



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συστήματα ελέγχου τρενων με βάση τις επικοινωνίες και
συστήματα διαχείρισης σιδηροδρομικής κυκλοφορίας**

**Αδαμοπούλου Σ. Κατερίνα
Καμπά Γ. Μαρία**

Επιβλέπων: Δρ. Ευστάθιος Χατζηευθυμιάδης, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συστήματα Ελέγχου Τρένων με βάση τις Επικοινωνίες και Συστήματα Διαχείρισης
Σιδηροδρομικής Κυκλοφορίας

Κατερίνα Σ. Αδαμοπούλου

A.M.: ME 11800

Μαρία Γ. Καμπά

A.M.: ME 118007

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Δρ. Ευστάθιος Χατζηευθυμιάδης , Καθηγητής

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αύξηση της αποτελεσματικότητας είναι μία από τις προτεραιότητες των φορέων εκμετάλλευσης του μετρό, λόγω του οικονομικού κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα νέα συστήματα σηματοδότησης εγκαθίστανται σε νέες και αναβαθμισμένες γραμμές του μετρό για αύξηση της μεταφορικής ικανότητας.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναλυτική παρουσίαση των συστημάτων σηματοδότησης σιδηροδρόμων με χρήση των τηλεπικοινωνιών στον Αστικό σιδηρόδρομό ενώ παράλληλα πραγματεύεται και την ανάλυση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Διαχείρισης Σιδηροδρομικής Κυκλοφορίας (ERTMS) όπου είναι το πρώτο διεθνές πρότυπο για επικοινωνία ελέγχου-χειρισμού αμαξοστοιχίας και επικοινωνίας αμαξοστοιχίας-εδάφους.

Αρχικά πραγματοποιείται η ανάπτυξη της λειτουργίας των προαναφερθέντων συστημάτων ενώ στη συνέχεια αναλύεται το κομμάτι των επικοινωνιών που στηρίζει την λειτουργία τους. Κατόπιν της αναλυτικής παρουσίασης των δύο συστημάτων γίνεται μια συγκριτική αξιολόγηση τους, καθώς και παρουσίαση των νέων τεχνολογιών που θα βελτιώσουν την απόδοση τους στοεγγύς μέλλον.

Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται με την μελέτη περίπτωσης για την Γραμμή 2 του Μετρό Αθήνας όπου πραγματοποιείται η τεχνοοικονομική ανάλυση σχετικά με την αναβάθμιση της γραμμής με το σύστημα σηματοδότησης σιδηροδρόμων με χρήση των τηλεπικοινωνιών (Communication Based Train Control -CBTC).

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Σηματοδότηση σιδηροδρόμων με χρήση των τηλεπικοινωνιών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: σηματοδότηση, σιδηρόδρομοι, CBTC, ERTMS

ABSTRACT

Efficiency is one of the priorities of metro operators, due to financial cost and environmental impact. The new signalling systems are being installed in new and upgraded metro lines to increase transportation capacity.

The purpose of the current thesis is the detailed presentation of railway communication systems in Urban Railway. More specifically, the document analyzes the CBTC while also dealing with the analysis of the Rail Traffic Management System (ERTMS) which is the first international standard for European communication.

Initially, the development of the operation of the aforementioned systems takes place, while then the part of the communications that supports their operation is analyzed. After the detailed presentation of the two systems, a comparative evaluation is made, as well as a presentation of the new technologies that will improve their performance in the near future.

Finally, a case study for Line 2 of the Athens Metro is presented where the techno-economic analysis is carried out regarding the upgrade of the line with the railway signaling system using telecommunications (Communication Based Train Control (CBTC)).

SUBJECT AREA: Transport communication system

KEYWORDS: signaling, transport, CBTC, ERTMS

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μας εργασίας, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μας, κύριο Χατζηευθυμιάδη Ευστάθιο, για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μας το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του και τη συνεχή του υποστήριξη που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος.

Τέλος, ευχαριστούμε τις οικογένειες μας για την υποστήριξη καθ'όλη την διάρκεια των μεταπτυχικών σπουδών μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ	14
1.1 Αντικείμενο παρούσας εργασίας	14
1.2 Ερευνητική μεθοδολογία.....	14
1.3 Δομή.....	14
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΥΡΜΩΝ.....	16
2.1 Ιστορική Αναδρομή	16
2.2 Εισαγωγικές Έννοιες και Ορισμοί	18
2.3 Παρούσα Κατάσταση- Βασικά σιδηροδρομικά στοιχεία και εξοπλισμός	19
2.3.1 Παρακολούθηση τμήματος τροχιάς.....	20
2.3.2 Σημείο ή Διακόπτης.....	20
2.3.3 Διαδρομή και Σύμπλεξη (Interlocking)	21
2.3.4 Ανίχνευση αμαξοστοιχίας και κύκλωμα τροχιάς.....	21
2.3.5 Μπλοκ σιδηροδρόμων	23
2.4 Αδυναμίες της κλασικής σηματοδότησης.....	25
3. Η ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΪΗΣΗ ΣΤΑ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	27
3.1 Συστήματα ελέγχου συρμού (Train Control System)	27
3.2 Συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης.....	28
3.2.1 Αυτόματο σύστημα ελέγχου του συρμού (Automatic Train Control).....	28
3.2.2 Αυτόματη Προστασία της Αμαξοστοιχίας (Automatic Train Protection).....	29
3.2.3 Αυτόματη Λειτουργία της Αμαξοστοιχίας (Automatic Train Operation).....	30
3.2.4 Αυτόματη εποπτεία συρμών – Automatic Train Supervision (ATS).....	31
3.2.5 Πέδηση	34
3.3 Συστήματα Μετρό και Βαθμοί Αυτοματοποίησης (Grades of Automation - Goa).....	36
3.3.1 Βαθμοί Αυτοματοποίησης και Απαιτούμενος Εξοπλισμός.....	36
4. CBTC ATP /ATO SUBSYSTEMS	38

4.1	Εισαγωγή.....	38
4.2	Εξοπλισμός του Communication Based Train Control- CBTC	40
4.2.1	Εποχούμενος Εξοπλισμός	41
4.2.2	Παράπλευρος Εξοπλισμός.....	42
4.2.3	Ασύρματο Δίκτυο μεταξύ Αμαξοστοιχίας και Γραμμής.....	45
4.3	Χαρακτηριστικά CBTC – Αρχές Moving Block	48
4.3.1	Οφέλη Moving Blocks	51
4.3.2	Πιθανές υλοποιήσεις της διαχείρισης αμαξοστοιχιών Moving Block.....	51
4.3.3	Έννοιες Moving Block και Αρχές που βασίζονται στην προσέγγιση του Εικονικού Μπλοκ.....	52
4.3.4	Έννοιες και Αρχές Moving Block βασισμένες σε Πλήρη Κίνηση.....	53
4.3.5	Αρχές του Moving Block.....	55
5.	ΡΑΔΙΟΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ (TRANSMISSION – COMMUNICATION) CBTC	58
5.1	Συμβατικά συστήματα σηματοδότησης	58
5.2	Σύγχρονα συστήματα σηματοδότησης	58
5.2.1	Επαγωγικό CBTC με βάση βρόχο	58
5.2.2	Radio-based CBTC	59
5.3	Επιλογή WiFi για το CBTC.....	61
5.4	Ζώνες συχνοτήτων και Παρεμβολές.....	64
5.4.1	Παρεμβολές.....	64
5.4.2	Παράγοντες για την επιλογή ζώνης συχνοτήτων	65
5.5	Περιοχή σε συστήματα CBTC.....	66
5.5.1	Καθυστέρηση (Latency) και Παράδοση (Handover)	67
5.5.2	Αλγόριθμος περιοχής	67
5.5.3	Παράδοση σύμφωνα με το IEEE 802.11	69
5.6	Διαμόρφωση δικτύου ραδιοεπικοινωνιών	71
5.6.1	Απόσταση μεταξύ AP	71
5.6.2	Διαμόρφωση κεραίων	73
5.7	Διαθεσιμότητα συστήματος.....	74
5.7.1	Εφεδρεία (redundancy)	74
5.8	Τυποποίηση.....	75
5.8.1	IEEE CBTC standard	76
5.8.2	Απαιτήσεις ραδιοεπικοινωνίας	78
6.	EUROPEAN RAIL TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEMS – ERTMS	79

6.1	European Train Control System - ETCS	82
6.2	Αρχιτεκτονική ETCS	85
6.3	ETCS Επιπέδου 1 (Level 1).....	89
6.4	ETCS Επιπέδου 2 (Level 2).....	90
6.5	ETCS Επιπέδου 3 (Level 3).....	91
7.	ΡΑΔΙΟΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ERTMS ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – GSMR	92
7.1	Ιστορική Αναδρομή Κινητής Τηλεφωνίας.....	92
7.2	GSM-R	93
7.2.1	Διαφορές GSM με GSM-R	94
7.2.2	Αρχές και ελλείψεις GSM – R.....	96
7.2.3	Κύρια χαρακτηριστικά GSM – R	97
7.2.4	Συνέπειες των επιλογών σχεδίασης GSM-R	100
7.2.5	Παράδοση (Handover) και Αλγόριθμοι παράδοσης GSM - R.....	102
7.3	Εναλλακτικές λύσεις.....	103
7.3.1	Terrestrial Trunked Radio (TETRA)	103
7.3.2	General Packet Radio Service (GPRS)	104
7.3.3	Universal Mobile Telecommunications System (UMTS).....	104
7.3.4	802.16 Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)	105
7.3.5	Long Term Evolution (LTE)	106
8.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ & ΣΥΓΚΛΙΣΗ CBTC - ETCS	109
8.1	Διαφορές και προκλήσεις.....	109
8.2	NGTC (Next Generation Train Control Systems).....	113
8.3	5G- Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)	116
9.	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ	123
9.1	Υπάρχουσα Κατάσταση γραμμής.....	123
9.2	Ποιοτική Ανάλυση Κόστους/Ωφέλειας	125
9.2.1	Οφέλη CBTC	125
9.2.2	SWOT.....	130
9.2.3	Ανάλυση των παραγόντων κόστους / οφέλους.....	131

9.3	Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας	133
9.3.1	Κόστος επένδυσης (CAPEX)	133
9.3.2	Κόστη λειτουργίας (OPEX).....	134
9.4	Αποτελέσματα.....	135
9.5	Ανάλυση Ευαισθησίας	135
10.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	137
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	141
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	142
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	143

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Σύστημα μπλοκ τηλεφώνου	17
Εικόνα 2 Διάταξη ενός απλού κόμβου σιδηροδρόμων.....	20
Εικόνα 3 Σύστημα κυκλώματος γραμμής DC μόνωση R R αποστολέας παραλήπτη μόνωση σήμα	22
Εικόνα 4 Σιδηροδρομικές γραμμές και σύστημα μπλοκ.....	23
Εικόνα 5 Παρακολούθηση κυκλώματος με μη κατειλημμένο μπλοκ	24
Εικόνα 6 Παρακολούθηση κυκλώματος με μη κατειλημμένο μπλοκ	25
Εικόνα 7 Αλυσίδα πληροφοριών από το παρατρόχιο στο τρένο.....	27
Εικόνα 8 Σχηματική απεικόνιση της βασικής αρχιτεκτονικής ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου αμαξοστοιχιών (ATC) σταθερών τμημάτων αποκλεισμού με τα τρία βασικά στοιχεία: ATP, ATO και ATS	32
Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση συστήματος αυτόματης προστασίας σε συμβατικά τρένα	33
Εικόνα 10 Σχηματική απεικόνιση συστήματος αυτόματης προστασίας σε τρένα υψηλών ταχυτήτων.....	34
Εικόνα 11 Καμπυλη Πέδησης.....	35
Εικόνα 12Ταξινόμηση των συστημάτων Μετρό ως προς το βαθμό αυτοματοποίησης της λειτουργίας τους	37
Εικόνα 13 Διάταξη Τεχνολογίας Ελέγχου Αμαξοστοιχίας με βάση τις Επικοινωνίες (CBTC)	39
Εικόνα 14 Εξοπλισμός CBTC.....	41
Εικόνα 15 Απεικόνιση εποχούμενου εξοπλισμού συστήματος CBTC.....	41
Εικόνα 16 Παράπλευρος Εξοπλισμός συστήματος CBTC.....	43
Εικόνα 17 Σύνδεση σημείων πρόσβασης με τον παράπλευρο εξοπλισμό, α)Star-topology , β)Ring-topology.....	45
Εικόνα 18 Ασύρματο Δίκτυο μεταξύ αμαξοστοιχίας και γραμμής.....	46
Εικόνα 19 Προσδιορισμός θέσης τρένου σε Σταθερό Μπλόκ	49
Εικόνα 20 Προσδιορισμός θέσης τρένου σε Κινητού Μπλόκ	50

Εικόνα 21 Προσέγγιση εικονικού μπλοκ (virtual block system).....	52
Εικόνα 22 Moving Block βασισμένο σε πλήρη κίνηση (full moving block system)	53
Εικόνα 23 Περιθώριο ασφαλείας σε σύστημα Full Moving Block.....	54
Εικόνα 24 Περιθώριο ασφαλείας σε εικονικό σύστημα μπλοκ Virtual Block System	54
Εικόνα 25 Έξτρα περιθώριο ασφαλείας σε εικονικό σύστημα μπλοκ	55
Εικόνα 26 Παράδοση στο CBTC	68
Εικόνα 27 Αλγόριθμος παράδοσης.....	69
Εικόνα 28 Signal range.....	72
Εικόνα 29 Στοιχεία ERTMS	80
Εικόνα 30 Πλάνο υλοποίησης ERTMS	83
Εικόνα 31 Σχηματική Απιεκόνιση της αρχιτεκτονικής ETCS επίπεδο 2	85
Εικόνα 32 Εξοπλισμός εντός αμαξοστοιχίας.....	86
Εικόνα 33 DMI σύστημα	87
Εικόνα 34 Eurobalises στην τροχία	88
Εικόνα 35 Επικοινωνία εξοπλισμού τροχίας με το υπολοιπο σύστημα ERTMS επίπεδο 2	89
Εικόνα 36 ETCS Επίπεδο 1	90
Εικόνα 37 ETCS Επίπεδο 2	91
Εικόνα 38 GSM-R συχνότητες στο uplink και στο downlink.....	96
Εικόνα 39 GSM-R αρχιτεκτονική δικτύου.....	97
Εικόνα 40 Παράδειγμα για την κατανομή συχνοτήτων καναλιών.....	99
Εικόνα 41 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου	100
Εικόνα 42 Δομικά Στοιχεία του συστήματος ERTMS	113
Εικόνα 43 Δομικά Στοιχεία του συστήματος CBTC.....	113
Εικόνα 44 Next Generation Train Control Systems	114
Εικόνα 45 Future Railway Mobile Communication System (FRMCS).....	118
Εικόνα 46 Χρονοδιάγραμμα FRMCS.....	119

Εικόνα 47 Πυλώνες FRMCS	121
Εικόνα 48 Υπηρεσίες FRMCS	122
Εικόνα 49 Γραμμή 2 του μετρό	123
Εικόνα 50 Παράγοντες Οφέλους	132
Εικόνα 51 Παράγοντες Κόστους	133

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

1.1 Αντικείμενο παρούσας εργασίας

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τα συστήματα σηματοδότησης σιδηροδρόμων με χρήση των τηλεπικοινωνιών στον Αστικό σιδηρόδρομο ενώ παράλληλα αναλύει και το Ευρωπαϊκό Σύστημα Διαχείρισης Σιδηροδρομικής Κυκλοφορίας όπου είναι το πρώτο διεθνές πρότυπο για επικοινωνία ελέγχου-χειρισμού αμαξοστοιχίας και επικοινωνίας αμαξοστοιχίας-εδάφους.

1.2 Ερευνητική μεθοδολογία

Η ερευνητική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε σε βιβλιογραφικό και συγκριτικό επίπεδο. Αρχικά, έγινε συλλογή πληροφοριών από αξιόπιστες πηγές και έπειτα πραγματοποιήθηκε η ανάλυση τους. Τελικά, με βάση τα δεδομένα συγκρίθηκαν, ταξινομήθηκαν και διατυπώθηκαν σχετικά συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού δημοσιεύσεων σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά ή συνέδρια και βιβλίων βασισμένων σε λέξεις κλειδιά, όπως CBTC, ERTMS, GOA κ.ά. Η βιβλιογραφία συγκεντρώθηκε με πλοήγηση σε δικτυακούς τόπους και περιλαμβάνει κυρίως πρακτικά συνεδρίων και αποτελέσματα ερευνών από συμβουλευτικές εταιρείες.

1.3 Δομή

Η εργασία διαρθρώνεται σε 10 κεφάλαια. Το παρών εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζει το αντικείμενο και τους στόχοι της εργασίας, περιγράφει τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την υλοποίησή της και δίδεται η δομή της. Ακολουθεί το 2^ο κεφάλαιο με την ιστορική αναδρομή των συστημάτων σηματοδότησης ενώ στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά σιδηροδρομικά στοιχεία, τα συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης και οι βαθμοί αυτοματοποίησης της .

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται μια ολοκληρωμένη παρουσίαση και ανάλυση των βασικών τεχνολογικών στοιχείων του συστήματος σηματοδότησης σιδηροδρόμων με χρήση των τηλεπικοινωνιών (Communication Based Train Control -CBTC).Ενώ στη συνέχεια, στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ραδιοεπικοινωνίες του συστήματος CBTC.

Στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται μια ολοκληρωμένη παρουσίαση και ανάλυση των βασικών τεχνολογικών στοιχείων του Ευρωπαϊκού συστήματος διαχείρισης της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας (European Rail Traffic Management System – ERTMS). Στη συνέχεια, στο

7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ραδιοεπικοινωνίες του συστήματος ERTMS καθώς και όλες οι εναλλακτικές λύσεις αυτού.

Το 8^ο κεφάλαιο πραγματεύεται θέματα σύγκρισης και σύγκλισης των συστημάτων CBTC-ERTMS με παράλληλη ανάπτυξη των μελλοντικών εξελίξεων στον τομέα των σιδηροδρόμων που αφορούν το φάσμα των τηλεπικοινωνιών. Στο 9^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η τεχνοοικονομική ανάλυση σχετικά με την αναβάθμιση της Γραμμής 2 του Μετρό με το σύστημα σηματοδότησης σιδηροδρόμων με χρήση των τηλεπικοινωνιών (Communication Based Train Control -CBTC).

Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εκπόνησης του παρόντος πονήματος.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΥΡΜΩΝ

Η κύρια σκοπιμότητα που εξυπηρετεί η λειτουργία της σιδηροδρομικής σηματοδότησης είναι η ασφαλής κυκλοφορία των συρμών κατά μήκος της γραμμής και συγκεκριμένα:

- Η αποφυγή σύγκρουσης δύο αντίθετα κινούμενων αμαξοστοιχιών σε γραμμή δύο κατευθύνσεων κυκλοφορίας (μετωπική σύγκρουση).
- Η αποφυγή σύγκρουσης δύο διαδοχικών αμαξοστοιχιών που κινούνται κατά την αυτή φορά σε γραμμή μιας ή δύο κατευθύνσεων κυκλοφορίας (οπισθομετωπική σύγκρουση).
- Η αποφυγή σύγκρουσης συρμών στα σημεία ένωσης (διακλαδώσεις), διχασμού (διακλαδώσεις), τομής (διασταυρώσεις) και σύνδεσης (παράλληλες γραμμές) σιδηροδρομικών γραμμών (εγκάρσια και πλαγιομετωπική σύγκρουση).
- Η αποφυγή λανθασμένων χειρισμών σε σχηματισμούς γραμμής (σημεία αλλαγών).
- Η εγκάρσια προστασία των συρμών στις ισόπεδες διασταυρώσεις με οδικές αρτηρίες ή στα σημεία ισόπεδης διέλευσης πεζών ή ζώων (εγκάρσια σύγκρουση με οδικά οχήματα, παράσυρση πεζών ή ζώων).
- Η αποφυγή εκτροχιασμού των συρμών στα τμήματα του δικτύου που μπορεί να επιβάλλεται περιορισμός της ταχύτητας διέλευσης (σημεία αλλαγών γραμμής, διέλευση τεχνικών έργων, τμήματα γραμμής με κακή ποιότητα επιδομής και δύσκολη οριζοντιογραφική χάραξη, τμήματα με υποχρεωτική βραδυπορία λόγω εκτελούμενων έργων ή λόγω κατολισθήσεων).

Επιπλέον των ανωτέρω η σηματοδότηση στο σιδηρόδρομο:

- Επιτρέπει την ορθολογικότερη χρησιμοποίηση της χωρητικότητας ενός τμήματος γραμμής, δηλαδή τη δρομολόγηση του μέγιστου αριθμού συρμών που μπορούν να κυκλοφορήσουν σε μια γραμμή, με πλήρη ασφάλεια, υπό ορισμένες πάντοτε συνθήκες εκμετάλλευσης και λειτουργίας της γραμμής.
- Παρέχει διάφορες πληροφορίες στους μηχανοδηγούς και στο προσωπικό της γραμμής (π.χ. σήμανση που αφορά τις εγκαταστάσεις ηλεκτροκίνησης).

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Στις πρώτες μέρες των σιδηροδρόμων, στα μέσα του δέκατου ένατου αιώνα (1850), οι σιδηροδρομικοί υπάλληλοι απασχολούνταν με το να στέκονται κατά μήκος της γραμμής

με ένα χρονόμετρο και χρησιμοποιώντας σήματα χεριών ενημέρωναν τους οδηγούς ότι ένα τρένο πρόκειται να περάσει σε έναν ορισμένο χρονικό διάστημα. Οι υπάλληλοι δεν είχαν κανέναν τρόπο να γνωρίζουν αν ένα τρένο είχε απομακρυνθεί, οπότε αν ένα προηγούμενο τρένο σταματούσε για οποιονδήποτε λόγο, ο οδηγός ενός επόμενου τρένου δεν θα είχε κανέναν τρόπο να το γνωρίζει αυτό εκτός και αν ήταν σαφώς ορατό. Ως αποτέλεσμα, τα ατυχήματα ήταν κοινά στις πρώτες μέρες των σιδηροδρόμων. Βοηθώντας το προσωπικό, οι σηματοδότες εισήχθησαν στις αρχές του αιώνα (1900). Το σήμα ερχόταν σε οριζόντια θέση (δείχνοντας στάση) όταν η αμαξοστοιχία επρόκειτο να περάσει. Μια τυπική απεικόνιση της σηματοδότησης ιστορικά αναλύεται στην παρακάτω εικόνα.

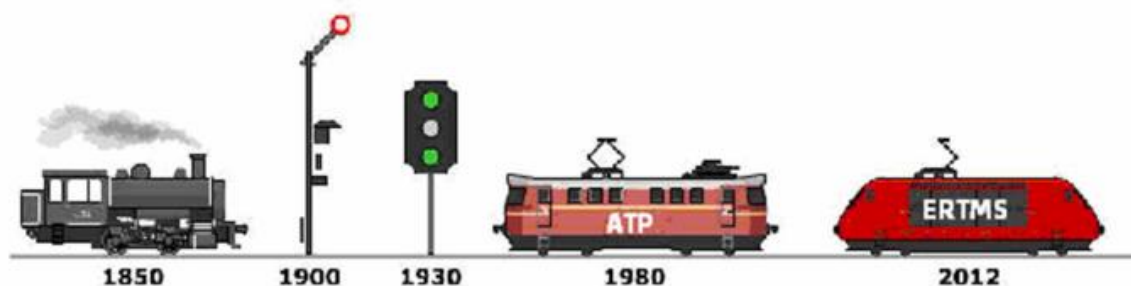
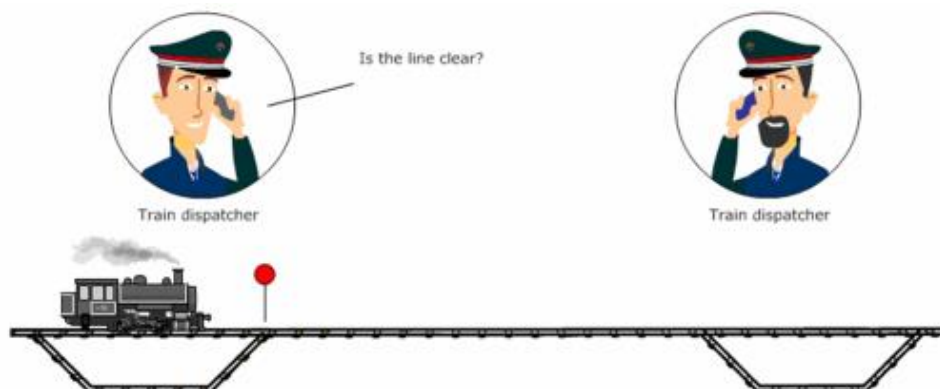


Figure 5: History of signalling systems

Με την εφεύρεση του ηλεκτρικού τηλέγραφου και στη συνέχεια του τηλεφώνου, κατέστη δυνατό για το προσωπικό ενός σταθμού να στέλνει ένα μήνυμα (πρώτα έναν συγκεκριμένο αριθμό σε ένα κουδούνι όπου χτυπάει, μετά ένα τηλεφώνημα) για να επιβεβαιώσει ότι ένα τρένο είχε περάσει από το σημείο και ότι ένα συγκεκριμένο μπλοκ ήταν τελικά καθαρό. Περίπου το 1930 εισήχθησαν τα πρώτα οπτικά σήματα. Όλο το σύστημα ονομάστηκε απόλυτο σύστημα μπλοκ (absolute block system) ή σύστημα μπλοκ τηλεφώνου (phone block system) και αντιπροσωπεύεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1 Σύστημα μπλοκ τηλεφώνου

Όταν τα σταθερά μηχανικά σήματα άρχισαν να αντικαθιστούν τα σήματα με την παρουσία ανθρώπων από τη δεκαετία του 1930, γεννήθηκε το ημιαυτόματο μπλοκ(semiautomatic block). Τα χαρακτηριστικά του ήταν ανάλογα με το προηγούμενο, αλλά η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κουτιών σήματος πραγματοποιήθηκε μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος και συστήματος μοχλών, με το οποίο αποστέλλονταν αίτημα και άδεια για πρόσβαση στο μπλοκ. Σήμερα, η σιδηροδρομική σηματοδότηση βασίζεται στο αυτόματο μπλοκ(automatic block), το οποίο δεν απαιτεί χειροκίνητη παρέμβαση. Μία γραμμή εξοπλισμένη με ηλεκτρονικό αυτόματο μπλοκ ή σύστημα αλληλοσύνδεσης (interlocking) που διαιρείται σε τμήματα μήκους όχι μικρότερη από την απόσταση στάσης των ταχύτερων τρένων που υπάρχουν στη διαδρομή. Η λειτουργία της ανίχνευσης της παρουσίας ή της διέλευσης των συρμών σε ένα συγκεκριμένο τμήμα εκτελείται από ένα σύστημα που ονομάζεται κύκλωμα τροχιάς (track circuit) (βλ. Κεφάλαιο 2.3.5.).

2.2 Εισαγωγικές Έννοιες και Ορισμοί

Το σιδηροδρομικό σύστημα είναι ένα μέσο μεταφοράς επιβατών ή εμπορευμάτων που χρησιμοποιούν τρένα που τρέχουν σε ράγες (επίσης γνωστά ως κομμάτια). Το σιδηροδρομικό δίκτυο αποτελείται από σιδηροδρομικές γραμμές και σιδηροδρομικούς σταθμούς / κόμβους.

Σιδηροδρομική γραμμή: Μια σιδηροδρομική γραμμή συνδέει δύο ή περισσότερους σιδηροδρομικούς κόμβους (ή σταθμούς) με ράγες. Η πιο κοινή είναι η σιδηροδρομική γραμμή διπλής τροχιάς αποτελείται από δύο γραμμές που χωρίζουν τα αντίθετα τρένα με διαφορετικές κατευθύνσεις ταξιδιού, ενώ σε σιδηροδρομική γραμμή μονής γραμμής και οι δύο κατευθύνσεις μοιράζονται την ίδια διαδρομή.

Ανάλογα με τη λειτουργικότητά τους, οι σιδηροδρομικές γραμμές μπορούν να ταξινομηθούν κατά:

- Κύριος σιδηρόδρομος: οι σιδηροδρομικές γραμμές μεταξύ πόλεων ή ακόμη και οι διεθνείς γραμμές, όπου τα τρένα μπορούν να κινούνται με σχετικά υψηλή ταχύτητα
- Σιδηροδρομικές γραμμές προαστιακού: σιδηροδρομικές γραμμές σχετικά χαμηλής ταχύτητας κυρίως για μετακινούμενους, π.χ. RER (Γαλλικά: Réseau Express Régional) για την περιοχή του Παρισιού.

- **Αστικές σιδηροδρομικές μεταφορές:** διάφοροι τύποι τοπικών σιδηροδρομικών συστημάτων εντός ή γύρω από τις αστικές περιοχές, π.χ., μετρό (μετρό), τραμ, σιδηρόδρομος.

Εκτός αν αναφέρεται συγκεκριμένα, ο όρος «σιδηροδρομική γραμμή» σε αυτή τη εργασία λαμβάνει υπόψη την αστική γραμμή δηλαδή τα τοπικά σιδηροδρομικά συστήματα, που περιλαμβάνουν αυστηρές απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργική πολυπλοκότητα.

Σιδηροδρομικός σταθμός: Ένας σιδηροδρομικός σταθμός είναι μια σιδηροδρομική διαδρομή όπου ένα τρένο ξεκινά / τελειώνει το ταξίδι του ή όπου σταματά κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του. Η κύρια λειτουργία ενός σιδηροδρομικού σταθμού είναι να προσφέρει πλατφόρμες όπου οι επιβάτες μπορούν να επιβιβαστούν και να αποβιβαστούν από τρένα.

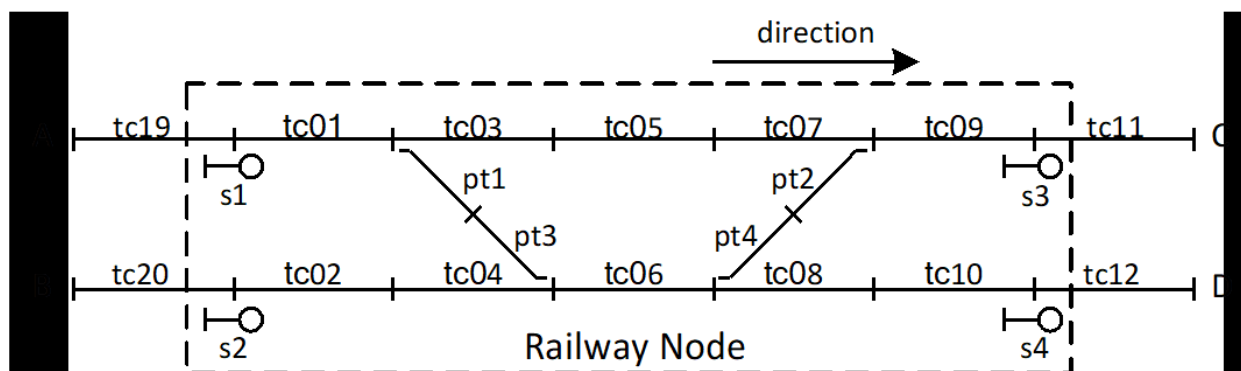
Σιδηροδρομικός κόμβος: Εκτός από τους γνωστούς σιδηροδρομικούς σταθμούς για τους επιβάτες, η μελέτη μας δίνει μεγαλύτερη προσοχή στους σιδηροδρομικούς κόμβους από την άποψη του ελέγχου της αμαξοστοιχίας.

Ο λεγόμενος «σιδηροδρομικός κόμβος» σε αυτή τη εργασία αναφέρεται σε έναν κόμβο ενός σιδηροδρομικού δικτύου που συνδέει διαφορετικές σιδηροδρομικές γραμμές. Προσφέρει τη δυνατότητα στα τρένα να αλλάξουν την σιδηροδρομική γραμμή στην οποία κινούνται ανάλογα με τους προορισμούς τους.

Ένας σιδηροδρομικός κόμβος μπορεί να είναι ένας μεγάλος σιδηροδρομικός σταθμός για όσο διάστημα χρειάζεται η λειτουργία για τη σύνδεση πολλών σιδηροδρομικών γραμμών.

2.3 Παρούσα Κατάσταση- Βασικά σιδηροδρομικά στοιχεία και εξοπλισμός

Η εικόνα 1 δείχνει τη διάταξη ενός πολύ απλού κόμβου σιδηροδρόμων, όπου μπορούμε να βρούμε κάποια βασικά σιδηροδρομικά στοιχεία για τον έλεγχο της αμαξοστοιχίας. Η διάταξη περιγράφει πώς είναι αυτά τα στοιχεία τοπολογικά διαμορφωμένα. Σε αυτήν τη διάταξη, σε κάθε στοιχείο δίνεται ένα μοναδικό αναγνωριστικό.



Εικόνα 2 Διάταξη ενός απλού κόμβου σιδηροδρόμων

2.3.1 Παρακολούθηση τμήματος τροχιάς

Από την άποψη ελέγχου αμαξοστοιχίας, τα τμήματα τροχιάς (κομμάτια για συντομία στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας) είναι στοιχεία που περιλαμβάνουν τις ράγες και χαρακτηρίζονται ως "tcxx" στην εικόνα 2.

Κάθε τμήμα κομματιού που είναι απομονωμένο από την ηλεκτρική μόνωση και είναι εξοπλισμένο με συσκευές ανίχνευσης αμαξοστοιχίας (όπως κυκλώματα τροχιάς ή μετρητές αξόνων), που αναλύονται παρακάτω, τα οποία μπορούν να ανιχνεύσουν εάν υπάρχει αμαξοστοιχία. Όταν υπάρχει μια αμαξοστοιχία σε ένα συγκεκριμένο κομμάτι τροχιάς, το τμήμα τροχιάς λέγεται ότι «καταλαμβάνεται».

Τα σιδηροδρομικά σήματα (σήματα εφεξής εν συντομία) εμφανίζονται ως σημάδια «γλειφιτζούρι» και χαρακτηρίζονται "sx" στην εικόνα 2. Τα σήματα ενημερώνουν τους οδηγούς των τρένων για την κατάσταση των σιδηροτροχιών μπροστά με μια οπτική μέθοδο (συνήθως χρωματιστά φώτα) για την αποφυγή συγκρούσεων. Τα σήματα έχουν διαφορετικές πτυχές (οπτικές εμφανίσεις) και ενδείξεις (έννοιες που την υποδηλώνουν). Λόγω διαφορετικών περιπτώσεων εφαρμογής, υπάρχουν πολλές μορφές σιδηροδρομικών σημάτων με πρακτική ανάλογα με τις χώρες και τα σιδηροδρομικά δίκτυα.

Τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου σιδηροδρόμων χρησιμοποιούν επίσης «σήματα καμπίνας (επί του σκάφους)» επειδή είναι όλο και περισσότερο ανέφικτο για τους οδηγούς αμαξοστοιχιών να βλέπουν παρατρόχια σήματα με την αυξανόμενη ταχύτητα αμαξοστοιχίας.

2.3.2 Σημείο ή Διακόπτης

Τα σημεία αυτά χαρακτηρίζονται ως "ptx" στην εικόνα 2 και ονομάζονται Διακόπτες. Ένας διακόπτης είναι μια μηχανική εγκατάσταση που επιτρέπει στα τρένα να

οδηγούνται από μία σιδηροδρομική γραμμή προς μία άλλη. Ένας απλός διακόπτης έχει δύο πιθανές θέσεις, δηλαδή, κανονική και αντίστροφη. Η κανονική θέση επιτρέπει σε μια αμαξοστοιχία να κινείται σε ευθεία κατεύθυνση, ενώ η αντίστροφη θέση οδηγεί μια αμαξοστοιχία σε ένα παρακλάδι.

Για να διασφαλιστεί η ασφάλεια στην κίνηση των αμαξοστοιχιών, ο διακόπτης έχει πάντα ένα κλείδωμα ασφαλείας στη θέση του. Ένα τρένο μπορεί να περάσει από ένα σημείο, εάν το σημείο έχει σταθερά καθορισμένη θέση (κανονική ή αντίστροφη) από παρατρόχιες συσκευές και έχει κλειδώσει σε αυτήν τη θέση.

2.3.3 Διαδρομή και Σύμπλεξη (Interlocking)

Μια διαδρομή αποτελείται από έναν συνδυασμό διαδοχικά συνδεδεμένων τμημάτων διαδρομής, που αντιστοιχούν σε σημεία και ένα ή περισσότερα σήματα για την προστασία αυτής της διαδρομής. Ο ορισμός των δρομολογίων είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος κατανομής και αξιοποίησης των πόρων ενός σιδηροδρομικού συστήματος.

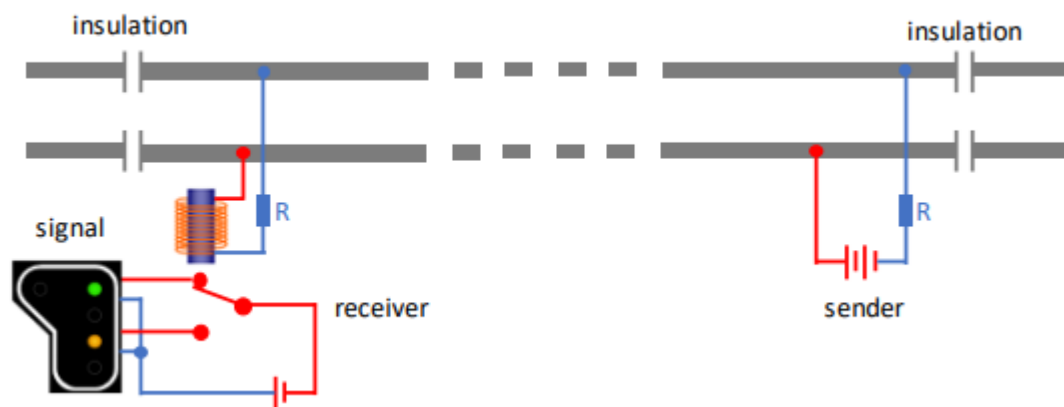
Η **Σύμπλεξη** (interlocking) ορίζεται επίσημα στις ΗΠΑ ως «*Διάταξη σημάτων και συσκευών σήματος τόσο διασυνδεδεμένα που οι κινήσεις τους πρέπει να επιτύχουν η μία την άλλη με τη σωστή σειρά*» (Josserand και Forman 1957). Είναι ένα σύστημα εγγύησης ασφαλείας για την αποφυγή συγκρουόμενων κινήσεων στο σιδηροδρομικό σύστημα ειδικά όταν οι τροχιές έχουν διακλαδώσεις ή διασταυρώσεις. Σε ένα σύστημα **Σύμπλεξης** (interlocking), οι συσκευές σηματοδότησης και οι τροχιές μπορούν να αναφέρονται συλλογικά σε διαδρομή αμαξοστοιχίας. Είναι επομένως αδύνατο να εμφανιστεί ένα ανοιχτό σήμα στον οδηγό εκτός εάν όλοι οι αντίστοιχα πόροι έχουν δεσμευτεί και η διαδρομή έχει αποδειχθεί ασφαλής.

2.3.4 Ανίχνευση αμαξοστοιχίας και κύκλωμα τροχιάς

Η ανίχνευση της αμαξοστοιχίας έχει θεωρηθεί ως πρωταρχική ανάγκη για ένα σύστημα ελέγχου αμαξοστοιχίας (Kichenside και Williams 1998). Υπάρχουν σήμερα δύο δημοφιλείς μέθοδοι για την ανίχνευση αμαξοστοιχίας: τα κυκλώματα γραμμής και οι μετρητές αξόνων.

Το **κύκλωμα τροχιάς** κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον William Robinson το 1872 (Robinson 1872). Η εφεύρεση του κυκλώματος γραμμής καθιστά δυνατή τη γνώση της κατάστασης του τμήματος τροχιάς (κατεχόμενο ή καθαρό) κάνοντας χρήση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των σιδηροτροχιών.

Ένα απλό κύκλωμα DC (συνεχούς ρεύματος) φαίνεται στην εικόνα 3. Το τμήμα της τροχιάς στη μέση προστατεύεται από το σήμα (φανάρι). Όταν το τμήμα της γραμμής είναι καθαρό, το ρελέ σηκώνεται και το σήμα εμφανίζεται "καθαρό". Διαφορετικά, όταν μια αμαξοστοιχία βρίσκεται στο τμήμα γραμμής, το ρελέ θα πέσει (λόγω βραχυκυκλώματος) και οι ενδείξεις σήματος θα είναι "κατεχόμενες". Η οθόνη θα είναι επίσης «απασχολημένη» σε περίπτωση που οι ράγες ή τα καλώδια είναι σπασμένα, πράγμα που θεωρείται «ασφαλή αστοχία», μια σημαντική έννοια στον κρίσιμο σχεδιασμό συστημάτων ασφαλείας.



Εικόνα 3 Σύστημα κυκλώματος γραμμής DC μόνωση R R αποστολέας παραλήπτη μόνωση σήμα

Εκτός από τη λειτουργία ανίχνευσης αμαξοστοιχίας, το κύκλωμα τροχιάς συμβάλλει επίσης στην μετάδοση πληροφοριών. Τα ηλεκτρικά σήματα που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση αμαξοστοιχίας μπορούν επίσης να καταγραφούν και να μεταφέρουν περισσότερες πληροφορίες ελέγχου. Το σήμα κυκλώματος τροχιάς συνήθως διαμορφώνεται και ονομάζεται «κωδικοποιημένα κυκλώματα διαδρομής».

Για περισσότερο από έναν αιώνα, το σύστημα κυκλώματος τροχιάς αναπτύχθηκε από DC σε AC, από χωρίς διαμόρφωση σε κωδικοποίηση, από αναλογικό σε ψηφιακό. Σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως σε όλο τον κόσμο ως μια σημαντική συσκευή ασφαλείας των σιδηροδρόμων.

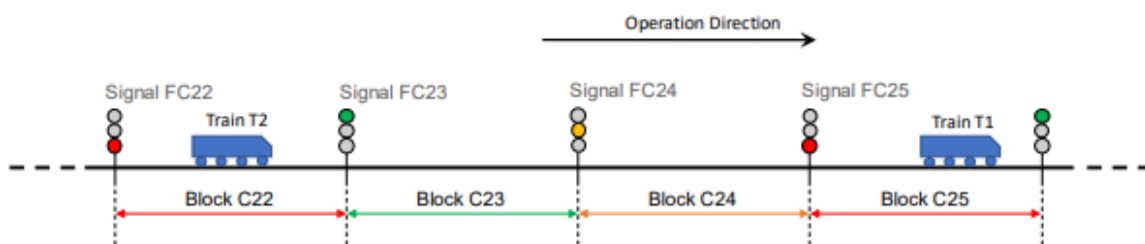
Ο **μετρητής άξονα** είναι μια εναλλακτική μέθοδος για την ανίχνευση της αμαξοστοιχίας με τη σύλληψη και μέτρηση αριθμού των αξόνων αμαξοστοιχίας που διέρχονται από μια διάταξη μετρητή άξονα. Ένα άλλο πλεονέκτημα ενός μετρητή αξόνων είναι ότι μπορεί ταυτόχρονα να ελέγξει την ακεραιότητα της αμαξοστοιχίας συγκρίνοντας τον αριθμό των αξόνων που μπαίνουν σε ένα τμήμα με το αποτέλεσμα αυτών που μετρήθηκαν.

2.3.5 Μπλοκ σιδηροδρόμων

Μια σιδηροδρομική γραμμή συνδέει δύο παρακείμενους σιδηροδρομικούς σταθμούς ή σιδηροδρομικούς κόμβους. Μπορεί να ταξιδεύουν πολλά τρένα σε μια σιδηροδρομική γραμμή διαδοχικά και ένα σύστημα μπλοκ σιδηροδρόμων χρησιμοποιείται για την αποφυγή σύγκρουσης των αμαξοστοιχιών, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των σιδηροδρομικών συστημάτων.

Για να εισαγάγουμε το σύστημα σιδηροδρομικών μπλοκ, εξετάζουμε πρώτα μόνο μία κατεύθυνση διπλής τροχιάς σιδηροδρομική γραμμή, δηλαδή μια μεμονωμένη σιδηροδρομική γραμμή που αποτελείται από δύο σιδηροτροχιές που έχουν σταθερή κατεύθυνση δηλαδή όπου όλα τα τρένα λειτουργούν προς την ίδια κατεύθυνση.

Μια τέτοια σιδηροδρομική γραμμή μπορεί να χωριστεί σε πολλά τμήματα. Για λόγους ασφαλείας, ανά πάσα στιγμή **το μπλοκ** δεν πρέπει να περιέχει περισσότερες από μία αμαξοστοιχίες. Μόνο αφού το τρένο που καταλάμβανε προηγουμένως το ρεύμα απομακρυνθεί από το μπλοκ (τότε το μπλοκ είναι "καθαρό") και μπορεί να επιτραπεί σε ένα άλλο τρένο να εισέλθει σε αυτό το μπλοκ.



Εικόνα 4 Σιδηροδρομικές γραμμές και σύστημα μπλοκ

Η εικόνα 4 δείχνει ένα βασικό σύστημα μπλοκ τριών διατάξεων με το κόκκινο / κίτρινο / πράσινο σύστημα σήματος. Μια αμαξοστοιχία (ή ένα εμπόδιο) που καταλαμβάνει το πρώτο τετράγωνο (Block C25) αποτρέπει άλλα τρένα από την είσοδο στο ίδιο μπλοκ δείχνοντας μια κόκκινη όψη στο σύστημα σήματος, εμφανίζει ένα προειδοποιητικό σήμα με κίτρινο χρώμα για να επιβραδύνει μια αμαξοστοιχία πριν εισέλθει στο δεύτερο μπλοκ (μπλοκ C24), και επιτρέπει πλήρη ταχύτητα εμφανίζοντας μια πράσινη όψη για όσους εισέρχονται στο τρίτο μπλοκ (Block C23) ή πιο μακρινά μπλοκ. Σήμερα, με την αυξανόμενη ταχύτητα του τρένου και τη ζήτηση για υψηλότερη χωρητικότητα, χρησιμοποιούνται πιο εξελιγμένα συστήματα σηματοδότησης ώστε στα τρένα να μπορούν να δοθούν πολλαπλά είδη προειδοποιήσεων για μία επικείμενη σύγκρουση.

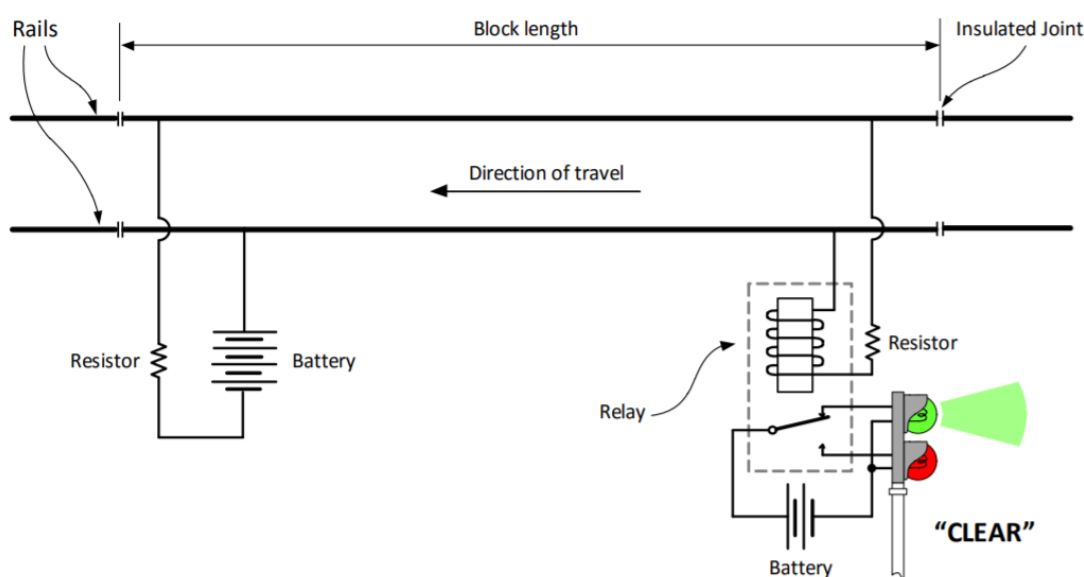
Το μήκος ενός μπλοκ είναι συνήθως από 500m έως 1500m, λαμβάνοντας υπόψη το μήκος του τρένου, την ταχύτητα και την απόδοση της πέδησης. Η κατοχή ενός μπλοκ ελέγχεται ανά κύκλωμα γραμμής ή άλλα συστήματα ανίχνευσης αμαξοστοιχίας.

Κάθε μπλοκ, λοιπόν, ξεχωρίζει από τα παρακείμενα μέσω μόνωσης συνδέσμου μεταξύ σιδηροτροχιών και επιτρέπει την ανίχνευση της παρουσίας αμαξοστοιχίας. Η αρχή λειτουργίας κυκλωμάτων τροχιάς βασίζεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα ανάμεσα στις δύο ράγες. Η παρουσία μιας αμαξοστοιχίας ανιχνεύεται από την ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ των σιδηροτροχιών, που παρέχονται από τους τροχούς και τους άξονες της αμαξοστοιχίας (μετατόπιση τροχού σε ράγα).

Το βασικό κύκλωμα συνεχούς ρεύματος εφευρέθηκε από τον Δρ. William Robinson και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1872. Το κύκλωμα τροχιάς αποτελείται από ένα τμήμα μπλοκ που ορίζεται σε κάθε άκρη από μονωμένους αρμούς στις ράγες. Οι μονωμένοι σύνδεσμοι παρέχουν ηλεκτρική μόνωση μεταξύ κυκλώματος τροχιάς και γειτονικών γραμμών.

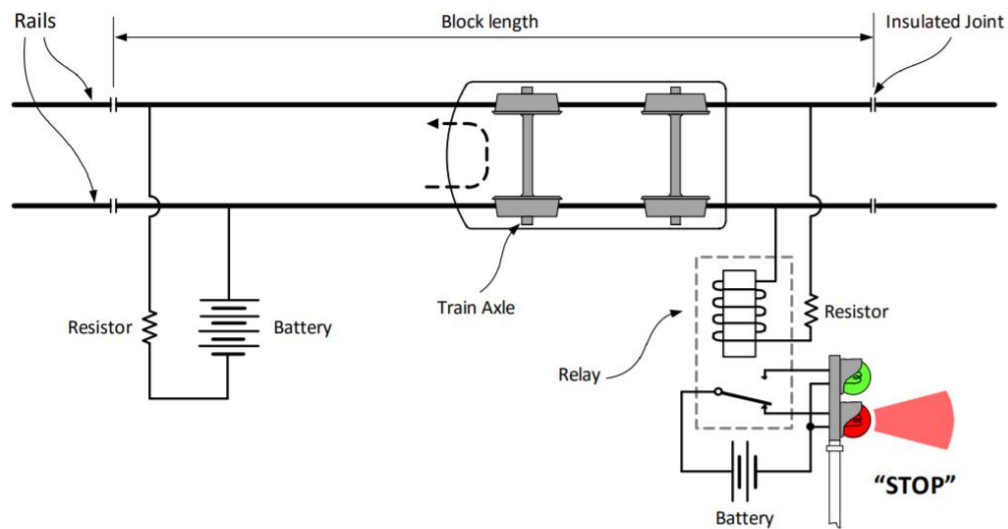
Η πηγή σήματος (μια μπαταρία) συνδέεται με τις ράγες στο ένα άκρο του τμήματος μπλοκ, ενώ ο δέκτης (ένα ρελέ) είναι συνδεδεμένος στην άλλη άκρη.

Όταν δεν υπάρχει αμαξοστοιχία, το κύκλωμα τροχιάς αδειάζει και το συνεχές ρεύμα που παρέχεται από τη μπαταρία μεταδίδεται από τις ράγες λειτουργίας στο ρελέ και την ενεργοποιεί. Όταν το ρελέ ενεργοποιείται, το πράσινο φως ανάβει (Εικόνα 4).



Εικόνα 5 Παρακολούθηση κυκλώματος με μη κατειλημμένο μπλοκ

Όταν μια αμαξοστοιχία πλησιάζει το μπλοκ, οι τροχοί και οι άξονές του συνδέουν τις δύο ράγες προκαλώντας βραχυκύκλωμα της μπαταρίας και επομένως μείωση του ρεύματος στο μηδέν μέσω του ρελέ. Αυτό προκαλεί την "πτώση" του ρελέ (Σχήμα 3), την απενεργοποίηση της πράσινης λυχνίας σήματος και την ενεργοποίηση της κόκκινης λυχνίας για ένδειξη ότι το μπλοκ καταλαμβάνεται από ένα τρένο. Μια σειρά αντιστάσεων προστατεύει την μπαταρία περιορίζοντας το ρεύμα που πρέπει να παρέχει όταν υπάρχει αμαξοστοιχία στο μπλοκ.



Εικόνα 6 Παρακολούθηση κυκλώματος με μη κατειλημμένο μπλοκ

2.4 Αδυναμίες της κλασικής σηματοδότησης

Η κλασική σιδηροδρομική σηματοδότηση, βασίζεται συνήθως σε φωτεινούς σηματοδότες. Η συνήθης (απλοποιημένη) λειτουργία του συστήματος έχει ως εξής:

1. Πρώτον, όταν πρόκειται να αναχωρήσει μια αμαξοστοιχία, το Σύστημα Διαχείρισης Κυκλοφορίας στέλνει ένα αίτημα για την διαδρομή του τρένου στο interlocking.
2. Το Interlocking επαληθεύει εάν τα μπλοκ (δηλαδή τμήματα της γραμμής) θα είναι κατειλημμένα ή όχι.
3. Στη συνέχεια, το Interlocking επιβεβαιώνει ότι τα αντίστοιχα σήματα εμφανίζουν ένδειξη "διακοπής διέλευσης", οπότε άλλα τρένα δεν εισέρχονται στη διαδρομή.
4. Μόλις γίνει αυτό, εμφανίζεται η κατάλληλη ένδειξη στον οδηγό της αμαξοστοιχίας.

