος της φυσιολογικής επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς, και το FASTSIM (fast simulation) για το πρόβλημα της εφαιπτομενικής επαφής. Εξαιτίας των διαφορετικών περιπτώσεων φθοράς στο πέλμα και στη στον όνυχα του τροχού, ο Zobory εισήγαγε δύο σταθερές αναλογικότητας, μία για την «ήπια» περίπτωση στο πέλμα και μία για τη «σοβαρή» περίπτωση στον όνυχα. Η μετάβαση από τη μία περίπτωση στην άλλη εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Καταλήγει ότι οι διατομές των τροχών τερνεύονται κάθε 1000 χιλιόμετρα.

Οι Jendel και Berg ([13],[14]) ανέπτυξαν ένα εργαλείο πρόβλεψης της φθοράς της διατομής του τροχού, το οποίο εφαρμόστηκε σε ένα όχημα του σιδηροδρομικού δικτύου της Στοκχόλμης, για περιφερειακές μεταφορές. Η επαφή μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς διαμορφώνεται σύμφωνα με τη θεωρία του Hertz και την απλοποιημένη θεωρία του Kalker [15] (FASTSIM). Η μοντελοποίηση της φθοράς βασίζεται στο μοντέλο φθοράς του Archard ([16],[17]) και την εφαρμογή αυτού, καθώς επίσης και σε εργαστηριακές μετρήσεις. Τέλος, η επικύρωση του μοντέλου γίνεται με συγκρίσεις μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων της διατομής του τροχού και της προσομοίωσης για συνολική διανυμένη απόσταση 200.000 χιλιομέτρων λειτουργίας. Θεωρείται ότι:

- Η απόσταση 200.000 χιλιόμετρα αντιπροσωπεύει τη διάρκεια ζωής ενός μέσου τροχού.
- Η διατομή του τροχού τερνεύεται κάθε φορά που το βάθος φθοράς έχει φτάσει τα 0,1 χιλιοστά, ή όταν η απόσταση που έχει διανυθεί είναι ίση με 1500 χιλιόμετρα.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται μετρήσεις των διατομών των τροχών, που περιλαμβάνουν τα τέσσερα βαθμωτά μεγέθη φθοράς (πάχος, ύψος και κλίση όνυχα, και επιφάνεια περιοχής του πέλματος που έχει υποστεί φθορά).

Ο Braghin και άλλοι ερευνητές [18], ανέπτυξαν ένα μοντέλο πρόβλεψης της φθοράς του τροχού που βασίζεται σε ένα αλγόριθμο του Kalker[15], για την επίλυση του προβλήματος τόσο της κανονικής, όσο και της εφαπτομενικής επαφής. Βασίζεται, επίσης, σε ένα μοντέλο της τοπικής φθοράς που θεωρεί ότι υπάρχει άμεση αναλογία μεταξύ του υλικού που αφαιρείται και των δυνάμεων που αναπτύσσονται στην διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς. Για την προσομοίωση οι διατομές των τροχών τρηνεύονταν δύο φορές κατά τη διάλυση 10.500 χιλιομέτρων. Συγκρίνοντας τις πειραματικές διατομές που προήλθαν από δοκιμές πλήρους κλίμακας σε ακριβείς συνθήκες λειτουργίας, με τις ψηφιακές διατομές της προσομοίωσης, παρατηρείται ότι τα διάφορα υποπρογράμματα και οι αλληλεπιδράσεις τους, είναι έγκυρα. Ωστόσο, ισχυρίζονται ότι μπορεί να παρατηρηθεί υπερεκτίμηση της φθοράς στον όνυχα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην προσεγγιστική περιγραφή της φθοράς του όνυχα, δηλαδή της περίπτωσης σοβαρής φθοράς. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του βέλτιστου διαστήματος μεταξύ δύο τρηνεύσεων διατομής, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος του κύκλου ζωής, και για τον καθορισμό αυτών των παραμέτρων σχεδιασμού των οχημάτων που ορίζουν μικρότερη φθορά του τροχού και της σιδηροτροχιάς.

Οι προσομοιώσεις του κύκλου ζωής του τροχού έδειξαν ότι μία τρηνευση τροχού μετά από διάλυση 200.000 χιλιομέτρων περίπου, θα διπλασιάσει σχεδόν τη διάρκεια ζωής του, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο, το συνολικό κόστος του κύκλου ζωής.

Διαφορετικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του ρυθμού φθοράς των χαλύβδινων σιδηροδρομικών τροχών, ώστε να παράγουν δεδομένα για χρήση σε διαδικασίες μοντελοποίησης της φθοράς. Μετρήσεις πεδίου έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τη μελέτη των αιτιών της φθοράς, όπως αυτές που διεξήχθησαν στο Dearden [20]. Ένα μεγάλο μέρος των δεδομένων έχει, επίσης, συγκεντρωθεί από πειράματα προσομοίωσης που διενεργούνται σε ειδικά κατασκευασμένες δοκιμαστικές τροχιές [21]. Οι εργαστηριακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, κυμαίνονται από εργαστηριακά πειράματα μεγάλης κλίμακας [22] και δοκιμές μικρότερης κλίμακας [23], μέχρι και επιτραπέζιες δοκιμές, ([24]-[28]).

Ο δείκτης φθοράς Derby που χρησιμοποιήθηκε από τους Pearce και Sherratt [11], υιοθετεί μια ενεργειακή προσέγγιση στην ανάλυση της σχέσης μεταξύ του ρυθμού φθοράς και των συνθηκών επαφής. Θεωρείται δεδομένο ότι ο ρυθμός φθοράς (g/m rolled/ mm^2 επιφάνειας επαφής) σχετίζεται με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επαφή τροχού-σιδηροτροχιάς (ποσοστό φθοράς = $K\Gamma\gamma / A$, όπου T η ελκτική δύναμη, γ η ολίσθηση στη διεπαφή τροχού-σιδηροτροχιάς, K ο συντελεστής φθοράς και A η επιφάνεια επαφής). Διάφοροι ερευνητές έχουν αναφέρει αποτελέσματα της φθοράς του τροχού και της σιδηροτροχιάς, που

υποστηρίζουν αυτή την προσέγγιση ([22],[23],[25],[26],[29]). Παρόλο που έχει βρεθεί ότι δε λειτουργεί σε συνθήκες υψηλής ολίσθησης και έντονες συνθήκες επαφής [25], εξακολουθεί να αποτελεί την πιο κατάλληλη βάση για ένα μοντέλο φθοράς και έχει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα μοντέλα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, θα μπορούσαν να γίνουν βελτιώσεις σ' αυτή την προσέγγιση μοντελοποίησης, ιδίως όσον αφορά τη φθορά σε έντονες συνθήκες επαφής και υψηλής ολίσθησης. Οι φθορές του πέλματος και του όνυχα εμπίπτουν σε διαφορετικές περιπτώσεις φθοράς, και επομένως, θα ήταν καλύτερο να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές σταθερές για κάθε περιοχή.

Ο Chongyi και άλλοι ερευνητές [30] περιέγραψαν μια μεθοδολογία πρόβλεψης της φθοράς τροχού και σιδηροτροχιάς. Η μεθοδολογία χρησιμοποιείται για την προσομοίωση δοκιμών της φθοράς των διατομών του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και αυτά από τις αριθμητικές προσομοιώσεις, συμπεραίνεται γενικά ότι συμφωνούν. Η μεθοδολογία αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της εξέλιξης της διατομής του τροχού και της σιδηροτροχιάς, που συμβαίνει εξαιτίας της φθοράς.

Οι Enblom και Stichel [31] ασχολήθηκαν με την εφαρμογή των νέων τεχνολογιών που αφορούν στην πρόβλεψη της επιδείνωσης της επιφάνειας του τροχού. Στην εργασία τους περιέγραψαν μεθόδους για την πρόβλεψη της εξέλιξης της φθοράς και της γεωμετρίας της διατομής, καθώς και για την εκτίμηση του κινδύνου εμφάνισης κόπωσης εξ επαφής στο τροχάιο υλικό. Οι διαπιστώσεις τους είναι ότι οι μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι χρήσιμες για την πρόβλεψη της εξέλιξης της διατομής, η κοίλη φθορά συνδέεται με την αύξηση της κωνικότητας και τη φθορά του όνυχα. Οι μέθοδοι αξιολόγησης της κόπωσης είναι λιγότερο ώριμες και χρειάζονται περαιτέρω βαθμονόμηση, παρόλα αυτά εξακολουθούν να είναι σε θέση να υποδεικνύουν την τοποθεσία και τη σημασία του κινδύνου της φθοράς.

Ο Li και άλλοι ερευνητές [32] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία πρόβλεψης της φθοράς της διατομής του τροχού, που χρησιμοποιείται για τους τροχούς ενός σιδηροδρομικού οχήματος κατά την κίνησή του σε κομμάτι διαδρομής με απότομη καμπύλη. Υπολογίζεται η γεωμετρία της επαφής τροχού/σιδηροτροχιάς χρησιμοποιώντας την θεωρία του Kalker, ώστε να βρεθεί το πραγματικό κενό μεταξύ των παραμορφωμένων στοιχείων (τροχού/σιδηροτροχιάς). Έπειτα, χρησιμοποιείται το μοντέλο φθοράς Archard για τον υπολογισμό του βάθους φθοράς του πέλματος του τροχού. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι λογικά, και υποδεικνύουν ότι τα αριθμητικά φαινόμενα φθοράς των τροχών του οχήματος που έχουν αναπαραχθεί, είναι σύμφωνα με αυτά που συνέβησαν σε πραγματικές θέσεις σιδηροδρομικού δικτύου.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, είναι σύμφωνα με τις μετρήσεις πεδίου και είναι τα εξής:

- Η φθορά των τροχών που κυλίνουν επί της εξωτερικής σιδηροτροχιάς είναι πολύ πιο έντονη από εκείνη των τροχών επί της εσωτερικής σιδηροτροχιάς, όταν το όχημα κινείται σε απότομη καμπύλη τροχιά και
- Η φθορά των τροχών του πρώτου άξονα του συρμού είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με τους οπίσθιους τροχούςⁱ.

Η αριθμητική διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της επίδρασης πολλών παραγόντων στη φθορά του τροχού και τη διάρκεια ζωής της διατομής του.

Ο Rombo και άλλοι ερευνητές [33] παρουσίασαν ένα υπολογιστικό εργαλείο που είναι σε θέση να προβλέψει την εξέλιξη της διατομής του τροχού, για ένα δεδομένο σύστημα σιδηροδρόμων, ως συνάρτηση της διανυθείσας απόστασης.

Ο Ignesti και άλλοι ερευνητές [34] παρουσίασαν ένα πλήρες μοντέλο για την πρόβλεψη της φθοράς τροχού και σιδηροτροχιάς στην εφαρμογή των σιδηροδρόμων. Το μοντέλο αυτό είναι ειδικά αναπτυγμένο για την αξιολόγηση της εξέλιξης της διατομής του τροχού και της σιδηροτροχιάς εξαιτίας της φθοράς. Το μοντέλο ολικής επαφής χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των σημείων επαφής τροχού και σιδηροτροχιάς, και για τον υπολογισμό των δυνάμεων επαφής σε κάθε σημείο επαφής, βασιζόμενο στις θεωρίες Hertz και Kalker ([37],[38],[39]). Το μοντέλο φθοράς, βασίζεται κυρίως σε πειραματικές σχέσεις ([40],[41]), που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, ανάμεσα στην υλικό που αφαιρείται και την ενέργεια που απελευθερώνεται λόγω τριβής κατά την επαφή. Έπειτα, αξιολογείται το υλικό που αφαιρείται λόγω της φθοράς και λαμβάνονται οι φθαρμένες διατομές του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση τόσο της ποσότητας του υλικού που απομακρύνεται, όσο και της κατανομής αυτού, κατά μήκος των διατομών του τροχού και της σιδηροτροχιάς, προκειμένου να αναλύσει την εξέλιξη του σχήματος των διατομών κατά τη διάρκεια της ζωής τους.

Η εξέλιξη της γεωμετρίας τροχού και σιδηροτροχιάς περιγράφεται μέσω διαφόρων ενδιάμεσων διατομών. Η επιλογή του κατάλληλου αριθμού ενδιάμεσων μετρήσεων, είναι θεμελιώδης όσον αφορά την ακρίβεια και τον υπολογιστικό φόρτο, καθώς όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μετρήσεων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια αλλά και ο αντίστοιχος υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται. Επομένως, θα πρέπει να βρεθεί μία καλή συμβιβαστική λύση.

ⁱ Στο κεφάλαιο 5 έγινε έλεγχος των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα στοιχεία της AMEA.

Επιπλέον, οι διαφορετικές χρονικές κλίμακες που χαρακτηρίζουν την εξέλιξη της φθοράς του τροχού και της σιδηροτροχιάς, απαιτούν την ανάπτυξη μιας κατάλληλης στρατηγικής για την τόνευση της διατομής. Η στρατηγική που προτείνεται, βασίζεται:

- στη συνολική απόσταση που διανύεται από το όχημα για τη μελέτη της φθοράς των τροχών,
- στη συνολική χωρητικότητα σε βάρος της σιδηροδρομικής γραμμής για τη μελέτη της σιδηροτροχιάς.

Όσον αφορά την φθορά του τροχού, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις δυναμικές προσομοιώσεις έχουν συγκριθεί με πειραματικά δεδομένα ενώ, όσον αφορά την φθορά της σιδηροτροχιάς, έχει εξεταστεί η σύγκριση με τα πειραματικά κριτήρια που βασίζονται στη συνολική χωρητικότητα σε βάρος επί της σιδηροδρομικής γραμμής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την εξέλιξη της διατομής του τροχού επισημαίνουν πως, υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας της σιδηροδρομικής γραμμής που μελετήθηκε, η φθορά είναι αρκετά σοβαρή και έντονα εντοπισμένη στον όνυχα του τροχού, γεγονός που οδηγεί σε συχνές επεμβάσεις συντήρησης.

Ο Νίνος [42] ασχολήθηκε με το θέμα της επαφής σιδηροτροχιάς και τροχού και τις φθορές που επιφέρει αυτή τόσο στη σιδηροτροχιά όσο και στον τροχό. Επισημαίνει ότι:

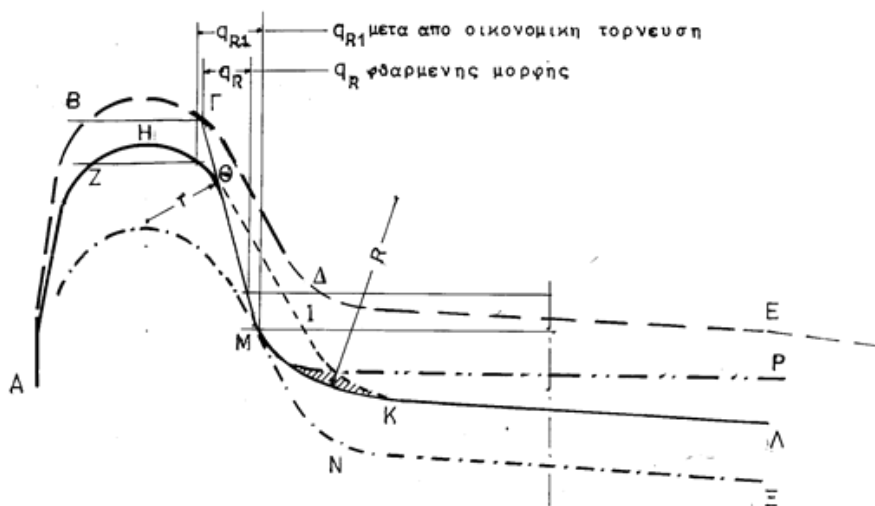
- Όταν η διαφορά των διαμέτρων των τροχών του ίδιου άξονα, υπερβεί ένα ορισμένο όριο, ο τροχός με τη μεγαλύτερη διάμετρο πιέζει αυτόν με την μικρότερη στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς. Ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα οριακά μεγέθη του πέλματος, η διαφορά διαμέτρων πρέπει να επαναφέρεται στα κανονικά όρια με τόνευση.
- Η μορφή των φθορών ή τα ίχνη επαφής εφόσον παρακολουθούνται συστηματικά, αποτελούν την βάση δεδομένων για την ποιότητα κύλισης του συρμού ή της επιδομής της γραμμής. Το να καταγράφονται τα στοιχεία ενός τροχού πριν και μετά την τόνευση, χωρίς αυτά να ταξινομούνται ανά όχημα και χωρίς να είναι υπό διαρκή παρακολούθηση, ώστε από αυτή την διαδικασία να προκύπτουν συμπεράσματα τόσο για τα οχήματα όσο και τη γραμμή, είναι ενέργειες χωρίς σκοπό και στόχο.
- Οι φθορές σε ένα σύστημα κύλισης ενός φορείου δεν είναι πάντα η φυσιολογική εξέλιξη της χρήσης. Εμφανίζονται φθορές μόνο στο πέλμα ή το νύχι, φθορές διαγώνιες ή μονόπλευρες.

Επίσης, για την *οικονομική τόννευση* των τροχών αναφέρει τα εξής:

- Η οικονομική τόννευση τροχών γίνεται μόνο μεταξύ δύο περιοδικών επισκευών και ποτέ κατά τις περιοδικές επισκευές.
- Έχει σαν στόχο την εξοικονόμηση υλικού κατά την τόννευση.
- Όταν σε τροχούς διαπιστωθούν ανεπίτρεπτες φθορές η μορφή ανανεώνεται εν μέρει ή εξ ολοκλήρου ώστε οι τροχοί να εξακολουθήσουν να κυκλοφορούν με ασφάλεια.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την τόννευση περιγράφεται συνοπτικά. Εκτιμάται ο χρόνος από την ημερομηνία της περιοδικής επισκευής μέχρι την ημερομηνία διαπίστωσης των φθορών και ανάγεται το μέγεθος που έχει φθαρεί ανά μονάδα χρόνου (εβδομάδα ή μήνα). Έπειτα εκτιμάται ο χρόνος που απομένει μέχρι την επομένη περιοδική επισκευή. Έτσι διαπιστώνεται ποσοτικά η βελτίωση των φθαρμένων μεγεθών ώστε ο τροχός να κυκλοφορήσει μέχρι την επομένη περιοδική επιθεώρηση.

Στην Εικόνα 3.1 έχει σχεδιασθεί η πλήρης μορφή που δόθηκε στο πέλμα στην περιοδική επισκευή, η φθαρμένη μορφή με $q_R = 6,5 \text{ mm}$, η μορφή της οικονομικής τόννευσης και η πλήρης μορφή που προκύπτει χωρίς οικονομική τόννευση. Η οικονομία υλικού είναι προφανής. Το κοπτικό του τόννου αντιγράφοντας το πρότυπο διαγράφει την A Z H Θ I K Λ αφήνοντας ατόρνευτα τα διαγραμμισμένα τρίγωνα. Αυτά αφαιρούνται εμπειρικά, επιβάλλοντας το κοπτικό να κινηθεί επί καμπύλων ακτίνας r και R . Το κοπτικό θα αφαιρούσε επί πλέον υλικό διαγράφοντας την καμπύλη A M N Ξ αν είχε δοθεί η πλήρης μορφή.



Εικόνα 3.1: Οικονομική τόννευση τροχού [42]

A B Γ Δ E	Πλήρης μορφή προ κυκλοφορίας
A Z H Θ M P	Μορφή φθοράς
A Z H Θ I K Λ	Πορεία κοπτικού κατά την οικονομική τόννευση
A Z H Θ M K Λ	Μορφή οικονομικής τόννευσης
A M N Ξ	Πλήρης μορφή μετά από κανονική τόννευση

Οι Austin, Wylie και Kay [43] ασχολήθηκαν με την εκτίμηση του κόστους συντήρησης των σιδηροδρομικών τροχών. Ανέπτυξαν μία πιθανολογική μεθοδολογία για την εκτίμηση του σχετικού κόστους των διαφόρων στρατηγικών συντήρησης ενός τροχοφόρου άξονα. Η μεθοδολογία αξιολογεί τα αποτελέσματα από το συνδυασμό της πολιτικής που ακολουθείται για την τόννευση των τροχών, τους κανόνες εξίσωσης των διαμέτρων και τις προγραμματισμένες τορνεύσεις, με κριτήριο το κόστος της συντήρησης, και λαμβάνει υπόψη τη συχνότητα εμφάνισης ελαττωμάτων στο πέλμα και τους ρυθμούς φθοράς του πέλματος και του όνυχα.

Τα κυριότερα συμπεράσματα της έρευνάς τους είναι τα εξής:

- Ο σημαντικότερος παράγοντας κόστους είναι εκείνος που σχετίζεται με την ποσότητα του υλικού που αφαιρείται από τον τροχό κάθε φορά που τορνεύεται.
- Η μερική τόννευση επηρεάζει το ποσοστό των τροχών που βρίσκονται εντός δύο χιλιοστών από τα όρια ασφαλείας για το ύψος και το πάχος του όνυχα. Ωστόσο, όλοι οι τροχοί παραμένουν εντός των προδιαγραφών.
- Φαίνεται να υπάρχει ένα μικρό όφελος κόστους στην τόννευση όλων των τροχών του ίδιου οχήματος στην ίδια τιμή της διαμέτρου, καθώς ελαχιστοποιεί την πιθανότητα παράβασης των ορίων για εξίσωση των διαμέτρων των τροχών, όταν το όχημα βρίσκεται σε λειτουργία.
- Η μερική τόννευση (βλέπε προηγούμενη αναφορά, Νίνος) προσφέρει την πιο ελκυστική στρατηγική οφέλους του κόστους, η οποία εξασφαλίζεται από το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού των τροχοφόρων αξόνων του δείγματος, βρέθηκε ότι θα διαρκέσει για ένα πλήρες διάστημα βαριάς συντήρησης.
- Περαιτέρω προσπάθειες απαιτούνται για την επιβεβαίωση της επίδρασης της μερικής τόννευσης στην ασφάλεια και την απόδοση των οχημάτων.

