



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Σχολή Πολιτικών Μηχανικών**

**Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής**

## Διερεύνηση της Συσχέτισης μεταξύ Μετρικών Αξιολόγησης της Ανθεκτικότητας σε Αστικά Οδικά Δίκτυα



Διπλωματική Εργασία

**Ανδρέας Περδικούρης**

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη,  
Καθηγήτρια Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2024



## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ελένη Ι. Βλαχογιάννη, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και απαιτητικό θέμα, την στήριξη και την εμπιστοσύνη της κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας και την καθοδήγησή της σε όλες τις δυσκολίες που προέκυψαν.

Στην συνέχεια, θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και στενό μου φίλο Χάρη Χαλκιαδάκη, για την άψογη συνεργασία, την προθυμία, την αμέριστη συμπαράστασή του και την ιδιαίτερως ουσιαστική συνεισφορά του ως προς την εκπλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Αθήνα, Νοέμβριος 2024



# Διερεύνηση της Συσχέτισης μεταξύ Μετρικών Αξιολόγησης της Ανθεκτικότητας σε Αστικά Οδικά Δίκτυα

Περδικούρης Ανδρέας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Ελένη Ι. Βλαχογιάννη

## Σύνοψη

Η ανθεκτικότητα είναι μία σύνθετη έννοια, η οποία διατυπώνεται μέσω πολλαπλών ορισμών και μετρικών. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μετρικές είναι η αποδοτικότητα (efficiency) και η κρισιμότητα (criticality) του δικτύου που εξετάζουν την επίδραση που έχει η αφαίρεση ενός δομικού στοιχείου από ένα γράφο/δίκτυο στη λειτουργία του. Η αποδοτικότητα είναι ένα τοπολογικό χαρακτηριστικό του δικτύου που λαμβάνει υπόψη τις συντομότερες διαδρομές μεταξύ των κόμβων ενώ, η κρισιμότητα εστιάζει στις μεταβλητές που σχετίζονται με ζήτηση για μετακινήσεις. Στην παρούσα εργασία, η αλληλεπίδραση μεταξύ αποδοτικότητας και κρισιμότητας διερευνάται εκτενώς μέσω μιας σειράς πειραμάτων μακροσκοπικής κυκλοφορίας στο οδικό δίκτυο του κέντρου της πόλης της Αθήνας. Για την ποσοτικοποίηση της αποδοτικότητας, της ευπάθειας (vulnerability) και της κρισιμότητας χρησιμοποιήθηκε μια επαναληπτική προσέγγιση όπου, ανά επανάληψη, αφαιρείτο ένας σύνδεσμος του δικτύου. Η ποσοτικοποίηση των προαναφερθέντων μετρικών διερευνάται περαιτέρω, αρχικά μέσω μιας παρόμοιας επαναληπτικής διαδικασίας, κατά την οποία αφαιρούνται κόμβοι που είχαν υψηλή κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) και κεντρικότητα ενδιάμεσότητας (betweenness centrality) και έπειτα, μέσω του προσδιορισμού για κάποιους συγκεκριμένους κόμβους, των μεταξύ τους συντομότερων διαδρομών. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναλύονται στατιστικά, χρησιμοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης χωρίς επίβλεψη και με επίβλεψη. Τα ευρήματα δείχνουν ότι υπάρχει μια πολυωνυμική σχέση μεταξύ του λόγου της κρισιμότητας προς την απόδοση και του κυκλοφοριακού φόρτου (traffic volume). Τέλος, ερμηνεύονται οι επιπτώσεις αυτών των ευρημάτων στη διαχείριση της κυκλοφορίας και του δικτύου.

**Λέξεις κλειδιά:** Ευπάθεια, Αποδοτικότητα, Κρισιμότητα, Ανθεκτικότητα, Κεντρικότητα, Συντομότερες διαδρομές, Ομαδοποίηση, Θεωρία γράφων, Μακροσκοπική προσομοίωση

# Investigation of urban road network resilience metrics and their relationship

Andreas Perdikouris

Supervising Professor : Eleni I. Vlahogianni

## **Abstract**

Resilience is a complex term, bearing multiple definitions and resilience-related metrics. The most commonly utilized metrics are network efficiency and criticality that examine the impact that the removal of a structural element of a graph/ network has on its operation. Efficiency addresses this term from a topological aspect and takes into account the shortest paths between the nodes, whereas criticality focuses on transportation-related variables like travel demand. In the present thesis, the interrelation between efficiency and criticality is further researched through a series of simulation experiments on the Athens city-center urban transportation network. For the quantification of efficiency, vulnerability, and criticality an iterative approach is used where per iteration, one link of the network was removed. In addition, the quantification of the above metrics is further studied, first through a similar iterative procedure, in which nodes with high closeness centrality and betweenness centrality are removed, and then by identifying for some specific nodes, the shortest paths between them. The outputs of the experiments are then statistically analyzed, using unsupervised and supervised machine learning techniques. Findings reveal that a polynomial relationship between the ratio of criticality over efficiency, and traffic volume exists. Finally, the implications of these findings to traffic and network management were interpreted.

**Keywords:** Vulnerability, Efficiency, Criticality, Resilience, Centrality, Shortest paths, Clustering, Graph theory, Macroscopic simulation



## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια τα επιστημονικά άρθρα που αφορούν την ανθεκτικότητα των συγκοινωνιακών δικτύων έχουν αυξηθεί σημαντικά σε αριθμό. Αυτό αποδεικνύει κατά συνέπεια, την σπουδαιότητα της συγκεκριμένης έννοιας. Παράλληλα όμως, η ανθεκτικότητα παρουσιάζεται στην βιβλιογραφία ως ένας πολύπλοκος όρος λόγω των πολλαπλών ορισμών που της αποδίδονται. Οι υπάρχουσες έρευνες εξετάζουν την ανθεκτικότητα από διάφορες οπτικές όπως για παράδειγμα την επίδραση που μπορεί να έχουν σε αυτή διαταραχές ή αστοχίες του συστήματος.

Η ανθεκτικότητα μπορεί να διερευνηθεί μέσω μετρικών όπως η στιβαρότητα, η προσαρμοστικότητα, ο πλεονασμός, η αποδοτικότητα, η αξιοπιστία, η ετοιμότητα, η ανακτησιμότητα, η ευπάθεια και η κρισιμότητα. Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται σε κάποιες από τις εν λόγω μετρικές (αποδοτικότητα, ευπάθεια και κρισιμότητα) και ειδικότερα στην ερμηνεία των σχέσεων που είναι δυνατόν να αναπτυχθούν μεταξύ τους κατά την εμφάνιση αστοχιών στο δίκτυο, σε επίπεδο συνδέσμων.

Αρχικά, για την καλύτερη οργάνωση της εργασίας, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογική προσέγγιση τεσσάρων βημάτων που περιγράφει το σύνολο των ενεργειών που ακολουθούνται για την ολοκλήρωσή της και περιλαμβάνει αρχικά τη δημιουργία του δικτύου στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της εργασίας. Το δίκτυο αυτό είναι ο εσωτερικός δακτύλιος του κέντρου της Αθήνας. Αποτελείται από 1293 κόμβους/διασταυρώσεις και 2572 άκρες/συνδέσμους. Το συγκεκριμένο δίκτυο χρησιμοποιήθηκε ως κατευθυνόμενος μη σταθμισμένος άκυκλος γράφος και ως μακροσκοπικό οδικό δίκτυο. Ο κατευθυνόμενος γράφος σχεδιάστηκε σε ένα πακέτο προγραμματισμού προσανατολισμένο σε γράφους ενώ το μακροσκοπικό οδικό δίκτυο εφαρμόστηκε σε έναν προσομοιωτή κυκλοφορίας.

Ο γράφος κατασκευάστηκε σε περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού R. Το αρχικό στάδιο για την δημιουργία του ήταν η εισαγωγή των συντεταγμένων των κόμβων και του συνόλου των διαδρομών από και προς κάθε κόμβο, στον κώδικα. Έπειτα, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας αυτών των δεδομένων στο RStudio, έγινε η χάραξη του γράφου. Αναφορικά με το μακροσκοπικό οδικό δίκτυο, αυτό εφαρμόστηκε στο Aimsun Next το οποίο είναι ένα λογισμικό μοντελοποίησης πολλαπλής ανάλυσης που προσφέρει εργαλεία για την υλοποίηση έργων συγκοινωνιακών μεταφορών.

Όσον αφορά στην ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας, αυτή πραγματοποιήθηκε βάσει συγκεκριμένων εξισώσεων. Επιπλέον, διατυπώθηκαν και οι εξισώσεις με τις οποίες υπολογίστηκαν οι κεντρικότητες που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία (κεντρικότητα βαθμού (degree centrality), κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality), κεντρικότητα μεταξύ, (betweenness centrality)).

Έπειτα, ξεκίνησε η διαδικασία των πειραμάτων. Το πρώτο βήμα ήταν η ποσοτικοποίηση των μετρικών και των κεντρικοτήτων κατά την κανονική αδιατάρακτη λειτουργία του δικτύου. Μετά, εφαρμόστηκε μία επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία τα δομικά στοιχεία του δοκιμαστικού δικτύου της Αθήνας αφαιρέθηκαν διαδοχικά από τον γράφο και από το



μακροσκοπικό μοντέλο Aimsun του δικτύου, ενώ παράλληλα υλοποιείτο η ποσοτικοποίηση των μετρικών σε κάθε επανάληψη. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στο επόμενο βήμα, λαμβάνοντας όμως υπόψιν μόνο τους πρώτους 20 κόμβους που είχαν την υψηλότερη κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) και κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) αντίστοιχα, κατά την τυπική λειτουργία του δικτύου. Το τελευταίο στάδιο των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός των συντομότερων διαδρομών των πρώτων 20 ζευγών Προέλευσης - Προορισμού του δικτύου, που είχαν την υψηλότερη ζήτηση. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε η αποδοτικότητα των 20 κόμβων με τις υψηλότερες κεντρικότητες εγγύτητας και κεντρικότητες ενδιαμεσότητας αντίστοιχα, αλλά και η αποδοτικότητα των συντομότερων διαδρομών των 20 ζευγών.

Κατόπιν, οι ποσοτικοποιημένες μετρικές της ανθεκτικότητας ερμηνεύθηκαν στατιστικά μέσω μη εποπτευόμενων και εποπτευόμενων τεχνικών. Ειδικότερα, μετρήθηκαν για την αποδοτικότητα, την ευπάθεια και την κρισιμότητα διάφορες παράμετροι όπως οι μέσες τιμές, τα τυπικά σφάλματα κ.α. Τέλος, αναλύθηκαν στατιστικά πέντε συναρτήσεις που αφορούν τις λειτουργικές τάξεις (functional classes) των συνδέσμων του εξεταζόμενου δικτύου.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της εργασίας δείχνει ότι η αποδοτικότητα και η ευπάθεια είναι χαμηλότερα διασκορπισμένες σε σύγκριση με την κρισιμότητα και ότι οι τιμές τους είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σύγκριση με την κρισιμότητα (ειδικά όταν λαμβάνεται υπόψιν η ευπάθεια). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά την προκαταρκτική ανάλυση παρουσιάστηκε το Παράδοξο Braess. Ακόμη, μια μεθοδολογία ομαδοποίησης βασισμένη στον αλγόριθμο k-means δείχνει ότι η σχέση μεταξύ αποδοτικότητας, ευπάθειας και κρισιμότητας μπορεί να εμποδίζει την εμφάνιση ορισμένων πιο περίπλοκων ιδιοτήτων, που όμως μπορούν να προσεγγιστούν με την ενσωμάτωση κάποιων μεταβλητών που σχετίζονται με την κυκλοφορία, όπως είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος ή η χωρητικότητα. Επιπλέον, η κοινή ανάλυση της κρισιμότητας και της αποτελεσματικότητας καταδεικνύει μια πολυωνυμική σχέση μεταξύ του λόγου του δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου (Network Component Importance index) και του δείκτη αποδοτικότητας (δείκτης Σημασίας Συνδέσμου - Link Importance indicator) και του κυκλοφοριακού φόρτου κάθε συνδέσμου του δικτύου.

Ολοκληρώνοντας την επεξεργασία των δεδομένων των πειραμάτων, προέκυψαν κάποια ενδιαφέροντα σημεία για την περαιτέρω διερεύνηση του εξεταζόμενου θέματος. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην εφαρμογή της μεθοδολογικής προσέγγισης και των ευρημάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας και σε άλλα αστικά οδικά δίκτυα. Αυτό θα οδηγήσει τόσο στην ανάπτυξη του διαθέσιμου συνόλου δεδομένων, με πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα, την ευπάθεια και την κρισιμότητα διαφόρων δικτύων, όσο και στην επαλήθευση των προγνωστικών τιμών που έχουν προταθεί εντός των επομένων κεφαλαίων.



# Πίνακας Περιεχομένων

<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>1</b>
1.1 Συστήματα Μεταφορών και Ανθεκτικότητα .....	1
1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας .....	3
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας .....	4
<b>2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b> .....	<b>7</b>
2.1 Η έννοια της Ανθεκτικότητας .....	7
2.1.1 Ποσοτικοποίηση Ανθεκτικότητας .....	8
2.1.2 Μοντελοποίηση της Ανθεκτικότητας .....	11
2.2 Ανάλυση Πρόσφατων Ερευνών .....	13
2.2.1 Ανθεκτικότητα σε διαταρακτικά γεγονότα .....	16
2.2.2 Ευπάθεια των δικτύων μεταφορών .....	19
2.2.3 Αξιοπιστία δικτύων μεταφορών .....	19
2.3 Περιοχές Εφαρμογής .....	20
2.3.1 Εφαρμογές σε πραγματικά δίκτυα .....	20
2.3.2 Εφαρμογές που εξετάζουν την ανθεκτικότητα από άλλες οπτικές .....	23
2.4 Προκλήσεις .....	23
2.4.1 Ανεπάρκεια και πολυπλοκότητα δεδομένων .....	23
2.4.2 Έλλειψη πραγματικών δεδομένων και απλοποίηση δεδομένων .....	24
2.5 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας .....	25
<b>3. Μεθοδολογική προσέγγιση</b> .....	<b>28</b>
3.1 Περιγραφή της διαδικασίας .....	28
3.1.1 Διατύπωση προβλήματος .....	28
3.1.2 Περιοχή μελέτης και δίκτυο προσομοίωσης .....	28
3.1.3 Επιλογή μετρικών ανθεκτικότητας και δημιουργία γράφου .....	29
3.1.4 Ποσοτικοποίηση μετρικών ανθεκτικότητας .....	30
3.1.5 Στατιστική ανάλυση και μοντελοποίηση .....	31
3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	33
3.2.1 Μετρικές ανθεκτικότητας .....	33
3.2.2 Ανάπτυξη γράφου .....	35
3.2.3 Μακροσκοπικό μοντέλο κυκλοφορίας .....	35

<b>4. Ανάλυση και Αποτελέσματα</b> .....	<b>38</b>
4.1 Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων .....	38
4.2 Υπολογισμός centralities, αποδοτικότητας και κρισιμότητας .....	42
4.2.1 Κανονική αδιατάρακτη λειτουργία του δικτύου .....	42
4.2.2 Διαδικασία Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων .....	42
4.2.3 Υπολογισμός αποδοτικότητας και κρισιμότητας κόμβων μέσω της διαδικασίας Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων.....	45
4.3 Αποτελέσματα .....	56
4.3.1 Διαδοχική αφαίρεση συνδέσμων και προκαταρκτική στατιστική ανάλυση .....	56
4.3.2 Ομαδοποίηση ανθεκτικότητας του δικτύου .....	59
4.3.3 Συσχέτιση αποδοτικότητας και κρισιμότητας .....	61
4.3.4 Συσχέτιση μεταξύ LI και Κυκλοφοριακού φόρτου.....	66
<b>5. Συμπεράσματα και προτάσεις</b> .....	<b>70</b>
5.1 Εισαγωγή .....	70
5.2 Βασικά συμπεράσματα .....	71
5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	72
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>74</b>
<b>Παράρτημα</b> .....	<b>83</b>

# Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Μοντέλο λειτουργίας συστήματος μεταφορών (Πηγή: Jenelius & Mattsson, 2020) .....	1
Σχήμα 2: Μεθοδολογική προσέγγιση .....	28
Σχήμα 3: Εσωτερικός δακτύλιος αστικού οδικού δικτύου Αθηνών .....	29
Σχήμα 4: Κόμβοι με τις υψηλότερες κεντρικότητες εγγύτητας (closeness centrality) και κεντρικότητες ενδιάμεσότητας (betweenness centrality) .....	31
Σχήμα 5: Περιοχή μελέτης .....	38
Σχήμα 6: Δίκτυο μελέτης σε περιβάλλον Aimsun Next .....	39
Σχήμα 7: Εισαγωγή της βιβλιοθήκης “igraph” και ονοματοδοσία κόμβων (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	40
Σχήμα 8: Εισαγωγή των συντεταγμένων x των κόμβων (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	40
Σχήμα 9: Εισαγωγή των συντεταγμένων y των κόμβων (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	40
Σχήμα 10: Εισαγωγή των κόμβων προέλευσης για την δημιουργία των διαδρομών (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	41
Σχήμα 11: Εισαγωγή των κόμβων προορισμού για την δημιουργία των διαδρομών (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	41
Σχήμα 12: Δημιουργία πλαισίων δεδομένων για τους κόμβους και τις διαδρομές και κατασκευή του γράφου (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	41
Σχήμα 13: Υπολογισμός για κάθε κόμβο των μεγεθών degree centrality, closeness centrality και betweenness centrality και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	42
Σχήμα 14: Υπολογισμός των μεγεθών degree centrality, closeness centrality και betweenness centrality μέσω της διαδικασίας Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	44
Σχήμα 15: Υπολογισμός αποδοτικότητας μέσω της διαδικασίας Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	44
Σχήμα 16: Διεξαγωγή προσομοίωσης και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .ang (απόσπασμα από τον κώδικα Python) .....	45
Σχήμα 17: Εισαγωγή διαδρομών και συνδέσμων τους στον κώδικα (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	47
Σχήμα 18: Υπολογισμός αποδοτικότητας όλων των πιθανών shortest paths για κάθε ζευγάρι OD μέσω της διαδικασίας διαδοχικής αφαίρεσης συνδέσμων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	47
Σχήμα 19: Διεξαγωγή προσομοίωσης και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .ang (απόσπασμα από τον κώδικα Python) .....	49
Σχήμα 20: Εισαγωγή δεδομένων στον κώδικα (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	51
Σχήμα 21: Υπολογισμός αποδοτικότητας των 20 κόμβων με την υψηλότερη closeness centrality και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	51
Σχήμα 22: Υπολογισμός αποδοτικότητας των 20 κόμβων με την υψηλότερη betweenness centrality και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R) .....	52
Σχήμα 23: Διεξαγωγή προσομοίωσης και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .ang (απόσπασμα από τον κώδικα Python) .....	53

Σχήμα 24: Διεξαγωγή προσομοίωσης και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .ang (απόσπασμα από τον κώδικα Python).....	54
Σχήμα 25: Στιγμιότυπο από την διαδικασία της προσομοίωσης στη διάρκεια ενός πειράματος για τους κόμβους με την υψηλότερη closeness centrality (στιγμιότυπο από το Windows command line).....	55
Σχήμα 26: Αποδοτικότητα μετά την αφαίρεση κάθε συνδέσμου από το γράφο G.....	56
Σχήμα 27: Ευπάθεια μετά την αφαίρεση κάθε συνδέσμου από το γράφο G .....	57
Σχήμα 28: Δείκτης Σημασίας Στοιχείων Δικτύου για τον εσωτερικό δακτύλιο του αστικού οδικού δικτύου των Αθηνών.....	58
Σχήμα 29: Ομαδοποίηση του δικτύου με βάση τη μετρική της αποδοτικότητας (επάνω), την ευπάθεια (μέση) και τον δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου (κάτω) .....	59
Σχήμα 30: Ομαδοποίηση του δικτύου με βάση τον κυκλοφοριακό φόρτο κάθε συνδέσμου (πάνω) και την αποδοτικότητα, τον δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου, τη χωρητικότητα και την ταχύτητα (κάτω) .....	60
Σχήμα 31: LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) για κάθε σύνδεσμο .....	62
Σχήμα 32: LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) για κάθε σύνδεσμο ανά λειτουργική κλάση .....	63
Σχήμα 33: Συναρτήσεις που εκφράζουν το LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) για κάθε σύνδεσμο ανά λειτουργική κλάση.....	64
Σχήμα 34: Συνάρτηση που εκφράζει το LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) κάθε διαδρομής .....	66
Σχήμα 35: Συναρτήσεις που εκφράζουν το LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) για κόμβους με υψηλή κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) .....	67
Σχήμα 36: Εκχωρημένος Κυκλοφοριακός Φόρτος (Assigned Volume) υπό κανονικές συνθήκες (αριστερά) και μετά από αφαίρεση κόμβου (δεξιά) .....	68

## **Ευρετήριο Πινάκων**

Πίνακας 1: Τα 20 Ζεύγη OD με την υψηλότερη ζήτηση (χρήση κλίμακας χρωμάτων για ευκολότερη ανάγνωση) ....	46
Πίνακας 2: Οι 20 κόμβοι (με τις ονομασίες τους στο Aimsun) με την υψηλότερη closeness centrality (χρήση κλίμακας χρωμάτων για ευκολότερη ανάγνωση).....	50
Πίνακας 3: Οι 20 κόμβοι (με τις ονομασίες τους στο Aimsun) με την υψηλότερη betweenness centrality (χρήση κλίμακας χρωμάτων για ευκολότερη ανάγνωση).....	50
Πίνακας 4: Προκαταρκτική στατιστική ανάλυση για την αποδοτικότητα και την ευπάθεια .....	57
Πίνακας 5: Προκαταρκτική στατιστική ανάλυση για την κρισιμότητα .....	58
Πίνακας 6: Έλεγχος καλής προσαρμογής (goodness of fit) των εξισώσεων 9–13 .....	65

## **Ευρετήριο Διαγραμμάτων**

Διάγραμμα 1: Μετρικές της ανθεκτικότητας .....	10
--	----



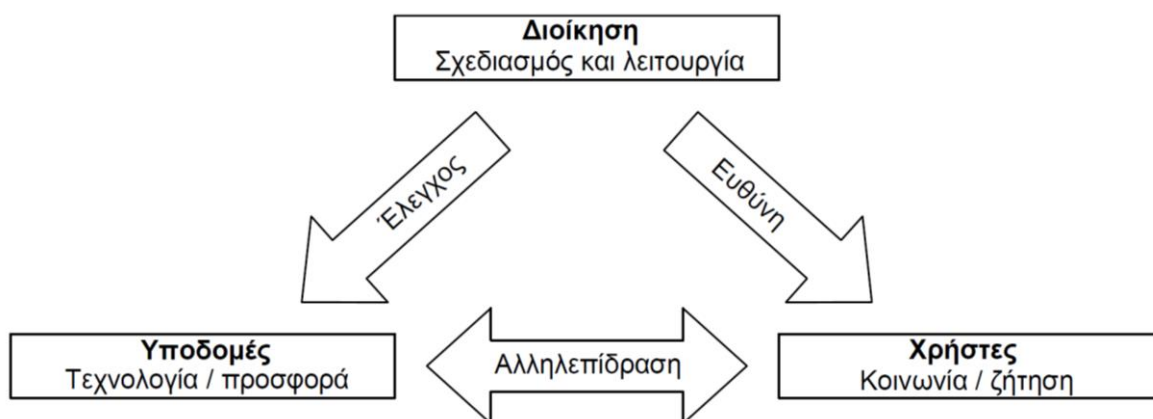
# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Συστήματα Μεταφορών και Ανθεκτικότητα

Οι σημερινές κοινωνίες έχουν αρχίσει να εξαρτώνται όλο και περισσότερο από τα συστήματα υποδομών που προσφέρουν προϊόντα και υπηρεσίες όπως παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, πληροφορίες και τηλεπικοινωνίες και βεβαίως, μετακινήσεις προσώπων και αγαθών. Ιδιαίτερα οι μεταφορές αποτελούν τομέα ζωτικής σημασίας, αφού συνεισφέρουν τόσο στην εξυπηρέτηση των πολιτών όσο και στην οικονομία. Οι μεταφορές μπορούν να χωριστούν σε επιβατικές, που αφορούν τη μεταφορά του πληθυσμού, προκειμένου να καλυφθούν οι μετακινήσεις του για την ικανοποίηση των αναγκών του (εργασία, αναψυχή, εκπαίδευση, αγορές κ.λπ.) και σε εμπορευματικές, που περιλαμβάνουν τη μεταφορά αγαθών (πρώτων υλών, ενδιάμεσων και τελικών προϊόντων), για την παραγωγή, τη διανομή και την κατανάλωση.

Αναφορικά με τα συστήματα μεταφορών (transport systems), σύμφωνα με τους Jenelius & Mattsson (2020), αυτά μπορούν να χωριστούν εννοιολογικά σε τρία μέρη (Σχήμα 1):

- 1) τις υποδομές, συμπεριλαμβανομένων των σιδηροδρομικών γραμμών, των οδών, των τερματικών σταθμών, των αεροδρομίων, των λιμένων κ.λπ.
- 2) τους άμεσους και έμμεσους χρήστες της τεχνολογίας, δηλαδή ταξιδιώτες, επαγγελματίες οδηγούς και την κοινωνία γενικότερα
- 3) τους φορείς που είναι υπεύθυνοι για τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη συντήρηση των υποδομών και των υπηρεσιών βάσει συγκεκριμένων κανονισμών και δημοσιονομικών περιορισμών.



Σχήμα 1: Μοντέλο λειτουργίας συστήματος μεταφορών (Πηγή: Jenelius & Mattsson, 2020)

Με την πάροδο του χρόνου τα συστήματα μεταφορών έχουν γίνει εξαιρετικά πολύπλοκα. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με την σημαντικότητά τους για τις κοινωνίες, όπως αναφέρθηκε και στην παραπάνω υποενότητα, είχε ως συνέπεια την αναγκαιότητα για ενδελεχή έλεγχο, παρακολούθηση και αξιολόγηση τους από τους διάφορους αρμόδιους κρατικούς φορείς.