Αυτό το σύστημα διασφαλίζει ότι δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη χρήση μίας διαδρομής. Επίσης, μη ένδειξη "προχωρήστε" εγγυάται ότι η διαδρομή είναι κλειδωμένη, δηλαδή

όλα τα μπλοκ είναι άδεια και όλες οι διαδρομές λαμβάνουν μια ένδειξη «διακοπής διέλευσης». Ωστόσο, η ασφάλεια του συστήματος εξαρτάται σημαντικά από τον ανθρώπινο παράγοντα, δηλαδή την αντίδραση του οδηγού στην εμφανιζόμενη ένδειξη. Ο οδηγός μπορεί, για παράδειγμα, να μην παρατηρήσει το σήμα, μπορεί να παρερμηνεύει την ένδειξη ή μπορεί να υποτιμήσει την απόσταση πέδησης του τρένο. Σε περίπτωση τέτοιου σφάλματος, οι συνέπειες μπορεί να είναι θανατηφόρες. Επιπλέον, ο κίνδυνος και η συνέπεια του σφάλματος του οδηγού αυξάνονται με την ταχύτητα της αμαξοστοιχίας. Εκτός από τα θέματα ασφάλειας, τα φωτεινοί σηματοδότες έχουν και τα κάτωθι μειονεκτήματα:

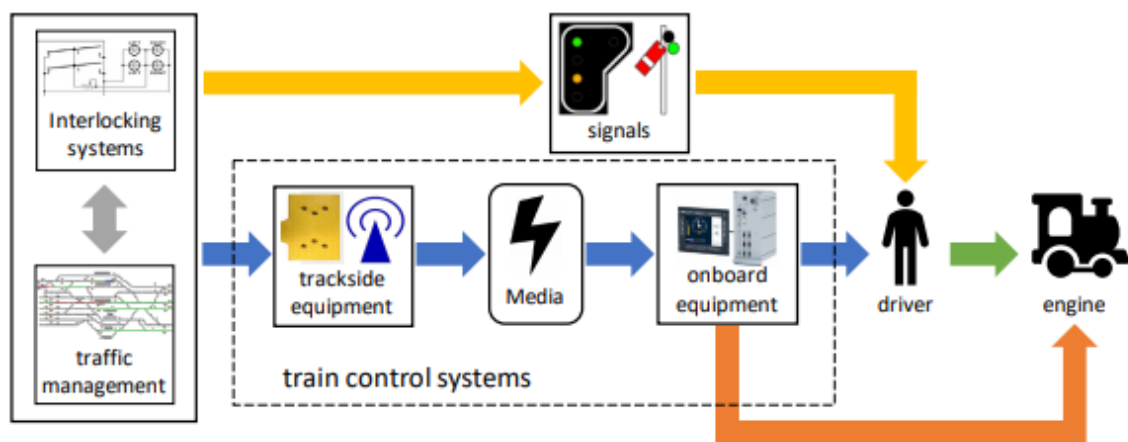
- Φέρουν περιορισμένες πληροφορίες. Είναι αδύνατο να ενημερώσει τον οδηγό σχετικά με τα ακριβή όρια ταχύτητας, την κατάληψη των κομματιών και την ακριβή απόσταση από τη θέση σήματος.
- Βρίσκονται σε σταθερές θέσεις. Έτσι, εάν το όριο ταχύτητας αυξηθεί ενώ η αμαξοστοιχία βρίσκεται κάπου μεταξύ δύο σηματοδοτών, ο οδηγός δεν μπορεί να ενημερωθείτε για αυτό. Το τρένο θα συνεχίσει να λειτουργεί με το παλιό όριο ταχύτητας έως ότου το επόμενο σήμα γίνει ορατό.
- Δεν μπορούν να λάβουν υπόψη τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης αμαξοστοιχίας. Για παράδειγμα, τα τρένα έχουν διαφορετικές δυνατότητες πέδησης και μέγιστης ταχύτητας. Δεδομένου ότι το σύστημα δεν γνωρίζει τι τρένο λειτουργεί αυτήν τη στιγμή, τα όρια ταχύτητας πρέπει να έχουν τα χειρότερα χαρακτηριστικά πέδησης.

3. Η ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΪΗΣΗ ΣΤΑ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1 Συστήματα ελέγχου συρμού (Train Control System)

Από τότε που επινοήθηκε, ο πιο σημαντικός ρόλος του ελέγχου αμαξοστοιχίας είναι η διαχείριση πολλαπλών αμαξοστοιχιών που τρέχουν σε σιδηροδρομικό δίκτυο και έτσι διασφαλίζεται η ασφάλεια. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να μεταφέρεται ο έλεγχος πληροφοριών από τα παρατρόχια συστήματα έως τα τρένα (ή τους οδηγούς τους).

Η εικόνα 7 δείχνει διάφορες αλυσίδες πληροφοριών, οι οποίες μπορεί να είναι χρήσιμες για την επεξήγηση των διαφορετικών μορφών ελέγχου αμαξοστοιχίας.



Εικόνα 7 Αλυσίδα πληροφοριών από το παρατρόχιο στο τρένο

Το πάνω βέλος με κίτρινο χρώμα δείχνει τις πληροφορίες που παρέχονται στον οδηγό της αμαξοστοιχίας με φυσικά και οπτικά σήματα δίπλα στη γραμμή. Ο οδηγός λειτουργεί την αμαξοστοιχία σύμφωνα με τα σήματα που δείχνουν την κατάσταση της γραμμής μπροστά του.

Το μεσαίο βέλος με μπλε χρώμα μπορεί να ονομαστεί σηματοδότηση καμπίνας, το οποίο επαναλαμβάνει ή αντικαθιστά τα σήματα της τροχιάς στην καμπίνα (δηλαδή, το διαμέρισμα του οδηγού της αμαξοστοιχίας). Τα σήματα στην καμπίνα εμφανίζονται συνεχώς στον οδηγό ώστε να ενημερώνεται εγκαίρως, καθιστώντας ευκολότερη την ανάγνωση, ειδικά για τους σιδηροδρόμους υψηλής ταχύτητας. Εκτός από την επανάληψη σημάτων του παρατρόχιου εξοπλισμού, μια πιο εξελιγμένη καμπίνα με συστήματα σηματοδότησης μπορεί επίσης να εμφανίσει το όριο ταχύτητας, καθώς και άλλες δυναμικές πληροφορίες σχετικά με τη θέση του με κοντινά τρένα, κατάσταση της γραμμής μπροστά, κ.λπ.

Σήμερα, τα σήματα καμπίνας είναι πάντα ενσωματωμένα σε ένα πιο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας της αμαξοστοιχίας που μπορεί να παρεμβαίνει αυτόματα στην κίνηση της αμαξοστοιχίας (π.χ. φρένα) εάν δεν το κάνει ο οδηγός και να ανταποκρίνεται κατάλληλα σε μια επικίνδυνη κατάσταση ή να βελτιστοποιεί τη λειτουργία της αμαξοστοιχίας. Η αυτόματη παρέμβαση υποδεικνύεται από το πορτοκαλί βέλος στο κάτω μέρος της εικόνας 7.

3.2 Συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης

3.2.1 Αυτόματο σύστημα ελέγχου του συρμού (Automatic Train Control)

Με τον όρο «Αυτόματο Σύστημα Ελέγχου του τρένου» (Automatic Train Control – ATC) νοείται το σύνολο των αυτόματων λειτουργιών ενός συρμού. Ένα σύστημα Automatic Train Control (ATC) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των σύγχρονων συστημάτων Μετρό. Αναλυτικότερα ένα ολοκληρωμένο αυτόματο σύστημα ελέγχου του τρένου (Automatic Train Control – ATC) αποτελείται από :

- το σύστημα Αυτόματης Προστασίας του Συρμού (Automatic Train Protection – ATP),
- το σύστημα Αυτόματης Λειτουργίας του Συρμού (Automatic Train Operation – ATO) και
- το σύστημα Αυτόματης Εποπτείας Συρμών (Automatic Train Supervision - ATS).

ATC Αυτόματος Έλεγχος Αμαξοστοιχίας		
ATS Automatic Train Supervisor	ATP Automatic Train Protection	ATO Automatic Train Operation
-Έλεγχος και επιθεώρηση των τρένων μέσω του κέντρου ελέγχου -Χρονικός Προγραμματισμός της αμαξοστοιχίας για να διαπιστωθεί εάν η αμαξοστοιχία συμβαδίζει χρονικά με αυτόν - Ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας -Παρακολούθηση κατάστασης του εξοπλισμού	-Ασφαλή διαχωρισμό των συρμών -Ασφαλή προστασία από σύγκρουση με άλλη αμαξοστοιχία -Εκτελεί αυτόματα ένα φρένο έκτακτης ανάγκης. Σημαντικό ρόλο έχει η καμπύλη πέδησης η οποία απεικονίζεται ηλεκτρονικά. -Ασφαλή ταχύτητα και κατεύθυνση ελέγχου -Ασφαλή επιτήρηση στις πόρτες του τρένου ATO	-Λειτουργία στις πόρτες των τρένων -Υπεύθυνο για την επιτάχυνση -Υπεύθυνο για την τήρηση της επιτρεπόμενης ταχύτητας -Υπεύθυνο για την επιβράδυνση του συρμού και την ακινητοποίηση του σε καθορισμένους σταθμούς -Εκτελεί τις λειτουργίες ενός οδηγού

Εικόνα 5 Αυτόματος Έλεγχος αμαξοστοιχίας

3.2.2 Αυτόματη Προστασία της Αμαξοστοιχίας (Automatic Train Protection)

Η Αυτόματη Προστασία Αμαξοστοιχίας (ATP) είναι υπεύθυνη για την αποφυγή συγκρούσεων με άλλη αμαξοστοιχία. Το ATP διασφαλίζει ότι η ταχύτητα της αμαξοστοιχίας είναι συμβατή με την επιτρεπόμενη ταχύτητα. Εάν είναι απαραίτητο, το ATP εκτελεί αυτόματα την λειτουργία του φρένου έκτακτης ανάγκης για να σταματήσει

την αμαξοστοιχία. Εξοπλισμένο σύστημα ελέγχου αμαξοστοιχίας με ATP αντιστοιχεί (τουλάχιστον) στο GoA1, το οποίο είναι επίσης η πιο κοινή κατάσταση των συστημάτων ελέγχου για τα τρέχοντα κύρια σιδηροδρομικά δίκτυα, π.χ. το σύστημα ERTMS / ETCS.

Η αυτόματη προστασία της αμαξοστοιχίας (ATP) αποτελεί την πρώτη λειτουργία ενός αυτόματου συστήματος ελέγχου του τρένου (Automatic Train Control – ATC). Βάσει αυτής το τρένο «λαμβάνει» τα επιτρεπόμενα όρια ταχύτητας μέσα στα οποία θα κινείται. Για να λειτουργήσει επιτυχώς η αυτόματη προστασία της αμαξοστοιχίας πρέπει στο σύστημα να είναι γνωστές οι παρακάτω παράμετροι: η τρέχουσα ταχύτητα του τρένου, η ικανότητα πέδησης και η απόσταση που θα διανύσει ο συρμός μέχρι να ακινητοποιηθεί. Σε αυτή την περίπτωση, τα τρένα είναι εξοπλισμένα με υπολογιστές, που είναι υπεύθυνοι να λαμβάνουν τα δεδομένα της κίνησης που μεταδίδονται από τη γραμμή στο συρμό, να καταγράφουν την ταχύτητα και να υπολογίζουν την ταχύτητα που στοχεύει να φτάσει το τρένο, αλλά και σε ποια δεδομένη στιγμή μπορεί αυτή να επιτευχθεί. Το σύστημα αυτόματης προστασίας του τρένου ενεργοποιείται εφόσον, μετά το σήμα που θα λάβει ο μηχανοδηγός, δεν αντιδράσει μέσα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα. Η πληροφορία της πέδησης στον μηχανοδηγό γίνεται γνωστή μέσω ενδείξεων στο θάλαμο. Κωδικοποιημένα σήματα επί του συρμού, που μεταφέρονται είτε μέσω κυκλωμάτων καλωδίων είτε μέσω των σιδηροτροχιών, διοχετεύονται στον θάλαμο της μηχανοδήγησης. Σημαντικό ρόλο σε όλη την παραπάνω διαδικασία έχει η καμπύλη πέδησης, η οποία απεικονίζεται ηλεκτρονικά. Εάν το τρένο υπερβεί το προφίλ της καμπύλης, το σύστημα πέδησης θα ενεργοποιηθεί αυτόματα για να επαναφέρει το τρένο ή να το διατηρήσει εντός των επιτρεπόμενων ορίων της ταχύτητας. Σε αντίθεση περίπτωση, στη χειροκίνητη λειτουργία του τρένου, χωρίς δηλαδή σύστημα αυτόματης προστασίας (ATP), ο οδηγός διαχειρίζεται το τρένο βασιζόμενος στη γνώση της διαδρομής και της πληροφορίας που λαμβάνει οπτικά, δηλαδή μέσω των σημάτων της γραμμής.

3.2.3 Αυτόματη Λειτουργία της Αμαξοστοιχίας (Automatic Train Operation)

Το σύστημα Αυτόματης Λειτουργίας της Αμαξοστοιχίας (Automatic Train Operation – ATO) αποτελεί τη δεύτερη λειτουργία του αυτόματου ελέγχου του τρένου (Automatic Train Control – ATC). Το συγκεκριμένο σύστημα είναι υπεύθυνο για την επιτάχυνση και την τήρηση της επιτρεπόμενης ταχύτητας, την επιβράδυνση του συρμού, όποτε είναι απαραίτητο, και την ακινητοποίησή του σε καθορισμένους σταθμούς στη σωστή θέση. Ανάλογα με το βαθμό αυτοματοποίησης υπάρχει περίπτωση για την εκκίνησή της, να

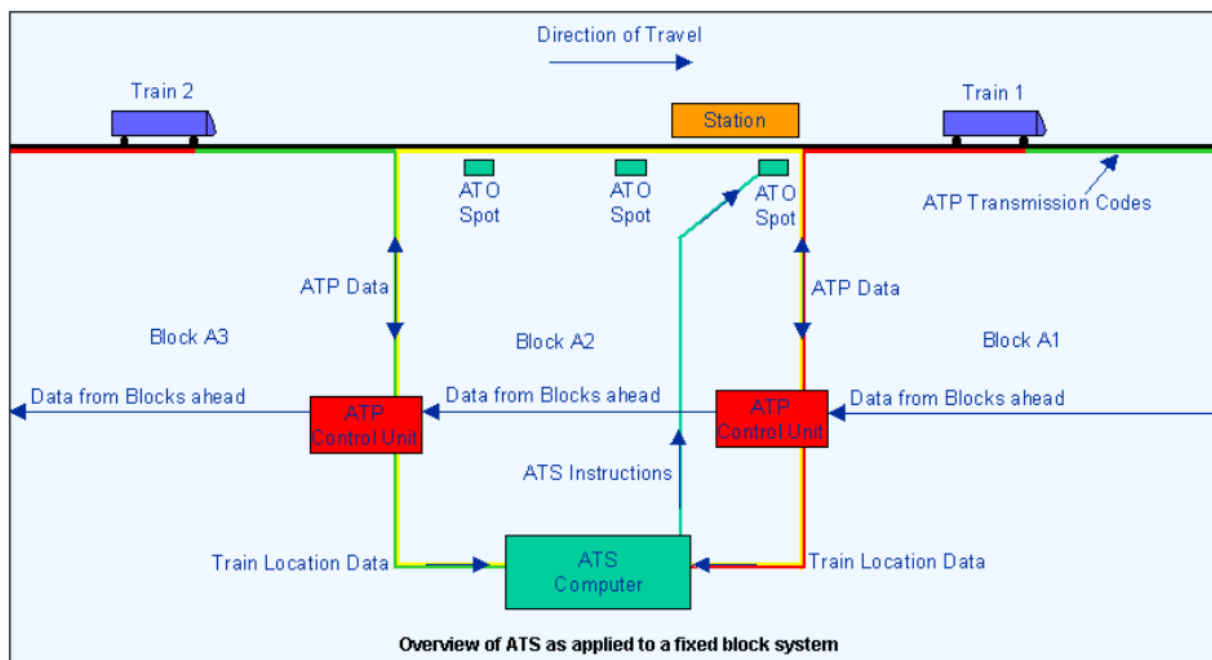
απαιτείται οδηγός. Στην περίπτωση της μη αυτόματης λειτουργίας, ο οδηγός είναι υπεύθυνος για όλα τα παραπάνω.

Η αυτόματη λειτουργία αμαξοστοιχίας (ΑΤΟ) εφαρμόζει μερική ή πλήρη αυτόματη πιλοτική αμαξοστοιχία (επιτάχυνση και πέδηση) και εκτελεί τις λειτουργίες ενός οδηγού. Ένα σύστημα μπορεί να ονομαστεί ΑΤΟ όταν αντιστοιχεί (τουλάχιστον) στο GoA2. Τα πρόσφατα συστήματα μπορεί να εφαρμόσουν πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου και ως εκ τούτου είναι «χωρίς οδηγό» (GoA3), ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις ένα πρόγραμμα οδήγησης είναι πάντα σε χρήση για τον μετριασμό των κινδύνων που ενδέχεται να εμφανιστούν σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή ακούσιας βλάβης.

3.2.4 Αυτόματη εποπτεία συρμών – Automatic Train Supervision (ATS)

Τέλος, το τρίτο συστατικό μέρος ενός αυτόματου συστήματος ελέγχου είναι το σύστημα Αυτόματης Εποπτείας Συρμών που έχει τον κεντρικό έλεγχο των κινήσεων των τρένων. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι υπεύθυνο για την οργάνωση των κινήσεων των τρένων, επειδή έχει μία ολοκληρωμένη εικόνα αυτών μέσω του κέντρου ελέγχου. Η αυτόματη εποπτεία συρμών προϋπήρχε των άλλων δύο συστημάτων που έχουν ήδη αναφερθεί. Στην αρχή η εποπτεία επιτυγχανόταν μέσω τηλεφωνικών μηνυμάτων στους χειριστές της σηματοδότησης, ενώ πλέον εκτελείται αυτόματα από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Χειροκίνητη διαδικασία εκτελείται σήμερα μόνον όταν απαιτείται να διορθωθεί κάποια διατάραξη των δρομολογίων.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι σύνδεσης των επί μέρους τριών συστατικών μερών ενός αυτόματου συστήματος ελέγχου τρένου. Ένας κοινός τρόπος είναι αυτός που απεικονίζεται στην εικόνα 8.



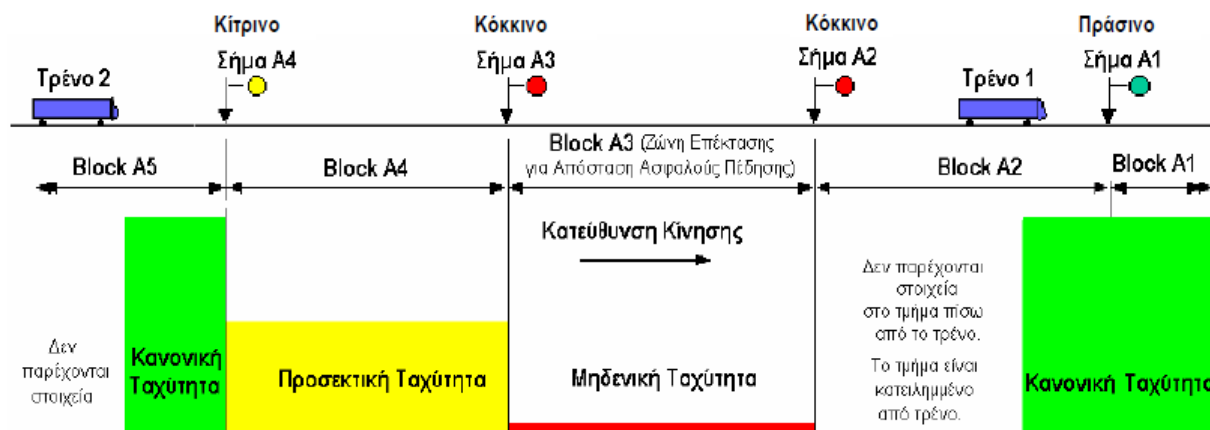
Εικόνα 8 Σχηματική απεικόνιση της βασικής αρχιτεκτονικής ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου αμαξοστοιχιών (ATC) σταθερών τμημάτων αποκλεισμού με τα τρία βασικά στοιχεία: ATP, ATO και ATS

Αναλυτικότερα, στο παραπάνω σχήμα, υπάρχει ο κεντρικός υπολογιστής «Αυτόματη Εποπτεία Συρμών (ATS)», ο οποίος λαμβάνει από τη μονάδα ελέγχου «Αυτόματη Προστασία Συρμού (ATP)» το σημείο που βρίσκεται μία αμαξοστοιχία και το όριο ταχύτητας που επιβάλλεται τη δεδομένη στιγμή. Στη συνέχεια ο κεντρικός υπολογιστής ATS συγκρίνει το χρονοδιάγραμμα των δρομολογίων για να διαπιστωθεί εάν η αμαξοστοιχία συμβαδίζει χρονικά με αυτό. Για να ρυθμιστεί ο χρονικός προγραμματισμός της αμαξοστοιχίας, το σύστημα «Αυτόματη Εποπτεία Συρμών» (ATS), μπορεί να στείλει εντολές στις θέσεις «Αυτόματη Λειτουργία Αμαξοστοιχίας (ATO)» που βρίσκονται κατά μήκος της γραμμής. Έπειτα, το σύστημα «Αυτόματη Λειτουργία Αμαξοστοιχίας (ATO)» είναι υπεύθυνο να μεταδώσει αυτά τα δεδομένα όπως το χρονικό διάστημα που πρέπει να παραμείνει το τρένο στο σταθμό (ο χρόνος παραμονής – the dwell time) και πόσο σύντομα πρέπει να μεταβεί στον επόμενο, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με το σύστημα «Αυτόματη Προστασία Συρμού (ATP)».

Τόσο οι εντολές της αυτόματης προστασίας τρένου (ATP) όσο και της αυτόματης λειτουργίας αμαξοστοιχίας εισάγονται από τους δέκτες στην αμαξοστοιχία και μεταφράζονται σε εντολές οδήγησης, πέδησης ή ακινητοποίησης. Σε περίπτωση που μια αμαξοστοιχία μπορεί να οδηγηθεί χειροκίνητα, η αυτόματη προστασία τρένου (ATP) θα εξακολουθήσει να διασφαλίζει τα επίπεδα ασφαλείας που απαιτούνται, αλλά η

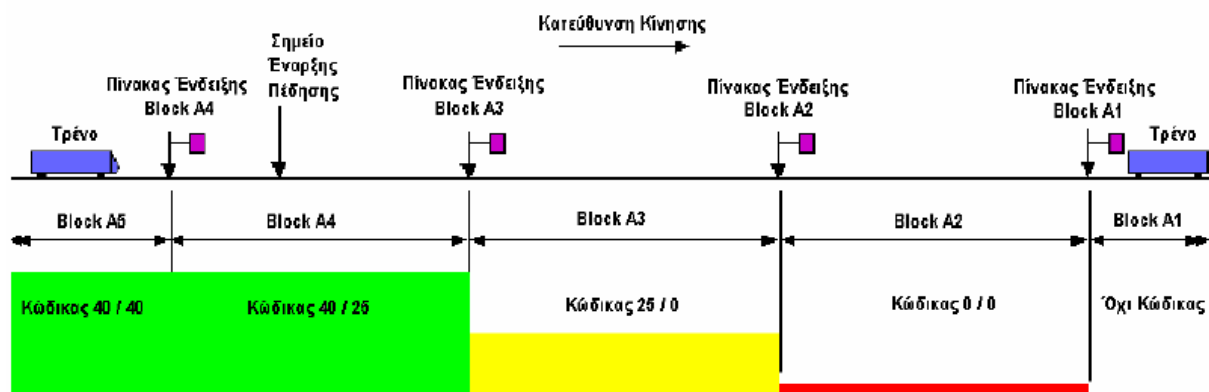
αυτόματη λειτουργία αμαξοστοιχίας (ΑΤΟ) «παραβιάζεται», διότι ο οδηγός σταματάει το τρένο στους σταθμούς χρησιμοποιώντας τα χειριστήρια της καμπίνας.

Παρακάτω ακολουθούν δύο σχήματα που αφορούν το σύστημα αυτόματης προστασίας ελέγχου σε συμβατικά τρένα και σε τρένα υψηλών ταχυτήτων αντίστοιχα.



Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση συστήματος αυτόματης προστασίας σε συμβατικά τρένα

Στην εικόνα 9, κάθε περιοχή επιτρεπόμενης ταχύτητας, ισούται και με ένα τμήμα αποκλεισμού. Το σύστημα αυτόματου ελέγχου (ATC) συνίσταται από μία σειρά περιοχών επιτρεπόμενης ταχύτητας. Αναλυτικότερα, στο πίσω μέρος του τμήματος αποκλεισμού που βρίσκεται το τρένο 1, η επιτρεπόμενη ταχύτητα πλέον είναι μηδενική. Στο τμήμα αποκλεισμού που ακολουθεί το κατειλημμένο, η επιτρεπόμενη ταχύτητα είναι και εκεί μηδενική, διότι αυτό το τμήμα αποτελεί την επικάλυψη (overlap). Εάν το τρένο 2 επιχειρήσει να παραβιάσει αυτό το τμήμα, τότε θα σταματήσει αυτόματα με τη λειτουργία της αυτόματης προστασίας. Θεωρητικά, αυτό θα έχει ήδη αποφευχθεί από το μηχανοδηγό, αλλά, σε αντίθετη περίπτωση, υπάρχει η πρόβλεψη. Τα δύο προηγούμενα τμήματα ενημερώνονται για τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα μέσω του συστήματος.



Εικόνα 10 Σχηματική απεικόνιση συστήματος αυτόματης προστασίας σε τρένα υψηλών ταχυτήτων

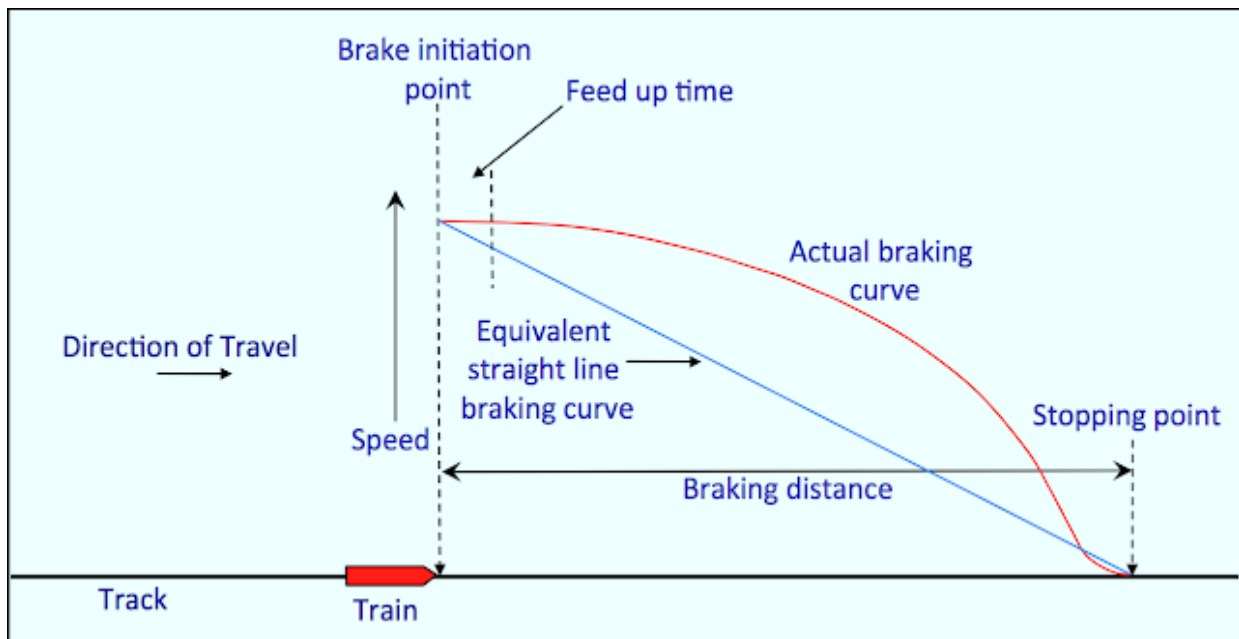
Η εικόνα 10 αναφέρεται σε τρένα υψηλών ταχυτήτων. Ενώ στο σχήμα δεν παρατηρείται καμία διαφορά στα δύο προηγούμενα τμήματα αποκλεισμού από το τρένο 1, στα αμέσως δύο προηγούμενα τμήματα, φαίνεται να υπάρχει σημείο έναρξης πέδησης για είναι σε θέση το τρένο εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας να επιβραδύνει και να μην εισέλθει στο τμήμα της επικάλυψης. Σε αντίθετη περίπτωση, εφαρμόζεται το σύστημα αυτόματης προστασίας.

Η προμήθεια και η εγκατάσταση συστημάτων αυτόματης προστασίας πλέον θεωρείται μία απλοποιημένη διαδικασία. Βασική προϋπόθεση αυτών των συστημάτων είναι η ύπαρξη τρένων με κοινά χαρακτηριστικά, για να είναι ίδιο το απαιτούμενο μήκος πέδησης. Οι γραμμές Μετρό και οι γραμμές στις οποίες κυκλοφορούν συρμοί με ίδια κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά εξασφαλίζουν την παραπάνω προϋπόθεση. Σε αντίθεση, στις γραμμές κυκλοφορίας συμβατικών τρένων (main line) δρομολογούνται τρένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά, κάτι που δυσκολεύει την εγκατάσταση του συστήματος αυτόματης προστασίας.

3.2.5 Πέδηση

Στον τομέα της σιδηροδρομικής μηχανικής, συναντάται η «Καμπύλη Πέδησης», η οποία έχει σχέση με την απόδοση του τρένου, τους χρόνους επανάλληψης της πλατφόρμας ή τη σήμανση. Η καμπύλη πέδησης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του χρόνου που χρειάζεται ένα τρένο για να σταματήσει από μια δεδομένη ταχύτητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό τόσο της συντήρησης όσο και των αποστάσεων πέδησης έκτακτης ανάγκης και μπορεί να δώσει χρόνους φρεναρίσματος, εάν χρειάζεται.

Η καμπύλη πέδησης είναι το σχήμα που σχηματίζεται σε ένα γράφημα ταχύτητας / απόστασης από μια αμαξοστοιχία καθώς επιβραδύνεται από την κανονική ταχύτητα σε μια στάση. Μια τυπική καμπύλη μοιάζει με αυτήν στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 11 Καμπυλη Πέδησης

Η καμπύλη ξεκινά όταν ο οδηγός πιέζει το φρένο. Το σύστημα πέδησης διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα για να φτάσει στον απαιτούμενο ρυθμό πέδησης (ο χρόνος "τροφοδοσίας") και στη συνέχεια η αμαξοστοιχία αρχίζει να επιβραδύνει.

Με συνεχή ζήτηση φρένων, όπως επιλέγεται από τον οδηγό, η αμαξοστοιχία επιβραδύνει πιο γρήγορα καθώς πέφτει η ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει επειδή, με χαμηλότερη ταχύτητα, η αμαξοστοιχία έχει λιγότερη ενέργεια για να απορρίψει. Εάν το φρένο παραμείνει αναμμένο στο ίδιο επίπεδο σε όλη τη στάση, τελικά η καμπύλη θα πάρει πιο απότομη και πιο απότομη έως ότου τελειώσει κατακόρυφα στη στάση. Εάν επιτραπεί αυτό να συμβεί, το τρένο θα σταματήσει με ένα έντονο χτύπημα. Για να αποτρέψει αυτό, ένας έμπειρος οδηγός θα χαλαρώσει από το φρένο καθώς η ταχύτητα πέφτει και αυτό θα του επιτρέψει να σταματήσει απαλά την αμαξοστοιχία. Το αποτέλεσμα αυτού μπορεί να φανεί στην καμπύλη μας καθώς πλησιάζει το σημείο στάσης.

Η εικόνα 11 μας δείχνει επίσης μια καμπύλη "ισοδύναμης ευθείας γραμμής". Αυτός είναι ένας απλός τρόπος για να δείξουμε την απόσταση στάσης που μπορούμε να περιμένουμε από μια αμαξοστοιχία να καλύψει, δεδομένου ισοδύναμου ρυθμού επιβράδυνσης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των αποστάσεων

διακοπής και για υπολογισμούς τροχίας σηματοδότησης, για παράδειγμα, τα προγράμματα υπολογιστών όπου κάνουν απλούς και λεπτομερείς υπολογισμούς απλούς.

3.3 Συστήματα Μετρό και Βαθμοί Αυτοματοποίησης (Grades of Automation - GoA)

3.3.1 Βαθμοί Αυτοματοποίησης και Απαιτούμενος Εξοπλισμός

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Ένωση (International Electro-Technical Commission) και το πρότυπο IEC 62290-1, υπάρχει μία σαφής ταξινόμηση του Βαθμού Αυτοματοποίησης (Grade of Automation -GoA) των σιδηροδρομικών συστημάτων. Οι βαθμοί αυτοματοποίησης (Grade of Automation - GoA) ταξινομούνται σε τέσσερις (4) κατηγορίες που περιγράφονται παρακάτω στην εικόνα 12:

- *Βαθμός Αυτοματοποίησης 1 (GoA1):*

- Λειτουργία με Μηχανοδηγό*

- Ο συρμός διαθέτει μηχανοδηγό που εμπλέκεται σε όλη τη δραστηριότητα της οδήγησης. Ο συρμός είναι εξοπλισμένος μόνο με σύστημα αυτόματης προστασίας συρμών ATP.

- *Βαθμός Αυτοματοποίησης 2 (GoA2):*

- Ημιαυτόματη Λειτουργία - STO (Semi-automatic Train Operation)*

- Υπάρχει επιβλέπων μηχανοδηγός, ο οποίος αναλαμβάνει υπηρεσία μόνο σε περίπτωση βλάβης του συστήματος και είναι επιφορτισμένος με το άνοιγμα και το κλείσιμο των θυρών. Ο συρμός είναι εξοπλισμένος με τα συστήματα ATP και ATO.

- *Βαθμός Αυτοματοποίησης 3 (GoA3):*

- Λειτουργία Χωρίς Μηχανοδηγό – DTO (Driverless Train Operation)*

- Ο συρμός κινείται χωρίς μηχανοδηγό. Υπάρχει στο συρμό συνοδός (υπεύθυνος αμαξοστοιχίας), ο οποίος αναλαμβάνει τον έλεγχο του ανοίγματος – κλεισίματος των θυρών και μπορεί να επέμβει σε περίπτωση βλάβης του συστήματος. Ο συρμός είναι εξοπλισμένος με τα συστήματα ATP και ATO.

- *Βαθμός Αυτοματοποίησης 4 (GoA4):*

- Πλήρως Αυτόματη Λειτουργία – UTO (Unattended Train Operation)*

- Ο συρμός κινείται τελείως αυτόματα και όλες οι παραπάνω δραστηριότητες

γίνονται χωρίς την παρουσία μηχανοδηγού ή συνοδού. Ο συρμός είναι εξοπλισμένος με τα συστήματα ATP και ATO.

Γενικά Αυτόματη Λειτουργία θεωρείται όταν οι συρμοί δε διαθέτουν μηχανοδηγό (GoA4 και GoA3). Οι συρμοί που έχουν βαθμό αυτοματοποίησης τρία (3) χαρακτηρίζονται και ως αυτόνομοι συρμοί, ενώ αυτοί που έχουν τέσσερα (4), ως πλήρως αυτόνομοι συρμοί. Οι δύο αυτοί βαθμοί αυτοματοποίησης πρέπει να συνοδεύονται από την εγκατάσταση κατά μήκος των αποβάθρων, αυτόματων συρόμενων θυρών (PSD-Platform Screen Doors).

Grade of Automation	Type of train operation	Setting train in motion	Stopping train	Door closure	Operation in event of Disruption
GoA 1 	ATP with driver	Driver	Driver	Driver	Driver
GoA 2 	ATP and ATO with driver	Automatic	Automatic	Driver	Driver
GoA 3 	Driverless	Automatic	Automatic	Train attendant	Train attendant
GoA 4 	UTO	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic

ATP - Automatic Train Protection ATO - Automatic Train Operation

Εικόνα 12 Ταξινόμηση των συστημάτων Μετρό ως προς το βαθμό αυτοματοποίησης της λειτουργίας τους

4. CBTC ATP /ATO SUBSYSTEMS

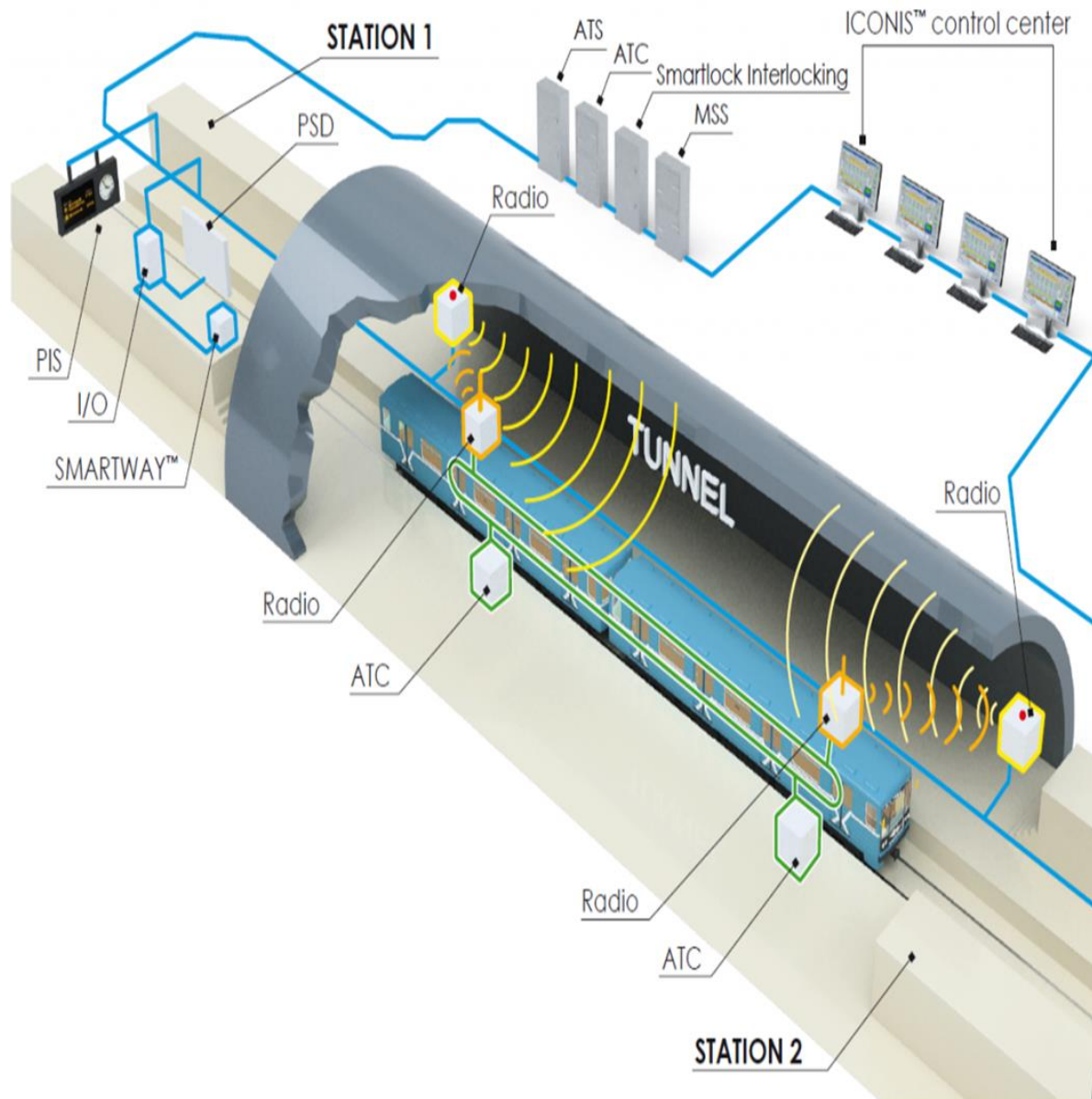
4.1 Εισαγωγή

Ο έλεγχος τρένων με βάση τις επικοινωνίες (CBTC) είναι ένα σύστημα σηματοδότησης σιδηροδρόμων που κάνει χρήση των τηλεπικοινωνιών μεταξύ του εξοπλισμού της αμαξοστοιχίας και της τροχιάς για την διαχείριση της κυκλοφορίας και τον έλεγχο της υποδομής. Μέσω των συστημάτων CBTC, η ακριβής θέση ενός τρένου είναι γνωστή με μεγαλύτερη ακρίβεια παρότι με τα παραδοσιακά συστήματα σηματοδότησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα πιο αποτελεσματικό και ασφαλή τρόπο διαχείρισης της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας.

Ένα σύστημα CBTC είναι ένα σύστημα συνεχούς, Αυτόματου Ελέγχου Αμαξοστοιχίας (ATC) που χρησιμοποιεί προσδιορισμό θέσης αμαξοστοιχίας υψηλής ανάλυσης, ανεξάρτητο από κυκλώματα τροχιάς με συνεχή, υψηλής χωρητικότητας, αμφίδρομη επικοινωνία δεδομένων αμαξοστοιχίας από άκρη προς άκρη · και επεξεργαστές που είναι ικανοί να εφαρμόζουν λειτουργίες αυτόματης προστασίας αμαξοστοιχίας (ATP), καθώς και προαιρετικά την αυτόματη λειτουργία αμαξοστοιχίας (ATO) και την αυτόματη επίβλεψη αμαξοστοιχίας (ATS), "όπως ορίζεται στο πρότυπο IEEE 1474.

Η Αυτοματοποίηση του Ελέγχου της Αμαξοστοιχίας για τα συστήματα Μετρό καθοδηγείται από την ανάπτυξη της Τεχνολογίας Ελέγχου Αμαξοστοιχίας με βάση τις Επικοινωνίες (CBTC) Ορίζεται στο πρότυπο IEEE 1474/ 2/3 (IEEE Std. 2004), ότι ένα σύστημα CBTC είναι ένα συνεχές, Αυτόματο Σύστημα Ελέγχου αμαξοστοιχίας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Τεχνικές προσδιορισμού θέσης τρένου υψηλής ανάλυσης που είναι ανεξάρτητες από τα κυκλώματα γραμμής.
- Συνεχείς, υψηλής χωρητικότητας, αμφίδρομες επικοινωνίες δεδομένων μεταξύ σιδηροδρομικών γραμμών προς παρακολούθηση.
- Ο ενσωματωμένος και ο παρατρόχιος εξοπλισμός όπου εφαρμόζουν λειτουργίες ATP, καθώς και προαιρετικές λειτουργίες ATO και ATS.
- Εκτός από τον υψηλό βαθμό αυτοματισμού (GoA 3 και GoA 4) , τα κύρια συστήματα CBTC έχουν συνήθως τα ακόλουθα δύο χαρακτηριστικά: **μετακίνηση μπλοκ** , το οποίο αναλύεται αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο, και **ραδιοφωνική επικοινωνία**, που αναλύεται στο κεφάλαιο 5.



Εικόνα 13 Διάταξη Τεχνολογίας Ελέγχου Αμαξοστοιχίας με βάση τις Επικοινωνίες (CBTC)

Στα σύγχρονα συστήματα CBTC τα τρένα υπολογίζουν συνεχώς και κοινοποιούν την κατάστασή τους μέσω ραδιοεπικοινωνιών προς τον παρατρόchio εξοπλισμό που κατανέμεται κατά μήκος της γραμμής. Αυτή η κατάσταση περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων παραμέτρους όπως, η ακριβής θέση, ταχύτητα, κατεύθυνση διαδρομής και απόσταση πέδησης. Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν τον υπολογισμό της περιοχής που ενδεχομένως καταλαμβάνεται από την αμαξοστοιχία.. Αυτό επιτρέπει επίσης στον παρατρόchio εξοπλισμό να καθορίσει τα σημεία στην τροχιά που δεν πρέπει ποτέ να περάσουν τα άλλα τρένα.. Αυτά τα σημεία κοινοποιούνται ώστε τα τρένα να προσαρμόζουν αυτόματα και συνεχώς την ταχύτητά τους διατηρώντας παράλληλα τις απαιτήσεις για ασφάλεια και άνεση. Έτσι, τα τρένα λαμβάνουν συνεχώς πληροφορίες

σχετικά με την απόσταση από την προηγούμενη αμαξοστοιχία και στη συνέχεια μπορούν να προσαρμόσουν ανάλογα την απόσταση ασφαλείας τους.

Στην πράξη, τα συστήματα CBTC αναπτύσσονται από διαφορετικές εταιρείες και ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό, όσον αφορά το μέγεθος, την σύνθεση και τη χρήση διαφορετικών τεχνολογιών για την εφαρμογή των διεθνών πρότυπων.

Σήμερα υπάρχουν πολλά παραδείγματα συστημάτων CBTC σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένου Μετρό του Παρισιού (Γραμμές 1, 3, 5 και 13), του Μετρό της Βαρκελώνης (Γραμμή 9 και 11), Μετρό του Πεκίνου (Γραμμές 1, 4, 2, 6, 8, 9, 10, 15, Daxing Line, Fangshan Line και Airport Express) και πολλές γραμμές στο Μετρό της Νέας Υόρκης.

4.2 Εξοπλισμός του Communication Based Train Control- CBTC

Το σύστημα σηματοδότησης CBTC που περιγράφεται στην παρούσα εργασία εκτελεί τα τρία κύρια τμήματα της λειτουργικότητας που αναλύθηκε στην παράγραφο 3.4, ATP, ATO και ATS μέσω μιας αρχιτεκτονικής υποσυστημάτων.

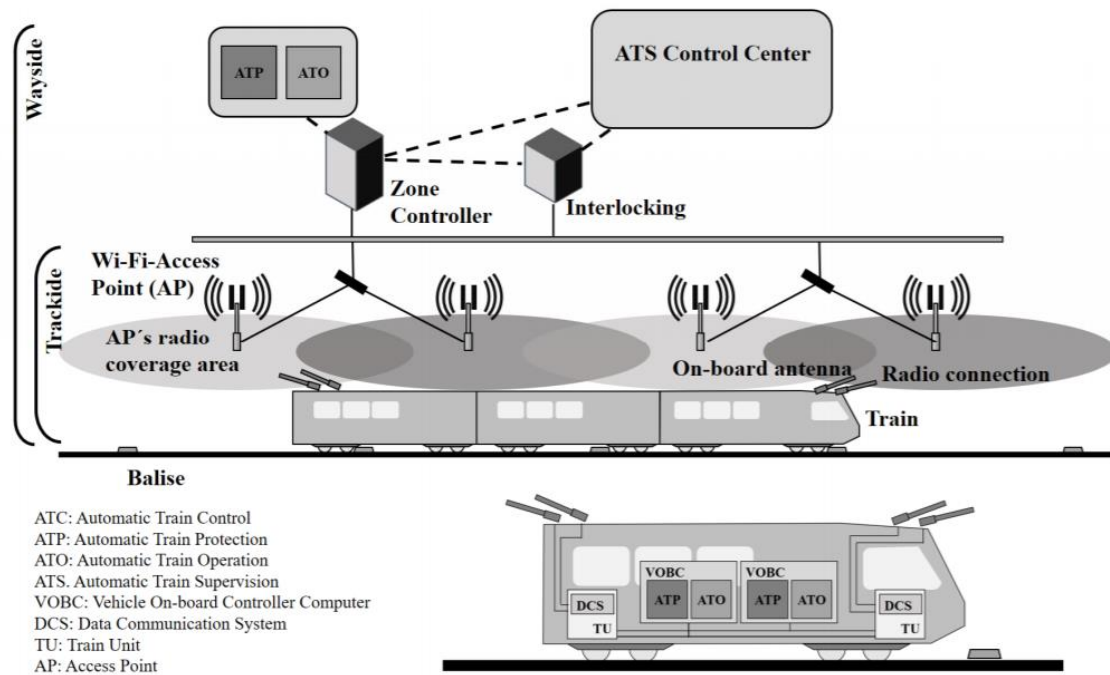
Κάθε υποσύστημα εκτελεί ένα υποσύνολο των λειτουργιών και είναι ιδιαίτερα ενοποιημένο μεταξύ των ιδίων λειτουργιών αλλά και με άλλους εξωτερικούς (όχι αποκλειστικά σχετιζόμενους με τη σηματοδότηση) εξοπλισμούς για τη συνολική λειτουργικότητα της αμαξοστοιχίας.

Ο εξοπλισμός του συστήματος CBTC περιλαμβάνει 3 (τρία) μέρη:

- 1)τον Εποχούμενο Εξοπλισμό,
- 2)τον Παράπλευρο(Δίκτυο Κορμού Γραμμής), καθώς και το
- 3)Αμφίδρομο Δίκτυο Επικοινωνίας τους.

Ενώ το Δίκτυο Επικοινωνίας αποτελείται από τρία ολοκληρωμένα δίκτυα :

- 1)Εποχούμενο δίκτυο
- 2)Δίκτυο κορμού Γραμμής και
- 3) Ασύρματο Δίκτυο μεταξύ Συρμού και Γραμμής.

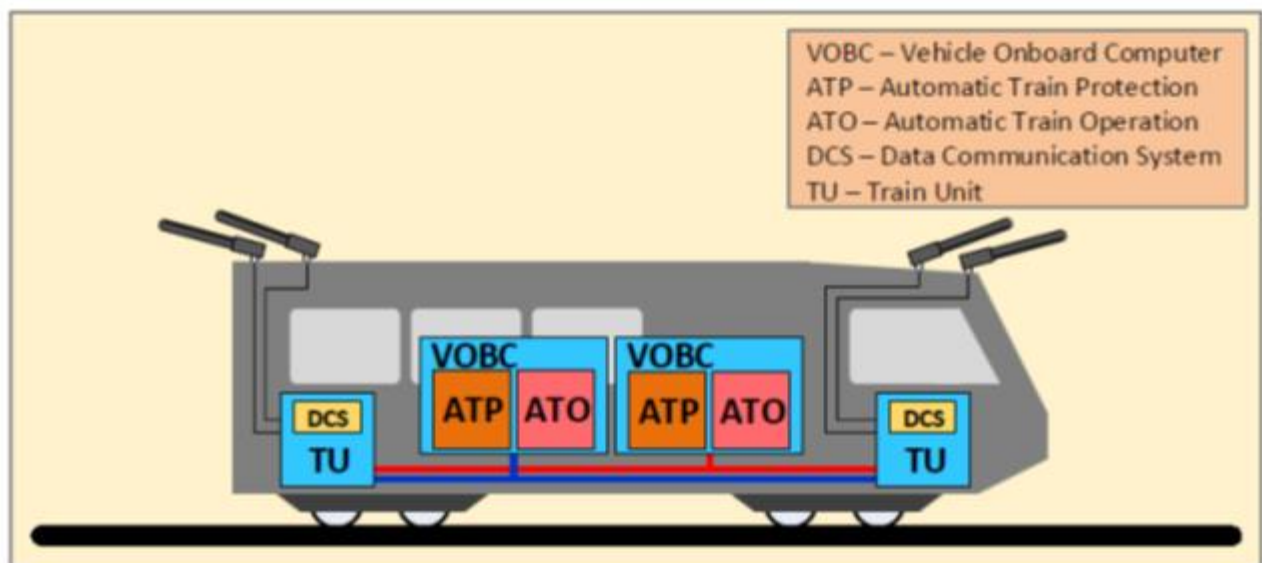


Εικόνα 14 Εξοπλισμός CBTC

Το Εποχούμενο Δίκτυο με το Δίκτυο Κορμού της Γραμμής επικοινωνούν μέσω του πρότυπου δικτύου υπολογιστών ενσύρματης τοπικής δικτύωσης, Ethernet, ενώ το ασύρματο δίκτυο μεταξύ τρένου και γραμμής χρησιμοποιεί το Wi-Fi.

4.2.1 Εποχούμενος Εξοπλισμός

Αναλυτικά ο Εποχούμενος Εξοπλισμός περιλαμβάνει:



Εικόνα 15 Απεικόνιση εποχούμενου εξοπλισμού συστήματος CBTC

➤ **Σύστημα Ελέγχου επί του Συρμού (Vehicle On-Board Controller/Computer /VOBC):** Στη βιβλιογραφία συναντάται και με τον όρο Ελεγκτής Κορμού (Carbone Controller) ή Μονάδα Ελέγχου επί του Συρμού (On board Control Unit/OBCU).

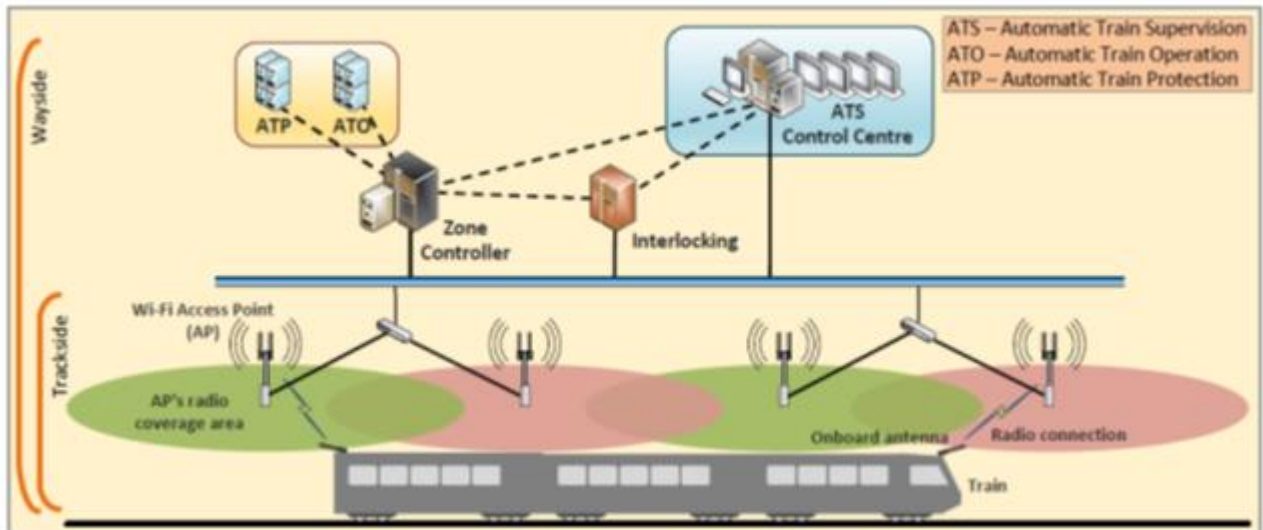
Αυτό το σύστημα είναι υπεύθυνο να αποστέλλει τις πληροφορίες ελέγχου της αμαξοστοιχίας στον παράπλευρο εξοπλισμό (wayside) σε περιοδική βάση. Τα εποχούμενα υποσυστήματα αυτόματης προστασίας (ATP) και αυτόματης λειτουργίας (ATO) συνεργάζονται ή συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα ελέγχου επί του συρμού (VOBC).

➤ **Αυτόματη Προστασία (ATP) και Αυτόματη Λειτουργία τρένου (ATO) επί του Συρμού:** Τα δύο υποσυστήματα ATP και ATO αποτελούν μέρος της λειτουργίας του αυτόματου συστήματος ελέγχου (ATC) επί του συρμού. Το ATP ελέγχει τις λειτουργίες ασφαλείας του συρμού και το ATO τις λειτουργίες που αφορούν την οδήγηση του συρμού. Και τα δύο υποσυστήματα προβλέπονται και στον παρατρόχιο εξοπλισμό. Το υποσύστημα ATP βοηθάει στην αποφυγή συγκρούσεων ενεργοποιώντας την πέδηση, στην περίπτωση που ένας οδηγός δεν αναγνωρίσει άμεσα έναν περιορισμό ταχύτητας ή ένα σήμα. Το υποσύστημα ATO είναι υπεύθυνο για την αυτοματοποίηση της λειτουργίας της αμαξοστοιχίας, συμπεριλαμβάνοντας τις βασικές λειτουργίες του οδηγού, όπως η εκκίνηση και η ακινητοποίηση της αμαξοστοιχίας, η ενεργειακά αποδοτική πέδηση, η επιτάχυνση και η ακρίβεια στην προσέγγιση στη αποβάθρα.