Συγκεντρωτικός πίνακας βιβλιογραφικής επισκόπησης

Εργασία	Χαρακτηριστικά διαδικασίας	Μοντέλο διεπαφής	Μοντέλο φθοράς	Προτεινόμενο διάστημα μεταξύ των τορνεύσεων	Κριτήριο τórνευσης
Pearce et Sherratt (1991)	υπολογισμός υλικού που αφαιρείται κατά την τórνευση		Δείκτης Derby	1100km	αριθμός χιλιομέτρων
Zobory (1997)	αναλογία φθοράς και ενέργειας που απελευθερώνεται, 2 περιπτώσεις φθοράς: ήπια (στο πέλμα) και σοβαρή (στον όνυχα)	Hertz		1000km	αριθμός χιλιομέτρων
Zendel et Berg (2002)		Hertz, Kalker	Archard	1500km	βάθος φθοράς 0,1mm ή 1500km, Διάρκεια ζωής τροχού: 200.000km λειτουργίας
Braghin et al (2002)	αναλογία φθοράς και δυνάμεων που αναπτύσσονται στη διεπαφή, κάθε 2.000km έλεγχος με miniProf	Kalker		5000km	2 φορές στα 10.500km
Li et al (2011)		Kalker	Archard		Μεγαλύτερη φθορά στους εξωτερικούς τροχούς απ'ότι στους εσωτερικούς (σε καμπύλη), μεγαλύτερη στους πρώτους τροχούς απ'ότι στους οπίσθιους
Pombo et al (2011)	υπολογισμός υλικού που αφαιρείται κατά την τórνευση		τοπικά μοντέλα φθοράς	ΔΕ ΣΥΝΙΣΤΑΤΑΙ : μεγάλος χρόνος υπολογισμού, δεν υπάρχει ουσιαστική βελτίωση στην ακρίβεια πρόβλεψης της φθοράς	

Εικόνα 3.2: Βιβλιογραφική επισκόπηση

4

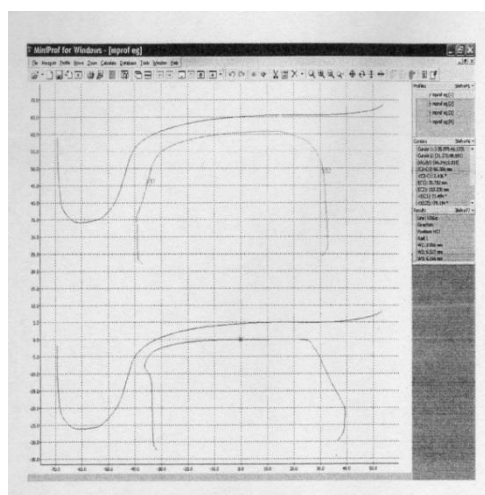
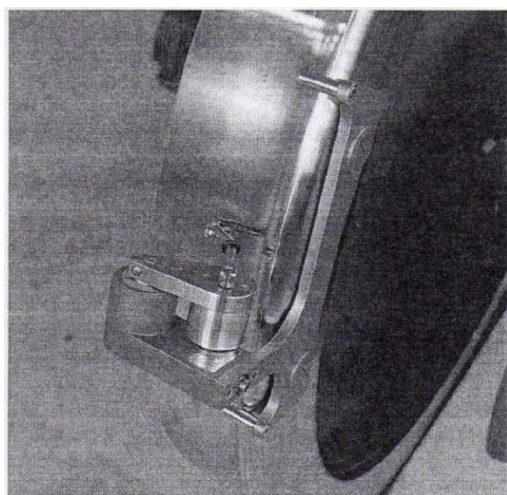
Περιγραφή συστήματος της Α.Μ.Ε.Λ. για τον έλεγχο και την τόννευση των τροχών

Η ΑΜΕΛ, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, είναι η εταιρεία που έχει αναλάβει τη λειτουργία του Μετρό της Αττικής. Αναπόσπαστο κομμάτι της ΑΜΕΛ αποτελεί το τμήμα που ασχολείται με τη συντήρηση. Το τμήμα της συντήρησης χωρίζεται σε πιο εξειδικευμένα τμήματα που αφορούν τη συντήρηση της υποδομής και τη συντήρηση του τροχαίου υλικού. Το τμήμα της συντήρησης του τροχαίου υλικού ασχολείται με διαδικασίες που αποσκοπούν στην καλύτερη αξιοποίηση των τροχών, έχοντας ως στόχο την ασφάλεια και την άνεση των επιβατών αλλά και το χαμηλότερο δυνατό κόστος λειτουργίας, στο οποίο περιέχεται και το κόστος συντήρησης. Λόγω των επιφανειακών ρωγμών στους τροχούς και της μη αποδεκτής γεωμετρίας τους, εξαιτίας της φθοράς, η διατομή των τροχών πρέπει να ανασχηματίζεται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η διαδικασία της επαναφοράς της διατομής του τροχού που έχει φθαρεί, στην πρότυπη ονομάζεται τόννευση των τροχών. Ένας επιπρόσθετος λόγος που τόννεύονται οι τροχοί είναι η εξίσωση των διατομών των τροχών που ανήκουν στον ίδιο άξονα. Δηλαδή, ένας άξονας τροχών μεταφέρεται στον τόννο, όταν ένας τουλάχιστον τροχός του έχει πλησιάσει ή εξαντλήσει μία από τις επιτρεπόμενες τιμές φθοράς, κατά τη λειτουργία του. Επομένως, παρόλο που μπορεί να χρειάζεται τόννευση μόνο ο ένας τροχός, αναγκαστικά θα τόννευτεί και ο άλλος του ίδιου άξονα ώστε να τηρηθούν τα όρια ανοχής που έχουν τεθεί από τον κατασκευαστή, για την απόκλιση των διαμέτρων των τροχών του ίδιου άξονα. Οι επιτρεπόμενες τιμές και τα όρια ανοχής αναφέρονται αναλυτικά σε επόμενα εδάφια.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την τόννευση αποτελείται από συγκεκριμένα βήματα, τα οποία επαναλαμβάνονται για κάθε τροχό. Υπάρχουν διάφοροι έλεγχοι που μπορεί να ορίσουν αν ένας τροχός χρειάζεται ανασχηματισμό της διατομής του. Ο πρώτος έλεγχος γίνεται με οπτική επιθεώρηση, ώστε να σημειώνονται οι επιφανειακές ρωγμές. Πολύ σημαντικός είναι, επίσης, ο έλεγχος υπερήχων (ultrasonic test) καθώς παρουσιάζει εάν υπάρχουν ρωγμές κάτω από την επιφάνεια του τροχού οι οποίες δεν είναι εμφανείς με τον οπτικό έλεγχο. Παράλληλα, γίνονται προληπτικές μετρήσεις στις διατομές των τροχών σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να ελέγχεται η εξέλιξη των διατομών των τροχών λόγω της φθοράς. Όταν η φθορά του τροχού υπερβεί κάποια καθορισμένα όρια, τότε κρίνεται απαραίτητη η μεταφορά του άξονα με τους φθαρμένους τροχούς, στο μηχάνημα του τόννου. Ο τόννος επαναφέρει τη διατομή του τροχού στην αρχική της μορφή, αφαιρώντας το απαραίτητο υλικό από τον τροχό. Οι μετρήσεις που γίνονται στις διατομές των τροχών, τόσο οι προληπτικές όσο και αυτές μετά τη διαδικασία της τόννευσης, καταγράφονται και αποθηκεύονται σε αρχεία, με σκοπό να παρατηρείται η εξέλιξη της φθοράς.

4.1 Προληπτικές μετρήσεις

Οι προληπτικές μετρήσεις γίνονται με μηχάνημα MiniProf (Εικόνα 4.1) περίπου κάθε 20.000-25.000 διανυθέντα χιλιόμετρα, εκτός εάν υπάρξει λόγος να γίνει και ενδιάμεση μέτρηση (π.χ. σε περίπτωση που δηλώσει ο οδηγός του συρμού περίεργο θόρυβο ή ταλάντωση του συρμού). Οι μετρήσεις αυτές διεξάγονται σε συγκεκριμένους τροχούς, στους οποίους έχει επισημανθεί μεγαλύτερη φθορά συγκριτικά με τους υπόλοιπους του ίδιου συρμού. Συνήθως οι προληπτικές μετρήσεις γίνονται σε έξι τροχούς κάθε συρμού, στους τροχούς του πρώτου, του τελευταίου και ενός ενδιάμεσου άξονα. Από αυτή την καταγραφή παρέχονται στοιχεία όπως τα χιλιόμετρα που έχει διανύσει ο συρμός και η ημερομηνία της μέτρησης, οι παράμετροι φθοράς, που είναι το ύψος(S_d), το πάχος(S_h) και η κλίση(q_R) του όνυχα, και το βάθος φθοράς (d). Ακολουθεί ένα δείγμα των αποτελεσμάτων αυτών των μετρήσεων (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.1: α) Μηχάνημα miniProf για τροχούς, β) παράδειγμα καταγραφής μετρήσεων του miniProf στον υπολογιστή [9]

DATE	KILOMETERS	TRAIN	CAB	WHEEL	DIRECTION	Sd	Sh	QR	DEPTH	CORRECTION	CALC_DEPTH
13-Απρ-07	543126	1	A13	1	L	32,70	29,10	11,30	1,00	0,00	1,0
13-Απρ-07	543126	1	A13	1	R	33,30	29,90	11,40	1,20	0,00	1,2
13-Απρ-07	543126	1	B13	1	L	33,30	29,10	11,20	1,30	0,00	1,3
13-Απρ-07	543126	1	B13	1	R	33,60	29,80	11,30	1,20	0,00	1,2
06-Αυγ-07	569896	1	A13	1	L	33,00	29,60	10,10	1,30	0,30	1,0
06-Αυγ-07	569896	1	A13	1	R	33,90	30,50	10,40	1,70	0,60	1,1
06-Αυγ-07	569896	1	B13	1	L	33,50	29,60	10,00	1,60	0,50	1,1
06-Αυγ-07	569896	1	B13	1	R	34,00	30,20	10,40	1,40	0,40	1,0
30-Οκτ-07	595502	1	A13	1	L	33,40	30,10	10,40	1,90	0,30	1,6
30-Οκτ-07	595502	1	A13	1	R	34,00	30,70	10,70	2,00	0,60	1,4
30-Οκτ-07	595502	1	B13	1	L	33,80	29,90	10,20	2,00	0,50	1,5
30-Οκτ-07	595502	1	B13	1	R	34,10	30,30	10,40	1,70	0,40	1,3
25-Ιαν-08	619775	1	A13	1	L	33,50	30,30	10,60	2,70	0,00	2,7
25-Ιαν-08	619775	1	A13	1	R	34,10	30,90	10,80	3,10	0,00	3,1
25-Ιαν-08	619775	1	B13	1	L	33,90	30,30	10,40	2,90	0,00	2,9
25-Ιαν-08	619775	1	B13	1	R	34,30	30,80	10,80	3,00	0,00	3,0
01-Απρ-08	633293	1	A13	1	L	32,70	28,30	9,60	0,20	0,20	0,0
01-Απρ-08	633293	1	A13	1	R	32,40	28,20	9,40	0,10	0,10	0,0
01-Απρ-08	633293	1	B13	1	L	33,20	28,30	9,80	0,20	0,20	0,0
01-Απρ-08	633293	1	B13	1	R	32,60	28,40	9,50	0,40	0,40	0,0
18-Απρ-08	639122	1	A13	1	L	32,60	28,30	9,60	0,30	0,20	0,1
18-Απρ-08	639122	1	A13	1	R	32,70	28,50	9,50	0,50	0,10	0,4
18-Απρ-08	639122	1	B13	1	L	33,20	28,40	9,80	0,40	0,20	0,2
18-Απρ-08	639122	1	B13	1	R	32,60	28,70	9,50	0,70	0,40	0,3
19-Ιουν-08	657842	1	A13	1	L	32,80	28,70	9,70	0,90	0,20	0,7
19-Ιουν-08	657842	1	A13	1	R	32,80	29,10	9,80	1,10	0,10	1,0
19-Ιουν-08	657842	1	B13	1	L	33,30	28,70	9,80	1,10	0,20	0,9
19-Ιουν-08	657842	1	B13	1	R	33,00	29,30	9,90	1,50	0,40	1,1

Εικόνα 4.2: Παράδειγμα πίνακα προληπτικών μετρήσεων

4.2 Επιτρεπόμενες διαφορές στις διαμέτρους τροχών συρμού

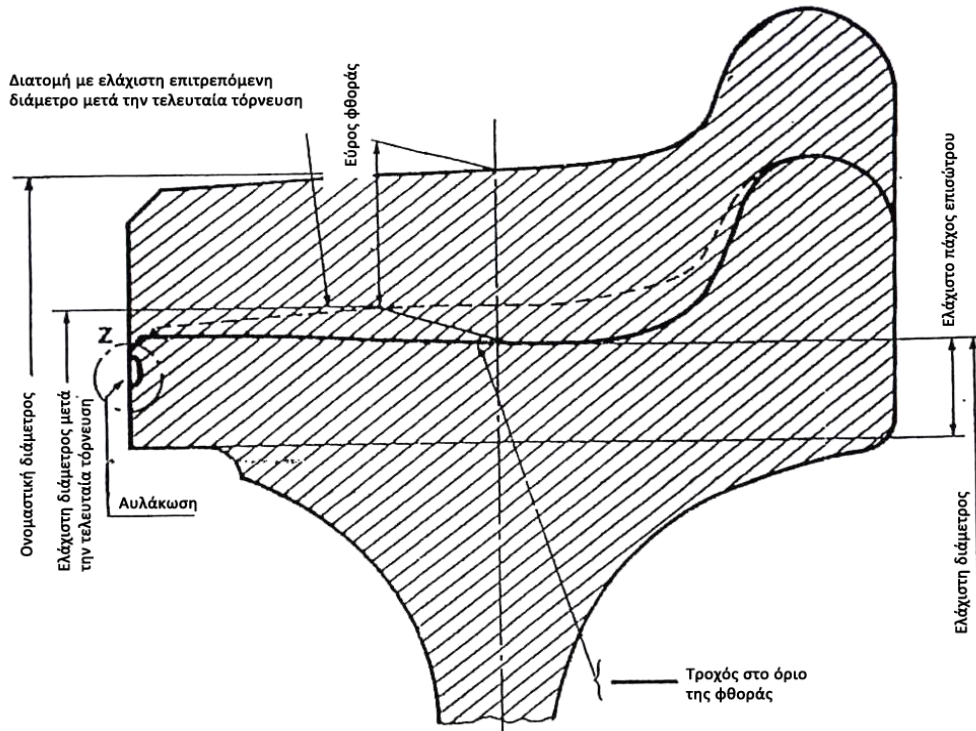
Η ΑΜΕΛ για τη διαδικασία τόννευσης χρησιμοποιεί κριτήρια και όρια διαστάσεων, ώστε η απόφαση για την αναγκαιότητα και το βάθος τόννευσης να προσδιορίζεται με μετρήσιμα αντικειμενικά κριτήρια. Ο τροχός έχει ονομαστική διάμετρο 860mm και τελική ωφέλιμη διάμετρο 780mm (Εικόνα 4.3). Όταν ο τροχός φτάσει την ωφέλιμη διάμετρο του, τότε πρέπει να αντικατασταθεί.

Τα κριτήρια τόννευσης είναι τα εξής:

- το βάθος στο πέλμα του τροχού,
- η διαφορά των διαμέτρων μεταξύ δύο τροχών που ανήκουν στον ίδιο άξονα,
- η διαφορά των διαμέτρων μεταξύ δύο αξόνων στο ίδιο φορείο,
- η διαφορά των διαμέτρων μεταξύ δύο αξόνων στο ίδιο βαγόνι, και
- η κλίση του όνυχα (q_R)

Το βάθος του πέλματος το οποίο αυξάνεται εξαιτίας της φθοράς του τροχού, αποτελεί το βασικότερο κριτήριο τόννευσης καθώς έχει παρατηρηθεί ότι είναι η παράμετρος που μεταβάλλεται περισσότερο στους τροχούς των συρμών του Μετρό. Ο τροχός χρειάζεται να τόννευτεί, όταν το βάθος αυτό ξεπεράσει την οριακή τιμή των τριών χιλιοστών του μέτρου. Τα όρια και τα κριτήρια αυτά αναφέρονται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πρέπει να σημειωθεί ότι μεγάλο ποσοστό των τροχών που τόννεύονται είναι εξαιτίας της εξίσωσής τους με τον τροχό του ίδιου άξονα. Αυτό παρουσιάζεται καλύτερα στο επόμενο κεφάλαιο όπου γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων και υπολογίζεται η διαφορά της διαμέτρου ανάμεσα στους τροχούς του ίδιου άξονα.



Εικόνα 4.3: Διατομή τροχού με ονομαστική διάμετρο και ωφέλιμη

ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗ		
Παράμετροι μετρήσεων τροχών	Συρμοί σειράς I (Γαλλικοί)	Συρμοί σειράς II (Κορεάτικοι)
Διάμετρος τροχού	860-780 mm	860-780 mm
Διαφορά διαμέτρων στον ίδιο άξονα	≤ 2 mm	≤ 1 mm
Διαφορά διαμέτρων μεταξύ δύο αξόνων στο ίδιο φορείο	$\leq 12,9$ mm	≤ 2 mm
Διαφορά διαμέτρων μεταξύ δύο αξόνων στο ίδιο βαγόνι	$\leq 12,9$ mm	≤ 6 mm
qR	$\geq 6,5$ mm	$\geq 6,5$ mm
Βάθος πέλματος	< 3 mm	< 3 mm

Πίνακας 1: Οριακές τιμές και κριτήρια τόννευσης

4.3 Τόρνος – Δυνατότητες και λειτουργία

Ο τόρνος έχει σχεδιαστεί για να επισκευάζει τους τροχούς των αξόνων που εδράζονται στο τροχάιο υλικό, και το δισκόφρενο χωρίς να χρειάζεται να μετακινηθούν οι τροχοφόροι άξονες. Είναι, επίσης, σε θέση να κατεργαστεί τους τροχοφόρους άξονες, είτε αυτοί είναι συναρμολογημένοι στο φορείο, είτε απλά μεμονωμένοι. Η ειδική διάταξη του, δηλαδή ο εξοπλισμός τοποθετημένος σε ένα κοίλωμα κάτω από το επίπεδο του πατώματος του συνεργείου επισκευής, επιτρέπει στον τόρνο να κατεργαστεί τους άξονες χωρίς να είναι αναγκαία η αποσυναρμολόγηση οποιουδήποτε τμήματος των οχημάτων.

Ο τόρνος, εξοπλισμένος με ένα σύγχρονο ψηφιακό έλεγχο, καθιστά δυνατή την αυτόματη εκτέλεση όλων των κύκλων εργασίας. Επομένως, εκτελεί εργασίες ανύψωσης και κεντραρίσματος των τροχοφόρων αξόνων, μέτρησης της διαμέτρου του πέλματος και της φθαρμένης διατομής, επεξεργάζεται τα δεδομένα και βελτιστοποιεί την ποσότητα που πρέπει να αφαιρεθεί, πραγματοποιεί την τελική μέτρηση της καινούργιας διατομής, εκτυπώνει πρωτόκολλο με τα κύρια στοιχεία του τροχοφόρου άξονα, και εφόσον ζητηθεί, το διαβιβάζει σε ένα κύριο κεντρικό υπολογιστή [45].



Εικόνα 4.4: Φωτογραφία τόρνου στο αμαξοστάσιο της Α.Μ.Ε.Α. στα Σεπόλια

Αρχικά τοποθετείται ο τροχός που χρειάζεται ανασχηματισμό διατομής στη σωστή θέση, που είναι το σημείο αναφοράς '0'. Από το χαμηλότερο σημείο της διαμέτρου, που βρέθηκε με τον ψηφιακό έλεγχο χρησιμοποιώντας το miniProf, υπολογίζεται το βάθος κοπής και εισάγεται στο μηχάνημα του τόννου. Για οικονομικούς λόγους, το βάθος κοπής πρέπει να είναι το μικρότερο δυνατό. Συνήθως, η διάμετρος μειώνεται περίπου (6 - 12) ~ 8 χιλιοστά σε κάθε τόννευση, αναλόγως τη φθορά. Το μηχάνημα του τόννου που χρησιμοποιείται από την Α.Μ.Ε.Λ. στην παρούσα κατάσταση πραγματοποιεί ένα ανασχηματισμό διατομής σε δύο βήματα. Δηλαδή, επεξεργάζεται χωριστά το πέλμα του τροχού από τον όνυχα. Υπάρχουν στο εμπόριο και πιο σύγχρονα μηχανήματα που πραγματοποιούν αυτή τη διαδικασία σε ένα μόνο βήμα (ένα τέτοιο μηχάνημα περιγράφεται στο τελευταίο κεφάλαιο). Επομένως, πρώτα σχηματίζεται το καινούργιο πέλμα και στη συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία του όνυχα. Αφού σχηματιστεί ο ένας τροχός, και καταγραφεί η νέα διάμετρος του, πρέπει να σχηματιστεί και ο άλλος τροχός του ίδιου άξονα, με την ίδια διαδικασία. Η διαφορά των διαμέτρων των δύο τροχών προτιμάται να είναι πολύ μικρή, σχεδόν αμελητέα, της τάξης του 0,1 του χιλιοστού, παρόλο που το όριο είναι αρκετά μεγαλύτερο. Οι τροχοί τορνεύονται μέχρι αυτή η διαφορά να επιτευχθεί, δηλαδή αν δε συμβεί με την πρώτη φορά, πρέπει η διαδικασία να επαναληφθεί. Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας, γίνεται έλεγχος των τροχών, πρώτα τοποθετώντας την καλίμπρα (θηλυκή διατομή) στον τορνευμένο τροχό και παρατηρώντας αν εφαρμόζει απόλυτα, έπειτα χρησιμοποιώντας ένα όργανο μέτρησης των παραμέτρων φθοράς (Εικόνα 4.5) όπου γίνεται ο έλεγχος τα q_R , S_d , και S_h να είναι μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες τιμές ασφαλείας και τέλος ακολουθεί ο έλεγχος με το μηχάνημα miniProf.



