ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική εργασία

# Ανάλυση κρισιμότητας σιδηροδρομικών δικτύων με έμφαση στις εμπορευματικές μεταφορές: Εφαρμογή στο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο και την κακοκαιρία Daniel

Ελένη Α. Ζησιμοπούλου

**Επιβλέπουσα:** Τατιάνα Π. Μοσχόβου, Ε.ΔΙ.Π. ΕΜΠ

Αθήνα, 2026

# Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κα Τατιάνα Μοσχόβου, για την συνεργασία μας, την καθοδήγησή της και τις πολύτιμες παρατηρήσεις που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής κο Γ. Γιαννή, Καθηγητή ΕΜΠ και κο. Κ. Γκιοτσαλίτη, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ για την πρόθυμη συμμετοχή τους, και την υποστήριξη κατά τη διαδικασία αξιολόγησης.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω επίσης στον κ. Έκτορα Χανδακά, Τεχνικό Διευθυντή της Hellenic Train, για τον χρόνο που αφιέρωσε στη συζήτησή μας σχετικά με τη λειτουργία του σιδηροδρομικού δικτύου. Οι επισημάνσεις και οι πληροφορίες που μοιράστηκε συνέβαλαν ουσιαστικά στη διαμόρφωση της προσέγγισης της παρούσας μελέτης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη συνεχή στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

**Τίτλος:** «Ανάλυση κρισιμότητας σιδηροδρομικών δικτύων με έμφαση στις εμπορευματικές μεταφορές: Εφαρμογή στο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο και την κακοκαιρία Daniel»

**Συγγραφέας Διπλωματικής Εργασίας**: Ελένη Α. Ζησιμοπούλου

**Επιβλέπουσα**: Τατιάνα Π. Μοσχόβου

## Σύνοψη

Ο βασικός σιδηροδρομικός άξονας Πειραιά–Θεσσαλονίκης αποτελεί τον κύριο κορμό του ελληνικού σιδηροδρομικού συστήματος και βασικό διάδρομο διακίνησης εμπορευματικών ροών από τα λιμάνια προς το εσωτερικό της χώρας και την Ευρώπη. Η διακοπή της κυκλοφορίας στον άξονα λόγω της κακοκαιρίας «Daniel» τον Σεπτέμβριο του 2023 ανέδειξε με σαφήνεια τον βαθμό εξάρτησης του δικτύου από συγκεκριμένα τμήματα και την ανάγκη ποσοτικής διερεύνησης της σημασίας τους για τη συνολική λειτουργία του συστήματος. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της κρισιμότητας των συνδέσεων του βασικού σιδηροδρομικού άξονα μέσω εργαλείων θεωρίας δικτύων. Το σιδηροδρομικό σύστημα μοντελοποιείται ως γράφος, όπου οι σταθμοί αναπαρίστανται ως κόμβοι και οι σιδηροδρομικές συνδέσεις ως ακμές. Ως βασικός δείκτης αξιολόγησης χρησιμοποιείται η αποδοτικότητα δικτύου (network efficiency), η οποία επιτρέπει την ποσοτική αποτίμηση της συνολικής λειτουργικής απόδοσης του συστήματος. Μέσω προσομοίωσης σεναρίων διακοπής επιμέρους συνδέσεων εξετάζεται η μεταβολή της αποδοτικότητας του δικτύου και προσδιορίζονται τα τμήματα των οποίων η απώλεια επιφέρει τη μεγαλύτερη υποβάθμιση της συνολικής του απόδοσης. Παράλληλα, υπολογίζονται δείκτες κεντρικότητας για τη συμπληρωματική αποτίμηση της σχετικής σημασίας κόμβων και συνδέσεων. Η ανάλυση αναδεικνύει τον βαθμό συγκέντρωσης κρίσιμων λειτουργιών σε συγκεκριμένα τμήματα του άξονα και καταδεικνύει τη σημασία της αναγνώρισης των κρίσιμων συνδέσεων για την κατανόηση της δομικής συμπεριφοράς του σιδηροδρομικού συστήματος υπό συνθήκες διαταραχής.

**Λέξεις-κλειδιά**: σιδηροδρομικό δίκτυο Ελλάδας, άξονας Πειραιάς–Θεσσαλονίκη, κρισιμότητα συνδέσεων, θεωρία δικτύων, αποδοτικότητα δικτύου, σενάρια διακοπής, κακοκαιρία Daniel

**Title:** «Criticality Analysis of Railway Networks with Emphasis on Freight Transport: Application to the Greek Railway Network and Storm Daniel»

**Thesis Author**: Eleni A. Zisimopoulou

**Supervisor**: Tatiana P. Moschovou

## Abstract

The main railway corridor Piraeus–Thessaloniki constitutes the backbone of the Greek railway system and a key freight transport route connecting Greek ports with the national hinterland and the European network. The disruption of railway traffic along this corridor following the extreme weather event Storm Daniel in September 2023 highlighted the strong dependence of the network on specific sections and the need for a quantitative investigation of their importance for the overall functioning of the system. The aim of this thesis is to analyse the criticality of railway connections along the main corridor using network analysis tools. The railway system is modelled as a graph, where stations are represented as nodes and railway links as edges. The main performance indicator used in the analysis is network efficiency, which allows the quantitative assessment of the overall functional performance of the system. Through the simulation of disruption scenarios affecting individual links, the resulting changes in network efficiency are examined and the sections whose removal causes the greatest degradation of overall system performance are identified. In addition, centrality indicators are calculated in order to provide a complementary assessment of the relative importance of nodes and links within the network. The analysis highlights the concentration of critical functions in specific sections of the corridor and underlines the importance of identifying critical links for understanding the structural behaviour of the railway system under disruption conditions.

**Key words**: Greek railway network, Piraeus–Thessaloniki corridor, link criticality, network analysis, network efficiency, disruption scenarios, storm Daniel

# Περίληψη

Η λειτουργία του σιδηροδρομικού συστήματος αποτελεί βασικό στοιχείο της μεταφορικής υποδομής μιας χώρας, ιδίως όταν αυτό εξυπηρετεί σημαντικές εμπορευματικές ροές και συνδέει στρατηγικούς κόμβους με την ενδοχώρα. Στην ελληνική περίπτωση, ο βασικός άξονας Πειραιά–Θεσσαλονίκης συγκροτεί τον κύριο κορμό του εθνικού σιδηροδρομικού δικτύου, διασυνδέοντας το λιμάνι του Πειραιά και το Θριάσιο Εμπορευματικό Κέντρο με τη Βόρεια Ελλάδα και τα Βαλκάνια. Μέσω αυτού διακινείται σημαντικό μέρος των εμπορευματικών ροών που κατευθύνονται προς την Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη, γεγονός που καθιστά τη λειτουργική του συνέχεια κρίσιμη για την εφοδιαστική αλυσίδα. Η κακοκαιρία "Daniel" τον Σεπτέμβριο του 2023, η οποία προκάλεσε εκτεταμένες διακοπές κυκλοφορίας σε τμήματα του άξονα, ανέδειξε με σαφήνεια την εξάρτηση του συστήματος από συγκεκριμένες συνδέσεις και τον περιορισμένο βαθμό εναλλακτικών διαδρομών.

Η διεθνής βιβλιογραφία σχετικά με τη δομή και την ανθεκτικότητα μεταφορικών δικτύων έχει αναδείξει ότι η συνολική απόδοση ενός συστήματος δεν εξαρτάται μόνο από το μέγεθος ή την έκτασή του, αλλά κυρίως από τον τρόπο με τον οποίο είναι οργανωμένες οι συνδέσεις του. Μελέτες βασισμένες στη Θεωρία Δικτύων έχουν δείξει ότι η απώλεια συγκεκριμένων κόμβων ή ακμών μπορεί να επιφέρει δυσανάλογη μείωση της λειτουργικότητας, ακόμη και όταν το υπόλοιπο δίκτυο παραμένει άθικτο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον εντοπισμό «κρίσιμων» στοιχείων, δηλαδή εκείνων των τμημάτων των οποίων η διακοπή οδηγεί σε σημαντική επιβάρυνση των μετακινήσεων ή σε περιορισμό των διαθέσιμων διαδρομών. Στο πλαίσιο αυτό, η αναπαράσταση υποδομών ως γραφημάτων αποτελεί καθιερωμένη μεθοδολογική προσέγγιση, καθώς επιτρέπει τη συστηματική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ δομής και λειτουργίας. Η παρούσα εργασία εντάσσεται σε αυτή τη γραμμή έρευνας, αξιοποιώντας εργαλεία Θεωρίας Δικτύων για την ποσοτική αποτίμηση της συμπεριφοράς του βασικού σιδηροδρομικού άξονα υπό συνθήκες διαταραχής. Η επιλογή της συγκεκριμένης προσέγγισης στηρίζεται στη δυνατότητά της να συνδυάζει τη χωρική διάταξη του δικτύου με λειτουργικά μεγέθη, προσφέροντας μια συνεκτική εικόνα της σημασίας των επιμέρους συνδέσεων και της επίδρασής τους στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Για την ποσοτική διερεύνηση του ζητήματος, ο βασικός σιδηροδρομικός άξονας Πειραιά–Θεσσαλονίκης μοντελοποιείται ως γράφος, σύμφωνα με τις αρχές της Θεωρίας Δικτύων. Στο πλαίσιο αυτό, οι βασικοί σταθμοί και τα σημεία που παρουσιάζουν λειτουργική σημασία για τη διακίνηση εμπορευματικών ροών αναπαρίστανται ως κόμβοι, ενώ τα σιδηροδρομικά τμήματα που τους συνδέουν ως ακμές. Η επιλογή των κόμβων δεν βασίζεται αποκλειστικά σε γεωγραφικά κριτήρια, αλλά λαμβάνει υπόψη τον λειτουργικό ρόλο τους στο σύστημα, όπως η διασύνδεση με λιμενικές εγκαταστάσεις, η συγκέντρωση ροών ή η θέση τους σε τμήματα όπου δεν υπάρχουν άμεσες εναλλακτικές διαδρομές. Με τον τρόπο αυτό, η αναπαράσταση του δικτύου επιδιώκει να αποτυπώσει όχι μόνο τη χωρική του μορφή, αλλά και τη λειτουργική του σημασία.

Αντίστοιχα, οι ακμές αντιστοιχούν σε επιμέρους τμήματα του άξονα και ορίζονται με τρόπο που επιτρέπει τη διακριτή αξιολόγηση της επίδρασης κάθε σύνδεσης στη συνολική λειτουργία του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή είναι κρίσιμη, καθώς επιτρέπει την προσομοίωση σεναρίων διακοπής μεμονωμένων τμημάτων και την αποτίμηση της συμβολής τους στη συνολική απόδοση. Το επίπεδο ανάλυσης επιλέγεται ώστε να εστιάζει στον βασικό κορμό του άξονα, δηλαδή στο τμήμα που εξυπηρετεί τις κύριες εμπορευματικές ροές, χωρίς να επεκτείνεται στο σύνολο του εθνικού δικτύου. Η επιλογή αυτή αντανακλά τον στόχο της εργασίας, που δεν είναι η γενική αποτύπωση του σιδηροδρομικού συστήματος, αλλά η διερεύνηση της κρισιμότητας των συνδέσεων του κεντρικού εμπορευματικού διαδρόμου της χώρας.

Στο πλαίσιο της ανάλυσης, σε κάθε ακμή του δικτύου αποδίδεται βάρος, το οποίο ορίζεται ως το γενικευμένο κόστος μετακίνησης μεταξύ των αντίστοιχων κόμβων. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται ως βασική παράμετρος αποτίμησης, καθώς αποτυπώνει τη λειτουργική επιβάρυνση κάθε σύνδεσης και επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών διαδρομών υπό ενιαίο κριτήριο. Η συνολική λειτουργικότητα του άξονα αξιολογείται μέσω του δείκτη αποδοτικότητας δικτύου, ο οποίος εκφράζει τη μέση δυνατότητα μετακίνησης μεταξύ των κόμβων, λαμβάνοντας υπόψη τα βάρη των ακμών. Η επιλογή της αποδοτικότητας ως κύριου δείκτη βασίζεται στη δυνατότητά της να αποτυπώνει άμεσα τις μεταβολές στη συνδεσιμότητα και στο κόστος μετακίνησης που προκαλούνται από ενδεχόμενες διακοπές. Η αποδοτικότητα υπολογίζεται τόσο για την κατάσταση αναφοράς όσο και για σενάρια διακοπής επιμέρους τμημάτων, προσομοιώνοντας την απώλεια συγκεκριμένων ακμών του άξονα. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατή η ποσοτική σύγκριση της επίδρασης κάθε διαταραχής και ο προσδιορισμός των τμημάτων των οποίων η απώλεια οδηγεί στη μεγαλύτερη υποβάθμιση της συνολικής απόδοσης.

Με βάση την κατάταξη των συνδέσεων ως προς τον βαθμό υποβάθμισης της αποδοτικότητας, προέκυψε ιεράρχηση της θεωρητικής κρισιμότητας των επιμέρους τμημάτων του άξονα. Στη συνέχεια, η ανάλυση επεκτάθηκε σε διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της υπολογισμένης κρισιμότητας και της πραγματικής διαταραχής που προκάλεσε η κακοκαιρία «Daniel», εξετάζοντας κατά πόσο τα τμήματα που επλήγησαν αντιστοιχούν σε συνδέσεις με αυξημένη λειτουργική βαρύτητα. Η σύγκριση αυτή δεν αντιμετωπίζεται ως απλή αντιπαραβολή, αλλά ως τρόπος αξιολόγησης της ικανότητας της μεθοδολογίας να εντοπίζει δομικά ευαίσθητα σημεία του συστήματος. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε συμπληρωματική αξιολόγηση της σημασίας των κόμβων μέσω δεικτών κεντρικότητας, με στόχο την αποτύπωση της θέσης τους στη συνολική δομή του.

Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την εκτίμηση του βαθμού στον οποίο ένας κόμβος λειτουργεί ως σημείο συγκέντρωσης ροών ή ως ενδιάμεσος κρίκος σε κρίσιμες διαδρομές, παρέχοντας μια εναλλακτική, δομική οπτική της κρισιμότητας. Η συνδυαστική εξέταση αποδοτικότητας και δεικτών κεντρικότητας συνέβαλε στη διαμόρφωση μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας της κρισιμότητας των επιμέρους

συνδέσεων του άξονα, αναδεικνύοντας τη συγκέντρωση λειτουργικής σημασίας σε συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου. Τέλος, εφαρμόστηκε σενάριο διαταραχής που προσομοιώνει τις επιπτώσεις της κακοκαιρίας «Daniel» στο βασικό δρομολόγιο Πειραιάς–Θεσσαλονίκη, μέσω της αφαίρεσης ή της δραστικής επιβάρυνσης των επηρεασμένων ακμών. Η προσομοίωση αυτή κατέδειξε την επίδραση της διακοπής στη δυνατότητα μετακίνησης μεταξύ των δύο άκρων του άξονα και ανέδειξε τον βαθμό εξάρτησης του συστήματος από συγκεκριμένες συνδέσεις. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση ολοκληρώνεται με μια συνολική αποτίμηση της κρισιμότητας των συνδέσεων του βασικού σιδηροδρομικού διαδρόμου.

Από την ανάλυση προέκυψαν ορισμένα σαφή συμπεράσματα σχετικά με τη δομή και τη λειτουργία του βασικού σιδηροδρομικού άξονα. Το ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο παρουσιάζει έντονα γραμμική και ιεραρχική οργάνωση, με περιορισμένο βαθμό εναλλακτικότητας. Η λειτουργικότητά του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδοχική συνέχεια συγκεκριμένων συνδέσεων κατά μήκος του κεντρικού άξονα, γεγονός που καθιστά το σύστημα ευαίσθητο σε τοπικές διακοπές. Η ανάλυση κρισιμότητας ανέδειξε ότι η απώλεια ορισμένων τμημάτων επιφέρει δυσανάλογη μείωση της συνολικής αποδοτικότητας, επιβεβαιώνοντας ότι δεν έχουν όλες οι συνδέσεις την ίδια λειτουργική βαρύτητα. Ορισμένα τμήματα λειτουργούν ως καθοριστικοί κρίκοι για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας και της ροής εμπορευματικών μετακινήσεων, ιδίως εκείνα που διασφαλίζουν τη συνέχεια μεταξύ βασικών κόμβων και τη σύνδεση με λιμενικές και εμπορευματικές υποδομές. Επίσης, η σύγκριση της θεωρητικής αποτίμησης με το πραγματικό σενάριο διαταραχής έδειξε ότι η κακοκαιρία «Daniel» επηρέασε τμήματα υψηλής λειτουργικής σημασίας, γεγονός που εξηγεί την έκταση των επιπτώσεων στη σιδηροδρομική εξυπηρέτηση. Οι συνέπειες της διακοπής δεν ήταν τυχαίες, αλλά συνδέονται άμεσα με τη συγκέντρωση ροών σε περιορισμένο αριθμό κρίσιμων συνδέσεων. Παράλληλα, τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι αποδοτικότητα του συστήματος δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική επάρκεια των επιμέρους υποδομών, αλλά και από τη συνολική διάρθρωση του δικτύου και τον βαθμό εναλλακτικότητας που αυτό προσφέρει. Η εφαρμογή της Ανάλυσης Δικτύων αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για τον συστηματικό εντοπισμό των ευαίσθητων και κρίσιμων σημείων, προσφέροντας μια αντικειμενική και ποσοτική βάση για την κατανόηση της κρισιμότητας των συνδέσεων του διαδρόμου.

Υπό το πρίσμα των παραπάνω συμπερασμάτων, καθίσταται σαφές ότι η έγκαιρη αναγνώριση των κρίσιμων και ευάλωτων σημείων ενός μεταφορικού δικτύου αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ενίσχυση της αποδοτικότητάς του. Ακραία φαινόμενα όπως η κακοκαιρία «Daniel» δεν συνιστούν μεμονωμένες εξαιρέσεις, αλλά γεγονότα που αναμένεται να επαναλαμβάνονται, δοκιμάζοντας τη δομική επάρκεια και τη λειτουργική ετοιμότητα των υποδομών. Η δυνατότητα εντοπισμού των συνδέσεων των οποίων η απώλεια θα είχε τη μεγαλύτερη επίπτωση επιτρέπει τη μετάβαση από μια αντιδραστική διαχείριση κρίσεων σε μια πιο προληπτική και στρατηγική προσέγγιση. Η εφαρμογή της Ανάλυσης Δικτύων στην παρούσα εργασία ανέδειξε τη χρησιμότητά της ως εργαλείου υποστήριξης σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων, προσφέροντας αντικειμενική βάση για

την ιεράρχηση παρεμβάσεων και επενδύσεων στις υποδομές. Η ποσοτική αποτύπωση της κρισιμότητας επιτρέπει την τεκμηριωμένη αξιολόγηση της λειτουργικής σημασίας επιμέρους τμημάτων και τη στοχευμένη ενίσχυση εκείνων που συμβάλλουν καθοριστικά στη συνολική συνδεσιμότητα. Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία προτείνει κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα με στόχο την πληρέστερη κατανόηση της ανθεκτικότητας του συστήματος. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνεται η επέκταση της ανάλυσης σε δυναμικά και χρονικά εξαρτώμενα σενάρια, η ενσωμάτωση δεδομένων ζήτησης και πραγματικών ροών στη μοντελοποίηση της αποδοτικότητας, καθώς και η διεύρυνση της προσέγγισης σε πολυτροπικό και διεθνές επίπεδο. Οι επεκτάσεις αυτές μπορούν να συμβάλουν σε μια πιο ολοκληρωμένη αποτίμηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του δικτύου και σε αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων στον στρατηγικό σχεδιασμό μεταφορικών υποδομών.

# Περιεχόμενα

**1 Εισαγωγή ..... 16**

1.1 Γενικά στοιχεία ..... 16

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ..... 20

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας ..... 21

**2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση ..... 23**

2.1 Εισαγωγή ..... 23

2.2 Μεταφορές και κρίσιμες υποδομές ..... 23

2.3 Επιρροή ακραίων καιρικών φαινομένων στις μεταφορές ..... 29

2.4 Εναλλακτικές διαδρομές και αναδρομολόγηση ως μηχανισμοί διαχείρισης διαταραχών ..... 34

2.5 Μεθοδολογικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας και ανθεκτικότητας στις μεταφορές ..... 40

2.6 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας και ερευνητικό κενό ..... 42

**3 Μεθοδολογική προσέγγιση ..... 45**

3.1 Περιγραφή της διαδικασίας ..... 45

3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο ..... 46

3.2.1 Ανάλυση σιδηροδρομικών δικτύων με εργαλεία Θεωρίας Δικτύων ..... 46

3.2.2 Αποδοτικότητα δικτύου (Network Efficiency) ..... 47

3.2.3 Δείκτες κεντρικότητας ..... 49

3.2.4 Υπολογιστική υλοποίηση της Ανάλυσης Δικτύου ..... 51

**4 Ανάλυση και αποτελέσματα ..... 53**

4.1 Βάση δεδομένων ..... 53

4.1.1 «Κόμβοι» - Επιλογή και περιγραφή λειτουργικών κόμβων ..... 53

4.1.2 «Συνδέσεις» ..... 55

4.1.3 «Data Dictionary» ..... 59

4.1.4 Τελική σύνθεση βάσης δεδομένων ..... 61

4.2 Ανάπτυξη κώδικα και αναπαράσταση δικτύου ..... 61

4.2.1 Εισαγωγή δεδομένων και κατασκευή γράφου ..... 61

4.2.2 Συνεκτικότητα και βασικά χαρακτηριστικά ..... 62

4.3 Αποτελέσματα ..... 64

4.3.1 Υπολογισμός αποδοτικότητας ..... 66

4.3.2 Κρισιμότητα συνδέσεων ..... 68
4.4 Σύγκριση θεωρητικής κρισιμότητας και πραγματικής διαταραχής (κακοκαιρία Daniel) ..... 72
4.4.1 Διερεύνηση της σχέσης δομικής κρισιμότητας και πραγματικών αστοχιών 72
4.4.2 Συμπληρωματική αξιολόγηση κόμβων μέσω δεικτών κεντρικότητας..... 73
4.4.3 Εφαρμογή της διαταραχής Daniel στο βασικό δρομολόγιο Πειραιάς-Θεσσαλονίκη..... 78
4.5 Συνολική αποτίμηση..... 79
**5 Συμπεράσματα και προτάσεις.....81**
5.1 Γενικά..... 81
5.2 Βασικά συμπεράσματα..... 82
5.3 Προστάσεις για περαιτέρω έρευνα ..... 84
**6 Βιβλιογραφία .....90**
**7 Παραρτήματα.....94**

# Ευρετήριο σχημάτων

**Σχήμα 1.1** Χάρτης σιδηροδρομικού δικτύου Ελλάδας (ΟΣΕ, 2026) ..... 17
**Σχήμα 1.2** Χωρική κατανομή του συνολικού ημερήσιου ύψους βροχής κατά την κακοκαιρία Daniel στην περιοχή της Θεσσαλίας (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Meteo, 2023) ..... 19
**Σχήμα 2.1** Συμπληρωματικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό της κρισιμότητας υποδομής..... 25
**Σχήμα 2.2** Απεικόνιση κύριων διαδρόμων Ευρωπαϊκής Ένωσης (TEN-T, 2025) ..... 26
**Σχήμα 2.3** Ο Σιδηροδρομικός Εμπορευματικός Διάδρομος RFC7 (Orient/East-Med) (RFC7, 2024)..... 27
**Σχήμα 2.4** Παγκόσμιος χάρτης ακραίων καιρικών φαινομένων (EM-DAT, 2025)..... 30
**Σχήμα 2.5** Χωρική κατανομή των μετρήσεων και της ημερήσιας συσσωρευμένης βροχόπτωσης στην Θεσσαλία κατά την περίοδο 3-8 Σεπτεμβρίου (He et al., 2024). 32
**Σχήμα 2.6** Χρονική μεταβολή των σιδηροδρομικών εμπορευματικών ροών στην Ελλάδα (χιλιάδες τόνοι), βάσει τριμηνιαίων στοιχείων (Eurostat, 2026)..... 33
**Σχήμα 2.7** Ανάλυση της εξάρτησης του κόστους θαλάσσιας μεταφοράς από το μήκος της διαδρομής (Vukić et al., 2021) ..... 36
**Σχήμα 2.8** Ανάλυση της εξάρτησης του κόστους σιδηροδρομικής μεταφοράς από το μήκος της διαδρομής (Vukić et al., 2021)..... 36
**Σχήμα 2.9** Ανάλυση της εξάρτησης του εξωτερικού κόστους θαλάσσιας μεταφοράς από το μήκος της διαδρομής (Vukić et al., 2021) ..... 37
**Σχήμα 2.10** Ανάλυση της εξάρτησης του εξωτερικού κόστους σιδηροδρομικής μεταφοράς από το μήκος της διαδρομής (Vukić et al., 2021) ..... 37
**Σχήμα 4.1** Έλεγχος του συνολικού αριθμού κόμβων και ακμών μετά την κατασκευή του βασικού γράφου..... 62
**Σχήμα 4.2** Τοπολογική αναπαράσταση του εξεταζόμενου σιδηροδρομικού υποδικτύου (μη γεωγραφική απεικόνιση)..... 64
**Σχήμα 4.3** Υπολογισμός αποδοτικότητας βασικού σεναρίου..... 67
**Σχήμα 4.4** Υπολογισμός αποδοτικότητας σεναρίου διαταραχής..... 68
**Σχήμα 4.5** Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης αποδοτικότητας ..... 70
**Σχήμα 4.6** Γραφική απεικόνιση των τιμών degree centrality ανά κόμβο..... 75
**Σχήμα 4.7** Γραφική απεικόνιση των τιμών betweenness centrality ανά κόμβο..... 76
**Σχήμα 4.8** Γραφική απεικόνιση των τιμών closeness centrality ανά κόμβο ..... 77
**Σχήμα 4.9** Υπολογισμός διαδρομής Πειραιάς–Θεσσαλονίκη υπό κανονικές συνθήκες και σενάριο διαταραχής Daniel ..... 79

# Ευρετήριο πινάκων

**Πίνακας 4.1** Κατάλογος λειτουργικών κόμβων του σιδηροδρομικού υποδικτύου ... 55
**Πίνακας 4.2** Συνδέσεις και λειτουργικά χαρακτηριστικά των ακμών του επιλεγένου δικτύου..... 58
**Πίνακας 4.3** Data Dictionary – Περιγραφή μεταβλητών ανάλυσης υποδικτύου..... 60
**Πίνακας 4.4** Πίνακας κατάταξης κρισιμότητας ακμών ..... 69

**Πίνακας 4.5** Κατάταξη των 10 πιο κρίσιμων συνδέσεων του υποδικτύου βάση της μεταβολής της αποδοτικότητας και ένδειξη επίδρασης από το φαινόμενο Daniel ..... 73
**Πίνακας 4.6** Τιμές των δεικτών degree, betweenness και closeness centrality για όλους τους κόμβους του υποδικτύου ..... 74
**Πίνακας 5.1** Μεταβλητές ανθεκτικότητας και λειτουργικής διαταραχής για περαιτέρω έρευνα ..... 87
**Πίνακας 5.2** Data Dictionary μεταβλητών για περαιτέρω έρευνα ..... 88

## Ευρετήριο Εξισώσεων

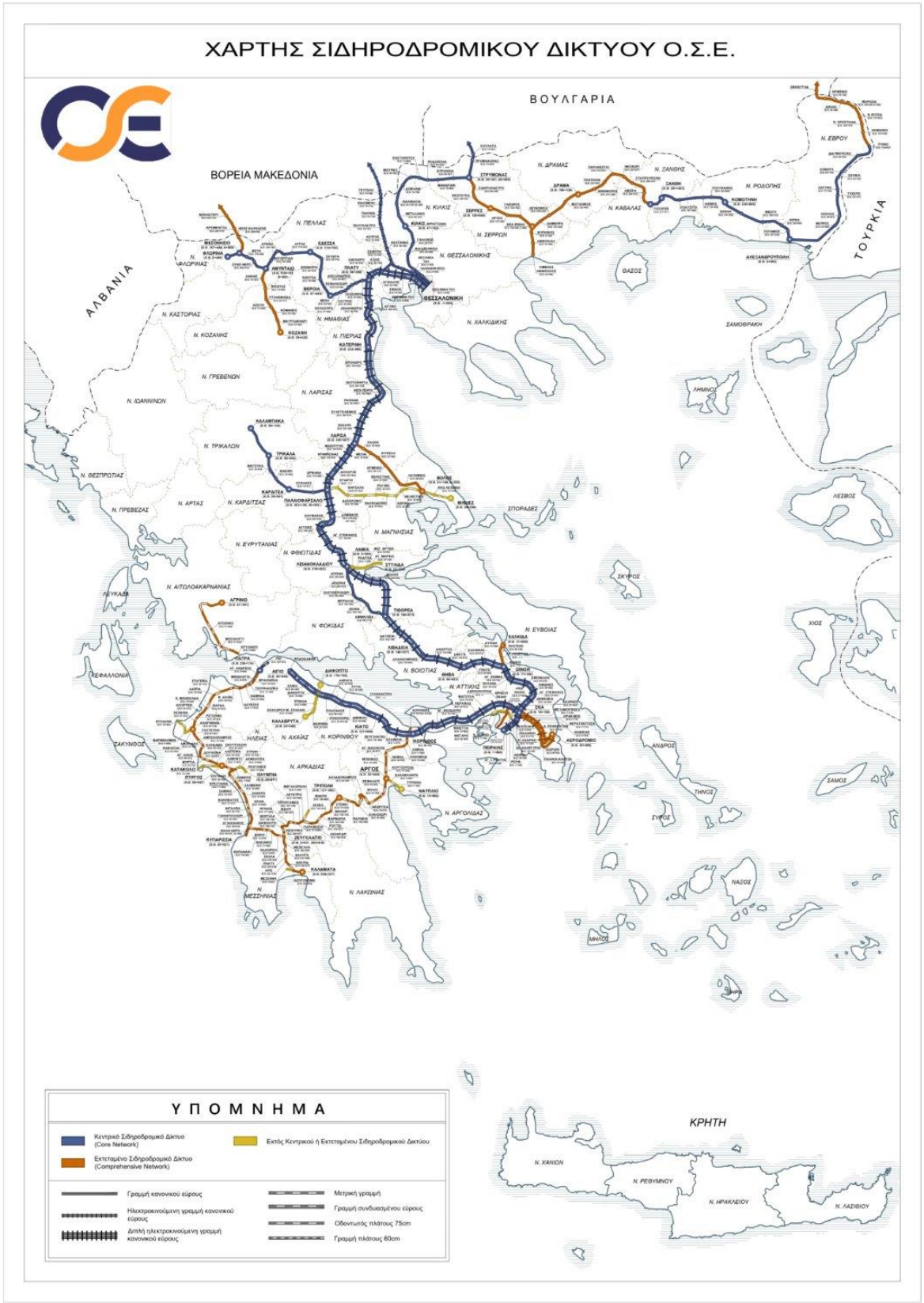
**Εξίσωση 3.1** Δείκτης αποδοτικότητας δικτύου ..... 47
**Εξίσωση 3.2** Μεταβολή αποδοτικότητας δικτύου ..... 48
**Εξίσωση 3.3** Ποσοστιαία μεταβολή της αποδοτικότητας δικτύου ..... 49
**Εξίσωση 3.4** Βαθμός κεντρικότητας (Degree centrality) ..... 49
**Εξίσωση 3.5** Δείκτης ενδιάμεσης κεντρικότητας (Betweenness centrality) ..... 50
**Εξίσωση 3.6** Κεντρικότητα εγγύτητας (Closeness centrality) ..... 51
**Εξίσωση 4.1** Υπολογισμός γενικευμένου βάρους ακμής ..... 57

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά στοιχεία

Οι σιδηροδρομικές υποδομές αποτελούν βασικό στοιχείο των σύγχρονων συστημάτων μεταφορών, τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε διεθνές επίπεδο. Ο σιδηρόδρομος εξυπηρετεί τη μετακίνηση επιβατών και τη μεταφορά εμπορευμάτων μεγάλης κλίμακας, συμβάλλοντας στη διασύνδεση λιμένων, βιομηχανικών περιοχών και αγορών. Στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής πολιτικής για βιώσιμες μεταφορές και μείωση των εκπομπών, ενισχύεται η μετατόπιση φορτίου από τις οδικές προς τις σιδηροδρομικές και θαλάσσιες μεταφορές (European Commission, 2026). Η αξιόπιστη λειτουργία του σιδηροδρομικού δικτύου καθίσταται, συνεπώς, κρίσιμη για τη σταθερότητα και τη συνέχεια των εφοδιαστικών αλυσίδων.

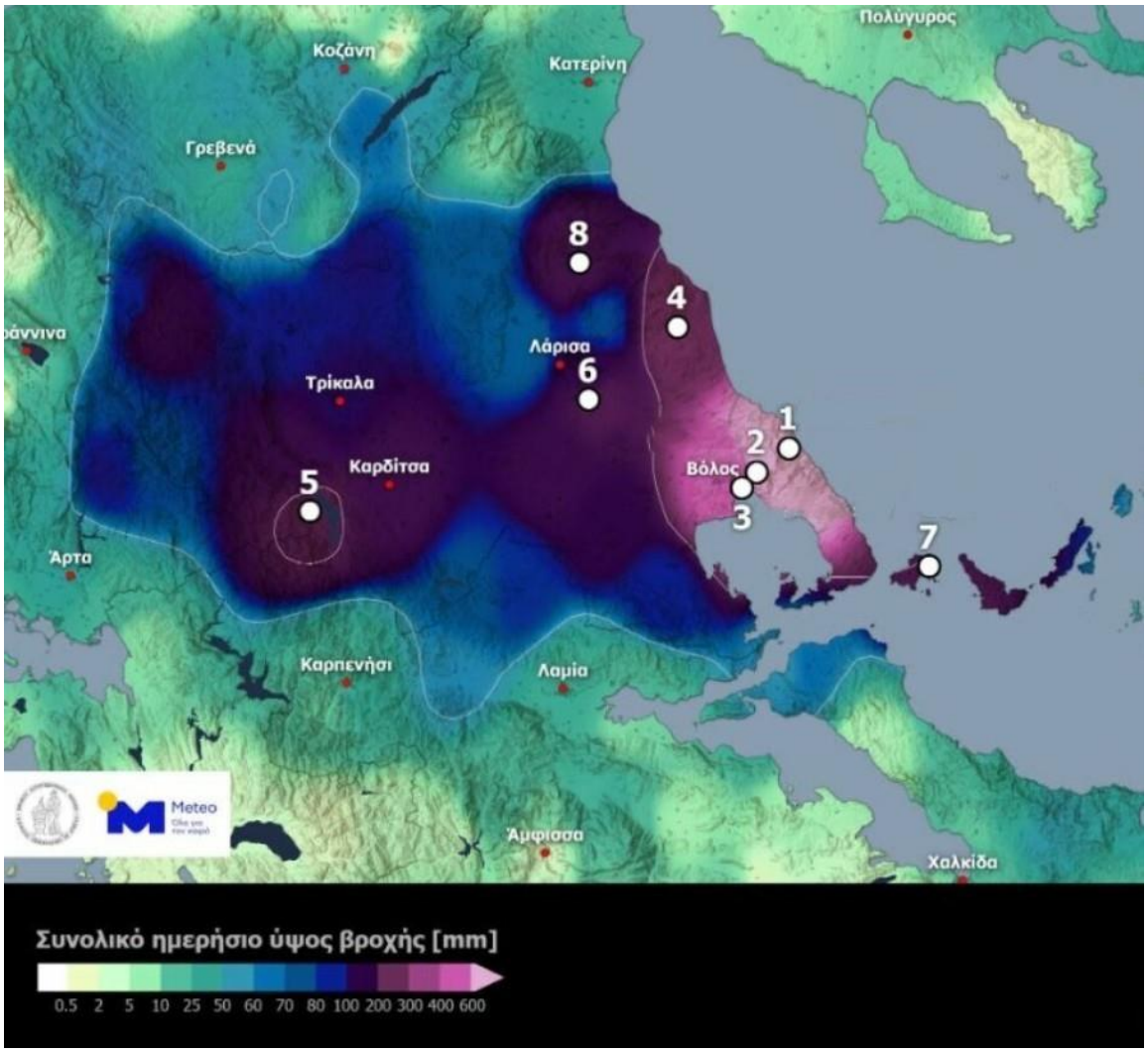
Στο ελληνικό πλαίσιο, ο βασικός σιδηροδρομικός άξονας Πειραιάς–Θεσσαλονίκη αποτελεί τον κεντρικό κορμό του εθνικού δικτύου. Ο άξονας αυτός συνδέει το λιμάνι του Πειραιά – έναν από τους σημαντικότερους κόμβους διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων στη Μεσόγειο – και το λιμάνι της Θεσσαλονίκης με τα βόρεια σύνορα της χώρας και τις αγορές της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης, εντασσόμενος στους διευρωπαϊκούς διαδρόμους μεταφορών (TEN-T) (European Commission, 2026). Στην πράξη, ο συγκεκριμένος διάδρομος εξυπηρετεί το μεγαλύτερο μέρος των διεθνών εμπορευματικών ροών της χώρας, με κυρίαρχο φορτίο τα εμπορευματοκιβώτια (containers) που προωθούνται από τους λιμένες προς τα Βαλκάνια και την Κεντρική Ευρώπη. Η συγκέντρωση του εμπορευματικού έργου σε έναν βασικό άξονα ενισχύει τη στρατηγική του σημασία, αλλά ταυτόχρονα δημιουργεί αυξημένη εξάρτηση από συγκεκριμένα τμήματα και κόμβους του δικτύου. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται το σιδηροδρομικό δίκτυο της Ελλάδας και ο βασικός άξονας που συνδέει τον Πειραιά με τη Θεσσαλονίκη και τα βόρεια σύνορα. Η δομή αυτή, αν και λειτουργικά αποτελεσματική υπό κανονικές συνθήκες, καθιστά το σύστημα ευάλωτο σε περιπτώσεις διακοπής κρίσιμων συνδέσεων, με δυνητικά δυσανάλογες επιπτώσεις στη συνολική συνδεσιμότητα και στη συνέχεια των εμπορευματικών ροών.