➤ **Σύστημα Ραδιοεπικοινωνίας (Radio Communication System/RCS ή Data Communication System/ DCS):** Το RCS ή DCS είναι συνήθως ένας συνδυασμός λογισμικού και υλικού, συμπεριλαμβανομένων των πομποδοκτών και των κεραιών, και είναι υπεύθυνη για την ραδιοεπικοινωνία μεταξύ του τρένου και του παράπλευρου εξοπλισμού. Το σύστημα RCS είναι υπεύθυνο για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ συρμού και γραμμής και μπορεί να είναι είτε ανεξάρτητο είτε να συμπεριλαμβάνεται στο σύστημα ελέγχου επί του συρμού (VOBC) και να αναφέρεται ως Μονάδα Τρένου (Train Unit/TU).

4.2.2 Παράπλευρος Εξοπλισμός

Ο Παράπλευρος Εξοπλισμός (Δίκτυο Κορμού) περιλαμβάνει:



Εικόνα 16 Παράπλευρος Εξοπλισμός συστήματος CBTC

➤ **Ελεγκτής Ζώνης (Zone Controller/ZC) ή Παράπλευρος Ελεγκτής:** Το παράπλευρο δίκτυο διαιρείται σε πολλαπλές, ανεξάρτητες ζώνες, έτσι ώστε κάθε ζώνη να περιλαμβάνει τη δική της παράπλευρη υποδομή, να βελτιώνει τη διαθεσιμότητα ακόμη και αν μία ή παραπάνω ζώνες αποτύχουν. Έτσι ο ελεγκτής ζώνης είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο και την ασφάλεια μίας συγκεκριμένης ζώνης και τυπικά περιλαμβάνει παράπλευρο υποσύστημα αυτόματης προστασίας (ATP) και αυτόματης λειτουργίας (ATO).

➤ **Υποσύστημα Αυτόματης Προστασίας (ATP) ενός Ελεγκτή Ζώνης:** Διαχειρίζεται την επικοινωνία των τρένων στην εκάστοτε ζώνη που ανήκει. Είναι επίσης το υποσύστημα που υπολογίζει την Αρχή Κίνησης (Movement Authority) για κάθε αμαξοστοιχία στη ζώνη της. Σε ένα σύστημα κινούμενων μπλοκ, όπως αναλύεται στην παράγραφο 4.3., η θέση της αμαξοστοιχίας και η καμπύλη πέδησης υπολογίζονται συνεχώς από τις αμαξοστοιχίες, και στη συνέχεια επικοινωνούν μέσω ραδιοεπικοινωνιών με τον παράπλευρο εξοπλισμό. Έτσι, ο παράπλευρος εξοπλισμός μπορεί να δημιουργήσει προστατευόμενες περιοχές, καθεμία από τις οποίες ονομάζεται Limit of Movement Authority (LMA), μέχρι το πλησιέστερο εμπόδιο. Το Movement Authority (MA) είναι η άδεια για ένα τρένο να μετακινηθεί σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία εντός των περιορισμών της υποδομής και με επίβλεψη της ταχύτητας. Χάρη στο υποσύστημα RCS ή DCS, ο εξοπλισμός CBTC λαμβάνει όλες τις θέσεις των αμαξοστοιχιών από το εξοπλισμό της αμαξοστοιχίας και την κατάσταση της διαδρομής (κυρίως εάν οι διαδρομές έχουν οριστεί ή όχι) από το υποσύστημα αλληλοσύνδεσης IXL. Για κάθε τρένο, ο εξοπλισμός CBTC καθοδηγείται από το όριο της αρχής κίνησης

(Movement Authority Limit). Το MAL είναι το πιο μακρινό σημείο μπροστά από το τρένο όπου μπορεί να επιτραπεί η κίνηση της αμαξοστοιχίας. Ο εξοπλισμός εδάφους CBTC μεταδίδει το MAL σε κάθε αμαξοστοιχία CBTC.

Ακόμη, ένα σύστημα αλληλεξάρτησης βασισμένο στον υπολογιστή (Computer-based Interlocking system/CI) μπορεί να αποτελεί μέρος του υποσυστήματος αυτόματης προστασίας (ATP) ή ένα ανεξάρτητο σύστημα. Το σύστημα αλληλεξάρτησης ελέγχει τον παρατρόχιο εξοπλισμό και είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό των διαδρομών των τρένων.

➤ **Υποσύστημα Αυτόματης Λειτουργίας (ATO):** Παρέχει σε όλα τα τρένα της ζώνης του, τον προορισμό τους και τους χρόνους παραμονής.

➤ **Υποσύστημα Αυτόματης Επιτήρησης της Αμαξοστοιχίας (Automatic train supervision/ATS):** Είναι ανεξάρτητη από τον ελεγκτή τρένων και είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση και το χρονοδιάγραμμα της κυκλοφορίας.

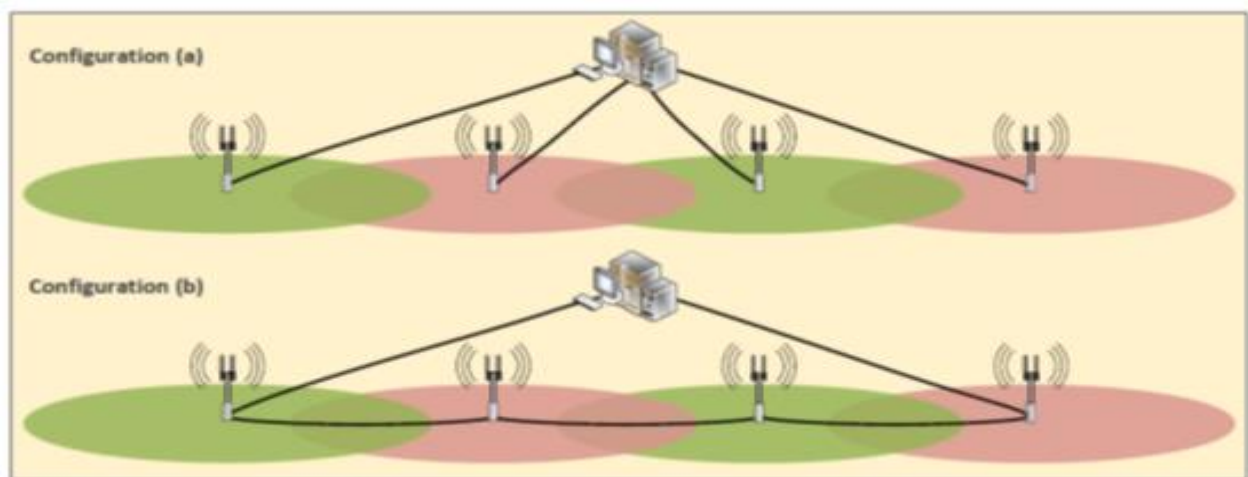
➤ **Σύστημα Αλληλομανδάλωσης (Interlocking /IXL):** Όταν απαιτείται ως ανεξάρτητο υποσύστημα (για παράδειγμα ως σύστημα εφεδρείας), θα είναι υπεύθυνο για τον ζωτικό έλεγχο των αντικειμένων εδάφους, όπως διακόπτες ή σήματα, καθώς και άλλες συναφείς λειτουργίες. Στην περίπτωση απλούστερων δικτύων ή γραμμών, η λειτουργικότητα της αλληλοσύνδεσης μπορεί να ενσωματωθεί στο σύστημα ATP.

Το δίκτυο κορμού (trackside) χωρίζεται σε πολλά κελιά Wi-Fi, που το καθένα εξυπηρετείται από ένα σημείο πρόσβασης (Access Point -AP). Η εικόνα 17 χρησιμοποιεί το πράσινο και το κόκκινο χρώματα για να διαφοροποιήσει τις περιοχές κάλυψης ραδιοεπικοινωνίας των AP. Οι AP είτε αναπτύσσονται στη μία πλευρά του δικτύου ή και στις δύο, με εναλλασσόμενο τρόπο. Τα τρένα επικοινωνούν με τα AP μέσω ραδιοεπικοινωνίας.. Αυτό αποτελεί ένα τυπικό δίκτυο ραδιοσυχνοτήτων CBTC τρένο-προς-παρατρόχιο. Τα AP συνδέονται με τη σειρά τους στα παρακείμενα μέρη του παρατρόχιου δικτύου.

Μια τυπική διαμόρφωση του δικτύου είναι:

- Τοπολογία Αστέρα, όπως φαίνεται στο εικόνα 17 (α), όπου κάθε AP συνδέεται απευθείας με την παρατρόχια υποδομή με χρήση καλωδίων οπτικών ινών,
- Τοπολογία Δακτυλίου, που φαίνεται στο εικόνα 17 (β), είναι μια προηγμένη εναλλακτική λύση. Αυτή η διαμόρφωση ελαχιστοποιεί την απαιτούμενη καλωδίωση, αφού η απόσταση μεταξύ ενός AP και του δικτύου κορμού είναι

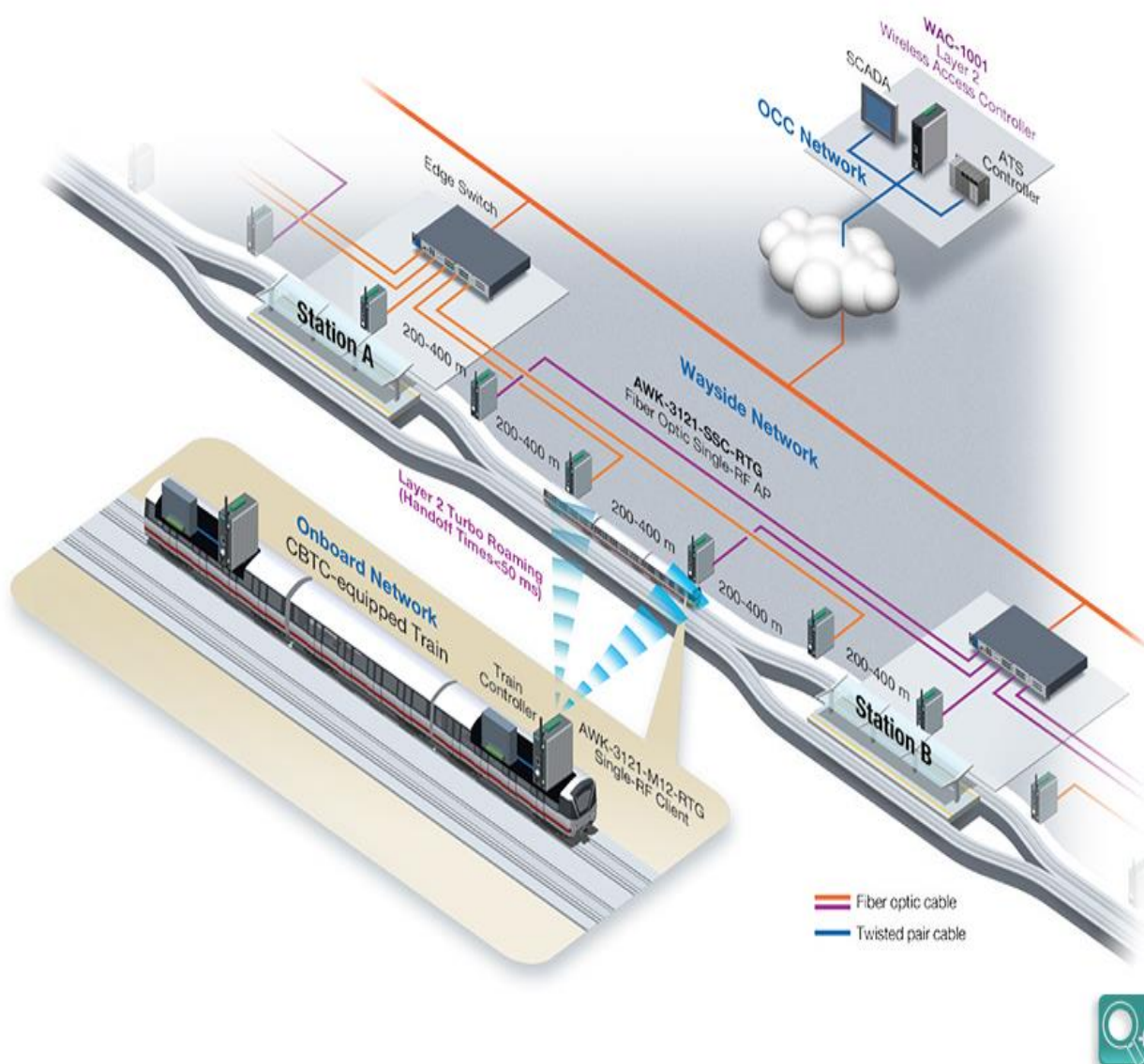
συνήθως πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών AP. Ένας εγγενής περιορισμός ενός δικτύου με βάση το δακτύλιο είναι ότι ένας αποτυχημένος κόμβος μπορεί να διαταράξει ολόκληρο το δίκτυο. Ωστόσο, ένα αριθμός πρωτοκόλλων δακτυλίου Ethernet, όπως το Media Redundancy Protocol (MRP) έχει δημιουργηθεί για να μετριάσει αυτό το πρόβλημα. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλοί δακτύλιοι ώστε να επιτρέψουν υπερβολική χρήση του δικτύου ή να διατηρήσουν τον αριθμό των κόμβων όταν το δίκτυο χρησιμοποιείται στο κατώτατο όριο.



Εικόνα 17 Σύνδεση σημείων πρόσβασης με τον παράπλευρο εξοπλισμό, α)Star-topology , β)Ring-topology

4.2.3 Ασύρματο Δίκτυο μεταξύ Αμαξοστοιχίας και Γραμμής

Τα συστήματα CBTC ενσωματώνουν ένα ψηφιακό δικτυακό ραδιοσύστημα μέσω κεραίας ή καλωδίου για την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του εξοπλισμού γραμμής και των αμαξοστοιχιών. Η ζώνη των 2,4 GHz χρησιμοποιείται συνήθως σε αυτά τα συστήματα (η ίδια με το WiFi), αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες εναλλακτικές συχνότητες όπως 900 MHz (ΗΠΑ), 5,8 GHz ή άλλες αδειοδοτημένες ζώνες.



Εικόνα 18 Ασύρματο Δίκτυο μεταξύ αμαξοστοιχίας και γραμμής

Στο σύστημα ελέγχου βασισμένο στην επικοινωνία/CBTC, για την ανταλλαγή πληροφοριών ελέγχου μεταξύ της αμαξοστοιχίας και της υποδομής χρησιμοποιούνται οι συνεχείς ραδιοεπικοινωνίες υψηλής χωρητικότητας δεδομένων και μια τυπική χρονοαπόσταση στα συστήματα CBTC είναι 90 δευτερόλεπτα ή λιγότερο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επιτρέπεται η χρήση του αυτόματου ελέγχου της αμαξοστοιχίας (ATC), δηλαδή η αυτόματη προστασία αμαξοστοιχίας (ATP) και η αυτόματη λειτουργία της αμαξοστοιχίας (ATO). Η αμαξοστοιχία αποστέλλει συνεχώς, μέσω της ραδιοεπικοινωνίας, το στίγμα της θέσης της, την κατεύθυνση της πορείας της, καθώς και την τρέχουσα ταχύτητά της. Βάσει των πληροφοριών που λαμβάνονται από όλα τα τρένα της γραμμής τη δεδομένη στιγμή καθώς και την ικανότητα πέδησης αυτών, το κέντρο ελέγχου της κυκλοφορίας υπολογίζει τη μέγιστη ταχύτητα και την απόσταση που

επιτρέπεται να διανύσει το κάθε τρένο (Movement Authority) και τα αποστέλλει στο συρμό. Βάσει αυτής της πληροφορίας, το σύστημα αυτόματου ελέγχου της αμαξοστοιχίας (ATC) ρυθμίζει συνεχώς την ταχύτητα και διατηρεί ασφαλή απόσταση από οποιαδήποτε προπορευόμενη αμαξοστοιχία.

Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της ανταλλαγής πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο είναι ότι δεν απαιτείται η εγκατάσταση συμβατικού εξοπλισμού σηματοδότησης όπως είναι τα φωτοσήματα και τα κυκλώματα γραμμής. Η ταχύτητα και η θέση της αμαξοστοιχίας καθορίζονται από έναν συνδυασμό συσκευών όπως ταχύμετρα, ραδιοφάροι (balises), ραντάρ Doppler, οδομετρητές και γεωγραφικό σύστημα όπως το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning by Satellite/GPS). Η ακρίβεια της μετάδοσης της θέσης είναι εξαιρετικά σημαντική. Οι αναμεταδότες ή ραδιοφάροι, όταν μία αμαξοστοιχία περνάει από πάνω τους, μεταδίδουν τις πληροφορίες της θέσης της στο συρμό, χρησιμοποιώντας μία κεραία, τοποθετημένη κάτω από το συρμό. Μεταξύ των ραδιοφάρων, η θέση του συρμού υπολογίζεται συνεχώς χρησιμοποιώντας οδόμετρα. Οποιαδήποτε ανακρίβεια στον υπολογισμό της θέσης, διορθώνεται μόλις περάσει από τον επόμενο ραδιοφάρο. Στα επόμενα χρόνια αναμένεται να επιτευχθεί ακρίβεια θέσης σε 5 cm.

Για τον ακριβή εντοπισμό της θέσης του συρμού με τη χρήση του γεωγραφικού συστήματος όπως το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning by Satellite/GPS) υπάρχει στην παρούσα φάση ένας σημαντικός αριθμός προβλημάτων. Ένα από τα σημαντικότερα κωλύματα της χρήσης του είναι ότι τα δορυφορικά σήματα δεν μπορούν να ληφθούν αξιόπιστα μέσα σε σήραγγες.

Ένα σύστημα CBTC είναι σε θέση να εκτελέσει προηγμένες λειτουργίες ATP καθώς και λειτουργίες ATO, επιτυγχάνοντας τον υψηλής ανάλυσης καθορισμό θέσης τρένων και, ως εκ τούτου, τον ασφαλή διαχωρισμό των συρμών.

4.2.3.1 Αναγνώστης Ετικετών Εντοπισμού Ασφαλείας-Tag Readers

Ο Αναγνώστης Ετικετών Εντοπισμού Ασφαλείας είναι εξωτερικός του Ελεγκτή Κορμού (Carbone Controller) και χρησιμοποιείται για να καθορίσει με ακρίβεια πού βρίσκεται η αμαξοστοιχία. Μαζί με τους αισθητήρες ταχύτητας και τα επιταχυνσιόμετρα, το τρένο μπορεί να υπολογίσει το πού βρίσκεται σε σχέση με σταθμούς και άλλα οχήματα. Οι ετικέτες τοποθετούνται σε σταθερές θέσεις κατά μήκος της διαδρομής και ο αναγνώστης ετικετών Carborne χρησιμοποιεί ραδιοσυχνότητες (RF) για να αποκτήσει πληροφορίες από την ετικέτα, καθώς το όχημα περνά πάνω από αυτή. Οι πληροφορίες

περιέχουν ένα αναγνωριστικό το οποίο χρησιμοποιεί το όχημα για να γνωρίζει τις ακριβείς αποστάσεις και την κατεύθυνση πορείας.

Ο αναγνώστης ετικετών εντοπισμού ασφάλειας είναι ταυτόχρονα ένας πομποδέκτης και ένα σύστημα ασφάλειας εντοπισμού ετικετών, ειδικά σχεδιασμένο για σιδηροδρομικές εφαρμογές. Αυτός ο αναγνώστης ετικετών εντοπισμού ασφάλειας έχει μια ενσωματωμένη κεραία, που συνήθως χρησιμοποιείται επί της αμαξοστοιχίας, τοποθετημένη εξωτερικά κάτω από το φορείο, προκειμένου να εντοπίσει μια ετικέτα ραδιοσυχνότητας και να διαβάσει τα δεδομένα αυτής της ετικέτας ραδιοσυχνότητας «εν κινήση». Αυτές οι ετικέτες τοποθετούνται κατά μήκος των διαδρομών, μεταξύ των σιδηροτροχιών.

Ο εντοπισμός γίνεται με δύο συμπληρωματικά ψηφιακά σήματα. Χρησιμοποιείται ένας σειριακός σύνδεσμος RS422 για να διαβιβαστούν τα δεδομένα. Αυτές οι λειτουργίες εξασφαλίζουν την αναγνώριση της τοποθεσίας σε πραγματικό χρόνο.

Το σύστημα χρησιμοποιεί δύο συχνότητες εργασίας 125KHz στον πομπό και 6,78MHz στον δέκτη.

4.2.3.2 Ετικέτες Εντοπισμού Ασφάλειας -Tag Subsystems

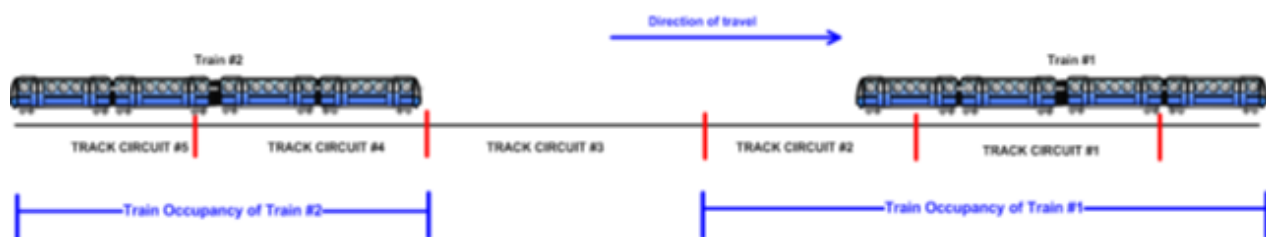
Μια ετικέτα είναι ένας δείκτης της θέσης της αμαξοστοιχίας που περιέχει το αναγνωριστικό της ID. Όλες οι θέσεις των ετικετών κατά μήκος της διαδρομής αποθηκεύονται στην βάση δεδομένων. Μια αμαξοστοιχία που διαβάζει το αναγνωριστικό της ετικέτας μπορεί να καθορίσει τη θέση της σύμφωνα με την ετικέτα θέσης από τη βάση δεδομένων. Οι ετικέτες θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της θέσης της αμαξοστοιχίας όσον αφορά την πλατφόρμα.

Οι Ετικέτες Εντοπισμού Ασφάλειας μπορούν να διαβαστούν μόνο από τον Αναγνώστη Ετικετών Εντοπισμού Ασφάλειας. Ο αναγνώστης ετικετών μπορεί να εντοπίσει την ετικέτα με ακρίβεια μέχρι +/- 5cm.

4.3 Χαρακτηριστικά CBTC – Αρχές Moving Block

Στα παλαιότερα συστήματα που σχεδιάζονται μέσω της διαχείρισης των αμαξοστοιχιών με σταθερό μπλοκ, ο διαχωρισμός των αμαξοστοιχιών εξασφαλίζεται συνήθως από το σύστημα οδικής διέλευσης, εντοπίζοντας την ύπαρξη αμαξοστοιχιών με ορισμένες συσκευές ανίχνευσης της γραμμής. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας για παράδειγμα κυκλώματα γραμμής, μετρητές αξόνων ή παρόμοιες τεχνολογίες που βρίσκονται στην τροχιά. Σε αυτά τα συστήματα παλαιού τύπου, αυτή η διαδικασία προσδιορισμού θέσης

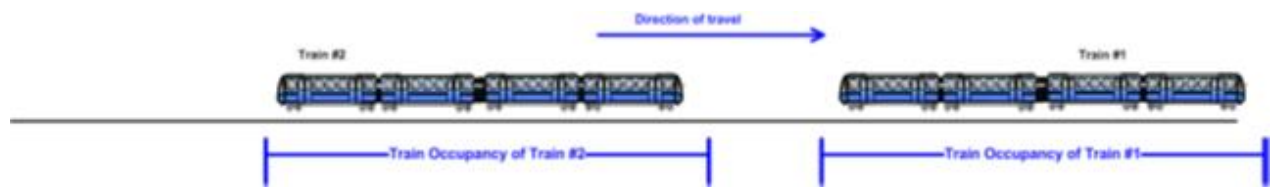
αμαξοστοιχίας περιλαμβάνει τυπικά την εγκατάσταση σημαντικού εξοπλισμού για τον προσδιορισμό της θέσης της αμαξοστοιχίας. Τέτοια συστήματα δεν είναι σε θέση να βελτιστοποιήσουν πλήρως την παραγωγική ικανότητα λόγω του κυκλώματος γραμμής σταθερού μήκους που χρησιμοποιούνται για τον ασφαλή διαχωρισμό των αμαξοστοιχιών. Επίσης, λόγω του υψηλού αριθμού εξοπλισμού που απαιτείται για την υλοποίηση τέτοιων ρυθμίσεων, τα σταθερά συστήματα μπλοκ είναι πιο επιρρεπή σε βλάβες.



Εικόνα 19 Προσδιορισμός θέσης τρένου σε Σταθερό Μπλόκ

Η Εικόνα 19 δείχνει ένα τυπικό σύστημα Σταθερού Μπλοκ (Fixed Block) που απεικονίζει ότι η θέση της αμαξοστοιχίας προσδιορίζεται από κυκλώματα γραμμής. Όπως απεικονίζει η εικόνα 19, η αμαξοστοιχία στα δεξιά δείχνει να καταλαμβάνει τρία κυκλώματα γραμμής, αν και το πραγματικό μήκος της αμαξοστοιχίας είναι πολύ μικρότερο. Ως αποτέλεσμα, σχεδόν όλο το 2ο κύκλωμα τροχιάς (Track Circuit #2) στην εικόνα 10 είναι άδειο. Σύμφωνα με τους συμβατικούς κανόνες σταθερού μπλοκ, μπορεί να υπάρχει τουλάχιστον ένα ελεύθερο κύκλωμα γραμμής μεταξύ δύο θέσεων για να συμμορφώνεται με τη λειτουργία επικαλύψεως. Επομένως, το κύκλωμα τροχιάς # 3 πρέπει να παραμείνει κενό και το πλησιέστερο επόμενο τρένο μπορεί να εισέλθει στο κύκλωμα τροχιάς # 4. Ως αποτέλεσμα, η ανάλυση της θέσης της αμαξοστοιχίας είναι πολύ χαμηλή και το σύστημα αντιλαμβάνεται στο περίπου για το πού είναι η αμαξοστοιχία, και όχι την ακριβή τοποθεσία του. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτά τα κυκλώματα γραμμής καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις και μια αμαξοστοιχία μέσα σε αυτό το κύκλωμα γραμμής θα είναι ορατή μόνο όταν καταλαμβάνει ολόκληρο το κύκλωμα γραμμής.

Από την άλλη πλευρά, η εικόνα 20 αντιπροσωπεύει την θέση της αμαξοστοιχίας στα Κινούμενα Συστήματα Μπλοκ, τα οποία επιτρέπουν μικρότερες αποστάσεις και πιο αποδοτικές λειτουργίες.



Εικόνα 20 Προσδιορισμός θέσης τρένου σε Κινητού Μπλόκ

Όπως δείχνει η εικόνα 20 (αν υποθέσουμε το ίδιο μήκος διαδρομής), η κατάληψη της αμαξοστοιχίας σε ένα κινούμενο σύστημα μπλοκ είναι κυρίως συνάρτηση του πραγματικού μήκους της αμαξοστοιχίας και της ελάχιστης ασφαλούς θέσης της. Στην περίπτωση αυτή, τα δύο τρένα (το ένα πίσω από το άλλο) είναι σε θέση να λειτουργούν σε πολύ πιο κοντινή απόσταση. Επιπλέον, υπάρχει λιγότερος εξοπλισμός στο σύστημα, καθώς η αμαξοστοιχία καθορίζει τη θέση της και μεταδίδει αυτήν την τοποθεσία στον παρατρόχιο εξοπλισμό.

Το Moving Block System συμβάλλει στην αποφυγή συγκρούσεων και εκτροχιασμών παρέχοντας έναν μηχανισμό για να:

1. διασφαλίζεται ο διαχωρισμός των αμαξοστοιχιών
2. διασφαλίζεται ο έλεγχος και το κλείδωμα διαδρομών για τα τρένα

Ο έλεγχος και το κλείδωμα διαδρομών για αμαξοστοιχίες περιλαμβάνει τον έλεγχο και το κλείδωμα οποιασδήποτε κινητής υποδομής, όπως αλλαγές στη θέση που απαιτείται για την αμαξοστοιχία ώστε να ακολουθήσει τη διαδρομή.

Ένας από τους στόχους του Moving Block System είναι να μειώσει τις αποστάσεις μεταξύ των αμαξοστοιχιών, αυξάνοντας έτσι την ικανότητα των σιδηροδρόμων, επιβάλλοντας παράλληλα την ασφαλή κίνηση τους.

Ένας άλλος σημαντικός στόχος του Moving Block System είναι να μειωθεί ή ακόμη και να εξαλειφθεί η εξάρτηση της ανίχνευσης της αμαξοστοιχίας από τον παρατρόχιο εξοπλισμό, βάσει των αναφορών θέσης αμαξοστοιχίας που λαμβάνονται από τις ίδιες (συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών σχετικά με το σφάλμα θέσης). Αυτή η μείωση ή εξάλειψη είναι σημαντική για την αξιοπιστία και το κόστος, καθιστώντας έτσι το Moving Block System κατάλληλο για σιδηροδρομικές γραμμές όπου η χωρητικότητα δεν αποτελεί πρόβλημα.

4.3.1 Οφέλη Moving Blocks

Με τη μετάβαση σε ένα κινούμενο σύστημα μπλοκ, ο χειριστής της λειτουργίας των τρένων κερδίζει τα εξής:

- Δυνατότητα κίνησης των αμαξοστοιχιών πολύ πιο κοντά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα μικρότερες χρονοαποστάσεις.
- Προσαρμοσμένη απόσταση μεταξύ των αμαξοστοιχιών σύμφωνα με την τρέχουσα ταχύτητα της αμαξοστοιχίας, κάνοντας αποτελεσματική χρήση της υποδομής.
- Μειωμένος παράπλευρος εξοπλισμός, με αποτέλεσμα μειωμένο κόστος συντήρησης και κύκλου ζωής.
- Μειωμένος παράπλευρος εξοπλισμός, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αξιοπιστίας.
- Πολύ μειωμένο κόστος.

4.3.2 Πιθανές υλοποιήσεις της διαχείρισης αμαξοστοιχιών Moving Block

Οι τρέχουσες υλοποιήσεις του Moving Block αντιστοιχούν σε αυτό που θα μπορούσε να ονομαστεί «Virtual Block Management» των τρένων.

Αυτό σημαίνει ότι σε αντίθεση με τα συστήματα ελέγχου αμαξοστοιχίας Fixed Block για τα οποία η ασφάλεια της αμαξοστοιχίας βασίζεται σε φυσικές συσκευές όπως κυκλώματα γραμμής, η διαχείριση του εικονικού μπλοκ βασίζεται σε εικονικά αντικείμενα (αυτά που σχετίζονται με το λειτουργικό σύστημα (software) και τη βάση δεδομένων (database)) για τη διαχείριση της πληρότητας της γραμμής και του διαχωρισμού των αμαξοστοιχιών.

Η πληρότητα τέτοιων εικονικών αντικειμένων ορίζεται μέσω της αναφοράς των αμαξοστοιχιών και ανάλογα με τη θέση του εμπρός και του πίσω μέρους της αμαξοστοιχίας. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις όσον αφορά το σχεδιασμό και τις έννοιες για την παροχή ενός συστήματος ελέγχου αμαξοστοιχίας Moving Block χωρίς ανίχνευση αμαξοστοιχίας σύμφωνα με την «διαχείριση εικονικού μπλοκ» των αμαξοστοιχιών: η μία ονομάζεται γενικά προσέγγιση «*εικονικού μπλοκ*», και η άλλη «*πλήρης κίνηση μπλοκ*».

Ο σχεδιασμός και οι έννοιες αυτών των δύο προσεγγίσεων είναι ότι για την κοινώς αποκαλούμενη προσέγγιση «εικονικού μπλοκ» τα όρια κάθε εικονικού μπλοκ είναι σταθερά και προκαθορισμένα (σε βάσεις δεδομένων διαμόρφωσης συστήματος), ενώ για την κοινώς αποκαλούμενη προσέγγιση «πλήρους κινούμενου μπλοκ» δεν υπάρχει

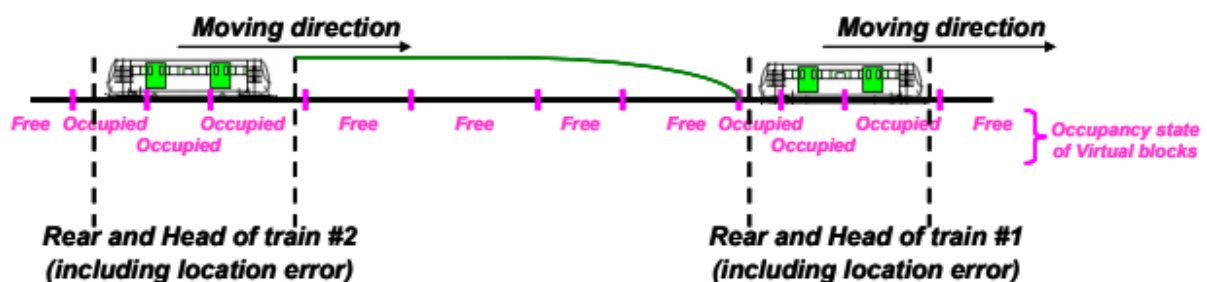
προκαθορισμένο όριο καθώς, το μέγεθος κάθε εικονικού μπλοκ προσαρμόζεται συνεχώς σύμφωνα με τις αναφορές εντοπισμού τρένων.

Και οι δύο προσεγγίσεις που βασίζονται σε εικονικά αντικείμενα παρέχουν απόδοση και ευελιξία προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο ασφαλής διαχωρισμός των αμαξοστοιχιών, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περίπτωση που απαιτείται η διαχείριση γραμμών που λειτουργούν με μικρές χρονοαποστάσεις (για παράδειγμα κάτω από 120 δευτερόλεπτα).

Επίσης, και οι δύο προσεγγίσεις δεν απαιτούν την ανάπτυξη συσκευών ανίχνευσης αμαξοστοιχιών, όπως κυκλώματα γραμμής.

4.3.3 Έννοιες Moving Block και Αρχές που βασίζονται στην προσέγγιση του Εικονικού Μπλοκ

Η ιδιαιτερότητα αυτής της προσέγγισης Moving Block είναι ότι τα εικονικά μπλοκ έχουν προκαθορισμένα και σταθερά όρια. Κάθε τρένο αναφοράς σχετίζεται με ένα ή περισσότερα εικονικά μπλοκ, ανάλογα με την αναφερόμενη τοποθεσία του τρένου.

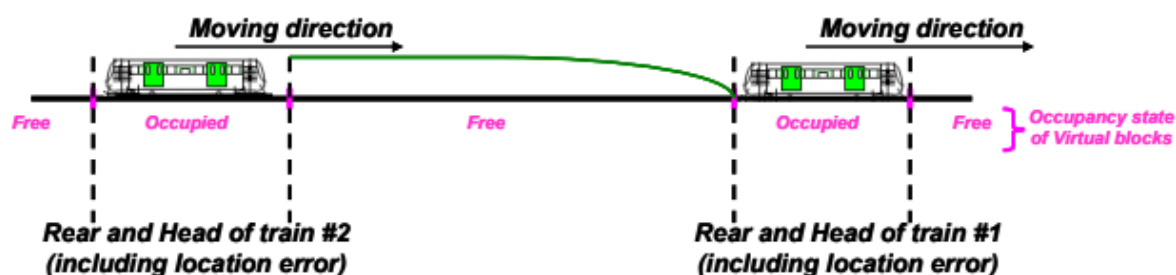


Εικόνα 21 Προσέγγιση εικονικού μπλοκ (virtual block system)

Με τέτοια συστήματα Moving Block, η αρχή κίνησης (Movement Authority) καθορίζεται από το 1ο όριο ενός κατεχόμενου εικονικού μπλοκ: εφόσον αυτό το εικονικό μπλοκ καταλαμβάνεται σύμφωνα με την αναφορά του τρένου, το όριο της αρχής κίνησης παραμένει αμετάβλητο. Αυτή η πτυχή είναι παρόμοια με την συμβατική διαχείριση Fixed Block, αλλά το όφελος αυτής της προσέγγισης είναι η δυνατότητα προσαρμογής του μεγέθους αυτών των εικονικών μπλοκ σύμφωνα με τις ανάγκες λειτουργίας του συστήματος (μείωση της χρονοαπόστασης). Μια τέτοια βελτίωση για την προσαρμογή του μεγέθους των μπλοκ είναι εύκολο να επιτευχθεί μέσω της αναβάθμισης στις αντίστοιχες βάσεις δεδομένων.

4.3.4 Έννοιες και Αρχές Moving Block βασισμένες σε Πλήρη Κίνηση

Η ιδιαιτερότητα αυτής της προσέγγισης Moving Block είναι ότι τα εικονικά μπλοκ δεν έχουν προκαθορισμένα και σταθερά μεγέθη. Κάθε τρένο αναφοράς σχετίζεται με ένα, και μόνο ένα, εικονικό μπλοκ. Το μέγεθος κάθε εικονικού μπλοκ προσαρμόζεται σύμφωνα με τη θέση του αναφερόμενου τρένου το σφάλμα εντοπισμού και την ταχύτητα του.

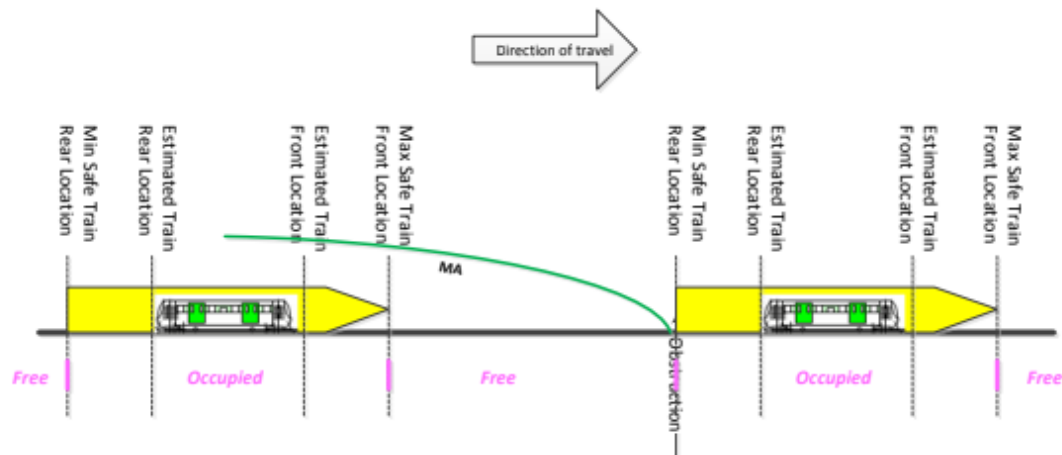


Εικόνα 22 Moving Block βασισμένο σε πλήρη κίνηση (full moving block system)

Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζει πλήρως τη διαχείριση των αμαξοστοιχιών Moving Block. Ο ασφαλής διαχωρισμός αμαξοστοιχίας υλοποιείται με αρχές κίνησης που υπολογίζονται σε σχέση με το πίσω μέρος της προηγούμενης αμαξοστοιχίας. Αυτό σημαίνει ότι η απόδοση από την άποψη της εφικτής ελάχιστης χρονοαπόστασης είναι λίγο καλύτερη από τη προηγούμενη (σε σύγκριση με την προηγούμενη προσέγγιση αντιστοιχεί στο να έχει θεωρητικά έναν άπειρο αριθμό εικονικών μπλοκ).

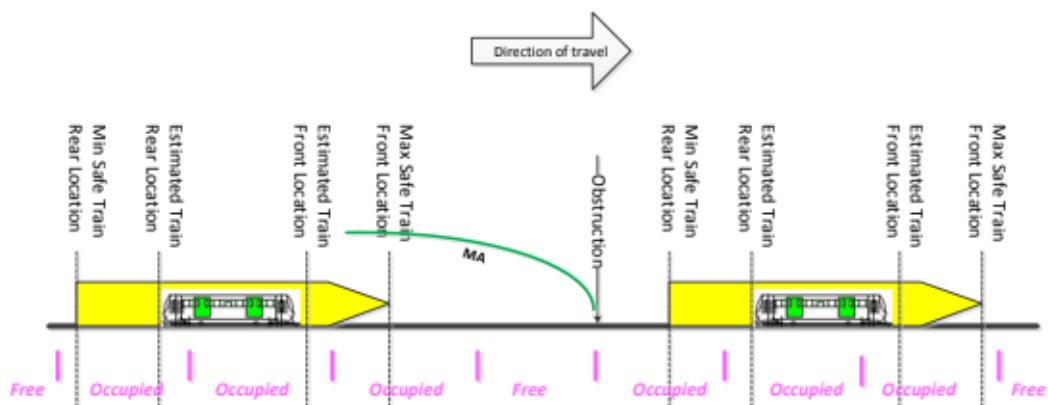
Επί του παρόντος, οι διάφοροι πάροχοι CBTC ακολουθούν μία από αυτές τις δύο προσεγγίσεις για να σχεδιάσουν τον εξοπλισμό τους σχετικά με την ασφάλεια. Οι περισσότερες εξοπλισμένες γραμμές είναι επί του παρόντος αστικές, αλλά υπάρχει μια αναδυόμενη τάση για την ανάπτυξη συστημάτων Moving Block σε προαστιακές γραμμές και σε εμπορευματικές γραμμές, υποστηριζόμενη από την ανάγκη μείωσης του συμβατικού παρατρόχιου εξοπλισμού.

Η απόδοση από την άποψη των ελάχιστων χρονοαποστάσεων είναι παρόμοια ακόμη και αν τα πλήρη κινούμενα συστήματα μπλοκ (moving block) επιτρέπουν την απόκτηση μικρότερης χρονοαπόστασης από τα εικονικά μπλοκ (virtual block). Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι απλώς ασφαλές να ληφθεί υπόψη για τον προσδιορισμό του ορίου της κίνησης, η αναφορά του πίσω μέρους της προηγούμενης αμαξοστοιχίας, αλλά στην πραγματικότητα πρέπει να ληφθεί υπόψη ένα επιπλέον περιθώριο ασφαλείας, που συχνά ονομάζεται **περιθώριο επαναφοράς** (σχετίζεται με τον έλεγχο ανατροπής αμαξοστοιχίας).



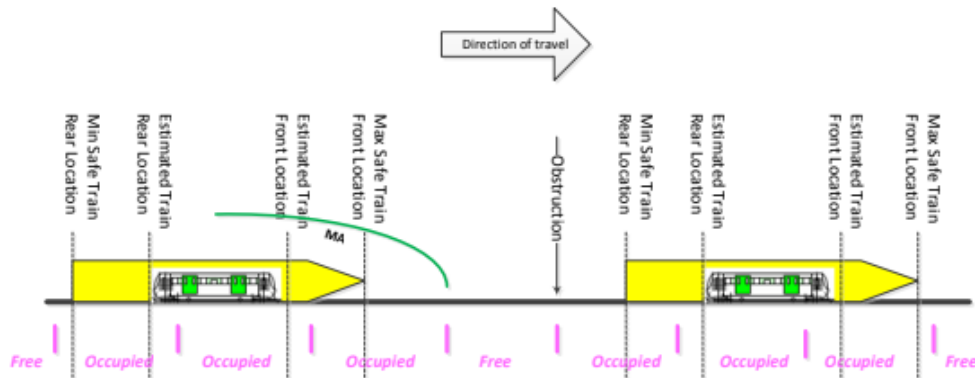
Εικόνα 23 Περιθώριο ασφαλείας σε σύστημα Full Moving Block

Στην προσέγγιση εικονικού μπλοκ (virtual block), η Αρχή Κίνησης θα μπορούσε να επεκταθεί στο όριο του τελευταίου εικονικού μπλοκ που καταλαμβάνεται από το τρένο μπροστά.



Εικόνα 24 Περιθώριο ασφαλείας σε εικονικό σύστημα μπλοκ Virtual Block System

Ωστόσο, πρακτικά προστίθεται ένα επιπλέον περιθώριο ασφαλείας, συμπεριλαμβάνοντας ένα επιπλέον μη κατειλημμένο εικονικό μπλοκ.



Εικόνα 25 Έξτρα περιθώριο ασφαλείας σε εικονικό σύστημα μπλοκ

4.3.5 Αρχές του Moving Block

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μερικές αρχές του Moving Block System:

1) Όλα τα εγγεγραμμένα τρένα και το παρατρόχιο σύστημα πρέπει να χρησιμοποιούν ένα κοινό σύστημα γεωγραφικής αναφοράς του σιδηροδρόμου.

Αυτό απαιτείται έτσι ώστε το τρένο να μπορεί να ερμηνεύει σωστά τις Αρχές κίνησης από το Σύστημα Παρακολούθησης της τροχιάς και το Σύστημα Παρακολούθησης της τροχιάς να μπορεί να ερμηνεύει σωστά τις αναφορές για την θέση της αμαξοστοιχίας.

2) Ο παρατρόχιος εξοπλισμός (Trackside) θα γνωρίζει τα χαρακτηριστικά των αμαξοστοιχιών, όπως το μήκος αμαξοστοιχίας, απόδοση φρένων, μέγιστη ταχύτητα αμαξοστοιχίας.

Ο παρατρόχιος εξοπλισμός (Trackside) είναι σημαντικό να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά όπως: μήκος αμαξοστοιχίας, απόδοση φρένων και μέγιστη ταχύτητα αμαξοστοιχίας, όλων των εγγεγραμμένων τρένων στο σύστημα σηματοδότησης Moving Block. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί από τα τρένα που αναφέρουν τα ανωτέρω χαρακτηριστικά τους στο παρατρόχιο εξοπλισμό (Trackside System) ή με κάποιο άλλο μέσο.

3) Τα τρένα θα αναφέρουν την τοποθεσία, την κατεύθυνση και την ταχύτητα τους στον παρατρόχιο εξοπλισμό (Trackside System).

Τα τρένα μπορούν να καθορίσουν τη θέση τους και την κατεύθυνση του ταξιδιού τους στο κοινό Σύστημα Γεωγραφικής Αναφοράς. Τα τρένα αναφέρουν την τοποθεσία, την ταχύτητα και την κατεύθυνση στον παρατρόχιο εξοπλισμό (Trackside). Αυτή η αναφορά για την θέση της αμαξοστοιχίας πρέπει να περιλαμβάνει τη θέση του εμπρός και του

πίσω μέρος της, την ταχύτητα της αμαξοστοιχίας και την κατεύθυνση της αμαξοστοιχίας.

4) Όλες οι αμαξοστοιχίες εντός μιας περιοχής ελέγχου Moving Block πρέπει να έχουν ένα μοναδικό αναγνωριστικό

Αυτή είναι μια βασική απαίτηση τόσο για τον παρατρόchio εξοπλισμό (Trackside) όσο και για τα τρένα ώστε να επιτρέπουν την αναγνώριση των τρένων με μοναδικό τρόπο από τον παρατρόchio εξοπλισμό (Trackside) και την επεξεργασία των ληφθέντων πληροφοριών από τα τρένα.

5) Το παρατρόchio εξοπλισμό σύστημα Trackside πρέπει να έχει γνώση όλων των αμαξοστοιχιών εντός της περιοχής ελέγχου.

Το σύστημα Trackside πρέπει να γνωρίζει για όλα τα εμπόδια εντός της περιοχής ελέγχου. Αυτό περιλαμβάνει όλα τα τρένα εντός της περιοχής ελέγχου, καθώς και τα όρια αυτών των περιοχών, το τέλος της γραμμής, τις θέσεις των αλλαγών κ.λ.π.

6) Το σύστημα Trackside θα πρέπει να κλειδώνει τις διαδρομές των τρένων.

Το Trackside σύστημα ελέγχει και κλειδώνει τις διαδρομές για τα τρένα. Αυτό περιλαμβάνει το κλείδωμα της κινητής υποδομής στη θέση που απαιτείται για τις διαδρομές. Το ασφαλές κλείδωμα διαδρομής περιλαμβάνει παραδοσιακές λειτουργίες αλληλοσύνδεσης.

7) Το Trackside System θα παρέχει Αρχές Κινήσεων μοναδικές σε συγκεκριμένα τρένα.

Το σύστημα Trackside παρέχει Αρχές κίνησης σε συγκεκριμένα τρένα, που εκφράζονται με βάση το κοινό Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς, όταν είναι ασφαλές. Η ασφάλεια περιλαμβάνει ότι η διαδρομή είναι κλειδωμένη και απομακρυσμένη από άλλα τρένα. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα Trackside δεν θα παρέχει την Αρχή Κίνησης (Movement Authority) για ένα τρένο πάνω από κινητή υποδομή, όταν δεν είναι κλειδωμένο από μια διαδρομή. Αυτό είναι ανάλογο με την διαδικασία που πραγματοποιείται αντίστοιχα σε ένα παραδοσιακό σύστημα σηματοδότησης.

8) Όλα τα τρένα θα παραμείνουν εντός της μοναδικής Αρχής Κίνησης τους.

Τα τρένα αναμένεται να παραμείνουν εντός της Αρχής Κίνησης (Movement Authority) που παρέχεται από το Σύστημα Trackside. Αυτό πρέπει να επιβάλλεται αυτόματα από την αυτόματη προστασία αμαξοστοιχίας (ATP). Για το ETCS, αυτό ενσωματώνει επίσης την παρακολούθηση της ταχύτητας της αμαξοστοιχίας έναντι του προφίλ ταχύτητας που παρέχεται εντός της Αρχής Κίνησης (Movement Authority) από το Trackside System.

9) Το σύστημα Trackside μπορεί να ξεκλειδώσει τη διαδρομή πίσω από τα τρένα.

Το Trackside System παρακολουθεί την πρόοδο των αμαξοστοιχιών κατά τη διάρκεια των διαδρομών τους, χρησιμοποιώντας τις τοποθεσίες που αναφέρονται από τα τρένα. Το Trackside System ξεκλειδώνει διαδρομές ή τμήματα διαδρομών όταν το πίσω μέρος της αμαξοστοιχίας είναι μακριά από τη διαδρομή ή το τμήμα της διαδρομής, καθιστώντας τα έτσι διαθέσιμα για χρήση από άλλα τρένα.

10) Το Trackside System θα επιτρέπει το ξεκλείδωμα των αχρησιμοποίητων διαδρομών π.χ. μπροστά από τα τρένα

Το Trackside System μπορεί να ξεκλειδώσει μια διαδρομή που έχει κλειδωθεί, αλλά η οποία δεν απαιτείται πλέον από ένα τρένο, αλλά μόνο όταν του ζητηθεί, και είναι ασφαλές να το κάνει. Ασφαλές σημαίνει είτε ότι δεν έχει εκδοθεί Αρχή Κίνησης για την κλειδωμένη διαδρομή ή ότι έχει αποδειχθεί ότι είναι ασφαλές.

11) Το Trackside System θα πραγματοποιεί αλλαγές μόνο όταν καμία Αρχή Κίνησης δεν είναι ενεργή πάνω από τις αλλαγές.

Το Trackside System μπορεί να μετακινήσει μόνο ένα στοιχείο κινητής υποδομής, όπως αλλαγές όταν δεν έχει εκδοθεί καμία Αρχή Κίνησης πάνω από την κινητή υποδομή και δεν είναι κλειδωμένη από μια διαδρομή.

5. ΡΑΔΙΟΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ (TRANSMISSION – COMMUNICATION) CBTC

5.1 Συμβατικά συστήματα σηματοδότησης

Σε μια ελαφρώς εξελιγμένη μορφή της συμβατικής σηματοδότησης, γνωστή ως "Σιδηροδρομική Γραμμή Control "(TBTC), οι σιδηροτροχιές χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μεταξύ σιδηροδρομικής και σιδηροδρομικής υποδομής. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν κωδικοποιημένα κυκλώματα διαδρομής εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), που ονομάζονται επίσης κυκλώματα ήχου παρακολούθησης συχνότητας (AF) λόγω του εύρους των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για διαμόρφωση δεδομένα. Τα δεδομένα ελέγχου αμαξοστοιχίας που αποστέλλονται μέσω σιδηροτροχιών χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη σηματοδότηση της καμπίνας - το χαρακτηριστικό της εμφάνισης πληροφοριών σήματος στον οδηγό μέσα στην αμαξοστοιχία— και για την επιβολή της επιτρεπόμενης ταχύτητας. Δεδομένου ότι σε αυτά τα συστήματα, τα κυκλώματα τροχιάς χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό θέσης αμαξοστοιχίας, αυτό το είδος σηματοδότησης αναφέρεται επίσης ως "Σηματοδότηση Κυκλώματος Τροχιάς". Αυτή η τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί μια πρώιμη μορφή ελέγχου τρένων με βάση την επικοινωνία. Ένα άμεσο παράδειγμα είναι το μετρό της Κοπεγχάγης χωρίς οδηγό.

Ωστόσο, η χαμηλή ανάλυση της θέσης της αμαξοστοιχίας καθορίζεται από κυκλώματα τροχιάς και η χαμηλή χωρητικότητα της σιδηροδρομικής επικοινωνίας οδηγεί σε λιγότερο ακριβείς πληροφορίες για την τοποθεσία του τρένου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες αποστάσεις για να διασφαλιστεί η ασφάλεια και συνεπώς χαμηλή χωρητικότητα γραμμής.

5.2 Σύγχρονα συστήματα σηματοδότησης

5.2.1 Επαγωγικό CBTC με βάση βρόχο

Τα πρώτα συστήματα CBTC στη δεκαετία του 1980 χρησιμοποίησαν επαγωγικό βρόχο ως τεχνολογία επικοινωνίας. Αυτός ο τύπος σηματοδότησης ονομάστηκε επίσης "Έλεγχος Αμαξοστοιχίας βάσει Μετάδοσης" (TBTC) . Το πρώτο σύστημα CBTC βασίστηκε σε αυτήν την τεχνολογία και εγκαταστάθηκε στο Τορόντο, Καναδάς, το 1985, στο Τορόντο Transit Commission Scarborough RT Line . Δύο άλλα τέτοια αρχικά επαγωγικά συστήματα που βασίζονται σε βρόχο ονομάστηκαν VAL, αναπτύχθηκαν στο Lille light του μετρό το 1983, και ο Meteor, σε υπηρεσία στο Paris Line 14 από το 1998.

Σε αυτά τα συστήματα, τα καλώδια επαγωγικού βρόχου τοποθετήθηκαν σε κομμάτια και κωδικοποιήθηκαν με συγκεκριμένες συχνότητες σε τακτά χρονικά διαστήματα. Το τρένο επαληθεύει την τοποθεσία του διαβάζοντας αυτά τα σήματα μέσω ενός ανιχνευτή τοποθετημένου από κάτω. Όπως φαίνεται, αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να θεωρηθεί μια προηγμένη εναλλακτική λύση για τη σηματοδότηση κυκλώματος τροχιάς που συζητήθηκε παραπάνω. Για το λόγο αυτό, η σηματοδότηση κυκλώματος τροχιάς υποστηρίζεται περιστασιακά ως μορφή έλεγχου αμαξοστοιχίας βάσει επικοινωνίας.