Ένας τρόπος αξιολόγησης των συστημάτων μεταφορών είναι μέσω της ανθεκτικότητας. Η ανθεκτικότητα (resilience) είναι μία έννοια στην οποία αποδίδονται πολλαπλοί ορισμοί, με αποτέλεσμα ο απόλυτος καθορισμός της να ενέχει δυσκολία. Σε ένα πιο γενικό βαθμό, αρκετοί μελετητές ορίζουν τα ανθεκτικά συστήματα ως συστήματα που είναι σε θέση να λειτουργούν σε επαρκές επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια ενός διαταρακτικού συμβάντος, έχουν αποδεκτή απόδοση κατά τη διάρκεια του συμβάντος και την ικανότητα να ανακάμπτουν μετά την παύση της διαταραχής.

Η ανθεκτικότητα των συστημάτων είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται ευρέως. Απαντάται όχι μόνο στην επιστήμη των μεταφορών αλλά και σε διάφορες άλλες όπως την οικονομική, την ιατρική και την επιστήμη των υπολογιστών.

Όσον αφορά στα συστήματα μεταφορών, η ανθεκτικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω κάποιων μεθόδων, με συνέπεια οι ερευνητές να έχουν στην διάθεσή τους πρακτικά αποτελέσματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιήσουν για την σύγκριση, την βελτίωση και την ανάπτυξη των συστημάτων μεταφορών. Επιπλέον, η μέτρηση της ανθεκτικότητας ενός οδικού δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου, προσφέρει ουσιαστικά δεδομένα τα οποία είναι δυνατόν να αποθηκευτούν και να αξιοποιηθούν σε μελλοντικά έργα μοντελοποίησης.

Παράλληλα, οι δυνατότητες που παρουσιάζει η συγκεκριμένη έννοια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες εφαρμογές. Είναι πολλά τα επιστημονικά άρθρα τα οποία μέσω της ανθεκτικότητας αξιολογούν τα συστήματα μεταφορών σε έκτακτες περιπτώσεις όπως στην διάρκεια εκκένωσης περιοχών (π.χ. Mahajan & Kim, 2020). Σε άλλες έρευνες εξετάζεται η ανθεκτικότητα σε περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών γενικότερα (για παράδειγμα οι επόμενες έρευνες που παρατίθενται εστιάζουν σε πλημμυρικά φαινόμενα: Tachaudomdach et al., 2021; Balakrishnan et al., 2020; Kasmalkar et al., 2020; Sen & Dutta, 2020), ενώ σε κάποιες μελετάται σε συνάρτηση με ανθρωπογενείς καταστροφές (π.χ. η έρευνα των Chen & Lu (2020) αναφέρεται στην περίπτωση τρομοκρατικών επιθέσεων σε ένα συγκοινωνιακό δίκτυο). Επιπρόσθετα, υπάρχουν και ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με την μέτρηση της ανθεκτικότητας σε χρόνο ύστερο των καταστροφών (π.χ. Zhao & Zhang, 2020).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, η έρευνα για την ανθεκτικότητα των συστημάτων μεταφορών αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια και έτσι αρκετοί μελετητές έχουν υιοθετήσει σύγχρονες και καινοτόμες μεθόδους στα επιστημονικά τους εγχειρήματα. Μία ενδιαφέρουσα μελέτη μάλιστα, αξιοποιεί τις δυνατότητες της μηχανικής μάθησης και των μη επανδρωμένων αεροχημάτων (drones), με σκοπό τον καθορισμό της ανθεκτικότητας κρίσιμων υποδομών (Dick et al., 2019).

## **1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό να παρουσιάσει μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ενός σύνθετου αστικού δικτύου μεταφορών υπό την εμφάνιση αστοχιών σε επίπεδο συνδέσμων, εξετάζοντας από κοινού την αποδοτικότητα, την ευπάθεια και την κρισιμότητα και μοντελοποιώντας τις αλληλεπιδράσεις τους.

Οι σχέσεις μεταξύ των τριών προαναφερθέντων μετρικών αναπτύσσονται και διερευνώνται στο αστικό οδικό δίκτυο του κέντρου της Αθήνας, μέσω της εφαρμογής μακροσκοπικής προσομοίωσης και στατιστικής ανάλυσης. Παρόλο που η αποτελεσματικότητα, η ευπάθεια και η κρισιμότητα προσδιορίζουν διαφορετικές πτυχές των δικτύων όσον αφορά στην ανθεκτικότητά τους, το πλαίσιο της υφιστάμενης έρευνας στοχεύει να εντοπίσει τα μεταξύ τους κοινά σημεία και να παραθέσει χρήσιμες πληροφορίες για την πιθανή διασύνδεσή τους.

## **1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας**

### Κεφάλαιο 1ο

Το πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αποτελεί την Εισαγωγή. Αναφέρεται στη σημασία της ανθεκτικότητας για τα συγκοινωνιακά συστήματα αλλά και τις μεταφορές γενικότερα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται και ο σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης.

### Κεφάλαιο 2ο

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται οι πιο σύγχρονες έρευνες που αφορούν την ανθεκτικότητα. Τα επιστημονικά άρθρα που εξετάστηκαν εξηγούνται και ταξινομούνται με βάση τις καινοτομίες τους, τις εφαρμογές τους και τα μειονεκτήματά τους. Παράλληλα, εκτός από την διεθνή βιβλιογραφία, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύονται οι ορισμοί και οι μετρικές της ανθεκτικότητας, όπως επίσης και οι σχέσεις μεταξύ των διάφορων μετρικών. Επιπλέον, διατυπώνεται η έννοια της ποσοτικοποίησης της ανθεκτικότητας.

### Κεφάλαιο 3ο

Στην μεθοδολογική προσέγγιση (τρίτο Κεφάλαιο) περιγράφονται αρχικά, τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται το δοκιμαστικό δίκτυο της Αθήνας, το οποίο χρησιμοποιείται ως εφαρμογή στην εργασία και έπειτα η διαδικασία με την οποία κατασκευάστηκαν ο κατευθυνόμενος γράφος και το μακροσκοπικό οδικό δίκτυο. Επιπρόσθετα, αναλύονται οι μαθηματικές σχέσεις με τις οποίες υπολογίστηκαν τα μεγέθη των μετρικών της ανθεκτικότητας και των κεντρικότητων. Τέλος, διατυπώνονται τα πειράματα που διεξήχθησαν στην διάρκεια της έρευνας και αναφέρονται τα στατιστικά μεγέθη με τα οποία ευρέθησαν τα τελικά αποτελέσματα.

### Κεφάλαιο 4ο

Σε αυτή την ενότητα τα δεδομένα της εν λόγω μελέτης περιγράφονται εκτενώς, παρατίθενται τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν και οι κώδικες που συντάχθηκαν, ερμηνεύονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και διερευνάται η σχέση μεταξύ ευπάθειας και κρισιμότητας. Επίσης, παρέχεται μία προκαταρκτική στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξετάζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ της αποδοτικότητας, της ευπάθειας και της κρισιμότητας, με βάση την ομαδοποίηση του δικτύου και την χρήση του αλγόριθμου k-means. Ακόμη, εφαρμόζεται ένα γενικό γραμμικό μοντέλο που έχει ως στόχο την εύρεση μιας συνάρτησης που ταιριάζει καλύτερα στα αποτελέσματα των πειραμάτων.

## Κεφάλαιο 5ο

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα κύρια ευρήματα και τα βασικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, καθώς και ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω ανάλυση των υπό εξέταση ζητημάτων, με σκοπό την αρωγή σε μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες.



## **2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση**

### **2.1 Η έννοια της Ανθεκτικότητας**

Η έννοια της ανθεκτικότητας προήλθε από την επιστήμη της οικολογίας και ορίστηκε πρώτη φορά ως η συνεχής διατήρηση των σχέσεων μέσα σε ένα σύστημα (Holling, 1973). Μετέπειτα, η χρήση της ανθεκτικότητας επεκτάθηκε και σε άλλους επιστημονικούς τομείς όπως είναι η οικονομία και οι επιχειρήσεις, τα συστήματα τηλεπικοινωνιών, τα συστήματα ισχύος, τα συστήματα παραγωγής και οι εφοδιαστικές αλυσίδες, τα συστήματα διανομής νερού, τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης καθώς και τα συστήματα υποδομών γενικότερα (Titko, Havko & Studena, 2020).

Παρότι η ανθεκτικότητα ερευνάται ήδη για δεκαετίες από τους επιστήμονες, δεν έχει έναν μοναδικό και απόλυτο ορισμό με συνέπεια, σύμφωνα και με τους Nira & Kermanshachi (2020a), να μην είναι μια έννοια που ορίζεται εύκολα (Wan et al., 2018). Στη βιβλιογραφία έχει μελετηθεί από πολλές οπτικές με κυριότερες την τεχνική, την οργανωτική, την οικονομική και την κοινωνική. Ειδικότερα, η τεχνική ανθεκτικότητα είναι η φυσική (εγγενής) ανθεκτικότητα του συστήματος, η οργανωτική ανθεκτικότητα είναι η ικανότητα των διαχειριστών κρίσεων να λαμβάνουν τις σωστές αποφάσεις για την αποφυγή ή/και τον περιορισμό μίας κρίσης, η οικονομική ανθεκτικότητα είναι η δυνατότητα εξυπηρέτησης του επιπρόσθετου κόστους επισκευής μετά από μία καταστροφή και η κοινωνική ανθεκτικότητα είναι η ικανότητα της άμεσης επέμβασης του κρατικού μηχανισμού και των εθελοντών με σκοπό την ελάττωση των επιπτώσεων μίας καταστροφής.

Η σπουδαιότητα της ανθεκτικότητας γίνεται ιδιαίτερα εμφανής μέσα από την πληθώρα των μελετών που την διερευνούν. Η περεταίρω εξέταση της βιβλιογραφίας αποκαλύπτει ακόμη ότι, η ανθεκτικότητα είναι μια ευρύτερη έννοια που μπορεί να είναι και εξαιρετικά πολύτιμη για την παρακολούθηση και τη διαχείριση μελλοντικών συνθηκών κινητικότητας σε πολύπλοκα έξυπνα αστικά περιβάλλοντα (Para et al., 2015).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται μερικοί από τους ορισμούς και τα χαρακτηριστικά της ανθεκτικότητας (Ayyub, 2020; Shen et al., 2019; Gonçalves & Ribeiro, 2020; Jenelius & Mattsson, 2020; Nira & Kermanshachi, 2020) που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές:

- 1.) Ένα ανθεκτικό σύστημα πρέπει να μπορεί να επιστρέψει σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο απόδοσης μετά από μια διαταραχή, με τους λιγότερους δυνατούς πόρους και χρόνο (Vugrin, Warren & Ehlen, 2011).
- 2.) Ένα ανθεκτικό σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση να ανακάμψει από ένα εξωτερικό διαταρακτικό γεγονός (Henry & Ramirez-Marquez, 2012).
- 3.) Ένα ανθεκτικό σύστημα θα πρέπει να μπορεί να συνεχίσει να είναι λειτουργικό κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου διαταραχής (Keogh & Cody, 2013).
- 4.) Ένα ανθεκτικό σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να απορροφά τις επιπτώσεις των εξωτερικών γεγονότων. Θα πρέπει επίσης να είναι σε θέση να προσαρμοστεί στην κατάσταση μετά την καταστροφή (Faturechi & Miller-Hooks, 2014).
- 5.) Ένα ανθεκτικό σύστημα θα πρέπει να έχει την ικανότητα να προβλέπει, να αντέχει, να επιβιώνει και να ανακάμπτει από το διαταρακτικό γεγονός (Panteli & Mancarella, 2017).

- 6.) Η ανθεκτικότητα υποδηλώνει την απόδοση του συστήματος στη περίπτωση ενός απρόβλεπτου διαταρακτικού συμβάντος (Liao, Hu & Ko, 2018).
- 7.) Ένα ανθεκτικό σύστημα πρέπει να μπορεί να μειώνει τον αντίκτυπο των καταστροφών, ούτως ώστε να αποκτήσει ένα αποδεκτό επίπεδο λειτουργικότητας (Dick et al., 2019).

Συμπερασματικά, πολλοί ερευνητές ορίζουν τα ανθεκτικά συστήματα ως συστήματα που είναι σε θέση να λειτουργούν σε επαρκές επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια ενός διαταρακτικού συμβάντος, έχουν αποδεκτή απόδοση κατά τη διάρκεια του συμβάντος και την ικανότητα να ανακάμπτουν μετά την παύση της διαταραχής.

### **2.1.1 Ποσοτικοποίηση Ανθεκτικότητας**

Όσον αφορά στις υποδομές μεταφορών τώρα, οι Nira & Kermanshachi (2020b) υποστήριξαν ότι η ανθεκτικότητα μπορεί να εξεταστεί περαιτέρω μέσω διαφόρων μετρικών (Li et al., 2020; Wang, Xue & Zhou, 2020; Yu et al., 2019; Zhao & Zhang, 2020; Qiang & Xu, 2019; Wang et al., 2021; Renne et al., 2019; Chen & Lu, 2020; Ahmed & Dey, 2020; Mao et al., 2021; Liu et al., 2019; Morshed et al., 2020; Tachaudomdach et al., 2021; Tang et al., 2020; Balakrishnan et al., 2020; Khaghani & Jazizadeh, 2020; Siri, Siri & Sacone, 2020; Sen & Dutta, 2020; Wang et al., 2020; Titko, Havko & Studena, 2020; Hu & Bhourri, 2020; Kammouh et al., 2019; Kasmalkar et al., 2020). Οι εν λόγω μετρικές είναι οι ακόλουθες:

- 1.) **Στιβαρότητα (Robustness)**: Αφορά τα χαρακτηριστικά του συστήματος τα οποία πρέπει να είναι αρκετά ισχυρά ώστε να απορροφούν τη διαταραχή, όταν αυτό εκτίθεται σε καταστροφικά γεγονότα (Wan et al., 2018). Ως εκ τούτου, ένα ισχυρό και υγιές σύστημα θα έχει υψηλότερη στιβαρότητα (Liu et al., 2019; Abdulla & Birgisson, 2020; Hu & Bhourri, 2020; Jenelius & Mattsson, 2020).
- 2.) **Πλεονασμός (Redundancy)**: Επιτρέπει στο σύστημα να έχει πολλαπλά εφεδρικά στοιχεία με την ίδια λειτουργικότητα, έτσι ώστε σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης το σύστημα να μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία του χρησιμοποιώντας εφεδρικά στοιχεία όταν τα υπάρχοντα στοιχεία του είναι διαταραγμένα (Liao, Hu & Ko, 2018).
- 3.) **Επινοητικότητα (Resourcefulness)**: Οι Frenkleton et al. (2012) έλαβαν τρεις μεταβλητές που σχετίζονται με τους πόρους κατά την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του δικτύου μεταφορών. Οι μεταβλητές αυτές είναι η πρόσβαση σε αγαθά και υλικά, οι διαθέσιμοι πόροι (Kermanshachi & Rouhanizadeh, 2018) και τα καύσιμα και η ενέργεια. Ενώ, οι Wan et al. (2018) από την άλλη πλευρά, όρισαν την επινοητικότητα ως τη διαθεσιμότητα υλικών και ανθρώπινων πόρων για την επίτευξη ανάκαμψης μετά από μια καταστροφή.
- 4.) **Ταχύτητα (Rapidty)**: Είναι η ταχύτητα του συστήματος που πρέπει να ανακτηθεί σε κατάσταση λειτουργίας μετά από μια καταστροφή, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιθανά εμπόδια για την έγκαιρη αποκατάσταση (Sun, Bocchini & Davison 2018; Rouhanizadeh, Kermanshachi & Nira, 2019).
- 5.) **Αποδοτικότητα (Efficiency)**: Είναι το χαρακτηριστικό του συστήματος που βελτιστοποιεί την αναλογία εισροών-εκροών ενέργειας ενός συστήματος (Murray-Tuite, 2006).
- 6.) **Ποικιλομορφία (Diversity)**: Αυτό το χαρακτηριστικό ενός συστήματος που του επιτρέπει να έχει εφεδρικά στοιχεία με διαφορετικά είδη λειτουργικότητας (Liao, Hu & Ko, 2018).

Εξυπηρετεί την ανάγκη του συστήματος να είναι σε θέση να αντέξει πολλαπλούς τύπους καταστροφών και απειλών.

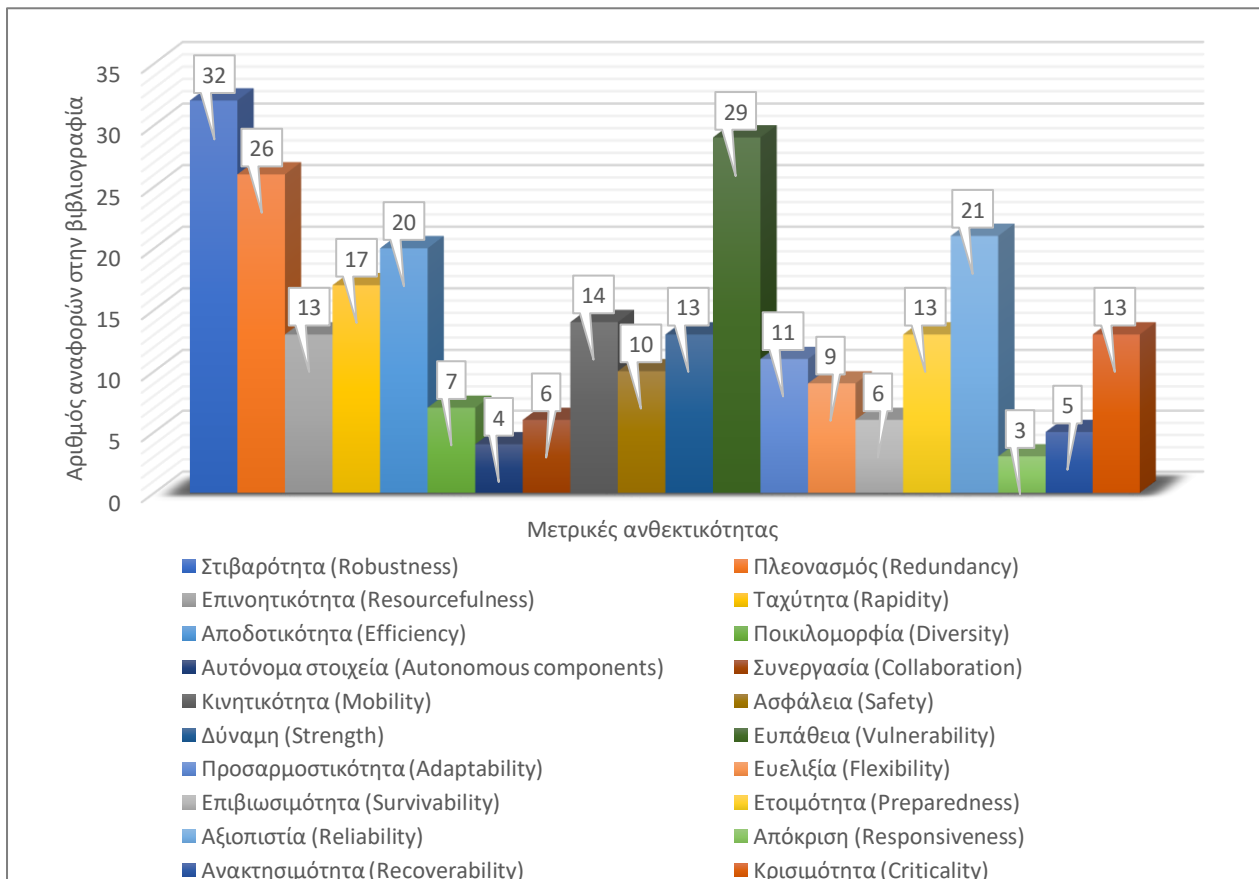
- 7.) Αυτόνομα στοιχεία (Autonomous components): Ένα σύστημα μεταφορών για να είναι ανθεκτικό πρέπει να έχει την ικανότητα να λειτουργεί ανεξάρτητα χωρίς κανέναν εξωτερικό έλεγχο (Liao, Hu & Ko, 2018).
- 8.) Συνεργασία (Collaboration): Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει σε ένα σύστημα να έχει τη δυνατότητα να μοιράζεται πληροφορίες και πόρους μεταξύ των ενδιαφερομένων μερών ή των δομικών στοιχείων του (Murray-Tuite, 2006; Rouhanizadeh & Kermanshachi, 2019).
- 9.) Κινητικότητα (Mobility): Αυτό το χαρακτηριστικό υποδηλώνει ότι το σύστημα μεταφορών θα είναι σε θέση να παρέχει ένα αποδεκτό επίπεδο υπηρεσιών για τους ταξιδιώτες ούτως ώστε να μετακινούνται από το ένα μέρος στο άλλο (Liao, Hu & Ko, 2018).
- 10.) Ασφάλεια (Safety): Ένα σύστημα μεταφορών για να είναι ανθεκτικό πρέπει να είναι αρκετά ασφαλές για τους χρήστες, ούτως ώστε να μην εκτίθενται σε κινδύνους (Liao, Hu & Ko, 2018). Η Murray-Tuite (2006) από την άλλη, απαρίθμησε δύο μεταβλητές, τον αριθμό των τροχαίων συμβάντων για ένα συγκεκριμένο τμήμα του δρόμου και τον αριθμό των οχημάτων που ταξιδεύουν σε περιοχή επιρρεπή σε καταστροφές, για τη μέτρηση της ασφάλειας.
- 11.) Δύναμη (Strength): Είναι η εγγενής δύναμη του συστήματος να αντιστέκεται σε εξωτερικές επιθέσεις (Liao, Hu & Ko, 2018).
- 12.) Ευπάθεια (Vulnerability): Αναφέρεται στη φυσική αδυναμία του συστήματος μεταφορών ως προς ένα διαταρακτικό συμβάν. Έχει αρνητικό αντίκτυπο στην ταχύτητα της απώλειας απόδοσης κατά τη διάρκεια μιας καταστροφής (Wan et al., 2018; Yu et al., 2019; Mahajan & Kim, 2020; Chen & Lu, 2020; Starita & Scaparra, 2020; Almotahari & Yazici, 2020; Balakrishnan et al., 2020; Abdulla & Birgisson, 2020; Jenelius & Mattsson, 2020).
- 13.) Προσαρμοστικότητα (Adaptability): Είναι η ικανότητα του συστήματος μεταφορών να υιοθετεί διδάγματα από την τρέχουσα καταστροφή που θα το βοηθήσουν να είναι ανθεκτικό έναντι μελλοντικών καταστροφών (Panteli & Mancarella, 2017).
- 14.) Ευελιξία (Flexibility): Αυτή η έννοια υπολογίζει την ικανότητα του συστήματος μεταφορών να προσαρμόζεται στις επιπτώσεις της καταστροφής μέσω ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης.
- 15.) Επιβιωσιμότητα (Survivability): Είναι η ικανότητα του συστήματος μεταφορών να αντέχει τον αρχικό αντίκτυπο της καταστροφής ώστε να συνεχίσει την λειτουργία του (Baroud et. al, 2014a).
- 16.) Ετοιμότητα (Preparedness): Είναι η ικανότητα να υπάρχουν ορισμένα μέτρα που θα βοηθήσουν το σύστημα στην αντιμετώπιση της καταστροφής (Jin et al., 2014). Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης διάσωσης στο σχέδιο κατασκευής των δρόμων και των γεφυρών θα κάνει το σύστημα πιο έτοιμο να αντιμετωπίσει την καταστροφή.
- 17.) Αξιοπιστία (Reliability): Υποδεικνύει την πιθανότητα της συνεχιζόμενης κανονικής λειτουργίας (Wan et al., 2018; Yu et al., 2019; Shen et al., 2020; Hu & Bhourri, 2020).
- 18.) Απόκριση (Responsiveness): Είναι η ικανότητα του συστήματος μεταφορών να αναγνωρίζει τις αλλαγές που συνέβησαν λόγω ενός καταστροφικού γεγονότος (Ivanov, Sokolov & Dolgui, 2014).



19.) Ανακτησιμότητα (Recoverability): Η ανακτησιμότητα αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία μια οντότητα του συστήματος ανακάμπτει από ένα σοκ διακοπής με σκοπό να επιτύχει μια επιθυμητή κατάσταση (Hua & Ong, 2016; Rose, 2007).

20.) Κρισιμότητα (Criticality): Η κρισιμότητα ορίζεται από την άποψη των επιπτώσεων (για παράδειγμα κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις) της υποβάθμισης του δικτύου και αυξάνεται με τα γενικευμένα κόστη ταξιδιού (Jenelius, Petersen & Mattsson, 2006). Επιπλέον, τα κρίσιμα στοιχεία προσδιορίζονται σε σχέση με τη σοβαρότητα των διαταραχών στην απόδοση του δικτύου όταν αποτυγχάνουν οι κόμβοι ή οι σύνδεσμοι (Taylor, Sekhar & D'Este, 2006; Li & Ozbay, 2012). Έχουν προταθεί πολυάριθμοι δείκτες για τον εντοπισμό κρίσιμων στοιχείων όσον αφορά τις αλλαγές στην απόδοση του οδικού δικτύου που προκαλούνται από διακοπή της σύνδεσης. Αυτοί οι δείκτες περιλαμβάνουν την προσβασιμότητα, το κόστος ταξιδιού και τον δείκτη στιβαρότητας δικτύου (Network Robustness Index, NRI) καθώς και μεικτούς δείκτες (Almotahari & Yazici, 2021; Li et al., 2020; Almotahari & Yazici, 2020a; Almotahari & Yazici, 2020b; Jafino, Kwakkel & Verbraeck, 2019).