Εικόνα 4.5: Όργανο μέτρησης των παραμέτρων φθοράς

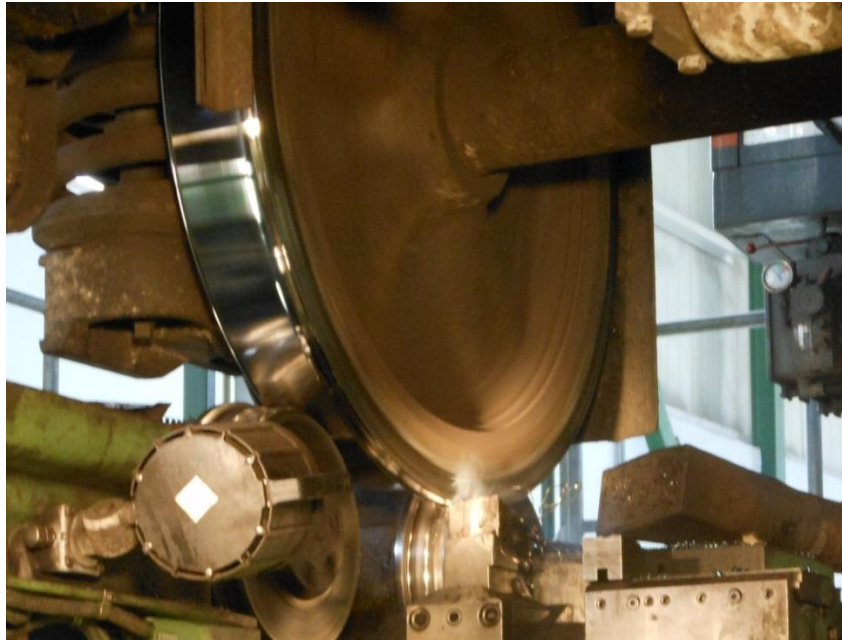
5

Συλλογή και επεξεργασία στοιχείων

Όλα τα στοιχεία που μετρώνται κατά την διαδικασία μετρήσεων και τόνρευσης τροχών που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο καταγράφονται συστηματικά από το προσωπικό της ΑΜΕΛ που χειρίζεται το μηχάνημα κοπής. Η καταγραφή γίνεται σε ειδικές φόρμες (Εικόνα 5.1) όπου σημειώνονται τα χιλιόμετρα του συρμού, η ημερομηνία της τόνρευσης και για κάθε τροχό οι παράμετροι φθοράς (ύψος, πάχος και κλίση όνυχια), και η διάμετρος του.

The image shows two forms for recording wheel measurements. The left form is for a carriage with axle number 3152 and bogie number 8322C. The right form is for a carriage with axle number 3247 and bogie number 8322C. Both forms have columns for 'ΤΡΙΑΡΙ', 'ΒΑΓΟΝΙ', 'ΒΟΓΙΕ', 'ΑΞΟΝΑΣ', 'ΔΙΕΥΣ. ΜΗΧΑΝ.', 'ΥΨΟΣ ΝΥΧΙΟΥ', 'ΠΑΧΟΣ ΝΥΧΙΟΥ', 'ΚΛΙΣΗ ΝΥΧΙΟΥ', 'ΔΙΑΜΕΤΡ. ΤΡΟΧΟΥ', 'ΤΡΟΧΟΣ ΑΞΟΝΑΣ', and 'ΔΙΕΥΣ.'. Below these columns are rows for different wheel types and axle positions, such as 'ΑΘΗΝΑ', 'ΠΕΙΡΑΙΑΣ', and 'ΑΘΗΝΑ'. The forms are filled with handwritten data for various wheels, including axle numbers, bogie numbers, and specific measurements.

Εικόνα 5.1: Φόρμα καταγραφής των στοιχείων κατά τη διαδικασία της τόνρευσης



Εικόνα 5.2: Τροχός κατά τη διαδικασία τόννευσης

Καταγράφονται τα στοιχεία όλων των συρμών του στόλου της ΑΜΕΛ που αποτελείται από 49 συρμούς, εκ των οποίων οι 28 (Γαλλικοί συρμοί) είναι η πρώτη γενιά συρμών της εταιρείας, και οι υπόλοιποι 21 είναι η δεύτερη γενιά των συρμών (Κορεάτικοι). Υπάρχει και η τρίτη γενιά συρμών η οποία δεν έχει τεθεί προς το παρόν σε λειτουργία και θα εξυπηρετεί τις ανάγκες του δικτύου των νέων σταθμών [4].

Τα θέματα που διερευνηθήκαν είναι:

- Ο εντοπισμός του χαρακτηριστικού τροχού ενός συρμού, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ των συρμών.
- Ο υπολογισμός του ρυθμού φθοράς και η εξέταση της συμπεριφοράς του.
- Ο υπολογισμός του κόστους συντήρησης και του κόστους αντικατάστασης όλων των τροχών ενός συρμού.

Τα θέματα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

5.1 Εντοπισμός των τροχών που εμφανίζουν μεγαλύτερη

φθορά

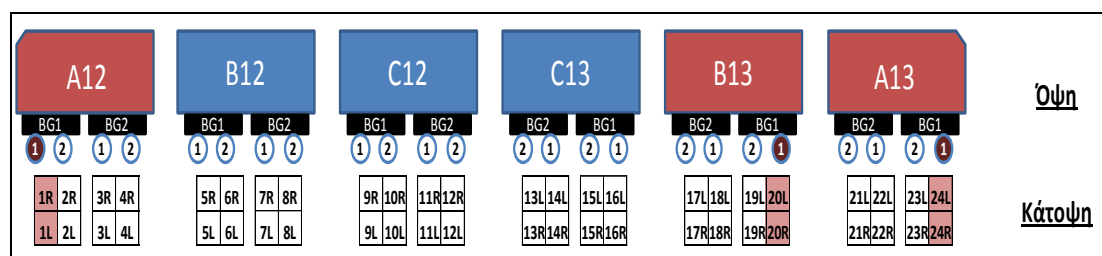
Από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι δεν καταπονούνται το ίδιο όλοι οι τροχοί ενός συρμού. Επομένως ελέγχεται ο άξονας των τροχών που φθείρεται περισσότερο. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε αναφέρεται στους 25 συρμούς από τους 28 της πρώτης γενιάς. Όμως, στο συρμό με αριθμό 5 εντοπίστηκαν σημαντικά σφάλματα στην καταγραφή των στοιχείων, και για το λόγο αυτό εξαιρέθηκε από το δείγμα. Επομένως, το δείγμα αποτελείται από 24 τρένα τελικά.

Οι ενδιάμεσες-προληπτικές μετρήσεις που καταγράφονται από την εταιρεία λειτουργίας του μετρώ, αφορούν τους τροχούς του πρώτου άξονα, των πρώτων βαγονιών (A), και ενός άξονα από τα μεσαία βαγόνια (B), όπως αναφέρονται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι άξονες αυτοί φαίνονται και στην Εικόνα 5.3 που ακολουθεί. Επομένως, καθίσταται υποχρεωτική η επιλογή ενός εκ των προαναφερθέντων έξι τροχών, ως αυτού που θα μελετηθεί.

Χρησιμοποιείται ως παράδειγμα για την περιγραφή της διαδικασίας το τρένο 1.

Η διαμόρφωση των συρμών πρώτης γενιάς είναι ως εξής:

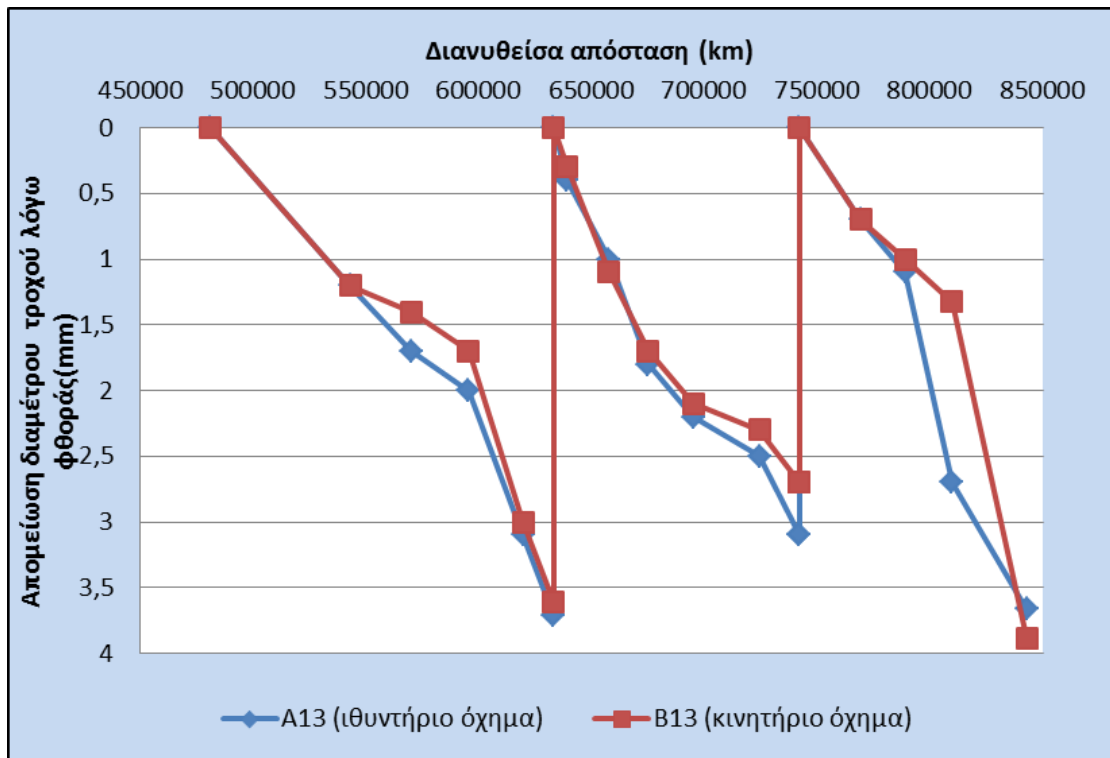
Δύο μονάδες τριών (3) οχημάτων συνδεδεμένων πλάτη με πλάτη. Το πρώτο όχημα (A) είναι ιθυντήριο και τα επόμενα (B,C) είναι κινητήρια οχήματα [4].



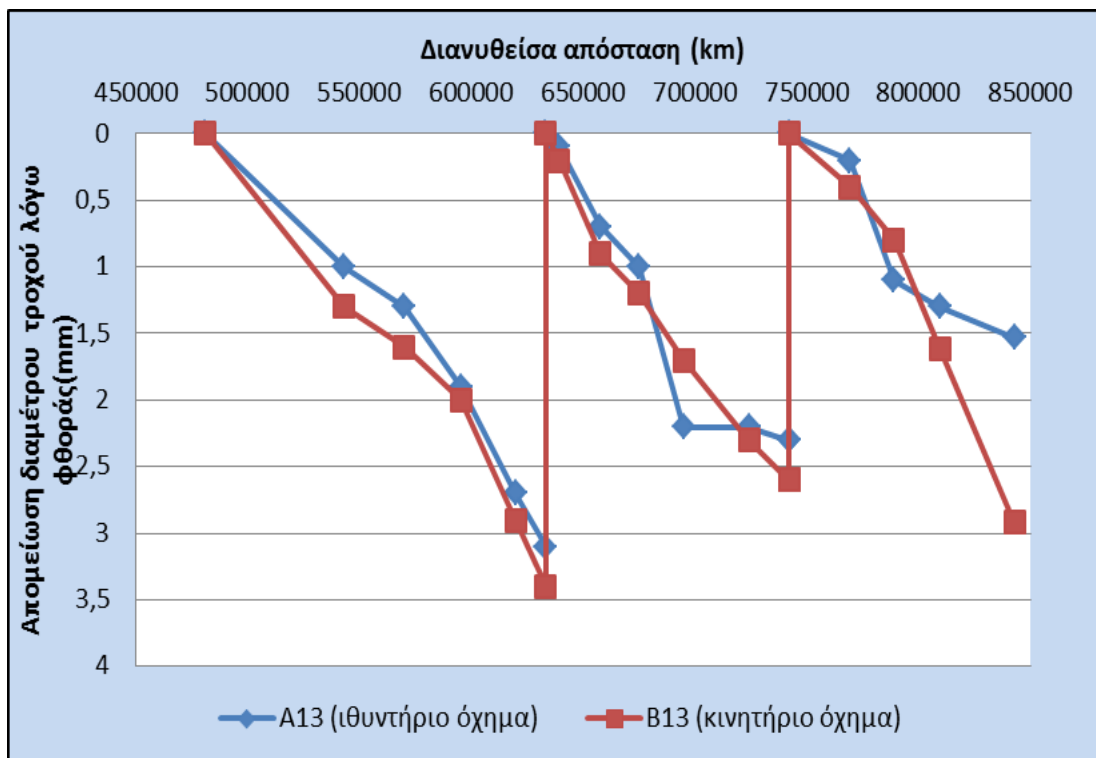
Εικόνα 5.3: Τρένο 1, σημειώνονται οι τροχοί για τους οποίους καταγράφονται οι προληπτικές μετρήσεις

5.1.1 Σύγκριση φθοράς μεταξύ τροχών ιθυντήριου και πρώτου κινητήριου οχήματος (βαγονιού)

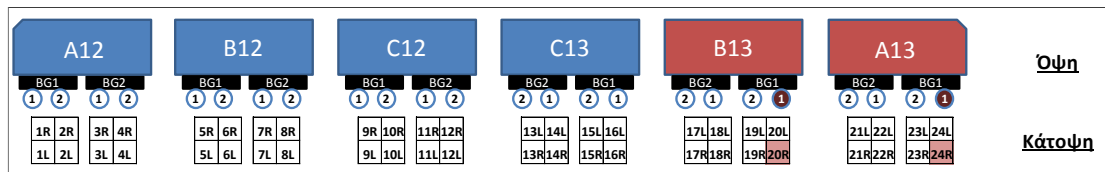
Συγκρίνονται οι δεξιοί και οι αριστεροί τροχοί χωριστά, των πρώτων αξόνων του ιθυντήριου βαγονιού A13 και του κινητήριου B13. Από τα δύο διαγράμματα που προκύπτουν, συμπεραίνεται ότι ο δεξιός τροχός του A13 καταπονείται περισσότερο από το δεξιό τροχό του B13, καθώς και οι τρεις κλάδοι της καμπύλης του A13 βρίσκονται συνεχώς χαμηλότερα (μεγαλύτερο βάθος εξ αρχής), από την καμπύλη του B13 (Εικόνα 5.4). Όπου βάθος εξ αρχής θεωρείται το βάθος που υπολογίζεται από την προηγούμενη τórνευση. Στα σημεία που φαίνεται το βάθος να μηδενίζεται, κατακόρυφη προς τα πάνω, είναι η χιλιομετρική απόσταση που γίνεται η τórνευση. Αντίθετα, για τους αριστερούς τροχούς παρατηρείται ότι καταπονείται περισσότερο ο μεσαίος τροχός (Εικόνα 5.5). Αυτό παρατηρείται και πιο αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί τα διαγράμματα (Εικόνα 5.6, Εικόνα 5.7). Από τους πίνακες προκύπτει το πρόσημο της διαφοράς των βαθών ιθυντήριου από κινητήριο και από αυτό προκύπτει σε κάθε σημείο μέτρησης ποιος τροχός έχει καταπονηθεί περισσότερο. Δηλαδή, το θετικό πρόσημο υποδηλώνει ότι ο τροχός του ιθυντήριου οχήματος καταπονήθηκε περισσότερο από τον τροχό του κινητήριου οχήματος. Αντίθετα, αν το πρόσημο της διαφοράς είναι αρνητικό, τότε ο τροχός του κινητήριου οχήματος έχει καταπονηθεί περισσότερο. Παρατηρείται γενικά κοινή συμπεριφορά πρόσημου μεταξύ των τórνευσεων. Στην τελευταία στήλη του πίνακα, αναγράφεται το ποσοστό των περιπτώσεων που η φθορά του τροχού του ιθυντήριου βαγονιού είναι μεγαλύτερη από τη φθορά του κινητήριου. Στο Παράρτημα (Π.1) γίνεται η σύγκριση για όλα τα τρένα. Από αυτές τις συγκρίσεις προκύπτει ο πίνακας (Εικόνα 5.8), όπου φαίνονται τα ποσοστά των «θετικών» περιπτώσεων για κάθε τρένο, για τους αριστερούς και τους δεξιούς τροχούς. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι δεν καταπονείται πάντα περισσότερο ο άξονας του ιθυντήριου βαγονιού, όμως αυτό συμβαίνει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Στην 5^η και την 6^η τórνευση καταπονείται περισσότερο το ιθυντήριο βαγόني στα περισσότερα τρένα (ποσοστά μεγαλύτερα από το 50%). Το αντίθετο συμβαίνει μόνο για τους δεξιούς τροχούς στην 7^η τórνευση.



Εικόνα 5.4: Σύγκριση δεξιών τροχών ιθνητήριου και κινητήριου βαγονιού

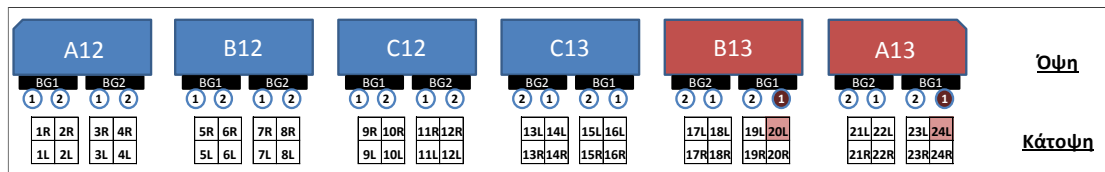


Εικόνα 5.5: Σύγκριση αριστερών τροχών ιθνητήριου και κινητήριου βαγονιού



Τρένο 1 δεξιά	διανυσθέντα χιλιόμετρα	A13 (ιθυντήριο όχημα)			B13 (κινητήριο όχημα)			διαφορές στη φθορά ιθυντηρίου από κινητήριο	ποσοστό περιπτώσεων που η φθορά του ιθυντηρίου υπερβαίνει το κινητήριο
		απομείωση ακτίνας τροχού (mm)	διαφορά από προηγούμενη μέτρηση	αθροιστική φθορά (mm)	απομείωση ακτίνας τροχού (mm)	διαφορά από προηγούμενη μέτρηση	αθροιστική φθορά (mm)		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(4)-(7)	
5η τórνευση	481253	0	-	-	0	-	-	-	100%
	543126	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	0,00	
	569896	1,70	0,50	1,70	1,40	0,20	1,40	0,30	
	595502	2,00	0,30	2,00	1,70	0,30	1,70	0,30	
	619775	3,10	1,10	3,10	3,00	1,30	3,00	0,10	
	633293	3,71	0,61	3,71	3,61	0,61	3,61	0,10	
6η τórνευση	633293	0,10	-	-	0,40	-	-	-	86%
	639122	0,50	0,40	0,40	0,70	0,30	0,30	0,10	
	657842	1,10	0,60	1,00	1,50	0,80	1,10	-0,10	
	674947	1,90	0,80	1,80	2,10	0,60	1,70	0,10	
	695133	2,30	0,40	2,20	2,50	0,40	2,10	0,10	
	724357	2,60	0,30	2,50	2,70	0,20	2,30	0,20	
	742045	3,20	0,60	3,10	3,10	0,40	2,70	0,40	
	742048	3,20	0,00	3,10	3,10	0,00	2,70	0,40	
7η τórνευση	742048	0,20	-	-	0,70	-	-	-	75%
	769189	0,90	0,70	0,70	1,40	0,70	0,70	0,00	
	788981	1,30	0,40	1,10	1,70	0,30	1,00	0,10	
	809702	2,90	1,60	2,70	2,03	0,33	1,33	1,37	
	842850	3,86	0,96	3,66	4,58	2,56	3,88	-0,22	