**Σχήμα 1.1** Χάρτης σιδηροδρομικού δικτύου Ελλάδας (ΟΣΕ, 2026)

Ένα δίκτυο θεωρείται δομικά ευάλωτο όταν η διακοπή περιορισμένου αριθμού κρίσιμων στοιχείων του οδηγεί σε σημαντική μείωση της συνδεσιμότητας ή της ικανότητάς του να εξυπηρετεί μετακινήσεις και ροές, γεγονός που υποδηλώνει υψηλή εξάρτηση από συγκεκριμένους κόμβους ή άξονες (Kammouh et al., 2025). Σε περιπτώσεις αυξανόμενων ακραίων καιρικών φαινομένων, η αξιολόγηση της κρισιμότητας των υποδομών αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι φυσικές καταστροφές δύνανται να προκαλέσουν εκτεταμένες διακοπές, με άμεσες οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες.

Το ακραίο καιρικό φαινόμενο "πλημμύρα Daniel" (Σεπτέμβριος 2023) αποτέλεσε χαρακτηριστικό παράδειγμα διαταραχής μεγάλης κλίμακας, οδηγώντας σε σημαντικές βλάβες τμημάτων του βασικού σιδηροδρομικού άξονα και σε παρατεταμένη διακοπή της σύνδεσης μεταξύ Βόρειας και Νότιας Ελλάδας. Το γεγονός αυτό ανέδειξε την ανάγκη συστηματικής διερεύνησης της κρισιμότητας των βασικών συνδέσεων του δικτύου και της ικανότητάς του να διατηρεί λειτουργική συνέχεια υπό συνθήκες διαταραχής. Η χωρική κατανομή των ακραίων βροχοπτώσεων στην περιοχή της Θεσσαλίας αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.2.




**Σχήμα 1.2** Χωρική κατανομή του συνολικού ημερήσιου ύψους βροχής κατά την κακοκαιρία Daniel στην περιοχή της Θεσσαλίας (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Meteo, 2023)

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται σε αυτό το πλαίσιο προβληματισμού, επιχειρώντας να εξετάσει την κρισιμότητα των συνδέσεων του βασικού σιδηροδρομικού άξονα της χώρας μέσω εργαλείων θεωρίας δικτύων. Ειδικότερα, διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο η διακοπή κρίσιμων συνδέσεων επηρεάζει την αποδοτικότητα και τη συνολική συνδεσιμότητα του συστήματος, καθώς και ο βαθμός στον οποίο συγκεκριμένοι κόμβοι και τμήματα εμφανίζουν αυξημένη δομική κρισιμότητα.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε επικοινωνία με στέλεχος του σιδηροδρομικού τομέα, με στόχο την ποιοτική κατανόηση της λειτουργίας του δικτύου πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το φαινόμενο "Daniel". Η συζήτηση παρείχε επιχειρησιακή οπτική σχετικά με τις επιπτώσεις της διαταραχής, τους υφιστάμενους περιορισμούς, καθώς και τη σημασία της έγκαιρης αναγνώρισης και διαχείρισης

κρίσιμων σημείων του άξονα υπό συνθήκες αυξημένης αβεβαιότητας. Τα στοιχεία αυτά αξιοποιήθηκαν υποστηρικτικά στην ερμηνεία του πλαισίου και στην τεκμηρίωση της αναγκαιότητας της παρούσας ανάλυσης.

Η αναγνώριση και ποσοτικοποίηση των κρίσιμων στοιχείων του δικτύου συνιστά βασική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό στοχευμένων παρεμβάσεων ενίσχυσης της αποδοτκότητας. Η μετάβαση από μια εκ των υστέρων διαχείριση κρίσεων σε έναν προληπτικό εντοπισμό ευάλωτων σημείων αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη διασφάλιση της λειτουργικής συνέχειας των εμπορευματικών ροών και της εθνικής και διασυνοριακής συνδεσιμότητας.

## 1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της κρισιμότητας των επιμέρους συνδέσεων του βασικού σιδηροδρομικού άξονα Πειραιά–Θεσσαλονίκη μέσω εργαλείων ανάλυσης δικτύων, καθώς και η αξιολόγηση της επίδρασης της διακοπής συγκεκριμένων τμημάτων στη συνολική αποδοτικότητα του δικτύου.

Η ανάλυση βασίζεται στην τοπολογική αναπαράσταση του βασικού σιδηροδρομικού άξονα και στην εφαρμογή δεικτών ανάλυσης δικτύων, όπως ο δείκτης αποδοτικότητας δικτύου (network efficiency) και δείκτες κεντρικότητας, με στόχο την ποσοτικοποίηση του ρόλου κάθε κόμβου και σύνδεσης στη συνολική λειτουργία του συστήματος.

Η διερεύνηση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία υπό το πρίσμα της πρόσφατης διακοπής της σύνδεσης στον άξονα Πειραιά–Θεσσαλονίκη, κατόπιν του ακραίου καιρικού φαινομένου Daniel το 2023, κατά την οποία ανεστάλη πλήρως η σιδηροδρομική κυκλοφορία για σημαντικό χρονικό διάστημα και η επαναλειτουργία πραγματοποιήθηκε με περιορισμούς ταχύτητας και χωρητικότητας. Το γεγονός αυτό ανέδειξε την εξάρτηση του συστήματος από συγκεκριμένα τμήματα του άξονα και τις περιορισμένες δυνατότητες ανακατεύθυνσης των σιδηροδρομικών ροών λόγω έλλειψης εναλλακτικών διαδρομών.

Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία επιδιώκει:

- τον εντοπισμό των κρίσιμων κόμβων και συνδέσεων του εξεταζόμενου σιδηροδρομικού δικτύου,
- την ποσοτική αποτίμηση της μεταβολής της αποδοτικότητας του δικτύου σε σενάρια διακοπής επιμέρους τμημάτων,
- την ιεράρχηση της κρισιμότητας των συνδέσεων με βάση την επίδρασή τους στη συνολική απόδοση του συστήματος,
- τη συμβολή στην κατανόηση της δομικής συμπεριφοράς του σιδηροδρομικού άξονα υπό συνθήκες διαταραχής.

Τελικός στόχος της εργασίας δεν είναι η επιχειρησιακή διαχείριση των μεταφορικών ροών, αλλά η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η δομή του δικτύου επηρεάζει τη

συνολική λειτουργία του συστήματος, αναδεικνύοντας τα τμήματα των οποίων η διακοπή οδηγεί στη μεγαλύτερη υποβάθμιση της αποδοτικότητας του σιδηροδρομικού άξονα.

## 1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μια διαδοχική λογική: από το γενικό πλαίσιο του προβλήματος και τη διεθνή βιβλιογραφία, στη μεθοδολογία και την εφαρμογή της, και τέλος στη σύνθεση των αποτελεσμάτων και τη συζήτησή τους.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το πλαίσιο της μελέτης και η σημασία της αξιόπιστης λειτουργίας των σιδηροδρομικών υποδομών για τις εφοδιαστικές αλυσίδες, με έμφαση στον ελληνικό σιδηροδρομικό άξονα Πειραιάς–Θεσσαλονίκη. Παράλληλα, αποσαφηνίζονται ο σκοπός, οι στόχοι και τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 (Βιβλιογραφική ανασκόπηση) συγκεντρώνεται και συντίθεται η διεθνής γνώση που αφορά: (i) τον ρόλο των μεταφορών ως κρίσιμων υποδομών και τις διαστάσεις της κρισιμότητας, (ii) τις επιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων στη λειτουργία μεταφορικών δικτύων και στην εφοδιαστική αλυσίδα, (iii) τους μηχανισμούς διαχείρησης διαταραχών μέσω εναλλακτικών διαδρομών και αναδρομολόγησης (rerouting), καθώς και (iv) τις βασικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις αξιολόγησης αποδοτικότητας και ανθεκτικότητας. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ανάδειξη του ερευνητικού κενού, το οποίο καθοδηγεί την επιλογή της μεθοδολογίας και τον τρόπο εφαρμογής της παρούσας μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 3 (Μεθοδολογική προσέγγιση) περιγράφονται τα δεδομένα και η διαδικασία μοντελοποίησης του σιδηροδρομικού δικτύου, καθώς και το αναλυτικό πλαίσιο με το οποίο αξιολογείται η λειτουργία του υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες διαταραχής. Παρουσιάζονται τα βήματα της ανάλυσης, οι παραδοχές και τα κριτήρια που επιτρέπουν τη συγκρίσιμη αποτίμηση των δύο σεναρίων.

Στο Κεφάλαιο 4 (Ανάλυση και αποτελέσματα) εφαρμόζεται η μεθοδολογία στον βασικό σιδηροδρομικό άξονα, με εστίαση σε σενάρια διακοπών κρίσιμων συνδέσεων που σχετίζονται με το συμβάν "Daniel". Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης, εντοπίζονται τμήματα με αυξημένη δομική σημασία και αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο η δομή του δικτύου επηρεάζει τη λειτουργική του συνέχεια σε περιπτώσεις διαταραχών.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 (Συμπεράσματα και προτάσεις) επιχειρείται η συνολική αποτίμηση των ευρημάτων της εργασίας. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων, τόσο υπό κανονικές συνθήκες όσο και υπό το σενάριο διαταραχής που προκάλεσε το φαινόμενο Daniel, αναδεικνύει τον ρόλο της χωρικής και ιεραρχικής οργάνωσης του δικτύου στη διαμόρφωση της συνολικής του επίδοσης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με συζήτηση περιορισμών και προτάσεις που συμβάλλουν στην περαιτέρω ανάπτυξη εργαλείων

ποσοτικής αποτίμησης και στον σχεδιασμό πιο ανθεκτικών σιδηροδρομικών συστημάτων.

# 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

## 2.1 Εισαγωγή

Η διερεύνηση της αποδοτικότητας (efficiency) και της ανθεκτικότητας (resilience) των μεταφορικών συστημάτων απέναντι σε διαταραχές αποτελεί έναν κρίσιμο άξονα έρευνας (Kong et al., 2019, Ouyang et al., 2011). Τα δίκτυα μεταφορών δεν υποστηρίζουν μόνο την καθημερινή κίνηση αγαθών και ανθρώπων, αλλά διασφαλίζουν επίσης τη σταθερότητα των εφοδιαστικών αλυσίδων, την οικονομική ανάπτυξη και τη σύνδεση κρίσιμων παραγωγικών τομέων. Η λειτουργία τους είναι στενά συνδεδεμένη με την κοινωνική και οικονομική σταθερότητα, καθιστώντας την αξιολόγηση της αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητάς τους ιδιαίτερα σημαντική (Hosseini et al., 2021, Ouyang et al., 2011).

Η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση στοχεύει να παρουσιάσει με συστηματικό τρόπο τις βασικές προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς για την εκτίμηση της απόδοσης των μεταφορικών υποδομών και των logistics (Chalkiadakis et al., 2022). Η ανάλυση οργανώνεται σε θεματικές ενότητες που ακολουθούν μια λογική ροή: αρχικά εξετάζεται ο ρόλος των κρίσιμων υποδομών και των logistics στην Ευρώπη, τονίζοντας τη σημασία τους για την οικονομία και την κοινωνία. Στη συνέχεια αναλύονται οι επιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών στις μεταφορές, με στόχο να κατανοηθεί πώς οι υποδομές και τα δίκτυα επηρεάζονται και πώς η διαταραχή τους μπορεί να επηρεάσει ευρύτερα συστήματα. Έπειτα, η επισκόπηση εστιάζει στις στρατηγικές rerouting και στις εναλλακτικές διαδρομές, ως βασικά εργαλεία διαχείρισης κρίσεων, και υπογραμμίζει τη σημασία της πολυτροπικότητας και των κόμβων μεταφοράς για τη διατήρηση της ροής αγαθών σε περιόδους διαταραχής (Fialkoff et al., 2017, Hosseini et al., 2021). Τέλος, παρουσιάζονται οι βασικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητας των μεταφορικών δικτύων, ώστε να δημιουργηθεί ένα συνολικό πλαίσιο για την κατανόηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας και για τη σύνδεση με τη μελέτη περίπτωσης της παρούσας διπλωματικής.

Σκοπός αυτής της εισαγωγής είναι να θέσει τα θεμέλια για την ανάλυση που ακολουθεί, επιτρέποντας να γίνουν κατανοητές οι υπάρχουσες προσεγγίσεις, τα ευρήματα και τα κενά της διεθνούς βιβλιογραφίας, τα οποία η παρούσα εργασία εξετάζει στο πλαίσιο της πλημμύρας Daniel.

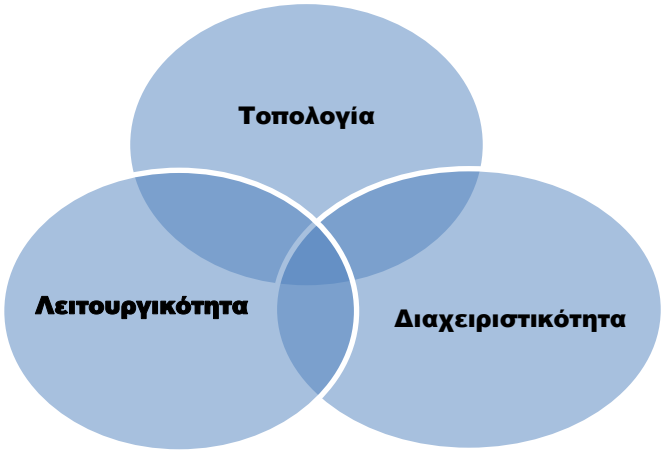
## 2.2 Μεταφορές και κρίσιμες υποδομές

Οι μεταφορές αποτελούν ουσιαστικό κορμό της σύγχρονης οικονομίας και κοινωνίας: μεταφέρουν πρώτες ύλες, τρόφιμα, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικά αγαθά, συνδέουν παραγωγικούς χώρους με αγορές και υποστηρίζουν την ομαλή λειτουργία εφοδιαστικών αλυσίδων που έχουν γεωγραφικά εκτεταμένο αντίκτυπο (Saundres et al., 2015). Στον τομέα των μεταφορών, ως κρίσιμες υποδομές μπορούν να θεωρηθούν

εκείνα τα στοιχεία του δικτύου που φέρουν ιδιαίτερη βαρύτητα για τη συνολική του λειτουργία. Η διακοπή ή δυσλειτουργία ενός τέτοιου κόμβου, συνδέσμου ή τερματικού σταθμού δεν επηρεάζει μόνο τοπικά την κυκλοφορία, αλλά δύναται να προκαλέσει ευρύτερες επιπτώσεις στο σύνολο του συστήματος, με συνέπειες που εκτείνονται πέρα από τον τομέα των μεταφορών και αγγίζουν την οικονομική και κοινωνική δραστηριότητα (Markolf et al., 2018, Ouyang et al., 2011). Στην πράξη η κρισιμότητα των υποδομών μπορεί να προσεγγιστεί μέσα από διαφορετικές οπτικές:

- **Τοπολογική ανάλυση:** Αναδεικνύει ποιοι κόμβοι ή συνδέσεις είναι κεντρικοί για τη συνολική συνδεσιμότητα, καθώς η απώλειά τους μπορεί να προκαλέσει δυσανάλογες επιπτώσεις στο σύστημα (Hosseini et al., 2021).
- **Λειτουργική διάσταση:** Σχετίζεται με τον όγκο της διακινούμενης ροής, τη χωρητικότητα των συνδέσεων και την ύπαρξη διαθέσιμων εναλλακτικών διαδρομών. Σε μελέτες για intermodal δίκτυα στις ΗΠΑ, έχει φανεί ότι η αποδοτικότητα της ροής και οι δυνατότητες rerouting αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη διατήρηση της ανθεκτικότητας σε περιόδους συμφόρησης ή διαταραχών (Hosseini et al., 2021).
- **Διαχειριστικότητα:** Αφορά τους πόρους που απαιτούνται για την προετοιμασία και αποκατάσταση μετά από μία διαταραχή. Στην πράξη, η λήψη αποφάσεων υπό καταστάσεις κρίσης λαμβάνει χώρα με σημαντικούς περιορισμούς σε χρόνο, χρηματοδότηση και διαθεσιμότητα υποδομών, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ενσωμάτωση αυτών των παραμέτρων στην ανάλυση (Fialkoff et al., 2017, Ouyang et al., 2015).

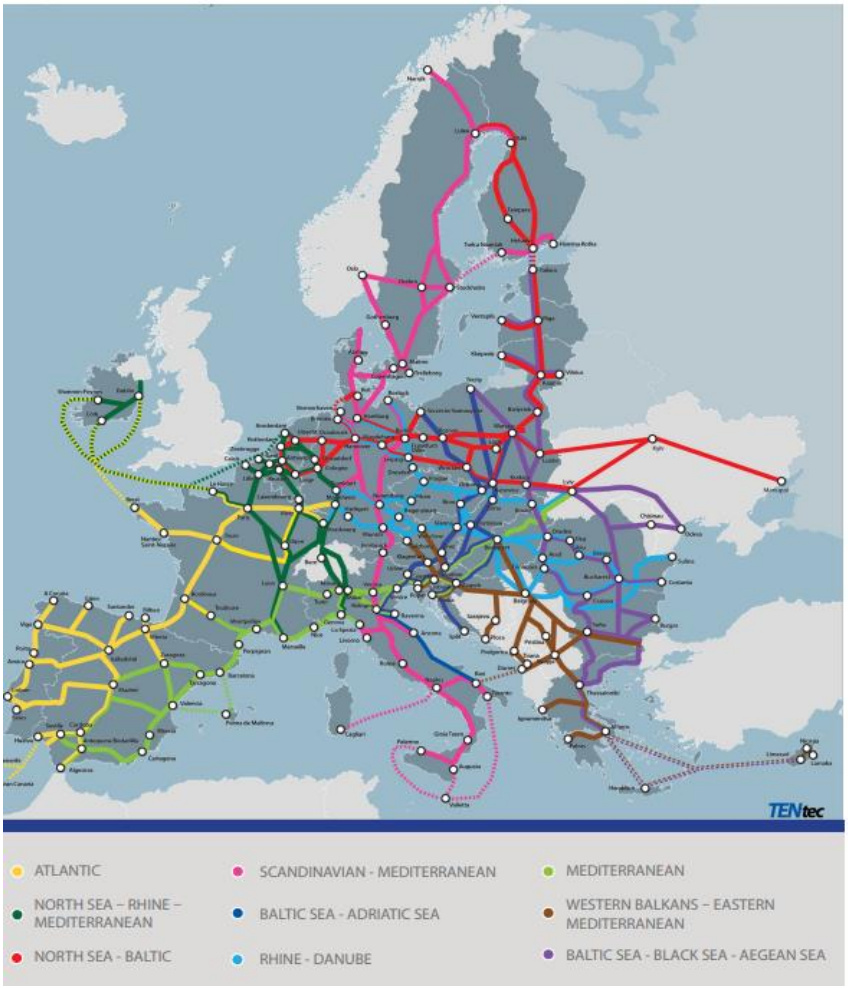
Οι παραπάνω προσεγγίσεις παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.1, όπου αποτυπώνεται η συμπληρωματική σχέση μεταξύ τοπολογικών, λειτουργικών και διαχειριστικών παραμέτρων στον προσδιορισμό της κρισιμότητας των υποδομών. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η ανάλυση κρισιμότητας προσεγγίζεται κυρίως από την τοπολογική διάσταση.




**Σχήμα 2.1** Συμπληρωματικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό της κρισιμότητας υποδομής

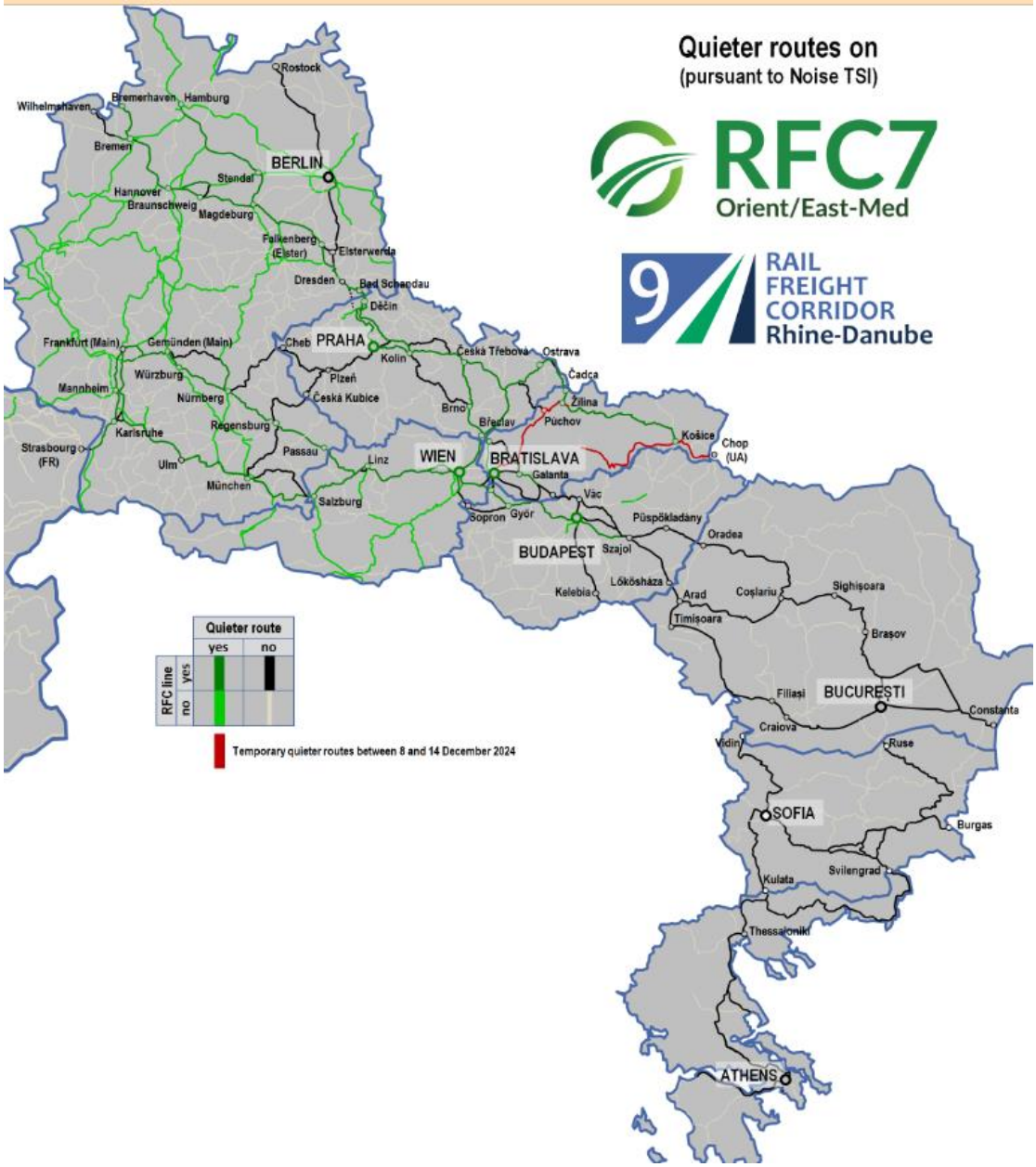
Συνεπώς, η διεθνής βιβλιογραφία προσεγγίζει την έννοια της κρίσιμης υποδομής μέσα από τις τρεις προαναφερόμενες κατευθύνσεις, γεγονός που φανερώνει ότι η κρισιμότητα δεν είναι μία στατική ιδιότητα αλλά αλλάζει ανάλογα με τη ζήτηση, την εποχικότητα, την ύπαρξη εναλλακτικών, και τους περιορισμούς πολιτικής ή νομικής φύσης. Η πρακτική συνέπεια είναι ότι η αξιολόγηση κρίσιμων υποδομών πρέπει να περιλαμβάνει (i) ανάλυση σε ηρεμία, (ii) σενάρια διαταραχής (π.χ. πλημμύρα, κλείσιμο κόμβου), και (iii) αξιολόγηση δράσεων αντιμετώπισης που μπορεί να μειώσουν την κρίσιμη επίδραση (Hosseini et al., 2021, Ibrahim et al., 2011).

Στην Ευρώπη, τα freight logistics οργανώνονται γύρω από δίκτυα και κόμβους που ενσωματώνονται στο διευρωπαϊκό πυρήνα (TEN-T). Η σύγκλιση θαλάσσιων διαδρόμων με σιδηροδρομικούς άξονες προς την ενδοχώρα είναι κεντρική για την εφοδιαστική δομή και την ανταγωνιστικότητα. Η χωρική διάρθρωση των βασικών ευρωπαϊκών διαδρόμων μεταφορών και η διασύνδεσή τους μέσω του δικτύου TEN-T απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2.




**Σχήμα 2.2** Απεικόνιση κύριων διαδρόμων Ευρωπαϊκής Ένωσης (TEN-T, 2025)

Ο Σιδηροδρομικός Εμπορευματικός Διάδρομος RFC7 (Orient/East-Med) αποτελεί έναν από τους βασικούς ευρωπαϊκούς διαδρόμους μεταφορών στο πλαίσιο του Διευρωπαϊκού Δικτύου Μεταφορών (TEN-T). Ο διάδρομος διασχίζει την Κεντρική και Νοτιοανατολική Ευρώπη, συνδέοντας χώρες της Κεντρικής Ευρώπης με λιμένες της Αδριατικής και της Ανατολικής Μεσογείου. Στο ελληνικό τμήμα του περιλαμβάνεται ο άξονας Πειραιάς–Θεσσαλονίκη–Ειδομένη, ο οποίος λειτουργεί ως βασική σιδηροδρομική πύλη διεθνών και διαμετακομιστικών εμπορευματικών ροών προς τα Βαλκάνια και την Κεντρική Ευρώπη. Η ένταξη του άξονα αυτού στον ευρωπαϊκό διάδρομο αναδεικνύει τη στρατηγική του σημασία στο ευρύτερο ευρωπαϊκό δίκτυο μεταφορών (Σχήμα 2.3).




**Σχήμα 2.3** Ο Σιδηροδρομικός Εμπορευματικός Διάδρομος RFC7 (Orient/East-Med) (RFC7, 2024)

Ταυτόχρονα, η βιβλιογραφία δείχνει ότι το κόστος επιλογής διαδρομών δεν είναι η μόνη παράμετρος: τα εξωτερικά κόστη, δηλαδή οι κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μεταφορικών δραστηριοτήτων που δεν ενσωματώνονται στο άμεσο χρηματικό κόστος, έχουν ουσιαστικό ρόλο στη συνολική αξιολόγηση διαδρομών, ειδικά σε πολυτροπικά σχήματα (Vukić et al., 2021). Η ανάλυση των Vukić & Kraemer (2021) επισημαίνει δύο κρίσιμες παρατηρήσεις που έχουν εφαρμογή στον ευρωπαϊκό σχεδιασμό: πρώτον, το θαλάσσιο σκέλος συχνά συνεισφέρει τη μεγαλύτερη μερίδα του

εξωτερικού κόστους στις συνδυασμένες θαλάσσιες–σιδηροδρομικές διαδρομές. Δεύτερον, το σιδηροδρομικό κόστος συνδέεται στενά με το μήκος της διαδρομής. Από αποφάσεις επιλογής λιμένα έως στρατηγικές συνδυασμένων δρομολογίων, αυτές οι εξαρτήσεις υπαγορεύουν ότι η βελτιστοποίηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη και οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια (Vukić et al., 2021).

Παράλληλα η, βιβλιογραφία υπενθυμίζει ότι εκτός από τεχνικούς περιορισμούς, οι νομικοί και θεσμικοί παράγοντες μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό εμπόδιο για την ευελιξία των μεταφορών σε κρίση. Το παράδειγμα που αναλύει η GIS-based μελέτη για το κλείσιμο του λιμένα New York-New Jersey μετά τον τυφώνα Sandy αναδεικνύει πως νομικοί περιορισμοί (Jones Act) έθεσαν στεγανά στις επιλογές short-sea shipping και σε άλλες εναλλακτικές λύσεις, περιορίζοντας την ταχύτητα και την αποτελεσματικότητα της απόκρισης (Fialkoff et al., 2017). Αυτό δείχνει ότι η σχεδίαση μέτρων προσαρμογής δεν μπορεί να παραβλέπει τη ρύθμιση, τις άδειες ή τα εμπόδια που καθορίζουν την ικανότητα rerouting.

Σε ευρωπαϊκό πλαίσιο, αν και η νομοθεσία διαφέρει από τις ΗΠΑ, το συμπέρασμα παραμένει: οι κανόνες ναυσιπλοΐας, οι τελωνειακές ρυθμίσεις, και οι δημόσιες συμβάσεις μπορεί να περιορίσουν ή να διευκολύνουν λύσεις έκτακτης ανάγκης. Από πρακτική σκοπιά, κάθε αξιολόγηση κρίσιμων υποδομών πρέπει να περιλαμβάνει ανάλυση ρυθμιστικών εμποδίων και δυνατότητες έκτακτης παρέμβασης.

Ωστόσο, η διερεύνηση της κρισιμότητας των υποδομών μεταφορών δεν μπορεί να περιοριστεί σε αφηρημένα μοντέλα ή θεωρητικές ασκήσεις καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις, κρίσιμες για την πραγματική επίλυση προβλημάτων. Αντ' αυτού, απαιτείται και η αποτύπωση του τρόπου με τον οποίο οι αλληλεξαρτήσεις εκδηλώνονται στην πράξη. Οι αλυσιδωτές επιπτώσεις μιας φυσικής καταστροφής μπορούν να αναδείξουν τις ευπάθειες του συστήματος με τρόπο που δύσκολα προκύπτει αποκλειστικά από προσομοιώσεις (Ouyang et al., 2015). Στο πλαίσιο αυτό, η διεθνής βιβλιογραφία επιχειρεί να συνδέσει τους παραπάνω άξονες με εμπειρικές μελέτες και παραδείγματα, τα οποία παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, οι υποδομές μεταφορών προσεγγίζονται συχνά ως σύνθετα συστήματα δικτύου, αποτελούμενα από κόμβους (π.χ. λιμένες, σταθμούς, τερματικούς κόμβους) και συνδέσμους (π.χ. σιδηροδρομικές γραμμές, οδικούς άξονες, θαλάσσιες διαδρομές), μέσω των οποίων διακινούνται ροές επιβατών και εμπορευμάτων. Στο πλαίσιο αυτό, η Θεωρία Δικτύων (Network Theory) παρέχει ένα αναλυτικό εργαλείο για την κατανόηση της δομής, της λειτουργίας και των αλληλεξαρτήσεων των στοιχείων του συστήματος, επιτρέποντας την αξιολόγηση της σημασίας επιμέρους κόμβων και συνδέσεων ως προς τη συνολική λειτουργία του δικτύου (Ouyang et al., 2015).

Παράλληλα, η ανθεκτικότητα (resilience) των δικτύων μεταφορών ορίζεται ως η ικανότητα ενός συστήματος να απορροφά διαταραχές, να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και να αποκαθιστά τη λειτουργικότητά του μετά από ακραία

γεγονότα ή αστοχίες, διατηρώντας αποδεκτά επίπεδα εξυπηρέτησης (Kong et al., 2019). Στις υποδομές μεταφορών, η έννοια αυτή συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητα του δικτύου να περιορίζει τις επιπτώσεις τοπικών βλαβών και να αποτρέπει τη διάχυση των διαταραχών στο σύνολο του συστήματος. Στην παρούσα εργασία, η λειτουργική συμπεριφορά του σιδηροδρομικού δικτύου εξετάζεται κυρίως υπό το πρίσμα της αποδοτικότητας, δηλαδή της ικανότητάς του να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα λειτουργικής απόδοσης υπό συνθήκες διαταραχής (Ouyang et al., 2011, Ouyang et al., 2015).

Συνολικά, η κρισιμότητα των υποδομών μεταφορών δεν μπορεί να αντιμετωπίζεται ως εγγενές χαρακτηριστικό μεμονωμένων στοιχείων, αλλά ως αποτέλεσμα της δυναμικής συμπεριφοράς και των αλληλεξαρτήσεων του συνολικού συστήματος (Ouyang et al., 2015). Σύγχρονες προσεγγίσεις ανάλυσης ανθεκτικότητας βασισμένες στη Θεωρία Δικτύων υπογραμμίζουν ότι η σημασία ενός κόμβου ή συνδέσμου προκύπτει από τον ρόλο του στη λειτουργική συνοχή του δικτύου, καθώς και από την ικανότητα του συστήματος να απορροφά, να προσαρμόζεται και να αποκαθίσταται μετά από διαταραχές (Kong et al., 2019).