Στο Διάγραμμα 1 απεικονίζονται οι συνολικές αναφορές των προαναφερθέντων μετρικών της ανθεκτικότητας που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία (σε σύνολο 41 εξεταζόμενων άρθρων). Είναι εμφανές ότι στα περισσότερα άρθρα αναφέρονται αρκετές παραπάνω από μία μετρικές ανθεκτικότητας.



Διάγραμμα 1: Μετρικές της ανθεκτικότητας

### **2.1.2 Μοντελοποίηση της Ανθεκτικότητας**

Οι προηγούμενες μετρικές μπορούν να καθοριστούν σε διαφορετικές κλίμακες, που κυμαίνονται από το επίπεδο σύνδεσης (ανάλυση ανθεκτικότητας βάσει στοιχείων) έως το επίπεδο δικτύου (ανάλυση ανθεκτικότητας βάσει δικτύου) (Wan et al., 2018; Zhou, Wang & Yang, 2019; Sun, Bocchini & Davison, 2018; Leobons, Campos & Bandeira, 2019). Μπορεί επίσης να αλληλεπικαλύπτονται (π.χ. στιβαρότητα - ευπάθεια) ή να λειτουργούν συμπληρωματικά μεταξύ τους (π.χ. πλεονασμός - κρισιμότητα). Ωστόσο, η έρευνα σχετικά με τον βαθμό στον οποίο αυτές οι μετρικές συσχετίζονται ή μπορούν να συσχετιστούν περαιτέρω σε μια λειτουργική σχέση για να απεικονίσουν μια πληρέστερη κατανόηση της ανθεκτικότητας ενός δικτύου μεταφορών βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, ειδικά σε περιπτώσεις αστοχιών επιπέδου σύνδεσης, όπου μπορούν να επηρεαστούν τόσο οι δομικές ιδιότητες του δικτύου όσο και η επιλογή διαδρομής και η δυνατότητα υλοποίησης. Έχουν γίνει μερικές προσπάθειες για να εξεταστεί περαιτέρω η συσχέτιση κρισιμότητας και ευπάθειας. Η πρώτη έρευνα, στην οποία παρουσιάστηκαν το Ενοποιημένο Μέτρο Απόδοσης Δικτύου (Unified Network Performance Measure) και ο Δείκτης Σημασίας Στοιχείων Δικτύου (Network Component Importance index), πραγματοποιήθηκε από τους Nagurney & Qiang (2008). Οι συγκεκριμένοι βασίστηκαν σε μια καθαρά τοπολογική μέτρηση ενώ κατάφεραν επίσης να ενσωματώσουν τον κυκλοφοριακό φόρτο και το γενικευμένο κόστος στη μελέτη τους. Όσον αφορά τη συσχέτιση κρισιμότητας και ευπάθειας, ανέφεραν μονάχα ότι οι εν λόγω μετρικές είναι ίσες εάν και μόνο εάν η ζήτηση του δικτύου είναι τόσο χαμηλή ώστε τα αποτελέσματα του αλγόριθμου εκχώρησης διαδρομής να είναι τα ίδια με την προσέγγιση της συντομότερης διαδρομής. Μια άλλη έρευνα που στόχευε να εξετάσει τη σχέση μεταξύ τοπολογικών και σχετιζόμενων με το φόρτο/ζήτηση μέτρων ανθεκτικότητας είναι αυτή των (Almotahari & Yazici, 2020). Οι προαναφερθέντες εξέτασαν τις σχέσεις μεταξύ διαφόρων μετρικών, ωστόσο ορισμένες συναρτήσεις που αφορούν την αλληλεπίδραση των αναφερόμενων μετρικών δεν παρέχονται σε αυτό το άρθρο. Γίνεται αντιληπτό ότι και στις δύο έρευνες, δεν υπάρχει περαιτέρω κατηγοριοποίηση των συνδέσεων του δικτύου και άρα και της σχέσης μεταξύ κρισιμότητας και ευπάθειας σύμφωνα με τη λειτουργική τάξη (functional class) των συνδέσεων.

Σύμφωνα με τους Sen & Dutta (2020), η ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας μπορεί να προσεγγιστεί μέσω διάφορων μεθόδων όπως είναι οι μέθοδοι ασαφούς λογικής (fuzzy logic methods) (Zadeh, 1983), οι πιθανοτικές μέθοδοι (Miller-Hooks, Zhang & Faturechi, 2012; Queiroz, Garg & Tari, 2013; Sharma, Tabandeh & Gardoni, 2018), οι μέθοδοι θεωρίας γράφων (Berche et al., 2009) και οι αναλυτικές μέθοδοι (Cimellaro, Reinhorn & Bruneau, 2010; Tamvakis & Xenidis, 2013).

Παράλληλα, διαπιστώθηκε από την έρευνα των Shen et al. (2019) ότι οι υπάρχουσες μετρικές που αφορούν την ανθεκτικότητα είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε τέσσερις τύπους και συγκεκριμένα σε μοντέλα οριζόντιας στάθμης (level-crossing models, LC), μοντέλα παρεμβολής αντοχής-τάσης (stress-strength interference models, SS), μοντέλα απώλειας-ανάκτησης (recovery-loss models, RL) και μοντέλα βασισμένα σε δίκτυο (network-based models, NB).

-> Τα μοντέλα LC, βασιζόμενα στα διαγράμματα που απεικονίζουν την υποβάθμιση και την ανάκτηση της απόδοσης του συστήματος μετά από μία διαταραχή ως προς τον χρόνο, εκτιμούν

την ανθεκτικότητα ως την αναλογία των εμβαδών των περιοχών κάτω από τη συνάρτηση πραγματικής απόδοσης και τη συνάρτηση απόδοσης στόχου.

-> Τα μοντέλα παρεμβολής SS εκτιμούν την ελαστικότητα ως συνάρτηση της αντοχής ενός συστήματος και της παρεμβολής των τάσεων που ασκούνται στο σύστημα.

-> Τα μοντέλα RL εκτιμούν την ανθεκτικότητα ως μια συνάρτηση ανάκτησης και απώλειας. Μια τέτοια συνάρτηση μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές, όπως αναλογία ή διαφορά. Επιπλέον, η ανάκτηση και η απώλεια μπορούν να αποσυντεθούν στα συστατικά τους στοιχεία, δηλαδή για παράδειγμα η ανάκτηση ως προϊόν της ταχύτητας ανάκτησης και της προσαρμοστικής ικανότητας (Francis & Bekera, 2014).

-> Τα μοντέλα NB εκτιμούν την ανθεκτικότητα ενός δικτύου ως συνάρτηση της κατάστασης των κόμβων και των συνδέσμων του. Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια παραδείγματα μελετών για υποδομές μεταφορών που βρέθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία και κάνουν χρήση των μοντέλων NB. Αρχικά, οι Omer, Nilchiani & Mostashari (2009) μέτρησαν την ανθεκτικότητα του δικτύου ως την αναλογία της αξίας του δικτύου να ανταποκρίνεται με επιτυχία μετά από μια διαταραχή, προς την αξία του δικτύου να ανταποκρίνεται με επιτυχία πριν από μια διαταραχή. Οι Chen & Miller-Hooks (2012) όρισαν την ανθεκτικότητα ως το αναμενόμενο κλάσμα της ζήτησης μετά την καταστροφή που μπορεί να ικανοποιηθεί εντός καθορισμένου κόστους ανάκτησης. Οι Kim, Chen & Linderman (2015) έπειτα, όρισαν την ανθεκτικότητα του δικτύου τροφοδοσίας ως την αναλογία του συνολικού αριθμού διαταραχών κόμβων/τόξων η οποία δεν οδηγεί σε διακοπή του δικτύου τροφοδοσίας, προς τον συνολικό αριθμό διαταραχών κόμβων/τόξων. Οι Jin et al. (2014) τώρα, όρισαν την ανθεκτικότητα των δικτύων του μετρό ως το κλάσμα της ζήτησης ταξιδιού πριν από τη διαταραχή που μπορεί να ικανοποιηθεί από το υποβαθμισμένο δίκτυο του μετρό μαζί με τις συμπληρωματικές υπηρεσίες λεωφορείων υπό δυσμενείς συνθήκες. Οι Baroud et al. (2014a) ακόμα, ανέπτυξαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό της πιο αποτελεσματικής ακολουθίας ανάκτησης συνδέσεων, με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου για την επαναφορά του δικτύου σε πλήρη ανθεκτικότητα. Επίσης, για να μετρήσουν ποια στοιχεία έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή στην ανθεκτικότητα του συστήματος, οι Baroud et al. (2014b) ανέπτυξαν δύο μετρικές σημασίας στοιχείων που βασίζονται στη στοχαστική ανθεκτικότητα (stochastic resilience-based component importance measures) για να τονίσουν τις κρίσιμες συνδέσεις ποταμών και παραποτάμων που συμβάλλουν στην ανθεκτικότητα του δικτύου των ποταμών και των παραποτάμων.

Οι τέσσερις κατηγορίες μοντέλων μπορούν να συγκριθούν ως προς το κύριο χαρακτηριστικό (απόδοση έναντι τοπολογίας), το χρόνο (συνεχής έναντι διακριτού), τον αριθμό των σεναρίων που αντιπροσωπεύονται και το εύρος μέτρησης της ανθεκτικότητας. Οι κατηγορίες ενδέχεται ακόμη και να επικαλύπτονται.

Στα μοντέλα LC, SS και RL η ανθεκτικότητα είναι συνάρτηση της παρατηρούμενης απόδοσης του συστήματος και η υποκείμενη δομή του συστήματος δεν είναι εμφανής. Αντίθετα, τα μοντέλα NB διαφέρουν ουσιαστικά από τα άλλα, αφού η ανθεκτικότητα είναι συνάρτηση της τοπολογίας του συστήματος, κάτι το οποίο καθορίζει και την παρατηρούμενη απόδοση.

Στα μοντέλα LC η απόδοση του συστήματος, είτε είναι η παρατηρούμενη απόδοση είτε η προσαρμοσμένη συνάρτηση απόδοσης, είναι συνεχής στο χρόνο. Από την άλλη, τα μοντέλα αντοχής-καταπόνησης και τα μοντέλα RL προκύπτουν από την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Σημειώνεται τέλος ότι, τα μοντέλα NB μπορούν να είναι είτε χρονικά συνεχόμενα είτε διακριτά.

## **2.2 Ανάλυση Πρόσφατων Ερευνών**

Οι έρευνες που αφορούν την ανθεκτικότητα μπορούν να χαρακτηριστούν ως καινοτόμες είτε μέσω των εννοιών που διερευνούν είτε με την εισαγωγή μιας καινοτόμου μεθόδου ποσοτικοποίησης. Αρχικά, ορισμένα άρθρα παρέχουν μια γενικότερη εννοιολογική διάσταση της ανθεκτικότητας. Για παράδειγμα, ο Ayyub (2020) έδωσε ορισμούς για τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα των συστημάτων υποδομής και κατέδειξε τη μεταξύ τους σχέση. Με τον ίδιο τρόπο, οι Jenelius & Mattsson (2020) έδωσαν ορισμούς για την ανθεκτικότητα, τον κίνδυνο και την ευπάθεια των συστημάτων υποδομής μεταφορών. Ανέφεραν επίσης τα αίτια και τις συνέπειες των διαταραχών των συστημάτων μεταφορών. Επιπλέον, προσδιόρισαν εργαλεία για τη μελέτη και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας. Τέλος, παρουσίασαν τις τρέχουσες τάσεις και τις τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα.

Σε ένα άλλο παράδειγμα, οι Renne et al. (2019) συνόψισαν τα βασικά ευρήματα των πρόσφατων ανασκοπήσεων της βιβλιογραφίας και της πρακτικής που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα μεταξύ των κρατικών υπηρεσιών μεταφορών (State Departments of Transportation) στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η προσπάθεια αναθεώρησης επικεντρώθηκε σε μια σειρά κινδύνων που αντιμετωπίζουν οι υπηρεσίες μεταφορών, όπως η κλιματική αλλαγή, η τρομοκρατία, οι επιθέσεις στον κυβερνοχώρο, η γήρανση των υποδομών και οι τρόποι με τους οποίους οι κρατικές υπηρεσίες μεταφορών τους αντιμετωπίζουν στην πράξη. Τα θέματα αυτού του άρθρου κυμαίνονται από τα θεμελιώδη, συμπεριλαμβανομένων των ορισμών της ανθεκτικότητας στις μεταφορές, στα πιο σύνθετα όπως την εξέταση του κινδύνου, της ευπάθειας και των απειλών έως και στα πιο εξελιγμένα, συμπεριλαμβανομένων των προσπαθειών σε διοικητικό επίπεδο για την εννοιολογική προσέγγιση της ανθεκτικότητας μέσω του εξελισσόμενου σχεδιασμού και των πολιτικών μεταφορών. Στη συνέχεια, οι Nira & Kermanshachi (2020a) ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο εννοιολογικό μοντέλο που καθορίζει τις σχέσεις των διαστάσεων της ανθεκτικότητας σε κρίσιμες και αλληλεξαρτώμενες υποδομές μεταφορών και σε ένα άλλο άρθρο τους (Nira & Kermanshachi, 2020b) προσδιόρισαν μια λίστα διαστάσεων για τη μέτρηση της τεχνικής και οργανωτικής ανθεκτικότητας του οδικού δικτύου.

Στην πλειονότητα της βιβλιογραφίας αναφέρονται πολλές καινοτομίες, ακόμη και σε άρθρα ανασκόπησης. Το πρώτο παράδειγμα είναι το άρθρο των Shen et al. (2019) όπου η ανθεκτικότητα υπολογίζεται ως συνάρτηση των εγγενών ικανοτήτων ενός συστήματος, της αποτελεσματικότητας της ανάκτησης και της διαδικασίας εξωγενούς τυχαίας διαταραχής. Στη συνέχεια, ανέπτυξαν ένα πλαίσιο στο οποίο προσδιορίζονται τα βασικά στοιχεία για την επίτευξη της ανθεκτικότητας. Το δεύτερο παράδειγμα είναι η εργασία των Goncalves & Ribeiro (2020) που παρείχε μια εννοιολογική ανασκόπηση της ανθεκτικότητας, η οποία εφαρμόζεται στα συστήματα αστικών μεταφορών εστιάζοντας στους ορισμούς, τα χαρακτηριστικά και τις

μεθόδους ποσοτικοποίησής τους. Με βάση αυτό, η αξιολόγηση του επιπέδου ανθεκτικότητας των υποσυστημάτων μεταφορών παρείχε το βασικό πλαίσιο για τη δημιουργία ενός εργαλείου για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του συστήματος αστικών μεταφορών. Επιπλέον, οι Ahmed & Dey (2020) συνέταξαν ένα άρθρο για την καλύτερη κατανόηση της ανθεκτικότητας των συστημάτων μεταφορών ως προς τις φυσικές και ανθρωπογενείς καταστροφές. Αυτή η έρευνα προσδιόρισε παραμέτρους μέτρησης της ανθεκτικότητας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση στρατηγικών ποσοτικοποίησης και βελτίωσης της ανθεκτικότητας ενός συστήματος μεταφορών. Επιπλέον, μία από τις συνεισφορές αυτού του άρθρου ανασκόπησης είναι ότι συγκέντρωσε τους βασικούς δείκτες ανθεκτικότητας που αναλύθηκαν για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας. Σε μια άλλη περίπτωση, οι Yu et al. (2019) ανέλυσαν και συνέκριναν τις ομοιότητες και τις διαφορές της αξιοπιστίας, της ευπάθειας και της ανθεκτικότητας στο πλαίσιο των μεταφορών. Αυτές οι έννοιες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το επίπεδο εστίασης, τη μέτρηση και το σενάριο εφαρμογής. Επέλυσαν τέλος και εφαρμογές για την αξιολόγηση αυτών των εννοιών κάτω από διαφορετικά σενάρια διαταραχής.

Οι επόμενες εργασίες επικεντρώνονται στην έννοια της ανθεκτικότητας των δικτύων μεταφορών. Κατ' αρχάς, οι Li et al. (2020) πρότειναν μια νέα μέθοδο αξιολόγησης της ανθεκτικότητας, το Time-dependent Resilience Analysis Framework (TIDRAF). Το TIDRAF εξετάζει: 1) τη χωρική και χρονική κατανομή πολλαπλών τύπων συμβάντων καταστροφών, 2) την χρονική αναμονή των εργασιών επισκευής λόγω του περιορισμένου αριθμού ομάδων εργασίας, 3) τη δυναμική απόδοση του συστήματος των οδικών δικτύων που προκαλείται από τα δύο προηγούμενα ζητήματα. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τρεις στρατηγικές βελτιστοποίησης της ανθεκτικότητας των οδικών δικτύων, οι οποίες βασίζονται στα αποτελέσματα της ανάλυσης του TIDRAF. Ομοίως με το προηγούμενο άρθρο, οι Wang, Xue & Zhou (2020) πρότειναν έναν τρόπο μέτρησης της ανθεκτικότητας των δικτύων υποδομής μεταφορών. Αυτή η προσέγγιση παρουσίασε ένα ενιαίο εννοιολογικό πλαίσιο για διαφορετικές κατηγορίες δικτύων υποδομής μεταφορών. Σε αυτό το πλαίσιο, εφαρμόστηκε η μέθοδος προσομοίωσης για την ανάλυση των παραγόντων επιρροής της ανθεκτικότητας του δικτύου των υποδομών μεταφορών και αναπτύχθηκε μια μέτρηση με βάση τα χαρακτηριστικά της ποικιλομορφίας του δικτύου. Αυτή η μέτρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ποσοτικό υπολογισμό και την ανάλυση της ανθεκτικότητας του συστήματος και της ανθεκτικότητας των κόμβων των δικτύων υποδομής.

Ακόμα, οι Zhao & Zhang (2020) έλαβαν την ανεκπλήρωτη ζήτηση (μία μέτρηση της ανθεκτικότητας) και τον συνολικό χρόνο ταξιδιού ως δύο παράγοντες για τη μοντελοποίηση του προβλήματος του σχεδίου αποκατάστασης και πρότειναν ένα διεπίπεδο πλαίσιο βελτιστοποίησης δύο στόχων για τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδίου αποκατάστασης υποδομών μεταφορών. Επιπλέον, οι Qiang & Xu (2019) εισήγαγαν μια εμπειρική προσέγγιση για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του οδικού δικτύου (από Χάρτες Google) χρησιμοποιώντας δεδομένα κυκλοφορίας που ελήφθησαν μέσω πληθοπορισμού. Με βάση την έννοια της ανθεκτικότητας και του δείκτη προσβασιμότητας Hansen, η ανθεκτικότητα του οδικού δικτύου μετρήθηκε από τη συσσωρευμένη μείωση της προσβασιμότητας στην πάροδο του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός κινδύνου. Στη συνέχεια, οι Wang et al. (2021) ανέλυσαν τα συστατικά στοιχεία του δικτύου συγκοινωνιών μεταξύ πόλεων και τις αλληλεπιδράσεις τους. Η ανθεκτικότητα του δικτύου μεταφορών μεταξύ πόλεων ορίστηκε από τη γενική έννοια της

ανθεκτικότητας του συστήματος. Έτσι, η ειδική διαδικασία σχηματισμού της ανθεκτικότητας του δικτύου μεταφορών μεταξύ πόλεων αναλύθηκε και συνοψίστηκε σε τρία στάδια, τα οποία είναι συνοπτικά η αντίσταση στη διαταραχή, η απορρόφηση της διαταραχής και η ανάκτηση λειτουργίας. Λαμβάνοντας τους κόμβους και τα συστήματα του δικτύου μεταφορών ως συγκεκριμένα αντικείμενα, συμπύκνωσαν τη στατική και τη δυναμική διαδρομή σχηματισμού της ανθεκτικότητας του δικτύου μεταφορών. Με βάση το τυπικό γραμμικό συμπαγές μοντέλο, κατασκεύασαν και επέλυσαν ένα θεωρητικό μοντέλο για την εύρεση του μηχανισμού σχηματισμού της ανθεκτικότητας του δικτύου μεταφορών μεταξύ πόλεων.

Χρησιμοποιώντας μια διαφορετική προσέγγιση, οι Morshed et al. (2020) πρότειναν ένα μοντέλο (το οποίο ονόμασαν «8R Resilience Model») που βασίζεται στις έννοιες της ανθεκτικότητας, το οποίο στοχεύει στη διαμόρφωση ενός εργαλείου διαχείρισης πληροφοριών για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των συστημάτων υποδομής μεταφορών στις καταστροφές. Επίσης, η έρευνά τους παρέχει μια ανάλυση των αξιολογήσεων των επιβατών για την ανθεκτικότητα των μεταφορών που υποστηρίζουν συστήματα υποδομής, μέσω της εφαρμογής ιεραρχικής ανάλυσης αποφάσεων (AHP) και ενός logit μοντέλου ταξινόμησης στα συλλεγόμενα δεδομένα. Επιπλέον, οι Tang et al. (2020) πρότειναν ένα ιεραρχικό μοντέλο δικτύου Bayes (BNM) για την ποσοτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των συστημάτων αστικών μεταφορών. Σε ένα άλλο άρθρο, οι Khaghani & Jazizadeh (2020) διερεύνησαν μια πολυδιάστατη προσέγγιση (mD -Resilience) για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας υποθέτοντας αυξημένη ροή πληροφοριών στην αξιολόγηση της απόδοσης. Πρότειναν μια μέτρηση της ανθεκτικότητας με διάφορα χαρακτηριστικά που χαρακτηρίζουν το στάδιο υποβάθμισης, το στάδιο ανάκτησης και πιθανές διαδρομές ανάκτησης, εξετάζοντας την ανθεκτικότητα των δρόμων σε επαναλαμβανόμενες συμφορήσεις ως συμβαλλόμενες στη βιώσιμη κινητικότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά ενσωματώθηκαν σε έναν δείκτη απόδοσης με τη χρήση της Ανάλυσης Περιβάλλοντος Δεδομένων (Data Envelopment Analysis, DEA) ως μη παραμετρικής μεθόδου. Περαιτέρω πραγματοποίησαν σύγκριση της προσέγγισης mD-Resilience σε σχέση με τη μέθοδο που βασίζεται στο εμβαδό κάτω από τις καμπύλες ανθεκτικότητας.

Σε μια άλλη έρευνα που διεξήχθη την ίδια χρονιά με την προαναφερθείσα, οι Siri, Siri & Sacone (2020) εφάρμοσαν ένα δυναμικό μοντέλο ως βάση για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ενός δικτύου κυκλοφορίας, ικανό να περιγράψει την εξέλιξη του λίγο μετά την εμφάνιση ενός ανατρεπτικού γεγονότος. Επέλυσαν ένα πρόβλημα εκχώρησης κυκλοφορίας Ισορροπίας Χρήστη ούτως ώστε να ληφθεί μια εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος πριν από τη διακοπή. Ξεκινώντας από το κρίσιμο συμβάν, εκτέλεσαν μια διαδικασία Προοδευτικής Εκχώρησης προκειμένου να ληφθούν εύλογες εκχωρήσεις κίνησης στο δίκτυο, σκεπτόμενοι την ανοχή των χρηστών στις αυξήσεις του χρόνου ταξιδιού καθώς και την εγγενή αδράνεια του συστήματος. Λαμβάνοντας τώρα υπόψη την απόδοση των συστημάτων μεταφορών, οι Titko, Hanke & Studena (2020) ερεύνησαν τον πιθανό αντίκτυπο των καταστροφών στη λειτουργικότητα των κρίσιμων στοιχείων των υποδομών των μεταφορών όταν υπερβαίνεται η ανθεκτικότητά τους. Ο στόχος αυτής της έρευνας ήταν η δημιουργία μια κατάλληλης προσέγγισης στη μέτρηση της ανθεκτικότητας μέσω του συνδυασμού (1) μιας θεωρητικής προσέγγισης απόφασης που βασίζεται σε Διαγράμματα επιρροής, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο για τη μοντελοποίηση του επιπέδου διακοπής της λειτουργικότητας των στοιχείων

του δικτύου μεταφορών μετά την επίδραση καταστροφής και (2) της χρονικής αποσύνθεσης της διάρκειας διακοπής της λειτουργικότητας αυτών των στοιχείων. Η προσέγγιση που προτάθηκε προορίζεται να εφαρμοστεί, σύμφωνα με τους συγγραφείς, στα κρίσιμα στοιχεία υποδομής παρά στο δίκτυο μεταφορών ως σύνολο.

Άλλοι ερευνητές όπως οι Hu & Bhourgi (2020), χρησιμοποίησαν κυρίως τη μέθοδο Gray Relational analysis για να αναλύσουν την αποτελεσματικότητα 14 δεικτών που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα του δικτύου μεταφορών. Στη διαδικασία της ανάλυσης, τα δεδομένα δείκτη τα οποία ελήφθησαν από ένα δίκτυο που δεν έχει δεχθεί κάποια επίθεση χρησιμοποιήθηκαν ως η βέλτιστη ακολουθία αναφοράς ενώ αντίθετα η χειρότερη ακολουθία αναφοράς ήταν ενός δικτύου που έχει δεχθεί επίθεση στον πιο συνδεδεμένο κόμβο του. Εκτός από το βέλτιστο και χειρότερο σενάριο, για τη μελέτη της ανθεκτικότητας του δικτύου όρισαν και μια στρατηγική επίθεσης δικτύου, η οποία συνίσταται σε επίθεση σε έναν κόμβο τη φορά, κατά σειρά για όλους τους κόμβους του δικτύου. Πρότειναν επίσης έναν σχετικό Grey Correlation Degree για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε 10 δίκτυα δημόσιων συγκοινωνιών. Τέλος, οι Kamnouchi et al. (2019) μελέτησαν το συγκοινωνιακό δίκτυο μιας εικονικής πόλης μεγάλης κλίμακας. Εφάρμοσαν μια τυχαία αφαίρεση των δρόμων η οποία προσομοιώνει την αστοχία του δικτύου. Στη συνέχεια, υπολόγισαν την αξιοπιστία του δικτύου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του φάσματος καταστροφής (Destruction Spectrum, D-spectrum) και ανέπτυξαν μια προσέγγιση Monte Carlo για τη δημιουργία μεταθέσεων αστοχίας που είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση του D-spectrum. Επιπλέον, προσδιόρισαν την σημασία των στοιχείων του δικτύου μέσω του Birnbaum Importance Measure (BIM) και χρησιμοποίησαν δείκτες ανθεκτικότητας για την πρόβλεψη της απόδοσης και της δυνατότητας εξυπηρέτησης των δικτύων μεταφορών.

