

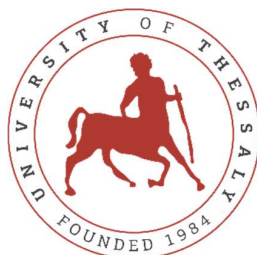
UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Disruption Management and Contingency Planning in Railway Freight Transportations

by
Georgia Sterpi
Mechanical Engineer UTH
&
Kyrillos Chatzimpaloglou
Mechanical Engineer UTH

Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in
Logistics & Supply Chain Management at the University of Thessaly

Volos, 2022



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Σενάρια αποφυγής κρίσεων σε σιδηροδρομικές μεταφορές

από

Τζωρτζίνα Στέρπη

Μηχανολόγο Μηχανικό Π.Θ

&

Κύριλλο Χατζημπαλόγλου

Μηχανολόγο Μηχανικό Π.Θ

Υποβλήθηκε ως μέρος των προϋποθέσεων για την απόκτηση του μεταπτυχιακού
τίτλου σπουδών στη Διοίκηση Εφοδιαστικής Αλυσίδας & Logistics από το
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βόλος, 2022

© 2022 Georgia Sterpi, Kyrillos Chatzimpaloglou

All rights reserved. The approval of the present Master of Science Thesis by the Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, University of Thessaly, does not imply acceptance of the views of the author (Law 5343/32 art. 202).

Approved by the Committee on Final Examination:

Advisor	Dr. Athanasios Ziliaskopoulos, Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly
Member	Dr. Stilianos Koukoumialos Professor of Operations Research and Operations Management, University of Thessaly
Member	Dr. Athanasios Lois, Network Operation Center, University of Thessaly

Date Approved: [19 October 2022]

Acknowledgements

Πάνω από όλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή μας κ. Αθανάσιο Ζηλιασκόπουλο, που όλα αυτά τα χρόνια έχει αποτελέσει τεράστια πηγή έμπνευσης, μεταλαμπαδεύοντας τις γνώσεις και το πάθος του για τον χώρο των Logistics. Ευχαριστίες θα θέλαμε να απευθύνουμε στον καθηγητή μας κ. Αθανάσιο Λόη, υπό του οποίου την στενή καθοδήγηση καταφέραμε να πορευτούμε σε αυτό το ταξίδι του μεταπτυχιακού ΔΕΑΛ, φτάνοντας αισίως μέχρι και το τέλος με την παρούσα εργασία. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας κ. Στυλιανό Κουκούμιαλο, για την συμμετοχή και υποστήριξή του. Τέλος, είμαστε ευτυχείς και ευγνώμονες για όλους τους καθηγητές μας οι οποίοι μας δίδαξαν και μας εφοδίασαν όχι μόνο για την ακαδημαϊκή μας σταδιοδρομία αλλά και για την επαγγελματική.

Disruption Management and Contingency Planning in Railway Freight Transportations

Georgia Sterpi

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly

&

Kyrillos Chatzimpaloglou

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly

Supervisor: Dr. Athanasios Ziliaskopoulos

Professor of Optimization of Production/Transportation Systems

Abstract

Σε περιπτώσεις μεγάλων διαταραχών στις σιδηροδρομικές μεταφορές που αφορούν φορτία (π.χ. μπλοκαρισμένες γραμμές ή βλάβες) οι υπεύθυνοι για την ομαλή κυκλοφορία θα πρέπει να εφαρμόζουν γρήγορα και κατάλληλα μέτρα, για την αποφυγή της συμφόρησης, την πρόληψη της διάδοσης της καθυστέρησης στο υπόλοιπο δίκτυο και την επιτυχή παράδοση των αγαθών στον προορισμό τους. Στο σιδηροδρομικό δίκτυο χρησιμοποιούνται προκαθορισμένες λύσεις που ονομάζονται σχέδια έκτακτης ανάγκης για να βοηθήσουν τους υπεύθυνους για την κυκλοφορία στην αντιμετώπιση της εν λόγω διαταραγμένης κυκλοφορίας. Κάθε σχέδιο έκτακτης ανάγκης αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σενάριο διακοπής σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία που έχει σχεδιαστεί χειροκίνητα από έμπειρους ελεγκτές κυκλοφορίας. Αυτά τα ειδικά σχέδια τοποθεσίας καθορίζουν ποιες αμαξοστοιχίες πρέπει να συνεχίσουν και ποιες θα πρέπει να ακυρωθούν ή να επαναδρομολογηθούν. Σε αυτή τη διπλωματική θα επιχειρήσουμε να εξετάσουμε τέτοια σενάρια σε περίπτωση που η κίνηση διακόπτεται από σύνορα μιας Α χώρας σε σύνορα μιας Β χώρας.

Key words: Contingency Planning, Disruption Management, Freight, Railway, Cargo, Σενάρια κρίσης, Resilience Management

Πίνακας Περιεχομένων

1.0 Εισαγωγή	11
1.2 Rail Net Europe.....	13
2.0 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	14
2.1 Disruption Management.....	14
2.2 Resilient System	16
2.3 Contingency Plan	22
2.3.1 Contingency Plan – Rail Net Europe	25
2.4 Διαταραχές και διακοπές.....	30
2.5 Επαναπρογραμματισμός.....	32
2.6 Περιγραφή διαδρόμων μεταφοράς	34
2.7 Βασικοί Δείκτες απόδοσης KPIS.....	38
2.8 Σενάρια Κρίσης - Σχεδιασμός.....	51
2.8.1 Στρατηγικός σχεδιασμός	53
2.8.2 Τακτικός σχεδιασμός	54
2.8.3 Βραχυπρόθεσμος σχεδιασμός.....	55
2.8.4 Καθημερινός σχεδιασμός.....	56
2.8.5 Προγραμματισμός σε πραγματικό χρόνο	57
2.9 Η επιχειρησιακή διαδικασία	57
2.10 Εκτέλεση αποφάσεων	59
3. Διαδρομές και σενάρια διαταραχής.....	60
3.1 Αλγόριθμος Reschedule – Reroute	71
3.2 Επαναδομολόγηση : μαθηματική διατύπωση	73
3.3 Μαθηματική διατύπωση : Consolidation and dispatching.....	77
4.0 Επίλυση	79
4.1 Αλγόριθμος Dijkstra	79
4.2 Αλγόριθμος k-shortest path	82
4.3 Υλοποίηση σε Python	84
4.4 Αποτελέσματα σεναρίων	90
5.Συμπέρασμα.....	93
ΑΡΕΝΔΙΧ... ..	95
Βιβλιογραφία	108
Ιστοσελίδες.. ..	110

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Διαχειριστές υποδομών.	29
Πίνακας 2: KPIs – Διαχείρισης Χωρητικότητας	41
Πίνακας 3 : KPIs – Επιχειρησιακού	42
Πίνακας 4 : KPIs – Ανάπτυξης Αγοράς.....	42
Πίνακας 5: Offered VS Requested Capacity, πηγή RNE.	46
Πίνακας 6: Σύνολο τρένων στα σύνορα, πηγή RNE.	49
Πίνακας 7: Λεπτομέρειες κόμβων.	86
Πίνακας 8: Πίνακας αποστάσεων	87
Πίνακας 9: Αριθμός βαγονιών και βάρος	90

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Bathtub	12
Εικόνα 2 Απόδοση ελαστικού συστήματος	21
Εικόνα 3 Ορισμός διεθνούς διαταραχής	23
Εικόνα 4 Διάδρομοι Μεταφοράς	34
Εικόνα 5 Rail Freight Corridors Map 2022 πηγή RNE	37
Εικόνα 6 KPIs	39
Εικόνα 7 Όγκος προσφερόμενης χωρητικότητας, πηγή RNE.	43
Εικόνα 8 Όγκος ζητούμενης χωρητικότητας, πηγή RNE.	43
Εικόνα 9 Όγκος ζητούμενης χωρητικότητας, πηγή RNE	44
Εικόνα 10 Αριθμός αντικρουόμενων αιτημάτων	44
Εικόνα 11 Διαδρομή RFC 7: Orient / East-Med, πηγή RNE.....	45
Εικόνα 12 Offered VS Requested, πηγή RNE.	47
Εικόνα 13 Ποσοστό πληρότητας, πηγή RNE	47
Εικόνα 14 Συνέπεια μικρότερη των 30 λεπτών, πηγή RNE	48
Εικόνα 15 Συνέπεια μικρότερη των 15 λεπτών, πηγή RNE.	48
Εικόνα 16 Αριθμός τρένων που πέρασαν τα σύνορα, πηγή RNE	49
Εικόνα 17 Μεταβολή αριθμού τρένων στα σύνορα 2020-2021, πηγή RNE.	50
Εικόνα 18 Timeline σχεδιασμού.....	52
Εικόνα 19 Διαδικασία εφαρμογής απόφασης.....	57
Εικόνα 20 : Διαδρομή συρμού, πηγή PEARL.	60
Εικόνα 21 : Διάγραμμα ροής επιλογής εναλλακτικού προορισμού.....	61
Εικόνα 22 Σενάριο 1 , διαδρομή Α - Β	63
Εικόνα 23 Σενάριο 2 , διαδρομή Α - Β	64
Εικόνα 24 Σενάριο 3 , διαδρομή Α - Β	65
Εικόνα 25 Σενάριο 4 , διαδρομή Α - Β	66
Εικόνα 26 Σενάριο 5 , διαδρομή Α - Β	67
Εικόνα 27 Σενάριο 6 , διαδρομή Α - Β	68
Εικόνα 28 Σενάριο 7	69
Εικόνα 29 Σενάριο 8 , διαδρομή Α - Β	70
Εικόνα 30 Γράφημα ανάθεσης στάσεων διαδρομής σε RFC υπό την μορφή κόμβων και ακμών.....	84
Εικόνα 31 Διάδρομοι και κόμβοι.....	85

1.0 Εισαγωγή

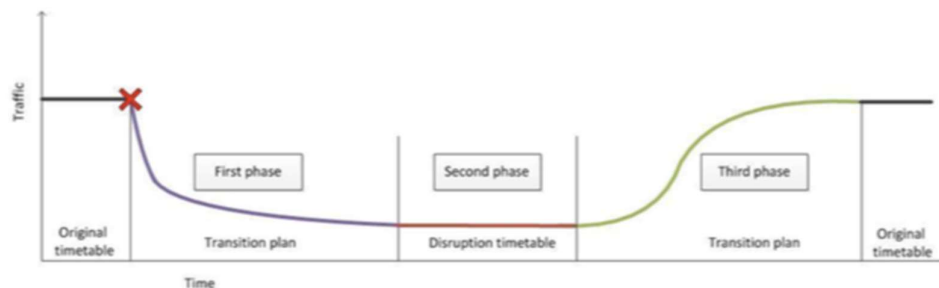
Τα δίκτυα σιδηροδρομικής διαμετακόμισης παρέχουν επιδόσεις υψηλής χωρητικότητας σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές λύσεις μεταφορών σε πόλεις με υψηλά επίπεδα οδικής συμφόρησης (De-Los-Santos et al. 2012). Δυστυχώς, οι αμαξοστοιχίες δεν λειτουργούν πάντα ή καθόλου εγκαίρως λόγω απροσδόκητων γεγονότων, όπως δυσλειτουργίες υποδομής, ατυχήματα και ακραίες καιρικές συνθήκες. Τέτοια γεγονότα ονομάζονται διαταραχές (Jespersen-Groth et al. 2009). Τα γεγονότα αυτά μπορούν να οδηγήσουν στην ταχεία υποβάθμιση της παρεχόμενης υπηρεσίας (Kepaptsoglou and Karlaftis 2009) και τα αποτελέσματα τέτοιων φραγμάτων μπορεί να είναι σημαντικά. «Όταν δεν γίνονται εκ των προτέρων προετοιμασίες, οι ασυντόνιστες απαντήσεις μπορούν να συνδυαστούν με τεράστια δημόσια σύγχυση και αβεβαιότητα για να αφήσουν το σύστημα αστικών μεταφορών σε κατάσταση σχεδόν παράλυσης» (Belobaba 1982).

Παρά τις κρίσιμες επιπτώσεις που μπορεί να έχουν οι σιδηροδρομικές διαταραχές, λίγες μελέτες εξετάζουν την αποτελεσματικότητα εναλλακτικών τρόπων υποδοχής των ταξιδιών που έχουν πάθει οποιουδήποτε είδους διαταραχή (Janarthanan and Schneider 1984; Tsuchiya, Sugiyama et al. 2006).

Αυτή η διπλωματική πραγματεύεται τα εναλλακτικά σχέδια ή αποφάσεις που, κατά το βέλτιστο, οφείλουν να παρθούν για τη διαχείριση επικείμενων κρίσεων. Ο σκοπός είναι, ιδανικά να μην διαταραχθεί ή να διαταραχθεί το λιγότερο δυνατόν, το σιδηροδρομικό δρομολόγιο που μεταφέρει κάποια φορτία. Τα φορτία είναι συγκεκριμένα, με συγκεκριμένους χρόνους παράδοσης, όπως και τα δρομολόγια είναι συγκεκριμένα και πάντοτε ακολουθούν εγκεκριμένες οδούς. Τα δρομολόγια των φορτίων αυτών συνεπώς, είναι προγραμματισμένα, όμως πολλές φορές προκύπτουν διαφορών φύσεων διαταραχές. Οι εναλλακτικές λύσεις, τις περισσότερες φορές, αποφασίζονται στη στιγμή και δεν υπάρχει κάποιος μαθηματικοποιημένος τρόπος λήψης της απόφασης, έτσι ώστε να μας διασφαλίζει ότι θα κινηθούμε κατά τον βέλτιστο τρόπο.

Πιο συγκεκριμένα, τα σχέδια δεν εκπονούνται λεπτομερώς σε επίπεδο κατανομής των υποδομών και δεν καλύπτουν όλες τις πιθανές περιπτώσεις διακοπής σε ολόκληρο το δίκτυο. Στην πράξη θα μπορούσε, συνεπώς, να συμβεί όταν δεν υπάρχει κατάλληλο σχέδιο έκτακτης ανάγκης για μια κατάσταση διαταραχής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι υπεύθυνοι κυκλοφορίας αντιμετωπίζουν υψηλό φόρτο εργασίας και πολλή επικοινωνία για να καταλήξουν σε συμφωνία σχετικά με ένα κατάλληλο σχέδιο αποκατάστασης. Συνεπώς, τα σχέδια αυτά είναι στατικά και άκαμπτα, και ακόμη και αν υπάρχει κατάλληλο σχέδιο, οι ελεγκτές κυκλοφορίας πρέπει να προβούν σε προσαρμογές και να συμπληρώσουν τις λεπτομέρειες για την εφαρμογή τους. Θα ήταν μεγάλη βοήθεια εάν, για παράδειγμα, θα ήταν διαθέσιμη η υποστήριξη αποφάσεων που θα μπορούσε να προτείνει διαδρομές χωρίς συγκρούσεις και λεπτομέρειες για τα βραχυκυκλωμένα τρένα και στις δύο πλευρές της περιοχής διακοπής.

Για να προσεγγίσουμε τις διαταραχές μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το λεγόμενο bathtub model. Όπως φαίνεται και από τη βιβλιογραφία (Ghaemi and Goverde 2015), μας βοηθά στην κατανομή φάσεων της διαταραχής.



Εικόνα 1 Bathtub

Στην παραπάνω εικόνα, φαίνεται η παρέκκλιση από το αρχικό χρονοδιάγραμμα, με διαταραχή που οφείλεται στην κίνηση.

Το μοντέλο της μπανιέρας χρησιμοποιείται για τη μελέτη των διαταραχών. Το σχήμα της μπανιέρας παρουσιάζεται στην εικόνα 1. Αυτό το μοντέλο χωρίζεται σε τρεις φάσεις :

1. Όταν συμβαίνει μια διακοπή, η κυκλοφορία μειώνεται (πρώτη φάση).
2. Η κυκλοφορία παραμένει σε χαμηλότερο επίπεδο κατά τη διάρκεια του χειρισμού του προβλήματος (δεύτερη φάση).

3. Μετά την επίλυση του προβλήματος η κυκλοφορία αυξάνεται στο αρχικό χρονοδιάγραμμα (τρίτη φάση).

Στην πράξη, η κυκλοφορία ενδέχεται ακόμη και να διακοπεί εντελώς κοντά στην περιοχή διακοπής για την απομάκρυνση των παγιδευμένων αμαξοστοιχιών και την επανεκκίνηση μιας επαναπρογραμματισμένης λύσης από κενές γραμμές. Οι πρώτες και τρίτες φάσεις ονομάζονται μεταβατικές φάσεις, δεδομένου ότι αντιπροσωπεύουν τη μετάβαση της λειτουργίας από το αρχικό χρονοδιάγραμμα στο χρονοδιάγραμμα διακοπής και αντιστρόφως. Το χρονοδιάγραμμα διακοπής βασίζεται συνήθως σε προκαθορισμένο μακροσκοπικό χρονοδιάγραμμα από ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης. Τέτοιες διαταραχές, σαν τις προαναφερόμενες, μπορούν να ποικίλουν σημαντικά και θα αναφερθούν παρακάτω.

1.2 Rail Net Europe

Ο RailNetEurope (RNE) είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που ιδρύθηκε τον Ιανουάριο του 2004, σκοπός του οποίου είναι να επιτρέψει τη γρήγορη και εύκολη πρόσβαση στο ευρωπαϊκό σιδηροδρομικό δίκτυο, καθώς και να αυξήσει την ποιότητα και την αποτελεσματικότητα της διεθνούς σιδηροδρομικής κυκλοφορίας. Επί του παρόντος, το RailNetEurope αριθμεί 37 μέλη, τα οποία είναι διαχειριστές σιδηροδρομικής υποδομής ή/και φορείς κατανομής, με ένα συνδυασμένο σιδηροδρομικό δίκτυο που ξεπερνά τα 230.000 χιλιόμετρα σε όλη την Ευρώπη. Ο RNE δεν εκτελεί δρομολόγια τρένων. Αυτό γίνεται από τις σιδηροδρομικές επιχειρήσεις, οι οποίες δεν μπορούν να είναι μέλη του RNE.

Στόχος της ένωσης είναι η παροχή υποστήριξης στις σιδηροδρομικές επιχειρήσεις και στις διεθνείς δραστηριότητές τους (τόσο για εμπορευματικές όσο και για επιβάτες) και την αύξηση της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών των Διαχειριστών Υποδομής. Μαζί, τα μέλη του RailNetEurope εργάζονται για την εναρμόνιση των διεθνών όρων και διαδικασιών σιδηροδρομικών μεταφορών στον τομέα της διαχείρισης διεθνών σιδηροδρομικών υποδομών – που είναι πολύ διαφορετικές στην Ευρώπη – εισάγοντας παράλληλα μια εταιρική προσέγγιση για την προώθηση της ευρωπαϊκής σιδηροδρομικής επιχείρησης προς όφελος ολόκληρης της σιδηροδρομικής βιομηχανία σε όλη την Ευρώπη.

2.0 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Disruption Management

Η διαχείριση των διαταραχών αναφέρεται στη διαδικασία δυναμικής αναθεώρησης ενός επιχειρησιακού σχεδίου για την επίτευξη ενός νέου σχεδίου που αντικατοπτρίζει τους στόχους και τους περιορισμούς της πραγματικής κατάστασης (Yu and Qi 2004). Στο σιδηροδρομικό πλαίσιο, η διαχείριση των διαταραχών αναφέρεται στην προσαρμογή των τριών κύριων οντοτήτων : του χρονοδιαγράμματος, της κυκλοφορίας, του τροχαίου υλικού και των χρονοδιαγραμμάτων του πληρώματος, στην πραγματική κατάσταση. Όταν η σιδηροδρομική υποδομή δυσλειτουργεί, το τροχαίο υλικό διασπάται ή τα πληρώματα δεν είναι διαθέσιμα, μπορεί να εμποδιστεί η εκτέλεση του επιχειρησιακού σχεδίου σύμφωνα με το πρόγραμμα – στην περίπτωση αυτή η κατάσταση διακόπτεται και αρχίζει η διαδικασία διαχείρισης της διαταραχής. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται στα κέντρα ελέγχου λειτουργίας και ακολουθεί τρία βήματα. Κάθε βήμα σχετίζεται με την ενημέρωση μιας από τις τρεις προαναφερθείσες οντότητες.

Στο πρώτο βήμα, το χρονοδιάγραμμα επικαιροποιείται ακυρώνοντας ή αλλάζοντας αμαξοστοιχίες. Οι διαχειριστές αποφασίζουν ποιες υπηρεσίες επηρεάζονται από τη διακοπή και επικαιροποιούν αναλόγως το χρονοδιάγραμμα. Οι ενημερώσεις του χρονοδιαγράμματος ακολουθούν συνήθως ένα προκαθορισμένο σενάριο χειρισμού.

Στο δεύτερο βήμα, τα χρονοδιαγράμματα τροχαίου υλικού προσαρμόζονται ώστε να εξυπηρετούν το επικαιροποιημένο χρονοδιάγραμμα. Η κυκλοφορία του τροχαίου υλικού πρέπει να επικαιροποιείται ώστε να συμμορφώνεται με την πραγματική κατάσταση, ενώ παράλληλα να πληροί ορισμένους λειτουργικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί περιβάλλονται από τα άνω όρια του μήκους της αμαξοστοιχίας, τη συμβατότητα του τροχαίου υλικού με τη διαδρομή και τους σύνθετους περιορισμούς ελιγμών, ενώ προσπαθούν να κατανέμουν τη χωρητικότητα σε σχέση με τη ζήτηση, η οποία επηρεάζεται επίσης από τη διακοπή. Ένας γενικά στόχος σε αυτή τη διαδικασία να ελαχιστοποιήσει τις αλλαγές από τα υπάρχοντα

σχέδια. Οι αλλαγές στην κυκλοφορία του τροχαίου υλικού ενδέχεται να απαιτούν συντονισμό με τους τοπικούς ελεγκτές κυκλοφορίας των διαχειριστών υποδομής, ώστε να διασφαλίζεται ότι είναι δυνατές οι προτεινόμενες εργασίες ελιγμών και άλλα τοπικά ζητήματα. Με άλλα λόγια, το πρόβλημα επαναπρογραμματισμού τροχαίου υλικού εφαρμόζεται στο δεύτερο βήμα της διαδικασίας διαχείρισης της διαταραχής.

Η εκτέλεση των σιδηροδρομικών εργασιών περιλαμβάνει την παρακολούθηση των θέσεων και των μετακινήσεων όλων των πόρων και την αντίδραση σε τυχόν απροσδόκητες αποκλίσεις από τα σχέδια.

Στο τρίτο βήμα, τα προγράμματα του πληρώματος επικαιροποιούνται έτσι ώστε ο σωστός αριθμός εξειδικευμένων οδηγών να αποδίδεται σε κάθε αμαξοστοιχία στο επικαιροποιημένο χρονοδιάγραμμα. Το πρόβλημα επαναπρογραμματισμού του πληρώματος υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς, καθώς τα πληρώματα δικαιούνται διαλείμματα, υπάρχουν περιορισμοί στην επιτρεπόμενη διάρκεια των καθηκόντων και τα πληρώματα πρέπει να επιστρέψουν στις βάσεις του πληρώματός τους στο τέλος των καθηκόντων τους. Οι προτεινόμενες αλλαγές στα προγράμματα του πληρώματος διαπραγματεύονται με τα επηρεαζόμενα πληρώματα για να διασφαλιστεί ότι μπορούν να πραγματοποιηθούν στην πράξη.

Τα τρία στάδια είναι αλληλένδετα υπό την έννοια ότι, εάν δεν είναι δυνατή η ανάθεση τροχαίου υλικού ή πληρώματος στο δεύτερο ή τρίτο στάδιο σε σιδηροδρομική υπηρεσία, το χρονοδιάγραμμα από το πρώτο βήμα μπορεί να χρειαστεί να αναθεωρηθεί εκ νέου. Επιπλέον, η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε ένα δυναμικό περιβάλλον που επηρεάζει συνεχώς τις διαθέσιμες επιλογές κατά τη διάρκεια. Κατά συνέπεια, ο ολοκληρωμένος επαναπρογραμματισμός μπορεί να είναι χρήσιμος, αλλά εξακολουθεί να θεωρείται υπερβολικά περίπλοκος.

2.2 Resilient System

Οι κοινωνίες μας εξαρτώνται όλο και περισσότερο από την κρίσιμες υποδομές. Μια υποδομή ονομάζεται κρίσιμη όταν η μη διαθεσιμότητάς της έχει σοβαρό αντίκτυπο στην ευημερία, την υγεία, την ασφάλεια και την οικονομία της περιοχής στην οποία βρίσκεται αυτή η υποδομή ή του τομέα στον οποίο αυτή λειτουργεί. Σήμερα αυτές οι υποδομές είναι ολοένα πιο περίπλοκες και αλληλεξαρτώμενες, με αποτέλεσμα η διαταραχή σε μία από αυτές να καθίσταται δύσκολο να ρυθμιστεί και μπορεί γρήγορα να εξαπλωθεί και στις λοιπές εγκαταστάσεις λόγω της αλληλεξάρτησης. Συστήματα ενέργειας, τηλεπικοινωνιών και μεταφορών αποτελούν παραδείγματα υποδομών ζωτικής σημασίας.

Για την προστασία των κρίσιμων υποδομών από απειλές, έχουν διεξαχθεί μελέτες ανάλυσης των κοινωνικοτεχνικών συστημάτων. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις για την ανάλυση κινδύνου όπου συχνά συνίστανται στην εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης απειλής, την έκθεση και την ευπάθεια της υποδομής σε σχέση με την απειλή. Υπάρχει ανάγκη κατανόησης πως, εν καιρώ κρίσης, το σύστημα μπορεί να συνδυάσει τους πόρους του και τους εξωτερικούς πόρους ώστε να εξασφαλιστεί η επιχειρηματική και επιχειρησιακή συνέχεια.

Η έννοια της ανθεκτικότητας έχει εισαχθεί για να μετρήσει την ικανότητα του συστήματος να απορροφήσει τις διαταραχές και να προσαρμοστεί αναλόγως στην νέα κατάσταση. Η ανθεκτικότητα συνίσταται στην προετοιμασία του συστήματος για πιθανές διαταραχές, εφόσον οι τελευταίες ήταν αναπόφευκτες. Αυτό απαιτεί τακτική αξιολόγηση της διαχείρισης του συστήματος σχέδια, μέτρα ασφαλείας, ανάλυση κινδύνου και μέτρα προστασία του συστήματος από τους κινδύνους. Η δημιουργία ενός ανθεκτικού συστήματος προϋποθέτει την εφαρμογή συστημάτων που ενσωματώνουν, μεταξύ άλλων, αρκετά σχέδια διαχείρισης κινδύνου.

Αναφορικά με τα προληπτικά μέτρα, η έννοια της ανθεκτικότητας μπορεί να θεωρείται ως μια έννοια που δίνει έμφαση στην κατανόηση του τρόπου που θα ξεπεραστούν οι διαταραχές, πώς οι άνθρωποι θα μαθαίνουν να προσαρμόζονται δημιουργώντας ασφάλεια σε ένα περιβάλλον που εμφανίζει λάθη και προβλήματα.

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζουμε ορισμένους ορισμούς και χαρακτηριστικά ενός ανθεκτικού συστήματος και περιγράφουμε πως η ανθεκτικότητα ποσοτικοποιείται σε συστήματα μεταφορών. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η ανθεκτικότητα ορίζεται ως η δυνατότητα του συστήματος να μειώσει : τις πιθανότητες αποτυχίας, τις συνέπειες της αποτυχίας, τις ζημιές και το χρόνο ανάκαμψης. Πιο συγκεκριμένα, τα τέσσερα χαρακτηριστικά του ανθεκτικού συστήματος είναι τα παρακάτω:

- Στιβαρότητα (Robustness): Η ικανότητα του συστήματος να αποφύγει τη διαταραχή ή να μετριάσει τις συνέπειες της διαταραχής έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες στην απόδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, σε συστήματα σιδηροδρομικών μεταφορών, η αντοχή ορισμένων σταθμών ώστε να έχουν την δυνατότητα να ανταπεξέλθουν σε μερικούς τύπους εκρήξεων ή πυρκαγιάς χτίζοντας τα με τα κατάλληλα υλικά.
- Πλεονασμός (Redundancy): Η ικανότητα του συστήματος να συνεχίσει να λειτουργεί ακόμη και αν είναι αρκετές λειτουργίες του συστήματος αποτυγχάνουν, λόγω πλεονάσματος κάποιων λειτουργιών, υλικών ή δεξιοτήτων του συστήματος. Ένα παράδειγμα πλεονασμού σε σιδηροδρομική γραμμή είναι το γεγονός ότι υποσταθμοί ανόρθωσης που παρέχουν στα τρένα ισχύ έλξης κατασκευάζονται έτσι ώστε κάθε μέρος της γραμμής να τροφοδοτείται από τουλάχιστον δύο υποσταθμούς αποκατάστασης.
- Ευρηματικότητα (Resourcefulness): Η δυνατότητα του συστήματος να ανιχνεύει και να αναλύει τις διαταραχές έτσι ώστε να παρέχει επαρκή μέτρα για να ξεπεραστούν αυτές οι διαταραχές. Κατά τη διάρκεια σοβαρής διαταραχής, η κινητοποίηση των εξωτερικών πόρων για να ξεπεραστεί η διαταραχή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ευρηματικό χαρακτηριστικό του συστήματος. Η ικανότητα του οργανισμού στις μαζικές σιδηροδρομικές μεταφορές να επιχειρεί τα τρένα μόνο σε ένα μέρος της γραμμής όταν μία σοβαρή διαταραχή εμφανίζεται σε αυτή τη γραμμή μπορεί να θεωρείται ως ευρηματικό χαρακτηριστικό του συστήματος.

- Ταχύτητα (Rapidity): Η ικανότητα του συστήματος να ανακτά γρήγορα τα επίπεδα απόδοσης τουλάχιστον όσο καλά ήταν και τα αρχικά ή τουλάχιστον σε ένα αποδεκτό επίπεδο μετά την διαταραχή.
- Προσαρμοστικότητα (Adaptability) : Η ικανότητα του συστήματος να μαθαίνει από τις παλαιότερες διαταραχές ή γεγονότα έτσι ώστε να βελτιωθούν στο μέλλον τα προηγούμενα χαρακτηριστικά

Στην πράξη, αυτά τα χαρακτηριστικά είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν, ιδιαίτερα για συστήματα σιδηροδρομικών μεταφορών. Η τυπική πρακτική για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του συστήματος είναι η χρήση δεικτών απόδοσης του συστήματος, δείκτες που λαμβάνουν καλύτερα υπόψη αυτά τα χαρακτηριστικά.