Εικόνα 5.6: Πίνακας σύγκρισης δεξιών τροχών για A13 και B13



Τρένο 1 αριστερά	διανυθέντα χιλιόμετρα	A13 (ιθυντήριο όχημα)			B13 (κινητήριο όχημα)			διαφορές στη φθορά ιθυντηρίου από κινητήριο	ποσοστό περιπτώσεων που η φθορά του ιθυντηρίου υπερβαίνει το κινητήριο
		απομείωση ακτίνας τροχού (mm)	διαφορά από προηγούμενη μέτρηση	αθροιστική φθορά (mm)	απομείωση ακτίνας τροχού (mm)	διαφορά από προηγούμενη μέτρηση	αθροιστική φθορά (mm)		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(4)-(7)	
5η τórνευση	481253	0	-	-	0	-	-	-	0%
	543126	1,00	1,00	1,00	1,30	1,30	1,30	-0,30	
	569896	1,30	0,30	1,30	1,60	0,30	1,60	-0,30	
	595502	1,90	0,60	1,90	2,00	0,40	2,00	-0,10	
	619775	2,70	0,80	2,70	2,90	0,90	2,90	-0,20	
	633293	3,10	0,40	3,10	3,40	0,50	3,40	-0,30	
6η τórνευση	633293	0,20	-	-	0,20	-	-	-	14%
	639122	0,30	0,10	0,10	0,40	0,20	0,20	-0,10	
	657842	0,90	0,60	0,70	1,10	0,70	0,90	-0,20	
	674947	1,20	0,30	1,00	1,40	0,30	1,20	-0,20	
	695133	2,40	1,20	2,20	1,90	0,50	1,70	0,50	
	724357	2,40	0,00	2,20	2,50	0,60	2,30	-0,10	
	742045	2,50	0,10	2,30	2,80	0,30	2,60	-0,30	
	742048	2,50	0,00	2,30	2,80	0,00	2,60	-0,30	
7η τórνευση	742048	1,00	-	-	0,80	-	-	-	25%
	769189	1,20	0,20	0,20	1,20	0,40	0,40	-0,20	
	788981	2,10	0,90	1,10	1,60	0,40	0,80	0,30	
	809702	2,30	0,20	1,30	2,41	0,81	1,61	-0,31	
	842850	2,53	0,23	1,53	3,72	1,30	2,92	-1,39	

Εικόνα 5.7: Πίνακας σύγκρισης αριστερών τροχών για A13 και B13

Τροχοί δεξιοί

Τόρνευση Κωδικός τρένου	5	6	7
1	100%	86%	75%
2	100%	80%	17%
3	75%	100%	33%
4	100%	20%	0%
6	100%	71%	17%
7	100%	100%	83%
8	67%	0%	
9	100%	67%	0%
10	100%	100%	20%
11	40%	57%	50%
12	100%	100%	
13	100%	67%	100%
14	60%	29%	40%
15	100%	14%	20%
16	100%	83%	100%
17	100%	100%	0%
18	60%	50%	100%
19	0%	67%	0%
20	50%	17%	75%
21	80%	20%	0%
22	100%	0%	0%
23	17%	11%	100%
24	75%	0%	100%
25	100%	63%	
μέσος όρος ποσοστού ανά τórνευση	80%	54%	44%

Τροχοί αριστεροί

Τόρνευση Κωδικός τρένου	5	6	7
1	0%	14%	25%
2	100%	100%	100%
3	100%	83%	67%
4	100%	100%	100%
6	100%	100%	0%
7	75%	100%	100%
8	100%	33%	
9	0%	83%	100%
10	75%	67%	100%
11	100%	71%	100%
12	100%	29%	
13	100%	0%	0%
14	60%	100%	0%
15	75%	86%	40%
16	63%	0%	0%
17	75%	80%	50%
18	60%	83%	33%
19	100%	100%	100%
20	100%	33%	100%
21	0%	100%	100%
22	100%	100%	100%
23	100%	89%	50%
24	0%	71%	100%
25	100%	75%	
μέσος όρος ποσοστού ανά τόρνευση	74%	71%	65%

Εικόνα 5.8: Αποτελέσματα σύγκρισης τροχών ιθνητήριων με κινητήριων βαγονιών σε όλο το δείγμα τρένων, Ποσοστό περιπτώσεων που η φθορά του ιθνητήριου υπερβαίνει το κινητήριο

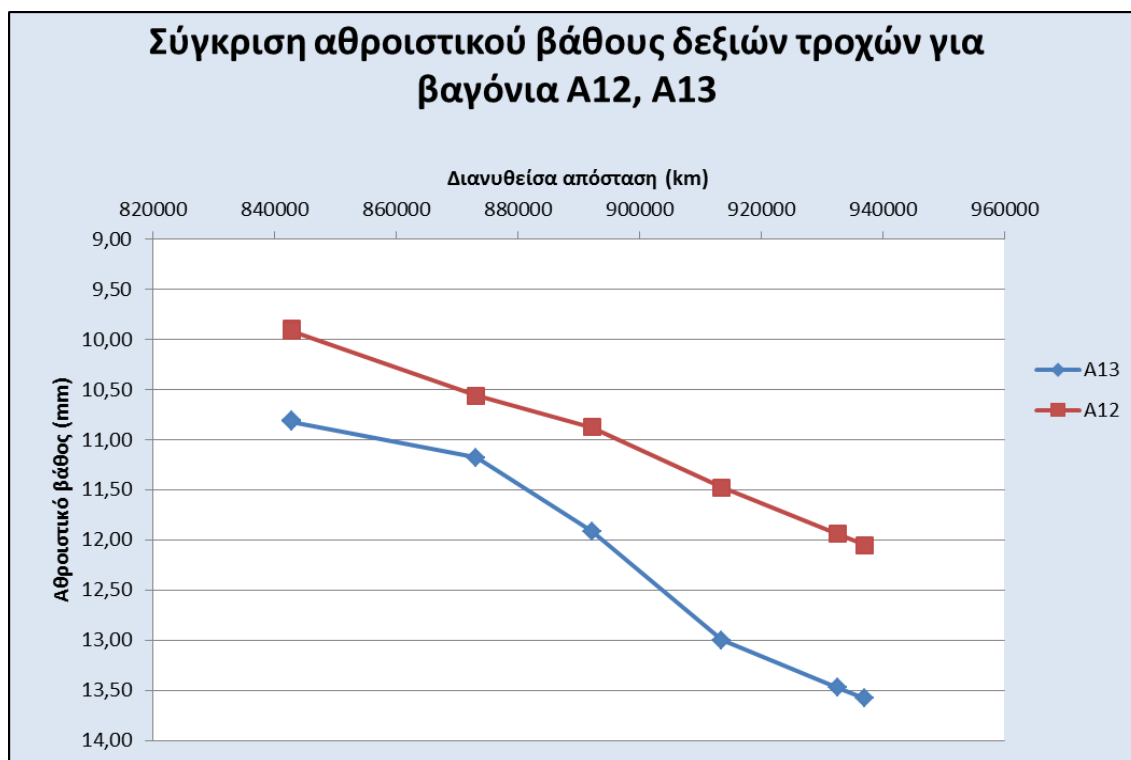
5.1.2 Σύγκριση τροχών πρώτου άξονα του πρώτου βαγονιού της μίας

κατεύθυνσης και της άλλης κατεύθυνσης (πρώτο και τελευταίο βαγόνι)

Για τη σύγκριση των τροχών του πρώτου και του τελευταίου βαγονιού (A12, A13), τα δεδομένα μας είναι ελλιπή, καθώς για το ένα από τα δύο βαγόνια έχουμε σημαντικά λιγότερες ενδιάμεσες μετρήσεις, γεγονός που παρουσιάζεται σε όλα τα τρένα. Παρόλα αυτά, γίνεται μία ποιοτική σύγκριση η οποία βασίζεται σε κάποιες παραδοχές. Αρχικά συγκρίνονται τα αθροιστικά βάρη.

Τα ελλειπή δεδομένα ξεκινούν μετά τη διάνυση αρκετών χιλιομέτρων. Για το παράδειγμά μας, τρένο 1, οι μετρήσεις του A12 ξεκινούν στα 809.702 διανυθέντα χιλιόμετρα. Θεωρώντας, λοιπόν, ότι το αθροιστικό βάθος ήταν ίδιο και στους δύο τροχούς μέχρι τον προηγούμενο μηδενισμό του βάθους (τόρνευση), εξάγονται τα παρακάτω διαγράμματα. Η θεώρηση αυτή είναι υπέρ της ασφαλείας για την απόδειξη ότι το βαγόνι με τις περισσότερες ενδιάμεσες μετρήσεις καταπονείται περισσότερο.

Για τους δεξιούς τροχούς (Εικόνα 5.9), παρατηρείται ότι ο τροχός του βαγονιού A13 καταπονείται πολύ περισσότερο από τον τροχό του A12.

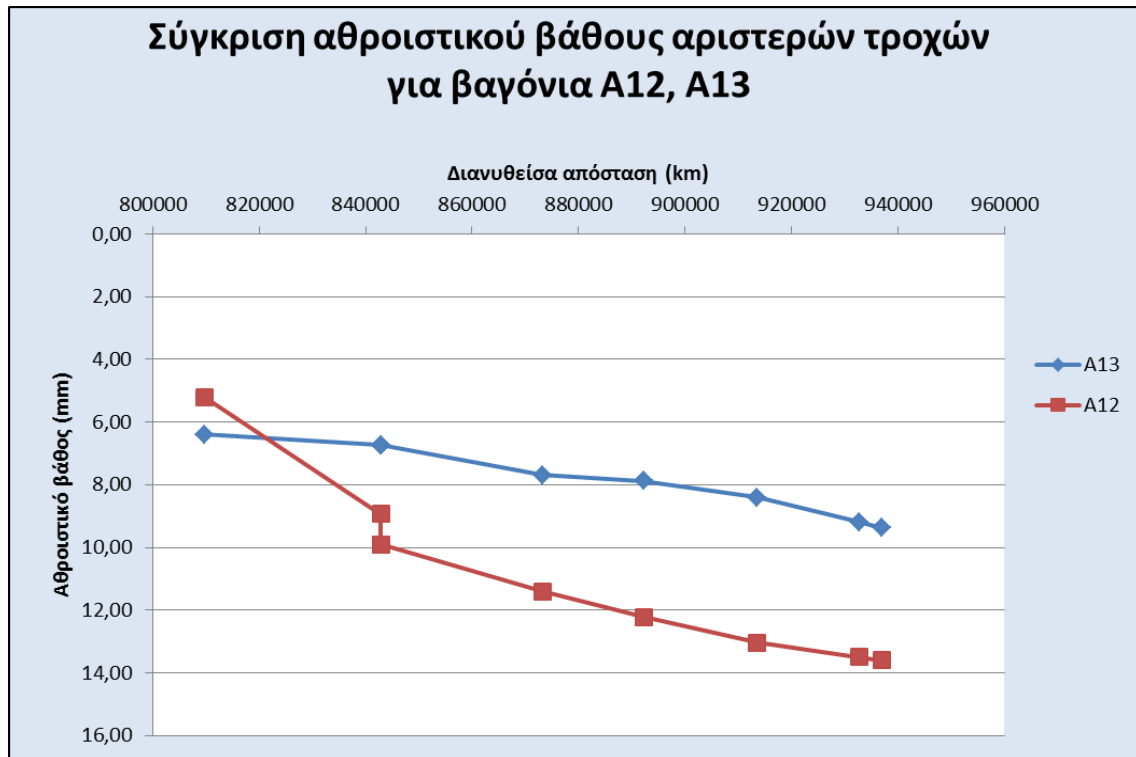


Εικόνα 5.9: Σύγκριση δεξιών τροχών πρώτου και τελευταίου βαγονιού

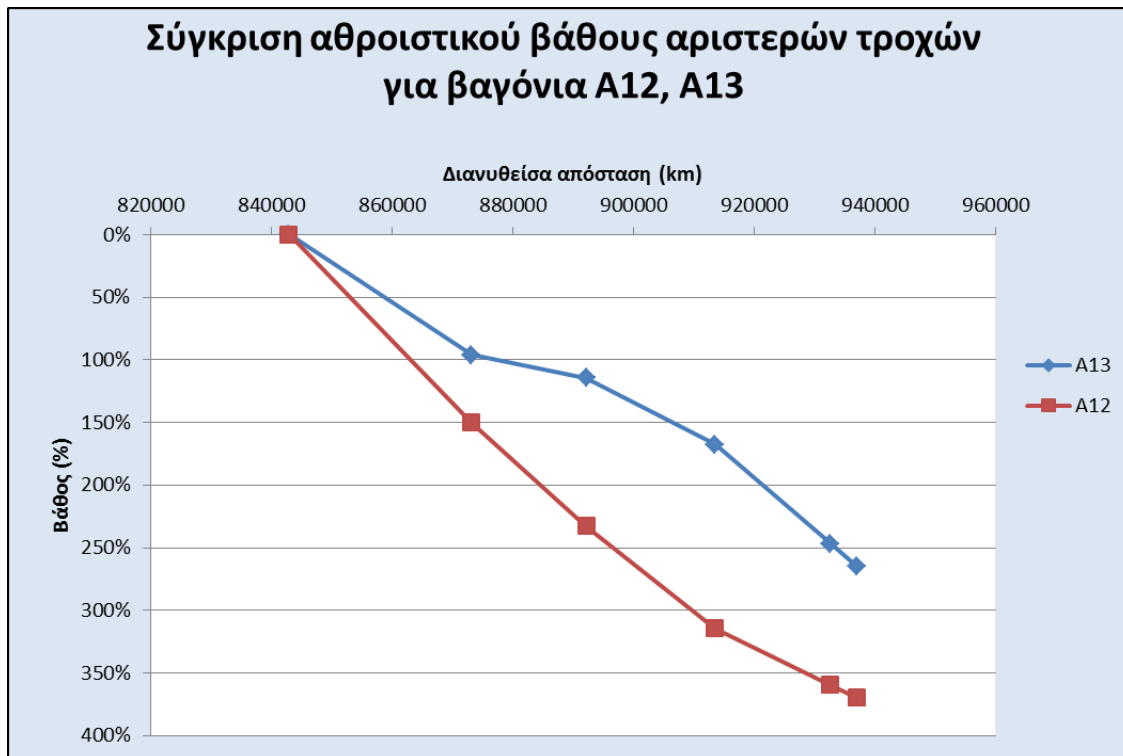
Αντιθέτως, για τους αριστερούς τροχούς του ίδιου τρένου, οι καμπύλες παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στη συμπεριφορά τους. Σύμφωνα με την παραπάνω παραδοχή, ο αριστερός τροχός του A12 καταπονείται περισσότερο από τον αντίστοιχο του A13 (Εικόνα 5.10). Επομένως, η παραδοχή καταρρίπτεται σε αυτήν την περίπτωση. Αν συγκριθεί απλά ο ρυθμός μεταβολής του βάθους, δηλαδή η κλίση της καμπύλης του βάθους μέχρι τον επόμενο μηδενισμό, και όχι αθροιστικά, προκύπτει ότι για εκείνες τις μετρήσεις, πράγματι ο τροχός του A12, καταπονείται περισσότερο (Εικόνα 5.11). Βέβαια, οι μετρήσεις αυτές αναφέρονται σε ένα τμήμα μόνο της εξέλιξης της διατομής του τροχού. Καθώς, δεν είναι γνωστή η εξέλιξη που προηγήθηκε δε μπορεί αυτό το κομμάτι να ληφθεί υπόψη. Δεν παύει, όμως να αποτελεί μία

ένδειξη ότι κάτι είναι διαφορετικό, π.χ. ότι οι αριστεροί τροχοί του A12 καταπονούνται συνεχώς περισσότερο από τους αριστερούς του A13.

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η σύγκριση αυτή και σε άλλα τρένα ώστε να παραχθεί κάποιο συμπέρασμα. Τα στοιχεία, όμως, συνεχίζουν να είναι ελλιπή και για τα υπόλοιπα τρένα. Θεωρείται λοιπόν, ότι το βαγόνι με τον άξονα τροχών που ελέγχεται συχνότερα (περισσότερες προληπτικές μετρήσεις) είναι και αυτό που καταπονείται περισσότερο.



Εικόνα 5.10: Σύγκριση αθροιστικού αριστερών τροχών πρώτου και τελευταίου βαγονιού



Εικόνα 5.11: Σύγκριση βάθους αριστερών τροχών πρώτου και τελευταίου βαγονιού

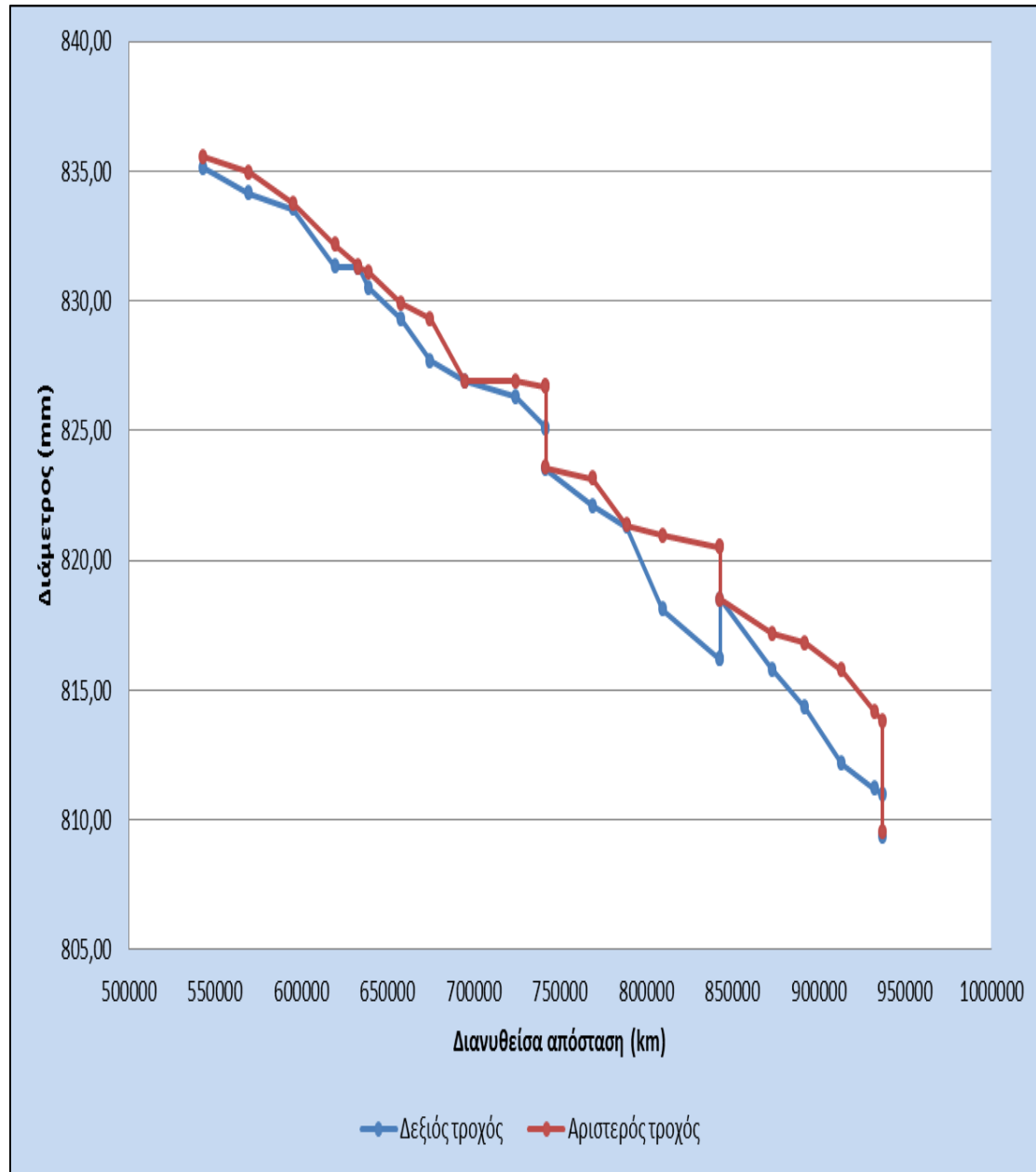
Στη συνέχεια της εργασίας, για τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου, συγκρίνονται οι τροχοί -δεξιά και αριστερά- μόνο του πρώτου άξονα του ιθνητήριου βαγονιού.

5.1.3 Σύγκριση τροχών αριστερά-δεξιά του ίδιου άξονα

Ένας έλεγχος που είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα αποτελέσματά του, ήταν η σύγκριση των τροχών –αριστερά και δεξιά- του ίδιου άξονα. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει τους 24 συρμούς που έχουν αναφερθεί προηγουμένα, και ο κάθε συρμός έχει περίπου 30 μετρήσεις. Στην αρχή, στη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι μετρήσεις των διαμέτρων των τροχών που καταγράφονταν μετά από κάθε τόννευση, με αποτέλεσμα σχεδόν να ταυτίζονται οι καμπύλες των δύο τροχών, σε όλα τα τρένα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η επιτρεπόμενη απόκλιση, που ορίζουν τα όρια της τόννευσης για τις δύο διαμέτρους των τροχών του ίδιου άξονα, είναι πολύ μικρή, έως αμελητέα, με αποτέλεσμα να μην είναι ορατή ευδιάκριτα στο διάγραμμα.

Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκαν και οι ενδιάμεσες μετρήσεις για την περιγραφή της εξέλιξης της διαμέτρου του κάθε τροχού. Ακολούθησε η δημιουργία διαγραμμάτων και πινάκων, χωριστά για κάθε τρένο, για την παρουσίαση των καμπυλών της εξέλιξης της διαμέτρου των τροχών του ίδιου άξονα (για το τρένο 1:Εικόνα 5.12, Εικόνα 5.13). Για τα υπόλοιπα τρένα στο Παράρτημα (Π.2). Από τα διαγράμματα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η

απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών είναι αρκετά σημαντική. Σε κάθε διάγραμμα φαίνεται ότι η απόκλιση αυτή, λίγο πριν την τόννευση, είναι αρκετά μεγάλη, και αυτό σημειώνεται από την απότομη πτώση, συνήθως κατακόρυφη, της καμπύλης στα σημεία της τόννευσης (για την ίδια διανυθείσα απόσταση μειώνεται η διάμετρος του τροχού). Η διαφορά ανάμεσα στις διαμέτρους τροχών ίδιου άξονα έχει βρεθεί μέχρι και 5,63 χιλιοστά, στο τρένο 20.