Η ανάλυση της κρισιμότητας των μεταφορικών υποδομών αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν το σύστημα εκτίθεται σε εξωτερικές διαταραχές. Στο πλαίσιο αυτό, τα ακραία καιρικά φαινόμενα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες κινδύνου για τη λειτουργία των μεταφορικών δικτύων και εξετάζονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

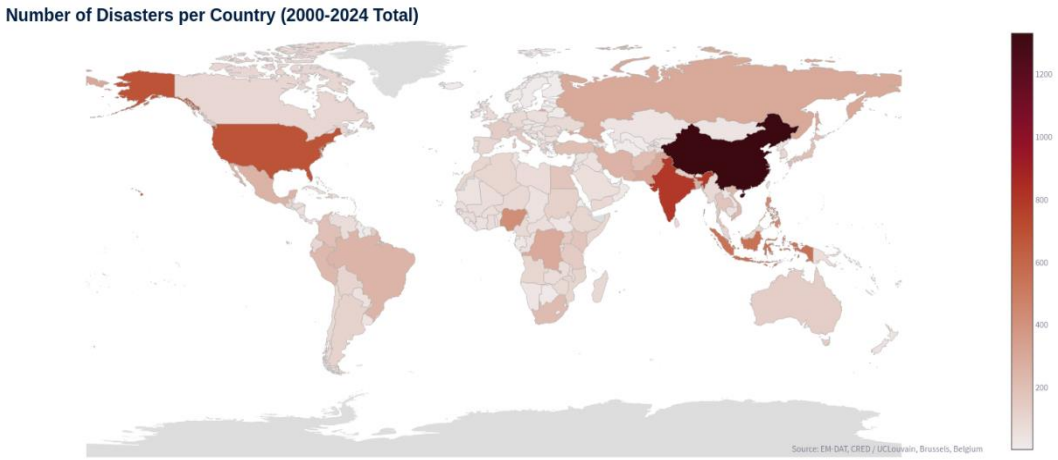
## 2.3 Επιρροή ακραίων καιρικών φαινομένων στις μεταφορές

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα αποτελούν κρίσιμο παράγοντα κινδύνου για τις μεταφορικές υποδομές σε παγκόσμιο επίπεδο, επηρεάζοντας τόσο τη λειτουργεία των κόμβων όσο και τη ροή των εμπορευμάτων (Hooks et al., 2011). Η συχνότητα και η ένταση τέτοιων φαινομένων αναμένεται να αυξηθεί λόγω της κλιματικής αλλαγής, καθιστώντας την κατανόηση των επιπτώσεών τους θεμελιώδη για λειτουργία των μεταφορικών δικτύων. Η χωρική κατανομή των ακραίων καιρικών φαινομένων σε παγκόσμιο επίπεδο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 Επιπλέον, πρόσφατη παγκόσμια ανάλυση των Liu et al. (2023) δείχνει ότι η κλιματική αλλαγή αναμένεται να αυξήσει σημαντικά την έκθεση των μεταφορικών υποδομών σε ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα, όπως οι έντονες βροχοπτώσεις, μειώνοντας τις περιόδους επαναφοράς γεγονότων που μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν σπάνια. Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι γεγονότα μεγάλης κλίμακας, όπως η κακοκαιρία Daniel, δεν αποτελούν μεμονωμένες ανωμαλίες αλλά εντάσσονται σε μια ευρύτερη τάση αυξανόμενης συχνότητας και έντασης ακραίων φαινομένων. Η εξέλιξη αυτή καθιστά επιτακτική την ανάγκη αξιολόγησης της λειτουργίας των μεταφορικών δικτύων και των κρίσιμων κόμβων τους υπό συνθήκες κλιματικής μεταβολής. Στην περίπτωση της καταιγίδας Daniel, η ακραία ένταση και διάρκεια των βροχοπτώσεων δεν αποτέλεσαν τυχαίο γεγονός. Σύμφωνα με τους Falaras et al. (2023), το φαινόμενο συνδέεται με

συνδυασμό ατμοσφαιρικών μηχανισμών μεγάλης κλίμακας, όπως η εμμονή συστημάτων χαμηλής πίεσης και η αυξημένη υγρασία στην κατώτερη τροπόσφαιρα, οι οποίοι ενισχύονται υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Η ανάλυση αυτή επιβεβαιώνει ότι παρόμοια επεισόδια ακραίων βροχοπτώσεων αναμένεται να εμφανίζονται συχνότερα στη Μεσόγειο, αυξάνοντας τη δομική έκθεση κρίσιμων υποδομών σε πλημμυρικούς κινδύνους.

Οι διακοπές που προκαλούνται δεν περιορίζονται μόνο στη φυσική ζημιά, αλλά έχουν δευτερογενείς επιπτώσεις όπως (Vukic et al., 2021):

- Αύξηση του κόστους μεταφοράς λόγω rerouting
- Καθυστερήσεις στις παραδόσεις εμπορευμάτων
- Αλυσιδωτές διαταραχές σε συνδεδεμένα δίκτυα intermodal
- Περιβαλλοντικές συνέπειες, ιδίως σε θαλάσσιες μεταφορές




**Σχήμα 2.4** Παγκόσμιος χάρτης ακραίων καιρικών φαινομένων (EM-DAT, 2025)

Η διεθνής βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι η ευπάθεια ενός κόμβου ή τμήματος του δικτύου μπορεί να επηρεάσει δυσανάλογα τη συνολική λειτουργία του συστήματος, αναδεικνύοντας τη σημασία της έγκαιρης αναγνώρισης κρίσιμων στοιχείων του δικτύου και της δυνατότητας διατήρησης της λειτουργικής συνέχειας των μεταφορικών υποδομών (Markolf et al., 2018).

Εμπειρικές μελέτες σε διαφορετικά γεωγραφικά πλαίσια επιβεβαιώνουν ότι η τρωτότητα των μεταφορικών δικτύων σε ακραία φαινόμενα εξαρτάται τόσο από τη δομή όσο και από την ύπαρξη εναλλακτικών διαδρομών. Στις ΗΠΑ, οι Hooks et al. (2011) ανέδειξαν την ευπάθεια των σιδηροδρομικών και intermodal υποδομών απέναντι σε διαταραχές μεγάλης κλίμακας. Τα βασικά ευρήματα της ανάλυσης δείχνουν ότι:

- Η διακοπή κρίσιμων τμημάτων οδηγεί σε αυξημένα κόστη rerouting και καθυστερήσεις

- Αλυσιδωτές επιπτώσεις σε δίκτυα intermodal, ιδίως όταν δεν υπάρχουν εναλλακτικές διαδρομές υψηλής χωρητικότητας
- Η λειτουργικότητα, η διαχειριστικότητα και η τοπολογία των κόμβων είναι κρίσιμες για την ανθεκτικότητα των δικτύων

Στην Ευρώπη, η μελέτη των Vukić & Kraemer (2021) ανέλυσε τις εξωτερικές επιβαρύνσεις σε intermodal διαδρομές από την Kiva προς την Κεντρική Ευρώπη μέσω διαφορετικών λιμένων. Κύρια ευρήματα:

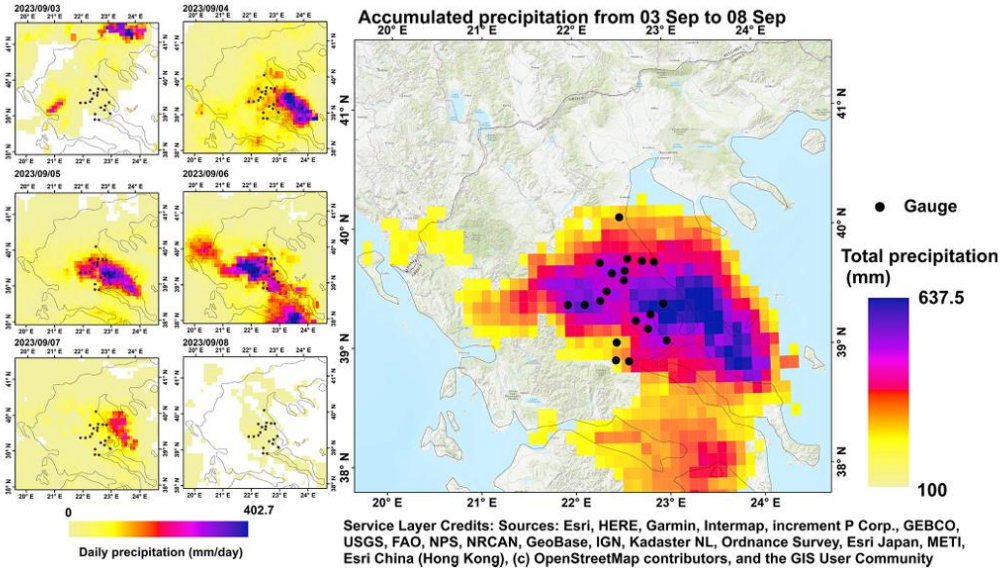
- Οι θαλάσσιες μεταφορές αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 83% των εξωτερικών δαπανών, υπογραμμίζοντας την ευπάθεια των λιμένων σε ακραία καιρικά φαινόμενα.
- Υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο πώς το κόστος και οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις εξαρτώνται από το μήκος διαδρομής, με τις μακρινές θαλάσσιες διαδρομές να δείχνουν μειωμένη ευαισθησία σε κόστος, αλλά αυξημένη σε εξωτερικές επιβαρύνσεις.
- Οι αντιθέσεις μεταξύ οικονομικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων δημιουργούν προκλήσεις στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Τα παραπάνω ευρήματα παρουσιάζονται συνοπτικά, ενώ η ποσοτική ανάλυση και η ερμηνεία τους με τη χρήση διαγραμμάτων αναπτύσσονται αναλυτικά στην υποενότητα 2.4.

Παράλληλα, οι διεθνείς μελέτες καταδεικνύουν διαφορετική επίδραση των ακραίων φαινομένων ανά τύπο υποδομής:

- **Σιδηροδρομικό δίκτυο:** Πλημμύρες και κατολισθήσεις προκαλούν εκτεταμένες διακοπές, με άμεσες οικονομικές και λειτουργικές συνέπειες (Hooks et al., 2011).
- **Λιμένες:** Καταιγίδες, υψηλή στάθμη θάλασσας και αναταραχή λιμανιών επηρεάζουν την ασφάλεια πλοίων και εμπορευμάτων, αυξάνοντας καθυστερήσεις και κόστος λειτουργίας (Vukić et al., 2021).

Στην Ελλάδα, χαρακτηριστική είναι η καταιγίδα Daniel στη Θεσσαλία τον Σεπτέμβριο του 2023, η οποία επιβεβαιώνει ότι ένα ακραίο γεγονός μπορεί να μετατραπεί σε συστημική διαταραχή μεταφορών (Diakakis et al., 2025). Το φαινόμενο Daniel εντάσσεται σε μια ευρύτερη κατηγορία πλημμυρικών καταστροφών υψηλής έντασης που έχουν παρατηρηθεί τα τελευταία έτη στον ελλαδικό χώρο. Η ένταση και η χωρική κατανομή των ακραίων βροχοπτώσεων στη Θεσσαλία κατά την περίοδο 3–8 Σεπτεμβρίου 2023 αποτυπώνονται στο Σχήμα 2.5.




**Σχήμα 2.5** Χωρική κατανομή των μετρήσεων και της ημερήσιας συσσωρευμένης βροχόπτωσης στην Θεσσαλία κατά την περίοδο 3-8 Σεπτεμβρίου (He et al., 2024)

Οι Diakakis et al. (2025) επισημαίνουν ότι τέτοιου τύπου γεγονότα χαρακτηρίζονται από συνδυασμό εκτεταμένης χωρικής επίδρασης, ταχείας εξέλιξης και περιορισμένων δυνατοτήτων άμεσης απόκρισης, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτες τις μεταφορικές και λοιπές κρίσιμες υποδομές. Η προσέγγιση αυτή αναδεικνύει ότι οι επιπτώσεις δεν περιορίζονται στην άμεση φυσική καταστροφή, αλλά επεκτείνονται στη λειτουργία των δικτύων και στη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Συγκεκριμένα, η κακοκαιρία προκάλεσε (He et al., 2024):

- **Εκτεταμένες πλημμύρες** (≈1150 km²) σε αγροτικές και αστικές περιοχές, με το 70% της έκτασης να αφορά γεωργική χρήση.
- **Καταστροφή καλλιεργειών** (π.χ. 282 km² βαμβάκι) και απώλεια ζωικού κεφαλαίου (>14.000 πτηνά, >21.500 αιγοπρόβατα), με άμεσες συνέπειες στην επισιτιστική αλυσίδα.
- **Σημαντικές βλάβες στις μεταφορικές υποδομές**, ιδίως στο σιδηροδρομικό δίκτυο που αποτελεί τον βασικό άξονα διασύνδεσης του λιμένα Πειραιά με την Κεντρική Ευρώπη.

Οι συνέπειες για τις μεταφορές ήταν:

- άμεση φθορά υποδομών
- ανάγκη για rerouting φορτίων μέσω εναλλακτικών διαδρομών
- πίεση σε κόμβους και λιμένες που δέχθηκαν μετατοπισμένες ροές
- καθυστερήσεις και αυξημένο κόστος για τους χρήστες των δικτύων.

Παράλληλα, σύμφωνα με δεδομένα της Eurostat, παρατηρείται αισθητή κάμψη των σιδηροδρομικών εμπορευματικών μεταφορών στην Ελλάδα κατά το τελευταίο τρίμηνο

του 2023, περίοδο που συμπίπτει χρονικά με τις επιπτώσεις του φαινομένου Daniel (Σχήμα 2.6).

**Σχήμα 2.6** Χρονική μεταβολή των σιδηροδρομικών εμπορευματικών ροών στην Ελλάδα (χιλιάδες τόνοι), βάσει τριμηνιαίων στοιχείων (Eurostat, 2026)

Οι παραπάνω παρατηρήσεις καταδεικνύουν ότι ένα ακραίο καιρικό φαινόμενο δεν πλήττει μόνο τις τοπικές κοινότητες, αλλά επηρεάζει ευρύτερα την αλυσίδα εφοδιασμού και τις διεθνείς ροές φορτίου. Η περίπτωση Daniel αποτελεί συνεπώς χειροπιαστό παράδειγμα της σημασίας που έχει η ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων στην αξιολόγηση της κρισιμότητας των υποδομών μεταφορών.

Συνοψίζοντας, η επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας και της περίπτωσης Daniel δείχνει ότι:

- Η αποδοτικότητα και η ανθεκτικότητα των μεταφορικών υποδομών εξαρτώνται άμεσα από την τοπολογία, λειτουργικότητα και διαχειριστικότητα των κόμβων (Kong et al., 2019, Hooks et al., 2011, Vukic et al., 2021, Fialkoff et al., 2017).
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών τρόπων μεταφοράς (intermodal) ενισχύει τις αλυσιδωτές συνέπειες διακοπών, ιδίως όταν δεν υπάρχουν επαρκείς εναλλακτικές διαδρομές (Hooks et al., 2011, Vukic et al., 2021, Kong et al., 2019).
- Η κατανόηση των επιπτώσεων ανά τύπο υποδομής είναι θεμελιώδης για τη στρατηγική προληπτικής διαχείρισης και τη βελτιστοποίηση διαδρομών (Vukic et al., 2021).

Από την επισκόπηση των ακραίων καιρικών φαινομένων προκύπτει ότι οι επιπτώσεις στις μεταφορικές υποδομές δεν περιορίζονται σε τοπικές βλάβες, αλλά συχνά εξελίσσονται σε συστημικές διαταραχές με ευρύτερες οικονομικές και λειτουργικές συνέπειες. Παρά τη σημαντική πρόοδο στη μελέτη των επιπτώσεων αυτών, η βιβλιογραφία σπάνια συνδυάζει ποσοτικούς δείκτες αποδοτικότητας με πραγματικά γεγονότα μεγάλης κλίμακας. Στο πλαίσιο αυτό, η κακοκαιρία Daniel αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία όχι απλώς ως περιγραφικό παράδειγμα, αλλά ως πραγματικό σενάριο διαταραχής για την αξιολόγηση της επίδρασης της διακοπής συγκεκριμένων τμημάτων στη συνολική αποδοτικότητα του σιδηροδρομικού δικτύου.

Οι παραπάνω επιπτώσεις καταδεικνύουν ότι η διακοπή κρίσιμων μεταφορικών υποδομών καθιστά αναγκαία την αναζήτηση μηχανισμών προσαρμογής, προκειμένου να περιοριστούν οι λειτουργικές και οικονομικές απώλειες. Ένας από τους βασικότερους μηχανισμούς που αναδεικνύονται στη βιβλιογραφία είναι η αναδρομολόγηση των ροών μέσω εναλλακτικών διαδρομών, η οποία αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

## 2.4 Εναλλακτικές διαδρομές και αναδρομολόγηση ως μηχανισμοί διαχείρισης διαταραχών

Η έννοια του rerouting (αναδρομολόγηση) στις μεταφορές αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία καθώς οι ακραίες φυσικές καταστροφές, οι γεωπολιτικές εξελίξεις και οι μεταβαλλόμενες οικονομικές συνθήκες δοκιμάζουν την αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητα των δικτύων. Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι η ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών διαδρομών δεν περιορίζεται σε περιπτώσεις καταστροφικών γεγονότων, αλλά συνδέεται γενικότερα με τη διατήρηση της λειτουργίας των αλυσίδων εφοδιασμού και της ανταγωνιστικότητας των λιμένων και των σιδηροδρομικών δικτύων (Vukic et al., 2021, Hosseini et al., 2021).

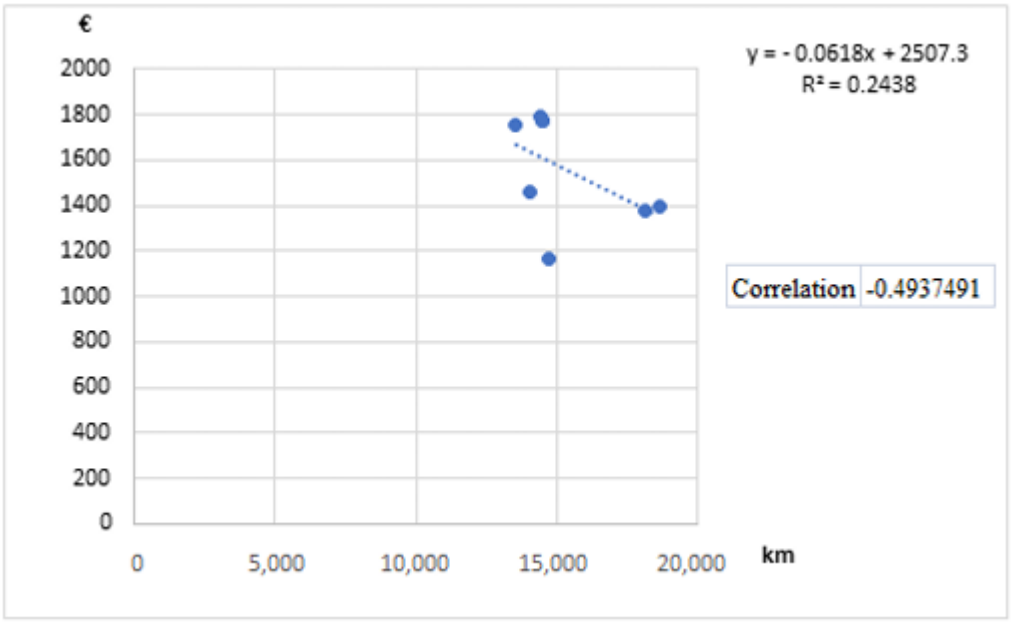
Στο πλαίσιο αυτό, οι ερευνητές έχουν εστιάσει σε τρεις βασικούς άξονες που συνδέονται με το rerouting:

- **Τα κόστη** που προκύπτουν από την επιλογή εναλλακτικών διαδρομών (Vukic et al., 2021, Fialkoff et al., 2017)

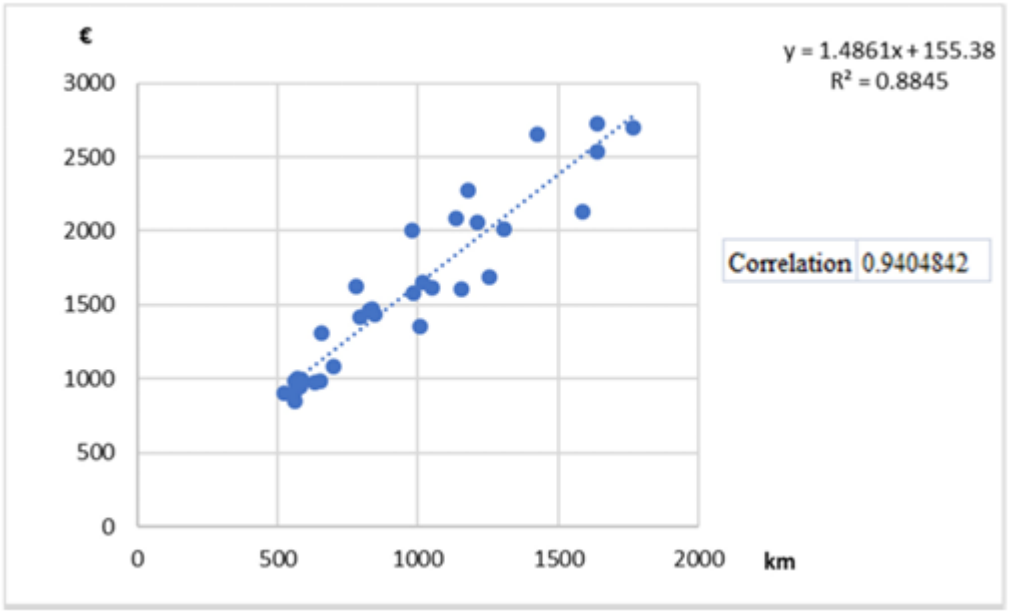
- **Η ανθεκτικότητα και αξιοπιστία** του δικτύου, δηλαδή ο βαθμός στον οποίο μπορεί να ανταποκριθεί σε ξαφνικές διαταραχές (Hosseini et al., 2021, Fialkoff et al., 2017)
- **Η συμβολή στη βιωσιμότητα και στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο**, αφού η επιλογή μιας διαδρομής δεν είναι ποτέ ουδέτερη ως προς τις εκπομπές και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον (Vukic et al., 2021)

Η μελέτη των Vukić & Kraemer (2021) προσθέτει μια ακόμη κρίσιμη διάσταση, δείχνοντας ότι η επιλογή εναλλακτικών διαδρομών δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στο κόστος μεταφοράς. Οι συγγραφείς αναλύουν συνδυασμένες θαλάσσιες–σιδηροδρομικές μεταφορές από την Ασία προς την Κεντρική Ευρώπη και διαπιστώνουν ότι το εξωτερικό κόστος της θαλάσσιας μεταφοράς αντιπροσωπεύει τουλάχιστον το 83% του συνολικού εξωτερικού κόστους. Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει ότι οι αποφάσεις rerouting, πέρα από οικονομικά κριτήρια, πρέπει να ενσωματώνουν και παραμέτρους εξωτερικού κόστους, όπως περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και κοινωνικές επιπτώσεις (π.χ. εκπομπές, ρύπανση, ατυχήματα), ιδίως σε μια Ευρώπη που δίνει έμφαση στη βιώσιμη ανάπτυξη και στη μείωση εκπομπών. Σε περιπτώσεις κρίσεων, όπου μια κύρια διαδρομή δεν είναι διαθέσιμη, η ανάγκη εξισορρόπησης κόστους, χρόνου και περιβαλλοντικού αντίκτυπου καθίσταται ακόμα πιο πιεστική.

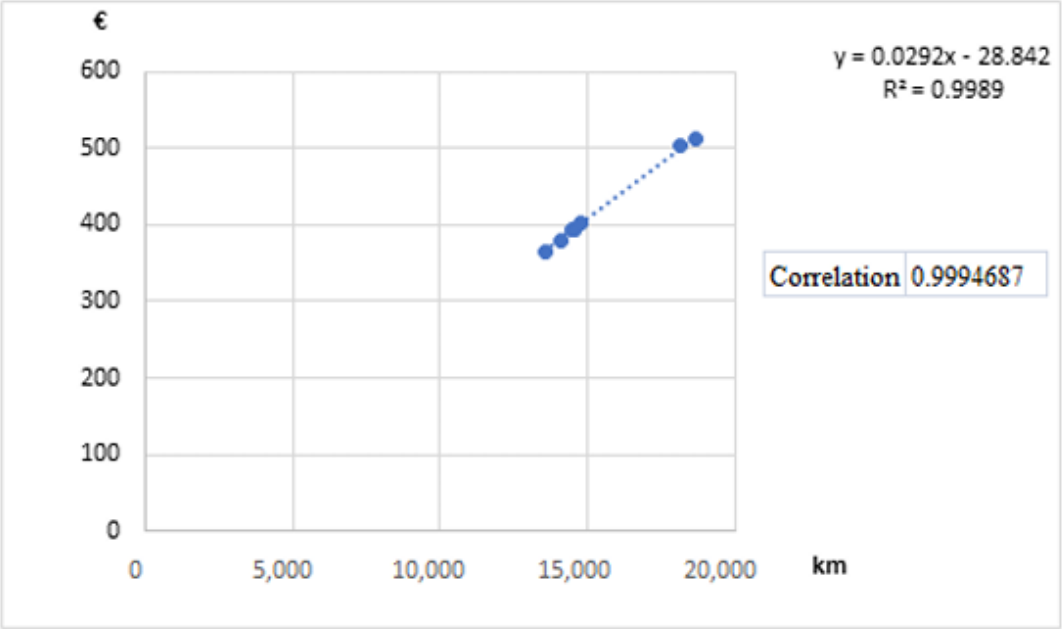
Παράλληλα, διαπιστώνουν ότι η εξάρτηση του εξωτερικού κόστους από το μήκος της διαδρομής είναι ιδιαίτερα έντονη για το σιδηροδρομικό σκέλος, ενώ για το θαλάσσιο σκέλος η σχέση αυτή είναι πιο ασαφής. Το φαινόμενο της αρνητικής συσχέτισης του κόστους θαλάσσιας μεταφοράς με το μήκος της διαδρομής εξηγείται, σύμφωνα με τους Vukić και Kraemer, από την προσπάθεια των φορέων να διατηρούν ανταγωνιστικότητα στις μεγαλύτερες γραμμές, επιδιώκοντας οικονομίες κλίμακας και αποδοτικότερη κατανομή του κόστους. Συνολικά, η ανάλυσή τους δείχνει ότι οι αποφάσεις για τη βέλτιστη διαδρομή δεν μπορούν να βασίζονται μόνο στην οικονομική αποδοτικότητα, αλλά απαιτούν ολοκληρωμένη θεώρηση που λαμβάνει υπόψη τόσο τις οικονομικές όσο και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτά τα ευρήματα έχουν άμεση σημασία για τη συζήτηση περί rerouting: σε περιπτώσεις όπου μια κύρια σιδηροδρομική σύνδεση διακόπτεται, η επιλογή εναλλακτικών διαδρομών πρέπει να εξετάζει τόσο το κόστος όσο και τις περιβαλλοντικές συνέπειες. Τα Σχήματα 2.7–2.10 απεικονίζουν την εξάρτηση του κόστους και των εξωτερικών επιβαρύνσεων από το μήκος της διαδρομής, επιβεβαιώνοντας ότι οι οικονομικές και περιβαλλοντικές παράμετροι δεν μεταβάλλονται πάντα γραμμικά, και συχνά οδηγούν σε αντικρουόμενα κριτήρια επιλογής διαδρομής.



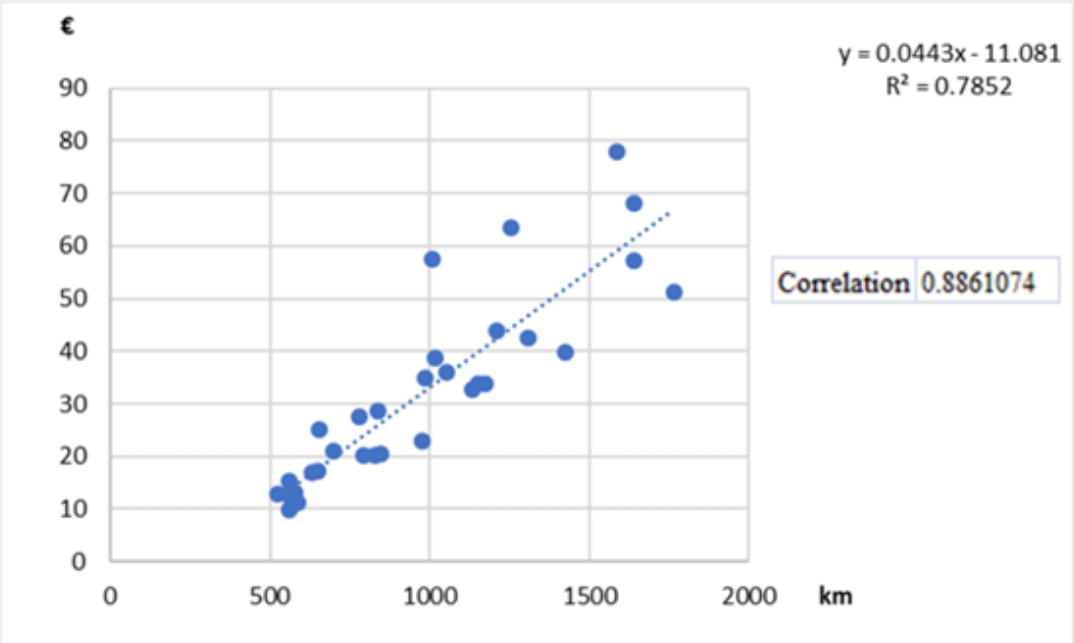

**Σχήμα 2.7** Ανάλυση της εξάρτησης του κόστους θαλάσσιας μεταφοράς από το μήκος της διαδρομής (Vukić et al., 2021)




**Σχήμα 2.8** Ανάλυση της εξάρτησης του κόστους σιδηροδρομικής μεταφοράς από το μήκος της διαδρομής (Vukić et al., 2021)




**Σχήμα 2.9** Ανάλυση της εξάρτησης του εξωτερικού κόστους θαλάσσιας μεταφοράς από το μήκος της διαδρομής (Vukić et al., 2021)




**Σχήμα 2.10** Ανάλυση της εξάρτησης του εξωτερικού κόστους σιδηροδρομικής μεταφοράς από το μήκος της διαδρομής (Vukić et al., 2021)

Σύμφωνα με την ίδια μελέτη, η ανταγωνιστικότητα των ευρωπαϊκών λιμένων εξαρτάται από την ικανότητά τους να προσφέρουν αποδοτικές εναλλακτικές διαδρομές υπό την προϋπόθεση επαρκούς χωρητικότητας (Hosseini et al., 2021). Όταν ένα γεγονός διαταράσσει την κύρια σιδηροδρομική γραμμή (π.χ. Πειραιάς – Κεντρική Ευρώπη), οι μεταφορείς πρέπει να αναζητήσουν άλλες επιλογές, όπως:

- Χρήση διαφορετικού θαλάσσιου λιμένα εισόδου (π.χ. Θεσσαλονίκη αντί Πειραιά)
- Στροφή σε συνδυασμένη μεταφορά με αυξημένο μερίδιο οδικής μεταφοράς
- Αξιοποίηση εναλλακτικών σιδηροδρομικών αξόνων μέσω Βαλκανίων ή Ανατολικής Ευρώπης

Συμπερασματικά, το rerouting συνδέεται με την αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητα των δικτύων μεταφορών. Όσο περισσότερες εναλλακτικές υφίστανται, τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα προσαρμογής σε απρόβλεπτες συνθήκες.

Η διεθνής βιβλιογραφία παρέχει σαφή παραδείγματα για το πώς το rerouting εφαρμόζεται σε συνθήκες κρίσης και πώς οι περιορισμοί –τεχνικοί, θεσμικοί ή περιβαλλοντικοί– επηρεάζουν την αποτελεσματικότητά του. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά είναι η περίπτωση του τυφώνα Sandy στις Ηνωμένες Πολιτείες. Όπως αναδεικνύουν οι Fialkoff et al. (2017), το κλείσιμο του λιμένα της Νέας Υόρκης και του Νιου Τζέρσεϋ μετά την καταστροφή οδήγησε στην ανάγκη αναδρομολόγησης των εμπορευματικών ροών μέσω άλλων θαλάσσιων και χερσαίων διαδρομών. Ωστόσο, η εφαρμογή του αμερικανικού νόμου Jones Act περιόρισε δραστικά την ευελιξία του συστήματος, καθώς απαγόρευε τη χρήση ξένων πλοίων σε εσωτερικές μεταφορές μεταξύ αμερικανικών λιμένων. Η περίπτωση αυτή ανέδειξε ότι ακόμη και όταν υπάρχουν φυσικά διαθέσιμες εναλλακτικές, οι θεσμικοί περιορισμοί μπορούν να καταστήσουν δυσλειτουργική την αναδρομολόγηση, αποκαλύπτοντας έτσι τη στενή διασύνδεση μεταξύ τεχνικών και νομικών παραμέτρων.

Εξίσου σημαντική είναι η συμβολή των μοντέλων βελτιστοποίησης στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί το rerouting σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα. Στη μελέτη των Hosseini et al. (2021) εξετάζεται ένα intermodal δίκτυο στις Ηνωμένες Πολιτείες, το οποίο συνδυάζει οδικούς, σιδηροδρομικούς και πλωτούς άξονες. Οι συγγραφείς αναπτύσσουν ένα μοντέλο που εντοπίζει τις κρίσιμες υποδομές και προσομοιώνει την απόδοση του συστήματος σε περίπτωση αστοχίας συνδέσμων. Ένα από τα βασικά ευρήματα είναι ότι τα intermodal terminals αποτελούν συχνά τα πιο ευάλωτα σημεία του συστήματος, καθώς η συμφόρηση που δημιουργείται σε αυτά μπορεί να ακυρώσει την αποτελεσματικότητα μιας εναλλακτικής διαδρομής. Έτσι, το rerouting δεν είναι μόνο θέμα ύπαρξης γεωγραφικών παρακάμψεων, αλλά και της λειτουργικής δυνατότητας των κόμβων να απορροφήσουν επιπλέον ροές σε συνθήκες κρίσης.

Τέλος, η εμπειρία της Ελλάδας με την καταιγίδα Daniel δείχνει στην πράξη τις προκλήσεις του rerouting. Η πλημμύρα του Σεπτεμβρίου 2023 προκάλεσε ζημιές άνευ

προηγουμένου στη Θεσσαλία, με συνολικά 1.150 km² πλημμυρισμένα και 70% της έκτασης αυτής να αποτελεί αγροτική γη (He et al., 2024). Αν και η μελέτη επικεντρώνεται κυρίως στις γεωργικές επιπτώσεις, η γεωγραφική θέση της καταστροφής στο κέντρο της βασικής σιδηροδρομικής αρτηρίας Αθήνας–Θεσσαλονίκης είχε άμεσες συνέπειες στις εμπορευματικές μεταφορές. Η έλλειψη εσωτερικών εναλλακτικών στο ελληνικό δίκτυο καθιστούσε αναγκαία την αναδρομολόγηση μέσω θαλάσσιων διαδρόμων προς λιμένες της Αδριατικής (Κόπερ, Ριέκα, Τεργέστη, Γένοβα) και από εκεί μέσω σιδηροδρομικών συνδέσεων προς την Κεντρική Ευρώπη.

Η σημασία του rerouting στην Ευρώπη συνδέεται στενά με τον ρόλο των λιμένων της Αδριατικής ως εναλλακτικών πυλών εισόδου προς την Κεντρική Ευρώπη. Όπως επισημαίνουν οι Vukić και Kraemer (2021), λιμένες όπως η Κόπερ, η Ριέκα, η Τεργέστη και η Γένοβα λειτουργούν όχι μόνο ως ανταγωνιστικά σημεία εισόδου, αλλά και ως στρατηγικές εφεδρείες σε περίπτωση που η κύρια ροή μέσω Πειραιά διακοπεί. Το γεγονός ότι οι λιμένες αυτοί συνδέονται απευθείας με το ευρωπαϊκό σιδηροδρομικό δίκτυο τους καθιστά ικανούς να αναλάβουν σημαντικό όγκο εμπορευματικών ροών σε συνθήκες κρίσης. Η ανάλυση των Vukić και Kraemer (2021) δείχνει ότι η επιλογή ενός από αυτούς τους κόμβους για rerouting δεν είναι ουδέτερη ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ειδικότερα, η σιδηροδρομική σύνδεση που ακολουθεί μετά τη θαλάσσια μεταφορά επηρεάζει καθοριστικά τόσο το συνολικό κόστος όσο και το εξωτερικό κόστος της διαδρομής. Για παράδειγμα, ενώ η θαλάσσια διαδρομή προς την Τεργέστη ενδέχεται να είναι πιο σύντομη, το σιδηροδρομικό σκέλος προς την Κεντρική Ευρώπη μπορεί να παρουσιάζει υψηλότερο κόστος ανά χιλιόμετρο. Αντίθετα, μια μεγαλύτερη θαλάσσια διαδρομή προς τη Γένοβα μπορεί να εξισορροπεί το συνολικό εξωτερικό κόστος λόγω καλύτερης εκμετάλλευσης οικονομιών κλίμακας.

Επιπλέον, οι Hosseini et al. (2021) αναδεικνύουν μέσω του μοντέλου τους ότι η συμφόρηση στους intermodal terminals αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχία του rerouting. Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση των λιμένων της Αδριατικής, οι οποίοι, αν και έχουν ενισχυθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, διαθέτουν περιορισμένη χωρητικότητα σε σχέση με τον Πειραιά. Επομένως, η δυνατότητα τους να λειτουργήσουν ως αξιόπιστες εναλλακτικές εξαρτάται όχι μόνο από τη γεωγραφική τους θέση, αλλά και από το κατά πόσο μπορούν να απορροφήσουν ξαφνικές αυξήσεις φορτίου χωρίς να καταρρεύσει η λειτουργικότητά τους.