Τέλος, η ανθεκτικότητα μπορεί να περιγραφεί και ως η ικανότητα του συστήματος να αντιμετωπίσει μια διαταραχή εντός αποδεκτών παραμέτρων υποβάθμισης και να επανέλθει μέσα σε ένα αποδεκτό χρόνο και κόστος. Με άλλα λόγια, η ανθεκτικότητα ενός συστήματος είναι η ικανότητα του συστήματος αυτού να μειώσει σε αποδεκτό επίπεδο την υποβάθμιση που δημιουργήθηκε από τις διαταραχές και να ανακτήσει την ονομαστική απόδοση σε εύλογο χρονικό πλαίσιο ελαχιστοποιώντας το κόστος και τον κίνδυνο. Με αυτόν τον ορισμό, αποδεικνύεται ότι η ανθεκτικότητα δεν μπορεί να βελτιωθεί χωρίς την υλοποίηση σχεδίων διαχείρισης κινδύνου σε σχέση με το σύστημα. (Adjete-Bahun et al. 2016)

Σε συνέχεια των προηγούμενων αναφορών για τον ορισμό του ανθεκτικού συστήματος και της ανάλυσης των στοιχείων που συμβάλουν στο να χαρακτηριστεί ένα σύστημα ανθεκτικό παρατίθεται το ακόλουθο σχεδιάγραμμα το οποίο οπτικοποιεί τις έννοιες αυτές εισάγοντάς τις σε ένα σύστημα αξόνων ώστε να γίνουν ευκολότερα κατανοητές.

Η υποθετική απόδοση του συστήματος των καμπυλών υπό κανονικές συνθήκες και ενόψει ενός διασπαστικού γεγονότος φαίνεται στην εικόνα 2. Προσπαθεί να ενσωματώσει όσο το δυνατόν περισσότερα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και παρέχει μια γενική επισκόπηση της απόδοσης ενός

συστήματος που εξαρτάται από το χρόνο. Για ένα σύστημα μεταφορών, η απόδοση μπορεί να γίνει κατανοητή ως η λειτουργία υπηρεσίας που προσφέρει και συνήθως μετρείται με λειτουργικές μετρήσεις όπως η χωρητικότητα των εξαρτημάτων, η ροή κυκλοφορίας και η διεκπεραίωση.

Συνολικά, η απόδοση σε σχέση με τον χρόνο εμφάνισης του γεγονότος διακοπής μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια: περιόδους πριν από τη διακοπή (t_0 , t_e), διακοπής (t_e , t_r) και μετά τη διακοπή ($t > t_r$). Στο στάδιο πριν από τη διακοπή, το σύστημα λειτουργεί στην αρχική κατάσταση όπως είχε προγραμματιστεί, όπου δεν επηρεάζονται τόσο η χωρητικότητα όσο και η ζήτηση του συστήματος. Είναι μια φυσιολογική κατάσταση μιας μεταφοράς συστήματος /δικτύου που ξεκινά τη στιγμή αναφοράς t_0 και τελειώνει όταν συμβεί ένα συμβάν διακοπής τη στιγμή t_e . Αυτή η χρονική περίοδος κυριαρχείται από την αξιοπιστία που επιτρέπει στο σύστημα να εκτελεί με την απαιτούμενη λειτουργία υπηρεσίας για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα χωρίς αποτυχία και παρέχει τη βασική γραμμή απόδοσης στην αρχική κατάσταση (Baroud et al. 2014).

Η απόδοση του συστήματος μειώνεται μόλις συμβεί το αποδιοργανωτικό συμβάν την ώρα t_e . Συνήθως, θα πέσει στην τιμή κατωφλίου όπου το σύστημα μεταφοράς πληροί απλώς τις χαμηλότερες απαιτήσεις και στη συνέχεια η υποβάθμιση συνεχίζεται μέχρι το χρόνο t_d , όταν οι αρνητικές επιπτώσεις από το διασπαστικό συμβάν απελευθερωθούν πλήρως. Εδώ, η απόδοση του συστήματος ερευνά τη χειρότερη κατάστασή του. Το σύστημα ανταποκρίνεται άμεσα τη στιγμή που επηρεάζεται, προκειμένου να μετριάσει τη διαταραχή και να επηρεάσει θετικά τη διαδικασία εξάπλωσής του κατά τις επιπτώσεις του. Εμπλέκονται στρατηγικές ανάκτησης για την αποκατάσταση της προσβασιμότητας του συστήματος και την ανάκτηση της λειτουργικότητάς του όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Σε αυτό το στάδιο, τόσο η στιβαρότητα όσο και ο πλεονασμός επηρεάζουν την αρχική μείωση της απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο, το πρώτο χαρακτηριστικό αποφασίζει πού βρίσκεται το χαμηλότερο σημείο, ενώ το δεύτερο καθορίζει τη διαφορά μεταξύ αρχικής και οριακής τιμής απόδοσης.

Στους τομείς των μεταφορών, ο πλεονασμός θεωρείται επίσης ως η ύπαρξη προαιρετικών διαδρομών μεταξύ προέλευσης και προορισμών, που μπορεί να βοηθήσει στον μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων των καταστροφών σε μια μεταφορά δίκτυο. Η ευπάθεια σε αυτή τη μελέτη αναφέρεται στη φυσική ευαισθησία του συστήματος σε διακοπές, που επηρεάζουν την ταχύτητα υποβάθμισης της απόδοσής του.

Το σχήμα της καμπύλης απόδοσης του συστήματος κατά τη διάρκεια της διακοπής επηρεάζεται από την ευρηματικότητα με δύο σημαντικές πτυχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη, δηλαδή η πρόσβαση στον πόρο και η προστασία του πόρου. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι σημαντικό στο σχεδιασμό και τον προγραμματισμό ενός συστήματος δικτύου μεταφορών

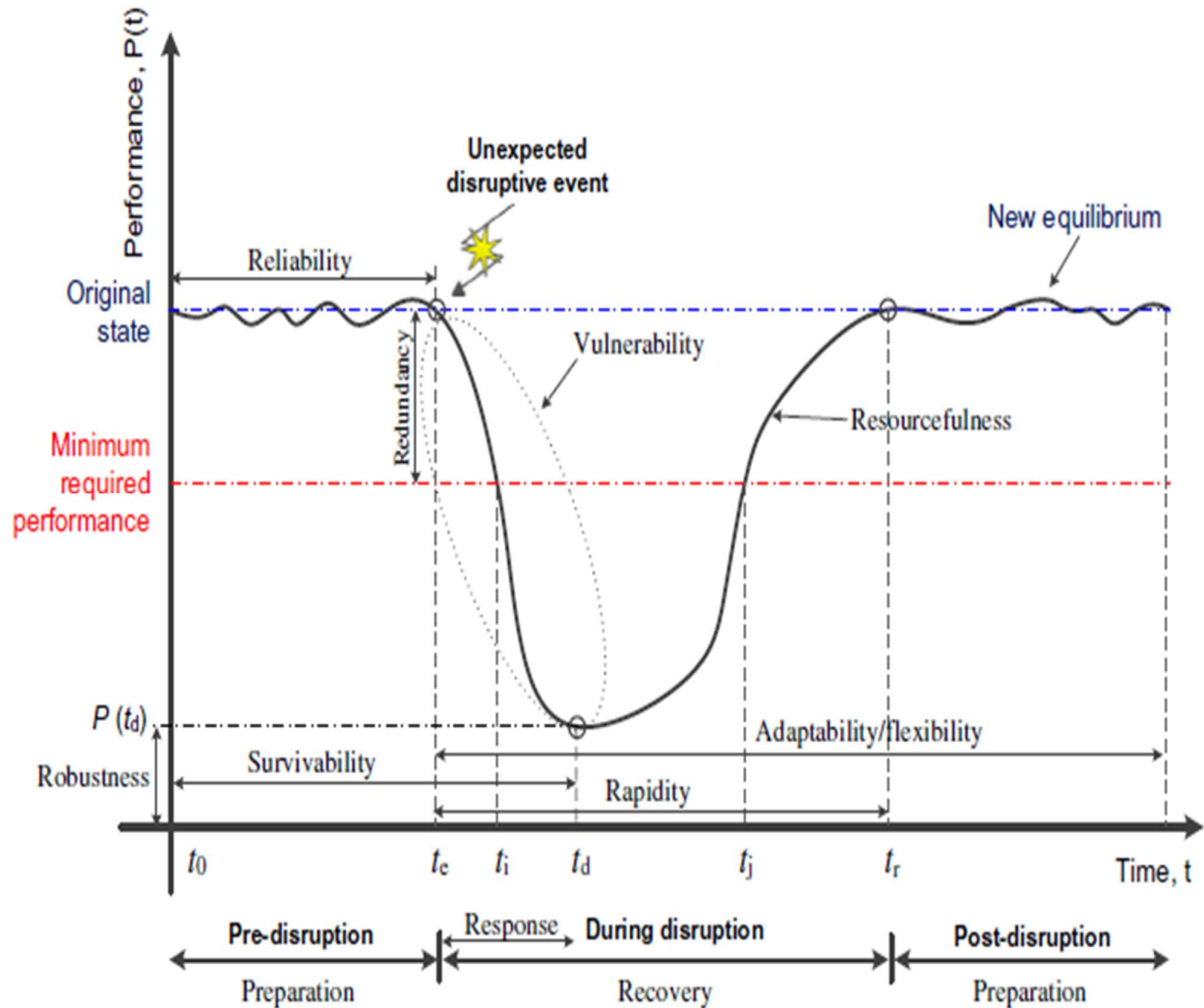
Η ταχύτητα και η δυνατότητα ανάκτησης είναι παρόμοια όσον αφορά την ανάκτηση από διακοπές, ενώ η ταχύτητα δίνει έμφαση στην ταχύτητα για την επίτευξη αυτού του στόχου, και επομένως έχει αντίκτυπο στη διάρκεια της μειωμένης απόδοσης του συστήματος.

Μετά το χρόνο t_r , το σύστημα σταθεροποιείται σε ένα άλλο αποδεκτό επίπεδο απόδοσης και ως εκ τούτου ξεκινά ένας νέος κύκλος απόδοσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η νέα ισορροπία μπορεί να είναι διαφορετική (είτε βελτιωμένη κατάσταση είτε μερικώς ανακτημένη κατάσταση) σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση πριν από διακοπές, σύμφωνα με τις απαιτήσεις.

Η προετοιμασία, ως ένα είδος στρατηγικής που είναι ζωτικής σημασίας για τον προγραμματισμό των μεταφορών, μπορεί να ενσωματωθεί πριν από μια διακοπή για να ενισχύσει τον πλεονασμό και την επινοητικότητα ενός συστήματος. Επίσης, η εμπειρία από προηγούμενες διακοπές (εάν υπάρχουν) θα συμβάλει στην προετοιμασία των ακόλουθων πιθανών ενοχλητικών γεγονότων.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, υπολογίζεται ότι τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει ένα ανθεκτικό σύστημα μεταφορών είναι η αξιοπιστία, ο πλεονασμός, η στιβαρότητα και η δυνατότητα ανάκτησης, καθώς αυτά

τα χαρακτηριστικά καθορίζουν κυρίως τη συνολική απόδοση ενός συστήματος μεταφορών για πόσο καιρό μπορεί να εκτελεστεί χωρίς να αποτύχει, ποιες ενέργειες θα κάνει απέναντι σε ένα διασπαστικό γεγονός, πόση λειτουργία θα παραμείνει μετά τη διακοπή του και πώς φτάνει σε μια νέα ισορροπία (Wan et al. 2018).



Εικόνα 2 Απόδοση ελαστικού συστήματος

2.3 Contingency Plan

Τα συμβάντα σε μια σιδηροδρομική υποδομή έχουν πάντα αντίκτυπο στις σιδηροδρομικές λειτουργίες. Τα περισσότερα περιστατικά αντιμετωπίζονται σε περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο από τον υπεύθυνο διαχειριστή υποδομής. Εάν επηρεάζονται τα δίκτυα τρένων γειτονικών διαχειριστών υποδομής, ο διαχειριστής της κυκλοφορίας του γειτονικού δικτύου ενημερώνεται άμεσα και συμμετέχει στη διαδικασία διαχείρισης συμβάντων. Αυτή η διαδικασία αποτελεί καθημερινή πρακτική μεταξύ των διαχειριστών υποδομής στην Ευρώπη.

Εάν υπάρξουν συμβάντα μεγάλης κλίμακας με σημαντικό διεθνή αντίκτυπο – διεθνής διακοπή-, ο διεθνής συντονισμός της διαχείρισης συμβάντων χρειάζεται υψηλή διαχειριστική προσοχή από τους διαχειριστές υποδομής, τους φορείς κατανομής και τις σιδηροδρομικές επιχειρήσεις. Άλλοι ενδιαφερόμενοι, όπως οι ναυλωτές, οι κυβερνήσεις, οι ρυθμιστικοί φορείς, τα λιμάνια, οι τερματικοί σταθμοί και τα μέσα ενημέρωσης πρέπει να ενημερώνονται για την κατάσταση της διεθνούς διαταραχής.

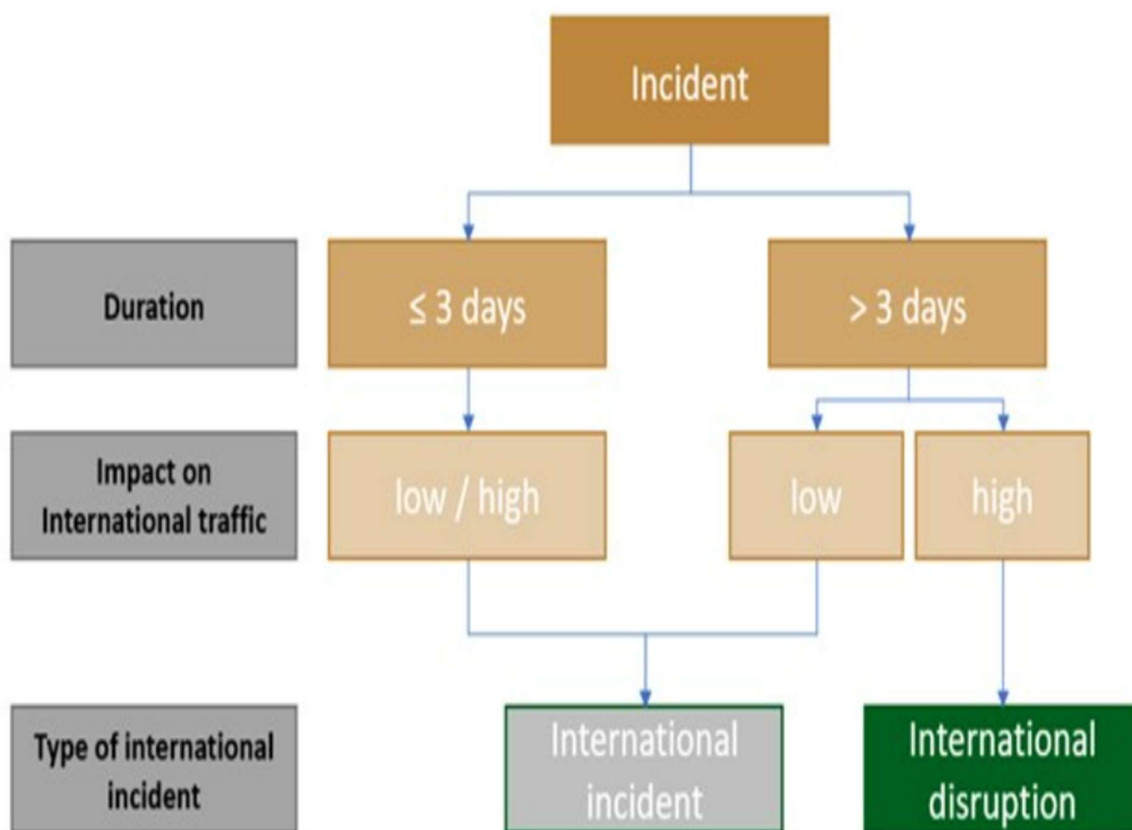
Τι είναι όμως μια διεθνής διακοπή; Μια διεθνής διακοπή είναι μια προγραμματίστη διακοπή που ορίζεται από τη διάρκειά της (με βάση την πρόβλεψη ανάκαμψης) και τον αντίκτυπό της στις διεθνείς σιδηροδρομικές λειτουργίες:

- Διάρκεια: τρέχουσες και αναμενόμενες διακοπές με προβλεπόμενο αντίκτυπο στο επηρεαζόμενο τμήμα άνω των τριών ημερολογιακών ημερών.
- Αντίκτυπος: διακοπές με υψηλό αντίκτυπο στη διεθνή κυκλοφορία. Ο αντίκτυπος ενός συμβάντος αξιολογείται με τη χρήση επιχειρηματικής τεχνογνωσίας (π.χ. γνώση σχετικά με τις ροές επιβατών/εμπορευμάτων) και με την εξέταση των διαθέσιμων επιλογών επαναδρομολόγησης. Επιπρόσθετα, μπορεί να θεωρηθεί ως εμπειρικός κανόνας υψηλός αντίκτυπος εάν το 50% των αμαξοστοιχιών στο επηρεαζόμενο τμήμα χρειάζονται επιχειρησιακή επεξεργασία. Αυτό μπορεί επίσης να προκληθεί από έναν συνδυασμό πολλών μικρών συμβάντων που προσθέτουν υψηλό αντίκτυπο στις σιδηροδρομικές λειτουργίες.

Για περιστατικά με διάρκεια 3 ημερών ή μικρότερη, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν οι ίδιες βασικές διαδικασίες. Ωστόσο, καθώς οι μικρότερες διακοπές θα

αντιμετωπίζονται λειτουργικά από τους διαχειριστές χωρίς τη συμμετοχή RFC, εφαρμόζονται απλοποιημένες διαδικασίες:

- Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με βάση υφιστάμενες διμερείς συμφωνίες.
- Ο επανασχεδιασμός γίνεται μόνο σε επιχειρησιακό επίπεδο ακολουθώντας εθνικές διαδικασίες



Εικόνα 3 Ορισμός διεθνούς διαταραχής

Τα σχέδια έκτακτης ανάγκης σχεδιάζονται από ειδικούς που έχουν εμπειρία στον έλεγχο κυκλοφορίας. Ο σχεδιασμός αυτών των προκαθορισμένων λύσεων βασίζεται στα πρότυπα ώρας των χρονοδιαγραμμάτων της εκάστοτε. Με βάση αυτά τα

πρότυπα και ένα συγκεκριμένο σενάριο διακοπής, ο σχεδιαστής εκτιμά την εναπομένονσα χωρητικότητα και αποφασίζει ποιες αμαξοστοιχίες θα πρέπει να ακυρωθούν ή να βραχυκυκλωθούν. Η ακύρωση των δρομολογίων θα πρέπει να κατανέμεται μεταξύ των διαφόρων σιδηροδρομικών υπηρεσιών που δραστηριοποιούνται στην περιοχή. Στη συνέχεια, καθορίζονται οι σταθμοί στους οποίους θα πρέπει να βρίσκονται οι βραχυκυκλωμένες οι αμαξοστοιχίες.

Για κάθε διάδρομο ορίζονται εκ των προτέρων οι λεγόμενοι σταθμοί αποσύνδεσης, όπου οι αμαξοστοιχίες θα στρίβουν σε περίπτωση πλήρους απόφραξης. Διαφορετικοί τύποι αμαξοστοιχιών (π.χ. intercities ή τοπικές αμαξοστοιχίες) ενδέχεται να διαθέτουν διαφορετικούς σταθμούς αποσύνδεσης για βραχυκύκλωμα. Κατά τον καθορισμό των θέσεων, αναμένεται ότι οι αμαξοστοιχίες μικρής στροφής θα αντικαταστήσουν τις αμαξοστοιχίες προς την αντίθετη κατεύθυνση. Με βάση την κατάληψη της γραμμής του σταθμού, ελέγχεται κατά πόσον τα τρένα θα μπορούσαν να γυρίσουν απότομα κατά τον προτεινόμενο χρόνο και πλατφόρμα. Αυτές οι στατικές λύσεις δεν είναι σε θέση να θεωρήσουν ότι οι αβεβαιότητες των λειτουργιών σε πραγματικό χρόνο και συνεπώς η συνειδητοποίησή τους ενδέχεται να μην είναι δυνατές εάν η πραγματική κυκλοφορία αποκλίνει από τα βασικά πρότυπα.

2.3.1 Contingency Plan – Rail Net Europe

Στις 16 Μαΐου 2018, η Γενική Συνέλευση του RailNet Europe στο Sopron ενέκρινε ομόφωνα το πρώτο Διεθνές Εγχειρίδιο Διαχείρισης Εκτάκτων Αναγκών. Η RailNetEurope (RNE) με την υποστήριξη των Rail Freight Corridors ανέλαβε την ευθύνη να διατηρεί αυτό το έγγραφο ενημερωμένο. Μετά από δύο χρόνια από την εφαρμογή του, ξεκίνησε η διαδικασία αναθεώρησης προκειμένου να βελτιωθεί το εγχειρίδιο International Contingency Management που περιλαμβάνει τις εμπειρίες που αποκτήθηκαν κατά τις πραγματικές διακοπές σε όλα τα περιστατικά που πραγματοποιήθηκαν τα προηγούμενα χρόνια. Το νέο εγχειρίδιο RNE International Contingency Management, συμπεριλαμβανομένων πολλών παραρτημάτων, εγκρίθηκε από τη Γενική Συνέλευση του RNE στις 19 Μαΐου 2021 με εφαρμογή από την περίοδο 2022.

Σκοπός αυτού του εγχειριδίου είναι να περιγράψει τα πρότυπα που επιτρέπουν τη συνέχιση των ροών κυκλοφορίας στο υψηλότερο δυνατό επίπεδο παρά τη διεθνή διακοπή και να διασφαλίσει τη διαφάνεια της κατάστασης της διακοπής και των επιπτώσεών της στις ροές κυκλοφορίας για όλους τους σχετικούς ενδιαφερόμενους φορείς σε όλη την Ευρώπη. Αναλυτικότερα, το εγχειρίδιο ορίζει την απαραίτητη συνεργασία σε περίπτωση διεθνών διαταραχών και περιγράφει:

- Πώς θα αναγνωριστεί και πως θα δηλωθεί μια διεθνής κρίση.
- Την διαδικασία για τη διαχείριση διεθνούς επιχειρηματικής συνέχειας
- Οι ρόλοι που απαιτούνται για τη διεθνή συνεργασία
- Προκαθορισμένες διαδικασίες και βέλτιστες πρακτικές

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία σε περίπτωση διεθνούς διαταραχής εφαρμόζονται κανόνες – στρατηγικές διαχείρισης διαταραχών. ο διαχειριστής υποδομών στο δίκτυο του οποίου συνέβη το συμβάν, πρέπει να λάβει όλα τα επιχειρησιακά μέτρα όπως ορίζονται από τους εθνικούς κανόνες διαχείρισης συμβάντων και να αντιμετωπίζει όλα τα γειωμένα τρένα όπως δημοσιεύονται στις δηλώσεις δικτύου. Ο διαχειριστής υποδομών εκκίνησης ενημερώνει άμεσα όλους τους εμπλεκόμενους και όσους επηρεάζονται από το συμβάν, ιδιαίτερα τα κέντρα ελέγχου κυκλοφορίας γειτονικών διαχειριστών υποδομών, μέσω του Train Information System

όπως περιγράφεται παρακάτω. Οι πληροφορίες σχετικά με τη διακοπή θα παρέχονται επίσης στους ενδιαφερόμενους RFC σε αυτό το πρώιμο στάδιο.

Αφού επιλυθούν τα πιο κρίσιμα ζητήματα ασφάλειας και μπορούν να εκτιμηθούν οι μελλοντικές συνέπειες του συμβάντος, ο αρχικός διαχειριστής αξιολογεί - βάσει των διεθνώς συμφωνημένων κριτηρίων - εάν πρέπει να δηλωθεί μια διεθνής διαταραχή και εάν η διεθνής διαχείριση έκτακτης ανάγκης πρέπει να ξεκινήσει. Ένα RFC μπορεί επίσης να προτείνει ώστε ο διαχειριστής να δηλώσει μια διεθνή διακοπή ωστόσο η τελική απόφαση λαμβάνεται από τον αρχικό διαχειριστή υποδομών.

Εάν η αξιολόγηση υποδεικνύει το διεθνές εύρος της διακοπής, το εθνικό κέντρο ελέγχου κυκλοφορίας του διαχειριστή εκκίνησης παρέχει τις πληροφορίες σχετικά με τη διακοπή στο εργαλείο διαχείρισης περιστατικών TIS έτσι ώστε :

- Να μοιράζονται οι πληροφορίες με όλους τους επηρεαζόμενους, χρήστες και RFC.
- Να δηλώνεται τη διεθνή αναστάτωση.
- Να επιλέγεται το συντονιστικό RFC.

Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι ακόλουθες διαδικασίες. Το συντομότερο δυνατό αλλά όχι αργότερα από 12 ώρες μετά τη δήλωση της διεθνούς διακοπής, ένα πρώτο σύνολο πληροφοριών σχετικά με τη διακοπή παραδίδεται στον συντονιστή. Άλλα επηρεαζόμενα RFC ενημερώνονται στη συνέχεια από το συντονιστικό RFC. Μια πρώτη τηλεφωνική διάσκεψη για επιβολή μέτρων μετριασμού με τους διαχειριστές συμβάντων όλων των σχετικών διαχειριστών και των επηρεαζόμενων RFC διοργανώνεται από το συντονιστή RFC εντός 12 ωρών. Η τηλεφωνική διάσκεψη πραγματοποιείται στα αγγλικά ή σε άλλη γλώσσα, η οποία είναι αποδεκτή από όλα τα μέρη. Σε περίπτωση που η οργάνωση της πρώτης τηλεπικοινωνίας εμπίπτει στις ημέρες που το προσωπικό γραφείου RFC δεν είναι διαθέσιμο, κάθε RFC πρέπει να συμφωνήσει εκ των προτέρων με τα μέλη του σχετικά με τις διαδικασίες που πρέπει να εφαρμόζονται εκτός ωρών γραφείου των RFC. Ανάλογα με το RFC, αυτό μπορεί να γίνει είτε με το διορισμό ενός εφεδρικού οργανισμού, με την ανάθεση της ευθύνης στον

αρχικό διαχειριστή ή μεταθέτοντας την υποχρέωση οργάνωσης τηλεπικοινωνίας στην πρώτη ημέρα που το προσωπικό του RFC είναι διαθέσιμο.

Κατά τη διάρκεια αυτής της τηλεφωνικής διάσκεψης, ανταλλάσσονται πληροφορίες για το περιστατικό και οργανώνονται τα επόμενα βήματα. Αυτό περιλαμβάνει μια κοινή απόφαση σχετικά με:

- Τις σχετικές επαναδρομολογήσεις και απαιτούμενα μέτρα ύφεσης.
- Εάν θα πρέπει να οργανωθεί η τηλεφωνική εταιρεία συντονισμού χωρητικότητας και από ποιον
- Χρονοδιάγραμμα και αρμοδιότητες προετοιμασίας προσφοράς (Όγκος μέγιστης χωρητικότητας/διαδρομών)
- Προθεσμία για την παροχή της διεθνώς συντονισμένης χωρητικότητας/διαδρομών προσαρμοσμένων για τη συγκεκριμένη κατάσταση.

Οι διαχειριστές συμβάντων, ως εκπρόσωποι των διαχειριστών, είναι υπεύθυνοι να εμπλέξουν όλα τα αρμόδια τμήματα τους σε αυτή τη διαδικασία καθ' όλη την (αναμενόμενη) διάρκεια της υπόθεσης. Το συντονιστικό RFC, με την υποστήριξη του αρχικού διαχειριστή, εποπτεύει τη διεθνή συνεργασία σε επίπεδο διαχείρισης οργανώνοντας διαδοχικές τηλεφωνικές διασκέψεις συμπεριλαμβανομένων της ημερήσια διάταξης και των πρακτικών, καθώς και την παρακολούθηση των συμφωνηθέντων μέτρων (π.χ. οργάνωση της τηλεπικοινωνίας συντονισμού ικανότητας κ.λπ.). Το συντονιστικό RFC επιβλέπει τη σωστή ροή πληροφοριών προς όλα τα εμπλεκόμενα μέρη και διαχειρίζεται απευθείας τις πληροφορίες σε άλλους RFC, συνεργάτες RFC και σχετικούς ενδιαφερόμενους φορείς. Η επιστροφή στις κανονικές διεθνείς λειτουργίες οργανώνεται από τον διαχειριστή εκκίνησης, τους επηρεαζόμενους με βάση τις πληροφορίες σχετικά με το ανεκτέλεστο συρμό και, εάν ισχύει, σε συνεργασία με τις τοπικές αρχές. Το IM εκκίνησης υποδεικνύει την επιστροφή στην κανονική λειτουργία κλείνοντας τη υπόθεση στο εργαλείο διαχείρισης περιστατικών TIS.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διαχειριστές υποδομών των αντίστοιχων χωρών.

Χώρα	Διαχειριστής	Χώρα	Διαχειριστής
Αυστρία	OBB-Infrastruktur AG	Βόρεια Μακεδονία	MŽ – Makedonski Železnici Infrastruktura
Αυστρία / Ουγγαρία	RAABERBAHN/GYSEV	Ολλανδία	ProRail B.V.
Ουγγαρία	VPE Vasúti Pályakapacitás-elosztó Kft.	Νορβηγία	Bane NOR
Ουγγαρία	MÁV Magyar Államvasutak Zrt.	Πολωνία	PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.
Βέλγιο	INFRABEL	Πορτογαλία	Infraestruturas de Portugal, S.A.
Βουλγαρία	NRIC – National Railway Infrastructure Company of Bulgaria	Ρουμανία	CFR – Compania Națională de Căi Ferate SA’
Βοσνία	ŽRS – Željeznice Republike Srpske	Σερβία	Infrastruktura železnice Srbije a.d
Κροατία	HŽ Infrastruktura d.o.o.	Σλοβακία	ŽSR – Železnice Slovenskej republiky
Τσεχία	SŽCZ – Správa železnic, státní organizace	Σλοβενία	Slovenske železnice- Infrastruktura, d.o.o.
Δανία	BDK – Banedanmark Rail Net Denmark	Ισπανία	ADIF – Administrador de Infraestructuras Ferroviarias
Εσθονία	Eesti Raudtee	Ισπανία / Γαλλία	LÍNEA FIGUERAS PERPIGNAN S.A.

Φινλανδία**Finnish Transport
Infrastructure Agency****Σουηδία****Trafikverket**

Γαλλία	SNCF Réseau	Ελβετία	BLS AG
Γερμανία	DB Netz AG	Ελβετία	SBB Infrastructure
Ελλάδα	OSE	Ελβετία	Schweizerische Trassenvergabestelle
Ιταλία	RFI – Rete Ferroviaria Italiana	Ηνωμένο Βασίλειο	HS1 – HighSpeed1 Ltd.
Λετονία	LDz - Latvijas Dzelzceļš	Ηνωμένο Βασίλειο	NR – Network Rail
Λετονία	LatRailNet	Λουξεμβούργο	CFL – Société Nationale des Chemins de Fer Luxembourgeois
Δανία	BDK – Banedanmark Rail Net Denmark	Ισπανία	ADIF – Administrador de Infraestructuras Ferroviarias

Πίνακας 1 Διαχειριστές υποδομών.