Εικόνα 5.12: Σύγκριση διαμέτρων τροχών του ίδιου άξονα για το τρένο 1, βαγόνι A13, χρησιμοποιώντας και τις ενδιάμεσες μετρήσεις

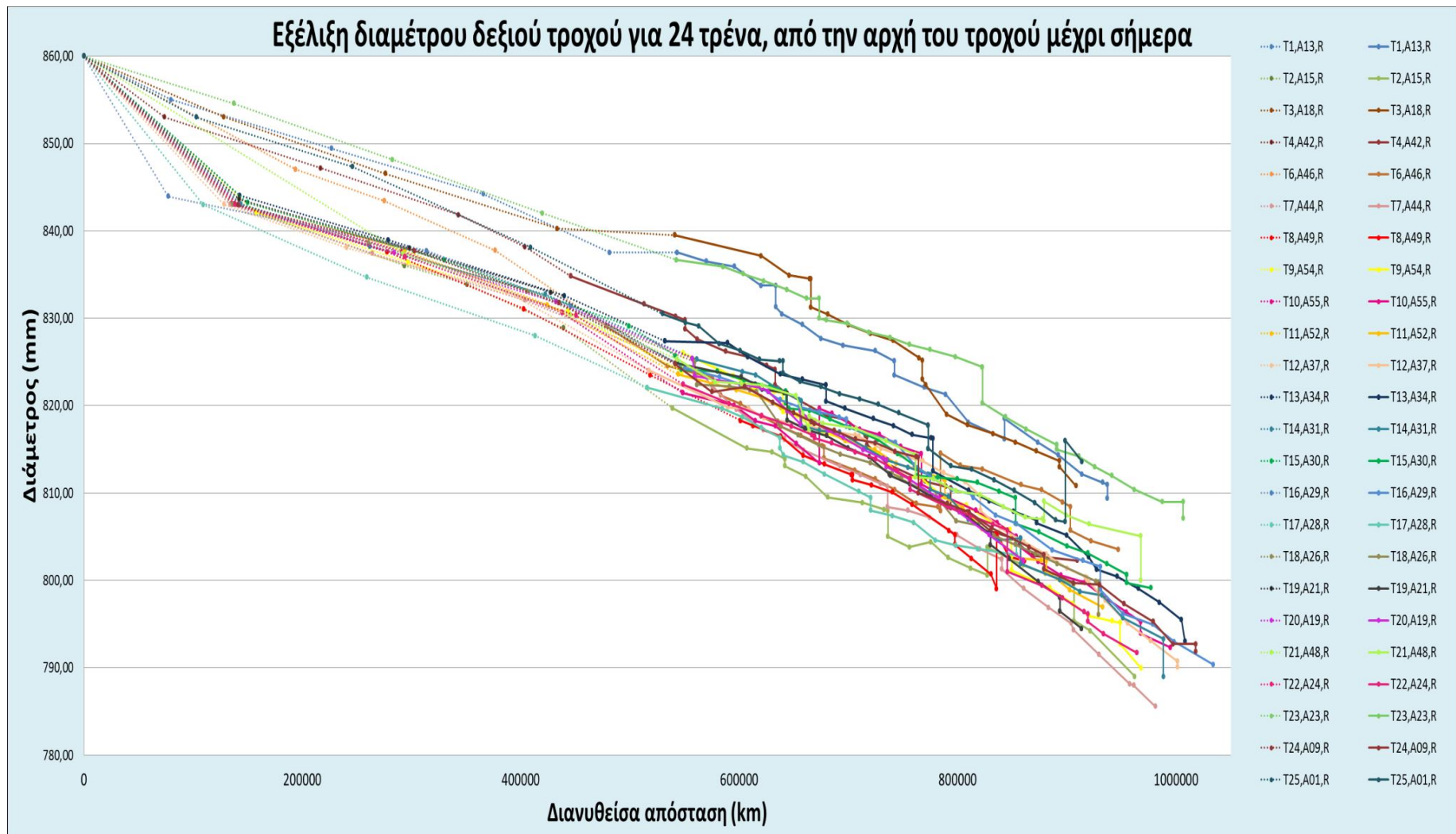
Τρένο 1	A13	Δεξιός τροχός		Αριστερός τροχός	
		Μέτρηση βάθους (mm)	Διάμετρος (mm)	Μέτρηση βάθους (mm)	Διάμετρος (mm)
5η τórνευση	481253	0,00	837,53	0,00	837,56
	543126	1,20	835,13	1,00	835,56
	569896	1,70	834,13	1,30	834,96
	595502	2,00	833,53	1,90	833,76
	619775	3,10	831,33	2,70	832,16
	633293	3,71	831,30	3,10	831,36
6η τórνευση	633293	0,10	831,29	0,20	831,30
	639122	0,50	830,49	0,30	831,10
	657842	1,10	829,29	0,90	829,90
	674947	1,90	827,69	1,20	829,30
	695133	2,30	826,89	2,40	826,90
	724357	2,60	826,29	2,40	826,90
	742045	3,20	825,09	2,50	826,70
	742048	3,20	825,09	2,50	826,70
7η τórνευση	742048	0,20	823,50	1,00	823,56
	769189	0,90	822,10	1,20	823,16
	788981	1,30	821,30	2,10	821,36
	809702	2,90	818,10	2,30	820,96
	842850	3,86	816,18	2,53	820,50
	842861	3,86	816,18	2,53	820,50
8η τórνευση	842861	-0,28	818,50	0,80	818,50
	873173	1,07	815,79	1,46	817,18
	892228	1,81	814,32	1,64	816,82
	913552	2,89	812,16	2,18	815,75
	932656	3,36	811,21	2,97	814,17
	937049	3,47	810,99	3,15	813,80
	937049	0,00	809,37	0,00	809,54

Εικόνα 5.13: Πίνακας σύγκρισης διαμέτρων τροχών ίδιου άξονα

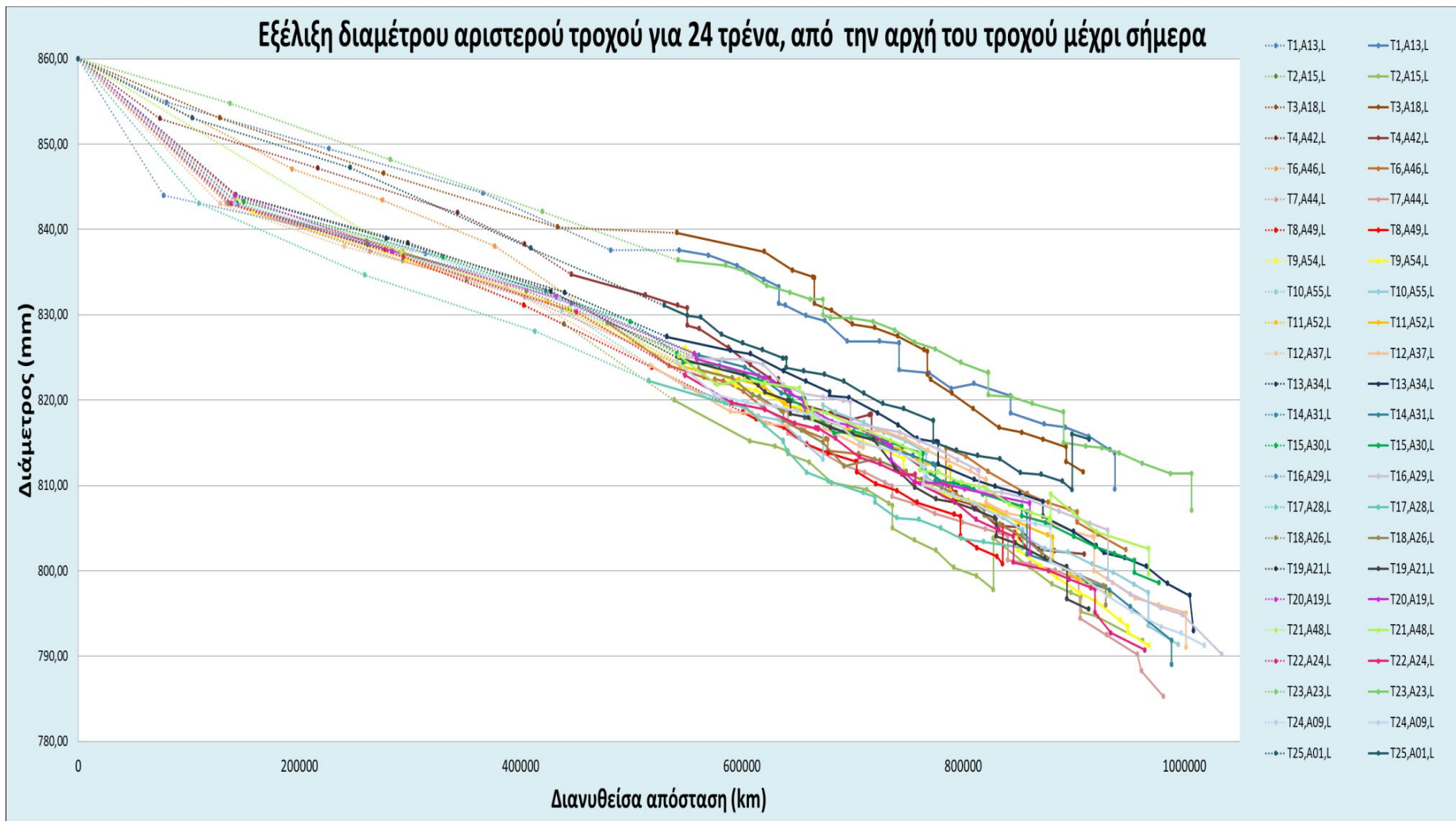
Έπειτα, δημιουργήθηκαν συγκεντρωτικά διαγράμματα για τα 24 τρένα (Εικόνα 5.14, Εικόνα 5.15), που απεικονίζουν την εξέλιξη των διαμέτρων τους, χωριστά για τους τροχούς που βρίσκονται δεξιά και τους τροχούς αριστερά. Οι πίνακες με τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή τη σύγκριση βρίσκονται στο Παράρτημα (Π.5). Τα διαγράμματα

αυτά παρουσίασαν παράξενη συμπεριφορά, καθώς παρατηρήθηκε στην πλειοψηφία των τρένων, απότομη μεταβολή της διαμέτρου από την αρχική τιμή της διαμέτρου 860mm, έως τα 840mm, και το φαινόμενο αυτό εξηγήθηκε από εκπρόσωπο της AMEL [44]. Οι αιτίες είναι οι εξής: η αρχική διατομή των τροχών δεν είχε σωστή εφαρμογή με τη διατομή της σιδηροτροχιάς και η διαδικασία της λίπανσης, που είναι απαραίτητη για τη μείωση της φθοράς των τροχών, καθώς μειώνει την τριβή, δεν είχε εφαρμοστεί. Επομένως, τροποποιήθηκε η διατομή των τροχών ολόκληρου του στόλου της AMEL και τοποθετήθηκαν αυτόματα μηχανήματα λίπανσης στους συρμούς. Από το σημείο αυτό και έπειτα, ο ρυθμός φθοράς της διαμέτρου, φαίνεται να παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά για όλους τους συρμούς.

Τέλος, εφόσον οι διαφορές μεταξύ δεξιού και αριστερού τροχού στον ίδιο άξονα, δε μπορούν να αμεληθούν, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 5.14: Συγκενρωτικό διάγραμμα διαμέτρων δεξιών τροχών (με διακεκομμένη γραμμή είναι η περίοδος που δεν καταγράφονταν ενδιάμεσες μετρήσεις)



Εικόνα 5.15: Συγκεντρωτικό διάγραμμα διαμέτρων αριστερών τροχών (με διακεκομμένη γραμμή είναι η περίοδος που δεν καταγράφονταν ενδιάμεσες μετρήσεις)

5.2 Σχέση φθοράς και χιλιομετρικής διάνυσης

5.2.1 Ρυθμός απομείωσης της διαμέτρου από την αρχή της ζωής του τροχού μέχρι τις τελευταίες μετρήσεις

Από τα προηγούμενα συγκεντρωτικά διαγράμματα, προκύπτουν δύο ομάδες συρμών με κριτήριο τη συμπεριφορά τους μέχρι την αλλαγή της διατομής (~840mm). Σε 7 από τους 24 συρμούς, η μεταβολή της διαμέτρου παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τους υπόλοιπους, επομένως εξετάζονται χωριστά.

Η πρώτη ομάδα συρμών (Α ομάδα) αποτελείται από 17 συρμούς (71% του δείγματος) και χαρακτηρίζεται από απότομη μεταβολή της διαμέτρου μέχρι την αλλαγή της διατομής.

Η δεύτερη ομάδα συρμών (Β ομάδα) αποτελείται από 7 συρμούς (29% του δείγματος) και παρουσιάζει πιο ομαλή μεταβολή διαμέτρου μέχρι την αλλαγή της διατομής.

Εξαιτίας αλλαγής των τροχών, για τον υπολογισμό του ρυθμού φθοράς έχουν εξαιρεθεί τα τρένα 9 και 10 από την ομάδα Α και τα τρένα 1 και 3 από την ομάδα Β.

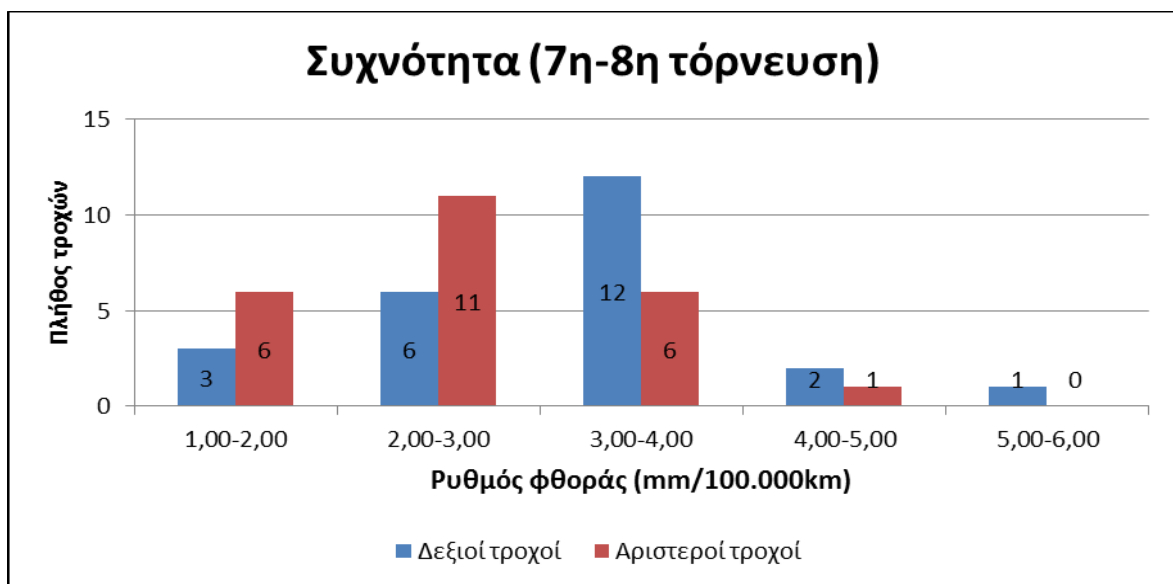
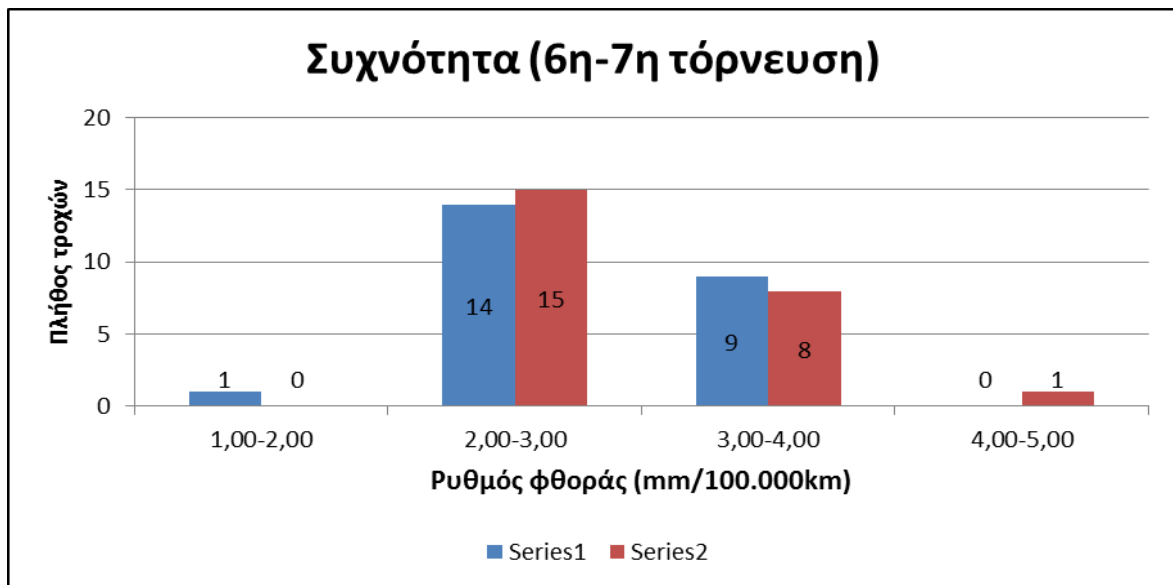
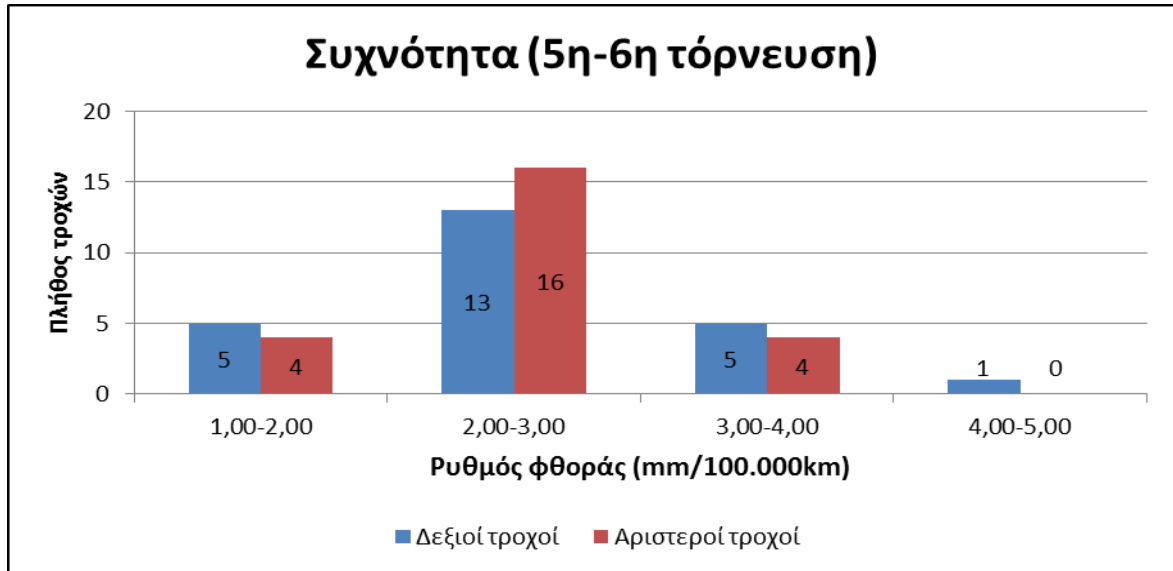
Η ρυθμός φθοράς που προκύπτει για κάθε τρένο για τον αριστερό και το δεξιό τροχό, απεικονίζεται στον πίνακα που ακολουθεί. Οι τιμές από τις οποίες έχει προκύψει ο ρυθμός φθοράς για κάθε τρένο βρίσκονται σε διαφορετικό πίνακα στο Παράρτημα (Π.5).

Ομάδα Α			Ομάδα Β		
Κωδικός τρένου	Δεξιά	Αριστερά	Κωδικός τρένου	Δεξιά	Αριστερά
2	6,14	6,54	4	6,07	6,11
7	6,79	6,82	6	6,62	6,50
8	6,30	6,05	21	5,21	5,32
11	5,90	5,89	23	5,47	5,49
12	6,06	5,96	25	5,82	5,47
13	5,90	5,90			
14	6,41	6,40			
15	5,33	5,39			
16	5,60	5,62			
17	5,19	5,18			
18	5,93	5,94			
19	6,38	6,29			
20	5,67	5,84			
22	6,22	6,34			
24	5,83	5,91			
Μέση τιμή	5,98	6,00	Μέση τιμή	5,84	5,78

Εικόνα 5.16: Ρυθμός απομείωσης διαμέτρου (mm/100.000km) κάθε τρένου του δείγματος

5.2.2 Ρυθμός φθοράς πέλματος στο διάστημα μεταξύ διαδοχικών торνεύσεων

Στη συνέχεια, γίνεται ο υπολογισμός της μέσης φθοράς του πέλματος μεταξύ δύο διαδοχικών торνεύσεων για αριστερό και δεξιό τροχό κάθε τρένου. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για αυτό τον υπολογισμό είναι από την μέτρηση που λαμβάνεται αμέσως μετά από την τόννευση μέχρι την τελευταία μέτρηση πριν γίνει η επόμενη τόννευση. Υπολογίζεται η απομείωση της διαμέτρου ανά 100.000 διανυθέντα χιλιόμετρα. Έπειτα, η φθορά του πέλματος (ακτίνα τροχού) προκύπτει ως η μισή τιμή της απομείωσης της διαμέτρου. Οι πίνακες που προκύπτουν από αυτούς τους υπολογισμούς για όλα τα τρένα βρίσκονται στο Παράρτημα (Π.3). Τα αποτελέσματά τους φαίνονται συνοπτικά στα διαγράμματα συχνοτήτων, που έχουν δημιουργηθεί για κάθε διάστημα торνεύσεων (Εικόνα 5.17). Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για όλα τα διαστήματα των торνεύσεων αναφέρονται στην Εικόνα 5.18. Η μέση φθορά στην ακτίνα για τους δεξιούς τροχούς, προκύπτει 2,87mm/100.000km, και για τους αριστερούς 2,69mm/100.000km. Οι τιμές αυτές μας δείχνουν ότι οι торνεύσεις πρέπει να γίνονται περίπου κάθε 100.000 διανυθέντα χιλιόμετρα, εφόσον η τιμή είναι κοντά στην οριακή για τόννευση (3mm).