Η ανθεκτικότητα του ευρωπαϊκού συστήματος μεταφορών, όπως καταδεικνύουν οι Fialkoff et al. (2017), δεν είναι μόνο τεχνικό ζήτημα, αλλά και θεσμικό. Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, οι διασυνοριακές ροές εξαρτώνται από κανόνες και συμφωνίες που ενδέχεται να καθυστερήσουν ή να περιπλέξουν την ενεργοποίηση rerouting. Αντίστοιχα, η περίπτωση της καταιγίδας Daniel στην Ελλάδα (He et al., 2024, Diakakis et al., 2025) έδειξε ότι η έλλειψη εσωτερικών εναλλακτικών στο εθνικό δίκτυο καθιστά τη χώρα εξαιρετικά εξαρτημένη από διεθνείς κόμβους. Η αναγκαστική μετατόπιση των ροών σε λιμένες της Αδριατικής απέδειξε τη στρατηγική σημασία τους, αλλά και τους κινδύνους

που συνεπάγεται η υπερβολική συγκέντρωση φορτίων σε υποδομές που ήδη λειτουργούν κοντά στα όρια τους.

Συνολικά, τα παραδείγματα αυτά αναδεικνύουν ότι το rerouting στην Ευρώπη είναι μια διαδικασία πολυδιάστατη που συνδυάζει:

- **Γεωγραφικούς παράγοντες**, δηλαδή τη δυνατότητα των λιμένων της Αδριατικής να λειτουργήσουν ως εναλλακτικές πύλες εισόδου (Vukic et al., 2021)
- **Λειτουργικούς παράγοντες**, όπως η χωρητικότητα των terminals και η διαθεσιμότητα σιδηροδρομικών συνδέσεων (Vukic et al., 2021, Hosseini et al., 2021)
- **Περιβαλλοντικούς παράγοντες**, καθώς η επιλογή κάθε διαδρομής έχει διαφορετικό αποτύπωμα στο συνολικό εξωτερικό κόστος (Vukic et al., 2021)
- **Θεσμικούς παράγοντες**, που καθορίζουν την ταχύτητα και την αποτελεσματικότητα με την οποία μπορεί να εφαρμοστεί το rerouting (Fialkoff et al., 2017)

Η ελληνική περίπτωση της καταιγίδας Daniel έρχεται να επιβεβαιώσει τις θεωρητικές παρατηρήσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας: όταν το εσωτερικό δίκτυο δεν διαθέτει επαρκείς εφεδρικές επιλογές, η αποδοτικότητα και η ανθεκτικότητα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από διεθνείς παρακαμπτήριους διαδρόμους και την δυνατότητα διεθνών κόμβων να απορροφήσουν τις ροές. (Diakakis et al., 2025). Το γεγονός αυτό αναδεικνύει όχι μόνο τη σημασία του rerouting, αλλά και την ανάγκη σχεδιασμού του σε στρατηγικό επίπεδο, με έμφαση στην πολυτροπικότητα, στη διασύνδεση και στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

## 2.5 Μεθοδολογικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας και ανθεκτικότητας στις μεταφορές

Η αποδοτικότητα και η ανθεκτικότητα αποτελούν δύο βασικές διαστάσεις στη μελέτη των δικτύων μεταφορών. Η αποδοτικότητα αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος να αξιοποιεί τους διαθέσιμους πόρους ώστε να επιτυγχάνει το μέγιστο δυνατό αποτέλεσμα με το χαμηλότερο δυνατό κόστος, χρόνο ή κατανάλωση ενέργειας (Mattsson et al., 2015). Αντίθετα, η ανθεκτικότητα σχετίζεται με την ικανότητα του ίδιου συστήματος να αντέχει σε εξωτερικές διαταραχές, να περιορίζει τις αρνητικές τους συνέπειες και να επανέρχεται σε αποδεκτό επίπεδο λειτουργίας μετά από μια κρίση ή φυσική καταστροφή (Camillaro et al.,2010, Mattsson et al., 2015).

Η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στις εμπορευματικές μεταφορές, όπου μια υποδομή μπορεί να είναι εξαιρετικά αποδοτική σε κανονικές συνθήκες, αλλά ταυτόχρονα ευάλωτη σε απρόβλεπτα γεγονότα (Pant et al.,2014, Fialkoff et al., 2017). Αντίστροφα, ένα λιμάνι ή ένα σιδηροδρομικό δίκτυο μπορεί να παρουσιάζει υψηλή

ανθεκτικότητα, προσφέροντας εναλλακτικές λύσεις σε περιπτώσεις κρίσης, αλλά να υστερεί σε καθημερινή αποδοτικότητα. Για τον λόγο αυτό, η διεθνής βιβλιογραφία αντιμετωπίζει την αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητα ως συμπληρωματικές αλλά διακριτές διαστάσεις, οι οποίες πρέπει να αξιολογούνται παράλληλα κατά τον σχεδιασμό και τη διαχείριση δικτύων μεταφορών (Mattsson et al., 2015).

Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντάμε ένα ευρύ φάσμα μεθοδολογικών προσεγγίσεων που επιχειρούν να αποτυπώσουν πτυχές της αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητας των δικτύων. Οι προσεγγίσεις αυτές δεν είναι αντικρουόμενες, αντίθετα λειτουργούν συμπληρωματικά, ανάλογα με το ερώτημα που τίθεται και τα διαθέσιμα δεδομένα (Mattsson et al., 2015).

Μια κατηγορία μεθοδολογιών βασίζεται σε **μοντέλα βελτιστοποίησης**, τα οποία διατυπώνουν το πρόβλημα σε όρους μαθηματικού προγραμματισμού, με στόχο την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε συνθήκες περιορισμένων πόρων ή υπό σενάρια διαταραχών. Τέτοιες προσεγγίσεις επιτρέπουν τον συνδυασμό παραμέτρων, όπως το κόστος, ο χρόνος μεταφοράς και η διαθεσιμότητα των διαδρομών, προκειμένου να εντοπιστούν οι πιο κρίσιμες ακμές και οι αποδοτικότερες στρατηγικές rerouting (Hosseini et al., 2021). Το πλεονέκτημα τους είναι η ακρίβεια και η δυνατότητα συστηματικής αξιολόγησης διαφορετικών σεναρίων. Ωστόσο, απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων και είναι συχνά δύσχρηστα σε μεγάλα δίκτυα, γεγονός που περιορίζει την πρακτική τους εφαρμογή.

Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί **ευρετικές μέθοδοι**, οι οποίες βασίζονται σε αλγοριθμικές προσεγγίσεις χαμηλότερης υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Σε αντίθεση με τα αυστηρά μοντέλα βελτιστοποίησης, οι ευρετικοί αλγόριθμοι αποσκοπούν σε γρήγορες και ικανοποιητικές -αν και όχι πάντα βέλτιστες-λύσεις. Ενδεικτική είναι η μελέτη των Jenelius και Mattsson (2015), όπου αναπτύχθηκε μια ευρετική μέθοδος για την εκτίμηση της ευαλωτότητας (vulnerability) δικτύων μέσω της προσομοίωσης αποτυχίας συνδέσμων. Το βασικό πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η ταχύτητα και η δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλα δίκτυα, ενώ το βασικό μειονέκτημα είναι ότι τα αποτελέσματα μπορεί να είναι λιγότερο ακριβή και να εξαρτώνται από τις παραδοχές του μοντέλου.

Μια τρίτη κατηγορία είναι οι **στοχαστικές προσεγγίσεις και οι μέθοδοι προσομοίωσης**, οι οποίες ενσωματώνουν την αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τα πραγματικά συστήματα μεταφορών. Μέσα από σενάρια, όπως φυσικές καταστροφές ή ξαφνικές διακοπές λειτουργίας, προσομοιώνεται η αντίδραση του δικτύου και αξιολογείται η αποδοτικότητα και η ανθεκτικότητά του. Η μελέτη των Hooks et al. (2011) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα, καθώς χρησιμοποιεί στοχαστική προσομοίωση για να εκτιμήσει τη μέγιστη αποδοτικότητα ενός δικτύου και να καθορίσει τις βέλτιστες ενέργειες προετοιμασίας και αποκατάστασης. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η ρεαλιστική ενσωμάτωση της αβεβαιότητας, ωστόσο, απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ και εξειδικευμένα δεδομένα για να είναι αποτελεσματική.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι **εμπειρικές και αναλυτικές προσεγγίσεις**, οι οποίες εστιάζουν κυρίως σε συγκεκριμένα δίκτυα ή μελέτες περίπτωσης. Στη μελέτη των Vukić και Kraemer (2021), για παράδειγμα, δίνεται έμφαση στην ανάλυση κόστους και εξωτερικού κόστους διαφορετικών συνδυασμένων διαδρομών, με στόχο την κατανόηση του πώς η επιλογή μιας εναλλακτικής πορείας μπορεί να επηρεάσει τόσο την οικονομική αποδοτικότητα όσο και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Αν και οι προσεγγίσεις αυτές δεν έχουν τον γενικευτικό χαρακτήρα των μαθηματικών μοντέλων, παρέχουν πολύτιμα στοιχεία για το πώς λειτουργούν στην πράξη οι διαδικασίες rerouting και ποια εμπόδια τίθενται από θεσμικούς, οικονομικούς ή γεωγραφικούς παράγοντες.

## 2.6 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας και ερευνητικό κενό

Η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας ανέδειξε τη σημασία των κρίσιμων υποδομών μεταφορών και ιδιαίτερα στις εμπορευματικές μεταφορές για την οικονομική σταθερότητα και τη λειτουργία των εφοδιαστικών αλυσίδων. Η έννοια της κρισιμότητας συνδέεται με διαφορετικές διαστάσεις – τοπολογικές, λειτουργικές και διαχειριστικές – οι οποίες είναι συμπληρωματικές, σκιαγραφώντας το περίπλοκο πλαίσιο μέσα στο οποίο λειτουργούν οι υποδομές (Fialkoff et al., 2017, Mattsson et al., 2015).

Παράλληλα, αναδείχθηκε ότι οι ακραίες φυσικές καταστροφές, όπως πλημμύρες και τυφώνες, έχουν άμεσο και σοβαρό αντίκτυπο στις μεταφορές, προκαλώντας διακοπές, αυξημένο κόστος και αλυσιδωτές επιπτώσεις σε άλλους κρίσιμους τομείς. Διεθνείς μελέτες έχουν καταγράψει ποσοτικά τις επιπτώσεις αυτών των φαινομένων (Pant et al. 2014), ενώ στην ελληνική περίπτωση η καταιγίδα Daniel προσέφερε ένα πρόσφατο και χαρακτηριστικό παράδειγμα μεγάλης διαταραχής, με σημαντικές επιπτώσεις στις σιδηροδρομικές υποδομές και την ανάγκη για αναδρομολόγηση μέσω εναλλακτικών θαλάσσιων αξόνων (He et al., 2024, Diakakis et al., 2025).

Η ανάλυση του rerouting κατέδειξε ότι η αναζήτηση εναλλακτικών διαδρομών αποτελεί κρίσιμη παράμετρο αποδοτικότητας και ανθεκτικότητας, αλλά συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Αυτές σχετίζονται τόσο με το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος, όσο και με θεσμικούς ή τεχνικούς περιορισμούς (Fialkoff et al., 2017). Τα ευρήματα δείχνουν ότι οι αποφάσεις δεν μπορούν να λαμβάνονται με βάση αποκλειστικά το κόστος, αλλά απαιτούν μια ολοκληρωμένη θεώρηση που συνυπολογίζει την αξιοπιστία, τη βιωσιμότητα και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο (Vukic et al., 2021).

Τέλος, η βιβλιογραφία ανέδειξε ένα πλούσιο φάσμα μεθοδολογικών εργαλείων για την αποτίμηση της αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητας. Από μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης και ευρετικούς αλγόριθμους έως στοχαστικές προσομοιώσεις και αναλύσεις κόστους, κάθε προσέγγιση προσφέρει διαφορετικές δυνατότητες και περιορισμούς, αναδεικνύοντας την πολυπλοκότητα του αντικειμένου.

Παρά την αξιοσημείωτη ανάπτυξη της διεθνούς βιβλιογραφίας γύρω από την αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητα των δικτύων μεταφορών, εντοπίζονται ακόμη σημαντικά κενά. Ένα πρώτο ζήτημα αφορά τη γεωγραφική εστίαση των μελετών. Μεγάλο μέρος της ερευνητικής παραγωγής αφορά περιπτώσεις από τις Ηνωμένες Πολιτείες (π.χ. τυφώνας Sandy, εκτεταμένες διακοπές σε σιδηροδρομικά δίκτυα), ενώ η Ευρώπη αντιπροσωπεύεται περιορισμένα και συνήθως μέσω γενικών αναφορών. Ο Ελληνικός χώρος, παρά τη στρατηγική του σημασία ως πύλη εμπορίου προς την Κεντρική Ευρώπη, παραμένει σε μεγάλο βαθμό ερευνητικά αχαρτογράφητος. Αυτό σημαίνει ότι απουσιάζει συστηματική καταγραφή των ιδιαιτεροτήτων που συνδέονται με τα βαλκανικά και μεσογειακά δίκτυα, αλλά και με την πολυπλοκότητα της ελληνικής γεωμορφολογίας, η οποία αυξάνει την ευαλωτότητα σε ακραία φαινόμενα.

Δεύτερον, παρατηρείται έλλειψη ισορροπίας μεταξύ θεωρίας και πράξης. Πολλές μελέτες αναπτύσσουν μεθοδολογικά εργαλεία υψηλής πολυπλοκότητας, όπως αλγοριθμικά μοντέλα βελτιστοποίησης ή στοχαστικά προγράμματα (π.χ. Hosseini et al., 2021), χωρίς όμως να παρέχουν επαρκή παραδείγματα εφαρμογής σε πραγματικές κρίσεις. Η ασυμμετρία αυτή οδηγεί σε μια βιβλιογραφία πλούσια σε θεωρητικές συνεισφορές αλλά φτωχή σε εμπειρικά δεδομένα, με αποτέλεσμα να μην είναι ξεκάθαρο πόσο εφαρμόσιμες είναι οι μέθοδοι σε συνθήκες πραγματικού χρόνου και περιορισμένων πόρων.

Τρίτον, η ανάλυση συχνά περιορίζεται σε οικονομικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες. Για παράδειγμα, οι Vukić και Kraemer (2021) εξετάζουν κυρίως τη σχέση κόστους και εξωτερικών επιβαρύνσεων στο πλαίσιο των θαλάσσιων–σιδηροδρομικών μεταφορών, αναδεικνύοντας μεν τη σημασία τους, αλλά αφήνοντας λιγότερο εξερευνημένους κρίσιμους παράγοντες όπως οι θεσμικοί περιορισμοί, τα ρυθμιστικά πλαίσια ή η συνεργασία μεταξύ κρατικών και ιδιωτικών φορέων. Αντίστοιχα, οι Fialkoff et al. (2017) δείχνουν πώς νομικά εμπόδια μπορούν να περιορίσουν τις επιλογές rerouting, αλλά τέτοιες αναλύσεις παραμένουν αποσπασματικές και δεν έχουν συστηματοποιηθεί.

Τέλος, υπάρχει περιορισμένη διερεύνηση της δυναμικής διάστασης της αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητας. Οι περισσότερες μελέτες προσεγγίζουν τα δίκτυα με στατικό τρόπο, δηλαδή εκτιμούν τις απώλειες από τη διακοπή μιας διαδρομής ή την προσθήκη μιας εναλλακτικής, χωρίς να αποτυπώνουν επαρκώς το πώς εξελίσσεται η αποκατάσταση ή η προσαρμογή μέσα στον χρόνο. Αυτό αφήνει αναπάντητο το ερώτημα πώς μπορούν τα δίκτυα να γίνουν πραγματικά πιο αποδοτικά και ανθεκτικά, και όχι απλώς να επανέλθουν προσωρινά μετά από μία κρίση.

Μεταξύ των παραπάνω ερευνητικών κενών, η παρούσα εργασία εστιάζει στην ανάλυση της αποδοτικότητας του σιδηροδρομικού δικτύου και της κρισιμότητας των συνδέσεων υπό συνθήκες πραγματικής διαταραχής, συμβάλλοντας στην κατανόηση της ανθεκτικότητας του συστήματος.

Συνολικά, η υπάρχουσα βιβλιογραφία, αν και προσφέρει σημαντικά θεωρητικά εργαλεία και πολύτιμα παραδείγματα, δεν έχει ακόμη κατορθώσει να απαντήσει επαρκώς σε

κρίσιμα ερωτήματα για την ευρωπαϊκή και ιδιαίτερα την ελληνική πραγματικότητα. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κάλυψη αυτού του κενού, αξιοποιώντας την περίπτωση της καταιγίδας Daniel ως μελέτη περίπτωσης που συνδέει την εμπειρική πραγματικότητα με τις θεωρητικές προσεγγίσεις γύρω από την αποδοτικότητα και την κρισιμότητα των σιδηροδρομικών συνδέσεων. Με βάση τα παραπάνω, το βασικό ερευνητικό ερώτημα της παρούσας εργασίας διατυπώνεται ως εξής:

Πώς μεταβάλλεται η αποδοτικότητα του βασικού εμπορευματικού σιδηροδρομικού άξονα της Ελλάδας υπό συνθήκες πραγματικής διαταραχής, και ποια σιδηροδρομικά τμήματα αναδεικνύονται ως κρίσιμα για τη συνολική του λειτουργία;

# 3 Μεθοδολογική προσέγγιση

## 3.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Για την υλοποίηση της παρούσας ανάλυσης και προκειμένου τα αποτελέσματά της να είναι επιστημονικά τεκμηριωμένα και τα συμπεράσματα αξιόπιστα, δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων που αποτυπώνει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου. Η διαδικασία αυτή περιλάμβανε τη συλλογή, επεξεργασία και ενοποίηση δεδομένων που αφορούν τη γεωγραφική δομή του δικτύου, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σιδηροδρομικών τμημάτων και τις παραμέτρους που επηρεάζουν το κόστος μετακίνησης.

Στο πλαίσιο αυτό, δημιουργήθηκε αρχικά μια βάση δεδομένων κόμβων και συνδέσεων, όπου οι κόμβοι αντιστοιχούν σε βασικούς σιδηροδρομικούς σταθμούς, εμπορευματικά κέντρα και λιμένες, ενώ οι συνδέσεις αντιπροσωπεύουν τα επιμέρους σιδηροδρομικά τμήματα του δικτύου. Για κάθε σύνδεση καταγράφηκαν βασικές γεωμετρικές και λειτουργικές μεταβλητές. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, υπολογίστηκε ένα γενικευμένο κόστος μετακίνησης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως βάρος στις συνδέσεις του δικτύου.

Έχοντας ως αφετηρία τα παραπάνω δεδομένα, το σιδηροδρομικό σύστημα αναπαραστάθηκε ως γράφος, όπου οι κόμβοι και οι ακμές αντιστοιχούν στα δομικά στοιχεία του δικτύου. Στο πλαίσιο της μαθηματικής αναπαράστασης χρησιμοποιείται ο όρος «ακμή» για τη δομική μονάδα του γράφου, ενώ ο όρος «σύνδεση» χρησιμοποιείται όταν η αναφορά αφορά τη φυσική σιδηροδρομική υποδομή. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε προγραμματιστικός κώδικας στο περιβάλλον Python, με αξιοποίηση της βιβλιοθήκης NetworkX, ο οποίος υλοποιεί το σύνολο των υπολογιστικών διαδικασιών της ανάλυσης. Ο κώδικας αυτός περιλαμβάνει συναρτήσεις για την εισαγωγή των δεδομένων από αρχεία Excel, τη δημιουργία και διαχείριση του γράφου, καθώς και τον υπολογισμό δεικτών που προέρχονται από τη θεωρία δικτύων (Mattsson et al., 2015).

Σε πρώτο στάδιο, ορίστηκε ένα βασικό σενάριο αναφοράς (baseline), στο οποίο το σύνολο των συνδέσεων του δικτύου θεωρείται πλήρως λειτουργικό και τα βάρη αντιστοιχούν στο γενικευμένο κόστος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Για το σενάριο αυτό υπολογίστηκε η αποδοτικότητα του δικτύου (Network Efficiency), η οποία χρησιμοποιείται ως δείκτης συνολικής λειτουργίας του συστήματος (Latora et al., 2001).

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε διαδικασία προσομοίωσης αστοχιών, η οποία βασίζεται στη διαδοχική αφαίρεση των συνδέσεων του δικτύου. Μετά από κάθε αφαίρεση, επανυπολογίζεται η αποδοτικότητα του δικτύου και καταγράφεται η μεταβολή της σε σχέση με το baseline. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ένας δείκτης κρισιμότητας για κάθε σύνδεση, ο οποίος αποτυπώνει τη συμβολή της σύνδεσης στη συνολική

λειτουργικότητα του δικτύου. Τα αποτελέσματα αυτά επιτρέπουν την κατάταξη των συνδέσεων ως προς τη σχετική τους σημασία και τον εντοπισμό των δομικά πιο κρίσιμων τμημάτων του σιδηροδρομικού συστήματος (Belokas et al., 2024).

Παράλληλα, προκειμένου να εξεταστεί η σύνδεση της θεωρητικής ανάλυσης με πραγματικές συνθήκες διαταραχής, ενσωματώθηκε στην ανάλυση το σενάριο του ακραίου καιρικού φαινομένου Daniel. Στο πλαίσιο αυτό, στα σιδηροδρομικά τμήματα που επηρεάστηκαν από το φαινόμενο αποδόθηκαν αυξημένα βάρη ή αφαιρέθηκαν πλήρως από το δίκτυο, ώστε να προσομοιωθεί η απώλεια ή η σοβαρή υποβάθμιση της λειτουργικότητάς τους (Mattsson et al., 2015). Η επίδραση του σεναρίου Daniel εξετάστηκε σε επίπεδο συνολικής αποδοτικότητας και στη συνέχεια αναλύθηκε ειδικότερα στο βασικό εμπορευματικό δρομολόγιο Πειραιάς-Θεσσαλονίκη.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται μέσω πινάκων, διαγραμμάτων και στιγμιότυπων του υπολογιστικού περιβάλλοντος, τα οποία διευκολύνουν την ερμηνεία των ευρημάτων. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα αυτά σχολιάζονται και συγκρίνονται με τα πραγματικά γεγονότα, ενώ αναδεικνύονται οι βασικές αδυναμίες του δικτύου και οι επιπτώσεις των διαταραχών στη λειτουργία του.

## 3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

### 3.2.1 Ανάλυση σιδηροδρομικών δικτύων με εργαλεία Θεωρίας Δικτύων

Η Θεωρία Δικτύων (Network Theory) αποτελεί ένα γενικό θεωρητικό πλαίσιο για τη μελέτη συστημάτων που αναπαρίστανται ως γράφοι, αποτελούμενοι από κόμβους και συνδέσεις, και εστιάζει στην κατανόηση της δομής και της λειτουργίας τους μέσω κατάλληλων μετρικών και μαθηματικών εργαλείων (Latora et al., 2001). Στο πλαίσιο αυτό, η Θεωρία Σύνθετων Δικτύων (Complex Network Theory), ως κλάδος της Θεωρίας Δικτύων, επικεντρώνεται σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας με σύνθετη δομή, όπου η συμπεριφορά τους δεν μπορεί να περιγραφεί επαρκώς με απλά ή γραμμικά μοντέλα, και επιτρέπει τη συνδυαστική διερεύνηση της δομής, της λειτουργίας και της αποδοτικότητας ενός δικτύου (Vukić et al., 2021). Επιπλέον, βασική δομική ιδιότητα ενός γράφου αποτελεί η συνεκτικότητα (connectivity), η οποία αναφέρεται στην ύπαρξη διαδρομής μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων του δικτύου. Ένας γράφος χαρακτηρίζεται ως συνεκτικός όταν όλοι οι κόμβοι ανήκουν στην ίδια συνδεδεμένη συνιστώσα, ενώ σε αντίθετη περίπτωση το δίκτυο διασπάται σε επιμέρους υποσύνολα κόμβων που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους (Ganin et al., 2017). Στο πλαίσιο μεταφορικών υποδομών, η απώλεια ακμών ή κόμβων μπορεί να οδηγήσει σε διάσπαση της συνεκτικότητας και λειτουργικό κατακερματισμό του συστήματος, επηρεάζοντας σημαντικά τη συνολική απόδοση και ανθεκτικότητά του (Besinović et al., 2022).

Στο πλαίσιο των σιδηροδρομικών και γενικότερα των δικτύων μεταφορών, η Ανάλυση Δικτύων (Network Analysis) εφαρμόζεται ευρέως στην ανάλυση μεταφορικών

συστημάτων. Ως Ανάλυση Δικτύων (Network Analysis) νοείται η αναπαράσταση του συστήματος ως γράφου, αποτελούμενου από κόμβους και συνδέσεις, με στόχο την εφαρμογή εργαλείων και μετρικών της Θεωρίας Δικτύων για τη διερεύνηση της δομής και της αποδοτικότητάς του (Vukić et al., 2021). Στο πλαίσιο αυτό, έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για:

- τον εντοπισμό κρίσιμων κόμβων και συνδέσεων,
- την αξιολόγηση της λειτουργικής σημασίας επιμέρους τμημάτων,
- την ανάλυση αποδοτικότητας σε σενάρια διαταραχής,
- και την εκτίμηση της επίδρασης ακραίων γεγονότων στη συνολική λειτουργία του συστήματος (Fialkoff et al., 2017, Besinović et al., 2022).

Σε αντίθεση με προσεγγίσεις που βασίζονται αποκλειστικά σε ροές ή σε μακροσκοπικούς δείκτες απόδοσης, η ανάλυση δικτύων επιτρέπει την ταυτόχρονη αποτύπωση:

- της τοπολογικής διάρθρωσης του συστήματος και
- της λειτουργικής επίδοσης, μέσω της ενσωμάτωσης βαρών που εκφράζουν πραγματικά κόστη μετακίνησης (Golias et al., 2021, Pregnolato et al., 2017).

Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για γραμμικά και ιεραρχικά δίκτυα, όπως το ελληνικό σιδηροδρομικό σύστημα, όπου η απώλεια περιορισμένου αριθμού συνδέσεων μπορεί να οδηγήσει σε δυσανάλογες λειτουργικές επιπτώσεις. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά την Ανάλυση Δικτύων ιδιαίτερα χρήσιμη για την ερμηνεία εκτεταμένων λειτουργικών διακοπών.

### 3.2.2 Αποδοτικότητα δικτύου (Network Efficiency)

Η αποδοτικότητα δικτύου (Network Efficiency) αποτελεί έναν από τους πλέον διαδεδομένους δείκτες συνολικής λειτουργικότητας σύνθετων δικτύων και προτάθηκε αρχικά από τους Latora & Marchiori (2001) ως μέτρο της ικανότητας ενός δικτύου να διευκολύνει τη ροή μεταξύ των κόμβων του.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Latora et. al., 2001), η αποδοτικότητα δικτύου ορίζεται ως :

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$$

**Εξίσωση 3.1** Δείκτης αποδοτικότητας δικτύου

όπου:

- *N* είναι ο αριθμός των κόμβων του δικτύου και

- $d_{ij}$ η συντομότερη απόσταση μεταξύ των κόμβων i και j. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει διαδρομή μεταξύ των δύο κόμβων, θεωρείται ότι $d_{ij} = \infty$, οπότε ο όρος $1/d_{ij}$ λαμβάνει τιμή 0.

Στην ανάλυση μεταφορικών δικτύων, η απόσταση $d_{ij}$ δεν εκφράζεται ως γεωμετρικό μήκος, αλλά ως γενικευμένο κόστος μετακίνησης, το οποίο μπορεί να ενσωματώνει:

- μήκος γραμμής,
- χρόνο ταξιδιού,
- τεχνικά χαρακτηριστικά,
- λειτουργικούς περιορισμούς ή ποινές (Golias et al., 2021).

Η αποδοτικότητα δικτύου έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη διερεύνηση:

- της λειτουργικότητας σιδηροδρομικών και οδικών δικτύων,
- της επίδρασης φυσικών καταστροφών,
- και της ανθεκτικότητας κρίσιμων υποδομών (Pregnolato et al., 2017, Besinović et al., 2022, He et al., 2024).

Σημαντικό πλεονέκτημα του δείκτη είναι ότι επιτρέπει άμεση ποσοτική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας, χωρίς να απαιτεί πρόσθετες υποθέσεις για τη ζήτηση ή την κατανομή ροών.

Κρισιμότητα συνδέσεων και προσομοίωση αστοχιών

Η κρισιμότητα μιας σύνδεσης σε ένα δίκτυο μεταφορών ορίζεται ως ο βαθμός στον οποίο η απώλειά της επηρεάζει τη συνολική λειτουργία του συστήματος. Στη βιβλιογραφία, η κρισιμότητα εκτιμάται συχνά μέσω προσομοιώσεων αστοχίας (failure simulations), κατά τις οποίες αφαιρούνται διαδοχικά κόμβοι ή συνδέσεις και παρατηρείται η μεταβολή βασικών δεικτών απόδοσης (Fialkoff et al., 2017, Vukić et al., 2021). Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση αστοχιών επικεντρώνεται στην αφαίρεση συνδέσεων και όχι κόμβων, καθώς οι διαταραχές σε σιδηροδρομικά δίκτυα εκδηλώνονται συχνότερα ως διακοπές γραμμών ή τμημάτων υποδομής και όχι ως πλήρης απώλεια κόμβων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει ρεαλιστικότερη αναπαράσταση των επιπτώσεων ακραίων γεγονότων, όπως πλημμύρες ή κατολισθήσεις, στη λειτουργία του δικτύου.

Η κρισιμότητα των συνδέσεων αξιολογείται μέσω της μεταβολής της αποδοτικότητας του δικτύου μετά την αφαίρεση κάθε ακμής. Η μεταβολή αυτή ορίζεται ως:

$$\Delta E_e = E_{baseline} - E_{-e}$$

**Εξίσωση 3.2** Μεταβολή αποδοτικότητας δικτύου

όπου**:**

• $E_{baseline}$: η αποδοτικότητα του δικτύου στο βασικό σενάριο (πλήρης λειτουργία όλων των συνδέσεων).

• $E_{-e}$: η αποδοτικότητα του δικτύου μετά την αφαίρεση της σύνδεσης *e*.

• $\Delta E_e$: η απόλυτη μεταβολή της αποδοτικότητας του δικτύου λόγω της αφαίρεσης της σύνδεσης *e*.

και κανονικοποιείται σε ποσοστιαία μορφή ως:

$$\Delta E_e(\%) = \frac{E_{baseline} - E_{-e}}{E_{baseline}} \times 100$$

**Εξίσωση 3.3** Ποσοστιαία μεταβολή της αποδοτικότητας δικτύου

όπου :

$\Delta E_e(\%)$: η ποσοστιαία μεταβολή της αποδοτικότητας του δικτύου σε σχέση με το βασικό σενάριο.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει εφαρμοστεί σε έρευνες ανάλυσης αποδοτικότητας μεταφορικών δικτύων, καθώς επιτρέπει τον εντοπισμό συνδέσεων με δυσανάλογη λειτουργική σημασία, ανεξάρτητα από το μήκος ή τη γεωγραφική τους θέση (Pregnolato et al., 2017, Besinović et al., 2022).

### 3.2.3 Δείκτες κεντρικότητας

Οι δείκτες κεντρικότητας χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιολόγηση της σημασίας κόμβων σε δίκτυα μεταφορών (Ganin et al., 2017, Bešinović et al., 2022). Οι δείκτες κεντρικότητας επιτρέπουν τον εντοπισμό κόμβων των οποίων η αστοχία αναμένεται να έχει δυσανάλογα μεγάλες επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου. Στην παρούσα ανάλυση εξετάζονται τρεις κλασικοί δείκτες:

- Βαθμός κεντρικότητας (Degree centrality)

Ο βαθμός κεντρικότητας εκφράζει τον αριθμό άμεσων συνδέσεων ενός κόμβου, κανονικοποιημένο ως προς τον μέγιστο δυνατό αριθμό συνδέσεων στο δίκτυο. Για γράφο με $n$ κόμβους, ο βαθμός κεντρικότητας ενός κόμβου $i$ δίνεται από:

$$C_D(i) = \frac{k_i}{n-1}$$

**Εξίσωση 3.4** Βαθμός κεντρικότητας (Degree centrality)

όπου:

- $C_D(i)$: βαθμός κεντρικότητας του κόμβου $i$,
- $k_i$: αριθμός άμεσων συνδέσεων (βαθμός) του κόμβου $i$,
- $n$: συνολικός αριθμός κόμβων του δικτύου.

Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε στην Python με χρήση της βιβλιοθήκης NetworkX μέσω της συνάρτησης: nx.degree_centrality(G).

Κόμβοι με υψηλό degree centrality αποτελούν τοπικά σημεία συγκέντρωσης ροών και συμβάλλουν σημαντικά στη βασική συνδεσιμότητα του δικτύου. Στο πλαίσιο δικτύων μεταφορών, τέτοιοι κόμβοι συχνά αντιστοιχούν σε σημαντικούς σταθμούς ή κόμβους διακλάδωσης (Geng et al., 2014, Ganin et al., 2017).

- Δείκτης ενδιάμεσης κεντρικότητας (Betweenness centrality)

Ο δείκτης ενδιάμεσης κεντρικότητας μετρά τη συχνότητα με την οποία ένας κόμβος παρεμβάλλεται στις συντομότερες διαδρομές μεταξύ ζευγών άλλων κόμβων. Ορίζεται ως:

$$C_B(i) = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}}$$

**Εξίσωση 3.5** Δείκτης ενδιάμεσης κεντρικότητας (Betweenness centrality)

όπου:

- $C_B(i)$: ενδιάμεση κεντρικότητα του κόμβου $i$,
- $\sigma_{st}$: συνολικός αριθμός συντομότερων διαδρομών μεταξύ των κόμβων $s$ και $t$,
- $\sigma_{st}(i)$: αριθμός αυτών των διαδρομών που διέρχονται από τον κόμβο $i$,
- $s, t$: διακριτοί κόμβοι του δικτύου.

Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός έγινε με βάση το γενικευμένο κόστος των ακμών (Weight_Δικτύου_Baseline), μέσω της συνάρτησης: nx.betweenness_centrality(G, weight="Weight_Δικτύου_Baseline").

Κόμβοι με υψηλή ενδιάμεση κεντρικότητα λειτουργούν ως «διαμεσολαβητές» της ροής και θεωρούνται ιδιαίτερα κρίσιμοι σε γραμμικά δίκτυα μεταφορών. Η διακοπή

λειτουργίας τους ενδέχεται να οδηγήσει σε σημαντική ανακατανομή ροών ή και σε απομόνωση τμημάτων του δικτύου (Ganin et al., 2017).

- Κεντρικότητα εγγύτητας (Closeness centrality)

Η κεντρικότητα εγγύτητας εκφράζει το πόσο «κοντά» βρίσκεται ένας κόμβος σε όλους τους υπόλοιπους, βάσει της συντομότερης απόστασης από αυτούς. Για γράφο με $n$ κόμβους, ορίζεται ως:

$$C_C(i) = \frac{n-1}{\sum_{j \neq i} d_{ij}}$$

**Εξίσωση 3.6** Κεντρικότητα εγγύτητας (Closeness centrality)

όπου:

- $C_C(i)$: κεντρικότητα εγγύτητας του κόμβου $i$,
- $d_{ij}$: συντομότερη απόσταση μεταξύ των κόμβων $i$και $j$,
- $n$: συνολικός αριθμός κόμβων του δικτύου.

Στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο απόστασης το Weight_Δικτύου_Baseline, μέσω της συνάρτησης: nx.closeness_centrality(G, distance="Weight_Δικτύου_Baseline").

Κόμβοι με υψηλή closeness centrality μπορούν θεωρητικά να προσεγγίσουν ταχύτερα το σύνολο του δικτύου, γεγονός που συνδέεται με αυξημένη λειτουργική σημασία και επιχειρησιακή αποδοτικότητα σε συστήματα μεταφορών (Peng et al., 2020, Xiao et al., 2024).