2.4 Διαταραχές και διακοπές

Κατά βάση, το χρονοδιάγραμμα και η διαχείριση των πόρων γίνονται χωρίς συγκρούσεις. Εάν δεν υπάρχουν διαταραχές ή διακοπές, τότε το χρονοδιάγραμμα και η διαχείριση των πόρων μπορούν να εκτελεστούν ακριβώς όπως έχουν προγραμματιστεί. Ωστόσο, κατά την εκτέλεση του επιχειρησιακού σχεδίου σε πραγματικό χρόνο, η αποφυγή διαταραχών ή των διακοπών είναι σχεδόν αναπόφευκτες.

Ο όρος διαταραχή χρησιμοποιείται για «σχετικά μικρά» κολλήματα που επηρεάζουν το σιδηροδρομικό σύστημα ενώ ο όρος διακοπή για «σχετικά μεγάλα» εξωτερικά συμβάντα που οδηγούν στην ακύρωση ενός αριθμού ταξιδιών στο χρονοδιάγραμμα.

Μια διαταραχή αντιστοιχεί στο γεγονός ότι ορισμένες σιδηροδρομικές διαδικασίες διαρκούν περισσότερο από ό,τι καθορίζεται στο χρονοδιάγραμμα. Κατά συνέπεια, τα τρένα ενδέχεται να αναχωρούν και/ή να φθάνουν αργότερα από το προγραμματισμένο. Μια καθυστέρηση που προκαλείται από το γεγονός ότι μια τέτοια διαδικασία διαρκεί περισσότερο από το προγραμματισμένο ονομάζεται κύρια καθυστέρηση. Μια τέτοια καθυστέρηση μπορεί εύκολα να μετακυλήσει από το ένα τρένο στο άλλο. Στην περίπτωση αυτή η καθυστέρηση του δεύτερου τρένου ονομάζεται δευτερεύουσα καθυστέρηση. Εξ ορισμού, η διαταραχή είναι τέτοια που μπορεί να αντιμετωπιστεί με επαναπρογραμματισμό μόνο του χρονοδιαγράμματος, χωρίς επαναπρογραμματισμό των υποχρεώσεων πόρων. Για παράδειγμα, σε ένα σταθμό η επιβίβαση των επιβατών μπορεί να διαρκέσει περισσότερο από το προγραμματισμένο για μια συγκεκριμένη αμαξοστοιχία κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε καθυστέρηση της αναχώρησης. Οι διαταραχές αυτές συνήθως απορροφώνται από την αδράνεια του συστήματος ή μπορεί να αντιμετωπιστούν με μικρές αλλαγές στην κατανομή των πόρων.

Μια διακοπή είναι ένα σχετικά μεγάλο εξωτερικό περιστατικό που επηρεάζει έντονα το χρονοδιάγραμμα και απαιτεί τα καθήκοντα πόρων να επαναπρογραμματιστούν επίσης. Μια διακοπή συνήθως σχετίζεται με μεγάλες

καθυστερήσεις ή ακυρώσεις ενός αριθμού τρένων. Αυτά μπορεί να προκαλείται από προσωρινή απόφραξη της σιδηροδρομικής υποδομής, για παράδειγμα από δυσλειτουργία υποδομής ή τροχαίου υλικού, ή από ατύχημα. Λόγω του μπλοκαρίσματος, ένας αριθμός τρένων μπορεί να έχει μεγάλες καθυστερήσεις ή ορισμένα ταξίδια στο χρονοδιάγραμμα πρέπει να ακυρωθούν. Κατά συνέπεια, οι αντίστοιχοι πόροι δεν φτάνουν έγκαιρα στο σταθμό στον οποίο πρέπει να εκτελεστούν οι επόμενες εργασίες σύμφωνα με το πρόγραμμά τους ή δεν φτάνουν καθόλου. Επομένως, τα ταξίδια που αντιστοιχούν σε αυτές τις εργασίες πρέπει να ακυρωθούν, ή άλλες μονάδες πόρων πρέπει να τα εκτελέσουν.

Αυτό σημαίνει ότι τα καθήκοντα πόρων πρέπει να επαναπρογραμματιστούν. Συνήθως, η διάρκεια μιας διακοπής δεν είναι γνωστή στην αρχή της. Ως εκ τούτου, το χρονοδιάγραμμα και τα καθήκοντα πόρων μπορεί να χρειαστεί να επαναπρογραμματιστούν πολλές φορές, κάθε φορά που γίνονται διαθέσιμες νέες πληροφορίες σχετικά με τη διάρκεια της διακοπής (Cacchiani et al. 2014).

2.5 Επαναπρογραμματισμός

Οι αποκλίσεις από τα επιχειρησιακά σχέδια όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ενδέχεται να απαιτούν επαναπρογραμματισμό ορισμένων πόρων. Δεδομένου ότι η μοντελοποίηση του επαναπρογραμματισμού του τροχαίου υλικού και οι εφαρμογές του είναι κύρια θέματα, παρατίθεται ένας επίσημος ορισμός του επαναπρογραμματισμού :

“Ο επαναπρογραμματισμός είναι το καθήκον της προσαρμογής ενός υπάρχοντος χρονοδιαγράμματος σε μια τροποποιημένη κατάσταση.” Φυσικά, δύο ερωτήματα προκύπτουν από αυτόν τον ορισμό· Πρώτον, τι είναι μια τροποποιημένη κατάσταση; Και δεύτερον, πότε ο επαναπρογραμματισμός είναι προτιμότερος από τον καθαρό προγραμματισμό;

Για την πρώτη ερώτηση, ορίζουμε σε γενικές γραμμές μια τροποποιημένη κατάσταση ως αλλαγή του συστήματος για το οποίο είχε προγραμματιστεί το υπάρχον χρονοδιάγραμμα. Η αλλαγή καθιστά το υπάρχον χρονοδιάγραμμα είτε μη μετρήσιμο είτε μη εφαρμόσιμο. Η τροποποιημένη κατάσταση μπορεί να χαρακτηρίζεται από μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Αλλαγή στη διαθεσιμότητα πόρων ή υποδομών.
- Αλλαγή ζήτησης.
- Αλλαγή στο περιβάλλον του συστήματος.

Για το δεύτερο ερώτημα διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει αυστηρός ορισμός σχετικά με το πότε προτιμάται η διαφοροποίηση από τον καθαρό προγραμματισμό, αλλά δίνουμε ορισμένους ανεπίσημους λόγους για τους οποίους ένα πρόβλημα πρέπει να θεωρείται πρόβλημα επαναπρογραμματισμού και όχι πρόβλημα προγραμματισμού:

- Το υπάρχον χρονοδιάγραμμα είναι εφικτό (ή ακόμα και βέλτιστο) για τους περισσότερους, αλλά όχι για όλους, τους εμπλεκόμενους της τροποποιημένης κατάστασης. Εάν η τροποποιημένη κατάσταση αφορά μια γεωγραφικά ή χρονικά περιορισμένη τροποποίηση, ίσως θελήσουμε να περιορίσουμε την αντίδρασή μας μόνο στα επηρεαζόμενα τμήματα του χρονοδιαγράμματος.

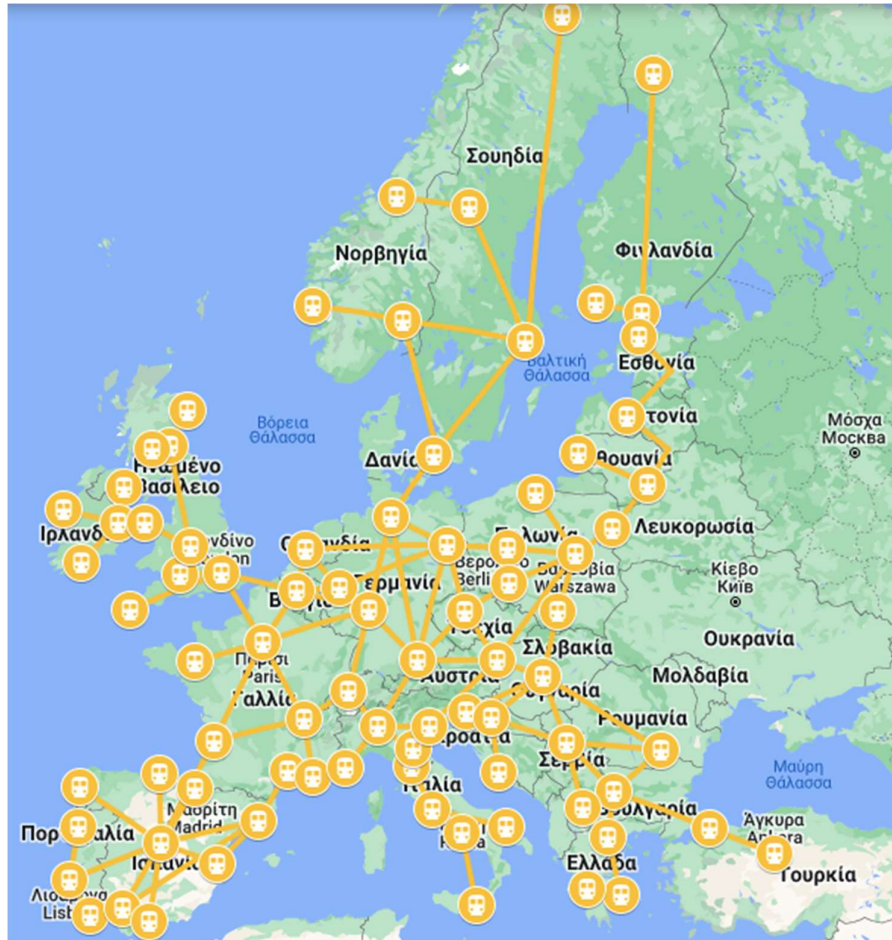
- Υπάρχει περιορισμένος χρόνος για τη δημιουργία ενός νέου χρονοδιαγράμματος. Εάν το πρόβλημα υπάρχει σε ένα χρονικά κρίσιμο περιβάλλον, ίσως θελήσουμε να περιορίσουμε τις προσπάθειές μας για τον επαναπρογραμματισμό του υποσυνόλου των πόρων.

- Το πρόβλημα είναι ένα υποπρόβλημα ενός μεγαλύτερου και πιο σύνθετου προβλήματος. Εάν υπάρχουν παλαιότερες, μεταγενέστερες ή ακόμα και παράλληλες εργασίες σχεδιασμού που βασίζονται στο σχεδιασμό του προβλήματος, μπορεί να θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε το κόστος για άλλες εργασίες σχεδιασμού.

- Ενδέχεται να υπάρχουν δαπάνες που σχετίζονται με την απόκλιση από το υπάρχον χρονοδιάγραμμα. Οι δαπάνες αυτές μπορεί να είναι άμεσες λειτουργικές δαπάνες, όπως η πληρωμή με καύσιμα ή υπερωρία, ή έμμεσες δαπάνες μέσω αποσταθεροποίησης κτλ. Ειδικά η ανάγκη επικοινωνίας ενημερώσεων σε πολλούς διαφορετικούς παράγοντες σε ένα χρονικό περιβάλλον μπορεί να είναι επιζήμια για την απόδοση του συστήματος (Cacchiani et al. 2014).

2.6 Περιγραφή διαδρόμων μεταφοράς.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τον σχεδιασμό πλάνου εκτάκτου ανάγκης καθώς και την διαχείριση κρίσεων είναι οι διαθέσιμες επίσημες Ευρωπαϊκές δίοδοι που χρησιμοποιούνται για μεταφορές. Στην εικόνα που παρατίθεται μπορούμε να έχουμε μια γενική εικόνα των διαδρόμων ανά την Ευρώπη.



Εικόνα 4 Διάδρομοι Μεταφοράς

Εν συνεχεία, θα εστιάσουμε στους διαδρόμους που μας αφορούν, καθώς θα εξετάσουμε μεταφορές από σταθμούς έναρξης στην Ελλάδα και τερματικούς σταθμούς σε χώρες όπως Βουλγαρία, Ρουμανία κλπ.

Σε αυτούς τους διαδρόμους θα επιχειρήσουμε εναλλακτικά σχέδια τόσο προκαθορισμένα όσο και σε πραγματικό χρόνο, όταν για κάποιον παράγοντα ένα σύνορο διακόπτει τις μεταφορές. Ωστόσο οι μεταφορές οφείλουν να

πραγματοποιηθούν με τη λιγότερο δυνατή διακοπή. Τα στατικά σενάρια θα μας βοηθήσουν σε περιπτώσεις μιας μεγάλης σε κλίμακα αλλαγής, ενώ τα σενάρια πραγματικού χρόνου μας βοηθάνε σε απρόβλεπτες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα μια έκτακτη βλάβη στις οδούς, στο βαγόνι, στο προσωπικό κτλ.

Η εύρεση του εναλλακτικού δρομολογίου δεν είναι απλή υπόθεση, για τον λόγο ότι η αναδρομολόγηση πρέπει να γίνει ακολουθώντας κάποιους πολύ συγκεκριμένους περιορισμούς. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3, οι διαδρομές που μπορούν να ακολουθηθούν είναι πολύ συγκεκριμένες και είναι οι εγκεκριμένες διαδρομές από την Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με κανονισμούς. Οι επονομαζόμενες διαδρομές ονομάζονται “Rail Freight Corridors, RFC” και έτσι θα αναφέρονται και στη συνέχεια.

Ο ορισμός των RFCs είναι : “Σιδηροδρομικός διάδρομος είναι η γη στην οποία κατασκευάζεται ο σιδηρόδρομος. Περιλαμβάνει όλα τα περιουσιακά στοιχεία που συνήθως οριοθετούνται από τη γραμμή φράχτη έως τη γραμμή φράχτη ή, εάν δεν είναι περιφραγμένα, παντού 15 μέτρα εκατέρωθεν των εξόχως απόκεντρων τμημάτων της τροχιάς, εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά.”

Ο κανονισμός (ΕΕ) αριθ. 913/2010 σχετικά με ένα ευρωπαϊκό σιδηροδρομικό δίκτυο ανταγωνιστικών εμπορευματικών μεταφορών άρχισε να ισχύει στις 9 Νοεμβρίου 2010. Ο παρών κανονισμός απαιτούσε από τα κράτη μέλη να θεσπίσουν RFC προσανατολισμένα στη διεθνή αγορά, προκειμένου να αντιμετωπίσουν τρεις κύριες προκλήσεις:

- Ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των IMs (Infrastructure Managers) σε βασικές πτυχές όπως η κατανομή των διαδρομών, η ανάπτυξη δια λειτουργικών συστημάτων και η ανάπτυξη υποδομών
- εξεύρεση της σωστής ισορροπίας μεταξύ εμπορευματικής και επιβατικής κίνησης κατά μήκος των RFC, παροχή επαρκούς χωρητικότητας για εμπορευματικές μεταφορές σύμφωνα με τις ανάγκες της αγοράς και διασφάλιση της επίτευξης κοινών στόχων ακρίβειας για τις εμπορευματικές αμαξοστοιχίες

- προώθηση της διαχρονικότητας μεταξύ σιδηροδρομικών και άλλων τρόπων μεταφοράς με την ενσωμάτωση τερματικών σταθμών στη διαδικασία διαχείρισης διαδρόμου

Δεδομένου ότι η κυκλοφορία συνήθως δεν αρχίζει και δεν τελειώνει σε RFC (Rail Freight Corridor) αποκλειστικά, απαιτούνται αποτελεσματικές και εναρμονισμένες διεπαφές με τις υφιστάμενες διαδικασίες και εργαλεία μεμονωμένων IMs και ABS (Allocation Bodies) που συμμετέχουν σε RFC.

Οι χρησιμοποιούμενοι διάδρομοι RFC σε όλη την Ευρώπη είναι έντεκα.

- 1. RFC 1 : Rhine Alpine**
- 2. RFC 2 : North Sea – Mediterranean**
- 3. RFC 3 : Scandinavian – Mediterranean**
- 4. RFC 4 : Atlantic**
- 5. RFC5 : Baltic - Adriatic**
- 6. RFC 6 : Mediterranean**
- 7. RFC 7 : Orient / East Med**
- 8. RFC 8 : North Sea – Baltic**
- 9. RFC9 : Rhine Danube**
- 10. RFC 10 : Alpine – Western Balkan**
- 11. RFC 11 : Amber**



Εικόνα 5 Rail Freight Corridors Map 2022 πηγή RNE

2.7 Βασικοί Δείκτες απόδοσης KPIS

Το άρθρο 19 παράγραφος 2 του κανονισμού της ευρωπαϊκής ένωσης 913/2010 απαιτεί, από τα Διοικητικά Συμβούλια (Management Boards) των Σιδηροδρομικών Εμπορευματικών Διαδρόμων (RFC) να παρακολουθούν τις επιδόσεις των εμπορευματικών μεταφορών στους αντίστοιχους εμπορευματικούς διαδρόμους και να δημοσιεύουν τα αποτελέσματα μία φορά τον χρόνο, για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν οι Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs).

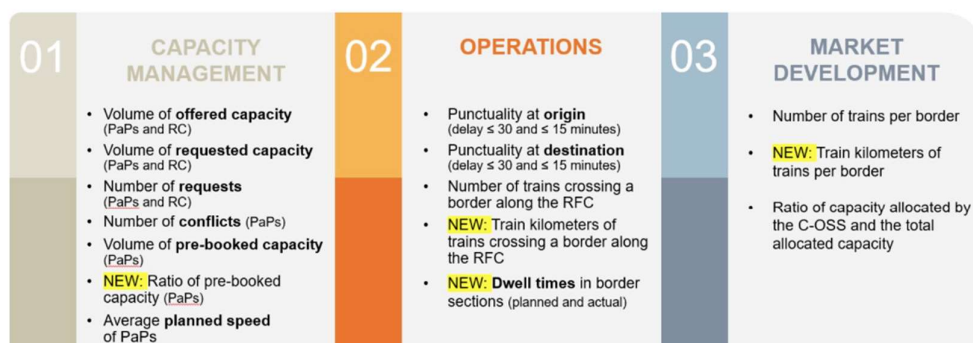
Ένας βασικός δείκτης απόδοσης είναι μια μετρήσιμη αξία που δείχνει πόσο αποτελεσματικά μια εταιρεία ή ένας οργανισμός επιτυγχάνει τους βασικούς επιχειρηματικούς στόχους της και μέσω του οποίου μπορεί να ποσοτικοποιεί και να ελέγχει την απόδοσή της. Οι διοικήσεις των RFC είναι ελεύθερες να επιλέξουν τους δικούς τους δείκτες απόδοσης για να εκπληρώσουν την απαίτηση του ευρωπαϊκού κανονισμού των εμπορευματικών μεταφορών.

Παρ όλα αυτά, προκειμένου να διευκολυνθεί η συλλογή στοιχείων για τον υπολογισμό των δεικτών απόδοσης και την επεξεργασία αυτών των δεδομένων, αποφασίστηκε μια κοινή προσέγγιση μέσω ενός συνόλου KPIs που θα εφαρμόζονται από κοινού σε όλα τα RFC, ενώ παράλληλα θα επιτρέπεται οι περαιτέρω ανάπτυξη μεμονωμένων δεικτών έτσι ώστε τα επιμέρους RFC να μπορούν να παρακολουθούν τις δραστηριότητες τους με απώτερο στόχο την ανάπτυξή τους. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν οι παρακάτω KPIs. Οι εν λόγω δείκτες συμπεριλήφθηκαν στις κατευθυντήριες γραμμές για την παρακολούθηση των σιδηροδρομικών εμπορευματικών διαδρόμων.

Η περαιτέρω ανάπτυξη για κοινώς εφαρμόσιμων KPI προκλήθηκε από τη δήλωση του τομέα του Ρότερνταμ που υπογράφηκε το 2016. Ένα από τα έργα προτεραιότητας που ορίζονται βάσει αυτού του εγγράφου είναι η παρακολούθηση της ποιότητας των εμπορευματικών υπηρεσιών με εφαρμοσμένους και κοινόχρηστους KPI. Ο κλάδος ανέπτυξε ορισμένες προτάσεις από τις οποίες εκείνες που είναι τεχνικά εφικτές - το πιο σημαντικό είναι τα διαθέσιμα δεδομένα - προστέθηκαν στον κατάλογο

των κοινώς εφαρμόσιμων KPI και τέθηκαν σε ισχύ από το χρονοδιάγραμμα του έτους 2018.

Το τρέχον σύνολο των κοινώς εφαρμόσιμων KPI εμφανίζεται παρακάτω.



Εικόνα 6 KPIs

Όπως βλέπουμε τα KPIs, διαχωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες.

1. **Capacity Management:** Έχει ως κύριο στόχο την καταγραφή της χωρητικότητας/ όγκο των τρενών, προσφερόμενη και ικανοποιούμενη, των αριθμό των αιτημάτων, το αριθμό των προβλημάτων αναφορικά με την ζήτηση, την προ-απαιτούμενη χωρητικότητα καθώς και τον λόγο αυτής και τη μέση ταχύτητα των προκαθορισμένων διαδρομών (Pre-arranged Paths PaPs) .

*Μια προκαθορισμένη διαδρομή σε έναν σιδηροδρομικό εμπορευματικό διάδρομο σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΕ) 913/2010, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε ολόκληρο τον διάδρομο είτε σε τμήματά του, σχηματίζοντας μια διεθνή διαδρομή που διασχίζει ένα ή περισσότερα σύνορα.

2. **Operations :** Περιλαμβάνει δείκτες από αφορούν την χρονική συνέπεια από τον κόμβο αναχώρησης στον κόμβο άφιξης (με καθυστέρηση μεταξύ των 15-30 λεπτών), τον αριθμό των τρένων που περνούν σύνορα, τα χιλιόμετρα που διανύουν τα τρένα όταν περνάνε ένα σύνορο και το χρόνο που έχει προγραμματιστεί ότι θα ξοδέψει ένα τρένο στα σύνορα συγκριτικά με τον πραγματικό.

3. **Market Development** : Περιλαμβάνει δείκτες που αφορούν τους αριθμούς τρένων ανά σύνορο, τα χιλιόμετρα τρένων στα σύνορα και τον λόγο της χωρητικότητας που καθορίζεται από τα C-OSS και της συνολικής καταναεμημένης χωρητικότητας.

*Το Corridor-One Stop Shop (C-OSS) είναι ένα κοινό όργανο που διευκολύνει τη διαχείριση σιδηροδρομικών διαδρομών των διεθνών σιδηροδρομικών εμπορευματικών μεταφορών κατά μήκος του σιδηροδρομικού εμπορευματικού διαδρόμου Άλπεων-Δυτικών Βαλκανίων. Είναι ένα ενιαίο σημείο επαφής, που επιτρέπει στον πελάτη να ζητήσει και να λάβει απαντήσεις σχετικά με τη χωρητικότητα υποδομής για διεθνή τρένα κατά μήκος του διαδρόμου.

Capacity Management – Διαχείριση Χωρητικότητας	
Όνομα δείκτη	Τύπος υπολογισμού
Όγκος προσφερόμενης χωρητικότητας (Προκαθορισμένων διαδρομών)	$\chi\lambda\mu * \text{προσφερόμενες ημέρες}$ $\chi\lambda\mu$: $\chi\lambda\mu$ PaP μεταξύ σημείων λειτουργίας χωρίς τροφοδοσία και τμημάτων εκροής
Όγκος ζητούμενης χωρητικότητας (Προκαθορισμένων διαδρομών)	$\chi\lambda\mu * \text{ζητούμενες ημέρες}$
Όγκος αιτημάτων (Προκαθορισμένων διαδρομών)	Αριθμός υποβληθέντων φακέλων PCS *PCS = σύστημα συντονισμού και κατανομής διαδρομής για διεθνείς σιδηροδρομικές μεταφορές επιβατών και εμπορευμάτων.
Όγκος προ-κρατημένης χωρητικότητας (Προκαθορισμένων διαδρομών)	$\chi\lambda\mu * \text{ημέρες (φάση προ-κράτησης)}$
Όγκος προσφερόμενης χωρητικότητας (Εφεδρική χωρητικότητα)	$\chi\lambda\mu * \text{προσφερόμενες ημέρες}$
Όγκος ζητούμενης χωρητικότητας (Εφεδρική χωρητικότητα)	$\chi\lambda\mu * \text{ζητούμενες ημέρες}$
Όγκος αιτημάτων (Εφεδρική χωρητικότητα)	Αριθμός υποβληθέντων φακέλων PCS *PCS = σύστημα συντονισμού και κατανομής διαδρομής για διεθνείς σιδηροδρομικές μεταφορές επιβατών και εμπορευμάτων
Μέση προγραμματισμένη ταχύτητα προκαθορισμένων διαδρομών	Μέσος όρος της προγραμματισμένης εμπορικής ταχύτητας των προκαθορισμένων διαδρομών ανά κατεύθυνση

Πίνακας 2: KPIs – Διαχείρισης Χωρητικότητας

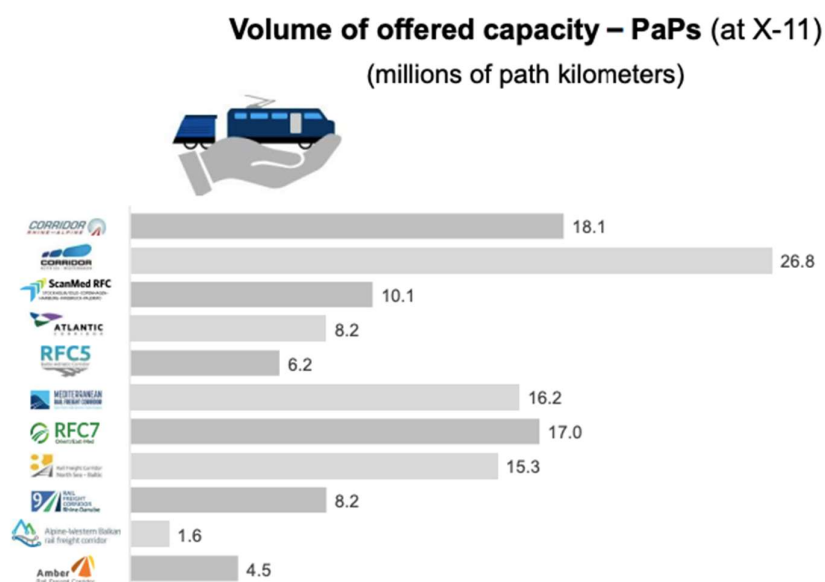
Operations - Επιχειρησιακού	
Όνομα δείκτη	Τύπος υπολογισμού
Συνέπεια αναχώρησης	Το μερίδιο όλων των τρένων στην είσοδο RFC με καθυστέρηση μικρότερη ή ίση με το όριο, σε σύγκριση με όλα τα τρένα στην είσοδο RFC
Συνέπεια προορισμού	Το μερίδιο όλων των τρένων στην έξοδο RFC με καθυστέρηση μικρότερη ή ίση με το όριο, σε σύγκριση με όλα τα τρένα που στην έξοδο RFC.
Συνολικός αριθμός τρένων στο RFC	Συνολικός αριθμός δρομολογίων αμαξοστοιχίας σε επιλεγμένα ζεύγη συνοριακών σημείων

Πίνακας 3 : KPIs – Επιχειρησιακού

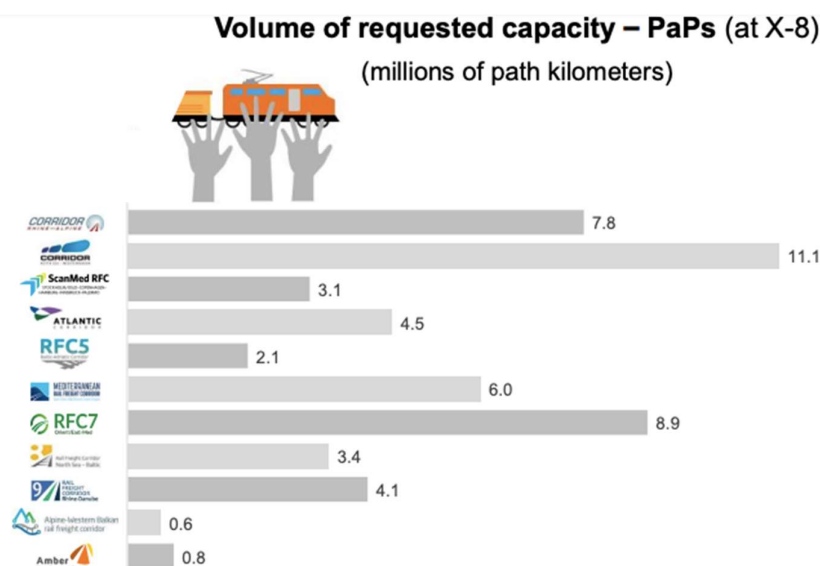
Market Development - Ανάπτυξη Αγοράς	
Όνομα δείκτη	Τύπος υπολογισμού
Συνολικός αριθμός τρένων ανά σύνορο	Αριθμός εμπορικών εμπορευματικών τρένων που διασχίζουν επιλεγμένα συνοριακά σημεία
Λόγος χωρητικότητας που κατανέμεται από το C-OSS και της συνολικής κατανεμημένης χωρητικότητας	Ο συνολικός αριθμός διεθνών εμπορευματικών αμαξοστοιχιών που έχουν κατανεμηθεί στο ετήσιο χρονοδιάγραμμα ανά σύνορα RFC

Πίνακας 4 : KPIs – Ανάπτυξης Αγοράς

Στις παρακάτω απεικονίσεις των KPIs για το 2022, παρουσιάζονται από τους δείκτες διαχείρισης χωρητικότητας : ο όγκος της προσφερόμενης χωρητικότητας ο όγκος της ζητούμενης χωρητικότητας, ο αριθμός αιτημάτων που δημιουργήθηκαν και τέλος ο αριθμός αιτημάτων που απορρίφθηκαν ή που δημιούργησαν πρόβλημα λόγω αντικρουόμενων συμφερόντων.

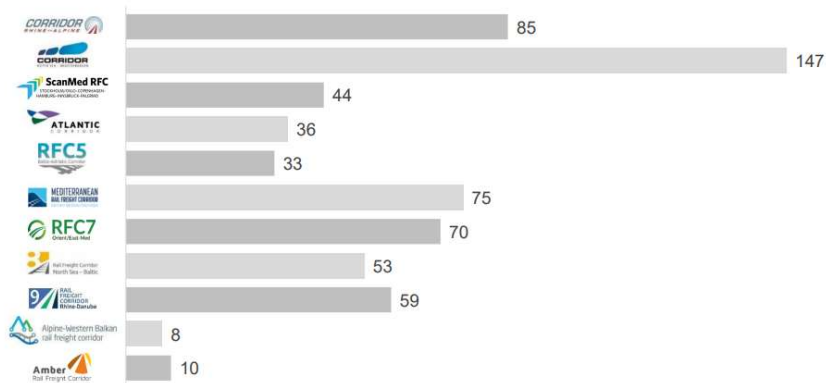


Εικόνα 7 Όγκος προσφερόμενης χωρητικότητας, πηγή RNE.