Εικόνα 5.17: Συχνότητα εμφάνισης των τιμών του ρυθμού φθοράς σε κάθε διάστημα μεταξύ τόννεύσεων

Τόρνευση	Μέση φθορά πέλματος(mm/100.000km)	
	Δεξιά	Αριστερά
5η-6η	2,53	2,56
6η-7η	2,83	2,90
7η-8η	3,23	2,60
Μέση τιμή	2,87	2,69

Εικόνα 5.18:Πίνακας με αποτελέσματα της μέσης φθοράς πέλματος μεταξύ διαδοχικών τورνεύσεων για όλους τους συρμούς του δείγματος

Οι πίνακες που ακολουθούν είναι συγκεντρωτικοί για όλα τα τρένα του δείγματος. Ο πρώτος πίνακας (Εικόνα 5.20) δείχνει την απομείωση της διαμέτρου ανά 10.000 χιλιόμετρα και για τους δύο τροχούς του άξονα που καταγράφεται. Λαμβάνει υπόψη και τη μέτρηση μετά την τόννευση καθώς περιλαμβάνει και τις πρώτες τورνεύσεις που δεν είχαν ενδιάμεσες μετρήσεις. Με κίτρινο χρώμα σημειώνονται τα χρονικά σημεία που έγινε αντικατάσταση του άξονα, και κατ' επέκταση των τροχών. Στο Παράρτημα (Π.5) υπάρχουν σε πίνακες όλες οι μετρήσεις των τρένων, όπου επισημαίνονται οι αλλαγές τροχών, ώστε να μη ληφθούν υπόψη. Η κόκκινη γραμμή δείχνει την αλλαγή της διατομής των τροχών στην αρχή της ζωής τους. Στον επόμενο πίνακα (Εικόνα 5.21), παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ διαδοχικών απομειώσεων για να εξεταστεί αν ο ρυθμός απομείωσης ακολουθεί συγκεκριμένο μοτίβο. Με πράσινο χρώμα σημειώνεται η διαφορά που έχει θετικό πρόσημο, δηλαδή η απομείωση της επόμενης τόννευσης να είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη (αυξανόμενος ρυθμός φθοράς), ενώ με κόκκινο χρώμα το αντίθετο. Δε φαίνεται να επικρατεί συγκεκριμένο χρώμα, ούτε μοτίβο και αυτό επαληθεύεται και από τον έλεγχο της υπόθεσης, που αναλύεται στην επόμενη ενότητα. Επομένως, ο ρυθμός φθοράς δε μπορεί να περιγραφεί καθώς είναι σχεδόν τυχαίος.

Στους επόμενους δύο πίνακες (Εικόνα 5.21,Εικόνα 5.22) γίνεται η ίδια διαδικασία με τη διαφορά ότι δε χρησιμοποιείται η τιμή της διαμέτρου μετά την τόννευση, γι' αυτό δεν έχουν περιληφθεί οι πρώτες τورνεύσεις. Τα αποτελέσματα συμφωνούν.

Μέση φθορά (απομείωση διαμέτρου τροχού, τórνευση είτε λόγω βάθους φθοράς είτε λόγω υποχρεωτικής εξίσωσης διαμέτρων δεξιού και αριστερού τροχού) μεταξύ διαδοχικών τórνεύσεων (mm/10000km), περιλαμβάνει και την τιμή μετά την επόμενη τórνευση																								
συρμός	T1		T2		T3		T4		T6		T7		T8		T9		T10		T11		T12		T13	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
1	0,63	0,64	1,25	1,25	0,54	0,54	0,95	0,95	0,67	0,67	1,27	1,27	1,24	1,24	1,13	1,14	1,19	1,18	1,15	1,14	1,32	1,32	1,12	1,12
2	0,38	0,37	0,45	0,42	0,44	0,44	0,41	0,41	0,45	0,45	0,43	0,43	0,39	0,39	0,41	0,40	0,36	0,41	0,39	0,42	0,44	0,45	0,37	0,37
3	0,38	0,37	0,38	0,39	0,40	0,40	0,42	0,42	0,56	0,53	0,38	0,38	0,52	0,52	0,39	0,40	0,48	0,45	0,48	0,45	0,35	0,33	0,40	0,39
4	0,58	0,58	0,56	0,59	0,07	0,06	0,60	0,61	0,85	0,88	0,51	0,56	0,66	0,63	0,66	0,63	0,83	0,82	0,66	0,63	0,69	0,70	0,56	0,56
5	0,41	0,41	0,92	0,89	0,67	0,67	0,79	0,84	0,71	0,68	1,74	0,96	0,63	0,63			0,14	0,17	0,45	0,50	0,39	0,39	0,47	0,47
6	0,72	0,71	0,64	0,61	0,81	0,81	0,58	0,57	0,80	0,82	0,90	0,89	0,66	0,68	0,74	0,74	0,93	0,90	0,71	0,70	0,76	0,76	0,82	0,82
7	0,50	0,50	0,86	0,92	0,80	0,81	0,78	0,76	-0,05	-0,03	0,82	0,79	0,79	0,80	0,71	0,71	0,79	0,78	0,90	0,89	0,81	0,82	0,63	0,64
8	0,97	0,95	0,14	0,13			0,82	0,82	0,74	0,72	0,68	0,71	-0,34	-0,32	1,03	0,91	0,90	0,94			1,20	1,08	1,00	0,99
9			1,06	1,09			0,95	0,95			1,06	1,04			0,85	0,97								
10							0,52	0,55			1,15	1,11												
συρμός	T14		T15		T16		T17		T18		T19		T20		T21		T22		T23		T24		T25	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
1	1,18	1,18	1,12	1,12	2,08	2,08	1,56	1,55	1,24	1,24	1,15	1,12	1,20	1,13	0,77	0,78	1,22	1,22	0,39	0,38	1,21	1,20	0,68	0,68
2	0,41	0,41	0,37	0,36	0,26	0,29	0,56	0,56	0,36	0,36	0,36	0,36	0,38	0,46	0,46	0,44	0,38	0,40	0,44	0,45	0,33	0,34	0,40	0,41
3	0,34	0,34	0,45	0,45	0,48	0,45	0,43	0,43	0,38	0,41	0,39	0,44	0,38	0,36	0,52	0,54	0,43	0,42	0,45	0,44	0,45	0,43	0,57	0,58
4	0,54	0,55	0,79	0,88	0,68	0,60	0,58	0,56	0,66	0,64	0,71	0,68	0,52	0,53	0,54	0,52	0,80	0,75	0,44	0,46	0,66	0,69	0,63	0,56
5	0,79	0,76	0,54	0,51	0,45	0,51	0,57	0,59	0,68	0,68	0,64	0,65	0,61	0,62	0,72	0,73	0,51	0,52	0,51	0,49	0,53	0,50	0,61	0,66
6	0,62	0,63	0,68	0,69	0,70	0,69	0,86	0,86	0,54	0,56	0,67	0,67	0,81	0,80	0,23	0,23	0,67	0,72	0,65	0,63	0,83	0,83	0,65	0,65
7	1,03	1,03	0,61	0,62	0,90	0,89	0,27	0,26	0,75	0,70	0,87	0,87	0,86	0,88	1,02	1,06	1,06	1,06	0,78	0,82	0,76	0,79		
8	0,99	0,99	0,67	0,65					0,93	0,96	1,19	1,16					0,77	0,80	0,68	0,68	0,73	0,71		

Συρμός: Κωδικός αριθμός συρμού
 R: Δεξιός τροχός του πρώτου άξονα του πρώτου βαγονιού
 L: Αριστερός τροχός του πρώτου άξονα του πρώτου βαγονιού
 Κίτρινη ένδειξη: Αλλαγή τροχού
 Κόκκινη γραμμή: Δείχνει την αλλαγή της διατομής των τροχών (Διάμετρος τροχού ~ 640mm)

Εικόνα 5.19: Υπολογισμός απομείωσης διαμέτρου (mm/10.000km) αριστερού και δεξιού τροχό κάθε συρμού χρησιμοποιώντας τις τιμές των τórνεύσεων

Διαφορά μέσης φθοράς μεταξύ διαδοχικών τورνεύσεων (μέχρι και τιμή μετά την επόμενη τórνευση)																								
Τórνευση \ τρένο	T1		T2		T3		T4		T6		T7		T8		T9		T10		T11		T12		T13	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
2η-1η	-0,25	-0,27	-0,80	-0,83	-0,11	-0,11	-0,54	-0,54	-0,22	-0,22	-0,84	-0,84	-0,85	-0,85	-0,73	-0,74	-0,82	-0,77	-0,77	-0,73	-0,88	-0,88	-0,74	-0,75
3η-2η	0,00	0,00	-0,07	-0,04	-0,04	-0,04	0,02	0,01	0,11	0,08	-0,05	-0,05	0,13	0,13	-0,02	0,00	0,12	0,04	0,09	0,03	-0,09	-0,12	0,02	0,02
4η-3η	0,20	0,21	0,18	0,20	-0,33	-0,34	0,18	0,19	0,29	0,35	0,13	0,18	0,13	0,11	0,27	0,23	0,35	0,38	0,18	0,18	0,34	0,37	0,16	0,17
5η-4η	-0,17	-0,17	0,36	0,30	0,60	0,61	0,19	0,23	-0,14	-0,21	1,22	0,40	-0,03	0,00	-0,66	-0,63	-0,69	-0,65	-0,21	-0,13	-0,30	-0,31	-0,09	-0,09
6η-5η	0,31	0,30	-0,28	-0,28	0,14	0,14	-0,21	-0,27	0,09	0,14	-0,84	-0,07	0,03	0,05	0,74	0,74	0,79	0,73	0,26	0,20	0,37	0,37	0,35	0,35
7η-6η	-0,22	-0,21	0,22	0,31	-0,01	0,00	0,20	0,19	-0,86	-0,85	-0,08	-0,11	0,13	0,12	-0,03	-0,03	-0,15	-0,12	0,19	0,19	0,05	0,06	-0,19	-0,18
8η-7η	0,47	0,45	-0,72	-0,80			0,04	0,06	0,79	0,75	-0,14	-0,08	-1,13	-1,12	0,32	0,20	0,12	0,15	-0,90	-0,89	0,39	0,26	0,37	0,34
9η-8η			0,92	0,96			0,14	0,13	-0,74	-0,72	0,38	0,33	0,34	0,32	-0,18	0,06								
10η-9η							-0,43	-0,40			0,09	0,07												

Τórνευση \ τρένο	T14		T15		T16		T17		T18		T19		T20		T21		T22		T23		T24		T25	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
2η-1η	-0,77	-0,77	-0,75	-0,76	-1,81	-1,79	-1,00	-0,99	-0,88	-0,88	-0,79	-0,76	-0,82	-0,67	-0,32	-0,34	-0,84	-0,82	0,05	0,07	-0,88	-0,86	-0,28	-0,27
3η-2η	-0,07	-0,07	0,08	0,09	0,22	0,16	-0,12	-0,13	0,03	0,05	0,03	0,08	0,00	-0,09	0,06	0,10	0,05	0,01	0,00	-0,01	0,12	0,09	0,17	0,17
4η-3η	0,19	0,21	0,35	0,43	0,19	0,15	0,15	0,14	0,27	0,23	0,32	0,24	0,14	0,17	0,02	-0,02	0,37	0,34	-0,01	0,02	0,21	0,26	0,06	-0,02
5η-4η	0,25	0,22	-0,25	-0,37	-0,22	-0,08	-0,01	0,02	0,03	0,05	-0,07	-0,04	0,09	0,09	0,17	0,21	-0,29	-0,24	0,07	0,03	-0,13	-0,19	-0,02	0,11
6η-5η	-0,17	-0,14	0,14	0,18	0,25	0,18	0,29	0,27	-0,14	-0,12	0,03	0,03	0,19	0,17	-0,48	-0,50	0,16	0,20	0,14	0,14	0,30	0,32	0,04	-0,01
7η-6η	0,40	0,40	-0,07	-0,06	0,20	0,20	-0,59	-0,60	0,21	0,13	0,20	0,19	0,05	0,08	0,79	0,83	0,39	0,34	0,13	0,19	-0,08	-0,04	-0,65	-0,65
8η-7η	-0,04	-0,04	0,05	0,03	-0,90	-0,89			0,18	0,26	0,32	0,29					-0,29	-0,26	-0,09	-0,14	-0,03	-0,08		

Πράσινη ένδειξη: η διαφορά προκύπτει θετική, άρα η επόμενη τórνευση έχει μεγαλύτερη μέση φθορά, δηλαδή ο τροχός φθείρεται ταχύτερα
Κόκκινη ένδειξη: η διαφορά προκύπτει αρνητική, άρα η επόμενη τórνευση έχει μικρότερη μέση φθορά, δηλαδή ο τροχός φθείρεται πιο αργά
Σκίαση: τιμές που δε λαμβάνονται υπόψη καθώς είναι πάνω στην αλλαγή του τροχού (στον υπολογισμό χρησιμοποιείται και η παλιά και η νέα διατομή)

Εικόνα 5.20: Υπολογισμός διαφορών ρυθμού φθοράς σε διαδοχικές τórνευσεις (προκύπτει από προηγούμενο πίνακα)

Μέση φθορά (απομείωση διαμέτρου τροχού, τórνευση είτε λόγω βάθους φθοράς είτε λόγω υποχρεωτικής εξίσωσης διαμέτρων δεξιού και αριστερού τροχού) μεταξύ διαδοχικών τórνεύσεων (mm/10000km), περιλαμβάνει μέχρι την τιμή πριν την επόμενη τórνευση

τρόνο Τórνευση	T1		T2		T3		T4		T6		T7		T8		T9		T10		T11		T12		T13	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
5η	0,41	0,41			0,40	0,42			0,61	0,68							0,64	0,68	0,43	0,48	0,39	0,50	0,34	0,44
6η	0,57	0,42	0,56	0,58	0,59	0,55	0,48	0,38	0,68	0,69	0,87	0,51	0,61	0,57	0,50	0,70	0,56	0,60	0,54	0,47	0,61	0,52	0,43	0,56
7η	0,73	0,30	0,54	0,64	0,74	0,68	0,56	0,84	0,57	0,51	0,57	0,66	0,67	0,56	0,68	0,58	0,69	0,71	0,78	0,59	0,79	0,42	0,59	0,46
8η	0,80	0,50	0,48	0,79			0,71	0,55	0,52	0,63	0,57	0,44	1,03	0,71	0,89	0,90	0,78	0,59	0,81	0,77	1,13	0,60	0,81	0,70
9η			0,53	0,87			0,64	0,84	0,50	0,77	0,98	0,35	1,26	1,26	0,60	0,90								
10η							0,63	0,68			1,20	0,81												
τρόνο Τórνευση	T14		T15		T16		T17		T18		T19		T20		T21		T22		T23		T24		T25	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
4η															0,54	0,51								
5η	0,49	0,53	0,40	0,42	0,39	0,35	0,47	0,58	0,66	0,68	0,34	0,50	0,60	0,56	0,45	0,54	0,49	0,52	0,38	0,39	0,53	0,34	0,49	0,58
6η	0,48	0,47	0,61	0,55	0,69	0,49	0,68	0,78	0,53	0,54	0,67	0,66	0,71	0,59	0,41	0,48	0,53	0,70	0,38	0,46	0,41	0,61	0,45	0,47
7η	0,68	0,44	0,29	0,49	0,68	0,40	0,38	0,40	0,75	0,59	0,74	0,64	0,86	0,41	0,45	0,72	0,52	0,72	0,71	0,29	0,62	0,43	0,73	0,40
8η	0,66	0,77	0,58	0,51	0,83	0,86			0,59	0,76	0,95	0,57					0,66	0,43	0,61	0,39	0,60	0,76		
9η																	0,80	0,98						

Εικόνα 5.21: Υπολογισμός απομείωσης διαμέτρου (mm/10.000km) αριστερού και δεξιού τροχού κάθε συρμού χωρίς να περιληφθούν οι τιμές των διαμέτρων μετά την τórνευση

Διαφορά μέσης φθοράς μεταξύ διαδοχικών τورνεύσεων (μέχρι και τιμή πριν την επόμενη τórνευση)

τρένο Τórνευση	T1		T2		T3		T4		T6		T7		T8		T9		T10		T11		T12		T13	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
6η-5η	0,16	0,02			0,19	0,13			0,07	0,02							-0,09	-0,08	0,11	0,00	0,22	0,02	0,09	0,12
7η-6η	0,16	-0,12	-0,02	0,06	0,15	0,13	0,08	0,46	-0,11	-0,19	-0,31	0,15	0,06	-0,01	0,18	-0,12	0,13	0,11	0,24	0,12	0,18	-0,11	0,16	-0,09
8η-7η	0,07	0,20	-0,06	0,15			0,14	-0,29	-0,05	0,12	0,01	-0,22	0,36	0,15	0,21	0,32	0,09	-0,12	0,03	0,18	0,34	0,18	0,22	0,24
9η-8η			0,05	0,09			-0,06	0,29	-0,02	0,14	0,40	-0,09	0,23	0,55	-0,28	0,00								
10η-9η							-0,01	-0,16			0,23	0,47												

τρένο Τórνευση	T14		T15		T16		T17		T18		T19		T20		T21		T22		T23		T24		T25	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
6η-5η	-0,01	-0,06	0,21	0,13	0,29	0,14	0,21	0,19	-0,13	-0,13	0,33	0,15	0,11	0,03	-0,08	0,02	0,04	0,18	-0,01	0,07	-0,11	0,26	-0,04	-0,11
7η-6η	0,19	-0,03	-0,32	-0,05	-0,01	-0,09	-0,30	-0,38	0,22	0,05	0,07	-0,01	0,15	-0,18	-0,04	-0,06	-0,01	0,02	0,33	-0,16	0,20	-0,17	0,28	-0,07
8η-7η	-0,02	0,34	0,29	0,02	0,16	0,46			-0,16	0,17	0,21	-0,08			0,04	0,24	0,14	-0,29	-0,10	0,09	-0,02	0,33		
9η-8η																	0,14	0,54						

Εικόνα 5.22: Υπολογισμός διαφορών ρυθμού φθοράς σε διαδοχικές τορνέυσεις (προκύπτει από προηγούμενο πίνακα)

5.2.3 Στατιστικός έλεγχος (έλεγχος υποθέσεων)

Στην ενότητα αυτή γίνονται έλεγχοι υποθέσεων για το περιεχόμενο των προηγούμενων δύο ενοτήτων.

Αρχικά, ελέγχεται αν τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει για το ρυθμό φθοράς των αριστερών και των δεξιών τροχών, είναι δείγματα που ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό. Η υπόθεση που γίνεται είναι ότι οι μέσες τιμές των δύο δειγμάτων δεν έχουν διαφορά. Δηλαδή, χρησιμοποιείται η απλή στατιστική υπόθεση ως μηδενική υπόθεση $H_0: \mu_1 = \mu_2$.

Εφαρμόζεται ο δίπλευρος έλεγχος στη στατιστική υπόθεση $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ θεωρώντας το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας $\alpha = 0,05$.

Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της πρώτης ενότητας (μετρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του τροχού) γίνεται χωριστά σε κάθε ομάδα (A,B). Τα μεγέθη των δειγμάτων του κάθε πληθυσμού είναι 15 και 5 τροχοί για τις ομάδες A και B, αντίστοιχα. Ο έλεγχος έχει επαληθεύσει την υπόθεση και για τις δύο ομάδες.

Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της δεύτερης ενότητας (ρυθμός φθοράς στα διαστήματα μεταξύ διαδοχικών τορνεύσεων) γίνεται χωριστά σε κάθε διάστημα. Το μέγεθος του δείγματος του κάθε πληθυσμού είναι 24 τροχοί. Τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι τα εξής:

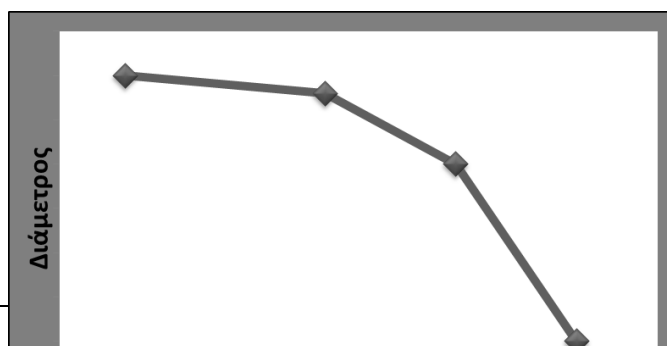
- Διάστημα 5^η-6^η τórνευση: η υπόθεση επαληθεύεται
- Διάστημα 6^η-7^η τórνευση: η υπόθεση επαληθεύεται
- Διάστημα 7^η-8^η τórνευση: η υπόθεση δεν επαληθεύεται

Επομένως, δεν ισχύει η υπόθεση μόνο για το τρίτο διάστημα.

Στη συνέχεια γίνεται ο έλεγχος για την υπόθεση ότι ο ρυθμός φθοράς που προκύπτει για κάθε διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών τορνεύσεων αυξάνεται συνεχώς κατά τη χρήση του τροχού.