### **2.2.1 Ανθεκτικότητα σε διαταρακτικά γεγονότα**

Σε άλλες έρευνες η ανθεκτικότητα μετριέται και αξιολογείται σε συσχέτιση με διαταρακτικά γεγονότα όπως ακραία καιρικά φαινόμενα ή σκόπιμες επιθέσεις, με έμφαση στον αντίκτυπο που έχουν αυτά τα γεγονότα σε μια συγκεκριμένη υπό μελέτη περιοχή. Αρχικά, οι Chen & Lu (2020) παρουσίασαν μια έρευνα σχετικά με την ευπάθεια και την ανθεκτικότητα των ολοκληρωμένων δικτύων μεταφορών μέσα σε έναν αστικό οικισμό. Σύμφωνα με τη θεωρία περίπλοκων δικτύων, δημιουργήθηκε το μοντέλο του ολοκληρωμένου δικτύου μεταφορών της ευρύτερης περιοχής του κόλπου Guangdong-Hong Kong-Macao (GBA). Εξέτασαν διάφορα σενάρια για τη βελτίωση του συνολικού επιπέδου της αμυντικής ικανότητας, συμπεριλαμβανομένων τυχαίων δυσλειτουργιών, στοχευμένων επιθέσεων και φυσικών κινδύνων. Ανέπτυξαν μοντέλα αξιολόγησης ευπάθειας και ανθεκτικότητας για τη διερεύνηση των επιρροών σε ολόκληρο το δίκτυο. Τέλος, διεξήγαγαν στο GBA μια ανάλυση προσομοίωσης για να εξετάσουν τις διακυμάνσεις στην απόδοση του δικτύου σε διάφορα σενάρια επίθεσης. Πιο πρόσφατα, μια έρευνα διεξήχθη επίσης από τους Tachaudomdach et al. (2021), με στόχο την ποσοτική μέτρηση της στιβαρότητας της υποδομής μεταφορών σε περίπτωση πλημμυρών. Εφάρμοσαν εμπειρικά ένα αναλυτικό πλαίσιο τεσσάρων σταδίων: (1) προσδιόρισαν το σύστημα και τη διαταραχή (δηλαδή, οδικό δίκτυο και κίνδυνο πλημμύρας στο Τσιάνγκ Μάι της Ταϊλάνδης), (2) απεικόνισαν την απόκριση του συστήματος χρησιμοποιώντας την περιοχή που

έχει υποστεί ζημιά ως συνάρτηση των επιπέδων του νερού πλημμύρας και των μέτρων προστασίας, (3) καθόρισαν τα όρια ανάκτησης με βάση τις χρήσεις γης και τη λειτουργικότητα του συστήματος και (4) ποσοτικοποίησαν την στιβαρότητα μέσω της εφαρμογής μοντέλων κεντρικότητας (betweenness) σε άκρα/συνδέσμους και κόμβους.

Επιπλέον, οι Balakrishnan et al. (2020) παρουσίασαν μια μέθοδο για τον εντοπισμό των διακυμάνσεων της κυκλοφορίας που προκαλούνται από μια φυσική καταστροφή (τυφώνας Χάρβεϊ) σε ένα αστικό δίκτυο κυκλοφορίας (Χιούστον) μελετώντας τα χαρακτηριστικά των ακραίων παρατηρήσεων του χρόνου ταξιδιού. Η έρευνα βασίστηκε σε αλγόριθμους αποσύνθεσης χρονοσειρών και ανίχνευσης ανωμαλιών για τη διερεύνηση των χωροχρονικών επιπτώσεων του τυφώνα στις συνθήκες κυκλοφορίας. Οι μετρικές που ανέπτυξαν φάνηκαν αποτελεσματικές στην ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας των δικτύων κυκλοφορίας έναντι φυσικών καταστροφών, καταγράφοντας τόσο τον αρχικό αντίκτυπο όσο και την ανάκαμψη. Σε μια διαφορετική εργασία, οι Sen & Dutta (2020) ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS)-Bayesian Belief Network (BBN) για να μοντελοποιήσουν και να ποσοτικοποιήσουν την ανθεκτικότητα (ευπάθεια και ανάκτηση) των συστημάτων υποδομής δικτύου έναντι των κινδύνων πλημμύρας. Για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας ενός οδικού δικτύου έναντι πλημμυρών, μελέτησαν την περίπτωση μίας κοινότητας στη βορειοανατολική Ινδία. Η συλλογή δεδομένων έγινε μέσω μίας πλατφόρμας GIS, ενώ ένα πιθανοτικό γραφικό μοντέλο (μοντέλο BBN) χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση των αβεβαιοτήτων στην ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα.

Στη συνέχεια, οι Wang et al. (2020) πρότειναν ένα πλαίσιο βαθιάς μάθησης (deep learning framework) για την εκτίμηση και την πρόβλεψη των χωροχρονικών μοτίβων ανθεκτικότητας των μεταφορών κάτω από ακραία καιρικά φαινόμενα. Το πλαίσιο που παρουσίασαν μπόρεσε να καταδείξει τις χωροχρονικές εξαρτήσεις του αστικού οδικού δικτύου και να αξιολογήσει την ανθεκτικότητα των μεταφορών με βάση τα μαζικά δεδομένα (big data) του πραγματικού κόσμου, συμπεριλαμβανομένων δεδομένων υπηρεσιών μετακίνησης κατά παραγγελία (on-demand ride services) και μετεωρολογικών δεδομένων δικτύου. Σε μια ακόμη έρευνα, οι Kasmalkar et al. (2020) ενσωμάτωσαν ένα μοντέλο κυκλοφορίας με χάρτες πλημμύρας που αντιπροσωπεύουν πιθανούς συνδυασμούς καταιγίδων, παλίρροιας, εποχιακούς κύκλους, διαχρονικές ανωμαλίες που προκαλούνται από μεγάλης κλίμακας μεταβλητότητα του κλίματος όπως η Νότια Ταλάντωση El Niño και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας. Τα αποτελέσματα για την περιοχή του κόλπου του Σαν Φρανσίσκο έδειξαν ότι οι κοινότητες με περιορισμένη διαθεσιμότητα εναλλακτικών δρόμων αντιμετωπίζουν μεγάλες καθυστερήσεις, ανεξάρτητα από την εγγύτητά τους στις περιοχές πλημμύρας. Αποδείχθηκε ότι η μετρική εμβέλεια, ένα μέτρο της πυκνότητας του οδικού δικτύου, είναι καλύτερος δείκτης για καθυστερήσεις από την έκθεση σε πλημμύρες.

Σε ορισμένες άλλες περιπτώσεις, οι συγγραφείς εστίασαν στην έννοια της ανθεκτικότητας μετά την καταστροφή. Το πρώτο παράδειγμα είναι η εργασία των Mao et al. (2021), η οποία πρότεινε ένα πλαίσιο για τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών αποκατάστασης οδικού δικτύου μετά από μία καταστροφή. Η απόδοση του δικτύου αξιολογείται από τον συνολικό χρόνο ταξιδιού του συστήματος (TSTT). Αναπτύχθηκαν δύο δείκτες για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του οδικού δικτύου, η ανθεκτικότητα της απώλειας απόδοσης και η



ανθεκτικότητα της ταχύτητας ανάκτησης. Ο πρώτος υπολογίστηκε με βάση το TSTT και ο δεύτερος σύμφωνα με τη διάρκεια αποκατάστασης. Στη συνέχεια, το πρόβλημα βελτιστοποίησης επαναφοράς διατυπώθηκε ως ένα μοντέλο προγραμματισμού μικτών ακεραίων διπλού στόχου (bi-objective mixed integer programming model) με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ανθεκτικότητας του δικτύου. Λόγω της NP-δυσκολίας (NP-hardness) του μοντέλου, αναπτύχθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος για την επίλυση του μοντέλου. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μελέτη για να καταδειχθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου. Σε μία άλλη περίπτωση, οι Liu et al. (2019) χρησιμοποίησαν έναν τροποποιημένο δείκτη στιβαρότητας δικτύου (MNRI) για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, συμπεριλαμβανομένου του κόστους επισκευής και του κόστους ταξιδιού κατά την ανάκτηση. Για κάθε σύνδεσμο, το πρόγραμμα επισκευής επιλέχθηκε μέσω της ανάλυσης κόστους αυξητικού οφέλους. Έπειτα, έλεγξαν την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου για ένα ρεαλιστικά φθαρμένο δίκτυο στο Chur της Ελβετίας. Διερεύνησαν τρία σενάρια με διαφορετικούς πόρους όσον αφορά τον προϋπολογισμό επισκευής και τη διαθεσιμότητα των εργαζομένων. Τα αποτελέσματα που έλαβαν χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο φαίνεται πως μειώνουν την υπολογιστική προσπάθεια και τον απαιτούμενο χρόνο.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν και έρευνες που αναδεικνύουν την έννοια της κρισιμότητας των συγκοινωνιακών δικτύων. Για παράδειγμα, οι Almotahari & Yazici (2021) ανέπτυξαν μια μέτρηση κρισιμότητας για τη βελτίωση της υπολογιστικής αποτελεσματικότητας. Διαμόρφωσαν έναν προσαρμοσμένο LCI (Link Criticality Index) για να τον καταστήσουν υπολογιστικά αποδοτικό για μεγαλύτερα δίκτυα. Σε άλλη έρευνα που διεξήχθη το 2020 από τους ίδιους συγγραφείς, (Almotahari & Yazici, 2020) δημιουργήθηκε ένας δείκτης κρισιμότητας συνδέσμων (Link Criticality Index) ο οποίος είναι πιο εύκολος στην πρακτική χρήση (PF-LCI). Ο PF-LCI απλοποίησε ορισμένες από τις τεχνικές απαιτήσεις ενώ παράλληλα αξιοποιήθηκαν και ορισμένα δεδομένα από επαγγελματίες για να επιτευχθούν ταξινομήσεις κρισιμότητας συνδέσμων που είναι συνεπείς με το LCI. Ένα ακόμη παράδειγμα είναι η εργασία των Li et al. (2020), όπου προτάθηκε μια προσέγγιση που εξετάζει τον δείκτη κυκλοφοριακού φόρτου κεντρικότητας (traffic flow betweenness index, TFBI) για τον εντοπισμό κρίσιμων συνδέσμων. Μέσω αυτής της διαδικασίας φάνηκε πως είναι δυνατόν να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος, σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο πλήρους σάρωσης. Ο TFBI αποτελείται από δύο μέρη (έχουν συντελεστή βαρύτητας μεταξύ τους): τον κυκλοφοριακό φόρτο κεντρικότητας (traffic flow betweenness) και τη ζήτηση του τελικού σημείου (αναδρομολογημένη ζήτηση ταξιδιού) προέλευσης-προορισμού (origin–destination, OD).

Επιπλέον, οι Jafino, Kwakkel & Verbraeck (2019) εξέτασαν, αξιολόγησαν και συνέκριναν δεκαεπτά μετρικές κρισιμότητας. Κατ' αρχάς, αξιολόγησαν εννοιολογικά αυτές τις μετρικές ως προς τη λειτουργικότητα του συστήματος μεταφορών που αντιπροσωπεύουν (διατήρηση της συνδεσιμότητας, μείωση του κόστους ταξιδιού, βελτίωση της προσβασιμότητας), τις υποκείμενες ηθικές αρχές (ωφελιμισμός ή εξισωτισμός) και τη χωροταξική συνάθροιση που λαμβάνεται υπόψη από τις μετρικές (όλο το δίκτυο ή τοπικά). Στη συνέχεια, συνέκριναν εμπειρικά τις μετρικές υπολογίζοντάς τις για οκτώ δίκτυα μεταφορών. Όρισαν την εμπειρική ομοιότητα μεταξύ δύο μετρικών ως τον βαθμό στον οποίο αποδίδουν παρόμοιες ταξινομήσεις στοιχείων υποδομής. Ζεύγη μετρικών που έχουν υψηλή εμπειρική ομοιότητα κατέδειξαν τα

ίδια σύνολα στοιχείων υποδομής μεταφορών ως κρίσιμα. Βρήκαν ότι η εμπειρική ομοιότητα εξαρτάται εν μέρει από την τοπολογία του δικτύου. Παρατήρησαν επίσης ότι οι μετρικές που είναι εννοιολογικά παρόμοιες δεν έχουν απαραίτητα υψηλή εμπειρική ομοιότητα. Τέλος, πρότειναν μια κατευθυντήρια γραμμή πέντε βημάτων, με σκοπό τον καλύτερο προσδιορισμό του συνόλου των μετρικών κρισιμότητας που θα χρησιμοποιηθούν από τις αρχές μεταφορών με βάση τις εκάστοτε πολιτικές τους.

### **2.2.2 Ευπάθεια των δικτύων μεταφορών**

Η έννοια της ευπάθειας των δικτύων μεταφορών εξετάζεται επίσης διεξοδικά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Οι Starita & Scararra (2020) πρότειναν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για τον εντοπισμό του συνόλου των τόξων που όταν αποκοπούν, οδηγούν στη χειρότερη συμμόρφωση κατά την κυκλοφορία ισορροπίας χρήστη (user equilibrium traffic). Το μοντέλο διατυπώθηκε ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα δύο επιπέδων. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε μέσω μιας προσαρμοσμένης έκδοσης της διαδικασίας Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) meta-heuristic. Μια άλλη έρευνα για το ίδιο θέμα που διεξήχθη από τους Abdulla & Birgisson το 2020, εξέτασε την ευπάθεια των οδικών δικτύων σε δύο τύπους διαταραχών, μέσω της μοντελοποίησης της δυναμικής διήθησης σε οδικά δίκτυα υπό διάφορα σενάρια διαταραχών.

Άλλοι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην εκκένωση περιοχών κατά τη διάρκεια καταστροφικών γεγονότων. Για παράδειγμα, οι Mahajan & Kim (2020) ανέπτυξαν μια μελέτη που αφορά την εφαρμογή διάφορων μέτρων ανάλυσης δικτύου (που σχετίζονται με την τοπολογία του δικτύου, την προσβασιμότητα από την κοινότητα και τα χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων μεταφορών) στο βορειοανατολικό τμήμα της επαρχίας της Αλμπέρτα του Καναδά (περιοχή επιρρεπής σε πυρκαγιές), με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της ευπάθειας της περιοχής σε περίπτωση έκτακτης εκκένωσης και καταστροφής εγκαταστάσεων. Επίσης, ο ερευνητής Wang (2020) ανέπτυξε ένα μοντέλο στοχαστικού προγραμματισμού δύο σταδίων, για την εκκένωση πληγέντων πολιτών προς ασφαλείς περιοχές κατά την αντιμετώπιση καταστροφών. Για την απεικόνιση της διαδικασίας εκκένωσης παρουσιάστηκε και ένα διάγραμμα ροής ελάχιστου κόστους.

### **2.2.3 Αξιοπιστία δικτύων μεταφορών**

Οι Shen et al. (2020) διεξήγαγαν μια έρευνα σχετικά με την αξιοπιστία των δικτύων μεταφορών, προτείνοντας έναν αλγόριθμο εύρεσης διαδρομής για την επίτευξη έγκαιρης άφιξης σε οδικά δίκτυα με αβεβαιότητα και με στοχαστικές καθυστερήσεις σε σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις.

Ακόμα, η αυτοματοποιημένη διαχείριση ασφάλειας αυτοκινητοδρόμων εξετάστηκε από τους Ou et al. (2019). Οι προαναφερθέντες παρουσίασαν μια έρευνα για τον αυτόματο προσδιορισμό των χωροχρονικών επιπτώσεων σε περιοχές αυτοκινητοδρόμων στις οποίες υπήρξαν ατυχήματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί αυτόματα και σωστά να προσδιορίσει τις περιοχές που επλήγησαν από ατυχήματα,

λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την αβεβαιότητα που προκύπτει από τις διακυμάνσεις της κυκλοφορίας.

## **2.3 Περιοχές Εφαρμογής**

### **2.3.1 Εφαρμογές σε πραγματικά δίκτυα**

Όσον αφορά τις εφαρμογές, στη βιβλιογραφία έχουν εξεταστεί διάφορες περιπτώσεις. Η κύρια κατηγοριοποίηση μεταξύ των εφαρμογών που χρησιμοποιούν οι ερευνητές είναι η εξέταση της ανθεκτικότητας είτε σε πραγματικό είτε σε δοκιμαστικό δίκτυο. Τα πραγματικά δίκτυα είναι κυρίως δίκτυα μεγάλων πόλεων ή μερικά από τα κύρια δίκτυα δοκιμής όπως το Sioux Falls. Από την άλλη, τα δοκιμαστικά δίκτυα είναι ως επί το πλείστον απλά δίκτυα τύπου πλέγματος (grid-like networks). Παρακάτω παρουσιάζονται εφαρμογές σε πραγματικά δίκτυα από διάφορους ερευνητές. Αρχικά, οι Li et al. (2020) χρησιμοποίησαν ένα οδικό δίκτυο στο Θιβητιανό Οροπέδιο ως εφαρμογή για το προτεινόμενο πλαίσιο τους. Οι Almotahari & Yazici (2021) στην έρευνά τους ανέλυσαν και συνέκριναν τη συνέπεια των ταξινομήσεων μεταξύ των αρχικών/προσαρμοσμένων LCI και άλλων μετρικών από τη βιβλιογραφία χρησιμοποιώντας τρία δίκτυα και μια πειραματική ρύθμιση. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε και σε ένα οδικό δίκτυο μεγάλης κλίμακας (δίκτυο του Σικάγο). Η υπολογιστική απόδοση του προσαρμοσμένου LCI συγκρίθηκε με εκείνη του αρχικού LCI και των άλλων μετρικών μέσω δοκιμαστικών δικτύων διαφορετικών μεγεθών, συγκεκριμένα των δικτύων Nguyen-Duruis, Sioux Falls, Anaheim και Chicago. Επίσης, οι Wang, Xue & Zhou (2020) επέλεξαν να εφαρμόσουν την προσέγγισή τους στα δίκτυα υποδομής σιδηροδρομικών και αεροπορικών μεταφορών της Κίνας, έχοντας ως στόχο τη μέτρηση της ανθεκτικότητάς τους.

Σε μια άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε την ίδια χρονιά με αυτή των προηγούμενων ερευνητών, οι Zhao & Zhang (2020) εφάρμοσαν την μέθοδο βελτιστοποίησης σχεδίου αποκατάστασης που πρότειναν σε ένα τυπικό οδικό δίκτυο του Sioux Falls, προκειμένου να επαληθεύσουν την αποτελεσματικότητά της. Για την περαιτέρω μελέτη της απόδοσης της μεθόδου, δημιουργήθηκαν διάφορα σενάρια (με διαφορετικά επίπεδα προϋπολογισμού) στα οποία διακόπτονταν από ένας έως πέντε σύνδεσμοι. Οι επόμενες δύο μελέτες τώρα διερεύνησαν οδικά δίκτυα από δύο πολιτείες των ΗΠΑ. Οι Ou et al. (2019) πρώτα, συνέλεξαν τα αρχεία ατυχημάτων μαζί με τα σχετικά δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου από τμήματα του αυτοκινητόδρομου I-5 στην περιοχή του Σαν Ντιέγκο της Καλιφόρνια. Έπειτα, οι Qiang & Xu (2019) ερεύνησαν τη μητροπολιτική περιοχή του Κλίβελαντ (Οχάιο) κατά τη διάρκεια της χειμερινής καταιγίδας Harper. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τρία άρθρα στα οποία μελετήθηκαν δίκτυα μεταφορών στην Κίνα. Οι Shen et al. (2020) χρησιμοποίησαν οδικά δίκτυα στο Χονγκ Κονγκ τα οποία αποτελούνται από 440 κόμβους (nodes) και 829 ζεύξεις (links) με σκοπό να παρουσιάσουν την αποδοτικότητα του προτεινόμενου ευρετικού αλγορίθμου (heuristic algorithm) τους. Επιπρόσθετα, οι Li et al. (2020) χρησιμοποίησαν το οδικό δίκτυο του Changchun στην Κίνα για να εφαρμόσουν την έρευνά τους η οποία βασίζεται στο TFBI. Στην τρίτη έρευνα, διερευνήθηκε η ανθεκτικότητα του σιδηροδρομικού δικτύου της Κίνας, μέσω του θεωρητικού μοντέλου ανθεκτικότητας δικτύων μεταφορών πόλεων που προτάθηκε από τους Wang et al. (2021).

Οι Mahajan & Kim (2020) μελέτησαν στην έρευνά τους το δίκτυο μεταφορών του βορειοανατολικού τμήματος της επαρχίας Αλμπέρτα του Καναδά. Στο επόμενο άρθρο από την διεθνή βιβλιογραφία, οι Chen & Lu (2020) χρησιμοποίησαν ως εφαρμογή ένα μοντέλο ολοκληρωμένου οδικού δικτύου της περιοχής Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA), στην Κίνα. Σε μια άλλη έρευνα που εμβάθυνε σε ένα ευρωπαϊκό δίκτυο, οι Liu et al. (2019) εξέτασαν την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα του τροποποιημένου δείκτη στιβαρότητας δικτύου (MNRI) που παρουσίασαν, με ένα οδικό δίκτυο που βρίσκεται στην κοιλάδα του Ρήνου γύρω από την πόλη Chur της Ελβετίας. Το δίκτυο θεωρήθηκε ότι αποτελείται μόνο από την εθνική οδό (51 km), τους κύριους (165 km) και τους δευτερεύοντες δρόμους (395 km), ενώ παράλληλα έχει διαμορφωθεί ως γράφος που αποτελείται από 1.520 κόμβους (37 κεντροειδή, 1056 διασταυρώσεις και 427 αλλαγές σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δρόμου) και 2.153 συνδέσμους (που αντιπροσωπεύουν οδικά τμήματα και γέφυρες). Οι Tachaudomdach et al. (2021) ακόμη, εφάρμοσαν ένα πλαίσιο για την αξιολόγηση της στιβαρότητας οδικών συστημάτων στο Τσιάνγκ Μάι της Ταϊλάνδης (η μεγαλύτερη επαρχία της βόρειας Ταϊλάνδης).

Σε μια διαφορετική έρευνα, οι Tang et al. (2020) διερεύνησαν μέσω ενός ιεραρχικού μοντέλου δικτύου Bayes (hierarchical Bayesian network model, BNM) τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα των οδικών συστημάτων τεσσάρων Κινεζικών πόλεων (ειδικότερα Πεκίνο, Τσιαντζίν, Σαγκάη και Τσονγκκίνγκ), από το έτος 1998 έως το 2017. Οι Jafino, Kwakkel & Verbraeck (2019) υπολόγισαν την στιβαρότητα τόσο για ολόκληρο το δίκτυο εμπορευματικών μεταφορών του Μπαγκλαντές όσο και για τα επτά διακριτά υποδίκτυα των αντίστοιχων επτά διοικητικών τμημάτων της χώρας. Επιπλέον, πρότειναν μία κατευθυντήρια γραμμή την οποία εφάρμοσαν σε ένα υποθετικό πρόβλημα επιλογής μετρικών στην περιφέρεια Barisal του Μπαγκλαντές. Στην ακόλουθη έρευνα, οι Balakrishnan et al. (2020) ανέλυσαν τις κυκλοφοριακές διακυμάνσεις που προκλήθηκαν από τον τυφώνα Χάρβεϊ στο δίκτυο αυτοκινητοδρόμων του Χιούστον. Παράλληλα, οι Khaghani & Jazizadeh (2020) πρότειναν έναν τρόπο ποσοτικοποίησης της ανθεκτικότητας των οδικών δικτύων την οποία ονόμασαν mD-Resilience. Στη συνέχεια, με δεδομένα που έλαβαν από ο σύστημα μέτρησης απόδοσης Caltrans (Caltrans Performance Measurement System, PeMS), εφάρμοσαν την προαναφερθείσα μέθοδο σε 248 τμήματα αυτοκινητόδρομου στο Λος Άντζελες της Καλιφόρνια.

Οι Siri, Siri & Sacone (2020) τώρα, δοκίμασαν το προτεινόμενο μοντέλο τους (ένα δυναμικό μοντέλο για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ενός κυκλοφοριακού δικτύου, ικανό να περιγράψει την εξέλιξή του λίγο μετά την εμφάνιση ενός διαταρακτικού γεγονότος) στο δίκτυο Nguyen-Duruis. Πριν από τη διαταραχή, το δίκτυο αποτελείτο από 13 κόμβους (nodes) και 19 συνδέσμους (links). Οι δύο επόμενες έρευνες αφορούν την διερεύνηση της ανθεκτικότητας έναντι πλημμυρικών φαινομένων. Οι Abdulla & Birgisson (2020) εφάρμοσαν μία μεθοδολογία για την μέτρηση της ανθεκτικότητας συστημάτων μεταφορών στο οδικό δίκτυο του κέντρου του Χιούστον, το οποίο επλήγη από έντονες πλημμύρες κατά τη διάρκεια του τυφώνα Χάρβεϊ και οι Sen & Dutta (2020) εφάρμοσαν ένα προτεινόμενο πλαίσιο για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας των οδικών δικτύων έναντι κινδύνων πλημμύρας, σε μια μικρή περιοχή της κοιλάδας Barak στη βορειοανατολική Ινδία.