Οι τρεις δείκτες είναι συμπληρωματικοί: ο πρώτος αποτυπώνει τοπική συνδεσιμότητα, ο δεύτερος ροή μέσω «βέλτιστων» διαδρομών και ο τρίτος συνολική εγγύτητα στο δίκτυο.

### 3.2.4 Υπολογιστική υλοποίηση της Ανάλυσης Δικτύου

Η ανάλυση του σιδηροδρομικού δικτύου υλοποιήθηκε με χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Python και της βιβλιοθήκης NetworkX, η οποία αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία ανάλυσης σύνθετων δικτύων στη διεθνή βιβλιογραφία (Golias et al., 2021). Η επιλογή της συγκεκριμένης υπολογιστικής προσέγγισης βασίστηκε στα εξής πλεονεκτήματα:

- **Ευελιξία στην αναπαράσταση του δικτύου**, με δυνατότητα ενσωμάτωσης σταθμισμένων ακμών και διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας.
- **Δυνατότητα προσομοίωσης πραγματικών διαταραχών**, όπως η απόδοση αυξημένων βαρών ή η πλήρης αφαίρεση συνδέσεων.
- **Διαφάνεια και αναπαραγωγιμότητα**, καθώς οι υπολογισμοί βασίζονται σε σαφώς ορισμένες συναρτήσεις και αλγορίθμους.
- **Συμβατότητα με βιβλιογραφικές πρακτικές**, δεδομένου ότι αντίστοιχες μελέτες εφαρμόζουν παρόμοιες προσεγγίσεις για την ανάλυση υποδομών μεταφορών (Pregnolato et al., 2017, Vukić et al., 2021, Besinović et al., 2022).

Η Ανάλυση Δικτύων επιτρέπει την άμεση διερεύνηση της αποδοτικότητας του συστήματος, καθιστώντας την ιδιαίτερα κατάλληλη για τη μελέτη ακραίων και αιφνίδιων γεγονότων, όπως το φαινόμενο Daniel. Συνοψίζοντας, το θεωρητικό πλαίσιο της Θεωρίας Σύνθετων Δικτύων και οι δείκτες αποδοτικότητας και κρισιμότητας που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο παρέχουν το απαραίτητο επιστημονικό υπόβαθρο για την αξιολόγηση της λειτουργείας του δικτύου και της κρισιμότητας των σιδηροδρομικών συνδέσεων, όπως έχει τεκμηριωθεί σε πλήθος αντίστοιχων μελετών μεταφορικών δικτύων (Pregnolato et al., 2017, Vukić et al., 2021, Besinović et al., 2022).

Η επιλογή της αποδοτικότητας δικτύου ως βασικού δείκτη επιτρέπει την ποσοτική αποτίμηση της συνολικής επίδοσης του συστήματος, ενώ η ανάλυση κρισιμότητας συνδέσεων καθιστά δυνατή την αναγνώριση των τμημάτων εκείνων των οποίων η αστοχία επιφέρει δυσανάλογες λειτουργικές συνέπειες, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική τους θέση ή το μήκος τους (Fialkoff et al., 2017, Golias et al., 2021).

Στο επόμενο κεφάλαιο, το παραπάνω θεωρητικό και μεθοδολογικό πλαίσιο εφαρμόζεται στο εξεταζόμενο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο, μέσω της ανάπτυξης και υλοποίησης υπολογιστικού μοντέλου στο περιβάλλον Python και της βιβλιοθήκης NetworkX, ακολουθώντας αντίστοιχες πρακτικές της διεθνούς βιβλιογραφίας (Golias et al., 2021).

# 4 Ανάλυση και αποτελέσματα

## 4.1 Βάση δεδομένων

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ο βασικός εμπορευματικός σιδηροδρομικός άξονας που συνδέει τον λιμένα Πειραιά με τη Θεσσαλονίκη και τα βόρεια σύνορα της χώρας. Ο συγκεκριμένος άξονας συγκεντρώνει το μεγαλύτερο μέρος των διεθνών και διαμετακομιστικών εμπορευματικών ροών και αποτελεί τμήμα του ευρωπαϊκού διαδρόμου RFC7. Το σύνολο των κόμβων και των συνδέσεων που τον απαρτίζουν ορίζεται στην παρούσα μελέτη ως το υπό εξέταση υποδίκτυο. Η ποσοτική ανάλυση του υποδικτύου βασίστηκε στη δημιουργία ενιαίας βάσης δεδομένων σε περιβάλλον Excel, η οποία αποτέλεσε την είσοδο για την κατασκευή του γράφου στο υπολογιστικό περιβάλλον Python.

Η βάση δεδομένων οργανώθηκε σε τρία διακριτά φύλλα εργασίας:

- Φύλλο «Κόμβοι»: περιλαμβάνει τους 15 επιλεγμένους λειτουργικούς κόμβους του υποδικτύου, μαζί με τα βασικά περιγραφικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά τους.
- Φύλλο «Συνδέσεις»: περιλαμβάνει τις 14 ακμές που συνδέουν τους κόμβους, καθώς και τα γεωμετρικά, λειτουργικά και αναλυτικά χαρακτηριστικά κάθε σύνδεσης.
- Φύλλο «Data Dictionary»: περιλαμβάνει τον αναλυτικό ορισμό όλων των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στη βάση δεδομένων, με αναφορά στη μονάδα μέτρησης, τον τρόπο υπολογισμού και τη βιβλιογραφική τεκμηρίωση όπου απαιτείται.

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή κάθε φύλλου, καθώς και ο τρόπος ορισμού των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του γράφου και στον υπολογισμό των δεικτών.

### 4.1.1 «Κόμβοι» - Επιλογή και περιγραφή λειτουργικών κόμβων

Αφετηρία της ανάλυσης είναι η επιλογή του τμήματος του ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου που είναι πιο άμεσα συνδεδεμένο με τη λειτουργία του λιμένα Πειραιά και με τον διάδρομο προς τη Βόρεια Ελλάδα και τα Βαλκάνια. Η επιλογή των κόμβων έγινε στοχευμένα, με βάση κριτήρια που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία για κρίσιμους κόμβους σε δίκτυα μεταφορών και τα ελληνικά δεδομένα (Mattsson et al., 2015, Vukic et al., 2021):

- **Κόμβοι ως λιμένες και εμπορευματικά κέντρα** (Λιμένας Πειραιά, Θριάσιο Εμπορευματικό Κέντρο, Σιδηροδρομικό Κέντρο Αχαρνών, Λιμένας Θεσσαλονίκης), οι οποίοι λειτουργούν ως βασικά σημεία εξυπηρέτησης εμπορευματικών ροών.

- **Κεντρικοί σιδηροδρομικοί σταθμοί** (Αθήνα, Λάρισα, Θεσσαλονίκη), που αποτελούν βασικούς κόμβους επιβατικών και εμπορευματικών ροών.
- **Ενδιάμεσοι κόμβοι–«γέφυρες»** κατά μήκος της κύριας γραμμής Αθήνα–Θεσσαλονίκη (Οινόη, Τιθορέα, Δομοκός, Παλαιοφάρσαλος, Πλατύ), οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη σημασία ως τμήματα του βασικού διαδρόμου, ιδιαίτερα υπό συνθήκες διακοπών ή εκτροπών.
- **Σημαντικοί διακλαδωτικοί κόμβοι** (Στρυμώνας, Ειδομένη), που συνδέουν το ελληνικό δίκτυο με διεθνείς κατευθύνσεις.

Συνολικά επιλέχθηκαν **15 λειτουργικοί κόμβοι** (Πίνακας 4.1). Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη συγκέντρωση της ανάλυσης στο κρίσιμο τμήμα του δικτύου, όπου οι επιπτώσεις της πλημμύρας Daniel και οι πιθανές εκτροπές ροών έχουν τη μεγαλύτερη επιχειρησιακή σημασία.

Οι επιλεγμένοι λειτουργικοί κόμβοι καταγράφηκαν και κωδικοποιήθηκαν σε φύλλο εργασίας Excel, όπου κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε έναν κόμβο και κάθε στήλη αποτυπώνει συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του:

- **Κόμβος_ID**: Μοναδικός κωδικός ταυτοποίησης κάθε κόμβου (π.χ. N1, N2) που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία γράφου στο περιβάλλον Python.
- **Όνομα_Κόμβου**: Η πλήρης ονομασία του σταθμού (π.χ. Λάρισα, Δομοκός) όπου αξιοποιείται για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την γραφική απεικόνιση του υποδικτύου.
- **Τύπος_Κόμβου**: Περιγράφει τη λειτουργική κατηγορία του κόμβου (π.χ. (Κεντρικός Σταθμός). Η μεταβλητή αυτή είναι περιγραφική και δεν χρησιμοποιείται αριθμητικά στους υπολογισμούς, αλλά τεκμηριώνει τη λειτουργική σημασία κάθε κόμβου.
- **Ρόλος_στο_Δίκτυο**: Σύντομη περιγραφή της σημασίας του κόμβου (π.χ. Κύρια Πύλη Εισόδου) που δικαιολογεί τη συμπερίληψη του κόμβου στο υποδίκτυο.
- **Συμμετοχή_σε_Εμπορευματικό_Διάδρομο**: Ένδειξη συμμετοχής στον βασικό εμπορευματικό διάδρομο Πειραιάς-Θεσσαλονίκη-Βαλκάνια (RFC7). Η μεταβλητή αυτή συμπληρωματικά με την μεταβλητή «Ρόλος_στο_Δίκτυο», τεκμηριώνει την επιλογή του κόμβου στο υποδίκτυο.
- **Επηρεάστηκε_από_Daniel**: Ένδειξη αν ο κόμβος επηρεάστηκε από την πλημμύρα Daniel. Η μεταβλητή αυτή είναι περιγραφική και λειτουργεί ως σύνδεση μεταξύ θεωρητικής ανάλυσης και πραγματικού σεναρίου διαταραχής.
- **Πηγή/Σχόλια**: Σύντομες αναφορές σχετικά την αιτιολόγηση των μεταβλητών, οι οποίες βασίζονται στη Δήλωση Δικτύου ΟΣΕ 2024.

**Πίνακας 4.1** Κατάλογος λειτουργικών κόμβων του σιδηροδρομικού υποδικτύου

| Κόμβος_ID | Όνομα_Κόμβου | Τύπος_Κόμβου | Ρόλος_στο_δίκτυο | Συμμετοχή_σε_εμπορευματικό_διάδρομο | Επηρεάστηκε_από_Daniel | Πηγή/Σχόλια |
|---|---|---|---|---|---|---|
| N1 | Λιμένας Πειραιά (G1/G2) | Λιμένας/Terminal | Κύρια Πύλη Εισόδου | Ναι | Όχι | Κύριο σημείο εισόδου εμπορευματοκιβωτίων. Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N2 | Θριάσιο (Εμπορευματικό Κέντρο) | Terminal/Σταθμός | Συγκέντρωση/Διανομή | Ναι | Όχι | Κρίσιμος κόμβος logistics. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N3 | ΣΚΑ (Σιδηροδρομικό Κέντρο Αχαρνών) | Junction | Διασταύρωση αξόνων | Ναι | Όχι | Σύζευξη κύριων αξόνων. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N4 | Οινόη | Σταθμός | Διέλευση/Ρύθμιση ροής | Ναι | Όχι | Κύρια γραμμή Αθήνα–Θεσσαλονίκη. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N5 | Τιθορέα | Σταθμός | Κόμβος διέλευσης σε τεχνικά σύνθετο τμήμα | Ναι | Όχι | Νέος άξονας υψηλών ταχυτήτων. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N6 | Δομοκός | Σταθμός | Διέλευση-Τμήμα ορεινό/ευαλωτό | Ναι | Ναι | Επηρεάστηκε από Daniel (Θεσσαλία). Παράρτημα Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N7 | Παλαιοφάρσαλος | Σταθμός/Κόμβος | Διακλάδωση προς δυτική Θεσσαλία | Ναι | Ναι | Σοβαρές επιπτώσεις Daniel. Δηλ. ΟΣΕ. 2024 |
| N8 | Λάρισα | Κεντρικός Σταθμός | Κόμβος Θεσσαλίας/ Διακλάδωση προς Βόλο | Ναι | Ναι | Επηρεάστηκε από Daniel. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N9 | Πλατύ | Κόμβος | Σύζευξη προς Δυτική Μακεδονία | Ναι | Όχι | Κρίσιμο για ανακατανομή ροών. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N10 | Θεσσαλονίκη (Σίνδος) | Terminal/Σταθμός | Κύριος Βόρειος Κόμβος | Ναι | Όχι | Διαχείριση εμπορευματικών ροών. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N11 | Στρυμόνας | Σταθμός Συνόρων/Κόμβος | Σύνδεση προς Βουλγαρία | Ναι | Όχι | Διασυνοριακός κόμβος. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N12 | Ειδομένη | Σταθμός Συνόρων | Σύνδεση προς Β. Μακεδονία/Κεντρ. Ευρώπη | Ναι | Όχι | Κύρια έξοδος RFC7. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N15 | Βόλος (εμπορικός) | Λιμένας/Σταθμός | Περιφεριακός λιμενικός κόμβος | Μερικώς | Ναι | Θεσσαλικός κλάδος – επηρεάστηκε. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N16 | Αθήνα (Κεντρικός) | Σταθμός | Κεντρικός κόμβος επιβατ./εμπορ. | Ναι | Όχι | Σύνδεση με ΣΚΑ/Θριάσιο. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |
| N18 | Θεσσαλονίκη Λιμένας | Λιμένας/Terminal | Θαλάσσια–σιδηροδρομική διεπαφή | Ναι | Όχι | Στρατηγικός κόμβος. Δηλ. ΟΣΕ 2024 |

Η δομή του φύλλου «Κόμβοι» εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος του υποδικτύου τεκμηριώνεται λειτουργικά και επιχειρησιακά πριν ενταχθεί στην ανάλυση γράφου.

### 4.1.2 «Συνδέσεις»

Το φύλλο «Συνδέσεις» (Πίνακας 4.2) αποτελεί τον βασικό πυρήνα της ποσοτικής ανάλυσης, καθώς αποτυπώνει τις ακμές του γράφου, δηλαδή τα φυσικά σιδηροδρομικά τμήματα που συνδέουν τους επιλεγμένους κόμβους του υποδικτύου.

Κάθε γραμμή του φύλλου αντιστοιχεί σε μία σύνδεση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων του υποδικτύου. Η καταγραφή οργανώθηκε με τρόπο ώστε να επιτρέπει τη μετατροπή της βάσης σε γράφο (graph structure), τον υπολογισμό δεικτών αποδοτικότητας, την εφαρμογή σεναρίων διαταραχής και τον υπολογισμό δεικτών κεντρικότητας. Παρακάτω περιγράφονται όλες οι στήλες του φύλλου «Συνδέσεις»:

- **Από_Κόμβο_ID**: Ο κωδικός του κόμβου προέλευσης (Κόμβος_ID), όπως ορίζεται στο φύλλο «Κόμβοι».

- **Προς_Κόμβο_ID**: Ο κωδικός του κόμβου προορισμού. Μαζί με τη στήλη «Από_Κόμβο_ID» ορίζει κάθε σύνδεση του υποδικτύου.
- **Ονομασία_Τμήματος**: Περιγραφή του φυσικού σιδηροδρομικού τμήματος (π.χ. Δομοκός – Παλαιοφάρσαλος). Η στήλη αυτή έχει περιγραφικό ρόλο και διευκολύνει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.
- **Κατηγορία Γραμμής**: Χαρακτηρισμός της γραμμής ως κύρια ή δευτερεύουσα βάσει της Δήλωσης Δικτύου ΟΣΕ (2024). Η μεταβλητή αυτή χρησιμοποιείται ερμηνευτικά για τη συζήτηση των αποτελεσμάτων.
- **Μήκος_km**: Το μήκος του σιδηροδρομικού τμήματος σε χιλιόμετρα. Το μήκος υπολογίστηκε με προσαύξηση περίπου 15% σε σχέση με την ευθεία απόσταση, ώστε να προσεγγίζει ρεαλιστικά τη γεωμετρική χάραξη της γραμμής, λαμβάνοντας υπόψη καμπυλότητες και μορφολογικούς περιορισμούς. Η προσέγγιση αυτή είναι συμβατή με αντίστοιχες πρακτικές σε μελέτες σιδηροδρομικών δικτύων (Besinović et al., 2022).
- **Χρόνος Ταξιδιού (Ti)**: Ο προσεγγιστικός χρόνος διέλευσης της ακμής σε λεπτά. Υπολογίστηκε βάσει θεωρητικής μέσης ταχύτητας 80 km/h, τιμή που είναι συμβατή με τις επιτρεπόμενες ταχύτητες του ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου σύμφωνα με τη Δήλωση Δικτύου ΟΣΕ (2024).
- **Κατάσταση_2024**: Περιγραφική ένδειξη της λειτουργικής κατάστασης του τμήματος μετά το φαινόμενο Daniel. Χρησιμοποιείται για τεκμηρίωση και επεξηγηματικό σχολιασμό.
- **Status_Binary**: Δυαδική μεταβλητή λειτουργικής κατάστασης:
  • 1 → Το τμήμα λειτουργεί
  • 0 → Το τμήμα έχει τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω ζημιών.
  Η κωδικοποίηση βασίστηκε σε επίσημες ανακοινώσεις και τεχνικές αναφορές του ΟΣΕ. Η μεταβλητή αυτή χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του σεναρίου Daniel και για την αφαίρεση ακμών από τον γράφο στο σενάριο διαταραχής.
- **Κίνδυνος Συμφόρησης**: Κατηγοριοποιημένη εκτίμηση της σχετικής πιθανότητας λειτουργικής επιβάρυνσης μιας σύνδεσης. Η αποτίμηση βασίστηκε στη δομική θέση της ακμής στο δίκτυο, στη σημασία της ως τμήμα βασικού διαδρόμου. Η μεταβλητή αυτή δεν εισάγεται απευθείας στον υπολογισμό αποδοτικότητας, αλλά αποτελεί τη βάση για τον καθορισμό του συντελεστή penalty. Οι συνδέσεις ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες:
    1. Υψηλός κίνδυνος συμφόρησης: Ακμές που συγκεντρώνουν αυξημένες εμπορευματικές ροές ή λειτουργούν ως βασικές συνδέσεις μεταξύ κύριων κόμβων του διαδρόμου (π.χ. λιμένας Πειραιά-Θριάσιο).
    2. Μέτριος κίνδυνος συμφόρησης: Ακμές της κύριας γραμμής που εξυπηρετούν τη διέλευση των ροών κατά μήκος του άξονα, αλλά δεν αποτελούν κύρια σημεία συγκέντρωσης εμπορευματικής δραστηριότητας. Σε αρκετές περιπτώσεις πρόκειται για σύγχρονα ή αναβαθμισμένα τμήματα με μεγαλύτερη λειτουργική ικανότητα απορρόφησης φόρτου.

3. Χαμηλός κίνδυνος συμφόρησης: Ακμές που λειτουργούν κυρίως ως συνδέσεις πρόσβασης, οι οποίες δεν συγκεντρώνουν σημαντικές διερχόμενες εμπορευματικές ροές σε σχέση με τον κύριο άξονα.

- **Penalty (Pi)**: Συντελεστής προσαύξησης κόστους που αποτυπώνει τον κίνδυνο συμφόρησης και τη δυσκολία χρήσης της συγκεκριμένης ακμής (Ganin et al., 2017). Ο συντελεστής λαμβάνει διακριτές τιμές ανάλογα με την κατηγορία κινδύνου συμφόρησης:
    1. Pi = 1,00 → Χαμηλός κίνδυνος
    2. Pi = 1,15 → Μέτριος κίνδυνος
    3. Pi = 1,30 → Υψηλός κίνδυνος

  Με τον τρόπο αυτό, οι κρίσιμες ακμές επιβαρύνονται με υψηλότερο γενικευμένο κόστος, ώστε να προσομοιωθεί η αυξημένη πιθανότητα συμφόρησης ή λειτουργικής επιβάρυνσης σε σενάρια διαταραχής.
- **Weight_Δικτύου_Baseline (Wi)**:Το γενικευμένο βάρος ακμής στο βασικό σενάριο. Ορίζεται ως:

$$Wi = Ti \times Pi,$$

**Εξίσωση 4.1** Υπολογισμός γενικευμένου βάρους ακμής

όπου:

Ti = χρόνος ταξιδιού

Pi = penalty

Το βάρος αυτό χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό αποδοτικότητας (E), στους δείκτες κεντρικότητας και στους υπολογισμούς shortest path.

- **Weight_Δικτύου_Daniel**: Στο σενάριο διαταραχής, το βάρος των ακμών τροποποιήθηκε ώστε να αποτυπωθεί η διακοπή λειτουργίας συγκεκριμένων τμημάτων του επιλεγμένου δικτύου. Για τις ακμές που χαρακτηρίστηκαν ως μη διαθέσιμες (Status_Binary = 0), αποδόθηκε πολύ μεγάλη τιμή κόστους, ώστε να μην μπορούν ουσιαστικά να χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς των διαδρομών. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώθηκε η πλήρης διακοπή των συγκεκριμένων συνδέσεων και κατέστη δυνατή η αξιολόγηση της λειτουργίας του υπόλοιπου υποδικτύου υπό συνθήκες διαταραχής.
- **Τεκμηρίωση_Κινδύνου**: Περιγραφική στήλη η οποία αιτιολογεί την κατηγοριοποίηση της σύνδεσης ως υψηλού, μέτριου ή χαμηλού κινδύνου συμφόρησης. Η στήλη αυτή δεν αξιοποιείται άμεσα σε υπολογισμούς, αλλά χρησιμοποιείται για την απόδοση της κατηγορίας κινδύνου και κατ' επέκταση για τον καθορισμό της τιμής του συντελεστή Penalty (Pi).
- **Πηγή**: Στήλη αναφοράς των δεδομένων και των πληροφοριών που χρησιμοποιήθηκαν.

**Πίνακας 4.2** Συνδέσεις και λειτουργικά χαρακτηριστικά των ακμών του επιλεγένου δικτύου

| Από_Κόμβο_ID | Προς_Κόμβο_ID | Ονομασία_Τμήματος | Κατηγορία Γραμμής | Αιτιολόγηση | Μήκος_km | Χρόνος ταξιδιού (λεπτά) | Κατάσταση_2024 | Status_Binary | Κίνδυνος_Συμφόρησης | Penalty | Weight_Δικτύου_Baseline | Weight_Δικτύου_Daniel | Τεκμηρίωση_Κινδύνου | Πηγή |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N1 | N2 | Πειραιάς – Θριάσιο | Συνδεση με λιμάνι | Συνδέει τον κύριο εμπορευματικό λιμένα της χώρας με το Θριάσιο Εμπορευματικό Κέντρο – κρίσιμη είσοδος φορτίων. | 17,25 | 12,94 | Κανονική | 1 | Υψηλός | 1,30 | 16,82 | 16,82 | Μεγάλος όγκος Ε/Κ, στενός λαιμός προς Θριάσιο. | Δήλωση ΟΣΕ 2024-25-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N2 | N3 | Θριάσιο – ΣΚΑ | Δευτερεύουσα | Εσωτερικό τμήμα αστικού δικτύου Αττικής – λειτουργεί ως διανομή από το Θριάσιο προς το εθνικό δίκτυο. | 14,17 | 10,63 | Κανονική | 1 | Υψηλός | 1,30 | 13,81 | 13,81 | Σύζευξη αξόνων/δρομολόγηση εμπορευματικών. | Δήλωση ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N3 | N4 | ΣΚΑ – Οινοη | Κύρια γραμμή | Αρχικό τμήμα της κύριας εθνικής γραμμής Αθήνα–Θεσσαλονίκη (άξονας RFC7). | 34,91 | 26,19 | Κανονική | 1 | Μέτριος | 1,15 | 30,11 | 30,11 | Κύρια διέλευση. | Δήλωση ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N4 | N5 | Οινοη – Τιθορέα | Κύρια γραμμή | Μέρος του εκσυγχρονισμένου διπλού διαδρόμου υψηλών ταχυτήτων προς Βορρά. | 96,42 | 72,31 | Κανονική | 1 | Μέτριος | 1,15 | 83,16 | 83,16 | Νέος διάδρομος υψηλών ταχυτήτων. | Δήλωση ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N5 | N6 | Τιθορέα – Δομοκός | Κύρια γραμμή | Νέο διπλό τμήμα υψηλών ταχυτήτων, μέρος του βασικού άξονα Αθήνα–Θεσσαλονίκη. | 84,18 | 63,14 | Επηρεάστηκε_από_Daniel | 0 | Μέτριος | 1,15 | 72,61 | 99999 | Ορεινό τμήμα, τεχνικά σύνθετο | Παράρτημα Δηλ. ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N6 | N7 | Δομοκός - Παλαιοφάρσαλος | Κύρια γραμμή | Συνδέει τη Θεσσαλία με το εθνικό δίκτυο, βασικό κομμάτι του RFC7. | 17,19 | 12,89 | Επηρεάστηκε_από_Daniel | 0 | Υψηλός | 1,30 | 16,76 | 99999 | Κρίσιμο πέρασμα προς Θεσσαλία. | Παράρτημα Δηλ. ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N7 | N8 | Παλαιοφάρσαλος - Λάρισα | Κύρια γραμμή | Κεντρικό τμήμα Θεσσαλίας, εντός κύριου διαδρόμου Αθήνα–Θεσσαλονίκη. | 44,28 | 33,21 | Επηρεάστηκε_από_Daniel | 0 | Υψηλός | 1,30 | 43,17 | 99999 | Κόμβος διακλάδωσης/συμφόρηση μετά την κρίση. | Παράρτημα Δηλ. ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N8 | N9 | Λάρισα – Πλατύ | Κύρια γραμμή | Μακρύτερο τμήμα της κύριας γραμμής Αθήνα–Θεσσαλονίκη (μέσω Κατερίνης). | 129,15 | 96,86 | Κανονική | 1 | Μέτριος | 1,15 | 111,39 | 111,39 | Ραχοκοκαλιά προς Βόρεια Ελλάδα. | Δήλωση ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N9 | N10 | Πλατύ – Θεσσαλονίκη (Σίνδος) | Κύρια γραμμή | Είσοδος προς τη Θεσσαλονίκη, τμήμα του βασικού άξονα RFC7. | 27,19 | 20,39 | Κανονική | 1 | Υψηλός | 1,30 | 26,51 | 26,51 | Μεγάλος κόμβος logistics Βορρά. | Δήλωση ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N10 | N12 | Θεσσαλονίκη – Ειδομένη | Κύρια γραμμή | Βόρειος διάδρομος RFC7 προς τα Βαλκάνια/ΕΕ, κύρια διασύνδεση εξαγωγών. | 65,29 | 48,96 | Κανονική | 1 | Μέτριος | 1,15 | 56,31 | 56,31 | Διασυνοριακή έξοδος RFC7 – πιθανές στενώσεις. | Δήλωση ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N10 | N11 | Θεσσαλονίκη – Στρυμόνας | Δευτερεύουσα | Ανατολική γραμμή προς Προμαχώνα, μέρος του δικτύου αλλά μικρότερης σημασίας σε εμπορικό όγκο. | 91,60 | 68,70 | Κανονική | 1 | Μέτριος | 1,15 | 79,00 | 79,00 | Διασύνδεση προς BG/RO – ικανότητα μετατόπισης ροών. | Δήλωση ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N7 | N15 | Λάρισα – Βόλος | Σύνδεση με λιμάνι | Εξυπηρετεί τον λιμένα Βόλου – βασική λιμενική σύνδεση της Θεσσαλίας. | 60,89 | 45,67 | Επηρεάστηκε_από_Daniel | 0 | Μέτριος | 1,15 | 52,52 | 99999,00 | Θεσσαλικός κλάδος με καταστροφές. | Παράρτημα Δηλ. ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N3 | N16 | ΣΚΑ – Αθήνα | Δευτερεύουσα | Αστικό τμήμα εντός Αθήνας – λειτουργεί ως σύνδεση με τον κεντρικό σταθμό επιβατικής κυκλοφορίας. | 9,90 | 7,43 | Κανονική | 1 | Χαμηλός | 1,00 | 7,43 | 7,43 | Εναλλακτική ροή διαχείρισης προς Αθήνα. | Δήλωση ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |
| N10 | N18 | Θεσσαλονίκη – Λιμένας Θεσσαλονίκης | Σύνδεση με λιμάνι | Συνδέει τον Σιδηροδρομικό Σταθμό με τον λιμένα – βασικό σημείο φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων. | 12,88 | 9,66 | Κανονική | 1 | Μέτριος | 1,15 | 11,11 | 11,11 | Θαλάσσια διεπαφή του σιδηροδρομικού δικτύου – κύριος κόμβος εμπορευματικής διακίνησης Βορρά | Δήλωση ΟΣΕ-OpenRailwayMap & Google Maps |

### 4.1.3 «Data Dictionary»

Το τρίτο φύλλο του αρχείου Excel «Data Dictionary» περιλαμβάνει τον ορισμό των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν στην ποσοτική ανάλυση του επιλεγμένου δικτύου. Για κάθε μεταβλητή τεκμηριώνονται η περιγραφή και ο τρόπος υπολογισμού της, η μονάδα μέτρησης, ο τύπος δεδομένων (Numerical: αριθμητική μεταβλητή, Binary: δυαδική μεταβλητή με τιμές 0/1, Categorical: μεταβλητή κατηγορίας, Text: περιγραφική μεταβλητή) και η βιβλιογραφική πηγή τεκμηρίωσης.

Οι μεταβλητές αυτές (Πίνακας 4.3) αποτελούν τις βασικές εισόδους για την κατασκευή του γράφου στο περιβάλλον Python (βιβλιοθήκη NetworkX), καθώς και για τον υπολογισμό συντομότερων διαδρομών και δεικτών κεντρικότητας.

**Πίνακας 4.3** Data Dictionary – Περιγραφή μεταβλητών ανάλυσης υποδικτύου

| Δείκτης | Περιγραφή | Μονάδα | Τύπος | Πηγή |
|---|---|---|---|---|
| **Κόμβος_ID** | Μοναδικό αναγνωριστικό κάθε κόμβου του σιδηροδρομικού δικτύου. | - | Categorical | - |
| **Όνομα_Κόμβου** | Ονομασία του κόμβου για σκοπούς αναγνωσιμότητας και ταυτοποίησης στο δίκτυο. | - | Categorical | Δήλωση ΟΣΕ 2024 |
| **Τύπος_Κόμβου** | Κατηγοριοποίηση κόμβου που αποτυπώνει τη λειτουργεία του στο δίκτυο. | - | Categorical | Δήλωση ΟΣΕ 2024 |
| **Ρόλος_στο_δίκτυο** | Λειτουργικός ρόλος του κόμβου όπως προκύπτει από τη θέση και τη σημασία του στο δίκτυο. | - | Categorical | Δήλωση ΟΣΕ 2024 |
| **Συμμετοχή_σε_εμπορευματικό_διάδρομο** | Ένδειξη συμμετοχής του κόμβου σε βασικό εμπορευματικό διάδρομο | - | Categorical | Δήλωση ΟΣΕ 2024 |
| **Επηρεάστηκε_από_Daniel** | Δείκτης που αποτυπώνει αν ο κόμβος επηρεάστηκε άμεσα από το ακραίο καιρικό φαινόμενο “Daniel” (Σεπτέμβριος 2023). | - | Binary | Δήλωση ΟΣΕ 2024 |
| **Από_Κόμβο_ID** | Αναγνωριστικό κόμβου αφετηρίας της ακμής. | - | Categorical | - |
| **Προς_Κόμβο_ID** | Αναγνωριστικό κόμβου προορισμού της ακμής. | - | Categorical | - |
| **Ονομασία_Τμήματος** | Περιγραφική ονομασία της σιδηροδρομικής σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων. | - | Categorical | Δήλωση ΟΣΕ 2024 |
| **Κατηγορία Γραμμής** | Κατηγοριοποίηση της γραμμής που αποτυπώνει τη λειτουργική της σημασία στο δίκτυο. | - | Categorical | Δήλωση ΟΣΕ 2024 |
| **Μήκος** | Πραγματικό μήκος σιδηροδρομικού τμήματος. Υπολογίζεται από την ευθεία απόσταση και προσαυξάνεται κατά +15% ώστε να προσεγγίζει τη σιδηροδρομική χάραξη. Η προσέγγιση βασίζεται σε σχετική βιβλιογραφία (Bešinović, 2022) όπου οι πραγματικές σιδηροδρομικές αποστάσεις συχνά υπερβαίνουν τη γραμμική απόσταση | km | Numerical | Google Maps / OpenRailwayMap, Bešinović, 2022 |
| **Χρόνος ταξιδιού** | Υπολογισμένος ως (Μήκος / 80) × 60, με θεωρητική μέση ταχύτητα 80 km/h | minutes | Numerical | - |
| **Κατάσταση_2024** | Αποτύπωση της λειτουργικής κατάστασης της σύνδεσης το έτος 2024 | - | Categorical | Δήλωση ΟΣΕ 2024 |
| **Status_Binary** | Λειτουργική κατάσταση τμήματος (1 = λειτουργεί, 0 = εκτός). Προκύπτει από συνάρτηση που ελέγχει τη στήλη Κατάσταση_2024 | - | Binary | Δήλωση ΟΣΕ 2024 |
| **Κίνδυνος Συμφόρησης** | Κατηγορία συμφόρησης της γραμμής | - | Categorical | - |
| **Penalty** | Συντελεστής που προκύπτει από τον Κίνδυνο Συμφόρησης | - | Numerical | Ganin et al., 2017; Besinovic, 2022 |
| **Weight_Δικτύου_Baseline** | Γενικευμένο κόστος σύνδεσης, υπολογισμένο ως χρόνος ταξιδιού × penalty | minutes | Numerical | Ganin et al., 2017; Besinovic, 2022 |
| **Weight_Δικτύου_Daniel** | Τροποποιημένο βάρος σύνδεσης στο σενάριο διαταραχής “Daniel” όπου στις πληγείσες συνδέσεις αποδίδεται πολύ υψηλή τιμή γενικευμένου κόστους. | minutes | Numerical | - |
| **Τεκμηρίωση_Κινδύνου** | Αιτιολογεί την κατηγοριοποίηση της σύνδεσης ως χαμηλού, μέτριου ή υψηλού κινδύνου συμφόρησης. | - | Text | - |

### 4.1.4 Τελική σύνθεση βάσης δεδομένων

Συνδυάζοντας τα ανωτέρω, προέκυψε ένα ενιαίο αρχείο Excel το οποίο αποτέλεσε τη βάση της υπολογιστικής ανάλυσης. Το αρχείο οργανώθηκε σε τρία διακριτά φύλλα εργασίας:

- Φύλλο «Κόμβοι»: περιλαμβάνει τους 15 επιλεγμένους λειτουργικούς κόμβους του υπό μελέτη υποδικτύου, με μοναδικό κωδικό και περιγραφικά.
- Φύλλο «Συνδέσεις»: περιλαμβάνει τις 14 ακμές του υποδικτύου, οι οποίες αντιστοιχούν σε φυσικά σιδηροδρομικά τμήματα του βασικού άξονα και των κύριων διακλαδώσεων.
- Φύλλο «Data Dictionary»: περιλαμβάνει τον αναλυτικό ορισμό των υπολογιστικών μεταβλητών του υποδικτύου, τη μονάδα μέτρησης, τον τύπο δεδομένων και τη βιβλιογραφική αναφορά κάθε μεταβλητής.

Η τελική αυτή διάρθρωση διασφαλίζει σαφή διαχωρισμό μεταξύ περιγραφικών και υπολογιστικών δεδομένων και δυνατότητα αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων μέσω του κώδικα Python.

Το εν λόγω αρχείο αποτέλεσε την είσοδο στον κώδικα Python για την κατασκευή του γράφου, τον υπολογισμό αποδοτικότητας, τον υπολογισμό των δεικτών κεντρικότητας, των συντομότερων διαδρομών και των σεναρίων διαταραχής.