Ο έλεγχος της υπόθεσης αυτής για τα διαστήματα μεταξύ 5^{ης}-6^{ης} και 6^{ης}-7^{ης} επαληθεύεται και για τους αριστερούς και για τους δεξιούς τροχούς. Αντίθετα, ο ίδιος έλεγχος για τα διαστήματα 6^{ης}-7^{ης} και 7^{ης}-8^{ης} επαληθεύεται μόνο για τους δεξιούς τροχούς. Οι έλεγχοι αυτοί γίνονται για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$.

Τέλος, ελέγχεται αν ισχύει η υπόθεση ότι ο ρυθμός φθοράς ανάμεσα σε δύο διαδοχικές



Εικόνα 5.23: Υποθετικό προφίλ ρυθμού φθοράς στο διάστημα μεταξύ διαδοχικών τορνεύσεων

τορνεύσεις αυξάνεται, δηλαδή ακολουθεί συγκεκριμένο προφίλ (όπως φαίνεται στο σκαρίφημα της Εικόνα 5.23). Η υπόθεση αυτή έγινε βασιζόμενη στο γεγονός ότι όσο μειώνεται η διάμετρος του τροχού, αυξάνεται η γωνιακή του ταχύτητα, για να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα του συρμού. Το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για αυτόν τον έλεγχο είναι 144 διαστήματα (72 για τους αριστερούς τροχούς και 72 για τους δεξιούς) και αφορούσε σε τρία επίπεδα τórνευσης (βλέπε Εικόνα 5.24). Ο έλεγχος της υπόθεσης ότι η φθορά ακολουθεί το συγκεκριμένο προφίλ απορρίφθηκε. Τα αναλυτικά αποτελέσματα βρίσκονται στο Παράρτημα (Π.4).

Τροχός	Αριθμός τροχών σε κάθε κατάσταση			
	δεξιά		αριστερά	
Διάστημα	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE
5η-6η	2	22	0	24
6η-7η	0	24	0	24
7η-8η	3	21	3	21

Εικόνα 5.24: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχου

5.3 Μεταβολή διαμέτρου τροχών λόγω τόννευσης

Σε αυτό το εδάφιο υπολογίζεται το μέγεθος της διατομής που αφαιρείται κατά τη διαδικασία της τόννευσης. Αρχικά υπολογίζονται οι διαφορές των διαμέτρων δεξιού και αριστερού τροχού για όλες τις μετρήσεις (Εικόνα 5.25). Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η αρνητική διαφορά, δηλαδή όταν ο αριστερός τροχός καταπονείται περισσότερο από τον δεξιό, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, με πράσινο χρώμα. Με κίτρινο επισημαίνεται η στιγμή της αλλαγής του άξονα των τροχών. Το σημείο που αλλάζει το χρώμα πιθανόν να είναι εξαιτίας της αλλαγής της φοράς της κίνησης του συρμού (*αλλαγή μετώπου*). Τα πιο έντονα γράμματα συμβολίζουν την τόννευση και τα κόκκινα γράμματα την περίοδο που δεν καταγράφονταν ενδιάμεσες μετρήσεις. Περιέχουν δηλαδή μόνο μετρήσεις μετά τις εκάστοτε τόννευσεις. Για τα υπόλοιπα τρένα οι πίνακες επισυνάπτονται στο Παράρτημα (Π.5).

Στη συνέχεια, υπολογίζεται χωριστά η ποσότητα που αφαιρείται για τον κάθε τροχό, αριστερά και δεξιά σε κάθε τόννευση. Δημιουργούνται οι διαφορές των ποσοτήτων αυτών (απόλυτη τιμή) ανά άξονα, όπως φαίνεται στους πίνακες που ακολουθούν (Εικόνα 5.26, Εικόνα 5.27), για όλο το δείγμα. Βρίσκονται αθροιστικά, για το δείγμα των μετρήσεων που υπάρχει, η συνολική ποσότητα που αφαιρείται και από τους δύο τροχούς ενός άξονα και το άθροισμα των διαφορών. Τέλος, υπολογίζεται το ποσοστό των διαφορών των διαμέτρων των δύο τροχών ως προς τη συνολική ποσότητα που αφαιρείται.

Συμπεραίνεται από αυτούς τους πίνακες ότι σε 79 τόννευσεις ενός ζεύγους τροχών (άξονας) το σύνολο των περιπτώσεων που η διαφορά των διαμέτρων αριστερού-δεξιού τροχού είναι μεγαλύτερη από 2mm (όριο πέρα από το οποίο απαιτείται εξομοίωση των διαμέτρων των 2 τροχών) είναι 19 (24% του συνόλου των τόννευσεων). Επίσης, τα χιλιοστά απομείωσης της διαμέτρου κατά τη διαδικασία της τόννευσης για τις περιπτώσεις αυτές, ανέρχονται σε 105,88mm (34% του συνολικού 291,10mm). Αυτό το ποσοστό (34%) θα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά με την αντιμετώπιση του προβλήματος της μεγάλης απόκλισης των δύο διαμέτρων αριστερού-δεξιού τροχού.

αλλαγή τροχού				αλλαγή τροχού			
T1,A13				T2,A15			
χλμ	διάμετρος		Σύγκριση	χλμ	διάμετρος		Σύγκριση
	R	L	R-L		R	L	R-L
0	860,00	860,00	0,00	0	860,00	860,00	0,00
79741	855,00	854,90	0,10	135684	843,08	843,04	0,04
226735	849,43	849,44	-0,01	293519	836,04	836,34	-0,30
365859	844,21	844,26	-0,05	350924	833,86	834,11	-0,25
481253	837,53	837,56	-0,03	439098	828,90	828,90	0,00
543126	835,13	835,56	-0,43	538709	819,71	820,00	-0,29
569896	834,13	834,96	-0,83	606889	815,11	815,20	-0,09
595502	833,53	833,76	-0,23	629872	814,71	814,60	0,11
619775	831,33	832,16	-0,83	641619	813,91	814,00	-0,09
633293	831,30	831,36	-0,06	641621	813,91	814,00	-0,09
633293	831,29	831,30	-0,01	641621	813,10	813,72	-0,62
639122	830,49	831,10	-0,61	660783	811,90	812,72	-0,82
657842	829,29	829,90	-0,61	680966	809,50	810,32	-0,82
674947	827,69	829,30	-1,61	712790	808,90	809,52	-0,62
695133	826,89	826,90	-0,01	732614	808,10	807,92	0,18
724357	826,29	826,90	-0,61	735984	807,96	807,65	0,32
742045	825,09	826,70	-1,61	735984	805,00	805,00	0,00
742048	825,09	826,70	-1,61	755705	803,80	803,60	0,20
742048	823,50	823,56	-0,06	775344	804,40	802,40	2,00
769189	822,10	823,16	-1,06	791347	802,60	800,40	2,20
788981	821,30	821,36	-0,06	811824	801,40	799,40	2,00
809702	818,10	821,93	-3,82	827216	800,60	797,80	2,80
842850	816,18	820,50	-4,32	827217	800,60	797,80	2,80
842861	816,18	820,50	-4,32	827217	803,76	803,84	-0,08
842861	818,50	818,50	0,00	859922	801,76	800,44	1,32
873173	815,79	817,18	-1,39	880245	800,76	798,44	2,32
892228	814,32	816,82	-2,49	880245	800,76	798,44	2,32
913552	812,16	815,75	-3,60	897435	799,96	797,44	2,52
932656	811,21	814,17	-2,96	906325	799,55	796,92	2,62
937049	810,99	813,80	-2,81	906325	795,40	795,23	0,17
937049	809,37	809,54	-0,17	921343	794,20	794,63	-0,43
				962048	789,00	791,83	-2,83

Ο υπολογισμός για τα υπόλοιπα τρένα του δείγματος βρίσκεται στο παράρτημα

Εικόνα 5.25: Υπολογισμός διαφοράς διαμέτρων αριστερού και δεξιού τροχού του ίδιου άξονα, για τα τρένα 1 και 2

T1,A13				T2,A15				T3,A18				T4,A42			
Διανθείσα απόσταση που έγινε η τórνευση	mm που αφαιρούνται		Διαφορά ποσοτήτων (απόλυτη τιμή)	Διανθείσα απόσταση που έγινε η τórνευση	mm που αφαιρούνται		Διαφορά ποσοτήτων (απόλυτη τιμή)	Διανθείσα απόσταση που έγινε η τórνευση	mm που αφαιρούνται		Διαφορά ποσοτήτων (απόλυτη τιμή)	Διανθείσα απόσταση που έγινε η τórνευση	mm που αφαιρούνται		Διαφορά ποσοτήτων (απόλυτη τιμή)
	δεξιός τροχός	αριστερός τροχός			δεξιός τροχός	αριστερός τροχός			δεξιός τροχός	αριστερός τροχός			δεξιός τροχός	αριστερός τροχός	
633293	0,01	0,06	0,05	641621	0,81	0,28	0,53	665436	3,26	3,06	0,19	550499	1,01	2,00	0,99
742048	1,59	3,14	1,55	735984	2,96	2,65	0,32	767557	2,20	2,70	0,50	632773			
842861				827217				893048	0,70	1,71	1,01	716944	0,89	2,26	1,37
937049	1,62	4,26	2,64	906325	4,15	1,69	2,45					793568	2,34	0,87	1,47
Άθροισμα	10,68		4,24		12,54		3,30		13,63		1,70		9,37		3,83
Ποσοστό που μπορεί να μειωθεί			40%				26%				13%				41%
T6,A46				T7,A44				T8,A49				T9,A54			
575519	1,04	0,01	1,03	641594	0,16	2,53	2,37	703770	0,54	1,15	0,61	639883	2,16	0,37	1,78
677494	1,30	1,26	0,03	735719	2,35	1,22	1,14	797448	1,13	2,29	1,17	745998	0,30	1,33	1,03
784277				840290	1,11	2,85	1,74	835518				847970	3,05	3,19	0,14
903106	2,69	1,06	1,63	903743	0,75	4,63	3,88					948657	2,42	0,68	1,74
Άθροισμα	7,36		2,69		15,60		9,13		5,12		1,78		13,50		4,70
Ποσοστό που μπορεί να μειωθεί			37%				59%				35%				35%
T10,A55				T11,A52				T12,A37				T13,A34			
673295				669315	0,28	0,33	0,05	709452				679401	1,86	0,43	1,42
766592	3,50	2,80	0,70	788323	2,02	2,69	0,67	820780	1,67	2,68	1,01	777265	3,76	2,56	1,20
853584	0,83	0,60	0,23	880978	1,13	2,83	1,69	918247	0,21	3,94	3,74	872105	0,33	1,69	1,36
967352	1,36	3,89	2,53					1001363	0,61	4,05	3,44	1004787	2,77	4,12	1,35
Άθροισμα	12,97		3,46		9,28		2,42		13,17		8,18		17,53		5,33
Ποσοστό που μπορεί να μειωθεί			27%				26%				62%				30%

Εικόνα 5.26: Πίνακας που υπολογίζει την απομείωση της διαμέτρου κατά την τórνευση

T14,A31				T15,A30				T16,A29				T17,A28			
Διανυθείσα απόσταση που έγινε η τόνρευση	mm που αφαιρούνται		Διαφορά ποσοτήτων (απόλυτη τιμή)	Διανυθείσα απόσταση που έγινε η τόνρευση	mm που αφαιρούνται		Διαφορά ποσοτήτων (απόλυτη τιμή)	Διανυθείσα απόσταση που έγινε η τόνρευση	mm που αφαιρούνται		Διαφορά ποσοτήτων (απόλυτη τιμή)	Διανυθείσα απόσταση που έγινε η τόνρευση	mm που αφαιρούνται		Διαφορά ποσοτήτων (απόλυτη τιμή)
	δεξιός τροχός	αριστερός τροχός			δεξιός τροχός	αριστερός τροχός			δεξιός τροχός	αριστερός τροχός			δεξιός τροχός	αριστερός τροχός	
656773	2,83	2,25	0,57	642516	1,38	0,90	0,48	697999	0,86	2,43	1,57	637150	1,16	0,02	1,14
774809	1,65	1,90	0,26	763581	0,86	1,72	0,86	814263	0,13	2,35	2,22	720255	1,47	0,67	0,81
857588	2,90	4,93	2,02	852856	2,92	1,16	1,76	930625	2,63	5,72	3,10	853790			
988213	4,34	2,83	1,51	954626	0,94	1,41	0,47								
Άθροισμα	23,63		4,37		11,29		3,57		14,12		6,89		3,32		1,95
Ποσοστό που μπορεί να μειωθεί			18%				32%				49%				59%
T18,A26				T19,A21				T20,A19				T21,A48			
637290	0,17	0,04	0,13	643809	3,08	1,44	1,64	655929	0,14	0,60	0,46	663945	0,05	0,11	0,06
748452	0,14	0,23	0,10	738491	0,00	0,18	0,17	734665	0,79	1,65	0,86	761043	2,55	1,91	0,64
818984	0,00	0,76	0,76	829942	1,21	2,06	0,85	860106	0,07	5,90	5,83	879004			
928792	3,72	2,18	1,54	893622	1,57	3,75	2,18					967542	5,06	3,00	2,06
Άθροισμα	7,23		2,53		13,30		4,84		9,15		7,14		12,68		2,76
Ποσοστό που μπορεί να μειωθεί			35%				36%				78%				22%
T22,A24				T23,A23				T24,A09				T25,A01			
668899	0,21	0,00	0,21	673221	1,65	1,30	0,34	666157	0,01	2,00	1,99	640024	1,32	0,94	0,38
756557	1,24	0,17	1,08	822705	4,08	2,58	1,50	763937	4,09	2,17	1,92	772935	2,65	2,50	0,15
845319	4,75	3,02	1,73	890744	0,50	3,60	3,10	878922	1,62	4,04	2,42	898429			
919060	0,82	2,72	1,89	1006337	0,87	3,41	2,55	978956	2,59	0,77	1,82				
Άθροισμα	12,94		4,91		17,99		7,49		17,30		8,15		7,41		0,53
Ποσοστό που μπορεί να μειωθεί			38%				42%				47%				7%

Εικόνα 5.27: Συνέχεια προηγούμενου πίνακα

5.4 Κόστος τόννευσης και αντικατάστασης των τροχών ενός συρμού

5.4.1 Υπολογισμός κόστους τόννευσης των τροχών ενός συρμού

Κάθε συρμός αποτελείται από 48 τροχούς (Εικόνα 5.3). Στην Α.Μ.Ε.Λ. υπολογίζεται ότι η τόννευση του συνόλου των τροχών ενός τρένου διαρκεί περίπου 4 έως 5 μέρες. Επίσης, για τη διαδικασία αυτή χρειάζονται δύο εργαζόμενοι που θα απασχολούνται 8 ώρες την ημέρα. Ο μισθός των εργαζομένων αυτών είναι 40€/ώρα και τα γενικά βιομηχανικά έξοδα της τόννευσης υπολογίζονται ως το 20% του συνολικού κόστους των εργατικών. Επομένως, έχουμε ως εξής:

Για 5 ημέρες, με 8 ώρες την ημέρα για 2 άτομα: $5 \times 8 \times 2 = 80$ απαιτούμενες ώρες εργασίας για την τόννευση ολόκληρου του τρένου.

Για χρέωση 40€/ώρα: $80 \times 40 = 3200\text{€}$ κόστος εργατικών τόννευσης ολόκληρου του συρμού.

Για 20% επιπλέον βιομηχανικά έξοδα: $1,2 \times 3200\text{€} = 4000\text{€}$ το συνολικό κόστος τόννευσης των τροχών ολόκληρου του τρένου.

Οι εργάσιμες ημέρες σε ένα έτος είναι 200. Το κόστος για τόννευση ανά ημέρα υπολογίζεται ως $4000/5 = 800\text{€/ημέρα}$. Θεωρούμε ότι οι τόννευσεις γίνονται όλες τις ημέρες του χρόνου. Στην πραγματικότητα, για τόννευση όλου του στόλου της ΑΜΕΛ χρειάζονται 180 ημέρες περίπου. Υπάρχουν, δηλαδή, κάποια ενδιάμεσα κενά, συνολικά περίπου 20 ημέρες το έτος, που χρησιμοποιούνται για συντήρηση του μηχανήματος ή άλλες εργασίες. Συνεπώς, το κόστος για τη συντήρηση των τροχών σε ένα έτος είναι $200 \times 800 = 160.000 \text{€}/\text{έτος}$. Η διάρκεια ζωής ενός τροχού είναι περίπου 15 έτη. Άρα, το κόστος της συντήρησης των τροχών όλων των τρένων για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι $160.000 \times 15 = 2.400.000 \text{€}$.

5.4.2 Υπολογισμός κόστους αντικατάστασης τροχών ενός συρμού

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένα, οι τροχοί που χρησιμοποιούνται στους συρμούς της ΑΜΕΛ αποτελούνται από δύο τμήματα. Δηλαδή, περιλαμβάνουν ένα κεντρικό, σταθερό τμήμα, το σώτρο πάνω στο οποίο στερεώνεται σαν στεφάνι το επίσωτρο. Υπάρχουν και πιο σύγχρονοι τροχοί οι οποίοι αποτελούνται από ένα ενιαίο κομμάτι (Εικόνα 2.2). Σημαντική διαφορά των δύο ειδών τροχών είναι ότι κατά την αντικατάσταση των τροχών, οι τροχοί με επίσωτρο χρειάζονται αλλαγή μόνο του επισώτρου, ενώ οι ενιαίοι τροχοί χρειάζονται αναγκαστικά ολική αντικατάσταση. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το κόστος

αντικατάστασης του ενιαίου τροχού να είναι πολύ μεγαλύτερο -διπλάσιο-, από το κόστος αντικατάστασης των επισώτρων. Το κόστος ενός καινούργιου ενιαίου τροχού είναι 2000€, ενώ το κόστος του επισώτρου είναι 1000€. Εφόσον στην ΑΜΕΛ, προς το παρόν, χρησιμοποιούν τροχούς με επισώτρα, το κόστος για αλλαγή όλων των τροχών ενός τρένου είναι $1000\text{€} \times 48\text{τροχούς} = 48.000\text{€}$. Ο στόλος της ΑΜΕΛ αποτελείται από 49 συρμούς, επομένως, για αντικατάσταση όλων των τροχών όλων των συρμών, το κόστος είναι $48.000\text{€} \times 49 = \mathbf{2.352.000 \text{ €}}$.

Παρατηρείται ότι το κόστος αντικατάστασης όλων των τροχών του στόλου με καινούργιους τροχούς είναι περίπου ίσο με το κόστος για τη συντήρηση που χρειάζεται το ίδιο πλήθος τροχών για τη διάρκεια της ζωής τους. Επομένως, θα ήταν συμφέρον οι торνεύσεις να γίνονται σε πιο τακτά χρονικά διαστήματα, μόνο εάν ήταν δυνατό, να διπλασιαζόταν η διάρκεια ζωής των τροχών.

6

Η σιδηροδρομική γραμμή και η φθορά των τροχών στον ΗΣΑΠ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ενδεικτικά μια αναφορά της φθοράς των τροχών των συρμών του Ηλεκτρικού Σιδηροδρόμου Αθηνών Πειραιά (ΗΣΑΠ) και στη συνέχεια μια σύγκριση με τη φθορά των τροχών των συρμών του Μετρό.

6.1 Οι Τροχοί των συρμών του ΗΣΑΠ

Ο Αστικός Σιδηρόδρομος Πειραιά - Κηφισιάς, γνωστός ως «Ηλεκτρικός», μετράει σχεδόν ενάμισι αιώνες ζωής. Ατμοκίνητος αρχικά και ηλεκτροκίνητος σήμερα, ο σιδηρόδρομος συνέδεσε το 1869 την Αθήνα με τον Πειραιά. Το 1904 πραγματοποιήθηκε η ηλεκτροδότηση του σιδηροδρόμου. Επομένως, η γραμμή αυτή είναι αρκετών χρόνων. Υπάρχουν συρμοί που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα και λειτουργούν από το 1983. Σε γενικότερες γραμμές, ο στόλος του ΗΣΑΠ αποτελείται από 41 συρμούς, εκ των οποίων οι 14 συρμοί λειτούργησαν το 1983, οι 10 συρμοί το 1993 και οι υπόλοιποι 17 το 2003. Η υποδομή του σιδηροδρόμου μέχρι πέρυσι αποτελούνταν από ξύλινους στρωτήρες που ήταν τοποθετημένοι πάνω σε έρμα (χαλίκι). Το 2012 ξεκίνησε η αλλαγή της γραμμής και ολοκληρώθηκε –εκτός από ένα κομμάτι (Φάληρο-Πειραιάς)- το 2013 .