Οι Wang et al. (2020) από την άλλη, επέλεξαν να μελετήσουν μια από τις μεγαλύτερες παράκτιες πόλεις της νότιας Κίνας, τη Shenzhen. Τα σύνολα δεδομένων κίνησης που

χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα που διεξήγαγαν προέρχονται από τη μεγαλύτερη διαδικτυακή πλατφόρμα ride-hailing στην Κίνα, κατά την περίοδο μεταξύ 7 Απριλίου 2017 και 15 Ιανουαρίου 2019 (συνολικά 649 ημέρες). Επιπρόσθετα, οι Hu & Bhourri (2020) χρησιμοποίησαν δέκα διαφορετικά δίκτυα λεωφορείων τα οποία βασίζονται στο θεμελιώδες δίκτυο του Mandl (περιέχει 15 κόμβους και 21 συνδέσμους αμφίδρομης κατεύθυνσης, ο κάθε σύνδεσμος επισημαίνεται με τον αντίστοιχο χρόνο ταξιδιού). Ο αριθμός των δρομολογίων των λεωφορείων ποικίλλει από 4 έως 8 διαδρομές ανάλογα με τον σχεδιασμό του εκάστοτε δικτύου ενώ και τα σενάρια διαταραχής αλλάζουν για κάθε δίκτυο. Τέλος, οι Kasmalkar et al. (2020) χρησιμοποίησαν το μοντέλο του περιφερειακού οδικού δικτύου της περιοχής του κόλπου του Σαν Φρανσίσκο, που αναπτύχθηκε από τη Μητροπολιτική Επιτροπή Μεταφορών (Metropolitan Transportation Commission, MTC). Το οδικό δίκτυο MTC είναι μια απλοποιημένη έκδοση του πραγματικού οδικού δικτύου. Ενώ περιέχει όλους τους κύριους και δευτερεύοντες δρόμους, συγκεντρώνει τους τοπικούς δρόμους σε απλοποιημένες αναπαραστάσεις οδικών τμημάτων για να κάνει τις προσομοιώσεις της κυκλοφορίας υπολογιστικά διαχειρίσιμες. Το οδικό δίκτυο MTC δεν περιέχει σταθμούς διοδίων, λωρίδες κυκλοφορίας express ή φωτεινούς σηματοδότες.

Σε κάποια άλλα άρθρα της βιβλιογραφίας οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει γνωστά δίκτυα δοκιμών ή άλλα τεχνητά δίκτυα για να πραγματοποιήσουν τα πειράματά τους. Για παράδειγμα, οι Almotahari & Yazici (2020) δοκίμασαν τις δυνατότητες της προτεινόμενης μεθόδου τους για τον εντοπισμό κρίσιμων συνδέσμων (PF-LCI) σε ένα δοκιμαστικό δίκτυο (δίκτυο που αποτελείται από έξι κόμβους, οκτώ συνδέσμους και τέσσερα ζεύγη OD) και το Sioux Falls Network (δίκτυο που αποτελείται από 76 συνδέσμους, 24 κόμβους και 526 ζεύγη OD με ζήτηση μεγαλύτερη από το μηδέν). Οι προηγούμενοι συγγραφείς δημοσίευσαν την ίδια χρονιά (Almotahari & Yazici, 2020) ένα ακόμα άρθρο στο οποίο συνέκριναν τις ταξινομήσεις κρισιμότητας συνδέσμων (link criticality rankings) με πέντε διαφορετικές μετρικές σε 150 δοκιμαστικά δίκτυα διαφορετικών τοπολογιών και επιπέδων συμφόρησης. Η ανάλυση διεξήχθη επίσης σε τρία δοκιμαστικά οδικά δίκτυα. Το πρώτο είναι το δίκτυο Sioux Falls (76 σύνδεσμοι και 24 κόμβοι), το δεύτερο είναι το δίκτυο της Ανατολικής Μασαχουσέτης με 258 συνδέσμους και 74 κόμβους και το τρίτο είναι το δίκτυο Anaheim που αποτελείται από 914 συνδέσμους και 416 κόμβους.

Ο ερευνητής Wang (2020) στη συνέχεια, επαλήθευσε την αποτελεσματικότητα ενός ευρετικού αλγορίθμου που πρότεινε με σκοπό την επίλυση του στοχαστικού μοντέλου εκκένωσης δύο σταδίων (two-stage stochastic evacuation planning model) χρησιμοποιώντας: 1.) Ένα δίκτυο πλέγματος (grid network), που αποτελείται από 100 κόμβους και 180 συνδέσμους. Έχει υποτεθεί ότι υπάρχουν 500 αυτοκίνητα που πρέπει να εκκενωθούν σε ασφαλή περιοχή και η διάρκεια της καταστροφής είναι 120 λεπτά. 2.) Το δίκτυο Chicago Sketch, που αποτελείται από 933 κόμβους και 2950 συνδέσμους. Επιπλέον, το προτεινόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης των Starita & Scaparra (2020) δοκιμάστηκε σε υπολογιστικά πειράματα τα οποία βασίζονταν σε ένα σύνολο δεδομένων που αποτελείτο από τεχνητούς γράφους διαφορετικών μεγεθών. Ακόμα, οι ερευνητές πρότειναν και κάποιες κατευθυντήριες γραμμές για τις διοικήσεις των συγκοινωνιακών υποδομών με βάση τις δημοφιλείς μελέτες των δικτύων Sioux και Berlin. Σε μια άλλη μελέτη, οι Mao et al. (2021) εφάρμοσαν την μέθοδο που παρουσίασαν (ένα πλαίσιο για τη βελτιστοποίηση στρατηγικών αποκατάστασης οδικών δικτύων μετά από καταστροφές)

σε ένα οδικό δίκτυο με 19 κόμβους και 36 συνδέσμους. Οι ροές των συνδέσμων (link flows) πριν από την καταστροφή λαμβάνονται χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο UE. Τέλος, οι Kamnouchi et al. (2019) μελέτησαν το οδικό δίκτυο μιας εικονικής πόλης. Ο οδικός χάρτης της πόλης μετατρέπεται σε ένα μη κατευθυνόμενο γράφο (undirected graph), ο οποίος αποτελείται από 15.012 κόμβους (nodes) και 19.614 άκρες/συνδέσμους. Ως μηχανισμός αστοχίας εφαρμόστηκε η τυχαία αφαίρεση άκρων/συνδέσμων μέχρι την επίτευξη αστοχίας του δικτύου.

### **2.3.2 Εφαρμογές που εξετάζουν την ανθεκτικότητα από άλλες οπτικές**

Προκειμένου να αναπτύξουν ένα εννοιολογικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της σχέσης των διαστάσεων της ανθεκτικότητας, οι Nira & Kermanshachi (2020a), σχεδίασαν ένα διάγραμμα διαδρομής (path diagram) χρησιμοποιώντας το IBM SPSS AMOS.

Επιπλέον, οι Morshed et al. (2020) διεξήγαγαν μια διαδικτυακή έρευνα με χρήση ερωτηματολογίου στο Μαϊάμι της Φλόριντα, τον Νοέμβριο του 2019, προκειμένου να κατανοήσουν την άποψη των επιβατών σχετικά με το μοντέλο ανθεκτικότητας 8R για υποδομές μεταφορών, το οποίο ανέπτυξαν. Η έρευνα αποτελείτο από δεκατέσσερις ερωτήσεις συνολικά, συμπεριλαμβανομένων τριών δημογραφικών ερωτήσεων, δύο ερωτήσεων που είχαν σχέση με την αντιμετώπιση των τυφώνων, οκτώ ερωτήσεων σχετικά με το μοντέλο ανθεκτικότητας 8R και μίας ερώτησης σχετικά με την κατάταξη (ως προς την σημαντικότητα) των μετρικών της ανθεκτικότητας των συστημάτων μεταφορών.

Τέλος, οι Titko, Havko & Studena (2020) εφάρμοσαν το μοντέλο ID (Influence Diagrams, Διαγράμματα Επιρροής) που πρότειναν σε ένα παράδειγμα το οποίο υποθέτει τρεις διαφορετικές απειλές για τις κρίσιμες υποδομές μεταφορών: τροχαίο ατύχημα, ανεμοθύελλα και χημικές εκλύσεις.

## **2.4 Προκλήσεις**

### **2.4.1 Ανεπάρκεια και πολυπλοκότητα δεδομένων**

Σε μερικά από τα άρθρα της βιβλιογραφίας που εξετάστηκαν προηγουμένως, αναφέρονται κάποιοι περιορισμοί στις έρευνες και στις αντίστοιχες εφαρμογές τους. Τα πρώτα προβλήματα που παρουσιάζονται είναι η έλλειψη επαρκών δεδομένων, η μη ικανοποιητική ποιότητα των δεδομένων και η πολυπλοκότητά τους. Για παράδειγμα, οι Qiang & Xu (2019) τόνισαν ως μειονέκτημα της έρευνάς τους τον μικρό αριθμό χρόνων δειγματοληψίας και την περιορισμένη μέτρηση της προσβασιμότητας μόνο σε λίγες επιλεγμένες εγκαταστάσεις. Οι Chen & Lu (2020) τώρα, χρησιμοποίησαν μόνο ένα απλό μοντέλο για τη δημιουργία σεναρίων φυσικού κινδύνου λόγω περιορισμού δεδομένων.

Οι Almotahari & Yazici (2020) από την άλλη πλευρά, σχολίασαν ότι οι επιλεγμένες μετρικές κρισιμότητας της μελέτης τους είναι περιορισμένες όσον αφορά την εξέταση συγκεκριμένων/κρίσιμων εγκαταστάσεων (π.χ. νοσοκομεία). Ακόμη, οι Tang et al. (2020) πραγματοποίησαν την αξιολόγησή τους με βάση μόνο ετήσια δεδομένα ενώ επίσης χρειάστηκε

να κάνουν και εκτιμήσεις για αρκετές μεταβλητές (μέσω δεδομένων από πολλαπλές πηγές), λόγω της διαθεσιμότητας και της ποιότητας των χρησιμοποιούμενων δεδομένων. Στην επόμενη έρευνα τώρα, υπήρξαν παρόμοια προβλήματα αφού οι Khaghani & Jazizadeh (2020) υπογράμμισαν ότι διάφοροι παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της διαθεσιμότητας των δεδομένων και της ανάλυσης, θα μπορούσαν να έχουν επηρεάσει τα αποτελέσματα της ανάλυσής τους. Οι Wang et al. (2020) τέλος, ανέφεραν ως μειονεκτήματα της έρευνάς τους την απουσία κυκλοφοριακών δεδομένων μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας και την έλλειψη επαρκών δεδομένων κυκλοφοριακού φόρτου.

#### **2.4.2 Έλλειψη πραγματικών δεδομένων και απλοποίηση δεδομένων**

Άλλα μειονεκτήματα που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία είναι η απουσία πραγματικών δεδομένων για την επικύρωση των αποτελεσμάτων των διαφόρων πειραμάτων αλλά και η απλοποίηση των δεδομένων που αφορούν τα μοντέλα και τις εφαρμογές τους. Αρχικά, οι Li et al. (2020) ανέφεραν ότι ο δείκτης κυκλοφοριακού φόρτου κεντρικότητας (traffic flow betweenness index, TFBI) που πρότειναν για την έμμεση αξιολόγηση της απώλειας απόδοσης δικτύου, υποδηλώνει ότι κάθε σύνδεση έχει την ίδια πιθανότητα διακοπής. Σε ένα πραγματικό οδικό δίκτυο όμως, οι διακοπές σύνδεσης συμβαίνουν με ποικίλες πιθανότητες. Επιπλέον, ο ερευνητής Wang (2020) ανέφερε ότι το πραγματικό περιβάλλον του οδικού δικτύου είναι πιο περίπλοκο από αυτό που εξετάζεται στην έρευνά του, η οποία εστιάστηκε κυρίως σε ένα θεωρητικό μοντέλο. Παράλληλα, οι Liu et al. (2019) σχολίασαν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμός τους δοκιμάστηκε μόνο σε ένα δίκτυο και έτσι η γενίκευση των συμπερασμάτων της έρευνας θα απαιτούσε εκτεταμένη ανάλυση ευαισθησίας και δοκιμή σε άλλα δίκτυα. Οι Jafino, Kwakkel & Verbraeck (2019) επίσης, δεν υπολόγισαν κάθε μέτρηση της κρισιμότητας ή εννοιολογική της διάσταση και έτσι η παρουσιαζόμενη κατευθυντήρια γραμμή τους μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμη σε κάποιες περιπτώσεις ενώ οι ερευνητές Siri, Siri & Sacone (2020) διευκρίνισαν ότι το μοντέλο τους δεν έχει επικυρωθεί με πραγματικά δεδομένα.

Στις δύο επόμενες έρευνες τώρα, τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται αφορούν την απλούστευση δεδομένων. Στην πρώτη, οι Abdulla & Birgisson (2020) επικεντρώθηκαν μόνο σε οδούς που χρησιμοποιούνται από επιβατικά οχήματα και όχι σε πιο λεπτομερή οδικά δίκτυα που περιλαμβάνουν ποδηλατοδρόμους και πεζόδρομους και στη δεύτερη οι Sen & Dutta (2020) δήλωσαν ότι στην έρευνά τους για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας, δεν έλαβαν καθόλου υπόψιν τα δημογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής που εξέτασαν (μικρή περιοχή της κοιλάδας Barak στη βορειοανατολική Ινδία). Στην επόμενη έρευνα υπήρξε μία απλοποιητική παραδοχή, καθώς οι Kamtoui et al. (2019) υπολόγισαν την αξιοπιστία ενός δικτύου λαμβάνοντας ίσες πιθανότητες αστοχίας για όλα τα στοιχεία του. Ωστόσο στην πραγματικότητα αυτό δεν μπορεί να συμβεί διότι η επίδραση των διαταρακτικών γεγονότων σε ένα σύστημα οδικού δικτύου δεν είναι χωρικά ομοιόμορφη. Τέλος, οι Kasmalkar et al. (2020) ανέφεραν ότι ορισμένες από τις εκτιμήσεις που πραγματοποίησαν κατά την ανάπτυξη του μοντέλου κυκλοφορίας για την περιοχή του κόλπου του Σαν Φρανσίσκο, ενδέχεται να μην ισχύουν σε άλλες παράκτιες περιοχές. Επιπρόσθετα, δεν εξέτασαν τα μέσα μαζικής μεταφοράς και την μετακίνηση μέσω ποδηλάτου, κάτι που μπορεί να καταστήσει το προτεινόμενο μοντέλο

όχι απόλυτα εφαρμόσιμο σε αστικές περιοχές όπου αυτοί οι τρόποι μετακίνησης είναι συνήθεις.

## **2.5 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας**

Από την ανάλυση της βιβλιογραφίας που προηγήθηκε προκύπτουν εξόχως ενδιαφέροντα και σημαντικά συμπεράσματα. Αρχικά, είναι έκδηλο ότι η έννοια της ανθεκτικότητας είναι αρκετά πολυδιάστατη τόσο λόγω των πολλών ορισμών και μετρικών που την περιγράφουν αλλά και λόγω της εμφάνισής της σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών τομέων, το οποίο εκτείνεται από την οικονομία έως την υγειονομική περίθαλψη και περιλαμβάνει φυσικά και τα συστήματα υποδομών μεταφορών.

Ο μεγάλος αριθμός των μετρικών είναι επίσης ενδεικτικός της πολυπλοκότητας της ανθεκτικότητας. Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να προσδιορίσουν τις απαραίτητες μετρικές ή έστω αυτές που θεωρούν εκείνοι πιο αναγκαίες, όμως όπως φαίνεται και από την ανάλυση των αναφορών στην βιβλιογραφία δεν έχει υπάρξει ακόμα ένα απόλυτο πλαίσιο το οποίο ενστερνίζονται όλοι. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι στην βιβλιογραφική ανασκόπηση κάθε άρθρου παρατίθενται και ερμηνεύονται εννοιολογικά κάποιες από τις διαθέσιμες μετρικές, ενώ για τις εκάστοτε εφαρμογές χρησιμοποιείται στις πλείστες των περιπτώσεων μόνο μία μέτρηση για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας του εξεταζόμενου δικτύου.

Όσον αφορά στις σχέσεις των μετρικών, φαίνεται πως πολλές είτε αλληλεπικαλύπτονται είτε λειτουργούν συμπληρωματικά η μία με την άλλη. Το επίπεδο της έρευνας για το πως μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους και να είναι αποδοτικές σε ένα ενιαίο πεδίο εφαρμογής, βρίσκεται ακόμα στην απαρχή του. Πιο συγκεκριμένα, σε σενάρια αστοχιών στο επίπεδο σύνδεσης των κόμβων, όπου υπάρχει περίπτωση διαταραχής στη δομή του δικτύου και στην δυνατότητα επιλογής διαδρομής, οι έρευνες οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί δεν είναι πολλές με συνέπεια την έλλειψη επαρκών δεδομένων και αποτελεσμάτων.

Άλλες έρευνες έχουν εστιάσει στις διάφορες μεθόδους και στα μοντέλα με τα οποία είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας. Από την εξέταση αυτών των μελετών οι μέθοδοι που διακρίνονται είναι κυρίως οι μέθοδοι ασαφούς λογικής, οι πιθανοτικές, οι αναλυτικές και οι μέθοδοι θεωρίας γράφων. Τα μοντέλα ομοίως κατηγοριοποιούνται σε μοντέλα οριζόντιας στάθμης (LC), μοντέλα παρεμβολής αντοχής-τάσης (SS), μοντέλα απώλειας-ανάκτησης (RL) και μοντέλα βασισμένα σε δίκτυο (NB).

Επιπρόσθετα, η διερεύνηση ποικίλων άρθρων που υλοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια της βιβλιογραφικής ανάλυσης, κατέδειξε ότι οι διάφορες έρευνες είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες με βάση τις καινοτομίες που παρουσιάζουν, τις εφαρμογές τους και τα μειονεκτήματα που αναφέρουν οι συγγραφείς τους. Αξίζει επιπλέον να σημειωθεί, πως στα περισσότερα άρθρα δεν υπάρχει σαφής αναφορά σε μειονεκτήματα ή σε ελλείψεις και απλοποιήσεις δεδομένων και διαδικασιών.

Συνοψίζοντας, είναι εμφανές ότι υπάρχουν αρκετά ζητήματα που δεν έχουν εξεταστεί ενδελεχώς στην τρέχουσα βιβλιογραφία. Ένα από αυτά είναι η διερεύνηση της συσχέτισης της ευπάθειας και της κρισιμότητας, που αποτελούν δύο εκ των κυριότερων μετρικών της



ανθεκτικότητας. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτή την παρατήρηση, η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ενός σύνθετου αστικού οδικού δικτύου κατά την εμφάνιση αστοχιών σε επίπεδο συνδέσμων (με βάση τη λειτουργική τους τάξη), εξετάζοντας από κοινού την αποτελεσματικότητα, την ευπάθεια και την κρισιμότητα και μοντελοποιώντας τις αλληλεπιδράσεις τους χρησιμοποιώντας μακροσκοπική προσομοίωση και περαιτέρω στατιστική μοντελοποίηση. Συνεπώς, ο τελικός στόχος και η επιδίωξη της συγκεκριμένης έρευνας είναι να συνδέσει τις έννοιες της ευπάθειας και της κρισιμότητας και να δώσει περαιτέρω πληροφορίες για την πιθανή σχέση τους.



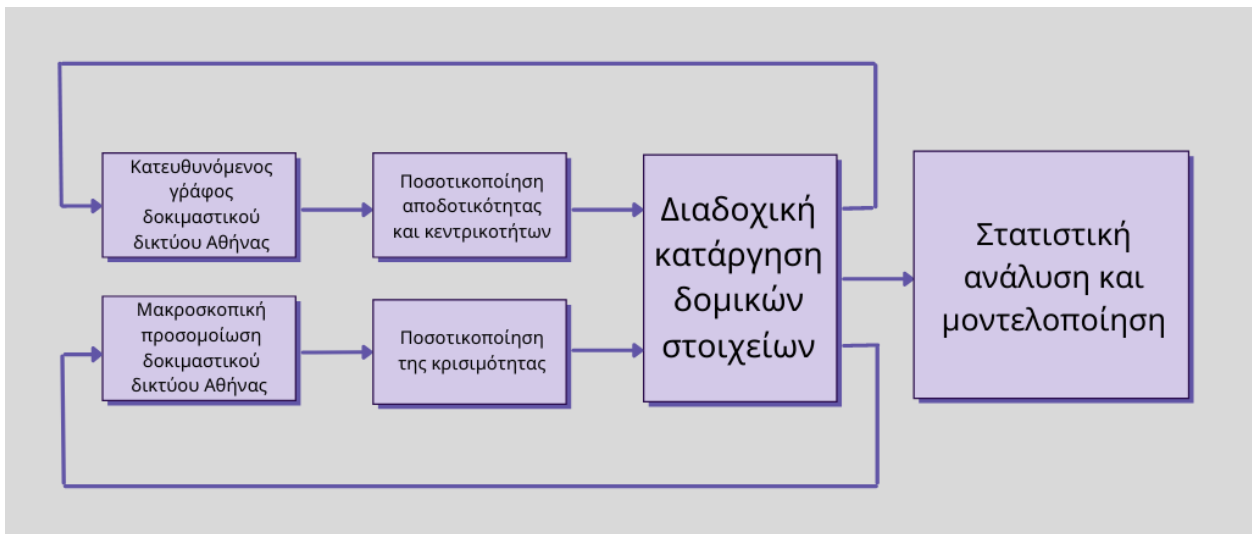
### **3. Μεθοδολογική προσέγγιση**

Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα έρευνα. Αρχικά, διατυπώνεται το πρόβλημα, στη συνέχεια παρέχεται μια ανασκόπηση σχετικά με το υπό μελέτη συγκοινωνιακό δίκτυο και τις μετρικές που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα και τέλος παρουσιάζονται η Πλατφόρμα Προσομοίωσης Οδικού Δικτύου αλλά και τα πειράματα που διεξήχθησαν κατά την πορεία της διπλωματικής εργασίας.

#### **3.1 Περιγραφή της διαδικασίας**

##### **3.1.1 Διατύπωση προβλήματος**

Στην συγκεκριμένη μελέτη ακολουθείται μια προσέγγιση τεσσάρων βημάτων, προκειμένου να κατανοηθεί η σημασία κάθε δομικού στοιχείου του οδικού δικτύου (σύνδεσμοι, κόμβοι και διαδρομές) ως προς την ανθεκτικότητά του, με βάση τα τοπολογικά του χαρακτηριστικά, τη συμμετοχή του στην κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στο δίκτυο αστικών συγκοινωνιών και τη λειτουργική του τάξη (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Μεθοδολογική προσέγγιση

Κάθε βήμα περιγράφεται λεπτομερέστερα στις ακόλουθες υποενότητες.

##### **3.1.2 Περιοχή μελέτης και δίκτυο προσομοίωσης**

Η εφαρμογή που εξετάζεται με σκοπό την διεξαγωγή πειραμάτων είναι ο εσωτερικός δακτύλιος του αστικού οδικού δικτύου της Αθήνας, στην Ελλάδα. Το δίκτυο αποτελείται από 1293 κόμβους/διασταυρώσεις και 2572 άκρες/συνδέσμους. Από πλευράς ζήτησης, περίπου 83000 οχήματα εισάγονται κατά τις πρωινές ώρες αιχμής. Το παραπάνω δίκτυο χρησιμοποιείται τόσο

ως κατευθυνόμενος μη σταθμισμένος άκυκλος γράφος όσο και ως μακροσκοπικό οδικό δίκτυο. Ο κατευθυνόμενος γράφος σχεδιάζεται και εφαρμόζεται σε ένα πακέτο προγραμματισμού προσανατολισμένο σε γράφους ενώ το μακροσκοπικό οδικό δίκτυο εφαρμόζεται στον προσομοιωτή κυκλοφορίας Aimsun Next (Aimsun Next 20 User's Manual, Aimsun Next Version 20.0.3, Accessed Jun. 25, 2021). Το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3) απεικονίζει τον εσωτερικό δακτύλιο του αστικού οδικού δικτύου της πόλης της Αθήνας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα.



Σχήμα 3: Εσωτερικός δακτύλιος αστικού οδικού δικτύου Αθηνών

### **3.1.3 Επιλογή μετρικών ανθεκτικότητας και δημιουργία γράφου**

Αναφορικά με τις μετρικές που εξετάστηκαν, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπήρξε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα με σκοπό την κατάλληλη εκλογή αυτών που θα χρησιμοποιούνταν για την συγκεκριμένη εργασία. Έπειτα από την διαδικασία της έρευνας αποφασίστηκε πως οι μετρικές ανθεκτικότητας που θα επιλέγονταν ήταν η κρισιμότητα και η αποδοτικότητα. Ειδικότερα, ήταν εμφανές ότι τα υπάρχοντα επιστημονικά άρθρα δεν είχαν εξετάσει εις βάθος τις σχέσεις μεταξύ της ανθεκτικότητας και των δύο προαναφερθέντων μετρικών. Ως συνέπεια λοιπόν της προηγούμενης παρατήρησης ορίστηκε και το κεντρικό θέμα της παρούσας διπλωματικής.

Σχετικά με τα πρώτα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για την υλοποίηση της εργασίας, αρχικά εισήχθησαν σε περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού R όλοι οι κόμβοι του δακτυλίου των Αθηνών μαζί με τις συντεταγμένες  $x$  και  $y$  τους αλλά και όλες οι πιθανές διαδρομές από και προς κάθε κόμβο. Έπειτα, μέσω κατάλληλου κώδικα δημιουργήθηκε ένας κατευθυνόμενος γράφος που περιέχει της προαναφερθείσες πληροφορίες. Ακόμα, υπολογίστηκαν για κάθε

κόμβοι οι κεντρικότητες βαθμού (degree centrality), οι κεντρικότητες εγγύτητας (closeness centrality) και οι κεντρικότητες ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) κατά την κανονική αδιατάρακτη λειτουργία του δικτύου. Οι συγκεκριμένοι υπολογισμοί εξήχθησαν σε ένα αρχείο τύπου .csv. Τέλος, μέσω κατάλληλης τροποποίησης των τιμών αυτού του αρχείου, κατατάχθηκαν οι κόμβοι κατά φθίνουσα σειρά ως προς την κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) και την κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality).