## 4.2 Ανάπτυξη κώδικα και αναπαράσταση δικτύου

### 4.2.1 Εισαγωγή δεδομένων και κατασκευή γράφου

Η ανάλυση του επιλεγμένου δικτύου υλοποιήθηκε σε περιβάλλον **Python** (Jupyter Notebook), με χρήση των βιβλιοθηκών **pandas** για τη διαχείριση πινάκων δεδομένων και **NetworkX** για τη μοντελοποίηση γράφων. Τα βασικά βήματα συνοψίζονται ως εξής:

1. Εισαγωγή δεδομένων Excel

Με τη συνάρτηση pandas.read_excel() διαβάστηκαν τα φύλλα «Κόμβοι» και «Συνδέσεις» σε δύο DataFrames (df_nodes, df_edges), διατηρώντας την ονομασία των στηλών όπως ορίστηκε στο Data Dictionary.

2. Δημιουργία γράφου

Ορίζεται ένας μη κατευθυνόμενος γράφος G = nx.Graph(), δεδομένου ότι η κίνηση των συρμών θεωρείται δυνατή και προς τις δύο κατευθύνσεις για όλα τα υπό μελέτη τμήματα.

3. Προσθήκη ακμών με attributes

Για κάθε γραμμή του πίνακα df_edges προστέθηκε μία ακμή G.add_edge(από, προς), με attributes:

- length = Μήκος_km
- travel_time = Χρόνος ταξιδιού
- weight = Weight_δικτύου
- status = Status_Binary

4. Προσθήκη κόμβων με ονόματα

Από το df_nodes προστέθηκαν οι κόμβοι με G.add_node(Κόμβος_ID, name='Όνομα_Κόμβου), ώστε η γραφική απεικόνιση και τα αποτελέσματα να εμφανίζονται με τις πραγματικές ονομασίες (π.χ. «Λάρισα», «Θεσσαλονίκη Σίνδος» κ.λπ.).

Μετά την κατασκευή, ο γράφος περιλαμβάνει **15 κόμβους** και **14 ακμές**, όπως επιβεβαιώνεται από τις συναρτήσεις G.number_of_nodes() και G.number_of_edges() και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1:

```
In [15]: G.number_of_nodes(), G.number_of_edges()

Out[15]: (15, 14 )
```

**Σχήμα 4.1** Έλεγχος του συνολικού αριθμού κόμβων και ακμών μετά την κατασκευή του βασικού γράφου

### 4.2.2 Συνεκτικότητα και βασικά χαρακτηριστικά

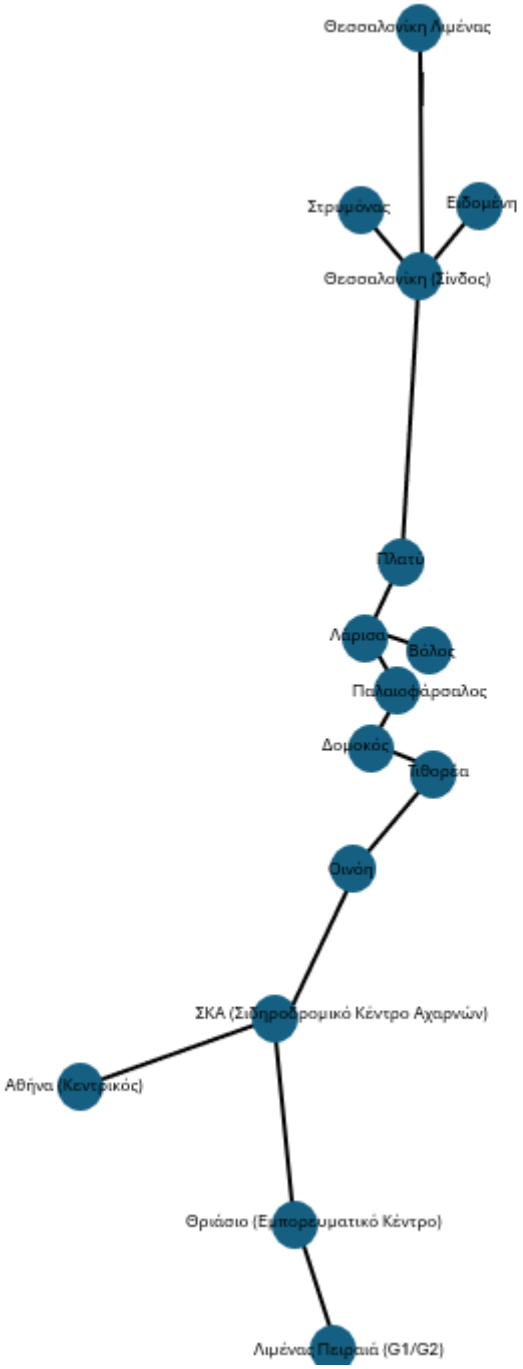
Η διερεύνηση της συνεκτικότητας και των βασικών δομικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη σιδηροδρομικού δικτύου αποσκοπεί στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οργανώνεται και λειτουργεί το σύστημα ως ενιαίο σύνολο. Το επιλεγμένο υποδίκτυο εμφανίζει σαφή συνεκτικότητα, καθώς όλοι οι εξεταζόμενοι κόμβοι ανήκουν στην ίδια συνδεδεμένη συνιστώσα και συνδέονται μέσω ενός κυρίαρχου γραμμικού κορμού. Παράλληλα, η τοπολογία του δικτύου χαρακτηρίζεται από έντονα γραμμικά χαρακτηριστικά και περιορισμένη ύπαρξη εναλλακτικών διαδρομών, στοιχεία που καθιστούν συγκεκριμένους κόμβους και συνδέσεις λειτουργικά καθοριστικούς. Η γραφική απεικόνιση που ακολουθεί συμβάλλει στην οπτική αποτύπωση της συνεκτικότητας και της δομής του δικτύου, και τα χαρακτηριστικά αυτά της συνεκτικότητας και της δομής επηρεάζουν άμεσα τόσο τις τιμές των δεικτών κεντρικότητας όσο και τα αποτελέσματα της ανάλυσης κρισιμότητας που ακολουθεί.

Γραφική απεικόνιση του βασικού δικτύου

Για τη γραφική αναπαράσταση του βασικού δικτύου (Σχήμα 4.2) χρησιμοποιήθηκε η διάταξη spring_layout της βιβλιοθήκης NetworkX, με σταθερό seed για λόγους αναπαραγωγιμότητας. Η γραφική απεικόνιση αποτυπώνει:

- Τους κόμβους του επιλεγμένου δικτύου (κύκλοι), με ετικέτες τα ονόματα των κόμβων.
- Τις ακμές μεταξύ των κόμβων, όπως αυτές προκύπτουν από το φύλλο «Συνδέσεις» των δεδομένων.
- Τη συνεκτική δομή του υποδικτύου, με όλους τους εξεταζόμενους κόμβους να ανήκουν σε μία ενιαία συνδεδεμένη συνιστώσα.
- Τον κυρίαρχο γραμμικό λειτουργικό άξονα του υποδικτύου, ο οποίος διατρέχει το σύστημα από τον Λιμένα Πειραιά έως τη Θεσσαλονίκη και συγκεντρώνει το μεγαλύτερο μέρος των ροών.

Το σχήμα αυτό λειτουργεί ως οπτική βάση για τα επόμενα βήματα, όπου εισάγονται βάρη και υπολογίζονται δείκτες αποδοτικότητας και κεντρικότητας.




**Σχήμα 4.2** Τοπολογική αναπαράσταση του εξεταζόμενου σιδηροδρομικού υποδικτύου (μη γεωγραφική απεικόνιση)

## 4.3 Αποτελέσματα

Στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζεται η λειτουργία του σιδηροδρομικού υποδικτύου μέσω της αποδοτικότητας δικτύου (Network Efficiency) και αναλύεται η κρισιμότητα των

επιμέρους συνδέσεων. Προκειμένου να υλοποιηθούν οι απαιτούμενες διαδικασίες της ανάλυσης του σιδηροδρομικού υποδικτύου, αναπτύχθηκε κώδικας στο περιβάλλον **Python**, με αξιοποίηση της βιβλιοθήκης **NetworkX**, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία για την ανάλυση σύνθετων δικτύων (Latora et al., 2001).

Ο αναπτυγμένος κώδικας καλύπτει το σύνολο των βασικών σταδίων της ανάλυσης και συγκεκριμένα:

- την εισαγωγή και επεξεργασία των δεδομένων του επιλεγμένου δικτύου από αρχεία Excel,
- τη δημιουργία του γράφου του σιδηροδρομικού υποδικτύου με χρήση βαρών (γενικευμένο κόστος),
- τον υπολογισμό της αποδοτικότητας του υποδικτύου (Network Efficiency),
- την προσομοίωση αστοχιών μέσω διαδοχικής αφαίρεσης συνδέσεων,
- τον υπολογισμό της μεταβολής της αποδοτικότητας και
- την κατάταξη των συνδέσεων ως προς την κρισιμότητά τους.

Η αξιολόγηση της κρισιμότητας ενός μεταφορικού δικτύου προϋποθέτει τη σύγκριση της συμπεριφοράς του δικτύου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και υπό συνθήκες διαταραχής.

Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία εξετάζονται δύο σενάρια λειτουργίας:

**Σενάριο 1**: Κανονική λειτουργία ως σενάριο αναφοράς (baseline) και

**Σενάριο 2**: Λειτουργία μετά τη διαταραχή από το φαινόμενο Daniel.

Τα σενάρια αυτά επιτρέπουν την ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης ακραίων γεγονότων στη συνολική απόδοση του επιλεγμένου σιδηροδρομικού δικτύου.

**Σενάριο 1 – Βασικό σενάριο αναφοράς (baseline)**

Το βασικό σενάριο αναφοράς (baseline) αντιπροσωπεύει την κανονική λειτουργία του σιδηροδρομικού υποδικτύου, στο οποίο όλες οι συνδέσεις θεωρούνται πλήρως λειτουργικές. Τα βάρη των ακμών βασίζονται σε γενικευμένο κόστος μετακίνησης που αντιστοιχεί σε συνθήκες χωρίς διαταραχές. Το σενάριο αυτό χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς, προκειμένου να εκτιμηθεί η μεταβολή των δεικτών αποδοτικότητας και να καταστεί δυνατή η σύγκριση με σενάρια διαταραχής.

**Σενάριο 2 – Σενάριο διαταραχής λόγω φαινομένου Daniel**

Το δεύτερο σενάριο αφορά τη λειτουργία του υποδικτύου μετά την εκδήλωση του ακραίου καιρικού φαινομένου Daniel. Στο σενάριο αυτό, οι συνδέσεις του δικτύου που επηρεάστηκαν από το φαινόμενο εμφανίζουν μειωμένη λειτουργικότητα ή αυξημένο κόστος μετακίνησης, σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα δεδομένα επιπτώσεων (ΟΣΕ Δήλωση δικτύου, 2024). Η ανάλυση του σεναρίου αυτού αποσκοπεί στην αποτύπωση του τρόπου με τον οποίο μια εκτεταμένη φυσική διαταραχή επηρεάζει τη συνολική

αποδοτικότητα του δικτύου και στον εντοπισμό τμημάτων με αυξημένη κρίσιμη σημασία.

Η σύγκριση των δύο σεναρίων επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της μεταβολής της αποδοτικότητας του υποδικτύου και, κατ' επέκταση, την ανάδειξη των συνδέσεων με τη μεγαλύτερη κρισιμότητα.

### 4.3.1 Υπολογισμός αποδοτικότητας

Αποδοτικότητα για Σενάριο 1 – Βασικό σενάριο αναφοράς (baseline)

Αρχικά υπολογίστηκε η αποδοτικότητα του βασικού σεναρίου αναφοράς (baseline), στο οποίο το σύνολο των σιδηροδρομικών συνδέσεων θεωρείται πλήρως λειτουργικό. Στο υπολογιστικό περιβάλλον της Python, ο υπολογισμός της αποδοτικότητας πραγματοποιήθηκε ως εξής:

1. Δημιουργήθηκε ο γράφος του υποδικτύου με χρήση της κλάσης Graph() της βιβλιοθήκης NetworkX.
2. Υπολογίστηκαν όλες οι συντομότερες διαδρομές μεταξύ των κόμβων με βάση το βάρος weight.
3. Για κάθε ζεύγος κόμβων με πεπερασμένη απόσταση, υπολογίστηκε ο αντίστροφος της απόστασης $1/dij$.
4. Οι τιμές αθροίστηκαν και κανονικοποιήθηκαν ως προς τον συνολικό αριθμό ζευγών κόμβων.

Η τιμή της αποδοτικότητας του βασικού σεναρίου $E_{baseline}$ υπολογίστηκε εφαρμόζοντας τον ορισμό της αποδοτικότητας δικτύου (Network Efficiency), όπως δίνεται στην Εξίσωση 3.1, στον πλήρως λειτουργικό γράφο του σιδηροδρομικού υποδικτύου. Συγκεκριμένα, για το βασικό σενάριο θεωρείται ότι όλες οι συνδέσεις του υποδικτύου είναι διαθέσιμες και λειτουργούν χωρίς διαταραχές, ενώ τα βάρη των ακμών αντιστοιχούν στο γενικευμένο κόστος μετακίνησης υπό κανονικές συνθήκες. Για κάθε ζεύγος κόμβων υπολογίστηκε η συντομότερη διαδρομή με βάση το βάρος αυτό και στη συνέχεια η αποδοτικότητα προέκυψε από τον μέσο όρο του αντίστροφου των αποστάσεων μεταξύ όλων των ζευγών κόμβων. Ο αντίστοιχος υπολογιστικός κώδικας παρατίθεται πλήρης στο Παράρτημα Α1.

Για το εξεταζόμενο δίκτυο, το οποίο περιλαμβάνει $N = 15$ κόμβους και $14$ συνδέσεις, η συνολική αποδοτικότητα προέκυψε ίση με:

$$E_{baseline} = 0.01055$$

Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση των σεναρίων διαταραχής και της κρισιμότητας των συνδέσεων. Ο υπολογισμός της αποδοτικότητας πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Python με χρήση της βιβλιοθήκης NetworkX (Σχήμα 4.3).

```
E_baseline = network_efficiency_weighted(G, weight="weight")
print("E_baseline =", E_baseline)
```

```
Κόμβοι: 15 Ακμές: 14
E_baseline = 0.010549103023593203
```

**Σχήμα 4.3** Υπολογισμός αποδοτικότητας βασικού σεναρίου

Η σχετικά χαμηλή απόλυτη τιμή του δείκτη αποδοτικότητας αντανακλά τη γραμμική μορφή του εξεταζόμενου σιδηροδρομικού δικτύου, όπου οι περισσότερες διαδρομές διέρχονται από κοινά τμήματα, αυξάνοντας τα μήκη των συντομότερων διαδρομών μεταξύ απομακρυσμένων κόμβων.

Αποδοτικότητα για Σενάριο 2 – Σενάριο διαταραχής λόγω φαινομένου Daniel

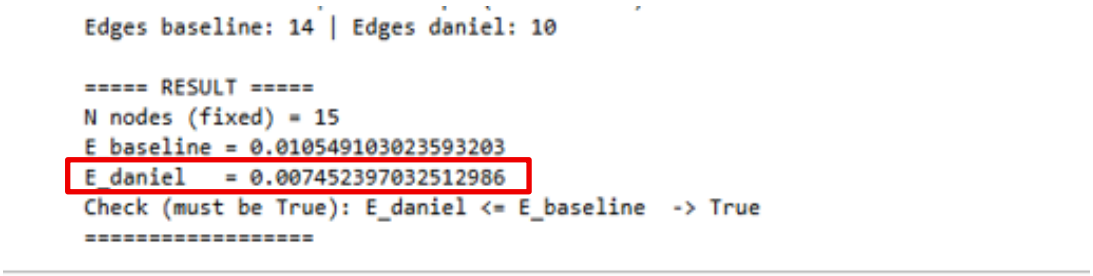
Για την αξιολόγηση της επίδρασης του φαινομένου Daniel στη συνολική λειτουργία του επιλεγμένου σιδηροδρομικού δικτύου, υπολογίστηκε η αποδοτικότητα του δικτύου υπό συνθήκες διαταραχής. Στο σενάριο αυτό διατηρείται σταθερό το σύνολο των κόμβων (N = 15), ενώ αφαιρούνται πλήρως από τον γράφο οι συνδέσεις (ακμές) για τις οποίες η μεταβλητή Status_Binary λαμβάνει τιμή 0, δηλαδή τα τμήματα που τέθηκαν εκτός λειτουργίας λόγω της πλημμύρας.

Η αποδοτικότητα υπολογίστηκε με τον ίδιο μαθηματικό ορισμό (Εξίσωση 3.1) της αποδοτικότητας δικτύου (Network Efficiency), με σταθερό παρονομαστή, ώστε τα αποτελέσματα να είναι άμεσα συγκρίσιμα με το βασικό σενάριο (Σχήμα 4.4). Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Python με χρήση της βιβλιοθήκης NetworkX, και πλήρης κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα Α2.

Για το εξεταζόμενο δίκτυο προέκυψε:

$$E_{daniel} = 0.00745$$

Επαληθεύεται ότι: $E_{daniel} < E_{baseline}$ γεγονός που επιβεβαιώνει τη μείωση της συνολικής αποδοτικότητας του υποδικτύου υπό συνθήκες διαταραχής.




**Σχήμα 4.4** Υπολογισμός αποδοτικότητας σεναρίου διαταραχής

Η μείωση της αποδοτικότητας από 0.01055 σε 0.00745 (29.4%) αποτυπώνει ποσοτικά την επίδραση της ταυτόχρονης διακοπής πολλαπλών κρίσιμων συνδέσεων στον βασικό σιδηροδρομικό άξονα. Το φαινόμενο Daniel δεν οδηγεί σε μηδενισμό της αποδοτικότητας, καθώς το δίκτυο δεν καθίσταται πλήρως ανενεργό εφόσον παραμένουν λειτουργικές επιμέρους συνδέσεις (π.χ. ενδοπεριφερειακές συνδέσεις). Ωστόσο, η απώλεια συνδέσεων στον κύριο άξονα βορρά–νότου καθιστά ορισμένα ζεύγη μη προσπελάσιμα. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει ότι το φαινόμενο Daniel έπληξε δομικά κρίσιμα τμήματα του υποδικτύου και ότι η ανάλυση αποδοτικότητας μπορεί να αποτυπώσει με ποσοτικό τρόπο τη μείωση της λειτουργικής επίδοσης του υποδικτύου.

### 4.3.2 Κρισιμότητα συνδέσεων

Για την αξιολόγηση και τον εντοπισμό των πλέον κρίσιμων συνδέσεων, εφαρμόστηκε ανάλυση κρισιμότητας ακμών (edge criticality analysis). Η ανάλυση κρισιμότητας βασίζεται στη λογική προσομοίωσης αστοχιών μέσω διαδοχικής αφαίρεσης συνδέσεων (Ganin et al., 2017).

Η διαδικασία περιλάμβανε τα ακόλουθα βήματα:

1. Ορισμό του baseline σεναρίου αναφοράς, με χρήση των baseline βαρών (γενικευμένο κόστος σε κανονικές συνθήκες).
2. Διαδοχική αφαίρεση κάθε σύνδεσης (ακμής) από το δίκτυο.
3. Επαναϋπολογισμό της αποδοτικότητας του υποδικτύου μετά την αφαίρεση της σύνδεσης σύμφωνα με την εξίσωση 3.1.
4. Υπολογισμό της μεταβολής της αποδοτικότητας (Εξίσωση 3.2):

$$\Delta E = E_0 - E_{-e}$$

5. Κανονικοποίηση της μεταβολής σε ποσοστιαία μορφή (Εξίσωση 3.3):

$$\Delta E_k(\%) = \frac{E_{baseline} - E_{-k}}{E_{baseline}} \times 100$$

Η παραπάνω διαδικασία υλοποιήθηκε πλήρως στην Python με χρήση βρόχου επανάληψης, όπου σε κάθε επανάληψη δημιουργείται νέος γράφος χωρίς τη συγκεκριμένη ακμή και υπολογίζεται εκ νέου η αποδοτικότητα.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4 κατά φθίνουσα σειρά, όπου καταγράφονται για κάθε ακμή:

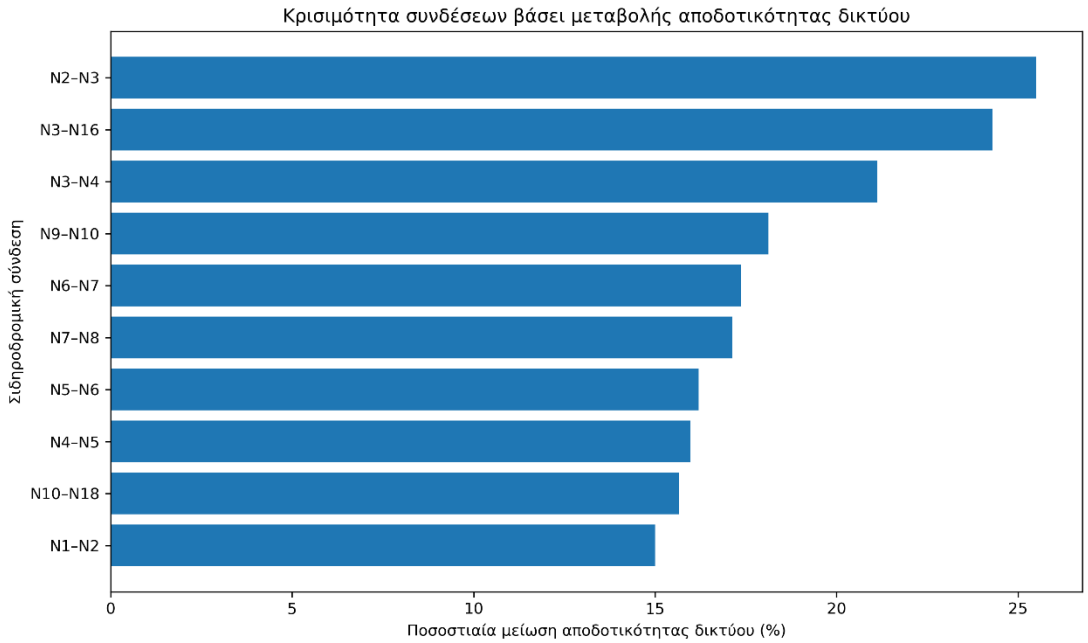
- η αποδοτικότητα του baseline (E_baseline),
- η αποδοτικότητα μετά την αφαίρεσή της (E_after_removal),
- και το ποσοστό μείωσης της αποδοτικότητας (ΔE_%).

**Πίνακας 4.4** Πίνακας κατάταξης κρισιμότητας ακμών

| Από_Κόμβο_ID | Προς_Κόμβο_ID | Ονομασία_Τμήματος | Weight_Δικτύου_Baseline | E_baseline | E_after_removal | ΔE | ΔE_% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N2 | N3 | Θριάσιο – ΣΚΑ | 13,814 | 0,01055 | 0,00786 | 0,00269 | 25,50 |
| N3 | N16 | ΣΚΑ – Αθήνα | 7,426 | 0,01055 | 0,00799 | 0,00256 | 24,30 |
| N3 | N4 | ΣΚΑ – Οινοη | 30,113 | 0,01055 | 0,00832 | 0,00223 | 21,13 |
| N9 | N10 | Πλατύ – Θεσσαλονίκη (Σίνδος) | 26,506 | 0,01055 | 0,00864 | 0,00191 | 18,12 |
| N6 | N7 | Δομοκός – Παλαιοφάρσαλος | 16,763 | 0,01055 | 0,00872 | 0,00183 | 17,37 |
| N7 | N8 | Παλαιοφάρσαλος – Λάρισα | 43,168 | 0,01055 | 0,00874 | 0,00181 | 17,12 |
| N5 | N6 | Τιθορέα – Δομοκός | 72,605 | 0,01055 | 0,00884 | 0,00171 | 16,20 |
| N4 | N5 | Οινοη – Τιθορέα | 83,159 | 0,01055 | 0,00886 | 0,00168 | 15,97 |
| N10 | N18 | Θεσσαλονίκη – Λιμένας Θεσσαλονίκης | 11,109 | 0,01055 | 0,00890 | 0,00165 | 15,66 |
| N1 | N2 | Πειραιάς – Θριάσιο | 16,819 | 0,01055 | 0,00897 | 0,00158 | 15,00 |
| N8 | N9 | Λάρισα – Πλατύ | 111,388 | 0,01055 | 0,00911 | 0,00143 | 13,60 |
| N10 | N12 | Θεσσαλονίκη – Ειδομένη | 56,309 | 0,01055 | 0,00980 | 0,00075 | 7,11 |
| N7 | N15 | Λάρισα – Βόλος | 52,520 | 0,01055 | 0,00980 | 0,00075 | 7,08 |
| N10 | N11 | Θεσσαλονίκη – Στρυμόνας | 79,003 | 0,01055 | 0,00992 | 0,00063 | 5,93 |

Από την κατάταξη των ακμών (Πίνακας 4.4) προκύπτει ότι ένα υποσύνολο του επιλεγμένου δικτύου παρουσιάζει δυσανάλογα υψηλή επίδραση στη συνολική αποδοτικότητα, καθώς η αφαίρεση κάθε μίας από τις συνδέσεις αυτές οδηγεί σε ποσοστιαία μείωση της αποδοτικότητας άνω του 16%. Οι ακμές αυτές εντοπίζονται κυρίως στο νότιο και κεντρικό τμήμα του βασικού σιδηροδρομικού άξονα, γεγονός που σχετίζεται με τη δομική τους θέση στον κύριο διάδρομο μεταφοράς μεταξύ του λιμένα Πειραιά και της Βόρειας Ελλάδας. Η υψηλή τους κρισιμότητα αντανακλά τη γραμμική τοπολογία του δικτύου και την περιορισμένη δυνατότητα εναλλακτικής δρομολόγησης. Αντίθετα, στο βόρειο τμήμα παρατηρείται μεγαλύτερη τοπική διασύνδεση γύρω από τον κόμβο της Θεσσαλονίκης, γεγονός που περιορίζει την επίδραση της αφαίρεσης μεμονωμένων συνδέσεων στην συνολική αποδοτικότητα του υποδικτύου.

Η κατανομή της ποσοστιαίας μείωσης της αποδοτικότητας ανά σύνδεση αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.5. Για λόγους ευκρίνειας και συγκριτικής αξιολόγησης, στο διάγραμμα απεικονίζονται μόνο οι δέκα ακμές με τη μεγαλύτερη επίδραση.




**Σχήμα 4.5** Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης αποδοτικότητας

1) N2 – N3 (Θριάσιο Εμπορευματικό Κέντρο – ΣΚΑ Αχαρνών)

Η ακμή Θριάσιο–ΣΚΑ αναδεικνύεται ως η πλέον κρίσιμη του υποδικτύου. Αποτελεί τον βασικό σύνδεσμο μεταξύ του κύριου εμπορευματικού κόμβου της Αττικής και του κεντρικού κόμβου διανομής του σιδηροδρομικού συστήματος. Η αφαίρεσή της οδηγεί σε σημαντική αύξηση του γενικευμένου κόστους για μεγάλο πλήθος διαδρομών, γεγονός που επιβεβαιώνει τον ρόλο της ως δομικού bottleneck για το νότιο τμήμα του άξονα.

2) N3 – N16 (ΣΚΑ Αχαρνών – Αθήνα Κεντρικός)

Η ακμή ΣΚΑ–Αθήνα Κεντρικός εμφανίζεται εξαιρετικά κρίσιμη, καθώς εξασφαλίζει τη λειτουργική συνέχεια μεταξύ του κεντρικού κόμβου διανομής και του αστικού/λειτουργικού πυρήνα της πρωτεύουσας. Η απώλειά της επηρεάζει δυσανάλογα τη συνολική αποδοτικότητα, επιβεβαιώνοντας τη συγκέντρωση κρίσιμων ροών γύρω από το μητροπολιτικό σύμπλεγμα της Αθήνας.

3) N3 – N4 (ΣΚΑ Αχαρνών – Οινόη)

Η ακμή ΣΚΑ–Οινόη αποτελεί τη βασική μετάβαση από το αστικό δίκτυο της Αττικής προς τον κύριο σιδηροδρομικό άξονα. Η υψηλή της κρισιμότητα υποδηλώνει ότι η

λειτουργία του υποδικτύου εξαρτάται έντονα από την απρόσκοπτη σύνδεση του ΣΚΑ με τον κορμό, χωρίς διαθέσιμες εσωτερικές παρακάμψεις.

4) N9 – N10 (Πλατύ – Θεσσαλονίκη/Σίνδος)

Η ακμή Πλατύ–Σίνδος αναδεικνύεται ως καθοριστική για την ολοκλήρωση της πρόσβασης προς τον κόμβο της Θεσσαλονίκης. Η απώλειά της επιφέρει σημαντική μείωση της αποδοτικότητας, επιβεβαιώνοντας τη λειτουργία του βόρειου τμήματος του άξονα ως συγκεντρωτικού και ευάλωτου σε διακοπές.

5) N6 – N7 (Δομοκός – Παλαιοφάρσαλος)

Η ακμή Δομοκός–Παλαιοφαρσαλος βρίσκεται στον πυρήνα του κεντρικού κορμού του δικτύου. Η υψηλή της κατάταξη αποτυπώνει τη στρατηγική σημασία της για τη διατήρηση της συνέχειας μεταξύ Κεντρικής και Βόρειας Ελλάδας, σε ένα δίκτυο με έντονα γραμμικά χαρακτηριστικά.

6) N7 – N8 (Παλαιοφάρσαλος – Λάρισα)

Η ακμή Παλαιοφάρσαλος–Λάρισα λειτουργεί ως κρίσιμος σύνδεσμος μεταξύ βασικών κόμβων του κεντρικού άξονα. Η απώλειά της αυξάνει το γενικευμένο κόστος σε πλήθος διαδρομών, γεγονός που υποδηλώνει περιορισμένες δυνατότητες εναλλακτικής δρομολόγησης στο συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου.

7) N5 – N6 (Τιθορέα – Δομοκός)

Η ακμή Τιθορέα–Δομοκός, αν και γεωγραφικά ενδιάμεση, εμφανίζεται υψηλά στην κατάταξη, επιβεβαιώνοντας ότι ακόμη και επιμέρους τμήματα του κορμού είναι δομικά κρίσιμα. Η αφαίρεσή της προκαλεί αλυσιδωτή αύξηση κόστους, λόγω απουσίας εναλλακτικών διαδρομών.

8) N4 – N5 (Οινόη – Τιθορέα)

Η ακμή Οινόη–Τιθορέα διασφαλίζει τη συνέχεια μεταξύ του νότιου και του κεντρικού τμήματος του άξονα. Η κρισιμότητά της υποδηλώνει ότι η λειτουργικότητα του υποδικτύου εξαρτάται από μια σχεδόν συνεχόμενη αλυσίδα συνδέσεων χωρίς περιθώρια εκτροπής.

9) N10 – N18 (Θεσσαλονίκη/Σίνδος – Λιμένας Θεσσαλονίκης)

Η ακμή Σίνδος–Λιμένας Θεσσαλονίκης αναδεικνύει τη σημασία των λιμενικών κόμβων στο σύστημα. Η απώλειά της μειώνει αισθητά την αποδοτικότητα, ιδίως για ροές που εξαρτώνται από τη διασύνδεση του σιδηροδρόμου με τις θαλάσσιες μεταφορές.

10) N1 – N2 (Λιμένας Πειραιά – Θριάσιο Εμπορευματικό Κέντρο)

Η ακμή Πειραιάς–Θριάσιο συμπληρώνει τη δεκάδα των πιο κρίσιμων συνδέσεων ακμών, επιβεβαιώνοντας τον κομβικό ρόλο του λιμένα Πειραιά ως πύλης εισόδου/εξόδου του δικτύου. Η απώλειά της αυξάνει το γενικευμένο κόστος πρόσβασης στο σύστημα και επηρεάζει δυσανάλογα τη συνολική αποδοτικότητα.

Τα παραπάνω αποτελέσματα σκιαγραφούν τη δομική θεωρητική κρισιμότητα των ακμών του επιλεγμένου δικτύου, όπως αυτή προκύπτει από την ανάλυση της μεταβολής της αποδοτικότητας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μια σύνδεση θεωρείται δομικά κρίσιμη όταν η αφαίρεσή της επιφέρει δυσανάλογα μεγάλη μείωση της συνολικής αποδοτικότητας του δικτύου, ανεξάρτητα από την αιτία της διακοπής.

Στο επόμενο υποκεφάλαιο εξετάζεται κατά πόσο οι ακμές που αναγνωρίζονται ως θεωρητικά πιο κρίσιμες συμπίπτουν με εκείνες που επηρεάστηκαν στην πράξη από το ακραίο καιρικό φαινόμενο Daniel, παρέχοντας έτσι μια σύνδεση μεταξύ δομικής ανάλυσης και πραγματικού σεναρίου διαταραχής.

## 4.4 Σύγκριση θεωρητικής κρισιμότητας και πραγματικής διαταραχής (κακοκαιρία Daniel)

Στο παρόν υποκεφάλαιο επιχειρείται η σύνδεση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης κρισιμότητας των συνδέσεων, όπως αυτή προέκυψε μέσω της αποδοτικότητας δικτύου, με το πραγματικό σενάριο διαταραχής που προκάλεσε το ακραίο καιρικό φαινόμενο Daniel. Στόχος είναι να αξιολογηθεί κατά πόσο οι συνδέσεις που αναγνωρίζονται ως δομικά κρίσιμες υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας συμπίπτουν με εκείνες που επηρεάστηκαν στην πράξη, καθώς και να αποτυπωθεί η λειτουργική επίπτωση της διαταραχής σε επίπεδο βασικών δρομολογίων.

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, το φαινόμενο Daniel προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές σε τμήματα του κεντρικού σιδηροδρομικού άξονα της χώρας, με αποτέλεσμα τη διακοπή της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας για μεγάλο χρονικό διάστημα και την ουσιαστική απομόνωση κρίσιμων περιοχών του δικτύου. Το γεγονός αυτό καθιστά το συγκεκριμένο συμβάν ιδιαίτερα κατάλληλο για τη διερεύνηση της λειτουργικής επίδρασης των διαταραχών στο σιδηροδρομικό δίκτυο και τη σύγκριση θεωρητικών αποτελεσμάτων κρισιμότητας με πραγματικές επιπτώσεις.

### 4.4.1 Διερεύνηση της σχέσης δομικής κρισιμότητας και πραγματικών αστοχιών

Η ανάλυση κρισιμότητας συνδέσεων που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο (Πίνακας 4.4 και Σχήμα 4.5) έδειξε ότι οι μεγαλύτερες μειώσεις της αποδοτικότητας του υποδικτύου προκαλούνται από την απώλεια συνδέσεων που βρίσκονται στον βασικό σιδηροδρομικό κορμό, και ειδικότερα σε τμήματα που εξασφαλίζουν τη συνέχεια μεταξύ των κύριων κόμβων του άξονα Αθήνα–Θεσσαλονίκη.

Η σύγκριση των θεωρητικά πιο κρίσιμων συνδέσεων με τις συνδέσεις που επηρεάστηκαν από το φαινόμενο Daniel δείχνει ότι **3 από τις 10** συνδέσεις με τη μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση αποδοτικότητας περιλαμβάνονται και μεταξύ των πληγεισών, γεγονός που υποδηλώνει σημαντική αντιστοιχία μεταξύ των θεωρητικά κρίσιμων συνδέσεων και εκείνων που επηρεάστηκαν στην πράξη (Πίνακας 4.5).

Συγκεκριμένα, οι συνδέσεις Τιθορέα–Δομοκός, Δομοκός–Παλαιοφάρσαλος και Παλαιοφάρσαλος–Λάρισα, οι οποίες κατατάσσονται υψηλά ως προς τη δομική τους κρισιμότητα, συγκαταλέγονται και μεταξύ των πλέον σοβαρά πληγέντων στην πράξη. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η πραγματική διαταραχή έπληξε σημεία του δικτύου με υψηλή λειτουργική σημασία, επιβεβαιώνοντας τη χρησιμότητα της ανάλυσης αποδοτικότητας ως εργαλείου εντοπισμού ευάλωτων συνδέσεων, όπως έχει αναδειχθεί και στη σχετική βιβλιογραφία (Belokas et al., 2024).