5.2.2 Radio-based CBTC

Σε αντίθεση με τα σύγχρονα συστήματα CBTC που λειτουργούν στο εύρος συχνοτήτων GHz με Wi-Fi, τα συστήματα επαγωγικού βρόχου λειτουργούσαν με απλά συστήματα ανίχνευσης θέσης στην περιοχή kHz. Ωστόσο, παρά τα μειονεκτήματά του, ο επαγωγικός βρόχος είναι μια αποδεδειγμένη τεχνολογία που έχει χρησιμοποιηθεί για σιδηροδρόμους για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ενώ είναι οικονομικά αποδοτικό, καθώς χρησιμοποιεί ένα τυπικό καλώδιο, το οποίο είναι εύκολο να επισκευαστεί, ωστόσο το μειονέκτημα είναι ότι δεν είναι εύκολο να εγκατασταθεί και είναι ευάλωτο σε βανδαλισμούς και κλοπή.

Από την άλλη, τα σύγχρονα συστήματα CBTC χρησιμοποιούν συνεχή και υψηλής χωρητικότητας ραδιοεπικοινωνία μεταξύ της αμαξοστοιχίας και του παρατρόχιου εξοπλισμού για τη μετάδοση πληροφοριών ελέγχου αμαξοστοιχίας. Η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και η αναγνώριση της ακριβούς τοποθεσίας του τρένου καθιστούν δυνατή τη λειτουργία του "κινούμενου μπλοκ" με αποτέλεσμα τις μικρές χρονοαποστάσεις και την αυξημένη χωρητικότητα γραμμής. Μια τυπική χρονοαπόσταση σε συστήματα CBTC είναι 90 δευτερόλεπτα ή λιγότερο. Επιπλέον, επιτρέπει προηγμένες δυνατότητες όπως λειτουργίες τρένου Driverless και Unattended. Το πρώτο σύστημα CBTC με ραδιοεπικοινωνίες προμήθευσε η Bombardier και εγκαταστάθηκε στο αεροδρόμιο του Σαν Φρανσίσκο το 2003.

Τα συστήματα CBTC μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: αυτές που βασίζονται στη σύγχρονη, ραδιοεπικοινωνία υψηλής χωρητικότητας - η οποία μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω σε custom λύσεις και εμπορικές λύσεις commercial off-the-shelf (COTS) – και αυτές που βασίζονται στην παλαιότερη τεχνολογία κυματοδηγού.

Προσαρμοσμένες λύσεις (Custom) και Εμπορικές λύσεις (Commercial -Off-The-Shelf (COTS)) ραδιοεπικοινωνιών : Τα περισσότερα από τα προηγούμενα συστήματα CBTC radio ήταν προσαρμοσμένες λύσεις, κατασκευασμένες ειδικά για να

ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις ενός έργου και χρησιμοποίησαν μια αποκλειστική τεχνολογία ραδιοεπικοινωνιών. Ένα παράδειγμα είναι η λύση Model2400 της Andrew Corporation, που βασίζεται στην τεχνολογία διαρροής κυματοδηγού, που χρησιμοποιεί η Bombardier στις αρχικές εγκαταστάσεις CBTC. Το κόστος του ήταν 22.000 \$ (ανά radio), περίπου 100 φορές το κόστος μιας λύσης που βασίζεται σε Wi-Fi. Το μειονέκτημα των προσαρμοσμένων λύσεων είναι η έλλειψη ασυμβατότητάς τους με συστήματα που αναπτύχθηκαν από άλλους προμηθευτές.

Αργότερα, η Bombardier ανέπτυξε ένα ευρύ φάσμα εμπορικών λύσεων με βάση το φάσμα που αναπτύχθηκε από την Safetran Systems Corporation (τώρα Siemens) , το οποίο κόστιζε μόνο 1600 \$, αν και εξακολουθεί να είναι περίπου 10 φορές παραπάνω από το κόστος μιας λύσης βασισμένης σε Wi-Fi . Για να διατηρηθεί το ραδιοσύστημα ανεξάρτητο από έναν συγκεκριμένο προμηθευτή, η New YorkCity Transit (NYCT) επέλεξε μια εμπορική λύση για τα έργα Culver και Canarsie Line. Η επιλεγμένη λύση ονομάστηκε RailPath και αναπτύχθηκε από την Springboard WirelessNetworks Inc. και λειτουργούσε στη ζώνη 2,4 GHz.

Το ραδιοσύστημα που χρησιμοποιείται στο σύστημα CBTC S-train της Κοπεγχάγης, που ονομάζεται Airlink , βασίζεται σε Wi-Fi. Ωστόσο, οι προηγούμενες γενιές της Airlink εξακολουθούν να χρησιμοποιούν ιδιόκτητη και προσαρμοσμένη τεχνολογία ραδιοεπικοινωνιών, με βάση το φάσμα εξάπλωσης και λειτουργούν στις ζώνες 2,4 και 5,9GHz. Το πιο πρόσφατο έργο που χρησιμοποιεί αυτό το σύστημα με βάση το φάσμα εξάπλωσης είναι το Queens Boulevard Li της NYCT.

Leaky Waveguide – Τεχνολογία κυματοδηγού: Η τεχνολογία κυματοδηγού είναι ένα ομοαξονικό καλώδιο με περιοδικά ανοίγματα στην ασπίδα του για να επιτρέπεται η διαρροή ή είσοδος ραδιοσημάτων, ενεργώντας έτσι ως συνεχής κεραία. Για δεκαετίες, με επιτυχία χρησιμοποιήθηκε για την παροχή φωνητικής υπηρεσίας σε μετρό. Ο μεγάλος κυματοδηγός προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα. Η ραδιοεπικοινωνία σε υπαίθριους χώρους είναι γενικά απρόβλεπτη, καθώς η απώλεια διάδοσης που βιώνει ένα σήμα εξαρτάται από τα εμπόδια που συναντά στην μετάδοση του. Το Leaky Waveguide παρέχει απεριόριστη επικοινωνία, η οποία πραγματοποιείται σε πολύ μικρή απόσταση - συνήθως από 0,3 έως 0,6 μέτρα - μεταξύ του ραδιοσυστήματος στο τρένο. Έτσι, ο κυματοδηγός διαρροής εγγυάται μια πιο προβλέψιμη απώλεια διάδοσης και είναι περισσότερο ανεκτική σε παρεμβολές. Δεδομένων αυτών των πλεονεκτημάτων, ορισμένοι διαχειριστές σιδηροδρόμων χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό ραδιοεπικοινωνιών και κυματοδηγού διαρροής. Ενώ η ραδιοεπικοινωνία

χρησιμοποιείται σε σήραγγες, ο κυματοδηγός διαρροής χρησιμοποιείται σε υπαίθριες τοποθεσίες όπου οι παρεμβολές είναι σημαντικά υψηλότερες ή σε κρίσιμες θέσεις όπου η ραδιοεπικοινωνία είναι εξαιρετικά προβληματική. Ένα παράδειγμα είναι οι σταθμοί σε σήραγγες, όπου θα μπορούσε να παρεμποδίζεται το Line of Sight (LOS) στο πλησιέστερο Access Point. Ωστόσο, μια πρόκληση στην συνδυαστική χρήση των ανωτέρω λύσεων είναι η απρόσκοπτη εναλλαγή μεταξύ των δύο τεχνολογιών στις περιοχές διέλευσης (όπως για παράδειγμα οι αποβάθρες). Για κάθε τεχνολογία πρέπει να χρησιμοποιείται ξεχωριστή σειρά κεραιών. Το μειονέκτημα των κυματοδηγών διαρροής είναι ότι δεν είναι οικονομικά αποδοτικές και η εγκατάσταση και η συντήρηση απαιτεί πολλή προσπάθεια, ειδικά στο περιβάλλον της σήραγγας. Επιπλέον, όταν εγκαθίστανται σε υπαίθριες τοποθεσίες, είναι επιρρεπείς σε υποβάθμιση σήματος λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων όπως βροχή και χιόνι. Για αυτούς τους λόγους, το Leaky Waveguide δεν έχει αποδειχθεί πολύ δημοφιλές για τα συστήματα CBTC.

5.3 Επιλογή WiFi για το CBTC

Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους η ραδιοεπικοινωνία, ιδιαίτερα το Wi-Fi, έχει επιλεγεί ως τεχνολογία επικοινωνίας για το CBTC, συνοψίζονται στα παρακάτω **οφέλη**:

- Υψηλή χωρητικότητα - δηλ. απόδοση δεδομένων
- Χαμηλό κόστος προμήθειας του απαιτούμενου εξοπλισμού και εύκολη αναβάθμιση λογισμικού
- Λιγότερο παρατρόχιο εξοπλισμό - π.χ. ως αποτέλεσμα της αφαίρεσης κυκλωμάτων τροχιάς και μετρητών αξόνων
- Εύκολη επεκτασιμότητα - π.χ. προσθέτοντας περισσότερο ραδιοεξοπλισμό
- Εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση - ως αποτέλεσμα λιγότερων καλωδίων
- Ανοχή σφάλματος / πλεονασμός (redundancy) - π.χ. μέσω πολλαπλών ραδιοσυστημάτων, και αλληλεπικαλυπτόμενη κάλυψη
- Χαμηλή ευαισθησία στον βανδαλισμό - ως αποτέλεσμα λιγότερων καλωδίων

Επιπλέον, οι κύριοι λόγοι για την επιλογή του Wi-Fi ως τεχνολογία ραδιοεπικοινωνίας περιλαμβάνει:

- Δωρεάν διαθέσιμη βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική (ISM) ζώνη συχνοτήτων
- Μια μεγάλη αγορά προμηθευτών και υποστήριξη της βιομηχανίας
- Χαμηλό κόστος - οικονομικά αποδοτικό και άμεσα διαθέσιμο ραδιοεξοπλισμό

- Διαλειτουργικότητα μεταξύ πολλών προμηθευτών, χάρη στο Wi-Fi Alliance
- Ανοιχτά πρωτόκολλα και standard

Μερικά από τα **μειονεκτήματα** της επιλογής Wi-Fi περιλαμβάνουν:

- Ευαισθησία σε παρεμβολές
- Απαιτεί αυστηρά μέτρα ασφαλείας σχετικά με τις επικοινωνίες
- Μικρό εύρος
- Συμφόρηση δικτύου

Σε αντίθεση με τον κεντρικό σιδηρόδρομο (δηλαδή υπεραστικές αμαξοστοιχίες μεγάλης απόστασης), ο αριθμός των συρμών σε μαζικές μεταφορές είναι μεγαλύτερος, έχοντας ως αποτέλεσμα μικρότερες χρονοαποστάσεις. Επομένως, η μαζική διαμετακόμιση απαιτεί τεχνολογία ραδιοσυχνοτήτων υψηλότερης χωρητικότητας σε σύγκριση με το GSM-R (Παγκόσμιο Σύστημα για Κινητές Επικοινωνίες - Σιδηρόδρομος), που υιοθετήθηκε από το ευρωπαϊκό βασικό πρότυπο ERTMS. Ενώ η χρήση της τεχνολογίας CBTC από μόνη της δεν απαιτεί υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, είναι όμως το κλειδί για την ενεργοποίηση και ενσωμάτωση σύγχρονων εφαρμογών όπως η απομακρυσμένη διάγνωση και συντήρηση, απομακρυσμένη αναβάθμιση λογισμικού, ενσωμάτωση CCTV, εφεδρεία μετάδοσης, καθώς και εφαρμογές ψυχαγωγίας επιβατών, όπως το Internet. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για την υποστήριξη αυτών των εφαρμογών μπορεί εύκολα να φτάσει μερικά megabit ανά δευτερόλεπτο ανά τρένο. Το Wi-Fi, που υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 300 Mbps, όχι μόνο πληροί αυτήν την απαίτηση, αλλά έχει επίσης τη δυνατότητα να το πράξει στο εγγύς μέλλον. Ο υπόγειος χαρακτήρας του σιδηροδρόμου μαζικής διαμετακόμισης σημαίνει ότι δεν είναι εφικτό να εγκατασταθούν κεραιές σε υψηλούς ιστούς όπως σε υπαίθριες τοποθεσίες. Είναι επομένως αναπόφευκτο η εγκατάσταση πολλών Access Points κατά μήκος της γραμμής για την κάλυψη μιας μεγάλης περιοχής. Επομένως, η διαθεσιμότητα εξοπλισμού εμπορικά διαθέσιμων προϊόντων Wi-Fi χαμηλού κόστους έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία του Wi-Fi για το CBTC. Ενώ οι πιο προηγμένες κυψελοειδείς τεχνολογίες, όπως το LTE, μπορεί να πληρούν την απαίτηση δεδομένων, είναι συγκριτικά λιγότερο οικονομικά αποδοτικές καθώς είτε απαιτεί από τον προμηθευτή CBTC να αναπτύξει τη δική του υποδομή δικτύου είτε να αποκτήσει τη ραδιοσύνδεση από μια εταιρεία τηλεπικοινωνιών και να πληρώσει με βάση τη χρήση. Επιπλέον, η παροχή ραδιοκάλυψης στις υπόγειες τοποθεσίες είναι προβληματική

καθώς οι τεχνολογίες ραδιοκυμάτων υψηλής συχνότητας δεν μπορούν να διεισδύσουν καλά σε στερεά αντικείμενα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και λιγότερο σημαντικό σε σύγκριση με μια συμβατική τεχνολογία όπως ο επαγωγικός βρόχος, ο εξοπλισμός Wi-Fi εξακολουθεί να είναι ευάλωτος στον βανδαλισμό. Συγκεκριμένα, τα πλαϊνά Access Points, ενώ περικλείονται σε προστατευτικά μεταλλικά περιβλήματα και είναι τοποθετημένοι σε ιστούς, εξακολουθούν να είναι ορατά και προσιτά .

Η ευαισθησία σε παρεμβολές από άλλους χρήστες Wi-Fi και άλλων ασύρματων επικοινωνιών είναι ένα γνωστό ζήτημα. Ωστόσο, πάλι, αποδεικνύεται λιγότερα σημαντικό πρόβλημα λόγω του υπόγειου χαρακτήρα της μαζικής μεταφοράς. Σε υπόγεια περιβάλλοντα, η πιθανότητα παρεμβολής από άλλους χρήστες είναι συγκριτικά χαμηλότερη και μπορεί να ελεγχθεί πιο αποτελεσματικά . Παρόλο που οι ανησυχίες ασφαλείας που περιγράφονται εδώ ισχύουν για οποιαδήποτε ραδιοτεχνολογία βασισμένη σε εκπομπές, η χρήση της ζώνης ISM κάνει τις εν λόγω ανησυχίες ακόμη πιο σχετικές με το Wi-Fi. Απαιτούνται κατάλληλα μέτρα ασφαλείας για την αποφυγή σύνδεσης μη εξουσιοδοτημένων χρηστών σε ένα AP, που θα μπορούσε να οδηγήσει σε υποκλοπή δεδομένων κυκλοφορίας ή πόρων του εύρους ζώνης. Συναφείς ανησυχίες προκαλεί και το ενδεχόμενο επιθέσεων μπλοκαρίσματος που μπορούν να διαταράξουν ολόκληρο το ραδιοδίκτυο ή οι επιθέσεις man-in-the-middle όπου ένας εισβολέας μπορεί να παριστάνει ένα CBTC AP, προκαλώντας τη σύνδεση των τρένων σε αυτό.

Οι μέθοδοι ελέγχου ταυτότητας και κρυπτογράφησης από άκρο σε άκρο είναι επομένως εξαιρετικά κρίσιμες. Επομένως, τα σχετικά πρότυπα που καθορίζουν τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας, όπως το EN 50159 , εφαρμόζονται από τα συστήματα CBTC. Το πρότυπο IEEE 802.11 αναπτύχθηκε κυρίως για την αντικατάσταση καλωδίων σε τοπικές εφαρμογές όπως περιβάλλοντα γραφείου και επομένως εγγενώς δεν υποστηρίζει την κινητικότητα και τις μεγάλες περιοχές . Για το λόγο αυτό, τα συστήματα επικοινωνίας CBTC radio εφαρμόζουν γενικά τους δικούς τους αλγόριθμους παράδοσης (handover algorithms). Οι γενικά χαμηλές ταχύτητες των αμαξοστοιχιών ελαχιστοποιούν περαιτέρω αυτήν την εγγενή έλλειψη στο IEEE 802.11 .

Σε κυψελοειδή δίκτυα όπως το GSM (Global Σύστημα για κινητή επικοινωνία) ή LTE, η απόσταση μεταξύ ενός κινητού κόμβου και ενός σταθμού βάσης είναι συνήθως μεγάλη. Συγκριτικά, κατά τη μετάδοση, η απόσταση μεταξύ αμαξοστοιχίας και του AP είναι μικρή, κυρίως λόγω της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Αυτό καθιστά το μικρό εύρος του

Wi-Fi λιγότερο σημαντικό ζήτημα. Το πρόβλημα ελαχιστοποιείται περαιτέρω με την εγκατάσταση μεγάλου αριθμού AP παράπλευρα. Η κακή ποιότητα υπηρεσίας (QoS) λόγω της συμφόρησης στο δίκτυο είναι ένα πολύ γνωστό ζήτημα, ειδικά όταν ο αριθμός των χρηστών είναι μεγάλος. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί τόσο σοβαρό ζήτημα για το CBTC. Είναι απίθανο να υπάρχουν περισσότερα από ένα τρένα σε ένα κελί Wi-Fi κάθε φορά, επειδή τα τρένα στις ράγες δεν μπορούν να αλληλοσυμπληρώνονται για λόγους ασφαλείας.

5.4 Ζώνες συχνότητων και Παρεμβολές

Σχεδόν όλες οι εγκαταστάσεις CBTC λειτουργούν σήμερα σε μία από τις τρεις ζώνες ISM χωρίς άδεια: 900 MHz, 2,4 GHz και 5 GHz. Τα 2,4 GHz είναι η πιο δημοφιλής στους προμηθευτές CBTC ακολουθούμενη από αυτή των 5 GHz. Ο Πίνακας 1 παραθέτει το εύρος συχνότητας ζώνης ISM μαζί με τις εφαρμογές των χρηστών τους:

Πίνακας 1 Εύρος συχνότητων ISM και εφαρμογές τους

Frequency range	Users
902 - 928 MHz	Microwave ovens, cordless phones, industrial
2.4 - 2.4835 GHz	IEEE 802.11b/g, microwave ovens, cordless phones, Bluetooth, garage doors openers, baby monitors, car alarms, printers, keyboards/mice
5.725 - 5.825 GHz	IEEE 802.11a/h
61 - 61.5 GHz	IEEE 802.11ad

5.4.1 Παρεμβολές

Οι παρεμβολές, τόσο στο ίδιο κανάλι όσο και στο γειτονικό κανάλι, είναι ένα πολύ γνωστό ζήτημα στα δίκτυα Wi-Fi. Όπως συζητήθηκε παραπάνω, ένας σημαντικός λόγος για την επιλογή Wi-Fi είναι η χρήση της ζώνης συχνότητων ISM. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι σιδηροδρομικοί φορείς δεν χρειάζεται να ανησυχούν για την απόκτηση άδειας από τον ρυθμιστικό φορέα.

Στις ΗΠΑ, αυτές οι συχνότητες ζώνης έχουν οριστεί από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) ως χωρίς άδεια, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιονδήποτε, χωρίς την ανάγκη απόκτησης άδειας. Ωστόσο, ισχύουν ορισμένοι περιορισμοί στην ισχύ μετάδοσης. Στην Ευρώπη, παρόμοιοι κανονισμοί εφαρμόζονται από τα ευρωπαϊκά πρότυπα τηλεπικοινωνιών (ETSI), το σώμα των ευρωπαϊκών ρυθμιστικών αρχών για τις ηλεκτρονικές επικοινωνίες (BEREC) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC).

Ωστόσο, παρόλο που ο αριθμός των χρηστών που χρησιμοποιούν την κάθε ζώνη με άδεια είναι μεγάλος, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα παρεμβολής από άλλους χρήστες στη ζώνη. Ως συνέπεια, η αυξανόμενη χρήση της ζώνης 2,4 GHz για συστήματα CBTC από σιδηροδρομικούς φορείς ως εκ τούτου εγείρει προβλήματα. Για παράδειγμα, οι αστοχίες CBTC στο Shenzhen Metro έχουν αποδοθεί σε παρεμβολές που προκαλούνται από τους χρήστες Wi-Fi στις γύρω περιοχές. Λόγω αυτών, μια έρευνα των υφιστάμενων RF (ραδιοσυχνότητες) διεξήχθη για τον προσδιορισμό των παρεμβολών πριν τον προγραμματισμό της τοποθέτησης AP. Ωστόσο, ο ραγδαίος και διαδεδομένος πολλαπλασιασμός της χρήσης των smartphone και άλλων φορητών συσκευών σημαίνει ότι είναι σημαντικό για τέτοιες έρευνες να προβλέπουν με ακρίβεια τις παρεμβολές ακόμη και στο εγγύς μέλλον. Για να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή γειτονικών καναλιών, τα γειτονικά AP σε συστήματα CBTC λειτουργούν σε εναλλασσόμενα κανάλια συχνότητας.

5.4.2 Παράγοντες για την επιλογή ζώνης συχνότητας

Στο CBTC, η επιλογή μεταξύ ζωνών συχνότητας 2,4 GHz και 5 GHz καθορίζεται γενικά από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Διαθεσιμότητα οικονομικά αποδοτικού ραδιοεξοπλισμού: Αυτός ο εξοπλισμός είναι πιο πιθανό να είναι διαθέσιμος στα 2,4 GHz λόγω της μεγάλης αγοράς προμηθευτών. Οι προμηθευτές CBTC θα προτιμούσαν να παρέχουν ένα σύστημα επικοινωνίας βασισμένο σε άμεσα διαθέσιμο εμπορικό εξοπλισμό παρά να αναπτύξουν τη δική τους ιδιόκτητη λύση.
- Πυκνότητα και παρεμβολές χρηστών: Όπως συζητήθηκε παραπάνω, λόγω ενός σημαντικού αριθμού χρηστών Wi-Fi και άλλων ασύρματων επικοινωνιών, η ζώνη 2,4 GHz είναι πολύ πιο επιρρεπής σε παρεμβολές σε σύγκριση με τη ζώνη των 5 GHz, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

- **Εύρος σήματος:** Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα των ραδιοκυμάτων, τόσο μικρότερη είναι η απόσταση που μπορούν να ταξιδέψουν. Έτσι, τα ραδιοκύματα στα 2,4 GHz καλύπτουν μια μεγαλύτερη απόσταση από αυτά των 5 GHz, με την ίδια ισχύ μετάδοσης. Αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά των ραδιοκυμάτων υψηλής συχνότητας τα οποία όχι μόνο εξασθενούν ταχύτερα αλλά επίσης δεν διεισδύουν σε στερεά αντικείμενα. Ωστόσο, ένα πλεονέκτημα των σημάτων υψηλής συχνότητας είναι ότι, επειδή δεν ταξιδεύουν στο περιβάλλον, παρεμβάλλονται λιγότερο με τα γειτονικά σήματα.
- **Ευκολία εγκατάστασης:** Η συχνότητα λειτουργίας οριοθετεί επίσης στον αριθμό των εγκατεστημένων AP. Το μικρότερο εύρος σημάτων των ραδιοκυμάτων στα 5 GHz σημαίνει μικρότερες αποστάσεις μεταξύ APs, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο αριθμό εγκαταστάσεων AP. Επιπλέον, η συχνότητα προσδιορίζει επίσης τη θέση και το ύψος της εγκατάστασης AP, λόγω των χαρακτηριστικών διάδοσης.
- **Αριθμός διαθέσιμων καναλιών:** Κατά τη διαμόρφωση καναλιών συχνότητας για παρακείμενα APs, κατά κανόνα, προτιμώνται τα μη επικαλυπτόμενα κανάλια με σκοπό τον περιορισμό των παρεμβολών. Ωστόσο, μόνο 3 και 4 μη επικαλυπτόμενα κανάλια είναι διαθέσιμα στα IEEE 802.11b (DSSS modulation) και IEEE 802.11g (OFDM modulation), αντίστοιχα. Συγκριτικά, το IEEE 802.11a, το οποίο λειτουργεί στη ζώνη των 5 GHz, επιτρέπει 23 μη επικαλυπτόμενα κανάλια.

5.5 Περιαγωγή σε συστήματα CBTC

Σε αντίθεση με την κυψελοειδή επικοινωνία, η περιαγωγή σε σιδηροδρομικά περιβάλλοντα είναι μια αναπόφευκτη πραγματικότητα. Σε αντίθεση με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το Wi-Fi είναι δίκτυο μικρής εμβέλειας, όπου δημιουργούνται μεγαλύτερα δίκτυα με την ανάπτυξη περισσότερων AP. Αυτό σημαίνει ότι τα AP τοποθετούνται σε κοντά το ένα στο άλλο στο δίκτυο του παρατρόχιου εξοπλισμού, ώστε οι μεμονωμένες περιοχές κάλυψης τους να αλληλεπικαλύπτονται και ένα τρένο να πρέπει συνεχώς να βρει το νέο κατάλληλο AP για να επανασυνδεθεί καθώς κινείται.

Ως αποτέλεσμα, μια κρίσιμη πτυχή της περιαγωγής στο CBTC είναι ο τρόπος με τον οποίο το σύστημα ραδιοεπικοινωνίας θα αλλάζει ομαλά από το ένα AP στο άλλο χωρίς να προκαλεί διακοπές και καθυστερήσεις στην επικοινωνία. Επιπλέον, η μεγάλη καθυστέρηση παράδοσης οδηγεί σε καθυστερημένη λήψη των πληροφοριών της Αρχής Κίνησης και αποτέλεσμα αυτού θα είναι η αμαξοστοιχία να πρέπει να πατήσει φρένα έκτακτης ανάγκης.

Επιπλέον, δεδομένου ότι στο CBTC είναι πολύ συνηθισμένο να αναπτύσσονται γειτονικά AP σε διαφορετικές συχνότητες, το σύστημα ραδιοεπικοινωνίας πρέπει να εναλλάσσεται κατά την μετάβαση από το ένα AP στο άλλο. Αυτό, σε συνδυασμό με τις υψηλές ταχύτητες των σύγχρονων τρένων, οδηγεί σε ταχέως μεταβαλλόμενα κανάλια και καθιστά τους αλγόριθμους παράδοσης που χρησιμοποιούνται με επιτυχία σε σταθερά περιβάλλοντα Wi-Fi, αναποτελεσματικούς για το CBTC.

5.5.1 Καθυστέρηση (Latency) και Παράδοση (Handover)

Η συχνότητα της παράδοσης (Handover) καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ των δύο AP και την ταχύτητα της αμαξοστοιχίας. Η παράδοση στο IEEE 802.11 είναι το λεγόμενο "hard handover", όπου ο κόμβος του κινητού σπάει την τρέχουσα σύνδεση πριν από την πραγματοποίηση της επόμενης σύνδεσης, με αποτέλεσμα καθυστερήσεις και απώλεια πακέτων. Η υψηλή ταχύτητα και η μικρή απόσταση μεταξύ των AP έχει ως αποτέλεσμα τις συχνότερες μεταβιβάσεις, με αποτέλεσμα να επιδεινώνει περαιτέρω το προαναφερθέν πρόβλημα.

Μελέτες δείχνουν ότι ο αριθμός των πακέτων που χάθηκαν λόγω της καθυστέρησης παράδοσης (handover) είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν λόγω της ραδιοφωνικής διάδοσης (propagation). Οι περισσότεροι προτείνουν μια μέθοδο για τον προσδιορισμό του ποσοστού απώλειας πακέτων με βάση το χρόνο παράδοσης, το εύρος κάλυψης AP, και την περιοχή επικάλυψης μεταξύ AP. Με βάση αυτήν την μέθοδο υπολογίζεται ότι σε αμαξοστοιχίες υπεραστικές με ταχύτητα 200 km/h, μέγιστη παράδοση (handover) 180 χιλιοστών του δευτερολέπτου και με περιοχή επικάλυψης 20 μέτρων, το υπολογιζόμενο ποσοστό απώλειας πακέτων είναι περίπου 10%.

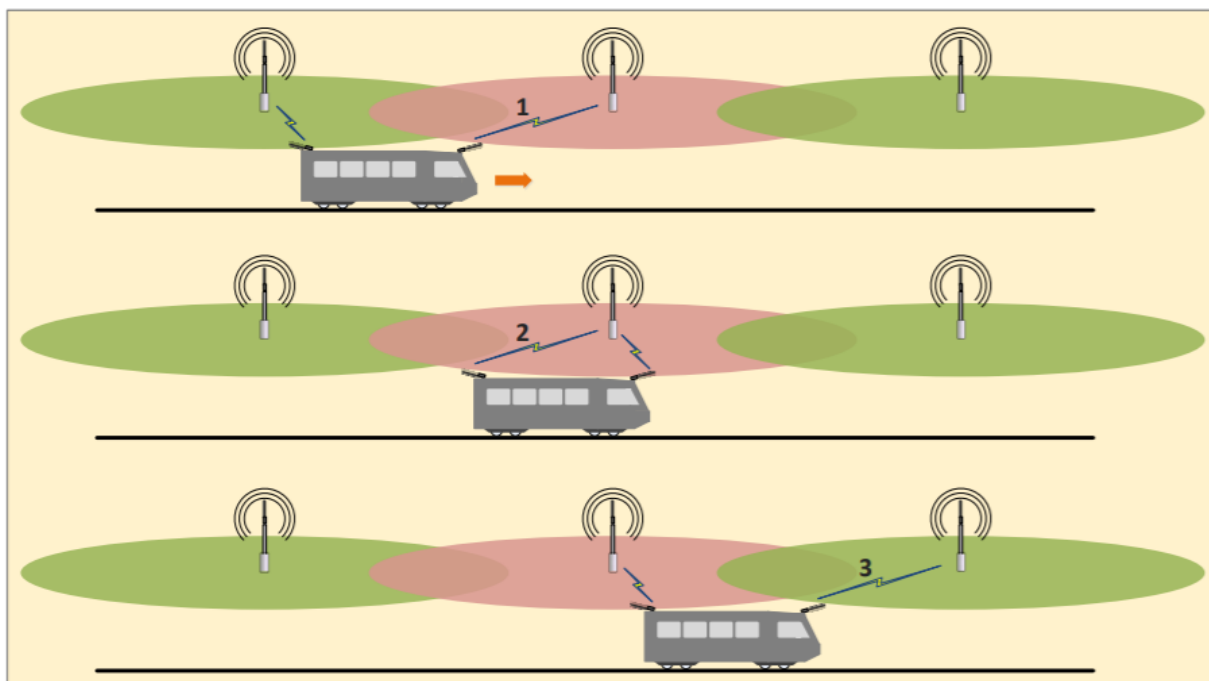
Ο χρόνος καθυστέρησης παράδοσης (handover) στο CBTC κυμαίνεται συνήθως από 70-120 χιλιοστά του δευτερολέπτου, με 1 δευτερόλεπτο ως ανώτερο όριο. Όσο αυτή η καθυστέρηση είναι μικρότερη από το χρονικό διάστημα αποστολής μηνυμάτων ελέγχου CBTC που συζητήθηκε παραπάνω, αυτή δεν αποτελεί σοβαρή απειλή, καθώς σημαίνει μόνο ένα χαμένο μήνυμα στη χειρότερη περίπτωση.

5.5.2 Αλγόριθμος περιαγωγής

Κανονικά η ομαλή μετάβαση επιτυγχάνεται με τον εξοπλισμό μιας αμαξοστοιχίας με τουλάχιστον δύο κεραίες, μία σε κάθε άκρο, έτσι ώστε τουλάχιστον μία από αυτές να είναι πάντα συνδεδεμένη με ένα AP.

Στην απλούστερη μορφή του, λειτουργεί ως εξής. Καθώς το τρένο κινείται, η μπροστινή κεραία αναζητάει το νέο AP. Όταν βρει ένα νέο AP, διακόπτει την τρέχουσα σύνδεση και δημιουργεί μία νέα σύνδεση (σύνδεση 1), ενώ η πίσω κεραία παραμένει συνδεδεμένη. Στη συνέχεια, η πίσω κεραία αλλάζει τη σύνδεση της στο νέο AP (σύνδεση 2), ενώ παράλληλα η μπροστινή κεραία παραμένει συνδεδεμένη.

Στη συνέχεια, το πρώτο βήμα επαναλαμβάνεται και η μπροστινή κεραία συνδέεται με ένα νέο AP (σύνδεση 3).



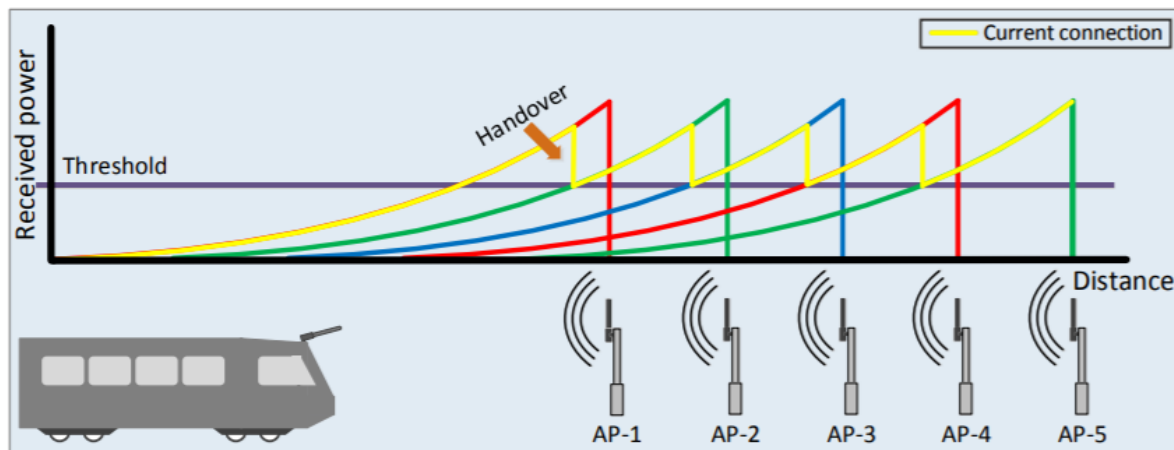
Εικόνα 26 Παράδοση στο CBTC

Ωστόσο, πριν από την εκτέλεση μιας παράδοσης, πρέπει να εντοπιστεί πότε πρέπει να πραγματοποιηθεί η παράδοση. Το πώς επιτυγχάνεται αυτό δεν καθορίζεται από το πρότυπο IEEE 802.11, και επομένως, τα συστήματα CBTC καλούνται να αναπτύξουν συνήθως τον δικό τους αλγόριθμο περιαγωγής. Τυπικές προσεγγίσεις των εν λόγω αλγορίθμων είναι η παρακολούθηση της ποιότητας της σύνδεσης π.χ. παρακολουθώντας τον αριθμό των μη αναγνωρισμένων πακέτων (δηλ. απώλεια πακέτων) ή παρακολουθώντας πότε μειώνεται η ποιότητα του σήματος κάτω από ένα ορισμένο όριο. Εάν βρεθούν περισσότερα από ένα πιθανά AP για τη νέα σύνδεση, χρησιμοποιούνται τα ίδια κριτήρια για την επιλογή του καλύτερου AP μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών.

Τα εξαιρετικά δυναμικά περιβάλλοντα των σιδηροδρομικών μεταφορών κάνουν την ανίχνευση της παράδοσης μια πρόκληση για τους προμηθευτές.

Όριο παράδοσης

Μια τυπική προσέγγιση στα συστήματα CBTC είναι η εκτέλεση της παράδοσης μόλις το τρένο λαμβάνει ένα σήμα από ένα νέο AP, με ισχύ πάνω από ένα ορισμένο όριο, ακόμη και αν η ισχύς σήματος του τρέχοντος AP είναι μεγαλύτερη και εξακολουθεί να αυξάνεται. Αυτό απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.6**, όπου, για παράδειγμα, πραγματοποιείται παράδοση από το AP-1 στο AP-2 κάθε φορά που η τρέχουσα ισχύς σήματος του AP-1 (κόκκινο) είναι μεγαλύτερη από εκείνη του AP-2 (πράσινο).



Εικόνα 27 Αλγόριθμος παράδοσης

Μια άλλη προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά κατώτατα όρια: ένα "όριο αποχώρησης" και ένα "όριο σύνδεσης". Η περιαγωγή πραγματοποιείται εάν η ισχύς σήματος του τρέχοντος AP πέσει κάτω το όριο αποχώρησης ή / και η ισχύς του νέου AP είναι πάνω από το όριο σύνδεσης.

Ωστόσο, αυτά τα κατώτατα όρια πρέπει να καθοριστούν προσεκτικά. Ένα πολύ χαμηλό όριο αποχώρησης μπορεί να οδηγήσει σε παρατεταμένη σύνδεση με το τρέχον AP. Το αποτέλεσμα είναι μια καθυστέρηση περιαγωγής, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια του σήματος της αμαξοστοιχίας καθώς κινείται πέρα από το AP. Από την άλλη πλευρά, πολύ χαμηλό όριο σύνδεσης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη σύνδεση της αμαξοστοιχίας σε ένα AP με κακή ποιότητα σήματος.

5.5.3 Παράδοση σύμφωνα με το IEEE 802.11

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μια σύντομη εισαγωγή σχετικά με τον μηχανισμό παράδοσης IEEE 802.11.

Η παράδοση με βάση το IEEE 802.11 έχει 3 φάσεις:

(1) Σάρωση: Η σάρωση είναι η διαδικασία εύρεσης ενός κατάλληλου AP για σύνδεση. Από τις τρεις φάσεις παράδοσης, η σάρωση διαρκεί το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Σύμφωνα με τις μελέτες, ο λανθάνων χρόνος της φάσης σάρωσης αντιπροσωπεύει περίπου το 90% του συνολικού λανθάνοντος χρόνου παράδοσης.

Στην παθητική σάρωση, ένας ασύρματος κόμβος περιμένει τα μηνύματα σήματος που αποστέλλονται από το AP για να ανακοινώσουν την παρουσία τους. Η παθητική σάρωση είναι αργή, περίπου στα 100 χιλιοστά του δευτερολέπτου, από προεπιλογή. Στην ενεργή σάρωση, ο κόμβος στέλνει μηνύματα αίτησης διερεύνησης, στα οποία απαντούν τα κοντινά AP με μηνύματα απόκρισης.

Γενικά, σε συστήματα CBTC, η ενεργός σάρωση υιοθετείται για την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης. Ωστόσο, δεδομένου ότι συνήθως ο κόμβος πρέπει να ανιχνεύει όλα τα κανάλια συχνότητας, ο χρόνος που απαιτείται είναι μεγάλος.

Η επιλογή των καναλιών συχνότητας για χρήση κατά την ανάπτυξη ενός παρατρόχιου ραδιοδικτύου είναι συχνά ανεξάρτητη από την ανάπτυξη του συστήματος ραδιοεπικοινωνιών CBTC. Σαν συνέπεια, ακόμη και αν χρησιμοποιούνται μόνο δύο κανάλια, δεν είναι ασυνήθιστο το σύστημα επικοινωνίας να έχει αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ανιχνεύει όλα τα κανάλια από προεπιλογή.

Υπάρχουν ωστόσο, διαφορετικές προσεγγίσεις για τη μείωση του χρόνου που αφιερώνεται στη σάρωση. Συχνά χρησιμοποιείται αρχικά η παθητική σάρωση όπου ο κόμβος μαθαίνει για το επόμενο διαθέσιμο AP ενώ είναι ακόμη συνδεδεμένος στο τρέχον AP.

Λόγω της γραμμικής φύσης ενός παρατρόχιου ραδιοδικτύου, το επόμενο AP για σύνδεση μπορεί να είναι προκαθορισμένο, υπό την προϋπόθεση ότι η αμαξοστοιχία διατηρεί μια ενημερωμένη βάση δεδομένων με τις πληροφορίες για όλα τα AP και, ότι όλα τα AP είναι σε καλή κατάσταση.

(2) Έλεγχος ταυτότητας: Στη φάση ελέγχου ταυτότητας, ένας κόμβος καθορίζει την ταυτότητά του με το AP που βρέθηκε στη φάση σάρωσης, ανταλλάσσοντας ειδικά μηνύματα ελέγχου ταυτότητας. Ωστόσο, ανάλογα με την υλοποίηση του κάθε προμηθευτή, αυτή η φάση μπορεί να διαρκέσει σημαντικό χρόνο, π.χ. έως ένα δευτερόλεπτο, εάν χρησιμοποιείται μια κεντρική αρχιτεκτονική ασφαλείας βασισμένη στο IEEE 802.1X που περιλαμβάνει επικοινωνία με έναν διακομιστή ελέγχου ταυτότητας.

Μερικά προϊόντα Wi-Fi υποστηρίζουν την επέκταση IEEE 802.11f, επίσης γνωστή ως πρωτόκολλο σημείου πρόσβασης (IAPP). Το IAPP προσφέρει μια μέθοδο αρχικού ελέγχου της ταυτότητας στην οποία ένα AP, μετά τον επιτυχή έλεγχο ταυτότητας με έναν κόμβο, μοιράζεται τις πληροφορίες έλεγχου ταυτότητας του εν λόγω κόμβου με τα κοντινά AP. Έτσι, η διαδικασία ελέγχου ταυτότητας μπορεί να παραλειφθεί κατά τη σύνδεση με αυτά τα AP στη συνέχεια.

Στο CBTC, όπου η απρόσκοπτη παράδοση είναι κρίσιμη, μια προσέγγιση είναι να παραλείπεται συνολικά η φάση ελέγχου ταυτότητας. Ωστόσο, το μειονέκτημα σε αυτήν την προσέγγιση είναι ότι πρέπει ο έλεγχος ταυτότητας πρέπει να εκτελείται σε επίπεδο πακέτου χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο ασφαλείας υψηλότερου επιπέδου, όπως το IP Security (IPSec).

(3) Συσχέτιση: Στη φάση συσχέτισης, ο κόμβος εγγράφεται στο AP με την ανταλλαγή ειδικών μηνυμάτων, έτσι ώστε το AP να μπορεί να προωθεί δεδομένα από / προς αυτό. Δεν υπάρχει περιθώριο βελτίωσης στο latency αυτής της φάση καθώς εξαρτάται μόνο από την καθυστέρηση μεταφοράς μηνυμάτων.

5.6 Διαμόρφωση δικτύου ραδιοεπικοινωνιών

5.6.1 Απόσταση μεταξύ AP

Η εφεδρεία είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή αξιόπιστης ραδιοεπικοινωνίας στο CBTC και είναι αποφασιστικός παράγοντας κατά τον σχεδιασμό του αριθμού και της τοποθέτησης των AP στον παρατρόchio εξοπλισμό. Με δεδομένο ότι η κίνηση του τρένου είναι σταθερή, η διαμόρφωση του ραδιοδικτύου αμαξοστοιχίας προς τροχιά είναι γραμμική, κάτι που βοηθά στη μείωση των προσπαθειών εγκατάστασης. Τα AP τοποθετούνται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη διαδρομή (track) ώστε να παρέχουν την καλύτερη δυνατή ποιότητα σήματος στο τρένο και να αποφύγονται πιθανά εμπόδια στο LOS. Για να παρέχεται συνεχή συνδεσιμότητα, η απόσταση μεταξύ APs επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι περιοχές κάλυψης των AP να αλληλεπικαλύπτονται. Οι υπολογισμοί για τον προϋπολογισμό της εγκατάστασης RF πραγματοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό της απόστασης μεταξύ των AP, και το εύρος σήματος AP παίζει βασικό ρόλο σε αυτούς τους υπολογισμούς. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η επιτόπια έρευνα για τα RF πραγματοποιείται στη συνέχεια κανονικά για τον προσδιορισμό του αριθμού και της τοποθέτησης των AP.

Μια κοινή προσέγγιση είναι να χρησιμοποιείται μια μικρή απόσταση μεταξύ AP, καθώς και μια υψηλή ισχύος μετάδοση, για να ξεπεραστούν οι παρεμβολές από άλλες συσκευές / χρήστες.

Για να διευκολυνθεί η ομαλή παράδοση, η απόσταση μεταξύ AP σχεδιάζεται με τρόπο ώστε το τρένο να είναι πάντα τοποθετημένο μέσα στην κάλυψη τουλάχιστον δύο AP. Ένα άλλο πλεονέκτημα μιας κοντινής σύνδεσης AP είναι ότι η μπροστινή κεραία μπορεί να ακούσει όχι μόνο το AP μπροστά της, αλλά και το επόμενο.

Αυτό πρακτικά αυξάνει τη διαθεσιμότητα καθώς το μπροστινό radio έχει διπλάσιο αριθμό AP από ό, τι χρειάζεται. Στην προκειμένη περίπτωση τα παρακείμενα AP πρέπει να αναπτυχθούν σε διαφορετικές συχνότητες για να αποφευχθεί οι παρεμβολές.

Η εικόνα παρακάτω παραθέτει τις περιοχές για εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντα σύμφωνα IEEE 802.11b, το οποίο προσφέρει τις μεγαλύτερες περιοχές σε σύγκριση με τα άλλα πρότυπα IEEE 802.11, 802.11a και 802.11g.

Mode	Modulation	Outdoor range (m)	Indoor range (m)
1 Mbps	DSSS	550	50
2 Mbps	DSSS	388	40
5.5 Mbps	CCK	235	30
11 Mbps	CCK	166	24
5.5 Mbps	PBCC	351	38
11 Mbps	PBCC	248	31
6 Mbps	OFDM	300	35
12 Mbps	OFDM	211	28
18 Mbps	OFDM	155	23
24 Mbps	OFDM	103	18
36 Mbps	OFDM	72	15
48 Mbps	OFDM	45	11
54 Mbps	OFDM	36	10

Εικόνα 28 Signal range

Ωστόσο, το εύρος του σήματος IEEE 802.11 εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και μπορεί να ενισχυθεί. Οι παράμετροι όπως το ύψος της κεραίας, η ισχύς μετάδοσης, το

κέρδος και η ευαισθησία του δείκτη μπορεί να ρυθμιστεί για να βελτιώσει το εύρος σήματος. Επιπλέον, το εύρος σήματος εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας, και από τη απώλεια διάδοσης.

5.6.2 Διαμόρφωση κεραίων

Μια πολυκατευθυντική κεραία παρέχει ίση κάλυψη σε όλες τις κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης, αν και η καλυμμένη απόσταση είναι μικρή. Αντίθετα, μία μονοκατευθυντική κεραία παρέχει κάλυψη σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη απόσταση κάλυψης αλλά στενότερη περιοχή κάλυψης. Ο τύπος της κεραίας που χρησιμοποιείται διαφέρει ανάλογα με τις λύσεις CBTC.

5.6.2.1 Παρατρόχια κεραία

Σε γενικές γραμμές, οι μονοκατευθυντικές κεραίες παρέχουν καλύτερη κάλυψη LOS και οι κεραίες πολλαπλής κατεύθυνσης αποδίδουν καλύτερα στο μη οπτικό πεδίο (NLOS), για παράδειγμα σε σήραγγες με καμπύλες.

Η χρήση πολυκατευθυντικών κεραιών σε γραμμικά περιβάλλοντα, όπως ένα παρατρόχιο δίκτυο παρέχει μια πιο «ευρεία» κάλυψη. Λόγω της μικρής εμβέλειας, η αμαξοστοιχία μόνο "βλέπει" ένα AP μπροστά από αυτήν, εάν τα AP είναι σε κατάλληλη απόσταση. Αυτό σημαίνει γρηγορότερη και λιγότερο περίπλοκη περιαγωγή καθώς μπορεί να αποφευχθεί η "επιλογή AP" μέσω του αλγορίθμου.

Τα προφανή μειονεκτήματα είναι ένας μεγάλος αριθμός AP που απαιτούνται για την κάλυψη μιας δεδομένης περιοχής, και μεγαλύτερη ευαισθησία σε παρεμβολές από κοντινούς χρήστες, π.χ. Wi-Fi hotspots στους σταθμούς των τρένων.

Συχνά χρησιμοποιούνται δύο μονοκατευθυντικές κεραίες, με αντίθετη κατεύθυνση, μειώνοντας τον αριθμό των AP και κάνοντας ένα πιο προβλέψιμο, γραμμικό μοτίβο, που ταιριάζει καλά σε ένα παρατρόχιο δίκτυο. Ωστόσο, το πλάτος της περιοχής κάλυψης μιας μονοκατευθυντικής κεραίας εξαρτάται από το μέγεθος του εύρους δέσμης της κεραίας. Μία κεραία AP με πολύ στενή beamwidth σημαίνει ότι η αμαξοστοιχία δεν μπορεί να δει το AP πριν να "ευθυγραμμιστεί" σωστά με το AP της περιοχή κάλυψης.

Τόσο με μονοκατευθυντικές όσο και πολυκατευθυντικές κεραίες, το τρένο βλέπει σταδιακή αύξηση της ισχύος του σήματος καθώς πλησιάζει το AP, ακολουθούμενη από μια μικρή πτώση όταν είναι δίπλα στο AP. Ωστόσο, αυτό διαφέρει όταν η αμαξοστοιχία κινείται μακριά από το AP. Στην περίπτωση μιας πολυκατευθυντικής κεραίας, η

αμαξοστοιχία βλέπει σταδιακά μείωση της έντασης του σήματος. Αντίθετα, στην περίπτωση μιας μονοκατευθυντικής κεραίας, βλέπει μια γρήγορη πτώση της ισχύος του σήματος αμέσως μετά την μετάβαση από το AP.

Ανάλογα με την τοπολογία της διαδρομής (Track) και του εδάφους, τα AP τοποθετούνται σε ιστούς για παροχή βέλτιστης κάλυψης καθώς και ευκολία συντήρησης. Το ύψος αυτών των ιστών κυμαίνεται από 50 εκατοστά έως 4 μέτρα για υπόγειες εγκαταστάσεις και 4-6 μέτρα για υπαίθρια εγκατάσταση. Συχνά το ύψος της κεραίας επιλέγεται να είναι πάνω από το επίπεδο της οροφής της αμαξοστοιχίας, π.χ. μεταξύ 0,5 και 1 μέτρου, ώστε να επιβεβαιώνεται ότι τα ραδιοκύματα δεν κόβονται από την αμαξοστοιχία.

5.6.2.2 Κεραία αμαξοστοιχίας

Οι κεραίες γενικά εγκαθίστανται σε επαρκές ύψος στην οροφή της αμαξοστοιχίας, έτσι ώστε η διαδρομή Line-of-Sight (LOS) προς το AP να μην εμποδίζεται από άλλα τρένα. Γενικά, οι μονοκατευθυντικές κεραίες προτιμώνται επί του συρμού, για τον λόγο που συζητήθηκε παραπάνω. Ωστόσο, η χρήση μονοκατευθυντικών κεραιών τόσο στο AP όσο και στο τρένο μπορεί να κάνει την περιαγωγή πιο δύσκολη, καθώς αυτό σημαίνει ότι οι περιοχές κάλυψης τους πρέπει να ευθυγραμμιστούν τέλεια για να είναι σε θέση να δουν το ένα το άλλο. Για αυτόν τον λόγο, ορισμένα συστήματα CBTC χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό μονοκατευθυντικών και πολυκατευθυντικών κεραιών, π.χ. μονοκατευθυντικές κεραίες στα τρένα και πολυκατευθυντικές κεραίες σε AP ή αντίστροφα.

5.7 Διαθεσιμότητα συστήματος

Δεδομένου ότι αφορά τις σιδηροδρομικές λειτουργίες και την ασφάλεια των επιβατών, η διαθεσιμότητα του δικτύου είναι πολύ κρίσιμη. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι οι προμηθευτές CBTC προσφέρουν διαθεσιμότητα 99,999% (6,05 δευτερόλεπτα εκτός λειτουργίας ανά εβδομάδα) στις λύσεις τους, ιδίως αυτές με βάση το σύστημα ραδιοεπικοινωνιών.

5.7.1 Εφεδρεία (redundancy)

Στο CBTC, η εφεδρεία (redundancy) είναι το κλειδί για υψηλή διαθεσιμότητα. Ο γενικός κανόνας είναι ότι σε οποιοδήποτε δεδομένη θέση στην τροχιά, θα πρέπει να είναι διαθέσιμα τουλάχιστον δύο AP για σύνδεση. Ένα τρένο είναι συνήθως εξοπλισμένο με δύο TU (Μονάδα τρένου), ένα σε κάθε άκρο, για να παρέχει επαρκή εφεδρεία. Κάθε TU

είναι συνήθως εξοπλισμένο με ένα radio, αν και υπάρχουν λύσεις με δύο radio. Κάθε radio είναι εξοπλισμένο με μία ή δύο κεραίες.

Η εφεδρεία πραγματοποιείται λοιπόν με τους ακόλουθους τρόπους:

- Δύο TU ανά τρένο
- Δύο radio ανά TU
- Δύο κεραίες ανά radio
- Δύο ή περισσότερες συχνότητες
- Περιορισμένες περιοχές κάλυψης AP
- Περιττές AP ανά τοποθεσία

Η εφεδρεία εξασφαλίζεται επιπλέον από την ποικιλομορφία. Έχοντας δύο κεραίες ανά radio, χωρισμένες από μια ορισμένη απόσταση, παρέχεται χωρική ποικιλομορφία, αφού δύο ανεξάρτητα σήματα που μπορούν να ληφθούν σε μια δεδομένη στιγμή, από την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ισχυρότερο σήμα. Η ποικιλομορφία της κεραίας βοηθάει να ξεπεραστεί η εξασθένιση (multipath fading). Πρόσθετη χωρική ποικιλομορφία παρέχεται αυτόματα έχοντας δύο TU ανά αμαξοστοιχία, διαχωρισμένα από το μήκος της αμαξοστοιχίας. Η χρήση δύο ή περισσότερων συχνοτήτων, είναι από μόνη της μια μορφή ποικιλομορφίας συχνοτήτων καθώς μειώνει την πιθανότητα όλα τα σήματα που εισέρχονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή να είναι αλλοιωμένα με τον ίδιο τρόπο. Ομοίως, μια τυπική πρακτική στο CBTC είναι αυτή της επανάληψης της μετάδοσης των ίδιων πληροφοριών, π.χ. πάνω σε διαφορετικά radio / κεραίες, είναι μια μορφή χρονικής ποικιλομορφίας. Μια άλλη μορφή εφεδρείας είναι η εφεδρεία τροφοδοσίας. Όταν χρησιμοποιείται η τοπολογία πολλαπλών δακτυλίων, θα πρέπει οι δακτύλιοι AP (ή δίκτυα κορμού) να είναι ανεξάρτητοι ο ένας από το άλλο και να συνδέονται με ανεξάρτητα τροφοδοτικά.