### **3.1.4 Ποσοτικοποίηση μετρικών ανθεκτικότητας**

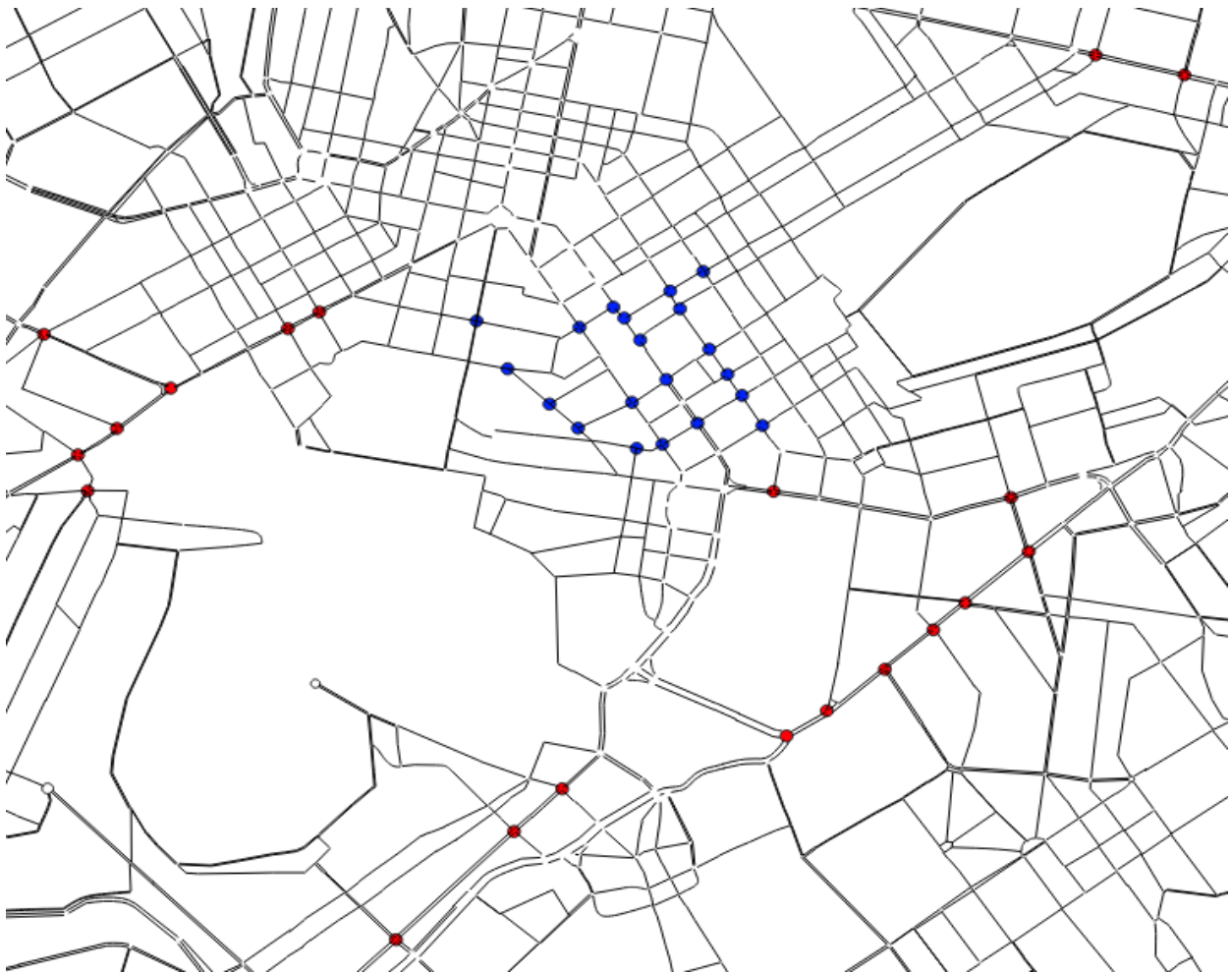
Όλες οι μετρικές ανθεκτικότητας, κεντρικότητες, αποδοτικότητα, κρισιμότητα, ποσοτικοποιούνται με βάση τις εξισώσεις στις σελίδες 33-34 (εξισώσεις 1-7), που αναλύονται εκτενώς στην υποενότητα 3.2.1. Η ποσοτικοποίηση των εν λόγω μετρικών εκτελείται σε δύο διακριτές φάσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2. Αρχικά, οι κεντρικότητες, η αποδοτικότητα και η κρισιμότητα ποσοτικοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη την κανονική αδιατάρακτη λειτουργία του δικτύου. Στη συνέχεια, ξεκινά η διαδικασία Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων (Sequential Component Elimination). Σε αυτή τη διαδικασία, τα δομικά στοιχεία του δοκιμαστικού δικτύου της Αθήνας αφαιρούνται διαδοχικά τόσο από τον γράφο όσο και από το μακροσκοπικό μοντέλο Aimsun του δικτύου. Μετά την αφαίρεση του κάθε στοιχείου, οι προαναφερθείσες μετρικές ποσοτικοποιούνται και αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων.

Κατόπιν ακολουθεί μία παρόμοια μέθοδος με την παραπάνω, αλλά αυτή τη φορά λαμβάνονται υπόψη στην διαδικασία Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων μόνο οι πρώτοι 20 κόμβοι οι οποίοι είχαν την υψηλότερη κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) και κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) αντίστοιχα (δηλαδή ένα σύνολο 40 κόμβων), κατά την φυσιολογική αδιατάρακτη λειτουργία του δικτύου. Επομένως, μετά την αφαίρεση κάθε ενός από τους κόμβους αυτούς κατά την επαναληπτική διαδικασία, οι μετρικές ποσοτικοποιούνται και αποθηκεύονται ξανά.

Έπειτα, μέσω του λογισμικού του προσομοιωτή κυκλοφορίας Aimsun Next, εξάγεται σε μορφή πίνακα σε ένα αρχείο τύπου .xlsx, η ζήτηση όλων των διαδρομών των ζευγαριών των κεντροειδών Προέλευσης - Προορισμού του δακτυλίου των Αθηνών. Μέσω της συνάρτησης LARGE του προγράμματος λογιστικών φύλλων Microsoft Excel, οι διαδρομές των ζευγών Προέλευσης - Προορισμού κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά ως προς τη ζήτηση και επιλέγονται οι 20 από αυτές που είχαν την πιο υψηλή. Ακόμη, κάνοντας χρήση του προγράμματος Aimsun Next προσδιορίζονται όλες οι πιθανές συντομότερες διαδρομές για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα 20 ζεύγη Προέλευσης - Προορισμού, ενώ παράλληλα οι σύνδεσμοι από τους οποίους αποτελούνται οι διαδρομές αυτές καταγράφονται σε ένα αρχείο .xlsx για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Τέλος, ανάλογα και με τα προηγούμενα, πραγματοποιείται μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας η διαδοχική αφαίρεση όλων των συντομότερων διαδρομών των 20 ζευγαριών Προέλευσης - Προορισμού και οι μετρικές ποσοτικοποιούνται και αποθηκεύονται.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4) απεικονίζονται ως μπλε σημεία οι 20 κόμβοι που είχαν την υψηλότερη κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) και ως κόκκινα σημεία οι 20 κόμβοι

που είχαν την υψηλότερη κεντρικότητα ενδιάμεσότητας (betweenness centrality), στον εσωτερικό δακτύλιο του αστικού οδικού δικτύου της πόλης της Αθήνας.



Σχήμα 4: Κόμβοι με τις υψηλότερες κεντρικότητες εγγύτητας (closeness centrality) και κεντρικότητες ενδιάμεσότητας (betweenness centrality)

### **3.1.5 Στατιστική ανάλυση και μοντελοποίηση**

Στο τελικό στάδιο, οι ποσοτικοποιημένες μετρικές της ανθεκτικότητας που είναι αποθηκευμένες στη βάση δεδομένων, αναλύονται στατιστικά χρησιμοποιώντας μη εποπτευόμενες και εποπτευόμενες τεχνικές. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας στοχεύει να διερευνήσει την ύπαρξη οποιασδήποτε συσχέτισης μεταξύ των μετρικών ανθεκτικότητας που λαμβάνονται υπόψη στην έρευνα.

Αρχικά, για την πραγματοποίηση της στατιστικής επεξεργασίας δημιουργήθηκε ένα αρχείο τύπου .xlsx στο οποίο υπολογίστηκαν διάφορα χρήσιμα μεγέθη. Στο συγκεκριμένο αρχείο προστέθηκαν κατά πρώτων, οι κυκλοφοριακές ροές (flow) όλων των συνδέσμων, οι οποίες προέκυψαν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν στο πρόγραμμα Aimsun Next. Στη συνέχεια, μέσω κατάλληλης άθροισης των προαναφερθέντων κυκλοφοριακών ροών, ευρέθησαν οι κυκλοφοριακές ροές των 20 κόμβων με την υψηλότερη

κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality), των 20 κόμβων με την υψηλότερη κεντρικότητα ενδιάμεσότητας (betweenness centrality) και των συντομότερων διαδρομών των 20 ζευγών Προέλευσης - Προορισμού που είχαν την υψηλότερη ζήτηση. Επιπρόσθετα, μέσω των μεγεθών της αποδοτικότητας (efficiency) και του  $\lambda$  των παραπάνω κόμβων και συντομότερων διαδρομών προσδιορίστηκε το LI τους.

Όσον αφορά την προκαταρκτική στατιστική ανάλυση της αποδοτικότητας, της ευπάθειας και της κρισιμότητας, υπολογίστηκαν οι στατιστικές μετρήσεις της μέσης τιμής, του τυπικού σφάλματος, του διαμέσου, της τυπικής απόκλισης, της διακύμανσης του δείγματος (sample variance), της κύρτωσης, της λοξότητας (skewness), της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής και του επιπέδου εμπιστοσύνης (95,0%).

Μετέπειτα, αναλύθηκαν στατιστικά πέντε συναρτήσεις που αφορούν τις λειτουργικές τάξεις (functional classes) των συνδέσμων του εσωτερικού δακτυλίου του αστικού οδικού δικτύου των Αθηνών. Οι στατιστικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το υπολειπόμενο df (residual df), η παράμετρος κλίμακας (scale parameter), η απόκλιση, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, η απόκλιση 1/df, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson 1/df, το AIC, η πιθανότητα Log (Log likelihood) και το BIC.

## 3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

### 3.2.1 Μετρικές ανθεκτικότητας

Στην παρούσα μελέτη, η αποδοτικότητα, οι κεντρικότητες και η κρισιμότητα διερευνούνται ενδελεχώς. Για την εξέτασή τους, το οδικό δίκτυο αναπαρίσταται ως γράφος (Freeman, 1978; Mattsson & Jenelius, 2015; Mitsakis et al., 2015; Nagurney & Qiang, 2008; Mitsakis et al., 2014; Vogiatzis & Pardalos, 2015; Guze, 2019). Επομένως, είναι σημαντικό να οριστεί ένας κατευθυνόμενος γράφος  $G(N,L)$  με  $N$  κόμβους και  $L$  συνδέσμους.

Όσον αφορά τις κεντρικότητες (Mitsakis et al., 2015; Mitsakis et al., 2014; Stamos et al., 2015), η κεντρικότητα βαθμού (degree centrality) (Εξίσωση 1), η κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) (Εξίσωση 2) και η κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) (Εξίσωση 3) αναλύονται περαιτέρω.

$$C_d(p_i) = \sum_{k=1}^N a(p_i, p_k) \quad (1)$$

$$C_c(p_i) = [\sum_{i=1}^N d(i, j)]^{-1} \quad (2)$$

$$C_b(v) = \sum_{i \neq v \neq j} \frac{\sigma_{i,j}(v)}{\sigma_{i,j}} \quad (3)$$

Στην Εξίσωση 1,  $\sum_{k=1}^N a(p_i, p_k)$  είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων  $p_k$  με τους οποίους είναι συνδεδεμένος ο κόμβος  $p_i$ . Στην Εξίσωση 2,  $\sum_{i=1}^N d(i, j)$  είναι το άθροισμα όλων των συντομότερων διαδρομών μεταξύ κόμβου  $i \in G$  και τυχαίου κόμβου  $j \in G$ . Στην Εξίσωση 3,  $\sigma_{i,j}(v)$  είναι ο αριθμός των συντομότερων διαδρομών μεταξύ κόμβων  $i$  και  $j$  που περιλαμβάνουν κόμβο  $v$  και  $\sigma_{i,j}$  είναι ο συνολικός αριθμός των συντομότερων διαδρομών μεταξύ κόμβων  $i$  και  $j$ .

Οι κεντρικότητες στοχεύουν να απεικονίσουν τη σημασία των στοιχείων του γράφου  $G$ . Βασίζονται στα τοπολογικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση (οδικού) δικτύου (τοπολογικές μετρικές) (Jenelius & Mattsson, 2020) και οι υπολογισμοί για την ποσοτικοποίησή τους δεν καταφέρνουν να αποτυπώσουν τις αλληλεπιδράσεις που υλοποιούνται κατά το κλείσιμο οποιουδήποτε τμήματος του δικτύου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κεντρικότητες είναι μετρικές προσανατολισμένες σε κόμβους και επομένως δεν μπορούν να προσδιορίσουν το δίκτυο στο σύνολό του.

Υπάρχουν άλλες μετρικές κεντρικότητας που δύναται να παρέχουν πιο «δυναμικά» αποτελέσματα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η κεντρικότητα ενδιαμεσότητας άκρων/συνδέσμων (edge betweenness centrality) (Freeman, 1978; Jenelius & Mattsson, 2020). Η κεντρικότητα ενδιαμεσότητας άκρων/συνδέσμων (edge betweenness centrality) μπορεί να οριστεί ως ο αριθμός των συντομότερων διαδρομών που χρησιμοποιούν ένα ορισμένο άκρο/σύνδεσμο ( $i$ ) του γραφήματος, διαιρεμένος με τον συνολικό αριθμό των συντομότερων διαδρομών στο γράφημα (Εξίσωση 4). Ο μαθηματικός ορισμός της είναι πανομοιότυπος με την Εξίσωση 3 (κεντρικότητα μεταξύ).

$$C_b(e) = \sum_{i \neq v \neq j} \frac{\sigma_{i,j}(e)}{\sigma_{i,j}} \quad (4)$$



Παρά τη σημασία της, η κεντρικότητα ενδιαμεσότητας άκρων/συνδέσμων (edge betweenness centrality) δεν καταφέρνει να προσδιορίσει πλήρως την κεντρικότητα σε επίπεδο δικτύου. Ένα άλλο στοιχείο που αφορά την συγκεκριμένη έννοια είναι ότι οι συντομότερες διαδρομές που υπολογίζονται στον γράφο  $G$  δεν αντικατοπτρίζουν ένα πραγματικό σενάριο, κυρίως λόγω της τοπολογικής φύσης αυτής της μέτρησης. Αυτό θα μπορούσε να ξεπεραστεί σταθμίζοντας το  $G$  με βάρη στις άκρες (συνδέσμους) του, όμως τότε η λύση του γράφου δεν θα βασίζεται στις συντομότερες διαδρομές αλλά σε μια λύση που προσομοιάζει με μια μέθοδο εκχώρησης διαδρομής όπως η Frank-Wolfe.

Μια άλλη σημαντική μέτρηση για την παρούσα έρευνα είναι αυτή της αποδοτικότητας ενός γράφου  $G$  (Brandes, 2001; Latora & Marchiori, 2001). Η αποδοτικότητα ορίζεται ως ο μέσος όρος όλων των ζευγών κόμβων των αντίστοιχων αποστάσεων των ζευγών κόμβων (Εξίσωση 5).

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{d_{i,j}} \quad (5)$$

Η Εξίσωση 5 συσχετίζει την εξαγωγή ενός στοιχείου του γράφου  $G$ , είτε ενός κόμβου είτε μιας άκρης/συνδέσμου (παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι κυρίως προσανατολισμένη στους κόμβους), με την απόδοση του δικτύου όσον αφορά τις συντομότερες διαδρομές του. Εξακολουθεί να είναι μια τοπολογική μέτρηση, αλλά η εξαγωγή ενός στοιχείου του  $G$  μπορεί να οδηγήσει σε παραλλαγές του  $E$ .

Όσον αφορά την κρισιμότητα, με βάση τη μεθοδολογία των Nagurney & Qiang (2008), υπολογίζεται μια Ανάθεση Ισορροπίας Χρήστη (User Equilibrium Assignment) για το οδικό δίκτυο, καθώς επίσης και η Μέτρηση Απόδοσης Ενοποιημένου Δικτύου (Unified Network Performance Measure) η οποία ορίζεται με την ακόλουθη εξίσωση (Εξίσωση 6).

$$\varepsilon = \varepsilon(G, d) = \frac{\sum_{w \in W} \frac{d_w}{\lambda_w}}{n_w} \quad (6)$$

Στην Εξίσωση 6,  $d_w$  είναι η ζήτηση για το ζεύγος  $w$  του πίνακα Προέλευσης-Προορισμού,  $\lambda_w$  είναι το γενικευμένο κόστος (κυρίως ο χρόνος ταξιδιού) για το ζεύγος  $w$  του πίνακα προέλευσης-προορισμού και  $n_w$  είναι ο συνολικός αριθμός των ζευγών Προέλευσης-Προορισμού.

Στη συνέχεια, καθένας από τους συνδέσμους του οδικού δικτύου αφαιρείται διαδοχικά από το δίκτυο και η Ανάθεση Ισορροπίας Χρήστη (User Equilibrium Assignment) και η Μέτρηση Απόδοσης Ενοποιημένου Δικτύου (Unified Network Performance Measure) υπολογίζονται εκ νέου για την καινούργια κατάσταση. Ο δείκτης Σημασίας Στοιχείων Δικτύου (Network Component Importance) που εξετάζει περαιτέρω τη σημασία καθενός από τους συνδέσμους που έχουν αφαιρεθεί από το δίκτυο, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 7.

$$l(g) = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(G, d) - \varepsilon(G-g, d)}{\varepsilon(G, d)} \quad (7)$$

Στην προηγούμενη εξίσωση (Εξίσωση 7),  $\varepsilon(G - g, d)$  είναι η τιμή της Μέτρησης Απόδοσης Ενοποιημένου Δικτύου (Unified Network Performance Measure) μετά την αφαίρεση ενός συνδέσμου. Η κρισιμότητα είναι μια μέτρηση που σχετίζεται μόνο με τους συνδέσμους του δικτύου και θεωρείται πως βασίζεται και είναι προσανατολισμένη στη ζήτηση. Αυτό το γεγονός

αντικατοπτρίζει τον αντίκτυπο που έχει η αφαίρεση ενός συνδέσμου στο δίκτυο όσον αφορά την απόδοσή του και την ικανότητά του να εξυπηρετεί τη ζήτηση.

### **3.2.2 Ανάπτυξη γράφου**

Ο κατευθυνόμενος γράφος του δικτύου δημιουργήθηκε σε ένα προγραμματιστικό περιβάλλον (RStudio) της γλώσσας προγραμματισμού R.

Το RStudio είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) για την γλώσσα προγραμματισμού R με ενσωματωμένη κονσόλα, συντάκτη επισήμανσης σύνταξης (syntax-highlighting editor) που υποστηρίζει την άμεση εκτέλεση κώδικα αλλά και εργαλεία για την σχεδίαση, το ιστορικό, τον εντοπισμό σφαλμάτων και την διαχείριση του χώρου εργασίας (RStudio Users Guide).

Όσον αφορά την R, αποτελεί μια γλώσσα προγραμματισμού που είναι ευρέως διαδεδομένη και χρησιμοποιείται κυρίως στην εφαρμογή διάφορων στατιστικών μοντέλων και υπολογισμών, στην παραγωγή γραφικών απεικονίσεων και στην επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων κατά την Εξόρυξη Δεδομένων.

Η υλοποίηση της R βασίστηκε στη γλώσσα προγραμματισμού S. Η R δημιουργήθηκε από τους Ross Ihaka και Robert Gentleman, στο πανεπιστήμιο Auckland στη Νέα Ζηλανδία. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής και πλέον αναπτύσσεται από μια ομάδα προγραμματιστών, γνωστή ως R Development Core Team.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της R είναι η ευκολία στην εκμάθησή της, η συμβατότητά της με τα πιο διαδεδομένα λειτουργικά συστήματα (Linux, Mac OS και Windows), το ότι διαθέτει έναν μεγάλο αριθμό έτοιμων πακέτων με καλογραμμένα εγχειρίδια χρήσης και τέλος το γεγονός ότι είναι διαθέσιμη δωρεάν (Βερύκιος, Καγκλής & Σταυρόπουλος, 2015).

### **3.2.3 Μακροσκοπικό μοντέλο κυκλοφορίας**

Στο πλαίσιο της εργασίας, εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογική προσέγγιση σε μακροσκοπική προσομοίωση κυκλοφορίας του οδικού δικτύου της Αθήνας σε Aimsun Next. Το Aimsun Next είναι ένα λογισμικό μοντελοποίησης πολλαπλής ανάλυσης. Διαθέτει ένα επεκτάσιμο περιβάλλον που προσφέρει εργαλεία για την υλοποίηση ενός έργου μοντελοποίησης συγκοινωνιακών μεταφορών όπως είναι η εισαγωγή και επεξεργασία ενός οδικού δικτύου, η εκτίμηση και βελτίωση της ζήτησης μεταφορών, η προσομοίωση της κίνησης σε στατικές μακροσκοπικές αναθέσεις ή σε δυναμική μεσοσκοπική, μικροσκοπική ή υβριδική προσομοίωση σε διαδρομές που προέρχονται από απλές μεθόδους "Όλα ή Τίποτα" ("All or Nothing" methods) έως και σε σύνθετους αλγόριθμους Δυναμικής Ισορροπίας Χρηστών (Dynamic User Equilibrium). Τα αποτελέσματα που εξάγονται από την επεξεργασία των δεδομένων κυμαίνονται από το 3D animation μέχρι και την σύνθετη ανάλυση συγκοινωνιακών μεταφορών. Παράλληλα, περιλαμβάνονται και εργαλεία που βοηθούν στην καλύτερη εποπτεία ενός έργου, παρέχοντας ένα κύριο πρότυπο αλλά και πολλαπλές εναλλακτικές λύσεις για την

διεξαγωγή δοκιμών. Όλες οι λειτουργίες περιέχονται σε μία εφαρμογή που εκτελείται σε ένα αρχείο υπολογιστή.

Επιπλέον, στο Aimsun Next υπάρχουν προγράμματα διαχείρισης για τον έλεγχο διαφορετικών σεναρίων σε ένα μοντέλο. Για παράδειγμα, ένα τυπικό έργο μπορεί να έχει ένα βασικό μοντέλο και μια πληθώρα επιλογών που αφορούν τον σχεδιασμό των οδών, ενώ είναι πιθανόν στη συνέχεια να απαιτείται η δοκιμή των επιλογών αυτών σε διάφορα σενάρια ζήτησης και ρύθμισης της κυκλοφορίας. Παρέχει επίσης τη δυνατότητα σε πολλαπλούς σχεδιαστές να συνεργάζονται σε ένα έργο. Ταυτόχρονα, είναι δυνατόν οι λειτουργίες του λογισμικού να επεκταθούν από τους χρήστες μέσω εφαρμογών προγραμματισμού (Aimsun Next 20 User's Manual, Aimsun Next Version 20.0.3, Accessed Jun. 25, 2021).

Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση λειτουργιών στο Aimsun Next είναι η Python. Η Python είναι μια διερμηνευόμενη (interpreted), γενικού σκοπού (general-purpose) και υψηλού επιπέδου, γλώσσα προγραμματισμού. Δημιουργήθηκε από τον Ολλανδό Γκίντο βαν Ρόσσουμ (Guido van Rossum) στο ερευνητικό κέντρο Centrum Wiskunde & Informatica (CWI) το 1989 και κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1991. Ο κύριος στόχος της είναι η αναγνωσιμότητα του κώδικά της και η ευκολία χρήσης της. Διακρίνεται λόγω του ότι έχει πολλές βιβλιοθήκες που διευκολύνουν ιδιαίτερα αρκετές συνηθισμένες εργασίες. Η Python αναπτύσσεται ως ανοιχτό λογισμικό (open source) και η διαχείρισή της γίνεται από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό Python Software Foundation (Aggelidakis, 2015). Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί ότι κάποιες από τις τυπικές εργασίες που μπορούν να εκτελεστούν στο Aimsun Next μέσω κώδικα Python είναι η τροποποίηση ενός μοντέλου, η εισαγωγή ή εξαγωγή δεδομένων, η εκτέλεση υπολογισμών με δεδομένα μοντέλου και η τροποποίηση του μοντέλου μεταδεδομένων.