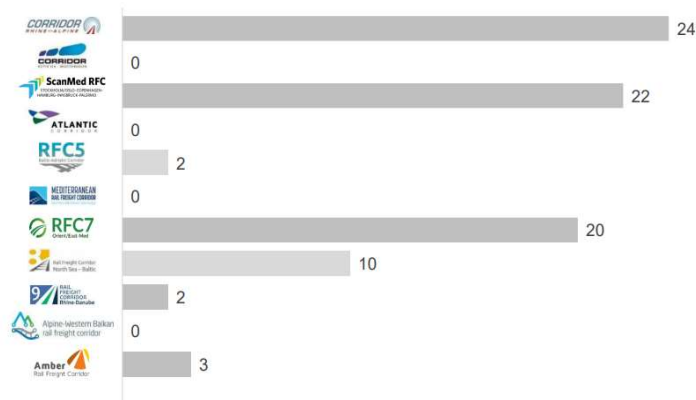
Εικόνα 8 Όγκος ζητούμενης χωρητικότητας, πηγή RNE.

Number of requests – PaPs (at X-8)
(number of PCS dossiers)



Εικόνα 9 Όγκος ζητούμενης χωρητικότητας, πηγή RNE

Number of conflicts – PaPs (at X-8)
(number of conflicting PCS dossiers)

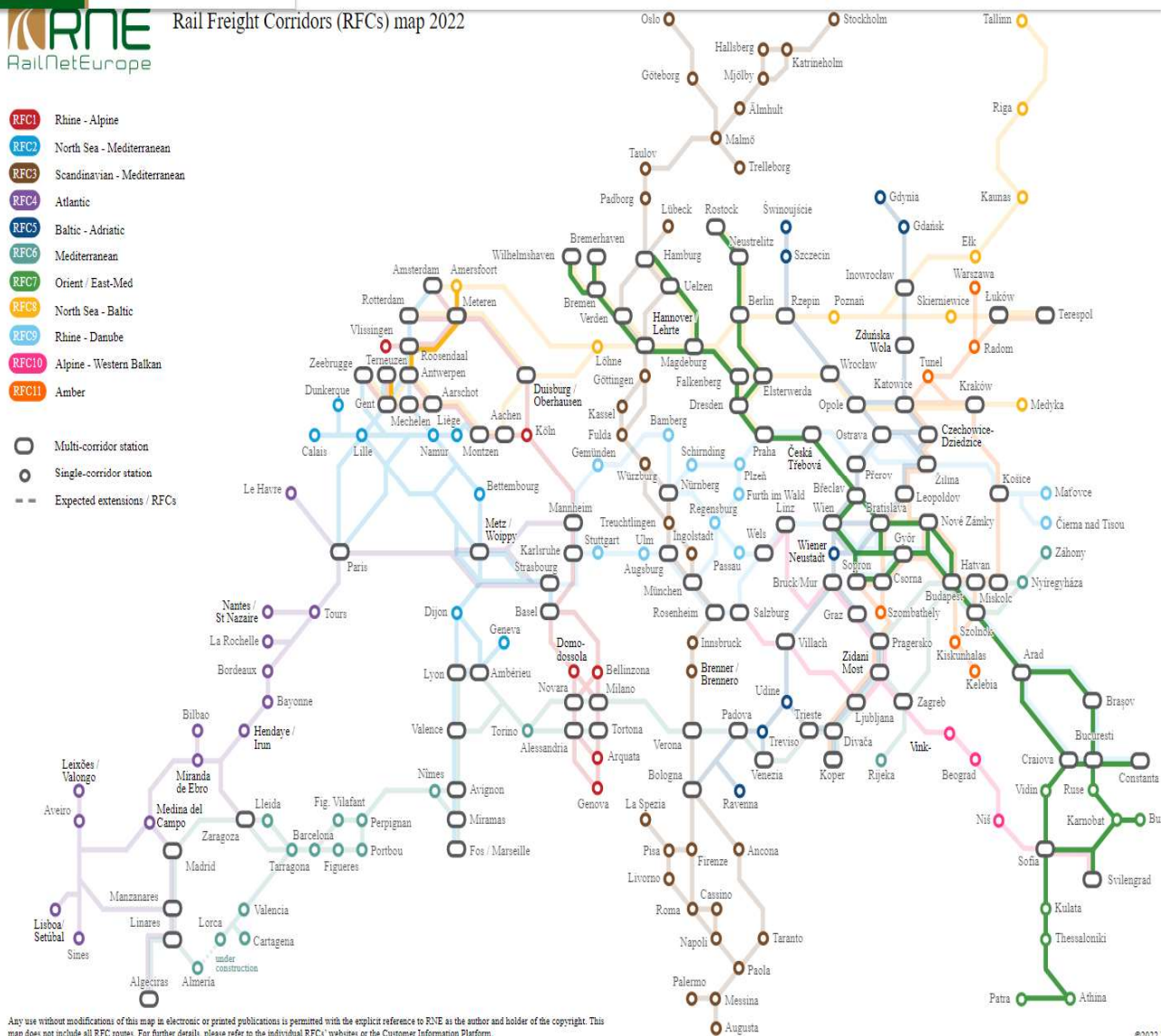


Εικόνα 10 Αριθμός αντικρουόμενων αιτημάτων

Στην περίπτωση μας θα εστιάσουμε στον **RFC 7 : Orient / East-Med Corridor** διότι αυτός είναι ο διάδρομος που αφορά τη Ελλάδα και τις διαδρομές που θα εξεταστούν.

- RFC1 Rhine - Alpine
- RFC2 North Sea - Mediterranean
- RFC3 Scandinavian - Mediterranean
- RFC4 Atlantic
- RFC5 Baltic - Adriatic
- RFC6 Mediterranean
- RFC7 Orient / East-Med
- RFC8 North Sea - Baltic
- RFC9 Rhine - Danube
- RFC10 Alpine - Western Balkan
- RFC11 Amber

- Multi-corridor station
- Single-corridor station
- Expected extensions / RFCs



Any use without modifications of this map in electronic or printed publications is permitted with the explicit reference to RNE as the author and holder of the copyright. This map does not include all RFC routes. For further details, please refer to the individual RFCs' websites or the Customer Information Platform.

Εικόνα 11 Διαδρομή RFC 7: Orient / East-Med, πηγή RNE.

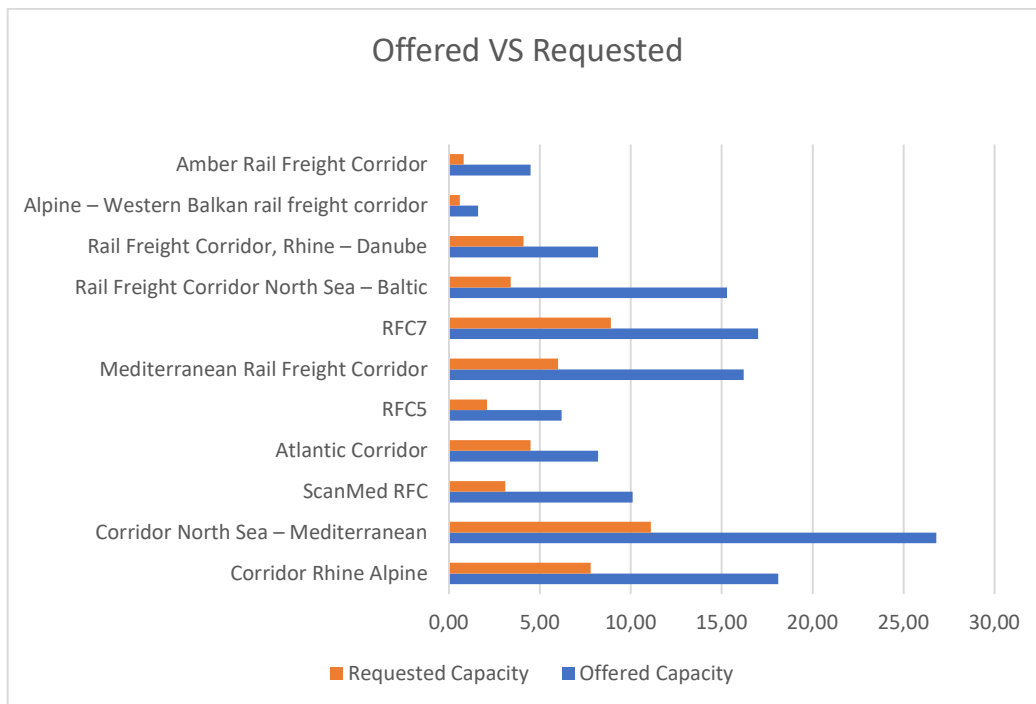
Σύμφωνα με τους δείκτες αποδοτικότητας που αναφέρονται παραπάνω και εστιάζοντας παράλληλα στον διάδρομο Orient / East-Med, φαίνεται ότι ο όγκος προσφερόμενης χωρητικότητας για τον RFC που μας αφορά είναι 17.0 ενώ ο όγκος ζητούμενης χωρητικότητάς είναι 8.9. Επίσης ο αριθμός αιτημάτων χρήσης του

διαδρόμου για το 2023 ανέρχεται στα 70 αιτήματα ενώ αυτός των αντικρουόμενων αιτημάτων που δεν μπορούν να εκτελεστούν είναι 20.

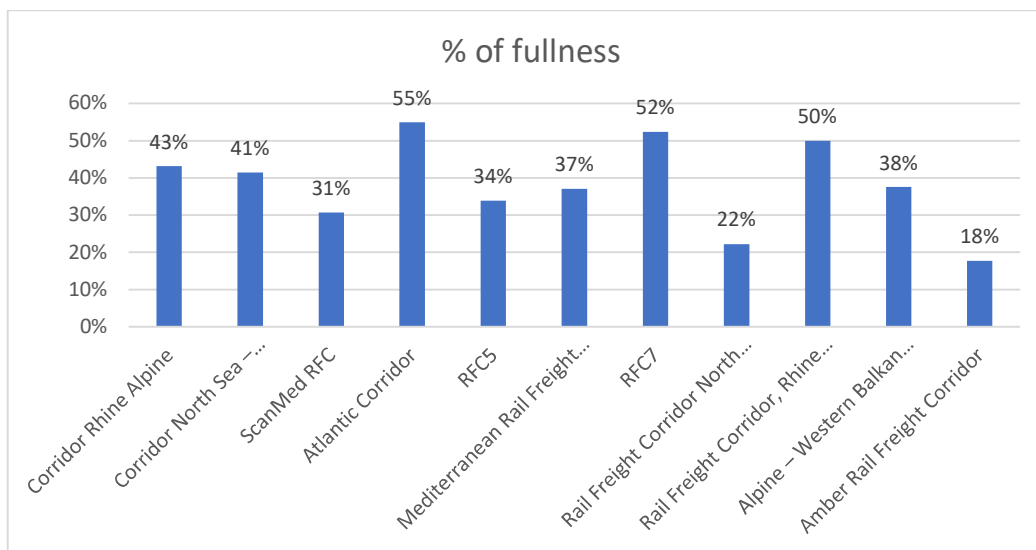
Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται τα ποσοστά πληρότητας, δηλαδή κατά πόσο η προσφερόμενη χωρητικότητα ικανοποιείται από τη ζητούμενη χωρητικότητα.

<i>Corridor</i>	Offered Capacity	Requested Capacity	% of fullness
<i>Rhine Alpine</i>	18,10	7,80	43%
<i>North Sea – Mediterranean</i>	26,80	11,10	41%
<i>Scandinavian – Mediterranean</i>	10,10	3,10	31%
<i>Atlantic</i>	8,20	4,50	55%
<i>Baltic – Adriatic</i>	6,20	2,10	34%
<i>Mediterranean</i>	16,20	6,00	37%
<i>Orient / East – Med</i>	17,00	8,90	52%
<i>North Sea – Baltic</i>	15,30	3,40	22%
<i>Rhine – Danube</i>	8,20	4,10	50%
<i>Alpine – Western Balkan</i>	1,60	0,60	38%
<i>Amber</i>	4,50	0,80	18%

Πίνακας 5: Offered VS Requested Capacity, πηγή RNE.



Εικόνα 12 Offered VS Requested, πηγή RNE.

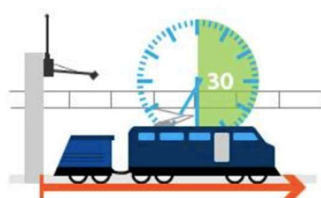


Εικόνα 13 Ποσοστό πληρότητας, πηγή RNE

Όπως βλέπουμε, η μεγαλύτερη αναλογία πληρότητας συναντάται στον Atlantic Corridor καθώς η μικρότερη στον Amber Rail Freight Corridor, ενώ για τον RCF7 που μας αφορά, έχουμε 52% πληρότητα, δηλαδή την δεύτερη υψηλότερη.

Εστιάζοντας περισσότερο στον Orient / East-Med παρατίθενται και τα KPIs του συγκεκριμένου διαδρόμου αναφορικά με την συνέπεια αφίξεων. Από τα KPIs, βλέπουμε ότι το 2021, το 44% των τρένων φεύγουν από τον σταθμό προορισμού τους με καθυστέρηση μικρότερη των 30 λεπτών, ενώ το 33% φτάνει στον σταθμό άφιξης με καθυστέρηση μικρότερη των 30 λεπτών. Το 34% των τρένων φεύγουν από τον σταθμό προορισμού τους με καθυστέρηση μικρότερη των 15 λεπτών, ενώ το 29% φτάνει στον σταθμό άφιξης με καθυστέρηση μικρότερη των 15 λεπτών.

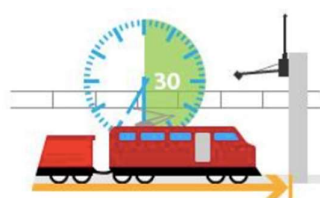
Punctuality at origin (RFC entry)



(delay ≤ 30 minutes)

2021: 44.0%
2020: 47.0%
2019: 45.0%

Punctuality at destination (RFC exit)

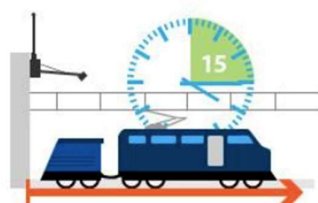


(delay ≤ 30 minutes)

2021: 33.0%
2020: 36.0%
2019: 35.0%

Εικόνα 14 Συνέπεια μικρότερη των 30 λεπτών, πηγή RNE

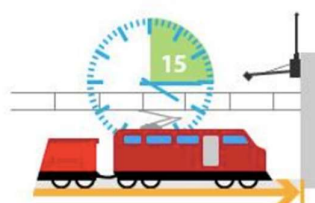
Punctuality at origin (RFC entry)



(delay ≤ 15 minutes)

2021: 39.0%
2020: 42.0%
2019: 40.0%

Punctuality at destination (RFC exit)



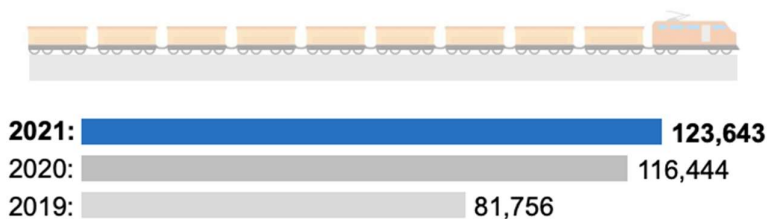
(delay ≤ 15 minutes)

2021: 29.0%
2020: 32.0%
2019: 32.0%

Εικόνα 15 Συνέπεια μικρότερη των 15 λεπτών, πηγή RNE.

Ο αριθμός των τρένων που πέρασαν τα σύνορα κατά το RFC το 2021 ήταν 123.643, το 2020 116.444 και το 2019 81.756.

Number of trains crossing a border along the RFC*



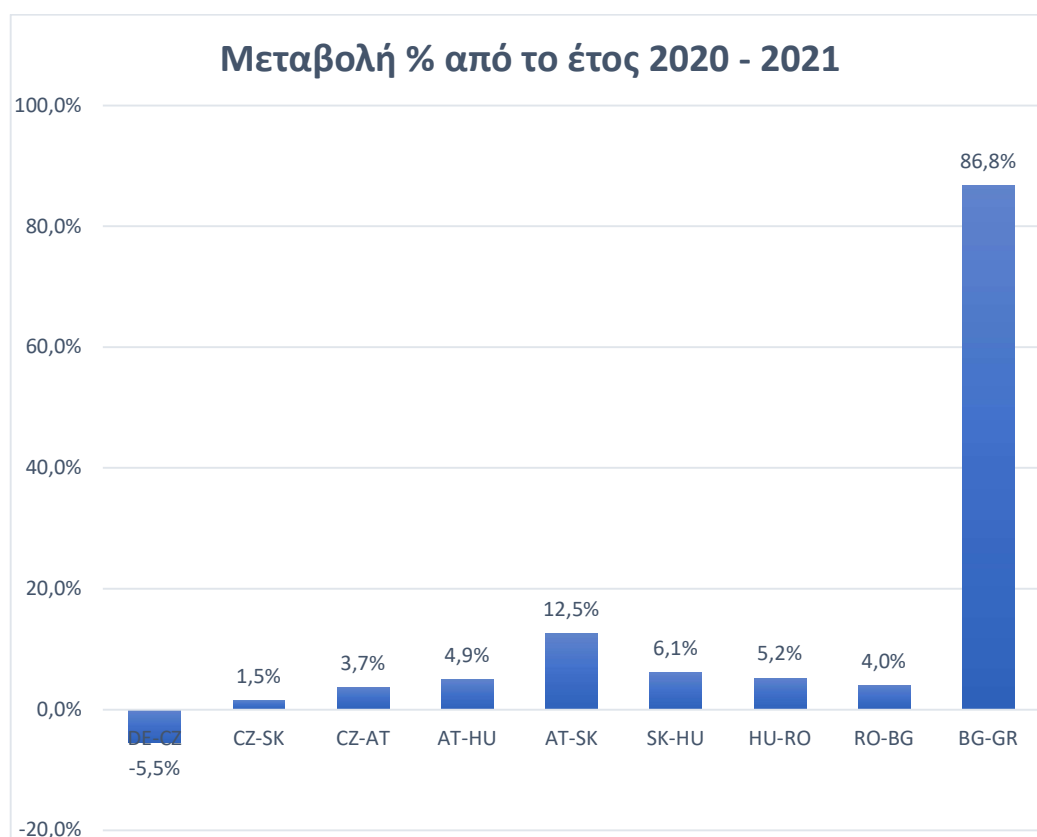
Εικόνα 16 Αριθμός τρένων που πέρασαν τα σύνορα, πηγή RNE

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία των ετών 2019-2021 αναφορικά με τις φορές που είχαμε πέρασμα από σύνορο μεταξύ δύο χωρών :

<i>Total</i>	2019	2020	2021
<i>DE-CZ</i>	31268	30408	28737
<i>CZ-SK</i>	N/A	18611	18889
<i>CZ-AT</i>	12753	11395	11816
<i>AT-HU</i>	N/A	19340	20289
<i>AT-SK</i>	8155	7744	8714
<i>SK-HU</i>	N/A	17161	18203
<i>HU-RO</i>	12164	11302	11893
<i>RO-BG</i>	N/A	3606	3750
<i>BG-GR</i>	N/A	212	396

Πίνακας 6: Σύνολο τρένων στα σύνορα, πηγή RNE.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται ότι τα συνολικά τρένα στα σύνορα Βουλγαρίας – Ελλάδας, σημειώνουν την μεγαλύτερη αύξηση από το έτος 2020 στο έτος 2021. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα KPIs, βλέπουμε μια αύξηση (Βουλγαρία – Ελλάδα) 86,8% , ενώ όλες οι υπόλοιπες χώρες παρουσιάζουν μια πολύ πιο συντηρητική αύξηση, πλην των συνόρων Γερμανίας – Τσεχίας όπου βλέπουμε μείωση 5,5%. Παρόλα αυτά, στα σύνορα των υπόλοιπων χωρών, ο αριθμός των τρένων είναι πολύ μεγαλύτερος και ο σχετικός δείκτης παρουσιάζει ανοδική τάση όπως βλέπουμε από τον πίνακα των KPIs



Εικόνα 17 Μεταβολή αριθμού τρένων στα σύνορα 2020-2021, πηγή RNE.

2.8 Σενάρια Κρίσης - Σχεδιασμός

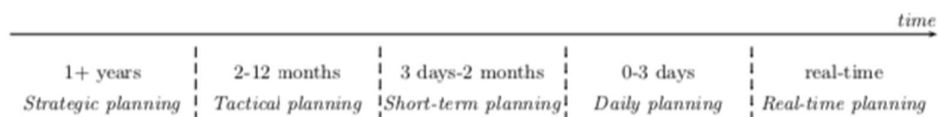
Η λειτουργία ενός μεταφορικού σιδηροδρομικού συστήματος είναι μια πολύπλοκη διαδικασία όπου συμμετέχουν πολλά μέρη με διαφορετικές ευθύνες. Παρόλο που μεταφέρεται φορτίο, οι σιδηρόδρομοι, τα τρένα, οι σταθμοί φόρτωσης και εκφόρτωσης, στελεχώνονται από ανθρώπους. Ωστόσο, δεν θα εστιάσουμε στον επαναπρογραμματισμό του προσωπικού, αλλά θα υποθέσουμε ότι το προσωπικό είναι διαθέσιμο και μπορεί να στελεχώσει τα υποθετικά σενάρια. Εστιάζουμε περισσότερο σε κάποιους βασικούς όρους οι οποίοι θα μας βοηθήσουν να σχεδιάσουμε τις εναλλακτικές μας λύσεις.

Ένα σιδηροδρομικό σύστημα περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες, καθένας από τους οποίους είναι υπεύθυνος για το δικό του μέρος της διαδικασίας. Από την απελευθέρωση της ευρωπαϊκής σιδηροδρομικής αγοράς τη δεκαετία του 1990, το έργο της διαχείρισης της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας έχει κατανεμηθεί μεταξύ του διαχειριστή υποδομής και των φορέων εκμετάλλευσης. Ο διαχειριστής υποδομής είναι ένας κυβερνητικός οργανισμός που είναι υπεύθυνος για τη συντήρηση και τη χρήση της υποδομής. Οι φορείς εκμετάλλευσης είναι οι σιδηροδρομικές εταιρείες που εκτελούν τις σιδηροδρομικές υπηρεσίες σύμφωνα με ορισμένες συμβάσεις με την κυβέρνηση. Δίνουμε εδώ μια επισκόπηση των οργανισμών που εμπλέκονται στις σιδηροδρομικές δραστηριότητες και των κινήτρων τους.

1. Κυβέρνηση.
2. Διαχειριστές υποδομών.
3. Εταιρίες παροχής υπηρεσιών μεταφοράς.

Πολλές φορές, εκτός από το αποκλειστικό δίκτυο για εμπορευματική χρήση, χρησιμοποιείται και κατά τμήματα το επιβατικό δίκτυο τρένων, το οποίο φυσικά κρίνει πιο πολύπλοκη μια επικείμενη αναδρομολόγηση. Μπορούμε να αναλύσουμε το χρονοδιάγραμμα του σχεδιασμού, οι φάσεις σχεδιασμού μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον χρονικό ορίζοντα των σχετικών αποφάσεων. Οι (Huisman et al. 2005) χωρίζουν τη διαδικασία σχεδιασμού σε τέσσερα στάδια ανάλογα με τον ορίζοντα των αποφάσεων. Όμως κατά τον (Nielsen 2011), μαζί με τις πρώτες τέσσερις παραδοσιακές

φάσεις : ο στρατηγικός, ο τακτικός, ο βραχυπρόθεσμος και ο καθημερινός σχεδιασμός, ορίζεται και μια πέμπτη φάση που αφορά τον ανασχεδιασμό που λαμβάνει χώρα σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια των πραγματικών λειτουργιών. Η διάκριση αυτή συμβαίνει για κυρίως οργανωτικούς λόγους. Με τη λογική ότι η τελευταία φάση του σχεδιασμού αποτελεί το δεδομένο εισαγωγής της αμέσως επόμενης.



Εικόνα 18 Timeline σχεδιασμού

Επομένως, ο σχεδιασμός διακρίνεται σε πέντε στάδια. Στις πρώτες φάσεις, ο σχεδιασμός είναι ιδιαίτερα συγκεντρωτικός, αλλά καθώς ο χρόνος λειτουργίας πλησιάζει, τα καθήκοντα σχεδιασμού διεξάγονται από πιο τοπικούς οργανισμούς. Σε μακροσκοπικό επίπεδο υπάρχει ο στρατηγικός σχεδιασμός, που λαμβάνει χώρα σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός χρόνου. Στη συνέχεια, ο τακτικός σχεδιασμός πραγματοποιείται γύρω στους δύο έως δώδεκα μήνες. Ακολουθώντας, υπάρχει ο βραχυπρόθεσμος σχεδιασμός που αφορά τα χρονικά διαστήματα οπουδήποτε μέσα στο διάστημα των τριών ημερών έως δύο μηνών, ο καθημερινός σχεδιασμός που αφορά μηδέν έως τρεις ημέρες και τέλος υπάρχει και ο σχεδιασμός σε πραγματικό χρόνο.

Οι σχεδιασμοί που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αφορούν και τις πέντε κατηγορίες. Διότι από τη μία, μια μεταβολή μπορεί να είναι απρόβλεπτη και να εμπίπτει στις κατηγορίες καθημερινού ή και σχεδιασμού σε πραγματικό χρόνο και από την άλλη μπορεί να αφορούν προειδοποιημένες και προγραμματισμένες μεταβολές και διαταραχές ή διακοπές που θα συμβαίνουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι για μια μέρα, ένα δρομολόγιο, μία μεταφορά κτλ.

Ο προγραμματισμός των σιδηροδρομικών δραστηριοτήτων από έναν φορέα εκμετάλλευσης αφορά κυρίως το χρονοδιάγραμμα και τους δύο κύριους πόρους : το τροχαίο υλικό και το πλήρωμα. Ο σχεδιασμός αυτών των πόρων υφίσταται διάφορες φάσεις πριν από τις πραγματικές λειτουργίες, στη συνέχεια θα αναλυθούν τα προαναφερθέντα στάδια του σχεδιασμού που φαίνονται στην *εικόνα 16*.

2.8.1 Στρατηγικός σχεδιασμός

Ο ορίζοντας του στρατηγικού σχεδιασμού διαρκεί αρκετά έτη και περιλαμβάνει τον καθορισμό των συνολικών στόχων του φορέα εκμετάλλευσης, την αγορά, την επισκευή ή γενικά ό,τι αφορά το τροχαίο υλικό, την πρόσληψη και την εκπαίδευση νέου πληρώματος, τη βασική δομή του χρονοδιαγράμματος και τις αποφάσεις για τον σχεδιασμό των γραμμών.

Για το τροχαίο υλικό, λαμβάνονται στρατηγικές αποφάσεις σχετικά με την αγορά ή τη μίσθωση νέου τροχαίου υλικού, καθώς και σχετικά με την ανανέωση ή επισκευή του υφιστάμενου. Οι αποφάσεις αυτές έχουν πολύ μεγάλο χρονικό ορίζοντα, καθώς το τροχαίο υλικό λειτουργεί συνήθως για δεκαετίες ενώ επίσης αποτελεί μία αρκική επένδυση.

Μια περαιτέρω στρατηγική απόφαση για το τροχαίο υλικό είναι η συντήρηση. Αυτό περιλαμβάνει τις τοποθεσίες των εγκαταστάσεων συντήρησης και τις αποφάσεις σχετικά με τη συχνότητα συντήρησης του τροχαίου υλικού. Μια στρατηγική συντήρησης υπαγορεύει μετά από πόση χρήση ή πόσο χρόνο αντικαθίστανται ορισμένα ανταλλακτικά και πόσο συχνά εκτελείται προληπτική συντήρηση.

Εν συνεχεία, ένας ακόμα παράγοντας του στρατηγικού σχεδιασμού είναι το προσωπικό, καθώς η πρόσληψη ή ακόμα και η εκπαίδευση αυτού μπορεί να πάρει χρόνια και είναι μια διαδικασία η οποία είναι συνεχής καθώς συνεχώς δημιουργούνται ανάγκες και θέσεις εργασίας κατά το πέρασ του χρόνου.

2.8.2 Τακτικός σχεδιασμός

Η φάση του τακτικού σχεδιασμού αναφέρεται σε εργασίες σχεδιασμού με χρονικό ορίζοντα δύο έως δώδεκα μηνών. Σε αυτή τη φάση το γενικό χρονοδιάγραμμα που έχει δημιουργηθεί, καθορίζει τις ώρες αναχώρησης όλων των σιδηροδρομικών υπηρεσιών για έναν χρονικό ορίζοντα όπως δύο μήνες, που δεν έχει ειδικές απαιτήσεις. Αυτό σημαίνει ότι τα ενδεχόμενα έργα συντήρησης της υποδομής δεν λαμβάνονται υπόψη σε αυτή τη φάση αλλά λαμβάνεται υπόψη μόνο η προγραμματισμένη τακτική συντήρηση. Ούτε υπάρχουν εκδηλώσεις όπως οι αργίες όπου τα δρομολόγια ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά από τις κανονικές εβδομάδες.

Σε τοπικό επίπεδο, κατασκευάζονται σχέδια για τις κινήσεις των αμαξοστοιχιών εντός των σιδηροδρομικών κόμβων σύμφωνα με τα γενικά σχέδια. Αυτά τα τοπικά σχέδια χρησιμεύουν κυρίως ως έλεγχος εφικτότητας για το γενικευμένο χρονοδιάγραμμα και την κυκλοφορία του τροχαίου υλικού.

Ένα ουσιαστικό βήμα στη φάση του τακτικού σχεδιασμού είναι η κατανομή του τροχαίου υλικού μεταξύ των γραμμών. Με βάση την εκτιμώμενη ζήτηση σε φορτία, που σε μακροσκοπικό επίπεδο μπορούμε να δούμε μια εικόνα αυτού από τα KPIs που έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, το τροχαίο υλικό κατανέμεται μεταξύ των γραμμών έτσι ώστε σε μια δεδομένη ημέρα κάθε γραμμή να ικανοποιεί κάποιες συγκεκριμένες απαιτήσεις και να μεταφέρει συγκεκριμένα φορτία στους προορισμούς που ζητώνται. Στη συνέχεια, το τροχαίο υλικό ανατίθεται σε κάθε σιδηροδρομική γραμμή σύμφωνα με το γενικό χρονοδιάγραμμα. Αυτή η λεπτομερής ανάθεση συνεπάγεται επίσης την ανάγκη ελιγμών των κινήσεων του τροχαίου υλικού εντός των σιδηροδρομικών κόμβων. Αυτές οι κινήσεις προγραμματίζονται και για τη γενική εβδομάδα σε αυτή τη φάση. Η ύπαρξη των γενικών χρονοδιαγραμμάτων πόρων σημαίνει ότι οποιοσδήποτε μεταγενέστερος προγραμματισμός για συγκεκριμένες ημέρες, που διαφέρουν από την αντίστοιχη ημέρα της γενικής εβδομάδας, πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα γενικά χρονοδιαγράμματα.