5.8 Τυποποίηση

Το πρότυπο IEEE 1474.1 , που δημοσιεύθηκε αρχικά το 1999, καθορίζει την απόδοση και τις λειτουργικές απαιτήσεις για CBTC. Ένα πρόσθετο πρότυπο IEEE 1474.3, που δημοσιεύθηκε το 2008, καθορίζει τη συνιστάμενη πρακτική για το σχεδιασμό συστήματος CBTC και την κατανομή των λειτουργιών.

Ωστόσο, σε αντίθεση με το πρότυπο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις σιδηροδρομικές γραμμές, ERTMS, το πρότυπο IEEE 1474.1-2004 για το CBTC χρησιμεύει ως απλές

οδηγίες και δεν ακολουθείται αυστηρά από τους προμηθευτές. Ως αποτέλεσμα, σχεδόν όλες οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις CBTC είναι ασύμβατες, με ιδιότητα συστήματα.

Επιπλέον, η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC), και το αντίστοιχο όργανο στην Ευρώπη, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης (CENELEC) είναι υπεύθυνες για την ανάπτυξη προτύπων για τη σιδηροδρομική βιομηχανία. Αυτά τα πρότυπα αντιμετωπίζουν τόσο τις γενικές αρχές σχεδιασμού, τις σχετικές με την ασφάλεια προδιαγραφές όσο και τις απαιτήσεις σχετικά με το λογισμικό. Ο Πίνακας παρακάτω παραθέτει τα σχετικά πρότυπα.

Πίνακας 2 Πρότυπα IEC και CENELEC

Description		IEC	CENELEC
Urban guided transport management and command/control systems	System principles and fundamental concepts	62290-1	
	Functional requirements specification	62290-2	
	System requirements specifications	62290-3	
Communication, signalling and processing systems - Safety-related communication in transmission systems			50129, 50159
Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)		62278	50126
Communication, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems		62279	50128

Στις ΗΠΑ, η American Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη ενός εγχειριδίου για τις προτεινόμενες πρακτικές στη Σιδηροδρομική γραμμή ενώ το ερευνητικό πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης MODURBAN έχει παρόμοιους στόχους σχετικά με την ανάπτυξη μίας βασικής αρχιτεκτονικής συστήματος και διεπαφών για τα αστικά σιδηροδρομικά συστήματα.

5.8.1 IEEE CBTC standard

Αυτή η ενότητα περιγράφει μερικές βασικές και σχετικές απαιτήσεις από το πρότυπο IEEE CBTC 1474.1.

Πίνακας 3 IEEE προδιαγραφές για το CBTC

Category	Parameter	Typical value
Performance limitations	Maximum number of trains that can be handled by a Zone Controller	10 to 40 trains
Location	Onboard train location measurement	Resolution Accuracy
	Resolution of wayside calculated movement authority limits	± 0.25 m to ± 6.25 m ± 5 m to ± 10 m ± 0.25 m to ± 6.25 m
Speed	Onboard speed measurement	Resolution Accuracy
	Resolution of wayside calculated speed limits	± 0.5 km/h to ± 2 km/h ± 3 km/h ± 0.5 km/h to ± 5 km/h
Communication delay	Delay in train control messages, in both directions	0.5 s to 2 s
Equipment reaction time	Wayside	0.07 s to 1 s
	Onboard	0.07 s to 0.75 s

Το πρότυπο δηλώνει ότι σε περίπτωση αστοχίας στην επικοινωνία του εξοπλισμού ή των δεδομένων, τα τρένα θα συνεχίσουν να κινούνται με ασφάλεια, σε υποβαθμισμένη λειτουργία, π.χ. με μειωμένες ταχύτητες, με τη βοήθεια ενός συμπληρωματικού συστήματος παράπλευρου εξοπλισμού (δηλαδή για την ανίχνευση της αμαξοστοιχίας).

Επιπλέον, το πρότυπο καθορίζει έναν αριθμό παραμέτρων για την επίτευξη υψηλού επιπέδου απόδοσης, μαζί με τις τυπικές τιμές τους. Ο πίνακας παραπάνω παραθέτει μερικές από τις πιο βασικές παραμέτρους. Οι χρόνοι αντίδρασης του εξοπλισμού περιλαμβάνουν το χρόνο που απαιτείται για τον υπολογισμό του ορίου της νέας Αρχής Κίνησης (LMA) από τον παράπλευρο εξοπλισμό αφού ληφθεί υπόψη η ανανεωμένη τοποθεσία του τρένου και η ώρα για τον προσδιορισμό ένα νέου προφίλ ATP της αμαξοστοιχίας λαμβάνοντας υπόψη το όριο της νέας Αρχής Κίνησης (LMA).

Το πρότυπο αναφέρει ότι ο εξοπλισμός CBTC θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί με διάρκεια ζωής 30 ετών. Επιπλέον, ένα σύστημα CBTC επιτρέπει, μεταξύ άλλων, πρόβλεψη για τα ακόλουθα:

- ευκολία συντήρησης
- δυνατότητες συντήρησης και διάγνωσης, συμπεριλαμβανομένων απομακρυσμένων διαγνωστικών δυνατοτήτων
- ενσωματωμένες δυνατότητες δοκιμής
- έγκαιρος εντοπισμός αποτυχημένων(faild) εξαρτημάτων και λειτουργιών

- καταγραφή δεδομένων, επιτρέποντας την αναδημιουργία των συμβάντων που οδηγούν σε σφάλμα
- περιοδική επαλήθευση υλικού / λογισμικού / δεδομένων ATP

Το πρότυπο καθορίζει παραμέτρους για την ανάπτυξη ενός μοντέλου ασφαλούς πέδησης. Το μοντέλο ασφαλούς πέδησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τυχόν ανακρίβειες τοποθεσίας, π.χ. λόγω διακοπών στην ραδιοφωνική επικοινωνία.

5.8.2 Απαιτήσεις ραδιοεπικοινωνίας

Το πρότυπο αναφέρει ότι η ποιότητα της σύνδεσης ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ της αμαξοστοιχίας και του παράπλευρου εξοπλισμού επαληθεύεται περιοδικά. Προσδιορίζονται οι ακόλουθες λειτουργικές απαιτήσεις και ο σύνδεσμος επικοινωνίας πρέπει να είναι ικανός για:

- Υποστήριξη σε όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες ATP, ATO και ATS
- Παροχή συνεχούς κάλυψης, συμπεριλαμβανομένης αυτής σε σήραγγες, ανυψωμένες κατασκευές και πλαγιές
- Υποστήριξη μεταφοράς δεδομένων δύο κατευθύνσεων με αρκετά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο
- Υποστήριξη ασφαλούς και έγκαιρης παράδοσης μηνυμάτων ελέγχου αμαξοστοιχίας.

6. EUROPEAN RAIL TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEMS – ERTMS

Στις αρχές του 1900 στον Μητροπολιτικό Σιδηρόδρομο του Λονδίνου, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το αυτόματο σύστημα προστασίας. Στη συνέχεια ακολούθησε η εφαρμογή του και σε άλλες χώρες τόσο στα Μετρό όσο και στα συμβατικά σιδηροδρομικά δίκτυα. Με το πέρασμα των χρόνων στην Ευρώπη, έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα αυτόματης προστασίας, τα οποία καθορίζονταν από τις εκάστοτε εθνικές απαιτήσεις, τα τεχνικά πρότυπα και τους κανόνες λειτουργίας. Αυτή η ανεξάρτητη ανάπτυξη διαφορετικών συστημάτων συνέβαλε στην παρεμπόδιση της διασυννοριακής λειτουργίας της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας στο Ευρωπαϊκό δίκτυο.

Στο πλαίσιο αυτό προέκυψε η ανάγκη για μία ενιαία αγορά κατασκευής και λειτουργίας τροχαίου υλικού και υποδομής που θα υποστηρίζει το ίδιο σύστημα αυτόματης προστασίας. Επίσης προέκυψε και η επιπλέον ανάγκη για διασυννοριακή κυκλοφορία μεταξύ των κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αποτέλεσμα των δύο αυτών απαιτήσεων ήταν η ανάγκη επίτευξης της δια λειτουργικότητας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Αυτός ο στόχος οδήγησε στο σχεδιασμό του Ευρωπαϊκού συστήματος διαχείρισης της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας (European Rail Traffic Management System – ERTMS), και την εφαρμογή του σε όλες τις χώρες τουλάχιστον της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το Ευρωπαϊκό Σύστημα Διαχείρισης Σιδηροδρομικής Κυκλοφορίας (ERTMS) είναι το πρώτο διεθνές πρότυπο για επικοινωνία ελέγχου-χειρισμού αμαξοστοιχίας και επικοινωνίας αμαξοστοιχίας-εδάφους.

Με τον όρο «δια λειτουργικότητα» νοείται η δυνατότητα του σιδηροδρομικού συστήματος να επιτρέπει την ασφαλή και συνεχή κυκλοφορία αμαξοστοιχιών με την επίτευξη των απαιτούμενων επιδόσεων στις συγκεκριμένες γραμμές. Η δυνατότητα αυτή εξαρτάται από το σύνολο των κανονιστικών, τεχνικών και επιχειρησιακών προϋποθέσεων που πρέπει να τηρούνται προκειμένου να πληρούνται οι βασικές απαιτήσεις.

Το Ευρωπαϊκό σύστημα διαχείρισης της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας αποτελείται από δύο πυλώνες :

➤ Το διευρωπαϊκό σύστημα προστασίας και ελέγχου κίνησης συρμών (European Train Control System – ETCS) που χρησιμοποιείται:

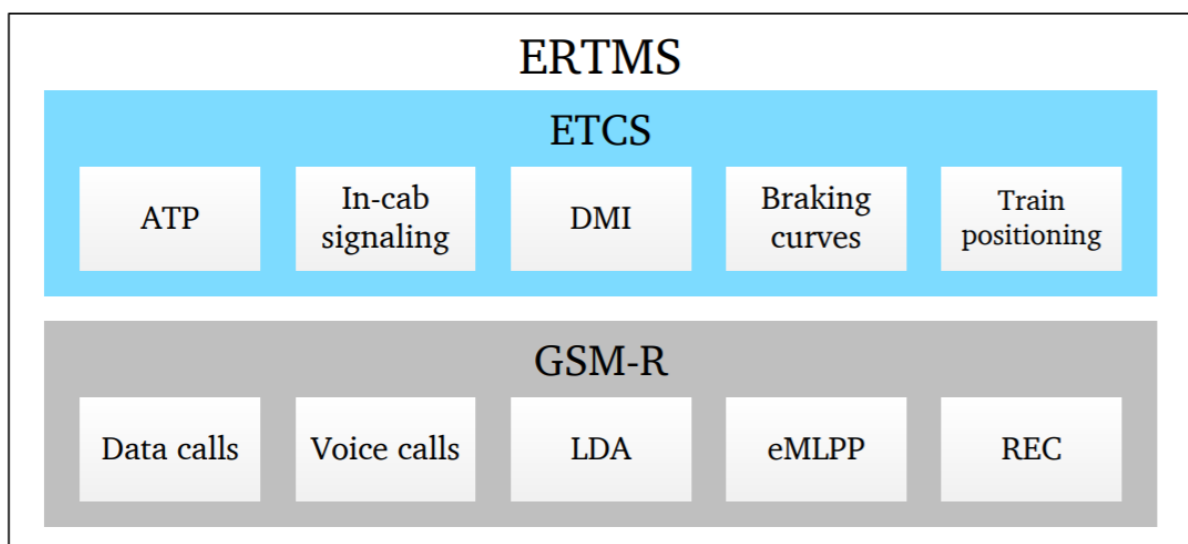
1. για τη μετάδοση δεδομένων οχήματος – γραμμής,
2. για τη φωνητική επικοινωνία μεταξύ μηχανοδηγού – ελεγκτών κυκλοφορίας,

3. για οποιαδήποτε μετάδοση πληροφοριών που αφορούν στη λειτουργία του συστήματος.

Το ETCS είναι ένα ψηφιακό σύστημα ελέγχου-χειρισμού σιδηροδρόμων. Περιλαμβάνει καμπίνα σηματοδότησης, σύστημα ATP, τυποποιημένο DMI, κινούμενο μπλοκ και πολλά άλλα.

➤ Το διευρωπαϊκό σύστημα ασύρματων επικοινωνιών μεταξύ αμαξοστοιχιών και εδάφους (Global System for Mobile telecommunications – Railway – GSM – R) το οποίο θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο .

Αυτή η τεχνολογία ραδιοεπικοινωνιών έχει δύο βασικούς σκοπούς. Πρώτον, επιτρέπει στο ETCS να μεταφέρει δεδομένα στα διασυνδεδεμένα τρένα από τα κέντρα ελέγχου. Δεύτερον, το GSM-R είναι μια ενοποιημένη λύση για όλους τους σιδηροδρόμους σε φωνητική επικοινωνία.



Εικόνα 29 Στοιχεία ERTMS

Το ERTMS λοιπόν, είναι ένα διεθνές πρότυπο πρόγραμμα που δημιουργήθηκε για την ανάπτυξη μιας κοινής διαλειτουργικής πλατφόρμας για σιδηροδρόμους, συστήματα εξουσιοδότησης και σηματοδότησης. Σήμερα, η υιοθέτηση του ERTMS είναι απαραίτητη για όλες τις σιδηροδρομικές γραμμές High Speed / High Capacity, αλλά μπορεί να εγκατασταθεί και σε μια συμβατική γραμμή.

Το ERTMS αναπτύχθηκε αρχικά στην ΕΕ για τη διασύνδεση των σιδηροδρομικών συστημάτων στην ήπειρο. Ωστόσο, λόγω πολλών πλεονεκτημάτων του συστήματος, άλλες χώρες σε όλο τον κόσμο άρχισαν επίσης να το αναπτύσσουν. Έτσι, εκτός Ευρώπης, το ERTMS χρησιμοποιείται ή σχεδιάζεται να χρησιμοποιηθεί σε: Αλγερία,

Αργεντινή, Αυστραλία, Βραζιλία, Κίνα, Αίγυπτος, Ινδία, Ινδονησία, Καζακστάν, Λιβύη, Μαλαισία, Μεξικό, Μαρόκο, Νέα Ζηλανδία, Ρωσία, Σαουδική Αραβία, Νότια Κορέα, Ταϊβάν, Τουρκία και Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Έτσι το ERTMS σταδιακά μετατρέπεται από ένα ευρωπαϊκό πρότυπο σε ένα παγκόσμιο πρότυπο με μια ευρεία υποστήριξη από χώρες σε όλο τον κόσμο.

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα που προσφέρει το ERTMS είναι τα εξής:

- Βελτίωση της διαλειτουργικότητας των σιδηροδρόμων με τη δημιουργία ενός νέου κοινού Ευρωπαϊκού προτύπου, που επιτρέπει την αδιάλειπτη διασυνοριακή λειτουργία τρένων.
- Εισαγωγή ενός νέου συστήματος ελέγχου εντολών για τρένα υψηλής ταχύτητας, τα οποία θα αντικαταστήσει τελικά τα παλαιά πρότυπα ελέγχου-εντολών στην Ευρώπη
- Αύξηση της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας των τρένων υψηλής ταχύτητας λόγω της σηματοδότησης εντός καμπίνας και της αυτόματης προστασίας αμαξοστοιχίας (ATP).
- Αύξηση της χωρητικότητας του κομματιού με τη χρήση του concept του κινούμενου μπλοκ και των δυναμικών καμπυλών πέδησης.
- Μειωμένη πολυπλοκότητα της εργασίας του οδηγού αμαξοστοιχίας, χάρη σε έναν τυποποιημένο οδηγό
- Διεπαφές μηχανής (DMI) για όλα τα ευρωπαϊκά τρένα
- Μείωση παρατρόχιου εξοπλισμού σηματοδότησης.
- Δημιουργία ενός ενιαίου συστήματος ραδιοεπικοινωνίας, το οποίο θα υποστηρίξει το νέο σύστημα ελέγχου εντολών. Το νέο ραδιοσύστημα θα αντικαταστήσει επίσης όλα radio φωνητικής επικοινωνίας παλαιού τύπου, π.χ.: ραδιόφωνο τρένου-εδάφους, ραδιόφωνο σήραγγας, ραδιόφωνο διακλάδωσης κ.λπ.
- Εισαγωγή σιδηροδρομικής κλήσης έκτακτης ανάγκης (REC) που προσφέρει γρήγορη και αξιόπιστη επικοινωνία σε περίπτωση επικίνδυνης κατάστασης.
- Μειώσεις κόστους χάρη σε μια ενιαία ευρωπαϊκή αγορά. Η Τυποποίηση του, το σύστημα ελέγχου εντολών και επικοινωνίας ανοίγει τις τοπικές εθνικές αγορές στον ξένο ανταγωνισμό. Αυξάνει επίσης τον αριθμό των προμηθευτών.

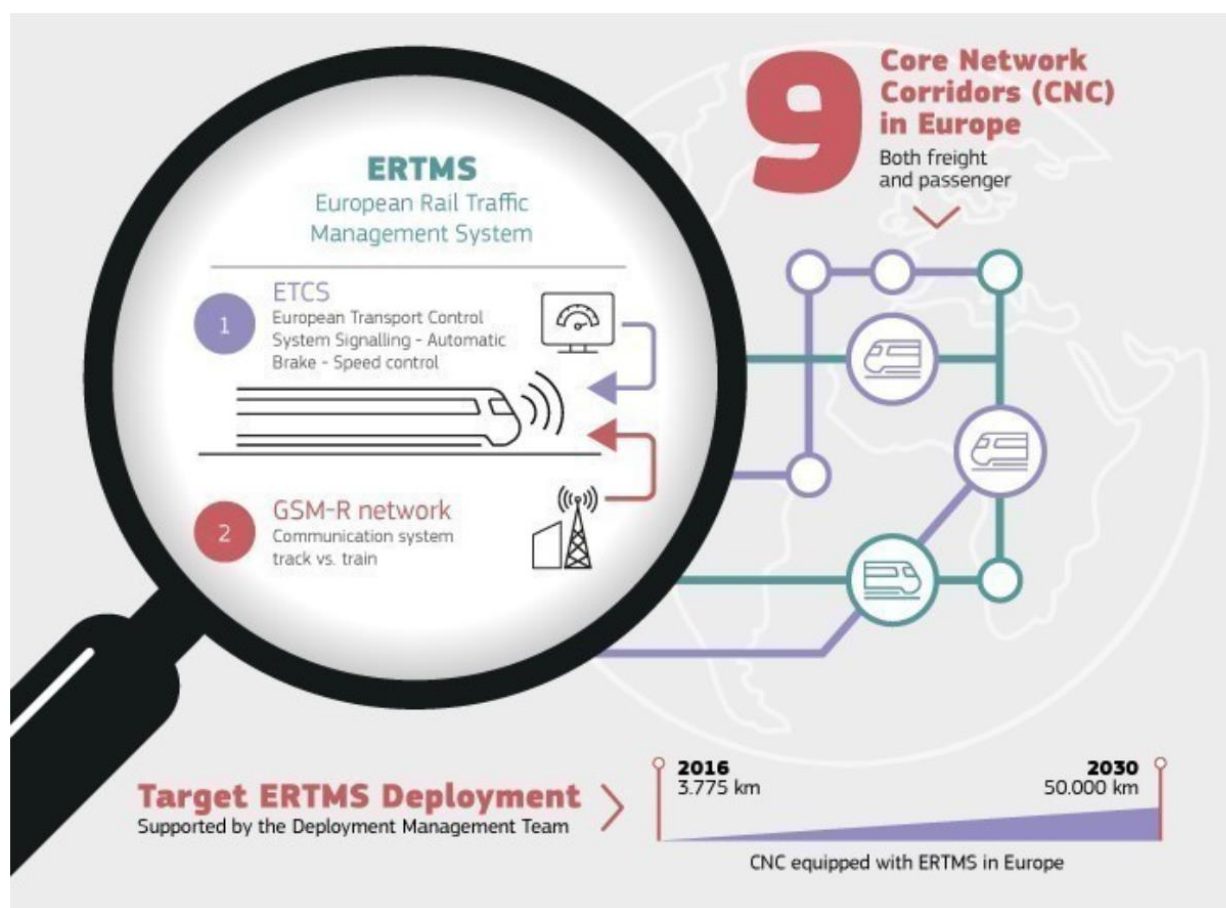
6.1 European Train Control System - ETCS

Το σύστημα ETCS έχει μια μακρά πορεία από την αρχική του σύλληψη στις αρχές της δεκαετίας του 1990 (η αρχική πρωτοβουλία για ένα νέο σύστημα αποδίδεται στην UIC και στην ΕΕ, το 1989), ως τη σημερινή του διαμόρφωση. Οι προδιαγραφές του έχουν τεθεί με μια σειρά από νομικά και κανονιστικά κείμενα. Το θεμελιοδέστερο όλων είναι η Ευρωπαϊκή Οδηγία περί δια λειτουργικότητας. Η πρώτη Οδηγία ήταν η 96/48/ΕΕ, που έθεσε την απαίτηση δια λειτουργικότητας στο δίκτυο υψηλών ταχυτήτων.

Μετά την έκδοση της 96/48/ΕΕ, ακολούθησαν νέες οδηγίες, αρχικά και για το «Συμβατικό Δίκτυο», ενώ στη συνέχεια, με την Οδηγία 2008/57/ΕΕ οι οδηγίες ενοποιήθηκαν για το σύνολο του διευρωπαϊκού δικτύου, συμβατικού και υψηλών ταχυτήτων. Η τελευταία οδηγία περί δια λειτουργικότητας είναι η 2016/797.

Οι εκάστοτε εν ισχύ οδηγίες ορίζουν ότι για κάθε υποσύστημα του διευρωπαϊκού δικτύου (π.χ. υποδομή, τροχαίο υλικό κλπ.) θα εκδίδεται μία Τεχνική Προδιαγραφή Δια λειτουργικότητας (TSI/ΤΠΔ).

Το ETCS, το οποίο είναι το υπερσύγχρονο σύστημα ελέγχου και σηματοδότησης σιδηροδρόμων, είναι ένα σύστημα βασισμένο στην επικοινωνία που διαχειρίζεται και επιβλέπει την κίνηση των αμαξοστοιχιών.



Εικόνα 30 Πλάνο υλοποίησης ERTMS

Πρέπει να σημειωθεί ότι το ETCS δεν αντικαθιστά το πρόγραμμα οδήγησης, επομένως δεν παρέχει αυτόματη λειτουργία αμαξοστοιχίας (ATO). Ωστόσο, το σύστημα υποστηρίζει το πρόγραμμα οδήγησης και αντιδρά σε περίπτωση επικίνδυνου σφάλματος. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά που παρέχονται από το ETCS είναι:

- **Η σηματοδότηση εντός καμπίνας** είναι μια ιδέα που αντικαθιστά τα κλασικά σήματα έγχρωμου φωτός με μια διαδραστική οθόνη που ονομάζεται Interface Machine Driver (DMI). Το DMI, το οποίο τοποθετείται στην καμπίνα του τρένου, εμφανίζει όλες τις εντολές και απαραίτητες πληροφορίες για τον οδηγό. Επομένως, ο κίνδυνος που μπορεί να οδηγήσει τον οδηγό ώστε να χάσει ή να παρερμηνεύσει ένα σήμα μειώνεται πολύ. Επιπλέον, οι πληροφορίες στο DMI είναι συχνά πιο λεπτομερές και ακριβείς από τις πληροφορίες που μεταδίδονται από τα φωτεινά σήματα. Ως εκ τούτου, η σηματοδότηση εντός καμπίνας συμβάλλει τόσο στην ασφάλεια και αποτελεσματικότητα της λειτουργίας της αμαξοστοιχίας. Είναι συχνά ένα υποχρεωτικό χαρακτηριστικό για τα τρένα που τρέχουν γρηγορότερα από 160 km / h.

- **Η αυτόματη προστασία αμαξοστοιχίας** είναι ένα σύστημα υπεύθυνο για την επίβλεψη του μηχανοδηγού. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή ενός ενσωματωμένου

υπολογιστή που έχει γνώση σχετικά με τα όρια ταχύτητας, τα χαρακτηριστικά της αμαξοστοιχίας και την ασφάλεια της θέσης στάθμευσης. Με βάση αυτά, το ATP υπολογίζει την καμπύλη πέδησης που καθορίζει ποια πρέπει να είναι η ταχύτητα της αμαξοστοιχίας σε κάθε σημείο κατά μήκος της γραμμής. Στη συνέχεια, συγκρίνοντας αυτήν την υπολογισμένη ταχύτητα με την πραγματική ταχύτητα και θέση της αμαξοστοιχίας, το σύστημα επαληθεύει εάν ο οδηγός συμμορφώνεται με όλους τους κανόνες και εάν η αμαξοστοιχία μπορεί να σταματήσει με ασφάλεια πριν φτάσει στη θέση στάσης. Αν το σύστημα ανιχνεύει ότι η αμαξοστοιχία τρέχει πολύ γρήγορα ή ο οδηγός δεν αντιδρά εφαρμόζεται το σήμα, αυτόματου φρεναρίσματος .

Το ETCS έχει τρία επίπεδα εφαρμογής: 1, 2 και 3 . Όλα τα επίπεδα παρέχουν τη σηματοδότηση στην καμπίνα και το ATP. Ωστόσο, διαφέρουν ως προς την αποδοτικότητα, τις επενδύσεις κόστους και τη συμβατότητα με την παλαιά σηματοδότηση. Χάρη σε αυτά τα πολλαπλά επίπεδα, οι σιδηρόδρομοι μπορούν να προσαρμόσουν το σύστημα στις ειδικές απαιτήσεις και τη στρατηγική τους.

Το ETCS αντικαθιστά τον τρόπο με τον οποίο ο οδηγός λαμβάνει σήματα (εντολές) από το σύστημα και εισάγει στοιχεία που επιβλέπουν την κίνηση των αμαξοστοιχιών. Ωστόσο, δεν μπορεί να αντικαταστήσει ολόκληρο το παλαιό σύστημα σηματοδότησης, αλλά βασίζεται πάνω του. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα , οι συνδυασμοί, οι μετρητές αξόνων (ή άλλη ανίχνευση τροχιάς), οι μηχανές σημείων, και τα συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας είναι ακόμη απαραίτητα. Ωστόσο, αυτά τα στοιχεία του συστήματος σηματοδότησης είναι εκτός πεδίου εφαρμογής του προτύπου ETCS και διαφέρει από προμηθευτή σε προμηθευτή.

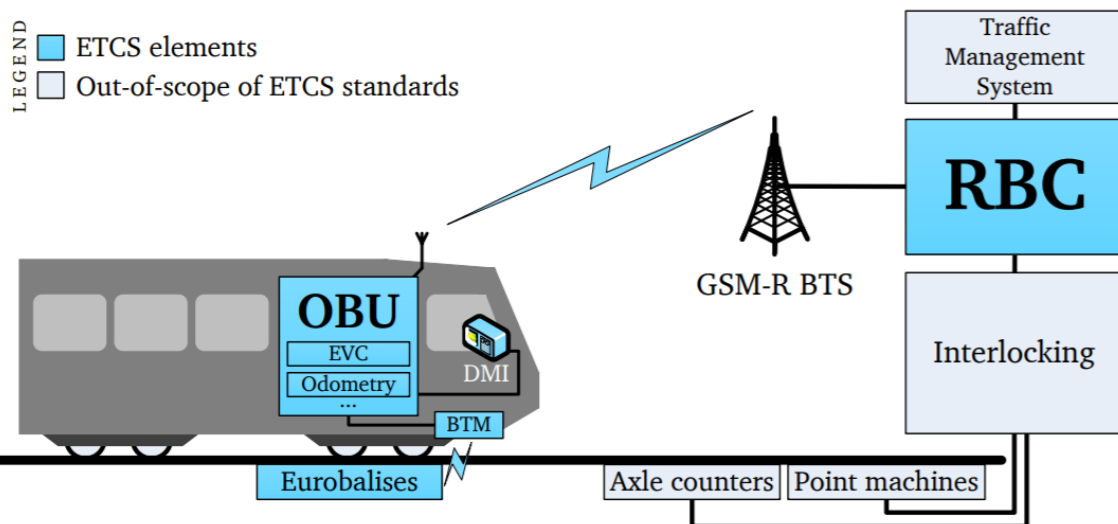


Figure 2.3: Schematic overview of ETCS Level 2 architecture

Εικόνα 31 Σχηματική Απεικόνιση της αρχιτεκτονικής ETCS επίπεδο 2

6.2 Αρχιτεκτονική ETCS

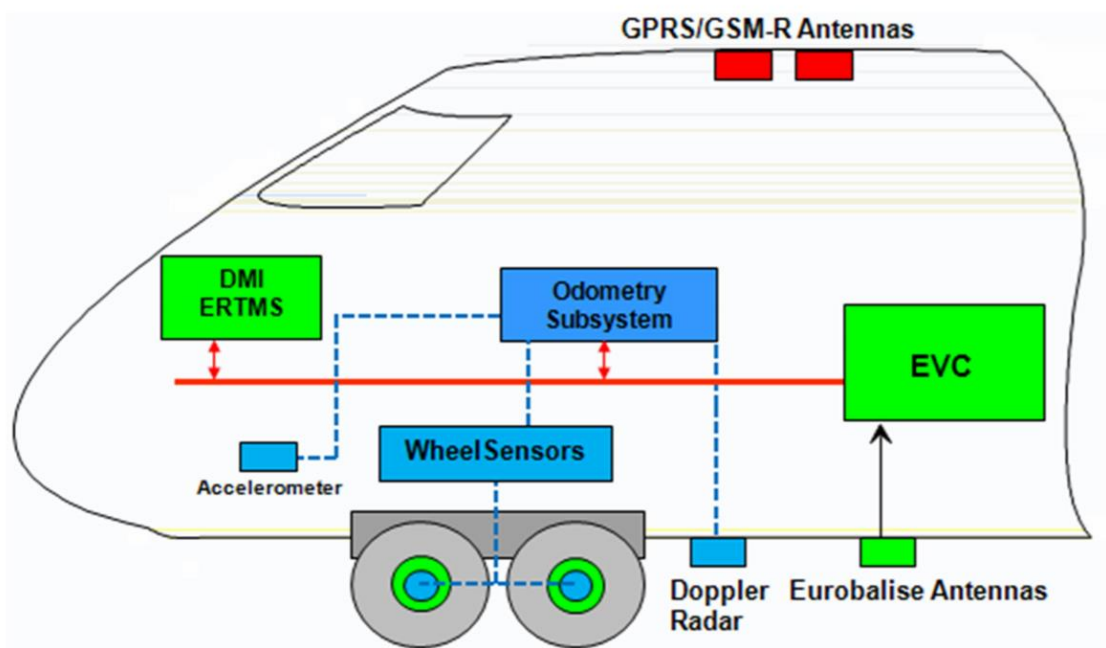
Όσο αφορά την αρχιτεκτονική, το ETCS χωρίζεται σε δύο γενικά μέρη: εποχούμενο (on-board) και το παράπλευρο μέρος (trackside). Το παράπλευρο μέρος (trackside) αποτελείται από το Κέντρο Ραδιοκλεισμάτων (RBC) και Eurobalises. Το εποχούμενο μέρος αποτελείται από την ενσωματωμένη μονάδα (OBU) και τα υποστηρικτικά στοιχεία της.

Στοιχεία παράπλευρου-παρατρόχιου ETCS: Το Radio Block Center (RBC) είναι το κύριο στοιχείο του παρατρόχιου τμήματος. Είναι ένας κεντρικός υπολογιστής που διαχειρίζεται όλα τα τρένα που εκτελούνται εντός της περιοχής του. Όπως φαίνεται στην εικόνα 31, το RBC έχει διασυνδέσεις με το Σύστημα Διαχείρισης Κυκλοφορίας, τη σύμπλεξη και το τρένο OBU. Ωστόσο, μόνο η διεπαφή με το OBU είναι τυποποιημένη. Οι υπόλοιπες δύο είναι λύσεις που αναπτύσσονται ανάλογα με το σύστημα του Προμηθευτή. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τρεις διεπαφές, το RBC λαμβάνει μια λεπτομερή επισκόπηση της περιοχής που είναι υπεύθυνο. Το Σύστημα Διαχείρισης Κυκλοφορίας παρέχει τα τρέχοντα χρονοδιαγράμματα και ενημερωμένο επιχειρησιακό σχέδιο για κάθε αμαξοστοιχία. Οι OBU παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα και τη θέση των αμαξοστοιχιών. Η σύμπλεξη είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση και το κλείδωμα διαδρομών τρένου – και αποτελούν δέσμευση για την προστασία των διαδρομών του σιδηροδρομικού δικτύου. Το RBC διαχειρίζεται την κίνηση των τρένων χρησιμοποιώντας το Movements Authorities (MA). Ένα MA είναι ένα ψηφιακό μήνυμα που περιέχει ένα φάκελο ταχύτητας / απόστασης, δηλαδή ένα φορέα δεδομένων με τον

καθορισμό των ακριβών ορίων ταχύτητας στο τμήμα της γραμμής μπροστά από κάθε αμαξοστοιχία. Κάθε MA περιλαμβάνει το End of Movement Authority (EoMA), δηλαδή τη θέση στάσης που η αμαξοστοιχία δεν επιτρέπεται να περάσει έως ότου εκδοθεί νέα MA.

Εκτός από το RBC, το άλλο παρατρόχιο στοιχείο είναι το Eurobalise, το οποίο είναι ένας αναμεταδότης εγκατεστημένος μεταξύ των σιδηροτροχιών. Καθώς περνάει από ένα Eurobalise, το τρένο λαμβάνει ένα σήμα χαμηλού ρυθμού bit. Στο ETCS Level 2, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την παράδοση στατικών πληροφοριών, για παράδειγμα, σχετικά με την ακριβή θέση του Eurobalise ή σε σχέση με την ευθύνη του RBC για μια συγκεκριμένη περιοχή.

Στοιχεία εποχούμενου ETCS: Το On-board Unit (OBU) είναι ένα σύνολο στοιχείων ETCS εγκατεστημένα στο τρένο. Το OBU αποτελείται από το European Vital Computer (EVC), DMI, Balise Transmission Module (BTM), ένα σύστημα οδομετρίας και μια μονάδα ραδιοεπικοινωνίας GSM-R .

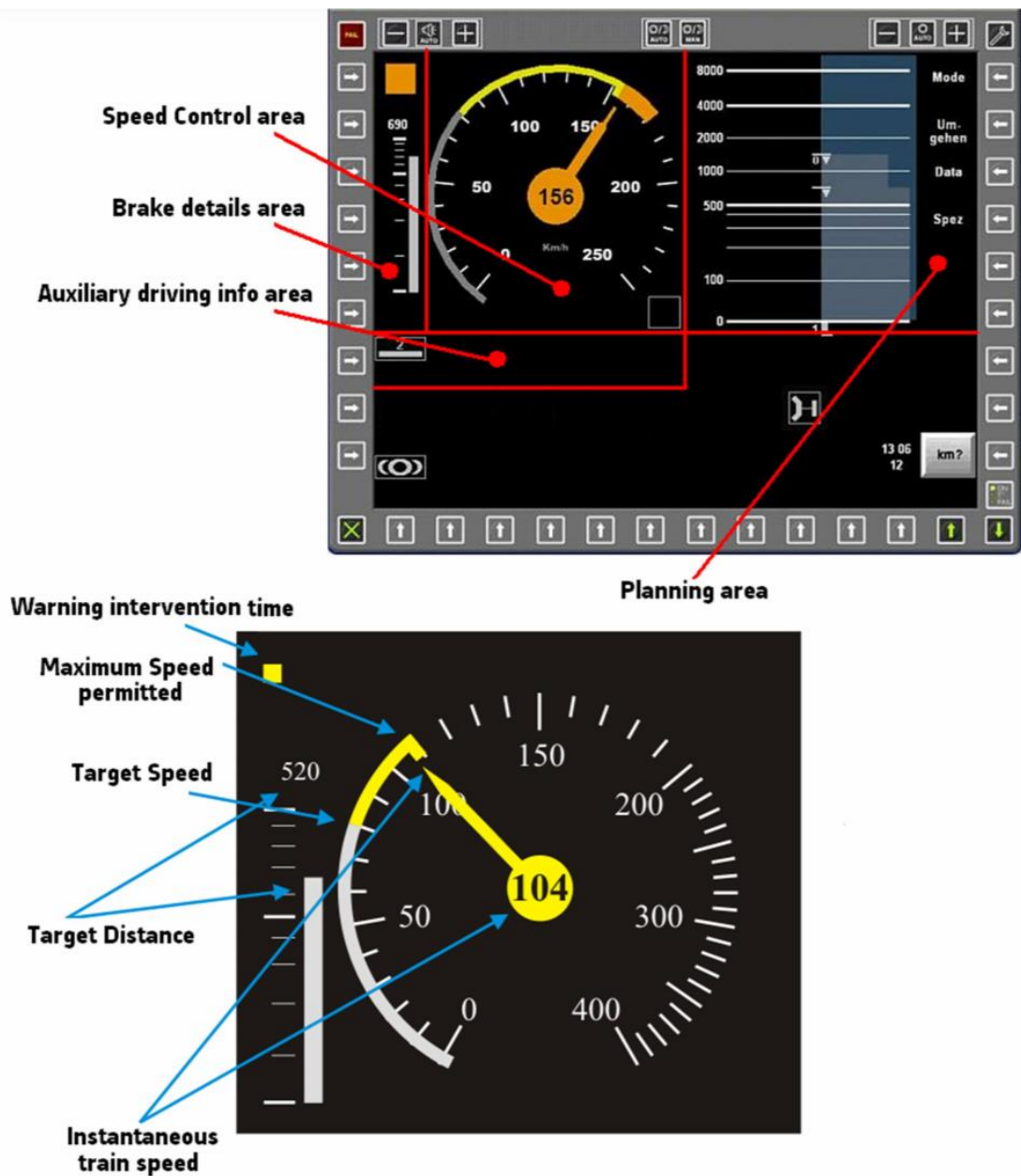


Εικόνα 32 Εξοπλισμός εντός αμαξοστοιχίας

Το EVC περιέχει μια λογική του συστήματος, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία παρέχουν διασυνδέσεις και υποστηρικτικές λειτουργίες, όπως αναλύονται παρακάτω:

- Το DMI εμφανίζει όλες τις απαραίτητες εντολές και πληροφορίες για ένα πρόγραμμα οδήγησης (π.χ. όρια ταχύτητας, απόσταση από το EoMA). Έτσι, το DMI παρέχει τη λειτουργικότητα που παρέχεται από τα σήματα χρώματος φωτός στο σύστημα της

κλασικής σηματοδότησης. Ωστόσο, το DMI μπορεί επίσης να λάβει δεδομένα από τον οδηγό, π.χ. κατά την διάρκεια διαδικασία ρύθμισης του ETCS.



Εικόνα 33 DMI σύστημα

- Το σύστημα οδομετρίας καθορίζει την τρέχουσα ταχύτητα της αμαξοστοιχίας και τη θέση της σε σχέση με το τελευταίο Eurobalise. Έτσι, είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό για το ATP.



Εικόνα 34 Eurobalises στην τροχία

- Το BTM διαβάζει τις πληροφορίες που αποστέλλονται από τις Eurobalises που βρίσκονται κατά μήκος της τροχιάς . Κάθε Eurobalise στέλνει με ακρίβεια τη θέση του, η οποία χρησιμοποιείται για να διορθώσει το πιθανό σφάλμα μέτρησης της απόστασης του ενσωματωμένου συστήματος της οδομετρίας.
- Η μονάδα GSM-R παρέχει μια διεπαφή επικοινωνίας με το RBC.

Το EVC ερμηνεύει τα μηνύματα MA που εισέρχονται από το RBC (μέσω GSM-R) και υπολογίζει τις καμπύλες ασφαλούς πέδησης. Καθώς το τρένο λειτουργεί, το EVC ελέγχει εάν το πρόγραμμα οδήγησης ακολουθεί τις εντολές που εμφανίζονται στο DMI, δηλαδή το OBU ελέγχει εάν η αμαξοστοιχία λειτουργεί σύμφωνα με το εκδοθέν MA. Εάν πλησιάζει η ταχύτητα της αμαξοστοιχίας στην καμπύλη πέδησης, το EVC εκδίδει μια ηχητική προειδοποίηση. Στη συνέχεια, εάν ο οδηγός δεν αντιδράσει και επιτυγχάνεται η καμπύλη πέδησης, εφαρμόζεται ένα φρένο έκτακτης ανάγκης. Με αυτόν τον τρόπο, το ETCS παρέχει λειτουργικότητα ATP που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ανθρώπινου σφάλματος.

Ως παράδειγμα εφαρμογής, αναφέρουμε την αρχιτεκτονική που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Alstom για το σύστημα σηματοδότησης που βρίσκεται εγκατεστημένο στη γραμμή Μπολόνια-Φλωρεντία, όπως αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

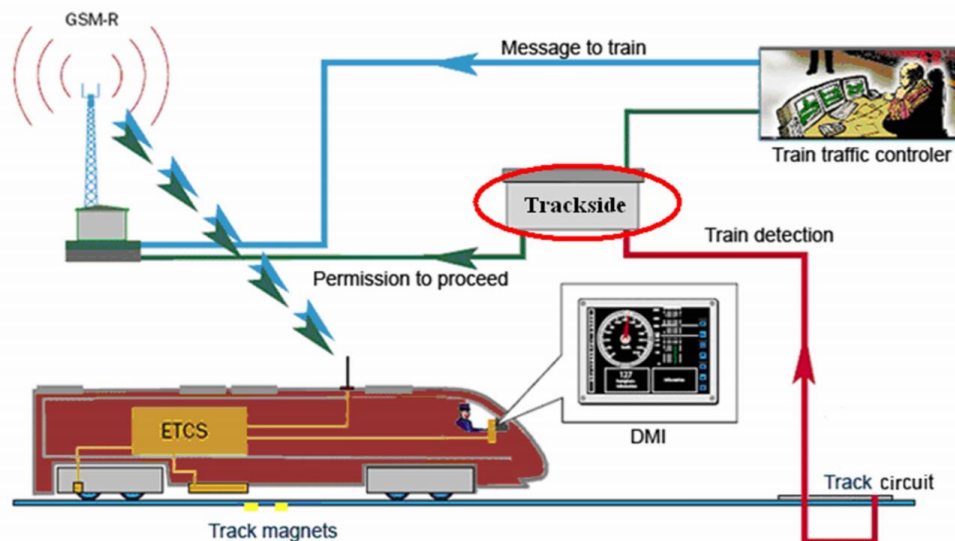


Figure 22: Communication of the trackside subsystem with other ERTMS L2 elements

Εικόνα 35 Επικοινωνία εξοπλισμού τροχίας με το υπολοιπο σύστημα ERTMS επίπεδο 2

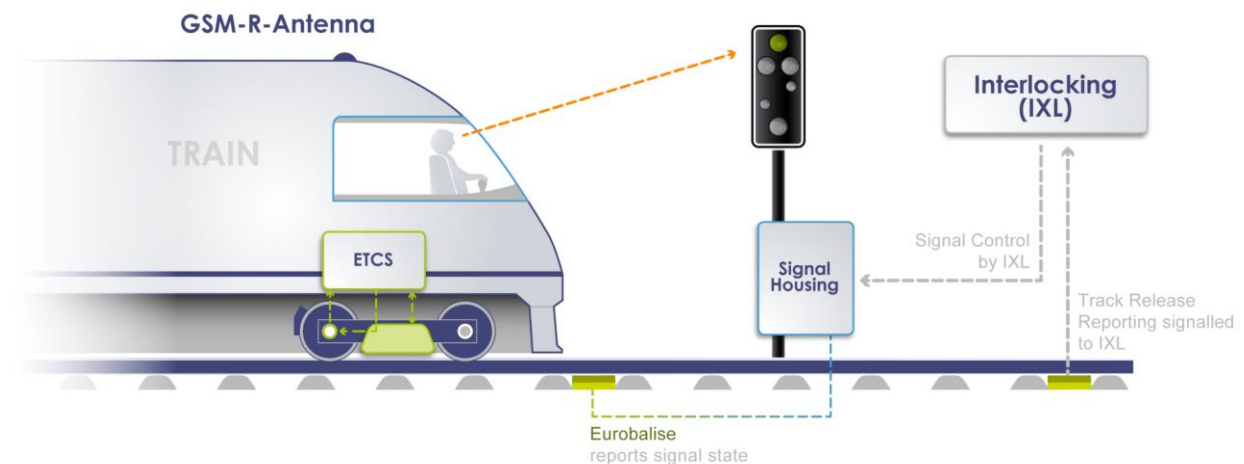
6.3 ETCS Επιπέδου 1 (Level 1)

Το επίπεδο 1 περιλαμβάνει συνεχή επίβλεψη της κίνησης της αμαξοστοιχίας (δηλ. ο ενσωματωμένος υπολογιστής εποπτεύει συνεχώς τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα και υπολογίζει την καμπύλη πέδησης έως το τέλος της αρχής κίνησης) ενώ πραγματοποιείται μη συνεχή επικοινωνία μεταξύ αμαξοστοιχίας και τροχιάς, μέσω Eurobalises.

Τα παρατρόχια σήματα είναι απαραίτητα. Οι έλεγχοι ανίχνευσης και ακεραιότητας της αμαξοστοιχίας (δηλ. ότι η αμαξοστοιχία είναι πλήρης και δεν έχει διαχωριστεί κατά λάθος) πραγματοποιούνται από τον παρατρόχιο εξοπλισμό εκτός του πεδίου εφαρμογής του ERTMS.

Το Επίπεδο 1 εφαρμόζεται ως συμπλήρωμα στο παρατρόχιο σύστημα σηματοδότησης(αλληλεξαρτήσεις, αποκλεισμός και φωτοσήματα) και επικάθεται σε αυτό. Η κύρια αποστολή του είναι η δημιουργία της Άδειας Πορείας/MA, βάσει των πληροφοριών που συλλέγονται από το παρατρόχιο σύστημα σηματοδότησης και ο έλεγχος της συμμόρφωσης του Μηχανοδηγού με αυτό. Η διασύνδεση του συστήματος με τα υπάρχοντα συστήματα αλληλεξάρτησης και αποκλεισμού αφορά μόνο τη λήψη πληροφοριών από αυτά σχετικά με τις ενδείξεις των φωτοσημάτων.

Το ETCS Level 1 μπορεί εύκολα να επικαλυφθεί από το υπάρχον εθνικό σύστημα σηματοδότησης και παρέχει σηματοδότηση καμπίνας. Με τα ληφθέντα δεδομένα, η μέγιστη ταχύτητα καθώς και οι καμπύλες πέδησης υπολογίζονται ανά πάσα στιγμή. Επιπρόσθετα με την Eurobalises είναι δυνατή η εφαρμογή του EuroLoop (loop infill) ή μιας λύσης βασισμένη στις ραδιοεπικοινωνίες (radio infill) που μεταδίδει συνεχώς δεδομένα σε μεγαλύτερη απόσταση.

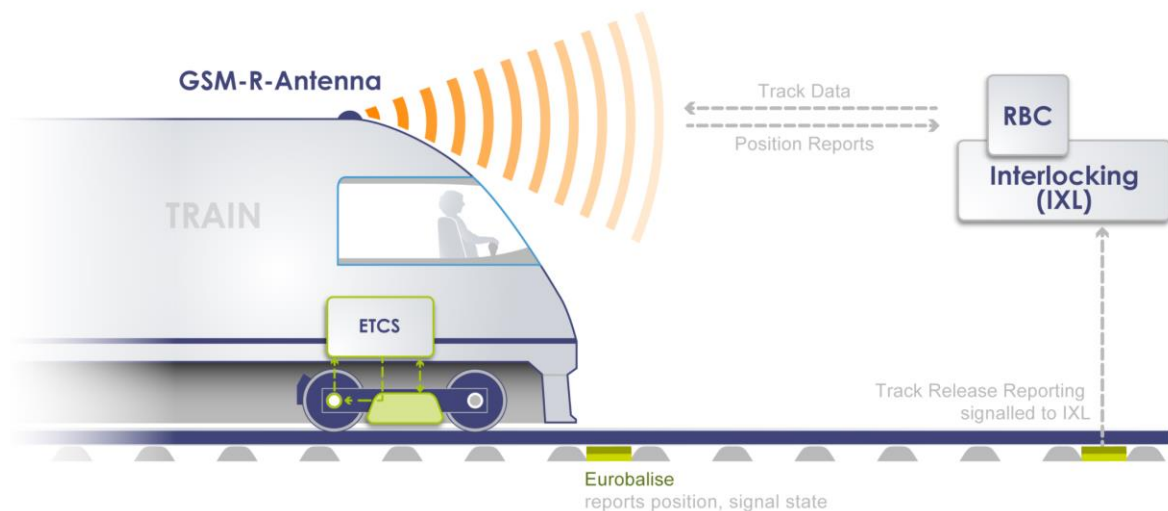


Εικόνα 36 ETCS Επίπεδο 1

6.4 ETCS Επίπεδου 2 (Level 2)

Το επίπεδο 2 περιλαμβάνει συνεχή παρακολούθηση της κίνησης της αμαξοστοιχίας με συνεχή επικοινωνία μέσω GSM-R μεταξύ της αμαξοστοιχίας και της τροχιάς.

Τα παρατρόχια σήματα είναι προαιρετικά σε αυτήν την περίπτωση και οι έλεγχοι ανίχνευσης και ακεραιότητας αμαξοστοιχίας πραγματοποιούνται από τον παρατρόχιο εξοπλισμό εκτός του πεδίου εφαρμογής του ERTMS. Το ETCS Level 2 είναι ένα σύστημα που βασίζεται στις ραδιοεπικοινωνίες και εμφανίζει τις πληροφορίες σχετικά με την σηματοδότηση και την κίνηση στην καμπίνα. Η αμαξοστοιχία στέλνει συνεχώς δεδομένα στο Radio Block Center (RBC) για να αναφέρει την ακριβή θέση και κατεύθυνση του. Τα Eurobalises χρησιμοποιούνται ως παθητικοί αισθητήρες που ενημερώνουν για την θέση. Τα τρένα βελτιώνουν τη θέση τους με επιπλέον αισθητήρες όπως επιταχυνσιόμετρα, χιλιομετρητές ή ραντάρ.



Εικόνα 37 ETCS Επίπεδο 2

6.5 ETCS Επίπεδου 3 (Level 3)

Το επίπεδο 3 περιλαμβάνει συνεχή επίβλεψη αμαξοστοιχίας με συνεχή επικοινωνία μεταξύ αμαξοστοιχίας και παρατρόχιου εξοπλισμού. Η κύρια διαφορά με το Επίπεδο 2 είναι ότι η διαχείριση της θέσης και της ακεραιότητας του τρένου εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής του συστήματος ERTMS, δηλαδή δεν υπάρχει ανάγκη για σήματα γραμμής ή συστήματα ανίχνευσης αμαξοστοιχίας εκτός των Eurobalises. Η ακεραιότητα της αμαξοστοιχίας εποπτεύεται από την αμαξοστοιχία.

Το ETCS Level 3 είναι ένα σύστημα που στηρίζεται πλήρως στις ραδιοεπικοινωνίες χωρίς χρήση του παρατρόχιου εξοπλισμού. Το Radio Block Center (RBC) λαμβάνει τη θέση κάθε αμαξοστοιχίας συνεχώς και υπολογίζει τις μικρότερες δυνατές αποστάσεις που μπορεί να τηρήσει η αμαξοστοιχία ανά πάσα στιγμή. Γι' αυτό δεν χρησιμοποιούνται πλέον τα σταθερά μπλοκ αλλά η κίνηση βασίζεται σε «κινούμενα μπλοκ». Ταυτόχρονα, είναι ζωτικής σημασίας τα τρένα να εγγυώνται την ακεραιότητά τους, καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμος παρατρόχιος εξοπλισμός για την παροχή αυτών των πληροφοριών. Το ETCS L3 βρίσκεται ακόμη υπό τυποποίηση.

7. ΡΑΔΙΟΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ERTMS ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – GSMR

7.1 Ιστορική Αναδρομή Κινητής Τηλεφωνίας

Τα πρώτα κινητά ραδιοφωνικά τηλεφωνικά συστήματα, τοποθετήθηκαν κυρίως σε οχήματα. Η Motorola ξεκίνησε την υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας στις ΗΠΑ το 1946, ενώ η πρώτη υπηρεσία στο Ηνωμένο Βασίλειο κάλυψε την περιοχή του Μάντσεστερ το 1951, με περιορισμένη κάλυψη απαιτώντας τη σύνδεση όλων των κλήσεων από έναν φορέα.

Η πρώτη γενιά (1G - αν και αυτός ο όρος τέθηκε σε χρήση μόνο όταν αναπτύχθηκε το 2G) δικτύων κινητής επικοινωνίας με χρήση ασύρματης κυψελοειδούς τεχνολογίας, ξεκίνησε το 1979 στην Ιαπωνία και στη συνέχεια στη δεκαετία του 1980 διαδόθηκε σε άλλες χώρες. Ήταν ένα υβρίδιο ψηφιακής σηματοδότησης, που συνέδεσε τους τηλεπικοινωνιακούς πύργους με το υπόλοιπο δίκτυο, και την αναλογική τεχνολογία ραδιοεπικοινωνίας με την ίδια τη φωνητική κλήση, διαμορφώνοντας τη σε υψηλότερη συχνότητα.

Το πρότυπο κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2G) ήταν πραγματικά ψηφιακό. Η υπηρεσία GSM (Παγκόσμιο Σύστημα για Κινητές Επικοινωνίες, αρχικά Groupe Spécial Mobile) ξεκίνησε στη Φινλανδία το 1991. Το GSM-R (R for Railway) είναι η προδιαγραφή η οποία οριστικοποιήθηκε το 2000 και βασίζεται σε 2G GSM.

Το Πρόγραμμα Συνεργασίας Τρίτης Γενιάς (3GPP) ιδρύθηκε το 1998 για την ανάπτυξη προδιαγραφών για προηγμένες κινητές επικοινωνίες. Ο αρχικός στόχος του 3GPP ήταν η δημιουργία ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς, με αυξημένη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων. Ωστόσο, σήμερα το 3GPP έχει δημιουργήσει τις προδιαγραφές των συστημάτων για το 4G και το 5G.

Τον Μάρτιο του 2008, εκδόθηκε ένα νέο σύνολο απαιτήσεων για το 4G. Η τεχνολογία Long Term Evolution (LTE) υποβλήθηκε ως υποψήφιο σύστημα 4G στα τέλη του 2009. Τα συστήματα LTE, σε ορισμένες περιπτώσεις, υπολείπονται των απαιτήσεων 4G ως προς τις ταχύτητες δεδομένων, ωστόσο είναι γνωστά ως 4G LTE.

Το 5G είναι η επόμενη γενιά ασύρματων τηλεπικοινωνιών που προσφέρει ακόμα μεγαλύτερη ταχύτητα, χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο και μεγαλύτερη κλίμακα ανάπτυξης.