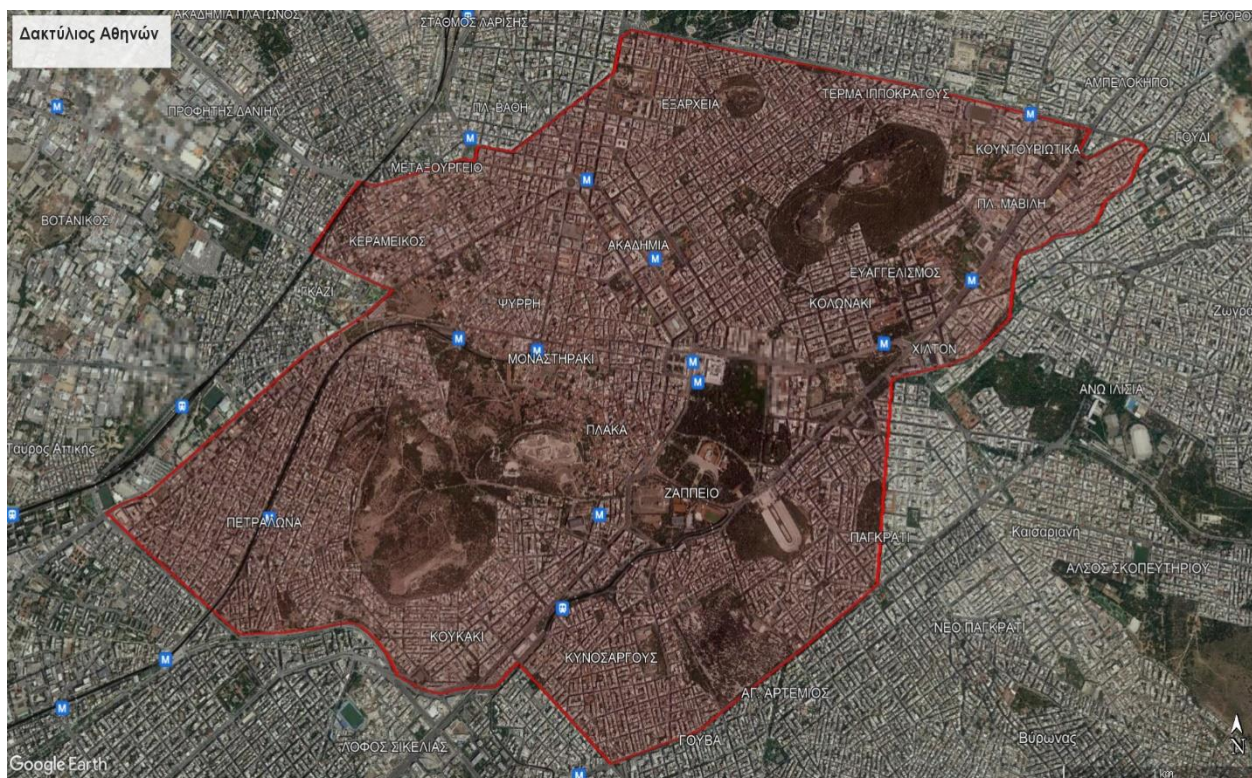


## 4. Ανάλυση και Αποτελέσματα

### 4.1 Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων

Για τον υπολογισμό των εξεταζόμενων μετρικών της ανθεκτικότητας σε συγκεκριμένους κόμβους του Αθηναϊκού συγκοινωνιακού δικτύου, αξιοποιήθηκε ένα έτοιμο και κατάλληλα τροποποιημένο πακέτο δεδομένων, το οποίο περιείχε το δίκτυο του εσωτερικού δακτυλίου της Αθήνας. Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιείται τόσο ως κατευθυνόμενος μη σταθμισμένος άκυκλος γράφος όσο και ως μακροσκοπικό οδικό δίκτυο, προσαρμοσμένο στο λογισμικό του προσομοιωτή κυκλοφορίας Aimsun Next. Το προαναφερθέν πακέτο δεδομένων, παραχωρήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας από τον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

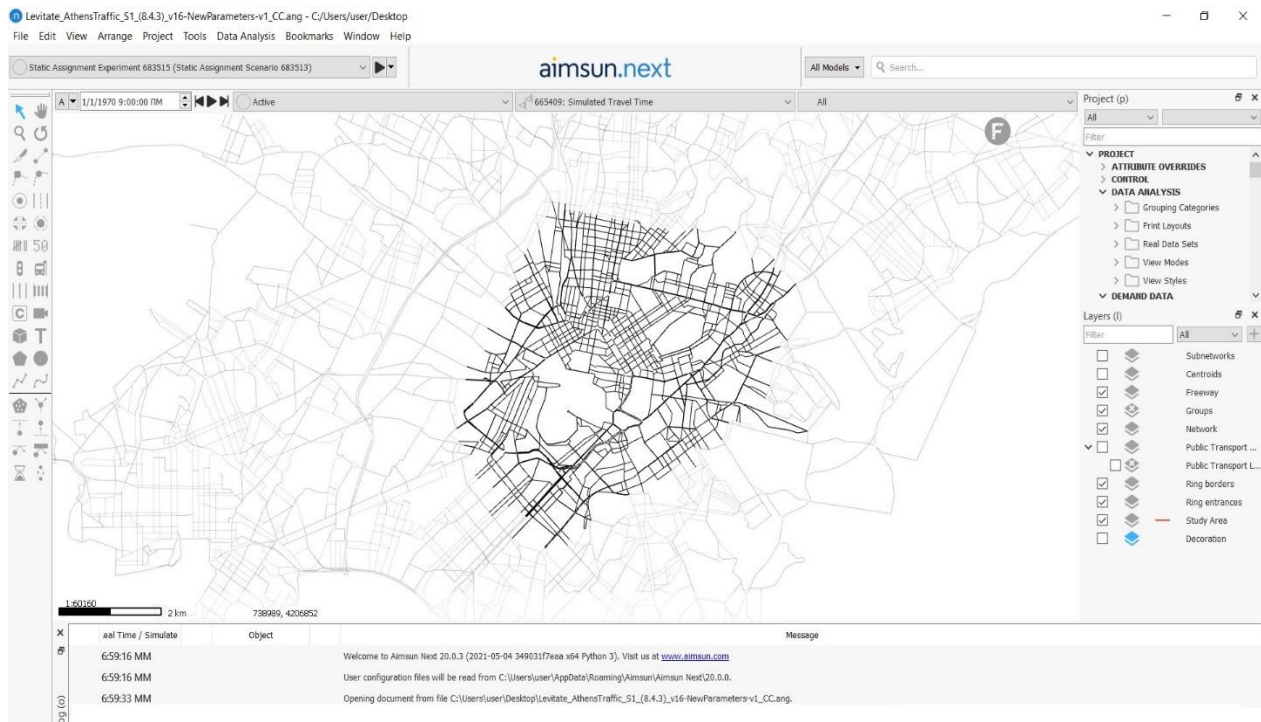
Η περιοχή μελέτης (Σχήμα 5) η οποία επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη έρευνα (εσωτερικός δακτύλιος του αστικού οδικού δικτύου της Αθήνας) είναι ιδιαίτερως ενδιαφέρουσα τόσο λόγω του αυξημένου κυκλοφοριακού φόρτου που έχει, όσο και λόγω της θέσης στην οποία βρίσκεται (κέντρο Αθηνών). Παράλληλα, η σημασία της προαναφερθείσας περιοχής μπορεί να γίνει ακόμη πιο εμφανής, καθότι στον εσωτερικό δακτύλιο Αθηνών εφαρμόζονται και κάποια μέτρα περιορισμού της κυκλοφορίας ορισμένων οχημάτων, που βασίζονται στην εκ περιτροπής κυκλοφορία τους και έχουν ως σκοπό την μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εξαιτίας των αερίων ρύπων.



Σχήμα 5: Περιοχή μελέτης

Το δίκτυο της Αθήνας δόθηκε έτοιμο σε λογισμικό Aimsun Next (Σχήμα 6). Παρόλα αυτά, ακολουθήθηκε και μία σύντομη διαδικασία για την διόρθωση κάποιων ελάχιστων σφαλμάτων

τα οποία αφορούσαν κυρίως λάθη στην ονοματοδοσία και την κωδικοποίηση συνδέσμων και κόμβων του δικτύου.



Σχήμα 6: Δίκτυο μελέτης σε περιβάλλον Aimsun Next

Η δημιουργία του γράφου πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού R. Αρχικά, φορτώθηκε στο RStudio η βιβλιοθήκη “igraph” μέσω της οποίας κατέστη δυνατός ο σύντομος σχεδιασμός του γράφου (Σχήμα 7). Έπειτα, εισήχθησαν στο λογισμικό όλοι οι κόμβοι του δακτυλίου των Αθηνών μαζί με τις συντεταγμένες x και y τους αλλά και όλες οι πιθανές διαδρομές από και προς κάθε κόμβο (Σχήμα 7, Σχήμα 8, Σχήμα 9, Σχήμα 10, Σχήμα 11).

Σημειώνεται πως τα ονόματα των κόμβων και οι συντεταγμένες τους είναι γραμμένες σε σειρά και κατ’ αντιστοιχία ούτως ώστε να σχηματιστούν τα κατάλληλα σύνολα δεδομένων που θα περιέχουν τις ορθές πληροφορίες για κάθε κόμβο ξεχωριστά. Ανάλογα, το ίδιο συμβαίνει και με τα ζεύγη των κόμβων προέλευσης και προορισμού για την δημιουργία των διαδρομών.







## 4.2 Υπολογισμός centralities, αποδοτικότητας και κρισιμότητας

### 4.2.1 Κανονική αδιατάρακτη λειτουργία του δικτύου

Το επόμενο βήμα ήταν η επεξεργασία των δεδομένων. Αρχικά, υπολογίστηκαν η κεντρικότητα βαθμού (degree centrality), η κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality), η κεντρικότητα ενδιάμεσότητας (betweenness centrality), η αποδοτικότητα και η κρισιμότητα μέσω κατάλληλων εντολών, για την κανονική αδιατάρακτη λειτουργία του δικτύου. Στη συνέχεια, οι συγκεκριμένοι υπολογισμοί εξήχθησαν σε ένα αρχείο τύπου .csv (Σχήμα 13). Σημειώνεται επίσης, πως δημιουργήθηκε και ένα data frame ούτως ώστε να αποθηκευτούν τα αποτελέσματα.

```
1314 cent_scores <- data.frame(  
1315   degree = degree(g),  
1316   betweenness = round(betweenness(g),4),  
1317   closeness = round(closeness(g),4))  
1318  
1319  
1320 #centrality scores  
1321 #degree  
1322 degree_centrality <- centr_degree(g, mode = "all", loops = TRUE,  
1323                               normalized = TRUE)  
1324  
1325  
1326  
1327 #closeness centrality  
1328 closeness_centrality <- centr_clo(g, mode = "all", normalized = TRUE)  
1329  
1330  
1331 #betweenness centrality  
1332 betweenness_centrality <- centr_betw(g, directed = TRUE, nobigint = TRUE,  
1333                               normalized = TRUE)  
1334  
1335  
1336 #data frame for centrality measurements in order  
1337 info.data <- data.frame(nodes, degree_centrality[["res"]], betweenness_centrality[["res"]], closeness_centrality[["res"]])  
1338 write.csv(info.data, file="C:/Users/user/Desktop/info.data.csv")
```

**Σχήμα 13: Υπολογισμός για κάθε κόμβο των μεγθών degree centrality, closeness centrality και betweenness centrality και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R)**

### 4.2.2 Διαδικασία Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων

Έπειτα, υπολογίστηκαν ξανά τα μεγέθη degree centrality, closeness centrality, betweenness centrality, αποδοτικότητα και κρισιμότητα, όμως αυτή τη φορά ο υπολογισμός έγινε κατά τη διαδικασία Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων (Sequential Component Elimination). Δηλαδή, τα δομικά στοιχεία του δικτύου αφαιρέθηκαν διαδοχικά και από τον γράφο αλλά και από το μακροσκοπικό μοντέλο Aimsun. Μετά την αφαίρεση του κάθε στοιχείου, οι προαναφερθείσες μετρικές ποσοτικοποιήθηκαν και αποθηκεύτηκαν σε μια βάση δεδομένων.

Για τα μεγέθη των κεντρικοτήτων (degree centrality, closeness centrality και betweenness centrality) ο κώδικας που καταστρώθηκε παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 14). Μέσω μίας δομής επανάληψης (for loop) αφαιρείτο σε κάθε επανάληψη ένας σύνδεσμος (section) και τα προαναφερθέντα μεγέθη υπολογίζονταν και τοποθετούνταν σε ένα data frame.

Όσον αφορά την μέτρηση της αποδοτικότητας, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι μέσω του υπολογισμού της (Latora & Marchiori, 2001) ποσοτικοποιείται στη συνέχεια η ευπάθεια (Jenelius & Mattsson, 2020). Η ευπάθεια  $V$  γράφου  $G$  μπορεί να οριστεί ως η διαφορά του  $E_0$ , που είναι η αποδοτικότητα του γράφου/δικτύου με όλα τα στοιχεία του, με το  $E_i$ , που είναι η αποδοτικότητα του γράφου/δικτύου όταν αφαιρείται ένας κόμβος του γράφου ( $V = E_0 - E_i$ ).

Στην παρούσα έρευνα όμως, υιοθετείται μία απόκλιση από αυτό τον ορισμό και την κοινή πρακτική, σε μία προσπάθεια συσχέτισης της ευπάθειας και της κεντρικότητας. Η μέτρηση της αποδοτικότητας και επομένως η ευπάθεια, ποσοτικοποιούνται με βάση την αφαίρεση ενός συνδέσμου και όχι ενός κόμβου. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται κυρίως με σκοπό να προσομοιάσει τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται η κρισιμότητα (Nagurney & Qiang, 2008). Επίσης, σύμφωνα και με τους Leobons, Campos & Bandeira (2019), μια διαταραχή σε ένα δίκτυο μπορεί να προσομοιωθεί αφαιρώντας ένα δομικό στοιχείο του γράφου/δικτύου, είτε ενός κόμβου είτε μίας σύνδεσης. Αν και η κατάργηση ενός μόνο συνδέσμου ανά επανάληψη δεν αναμένεται να αλλάξει τη μέτρηση αποδοτικότητας  $E_i$  σε σύγκριση με το  $E_0$  ωστόσο, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία είναι δυνατόν να επιτευχθεί μια άμεση σύγκριση με την κρισιμότητα. Ο κώδικας για την μέτρηση της αποδοτικότητας παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 15).

Παράλληλα, για την ποσοτικοποίηση της κρισιμότητας εφαρμόζεται ο εσωτερικός δακτύλιος του αστικού οδικού δικτύου των Αθηνών στο λογισμικό Aimsun Next. Η κρισιμότητα υπολογίζεται μέσω των Εξισώσεων 6 και 7 (σελ. 34). Η συγκεκριμένη προσέγγιση υλοποιείται μέσω ενός γενικού σεναρίου `python` (`generic python script`) που αλληλεπιδρά με το Aimsun και προσομοιώνει την επαναληπτική διαδικασία, όπως προτείνεται από τους Nagurney & Qiang (2008), για την εκχώρηση διαδρομής μετά την αφαίρεση κάθε συνδέσμου από το δίκτυο. Η αφαίρεση των συνδέσμων προσομοιώνεται με την εκχώρηση μίας Συνάρτησης Κυκλοφοριακού Φόρτου-Καθυστέρησης (Volume-Delay Function) σε κάθε έναν από τους συνδέσμους. Η συνάρτηση αυτή αντιστοιχεί σε υψηλό κόστος για τη χρήση του εκάστοτε συνδέσμου στον αλγόριθμο εκχώρησης διαδρομής Frank-Wolfe (Frank-Wolfe path assignment algorithm). Τέλος, το αποτέλεσμα αναλύεται περαιτέρω για την ποσοτικοποίηση του Ενιαίου Μέτρου Απόδοσης Δικτύου (Unified Network Performance Measure)  $\epsilon$  (Εξίσωση 6) και του δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου (Network Component Importance index)  $l(g)$  (Εξίσωση 7) και για την τελική ταξινόμηση των συνδέσμων με βάση την κρισιμότητά τους.

Ο κώδικας που καταστρώθηκε για την εκχώρηση της Volume-Delay Function με υψηλό κόστος στα sections παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 16). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, για την διαδικασία της εκχώρησης της Volume-Delay Function με υψηλό κόστος, δημιουργήθηκαν πέντε διαφορετικοί κώδικες ανάλογα με το είδος οδού (και κατά συνέπεια ανάλογα με τις προϋπάρχουσες στο Aimsun, Volume-Delay Functions που αντιστοιχούν στα εκάστοτε road types) που ήταν καταγεγραμμένοι και ταξινομημένοι οι εκάστοτε σύνδεσμοι (sections) στο πρόγραμμα Aimsun Next. Επιπλέον, η Volume-Delay Function με υψηλό κόστος που εκχωρήθηκε στα sections, δημιουργήθηκε εντός του προγράμματος Aimsun μέσω κώδικα. Ακόμη, σημειώνεται πως η συνολική διαδικασία εκτελέστηκε μέσω ενός κατάλληλα διαμορφωμένου αρχείου batch (.bat) με σκοπό την ταχύτερη ολοκλήρωση των πειραμάτων. Τέλος, μετά την πραγματοποίηση των πειραμάτων, τα αποτελέσματα αποθηκεύτηκαν σε αρχεία τύπου Aimsun (.ang) και από εκεί εξήχθησαν οι πίνακες (matrices) των trips και time σε ένα αρχείο τύπου .xlsx όπου και επεξεργάστηκαν, με σκοπό την εύρεση του μεγέθους epsilon, στην συνέχεια την εύρεση του μεγέθους lambda και τελικά την εύρεση του li ( $li = \lambda/\text{efficiency}$ ).

```

1348 centralities <- data.frame(matrix(ncol=6, nrow=nrow(EdgeList)))
1349 x <- c("from", "to", "connected_components", "degree", "closeness", "betweenness")
1350 colnames(centralities) <- x
1351 centralities$connected_components <- as.numeric(centralities$connected_components)
1352 centralities$degree <- as.numeric(centralities$degree)
1353 centralities$closeness <- as.numeric(centralities$closeness)
1354 centralities$betweenness <- as.numeric(centralities$betweenness)
1355
1356
1357 for (i in (1:nrow(EdgeList))) {
1358   NodeList_new <- NodeList
1359   EdgeList_new <- EdgeList[-c(i), ]
1360
1361   #calculate new graph
1362   g_new <- graph_from_data_frame(vertices=NodeList_new, d=EdgeList_new,
1363     directed = TRUE)
1364
1365   ConComp_new = components(g_new)
1366
1367   #Centralities. Note: CENTRALIZATION IS THE GRAPH LEVEL CENTRALITY INDEX
1368
1369   #degree
1370   degree_centrality_new <- centr_degree(g_new, mode = "all", loops = TRUE,
1371     normalized = TRUE)
1372
1373   #closeness centrality
1374   closeness_centrality_new <- centr_clo(g_new, mode = "all",
1375     normalized = TRUE)
1376
1377   #betweenness centrality
1378   betweenness_centrality_new <- centr_betw(g_new, directed = TRUE,
1379     nobigint = TRUE,
1380     normalized = TRUE)
1381
1382
1383
1384
1385   centralities$from[i] <- EdgeList$from[i]
1386   centralities$to[i] <- EdgeList$to[i]
1387   centralities$connected_components[i] <- ConComp_new$no
1388   centralities$degree[i] <- degree_centrality_new[["centralization"]]
1389   centralities$closeness[i] <- closeness_centrality_new[["centralization"]]
1390   centralities$betweenness[i] <- betweenness_centrality_new[["centralization"]]
1391
1392
1393   rm(NodeList_new, EdgeList_new, g_new, ConComp_new, degree_centrality_new, closeness_centrality_new,
1394     betweenness_centrality_new)
1395 }
1396
1397 write.csv(centralities, file="c:/Users/user/Desktop/centralities.csv")

```

**Σχήμα 14:** Υπολογισμός των μεγεθών degree centrality, closeness centrality και betweenness centrality μέσω της διαδικασίας Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R)

```

1417 efficiency <- data.frame(matrix(ncol=5, nrow=nrow(EdgeList)))
1418 x <- c("from", "to", "connected_components", "mean_distance", "efficiency")
1419 colnames(efficiency) <- x
1420 efficiency$connected_components <- as.numeric(efficiency$connected_components)
1421 efficiency$mean_distance <- as.double(efficiency$mean_distance)
1422 efficiency$efficiency <- as.double(efficiency$efficiency)
1423
1424 dist <- 1/distances(g, algorithm = 'dijkstra')
1425 dist[dist=="Inf"]<-NA
1426
1427 e <- (1/(nrow(NodeList)*(nrow(NodeList)-1)))*sum(colSums(dist, na.rm = TRUE))
1428
1429 for (i in (1:nrow(EdgeList))) {
1430   NodeList_new <- NodeList
1431   EdgeList_new <- EdgeList[-c(i), ]
1432
1433   #calculate new graph
1434   g_new <- graph_from_data_frame(vertices=NodeList_new, d=EdgeList_new,
1435     directed = TRUE)
1436
1437   ConComp_new = components(g_new)
1438
1439   mean_dist <- mean_distance(g, directed = TRUE)
1440
1441   #Efficiency index (Latora & Marchiori, 2001)
1442   dist <- 1/distances(g_new, algorithm = 'dijkstra')
1443   dist[dist=="Inf"]<-NA
1444
1445   e_new <- (1/(nrow(NodeList)*(nrow(NodeList)-1)))*sum(colSums(dist, na.rm = TRUE))
1446
1447   efficiency$from[i] <- EdgeList$from[i]
1448   efficiency$to[i] <- EdgeList$to[i]
1449   efficiency$connected_components[i] <- ConComp_new$no
1450   efficiency$mean_distance[i] <- mean_dist
1451   efficiency$efficiency[i] <- e_new
1452
1453
1454   rm(NodeList_new, EdgeList_new, g_new, ConComp_new, mean_dist, dist, e_new)
1455
1456   print(i)
1457 }
1458
1459 #Export to csv
1460 write.csv(efficiency, file="c:/Users/user/Desktop/efficiency.csv")

```

**Σχήμα 15:** Υπολογισμός αποδοτικότητας μέσω της διαδικασίας Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R)

```

2 import sys
3
4 from PyANGBasic import *
5 from PyANGKernel import *
6 from PyANGConsole import *
7
8 def main(argv):
9     if len(argv) < 5: # If the length of the arguments is less than 5, begin
10        print("Usage: aconsole -script %s ANG_FILE MATRIX_ID" % (argv[0]))
11        return -1
12
13        # Start a console
14        console = ANGConsole()
15        # Load a network
16        if console.open(argv[1]):
17            model = console.getModel()
18            print("load network")
19            list = [552744, 555176, 639538, 555506, 556376, 555264, 372739, 556088, 661387, 555546, 555190, 635683, 556108,
20                555086, 556084, 555394, 361535, 552672, 374755, 552730, 555226, 555162, 555294, 555216, 372779, 556100,
21                555250, 552676, 555380, 552916, 555598, 552750, 555180, 552934, 555222, 555196, 556116, 556390, 555548,
22                372737, 555406, 556074, 661341, 645695, 635684, 555170, 555220, 556106, 555166, 555198, 556096, 555194,
23                555326, 555296, 556388, 552726, 555184, 555240, 555148, 555528, 556386, 555252, 635690, 555416, 556082,
24                556378, 555324, 374753, 555298, 552694, 555174, 555192, 661391, 555498, 552720, 555242, 555504, 552678,
25                552922, 552738, 556098, 555088, 555188, 555412, 555160, 555244, 555414, 555178, 556380, 555218, 556094,
26                552742, 555224, 555172, 555522, 555600, 552736, 552674, 556110, 661235, 551896, 555146, 555378, 556076,
27                555292, 556090, 555164, 374745, 556078, 555530, 374747, 555182, 555152, 552732, 639220, 556384, 555496,
28                556120, 555262, 372781, 661331, 555400, 361537]
29
30        columnVDF = model.getColumn("GKSection:vdfAtt")
31
32        for i in list:
33            section = model.getCatalog().find(i) # find the section
34            VDF_old = model.getCatalog().find(683545) # old vdf of the section (Frank-Wolfe algorithm)
35            VDF_new = model.getCatalog().find(683546) # new vdf of the section with high cost (simulating the removal of the section)
36            VDF = section.setDataValueObject(columnVDF, VDF_new)
37            experiment = model.getCatalog().find(683515) # experiment id
38            experiment.getOutputPathAssignment().getPathAssignmentPath() # path assignment result
39            experiment.getOutputPathAssignment().setFolderPath("C:\\Users\\user\\Desktop\\criticality")
40            experiment.getOutputPathAssignment().setFileName(str(i) + ".apa")
41
42            GKSystem.getSystem().executeAction("execute", experiment, [], "") # execution of the experiment
43            x = console.save("C:\\Users\\user\\Desktop\\criticality\\" + str(i) + ".ang")
44            VDF = section.setDataValueObject(columnVDF, VDF_old) # reassign the old VDF
45
46        console.close()
47    else:
48        console.getLog().addError("Cannot load the network")
49        print("cannot load network")
50
51    if __name__ == "__main__":
52        sys.exit(main(sys.argv))

```

Σχήμα 16: Διεξαγωγή προσομοίωσης και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .ang (απόσπασμα από τον κώδικα Python)

### 4.2.3 Υπολογισμός αποδοτικότητας και κρισιμότητας κόμβων μέσω της διαδικασίας Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων

Το επόμενο βήμα στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν η εξέταση της αποδοτικότητας και της κρισιμότητας κατά την εφαρμογή της μεθόδου της Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων για τους 20 κόμβους με το υψηλότερο closeness centrality, τους 20 κόμβους με το υψηλότερο betweenness centrality και τις διαδρομές των 20 ζευγαριών Προέλευσης - Προορισμού με την υψηλότερη ζήτηση. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με σκοπό τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ LI και κυκλοφοριακού φόρτου. Τονίζεται ότι οι κόμβοι και οι διαδρομές ευρέθησαν με τον τρόπο που περιγράφεται στη σελίδα 35.

→ Όσον αφορά την διαδοχική αφαίρεση όλων των πιθανών συντομότερων διαδρομών των 20 ζευγαριών Προέλευσης - Προορισμού (OD) με την υψηλότερη ζήτηση, αυτή πραγματοποιείται μέσω της αφαίρεσης των sections της εκάστοτε διαδρομής. Για την μέτρηση της αποδοτικότητας ο τρόπος με τον οποίο αφαιρούνται τα sections είναι παρόμοιος με την διαδικασία της παραπάνω υποενότητας 2.), με τις μόνες διαφορές να έγκεινται στην δομή του κώδικα, καθότι τώρα είναι απαραίτητο να περαστούν στο πρόγραμμα όλες οι πιθανές διαδρομές με τους συνδέσμους τους (Σχήμα 17), ούτως ώστε μέσω της εφαρμογής των κατάλληλων δομών επανάληψης (for loops) και δομών επιλογής (if statement) να ευρεθούν τα ζητούμενα (Σχήμα 18). Σημειώνεται πως οι πιθανές διαδρομές ευρέθησαν μέσω του προγράμματος Aimsun και σε σχεδόν όλα τα ζεύγη αντιστοιχούσαν παραπάνω από μία πιθανές συντομότερες διαδρομές.