**Πίνακας 4.5** Κατάταξη των 10 πιο κρίσιμων συνδέσεων του υποδικτύου βάση της μεταβολής της αποδοτικότητας και ένδειξη επίδρασης από το φαινόμενο Daniel

| Edge_u | Edge_v | Weight_edge | E_baseline | E_without_edge | Delta_E | Delta_E_percent | edge_key | daniel_affected |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N2 | N3 | 13,8138 | 0,01055 | 0,00786 | 0,00269 | 25,50 | N2-N3 | FALSE |
| N3 | N16 | 7,4261 | 0,01055 | 0,00799 | 0,00256 | 24,30 | N16-N3 | FALSE |
| N3 | N4 | 30,1133 | 0,01055 | 0,00832 | 0,00223 | 21,13 | N3-N4 | FALSE |
| N9 | N10 | 26,5064 | 0,01055 | 0,00864 | 0,00191 | 18,12 | N10-N9 | FALSE |
| N6 | N7 | 16,763 | 0,01055 | 0,00872 | 0,00183 | 17,37 | N6-N7 | TRUE |
| N7 | N8 | 43,1681 | 0,01055 | 0,00874 | 0,00181 | 17,12 | N7-N8 | TRUE |
| N5 | N6 | 72,6053 | 0,01055 | 0,00884 | 0,00171 | 16,20 | N5-N6 | TRUE |
| N4 | N5 | 83,1588 | 0,01055 | 0,00886 | 0,00168 | 15,97 | N4-N5 | FALSE |
| N10 | N18 | 11,1090 | 0,01055 | 0,00890 | 0,00165 | 15,66 | N10-N18 | FALSE |
| N1 | N2 | 16,8188 | 0,01055 | 0,00897 | 0,00158 | 15,00 | N1-N2 | FALSE |

Παράλληλα, παρατηρείται ότι η πραγματική έκταση των επιπτώσεων δεν περιορίστηκε αποκλειστικά στις θεωρητικά πιο κρίσιμες συνδέσεις. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει τον ρόλο εξωγενών παραγόντων, όπως τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, η εγγύτητα σε υδρολογικά δίκτυα και η τεχνική κατάσταση των υποδομών, οι οποίοι δεν αποτυπώνονται πλήρως σε ένα τοπολογικό μοντέλο, αλλά επηρεάζουν καθοριστικά την πραγματική τρωτότητα του δικτύου.

### 4.4.2 Συμπληρωματική αξιολόγηση κόμβων μέσω δεικτών κεντρικότητας

Η χρήση δεικτών κεντρικότητας εντάσσεται στην παρούσα ανάλυση με στόχο τη συμπληρωματική αξιολόγηση της σημασίας των κόμβων του σιδηροδρομικού δικτύου, πέραν της ανάλυσης κρισιμότητας των συνδέσεων. Ενώ η ανάλυση κρισιμότητας επικεντρώνεται στις επιπτώσεις της αφαίρεσης ακμών στη συνολική αποδοτικότητα του

δικτύου, οι δείκτες κεντρικότητας επιτρέπουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε επίπεδο κόμβων, αναδεικνύοντας σημεία συγκέντρωσης ροών, διαμεσολάβησης και δομικής εγγύτητας. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατή η κατανόηση του ρόλου που διαδραματίζουν επιμέρους κόμβοι στη λειτουργία του δικτύου και η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ τοπικών τοπολογικών χαρακτηριστικών και συνολικής λειτουργίας του δικτύου.

Οι δείκτες κεντρικότητας στο υπό μελέτη δίκτυο υπολογίστηκαν στην Python με τη βιβλιοθήκη NetworkX μέσω των ενσωματωμένων συναρτήσεων:

- nx.degree_centrality(G) για τον δείκτη degree.
- nx.betweenness_centrality(G, weight="Weight_δικτύου") για το betweenness, λαμβάνοντας υπόψη το γενικευμένο κόστος.
- nx.closeness_centrality(G, distance="Weight_δικτύου") για το closeness, όπου ως «απόσταση» ορίζεται επίσης το γενικευμένο κόστος.

Οι αριθμητικές τιμές που προέκυψαν εξήχθησαν σε πίνακα Excel (Πίνακα 4.6), μαζί με τα IDs και τις ονομασίες των κόμβων. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων παρατίθεται στο Παράρτημα Β. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται αφενός η διαφάνεια των υπολογισμών, αφετέρου η δυνατότητα επεξεργασίας/ταξινόμησης των δεικτών ανά κόμβο.

**Πίνακας 4.6** Τιμές των δεικτών degree, betweenness και closeness centrality για όλους τους κόμβους του υποδικτύου

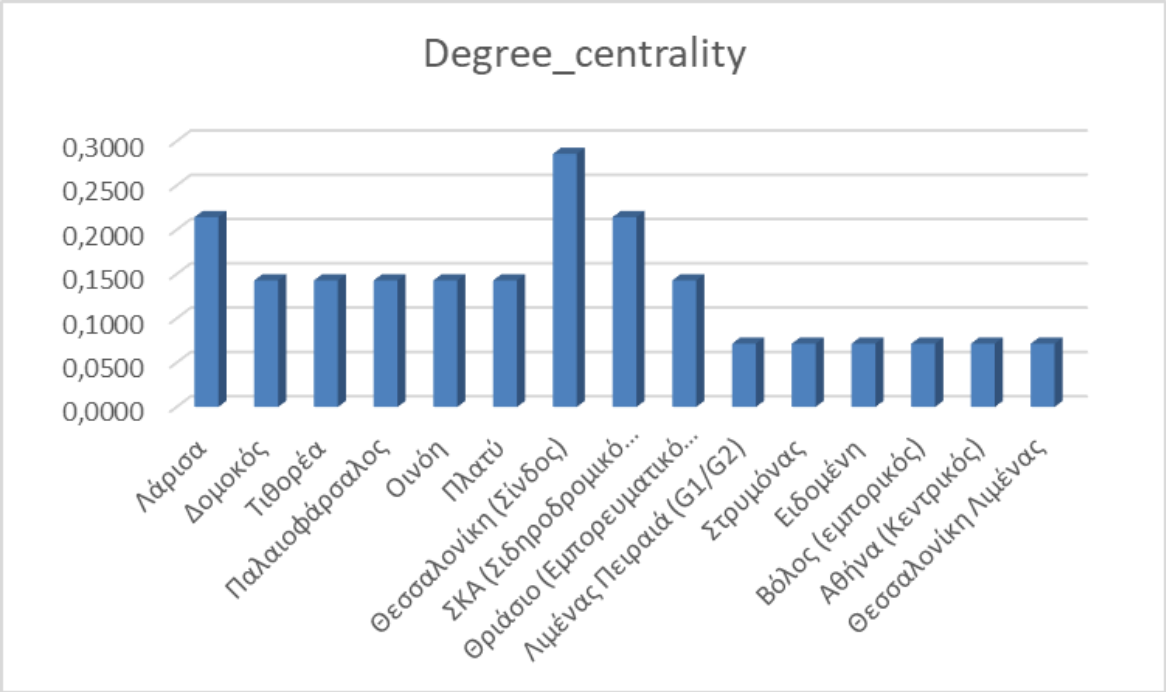
| Όνομα_Κόμβου | Degree_centrality | Betweenness_centrality | Closeness_centrality |
|---|---|---|---|
| Λάρισα | 0,2143 | 0,6044 | 0,0062 |
| Δομοκός | 0,1429 | 0,5275 | 0,0061 |
| Τιθορέα | 0,1429 | 0,4945 | 0,0056 |
| Παλαιοφάρσαλος | 0,1429 | 0,4945 | 0,0059 |
| Οινόη | 0,1429 | 0,4396 | 0,0048 |
| Πλατύ | 0,1429 | 0,4396 | 0,0047 |
| Θεσσαλονίκη (Σίνδος) | 0,2857 | 0,3956 | 0,0045 |
| ΣΚΑ (Σιδηροδρομικό Κέντρο Αχαρνών) | 0,2143 | 0,3846 | 0,0045 |
| Θριάσιο (Εμπορευματικό Κέντρο) | 0,1429 | 0,1429 | 0,0043 |
| Λιμένας Πειραιά (G1/G2) | 0,0714 | 0,0000 | 0,0040 |
| Στρυμόνας | 0,0714 | 0,0000 | 0,0034 |
| Ειδομένη | 0,0714 | 0,0000 | 0,0036 |
| Βόλος (εμπορικός) | 0,0714 | 0,0000 | 0,0048 |
| Αθήνα (Κεντρικός) | 0,0714 | 0,0000 | 0,0043 |
| Θεσσαλονίκη Λιμένας | 0,0714 | 0,0000 | 0,0043 |

Στον Πίνακα 4.6 για κάθε κόμβο αναγράφονται:

- Degree_centrality: «πόσες συνδέσεις έχει κάθε κόμβος ως προς τον μέγιστο δυνατό αριθμό».
- Betweenness_centrality: «πόσο συχνά ένας κόμβος βρίσκεται σε βέλτιστες διαδρομές μεταξύ άλλων κόμβων, με βάση το γενικευμένο κόστος, όπως αυτό έχει ενσωματωθεί στο βάρος (weight) του δικτύου».
- Closeness_centrality: «πόσο "κοντά" είναι ένας κόμβος σε όλους τους άλλους, με βάση το γενικευμένο κόστος».

Από τον Πίνακα 4.6 προκύπτει ότι η δομή του υπό μελέτη σιδηροδρομικού δικτύου χαρακτηρίζεται από έντονη γραμμικότητα, με έναν κυρίαρχο λειτουργικό άξονα Αθήνα – Λάρισα – Θεσσαλονίκη. Οι διαφορετικοί δείκτες φωτίζουν συμπληρωματικές πτυχές της σημασίας των κόμβων:

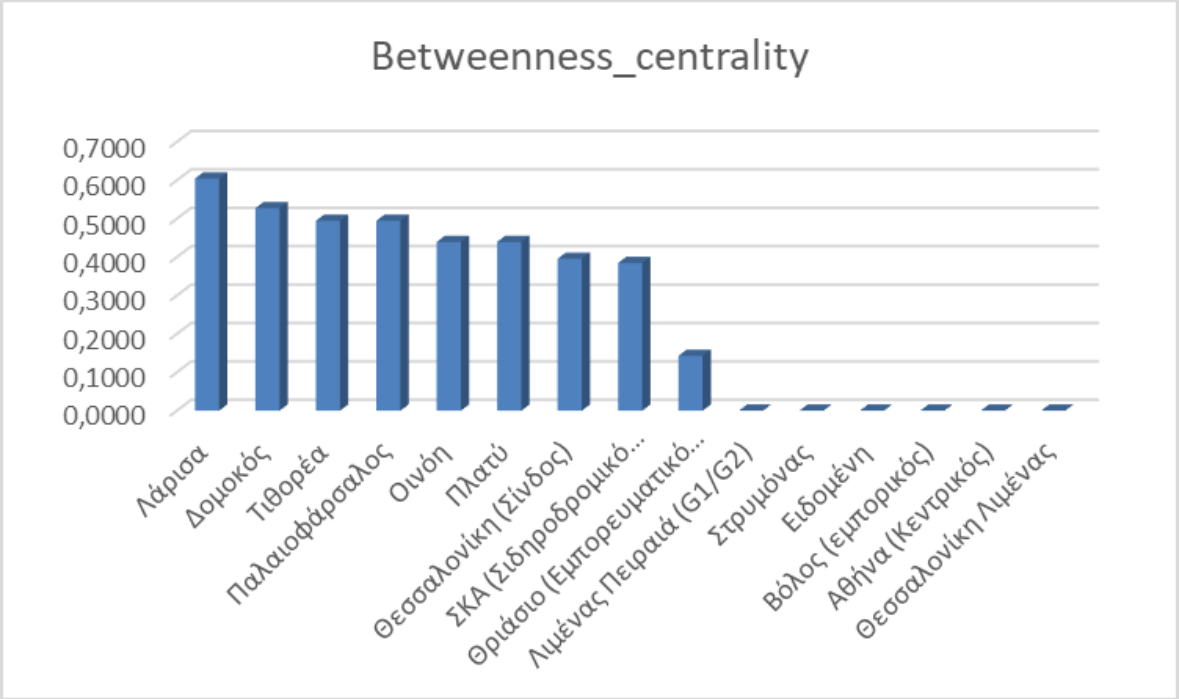
- **Βαθμός κεντρικότητας (Degree centrality)** (Σχήμα 4.6)
  Κόμβοι όπως η Θεσσαλονίκη (Σίνδος), ΣΚΑ και Λάρισα παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές degree centrality, γεγονός που αντανακλά τον ρόλο τους ως σημεία συγκέντρωσης και διανομής ροών, με πολλαπλές άμεσες συνδέσεις. Οι κόμβοι αυτοί λειτουργούν ως βασικές πύλες εισόδου/εξόδου του δικτύου.




**Σχήμα 4.6** Γραφική απεικόνιση των τιμών degree centrality ανά κόμβο

- **Δείκτης ενδιάμεσης κεντρικότητας (Betweenness centrality)** (Σχήμα 4.7)

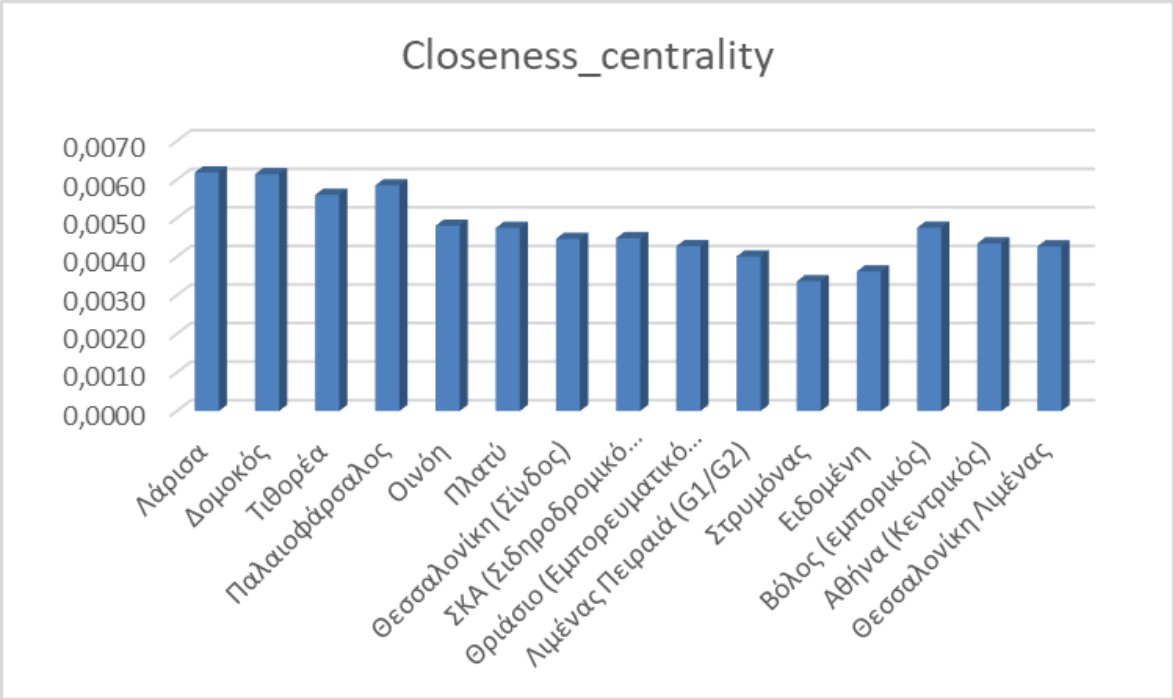
  Κόμβοι που βρίσκονται κατά μήκος του κύριου άξονα, όπως η Λάρισα, ο Δομοκός, η Τιθορέα, ο Παλαιοφάρσαλος**,** Οινόη και το Πλατύ, εμφανίζουν υψηλές τιμές betweenness centrality. Αυτό υποδηλώνει ότι λειτουργούν ως βασικοί διαμεσολαβητές ροών, καθώς μεγάλο ποσοστό των βέλτιστων διαδρομών του υποδικτύου διέρχεται από αυτούς. Η αστοχία ή διακοπή λειτουργίας τους αναμένεται να έχει δυσανάλογα μεγάλη επίδραση στη συνολική απόδοση.




**Σχήμα 4.7** Γραφική απεικόνιση των τιμών betweenness centrality ανά κόμβο

- **Κεντρικότητα εγγύτητας (Closeness centrality)** (Σχήμα 4.8)

  Οι τιμές closeness centrality είναι αυξημένες για κόμβους του βασικού διαδρόμου (Λάρισα, Δομοκός, Τιθορέα, Παλαιοφάρσαλος) υποδεικνύοντας τη λειτουργική τους εγγύτητα προς το σύνολο του δικτύου με βάση το γενικευμένο κόστος μετακίνησης. Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι αυτοί μπορούν, θεωρητικά, να προσεγγίσουν το σύνολο του δικτύου με μικρότερο συνολικό κόστος, γεγονός που ενισχύει τη σημασία τους υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.




**Σχήμα 4.8** Γραφική απεικόνιση των τιμών closeness centrality ανά κόμβο

Συνολικά, τα αποτελέσματα των δεικτών κεντρικότητας επιβεβαιώνουν ότι η λειτουργία του υποδικτύου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από έναν περιορισμένο αριθμό κόμβων του κύριου άξονα.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δεικτών κεντρικότητας με την ανάλυση κρισιμότητας των συνδέσεων δείχνει ότι τα δύο εργαλεία παρέχουν συμπληρωματικές πληροφορίες για τη δομή του δικτύου. Ειδικότερα, οι ακμές των οποίων η αφαίρεση οδηγεί σε σημαντική μείωση της συνολικής αποδοτικότητας συνδέονται συχνά με κόμβους που εμφανίζουν αυξημένες τιμές degree, betweenness και closeness centrality, γεγονός που υποδηλώνει τη σημασία τους στη διαμεσολάβηση ροών και στην προσβασιμότητα του συστήματος. Ωστόσο, η κρισιμότητα μιας σύνδεσης δεν ταυτίζεται απαραίτητα με υψηλή κεντρικότητα των κόμβων που τη συγκροτούν, καθώς ορισμένες ακμές μπορεί να αποτελούν δομικά σημεία τομής του δικτύου, των οποίων η αφαίρεση διακόπτει τη συνέχεια του βασικού διαδρόμου ακόμη και όταν οι επιμέρους κόμβοι δεν εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές κεντρικότητας.

Επίσης, η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δεικτών κεντρικότητας με τις συνδέσεις που επηρεάστηκαν κατά το ακραίο καιρικό φαινόμενο Daniel αναδεικνύει μια σαφή λειτουργική συσχέτιση μεταξύ θεωρητικής ανάλυσης και πραγματικών επιπτώσεων.

Ειδικότερα, οι συνδέσεις που υπέστησαν τις σοβαρότερες διαταραχές αφορούν τμήματα του υποδικτύου που συνδέουν κόμβους με υψηλές τιμές betweenness και closeness centrality, όπως οι κόμβοι Τιθορέα, Δομοκός, Λάρισα και Παλαιοφάρσαλος. Οι κόμβοι αυτοί εμφανίζονται συστηματικά ως ενδιάμεσοι στις βέλτιστες διαδρομές μεταξύ μεγάλου αριθμού ζευγών προέλευσης–προορισμού, γεγονός που τους προσδίδει αυξημένο ρόλο διαμεσολάβησης ροών κατά μήκος του βασικού σιδηροδρομικού άξονα.

Το γεγονός ότι οι πλέον πληγείσες από το φαινόμενο Daniel συνδέσεις βρίσκονται μεταξύ κόμβων με αυξημένη κεντρικότητα δεν υποδηλώνει αυξημένη πιθανότητα αστοχίας των συγκεκριμένων τμημάτων, αλλά καταδεικνύει ότι η διακοπή τους επιφέρει δυσανάλογα μεγάλες συνέπειες στη συνολική λειτουργία του συστήματος. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει τη συμπληρωματική αξία των δεικτών κεντρικότητας ως εργαλείων ερμηνείας της τρωτότητας του δικτύου και λειτουργεί ως φυσική μετάβαση στο επόμενο υποκεφάλαιο, όπου το σενάριο Daniel εφαρμόζεται άμεσα στο δίκτυο και αποτυπώνεται η απώλεια της δυνατότητας εφικτής σιδηροδρομικής δρομολόγησης.

### 4.4.3 Εφαρμογή της διαταραχής Daniel στο βασικό δρομολόγιο Πειραιάς-Θεσσαλονίκη

Προκειμένου να αποτυπωθούν με σαφήνεια οι λειτουργικές συνέπειες της διαταραχής σε επίπεδο μετακινήσεων, εφαρμόστηκε το σενάριο Daniel σε ένα βασικό σενάριο δρομολόγησης που συνδέει τον Λιμένα του Πειραιά με τη Θεσσαλονίκη. Η συγκεκριμένη διαδρομή αποτελεί τον πυρήνα του ελληνικού σιδηροδρομικού συστήματος και συνδέεται άμεσα με τις εμπορευματικές και επιβατικές ροές που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον Python, με χρήση της βιβλιοθήκης NetworkX, μέσω υπολογισμού της συντομότερης διαδρομής μεταξύ των δύο κόμβων με βάση το γενικευμένο κόστος. Συγκεκριμένα, για το baseline σενάριο χρησιμοποιήθηκαν τα βάρη κανονικής λειτουργίας, ενώ για το σενάριο Daniel εφαρμόστηκε είτε ιδιαίτερα αυξημένα βάρη (penalty weights) στις πληγείσες συνδέσεις είτε πλήρης αφαίρεσή τους από το υποδίκτυο. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις χρησιμοποιήθηκαν ώστε να αποτυπωθούν διαφορετικοί βαθμοί λειτουργικής διαταραχής του υποδικτύου. Η εφαρμογή πολύ υψηλών βαρών προσομοιώνει συνθήκες σοβαρής υποβάθμισης της λειτουργίας των συνδέσεων, ενώ η πλήρης αφαίρεσή τους αντιστοιχεί σε σενάριο ολοκληρωτικής διακοπής της κυκλοφορίας. Ο υπολογισμός της συντομότερης διαδρομής και του συνολικού κόστους πραγματοποιήθηκε με χρήση της συνάρτησης shortest_path και του αντίστοιχου μήκους διαδρομής (shortest_path_length).

Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (baseline), ο αλγόριθμος εντοπίζει πλήρως λειτουργική διαδρομή κατά μήκος του βασικού άξονα, με πεπερασμένη συνολική τιμή γενικευμένου κόστους. Αντιθέτως, στο σενάριο Daniel, η ίδια διαδρομή εμφανίζει εξαιρετικά υψηλό συνολικό κόστος λόγω των ποινών στις πληγείσες συνδέσεις, γεγονός που υποδηλώνει πρακτική αδυναμία εξυπηρέτησης της ροής. Στην περίπτωση πλήρους αφαίρεσης των πληγέντων τμημάτων, δεν εντοπίζεται καμία εφικτή διαδρομή μεταξύ Πειραιά και Θεσσαλονίκης, αποτέλεσμα που αποτυπώνεται ρητά στα υπολογιστικά αποτελέσματα ως «No feasible path».

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9, όπου απεικονίζονται η ακολουθία των κόμβων, το συνολικό κόστος της διαδρομής στο baseline σενάριο και η απώλεια εφικτής διαδρομής υπό το σενάριο Daniel.

```
======================================================================
OD: N1 → N10
----------------------------------------------------------------------
BASELINE (fully operational)
  Path IDs  : ['N1', 'N2', 'N3', 'N4', 'N5', 'N6', 'N7', 'N8', 'N9', 'N10']
  Cost      : 484.708
  Path names: N1 (Λιμένας Πειραιά (G1/G2)) → N2 (Θριάσιο (Εμπορευματικό Κέντρο)) → N3 (ΣΚΑ (Σιδηροδρομικό Κέντρο Αχαρνών)) → N4
(Οινόη) → N5 (Τιθορέα) → N6 (Δομοκός) → N7 (Παλαιοφάρσαλος)→ N8 (Λάρισα)  → N9 (Πλατύ) → N10 (Θεσσαλονίκη (Σίνδος))
----------------------------------------------------------------------
DANIEL (penalty / BIG weights on disrupted edges)
  Path IDs  : ['N1', 'N2', 'N3', 'N4', 'N5', 'N6', 'N7', 'N8', 'N9', 'N10']
  Cost      : 300307.394
  Disrupted edges on path: [('N5', 'N6'), ('N6', 'N7'), ('N7', 'N8')]
  Path names: N1 (Λιμένας Πειραιά (G1/G2)) → N2 (Θριάσιο (Εμπορευματικό Κέντρο)) → N3 (ΣΚΑ (Σιδηροδρομικό Κέντρο Αχαρνών)) → N4
(Οινόη) → N5 (Τιθορέα) → N6 (Δομοκός) → N7 (Παλαιοφάρσαλος)→ N8 (Λάρισα)  → N9 (Πλατύ) → N10 (Θεσσαλονίκη (Σίνδος))
----------------------------------------------------------------------
DANIEL (hard removal): NO FEASIBLE PATH
======================================================================
```

**Σχήμα 4.9** Υπολογισμός διαδρομής Πειραιάς–Θεσσαλονίκη υπό κανονικές συνθήκες και σενάριο διαταραχής Daniel

## 4.5 Συνολική αποτίμηση

Η συνδυαστική εξέταση της ανάλυσης κρισιμότητας των συνδέσεων, των δεικτών κεντρικότητας των κόμβων και της εφαρμογής του πραγματικού σεναρίου διαταραχής Daniel επιτρέπει μια ολοκληρωμένη ερμηνεία της λειτουργικής δομής του εξεταζόμενου σιδηροδρομικού δικτύου. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η έντονα γραμμική διάρθρωση του διαδρόμου συνεπάγεται συγκέντρωση της λειτουργικής σημασίας σε περιορισμένο αριθμό κόμβων και συνδέσεων. Ως αποτέλεσμα, η διακοπή συγκεκριμένων τμημάτων του βασικού άξονα επηρεάζει δυσανάλογα τη συνολική συνδεσιμότητα και αποδοτικότητα του συστήματος.

Η ανάλυση των δεικτών κεντρικότητας αναδεικνύει τη συγκέντρωση της λειτουργικής σημασίας σε συγκεκριμένους κόμβους του βασικού διαδρόμου Πειραιά–Θεσσαλονίκη. Κόμβοι όπως η Λάρισα, ο Δομοκός, η Τιθορέα, ο Παλαιοφάρσαλος και το Πλατύ εμφανίζουν αυξημένες τιμές betweenness και closeness centrality, γεγονός που υποδηλώνει τον καθοριστικό τους ρόλο στη διέλευση μεγάλου μέρους των

συντομότερων διαδρομών και στη συνολική προσβασιμότητα του υποδικτύου. Οι κόμβοι αυτοί βρίσκονται σε θέσεις όπου συγκεντρώνεται μεγάλο μέρος των ροών κατά μήκος του διαδρόμου και συνεπώς αποτελούν κρίσιμα σημεία για τη διατήρηση της λειτουργικής συνέχειας του συστήματος. Αντίθετα, ο δείκτης degree centrality αναδεικνύει κυρίως την τοπική συνδεσιμότητα ορισμένων κόμβων, όπως της Θεσσαλονίκης, χωρίς αυτό να συνεπάγεται απαραίτητα αντίστοιχα υψηλή λειτουργική κρισιμότητα στο επίπεδο της συνολικής διάρθρωσης του υποδικτύου.

Παράλληλα, η ανάλυση κρισιμότητας συνδέσεων έδειξε ότι η αφαίρεση συγκεκριμένων ακμών του ίδιου βασικού διαδρόμου προκαλεί δυσανάλογα μεγάλη μείωση της συνολικής αποδοτικότητας του υποδικτύου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι συνδέσεις με τη μεγαλύτερη επίδραση στην αποδοτικότητα εντοπίζονται κυρίως στο νότιο και κεντρικό τμήμα του άξονα Πειραιά–Θεσσαλονίκη, γεγονός που συνδέεται με τη μειωμένη ύπαρξη εναλλακτικών διαδρομών στα τμήματα αυτά. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει ότι η λειτουργία του συστήματος δεν κατανέμεται ομοιόμορφα, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από περιορισμένα τμήματα του υποδικτύου με αυξημένο δομικό ρόλο.

Η εφαρμογή του σεναρίου Daniel λειτουργεί ως εμπειρική επιβεβαίωση των παραπάνω θεωρητικών αποτελεσμάτων. Οι συνδέσεις που επλήγησαν από το ακραίο καιρικό φαινόμενο αντιστοιχούν σε τμήματα του υποδικτύου που, σύμφωνα τόσο με τους δείκτες κεντρικότητας όσο και με την ανάλυση αποδοτικότητας, χαρακτηρίζονται ως υψηλής κρισιμότητας. Η αδυναμία διατήρησης λειτουργικών εναλλακτικών διαδρομών και η σημαντική αύξηση του γενικευμένου κόστους μετακίνησης καταδεικνύουν ότι το δίκτυο παρουσιάζει περιορισμένη δυνατότητα παράκαμψης σε εκτεταμένες διαταραχές του κύριου άξονα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου προσφέρουν μια συνεκτική και τεκμηριωμένη σύνδεση μεταξύ της δομικής ανάλυσης του υποδικτύου και των πραγματικών επιπτώσεων που παρατηρήθηκαν κατά το φαινόμενο Daniel. Η σύγκλιση θεωρητικών δεικτών και εμπειρικών παρατηρήσεων ενισχύει την αξιοπιστία της μεθοδολογίας και αποτελεί τη βάση για τη συζήτηση συμπερασμάτων και την ανάπτυξη προτάσεων ενίσχυσης της λειτουργίας του δικτύου σε περιπτώσεις διαταραχών, που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

# 5 Συμπεράσματα και προτάσεις

## 5.1 Γενικά

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη διερεύνηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του βασικού εμπορευματικού άξονα, με έμφαση στον εντοπισμό κρίσιμων συνδέσεων και στην αποτίμηση των επιπτώσεων ακραίων διαταραχών. Αφετηρία της ανάλυσης αποτέλεσε η διαπίστωση, όπως προέκυψε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ότι τα σιδηροδρομικά δίκτυα -και ιδίως εκείνα με έντονα γραμμικά και ιεραρχικά χαρακτηριστικά- εμφανίζουν αυξημένη ευαισθησία σε γεγονότα μεγάλης κλίμακας, ενώ η δυνατότητα εναλλακτικής δρομολόγησης είναι συχνά περιορισμένη.

Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία υιοθέτησε μια προσέγγιση βασισμένη στη Θεωρία Δικτύων, με στόχο την ποσοτική αποτίμηση της συνολικής αποδοτικότητας του συστήματος και την αξιολόγηση της σημασίας των επιμέρους συνδέσεων. Μέσω της έννοιας της αποδοτικότητας δικτύου (Network Efficiency), κατέστη δυνατή η ενιαία αποτύπωση τόσο της τοπολογικής διάρθρωσης του επιλεγμένου δικτύου όσο και των λειτουργικών χαρακτηριστικών του, όπως αυτά εκφράζονται μέσω του γενικευμένου κόστους μετακίνησης.

Η ανάλυση δεν περιορίστηκε σε θεωρητική διερεύνηση υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, αλλά επεκτάθηκε στη μελέτη ενός πραγματικού και πρόσφατου σεναρίου διαταραχής, του ακραίου καιρικού φαινομένου Daniel. Η σύγκριση μεταξύ της θεωρητικής κρισιμότητας των συνδέσεων και των πραγματικών επιπτώσεων της διαταραχής ανέδειξε ότι οι δομικά κρίσιμες συνδέσεις του υποδικτύου συμπίπτουν σε σημαντικό βαθμό με εκείνες των οποίων η διακοπή επιφέρει τις σοβαρότερες λειτουργικές συνέπειες. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα της ανάλυσης αποδοτικότητας ως εργαλείου ποσοτικής αποτίμησης της λειτουργικής ευαισθησίας του σιδηροδρομικού δικτύου σε διακοπές κρίσιμων συνδέσεων, και των επιπτώσεων που αυτές επιφέρουν στη συνολική δυνατότητα εξυπηρέτησης μετακινήσεων.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη χρήση υπολογιστικών εργαλείων και στην ανάπτυξη κώδικα στο περιβάλλον Python, γεγονός που επέτρεψε την προσομοίωση αστοχιών, την εξαγωγή αποτελεσμάτων και τη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης της ανάλυσης.

Στα επόμενα υποκεφάλαια συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και διατυπώνονται προτάσεις τόσο σε επίπεδο ερμηνείας των ευρημάτων όσο και σε επίπεδο μελλοντικής έρευνας, με στόχο την περαιτέρω εμβάθυνση στη μελέτη της ανθεκτικότητας σιδηροδρομικών και ευρύτερα μεταφορικών δικτύων.

## 5.2 Βασικά συμπεράσματα

Μέσω της συνδυαστικής ανάλυσης αποδοτικότητας δικτύου και του υπολογισμού δεικτών κεντρικότητας, καθώς και της εξέτασης του πραγματικού σεναρίου διαταραχής που συνδέεται με το ακραίο καιρικό φαινόμενο Daniel, προέκυψε μια σειρά βασικών συμπερασμάτων σχετικά με τη δομή του εξεταζόμενου σιδηροδρομικού δικτύου και τη σημασία συγκεκριμένων κόμβων και συνδέσεων. Τα συμπεράσματα αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Δομή και λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου

Από την συνολική ανάλυση προκύπτει ότι:

i. Το ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο παρουσιάζει έντονα γραμμική και ιεραρχική διάρθρωση, με περιορισμένο αριθμό βασικών συνδέσεων να εξυπηρετούν το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας του συστήματος.
ii. Η περιορισμένη ύπαρξη εναλλακτικών σιδηροδρομικών διαδρομών αποτυπώνεται ποσοτικά μέσω της σχετικά χαμηλής τιμής της αποδοτικότητας του δικτύου, γεγονός που υποδηλώνει υψηλή εξάρτηση της συνολικής λειτουργίας από τον βασικό άξονα Πειραιά–Θεσσαλονίκης.

Τα παραπάνω καταδεικνύουν ότι η έντονα γραμμική και ιεραρχική διάρθρωση του ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου, σε συνδυασμό με την περιορισμένη ύπαρξη εναλλακτικών διαδρομών, περιορίζει τη δομική ευελιξία του συστήματος και ενισχύει την εξάρτησή του από συγκεκριμένα τμήματα του βασικού διαδρόμου.

Κρισιμότητα συνδέσεων και λειτουργικές επιπτώσεις αστοχίας

Η ανάλυση κρισιμότητας συνδέσεων μέσω της διαδοχικής αφαίρεσης ακμών και της παρακολούθησης της μεταβολής της αποδοτικότητας του υποδικτύου κατέδειξε ότι:

i. Ορισμένες συνδέσεις προκαλούν δυσανάλογα μεγάλη μείωση της συνολικής αποδοτικότητας σε περίπτωση απώλειάς τους.
ii. Οι πλέον κρίσιμες συνδέσεις εντοπίζονται κατά κύριο λόγο στο νότιο και κεντρικό τμήμα του βασικού σιδηροδρομικού άξονα.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι η υψηλή κρισιμότητα μιας σύνδεσης δεν συνεπάγεται αυξημένη πιθανότητα αστοχίας, αλλά αυξημένη λειτουργική επίπτωση σε περίπτωση απώλειάς της. Η παρούσα Ανάλυση Δικτύου (Network Analysis) δεν αποσκοπεί στην πρόβλεψη των σημείων στα οποία θα εκδηλωθεί μια φυσική καταστροφή, αλλά στην ποσοτική αποτίμηση των συνεπειών που θα είχε η απώλεια συγκεκριμένων τμημάτων στο συνολικό σύστημα. Η διάκριση αυτή είναι θεμελιώδης για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Σύνδεση θεωρητικής ανάλυσης και πραγματικού σεναρίου διαταραχής Daniel

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης με το πραγματικό σενάριο διαταραχής που προκάλεσε το ακραίο καιρικό φαινόμενο Daniel οδηγεί σε επιπλέον ουσιαστικά συμπεράσματα σχετικά με την ευπάθεια του ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου:

i. Η διακοπή ή υποβάθμιση λειτουργίας συγκεκριμένων τμημάτων του κεντρικού άξονα μπορεί να οδηγήσει όχι μόνο σε αύξηση του κόστους μετακίνησης, αλλά και σε πλήρη διακοπή της σιδηροδρομικής σύνδεσης μεταξύ βασικών κόμβων.

ii. Τα αποτελέσματα του πραγματικού σεναρίου διαταραχής επιβεβαιώνουν τα ευρήματα της θεωρητικής ανάλυσης, δείχνοντας ότι η περιορισμένη ύπαρξη εναλλακτικών διαδρομών στον βασικό άξονα οδηγεί σε σημαντική μείωση της λειτουργικής απόδοσης του συστήματος όταν διακόπτονται κρίσιμα τμήματα του διαδρόμου.