2.8.3 Βραχυπρόθεσμος σχεδιασμός

Η φάση του βραχυπρόθεσμου σχεδιασμού αναφέρεται σε εργασίες σχεδιασμού με χρονικό ορίζοντα λίγων ημερών έως δύο μηνών. Σε αυτή τη φάση το γενικό σχέδιο της κάθε εβδομάδας, το οποίο έχει δημιουργηθεί κατά την προηγούμενη φάση, προσαρμόζεται στις απαιτήσεις των μεμονωμένων εβδομάδων ή ημερών.

Για μια συγκεκριμένη εβδομάδα, η συντήρηση της υποδομής μπορεί να απαιτήσει προσαρμογές του χρονοδιαγράμματος. Οι ώρες αναχώρησης και άφιξης προσαρμόζονται και τα δρομολόγια των τρένων μπορούν να εισαχθούν ή να ακυρωθούν ανάλογα με τη διαθέσιμη υποδομή. Τέτοιες προσαρμογές στο χρονοδιάγραμμα συνεπάγονται επίσης αλλαγές στα χρονοδιαγράμματα πόρων. Οι πόροι επαναπρογραμματίζονται λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη δομή των γενικών σχεδίων. Ο συνολικός στόχος είναι να διαταραχθούν τα χρονοδιαγράμματα των άλλων επηρεαζόμενων φορέων, καθώς και του ίδιου του τροχαίου υλικού όσο το δυνατόν λιγότερο.

Οι εθνικές αργίες και οι εκδηλώσεις κατά τις οποίες το πλήρωμα μπορεί να βρίσκεται σε μειωμένη πληρότητα, απαιτούν γενικά διαφορετική κατανομή του γενικού προγραμματισμού των εργασιών καθώς και της κατανομής του φόρτου. Όπως επίσης και στην περίπτωση η οποία θα εξεταστεί δηλαδή ο αποκλεισμός κάποιου από τα σύνορα για οποιουδήποτε λόγους, τα γενικά χρονοδιαγράμματα πόρων προσαρμόζονται ώστε αυτό να λαμβάνεται υπόψη. Ο προγραμματισμός των πόρων μέχρι και τον βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό πραγματοποιείται σε οργανισμούς σχεδιασμού, αλλά μετά από αυτή τη φάση τα σχέδια γνωστοποιούνται σε όλα τα μέρη που πρόκειται να τα εφαρμόσουν.

2.8.4 Καθημερινός σχεδιασμός

Η τελευταία φάση σχεδιασμού πριν από τις πραγματικές λειτουργίες έχει ορίζοντα έως και λίγες μόνο ημέρες. Ονομάζουμε αυτή τη φάση καθημερινό σχεδιασμό αφού ασχολείται με θέματα που προκύπτουν σε καθημερινή βάση. Σε αυτή τη φάση τα σχέδια από τον βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό μεταφέρονται στους σχετικούς τοπικούς ελεγκτές και αποστολείς. Σε αυτή τη μετάβαση ενδέχεται να προκύψουν ορισμένα τοπικά ζητήματα που απαιτούν μικρές προσαρμογές. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε προσωρινή μη διαθεσιμότητα του προσωπικού λόγω ασθένειας ή σε απροσδόκητους περιορισμούς στην ικανότητα ελιγμών ή στη μη διαθεσιμότητα τροχαίου υλικού. Οι περισσότερες από αυτές τις συγκρούσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν σε τοπικό επίπεδο με την ανταλλαγή καθηκόντων μεταξύ του προσωπικού ή του τροχαίου υλικού και, ως εκ τούτου, απαιτούν ελάχιστο ή καθόλου καθολικό συντονισμό.

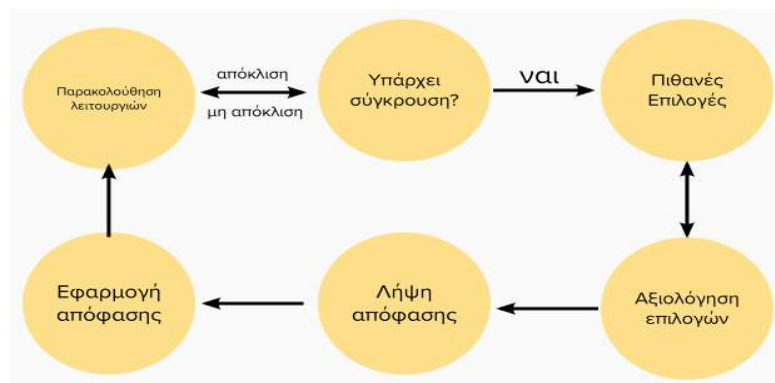
Ένα σημαντικό ζήτημα σε αυτή τη φάση είναι η προληπτική συντήρηση του τροχαίου υλικού. Το τροχαίο υλικό πρέπει να υποβάλλεται σε τακτικούς ελέγχους συντήρησης κάθε φορά που οδηγείται ορισμένος αριθμός χιλιομέτρων. Ο αριθμός των χιλιομέτρων που διανύονται παρακολουθείται για κάθε μονάδα τροχαίου υλικού, έτσι ώστε η ανάγκη συντήρησης να ανιχνεύεται πολύ πριν η μονάδα φτάσει στο όριο του χιλιομέτρου. Μόλις μια μονάδα χρειάζεται τον τακτικό έλεγχο συντήρησής της, το καθήκον της ανταλλάσσεται με το καθήκον μιας μονάδας που τελειώνει σε κατάλληλη εγκατάσταση συντήρησης. Η ανάγκη τακτικής προληπτικής συντήρησης συνεπάγεται ότι πρέπει να υπάρχουν επαρκείς δυνατότητες ανταλλαγής φορτίων στα καθήκοντα τροχαίου υλικού ώστε οι μονάδες να φτάσουν στην εγκατάσταση συντήρησης εντός λίγων ημερών. Σημειώνουμε ότι σε ορισμένες σιδηροδρομικές επιχειρήσεις ο προγραμματισμός της προληπτικής συντήρησης λαμβάνεται υπόψη ήδη στον τακτικό σχεδιασμό ανάλογα με τη συγκεκριμένη πολιτική του φορέα εκμετάλλευσης.

2.8.5 Προγραμματισμός σε πραγματικό χρόνο

Η φάση αυτή αφορά την ανασχεδιασμό των πόρων κατά τη διάρκεια των πραγματικών πράξεων. Εάν ένα απροσδόκητο γεγονός καθιστά αδύνατη την εκτέλεση των επιχειρησιακών σχεδίων στην πράξη, οι επηρεαζόμενοι πόροι πρέπει να επαναπρογραμματιστούν. Για παράδειγμα, εάν για κάποιον λόγο κλείσουν τα σύνορα μιας χώρας προς μια άλλη και κατά συνέπεια κλείσει και ο διάδρομος έτσι ώστε να περάσει το φορτίο, τότε πρέπει να υπάρχουν έτοιμα σενάρια για εναλλακτικές διαδρομές τόσο προκαθορισμένα, όσο και με δυνατότητα του προγραμματισμού σε πραγματικό χρόνο για λεπτομέρειες και παράγοντες οι οποίοι επηρεάζονται από βραχυπρόθεσμα δεδομένα. Η διαδικασία παρακολούθησης του χρονοδιαγράμματος και των πόρων, του εντοπισμού των συγκρούσεων και της εφαρμογής των κατάλληλων αντιδράσεων περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

2.9 Η επιχειρησιακή διαδικασία

Για να μπορέσουμε να καταστρώσουμε ένα σχέδιο το οποίο θα προκύψει από ένα διάγραμμα, πρέπει να παρατηρήσουμε πως «τρέχουν» τα επιχειρησιακά σενάρια όταν δεν υπάρχει κάποια διαταραχή δηλαδή, υπό κανονικές συνθήκες. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την εποπτεία των πόρων και την αξιολόγηση των πιθανών συγκρούσεων που μπορούν να προκύψουν αλλά και των διαδικασιών που αποκλίνουν από το προκαθορισμένο πρόγραμμα της μεταφοράς που θέλουμε να πραγματοποιηθεί. Εάν εντοπισθεί μια σύγκρουση τότε, μέσα από μια σειρά ερωτήσεων και αξιολογήσεων των διαθέσιμων πιθανών σεναρίων θα οδηγηθούμε στην απόφαση.



Εικόνα 19 Διαδικασία εφαρμογής απόφασης

Αναλυτικότερα, μια σύγκρουση μπορεί για παράδειγμα να είναι ένα τρένο το οποίο έχει καθυστερήσει και μπλοκάρει μια πλατφόρμα, επομένως το τρένο το οποίο αναμένει την άφιξή του καθυστερεί και εκείνο. Πιο σοβαρές συγκρούσεις αφορούν βλάβες στις υποδομές όπως και ένας εξωτερικός παράγοντας (π.χ. ακραίες καιρικές συνθήκες). Όταν μία σύγκρουση εντοπίζεται, αμέσως ξεκινάει η διαδικασία αναγνώρισης των επιλογών που υπάρχουν έτσι ώστε να εκτελεστεί η μεταφορά.

Σε περίπτωση σύγκρουσης στο χρονοδιάγραμμα της εκτέλεσης της μεταφοράς ή ανάθεση δρομολογίων, οι προγραμματιστές ή υπεύθυνοι εκτέλεσης των μεταφορών πρέπει να αποφασίσουν πώς θα αντιδράσουν στη σύγκρουση. Σε περίπτωση μικρών αποκλίσεων μπορεί να είναι σχετικά απλό να εκτιμηθούν οι πιθανές επιλογές, αλλά σε περίπτωση πιο μεγάλων διαταραχών, υπάρχουν αρκετές πιθανές επιλογές με διαφορετικές επιπτώσεις στην απόδοση του συστήματος, το οποίο πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη στην λήψη της απόφασης. Ένα άλλο περίπλοκο μέρος της διαδικασίας λήψης αποφάσεων είναι η εκτίμηση της διάρκειας μιας σύγκρουσης.

Σε περίπτωση σύγκρουσης, κάποιες από τις πιθανές επιλογές κατά κύριο λόγο είναι :

1. Ακύρωση πραγματοποίησης της μεταφοράς/ αμαξοστοιχιών
2. Αλλαγή των δρομολογίων των αμαξοστοιχιών μεταξύ σταθμών και εντός των σταθμών
3. Αλλαγή του χρονοδιαγράμματος σύμφωνα με τις (αναμενόμενες) καθυστερήσεις, την ακύρωση των συνδέσεων επιβατών, την αλλαγή της σειράς των αμαξοστοιχιών και την αλλαγή της εκχώρησης πόρων στα τρένα.
4. Επίσης, έκτακτες και ασυνήθιστες συνθήκες ενδέχεται να απαιτούν διαφορετικές στάσεις/παραδόσεις ορισμένων αμαξοστοιχιών για την ανακούφιση της πίεσης σε άλλες

Για συγκρούσεις που επηρεάζουν αρκετές προγραμματισμένες αμαξοστοιχίες και τους εμπλεκόμενους πόρους, η αντίδραση των υπευθύνων του προγραμματισμού ακολουθεί συνήθως ένα προκαθορισμένο σενάριο χειρισμού. Το σενάριο περιγράφει μια τροποποιημένη σταθερή κατάσταση για το σύστημα. Σε μια τέτοια περίπτωση, εξακολουθεί να είναι μια σημαντική απόφαση ποιο σενάριο θα χρησιμοποιηθεί και πώς θα χειριστεί τη μετάβαση από την αρχικά προγραμματισμένη κατάσταση στη διαταραγμένη σταθερή κατάσταση και αργότερα πίσω στην κανονικότητα πάλι. Στη συνέχεια αυτής της διπλωματικής θα αναλυθούν οι πιθανές επιλογές διαχείρισης συγκρούσεων και θα δημιουργηθούν κάποια σχέδια για τον σκοπό αυτό.

2.10 Εκτέλεση αποφάσεων

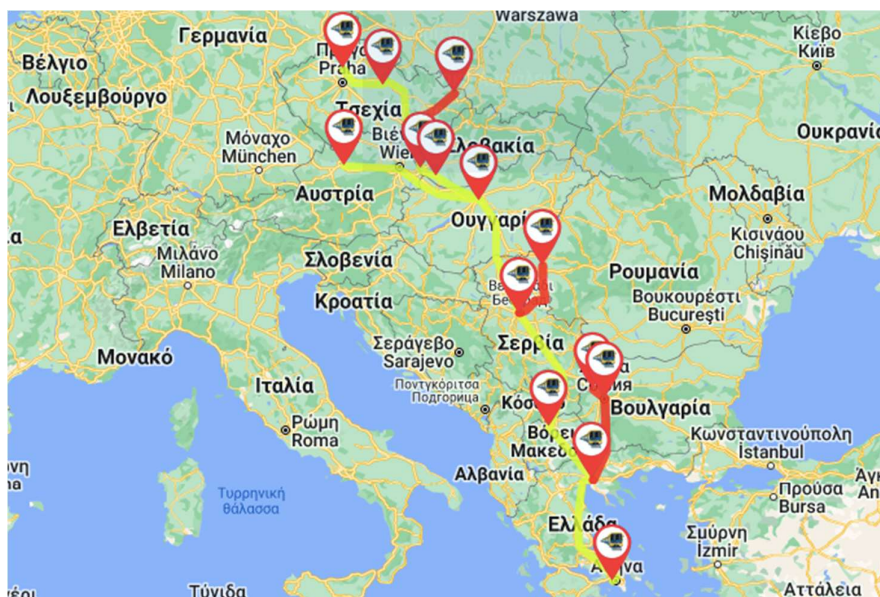
Η ανάγκη δημιουργίας αυτών των σεναρίων έγκειται στο γεγονός ότι πρέπει να παρθεί η βέλτιστη για το σύστημα απόφαση, υπό την εξέταση των κριτηρίων. Μόλις γίνει μια σκιαγράφιση για το συνολικό πλαίσιο και για τον τρόπο αντίδρασης σε μια σύγκρουση, οι αποφάσεις εφαρμόζονται στην πράξη. Η πρακτική εφαρμογή αποτελείται από δύο κύρια καθήκοντα: την ενημέρωση των κατάλληλων πληροφοριακών συστημάτων και την κοινοποίηση των αλλαγών στα κατάλληλα μέρη. Οι αλλαγές στους αναμενόμενους χρόνους άφιξης των αμαξοστοιχιών (σε περίπτωση που η διαταραχή προκαλεί και διαταραχή στο πρόγραμμα των δρομολογίων) καταγράφονται αυτόματα στα πληροφοριακά συστήματα, ενώ άλλες αλλαγές μπορεί να χρειάζονται μη αυτόματη εισαγωγή στα συστήματα. Επίσης, πρέπει να καταγράφονται τα επαναδρομολογημένα και ακυρωμένα τρένα, καθώς και τα δρομολόγια των αμαξοστοιχιών εντός των σταθμών. Η ενημέρωση των πληροφοριακών συστημάτων επιτρέπει στους αποστολείς να υποβάλλουν ερωτήματα στο σύστημα για λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο οι πόροι χρησιμοποιούνται στην προσαρμοσμένη κατάσταση. Με τον τρόπο αυτό, οι αποφάσεις μπορούν να παρθούν πιο δυναμικά συνυπολογίζοντας τα νέα δεδομένα, και μπορούν να εξελίξουν μια θεωρητική απόφαση, μήνες πριν για το βέλτιστο αποτέλεσμα. Επίσης, είναι θεμιτή η καταγραφή όλων αυτών των δεδομένων έτσι ώστε τα μοντέλα να μπορούν να προπονούνται σε αυτά και να γίνονται όλο και πιο εύστοχα και ευφυή.

Επομένως στην πράξη, το χρονοδιάγραμμα ενημερώνεται πριν από τα χρονοδιαγράμματα των πόρων, καθώς το χρονοδιάγραμμα αυτό κάθε αυτό υπαγορεύει στους πόρους το πως θα κινηθούν. Ένας άλλος παράγοντας που περιπλέκει την κατάσταση είναι ότι διαφορετικοί οργανισμοί εκτελούν τις ενημερώσεις - ο διαχειριστής υποδομής ενημερώνει το χρονοδιάγραμμα, ενώ τα χρονοδιαγράμματα πόρων ενημερώνονται από τον προγραμματιστή των πόρων και αντίστοιχα ο κάθε υπεύθυνος του εκάστοτε οργανισμού ενημερώνει από τη μεριά του το σύστημα. Αυτές οι αλλαγές επομένως πρέπει να επικοινωνούνται ταυτόχρονα μεταξύ των φορέων, έτσι ώστε σε περίπτωση κρίσης, το εναλλακτικό σενάριο να πραγματοποιηθεί ομαλά. Στην επόμενη ενότητα θα παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδρομή την οποία θα μελετήσουμε και θα χρησιμοποιήσουμε για τα σενάρια μας.

3. Διαδρομές και σενάρια διαταραχής

Όπως έχουμε αναφέρει στην προηγούμενη ενότητα, οι διαδρομές οι οποίες εκτελούνται είναι πολύ συγκεκριμένες και οφείλουν να είναι σύμφωνες με υπάρχοντες διαδρόμους. Στην προκειμένη περίπτωση θα εστιάσουμε σε μια διαδρομή που εκτελείται από εταιρεία η οποία δραστηριοποιείται και στην Ελλάδα και έχει ως εναρκτήριο κόμβο την Ελλάδα και ως αφετηρία σταθμούς εντός της Ευρώπης.

Η συγκεκριμένη διαδρομή απεικονίζεται παρακάτω.

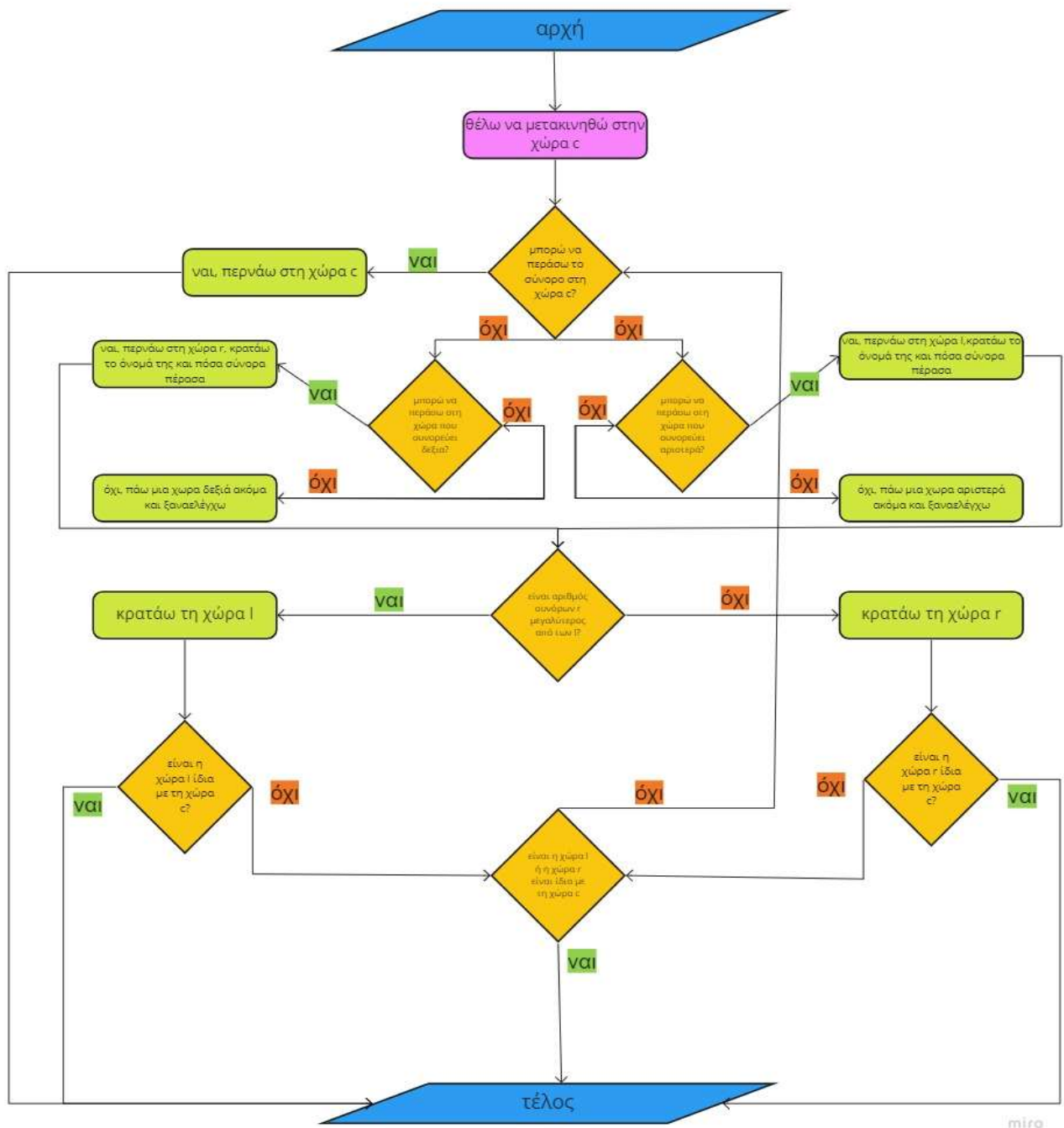


Εικόνα 20 : Διαδρομή συρμού, πηγή PEARL.

Αναλυτικότερα, οι κόμβοι έχουν ως εξής :

1. Ελλάδα, Πειραιάς
2. Ελλάδα, Θεσσαλονίκη
3. Βόρεια Μακεδονία, Σκόπια
4. Σερβία, Βελιγράδι
5. Ουγγαρία, Βουδαπέστη/ BILK
6. Σλοβακία, Ντουνάσκα Στρέντα
7. Σλοβακία, Μπρατισλάβα
8. Τσεχία, Παρτουμπίτσε/TPTP
9. Τσεχία, Οστράβα
10. Τσεχία, Μέλνικ/ RCO
11. Αυστρία, Ενς
12. Βουλγαρία, Σόφια
13. Βουλγαρία, Ντράγκομαν
14. Ρουμανία, Δυτικά

Οι διαταραχές των δρομολογίων που θα εξετάσουμε, υποθέτουμε ότι βρίσκονται μεταξύ των συνόρων γειτονικών χωρών. Ο τρόπος επιλογής εναλλακτικών χωρών μετάβασης, ύστερα από την εμφάνιση της διαταραχής, προκύπτει σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα ροής και βασίζεται στην διέλευση λιγότερων δυνατών συνόρων.



Εικόνα 21 : Διάγραμμα ροής επιλογής εναλλακτικού προορισμού.

Ακολουθώς παρουσιάζεται η ανάλυση του προηγούμενου διαγράμματος ροής σε βήματα τα οποία περιγράφουν με απλά λόγια τον τρόπο επιλογής του εναλλακτικού προορισμού.

1. Επέλεξε τη χώρα C που θες να μετακινηθείς
2. Έλεγξε αν μπορείς να περάσεις στο σύνορο της C. Εάν ναι, προχώρησε στο 14 αλλιώς προχώρησε στο 3.
3. Έλεγξε αν μπορείς να περάσεις στη χώρα R που συνορεύει η C από τα δεξιά εάν ναι, πάνε στο 5, αλλιώς προχώρησε στο 4.
4. Πήγαινε μία χώρα πιο δεξιά από την προηγούμενη και επέστρεψε στο 3.
5. Πέρνα στη χώρα R αποθήκευσε το όνομα της και το πόσα σύνορα Br έχεις περάσει, πάνε στο 6.
6. Έλεγξε αν μπορείς να περάσεις στη χώρα L που συνορεύει η C από τα αριστερά εάν ναι, πάνε στο 8, αλλιώς προχώρησε στο 7.
7. Πήγαινε μία χώρα πιο αριστερά από την προηγούμενη και επέστρεψε στο 6.
8. Πέρνα στη χώρα L, αποθήκευσε το όνομα της και το πόσα σύνορα Bl έχεις περάσει, πάνε στο 9.
9. Αν $Br \geq Bl$, κράτα τη χώρα L και προχώρησε στο 10, αλλιώς προχώρησε στο 11.
10. Εάν $L = C$, πήγαινε στο 13, αλλιώς επέστρεψε στο 6.
11. Αν $Br < Bl$, κράτα τη χώρα R και προχώρησε στο 12.
12. Εάν $R = C$, πήγαινε στο 13, αλλιώς επέστρεψε στο 3.
13. Πέρνα στη χώρα C.

Επομένως, διαταραχές μπορούν να εντοπιστούν :

Σενάριο 1: Στον κόμβο 2 (Ελλάδα, Θεσσαλονίκη) με κόμβο 3 (Βόρεια Μακεδονία, Σκόπια).

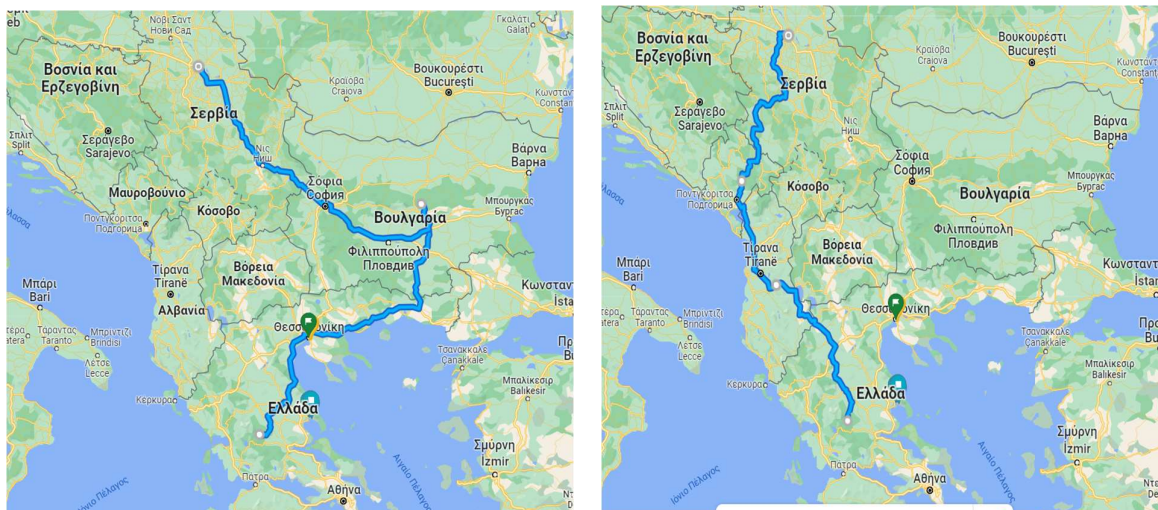
Η προσέγγιση της Σερβίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω εναλλακτικές διαδρομές :

A. Ελλάδα → Βουλγαρία → Σερβία :

Η διαδρομή διασχίζει δύο σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος.

B. Ελλάδα → Αλβανία → Μαυροβούνιο → Σερβία :

Η διαδρομή διασχίζει τρία σύνορα και οι χώρες, εκτός της Ελλάδας, δεν αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος



Εικόνα 22 Σενάριο 1 , διαδρομή A - B

Σενάριο 2 : Στον κόμβο 3 (Βόρεια Μακεδονία, Σκόπια) με κόμβο 4(Σερβία, Βελιγράδι).

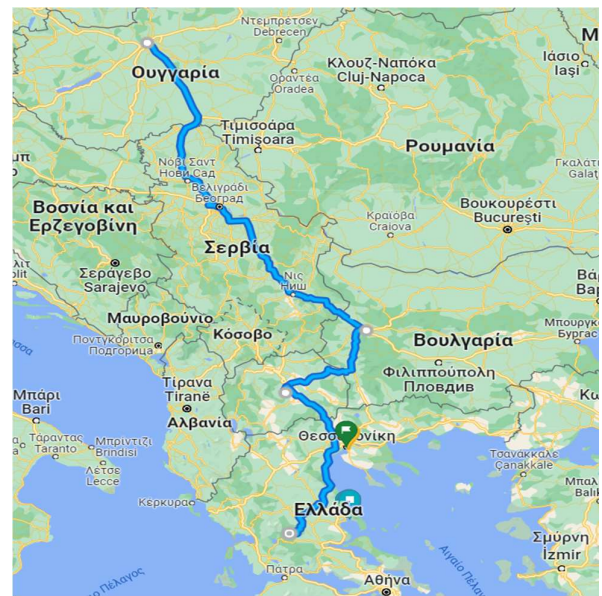
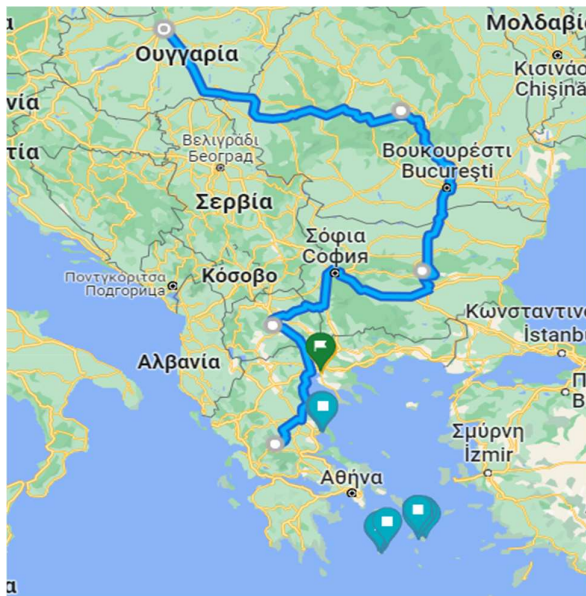
Η προσέγγιση της Ουγγαρίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω εναλλακτικές διαδρομές :

A. Ελλάδα → Σκόπια → Βουλγαρία → Ρουμανία → Ουγγαρία :

Η διαδρομή διασχίζει τέσσερα σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος.

B. Ελλάδα → Σκόπια → Βουλγαρία → Σερβία → Ουγγαρία :

Η διαδρομή διασχίζει τέσσερα σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος



Εικόνα 23 Σενάριο 2 , διαδρομή A - B

Σενάριο 3 : Στον κόμβο 4 (Σερβία, Βελιγράδι) με κόμβο 5(Ουγγαρία, Βουδαπέστη/ BILK).