7.2 GSM-R

Το GSM-R αποτελεί όπως αναφέρθηκε αυτόνομο πυλώνα του συστήματος ERTMS και στην αρχική του σύλληψη αποσκοπούσε στην υψηλής αξιοπιστίας ασύρματη φωνητική επικοινωνία και διαβίβαση δεδομένων μεταξύ Μηχανοδηγών και προσωπικού εδάφους. Είναι ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας το οποίο σε σχέση με τη συμβατική κινητή τηλεφωνία που χρησιμοποιείται στις καθημερινές επικοινωνίες (GSM), διαθέτει λόγω της διαμόρφωσης του εξοπλισμού του πολύ υψηλότερη ασφάλεια, διαθεσιμότητα, αξιοπιστία και δυνατότητα χρήσης ακόμα και όταν ο συρμός κινείται με υψηλές ταχύτητες (ως 500km/h). Επιπλέον έχει τη δυνατότητα κλήσεων με ιεραρχημένη προτεραιότητα, κατάλληλων για τη σιδηροδρομική κυκλοφορία (κλήση κινδύνου, ομαδικές κλήσεις, κλήσεις προς συνδρομητές σε εντοπισμένη περιοχή του δικτύου κ.ά.). Το GSM-R όμως αποτελεί και δομικό στοιχείο του συστήματος προστασίας/ελέγχου, χρησιμοποιούμενο στην αμφίδρομη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του εποχούμενου εξοπλισμού και του Ασύρματου Κέντρου Αποκλεισμού/RBC (για τα Επίπεδα 2 και 3) ή των Μονάδων Ασύρματης Ενδιάμεσης Επικαιροποίησης (για το Επίπεδο 1). Έτσι σε γραμμές εξοπλισμένες για λειτουργία Επιπέδων 2 ή 3 θα πρέπει να υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός για την υποστήριξη του GSM-R (σταθμούς βάσης κλπ.).

Το GSM-R παρέχει δύο βασικές σιδηροδρομικές υπηρεσίες:

- Επικοινωνία δεδομένων αμαξοστοιχίας προς τον παρατρόchio εξοπλισμό για ETCS Επίπεδο 2 και 3.
- Φωνητική επικοινωνία με ειδικά χαρακτηριστικά απαραίτητα για τους σιδηροδρόμους.

Το δίκτυο GSM-R αντικαθιστά την ραδιοεπικοινωνία αμαξοστοιχίας, την ραδιοεπικοινωνία σήραγγας, την ραδιοεπικοινωνία shunting και την ραδιοεπικοινωνία συντήρησης, δηλαδή είναι μια μοναδική λύση που ικανοποιεί όλες τις ανάγκες για σιδηροδρομικές φωνητικές επικοινωνίες.

Το GSM-R είναι ένα δίκτυο αφιερωμένο αποκλειστικά στους σιδηροδρόμους. Αυτό σημαίνει ότι είναι ανεξάρτητο από άλλα δίκτυα (π.χ. εμπορικά δίκτυα GSM) και δεν είναι σε κοινή χρήση με οντότητες εκτός των σιδηροδρόμων (π.χ. αστυνομία ή άλλες δημόσιες υπηρεσίες). Επίσης, το GSM-R δεν παρέχει καμία υπηρεσία απευθείας στους επιβάτες, επομένως τα τερματικά τους δεν εντοπίζουν ούτε συνδέονται στο δίκτυο GSM-R.

7.2.1 Διαφορές GSM με GSM-R

Το GSM σχεδιάστηκε ως δίκτυο εμπορικής κινητής τηλεφωνίας. Επομένως, το πρότυπο GSM έπρεπε να τροποποιηθεί πριν μπορέσει να χρησιμοποιηθεί σε σιδηροδρομικό περιβάλλον.

Υπήρχαν αρκετοί λόγοι για αυτό:

- Το σιδηροδρομικό δίκτυο επικοινωνίας πρέπει να υποστηρίζει χρήστες (τρένα) που ταξιδεύουν με ταχύτητες έως 500 km / h.
- Διάφορες υπηρεσίες και εφαρμογές που παρέχονται από την σιδηροδρομική επικοινωνία του δικτύου και έχουν διαφορετική σημασία και διαφορετικό αντίκτυπο στην ασφάλεια των σιδηροδρόμων. Υπάρχει ανάγκη διάκρισης μεταξύ αυτών των υπηρεσιών και παροχής αυτών με διαφορετική προτεραιότητα στο δίκτυο. Ως εκ τούτου, το σιδηροδρομικό δίκτυο επικοινωνίας πρέπει να παρέχει έναν αποτελεσματικό μηχανισμό ποιότητας υπηρεσίας (QoS).
- Οι σιδηρόδρομοι απαιτούν πρόσθετα χαρακτηριστικά φωνητικής επικοινωνίας, όπως δυναμικές διευθύνσεις και ομαδικές κλήσεις.

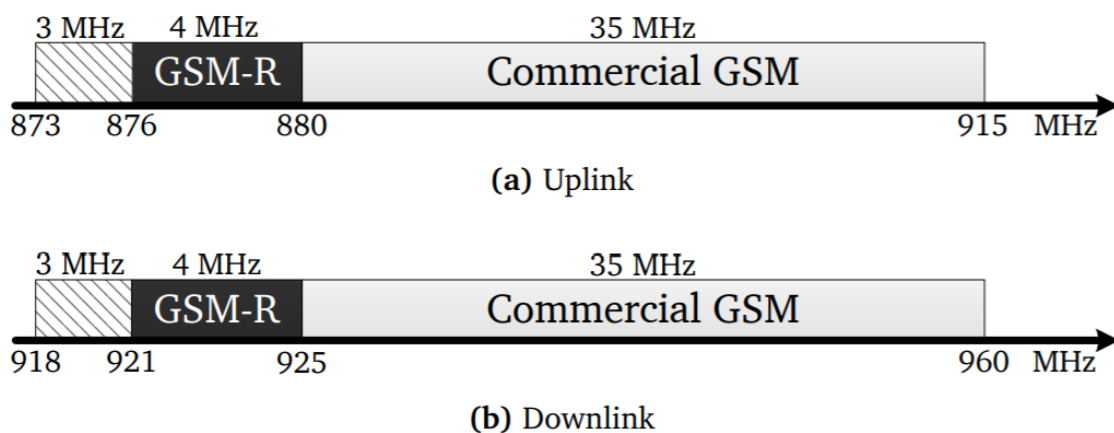
Προκειμένου να προσαρμοστεί το πρότυπο GSM που χρησιμοποιείται στο εμπόριο για τους σιδηροδρόμους, το EIRENE ξεκίνησε το 1992 στο UIC. Ο στόχος αυτού του έργου ήταν να αναπτύξει τις προδιαγραφές για ένα σιδηροδρομικό δίκτυο επικοινωνιών με βάση το GSM. Το έργο ολοκληρώθηκε το 1995 με δημοσίευση των προδιαγραφών των λειτουργικών και συστημικών απαιτήσεων. Το έργο EIRENE ακολούθησε το έργο MORANE, στόχος του οποίου ήταν η εκτέλεση τριών δοκιμαστικών δικτύων GSM-R και η επικύρωση της απόδοσης της ανεπτυγμένης τεχνολογίας. Αυτό το έργο ολοκληρώθηκε το 2000, με παράδοση των τελικών προδιαγραφών του GSM-R. Οι αρχές του GSM-R είναι οι ίδιες με το GSM . Επομένως, το GSM-R παρέχει όλες τις δυνατότητες του GSM. Ωστόσο, υπάρχουν μερικές αξιοσημείωτες προσθήκες που εισήχθησαν στο GSM-R από έργα EIRENE και MORANE όπως:

- Η βελτιωμένη προτεραιότητα πολλαπλών επιπέδων και η προτίμηση (eMLPP) είναι ένας μηχανισμός QoS που θέτει διαφορετικές προτεραιότητες σε κλήσεις και συνδέσεις στο GSM-R. Για παράδειγμα, το eMLPP διασφαλίζει ότι η ανταλλαγή μηνυμάτων ETCS δεν διακόπτεται από μια φωνητική κλήση χαμηλής προτεραιότητας. Το eMLPP είναι ένας απαραίτητος μηχανισμός σε ένα δίκτυο

όπου οι πόροι μετάδοσης μοιράζονται μεταξύ κρίσιμων για την ασφάλεια (π.χ. ETCS) και άλλων Υπηρεσιών.

- Η Λειτουργική Διεύθυνση (FA) επιτρέπει στους χρήστες να καλούν έναν συγκεκριμένο προορισμό χωρίς να γνωρίζουν έναν συγκεκριμένο αριθμό τηλεφώνου. Για παράδειγμα, μπορεί να πραγματοποιηθεί κλήση σε έναν train dispatcher για μια δεδομένη περιοχή, πατώντας απλά ένα Κουμπί "Dispatcher" σε τερματικό φωνής GSM-R. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η κλήση προς έναν οδηγό τρένου. Αντί να γνωρίζουμε τον συγκεκριμένο αριθμό τηλεφώνου που χρησιμοποιείται από ένα τρένο, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί κλήση προς τον οδηγό χρησιμοποιώντας τον αριθμό τρένου.
- Η θέση εξαρτώμενης διεύθυνσης (LDA) επιλέγει δυναμικά το καλούμενο μέλος βάσει της θέσης του καλούντος. Αυτή η δυνατότητα χρησιμοποιείται κυρίως όταν επιθυμεί ένας οδηγός τρένου να συνδεθεί με έναν "Dispatcher"-αποστολέα. Η LDA επιλέγει αυτόματα τον υπεύθυνο αποστολέα για τη δεδομένη σιδηροδρομική περιοχή. Η FA και η LDA απλοποιούν πολύ την καθημερινή σιδηροδρομική λειτουργία και επιτρέπουν την ταχύτερη πραγματοποίηση φωνητικών κλήσεων.
- Η υπηρεσία φωνητικής κλήσης ομάδας (VGCS) και η υπηρεσία φωνητικής μετάδοσης (VBS) προσφέρουν την δυνατότητα πραγματοποίησης ομαδικών και γενικών κλήσεων. Για παράδειγμα, αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από έναν αποστολέα για να ενημερώσει όλους τους οδηγούς αμαξοστοιχιών σχετικά με κάποια διαταραχή και την ακόλουθη καθυστέρηση ταξιδιού.
- Η σιδηροδρομική κλήση έκτακτης ανάγκης (REC) είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό GSM-R από την άποψη της ασφάλειας των σιδηροδρόμων. Το REC είναι μια κλήση μετάδοσης υψηλής προτεραιότητας, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιοδήποτε τερματικό φωνής GSM-R χρησιμοποιώντας ένα ειδικό REC κουμπί. Το REC προδικάζει όλες τις τρέχουσες φωνητικές κλήσεις και συνδέει τον καλούντα με τον αποστολέα. Όλα τα άλλα τερματικά στην περιοχή αρχίζουν να ακούνε αυτόματα το σε εξέλιξη REC. Ως εκ τούτου, διασφαλίζεται ότι όλο το προσωπικό των σιδηροδρόμων ενημερώνονται αμέσως για την κατάσταση έκτακτης ανάγκης.

Εκτός από τα πρόσθετα χαρακτηριστικά, μια άλλη σημαντική διαφορά στο GSM είναι η αποκλειστική ζώνη ραδιοσυχνοτήτων στην οποία λειτουργεί το GSM-R. Σε όλη την Ευρώπη οι σιδηρόδρομοι χρησιμοποιούν μια αποκλειστική ζώνη ραδιοεπικοινωνιών 4 MHz σε 921 MHz για GSM-R. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, 876–880 MHz είναι το uplink band, ενώ τα 921–925 MHz είναι το downlink band. Η κοινή μπάντα που χρησιμοποιείται σε ολόκληρη την ΕΕ είναι ένα από τα σημαντικά στοιχεία που επιτρέπουν τη διασυνοριακή διαλειτουργικότητα. Σε ορισμένες χώρες, το GSM-R έλαβε μια επιπλέον ζώνη 3 MHz: 873-876 MHz σε uplink και 918-921 MHz σε downlink. Έτσι, ένα συνολικό εύρος ζώνης 7 MHz είναι διαθέσιμο στο GSM-R εκεί.



Εικόνα 38 GSM-R συχνότητες στο uplink και στο downlink

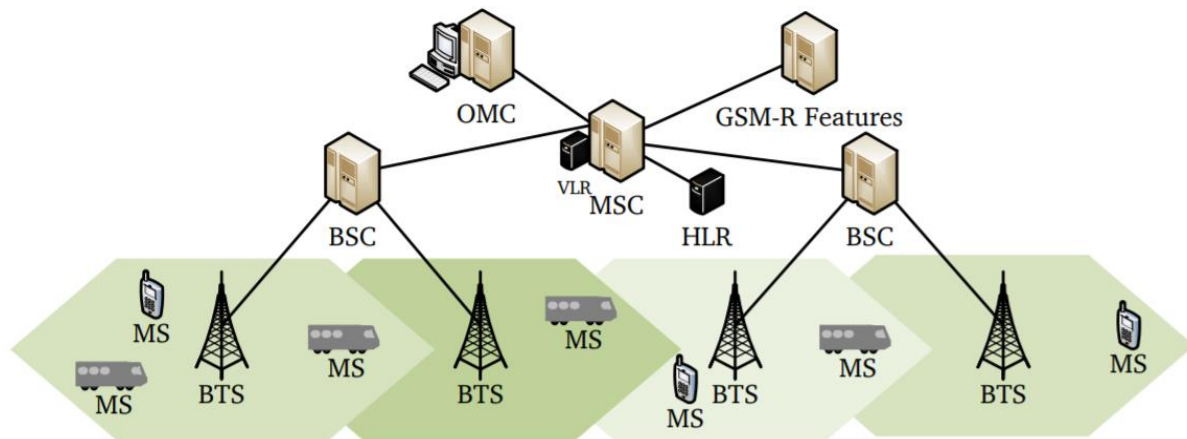
7.2.2 Αρχές και ελλείψεις GSM – R

Το δίκτυο GSM-R χωρίζεται σε τρία κύρια υποσυστήματα :

- Το Mobile Station (MS) που είναι το τερματικό χρήστη και είναι συνδεδεμένο ασύρματα στο δίκτυο. Μπορεί να είναι ένα φορητό τερματικό φωνής, μια επικοινωνία σ' ένα όχημα ή ένα ETCS OBU.
- Το υποσύστημα σταθμού βάσης (BSS) το οποίο είναι ένας ελεγκτής σταθμού βάσης (BSC) και ένας αριθμός των Σταθμών πομποδεκτών βάσης (BTS), που διαχειρίζεται ο συγκεκριμένος BSC. Το BTS είναι μια βάση ραδιοεπικοινωνίας υπεύθυνη για την ασύρματη επικοινωνία με το Mobile Station.
- Το Υποσύστημα Δικτύου και Εναλλαγής (NSS) αναφέρεται συνήθως ως «πυρήνας δικτύου». Οι πιο σημαντικοί κόμβοι στο NSS είναι: Mobile Switching Center (MSC), Home Location Register (HLR) και Visitor Location Register (VLR). Το MSC είναι το κεντρικό στοιχείο του NSS. Είναι υπεύθυνο για τη

διαχείριση του MS (π.χ. εγγραφή), δρομολόγηση κλήσεων και διαχείριση κινητικότητας .

Εκτός από τα παραπάνω τρία υποσυστήματα, το GSM-R περιλαμβάνει διακομιστές που είναι υπεύθυνοι για παροχή σιδηροδρομικών υπηρεσιών (π.χ. REC), καθώς και κόμβους υπεύθυνους για τη λειτουργία και τις εργασίες συντήρησης (Κέντρο Λειτουργίας και Συντήρησης). Η βασική αρχιτεκτονική του GSM-R φαίνεται στην Εικόνα 39.



Εικόνα 39 GSM-R αρχιτεκτονική δικτύου

7.2.3 Κύρια χαρακτηριστικά GSM – R

Τα κύρια χαρακτηριστικά του GSM-R είναι τα εξής παρακάτω:

- Δίκτυο κινητής επικοινωνίας

Το GSM-R είναι ένα κυψελοειδές δίκτυο, δηλαδή η συνδεσιμότητα με τους Κινητούς Σταθμούς (Mobile Station) ορίζεται από ένα σύστημα γεωγραφικά κατανεμημένων κελιών. Το κεντρικό σημείο του κάθε κελίου είναι το BTS. Από τη μία πλευρά, το BTS παρέχει ραδιοφωνική κάλυψη σε κάθε κελί και από την άλλη πλευρά, το BTS παρέχει συνδεσιμότητα στο κεντρικό δίκτυο και στις υπηρεσίες που προσφέρονται εκεί.

- Μετάδοση με βάση κύκλωμα

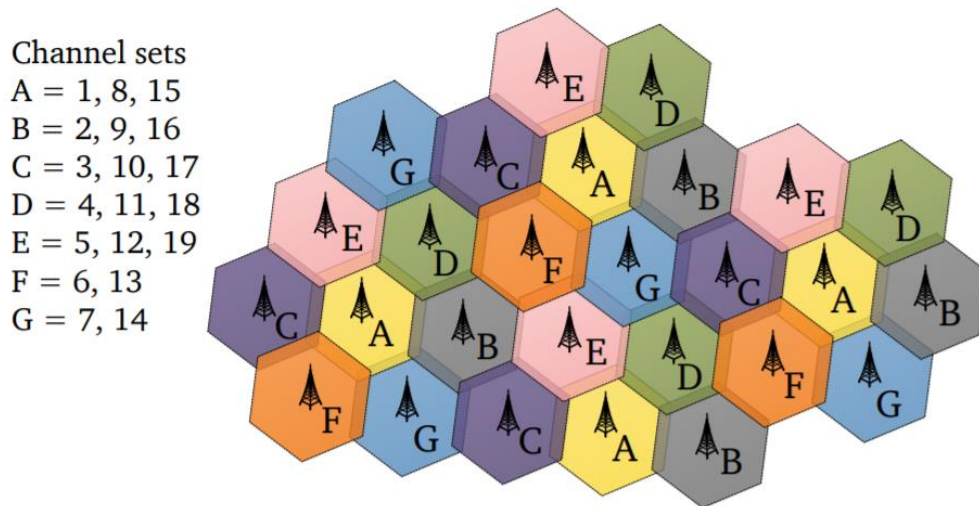
Το GSM-R είναι ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος. Επομένως, κάθε σύνδεση στο δίκτυο (κλήση ή σύνδεση δεδομένων) απαιτεί ένα ειδικό εικονικό κύκλωμα από άκρο σε άκρο. Αυτό σημαίνει ότι οι πόροι του δικτύου προορίζονται αποκλειστικά για μια συγκεκριμένη σύνδεση, τόσο στην ραδιοεπικοινωνία όσο και στους συνδέσμους του.

- Διπλός διαχωρισμός συχνότητας (FDD)

Το GSM-R είναι μια τεχνολογία FDD, οπότε το uplink (από MS σε BTS) και το downlink πραγματοποιούνται σε ξεχωριστές συχνότητες. Ως εκ τούτου, η ζώνη 4 MHz GSM-R αποτελείται στην πραγματικότητα από μια ζώνη 4 MHz σε ανερχόμενη ζεύξη και μια ζώνη 4 MHz σε κατερχόμενη σύνδεση. Οι πόροι uplink και downlink εκχωρούνται συμμετρικά, με την έννοια ότι μια ενεργή σύνδεση λαμβάνει πάντα ίσους πόρους δικτύου uplink και downlink. Στις ακόλουθες παραγράφους, συζητείται μόνο μία κατεύθυνση, αλλά η περιγραφή ισχύει και για τις δύο.

- Κανάλια συχνότητας

Η ζώνη 4 MHz GSM-R χωρίζεται σε 19 κανάλια συχνοτήτων, το καθένα από τα οποία είναι πλάτους 200 kHz. Αυτά τα κανάλια χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τις μεταδόσεις σε γειτονικά κελιά. Ως εκ τούτου, τα κανάλια συχνότητας πρέπει να κατανέμονται μεταξύ των κυψελών έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι τα γειτονικά κελιά δεν χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες (τα ίδια κανάλια). Κάθε κελί ραδιοεπικοινωνίας χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερα κανάλια ανάλογα με το αναμενόμενη ζήτηση χωρητικότητας. Ένα κανάλι συχνότητας που χρησιμοποιείται σε ένα κελί μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλο κελί, μόνο εάν η απόσταση μεταξύ τους εγγυάται ότι τα κελιά δεν παρεμβαίνουν το ένα στο άλλο. Συνήθως απαιτούνται επτά κανάλια συχνότητας για την κάλυψη μιας ευρείας περιοχής. Σε ανοιχτή σιδηροδρομική γραμμή, όπου απαιτείται μόνο γραμμική κάλυψη, τέσσερα κανάλια πιθανότατα είναι επαρκή. Αφού η μπάντα GSM-R προσφέρει 19 κανάλια, στα κελιά εκχωρούνται σύνολα καναλιών αντί για ένα κανάλι. Για παράδειγμα, εάν ορίζονται επτά σύνολα, τότε καθένα από αυτά περιλαμβάνει δύο ή τρία κανάλια. Επομένως, δύο ή τρία κανάλια συχνότητας είναι διαθέσιμα σε κάθε κελί. Μια υποδειγματική κατανομή καναλιών παρουσιάζεται στην εικόνα 40.



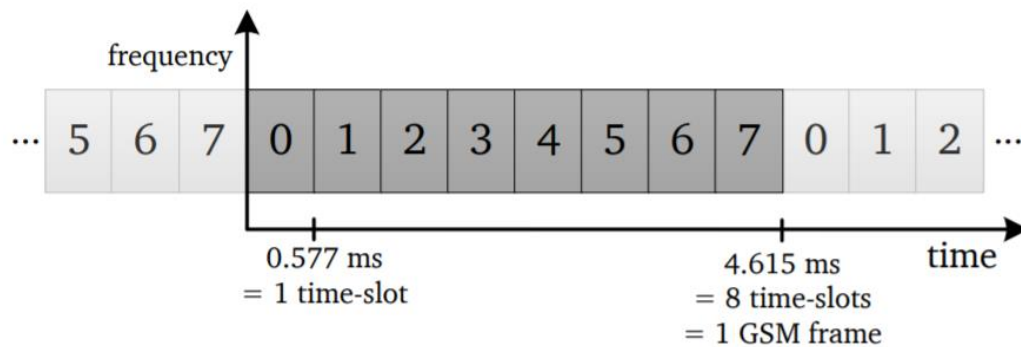
Εικόνα 40 Παράδειγμα για την κατανομή συχνοτήτων καναλιών

- (TDMA)

Προκειμένου να παρέχονται πολλές κλήσεις (κυκλώματα) ανά κελί, κάθε κανάλι συχνότητας είναι σε κοινή χρήση μεταξύ των MSs (Mobile Stations) χρησιμοποιώντας TDMA. Η μετάδοση GSM-R χωρίζεται σε καρέ (frames).

Ένα καρέ διαρκεί 4,615 ms και αποτελείται από οκτώ χρονικά διαστήματα, ένα κάθε 0,577 ms), όπως φαίνεται στην εικόνα 41. Σε κάθε κελί, τουλάχιστον μία χρονική περίοδος (time-slot) προορίζεται για την σηματοδότηση δικτύου. Οι υπόλοιπες επτά περίοδοι (slot) μεταφέρουν κλήσεις / συνδέσεις χρηστών, δηλαδή αντιστοιχούν στα εικονικά κυκλώματα.

Μια κλήση GSM-R καταλαμβάνει μία χρονική περίοδο (time-slot) TDMA σε κάθε διαδοχικό καρέ (frame). Αυτή η χρονική περίοδος (time-slot) προορίζεται αποκλειστικά για την κλήση, έως ότου ολοκληρωθεί η κλήση. Αφού επτά είναι τα διαθέσιμα χρονικά διαστήματα (time-slot), επτά ταυτόχρονες κλήσεις μπορούν να μεταφερθούν σε ένα μόνο κανάλι συχνότητας (υποθέτοντας ότι χρησιμοποιείται μία χρονική περίοδος (time-slot) για τη σηματοδότηση δικτύου). Τα ανενεργά MSs δεν καταλαμβάνουν χρονικές περιόδους (time-slot). Όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, ένα κελί συνήθως προσφέρει έως και τρία κανάλια συχνότητας και καθένα ένα από αυτά φέρει επτά συνδέσεις. Επομένως, η χωρητικότητα ενός τυπικού κελιού είναι 23 συνδέσεις.



Εικόνα 41 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου

- Διαμόρφωση ραδιοεπικοινωνίας

Η διαμόρφωση Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) χρησιμοποιείται στο GSM-R, και επιλέχθηκε λόγω της απλότητάς της σε απαιτήσεις σχετικές με εξοπλισμό και στις χαμηλές παρεμβολές που δημιουργεί κατά την διάρκεια της εκπομπής. Άρα, ανεξάρτητα από τις συνθήκες των ραδιοεπικοινωνιών, μεταδίδει μόνο ένα bit ανά σύμβολο.

7.2.4 Συνέπειες των επιλογών σχεδίασης GSM-R

Το πρότυπο GSM σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη δύο σημαντικές παραδοχές που επηρεάζουν την απόδοση και τις δυνατότητες των δικτύων GSM-R σήμερα:

1. Το δίκτυο GSM θα χρησιμοποιείται κυρίως για φωνητική υπηρεσία.
2. Τα Mobile Systems θα προσφέρουν μικρή υπολογιστική ισχύ και περιορισμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Σήμερα, αυτές οι υποθέσεις δεν ισχύουν. Αυτό συμβαίνει επειδή, από τις αρχές 1990, όταν σχεδιάστηκε το GSM, τόσο οι απαιτήσεις επικοινωνίας όσο και οι δυνατότητες των ηλεκτρονικών συσκευών έχουν εξελιχθεί σημαντικά.

Πρώτα απ' όλα, η επικοινωνία δεδομένων είναι τώρα εξίσου ή ακόμη πιο σημαντική σε σχέση με την φωνητική επικοινωνία. Επιπλέον, νέες εφαρμογές βασισμένες στην επικοινωνία καθώς και νέες υπηρεσίες προβλέπονται για τους σιδηροδρόμους. Ως εκ τούτου, το δίκτυο επικοινωνίας ενός σύγχρονου σιδηρόδρομου πρέπει να παρέχει καλή υποστήριξη για τη μετάδοση δεδομένων.

Επιπλέον, χάρη στις εξελίξεις στην τεχνολογία, η υπολογιστική δύναμη των σύγχρονων κινητών τερματικών επιτρέπει την εφαρμογή πολύ πιο προηγμένης διαμόρφωσης

καθώς και πολυπλεξίας. Επίσης, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας δεν αποτελεί πλέον τόσο μείζον ζήτημα στο σιδηροδρομικό περιβάλλον, επειδή πολλά τερματικά (MS) έχουν συνεχή τροφοδοσία.

Παρά αυτές τις σημαντικές αλλαγές, το πρότυπο GSM-R παρέμεινε χωρίς τροποποίηση. Μερικές από τις σχεδιαστικές επιλογές που έκαναν το GSM-R μια καλή τεχνολογία για τη φωνητική επικοινωνία στη δεκαετία του 1990 αποτελούν τα μειονεκτήματά του σήμερα:

- Το GSM-R δεν παρέχει μετάδοση packet-switched. Επομένως, τα δεδομένα επικοινωνίας πρέπει να παραδίδονται από δεδομένα κυκλώματος-διακόπτη (CSD), τα οποία δεν μπορούν να εκχωρήσουν τους πόρους του δικτύου βάσει της πραγματικής ζήτησης. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω εικονικών κυκλωμάτων, όπως τα φωνητικά πλαίσια. Ωστόσο, σε αντίθεση με τη μετάδοση φωνής, η επικοινωνία δεδομένων είναι πολύ συχνά κακή. Η πηγή των δεδομένων στέλνει διάφορες ποσότητες σε ακανόνιστα διαστήματα. Μια τέτοιου τύπου μετάδοση δεν ταιριάζει σε ένα σταθερό κύκλωμα που παρέχεται από το GSM-R. Ως αποτέλεσμα, κυκλώματα συχνά δεν χρησιμοποιούνται και οι πόροι του δικτύου σπαταλούνται.
- Το TDMA εκχωρεί ένα χρονικό διάστημα ενός καρέ (frame) σε κάθε σύνδεση. Αυτή η προσέγγιση ταιριάζει καλά με την φωνητική επικοινωνία όπου κωδικοποιείται ομιλία σε περιοδικά καρέ. Όσον αφορά συνδέσεις δεδομένων, όπως το ETCS, η χρήση περισσότερων χρονικών περιόδων ανά πλαίσιο είναι απαραίτητη. Ωστόσο, μία σύνδεση δεν μπορεί να πάρει περισσότερες από μία χρονικές περιόδους, ακόμη και αν υπάρχουν διαθέσιμες. Επομένως, οι πόροι της ραδιοεπικοινωνίας ενδέχεται να παραμείνουν αδιάθετοι ακόμη και αν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση.
- Οι πόροι GSM-R εκχωρούνται συμμετρικά σε ανερχόμενες και κατερχόμενες συνδέσεις. Ωστόσο, οι υπηρεσίες που βασίζονται σε δεδομένα δημιουργούν συχνά διαφορετική ποσότητα κίνησης στις δύο κατευθύνσεις. Ως εκ τούτου, η συμμετρία των συνδέσεων GSM-R σημαίνει ότι είτε το uplink είτε το downlink χρησιμοποιούν παραπάνω πόρους και ως αποτέλεσμα οι πόροι του δικτύου συνολικά σπαταλούνται.
- Το σχήμα διαμόρφωσης GMSK, το οποίο χρησιμοποιείται στο GSM-R, δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει πλήρως το πλεονέκτημα των καλών ραδιοφωνικών

συνθηκών. Το GSMK είναι αρκετό για φωνητική επικοινωνία, αλλά πιο προηγμένα σχήματα διαμόρφωσης θα επέτρεπαν στο GSM-R να μεταδίδουν σε πολύ υψηλότερα bit rates. Χάρη στις εξελίξεις της τεχνολογίας, σήμερα ακόμη και οι φορητές συσκευές μπορούν να χρησιμοποιούν πιο προηγμένες τεχνικές πολυπλεξίας και διαμόρφωσης, όπως η πολυπλεξία OFDMA και διαμόρφωση QAM.

- Ο μέγιστος ρυθμός σύνδεσης σε bit που προσφέρεται από το GSM-R είναι μόνο 9,6 kbit / s. Αυτό είναι συνέπεια πολλών επιλογών σχεδίασης όπως η επιλεγμένη διαμόρφωση και τα σχήματα πολυπλεξίας. Ένας τόσο χαμηλός ρυθμός bit δεν επαρκεί για την υποστήριξη πολλών μοντέρνων εφαρμογών, ειδικά αυτών που βασίζονται στη μετάδοση πολυμέσων.
- Η καθυστέρηση μετάδοσης στο δίκτυο GSM-R εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 200 ms και 400 ms. Εάν προστεθεί σε αυτό και το χαμηλό bitrate, η απόδοση καθυστέρησης GSM-R χαρακτηρίζεται ως πολύ κακή. Έτσι, το GSM-R δεν πληροί τις απαιτήσεις εφαρμογών ευαίσθητων σε καθυστέρηση.
- Ο χρόνος ρύθμισης κλήσεων από το GSM-R κυμαίνεται περίπου στα 5 δευτερόλεπτα. Οι απαιτήσεις του GSM-R δηλώνουν ότι η διαδικασία εγκατάστασης δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 8,5 s (στο 95% των περιπτώσεων) και 10 s (στο 100% των περιπτώσεων). Το παραπάνω μπορεί να είναι αρκετό για μια φωνητική κλήση, αλλά ο προαναφερθείς χρόνος εγκατάστασης σύνδεσης δεν είναι αποδεκτός για πολλές εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο.

Όπως είναι ξεκάθαρο, οι άκαμπτοι μηχανισμοί που εφαρμόζονται στο GSM-R δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις εφαρμογών που βασίζονται σε δεδομένα, καθιστώντας το GSM-R αναποτελεσματικό ως δίκτυο δεδομένων.

7.2.5 Παράδοση (Handover) και Αλγόριθμοι παράδοσης GSM - R

Παρόλο που το GSM-R βασίζεται στην ώριμη τεχνολογία GSM, εξακολουθεί να έχει πολλά βασικά προβλήματα που απαιτούν να λυθούν, ειδικά στην εφαρμογή σε περιβάλλον υψηλής ταχύτητας και η παράδοση είναι ένα από τα βασικά προβλήματα.

Σύμφωνα με την εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας για την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος GSM-R, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το πρόβλημα μεταβίβασης συχνότητας κατά τη μετακίνηση του MS (Mobile Station). Στα υπάρχοντα συστήματα GSM-R, όταν πραγματοποιείται παράδοση (handover), το MS (Mobile

Station) απελευθερώνει πάντα το παλιό κανάλι σταθμού βάσης πρώτα και, στη συνέχεια, αποκτά πρόσβαση στο κανάλι που εκχωρεί ο νέος σταθμός βάσης. Η διαδικασία παράδοσης πραγματοποιείται μεταξύ δύο κελιών (ή τομέων) που επικαλύπτονται. Εάν η στιγμιαία αλλαγή της ισχύος του σήματος για δύο κελιά είναι μεγαλύτερη εντός συγκεκριμένης περιοχής, το MS (Mobile Station) θα εγκλωβιστεί μεταξύ δύο κελιών προς τα πίσω και προς τα εμπρός, παράγοντας το λεγόμενο φαινόμενο του «ring-rang». Μια τέτοια διαδικασία παρότι αυξάνει το φορτίο του συστήματος μεταγωγής, αυξάνει και την πιθανότητα πτώσης των συνδέσεων. Η παράδοση κατά την διάρκεια μίας ασύρματης επικοινωνίας είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα της επικοινωνίας.

Τα κριτήρια καθορισμού μιας παράδοσης περιλαμβάνουν τη μέση ισχύ σήματος λήψης, την ποιότητα σήματος (ρυθμός σφάλματος bit), την απόσταση κ.λ.π. Παρόλο που το σύστημα GSM-R έχει υιοθετήσει την "εφεδρική κάλυψη ασύρματου δικτύου" που σημαίνει την ύπαρξη back up σε σιδηροδρόμους υψηλής ταχύτητας, η παράδοσή του στην πραγματικότητα είναι παρόμοια με την παράδοση στο παραδοσιακό σύστημα GSM. Κατά τη διάρκεια της διαδρομής του τρένου, συχνά η παράδοση είναι ο βασικός παράγοντας που οδηγεί στην πτώση της απόδοσης GSM-R. Για παράδειγμα, είναι σε θέση να φέρει την αποτυχία παράδοσης ή την αστάθεια της ποιότητας της επικοινωνίας. Σύμφωνα με τα δεδομένα δοκιμών σε σιδηροδρομικές γραμμές, η πιθανότητα πτώσης κλήσεων που προκαλείται από την παράδοση είναι περίπου το ήμισυ της συνολικής πιθανότητας πτώσης κλήσεων.

7.3 Εναλλακτικές λύσεις

7.3.1 Terrestrial Trunked Radio (TETRA)

Οι σιδηρόδρομοι ήθελαν να υιοθετήσουν μια καλά αποδεδειγμένη τεχνολογία και να τη χρησιμοποιήσουν για τους σκοπούς τους με ελάχιστες τροποποιήσεις. Δύο τεχνολογίες ήταν οι ισχυρότεροι υποψήφιοι: το GSM και Terrestrial Trunked Radio (TETRA). Το GSM είναι μια τεχνολογία σχεδιασμένο για εμπορικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Το TETRA είναι ένα δίκτυο για public υπηρεσίες, π.χ. αστυνομία, πυροσβεστικές υπηρεσίες, κυβερνητικά ιδρύματα κ.λπ.

Και οι δύο τεχνολογίες είχαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Το GSM είχε μεγάλη υποστήριξη από τη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών και μια μεγάλη βάση προμηθευτών. Από την άλλη πλευρά, το TETRA θα μπορούσε να παρέχει μεγαλύτερη κάλυψη και να προσφέρει διάφορα χαρακτηριστικά, που ήταν χρήσιμα για τους

σιδηροδρόμους, π.χ. ομαδικές κλήσεις και λειτουργία άμεσης λειτουργίας (χωρίς υποδομή). Ωστόσο, το 1990, το TETRA ήταν ακόμη στη διαδικασία τυποποίησης. Επομένως, επιλέχθηκε το GSM. Το πιο σημαντικό επιχείρημα ήταν ότι το GSM ήταν μια ήδη αποδεδειγμένη τεχνολογία με πολλά προϊόντα διαθέσιμα στην αγορά.

Το TETRA, το οποίο απορρίφθηκε από τους ευρωπαϊκούς σιδηροδρόμους τη δεκαετία του 1990, τελικά έγινε μια τεχνολογία επικοινωνιών σιδηροδρόμων στο Καζακστάν και στην Ταϊβάν . Οι κύριοι λόγοι για την επιλογή του έναντι του GSM-R ήταν το χαμηλότερο κόστος, ευρύτερο εύρος ζώνης (υψηλότερη χωρητικότητα) και μεγαλύτερο εύρος κελιών TETRA. Ωστόσο, εκτός από το χαμηλότερο κόστος, το TETRA δεν φέρνει σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με το GSM-R. Δεδομένου ότι το TETRA προσφέρει μόνο ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 28,8 kbit / s, δεν μπορεί να επιλύσει το κύριο ζήτημα του GSM-R, δηλαδή την περιορισμένη υποστήριξη για επικοινωνία δεδομένων.

7.3.2 General Packet Radio Service (GPRS)

Η υπηρεσία General Packet Radio Service (GPRS) είναι μια επέκταση του προτύπου GSM. Εισάγει τη μετάδοση πακέτου από άκρο σε άκρο . Το GPRS προσθέτει περισσότερη ευελιξία στη ραδιοφωνική διασύνδεση χάρη στη συγκέντρωση χρονοθυρίδων. Επιπλέον, οι προσφερόμενες τιμές δεδομένων είναι υψηλότερες λόγω των νέων συστημάτων κωδικοποίησης με χαμηλότερο πλεονασμό. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να εκμεταλλευτεί καλύτερα τις καλές συνθήκες ραδιοεπικοινωνίας. Ωστόσο, η ανάπτυξη του GPRS ως τεχνολογίας για την παράδοση του ETCS έχει μια πολύ σημαντική «παρενέργεια». Δεδομένου ότι το GPRS είναι μια τεχνολογία αλλαγής πακέτων, οι σιδηρόδρομοι πρέπει να ενημερώσουν τις προδιαγραφές του ETCS για να επιτρέψουν την επικοινωνία ETCS με δίκτυα που βασίζονται σε πακέτα εναλλαγής IP .Ως εκ τούτου, η σηματοδότηση ETCS θα γίνει ανεξάρτητη από την υποκείμενη τεχνολογία. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα, επειδή θα επιτρέψει την παροχή σύνδεσης ETCS χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε τεχνολογία IP που πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις απόδοσης.

7.3.3 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

Το Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) είναι διάδοχος του GSM και του GPRS. Η πρώτη έκδοση του προτύπου UMTS (Έκδοση 99) εισήγαγε μια πιο προηγμένη διεπαφή ραδιοεπικοινωνιών. Η ιδέα της χρήσης UMTS για σιδηροδρομικά συστήματα ελέγχου εντολών απέκτησε ελάχιστο ενδιαφέρον στην Ευρώπη. Ωστόσο, χρησιμοποιείται στην Αυστραλία και αξίζει να σημειωθεί ότι οι σιδηρόδρομοι της

Αυστραλίας εκμεταλλεύονται διάφορες τεχνολογίες προκειμένου να παρέχουν συνδεσιμότητα με τα τρένα τους όπου εκτός από το UMTS, επίσης το GSM-R, το Ultra High Frequency (UHF) χρησιμοποιούνται ως δορυφορική επικοινωνία. Το UMTS προσφέρει πολλές βελτιώσεις σε σχέση με το GSM-R. Ωστόσο, υπάρχουν ήδη νεότερα πρότυπα διαθέσιμα, τα οποία παρέχουν ακόμη καλύτερη απόδοση και, ταυτόχρονα έχουν πολύ χαμηλότερο κίνδυνο απαξίωσης από το UMTS. Από την ανάπτυξη ενός νέου, η τεχνολογία επικοινωνιών για τους σιδηροδρόμους θα είναι μια περίπλοκη και δαπανηρή διαδικασία γι' αυτό η επιλεγμένη τεχνολογία πρέπει να είναι η τελευταία λέξη της τεχνολογίας μεταξύ των τηλεπικοινωνιών προτύπων . Ως εκ τούτου, το UMTS είναι απίθανο να επιλεγεί ως διάδοχος του GSM-R.

7.3.4802.16 Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)

Έχει προταθεί επίσης Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) ως υποψήφιος για τη μελλοντική αντικατάσταση του GSM-R . Η τεχνολογία έχει αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα που θα μπορούσαν να το κάνουν μια καλή επιλογή για την επικοινωνία των σιδηροδρόμων:

- Το WiMAX είναι μια τεχνολογία εναλλαγής πακέτων που προσφέρει μεγάλο εύρος ζώνης και αποτελεσματική επικοινωνία δεδομένων. Τα ρεαλιστικά ποσοστά δεδομένων φτάνουν τα 16 Mbit / s, ενώ θεωρητικά αυτά φτάνουν τα 78 Mbit / s.
- Η διασύνδεση ραδιοεπικοινωνίας στο WiMAX βασίζεται στην πολυπλεξία Ορθογώνιου Συχνότητας (OFDM), το οποίο είναι πολύ πιο αποτελεσματικό και ευέλικτο από το Μηχανισμό TDMA που χρησιμοποιείται στο GSM-R.
- Το WiMAX υποστηρίζει μια σειρά από σχήματα διαμόρφωσης (έως 64QAM), τα οποία μπορούν να επιλέγουν δυναμικά με βάση τις συνθήκες της ραδιοεπικοινωνίας .
- Το WiMAX προσφέρει ομαδικές κλήσεις και φωνητική επικοινωνία push-to-talk .
- Διατίθεται multi hop mesh δικτύωση, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως οικονομικά αποδοτική μέθοδος σύνδεσης απομακρυσμένων σταθμών βάσης.
- Το WiMAX προσφέρει επίσης μηχανισμό QoS για την ιεράρχηση διαφορετικών ροών στο δίκτυο, το οποίο είναι σημαντικό εάν οι πόροι μετάδοσης μοιράζονται μεταξύ τους κρίσιμες και μη κρίσιμες εφαρμογές.

Ο κλάδος των τηλεπικοινωνιών είχε αρχικά μεγάλο ενδιαφέρον για τα πρότυπα WiMAX. Ήταν ένας από τους κύριους υποψηφίους για να γίνει η κινητή επικοινωνία τέταρτης γενιάς τεχνολογία. Ωστόσο, το WiMAX δεν πέτυχε μεγάλη εμπορική επιτυχία.

Τα δίκτυα WiMAX που αναπτύσσονται αυτήν τη στιγμή είναι συνήθως μικρά και εξυπηρετούν ιδιωτικά ιδρύματα, τοπικές κοινότητες ή μικρές πόλεις. Ως εκ τούτου, το WiMAX κέρδισε μόνο περίπου 25 εκατομμύρια συνδρομητές παγκοσμίως. Από τη σκοπιά των σιδηροδρόμων, η χαμηλή δημοτικότητα της τεχνολογίας είναι σημαντικό μειονέκτημα, δεδομένου ότι το WiMAX δεν μπορεί να εγγυηθεί μια μακροπρόθεσμη ευρεία υποστήριξη του κλάδου ή μια μεγάλη βάση πωλήσεων. Επομένως, επιλέγοντας WiMAX ως τη μελλοντική σιδηροδρομική επικοινωνία δίκτυο, οι σιδηρόδρομοι μπορεί να καταλήξουν σε μια εξειδικευμένη τεχνολογία, η οποία θα αποδειχθεί πολύ δαπανηρή στη συντήρηση. Ωστόσο, τα οφέλη που προσφέρει το WiMAX ενδέχεται να είναι ακόμη διαθέσιμα στους σιδηροδρόμους. Αυτό συμβαίνει επειδή, όπως εξηγείται στην επόμενη ενότητα, το LTE περιλαμβάνει πολλές τεχνικές λύσεις παρόμοιες με το WiMAX (π.χ. διαμόρφωση), αλλά έχει σημαντικά μεγαλύτερη υποστήριξη από τη βιομηχανία. Κατά συνέπεια, το LTE αποτελεί ήδη κύρια επιλογή για τους σιδηροδρόμους.

7.3.5 Long Term Evolution (LTE)

Το Long Term Evolution (LTE) είναι η τελευταία οικογένεια προτύπων κινητής επικοινωνίας αναπτύχθηκε από το Third Generation Partnership Project (3GPP). Το LTE είναι έμμεσως διάδοχος του GSM. Ως εκ τούτου, είναι φυσικός υποψήφιος για την αντικατάσταση του GSM-R. Η πρώτη έκδοση του προτύπου LTE δημοσιεύθηκε σχεδόν 20 χρόνια μετά το Πρότυπο GSM. Το LTE είναι αποτέλεσμα πολλών εξελίξεων και εξελίξεων στις τηλεπικοινωνίες και στα ηλεκτρονικά που συνέβησαν αυτά τα χρόνια. Έτσι, από τηλεπικοινωνιακή άποψη, υπάρχουν τεράστιες διαφορές μεταξύ αυτών των δύο κινητών τεχνολογιών.

Όλη η εξέλιξη από το GSM στο LTE υποκινήθηκε από τις ανάγκες της διαφήμισης σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Οι νέες λύσεις είναι βελτιστοποιημένες για αυτόν τον τύπο δικτύων. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά μπορεί να είναι εξίσου σημαντικά για σιδηροδρομικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Τα πιο αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα του LTE που μπορεί να είναι ευεργετικά για τους σιδηροδρόμους είναι τα εξής:

- Το LTE είναι το πρώτο πρότυπο επικοινωνίας κινητής τηλεφωνίας με πλήρη εναλλαγή πακέτων από 3GPP. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρότυπα, στο LTE, και στα δύο η επικοινωνία δεδομένων και φωνής βασίζεται σε πακέτα. Σε σύγκριση με το GSM-R, το LTE δίκτυο εκχωρεί τους πόρους του δικτύου σε χρήστες και εφαρμογές ανάλογα με την πραγματική ζήτηση μετάδοσης.

- Το LTE εισάγει ένα απλοποιημένο δίκτυο κορμού που ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC) με λιγότερα στοιχεία από ό, τι στα παλαιά πρότυπα. Το κύκλωμα-εναλλαγή μέρος της ραχοκοκαλιάς, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε παλαιότερες γενιές δικτύου για μετάδοση φωνής, έχει εγκαταλειφθεί υπέρ μιας λύσης με πλήρη αλλαγή πακέτου. Χάρη σε αυτήν την επιλογή, το EPC μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε δίκτυο μεταφορών που βασίζεται σε IP, όπως το Carrier Ethernet.
- Το LTE εισάγει μια νέα διεπαφή ραδιοεπικοινωνιών που βασίζεται στην Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλή πρόσβαση (OFDMA) σε κατερχόμενη ζεύξη και FDMA μονού φορέα (SC-FDMA) σε ανερχόμενη σύνδεση.
- Τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης επιλέγονται δυναμικά στο LTE με βάση τις συνθήκες ραδιοεπικοινωνίας και τη ζήτηση της κυκλοφορίας. Αυτή η προσαρμογή συνδέσμου είναι ο μηχανισμός που επιτρέπει στο δίκτυο να ισορροπεί μεταξύ της απόδοσης και της αξιοπιστίας της ραδιοφωνικής μετάδοσης.
- Η νέα διεπαφή ραδιοεπικοινωνίας προσφέρει πολύ υψηλότερη φασματική απόδοση από οποιαδήποτε άλλο πρότυπο κινητής επικοινωνίας παλαιού τύπου. Αυτό οφείλεται στην προηγμένη διαμόρφωση (OFDMA), πολυπλεξία (έως 64QAM) καθώς και χρήση πολλαπλής εισόδου Πολλαπλή εξόδου(MIMO).
- Το LTE μπορεί να λειτουργεί σε διαφορετικά εύρη ζώνης: 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ή 20 MHz (και περισσότερα με συγκέντρωση φορέα στο LTE-Advanced). Αυτό το εύρος ζώνης επιτρέπει στους χειριστές δικτύου να διαχειρίζονται ευέλικτα το διαθέσιμο ραδιοφάσμα. Για παράδειγμα, ένας χειριστής μπορεί να διαχωρίσει τη ραδιοφωνική ζώνη που χρησιμοποιείται από το δίκτυο GSM (αναδιάταξη φάσματος). Ένα μέρος θα εξακολουθούσε να χρησιμοποιείται από το GSM, ενώ στο άλλο μέρος θα αναπτυχθεί ένα νέο δίκτυο LTE. Επιλέγοντας ένα ευρύτερο ή μικρότερο εύρος ζώνης LTE, ο διαχειριστής δικτύου μπορεί αποφασίσει πόσο μεγάλο μέρος των πόρων των ραδιοεπικοινωνιών να εκχωρηθούν στο LTE και πόσο να παραμείνει για το GSM. Αυτό μπορεί να είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για τους σιδηροδρόμους, επειδή σημαίνει ότι το σιδηροδρομικό δίκτυο LTE θα μπορούσε να αναπτυχθεί κατά μήκος του δικτύου GSM-R στην ίδια ζώνη. Καθώς ο αριθμός των τερματικών εξοπλισμένων με radio LTE θα αυξανόταν με την πάροδο του χρόνου, το εύρος ζώνης του δικτύου LTE θα μπορούσε να αυξηθεί ανάλογα. Επομένως, η μετάβαση στο LTE θα είναι σταδιακή και θα εξαπλωθεί με την πάροδο των ετών.

- Το LTE προσφέρει μηχανισμούς QoS που παρέχουν διαφοροποίηση, προστασία και ιεράρχηση στην κίνηση των δικτύων ραδιοεπικοινωνίας .
- Το LTE παρέχει τυποποιημένους μηχανισμούς για τη συνεργασία μεταξύ όλων των παλαιών 3GPP τεχνολογίες (π.χ. GSM). Μηχανισμοί, όπως επανεπιλογή κελιών , παράδοση και απελευθέρωση σύνδεσης, επιτρέπει στα τερματικά κινητής τηλεφωνίας γρήγορη και απρόσκοπτη μεταφορά από ένα ραδιοφωνικό δίκτυο σε άλλο. Χάρη σε αυτά, η μετάβαση από το GSM στο LTE μπορεί να είναι σταδιακή και η διαλειτουργικότητα μεταξύ στα νέα και στα παλιά συστήματα μπορούν να επιτευχθούν .
- Το LTE είναι η τελευταία οικογένεια προτύπων κινητής επικοινωνίας. Ως εκ τούτου, έχει πολύ χαμηλότερο κίνδυνο απαξίωσης από οποιοδήποτε από τα προηγούμενα πρότυπα (π.χ. GPRS, UMTS ή HSPA).
- Το LTE κέρδισε ευρεία υποστήριξη από τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών.. Στη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη, τη Νότια Κορέα και Ιαπωνία, προβλέπεται ότι τα τερματικά LTE θα αποτελούν πάνω από 50% των συνολικών συνδρομών για κινητά έως το 2019

Επομένως, μακροπρόθεσμα αναμένεται υποστήριξη της βιομηχανίας για τα LTE. Συνολικά, το LTE είναι μια αποτελεσματική τεχνολογία, η οποία προσφέρει υψηλή χωρητικότητα μετάδοσης και χαμηλή καθυστέρηση. Η χρήση των πόρων του δικτύου - βελτιστοποιείται σε σύγκριση με το GSM-R. Επιπλέον, η μετάδοση βελτιώνεται σημαντικά όσον αφορά την απόδοση και την καθυστέρηση. Επίσης, το LTE προσφέρει τυποποιημένες λύσεις για τη συνεργασία μεταξύ GSM. Χάρη στα παραπάνω χαρακτηριστικά, το LTE κερδίζει σημαντικό ενδιαφέρον τόσο στην ερευνητική κοινότητα όσο και στην σιδηροδρομική βιομηχανία και στους προμηθευτές, με αποτέλεσμα να αποτελεί τον πιο πιθανό υποψήφιο για αντικατάσταση GSM-R στο μέλλον(βλ. Κεφάλαιο 8.3).

8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ & ΣΥΓΚΛΙΣΗ CBTC - ETCS

8.1 Διαφορές και προκλήσεις

Το ευρωπαϊκό σύστημα ελέγχου αμαξοστοιχίας (ETCS) και ο έλεγχος τρένων με βάση τις επικοινωνίες (CBTC) είναι τα καλύτερα παραδείγματα σιδηροδρομικών συστημάτων ελέγχου εντολών που βασίζονται στην επικοινωνία. Τα ETCS και CBTC παρέχουν όχι μόνο σήμανση εντός καμπίνας και ATP, αλλά προσφέρουν επίσης τη δυνατότητα λειτουργίας κινούμενου μπλοκ, μείωση του παρατρόχιου εξοπλισμού, επικοινωνία έκτακτης ανάγκης και πολλά άλλα. Μερικά από τα συστήματα CBTC φτάνουν μέχρι το σημείο της εξάλειψης εξ ολοκλήρου των οδηγών και την παροχή της λεγόμενης αυτοματοποιημένης λειτουργίας τρένου (UTO).

Χωρίς συστήματα όπως το ETCS, η δημιουργία σιδηρόδρομων υψηλής ταχύτητας δεν θα ήταν δυνατή. Ομοίως, χωρίς το CBTC, δεν θα μπορούσαν να κατασκευαστούν αποτελεσματικοί σιδηρόδρομοι μετρό..

Τόσο το ETCS όσο και το CBTC λειτουργούν βάσει της υποκείμενης τεχνολογίας ασύρματης επικοινωνίας. Στα συστήματα CBTC, το ραδιοδίκτυο σιδηροδρομικής γραμμής βασίζεται κυρίως Wi-Fi ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, το δορυφορικό σύστημα παγκόσμιας πλοήγησης (GNSS), π.χ. το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) μπορεί να λειτουργήσει ως συμπληρωματικό σύστημα στο CBTC. Για εφαρμογές βαρέων σιδηροδρόμων και κίνηση σε υπαίθριους χώρους, η ασύρματη επικοινωνία Wi-Fi δεν θεωρείται βιώσιμη λύση λόγω της υψηλής καθυστέρησης. Οι βαριές σιδηροδρομικές μεταφορές απαιτούν χαμηλές καθυστερήσεις και υψηλή αξιοπιστία.