6.1.1 Παλαιά γραμμή (ξύλινοι στρωτήρες με έρμα)

Πριν την αλλαγή της γραμμής, οι σιδηροτροχιές που υπήρχαν στο δίκτυο ήταν διατομής K39, Σ49, UIC54 και UIC60 (στις αλλαγές), ενώ η διατομή του τροχού δεν ήταν τυποποιημένη. Οι συρμοί οδηγούνταν στον τόρνο κάθε 500.000 – 600.000 χιλιόμετρα. Η φθορά των τροχών ήταν σχεδόν αμελητέα, της τάξης των 3-4 χιλιοστών. Η φθορά αυτή πολλές φορές δεν ήταν εμφανής ούτε με τη χρήση της «καλίμπρας». Η αλλοίωση, δηλαδή, της διατομής του τροχού δεν ήταν σοβαρή ώστε να αποτελέσει λόγο για τόννευση. Η αιτία που οι συρμοί οδηγούνταν στον τόρνο ήταν η σκλήρυνση που είχε υποστεί η επιφάνεια κύλισης του τροχού, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του τροχού, ενώ το υλικό κάτω από αυτό να είναι μικρότερης σκληρότητας. Το φαινόμενο αυτό, αν δεν αντιμετωπιστεί με τόννευση, ώστε να αφαιρεθεί το σκληρό στρώμα, μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στον τροχό καθώς μεταξύ του σκληρού στρώματος και του μαλακού υλικού δημιουργείται κενό, το οποίο όλο και αυξάνεται. Επομένως, με την παλαιά γραμμή, οι τροχοί δεν είχαν μεγάλες αλλοιώσεις στις διατομές τους με αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής αφού οι φθορές ήταν μικρές. Απόδειξη αυτού του γεγονότος είναι ότι από τους συρμούς του 1983, μόνο δύο οχήματα έχει χρειαστεί να αλλάξουν τροχούς. Τα οχήματα αυτά, είχαν διανύσει περίπου 3.000.000 χιλιόμετρα, όπως και οι υπόλοιποι συρμοί του ίδιου έτους που συνεχίζουν ακόμα να κινούνται χωρίς αντικατάσταση των τροχών τους. Οι διαστάσεις της διατομής του τροχού δε διαφέρουν πολύ από τις διαστάσεις του τροχού S1002, παρόλο που σχεδιάστηκε πολύ παλαιότερα (1963). Η αρχική διάμετρος είναι 860mm, ενώ η ωφέλιμη είναι πάλι 780mm. Τα όρια ασφαλείας των συντελεστών φθοράς κατά τη λειτουργία είναι όμοια με αυτά που τηρούνται στο Μετρό. Οι συρμοί κινούνταν με ταχύτητες 40-70 χιλιόμετρα την ώρα. Η τιμή των 70km/h ήταν η μέγιστη δυνατή και εμφανιζόταν σε μικρά κομμάτια της διαδρομής.

6.1.2 Νέα γραμμή (στρωτήρες σκυροδέματος σε σταθερή διατομή)

Μετά την αλλαγή της γραμμής, οι ξύλινοι στρωτήρες αντικαταστήθηκαν από στρωτήρες σκυροδέματος, και το έρμα στα περισσότερα σημεία της γραμμής έδωσε τη θέση του στο σκυρόδεμα, δηλαδή η γραμμή μετατράπηκε σε σταθερή. Οι νέες σιδηροτροχιές είναι όλες διατομής UIC54, εκτός από τις αλλαγές που είναι UIC60, ενώ η διατομή των τροχών των συρμών προσαρμόστηκε στη διατομή S1002. Δεν έχουν γίνει αρκετές μετρήσεις με τη νέα γραμμή, όμως οι πρώτες ενδείξεις εμφανίζουν φθορά στην εσωτερική καμπύλη του τροχού και μεγαλύτερο ρυθμό φθοράς της επιφάνειας κύλισης του πέλματος. Η αυξημένη φθορά πιθανόν να οφείλεται στις μειωμένες ταχύτητες των συρμών λόγω των έργων για την αλλαγή της γραμμής. Επομένως, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα προς το παρόν. Αυτό που αναμένεται είναι ότι οι τροχοί θα χρειάζονται τόννευση περίπου κάθε 180.000-200.000

χιλιόμετρα. Με τη νέα γραμμή, οι συρμοί φτάνουν πιο εύκολα το όριο ταχύτητας των 70 χιλιομέτρων την ώρα [46].

6.2 Η σιδηροδρομική επιδομή του Μετρό

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά η επιδομή του δικτύου του Μετρό, ώστε να γίνει κατανοητή η σύγκριση της επόμενης ενότητας.

Η σιδηροδρομική επιδομή στις σήραγγες του Μετρό, αποτελείται από τροχιά ελαστικής στήριξης σε κλίση σκυροδέματος (Σταθερή Επιδομή). Οι τροχιές έχουν καθιερωμένο εύρος 1435mm, και αποτελούνται από σιδηροτροχιές διατομής UIC 54, στερεωμένες σε διμερείς στρωτήρες ημι-εγκιβωτισμένους στο σκυρόδεμα κλίνης τροχιάς. Οι αλλαγές/διακλαδώσεις τροχιών εγκαθίστανται, με σύστημα άμεσης στερέωσης σε πλάκα σκυροδέματος. Στις ανοιχτές περιοχές των αμαξοστασίων, οι τροχιές και οι διακλαδώσεις τροχιών εδράζονται με στρωτήρες ξύλινους ή από σκυρόδεμα σε κλίνη τροχιάς από έρμα [4].

6.3 Σύγκριση φθοράς των τροχών στο Μετρό και στον ΗΣΑΠ

Στον ΗΣΑΠ, πριν την αλλαγή της γραμμής δεν κατέγραφαν τις μετρήσεις φθοράς των τροχών, καθώς δεν είχαν μεγάλες μεταβολές της διατομής του τροχού. Ένα τρένο πήγαινε για τόννευση τροχών κάθε 500.000-600.000 χιλιόμετρα. Το γεγονός αυτό και μόνο αποτελεί σημαντική ένδειξη ότι οι φθορές του Μετρό είναι αρκετά μεγαλύτερες από του ΗΣΑΠ. Το βάθος κοπής στον ΗΣΑΠ ήταν περίπου 3 χιλιοστά. Επομένως, οι φθορές του ήταν πραγματικά μικρές συγκριτικά με αυτές που αναφέρθηκαν σε αυτή την εργασία για τους τροχούς του Μετρό. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη φθορά των τροχών και οι οποίοι διαφέρουν στα δύο σιδηροδρομικά δίκτυα είναι η ταχύτητα οδήγησης, οι καμπύλες της διαδρομής και η υποδομή της γραμμής. Η μέγιστη ταχύτητα στο Μετρό είναι 80km/h και στον ΗΣΑΠ 70km/h. Η διαφορά των ορίων δεν είναι μεγάλη. Όμως, αυτό που συμβαίνει είναι ότι ένας συρμός της ΑΜΕΛ κινείται σχεδόν συνεχώς με τη μέγιστη ταχύτητα, σε αντίθεση με τον ΗΣΑΠ όπου η μέγιστη ταχύτητα επιτυγχάνεται μόνο σε ελάχιστα σημεία του δικτύου (παλιά γραμμή). Σοβαρό παράγοντα αποτελεί και η μείωση της ταχύτητας κατά τη διέλευση του συρμού από μία διασταύρωση (αλλαγή). Παράλληλα, το δίκτυο του Μετρό αποτελείται από πολλές καμπύλες και ανυψώσεις που πιθανό να δημιουργούν μεγαλύτερες φθορές στους τροχούς καθώς το τρένο πρέπει να προσαρμοστεί σε αυτές. Τέλος, η σταθερή επιδομή δεν επιτρέπει περιθώρια μετακίνησης εφόσον είναι περισσότερο άκαμπτη από την ύπαρξη έρματος.

7

Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εργασίας

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική αυτή εργασία, εξάγονται τα εξής αποτελέσματα:

- Οι τροχοί του πρώτου άξονα του συρμού, για την περίπτωση των συρμών της AMEA, συνήθως καταπονούνται περισσότερο από όλους τους τροχούς του τρένου. Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις που καταπονείται περισσότερο ο άξονας του δεύτερου βαγονιού.
- Από τη σύγκριση των τροχών του ίδιου άξονα, συμπεραίνεται ότι δεν καταπονούνται το ίδιο. Εκτιμάται ότι αυτό οφείλεται σε κάποια δυσμενή στοιχεία της διαδρομής, όπως καμπύλες μικρής ακτίνας, σε ορισμένα σημεία του δικτύου, ή σε άλλους λειτουργικούς λόγους, με αποτέλεσμα να καταπονείται συνεχώς περισσότερο ο ένας από τους δύο τροχούς. Προτείνεται η αλλαγή της κατεύθυνσης του συρμού (*αλλαγή μετώπου*), διαδικασία η οποία ήδη εφαρμόζεται αλλά όχι συστηματικά.

Από τη σύγκριση των τροχών του ίδιου άξονα, παρατηρείται σημαντική απόκλιση των διαμέτρων λίγο πριν την τórνευση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, σημαντικό ποσοστό του αριθμού των τórνεύσεων του δείγματος (24%), να γίνεται για να εξισωθούν οι διάμετροι των τροχών του ίδιου άξονα. Επίσης, η μείωση της διαμέτρου για την εξίσωση των τροχών που αποτελεί το 34% της συνολικής μείωσης των τórνεύσεων του δείγματος, θα μπορούσε να μειωθεί αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της διαφοράς των τροχών (*αλλαγή μετώπου*). Να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της διαδικασίας της αλλαγής του μετώπου δεν αναμένεται να μηδενίσει τη διαφορά των διαμέτρων, καθώς αυτή οφείλεται και σε άλλους παράγοντες, αλλά να τη μειώσει

σημαντικά. Έτσι, οι συρμοί θα οδηγούνται στον τόρνο αφού θα έχουν διανύσει μεγαλύτερη απόσταση, καθώς η φθορά θα κατανέμεται καλύτερα στους τροχούς του άξονα. Δηλαδή, ο τροχός που καταπονείται περισσότερο στον άξονα, θα χρειαστεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, από προηγουμένως (κατάσταση που δεν εφαρμόζεται η αλλαγή του μετώπου), για να εμφανίσει τη μέγιστη επιτρεπτή φθορά (οριακή τιμή τórνευσης), με συνέπεια να αυξηθούν τα διαστήματα μεταξύ των τórνεύσεων. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται η συστηματική και αυστηρή εφαρμογή της διαδικασίας αυτής.

- Ο ρυθμός φθοράς δεν ακολουθεί συγκεκριμένη συμπεριφορά (προφίλ), καθώς στο μεγαλύτερο ποσοστό του δείγματος δεν εμφανίζεται η αναμενόμενη συμπεριφορά. Αυτό συμβαίνει επειδή ο ρυθμός φθοράς εξαρτάται και από τυχαίους παράγοντες (π.χ επιπεδότητες, κ.α).
- Το κόστος τórνευσης του συνόλου των συρμών της ΑΜΕΛ, που υπολογίζεται για διάστημα 15 ετών, προκύπτει σχεδόν ίσο με το κόστος αντικατάστασης των επισώτρων των συρμών αυτών. Επομένως, θα υπήρχε ουσιαστικό κέρδος μόνο στην περίπτωση που με τη συχνότερη τórνευση των τροχών, διπλασιαζόταν η διάρκεια ζωής τους.
- Η μέση φθορά των τροχών του ΗΣΑΠ είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη των συρμών του Μετρό.
- Η πολιτική που εφαρμόζεται στην ΑΜΕΛ όσον αφορά στη συντήρηση των τροχών, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για το διάστημα μεταξύ των διαδοχικών τórνεύσεων.

8

Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα

Στο νέο αμαξοστάσιο της ΑΜΕΛ στον Ελαιώνα, είναι τοποθετημένο και έχει τεθεί σε λειτουργία τα τελευταία δύο έτη, το καινούργιο μηχάνημα τόννου, το οποίο είναι αυτόματο, ταχύτερο στις μετρήσεις και μεγαλύτερης ακριβείας.

Στο μηχάνημα αυτό αρχικά εισάγονται τα στοιχεία του τρένου (κωδικός αριθμός, πλάτος τροχού, για τα γαλλικά τρένα είναι 130mm, ενώ για τα κορεάτικα 135mm), ώστε να βρεθεί το ιστορικό του συγκεκριμένου τρένου, το οποίο έχει δημιουργηθεί από την αυτόματη αποθήκευση των προηγούμενων μετρήσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αφού αναγνωριστεί το τρένο, αρχίζει η διαδικασία. Τα «ράουλα στήριξης» σηκώνουν τον τροχό και τον περιστρέφουν, ενώ παράλληλα έχουν τη δυνατότητα να ζυγίσουν το φορτίο του. Τα ράουλα μετακινούν τον τροχό (σε περίπτωση «οβαλότητας» τροχού), ώστε να έρθει στη σωστή θέση που να εφαρμόσει το κοπτικό εργαλείο. Πάνω από τους τροχούς τοποθετούνται οι «μπότες» που ασκούν όση πίεση χρειάζεται στους τροχούς ώστε ο τροχός να κυλίνει χωρίς να ολισθαίνει. Σε μικρό χρονικό διάστημα, σε μία οθόνη εμφανίζονται το φορτίο του τροχού και το πρόσθετο φορτίο που χρειάζεται να ασκήσουν οι «μπότες» για εξισορρόπηση των δυνάμεων. Ξεκινάει η πρώτη μέτρηση, πριν να έχει γίνει τόννευση. Μετράται η απόσταση μεταξύ των δύο εσωτερικών προσώπων των τροχών (αξονική ανοχή), η διάμετρος στο σημείο της κύλισης (70mm από τον όνυχα), το βάρος του τροχού (ακτινική ανοχή), το πάχος και το ύψος του όνυχα και το qR και για τους δύο τροχούς του άξονα, ταυτόχρονα. Έπειτα, το μηχάνημα εξάγει τη γραφική παράσταση της διατομής του φθαρμένου τροχού, στο ίδιο διάγραμμα που υπάρχει και η πρότυπη διατομή. Η διατομή που έχει μετρήσει το μηχάνημα

βρίσκεται σε τυχαίο σημείο του τροχού. Στην συνέχεια, ακολουθεί η κατεργασία του τροχού. Το μηχάνημα προτείνει μια τελική τιμή της διαμέτρου, δηλαδή το βάθος κοπής. Αν ο μηχανοδηγός συμφωνεί με την προτεινόμενη διάμετρο την επιλέγει, αλλιώς έχει τη δυνατότητα εισαγωγής οποιασδήποτε τιμής.

Η διαφορά αυτού του μηχανήματος με το παλαιότερο που υπάρχει στο αμαξοστάσιο των Σεπολίων, είναι ότι εκτελεί την κοπή του τροχού σε ένα βήμα, χωρίς να χρειάζεται επανατοποθέτηση ο τροχός. Δηλαδή, το κοπτικό αρχίζει από το πέλμα και συνεχίζει στον όνυχα του τροχού χωρίς διακοπή. Με την αυτοματοποίηση του μηχανήματος, κερδίζεται αρκετός χρόνος, με αποτέλεσμα ένα τρένο που έκανε στο προηγούμενο μηχάνημα να τορνιριστεί 4-5 μέρες, σε αυτό να χρειάζεται περίπου 1,5 μέρα. Η διαφορά είναι αρκετά σημαντική και μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κόστους τόννευσης [45].

Θα ήταν καλό, να υπάρξει ενδιαφέρον για την περιγραφή των φθορών και των υπόλοιπων σιδηροδρομικών δικτύων της Ελλάδας (ΗΣΑΠ και ΟΣΕ), για την εξαγωγή συμπερασμάτων μεμονωμένα σε κάθε δίκτυο αλλά και για τη σύγκριση μεταξύ τους. Η σύγκριση των φθορών που παρουσιάζονται στους συρμούς του ΗΣΑΠ με αυτή των συρμών του Μετρό, θα ήταν ιδιαίτερα εύστοχη, καθώς τα δίκτυά τους έχουν πολλές ομοιότητες και τα φορτία των συρμών είναι παρόμοια, σε αντίθεση με τον ΟΣΕ.

Βιβλιογραφία

- [1] X. Πυργίδης (2009). Συστήματα Σιδηροδρομικών Μεταφορών (Υποδομή - Τροχαίο Υλικό - Εκμετάλλευση). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- [2] Β. Προφυλλίδης (1993). Σιδηροδρομική, Τόμος 1ος. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπουλή.
- [3] Κ. Λυμπέρης (2009). Σιδηροδρομική θεωρία και εφαρμογές, Τόμος 1ος. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
- [4] Ιστότοπος www.ametro.gr
- [5] Κ. Λυμπέρης (2010). Σημειώσεις μαθήματος «Ειδικά θέματα σιδηροδρομικής».
- [6] Deutsche Eisenbahn- Consulting GmbH, Rail and Wheel Wear Training Handbook, 5-30.
- [7] Εικόνες ιστότοπου Google.
- [8] C. Esveld (2001). Modern Railway Track.
- [9] R. Lewis, U. Olofsson (2009). Wheel-rail Interface Handbook.
- [10] Αθανάσιος Μούρλας (2010). Επαφή Hertz.
- [11] T.G. Pearce, N.D. Sherratt, Prediction of wheel profile wear, Wear 144 (1991)343–351.
- [12] I. Zobory, Prediction of wheel/rail profile wear, Vehicle Syst. Dynam. 28 (1997) 221–259.
- [13] T. Jendel, M. Berg, Prediction of wheel profile wear, Suppl. Vehicle Syst. Dynam. 37 (2002) 502–513.
- [14] T. Jendel, Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements, Wear 253 (2002) 89–99.
- [15] J.J. Kalker, Simulation of the development of a railway wheel profile trough wear, Wear 150 (1991) 355–365.
- [16] J.F. Archard, Contact and rubbing of flat surfaces, J. Appl. Phys. 24 (1) (1953) 18-28.

- [17] K. Serope, S. Steven, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Publication date: 09-2002.
- [18] F. Braghin, S. Bruni, F. Resta, Wear of railway wheel profiles: a comparison between experimental results and a mathematical model, *Suppl. Vehicle Syst. Dynam.* 37 (2002) 478–489.
- [19] W. Kik, J. Piotrowsky, A fast, approximate method to calculate normal load at contact between wheel and rail and creep forces during rolling, in: *Proceedings of the Second Mini Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail–Wheel Systems*, 1996.
- [20] J. Dearden, The wear of steel rails and tyres in railway service, *Wear* 3 (1960) 43–49.
- [21] R.K. Steele, Observations of in-service wear of railroad wheels and rails under conditions of widely varying lubrication, *ASLE Trans.* 25 (1982) 400–409.
- [22] I.J. McEwen, R.F. Harvey, Full-scale wheel-on-rail testing: comparisons with service wear and a developing theoretical predictive model, *Lubric. Eng.* 41 (1985) 80–88.
- [23] S. Kumar, D.L.P. Rao, Wheel–rail contact wear, work, and lateral force for zero angle of attack—a laboratory study, *Trans. ASME J. Dynam. Syst. Meas. Control* 106 (1984) 319–326.
- [24] T.M. Beagley, Severe wear of rolling/sliding contacts, *Wear* 36 (1976) 317–335.
- [25] P.J. Bolton, P. Clayton, I.J. McEwen, Wear of rail and tyre steels under rolling/sliding conditions, *ASLE Trans.* 25 (1982) 17–24.
- [26] P.J. Bolton, P. Clayton, Rolling–sliding wear damage in rail and tyre steels, *Wear* 93 (1984) 145–165.
- [27] H. Krause, G. Poll, Wear of wheel–rail surfaces, *Wear* 113 (1986) 103–122.
- [28] R. Lewis, R.S. Dwyer-Joyce, Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels, in: *Proceedings of the IMechE Part J, J. Eng. Tribol.* 218 (2004) 467–478.
- [29] S.M. Zakharov, I.A. Zharov, Simulation of mutual wheel/rail wear, in: *Proceedings of the Fifth International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, 2000.
- [30] C. Chongyi, W. Chengguo, J. Ying, Study on numerical method to predict wheel/rail profile evolution due to wear, *Wear* 269 (2010) 167–173.
- [31] S. Stichel, R. Enblom, Industrial implementation of novel procedures for the prediction of railway wheel surface deterioration, *Wear* 271 (2011) 203–209.
- [32] X. Li, X. Jin, Z. Wen, D. Cui, W. Zhang, A new integrated model to predict wheel profile evolution due to wear, *Wear* 271 (2011) 227–237.
- [33] J. Pombo, J. Ambrósio, M. Pereira, R. Lewis, R. Dwyer-Joyce, C. Ariaido, N. Kuka, Development of a wear prediction tool for steel railway wheels using three alternative wear functions, *Wear* 271 (2011) 238–245.

- [34] M. Ignesti, M. Malvezzi, L. Marini, E. Meli, A. Rindi, Development of a wear model for the prediction of wheel and rail profile evolution in railway systems, *Wear* 284–285 (2012) 1–17.
- [35] E. Meli, S. Falomi, M. Malvezzi, A. Rindi, Determination of wheel–rail contact points with semianalytic methods, *Multibody System Dynamic* 20 (2008) 327–358.
- [36] J. Auciello, E. Meli, S. Falomi, M. Malvezzi, Dynamic simulation of railway vehicles: wheel/rail contact analysis, *Vehicle System Dynamics* 47 (2009) 867–899.
- [37] J.J. Kalker, *Three-dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1990.
- [38] J.J. Kalker, Survey of wheel–rail rolling contact theory, *Vehicle System Dynamics* 8 (1979) 317–358.
- [39] H. Hertz, The contact of elastic solids, *Journal fur Die Reine und Angewandte Mathematik* 92 (1881) 156–171.
- [40] F. Braghin, R. Lewis, R.S. Dwyer-Joyce, S. Bruni, A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear, *Wear* 261 (2006) 1253–1264.
- [41] R. Enblom, M. Berg, Simulation of railway wheel profile development due to wear influence of disc braking and contact environment, *Wear* 258 (2005) 1055–1063.
- [42] Γ. Νίνοϋ, Τροχός και σιδηροτροχιά.
- [43] Dr J. Austin & A. Wylie, R. Kay, Optimisation of the cost of maintaining railway wheels, 3rd International ASRANet Colloquium (July 2006).
- [44] Συζήτηση με εκπρόσωπο της εταιρείας της AMEL.
- [45] Συζήτηση με εκπρόσωπο της εταιρείας του μηχανήματος.
- [46] Συζήτηση με εκπρόσωπο της εταιρείας του ΗΣΑΠ.