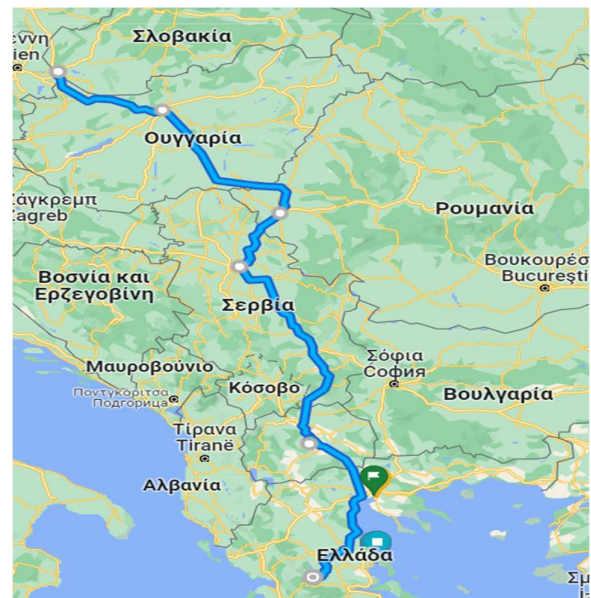
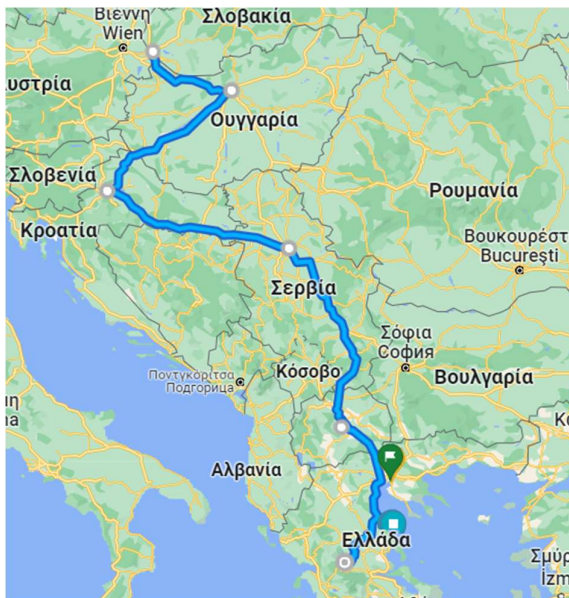
Η προσέγγιση της Σλοβακίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω εναλλακτικές διαδρομές :

A. Ελλάδα → Σκόπια → Σερβία → Κροατία → Ουγγαρία → Σλοβακία :

Η διαδρομή διασχίζει πέντε σύνορα και όλες οι χώρες, εκτός της Κροατίας, αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος.

B. Ελλάδα → Σκόπια → Σερβία → Ρουμανία → Ουγγαρία → Σλοβακία :

Η διαδρομή διασχίζει πέντε σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος



Εικόνα 24 Σενάριο 3 , διαδρομή Α - Β

Σενάριο 4 : Στον κόμβο 5 (Ουγγαρία, Βουδαπέστη) με κόμβο 6 (Σλοβακία, Ντουνάσκα Στρέντα), εφόσον ο κόμβος 6 δεν γίνεται προσβάσιμος, εκτός βγαίνει και ο 7 που βρίσκεται εντός της ίδιας χώρας (Σλοβακία, Μπρατισλάβα).

Η προσέγγιση της Τσεχίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω εναλλακτικές διαδρομές :

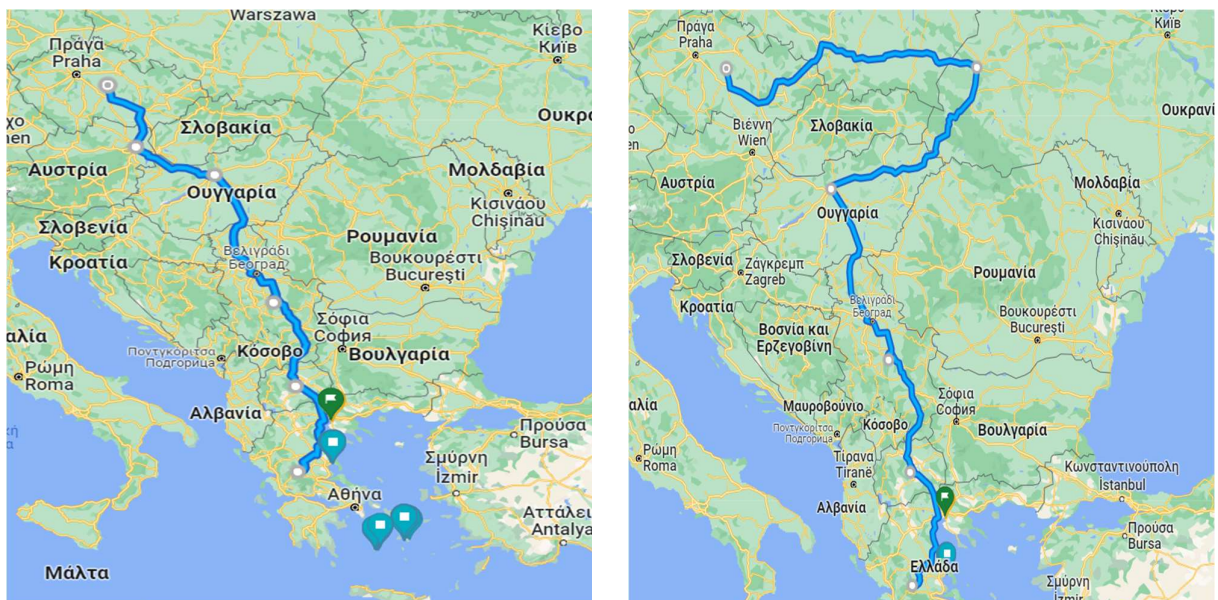
A. Ελλάδα → Σκόπια → Σερβία → Ουγγαρία → Αυστρία → Τσεχία :

Η διαδρομή διασχίζει πέντε σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος.

B. Ελλάδα → Σκόπια → Σερβία → Ουγγαρία → Ουκρανία → Πολωνία →

Τσεχία :

Η διαδρομή διασχίζει έξι σύνορα και όλες οι χώρες, εκτός των Ουκρανία και Πολωνία, αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος



Εικόνα 25 Σενάριο 4 , διαδρομή A - B

Σενάριο 5 : Στους κόμβους 6/7 (Σλοβακία) με κόμβο 8 (Τσεχία, Παρτουμπίτσε/TRTP), εφόσον ο κόμβος 8 δεν γίνεται προσβάσιμος εκτός βγαίνουν ο 9 και ο 10 που βρίσκονται εντός της ίδιας χώρας (Τσεχία, Οστράβα, Τσεχία, Μέλνικ/ RCO) .

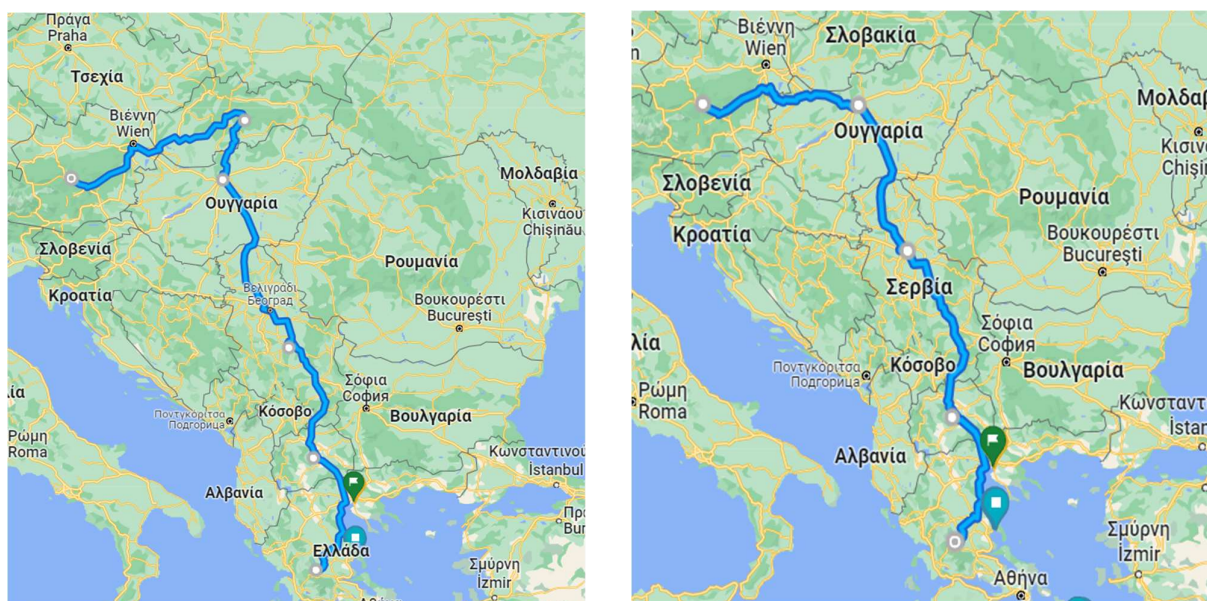
Η προσέγγιση της Αυστρίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω εναλλακτικές διαδρομές :

A. Ελλάδα → Σκόπια → Σερβία → Ουγγαρία → Σλοβακία → Αυστρία :

Η διαδρομή διασχίζει πέντε σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος.

B. Ελλάδα → Σκόπια → Σερβία → Ουγγαρία → Αυστρία :

Η διαδρομή διασχίζει τέσσερα σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος



Εικόνα 26 Σενάριο 5 , διαδρομή Α - Β

Σενάριο 6. : Στους κόμβους 8/9/10 (Τσεχία) με τον κόμβο 11 (Αυστρία, Εννς).

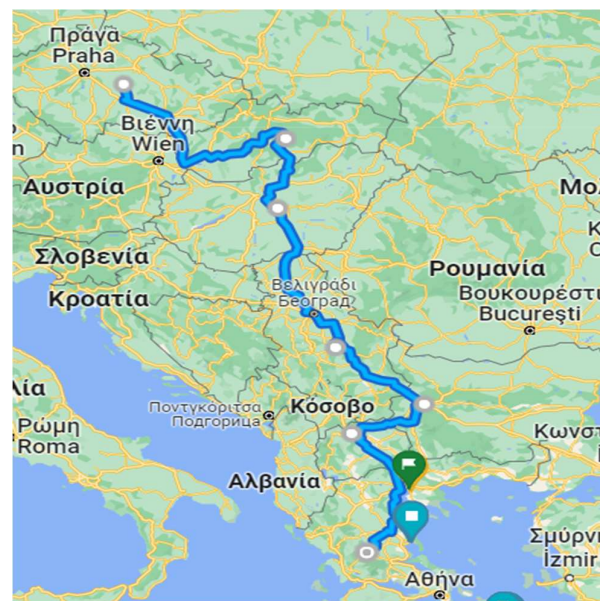
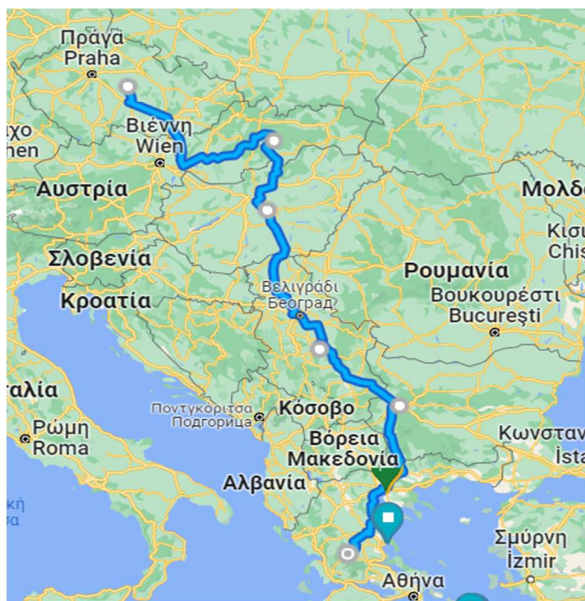
Η προσέγγιση της Βουλγαρίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω εναλλακτικές διαδρομές :

A. Τσεχία → Σλοβακία → Ουγγαρία → Σερβία → Βουλγαρία → Ελλάδα :

Η διαδρομή διασχίζει πέντε σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος.

B. Τσεχία → Σλοβακία → Ουγγαρία → Σερβία → Βουλγαρία → Σκόπια → Ελλάδα :

Η διαδρομή διασχίζει έξι σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος

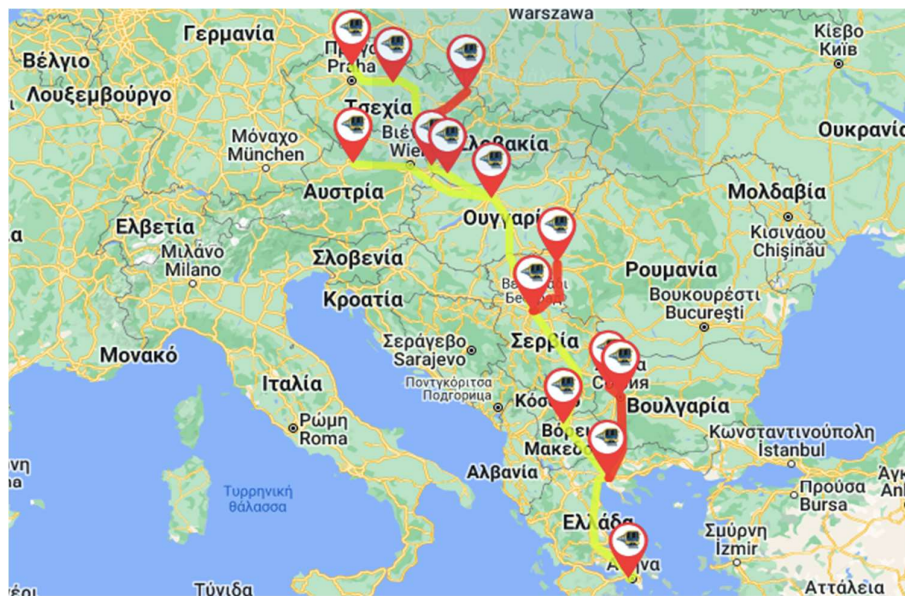


Εικόνα 27 Σενάριο 6 , διαδρομή A - B

Σενάριο 7 : Στον κόμβο 11 (Αυστρία, Εννς) με κόμβο 12 (Βουλγαρία, Σόφια). Εφόσον ο κόμβος 12 δεν γίνεται προσβάσιμος, εκτός βγαίνει και ο 13 που βρίσκεται εντός της ίδιας χώρας (Βουλγαρία, Ντράγκομαν). Οι χώρες αυτές δε συνορεύουν οπότε η διαδρομή παραμένει αμετάβλητη διότι μπορούν να προσεγγιστούν όλες οι χώρες του δρομολογίου.

Α. Ελλάδα → Σκόπια → Σερβία → Ουγγαρία → Σλοβακία → Τσεχία → Αυστρία
→ Βουλγαρία → Ρουμανία :

Η διαδρομή διασχίζει επτά σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος.



Εικόνα 28 Σενάριο 7

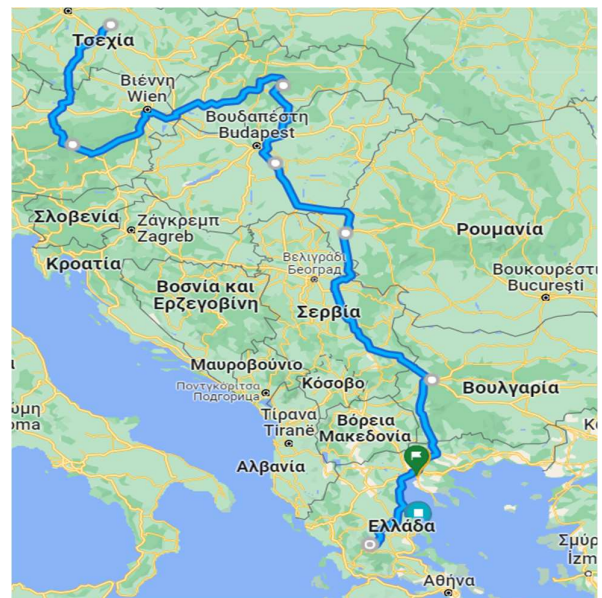
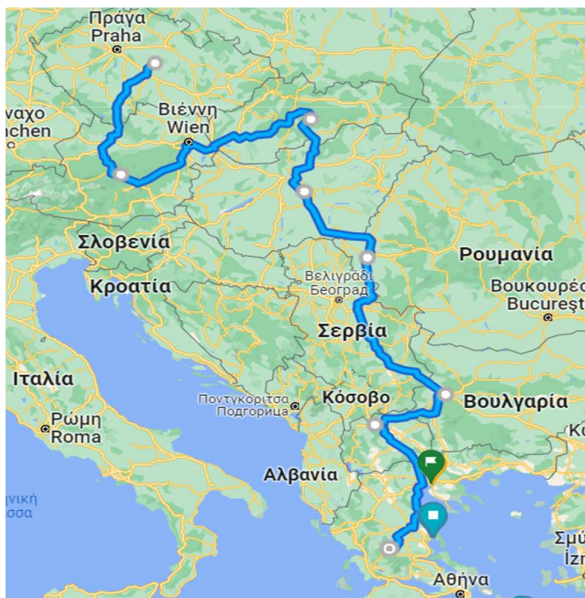
Σενάριο 8 : Στον κόμβο 12/13 (Βουλγαρία) με κόμβο 14 (Ρουμανία, Δυτικά). Η προσέγγιση της Ρουμανίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω εναλλακτικές διαδρομές :

A. Τσεχία → Αυστρία → Σλοβακία → Ουγγαρία → Ρουμανία → Σερβία → Βουλγαρία → Ελλάδα :

Η διαδρομή διασχίζει επτά σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος.

B. Τσεχία → Αυστρία → Σλοβακία → Ουγγαρία → Ρουμανία → Σερβία → Βουλγαρία → Σκόπια → Ελλάδα :

Η διαδρομή διασχίζει οκτώ σύνορα και όλες οι χώρες αποτελούν μέρη του αρχικού προγράμματος



Εικόνα 29 Σενάριο 8 , διαδρομή A - B

3.1 Αλγόριθμος Reschedule – Reroute

Για να μπορέσουμε να ισχυροποιήσουμε την ευστάθεια της απόφασής μας, θα βασιστούμε σε αξιόπιστους αλγορίθμους που έχουν δοκιμαστεί ευρέως στη βιβλιογραφία. Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία, για τις δύο κατηγορίες (real time solutions/non realtime) κατά την πρώτη βλέπουμε να συναντώνται αλγόριθμοι όπως ο tabu search και κατά τη δεύτερη χρησιμοποιούνται εργαλεία milp (mixed integer linear programming) για την αντιμετώπιση των προβλημάτων. Σε πρώτο χρόνο όμως θα πρέπει να περιγράψουμε κάποιες έννοιες που διέπουν το πρόβλημα.

Ένα σιδηροδρομικό δίκτυο αποτελείται από τμήματα τροχιάς και σήματα. Τα σήματα επιτρέπουν τη ρύθμιση της κυκλοφορίας στο δίκτυο καθώς και ρυθμίζουν την ταχύτητα με την οποία κινούνται οι αμαξοστοιχίες που φέρουν τα φορτία. Το τμήμα της γραμμής μεταξύ δύο σημάτων ονομάζεται τμήμα μπλοκ και μπορεί να φιλοξενήσει το πολύ ένα τρένο κάθε φορά. Οι κανόνες κυκλοφορίας επιβάλλουν επίσης έναν ελάχιστο διαχωρισμό απόστασης μεταξύ των αμαξοστοιχιών, ο οποίος μεταφράζεται σε χρόνο ρύθμισης μεταξύ της εξόδου ενός τρένου από ένα τμήμα μπλοκ και της εισόδου του επόμενου συρμού στο ίδιο τμήμα μπλοκ.

Για κάθε αμαξοστοιχία που κινείται στο δίκτυο, ένα χρονοδιάγραμμα εκτός γραμμής καθορίζει μια διαδρομή, δηλαδή μια σειρά τμημάτων που πρέπει να διασχισθούν, και τους προγραμματισμένους χρόνους άφιξης/διέλευσης σε ένα σύνολο σχετικών σημείων κατά μήκος της διαδρομής του (π.χ. σταθμοί, κόμβοι και το σημείο εξόδου του δικτύου). Η ταχύτητα κίνησης της αμαξοστοιχίας εξαρτάται από την αμαξοστοιχία, τη διαδρομή και από αρκετούς άλλους παράγοντες και κανονισμούς. Η διέλευση μιας αμαξοστοιχίας από ένα συγκεκριμένο τμήμα απαιτεί δεδομένο ελάχιστο χρόνο λειτουργίας, ο οποίος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τροχαίου υλικού και της υποδομής και είναι γνωστός εκ των προτέρων, δεδομένου ότι οι κανόνες σιδηροδρομικής κυκλοφορίας επιβάλλουν αυστηρούς περιορισμούς στα προφίλ ταχύτητας των αμαξοστοιχιών. Πολλά δρομολόγια σχεδιάζουν τα τρένα να ταξιδεύουν με μικρότερη από τη μέγιστη ταχύτητα, έτσι ώστε να υπάρχει μια βαθμίδα ελευθερίας σε επικείμενες καθυστερήσεις. Αυτά τα χρονικά αποθέματα προσφέρουν μια ευελιξία

που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους αποστολείς για τη ρύθμιση της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο.

Θεωρούμε ένα χρονοδιάγραμμα που περιγράφει την κίνηση όλων των αμαξοστοιχιών στο δίκτυο κατά τις επόμενες χρονικές περιόδους. Σε κάθε σταθμό, μια αμαξοστοιχία που σταματά δεν επιτρέπεται να αναχωρήσει από μια πλατφόρμα πριν από την προγραμματισμένη ώρα αναχώρησής της και θεωρείται καθυστερημένη εάν φτάσει στην πλατφόρμα αργότερα από την προγραμματισμένη ώρα άφιξής της. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί που οφείλονται στην κυκλοφορία του τροχαίου υλικού και στον προγραμματισμό του προσωπικού.

Τα δρομολόγια έχουν σχεδιαστεί για να ικανοποιούν όλες τις κυκλοφοριακές ρυθμίσεις. Ωστόσο, σε πραγματικό χρόνο, συμβαίνουν απροσδόκητα γεγονότα που καθιστούν τα χρονοδιαγράμματα ανέφικτα. Η διαχείριση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο αντιμετωπίζει αυτές τις ατέλειες προσαρμόζοντας το χρονοδιάγραμμα κάθε αμαξοστοιχίας, όσον αφορά τη δρομολόγηση και το χρονοδιάγραμμα, και επανατοποθετώντας τις αμαξοστοιχίες σε κάθε σημείο συγχώνευσης/διέλευσης. Κύριος στόχος του είναι να ελαχιστοποιήσει τις καθυστερήσεις των αμαξοστοιχιών (δηλαδή, τη διαφορά μεταξύ του χρόνου άφιξης σε κάθε σχετικό σημείο του νέου προγράμματος και εκείνου στο προσχεδιασμένο χρονοδιάγραμμα) ικανοποιώντας παράλληλα τους περιορισμούς του κώδικα οδικής κυκλοφορίας και τη συμβατότητα με τη θέση σε πραγματικό χρόνο κάθε αμαξοστοιχίας. Οι τελευταίες αυτές πληροφορίες επιτρέπουν τον υπολογισμό του χρόνου αποδέσμευσης κάθε αμαξοστοιχίας, ο οποίος είναι ο ελάχιστος χρόνος κατά τον οποίο η αμαξοστοιχία μπορεί να εισέλθει στο δίκτυο ή να φθάσει στο τέλος του τρέχοντος τμήματος της αμαξοστοιχίας. Η συνολική συσσωρευμένη καθυστέρηση αμαξοστοιχίας σε σχετικό σημείο του δικτύου είναι η διαφορά μεταξύ της ώρας άφιξης της αμαξοστοιχίας στο συγκεκριμένο σημείο της λύσης CDR και της ώρας του πίνακα δρομολογίων. Αυτή η καθυστέρηση μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη. Δεδομένης της θέσης μιας αμαξοστοιχίας τη στιγμή t_0 , η αρχική καθυστέρηση (ή κύρια καθυστέρηση) είναι η ελάχιστη καθυστέρηση της αμαξοστοιχίας σε όλα τα εφικτά δρομολόγια και προφίλ ταχύτητας, δηλαδή η καθυστέρηση που δεν μπορεί να ανακτηθεί με επαναπρογραμματισμό των κινήσεων της αμαξοστοιχίας ή με επιτάχυνση των αμαξοστοιχιών. Με άλλα λόγια, η αρχική καθυστέρηση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας

όλα τα διαθέσιμα χρονικά περιθώρια, λαμβάνοντας υπόψη τον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας και όχι τον προγραμματισμένο χρόνο λειτουργίας για κάθε αμαξοστοιχία σε κάθε τμήμα τμήματος. Η διαδοχική καθυστέρηση (ή δευτερεύουσα καθυστέρηση) είναι η διαφορά μεταξύ της συνολικής συσσωρευμένης καθυστέρησης και της αρχικής καθυστέρησης, η οποία προκαλείται από την αλληλεπίδραση με τις άλλες αμαξοστοιχίες κατά τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Θα ήταν μηδέν δίνοντας πάντα προτεραιότητα σε αυτό το τρένο έναντι των άλλων.

3.2 Επαναδομολόγηση : μαθηματική διατύπωση

Η μαθηματική διατύπωση των προαναφερθέντων συναντάται ευρέως στη βιβλιογραφία. Για ένα δεδομένο πρόγραμμα, το οποίο μπορεί να διαταραχθεί ανά πάσα στιγμή κατά τη βιβλιογραφία το πρόβλημα επαναδομολόγησης μοντελοποιείται (Cacchiani et. Al) ως μοντέλο ροής πολλαπλών εμπορευμάτων σε ένα γράφημα όπου οι κόμβοι αντιστοιχούν σε σταθμούς σε συγκεκριμένες ώρες, ενώ τα τόξα αντιστοιχούν σε ταξίδια που πρέπει να εκτελεστούν σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα. Οι Fioole et al. (2006) διαμόρφωσαν το μοντέλο κατανομής τροχαίου υλικού ως μοντέλο ροής πολλαπλών εμπορευμάτων. Αρκετά μοντέλα επαναπρογραμματισμού βασίζονται στο προαναφερθέν μοντέλο. Εάν η αλληλουχία των μονάδων αμαξοστοιχίας σε μια μεγαλύτερη σύνθεση αμαξοστοιχίας είναι σημαντική, τότε συνήθως απαριθμούνται. Μία σύνθεση αμαξοστοιχίας πρέπει να αποδίδεται σε μία διαδρομή στο χρονοδιάγραμμα. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση ορισμένων δαπανών και η μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης των επιβατών. Στη δική μας περίπτωση, επειδή δεν πραγματευόμαστε επιβατικές μεταφορές αλλά μεταφορές εμπορεύματος και φορτίου, θα αντικαταστήσουμε την «εξυπηρέτηση επιβατών» με την εξυπηρέτηση των πελατών. Όπου οι πελάτες είναι οι κόμβοι προορισμού των φορτίων, καθώς το φορτίο οφείλει να παραδοθεί. Πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι περιορισμοί, για παράδειγμα σε σχέση με τις δυνατότητες ελιγμών στους σταθμούς και των διαθέσιμων συρμών στους σταθμούς κατά το τέλος της ημέρας. Σε ορισμένες δημοσιεύσεις, π.χ. Cadarso και Marín (2012), οι κινήσεις ελιγμών δεν είναι επιτρεπτές, προκειμένου να αυξηθεί η ευρωστία του σιδηροδρομικού συστήματος, καθώς οι κινήσεις ελιγμών μπορεί εύκολα να οδηγήσουν σε τεχνικές βλάβες. Άλλες δημοσιεύσεις, π.χ. Nielsen et al. (2012), δεν επιτρέπουν τις αλλαγές στα σχέδια ελιγμών, προκειμένου να διατηρηθούν οι

διαδικασίες ελιγμών σε πραγματικό χρόνο όσο το δυνατόν περισσότερο ίδιες με τις αρχικά προγραμματισμένες.

Μια γενική διατύπωση μοντέλου για τον επαναπρογραμματισμό σιδηροδρομικών μονάδων διαφορετικών τύπων σε ταξίδια σε μία μόνο ημέρα λόγω διαταραχής, όπου η σειρά των σιδηροδρομικών μονάδων σε σύνθεση αμαξοστοιχίας είναι σημαντική, μπορεί να περιγραφεί ως εξής. Έστω ότι το R να είναι το σύνολο των διαδρομών που πρέπει να εκτελεστούν, το M το σύνολο των διαφορετικών τύπων μονάδων τρένων, το C το σύνολο των πιθανών συνθέσεων τρένων, το $\mathfrak{R} \subset R \times R$ είναι το σύνολο των ζευγών διαδοχικών διαδρομών και το S το σύνολο των σταθμών.

Οι ακόλουθες παράμετροι χρησιμοποιούνται στο μοντέλο: πρώτον, η αρχική κατανομή της σύνθεσης c στο ταξίδι r συμβολίζεται με $x_{r,c}^0$. Στη συνέχεια, το $I_{s,m}^0$, είναι ο διαθέσιμος αριθμός τρένων τύπου m στο σταθμό s κατά την αρχή της ημέρας και το $I_{s,m}^\infty$ είναι ο επιθυμητός αριθμός τρένων τύπου m στο σταθμό s μέχρι το τέλος της ημέρας. Επιπλέον, η παράμετρος $a_{s,r,c,m}$ αντιπροσωπεύει την αύξηση ή τη μείωση του αριθμού των αμαξοστοιχιών τύπου m στους σταθμούς που προκαλείται από το ταξίδι r χρησιμοποιώντας τη σύνθεση c . Το $R_{c,r} \subset R$ είναι το σύνολο των ταξιδιών που φτάνουν ή αναχωρούν από το σταθμό s πριν από την αναχώρηση του ταξιδιού r από το σταθμό s .

Η παράμετρος τ υποδηλώνει το χρόνο επαναπρογραμματισμού και το R_τ υποδηλώνει το σύνολο των διαδρομών με ώρα έναρξης νωρίτερα από το τ , δηλαδή το σύνολο των διαδρομών που ξεκίνησαν ήδη κατά τη στιγμή του επαναπρογραμματισμού (και που ενδεχομένως ολοκληρώθηκαν ήδη).