Συνολική αποτίμηση βασικών συμπερασμάτων

Συνοψίζοντας, τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας ανάλυσης μπορούν να αποτυπωθούν ως εξής:

i. Το εξεταζόμενο τμήμα του σιδηροδρομικού δικτύου κατά μήκος του άξονα Πειραιά–Θεσσαλονίκης εμφανίζει περιορισμένες εναλλακτικές διαδρομές, με αποτέλεσμα η συνολική αποδοτικότητα του συστήματος να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνεχή λειτουργία συγκεκριμένων βασικών συνδέσεων του διαδρόμου.

ii. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης κρισιμότητας δείχνουν ότι οι μεγαλύτερες μειώσεις της συνολικής αποδοτικότητας προκαλούνται από διακοπές συνδέσεων στο νότιο και κεντρικό τμήμα του άξονα Πειραιά–Θεσσαλονίκης, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα τμήματα αυτά διαδραματίζουν ιδιαίτερα καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της συνολικής λειτουργίας του συστήματος..

iii. Η σύγκριση θεωρητικών αποτελεσμάτων και πραγματικού σεναρίου διαταραχής έδειξε ότι το φαινόμενο Daniel έπληξε σημεία του δικτύου με υψηλή συμβολή στη συνολική αποδοτικότητα, οδηγώντας σε αποσύνδεση βασικών πόλων και, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε πλήρη αδυναμία σιδηροδρομικής εξυπηρέτησης.

iv. Η σύμπτωση θεωρητικής κρισιμότητας και πραγματικών επιπτώσεων επιβεβαιώνει ότι η Ανάλυση Δικτύων αποτελεί κατάλληλο και αξιόπιστο εργαλείο για την ποσοτική ιεράρχηση της κρισιμότητας συνδέσεων των σιδηροδρομικών υποδομών.

Συνολικά, τα παραπάνω συμπεράσματα αναδεικνύουν ότι η λειτουργία του εξεταζόμενου σιδηροδρομικού διαδρόμου επηρεάζεται καθοριστικά από τη δομή και από την περιορισμένη ύπαρξη εναλλακτικών διαδρομών κατά μήκος του βασικού άξονα. Η συγκέντρωση της λειτουργικής σημασίας σε συγκεκριμένες συνδέσεις και κόμβους καθιστά ορισμένα τμήματα του διαδρόμου ιδιαίτερα καθοριστικά για τη διατήρηση της συνολικής αποδοτικότητας και της σιδηροδρομικής συνδεσιμότητας. Η παρατήρηση αυτή αναδεικνύει τη σημασία της κατανόησης της δομής του δικτύου για την ερμηνεία των επιπτώσεων διαταραχών και αποτελεί τη βάση για τη διατύπωση προτάσεων και κατευθύνσεων περαιτέρω έρευνας, οι οποίες παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο..

## 5.3 Προστάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε τη χρησιμότητα της Ανάλυσης Δικτύων για την ποσοτική αποτίμηση της αποδοτικότητας σιδηροδρομικών υποδομών, καθώς και τη δυνατότητα σύνδεσης θεωρητικών δεικτών με πραγματικά σενάρια διαταραχής. Με βάση τα ευρήματα της ανάλυσης, μπορούν να διατυπωθούν ορισμένες κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας, οι οποίες θα μπορούσαν να συμβάλουν στη βαθύτερη διερεύνηση της συμπεριφοράς σιδηροδρομικών δικτύων υπό συνθήκες διαταραχών, καθώς και στην εξέταση πτυχών που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα των υποδομών.

Επέκταση της ανάλυσης σε δυναμικά και χρονικά εξαρτώμενα σενάρια

Μία βασική κατεύθυνση περαιτέρω έρευνας αφορά τη μετάβαση από τη στατική σε δυναμική Ανάλυση Δικτύου. Στην παρούσα εργασία, η αποδοτικότητα και η κρισιμότητα των συνδέσεων αξιολογήθηκαν υπό συγκεκριμένα, διακριτά σενάρια λειτουργίας (baseline και Daniel) χωρίς την ενσωμάτωση της χρονικής εξέλιξης της διαταραχής και της αποκατάστασης. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, το ακραίο φαινόμενο Daniel οδήγησε σε πλήρη διακοπή της σιδηροδρομικής σύνδεσης στον βασικό άξονα για το χρονικό διάστημα Σεπτεμβρίου–Δεκεμβρίου, ενώ ακόμη και μετά την επαναλειτουργία του δικτύου δεν έχει επιτευχθεί πλήρης αποκατάσταση, καθώς εξακολουθούν να υφίστανται περιορισμοί σε ταχύτητα και χωρητικότητα. Η παρατεταμένη αυτή περίοδος μειωμένης λειτουργικότητας δεν αποτυπώνεται στο παρόν στατικό μοντέλο, το οποίο εξετάζει στιγμιαίες καταστάσεις πριν και μετά τη διαταραχή.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να ενσωματώσει:

- χρονική εξέλιξη των βαρών των συνδέσεων, ώστε να αποτυπώνονται μεταβολές στο κόστος μετακίνησης λόγω περιορισμών λειτουργίας (π.χ. μειωμένες ταχύτητες, μονή γραμμή, περιορισμένη χωρητικότητα),
- σταδιακή αποκατάσταση τμημάτων του δικτύου, και μεταβατικά στάδια λειτουργίας μετά από ακραία γεγονότα.

Ενσωμάτωση στοιχείων ζήτησης και λειτουργίας στην Ανάλυση Δικτύου

Η παρούσα ανάλυση εστιάζει κυρίως στη δομή και τη λειτουργία του δικτύου, χωρίς την ενσωμάτωση δεδομένων ζήτησης ή πραγματικών ροών μεταφοράς. Μια μελλοντική επέκταση θα μπορούσε να εξετάσει την ενσωμάτωση δεδομένων ζήτησης και λειτουργικών χαρακτηριστικών, ώστε η αποδοτικότητα του δικτύου να αποτιμάται και με βάση τη χρήση του από διαφορετικές κατηγορίες μεταφορών. Συγκεκριμένα, θα μπορούσε να εξεταστεί:

- ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων εμπορευματικών μεταφορών στον υπολογισμό της αποδοτικότητας,
- ενσωμάτωση δεδομένων επιβατικών μεταφορών και διαφοροποίηση της αποδοτικότητας ως προς επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές.

Ο συνδυασμός των παραπάνω θα επέτρεπε την αποτίμηση της αποδοτικότητας και της κρισιμότητας των συνδέσεων με βάση πραγματικές ροές ζήτησης, οδηγώντας σε πιο ρεαλιστική εκτίμηση των επιπτώσεων διαταραχών.

Ενσωμάτωση πολυτροπικών και διεθνών διαστάσεων

Μια ιδιαίτερα σημαντική προοπτική αφορά την επέκταση της ανάλυσης πέρα από το αμιγώς σιδηροδρομικό δίκτυο και τα ελληνικά σύνορα. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να:

- ενσωματώσει οδικές και θαλάσσιες συνδέσεις σε ένα πολυτροπικό δίκτυο μεταφορών και να εξετάσει τον ρόλο των λιμένων ως κόμβων διασύνδεσης,
- εξετάσει την επέκταση της ανάλυσης στη σύνδεση του ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου με διεθνείς εμπορευματικούς διαδρόμους.

Η προσέγγιση αυτή θα επέτρεπε την εξέταση του συστήματος μεταφορών σε ευρύτερη κλίμακα, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών μέσων μεταφοράς και τη θέση του ελληνικού σιδηροδρομικού δικτύου στο ευρωπαϊκό δίκτυο μεταφορών.

Αξιοποίηση των αποτελεσμάτων στον σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων

Η κατάταξη των συνδέσεων ως προς τη λειτουργική τους κρισιμότητα προσφέρει ένα εργαλείο:

- ιεράρχησης επενδύσεων σε υποδομές,
- στοχευμένης ενίσχυσης και θωράκισης κρίσιμων τμημάτων,
- και υποστήριξης στρατηγικών αποφάσεων στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών.

Η Ανάλυση Δικτύου (Network Analysis) επιτρέπει τη μετατόπιση του σχεδιασμού από οριζόντιες παρεμβάσεις γενικού χαρακτήρα σε πιο στοχευμένες στρατηγικές, βασισμένες στη λειτουργική σημασία των επιμέρους τμημάτων του δικτύου.

Μεταβλητές που δεν ενσωματώθηκαν στην ανάλυση και προοπτικές αξιοποίησης

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης της βάσης δεδομένων καταγράφηκαν επιπλέον μεταβλητές και υπολογίστηκαν σε επίπεδο ακμής, αλλά δεν ενσωματώθηκαν στο βασικό μοντέλο αποδοτικότητας (baseline και σενάριο Daniel). Οι μεταβλητές αυτές δύνανται να αξιοποιηθούν σε μελλοντική επέκταση της ανάλυσης προς δυναμικά και χρονικά εξαρτώμενα σενάρια διαταραχής και αποκατάστασης του δικτύου. Οι μεταβλητές αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1).

**Πίνακας 5.1** Μεταβλητές ανθεκτικότητας και λειτουργικής διαταραχής για περαιτέρω έρευνα

| Από_Κόμβο_ID | Προς_Κόμβο_ID | Ονομασία_Τμήματος | Μονή_ή_Διπλή | Χωρητικότητα Γραμμής | Ηλεκτροκίνηση | Χρονικό διάστημα διακοπής (ημέρες) μετά την πλημμύρα | Αιτιολόγηση | Resilience Index | Πηγή |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N1 | N2 | Πειραιάς – Θριάσιο | Διπλή | 80 | Ναι | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N2 | N3 | Θριάσιο – ΣΚΑ | Διπλή | 80 | Ναι | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N3 | N4 | ΣΚΑ – Οινοη | Διπλή | 80 | Ναι | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N4 | N5 | Οινοη – Τιθορέα | Διπλή | 80 | Ναι | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N5 | N6 | Τιθορέα – Δομοκός | Διπλή | 80 | Ναι | 0 | Δεν αναφέρεται επίσημη διακοπή ή καταστροφή στο συγκεκριμένο τμήμα. | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N6 | N7 | Δομοκός – Παλαιοφάρσαλος | Διπλή | 80 | Ναι | 90 | Μειωμένη λειτουργία, ηλεκτροκίνηση κομμένη, εργασίες έως 2026 | 0,75 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N7 | N8 | Παλαιοφάρσαλος-Λάρισα | Διπλή | 80 | Ναι | 120 | Σοβαρές ζημιές / λειτουργία μονής γραμμής με αποκλεισμό | 0,67 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N8 | N9 | Λάρισα – Πλατύ | Διπλή | 80 | Ναι | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N9 | N10 | Πλατύ – Θεσσαλονίκη (Σίνδος) | Διπλή | 80 | Ναι | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N10 | N12 | Θεσσαλονίκη – Ειδομένη | Μονή/Διπλή | 80 | Μερική | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N10 | N11 | Θεσσαλονίκη – Στρυμόνας | Μονή/Διπλή | 40 | Μερική | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N7 | N15 | Λάρισα – Βόλος | Μονή | 40 | Όχι/Μερική | 200 | Βαριές ζημιές, μακρά αποκατάσταση | 0,45 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N3 | N16 | ΣΚΑ – Αθήνα | Διπλή | 20 | Ναι | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |
| N10 | N18 | Θεσσαλονίκη – Λιμένας Θεσσαλονίκης | Μονή/Διπλή | 80 | Μερική | 0 | | 1,00 | Δηλ. Δικτύου ΟΣΕ 2024 |

Οι μεταβλητές του Πίνακα 5.1 συνοδεύονται από συνοπτικό Data Dictionary (Πίνακας 5.2), ώστε να είναι σαφής η μεθοδολογία ενδεχόμενης μελλοντικής ενσωμάτωσής τους σε δυναμικά/χρονικά εξαρτώμενα σενάρια.

**Πίνακας 5.2** Data Dictionary μεταβλητών για περαιτέρω έρευνα

| Δείκτης | Περιγραφή | Μονάδα | Τύπος | Πηγή |
|---|---|---|---|---|
| **Χρονικό διάστημα διακοπής** | Ενδεικτικές διάρκειες ημερών, σε τρεις βαθμίδες, βάσει της λογικής restoration time της βιβλιογραφίας | days | Numerical | Kammouh et al., 2025 |
| | | | | |
| **Resilience Index** | Ποσοστό ημερών λειτουργικότητας. Υπολογίζεται ως 1 – (Χρονικό διάστημα διακοπής / 365), όπου 365 αποτελεί σταθερά κανονικοποίησης, σύμφωνα με τη λογική κανονικοποίησης που προτείνεται στη μεθοδολογία των Kammouh et al. (2025) | - | Numerical | Kammouh et al., 2025 |
| | | | | |
| **Χωρητικότητα γραμμής** | Χωρητικότητα γραμμής (80/40/20 τρένα/ημέρα) βάσει διεθνών benchmarks και στοιχείων του ΟΣΕ | trains/day | Numerical | Δηλ. ΟΣΕ 2024, Golias, 2021, Besinovic, 2022 |

Οι μεταβλητές αυτές ορίστηκαν ως εξής:

- **Μονή_ή_Διπλή**: Κατηγορική μεταβλητή που αποτυπώνει τη διάταξη της υποδομής ανά τμήμα (μονή ή διπλή γραμμή). Χρησιμοποιείται ως ένδειξη της επιχειρησιακής ευελιξίας και της δυνατότητας ταυτόχρονης κυκλοφορίας αντίθετων ρευμάτων, άρα και της δυνητικής ικανότητας απορρόφησης διαταραχών (ΟΣΕ Δήλωση Δικτύου, 2024).
- **Χωρητικότητα Γραμμής**: Ποσοτική μεταβλητή που εκτιμά την ικανότητα του τμήματος να εξυπηρετεί διελεύσεις συρμών (capacity) (ΟΣΕ Δήλωση Δικτύου, 2024).
- **Ηλεκτροκίνηση**: Δυαδική μεταβλητή (Ναι/Όχι) που δηλώνει αν το τμήμα διαθέτει ηλεκτροκίνηση. Καταγράφεται ως βασικό τεχνικό χαρακτηριστικό που δύναται να επηρεάσει τη λειτουργική απόδοση (π.χ. τύποι συρμών, περιορισμοί λειτουργίας (ΟΣΕ Δήλωση Δικτύου, 2024).
- **Χρονικό διάστημα διακοπής (ημέρες) μετά την πλημμύρα**: Ποσοτική μεταβλητή που αποτυπώνει τη διάρκεια μη λειτουργίας ή σοβαρής λειτουργικής υποβάθμισης κάθε σιδηροδρομικού τμήματος μετά το φαινόμενο Daniel. Η μεταβλητή βασίζεται στη θεωρητική προσέγγιση αποτίμησης ανθεκτικότητας που προτείνεται από τους Kammouh et al. (2025), σύμφωνα με την οποία η ανθεκτικότητα υποδομών προσεγγίζεται μέσω της χρονικής διάστασης της διαταραχής. Οι τιμές δεν αποτελούν αυθαίρετες εκτιμήσεις, αλλά κωδικοποιημένες κατηγορίες διάρκειας αποκατάστασης βάσει τεχνικών και επίσημων αναφορών (ΟΣΕ Δήλωση Δικτύου 2024), και διαμορφώθηκαν ως εξής:

- 0 ημέρες: δεν τεκμηριώνεται επίσημη διακοπή λειτουργίας,
- 90 ημέρες: σημαντική αλλά σχετικά ταχεία αποκατάσταση,
- 120 ημέρες: παρατεταμένη λειτουργική διαταραχή,
- 200 ημέρες: εκτεταμένη διακοπή λόγω σοβαρών ζημιών.

Η διάκριση σε αυτές τις κατηγορίες επιτρέπει τη συγκρίσιμη ενσωμάτωση της χρονικής επίπτωσης της διαταραχής στη μαθηματική αποτίμηση της ανθεκτικότητας του δικτύου.

- **Αιτιολόγηση**: Ποιοτική μεταβλητή που συνοψίζει τη λογική τεκμηρίωσης της τιμής του «Χρονικού διαστήματος διακοπής» και τη γενικότερη εικόνα λειτουργικής κατάστασης του τμήματος (π.χ. αναφορά σε ζημιές, μειωμένη λειτουργία) (ΟΣΕ Δήλωση Δικτύου, 2024).
- **Resilience Index (RI)**: Ποσοτικός δείκτης ανθεκτικότητας που αποτυπώνει το ποσοστό λειτουργικότητας κάθε τμήματος εντός ετήσιου χρονικού ορίζοντα. Υπολογίζεται σύμφωνα με τη χρονική προσέγγιση ανθεκτικότητας των Kammouh et al. (2025) ως:

$$RI = 1 - \frac{T_{disruption}}{365}$$

όπου:

- T_disruption= Χρονικό διάστημα διακοπής (σε ημέρες)
- 365 = σταθερά κανονικοποίησης σε ετήσιο ορίζοντα

Ο δείκτης λαμβάνει τιμές στο διάστημα $0 \leq RI \leq 1$ και ερμηνεύεται ως εξής:

- RI = 1: πλήρης λειτουργικότητα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους,
- RI = 0: εκτεταμένη απώλεια λειτουργικότητας,

Όσο μικρότερη η διάρκεια διακοπής, τόσο υψηλότερη η ανθεκτικότητα του τμήματος.

Με τον τρόπο αυτό, η χρονική ένταση της διαταραχής μετατρέπεται σε κανονικοποιημένο δείκτη συγκρίσιμο μεταξύ διαφορετικών τμημάτων του δικτύου.

# 6 Βιβλιογραφία


Belokas, G.; Saroglou, C.; Moschovou, T.P.; Vlahogianni, E.I. An Integrated Infrastructure Resilience Approach, from the Geotechnical Asset to the Transport Network. Eng 2024, 5, 819–833. https://doi.org/10.3390/eng5020044

Bešinović, N., Nassar, R., & Szymula, C. (2022). Resilience assessment of railway networks: Combining infrastructure restoration and transport management. Reliability Engineering and System Safety, 224, 1-15. Article 108538. https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108538

Chalkiadakis, C., Perdikouris, A., & Vlahogianni, E. I. (2022). Urban road network resilience metrics and their relationship: Some experimental findings. Case Studies on Transport Policy, 10, 2377–2392.

Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. Engineering Structures, 32, 3639–3649.

Diakakis, M.; Sarantopoulou, A.; Gogou, M.; Filis, C.; Nastos, P.; Kapris, I.; Vassilakis, E.; Konsolaki, A.; Lekkas, E. Cascade Effects Induced by Extreme Storms and Floods: The Case of Storm Daniel (2023) in Greece. Water 2025, 17, 912. https://doi.org/10.3390/w17070912

EM-DAT. The International Disaster Database. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Université catholique de Louvain. https://www.emdat.be (Accessed: September 2025)

European Commission, Sustainable Transport. Directorate-General for Mobility and Transport. https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/sustainable-transport_en (Accessed: February 2026)

European Commission, Trans-European Transport Network (TEN-T). Directorate-General for Mobility and Transport. https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en (Accessed: February 2026)

European Commission (n.d.). Trans-European Transport Network (TEN-T). Available at: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en (Accessed: September 2025)

Eurostat (2026). Goods transported (detailed reporting only ) - quarterly data. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat (Accessed: March 2026).

Falaras, T.; Dosiou, A.; Tounta, S.; Diakakis, M.; Lekkas, E.; Parcharidis, I. Mapping of Flood Impacts Caused by the September 2023 Storm Daniel in Thessaly's Plain

(Greece) with the Use of Remote Sensing Satellite Data. Remote Sens. 2025, 17, 1750. https://doi.org/ 10.3390/rs17101750

Fialkoff, M. R., Omitaomu, O. A., Peterson, S. K., & Tuttle, M. A. (2017). Using geographic information science to evaluate legal restrictions on freight transportation routing in disruptive scenarios. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 17, 60–74. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcip.2016.12.001

Ganin, A. A., Kitsak, M., Marchese, D., Keisler, J. M., Seager, T., & Linkov, I. (2017). Resilience and efficiency in transportation networks. Science Advances, 3(12), Article e1701079. https://doi.org/10.1126/sciadv.1701079

Geng, J.-B., Ji, Q., & Fan, Y. (2014). A dynamic analysis on global natural gas trade network. Applied Energy, 132, 23–33.

Golias, M., Mishra, S., Kaisar, E., Hourdos, I., TakhtiFiroozeh, H., Machatto, A., Giampouranis, D., & Liatsos, V. (2021). Identifying critical and vulnerable freight routes in roadway networks: A game theory framework and application in the state of Florida. Final Report, Freight Mobility Research Institute (FMRI), Florida Atlantic University, Boca Raton, FL, USA.

He, K., Yang, Q., Shen, X., Dimitriou, E., Mentzafou, A., Papadaki, C., Stoumboudi, M., & Anagnostou, E. N. (2024). Brief communication: Storm Daniel flood impact in Greece in 2023: mapping crop and livestock exposure from synthetic-aperture radar (SAR). Natural Hazards and Earth System Sciences, 24, 2375–2382. https://doi.org/10.5194/nhess-24-2375-2024

Hooks, E., Zhang, X., & Faturechi, R. (2012). Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks. Computers & Operations Research, 39, 1633–1643. doi:10.1016/j.cor.2011.09.017

Hosseini, S., & Al Khaled, A. (2021). Freight flow optimization to evaluate the criticality of intermodal surface transportation system infrastructures. Computers & Industrial Engineering, 159, Article 107522. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107522

Ibrahim, S., Ammar, R., Rajasekaran, S., Lownes, N., Wang, Q., & Sharma, D. (2011). An Efficient Heuristic for Estimating Transportation Network Vulnerability. IEEE

Kammouh O. & N. Chahrour (2025) Indicator-based framework to evaluate the resilience of transport infrastructure systems, Sustainable and Resilient Infrastructure, 10:5, 536-562, DOI: 10.1080/23789689.2025.2500899 https://doi.org/10.1080/23789689.2025.2500899

Kong, J., Simonovic, S. P., & Zhang, C. (2019). Resilience Assessment of Interdependent Infrastructure Systems: A Case Study Based on Different Response Strategies. doi:10.3390/su11236552

Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. Physical Review Letters, 87(19), 198701. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.198701

Liu, K., Wang, Q., Wang, M., & Koks, E. E. (2023). Global transportation infrastructure exposure to the change of precipitation in a warmer world. Nature Communications, 14, Article 38203. https://doi.org/10.1038/s41467-023-38203-3

Markolf, S. A., Chester, M. V., Eisenberg, D. A., Iwaniec, D. M., Davidson, C. I., Zimmerman, R., et al. (2018). Interdependent infrastructure as linked social, ecological, and technological systems (SETSs) to address lock-in and enhance resilience. Earth's Future, 6, 1638–1659. https://doi.org/10.1029/ 2018EF000926

Mattsson, L.-G., & Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. Transportation Research Part A, 81, 16–34. http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002

Ouyang, M., Dueñas-Osorio, L., & Min, X. (2011). A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems. Structural Safety, 36–37, 23–31. doi:10.1016/j.strusafe.2011.12.004

Ouyang, M., & Wang, Z. (2015). Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: With a focus on joint restoration modeling and analysis. Reliability Engineering and System Safety, 141, 74–82. http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.011

Pant, R., Blainey, S., Hall, J., & Preston, J. (2014). Assessing risks to inform resilience: A criticality assessment of the British railway network. University of Oxford & University of Southampton

Peng, P., Lu, F., Cheng, S., & Yang, Y. (2021). Mapping the global liquefied natural gas trade network: A perspective of maritime transportation. Journal of Cleaner Production, 283, 124640. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124640

Pregnolato, M., Ford, A., Wilkinson, S. M., & Dawson, R. J. (2017). The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. Transportation Research Part D, 55, 67–81. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020

Rail Freight Corridor 7 (RFC7), 2024. Orient/East-Med Rail Freight Corridor – Network Map. Available at: https://www.rfc7.eu (Accessed: March 2026).

Saunders, W. S. A., & Becker, J. S. (2015). A discussion of resilience and sustainability: Land use planning recovery from the Canterbury earthquake sequence, New Zealand. International Journal of Disaster Risk Reduction, 14, 73–81. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.01.013

Vukić, L.; Kraemer, I. Dependence of Transport and External Cost Variables on Transportation Route Length. J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9, 1270. https://doi.org/10.3390/jmse9111270

Xiao, R., Xiao, T., Zhao, P., Zhang, M., Ma, T., & Qiu, S. (2024). Structure and resilience changes of global liquefied natural gas shipping network during the Russia–Ukraine conflict. Ocean and Coastal Management, 252, 107102. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107102

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ), 2023. Χωρική κατανομή ημερήσιου ύψους βροχής κατά την κακοκαιρία Daniel στη Θεσσαλία. Διαθέσιμο στο: https://www.meteo.gr (Accessed: February 2026).

Οργανισμός Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ), 2024. Δήλωση Δικτύου 2024. Διαθέσιμο στο: https://www.ose.gr (Accessed: September 2025)

Οργανισμός Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ), 2024. Χάρτης Σιδηροδρομικού Δικτύου Ελλάδας. Διαθέσιμο στο: https://www.ose.gr (Accessed: February 2026).

# 7 Παραρτήματα

**Παράρτημα Α1** Υπολογιστικός κώδικας για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας υποδικτύου (baseline σενάριο)

In [28]:

```
import pandas as pd
import numpy as np
import networkx as nx


FILE = r"Δεδομένα-Δίκτυο_Κόμβοι_Συνδέσεις_Τελικό.xlsx"
SHEET_NODES = "Κόμβοι"
SHEET_EDGES = "Συνδέσεις"

df_nodes = pd.read_excel(FILE, sheet_name=SHEET_NODES)
df_edges = pd.read_excel(FILE, sheet_name=SHEET_EDGES)


df_nodes.columns = df_nodes.columns.str.strip()
df_edges.columns = df_edges.columns.str.strip()


WEIGHT_COL = "Weight_Δικτύου_Baseline"
U_COL = "Από_Κόμβο_ID"
V_COL = "Προς_Κόμβο_ID"

df_edges[WEIGHT_COL] = pd.to_numeric(df_edges[WEIGHT_COL], errors="coerce")
df_edges = df_edges.dropna(subset=[U_COL, V_COL, WEIGHT_COL])
df_edges = df_edges[df_edges[WEIGHT_COL] > 0].copy()


G = nx.Graph()


G.add_nodes_from(df_nodes["Κόμβος_ID"].astype(str).tolist())
```

```
for _, r in df_edges.iterrows():
    u = str(r[U_COL]); v = str(r[V_COL])
    w = float(r[WEIGHT_COL])
    G.add_edge(u, v, weight=w)

print("Κόμβοι:", G.number_of_nodes(), "Ακμές:", G.number_of_edges())


def network_efficiency_weighted(G: nx.Graph, weight: str = "weight") -> float:
    nodes = list(G.nodes())
    n = len(nodes)
    if n <= 1:
        return 0.0


    lengths = dict(nx.all_pairs_dijkstra_path_length(G, weight=weight))

    s = 0.0

    for i in nodes:
        Li = lengths.get(i, {})
        for j in nodes:
            if i == j:
                continue
            dij = Li.get(j, np.inf)
            if np.isfinite(dij) and dij > 0:
                s += 1.0 / dij


    return s / (n * (n - 1))

E_baseline = network_efficiency_weighted(G, weight="weight")
print("E_baseline =", E_baseline)
```

```
Κόμβοι: 15 Ακμές: 14
E_baseline = 0.010549103023593203
```

**Παράρτημα Α2** Υπολογιστικός κώδικας για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας του υποδικτύου υπό το σενάριο διαταραχής Daniel

In [2]:
```
import pandas as pd
import networkx as nx
import math

PATH = r"C:\Users\elenh\Diplomatiki_Diktyo\Δεδομένα-Δίκτυο_Κόμβοι_Συνδέσεις_Τελικό.xlsx"

SHEET_EDGES = "Συνδέσεις"
SHEET_NODES = "Κόμβοι"

COL_U = "Από_Κόμβο_ID"
COL_V = "Προς_Κόμβο_ID"
COL_W = "Weight_Δικτύου_Baseline"
COL_STATUS = "Status_Binary"

NODE_ID_COL = "Κόμβος_ID"

df_edges = pd.read_excel(PATH, sheet_name=SHEET_EDGES)
df_nodes = pd.read_excel(PATH, sheet_name=SHEET_NODES)
nodes_all = df_nodes[NODE_ID_COL].astype(str).str.strip().tolist()
nodes_fixed = [n for n in nodes_all if n != REMOVE_NODE]

print(f"Nodes in file: {len(nodes_all)} | Nodes kept (without {REMOVE_NODE}): {len(nodes_fixed)}")


df_edges[COL_U] = df_edges[COL_U].astype(str).str.strip()
df_edges[COL_V] = df_edges[COL_V].astype(str).str.strip()
df_edges = df_edges.dropna(subset=[COL_U, COL_V, COL_W, COL_STATUS]).copy()

def build_graph(edges_df, nodes, keep_only_status_1: bool):
    G = nx.Graph()
    G.add_nodes_from(nodes)

    if keep_only_status_1:
        edges_df = edges_df[edges_df[COL_STATUS].astype(int) == 1].copy()

    for _, r in edges_df.iterrows():
        u = str(r[COL_U]).strip()
        v = str(r[COL_V]).strip()
        try:
            w = float(r[COL_W])
        except:
            continue
        if u and v and (w > 0) and math.isfinite(w):
            G.add_edge(u, v, weight=w)

    return G

G_base   = build_graph(df_edges, nodes_fixed, keep_only_status_1=False)
G_daniel = build_graph(df_edges, nodes_fixed, keep_only_status_1=True)

print(f"Edges baseline: {G_base.number_of_edges()} | Edges daniel: {G_daniel.number_of_edges()}")
def network_efficiency_fixed_denominator(G, nodes):
    nodes = list(nodes)
    N = len(nodes)
    if N < 2:
        return 0.0

    total = 0.0
    lengths = dict(nx.all_pairs_dijkstra_path_length(G, weight="weight"))

    for i in nodes:
        Li = lengths.get(i, {})
        for j in nodes:
            if i == j:
                continue
            d = Li.get(j, math.inf)
            if math.isfinite(d) and d > 0:
                total += 1.0 / d


    return total / (N * (N - 1))

E_baseline = network_efficiency_fixed_denominator(G_base, nodes_fixed)
E_daniel   = network_efficiency_fixed_denominator(G_daniel, nodes_fixed)

print("\n===== RESULT =====")
print("N nodes (fixed) =", len(nodes_fixed))
print("E_baseline =", E_baseline)
print("E_daniel   =", E_daniel)
print("Check (must be True): E_daniel <= E_baseline  ->", E_daniel <= E_baseline)
print("==================")
```

```
Edges baseline: 14 | Edges daniel: 10

===== RESULT =====
N nodes (fixed) = 15
E_baseline = 0.010549103023593203
E_daniel   = 0.007452397032512986
Check (must be True): E_daniel <= E_baseline  -> True
==================
```

**Παράρτημα Β** Υπολογιστικός κώδικας για τον υπολογισμό των δεικτών κεντρικότητας

In [3]:

```
import os
from pathlib import Path
import pandas as pd
import networkx as nx


import tkinter as tk
from tkinter import filedialog

root = tk.Tk()
root.withdraw()
root.attributes("-topmost", True)

file_path = filedialog.askopenfilename(
    title="Διάλεξε το Excel: Δεδομένα-Δίκτυο_Κόμβοι_Συνδέσεις_Τελικό.xlsx",
    filetypes=[("Excel files", "*.xlsx *.xls")]
)
if not file_path:
    raise RuntimeError("Δεν επέλεξες αρχείο Excel.")

PATH = Path(file_path)


SHEET_NODES = "Κόμβοι"
SHEET_EDGES = "Συνδέσεις"

COL_NODE_ID   = "Κόμβος_ID"
COL_NODE_NAME = "Όνομα_Κόμβου"

COL_U = "Από_Κόμβο_ID"
COL_V = "Προς_Κόμβο_ID"
COL_W = "Weight_Δικτύου_Baseline"


df_nodes = pd.read_excel(PATH, sheet_name=SHEET_NODES)

if COL_NODE_ID not in df_nodes.columns:
    raise ValueError(f"Στο sheet '{SHEET_NODES}' δεν βρέθηκε η στήλη '{COL_NODE_ID}'.\nΒρέθηκαν: {list(df_nodes.columns)}")
```

```
df_nodes[COL_NODE_ID] = df_nodes[COL_NODE_ID].astype(str).str.strip()


if COL_NODE_NAME not in df_nodes.columns:
    df_nodes[COL_NODE_NAME] = df_nodes[COL_NODE_ID]

df_nodes[COL_NODE_NAME] = df_nodes[COL_NODE_NAME].astype(str).str.strip()

nodes_list = df_nodes[COL_NODE_ID].dropna().tolist()


df_edges = pd.read_excel(PATH, sheet_name=SHEET_EDGES)

missing = [c for c in [COL_U, COL_V, COL_W] if c not in df_edges.columns]
if missing:
    raise ValueError(f"Λείπουν στήλες από το sheet '{SHEET_EDGES}': {missing}\nΒρέθηκαν: {list(df_edges.columns)}")

df_edges = df_edges.copy()
df_edges[COL_U] = df_edges[COL_U].astype(str).str.strip()
df_edges[COL_V] = df_edges[COL_V].astype(str).str.strip()
df_edges[COL_W] = pd.to_numeric(df_edges[COL_W], errors="coerce")


df_edges = df_edges.dropna(subset=[COL_U, COL_V, COL_W]).copy()
df_edges = df_edges[df_edges[COL_W] > 0].copy()


G = nx.Graph()
G.add_nodes_from(nodes_list)


for _, r in df_edges.iterrows():
    u = r[COL_U]
    v = r[COL_V]
    w = float(r[COL_W])
    if (u in G) and (v in G):
        G.add_edge(u, v, weight=w)


degree_c = nx.degree_centrality(G)
betw_c   = nx.betweenness_centrality(G, weight="weight", normalized=True)
close_c  = nx.closeness_centrality(G, distance="weight")


out = df_nodes[[COL_NODE_ID, COL_NODE_NAME]].drop_duplicates().copy()
out["Degree_centrality"] = out[COL_NODE_ID].map(degree_c).fillna(0.0)
out["Betweenness_centrality"] = out[COL_NODE_ID].map(betw_c).fillna(0.0)
out["Closeness_centrality"] = out[COL_NODE_ID].map(close_c).fillna(0.0)
```

```
out_sorted = out.sort_values("Betweenness_centrality", ascending=False).reset_index(drop=True)


print("========== CENTRALITY (BASELINE) : RESULT ==========")
print("File:", str(PATH))
print("Sheets:", SHEET_NODES, "/", SHEET_EDGES)
print(f"Nodes (from '{SHEET_NODES}'): {G.number_of_nodes()}")
print(f"Edges (valid baseline weights): {G.number_of_edges()}")
print(out_sorted[[COL_NODE_ID, COL_NODE_NAME, "Betweenness_centrality"]].head(5).to_string(index=False))
print("====================================================")


OUT_PATH = PATH.with_name(PATH.stem + "_centrality_baseline_output.xlsx")
out_sorted.to_excel(OUT_PATH, index=False)
print("\nSaved Excel to:", str(OUT_PATH))
```

```
========== CENTRALITY (BASELINE) : RESULT ==========
File: C:\Users\elenh\OneDrive\Εγγραφα\Σχολή Τίπιρι\Διπλωματική\Δεδομένα-Δίκτυο_Κόμβοι_Συνδέσεις_Τελικό.xlsx
Sheets: Κόμβοι / Συνδέσεις
Nodes (from 'Κόμβοι'): 15
Edges (valid baseline weights): 14
====================================================

Saved Excel to: C:\Users\elenh\OneDrive\Εγγραφα\Σχολή Τίπιρι\Διπλωματική\Δεδομένα-Δίκτυο_Κόμβοι_Συνδέσεις_Τελικό_centrality_bas
eline_output.xlsx
```