Πίνακας 4 Παραδείγματα GoA

Grade of Automation	Type of Train operation	Setting Train in Motion	Stopping Train	Door Closure	Operation in event of Disruption	Examples
GoA 1	ATP with driver	Driver	Driver	Driver	Driver	ETCS Level 1
GoA 2	ATP and ATO with driver	Automatic	Automatic	Driver	Driver	ETCS Level 2 ETCS Level 3
GoA 3	Driverless	Automatic	Automatic	Train attendant	Train attendant	
GoA 4	Unattended Train Operation	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic	CBTC with all functionalities

Για τις εφαρμογές ETCS, λοιπόν, το GSM-R εφαρμόζεται ως πρότυπο ραδιοεπικοινωνίας από το 1994. Η ακεραιότητα της αμαξοστοιχίας αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να ανιχνεύει την πληρότητα της αμαξοστοιχίας σε σχέση με το μήκος της ανά πάσα στιγμή (δηλ. για να επιβεβαιώσει ότι η αμαξοστοιχία δεν έχει χάσει βαγόνια), ακόμη και όταν η ραδιοεπικοινωνία σταματά να λειτουργεί. Σε συστήματα CBTC, αυτό επιτυγχάνεται μέσω περιοδικού αυτοελέγχου από τον εξοπλισμό ραδιοεπικοινωνίας. Τα συνεχή μηνύματα πληρότητας του τρένου αποστέλλονται από τις κεραίες στο πίσω και μπροστά μέρος της αμαξοστοιχίας προς την παρατρόχια υποδομή μέσω ραδιοεπικοινωνίας.

Στο ETCS το επίπεδο 3 δεν είναι ακόμη σαφές πώς θα εφαρμοστεί αυτή η αρχή. Συγκεκριμένα, για εμπορευματικές μεταφορές, ο αριθμός και τα διαφορετικά βαγόνια καθιστούν πιο δύσκολο και ακριβό τον εξοπλισμό με αυτήν την τεχνολογία. Για αυτό το λόγο, το υβριδικό ETCS Level 3, το οποίο εξακολουθεί να χρησιμοποιεί ορισμένες συσκευές ανίχνευσης τοποθετημένες κατά μήκος της τροχιάς για να εγγυηθεί την ακεραιότητα της αμαξοστοιχίας, θεωρείται από τη βιομηχανία και τις ερευνητικές ομάδες ως η καταλληλότερη επιλογή για υποστήριξη του ETCS Επίπεδο 3 στις εμπορευματικές μεταφορές. Μια δεύτερη πρωτοβουλία, κατάλληλη για τρένα εξοπλισμένα με ETCS Level 3, είναι να τοποθετείται σε κάθε άκρο κάθε βαγονιού μία συσκευή παρακολούθησης Coupler (CMD). Αυτές οι συσκευές αναφέρουν την ακεραιότητα της αμαξοστοιχίας στη συσκευή Head End (HED), που βρίσκεται στο μπροστινό μέρος της αμαξοστοιχίας και, με τη σειρά της, αναφέρεται στο RBC. Αυτές οι πρωτοβουλίες είναι ακόμα υπό ανάπτυξη και δεν περιλαμβάνονται ακόμη στις προδιαγραφές του επιπέδου 3 του ETCS.

Διαλειτουργικότητα είναι η δυνατότητα λειτουργίας της αμαξοστοιχίας εξοπλισμένης από έναν προμηθευτή σε απευθείας σύνδεση με τον παρατρόchio εξοπλισμό που παρέχεται από άλλον προμηθευτή. Η εναλλαγή είναι η ικανότητα ανταλλαγής στοιχείων των συστημάτων με εξαρτήματα που παρέχονται από προμηθευτή διαφορετικό από τον αρχικό προμηθευτή. Η διαλειτουργικότητα και η εναλλαγή μεταξύ προμηθευτών εκτός του ότι επιτρέπει τη διασυννοριακή λειτουργία, αποτελούν βασικούς παράγοντες που διατηρούν τις τιμές των εν λόγω συστημάτων χαμηλές τόσο για βαριά όσο και για ελαφριά σιδηροδρομικά συστήματα παγκοσμίως.

Οι σιδηροδρομικοί φορείς δεν δεσμεύονται σε έναν προμηθευτή κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος και ωφελούνται από μελλοντικές εξελίξεις διαφορετικών προμηθευτών (π.χ. ενημερώσεις υλικού και λογισμικού). Σχετικά με τα ανωτέρω, το

IEEE πρέπει να περιγράψει επακριβώς τα πρότυπα συστημάτων CBTC, ώστε να τα τηρούν οι περισσότεροι προμηθευτές. Εν τω μεταξύ, το ETCS έχει πετύχει την τήρηση των προτύπων από τους προμηθευτές για τα Επίπεδα 1 και 2.

Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των συστημάτων CBTC και ETCS σχετικά με τα χαρακτηριστικά που εξηγούνται παραπάνω.

Πίνακας 5 Σύγκριση ETCS και CBTC

Level	Level 1	Level 2	Level 3	CBTC
Application	(mostly)Heavy	(mostly)Heavy	(mostly)Heavy	(mostly)Light
Operation	Fixed Block	Fixed Block	Moving Block	Moving Block
Lineside Signals	Yes	Not needed	Not needed*	Not needed*
Interoperable and Interchangeability	Yes	Yes	Yes	No
Functionalities	ATP	ATP compatible with ATO	ATP compatible with ATO	ATP, ATO, ATS, Diagnosis
Standards by	ERTMS	ERTMS	Not yet specified	Partially by IEEE
Route Interlocking	Yes	Yes	Not yet specified	Yes
Type Data Transmission	Spot (Semicontinuous), Unidirectional (from track to train)	Continuous Bidirectional Track-to-train	Continuous Bidirectional Track-to-train	Continuous Bidirectional Track-to-train
Vital information is transmitted through	Lineside signals, and Electronic Unit, controlled Eurobalises (Euro loops and Radio Infill)	Radio communication via GSM-R	Radio communication (To be defined, probably 5G)	Radio communication via WiFi
Track clearance detection	Track circuits/ axle counter	Track circuits/ axle counter	On board (To be defined)	Continuous message

Οι κύριες διαφορές των δύο συστημάτων είναι:

- 1.Ευελιξία: Το σύστημα “ERTMS” επιτρέπει ομαλότερη μετάβαση από τις συμβατικές σηματοδοτήσεις, χωρίς να διαταράσσονται οι λειτουργικές υπηρεσίες.
- 2.Αυτόματη λειτουργία αμαξοστοιχίας (ATO): Διατίθεται σε συστήματα “CBTC”, ενώ στα συστήματα “ERTMS” υπάρχουν προς το παρόν 2 εφαρμογές με περιθώρια βελτίωσης και ανάπτυξης.
- 3.Αρχή του κινούμενου μήκους αποκλεισμού (moving block): Διατίθεται σε συστήματα “CBTC”, επιτρέπει την κίνηση των τρένων σε μικρότερη απόσταση, αυξάνοντας συνεπώς τη χωρητικότητα της γραμμής. Στο σύστημα “ERTMS” εξακολουθεί να βρίσκεται σε εξέλιξη, και θα αποτελεί το επίπεδο 3.

Επομένως υπάρχουν βασικές διαφορές που δεν επιτρέπουν τη σύγκλιση αυτών των δύο συστημάτων. Κάθε δίκτυο έχει συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις, διαφορετικές υποδομές και μπορεί να χρησιμοποιεί και διαφορετική τεχνολογία επικοινωνίας. Το σύστημα που θα αναπτυχθεί πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να μπορεί να υποστηρίξει τις ανωτέρω διαφορές και των δύο συστημάτων χωρίς να επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά που έχουν αναπτύξει το κάθε σύστημα χωριστά. Στο μέλλον όλα θα συγκλίνουν προς την τυποποίηση των λειτουργικών απαιτήσεων των συστημάτων ελέγχου του συρμού. Ωστόσο, αυτός ο στόχος θα είναι δύσκολο να επιτευχθεί λόγω του μεγάλου αριθμού των εμπλεκόμενων φορέων. Ορισμένες προσπάθειες βρίσκονται σε εξέλιξη, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

Ένα άλλο θέμα που χρήζει αντιμετώπισης είναι η ακεραιότητα της αμαξοστοιχίας. Η ασφάλιση του συρμού αποτελεί μία από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει το επίπεδο 3 του συστήματος “ERTMS”. Αυτό είναι υποχρεωτικό για το σύστημα για να είναι ικανό να υποστηρίξει τη λειτουργία του κινούμενου τμήματος αποκλεισμού (moving block).

Ακόμη ένα σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της λειτουργίας των δύο συστημάτων μαζί είναι η επιλογή του σωστού συστήματος επικοινωνίας. Το σύστημα επικοινωνίας αποτελεί τη βάση για την παροχή ασφαλούς και βελτιστοποιημένης λειτουργίας και, τελικά, για την εγγύηση της ικανοποίησης του πελάτη από τη βελτίωση των υπηρεσιών που διατίθενται επί του συρμού και από την προσθήκη νέων. Ο στόχος κατά την επιλογή του κατάλληλου συστήματος επικοινωνίας είναι να εξασφαλίζει την δυνατότητα της διαχείρισης σε πραγματικό χρόνο και την ίδια χρονική στιγμή ενός μεγάλου όγκου ζωτικής και μη σημασίας πληροφοριών, εξασφαλίζοντας υψηλά επίπεδα ασφάλειας και αξιοπιστίας. Δεδομένου ότι οι τεχνολογίες επικοινωνίας πάντα εξελίσσονται, είναι πολύ σημαντικό να προετοιμάζονται τα δίκτυα εξαρχής για να υποστηρίζουν στο μέλλον τις αναβαθμίσεις αυτών. Αυτό θα επέτρεπε στους φορείς εκμετάλλευσης να επωφελούνται από τις νέες και βελτιωμένες υπηρεσίες και τεχνολογίες χωρίς να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην υποδομή και στη λειτουργία του δικτύου. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ο φορέας εκμετάλλευσης δεν περιορίζεται στην επιλογή συστήματος ελέγχου από έναν μόνο προμηθευτή. Η αρχή της διαλειτουργικότητας επιδιώκεται πολύ έντονα στις μέρες μας και αποτελεί μέρος οποιουδήποτε φορέα εκμετάλλευσης είτε για την δημιουργία νέων γραμμών είτε για την αναβάθμιση υφιστάμενων.



Εικόνα 42 Δομικά Στοιχεία του συστήματος ERTMS

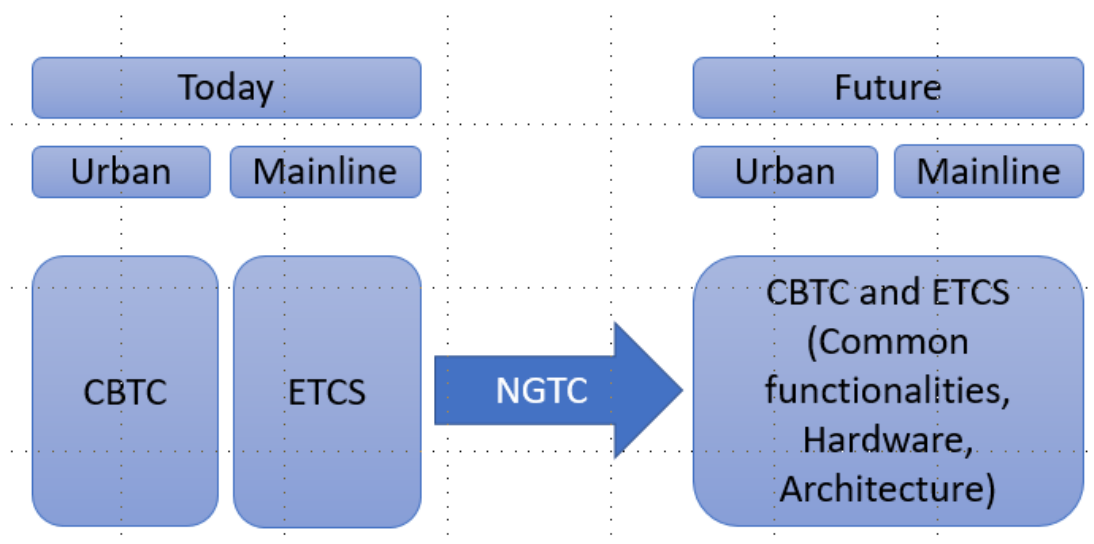


Εικόνα 43 Δομικά Στοιχεία του συστήματος CBTC

8.2 NGTC (Next Generation Train Control Systems)

Παρά την εφαρμογή προηγμένων συστημάτων σιδηροδρομικού ελέγχου, εξακολουθούν να συμβαίνουν σιδηροδρομικά ατυχήματα, συγκρούσεις και εκτροχιασμοί. Η υπάρχουσα αρχιτεκτονική των συστημάτων ελέγχου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανθρώπινη παρέμβαση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα το σφάλμα. Από το 2013 έως το 2017 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή είχε χρηματοδοτήσει το έργο NGTC (Next Generation Train Control Systems) με σκοπό τον εντοπισμό των ομοιοτήτων και των διαφορών στην αρχιτεκτονική, το σχεδιασμό, τα υλικά και τις πλατφόρμες λογισμικού των ETCS (European Train Control Systems) και CBTC (Communication Based Train Control Systems) έχοντας ως στόχο τη σύγκλιση αυτών.

Το ETCS αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει τη διαλειτουργικότητα των μεγάλων σιδηροδρόμων, ενώ τα συστήματα CBTC υποστηρίζουν τις αυτοματοποιημένες λειτουργίες των αστικών σιδηροδρόμων. Το ETCS και το CBTC παρέχουν νέες ευκαιρίες για τη βελτίωση της ασφάλειας και της χωρητικότητας, καθώς επίσης προσφέρουν και διασυννοριακές λειτουργίες για σιδηροδρομικές γραμμές αστικού δικτύου. Η αρχιτεκτονική ETCS βασίζεται στο καθορισμένο σύνολο λειτουργιών προστασίας αμαξοστοιχιών και μηνυμάτων track-to-train (airgap) που παρέχουν πλήρη διαλειτουργικότητα μεταξύ της υποδομής και των αμαξοστοιχιών. Η αρχιτεκτονική CBTC περιλαμβάνει διάφορα συστήματα ελέγχου και εντολών, τα οποία είναι ειδικά για την εταιρεία και καλύπτουν ανάγκες υψηλών επιδόσεων, αλλά δεν είναι πάντοτε διαλειτουργικά μεταξύ τους.



Εικόνα 44 Next Generation Train Control Systems

Τα αποτελέσματα του έργου συνοψίζονται ως εξής:

- Διαμόρφωση των προδιαγραφών λειτουργικών απαιτήσεων NGTC:

Σε συνέχεια μιας λεπτομερούς ανάλυσης των υφιστάμενων προτύπων που καθορίζουν τόσο τα κύρια συστήματα ελέγχου όσο και τα συστήματα ελέγχου αστικών αμαξοστοιχιών, διαμορφώθηκαν οι απαιτήσεις των χρηστών που συνδέονται με τον μελλοντικό σχεδιασμό των συστημάτων ελέγχου των τρένων.

- Προδιαγραφές αρχιτεκτονικής, σχεδιασμού συστήματος και διασύνδεσης NGTC
- Με βάση τις συγκριτικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των λειτουργικών απαιτήσεων του τομέα της κύριας γραμμής (προδιαγραφές βασικής

γραμμής ERTMS 3) και του αστικού τομέα και του σχετικού εγγράφου προδιαγραφών λειτουργικών απαιτήσεων NGTC (FRS), το έργο NGTC ανέπτυξε την αρχιτεκτονική, τη λειτουργική κατανομή, τις προδιαγραφές σχεδιασμού και μία πρόταση σε επίπεδο τυποποίησης για τις διασυνδέσεις που απαιτούνται (FIS, FFFIS). Επιπλέον, το έργο παρέδωσε και τις προδιαγραφές των διεπαφών εντός του NGTC που είναι κοινές για αστικές και κεντρικές γραμμές. Αυτές οι προδιαγραφές NGTC ανοίγουν το δρόμο για την δημιουργία τυποποιημένων συστημάτων ελέγχου αμαξοστοιχιών για κύρια και αστικά πεδία που παρέχουν λειτουργίες ATP, ATO και ATS και υποστηρίζουν τη λειτουργία αμαξοστοιχίας από Βαθμό Αυτοματισμού GOA0 έως GOA4, μειώνοντας παράλληλα το κόστος του κύκλου ζωής και επιτυγχάνοντας μια συνολική βελτίωση σε απόδοση με χαμηλότερο κόστος. Δομές για ανταλλαγή μηνυμάτων για νέες λειτουργίες ETCS

Το έργο NGTC παρέδωσε συγκεκριμένες λεπτομερείς επιχειρησιακές διαδικασίες στην Αυτόματη λειτουργία αμαξοστοιχίας για λειτουργίες όπως Διαχείριση των θυρών στην πλατφόρμα, τον διαχωρισμό αμαξοστοιχιών και την ζεύξη τους. Αυτές περιλαμβάνουν τις προδιαγραφές για όλα τα νέα μηνύματα που απαιτούνται για την επικοινωνία RBC – ATP, OCC-ATO, ATP-PDIU και ATO-PDIU και τον προσδιορισμό των απαραίτητων τροποποιήσεων των λειτουργιών ETCS. Τα αποτελέσματα του NGTC συμβάλλουν έτσι στην εισαγωγή των νέων βασικών λειτουργιών για το ETCS οδηγώντας σε αυξημένο πεδίο εφαρμογής του συστήματος και υποστηρίζουν τη μελλοντική εισαγωγή υψηλότερων επιπέδων αυτοματισμού.

- Λεπτομερές σύνολο μελετών και συστάσεων για την επόμενη γενιά συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών με βάση IP

Με βάση μια σειρά τεχνικών κριτηρίων, η NGTC επέλεξε 3 αναδυόμενες τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνιών με βάση IP για λεπτομερή μελέτη: LTE, Wi-Fi και δορυφορικές επικοινωνίες. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τον προσδιορισμό της επιτεύξιμης απόδοσης, του QoS, της λανθάνουσας κατάστασης κτλ. Συγκεντρώθηκαν και μελετήθηκαν πειραματικά δεδομένα τόσο για το LTE όσο και για το Wi-Fi για διάφορους παράγοντες, όπως η επίδραση του συστήματος κεραίας, η ταχύτητα της κινητής μονάδας, το εύρος της επικοινωνίας και άλλα. Εκτελέστηκε μια αναλυτική μελέτη των επιδόσεων και των δύο τεχνολογιών στις ίδιες συνθήκες δείχνοντας βελτίωση στην απόδοση του LTE σε σύγκριση με το Wi-Fi. Επιπλέον, προτάθηκε μια πιθανή αρχιτεκτονική για αστικούς και μη αστικούς σιδηροδρόμους,

καθώς και συστάσεις και οδηγίες για πιθανή επιχειρησιακή χρήση του προτεινόμενου συστήματος.

Τόσο για τα κύρια όσο και για τα συστήματα μαζικής διαμετακόμισης, υπάρχει μια αυξανόμενη ζήτηση για ένα νέο σύστημα ραδιοεπικοινωνιών που βασίζεται σε IP το οποίο θα μπορούσε να ανταποκριθεί στις ανάγκες για την υποστήριξη των διάφορες εφαρμογών επικοινωνίας μεταξύ τρένων και κέντρων ελέγχου. Ειδικά, για τις βασικές γραμμές, η τρέχουσα τεχνολογία GSM-R καθίσταται ξεπερασμένη. Το NGTC παρέχει μια ολοκληρωμένη καθοδήγηση μέσω σύνθετων μελετών, παρέχοντας σημαντική βάση γνώσεων σχετικά με τις κατάλληλες τεχνολογίες επικοινωνίας για την επόμενη γενιά συστημάτων ελέγχου τρένων.

Συμπερασματικά, το έργο Next Generation Train Control Systems (NGTC) πραγματοποίησε μια λεπτομερή ανάλυση των λειτουργιών CBTC και ETCS, και εντόπισε τις κοινές βασικές λειτουργίες. Ο στόχος του έργου ήταν να σχεδιάσει τις προδιαγραφές των μελλοντικών συστημάτων ελέγχου αμαξοστοιχιών (η εξέλιξη του ETCS) επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη συμβατότητα με συστήματα CBTC. Το NGTC επικεντρώθηκε στις κοινές βασικές λειτουργίες μεταξύ συστημάτων ETCS και CBTC που αντιστοιχούν κυρίως στο ATP. Το πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό των κοινών μεταξύ των δύο συστημάτων χαρακτηριστικών ολοκληρώθηκε, αλλά πλέον είναι απαραίτητο να προωθηθεί αυτή η πρωτοβουλία ένα βήμα παραπέρα, δηλαδή στον σχεδιασμό και την εφαρμογή μία προδιαγραφής συμβατής και με τα δύο συστήματα.

8.3 5G- Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)

Από τεχνολογική άποψη, το 5G λειτουργεί ως ενοποιητής για ολόκληρο το εύρος των δικτύων G. Ωστόσο, το 5G προσφέρει μια ολόκληρη αλλαγή γενεών που επιτρέπει 1ms καθυστέρησης και ταχύτητες λήψης 1Gbps, κάτι που αποτελεί σημαντική βελτίωση σε σχέση με το προηγούμενο 4G.

Η εφαρμογή του 5G μπορεί να ομαδοποιηθεί σε τρεις τομείς σχετικά με τις σιδηροδρομικές επικοινωνίες:

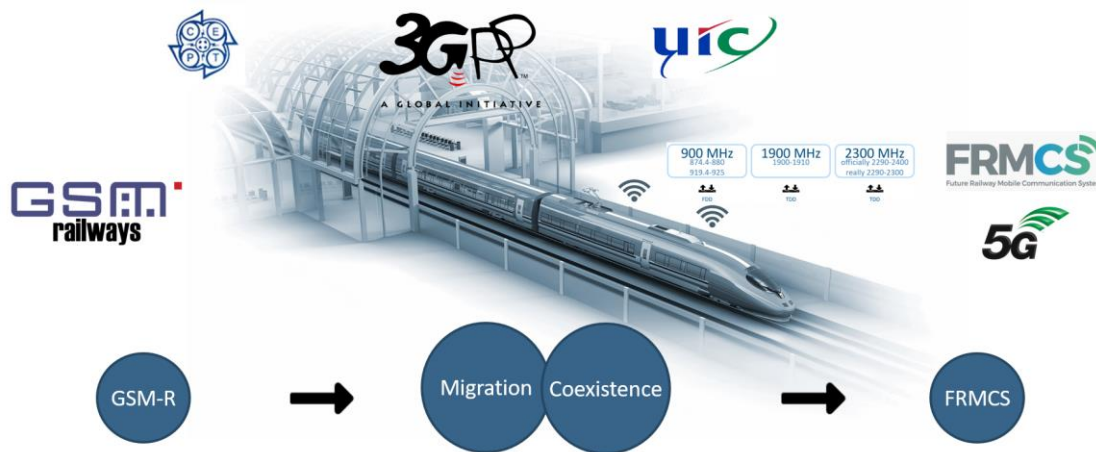
- Επικοινωνία κρίσιμων περιβαλλόντων
- Αυξημένο εύρος ζώνης με επικοινωνίες υψηλών ταχυτήτων
- Μαζικές επικοινωνίες με το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT).

Μόνο δύο από αυτές τις ανωτέρω εφαρμογές είναι ζωτικής σημασίας για τις σιδηροδρομικές επικοινωνίες. Το πρώτο σημείο, οι κρίσιμες επικοινωνίες περιβάλλοντος, είναι πολύ επωφελές για εφαρμογές συντήρησης και ελέγχου καθώς επίσης και για τις κρίσιμες λειτουργίες των τρένων. Χρησιμοποιώντας το 5G, ο σιδηρόδρομος μπορεί να αναλάβει και να δημιουργήσει ασφαλείς και αξιόπιστες επικοινωνίες χρησιμοποιώντας την εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση.

Άλλοι τομείς που θα βελτιωθούν με το 5G αφορούν τα δεδομένα που προέρχονται από τους αισθητήρες στην σιδηροδρομική υποδομή, το οποία θα μπορούν να μεταφερθούν πολύ πιο γρήγορα. Για παράδειγμα, πληροφορίες όπως αναγνώριση αντικειμένων, γεωγραφική τοποθεσία, επικοινωνίες μεταξύ τρένων, μπορούν να μεταφερθούν και να κοινοποιηθούν σε δευτερόλεπτα. Επιπλέον, οι χειριστές θα είναι ενημερωμένοι για την κατάσταση οποιουδήποτε τρένου οποιαδήποτε δεδομένη ημέρα σε οποιαδήποτε δεδομένη τοποθεσία μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα.

Ωστόσο, το πιο χρήσιμο πλεονέκτημα του δικτύου 5G για τις σιδηροδρομικές εφαρμογές είναι η σηματοδότηση. Το βάρος μιας αμαξοστοιχίας και η ταχύτητα που διανύει καθορίζουν τον απαραίτητο χώρο μεταξύ δύο αμαξοστοιχιών, ώστε να μην συγκρούονται. Με το 5G, θα υπάρξει βελτιωμένη και πιο ακριβής σηματοδότηση χωρίς την ανάγκη διάθεσης περισσότερων κεφαλαίων για την δημιουργία της σχετικής υποδομής. Η ιδέα είναι ότι, μέσω των επικοινωνιών 5G, ο χώρος μεταξύ δύο αμαξοστοιχιών μπορεί να μειωθεί και, συνεπώς, να βελτιωθεί η χρονοαπόσταση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανομοιογένεια των τρένων δημιουργεί προβλήματα τα οποία μπορεί να λύσει μόνο η διαθεσιμότητα μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων που υποβάλλονται γρήγορα σε επεξεργασία. Αυτό μπορεί επίσης να επιτευχθεί με την τεχνολογία του 5G.

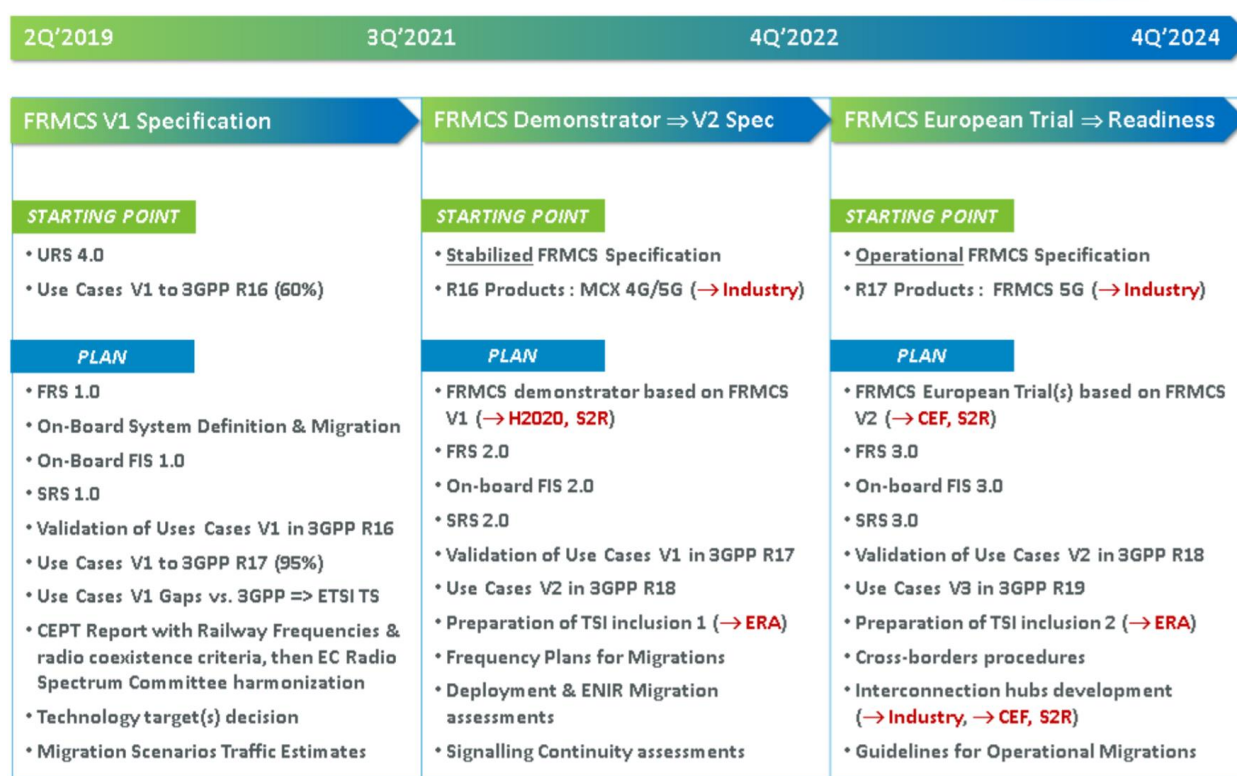


Εικόνα 45 Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)

Ο ευρωπαϊκός σιδηροδρομικός τομέας κατέληξε τα τελευταία χρόνια στην ανάγκη να εξελιχθεί το Ευρωπαϊκό Σύστημα Διαχείρισης Κυκλοφορίας Σιδηροδρόμων (ERTMS). Αυτή η εξέλιξη, σύμφωνα με το στρατηγικό σχέδιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, βασίζεται στην εισαγωγή των «ERTMS Game Changer», όπως ονομάζονται και πιο συγκεκριμένα είναι το ATO (Automatic Train Operation), οι βελτιστοποιημένες καμπύλες πέδησης, το ETCS Level 3 (μείωση των παρατρόχιων στοιχείων του ETCS), η ενισχυμένη τοποθέτηση αμαξοστοιχιών, τα ενισχυμένα μέτρα ασφάλειας στον κυβερνοχώρο και το FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), με το τελευταίο να δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης σε όλα τα προηγούμενα. Το Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) θα είναι το παγκόσμιο πρότυπο 5G για τις σιδηροδρομικές επικοινωνίες, σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κανονισμό και θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες και τις υποχρεώσεις των σιδηροδρομικών οργανισμών εκτός Ευρώπης.

Κατά τον καθορισμό της διάδοχης τεχνολογίας του GSM-R, το UIC αποφάσισε να ακολουθήσει μια φιλοσοφία πολύ διαφορετική από αυτή που οδήγησε τα έργα EIRENE και MORANE στην δημιουργία των προδιαγραφών του GSM-R στα τέλη της δεκαετίας του 1990. Η εμπειρία με το GSM-R οδήγησε τους σιδηροδρομικούς φορείς και οργανισμούς στο συμπέρασμα ότι απαιτούνται σημαντικές αλλαγές στη βασική λειτουργικότητα μιας κύριας τεχνολογίας οδηγεί σε περιορισμένο ανταγωνισμό, αφού πολλοί προμηθευτές θα αποφασίσουν να μην εισέλθουν σε ένα μικρό τμήμα μίας αγοράς όπως είναι αυτό των ραδιοεπικοινωνιών στους σιδηροδρόμους. Αυτή η προσέγγιση οδήγησε σε μικρότερο ανταγωνισμό και άρα υψηλότερες τιμές κατά την προμήθεια προϊόντων GSM-R από τους διαχειριστές των σιδηροδρόμων στην Ευρώπη.

Οι εργασίες για την διαμόρφωση των λειτουργικών και τεχνικών απαιτήσεις και προδιαγραφών καθώς και η τυποποίηση στο 3GPP διευθύνονται επί του παρόντος από την UIC, σε συνεργασία με ολόκληρο τον σιδηροδρομικό τομέα. Στα ανωτέρω πλαίσια έχει χρηματοδοτηθεί από την ΕΕ το έργο 5GRAIL το οποίο θα παραδώσει τελικά συμπεράσματα σε συνέχεια των πιλοτικών δοκιμών που θα εκτελέσει σχετικά με τις προδιαγραφές του FRMCS V1 και τον εντοπισμό τεχνικών περιορισμών που σχετίζονται με θέματα εφαρμογής του.



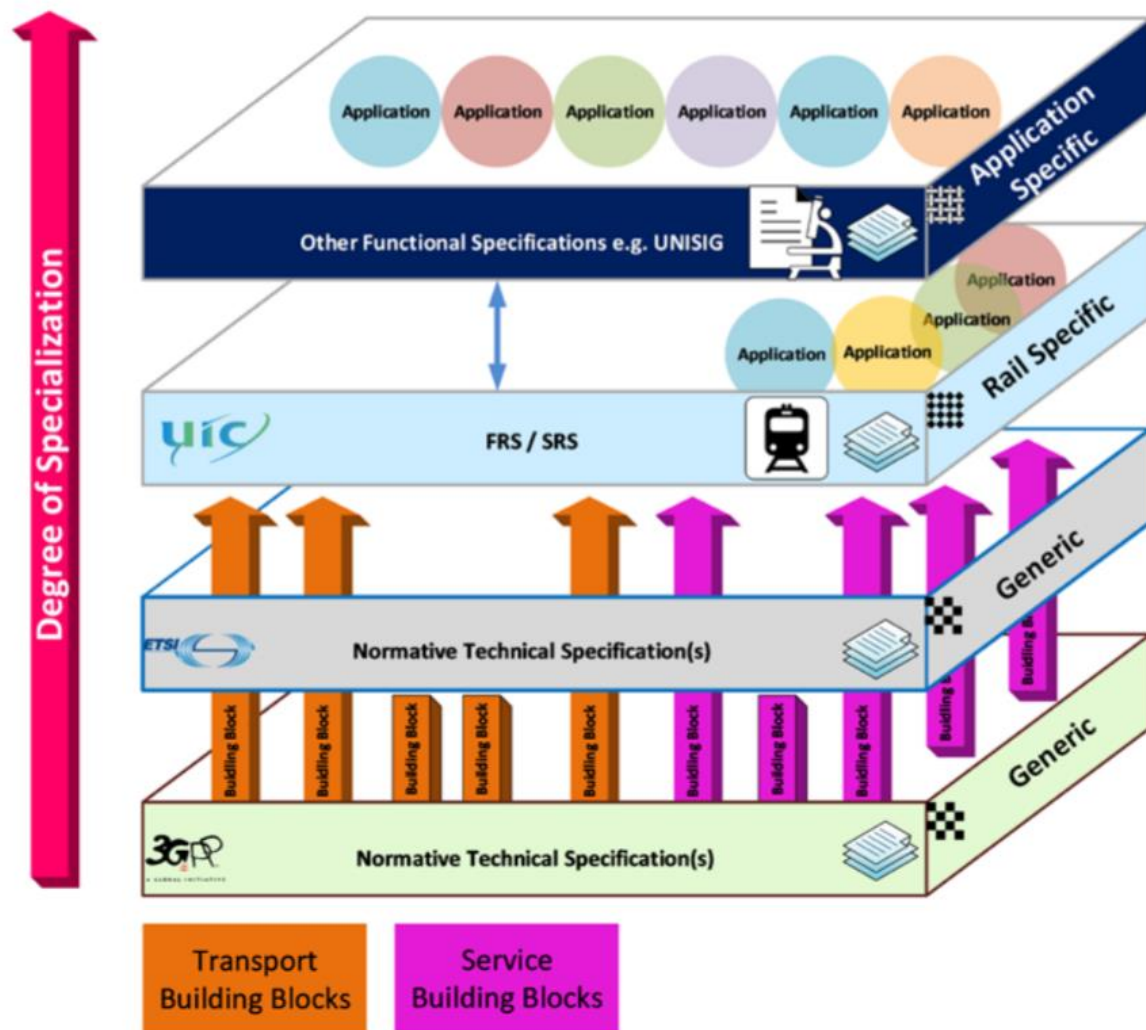
Εικόνα 46 Χρονοδιάγραμμα FRMCS

Ως ιδιοκτήτης των προδιαγραφών του GSM-R (EIRENE, Europe Integrated Railway Radio Enhancement, και MORANE, Mobile radio for Railway Networks in Europe), η UIC (International Union for Railways) ξεκίνησε τις αξιολογήσεις γύρω από το FRMCS το 2015, σε συνεργασία με ολόκληρο τον σιδηροδρομικό τομέα, που βασίστηκε κυρίως στην αναγγελθείσα απαρχαίωση της τεχνολογίας ραδιοεπικοινωνιών που χρησιμοποιείται επί του παρόντος στο ERTMS (GSM-R) το 2030.

Μετά από μια πρώτη ανάλυση υψηλού επιπέδου, η UIC καθόρισε ένα δομημένο πρόγραμμα για να εξετάσει όλες τις πτυχές της μείζονος μεταβασης από το GSM-R στο FRMCS, που αποτελείται από τους παρακάτω άξονες:

- Πεδίο εφαρμογής του FRMCS, που θα υπερβεί σε μεγάλο βαθμό το σημερινό πεδίο εφαρμογής του GSM-R
- Μεθοδολογία προδιαγραφών: ορισμός και δημιουργία απαιτήσεων χρήστη, λειτουργιών και συστημάτων.
- Στρατηγική τυποποίησης: για τους ενσωματωμένους ειδικούς μηχανισμούς της, η τυποποίηση FRMCS θα καθιερωθεί στο 3GPP με την ενεργή συμβολή του σιδηροδρομικού τομέα στις κανονιστικές ομάδες SA1, SA2 και S6, με μόνιμη υποστήριξη από το ETSI TC-RT (Τεχνική Επιτροπή Σιδηροδρομικών Τηλεπικοινωνιών);
- Στρατηγική και υποστήριξη ραδιοφάσματος σε ad-hoc ομάδες CEPT / ECC, καθώς η αύξηση των ψηφιακών εφαρμογών που θα πραγματοποιηθεί από το FRMCS θα απαιτούσε επιπλέον χωρητικότητα φάσματος.
- Ορισμός μιας νέας Αρχιτεκτονικής επικοινωνίας επί του συρμού (TOBA), για τη συγκέντρωση όλων των τηλεπικοινωνιών που απαιτούνται για τις επιχειρησιακές υπηρεσίες εντός της αμαξοστοιχίας.
- Αξιολόγηση των διαφόρων σεναρίων μετάβασης, με εκτιμήσεις των επιπτώσεων και τεχνικές οδηγίες για τους σιδηροδρομικούς φορείς ·
- Παγκόσμιοι στόχοι και προγραμματισμός, που θα συγχρονιστούν με τους σιδηροδρομικούς φορείς, τους κατασκευαστές του τομέα και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Σιδηροδρόμων (ERA), με δύο σημαντικά ορόσημα: τη συμπερίληψη του FRMCS στην αναθεώρηση των Ευρωπαϊκών Οδηγιών από τον ERA στα τέλη του 2022 και η ετοιμότητα της αγοράς και των σιδηροδρομικών φορέων ώστε να ξεκινήσουν εργασίες μετάβασης έως το 2025.

Το FRMCS βρίσκεται επομένως σε ένα στάδιο όπου οι απαιτήσεις των τελικών χρηστών ολοκληρώνονται σε μια πρώτη έκδοση (FRMCS V1), ενώ η συγγραφή των λειτουργικών απαιτήσεων και των απαιτήσεων συστήματος βρίσκονται σε φάση σύνταξης. Η τυποποίηση που αντιστοιχεί στο FRMCS V1 έχει εισαχθεί στο 3GPP για έγκριση στις Κυκλοφορίες 16 και 17, μετά από αναθεώρηση που πραγματοποιήθηκε από το ETSI.



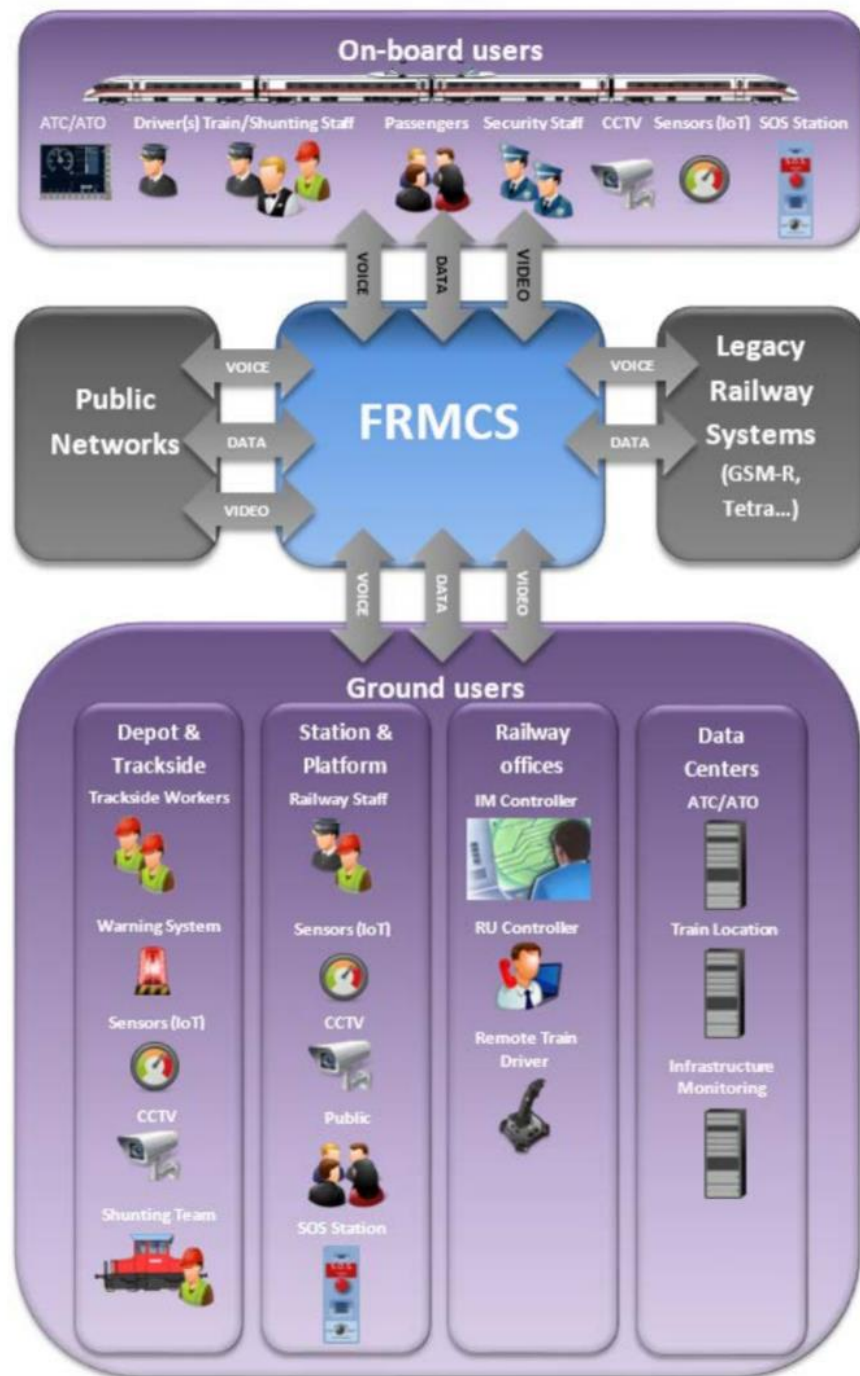
Εικόνα 47 Πυλώνες FRMCS

Συγκεκριμένα, το FRMCS στοχεύει στη κατάληψη του φάσματος στη ζώνη συχνοτήτων των 900MHz (2x1.6 MHz) καθώς και στις συχνότητες 1900 ή / και 2300MHz για την μεταβατική περίοδο, καθώς θεωρήθηκε ότι η ζώνη 900MHz θα είναι ανεπαρκής για τη μετάβαση από το GSM-R στο FRMCS. Το έργο FRMCS σχεδιάζει να εξασφαλίσει το εύρος συχνοτήτων από 5MHz σε 900MHz καθώς και την πρόσβαση στα 1900MHz και / ή 2300MHz μετά τη μετάβαση.

Επισημαίνει ότι η ζώνη 1900-1920MHz είναι η πρώην ζώνη του 3G που παραχωρήθηκε σε φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας, η οποία θα είναι διαθέσιμη μόλις λήξει η άδειά τους και έτσι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη της κάλυψης του FRMCS.

Τέλος, όσον αφορά τις εφαρμογές που θα υποστηρίζονται από το FRMCS, αυτές θα περιλαμβάνουν αυτές που ήδη καλύπτονται από το GSM-R δηλαδή το ETCS επίπεδο

2. Ωστόσο επιπλέον, θα καλυφθούν οι υπηρεσίες που σχετίζονται με την πλήρη αυτοματοποίηση των τρένων , GoA 3 και GoA 4, καθώς και ο απομακρυσμένος έλεγχος και η επίβλεψη του εξοπλισμού επί του συρμού. Σκοπός είναι επίσης να καλυφθεί με την νέα αυτή αρχιτεκτονική η υποστήριξη του IoT, της απομακρυσμένης συντήρησης ή επιδιόρθωσης βλαβών , αλλά και η πληροφόρηση σε πραγματικό χρόνο των επιβατών.

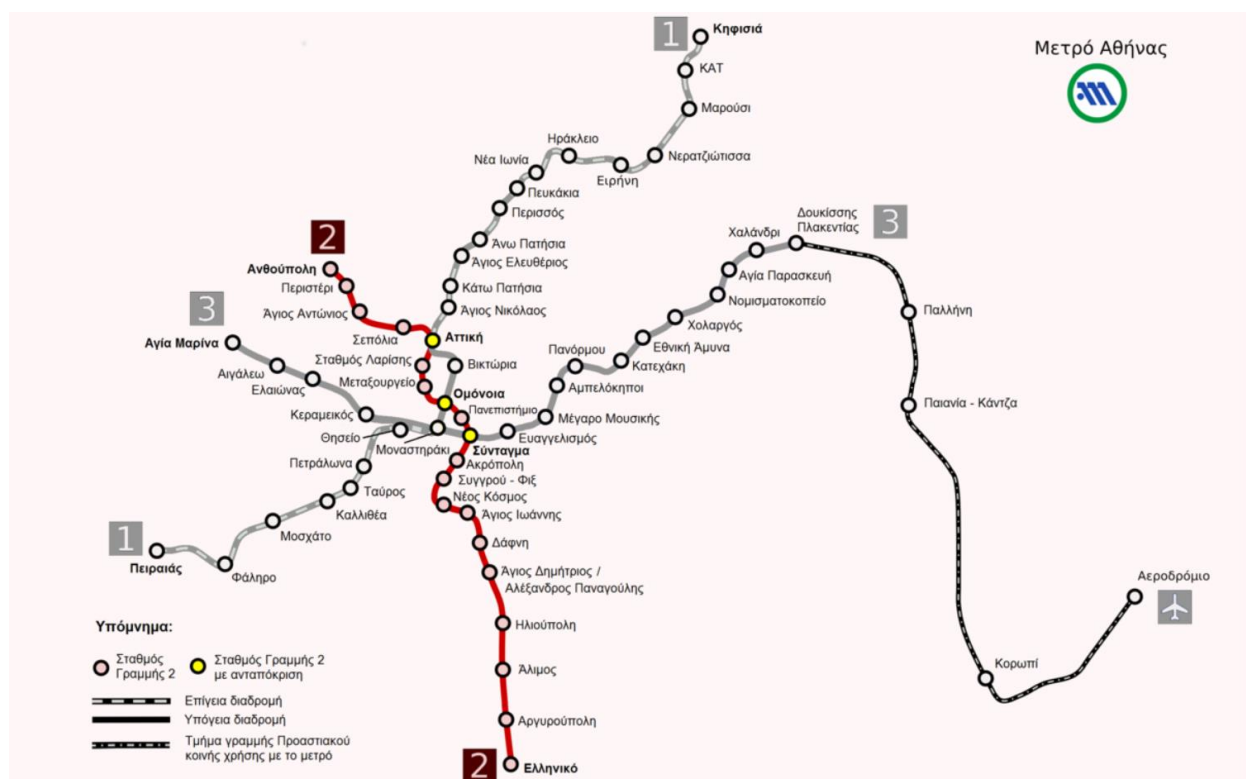


Εικόνα 48 Υπηρεσίες FRMCS

9. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 2 ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ

9.1 Υπάρχουσα Κατάσταση γραμμής

Η Γραμμή 2 του μετρό της Αθήνας είναι η γραμμή Ανθούπολη - Ελληνικό, η οποία στους χάρτες απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Ολόκληρη η γραμμή είναι υπόγεια και έχει διεύθυνση Βορρά - Νότου. Εγκαινιάστηκε στις 28 Ιανουαρίου 2000 μαζί με την Γραμμή 3 και αρχικά ένωνε τα Σεπόλια με την πλατεία Συντάγματος. Σήμερα, ξεκινάει από την συνοικία της Ανθούπολης του Περιστερίου, πολυπληθούς δυτικού προαστίου της Αθήνας, διέρχεται από τα Σεπόλια και το κέντρο της Αθήνας (Ομόνοια και Σύνταγμα), συνεχίζει νότια μέσα από το Νέο Κόσμο και τη Δάφνη και προχωρά κάτω από τη Λεωφόρο Βουλιαγμένης, για να καταλήξει στο Ελληνικό. Η γραμμή κατασκευάστηκε τμηματικά. Τον Ιανουάριο του 2000 παραδόθηκε το τμήμα Σεπόλια - Σύνταγμα και τον Νοέμβριο του ίδιου έτους το τμήμα Σύνταγμα - Δάφνη. Το 2004 δόθηκαν σε κυκλοφορία οι σταθμοί Άγιος Δημήτριος και Άγιος Αντώνιος. Η τελευταία μεγάλη επέκταση της γραμμής ήταν το 2013, όταν και παραδόθηκαν σε κυκλοφορία οι νέες προεκτάσεις προς Ανθούπολη και Ελληνικό. Το συνολικό μήκος της γραμμής είναι 17,9 χλμ και οι σταθμοί είναι 19 .



Εικόνα 49 Γραμμή 2 του μετρό

Σύμφωνα με την διαδικτυακή σελίδα της ΣΤΑ.ΣΥ. η συχνότητα διεύλευσης για την γραμμή υπό εξέταση είναι:

Πίνακας 6 Συχνότητα διεύλευσης συρμών στη γραμμή 2

ΓΡΑΜΜΗ 2 (ΜΕΤΡΟ)		
ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΩΡΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ
ΔΕΥΤΕΡΑ - ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	05:30 - 06:00	10'
	06:00 - 07:30	5'
	07:30 - 11:00	4' 30"
	11:00 - 13:30	5'
	13:30 - 17:30	4' 30"
	17:30 - 20:30	5'
	20:30 - 22:00	7'
	22:00 - 00:20	10'
ΣΑΒΒΑΤΟ & ΚΥΡΙΑΚΗ	05:30 - 09:00	10'
	09:00 - 17:00	7'
	17:00 - 00:20	10'

Παραδοχή της μελέτης αποτελεί η υφιστάμενη μέση συχνότητα διεύλευσης η οποία ανέρχεται σε 4 λεπτά.

Το υπάρχον σύστημα σταθερού μπλοκ σηματοδότησης σχεδιάστηκε για να επιτρέπει μέγιστη απόδοση δέκα (10) τρένων ανά ώρα. Ωστόσο, η πραγματικότητα των επιχειρήσεων έδειξε ότι η υψηλότερη απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί είναι στην πραγματικότητα πιο κοντά σε 6 τρένα ανά ώρα. Καθώς η ζήτηση για την γραμμή 2 αυξήθηκε, και προκειμένου να παρέχουν επαρκή χωρητικότητα η έρευνα για την ικανοποίηση της αυξανόμενης ζήτησης κρίθηκε αναγκαία.

Ο γενικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει το οικονομικό κόστος και τα οφέλη της εφαρμογής μη επιτηρούμενης αμαξοστοιχίας στην γραμμή 2 (CBTC Alternative). Ο τρόπος εξέτασης των ανωτέρω εναλλακτικών θα πραγματοποιηθεί με την δύο τρόπους:

- Χρησιμοποιώντας την Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)
- Μέσω μιας ποιοτικής ανάλυσης που εξετάζει άλλα στοιχεία που τα οφέλη τους δεν μπορούν να προσδιοριστούν με οικονομικούς όρους.

Η Καθαρή Παρούσα Αξία μετρά τα οφέλη από οικονομική άποψη, εξετάζοντας εάν το CBTC παρέχει αυξημένα έσοδα (περισσότεροι επιβάτες), μειωμένο κόστος (CAPEX ή OPEX) ή οποιοδήποτε άλλο συνδυασμό αυτών που φέρνει ένα καλύτερο οικονομικό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, η απόδοση της εναλλακτικής του CBTC σε σύγκριση με την

υπάρχουσα κατάσταση περιορίζεται από τις ακόλουθες προϋποθέσεις που πρέπει να τηρούνται:

- 1) Πρέπει να διατηρείται το υπάρχον επίπεδο ασφάλειας,
- 2) Πρέπει να παρέχονται εξίσου ειδικά τμήματα επιβατών με το ίδιο επίπεδο υπηρεσίας, π.χ. άτομα με ειδικές ανάγκες πρέπει να έχουν τουλάχιστον το ίδιο επίπεδο πρόσβασης, παρά την έλλειψη υποστήριξης οδηγού.
- 3) Άλλες εντάσεις υπηρεσίας, όπως για παράδειγμα, διαθεσιμότητα, αξιοπιστία ή άνεση. Τέτοιες παράμετροι υποτίθεται ότι πληρούν ένα επαρκές επίπεδο, αρκεί να μην βλάψει το οικονομικό αποτέλεσμα.

Στην πράξη, η οικονομική ανάλυση παρέχει μια οικονομική εξέταση του κόστους και των εσόδων που σχετίζεται με το έργο μετατροπής του δικτύου της Γραμμής 2 σε λειτουργία UTO χωρίς επιτήρηση αμαξοστοιχίας.

Η οικονομική ανάλυση βασίζεται σε αριθμούς και αξίες που παρέχονται από άλλες ομάδες εργασίας, καθώς και οι υποκείμενες παραδοχές αφορούσαν την παρούσα. Η περίοδος υπολογισμού του έργου εκτείνεται από το 2022, όπου το κόστος του πρώτου έργου διατηρείται έως το 2047, όπου τελειώνει η διάρκεια ζωής όλων των επενδύσεων κεφαλαίου.

9.2 Ποιοτική Ανάλυση Κόστους/Ωφέλειας

9.2.1 Οφέλη CBTC

Υποστηρίζεται ότι το CBTC μπορεί να παρέχει τα ακόλουθα οφέλη εξοικονόμησης κόστους σχετικά με την ασφάλεια, την λειτουργία και τον κύκλο ζωής σε μια τυπική γραμμή.

Ασφάλεια

Όλα τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου αμαξοστοιχίας σταθερού μπλοκ και CBTC έχουν σχεδιαστεί με αυστηρές αρχές σχεδιασμού ώστε να μπορούν να χαρακτηριστούν «ασφαλή για αστοχία», σε περίπτωση βλάβης σε κάποιο κρίσιμο στοιχείο του συστήματος ελέγχου της αμαξοστοιχίας.

Συνήθως, τα επηρεαζόμενα οχήματα σταματούν σε ένα προστατευμένο τμήμα της τροχιάς. Ωστόσο, οι κίνδυνοι παραμένουν σε αυτήν την ασφαλή κατάσταση. Για παράδειγμα, εάν μια αμαξοστοιχία είναι προσαραγμένη μεταξύ των σταθμών για παρατεταμένη χρονική περίοδο ως αποτέλεσμα αστοχίας του ελέγχου της

αμαξοστοιχίας, οι επιβάτες μπορούν να αποβιβαστούν δεξιά στον σιδηρόδρομο με επακόλουθη έκθεση σε πτώση, πτώση και πιθανούς κινδύνους ηλεκτροπληξίας. , καθώς και έκθεση σε πιθανούς κινδύνους από κινήσεις αμαξοστοιχιών σε παρακείμενες γραμμές. Παρομοίως, η ανάκαμψη από αστοχία ελέγχου αμαξοστοιχίας ή / και διατήρηση λειτουργίας σέρβις κατά τη διάρκεια αστοχίας ελέγχου αμαξοστοιχίας (με σχετική απώλεια αυτόματης προστασίας αμαξοστοιχίας) μπορεί να οδηγήσει σε ανάγκη για κινήσεις αμαξοστοιχίας που προστατεύονται αποκλειστικά με διαδικασίες λειτουργίας, με έκθεση σε ανθρώπινα σφάλματα και σύγκρουση / κίνδυνοι εκτροχιασμού. Η επίτευξη υψηλών επιπέδων διαθεσιμότητας συστήματος για το σύστημα ελέγχου αμαξοστοιχίας είναι, επομένως, μια σημαντική στρατηγική μετριασμού των κινδύνων.