Τα ακόλουθα σύνολα μεταβλητών απόφασης χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Πρώτον, το $x_{r,c}$ δείχνει ότι η σύνθεση $c \in C$ αποδίδεται στο ταξίδι $r \in R$. Στη συνέχεια, το $x_{r,c,c'}$ για το $r \in R$ δείχνει ότι η σύνθεση $c \in C$ αλλάζει σε σύνθεση $c' \in C$ στο σταθμό όπου τελειώνει το $\text{trip } r$. Επιπλέον, $I_{s,m}^\infty$ είναι η πραγματοποιηθείσα απογραφή της μονάδας τρένου τύπου m στο σταθμό s μέχρι το τέλος της ημέρας. Τέλος, $d_{s,m}^+$ και $d_{s,m}^-$ υποδηλώνουν τα εκτός ισολογισμού της μονάδας αμαξοστοιχίας τύπου m στο σταθμό s μέχρι το τέλος της ημέρας.

Στη συνέχεια, το μοντέλο μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$\min f(x, z, d) \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{c \in C} x_{r,c} = 1, \quad r \in R \quad (2)$$

$$x_{r,c} = \sum_{c' \in C} Z_{r,c,c'}, \quad r \in R, c \in C \quad (3)$$

$$x_{r',c'} = \sum_{c \in C} Z_{r,c,c'}, \quad (r, r') \in R, c' \in C \quad (4)$$

$$I_{s,m}^0 + \sum_{r' \in R_{s,r}} \sum_{c \in C} a_{s,r',c,m} x_{r',c} \geq 0, \quad s \in S, r \in R, m \in M \quad (5)$$

$$I_{s,m}^0 + \sum_{r' \in R_{s,r}} \sum_{c \in C} a_{s,r,c,m} x_{r,c} = i_{s,m}^\infty, \quad s \in S, m \in M \quad (6)$$

$$i_{s,m}^\infty = I_{s,m}^\infty + d_{s,m}^+ - d_{s,m}^-, \quad s \in S, m \in M \quad (7)$$

$$x_{r,c} = x_{r,c}^0, \quad r \in R, c \in C \quad (8)$$

$$x_{r,c} \in \{0,1\}, \quad r \in R, c \in C \quad (9)$$

Σημειώνεται ότι το (1)–(9) είναι μια απλοποιημένη έκδοση του μοντέλου προγραμματισμού τροχαίου υλικού που περιγράφεται από τους Nielsen et al. (2012). Σε αυτό το μοντέλο, ο στόχος (1) είναι συνάρτηση των μεταβλητών απόφασης $x_{r,c}$, $Z_{r,c,c'}$ και $d_{s,m}$, η οποία συνήθως μετρά το κόστος που σχετίζεται με τα χιλιόμετρα μεταφοράς, τα χιλιόμετρα έλλειψης θέσεων, τις κινήσεις ελιγμών, καθώς και τις διαφορές μεταξύ της αρχικής και της νέας κατανομής τροχαίου υλικού, την απόκλιση από το υπόλοιπο στο τέλος της ημέρας και την ακύρωση διαδρομών λόγω έλλειψης τροχαίου υλικού.

Οι περιορισμοί (2) διασφαλίζουν ότι αποδίδεται ακριβώς μία σύνθεση σε κάθε ταξίδι. Οι περιορισμοί (3) και (4) χειρίζονται την κατανομή ενδεχομένως διαφορετικών συνθέσεων σε διαδοχικά ταξίδια στο χρονοδιάγραμμα. Επιπλέον, οι περιορισμοί (5) εγγυώνται ότι η απογραφή κάθε τύπου μονάδας αμαξοστοιχίας σε κάθε σταθμό ανά πάσα στιγμή δεν είναι αρνητική. Οι περιορισμοί (6) καθορίζουν την πραγματοποιηθείσα απογραφή κάθε μονάδας αμαξοστοιχίας τύπου m στο σταθμό s . Οι περιορισμοί (7) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των τιμών των μεταβλητών απόφασης εκτός ισολογισμού $d_{s,m}^+$ και $d_{s,m}^-$. Οι περιορισμοί (8) εγγυώνται ότι δεν μεταβάλλονται οι συνθέσεις του τροχαίου υλικού στις διαδρομές που έχουν ήδη ξεκινήσει κατά τον χρόνο του επαναπρογραμματισμού. Τέλος, οι περιορισμοί (9) καθορίζουν τον δυαδικό χαρακτήρα των μεταβλητών εκχώρησης σύνθεσης. Όλες οι άλλες μεταβλητές απόφασης δεν είναι αρνητικές. Οι περιορισμοί (7) και (8) είναι η κύρια διαφορά μεταξύ αυτού του μοντέλου επαναπρογραμματισμού τροχαίου υλικού σε πραγματικό χρόνο και του μοντέλου των Fioole et al. (2006). Ωστόσο, μια άλλη σημαντική πτυχή σε μια κατάσταση επαναπρογραμματισμού σε πραγματικό χρόνο είναι ότι οι ροές επιβατών είναι διαφορετικές από ό,τι είχαν προγραμματιστεί, καθώς σε μια διαταραγμένη κατάσταση οι επιβάτες θα αναζητήσουν δυναμικά διαφορετικές διαδρομές για να φτάσουν στους προορισμούς τους. Αυτή η δυναμική συμπεριφορά των επιβατών περιγράφεται από τους Kroon et al. (υπό έκδοση) και Cadarso et al., 2013.

3.3 Μαθηματική διατύπωση : Consolidation and dispatching

Σε αυτή την ενότητα θα προσεγγίσουμε το πρόβλημα, ως ένα πρόβλημα shipment consolidation and dispatching. Όπου ο αποστολέας πρέπει να επιλέξει τον καλύτερο τρόπο, όσον αφορά το κόστος, να αποστείλει εγκαίρως ένα σετ παραγγελιών στους πελάτες, μέσα σε έναν συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός αυτός θα πρέπει να αφορά :

1. Το καλύτερο μέσο αποστολής για κάθε παραγγελία (στην περίπτωση μας εξετάζουμε τις σιδηροδρομικές μεταφορές, οπότε το μέσο είναι ένα).
2. Πως οι παραγγελίες θα αποσταλούν συνδυαστικά.
3. Τα χαρακτηριστικά των προγραμμάτων των οχημάτων (πχ. Χρόνοι έναρξης, ενδιάμεσες στάσεις, σειρά επίσκεψης).

Κάθε παραγγελία $k \in K$, χαρακτηρίζεται από έναν προορισμό $i_k \in N$, ένα βάρος $w_k \geq 0$, ένα χρόνο αποδέσμευσης r_k (η μέρα κατά την οποία η παραγγελία k είναι έτοιμη προς παράδοση) και μια προθεσμία d_k (η μέρα κατά την οποία μια παραγγελία k πρέπει να παραδοθεί στο i_k). Στην περίπτωση της σιδηροδρομικής μεταφοράς, η διαδρομή $r \in R$ και οι κόμβοι που πρέπει να επισκεφθούν είναι συγκεκριμένα. Όπως επίσης και η μέγιστη χωρητικότητα q_r . Επίσης, οι στάσεις χαρακτηρίζονται ως S_r (και επισκέπτονται με μία δεδομένη σειρά). Συνυπολογίζονται και τα σταθερά κόστη ως f_r . Επίσης, το $\tau_{k,r}$, $r \in R$, $k \in K$, είναι ο αριθμός των ημερών ταξιδιού που χρειάζονται για να γίνει η μεταφορά του της παραγγελίας k σύμφωνα με το δρομολόγιο r . Οι μεταβλητές απόφασης $x_{k,r,t}$, $k \in E$, $r \in R$, $t=1, \dots, T$, είναι διαδικές μεταβλητές και έχουν τιμή 1 εάν η παραγγελία k έχει ανατεθεί στο δρομολόγιο r το οποίο ξεκινάει κατά την ημέρα t ή αλλιώς 0. Η μεταβλητή απόφασης $\tau_{r,t}$, έχει τιμή 1 εάν το δρομολόγιο r πραγματοποιείται την ημέρα t και αλλιώς 0. Η μεταβλητή απόφασης w_k είναι επίσης διαδική και ισούται με 1 σε περίπτωση που η παραγγελία k μεταφέρεται από το στανταρ μεταφορέα, αλλιώς είναι 0. Στη δική μας περίπτωση, λόγω του ότι δεν αλλάζουμε μέσα μεταφοράς για τις πραγματοποιήσεις των δρομολογίων, αλλά πραγματευόμαστε μόνο σιδηροδρομικές μεταφορές, εάν θέλαμε να κάνουμε αυτή τη μοντελοποίηση θα αγνοούσαμε τη συγκεκριμένη μεταβλητή.

$$\min \sum_r \sum_{t=1}^T f_r y_{r,t} + \sum_{k \in K} g_k w_k \quad (10)$$

$$\text{subject to } \sum_{i: k \in S_r} \sum_{t: r_k \leq t \leq d_k - \tau_{kr}} x_{k,r,t} + w_k = 1, \quad k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{k: r_k \leq t \leq d_k - \tau_{kr}} w_k x_{k,r,t} \leq q_r y_{r,t}, \quad r \in R, t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$x_{k,r,t} \in \{0,1\}, \quad r \in R, k \in K, t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$y_{r,t} \in \{0,1\}, \quad r \in R, t = 1, \dots, T \quad (14)$$

$$w_k \in \{0,1\}, \quad k \in K \quad (15)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση, (10) είναι το συνολικό κόστος το οποίο χρειάζεται να πληρωθεί για να μετακινηθούν οι παραγγελίες. Οι περιορισμοί (11) αναφέρουν ότι για κάθε δρομολόγιο r και κάθε ημέρα t , το συνολικό βάρος που πρέπει να επιβαρύνει τη διαδρομή r δεν πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητα q_r εάν το $y_{r,t}$ είναι ίσο με 1 και αλλιώς είναι ίσο με το 0. Οι περιορισμοί (12) επιβάλουν ότι κάθε παραγγελία αντιστοιχεί σε ένα δρομολόγιο το οποίο εκτελείται από κάποιο συγκεκριμένο μέσο.

4.0 Επίλυση

Για να μπορούμε να βρίσκουμε τις εναλλακτικές διαδρομές, τόσο προσχεδιασμένα, αλλά και σε πραγματικό χρόνο, υλοποιήσαμε αλγόριθμο συντομότερης διαδρομής (shortest path) του Dijkstra καθώς και μια παραλλαγή αυτού, το k-shortest path, που αποκαλύπτει και τα δεύτερα, τρίτα ... κ shortest paths

4.1 Αλγόριθμος Dijkstra

Ο αλγόριθμος του Dijkstra, είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία. Θα αναλυθεί στην συνέχεια, καθώς και θα υλοποιηθεί για να πάρουμε ως λύση πιθανά σενάρια διαδρομών σε περιπτώσεις κρίσης. Επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε αυτόν τον αλγόριθμο λόγω της πολυπλοκότητάς του και λόγω του ότι με μια απλή παραλλαγή αυτού μπορούμε να πάρουμε και δεύτερο καλύτερο δρομολόγιο και τρίτο κ.ο.κ. .

Πρόκειται για έναν αλγόριθμο εύρεσης συντομότερων διαδρομών από κοινή αφετηρία σε έναν (κατευθυνόμενο ή μη) γράφο με μη αρνητικά βάρη στις ακμές. Ο αλγόριθμος αυτός σε κάθε βήμα επιλέγει την τοπικά βέλτιστη λύση, ώσπου στο τελευταίο βήμα συνθέτει μια συνολικά βέλτιστη λύση.

Πιο αναλυτικά, έστω ότι έχουμε έναν γράφημα $G(V,E)$, όπου V το σύνολο των κόμβων του και E το σύνολο των ακμών του. Επίσης, έχουμε μια συνάρτηση βάρους $w: E \rightarrow R^+ \cup \{0\}$ ορισμένη στις ακμές του γράφου. Αυτό σημαίνει ότι για να πάμε από έναν κόμβο του γράφου σε έναν άλλο, θα έχουμε κάποιο κόστος. Είναι σημαντικό, όπως θα φανεί παρακάτω, τα βάρη να μην είναι αρνητικά, διαφορετικά ο αλγόριθμος δεν δίνει σωστό αποτέλεσμα. Ο αλγόριθμος του Dijkstra βρίσκει τα μονοπάτια που πρέπει να ακολουθήσουμε από έναν κόμβο-αφετηρία προς τους υπόλοιπους, ώστε να έχουμε το λιγότερο δυνατό κόστος.

Η υλοποίηση βασίστηκε στον παρακάτω ψευδοκώδικα. Ο παρακάτω ψευδοκώδικας έχει τρεις παραμέτρους:

1. Ένα γράφο $G=(V,E)$ του οποίου το σύνολο κόμβων είναι το V και το σύνολο ακμών το E .
2. Μια δομή δεδομένων, w , που αναπαριστά τα βάρη των ακμών του γράφου.
3. Ο αρχικός κόμβος, s .

Στον παρακάτω αλγόριθμο διατηρείται ένα σύνολο S . Είναι το σύνολο των κόμβων για τους οποίους το συντομότερο μονοπάτι από την αφετηρία έχει υπολογιστεί. Πρόκειται ουσιαστικά για τους κόμβους που έχουν μαρκαριστεί ως *επεξεργασμένοι*. Με $d[u]$ συμβολίζεται ένα άνω όριο για το βάρος της συντομότερης διαδρομής από τον αρχικό κόμβο s στον u . Στις περιγραφές που δώσαμε παραπάνω, το $d[u]$ αντιστοιχούσε στην *ετικέτα απόστασης*. Για την *ετικέτα προηγούμενου κόμβου* ενός κόμβου v , χρησιμοποιείται ο συμβολισμός $prev[v]$. Επίσης, ο αλγόριθμος διατηρεί μια ουρά προτεραιότητας, Q , που περιέχει τους κόμβους του συνόλου $V \setminus S$ ($V-S$) με κλειδί τις τιμές d (τις ετικέτες απόστασης) του κάθε κόμβου.

```
Ντάικστρα( $G, w, s$ )
Για κάθε κόμβο  $v$  {
     $d[v] = \infty$ 
     $prev[v] = \text{κενό}$ 
}
 $d[s] = 0$ 
 $Q = V$ 

Όσο {
     $u = \text{extract\_min}(Q)$ 

    Για κάθε κόμβο  $v$ , γείτονα του κόμβου  $u$ , που δεν ανήκει στο  $S$  {
        Αν  $d[v] > d[u] + w[u, v]$  τότε
             $d[v] = d[u] + w[u, v]$ 
             $prev[v] = u$ 
    }
}
```


Η εντολή `extract_min` είναι πράξη της ουράς προτεραιότητας Q . Όλες οι ουρές προτεραιότητας έχουν μια πράξη για την εξαγωγή του μικρότερου στοιχείου (`extract_min`). Το $w[u,v]$ είναι το βάρος της ακμής που συνδέει τους κόμβους u και v . Ο παρακάτω ψευδοκώδικας χρησιμοποιείται για την εύρεση των κόμβων της συντομότερης διαδρομής, αφού έχει εφαρμοστεί ο παραπάνω ψευδοκώδικας και έχουν καθοριστεί οι αποστάσεις d και οι προηγούμενοι κόμβοι `prev`. Κατά την αρχικοποίηση της παρακάτω διαδικασίας, στις πρώτες δύο γραμμές, ο κόμβος u είναι ο κόμβος-προορισμός. Έπειτα, ακολουθώντας τις ενδείξεις `prev`, παίρνουμε τη ζητούμενη διαδρομή ανάποδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι $O((|V| + |E|)\log |V|)$.

```

A = κενή ακολουθία
Βάλε δείκτη στον κόμβο u
Όσο το prev[u] είναι διάφορο του κενού {
    Βάλε το u στην αρχή της A
    u=prev[u]
}

```

4.2 Αλγόριθμος k-shortest path

Ο αλγόριθμος του Yen υπολογίζει τις πιο σύντομες διαδρομές χωρίς βρόχο ενός πηγαίου κώδικα για ένα γράφημα με μη αρνητικό κόστος ακμής. Ο αλγόριθμος δημοσιεύθηκε από τον Jin Y. Yen το 1971 και χρησιμοποιεί οποιονδήποτε αλγόριθμο συντομότερης διαδρομής για να βρει την καλύτερη διαδρομή, στη συνέχεια προχωρά για να βρει $K - 1$ αποκλίσεις της καλύτερης διαδρομής

Ο αλγόριθμος υποθέτει ότι ο αλγόριθμος Dijkstra χρησιμοποιείται για να βρει τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων, αλλά οποιονδήποτε αλγόριθμο συντομότερης διαδρομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση του.

Ο ψευδοκώδικας έχει ως εξής L :

```
function YenKSP(Graph, source, sink, K):
    // Determine the shortest path from the source to the sink.
    A[0] = Dijkstra(Graph, source, sink);
    // Initialize the set to store the potential kth shortest
    path.
    B = [];

    for k from 1 to K:
        // The spur node ranges from the first node to the next
        to last node in the previous k-shortest path.
        for i from 0 to size(A[k - 1]) - 2:

            // Spur node is retrieved from the previous k-
            shortest path, k - 1.
            spurNode = A[k-1].node(i);
            // The sequence of nodes from the source to the spur
            node of the previous k-shortest path.
            rootPath = A[k-1].nodes(0, i);

            for each path p in A:
                if rootPath == p.nodes(0, i):
                    // Remove the links that are part of the
                    previous shortest paths which share the same root path.
                    remove p.edge(i, i + 1) from Graph;

            for each node rootPathNode in rootPath except
            spurNode:
                remove rootPathNode from Graph;

            // Calculate the spur path from the spur node to the
            sink.
            // Consider also checking if any spurPath found
```

```

        spurPath = Dijkstra(Graph, spurNode, sink);

        // Entire path is made up of the root path and spur
path.
        totalPath = rootPath + spurPath;
        // Add the potential k-shortest path to the heap.
        if (totalPath not in B):
            B.append(totalPath);

        // Add back the edges and nodes that were removed
from the graph.
        restore edges to Graph;
        restore nodes in rootPath to Graph;

        if B is empty:
            // This handles the case of there being no spur
paths, or no spur paths left.
            // This could happen if the spur paths have already
been exhausted (added to A),
            // or there are no spur paths at all - such as when
both the source and sink vertices
            // lie along a "dead end".
            break;
        // Sort the potential k-shortest paths by cost.
        B.sort();
        // Add the lowest cost path becomes the k-shortest path.
        A[k] = B[0];
        // In fact we should rather use shift since we are
removing the first element
        B.pop();

    return A;

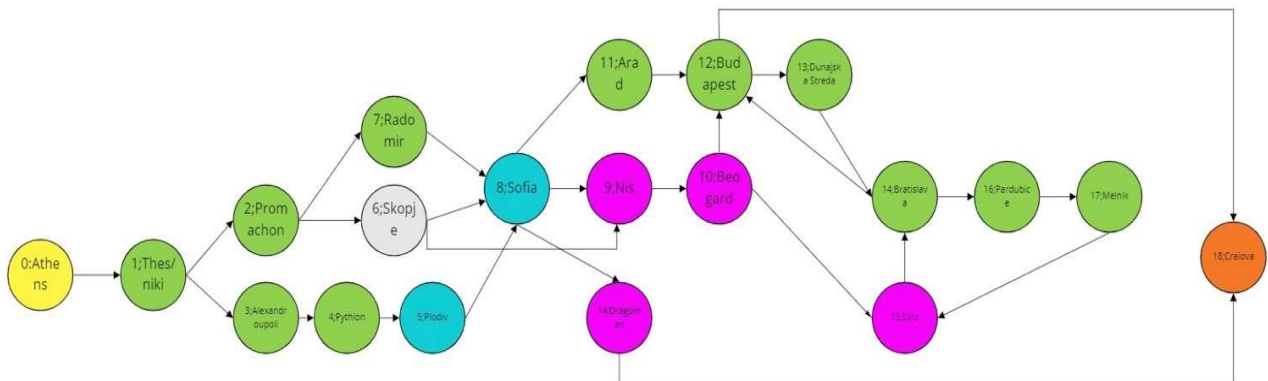
```

4.3 Υλοποίηση σε Python

Για την υλοποίηση χρησιμοποιήσαμε Python 3 και εξετάσαμε τέσσερα διαφορετικά σενάρια. Αυτά τα σενάρια, αφορούν το συγκεκριμένο δρομολόγιο το οποίο αναλύεται στο κεφάλαιο τρία και έχει ως αφετηρία τον Πειραιά, Ελλάδα, και ως τερματικό σταθμό την Κραϊόβα της Ρουμανίας. Σε αυτά τα σενάρια, βρήκαμε με εφαρμογή Dijkstra το καλύτερο δυνατό δρομολόγιο και εν συνεχεία τα k καλύτερα δρομολόγια, εφόσον αυτά υπήρχαν. Εν συνεχεία, «κόψαμε» την πρόσβαση από κομβικά σύνορα και βρήκαμε με εφαρμογή Dijkstra το εφικτό καλύτερο δρομολόγιο (με στόχο τα λιγότερα χιλιόμετρα) και τα δεύτερα, τρίτα κ.ο.κ. καλύτερα δρομολόγια έτσι ώστε να παρουσιαστεί ένα ολοκληρωμένο σετ πιθανών επιλογών. Τα σενάρια είναι τα εξής :

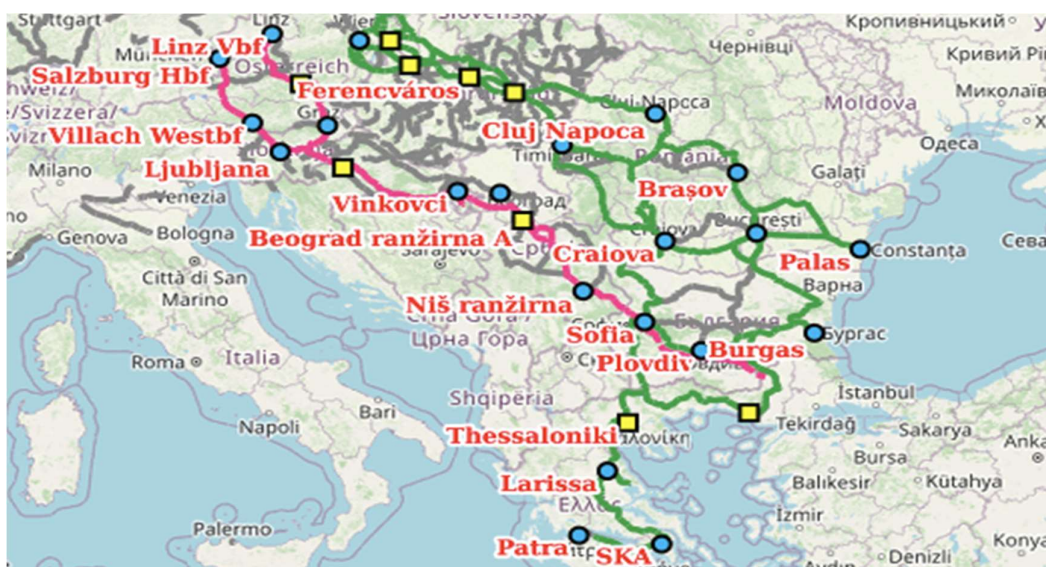
1. Όταν επιτρέπεται η πρόσβαση από όλους τους κόμβους.
2. Όταν κόβεται η πρόσβαση στη Βουλγαρία.
3. Όταν κόβεται η πρόσβαση στη Σερβία.
4. Όταν κόβεται η πρόσβαση στην Ουγγαρία.

Τα σενάρια υλοποιήθηκαν με κώδικα που βασίστηκε στον ψευδοκώδικα των παραπάνω αλγορίθμων (Dijkstra, k-shortest path ή Yen's algorithm) και το graph που χρησιμοποιήθηκε εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 30 Γράφημα ανάθεσης στάσεων διαδρομής σε RFC υπό την μορφή κόμβων και ακμών.

Με πράσινο χρώμα εμφανίζονται οι κόμβοι που ανήκουν στον διάδρομο RFC7: Orient/ East-Med , με ροζ οι κόμβοι που ανήκουν στον RFC 11: Alpine Western Balkan, με μπλε κόμβοι που ανήκουν και στους δύο προαναφερθέντες και με γκρι, κόμβοι που ανήκουν σε δίκτυα τα οποία να μην είναι διαθέσιμα για διαδρομές αλλά δεν ανήκουν σε κάποιον διάδρομο. Με κίτρινο έχουμε χρωματίσει την αφετηρία (κόμβος 0, Αθήνα και με πορτοκαλί τον τελικό προορισμό (κόμβος 18, Κραϊόβα). Οι κόμβοι φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα. Εστιάζουμε στους συγκεκριμένους κόμβους γιατί αυτοί οι κόμβοι συμπεριλαμβάνονται στο δρομολόγιο ενδιαφέροντος.



Εικόνα 31 Διάδρομοι και κόμβοι

Περισσότερες λεπτομέρειες για τους κόμβους πήραμε από τον παραπάνω χάρτη και μετά από καταγραφή και καθάρισμα των δεδομένων, συνοπτικά, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Κόμβος	Πόλη	Χώρα	Πλάτος	Μήκος	Μέγιστη ταχύτητα Km/h
0	Athens, Ikonio	Greece	37,96286	23,59043	81 - 100
1	Thessaloniki	Greece	40,64123	22,9208	101 - 120
2	Promachon	Greece	41,38038	23,36571	≤ 60
3	Alexandroupoli	Greece	40,85718	25,88887	81 - 100
4	Pythion	Greece	41,36849	26,62183	81 - 100
5	Plodiv	Bulgaria	42,13359	24,73663	≤ 60
6	Skopje	North Macedonia	42,00372	21,45185	na
7	Radomir	Bulgaria	42,54161	22,95549	≤ 60

8	Sofia	Bulgaria	42,7125	23,32046	≤ 60
9	Nis	Serbia	43,34093	21,82738	≤ 60
10	Beograd	Serbia	44,72545	20,35692	≤ 60
11	Arad	Romania	46,18376	21,28748	101 - 120
12	Budapest	Hungary	47,48069	19,07566	61 - 80
13	Dunajska Streda	Slovakia	47,99224	17,61174	61 - 80
14	Bratislava	Slovakia	48,13784	17,17982	≤ 60
15	Linz	Austria	48,26013	14,32586	≤ 60
16	Pardubice	Czech Republic	50,02846	15,74519	81 - 100
17	Melnik	Czech Republic	50,36124	14,49149	101 - 120
18	Craiova	Romania	44,33517	23,81514	61 - 80

Πίνακας 7: Λεπτομέρειες κόμβων.

Οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και είναι οι χιλιομετρικές αποστάσεις οι οποίες εκτελούνται με αυτοκίνητο από το google maps. Συγκρίνοντας τους χάρτες (εικόνα 31 και χάρτη διαδρομών από google maps) παρατηρούμε ότι οι διαδρομές που ακολουθεί το αυτοκίνητο με τις διαδρομές των τρένων, είναι αρκετά κοντά. Επειδή τα δεδομένα σιδηροδρομικών χιλιομετρικών αποστάσεων δεν ήταν διαθέσιμα σε εμάς, κάναμε αυτή την παραδοχή, χωρίς βλάβη της γενικότητας.

Νούμερο Κόμβου	Από	Προς	Απόσταση (km)
1	0	1	509
2	1	2	115
3	1	3	305
4	3	4	112
5	4	5	222
6	2	6	202
7	2	7	153
8	7	8	50
9	6	8	243
10	6	9	200
11	5	8	146
12	8	11	578
13	8	9	169
14	8	14	963
15	11	12	259
16	9	10	250
17	10	12	371
18	14	18	900
19	12	18	675

20	14	12	200
21	13	14	42
22	14	16	281
23	16	17	117
24	17	15	290
25	15	14	263
26	10	15	800
27	13	12	1

Πίνακας 8: Πίνακας αποστάσεων

Επίσης, αρκετά σημαντική ένδειξη είναι ο αριθμός των συρμών που επιτρέπονται ανά κομμάτι της διαδρομής, όπως και το βάρος. Για τον διάδρομο RFC7, τα δεδομένα αυτά παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Τμήμα διαδρομής	Αριθμός συρμών	Βάρος
Bremerhaven - Bremen	2	1: 3140t 2: 3210t (E-Tfz – DB 185)
Bremerhaven - Bremen	1	1: 2560t 2: 2100t (V-Tfz DB - 232/ 233)
Bremerhaven - Bremen	1	1: 2410t 2: 2100t (V-Tfz DB - 232/ 233)
Maschen - Hamburg	2	1: 2815t 2: 3045t (E-Tfz – DB 185)
Maschen - Hamburg	1	1: 2450t 2: 2765t (V-Tfz – DB 232/ 233)
Maschen - Hamburg	1	1: 2110t 2: 2545t (V-Tfz DB – 232/ 233)
Braunschweig - Magdeburg	2	1: 2505t 2: 2725t (E-Tfz – DB 185)
Braunschweig - Magdeburg	1	1: 3080t 2: 2635t (E-Tfz DB 185)
Braunschweig - Magdeburg	2	1: 2955t 2: 2025t (E-Tfz – DB 185)
Braunschweig - Magdeburg	2	1: 1705t 2: 1700t (E-Tfz – DB 185)
Braunschweig - Magdeburg	1	1: 2500t 2: 2090t (V-Tfz – DB 232/233)
Braunschweig - Magdeburg	2	1: 1570t 2: 1530t (E-Tfz – DB 185)
Braunschweig - Magdeburg	1	1: 2765t 2: 2450t (E-Tfz – DB 185)
Dresden - Děčín	2	1: 3245t 2: 3720t (E-Tfz – DB 185)

Dresden - Děčín	1	1: 595t 2: 915t (V-Tfz – DB232/233)
Dresden - Děčín	1	1: 595t 2: 915t (V-Tfz – DB232/233)
Dresden - Děčín	1	1: 595t 2: 915t (V-Tfz – DB232/233)
Dresden - Děčín	1	1: 2385t 2: 1795t (E-Tfz – DB 185)
Dresden - Děčín		
	1	-
Praha - Kolín	2	-
Kolín - Česká Třebová - Brno	2	-
Brno - Břeclav	1	-
	2	-
Kolín - Kutná Hora - Brno	2	-
Děčín - Lovosice	2	-
Lovosice - Praha	2	-
Děčín - Mělník	2	-
Mělník - Nymburk	2	-
Nymburk - Kolín	1	-
Břeclav - Wien	1	850 t one loco 2016
	1	-
	1	1150t one loco 1216
Wien Zvbf - Hegyeshalom	1	1450t one loco (1216)
	1	1450 t one loco (1216)
	1	1650 t one loco (1216)
Gänserndorf - Devínska Nová V	1	850 t one loco (2016)
Parndorf - Bratislava	1	850 t one loco (2016)
Wien Zvbf. - Ebenfurth	1	1450t one loco (1216)
Wiener Neustadt - Ebenfurth - Sopron	1	1200 t one loco (1216)
Lanzhot - Kúty	1	2200
Kúty - Bratislava	1/2	1100
Bratislava - Nové Zámky	1	2/1
Nové Zámky - Szob	1	1600
Nové Zámky - Komárom	2/1	2/1
Bratislava - Rajka	2/1	1

Bratislava - Komárno	2/1	1600
Kúty - Galanta	2	1600
Trnava - Bratislava	1/2	1600
Wien - Hegyeshalom - Ferencváros	1	1600
Bratislava - Rajka - Hegyeshalom	1	1600
Hegyeshalom - Győr - Ferencváros	1	1600
Nove Zamky - Komárom - Ferencváros	2	1600
Nove Zamky - Sturovo - Ferencváros	1	1600
Ferencváros - Cegléd - Szolnok	2	2000
Szolnok-Szajol - Lőkösháza -Curtici	1	2000
Ebenfurth - Sopron Rendező	1	1600
Sopron - Csorna	1	1600
Csorna - Győr	1	1600
Püspökladány - Episcopia Bihor	1	1600
Arad - Timisoara	1	900
Timisoara - Craiova		
Craiova - Vidin		
Arad - Simeria		
Simeria - Brasov	1	1350
Brasov - Bucuresti		
Bucuresti - Constanta	2	2700
Biharkeresztes oh - Coslariu		
Craiova - Bucuresti	1, partially 2	1000/2000
Videle - Ruse		
Bucuresti - Giurgiu		
Simeria - Filiasi	1	2100
Vidin Tovarna - Sofia	1	1600
Sofia - Kulata		
Sofia - Simeonovgrad	1	1600
Simeonovgrad - Svilengrad		
Ruse - Karnobat	1	1300
Karnobat - Simeonovgrad	1	1600
Nova Zagora - Stara Zagora	1	1600
Stara Zagora - Dimitrovgrad	1	1600
Plovdiv - Mihailovo	1	1600
Karnobat - Burgas		
Kulata - Strymonas	1	1250
Strymonas - Thessaloniki	1	1250
Strymonas - Serres	1	950
Serres - Alexandroupolis	1	950
Thessaloniki - Larisa	2	1250
Larisa - SKA	2,1	1250
SKA - Athens	2	1250
Athens - Piraeus	2	1250

SKA - Mavri Ora	2	1250
Mavri Ora - Triassio	2	1250
Mavri Ora - Ikonio	1	1250
Triassio - Patra	2	1250
Svilengrad - Alexandroupolis	1	1250
Larisa - Volos	1	1250
Kulata - Thessaloniki		
Thessaloniki - Athens		
SKA-Kiato		
Triassio-Ikonio		

Πίνακας 9: Αριθμός βαγονιών και βάρος

4.4 Αποτελέσματα σεναρίων

Για την υλοποίηση θα χρησιμοποιήσουμε τα τέσσερα σενάρια που περιεγράφηκαν στοχεύοντας στην απόκτηση της συντομότερης διαδρομής καθώς και των εναλλακτικών αυτής εφόσον υπάρχουν.

1. Όταν επιτρέπεται η πρόσβαση από όλους τους κόμβους. Τότε το αποτέλεσμα που προκύπτει από την εκτέλεση των αλγορίθμων είναι :

shortest path:
[0, 1, 2, 7, 8, 9, 10, 12, 18]
shortest distances:
{2690, 2339, 2759, 2322, 2292}

1st shortest distance: 2292 → [0, 1, 2, 7, 8, 9, 10, 12, 18]
2nd shortest distance: 2322 → [0, 1, 2, 6, 9, 10, 12, 18]
3rd shortest distance: 2339 → [0, 1, 2, 7, 8, 11, 12, 18]
4th shortest distance: 2759 → [0, 1, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 18]
5th shortest distance: 2690 → [0, 1, 2, 7, 8, 14, 18]

Από τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα βλέπουμε ότι η συντομότερη διαδρομή είναι 2292 χιλιόμετρα και οι κόμβοι που ακολουθούνται είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Ραντομίρ, Σόφια, Νις, Βελιγράδι, Βουδαπέστη, Κραϊόβα. Το δεύτερο συντομότερο δρομολόγιο είναι 2322 χιλιόμετρα, το τρίτο 2339 χιλιόμετρα, το τέταρτο 2759 και το πέμπτο 2690.

- Αναλυτικά το δεύτερο καλύτερο δρομολόγιο είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Σκόπια, Νις, Βελιγράδι, Βουδαπέστη, Κραϊόβα.
- Αναλυτικά το τρίτο καλύτερο δρομολόγιο είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Ραντομίρ, Σόφια, Αράντ, Βουδαπέστη, Κραϊόβα
- Αναλυτικά το τέταρτο καλύτερο δρομολόγιο είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Αλεξανδρούπολη, Πυθίον, Πλόντιβ, Σόφια, Νις, Βελιγράδι, Βουδαπέστη, Κραϊόβα

- Αναλυτικά το πέμπτο καλύτερο δρομολόγιο είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Ραντομίρ, Σόφια, Ντραγκομάν, Κραϊόβα

2. Όταν κόβεται η πρόσβαση στη Βουλγαρία. Τότε το αποτέλεσμα που προκύπτει από την εκτέλεση των αλγορίθμων είναι :

```
shortest path:
[0, 1, 2, 6, 9, 10, 12, 18]
shortest distances:
{3201, 2322, 2734}
1st shortest distance: 2322 → [0, 1, 2, 6, 9, 10, 12, 18]
2nd shortest distance: 2734 → [0, 1, 2, 6, 9, 10, 12, 13, 14, 18]
3rd shortest distance: 3201 → [0, 1, 2, 6, 9, 10, 15, 14, 13, 12, 18]
```

Από τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα βλέπουμε ότι η συντομότερη διαδρομή είναι 2322 χιλιόμετρα και οι κόμβοι που ακολουθούνται είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Σκόπια, Νις, Βελιγράδι, Βουδαπέστη, Κραϊόβα. Το δεύτερο συντομότερο δρομολόγιο είναι 2734 χιλιόμετρα, το τρίτο 3201.

- Αναλυτικά το δεύτερο καλύτερο δρομολόγιο είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Σκόπια, Νις, Βελιγράδι, Βουδαπέστη, Ντουνάσκα Στρέντα, Μπρατισλάβα, Κραϊόβα.
- Αναλυτικά το τρίτο καλύτερο δρομολόγιο είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Σκόπια, Νις, Βελιγράδι, Λίνζ, Μπρατισλάβα, Ντουνάσκα Στρέντα, Βουδαπέστη, Κραϊόβα.

3. Όταν κόβεται η πρόσβαση στη Σερβία. Τότε το αποτέλεσμα που προκύπτει από την εκτέλεση των αλγορίθμων είναι :

```
shortest path:
[0, 1, 2, 7, 8, 11, 12, 18]
shortest distances:
{2690, 2339, 2581, 2806}
1st shortest distance: 2339 → [0, 1, 2, 7, 8, 11, 12, 18]
2nd shortest distance: 2581 → [0, 1, 2, 6, 8, 11, 12, 18]
3rd shortest distance: 2690 → [0, 1, 2, 7, 8, 14, 18]
4th shortest distance: 2806 → [0, 1, 3, 4, 5, 8, 11, 12, 18]
```

Από τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα βλέπουμε ότι η συντομότερη διαδρομή είναι 2339 χιλιόμετρα και οι κόμβοι που ακολουθούνται είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Ραντομίρ, Σόφια, Αράντ, Βουδαπέστη, Κραϊόβα. Το

δεύτερο συντομότερο δρομολόγιο είναι 2581 χιλιόμετρα, το τρίτο 2690 και το τέταρτο 2806.

- Αναλυτικά το δεύτερο καλύτερο δρομολόγιο είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Σκόπια, Σόφια, Αράντ, Βουδαπέστη, Κραϊόβα.
- Αναλυτικά το τρίτο καλύτερο δρομολόγιο είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Ραντομίρ, Σόφια, Ντραγκομάν, Κραϊόβα.
- Αναλυτικά το τέταρτο καλύτερο δρομολόγιο είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Αλεξανδρούπολη, , Πυθιον, Πλόντιβ, Σόφια, Αράντ, Βουδαπέστη, Κραϊόβα.

4. Όταν κόβεται η πρόσβαση στην Ουγγαρία. Τότε το αποτέλεσμα που προκύπτει από την εκτέλεση των αλγορίθμων είναι :

```
shortest path:
[0, 1, 2, 7, 8, 14, 18]
shortest distances:
{2690}
Shortest distance: 2690
2nd shortest distance: no second shortest path
```

Από τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα βλέπουμε ότι η συντομότερη διαδρομή είναι 2690 χιλιόμετρα και οι κόμβοι που ακολουθούνται είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Ραντομίρ, Σόφια, Ντραγκομάν, Κραϊόβα. Το δεύτερο συντομότερο δρομολόγιο γι' αυτή τη διαδρομή δεν είναι εφικτό.

Από τα αποτελέσματα βλέπουμε γενικά ότι η Βουλγαρία είναι ένας αρκετά σημαντικός κόμβος καθώς η έλλειψη αυτής δίνει τις λιγότερες εναλλακτικές και ένας λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί τα Σόφια αποτελούν σταυροδρόμι μεταξύ των δύο corridors RFC7 και Alpine Western Balkan.

5. Συμπέρασμα

Συμπερασματικά, αφού κάναμε μια εκτενή μελέτη ανά τη βιβλιογραφία, καταλήξαμε ότι για την περίπτωση που μελετάμε, μπορούμε να εκτελέσουμε τον αλγόριθμο Dijkstra και τον αλγόριθμο Yen's για να βρούμε το καλύτερο δρομολόγιο μεταξύ των κόμβων. Εκτός από του καλούς υπολογιστικούς χρόνους, το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί τόσο και ως ένα σχέδιο που έχει δημιουργηθεί μήνες εκ των προτέρων αλλά και σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Για παράδειγμα, όταν ένας κόμβος αφαιρείται, άμεσα με την εκτέλεση του αλγορίθμου μπορεί να αποκαλυφθεί η καλύτερη λύση γι' αυτή την περίπτωση. Επίσης, είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν οι οποιοιδήποτε κόμβοι αφορούν το εκάστοτε δρομολόγιο, πέρα αυτών των οποίων αποτελούν την επιλογή μας στην τρέχουσα υπόθεση.

Επομένως, ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε διακοπή πρόσβασης σε σύνορο κάποιας χώρας. Αυτός ο αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μόνος του, για την εκπόνηση προδιαγεγραμμένων σχεδίων με την εξάντληση όλων των πιθανών περιπτώσεων. Αυτά τα σχέδια μπορούν να δημιουργηθούν κατά τη περίοδο του στρατηγικού προγραμματισμού, δηλαδή έως και πάνω από ένα χρόνο νωρίτερα από τη χρονική στιγμή αφετηρίας του εγχειρήματος. Καθώς επίσης και κατά το επίπεδο του τακτικού σχεδιασμού, δηλαδή δύο έως δώδεκα μήνες πρωτύτερα. Με αυτό τον τρόπο, εστιάζουμε στην ενίσχυση της στιβαρότητας και του πλεονασμού του συστήματος, καθώς έχουμε τον χρόνο να καταστρώσουμε ικανά σχέδια έτσι ώστε ο σκοπός να πραγματοποιηθεί ακόμα και αν υπάρξουν διάφορες διαταραχές.

Εν συνεχεία, κάνοντας zoom in στο σύστημα και στον βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό (2 μήνες έως 3 ημέρες) καθώς και στον καθημερινό σχεδιασμό και στον real time σχεδιασμό, μπορούμε εισάγοντας τα επιθυμητά δεδομένα (κόμβοι, αποστάσεις) και «κόβοντας» τους κόμβους που υπάρχουν διαταραχές, να εκτελέσουμε το πρόγραμμα η λύση του οποίου είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα. Έτσι προσθέτουμε στο σύστημα ταχύτητα και προσαρμοστικότητα, διότι πολύ γρήγορα και με γνωστά δεδομένα, μπορούμε να βρούμε τα επιθυμητά δρομολόγια. Εν συνεχεία, καταγράφοντας τα αποτελέσματα και εμπλουτίζοντας τον στρατηγικό σχεδιασμό με αυτά, έχουμε ένα σετ πιθανών λύσεων που μπορούν να αντιμετωπίσουν μια κρίση.

Έχοντας τα προαναφερθέντα ως αναφορά, ας κλείσουμε αυτή τη μελέτη με ένα παράδειγμα. Για το δρομολόγιο που μελετάμε, έστω ότι λόγω διαταραχών, κόβεται η πρόσβαση στα σύνορα της Βουλγαρίας.

Τότε σύμφωνα με τον αλγόριθμό μας και τον στρατηγικό σχεδιασμό μας, το δρομολόγιο που πρέπει να ακολουθήσουμε είναι :

- i. Ελλάδα (Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας)→ Σκόπια → Σερβία (Νις, Βελιγράδι)→ Ουγγαρία(Βουδαπέστη)→ Σλοβακία → Τσεχία → Αυστρία → Βουλγαρία → Ρουμανία(Κραϊόβα)

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο Dijkstra και k-shortest paths, μετά την υλοποίηση αυτών στην Python είναι :

- ii. Από τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα βλέπουμε ότι η συντομότερη διαδρομή είναι 2322 χιλιόμετρα και οι κόμβοι που ακολουθούνται είναι : Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Προμαχώνας, Σκόπια, Νις, Βελιγράδι, Βουδαπέστη, Κραϊόβα. Το δεύτερο συντομότερο δρομολόγιο είναι 2734 χιλιόμετρα και το τρίτο 3201.

APENDIX

```
import sys

class ShortestPathAnd2ndShortestDijkstras:
    NO_PARENT = -1

    path = []; #nodes in the shortest path
    allDists = set(); #list of shortest distance
    #use Dijkstra's Shortest Path Algorithm,  $O(n^2)$  Space  $O(n)$ 

    def shortestPath(self, adjacencyMatrix, src, dest) :
        n = len(adjacencyMatrix[0])
        shortest = {}
        visited = {}
        parents = {}
        for v in range(0, n, 1) :
            shortest[v] = sys.maxsize;
            visited[v] = False
        shortest[src] = 0;
        parents[src] = self.NO_PARENT;
        for i in range(1, n, 1) :
            pre = -1;
            min = sys.maxsize;
            for v in range(0, n, 1) :
                if visited[v]==False and shortest[v] < min :
                    pre = v;
                    min = shortest[v];
            if pre == -1:
                return
            visited[pre] = True;
            for v in range(0, n, 1) :
                dist = adjacencyMatrix[pre][v];
                if dist > 0 and ((min + dist) < shortest[v]) :
                    parents[v] = pre
                    shortest[v] = min + dist
        self.allDists.add(shortest[dest])
```

```

self.addPath(dest, parents);

#utility func to add nodes in the path recursively
def addPath(self, i, parents) :
    if (i == self.NO_PARENT) :
        return
    self.addPath(parents[i], parents)
    self.path.append(i)
#get 2nd shortest by removing each edge in shortest and compare
def find2ndShortest(self, adjacencyMatrix, src, dest) :
    #store previous vertex's data
    preV = -1
    preS = -1
    preD = -1
    mylist = list(self.path)
    for i in range(0, len(mylist)-1, 1) :
        #get source and destination for each path in shortest path
        s = mylist[i]
        d = mylist[i + 1]
        #resume the previous path
        if (preV != -1) :
            adjacencyMatrix[preS][preD] = preV
            adjacencyMatrix[preD][preS] = preV
        #record the previous data for recovery
        preV = adjacencyMatrix[s][d]
        preS = s
        preD = d
        #remove this path
        adjacencyMatrix[s][d] = 0
        adjacencyMatrix[d][s] = 0
        #re-calculate
        self.shortestPath(adjacencyMatrix, src, dest)

```



```

adjacencyMatrix = [[0,509,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[509,0,115,305,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,115,0,0,0,0,202,153,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,305,0,0,112,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,112,0,222,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,222,0,0,0,146,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,202,0,0,0,0,0,243,200,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,153,0,0,0,0,0,50,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,146,243,50,0,169,0,578,0,0,963,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,200,0,168,0,250,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,250,0,0,371,0,0,800,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,578,0,0,0,259,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,371,259,0,145,200,0,0,0,675],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,145,0,42,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,200,42,0,0,281,0,900],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,800,0,0,0,263,0,0,290,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,281,0,0,117,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,290,117,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,675,0,900,0,0,0],
]

src = 0
dest = 18
myobj = ShortestPathAnd2ndShortestDijkstras()
myobj.shortestPath(adjacencyMatrix, src, dest);
print("shortest path: ")
print(myobj.path)
myobj.find2ndShortest(adjacencyMatrix, src, dest);
print("shortest distances: ")
print(myobj.path)

print(myobj.allDists)
mylist = list(myobj.allDists);
print("Shortest distance: " + str(mylist[4]))

```

```

print("2nd shortest distance: " + str(mylist[3]))
print("3rd shortest distance: " + str(mylist[1]))
print("4th shortest distance: " + str(mylist[2]))
print("5th shortest distance: " + str(mylist[0]))

import sys
class ShortestPathAnd2ndShortestDijkstras:
    NO_PARENT = -1
    path = []; #nodes in the shortest path
    allDists = set(); #list of shortest distance
    #use Dijkstra's Shortest Path Algorithm,  $O(n^2)$  Space  $O(n)$ 
    def shortestPath(self, adjacencyMatrix, src, dest) :
        n = len(adjacencyMatrix[0])
        shortest = {}
        visited = {}
        parents = {}
        for v in range(0, n, 1) :
            shortest[v] = sys.maxsize;
            visited[v] = False
        shortest[src] = 0;
        parents[src] = self.NO_PARENT;
        for i in range(1, n, 1) :
            pre = -1;
            min = sys.maxsize;
            for v in range(0, n, 1) :
                if visited[v]==False and shortest[v] < min :
                    pre = v;
                    min = shortest[v];
            if pre == -1:
                return
            visited[pre] = True;
            for v in range(0, n, 1) :
                dist = adjacencyMatrix[pre][v];
                if dist > 0 and ((min + dist) < shortest[v]) :

```

```

        parents[v] = pre
        shortest[v] = min + dist
    self.allDists.add(shortest[dest])
    self.addPath(dest, parents);

#utility func to add nodes in the path recursively
def addPath(self, i, parents) :
    if (i == self.NO_PARENT) :
        return
    self.addPath(parents[i], parents)
    self.path.append(i)

#get 2nd shortest by removing each edge in shortest and compare
def find2ndShortest(self, adjacencyMatrix, src, dest) :
    #store previous vertex's data
    preV = -1
    preS = -1
    preD = -1
    mylist = list(self.path)
    for i in range(0, len(mylist)-1, 1) :
        #get source and destination for each path in shortest path
        s = mylist[i]
        d = mylist[i + 1]
        #resume the previous path
        if (preV != -1) :
            adjacencyMatrix[preS][preD] = preV
            adjacencyMatrix[preD][preS] = preV
        #record the previous data for recovery
        preV = adjacencyMatrix[s][d]
        preS = s
        preD = d
        #remove this path
        adjacencyMatrix[s][d] = 0
        adjacencyMatrix[d][s] = 0
    #re-calculate

```

```

self.shortestPath(adjacencyMatrix, src, dest)

adjacencyMatrix = [[0,509,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[509,0,115,305,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,115,0,0,0,0,202,153,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,305,0,0,112,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,112,0,222,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,222,0,0,0,146,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,202,0,0,0,0,0,243,200,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,153,0,0,0,0,0,50,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,200,0,168,0,250,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,250,0,0,371,0,0,800,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,578,0,0,259,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,371,259,0,145,200,0,0,0,675],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,145,0,42,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,200,42,0,0,281,0,900],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,800,0,0,0,263,0,0,290,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,281,0,0,117,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,290,117,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,675,0,900,0,0,0],
]
src = 0
dest = 18
myobj = ShortestPathAnd2ndShortestDijkstras()
myobj.shortestPath(adjacencyMatrix, src, dest);
print("shortest path: ")
print(myobj.path)
myobj.find2ndShortest(adjacencyMatrix, src, dest);
print("shortest distances: ")
print(myobj.path)

```

```

print(myobj.allDists)
mylist = list(myobj.allDists);
print("Shortest distance: " + str(mylist[1])) #second shortest sto proigoumeno
print("2nd shortest distance: " + str(mylist[2]))
print("3rd shortest distance: " + str(mylist[0]))

```

```

import sys
class ShortestPathAnd2ndShortestDijkstras:
    NO_PARENT = -1
    path = []; #nodes in the shortest path
    allDists = set(); #list of shortest distance
    #use Dijkstra's Shortest Path Algorithm,  $O(n^2)$  Space  $O(n)$ 
    def shortestPath(self, adjacencyMatrix, src, dest) :
        n = len(adjacencyMatrix[0])
        shortest = {}
        visited = {}
        parents = {}
        for v in range(0, n, 1) :
            shortest[v] = sys.maxsize;
            visited[v] = False
        shortest[src] = 0;
        parents[src] = self.NO_PARENT;
        for i in range(1, n, 1) :
            pre = -1;
            min = sys.maxsize;
            for v in range(0, n, 1) :
                if visited[v]==False and shortest[v] < min :
                    pre = v;
                    min = shortest[v];
            if pre == -1:
                return
            visited[pre] = True;
            for v in range(0, n, 1) :
                dist = adjacencyMatrix[pre][v];

```

```

        if dist > 0 and ((min + dist) < shortest[v]) :
            parents[v] = pre
            shortest[v] = min + dist
self.allDists.add(shortest[dest])
self.addPath(dest, parents);

#utility func to add nodes in the path recursively
def addPath(self, i, parents) :
    if (i == self.NO_PARENT) :
        return
    self.addPath(parents[i], parents)
    self.path.append(i)

#get 2nd shortest by removing each edge in shortest and compare
def find2ndShortest(self, adjacencyMatrix, src, dest) :
    #store previous vertex's data
    preV = -1
    preS = -1
    preD = -1
    mylist = list(self.path)
    for i in range(0, len(mylist)-1, 1) :
        #get source and destination for each path in shortest path
        s = mylist[i]
        d = mylist[i + 1]
        #resume the previous path
        if (preV != -1) :
            adjacencyMatrix[preS][preD] = preV
            adjacencyMatrix[preD][preS] = preV
        #record the previous data for recovery
        preV = adjacencyMatrix[s][d]
        preS = s
        preD = d
        #remove this path
        adjacencyMatrix[s][d] = 0
        adjacencyMatrix[d][s] = 0

```

```

#re-calculate
self.shortestPath(adjacencyMatrix, src, dest)

adjacencyMatrix = [[0,509,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[509,0,115,305,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,115,0,0,0,0,202,153,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,305,0,0,112,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,112,0,222,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,222,0,0,0,146,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,202,0,0,0,0,0,243,200,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,153,0,0,0,0,0,50,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,146,243,50,0,169,0,578,0,0,963,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,578,0,0,0,259,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,371,259,0,145,200,0,0,0,675],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,145,0,42,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,200,42,0,0,281,0,900],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,800,0,0,0,263,0,0,290,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,281,0,0,117,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,290,117,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,675,0,900,0,0,0],
]
src = 0
dest = 18
myobj = ShortestPathAnd2ndShortestDijkstras()
myobj.shortestPath(adjacencyMatrix, src, dest);
print("shortest path: ")
print(myobj.path)
myobj.find2ndShortest(adjacencyMatrix, src, dest);
print("shortest distances: ")
print(myobj.path)

```

```

print(myobj.allDists)
mylist = list(myobj.allDists);
print("Shortest distance: " + str(mylist[1])) #third best sto proto
print("2nd shortest distance: " + str(mylist[2]))
print("3rd shortest distance: " + str(mylist[4]))
print("4th shortest distance: " + str(mylist[0]))
print("5th shortest distance: " + str(mylist[3]))

```

```

import sys
class ShortestPathAnd2ndShortestDijkstras:
    NO_PARENT = -1
    path = []; #nodes in the shortest path
    allDists = set(); #list of shortest distance
    #use Dijkstra's Shortest Path Algorithm,  $O(n^2)$  Space  $O(n)$ 
    def shortestPath(self, adjacencyMatrix, src, dest) :
        n = len(adjacencyMatrix[0])
        shortest = {}
        visited = {}
        parents = {}
        for v in range(0, n, 1) :
            shortest[v] = sys.maxsize;
            visited[v] = False
        shortest[src] = 0;
        parents[src] = self.NO_PARENT;
        for i in range(1, n, 1) :
            pre = -1;
            min = sys.maxsize;
            for v in range(0, n, 1) :
                if visited[v]==False and shortest[v] < min :
                    pre = v;
                    min = shortest[v];
            if pre == -1:
                return

```



```

        visited[pre] = True;
    for v in range(0, n, 1) :
        dist = adjacencyMatrix[pre][v];
        if dist > 0 and ((min + dist) < shortest[v]) :
            parents[v] = pre
            shortest[v] = min + dist
    self.allDists.add(shortest[dest])
    self.addPath(dest, parents);

#utility func to add nodes in the path recursively
def addPath(self, i, parents) :
    if (i == self.NO_PARENT) :
        return
    self.addPath(parents[i], parents)
    self.path.append(i)

#get 2nd shortest by removing each edge in shortest and compare
#def find2ndShortest(self, adjacencyMatrix, src, dest) :
    #store previous vertex's data
    preV = -1
    preS = -1
    preD = -1
    mylist = list(self.path)
    for i in range(0, len(mylist)-1, 1) :
        #get source and destination for each path in shortest path
        s = mylist[i]
        d = mylist[i + 1]
        #resume the previous path
        if (preV != -1) :
            adjacencyMatrix[preS][preD] = preV
            adjacencyMatrix[preD][preS] = preV
        #record the previous data for recovery
        preV = adjacencyMatrix[s][d]
        preS = s
        preD = d

```

```

#remove this path
adjacencyMatrix[s][d] = 0
adjacencyMatrix[d][s] = 0
#re-calculate
self.shortestPath(adjacencyMatrix, src, dest)

adjacencyMatrix = [[0,509,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[509,0,115,305,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,115,0,0,0,0,202,153,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,305,0,0,112,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,112,0,222,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,222,0,0,0,146,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,202,0,0,0,0,0,243,200,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,153,0,0,0,0,0,50,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,146,243,50,0,169,0,578,0,0,963,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,200,0,168,0,250,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,250,0,0,371,0,0,800,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,145,0,42,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,200,42,0,0,281,0,900],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,800,0,0,0,263,0,0,290,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,281,0,0,117,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,290,117,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,675,0,900,0,0,0,0],
]
src = 0
dest = 18
myobj = ShortestPathAnd2ndShortestDijkstras()
myobj.shortestPath(adjacencyMatrix, src, dest);
print("shortest path: ")
print(myobj.path)
#myobj.find2ndShortest(adjacencyMatrix, src, dest);

```

```
print("shortest distances: ")
```

```
print(myobj.allDists)
```

```
mylist = list(myobj.allDists);
```

```
print("Shortest distance: " + str(mylist[0]))
```

```
print("2nd shortest distance: no second shortest path")
```

Βιβλιογραφία

- Adjetey-Bahun, Kpotissan, Babiga Birregah, Eric Châtelet, and Jean Luc Planchet. 2016. "A Model to Quantify the Resilience of Mass Railway Transportation Systems." *Reliability Engineering and System Safety* 153.
- Baroud, Hiba, Jose E. Ramirez-Marquez, Kash Barker, and Claudio M. Rocco. 2014. "Stochastic Measures of Network Resilience: Applications to Waterway Commodity Flows." *Risk Analysis* 34(7).
- Belobaba, Peter. 1982. "Contingency Planning for Response to Urban Transportation System Disruptions." *Journal of the American Planning Association* 48(4).
- Cacchiani, Valentina et al. 2014. "An Overview of Recovery Models and Algorithms for Real-Time Railway Rescheduling." *Transportation Research Part B: Methodological* 63.
- De-Los-Santos, Alicia, Gilbert Laporte, Juan A. Mesa, and Federico Perea. 2012. "Evaluating Passenger Robustness in a Rail Transit Network." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 20(1).
- Ghaemi, Nadjla, and Rob M. P. Goverde. 2015. "Review of Models for Railway Disruption Management." *Contribution to the 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis* 31(0).
- Huisman, Dennis et al. 2005. "Operations Research in Passenger Railway Transportation." *Statistica Neerlandica* 59(4).
- Jespersen-Groth, Julie et al. 2009. "Disruption Management in Passenger Railway Transportation." In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*.
- Nielsen, L. 2011. Erasmus University Rotterdam, the Netherlands "Rolling Stock Re-Scheduling in Passenger Railways." Erasmus University Rotterdam.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Rolling+Stock+Rescheduling+in+Passenger+Railways#3>.
- Wan, Chengpeng et al. 2018. "Resilience in Transportation Systems: A Systematic Review and Future Directions." *Transport Reviews* 38(4).

- Yu, Gang, and Xiangtong Qi. 2004. Disruption Management: Framework, Models and Applications *Disruption Management: Framework, Models and Applications*.
- Chengpeng Wan, Zaili Yang, Di Zhang, Xinping Yan & Shiqi Fan (2018) Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions, *Transport Reviews*, 38:4, 479-498, DOI: 10.1080/01441647.2017.1383532
- Shafieezadeh, A., & Ivey Burden, L. (2014). Scenario-based resilience assessment framework for critical infrastructure systems: Case study for seismic resilience of seaports. *Reliability Engineering & System Safety*, 132, 207–219. doi:10.1016/j.res.2014.07.021
- Baroud, H., Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E., & Rocco, C. M. (2014b). Inherent costs and interdependent impacts of infrastructure network resilience. *Risk Analysis*, 35(4), 642–662. doi:10.1111/risa.12223
- Dorbritz, R. (2011). Assessing the resilience of transportation systems in case of large-scale disastrous events. In *Proceedings of the 8th International Conference on Environmental Engineering*, 1070– 1076.
- Enjalbert, S., Vanderhaegen, F., Pichon, M., Ouedraogo, K. A., & Millot, P. (2011). Assessment of transportation system resilience. In *Human modelling in assisted transportation (pp. 335–341)*. Springer Milan.
- Francesco Corman, Andrea D’Ariano, Dario Pacciarelli, Marco Pranzo, A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 44, Issue 1, 2010, Pages 175-192, ISSN 0191 2615, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.05.004>.
- Valentina Cacchiani, Dennis Huisman, Martin Kidd, Leo Kroon, Paolo Toth, Lucas Veelenturf, Joris Wagenaar, An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 63, 2014, Pages 15-37, ISSN 0191-2615, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.01.009>.

Ιστοσελίδες

<https://pearl-rail.com/el/pearl-rail-greece/>

<https://rne.eu/>

[<https://cip.rne.eu/apex/f?p=212:24:6820023553285>](https://el.wikipedia.org/wiki/Αλγόριθμος_του_Ντάικστρα_)(<u>https://el.wikipedia.org/wiki/Αλγόριθμος_του_Ντάικστρα_)</u></p></div><div data-bbox=)

https://en.wikipedia.org/wiki/Yen%27s_algorithm

<https://cip.rne.eu/apex/f?p=212:24:6820023553285>