Εάν το δυνητικό κόστος των ατυχημάτων ενσωματωθεί σε ένα μοντέλο κόστους κύκλου ζωής, ένα σύστημα ελέγχου αμαξοστοιχίας όπως το CBTC που έχει σχεδιαστεί ειδικά για την εξάλειψη μεμονωμένων σημείων αστοχίας και παρέχει τα υψηλότερα επίπεδα διαθεσιμότητας συστήματος θα πρέπει να εμφανίζει πλεονεκτήματα κόστους κύκλου ζωής μέσω αυξημένων πιθανοτήτων αποφυγής κόστους ατυχήματος.

Το CBTC μπορεί επίσης να παρέχει βελτιωμένες λειτουργίες ασφάλειας που σχετίζονται με την επιβολή προσωρινών περιορισμών ταχύτητας και την προστασία των εργαζομένων στους σιδηροδρόμους. Αυτές οι λειτουργίες ασφαλείας μπορούν να παρέχονται χωρίς τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τα όρια κυκλώματος τροχιάς. Επιπλέον, το CBTC μπορεί να παρέχει θετική εφαρμογή στάσης σε ξεχωριστά σημεία χωρίς την ανάγκη εφαρμογής πέδης έκτακτης ανάγκης, η οποία θα προκαλούσε ορισμένους κινδύνους για τους επιβάτες.

Σε σύγκριση με τα συστήματα σταθερού μπλοκ, τα συστήματα CBTC απαιτούν λιγότερο εξοπλισμό βάσει τροχιάς και, κατά συνέπεια, η πρόσβαση σε εξοπλισμό βάσει τροχιάς και οι απαιτήσεις συντήρησης τροχιάς μειώνονται με σχετικές βελτιώσεις στην ασφάλεια των εργαζομένων σε τροχιά.

Τα συστήματα ελέγχου αμαξοστοιχίας που χρησιμοποιούν κυκλώματα τροχιάς ως πρωταρχικό μέσο ανίχνευσης αμαξοστοιχίας αποτελούν το θεμέλιο των συστημάτων προστασίας αμαξοστοιχίας για 100 χρόνια. Ενώ η απόδοση ασφάλειας των συστημάτων ελέγχου αμαξοστοιχίας που βασίζονται σε κύκλωμα τροχιάς είναι εξαιρετικά υψηλή, ωστόσο, έχουν σημειωθεί αστοχίες ανίχνευσης αμαξοστοιχίας με

συστήματα που βασίζονται σε κυκλώματα τροχιάς μέσω αστοχιών μετατόπισης του κυκλώματος τροχιάς, σφάλματα συντήρησης και αστοχίες εξοπλισμού.

Ένα υποσύστημα ανίχνευσης αμαξοστοιχίας που βασίζεται σε CBTC είναι απρόσβλητο από απώλεια διακλάδωσης και άλλους κινδύνους που ενυπάρχουν στον εξοπλισμό κυκλώματος τροχιάς. Περαιτέρω, ένα σύστημα CBTC που επικαλύπτεται σε ένα σύστημα κυκλώματος τροχιάς μπορεί να παρέχει το επίπεδο πλεονασμού ασφαλείας που απαιτείται από το NTSB για την ανίχνευση τυχόν απώλειας στην ανίχνευση πληρότητας τροχιάς από τα κυκλώματα τροχιάς.

Χωρητικότητα γραμμής

Ένα από τα πρωταρχικά λειτουργικά οφέλη των συστημάτων CBTC, σε σύγκριση με τα συστήματα που βασίζονται σε κύκλωμα παρακολούθησης, είναι ότι τα όρια κίνησης (Movement Authority) δεν περιορίζονται πλέον από φυσικά όρια σταθερού μπλοκ. Αντ' αυτού, δημιουργούνται μέσω αναφορών θέσης τρένου που μπορούν να παρέχουν φιλοσοφίες ελέγχου «εικονικού μπλοκ» ή «κινούμενου μπλοκ». Τέτοιες φιλοσοφίες ελέγχου επιτρέπουν στα τρένα να λειτουργούν με ασφάλεια σε μικρότερες χρονοαποστάσεις και μπορούν να επιτρέψουν στις λειτουργίες του συστήματος να ανακάμψουν ταχύτερα σε περίπτωση καθυστερήσεων λειτουργίας. Όλα αυτά μπορούν να προσφέρουν μια πιο τακτική και βελτιωμένη εξυπηρέτηση επιβατών, η οποία μπορεί να μεταφραστεί σε αυξημένη χωρητικότητα γραμμής που περιορίζεται μόνο από την απόδοση του τροχαίου υλικού και τους περιορισμούς της φυσικής ευθυγράμμισης της γραμμής. Αναγνωρίζοντας αυτούς τους περιορισμούς, ο σχεδιασμός των χρονοαποστάσεων τόσο χαμηλά όσο 60 δευτερόλεπτα ή ακόμα λιγότερο γίνεται θεωρητικά εφικτός με τα συστήματα CBTC.

Κατά συνέπεια, μια αύξηση στις απαιτήσεις επιβατών κατά τη διάρκεια ζωής ενός συστήματος CBTC μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα μέσω της απλής προσθήκης αμαξοστοιχιών στη γραμμή και της προσαρμογής του χρονοδιαγράμματος λειτουργίας στο λογισμικό. Συγκριτικά, εάν ένα σύστημα που βασίζεται σε κύκλωμα τροχιάς έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί για να υποστηρίξει, ας πούμε, 180 δευτερόλεπτα, δεν θα ήταν δυνατή η ανταπόκριση σε απαιτήσεις επιβατών που θα απαιτούσαν μικρότερες χρονοαποστάσεις εκτός από την αφαίρεση των υπαρχόντων μπλοκ και την αντικατάσταση με μικρότερα μήκη μπλοκ με σχετική απώλεια υπηρεσίας και αυξημένο κόστος κύκλου ζωής. Με άλλα λόγια, τα συστήματα σταθερού μπλοκ αντιπροσωπεύουν έναν περιορισμό στις μελλοντικές ευκαιρίες αύξησης της χωρητικότητας και, ως εκ

τούτου, έναν περιορισμό στα μελλοντικά έσοδα της farebox. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πολλές από τις κύριες αρχές σιδηροδρομικής διαμετακόμισης σε όλο τον κόσμο αναβαθμίζουν τα συστήματα σηματοδότησης / ελέγχου αμαξοστοιχίας βάσει κυκλώματος τροχιάς με CBTC.

Η ικανότητα των συστημάτων CBTC να υποστηρίζουν λειτουργίες με μικρότερες χρονοαποστάσεις σημαίνει επίσης ότι οι ίδιες απαιτήσεις χωρητικότητας μπορούν να ικανοποιηθούν χρησιμοποιώντας πιο σύντομα τρένα (τα οποία, με τη σειρά τους, απαιτούν μικρότερες πλατφόρμες) που λειτουργούν πιο συχνά, με την ταυτόχρονη εξάλειψη του κόστους και της διακοπής λειτουργίας του εξοπλισμού σε μεγαλύτερες πλατφόρμες.

Χρονοαπόσταση

Η ικανότητα ενός συστήματος CBTC να προσδιορίζει με ακρίβεια τη θέση της αμαξοστοιχίας, να παρέχει ακριβή όρια κίνησης (Movement Authority) βάσει προφίλ για την υποστήριξη μιας φιλοσοφίας ελέγχου κινούμενου μπλοκ και να ελέγχει με ακρίβεια την ταχύτητα της αμαξοστοιχίας σε σχέση με αυτήν την αρχή κίνησης, καθώς και την ικανότητα ενός συστήματος CBTC για να ελαχιστοποιήσετε τα λειτουργικά περιθώρια μέσω αυτόματου κανονισμού τρένων σε πραγματικό χρόνο, όλα μπορούν να συμβάλουν σε μειωμένο χρόνο μετ'επιστροφής. Αυτό όχι μόνο ωφελεί τους επιβάτες αλλά μπορεί επίσης να μειώσει το απαιτούμενο μέγεθος του στόλου λειτουργίας που απαιτείται για να παραδώσει την ίδια χωρητικότητα, σε σύγκριση με τα συστήματα που βασίζονται σε κύκλωμα παρακολούθησης.

Επιχειρησιακή Αποδοτικότητα

Άλλα χαρακτηριστικά των συστημάτων CBTC που μπορούν να βελτιώσουν την επιχειρησιακή αποδοτικότητα και να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη περιλαμβάνουν:

- Πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την ακριβή τοποθεσία, την ταχύτητα και την κατάσταση λειτουργίας των τρένων που είναι εξοπλισμένα με CBTC
- Δυνατότητα ορισμού νέων κινήσεων αλληλοσύνδεσης και μοτίβα κυκλοφορίας χωρίς τους περιορισμούς που επιβάλλονται από μια εγκατάσταση ενσύρματου σταθερού μπλοκ για κανονικές λειτουργίες και για υποστήριξη αστοχίας και διαχείρισης έκτακτης ανάγκης

- Αμφίδρομες λειτουργίες με συστήματα κυκλώματος τροχιάς απαιτούν διπλασιασμό του αριθμού του εξοπλισμού κυκλωμάτων τροχιάς με σημαντική πρόσθετη επένδυση κεφαλαίου
- Δυνατότητα συντονισμού πολλαπλών κινήσεων αμαξοστοιχιών για σκοπούς διαχείρισης διασταύρωσης και βελτιστοποίησης ενέργειας
- Δυνατότητα χρησιμοποίησης εναλλακτικών στρατηγικών για τη διατήρηση της κατανάλωσης ενέργειας
- Δυνατότητα σε πραγματικό χρόνο να περιορίζει τις κινήσεις των αμαξοστοιχιών σε απόκριση σε ανιχνευόμενους κινδύνους ή άλλες συνθήκες
- Ακριβής, συχνή ανίχνευση τοποθεσίας εξοπλισμένων οχημάτων συντήρησης και τρένων εργασίας

Συντήρηση

Τα συστήματα CBTC μπορούν να σχεδιαστούν ειδικά για να ελαχιστοποιήσουν την απαιτούμενη προσπάθεια συντήρησης (τόσο προληπτική όσο και διορθωτική) ελαχιστοποιώντας το χρόνο επισκευής καθώς και το χρόνο επαναφοράς της συντήρησης από το προσωπικό συντήρησης. Συγκεκριμένα, η ποσότητα του εξοπλισμού ελέγχου σηματοδότησης / αμαξοστοιχίας βάσει τροχιάς μειώνεται σημαντικά, ελαχιστοποιώντας έτσι την ανάγκη για το προσωπικό συντήρησης να εργάζεται δίπλα στο παρατρόχιο. Με συστήματα CBTC, η πλειονότητα του εξοπλισμού ελέγχου σηματοδότησης / αμαξοστοιχίας αυξάνεται όλο και περισσότερο ή βρίσκονται σε εύκολα προσβάσιμα δωμάτια ή κεντρικό εξοπλισμό. Τα συστήματα CBTC παρέχουν επίσης βελτιωμένη συντήρηση και διαγνωστικές δυνατότητες για τον εντοπισμό και την αντίδραση σε αστοχίες εξοπλισμού σηματοδότησης και ελέγχου αμαξοστοιχίας. Αυτές οι διαγνωστικές δυνατότητες περιλαμβάνουν απομακρυσμένη διάγνωση και τοπικό ενσωματωμένο δοκιμαστικό εξοπλισμό και άλλες οθόνες βλαβών για την αντιμετώπιση προβλημάτων και την έγκαιρη αναγνώριση των αποτυχημένων εξαρτημάτων και λειτουργιών. Οι δυνατότητες καταγραφής δεδομένων παρέχονται επίσης σε εξοπλισμό παρατρόχιο του τρένου για να επιτρέψει την αναδημιουργία μιας ακολουθίας συμβάντων που θα επιτρέψει στο προσωπικό συντήρησης να εντοπίζει την αιτία οποιασδήποτε βλάβης ή / και λανθασμένης λειτουργίας εξοπλισμού που δεν μπορεί να αναγνωρισθεί από το ενσωματωμένο διαγνωστικά του εξοπλισμού. Παρόλο που απαιτούνται συγκεκριμένες και διαφορετικές δεξιότητες για τη συντήρηση του εξοπλισμού που βασίζεται σε υπολογιστές και επικοινωνίες σε σύγκριση με εκείνους

ενός σταθερού μπλοκ, σύστημα βασισμένο σε κύκλωμα διαδρομής, το κόστος συντήρησης του συστήματος σηματοδότησης και ελέγχου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο για την τεχνολογία CBTC από ό, τι για οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία σηματοδότησης . Πράγματι, η εμπειρία υποδηλώνει ότι μπορούν να προβλεφθούν μειώσεις του κόστους συντήρησης μόλις αποκτήσει εξοικείωση με τις λειτουργίες του συστήματος και αφού το σύστημα έχει επιτύχει τους καθορισμένους στόχους αξιοπιστίας / διαθεσιμότητας.

9.2.2 SWOT

Δυνατά σημεία

- ❖ Αύξηση της χωρητικότητας της γραμμής
- ❖ Ακρίβεια στους χρόνους των δρομολογίων
- ❖ Συχνότερα δρομολόγια
- ❖ Υψηλότερη δυναμική άνεση επιβατών
- ❖ Εξοικονόμηση ενέργειας
- ❖ Μείωση κόστους συντήρησης
- ❖ Μείωση λειτουργικού κόστους
- ❖ Βελτιστοποιημένο προφίλ οδήγησης
- ❖ Βελτιωμένη παροχή υπηρεσιών στους επιβάτες
- ❖ Καλύτερες συνθήκες ανταγωνισμού

Αδυναμίες

- ❖ Υψηλότερο κόστος εγκαταστάσεων, υποδομής και τροχαίου υλικού
- ❖ Μεγάλος χρόνος για την ανάπτυξη των νέων συστημάτων
- ❖ Διαφορετικά χαρακτηριστικά συρμών
- ❖ Μη ύπαρξη αποκλειστικού διαδρόμου κυκλοφορία
- ❖ Συνεργασία διαχειριστή υποδομής και φορέα εκμετάλλευσης
- ❖ Εξοικείωση των οδηγών με τη νέα πραγματικότητα

- ❖ Μετακίνηση οδηγών σε άλλες θέσεις εργασίες
- ❖ Απαίτηση αύξησης χωρητικότητας των δεδομένων επικοινωνιών

Ευκαιρίες

- ❖ Δημιουργία νέων θέσεων εργασίας
- ❖ Εξασφάλιση διαλειτουργικότητας
- ❖ Δημιουργία προτύπου ATO over ETCS
- ❖ Ανάπτυξη του συστήματος ETCS – Level 3 : κινούμενο μήκος αποκλεισμού (moving block)
- ❖ Ταυτόχρονη λειτουργία των συστημάτων ETCS και CBTC

Απειλές

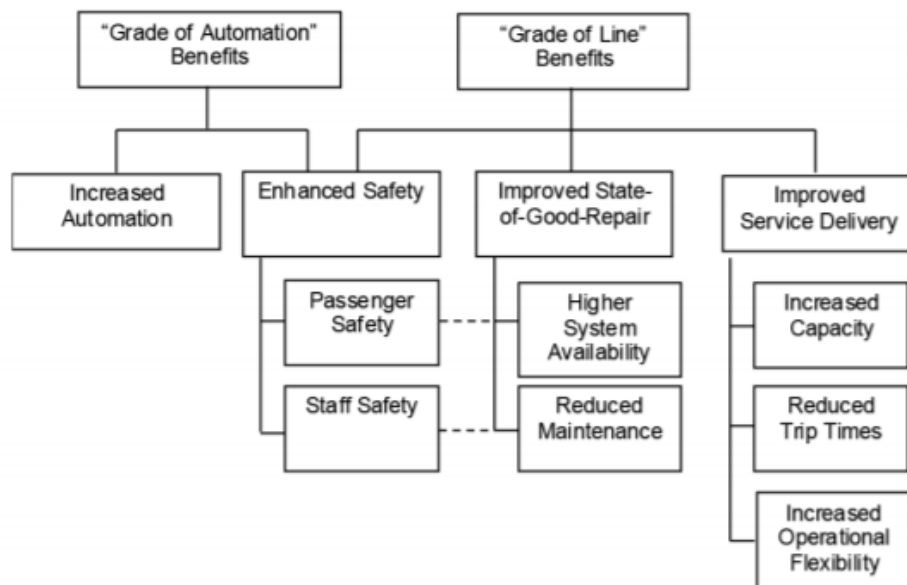
- ❖ Απροθυμία των χρηστών στην «αλλαγή»
- ❖ Μεγάλο το χρονικό διάστημα προσαρμογής
- ❖ Μειωμένη προηγούμενη εμπειρία της εφαρμογής
- ❖ Υπερεκτίμηση των τεχνολογικών δυνατοτήτων
- ❖ Μη τυποποίηση του συστήματος ATO για τις υπεραστικές γραμμές
- ❖ Μη ύπαρξη κατάλληλης νομοθεσίας
- ❖ Μη ύπαρξη εξειδικευμένου προσωπικού
- ❖ Μη ύπαρξη εξειδικευμένων εταιρειών για την επιτυχή ανάληψη των έργων σε όλες τις χώρες

9.2.3 Ανάλυση των παραγόντων κόστους / οφέλους

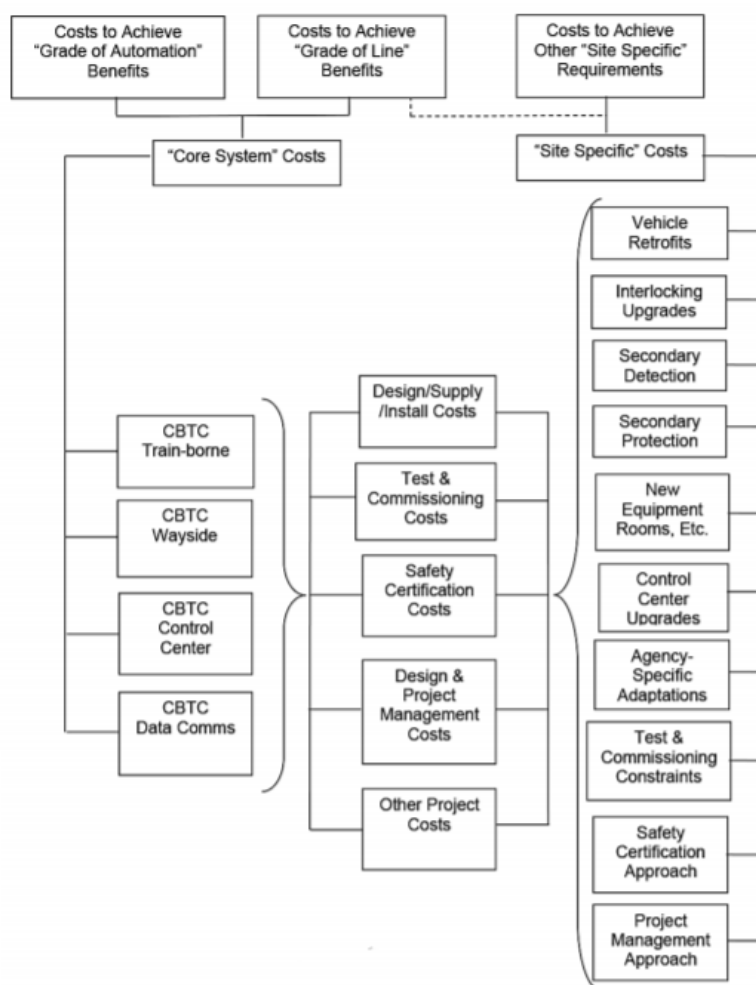
Το CBTC μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές διαφορετικές μορφές σε ένα φάσμα εφαρμογών σιδηροδρομικής διαμετακόμισης. Το CBTC μπορεί να εφαρμοστεί σε νέα έργα «Green Field» ή μπορεί να εφαρμοστεί σε έργα μετασκευής στο υπάρχον δίκτυο (εφαρμογή «Brown Field»). Μπορεί να υλοποιείται ως αυτόνομο έργο επανασηματοδότησης ή ως ένα μόνο στοιχείο από ένα συνολικό πρόγραμμα ενός οργανισμού για την αναβάθμιση και τον εκσυγχρονισμό των λειτουργικών του συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των αλληλοσυνδέσεων, του παρατρόχιου

εξοπλισμού, του κέντρου ελέγχου, του τρόπου μετάδοσης πληροφοριών στους επιβάτες, καθώς και τα συστήματα συλλογής ναύλων.

Το κόστος και τα συναφή οφέλη της εφαρμογής του CBTC μπορούν, επομένως, να ποικίλλουν ευρέως, ανάλογα με το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής και τα χαρακτηριστικά του δικτύου που αφορούν. Πράγματι, σε μια ανασκόπηση των δεδομένων κόστους του έργου CBTC ο δημόσιος τομέας αποκάλυψε ένα ευρύ φάσμα κόστους εφαρμογής του CBTC όταν μετρήθηκε έναντι απλών μετρήσεων, όπως το κόστος ανά χιλιόμετρο διαδρομής. Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε σε αυτή τη μελέτη, επομένως, είχε ως πρώτο βήμα την αναγνώριση των διαφόρων παραγόντων (οφέλη και κόστος) που θα μπορούσαν να συμβάλουν στην μελέτη μιας εταιρείας για την εφαρμογή του CBTC.



Εικόνα 50 Παράγοντες Οφέλους



Εικόνα 51 Παράγοντες Κόστους

9.3 Υπολογισμός Καθαρής Παρούσας Αξίας

9.3.1 Κόστος επένδυσης (CAPEX)

Το κόστος επένδυσης (CAPEX) υπολογίστηκε σε 93.600.000 ευρώ.

Για την αντικατάσταση σηματοδότησης, το κόστος που απαιτείται για την αντικατάσταση της τεχνολογίας και της διαδικασίας έγκρισης από τους αρμόδιους σιδηροδρομικούς ρυθμιστικούς φορείς θεωρείται ότι κυμαίνεται μεταξύ 85 και 105 εκατ. €. Στους υπολογισμούς περιλήφθηκε επίσης το κόστος και την εγκατάσταση εξοπλισμού εντός του οχήματος On-Board Controller (VOBC), κ.λπ., τον παρατρόχιο εξοπλισμό, την σήμανση (Signaling Equivalent Unit (SEU)) και την αφαίρεση του υφιστάμενου εξοπλισμού.

9.3.2 Κόστη λειτουργίας (OPEX)

Οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX) υπολογίζονται με βάση τέσσερα στοιχεία: τη μέση συντήρηση υποδομής, τη μέση συντήρηση τροχαίου υλικού, την παροχή ενέργειας και τους μισθούς προσωπικού.

Δεδομένου ότι τα λειτουργικά κόστη διατηρούνται σε ετήσια βάση κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής μιας τέτοιας επένδυσης, ο υπολογισμός εξέτασε την καθαρή παρούσα αξία των μελλοντικών δαπανών χρησιμοποιώντας επιτόκιο 5% σε μια συνολική περίοδο κύκλου ζωής 25 ετών.

Η ακόλουθη ενότητα παρέχει μια σύντομη συζήτηση σχετικά με το χρονοδιάγραμμα του έργου και τον υπολογισμό των κοστών και ωφελειών.

Στην πράξη, το χρονοδιάγραμμα του έργου αποτελείται από δύο φάσεις.

1. φάση κατασκευής (2022-2032) και
2. φάση λειτουργίας (2032-2047).

Στην αλλαγή των δύο αυτών Φάσεων υπολογίστηκε η αύξηση της τιμής του εισιτηρίου κατά 10 λεπτά. Επίσης, ως παραδοχή της μελέτης είναι η αύξηση των πωλήσεων ανά 5 έτη έχοντας υπόψιν την σταδιακή αύξηση της χωρητικότητας των αμαξοστοιχιών.

Passenger Rev	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
Total Tickets	780000	744000	759000	774000	790176	805199	820165	835078	850042	865061	880132	895261	910454	925717	941056	956476	971984	987587	1003292	1019104	1035030	1051077	1067252	1083563	1100007	1116583
Average Ticket	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
Total Passenger	10,200,000 €	10,424,400 €	10,632,000 €	10,845,564 €	11,062,472 €	11,283,700 €	11,505,340 €	11,728,408 €	11,952,928 €	12,178,932 €	12,406,444 €	12,635,500 €	12,866,144 €	13,098,412 €	13,332,340 €	13,567,972 €	13,805,352 €	14,044,524 €	14,285,536 €	14,528,432 €	14,773,264 €	15,020,080 €	15,268,944 €	15,519,912 €	15,773,040 €	16,028,312 €

Οι ακόλουθες παράγραφοι παρέχουν σύντομες περιγραφές για καθέναν από τους υπολογισμούς του OPEX που εμφανίζονται.

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
Infrastructure Maintenance	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €	194,000 €
Rolling stock	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €	2,800,217 €
Infrastructure costs	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €	50,000 €
Personnel	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €	5,000 €
Energy	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €
Maintenance (personnel)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Energy (personnel)	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €	1,000 €
Total Personnel Costs	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €	450,000 €
Total Personnel Savings	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €	72,500 €
Total OPEX	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €	3,000,717 €

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης συνίσταται σε λειτουργικά κόστη του τροχαίου υλικού και του κόστους συντήρησης της υποδομής και υπολογίστηκε με βάση τα παρακάτω μεγέθη.

- Εξοικονόμηση Κόστους Λειτουργίας του Προσωπικού - Saving on Staff Operating Cost

Η εξοικονόμηση δαπανών λειτουργίας του προσωπικού από την καθιερωμένη λειτουργία χωρίς οδηγό αντιπροσωπεύει μακράν το μεγαλύτερο όφελος καθώς αναμένεται μείωση των αναγκών του οργανισμού για οδηγούς και προσωπικό για την συντήρηση. Ο μέσος μισθός θεωρήθηκε 2.500 ευρώ.

- Κόστος Συντήρησης Υποδομής και Συστημάτων – Maintenance Costs

Το μέσο κόστος συντήρησης της υποδομής θεωρείται ότι είναι 1,7k € / km, εκτός εάν υπάρχει σημαντική αλλαγή στον εξοπλισμό. Το κόστος συντήρησης τροχιάς / υποδομής μπορεί να αυξηθεί, ωστόσο, από την αύξηση της χωρητικότητας.

Τα έξοδα συντήρησης του τροχαίου εξοπλισμού επίσης υπολογίστηκαν στα €118.368/km.

• Έσοδα επιβατών - Total Passenger Revenue

Τα έσοδα των επιβατών υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των επιβατών, με το εισιτήριο ανά ταξίδι. Στη χρηματοοικονομική ανάλυση, το μέσο εισιτήριο θεωρήθηκε το 1,4 ευρώ καθώς είναι αυτό που χρησιμοποιείται στο 80% των περιπτώσεων.

Ως αποτέλεσμα του συνδυασμού κλασικής λειτουργίας κατά τις ώρες αιχμής και της λειτουργίας μετρό κατά τις ώρες αιχμής, το νέο σενάριο προσφέρει περισσότερα ταξίδια επιβατών σε σύγκριση με τη κλασική λειτουργία της γραμμής. Αυτό μεταφράζεται σε υψηλότερα έσοδα επιβατών.

9.4 Αποτελέσματα

Ο Πίνακας 7 παρακάτω εμφανίζει τα αποτελέσματα σε αριθμούς, για την γραμμή 2 του Μετρό Αθήνας.

Πίνακας 7 Αποτελέσματα κόστους ωφέλειας για την Γραμμή 2

FIGURES	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
TOTAL INVESTMENT CAPITAL EXPENDITURE (CAPEX)	€3.600.000 €																									
TOTAL OPERATION AND MAINTENANCE COSTS (OPEX)		€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €	€3.601.717 €
TOTAL PASSENGER REVENUE		€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €	€1.204.406 €
NET RESULT	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €	€1.395.594 €

Κατόπιν του προσδιορισμού των ανωτέρω μεγεθών προέκυψε η αντίστοιχη τιμή της καθαρής παρούσας αξίας στα 102.588,27 ευρώ και ως εκ τούτου το έργο θεωρήθηκε κερδοφόρο για τον οργανισμό.

9.5 Ανάλυση Ευαισθησίας

Ο κύριος στόχος της Ανάλυσης Ευαισθησίας είναι να εξετάσουμε την επίδραση των αποτελεσμάτων όταν κύριοι παράμετροι αλλάζουν. Στην οικονομική ανάλυση 2 παράμετροι είναι οι καθοριστικοί στο συνολικό αποτέλεσμα όπως:

1. Έσοδα επιβατών

2. Επιτόκιο

Συστήματα Ελέγχου Τρένων με βάση τις Επικοινωνίες και Συστήματα Διαχείρισης Σιδηροδρομικής Κυκλοφορίας

Εναλλάσσοντάς τους υπολογισμούς με βάση τις ανωτέρω παραμέτρους παρατηρήθηκε ότι με επιτόκιο 15% το έργο δεν θεωρείται προσοδοφόρο στις περισσότερες περιπτώσεις.

FIGURES	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
TOTAL INVESTMENT CAPITAL EXPENDITURE (CAPEX)	53.600.000 €																									
TOTAL OPERATION AND MAINTENANCE COSTS (OPEX)		5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	
TOTAL PASSENGER REVENUE	15.424.400 €	10.022.889 €	15.842.546 €	17.062.451 €	17.282.751 €	17.503.051 €	17.723.351 €	17.943.651 €	18.163.951 €	18.384.251 €	18.604.551 €	18.824.851 €	19.045.151 €	19.265.451 €	19.485.751 €	19.706.051 €	19.926.351 €	20.146.651 €	20.366.951 €	20.587.251 €	20.807.551 €	21.027.851 €	21.248.151 €	21.468.451 €	21.688.751 €	
NET RESULT	43.600.000 €	6.522.889 €	7.201.771 €	7.243.826 €	7.460.743 €	7.681.989 €	7.878.357 €	8.047.739 €	8.153.917 €	8.245.823 €	8.317.824 €	8.378.276 €	8.428.376 €	8.468.476 €	8.508.576 €	8.548.676 €	8.588.776 €	8.628.876 €	8.668.976 €	8.709.076 €	8.749.176 €	8.789.276 €	8.829.376 €	8.869.476 €	8.909.576 €	
Mileage: 400km/h, 2000'																										
Discount Rate	5,00%	10,00%	15,00%																							
NPV		102.288.200	12.546.000	14.946.000	16.946.000	18.946.000	20.946.000	22.946.000	24.946.000	26.946.000	28.946.000	30.946.000	32.946.000	34.946.000	36.946.000	38.946.000	40.946.000	42.946.000	44.946.000	46.946.000	48.946.000	50.946.000	52.946.000	54.946.000	56.946.000	

Επίσης, για σταδιακή αύξηση των εσόδων μικρότερη του 8% στο τέλος των 25 ετών το έργο δεν θεωρείται προσοδοφόρο. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά οι υπολογισμοί.

Καλύτερη

Περίπτωση

Passenger Rev	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
Total Tickets	7300000	7650000	8004250	8450662,5	8873195,625	9315840,438	9724540,938	10127395,04	10470454,55	10840809,8	11215622,12	11604965,44	12000000,0	12396750,0	12795000,0	13194750,0	13595000,0	13995750,0	14397000,0	14798750,0	15199500,0	15599500,0	15999500,0	16399500,0	16799500,0	17199500,0
Average Ticket	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	
Total Personnel	10.220.000 €	10.731.000 €	11.267.550 €	11.830.926 €	12.422.474 €	13.043.598 €	13.697.957 €	14.386.251 €	15.109.251 €	15.867.501 €	16.661.501 €	17.492.001 €	18.358.501 €	19.260.501 €	20.198.501 €	21.172.001 €	22.180.501 €	23.223.501 €	24.300.501 €	25.411.501 €	26.556.501 €	27.735.501 €	28.948.501 €	30.195.501 €	31.476.501 €	

FIGURES	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
TOTAL INVESTMENT CAPITAL EXPENDITURE (CAPEX)	53.600.000 €																									
TOTAL OPERATION AND MAINTENANCE COSTS (OPEX)		5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	
TOTAL PASSENGER REVENUE		15.424.400 €	10.022.889 €	15.842.546 €	17.062.451 €	17.282.751 €	17.503.051 €	17.723.351 €	17.943.651 €	18.163.951 €	18.384.251 €	18.604.551 €	18.824.851 €	19.045.151 €	19.265.451 €	19.485.751 €	19.706.051 €	19.926.351 €	20.146.651 €	20.366.951 €	20.587.251 €	20.807.551 €	21.027.851 €	21.248.151 €	21.468.451 €	21.688.751 €
NET RESULT	43.600.000 €	4.052.383 €	4.448.533 €	4.844.563 €	5.271.478 €	5.715.138 €	6.091.624 €	6.776.678 €	7.716.678 €	8.442.178 €	9.084.091 €	9.448.172 €	9.786.405 €	10.354.748 €	10.731.341 €	10.754.427 €	10.800.974 €	10.817.012 €	10.800.295 €	10.762.133 €	10.827.447 €	10.868.761 €	10.899.884 €	10.920.807 €	10.941.630 €	10.962.453 €
Mileage: 400km/h, 2000' 2000'																										
Discount Rate	5,00%	10,00%	15,00%																							
NPV		503.643.278,41 €	106.186.722,11 €	4.386.682,81 €																						

Χειρότερη Περίπτωση

Passenger Rev	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
Total Tickets	7300000	7330000	7371312,5	7410048,438	7447008,063	7482134,188	7515477,469	7547165,554	7577235,0	7605724,5	7632673,5	7658122,5	7682111,0	7704679,5	7725857,5	7745585,5	7763893,5	7780801,5	7796349,5	7810577,5	7823425,5	7834933,5	7845051,5	7853819,5	7861287,5	7867505,5
Average Ticket	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	
Total Personnel	10.220.000 €	10.271.000 €	10.322.450 €	10.374.000 €	10.425.812 €	10.477.937 €	10.530.425 €	10.583.317 €	10.636.654 €	10.690.475 €	10.744.721 €	10.799.432 €	10.854.649 €	10.910.412 €	10.966.661 €	11.023.436 €	11.080.687 €	11.138.454 €	11.196.667 €	11.255.357 €	11.314.563 €	11.374.225 €	11.434.383 €	11.495.077 €	11.556.347 €	

FIGURES	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047
TOTAL INVESTMENT CAPITAL EXPENDITURE (CAPEX)	53.600.000 €																									
TOTAL OPERATION AND MAINTENANCE COSTS (OPEX)		5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	5.851.717 €	
TOTAL PASSENGER REVENUE	15.424.400 €	10.022.889 €	15.842.546 €	17.062.451 €	17.282.751 €	17.503.051 €	17.723.351 €	17.943.651 €	18.163.951 €	18.384.251 €	18.604.551 €	18.824.851 €	19.045.151 €	19.265.451 €	19.485.751 €	19.706.051 €	19.926.351 €	20.146.651 €	20.366.951 €	20.587.251 €	20.807.551 €	21.027.851 €	21.248.151 €	21.468.451 €	21.688.751 €	
NET RESULT	43.600.000 €	6.522.889 €	7.201.771 €	7.243.826 €	7.460.743 €	7.681.989 €	7.878.357 €	8.047.739 €	8.153.917 €	8.245.823 €	8.317.824 €	8.378.276 €	8.428.376 €	8.468.476 €	8.508.576 €	8.548.676 €	8.588.776 €	8.628.876 €	8.668.976 €	8.709.076 €	8.749.176 €	8.789.276 €	8.829.376 €	8.869.476 €	8.909.576 €	
Mileage: 400km/h, 2000' 2000'																										
Discount Rate	5,00%	10,00%	15,00%																							
NPV		102.288.200	12.546.000	14.946.000	16.946.000	18.946.000	20.946.000	22.946.000	24.946.000	26.946.000	28.946.000	30.946.000	32.946.000	34.946.000	36.946.000	38.946.000	40.946.000	42.946.000	44.946.000	46.946.000	48.946.000	50.946.000	52.946.000	54.946.000	56.946.000	

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο τέλος της εργασίας υπάρχουν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα τόσο σε επίπεδο ραδιοεπικοινωνίας των συστημάτων ελέγχου των τρένων όσο και σε επίπεδο κοινωνικοοικονομικών αποτελεσμάτων. Αρχικά η ραδιοεπικοινωνία παίζει βασικό ρόλο στη σύγχρονη επικοινωνία μέσω σηματοδότησης συστημάτων καθώς συνδέει το τρένο με τον παράπλευρο εξοπλισμό για να μεταφέρει στο τρένο υψηλής ανάλυσης και σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες ελέγχου, τόσο στον Αστικό Σιδηρόδρομο όσο και στο σχεδιασμό του Ευρωπαϊκού Συστήματος Διαχείρισης της Σιδηροδρομικής κυκλοφορίας.

Με τη βοήθεια αυτών των πληροφοριών, το CBTC προσφέρει έναν αριθμό σημαντικών ωφελειών από ένα συμβατικό σύστημα σηματοδότησης, δηλαδή, μικρότερες χρονοαποστάσεις με αποτέλεσμα μεγαλύτερη χωρητικότητα, λιγότερο παρατρόχιο εξοπλισμό, μεγαλύτερη ακρίβεια, βελτιωμένη ασφάλεια και υποστήριξη για αυτοματοποιημένες λειτουργίες τρένων. Ενώ οι πρώτες τεχνολογίες επιβάλλουν υψηλή εγκατάσταση και κόστος συντήρησης, η μεγαλύτερη πρόκληση με την επικοινωνία μέσω Wi-Fi είναι οι παρεμβολές. Μια διεξοδική εξέταση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της χρήσης ραδιοεπικοινωνίας, ιδίως IEEE 802.11 Wi-Fi, για CBTC, έδειξε ότι η επιτυχία του Wi-Fi μπορεί να αποδοθεί κυρίως στους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, στην ευκολία εγκατάστασης και συντήρησης, και η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας ως αποτέλεσμα του άμεσα διαθέσιμου ραδιοεξοπλισμού COTS και η λειτουργία χωρίς άδεια. Από την άλλη πλευρά, η ευαισθησία σε παρεμβολές, η έλλειψη υποστήριξη για κινητικότητα, και το μικρό εύρος σήματος είναι μερικά από τα μειονεκτήματά του. Μια σύγκριση του Wi-Fi, βασισμένου ραδιοεξοπλισμού στα πρώιμα COTS, και σε custom εξοπλισμό αποδείχθηκε ως ο πρώτος φθηνότερος σε παραγγελίες μεγέθους. Μια σε βάθος επισκόπηση του δικτύου CBTC έδειξε ότι αν και μια τυπική απόσταση μεταξύ AP στο CBTC είναι μόνο 200-300 μέτρα λόγω της μικρής εμβέλειας των σημάτων Wi-Fi, μπορεί να κερδίσει σημαντικά μεγαλύτερο εύρος έως και σε διάφορα χιλιόμετρα προσαρμόζοντας διάφορες παραμέτρους. Μια αξιολόγηση σε εναλλακτικές μελέτες και τοπολογίες για τις ραδιοεπικοινωνίες σιδηροδρομικής γραμμής τρένο προς τροχιά έδειξαν ότι η εφεδρεία (συστήματα ανεκτικά σε σφάλματα- Fault Tolerance System) είναι το κλειδί για την παροχή υψηλής διαθεσιμότητας στο

CBTC, και η διαθεσιμότητα μπορεί να αυξηθεί δραματικά διασφαλίζοντας την εφεδρεία σε πολλαπλά επίπεδα.

Από την άλλη το Ευρωπαϊκό Σύστημα Διαχείρισης Σιδηροδρομικής Κυκλοφορίας (ERTMS) είναι το πρώτο διεθνές πρότυπο για επικοινωνία ελέγχου-χειρισμού αμαξοστοιχίας και επικοινωνίας αμαξοστοιχίας-εδάφους. Το GSM-R αποτελεί όπως αναφέρθηκε ως αυτόνομο πυλώνα του συστήματος ERTMS, αποσκοπώντας σε υψηλή αξιοπιστία σε ασύρματη φωνητική επικοινωνία και διαβίβαση δεδομένων μεταξύ Μηχανοδηγών και προσωπικού εδάφους. Αλλά από την άλλη το GSM-R δεν παρέχει μετάδοση packet-switched με το TDMA να εκχωρεί ένα χρονικό διάστημα ενός καρέ (frame) σε κάθε σύνδεση και οι πόροι του GSM-R να εκχωρούνται συμμετρικά σε ανερχόμενες και κατερχόμενες συνδέσεις. Παράλληλα το σχήμα διαμόρφωσης GMSK, το οποίο χρησιμοποιείται στο GSM-R, δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει πλήρως το πλεονέκτημα των καλών ραδιοεπικοινωνιών. Όπως είναι ξεκάθαρο, οι άκαμπτοι μηχανισμοί που εφαρμόζονται στο GSM-R δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις εφαρμογών που βασίζονται σε δεδομένα, καθιστώντας το GSM-R αναποτελεσματικό ως δίκτυο δεδομένων.

Επομένως οι σιδηρόδρομοι προσπαθώντας να υιοθετήσουν μια καλά αποδεδειγμένη τεχνολογία ραδιοεπικοινωνίας και να τη χρησιμοποιήσουν για τους σκοπούς τους με ελάχιστες τροποποιήσεις στράφηκαν σε εναλλακτικές λύσεις όπως το LTE και σε μελλοντικές όπως το 5G, με το τελευταίο να λειτουργεί ως ενοποιητής για ολόκληρο το εύρος των δικτύων 5G προσφέροντας μια ολόκληρη αλλαγή γενεών που επιτρέπει 1ms καθυστέρησης και ταχύτητες λήψης 1Gbps, κάτι που αποτελεί σημαντική βελτίωση σε σχέση με το προηγούμενο 4G και το LTE. Αξίζει να αναφερθεί ότι το Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) θα είναι το παγκόσμιο πρότυπο 5G για τις σιδηροδρομικές επικοινωνίες, σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κανονισμό και θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες και τις υποχρεώσεις των σιδηροδρομικών οργανισμών εκτός Ευρώπης. Το έργο FRMCS σχεδιάζει να εξασφαλίσει το εύρος συχνοτήτων από 5MHz σε 900MHz καθώς και την πρόσβαση στα 1900MHz και / ή 2300MHz μετά τη μετάβαση. Με τις εφαρμογές του FRMCS θα καλυφθούν οι υπηρεσίες που σχετίζονται με την πλήρη αυτοματοποίηση των τρένων , GoA 3 και GoA 4, καθώς και ο απομακρυσμένος έλεγχος και η επίβλεψη του εξοπλισμού επί του συρμού και η υποστήριξη του IoT, της απομακρυσμένης συντήρησης ή επιδιόρθωσης βλαβών , αλλά και η πληροφόρηση σε πραγματικό χρόνο των επιβατών.

Από οικονομική άποψη, η επιλογή του CBTC με λειτουργία UTO για τη Γραμμή 2 του Μετρό της Αθήνας προέρχεται αρχικά από τέσσερις κύριες πηγές: το επιπλέον κόστος που σχετίζεται με νέα υποδομή, το επιπλέον κόστος για το τροχαίο υλικό που συμμορφώνεται με το UTO, το αυξημένο εισόδημα λόγω περισσότερων επιβατών και το μειωμένο κόστος προσωπικού λόγω της λειτουργίας UTO. Όλα αυτά υπολογίζονται ως αποτέλεσμα από κοινωνική οικονομική άποψη, με κύριο συντελεστή να προέρχεται από τα οφέλη των χρηστών, ιδίως από την εξοικονόμηση χρόνου στις δημόσιες συγκοινωνίες, με περισσότερα ωριαία τρένα αφού υπάρχει μειωμένη χρονοαπόσταση. Τα συμπεράσματα προέρχονται από τη συνολική ανάλυση όπου επικεντρώνεται στα ισχυρότερα βασικά ευρήματα και μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- Επίδραση UTO

Από οικονομικής άποψη, η επίδραση μπορεί να αποδειχθεί σαφώς στη δυνατότητα να αυξηθεί το επίπεδο εξυπηρέτησης. Η επένδυση σε ένα τέτοιο σύστημα στο σύνολο των περιπτώσεων ήταν επικερδής για τον οργανισμό.

- Λειτουργική ευελιξία

Η επίδραση του UTO και τα σενάρια που ερευνήθηκαν θα πρέπει να θεωρηθούν ως επιβεβαιωμένη απόδειξη της έννοιας, αντί ως προτάσεις για μελλοντικά επιχειρησιακά σχέδια. Για αυτόν τον λόγο, δεν απαιτείται η απόφαση για την εισαγωγή του UTO να ακολουθείται απαραίτητα από αποφάσεις σχετικά με το ακριβές επιχειρησιακό σχέδιο. Αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί ως μέρος της πιθανής μελλοντικής διαδικασίας υποβολής προσφορών.

- Διάθεση με βάση την ανάπτυξη και τη σταδιακή εφαρμογή

Το προτεινόμενο σενάριο διάθεσης βασίζεται στη δοκιμή και την έγκαιρη ανάπτυξη της Γραμμή 2 του Μετρό, αφήνοντας τη συντριπτική πλειονότητα του δικτύου αδιατάρακτη έως ότου εφαρμοστεί μια πιο ισχυρή λύση και συλλεχθούν, αναθεωρηθούν και αξιολογηθούν επαρκή διδάγματα. Μόλις η Γραμμή 2 μετατραπεί σε λειτουργία UTO, ένα διαδοχικό σχέδιο διάθεσης τριών βημάτων που περιλαμβάνει τη Γραμμή, θα προγραμματιστεί λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα της Γραμμής, συμπεριλαμβανομένης της προσβασιμότητας σε αποθήκες και εργαστήρια.

- Οργανωτικός αντίκτυπος

Ο πιο προφανής οργανωτικός αντίκτυπος θα είναι η μείωση των υπαρχόντων οδηγών τρένων και των υπεύθυνων συντήρησης. Το υπάρχον προσωπικό εξυπηρέτησης επί τρένων και πλατφορμών μπορεί πιθανώς να διευρυνθεί σε μια ομάδα περίπου επιμελητών εξυπηρέτησης, όπως είναι γνωστό από το Metro σήμερα. Οι αλλαγές

συμβάλλουν σημαντικά στα τελικά οικονομικά αποτελέσματα. Ωστόσο, ένας συνδυασμός φυσικής μείωσης του προσωπικού (διατήρηση, αλλαγές θέσεων εργασίας) και πιθανή μεταφορά μηχανοδηγών σε άλλες θέσεις εργασίας ή απόλυσης συνιστά τη διατήρηση έντονης και γενικής διαδικασίας μετάβασης, η οποία θα πρέπει να υποστηρίζεται από στρατηγικές διαχείρισης αλλαγών και ισχυρή ηγεσία.

- Εκτίμηση κινδύνου

Η συνολική εκτίμηση επικινδυνότητας δείχνει προς την κατεύθυνση ότι τα πιο σημαντικά περιστατικά ενδέχεται να σχετίζονται με εξαρτήσεις από άλλα εξωτερικά αναπτυξιακά έργα, τα οποία δεν είναι υπό τον έλεγχο του δυνητικού έργου UTO. Και, ο συνδυασμός νεότερων αποδεδειγμένων λύσεων σε συνδυασμό με ένα υπάρχον σύστημα, δηλαδή η λειτουργία UTO σε ένα μεγάλο σιδηροδρομικό δίκτυο που δεν είχε αρχικά σχεδιαστεί για λύση χωρίς οδηγό σχεδόν εξ ολοκλήρου πάνω από το έδαφος, μπορεί επίσης να είναι πρόκληση. Επιπλέον, όσον αφορά τις εξωτερικές εξαρτήσεις, θα υπάρξει μια ισχυρή απάντηση, ότι πολύ περισσότερα στοιχεία για την πραγματική απόδοση θα είναι διαθέσιμα πολύ πριν χρειαστούν οι απαραίτητες αποφάσεις σχετικά με το UTO.

Συνοψίζοντας, η ανάλυση τονίζει ότι το UTO είναι η καλύτερη επιλογή με τις καλύτερες προφανείς δυνατότητες για μελλοντικά οφέλη. Επομένως, είναι η σύσταση να πραγματοποιηθεί το επόμενο βήμα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων προς την κατεύθυνση του UTO με μια παράλληλη μακροπρόθεσμη στρατηγική προμηθειών που βασίζεται σε ελεγχόμενες πύλες αποφάσεων και επιτρέπουν ακόμα και την διαδικασία υποστήριξη του IoT.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Access Point	Ασύρματο σημείο πρόσβασης ή σταθμός βάσης
CBTC	Επικοινωνία αμαξοστοιχίας με βάση τις επικοινωνίες
CAPEX	Κόστος Επένδυσης
Fixed Block	Σταθερο Μπλοκ
Handover	Παράδοση
Interlocking	Συμπλεξη
Latency	Καθυστέρηση
Moving Block	Κινούμενο μπλοκ
OPEX	Κόστη λειτουργίας
Redundancy	Εφεδρεία
Track circuit	Κύκλωμα τροχιάς

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

AP	Access Points
ATC	Automatic Train Control
ATO	Automatic Train Operation
ATP	Automatic Train Protection
ATS	Automatic Train Supervision
CBTC	Communication based train control
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ETCS	European Train Control System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM-R	Global System for Mobile Communications-Railway
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LTE	Long Term Evolution
NGTC	Next Generation Train Control
RFID	Radio Frequency Identification
TETRA	Terrestrial Trunked Radio

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Martin Raab and Belinda Griffin-Cryan, *Digital Transformation of Supply Chains*, Capgemini Consulting, 2011.
- [2] Dr. Reinhard Geissbauer, Stefan Schrauf, Philipp Berttram and Farboud Cheraghi, *Digital Factories 2020 – Shaping the future of manufacturing*, PwC Germany, 2017.
- [3] Sam Palmisano, *Digital Supply Chain Transformation Guide Essential Metrics*, GLOBAL DIGITAL SUPPLY CHAIN COMMUNITY, 2017.
- [4] Adam Mussomeli, Doug Gish and Stephen Laaper, “*The rise of the digital supply network*”, Deloitte University Press, 2016
- [5] Brenna Sniderman, Monica Mahto, and Mark Cotteleer, *Industry 4.0 and manufacturing ecosystems: Exploring the world of connected enterprises*, Deloitte University Press, February 22, 2016, <http://dupress.com/articles/industry-4-0-manufacturing-ecosystems-exploring-world-connected-enterprises/>.
- [6] Tony Hines, *Supply Chain Strategies: Demand Driven and Customer Focused* (Routledge, 2014).
- [7] Moore’s Law refers to the principle developed by Gordon Moore of Intel in 1965, which observed that processing capabilities would double roughly every two years.
- [8] Jonathan Holdowsky et al., *Inside the Internet of Things (IoT): A primer on the technologies building the IoT*, Deloitte University Press, August 21, 2015, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/internet-of-things/iot-primer-iot-technologies-applications.html>.
- [9] Stephen A. Edwards, “History of processor performance,” Columbia University Department of Computer Science, April 24, 2012, <http://www.cs.columbia.edu/~sedwards/classes/2012/3827-spring/advanced-arch-2011.pdf>.
- [10] EMC and IDC, “Executive summary,” *The digital universe of opportunities: Rich data and the increasing value of the Internet of things*, April 2014, <http://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-summary.htm>.
- [11] Joe Mariani, Evan Quasney, and Michael E. Raynor, “Forging links into loops: The Internet of Things’ potential to recast supply chain management,” *Deloitte Review* 17, Deloitte University Press, July 27, 2015, <http://dupress.com/articles/internet-of-things-supply-chain-management/>.
- [12] *Optimizing the Supply Chain through Digital Transformation*, KPMG, Risk and Compliance Magazine, 2019
- [13] Wolfgang Kersten, Mischa Seiter, Birgit von See, Niels Hackius, Timo Maurer (2017), *Trends and Strategies in Logistics and Supply Chain Management – Digital Transformation Opportunities*, (https://www.researchgate.net/publication/317567258_Trends_and_Strategies_in_Logistics_and_Supply_Chain_Management_-_Digital_Transformation_Opportunities, τελευταία πρόσβαση στις 23/02/2020)
- [14] Δρ. Γεώργιος Μαλινδρέτος, «Εφοδιαστική Αλυσίδα, Logistics και Εξυπηρέτηση Πελατών», ΣΕΑΒ, 2015.
- [15] http://www.railwaysignalling.eu/wpcontent/uploads/2016/09/ERTMS_ETCS_signalling_system_revF.pdf

- [16] European Commission. Commission decision amending Decision 2012/88/EU on the technical specifications for interoperability relating to the control-command and signalling subsystems of the trans-European rail system". 6 November 2012. 2012/696/EU.
- [17] UIC FRMCS Project. <https://uic.org/frmcs>. Retrieved 12/06/2021.
- [18] International Railway Journal. "Beyond GSM-R: the future of railway radio". Published 01/03/2017
- [19] 3GPP on FRMCS. <http://www.3gpp.org/newsevents/3gpp-news/1792-frmcs>. Retrieved 12/06/2021.
- [20] ERA 2015 04 1 RS. "Study on Migration of Railway Radio Communication System from GSM-R to Other Solutions". Published 20/05/2016.
- [21] Mission Critical Services in 3GPP. http://www.3gpp.org/NEWS-EVENTS/3GPP-NEWS/1875-MC_SERVICES Published 20/06/2017. Retrieved 14/06/2021.
- [22] Bienfait, B., Zoetardt, P., & Barnard, B. (2012). Automatic train operation: The mandatory improvement for etcs applications. IRSE.
- [23] Critical Software (2014). ERTMS and CBTC side by side. The main difference and state-of-the art . February 2014.
- [24] https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/evolution_of_railway_radio_communication_system_definition.pdf
- [25] https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/145161981/PhD_thesis_Jahanzeb_Farooq.pdf
- [26] <https://core.ac.uk/download/pdf/84004038.pdf>
- [27] https://www.researchgate.net/publication/257878017_Handoff_management_in_communicationbased_train_control_networks_using_stream_control_transmission_protocol_and_IEEE_80211p_WLANs
- [28] <https://www.thalesgroup.com/en/communications-based-train-control-cbtc-signalling>
- [29] <https://docplayer.gr/63922848-Systimata-simatodotisis-kai-tehnologies-eleghoy-kykloforias-sidirodromon.html>
- <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=OJ:C:2014:226:FULL&from=EN>
- [30] https://www.researchgate.net/publication/320469190_Safety_Analysis_of_a_CBTC_System_A_Rigorous_Approach_with_Event-B
- [31] https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/44359/master_Bhattacharya_Arghya_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [32] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9327018>
- [33] <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/8526/1/King18MScbyRes.pdf>