Τα 20 ζεύγη OD (με τις ονομασίες με τις οποίες είναι κωδικοποιημένα στο πρόγραμμα Aimsun) μαζί με τις τιμές ζήτησης παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 1).

**Πίνακας 1: Τα 20 Ζεύγη OD με την υψηλότερη ζήτηση (χρήση κλίμακας χρωμάτων για ευκολότερη ανάγνωση)**

α/α	Ζεύγη OD	Ζήτηση
1 <sup>ο</sup>	680978 - 680675	932,116
2 <sup>ο</sup>	680285: Κ.ΤΣΑΛΔΑΡΗ - 681180	766,566
3 <sup>ο</sup>	680403 - 681296: ΜΕΣΟΓΕΙΩΝ	507,748
4 <sup>ο</sup>	680956 - 681304: ΚΗΦΙΣΙΑΣ	442,057
5 <sup>ο</sup>	680355: ΚΗΦΙΣΙΑΣ - 680956	357,054
6 <sup>ο</sup>	680347: ΚΟΣΜΟΥΛΗ - 681226: ΣΥΓΓΡΟΥ	344,337
7 <sup>ο</sup>	680797 - 681350: ΠΕΤΡΟΥ ΡΑΛΛΗ	338,151
8 <sup>ο</sup>	680243: ΣΥΓΓΡΟΥ - 681300: ΚΟΣΜΟΥΛΗ	296,305
9 <sup>ο</sup>	680357: ΑΝΔΡΕΑ ΣΥΓΓΡΟΥ - 680666	294,425
10 <sup>ο</sup>	680355: ΚΗΦΙΣΙΑΣ - 680535	289,769
11 <sup>ο</sup>	680345: ΗΛΙΟΥΠΟΛΕΩΣ - 681250: ΛΕΩΦ.ΑΘΗΝΩΝ	289,705
12 <sup>ο</sup>	680341: ΜΕΣΟΓΕΙΩΝ - 680745	280,01
13 <sup>ο</sup>	680331 - 681290: Λεωφόρος Ελ. Βενιζέλου	237,068
14 <sup>ο</sup>	680588 - 681296: ΜΕΣΟΓΕΙΩΝ	225,905
15 <sup>ο</sup>	680243: ΣΥΓΓΡΟΥ - 680741	202,789
16 <sup>ο</sup>	680930 - 681306: ΑΝΔΡΕΑ ΣΥΓΓΡΟΥ	200,561
17 <sup>ο</sup>	680978 - 680545	198,559
18 <sup>ο</sup>	680357: ΑΝΔΡΕΑ ΣΥΓΓΡΟΥ - 681013	192,194
19 <sup>ο</sup>	680768 - 680373	185,559
20 <sup>ο</sup>	680243: ΣΥΓΓΡΟΥ - 681126	184,532

```

1469 list_1_1 <- c('552766', '555174')
1470 list_1_2 <- c('551898', '554848', '555162', '555176', '555174')
1471 list_1_3 <- c('552752', '551882', '551886')
1472 list_2_1 <- c('373499', '373763', '373785', '373783', '373791', '373795', '374145', '374149', '374155',
1473 list_2_2 <- c('373499', '373759', '373767', '373775', '373803', '374161', '374171', '374189', '374187',
1474 list_2_3 <- c('373499', '373763', '373785', '373755', '373747', '663004', '373745', '373753', '374041',
1475 list_2_4 <- c('373499', '373759', '373771', '373791', '373795', '374145', '374149', '374155', '374159',
1476 list_2_5 <- c('373499', '373763', '373785', '373755', '373747', '663004', '373745', '373753', '374041',
1477 list_2_6 <- c('373499', '373763', '373785', '373755', '373747', '663004', '373745', '373753', '374041',
1478 list_2_7 <- c('373499', '373763', '373785', '373783', '373769', '373767', '373775', '373803', '374161',
1479 list_2_8 <- c('373499', '373763', '373785', '373755', '373747', '663004', '373745', '373753', '374041',
1480 list_2_9 <- c('373499', '373763', '373785', '373755', '373747', '663004', '373741', '373737', '373753',
1481 list_2_10 <- c('373499', '373763', '373785', '373755', '373747', '663004', '373745', '373753', '374037',
1482 list_2_11 <- c('373499', '373763', '373785', '373755', '373747', '663000', '662986', '662990', '373737',
1483 list_2_12 <- c('373499', '373763', '373785', '373783', '373791', '373795', '374145', '374149', '374155',
1484 list_2_13 <- c('373499', '373763', '373785', '373755', '373747', '663004', '373741', '373737', '373753',
1485 list_2_14 <- c('373499', '373763', '373785', '373755', '373747', '663004', '373745', '373753', '374041',
1486 list_3_1 <- c('555524', '555208', '555204', '555214', '555440', '555434', '555430', '555424', '555420',
1487 list_3_2 <- c('555232', '555196', '555530', '555192', '555188', '555180', '555172', '635684', '555170',
1488 list_3_3 <- c('555524', '555208', '555204', '555214', '555440', '555434', '555430', '555424', '555420',
1489 list_3_4 <- c('555524', '555208', '555204', '555214', '555440', '555434', '555430', '555424', '555420',
1490 list_3_5 <- c('555444', '555208', '555204', '555214', '555440', '555434', '555430', '555424', '555420',
1491 list_3_6 <- c('555232', '555196', '555530', '555192', '555188', '555180', '555172', '635683', '555166',
1492 list_3_7 <- c('552826', '552832', '552842', '552854', '552858', '555466', '555254', '552432', '552430',
1493 list_3_8 <- c('555232', '555196', '555530', '555192', '551904', '551906', '551886', '555172', '635684',
1494 list_3_9 <- c('552826', '552832', '552842', '552862', '546766', '663110', '546326', '546322', '546318',
1495 list_3_10 <- c('555230', '555222', '552408', '552404', '552398', '552394', '555606', '552392', '551926',
1496 list_3_11 <- c('555444', '552824', '552818', '546320', '546308', '546314', '546342', '546338', '546284',
1497 list_3_12 <- c('555524', '555208', '555204', '555214', '555440', '555434', '555430', '555424', '555420',
1498 list_3_13 <- c('555232', '555196', '555530', '555192', '551904', '551906', '551886', '555172', '635684',
1499 list_4_1 <- c('556100', '556108', '556110', '556116')

```

Σχήμα 17: Εισαγωγή διαδρομών και συνδέσμων τους στον κώδικα (απόσπασμα από τον κώδικα R)

```

1622 library(readxl)
1623 edges <- read_excel("C:/Users/user/Desktop/edges.xlsx")
1624 EdgeList$eid <- edges$eid
1625
1626 new_list <- list(list_1_1, list_1_2, list_1_3, list_2_1, list_2_2, list_2_3, list_2_4, list_2_5, list_2_6, list_2_7, list_2_8,
1627
1628 size_1 <- length(new_list)
1629 #print(size_1)
1630
1631 efficiency <- data.frame(matrix(ncol=4, nrow=size_1))
1632 x <- c("paths", "connected_components", "mean_distance", "efficiency")
1633 colnames(efficiency) <- x
1634 efficiency$connected_components <- as.numeric(efficiency$connected_components)
1635 efficiency$mean_distance <- as.double(efficiency$mean_distance)
1636 efficiency$efficiency <- as.double(efficiency$efficiency)
1637
1638 dist <- 1/distances(g, algorithm = 'dijkstra')
1639 dist[dist=="Inf"]<-NA
1640
1641 e <- (1/(nrow(NodeList)*(nrow(NodeList)-1)))*sum(colSums(dist, na.rm = TRUE))
1642
1643 edgetodo <- EdgeList
1644
1645
1646 for (i in seq_along(new_list)) {
1647   for (j in seq_along(new_list[[i]])) {
1648     for (s in (1:nrow(EdgeList))) {
1649       if (new_list[[i]][[j]] %in% edgetodo$eid[s]) {
1650         edgetodo$eid[s] <- NA
1651       }
1652     }
1653   }
1654
1655   EdgeList_new <- na.omit(edgetodo)
1656   NodeList_new <- NodeList
1657   g_new <- graph_from_data_frame(vertices=NodeList_new, d=EdgeList_new,
1658                                 directed = TRUE)
1659
1660   ConComp_new = components(g_new)
1661
1662   mean_dist <- mean_distance(g, directed = TRUE)
1663
1664   #Efficiency index (Latora & Marchiori, 2001)
1665   dist <- 1/distances(g_new, algorithm = 'dijkstra')
1666   dist[dist=="Inf"]<-NA
1667
1668   e_new <- (1/(nrow(NodeList)*(nrow(NodeList)-1)))*sum(colSums(dist, na.rm = TRUE))
1669
1670
1671   efficiency$paths[i] <- i
1672   efficiency$connected_components[i] <- ConComp_new$no
1673   efficiency$mean_distance[i] <- mean_dist
1674   efficiency$efficiency[i] <- e_new
1675
1676
1677   rm(NodeList_new, EdgeList_new, g_new, ConComp_new, mean_dist, dist, e_new)
1678
1679   edgetodo <- EdgeList
1680 }
1681
1682
1683 #Export to csv
1684 write.csv(efficiency, file="C:/Users/user/Desktop/efficiency_shortest_paths.csv")

```

Σχήμα 18: Υπολογισμός αποδοτικότητας όλων των πιθανών shortest paths για κάθε ζευγάρι OD μέσω της διαδικασίας διαδοχικής αφαίρεσης συνδέσμων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R)

→ Για τον υπολογισμό της κρισιμότητας των διαδρομών των 20 ζευγών OD καταστρώθηκε ανάλογο πείραμα με αυτό της υποενότητας 2.), με τη διαφορά ότι δημιουργήθηκαν τόσοι κώδικες όσες οι πιθανές διαδρομές για κάθε ζεύγος OD (συνολικά 152). Όπως και στην επαναληπτική διαδικασία της προαναφερθείσας υποενότητας, πραγματοποιείται διαδοχική αφαίρεση των sections του κάθε shortest path μέσω εκχώρησης μίας Volume-Delay Function με υψηλό κόστος στη θέση της εκάστοτε υπάρχουσας VDF που αντιστοιχεί στο κάθε section του Aimsun. Στο τέλος του πειράματος και μετά την αποθήκευση του αρχείου .ang, επιστρέφεται σε κάθε section η αρχική του VDF. Η VDF με το υψηλό κόστος και το id του experiment παραμένουν ίδια με αυτά του κώδικα του Σχήματος 16 καθότι επιτελούν την ίδια λειτουργία. Επίσης, η συνολική διαδικασία εκτελέστηκε ξανά μέσω ενός κατάλληλα διαμορφωμένου αρχείου batch (.bat) και έπειτα πραγματοποιήθηκαν οι ίδιοι υπολογισμοί που αναφέρονται και στην υποενότητα 2.) (εξαγωγή αποτελεσμάτων από Aimsun σε πίνακες trips και time και εύρεση μεγεθών epsilon, lambda και τελικά li). Παρακάτω (Σχήμα 19) παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας από τους κώδικες που υλοποιήθηκαν (κώδικας για τη διεξαγωγή προσομοίωσης για μία από τις πιθανές συντομότερες διαδρομές του ζεύγους OD 680978 – 680675, το οποίο είχε και τη μεγαλύτερη ζήτηση).

```

2 import sys
3 from PyANGBasic import *
4 from PyANGKernel import *
5 from PyANGConsole import *
6
7 def main(argv):
8     if len(argv) < 5:
9         print("Usage: aconsole -script %s ANG_FILE MATRIX_ID" % (argv[0]))
10        return -1
11        # Start a Console
12        console = ANGConsole()
13        # Load a network
14        if console.open(argv[1]):
15            model = console.getModel()
16            print("Load network")
17            list_i = [[552766, 555174]]
18            columnVDF = model.getColumn("GKSection::vdfAtt")
19
20            test = []
21            a = []
22            q = 0
23            sections = list_i
24
25            for i, j in enumerate(sections): # i -> enumeration, j -> section
26                a.append(j)
27                for z, w in enumerate(a[i]): # z->enumeration, w-> section
28                    section = model.getCatalog().find(w) # find the section
29                    VDF_old = section.getDataValue(columnVDF)
30                    test.append(VDF_old)
31                    VDF_new = model.getCatalog().find(683546) # new vdf of the section with high cost (simulating the removal of the section)
32                    VDF = section.setDataValueObject(columnVDF, VDF_new)
33
34                    experiment = model.getCatalog().find(683515) # experiment id
35                    experiment.getOutputPathAssignment().getPathAssignmentPath() # path assignment result
36                    experiment.getOutputPathAssignment().setFolderPath("C:\\Users\\user\\Desktop\\shortest_paths\\shortest_paths_1_1\\")
37                    experiment.getOutputPathAssignment().setFileName(str(i) + ".apa")
38                    GKSystem.getSystem().executeAction("execute", experiment, [], "") # execution of the experiment
39                    x = console.save("C:\\Users\\user\\Desktop\\shortest_paths\\shortest_paths_1_1\\" + str(i) + ".ang")
40
41                    for s, r in enumerate(a[i]):
42                        section = model.getCatalog().find(r)
43                        x = test[q][0]
44                        VDFold = model.getCatalog().find(x)
45                        VDF = section.setDataValueObject(columnVDF, VDFold) # reassign the old VDF
46                        q = q + 1
47
48                console.close()
49            else:
50                console.getLog().addError("Cannot load the network")
51                print("cannot load network")
52        if __name__ == "__main__":
53            sys.exit(main(sys.argv))

```

**Σχήμα 19:** Διεξαγωγή προσομοίωσης και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .ang (απόσπασμα από τον κώδικα Python)

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της αποδοτικότητας των 20 κόμβων με την υψηλότερη closeness centrality (Πίνακας 2) και την υψηλότερη betweenness centrality (Πίνακας 3). Ακολουθήθηκε ξανά η διαδικασία Διαδοχικής Αφαίρεσης Στοιχείων, μόνο που τώρα αφαιρούνται από το δίκτυο οι εκάστοτε είκοσι κόμβοι. Η διαδικασία της αφαίρεσης των κόμβων διαφοροποιείται από αυτή των συνδέσμων και των διαδρομών, καθότι αν διαγραφεί εντελώς ένας κόμβος καταργείται η δομική ακεραιότητα του γράφου. Συνεπώς, για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, η αφαίρεση των κόμβων πραγματοποιείται τελικά, μέσω της αφαίρεσης όλων των συνδέσμων που είτε προέρχονται είτε καταλήγουν στον εκάστοτε κόμβο ενδιαφέροντος. Επομένως, ο κώδικας καταστρώνεται με βάση τα παραπάνω και παρουσιάζεται στα Σχήματα 20, 21, 22.



**Πίνακας 2: Οι 20 κόμβοι (με τις ονομασίες τους στο Aimsun) με την υψηλότερη closeness centrality (χρήση κλίμακας χρωμάτων για ευκολότερη ανάγνωση)**

<b>α/α</b>	<b>Κόμβοι</b>	<b>Closeness centrality</b>
1 <sup>ος</sup>	504422	0,06010141
2 <sup>ος</sup>	504472	0,05965188
3 <sup>ος</sup>	504424	0,05955838
4 <sup>ος</sup>	504426	0,05946244
5 <sup>ος</sup>	504476	0,05944056
6 <sup>ος</sup>	504400	0,05913314
7 <sup>ος</sup>	504478	0,05906556
8 <sup>ος</sup>	504454	0,05893623
9 <sup>ος</sup>	504450	0,05893354
10 <sup>ος</sup>	623965	0,05892279
11 <sup>ος</sup>	504474	0,0589201
12 <sup>ος</sup>	504054	0,05890936
13 <sup>ος</sup>	504464	0,05889593
14 <sup>ος</sup>	504428	0,05887446
15 <sup>ος</sup>	680038	0,05886105
16 <sup>ος</sup>	504386	0,05884228
17 <sup>ος</sup>	503990	0,05881817
18 <sup>ος</sup>	504412	0,05868459
19 <sup>ος</sup>	623923	0,0586473
20 <sup>ος</sup>	504050	0,05860208

**Πίνακας 3: Οι 20 κόμβοι (με τις ονομασίες τους στο Aimsun) με την υψηλότερη betweenness centrality (χρήση κλίμακας χρωμάτων για ευκολότερη ανάγνωση)**

<b>α/α</b>	<b>Κόμβοι</b>	<b>Betweenness centrality</b>
1 <sup>ος</sup>	505592	222722,83
2 <sup>ος</sup>	505500	215029,97
3 <sup>ος</sup>	504092	206317,85
4 <sup>ος</sup>	505594	204052,8
5 <sup>ος</sup>	505616	199574,64
6 <sup>ος</sup>	505614	192334,31
7 <sup>ος</sup>	505610	191404,77
8 <sup>ος</sup>	505436	188057,65
9 <sup>ος</sup>	505604	183038,65
10 <sup>ος</sup>	505390	181153,85
11 <sup>ος</sup>	505508	173255,59
12 <sup>ος</sup>	505516	169670,32
13 <sup>ος</sup>	504084	155822,85
14 <sup>ος</sup>	505512	154227,38
15 <sup>ος</sup>	504546	152686,95
16 <sup>ος</sup>	504036	151904,69
17 <sup>ος</sup>	504694	145406,06
18 <sup>ος</sup>	504696	144640,87
19 <sup>ος</sup>	504030	144295,26
20 <sup>ος</sup>	504504	143032,00

```

1694 efficiency <- data.frame(matrix(ncol=4, nrow=20))
1695 x <- c("nodes", "connected_components", "mean_distance", "efficiency")
1696 colnames(efficiency) <- x
1697 efficiency$connected_components <- as.numeric(efficiency$connected_components)
1698 efficiency$mean_distance <- as.double(efficiency$mean_distance)
1699 efficiency$efficiency <- as.double(efficiency$efficiency)
1700
1701 dist <- 1/distances(g, algorithm = 'dijkstra')
1702 dist[dist=="Inf"]<-NA
1703
1704 e <- (1/(nrow(NodeList)*(nrow(NodeList)-1)))*sum(colSums(dist, na.rm = TRUE))
1705
1706
1707 list_b <- c('505592', '505500', '504092', '505594', '505616', '505614', '505610', '505436', '505604',
1708 r <- length(list_b)
1709
1710
1711
1712 list_c <- c('504422', '504472', '504424', '504426', '504476', '504400', '504478', '504454', '504450',
1713 t <- length(list_c)

```

Σχήμα 20: Εισαγωγή δεδομένων στον κώδικα (απόσπασμα από τον κώδικα R)

```

1777 counter <- 0
1778
1779 for (i in (1:nrow(NodeList))) {
1780   for (s in 1:r) {
1781     if (nodes[c(i)] == list_c[c(s)]) {
1782       NodeList_new <- NodeList[-c(i), ]
1783       Edgelist_new <- Edgelist
1784
1785       counter <- counter + 1
1786
1787       #remove all edges associated with the removed nodes
1788       for (j in (1:nrow(Edgelist_new))) {
1789         if (Edgelist_new$from[j]==NodeList$nodes[i]||Edgelist_new$to[j]==NodeList$nodes[i]) {
1790           Edgelist_new$from[j] <- NA
1791           Edgelist_new$to[j] <- NA
1792         } else{
1793           Edgelist_new$from[j] <- Edgelist_new$from[j]
1794           Edgelist_new$to[j] <- Edgelist_new$to[j]
1795         }
1796       }
1797
1798       Edgelist_new <- na.omit(Edgelist_new)
1799
1800
1801       #calculate new graph
1802       g_new <- graph_from_data_frame(vertices=NodeList_new, d=Edgelist_new,
1803                                     directed = TRUE)
1804
1805       ConComp_new = components(g_new)
1806       mean_dist <- mean_distance(g, directed = TRUE)
1807
1808       #Efficiency index (Latora & Marchiori, 2001)
1809       dist <- 1/distances(g_new, algorithm = 'dijkstra')
1810       dist[dist=="Inf"]<-NA
1811
1812       e_new <- (1/(nrow(NodeList)*(nrow(NodeList)-1)))*sum(colSums(dist, na.rm = TRUE))
1813
1814       efficiency$nodes[counter] <- NodeList$nodes[i]
1815       efficiency$connected_components[counter] <- ConComp_new$no
1816       efficiency$mean_distance[counter] <- mean_dist
1817       efficiency$efficiency[counter] <- e_new
1818
1819       rm(NodeList_new, Edgelist_new, g_new, ConComp_new, mean_dist, dist, e_new)
1820
1821     }
1822   }
1823 }
1824
1825 #Export to csv
1826 write.csv(efficiency, file="C:/Users/user/Desktop/efficiency_closeness_centrality.csv")
1827
1828
1829

```

Σχήμα 21: Υπολογισμός αποδοτικότητας των 20 κόμβων με την υψηλότερη closeness centrality και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R)

```

1718 counter <- 0
1719
1720
1721 for (i in (1:nrow(NodeList))) {
1722   for (s in 1:r) {
1723     if (nodes[c(i)] == list_b[c(s)]) {
1724       NodeList_new <- NodeList[-c(i), ]
1725       EdgeList_new <- EdgeList
1726
1727       counter <- counter + 1
1728
1729       #remove all edges associated with the removed nodes
1730       for (j in (1:nrow(EdgeList_new))) {
1731         if (EdgeList_new$from[j]==NodeList$nodes[i]||EdgeList_new$to[j]==NodeList$nodes[i]) {
1732           EdgeList_new$from[j] <- NA
1733           EdgeList_new$to[j] <- NA
1734         } else{
1735           EdgeList_new$from[j] <- EdgeList_new$from[j]
1736           EdgeList_new$to[j] <- EdgeList_new$to[j]
1737         }
1738       }
1739
1740       EdgeList_new <- na.omit(EdgeList_new)
1741
1742
1743       #calculate new graph
1744       g_new <- graph_from_data_frame(vertices=NodeList_new, d=EdgeList_new,
1745                                     directed = TRUE)
1746
1747
1748       ConComp_new = components(g_new)
1749       mean_dist <- mean_distance(g, directed = TRUE)
1750
1751       #Efficiency index (Latora & Marchiori, 2001)
1752       dist <- 1/distances(g_new, algorithm = 'dijkstra')
1753       dist[dist=="Inf"]<-NA
1754
1755       e_new <- (1/(nrow(NodeList)*(nrow(NodeList)-1)))*sum(colSums(dist, na.rm = TRUE))
1756
1757       efficiency$nodes[counter] <- NodeList$nodes[i]
1758       efficiency$connected_components[counter] <- ConComp_new$no
1759       efficiency$mean_distance[counter] <- mean_dist
1760       efficiency$efficiency[counter] <- e_new
1761
1762       rm(NodeList_new, EdgeList_new, g_new, ConComp_new, mean_dist, dist, e_new)
1763     }
1764   }
1765 }
1766 }
1767 }
1768
1769
1770 #Export to csv
1771 write.csv(efficiency, file="C:/Users/user/Desktop/efficiency_betweenness Centrality.csv")

```

**Σχήμα 22:** Υπολογισμός αποδοτικότητας των 20 κόμβων με την υψηλότερη betweenness centrality και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .csv (απόσπασμα από τον κώδικα R)

→ Το τελευταίο βήμα είναι ο υπολογισμός της κρισιμότητας των 20 κόμβων με την υψηλότερη closeness centrality και την υψηλότερη betweenness centrality. Δημιουργήθηκαν δύο κώδικες, ένας για τους κόμβους με την υψηλότερη closeness centrality και ένας για τους κόμβους με την υψηλότερη betweenness centrality. Και στους δύο κώδικες ακολουθείται η ίδια διαδικασία.

Η υλοποίηση των κωδικών πραγματοποιείται μέσω της διαδοχική αφαίρεσης των sections που είτε προέρχονται είτε καταλήγουν στον εκάστοτε κόμβο ενδιαφέροντος. Η κατάργηση των συγκεκριμένων sections γίνεται μέσω της εκχώρησης μίας Volume-Delay Function με υψηλό κόστος στη θέση της εκάστοτε υπάρχουσας VDF που αντιστοιχεί στο κάθε section του Aimsun. Στο τέλος του πειράματος και μετά την αποθήκευση του αρχείου .ang, επιστρέφεται σε κάθε section η αρχική του VDF. Η VDF με το υψηλό κόστος και το id του experiment παραμένουν ίδια με αυτά του κώδικα του Σχήματος 16 καθότι επιτελούν την ίδια λειτουργία. Επίσης, η συνολική διαδικασία εκτελέστηκε ξανά μέσω ενός κατάλληλα διαμορφωμένου αρχείου batch (.bat) και έπειτα πραγματοποιήθηκαν οι ίδιοι υπολογισμοί που αναφέρονται και στην υποενότητα 2.) (εξαγωγή αποτελεσμάτων από Aimsun σε πίνακες trips και time και εύρεση μεγεθών epsilon,

lambda και τελικά li) . Παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο κώδικες που κατασκευάστηκαν (στο Σχήμα 23 ο κώδικας για τους κόμβους με την υψηλότερη closeness centrality και στο Σχήμα 24 ο κώδικας για τους κόμβους με την υψηλότερη betweenness centrality).

```

2 import sys
3 from PyANGBasic import *
4 from PyANGKernel import *
5 from PyANGConsole import *
6 def main( argv ):
7     if len( argv ) < 5:
8         print ("Usage: aconsole -script %s ANG_FILE MATRIX_ID"%(argv[0]))
9         return -1
10    # Start a Console
11    console = ANGConsole()
12    # Load a network
13    if console.open( argv[1] ):
14        model = console.getModel()
15        print ("load network")
16        list_c = [[552138, 552188, 552190, 552156], [552272, 552276, 552274, 552194], [552192, 552194, 552198, 552188], [552190, 552196, 552166],
17        columnVDF = model.getColumn("GKSection:vdfAtt")
18        test=[]
19        a=[]
20        q=0
21        sections = list_c
22        for i,j in enumerate(sections): #i -> enumeration, j -> section
23            a.append(j)
24            for z, w in enumerate(a[i]): #z->enumeration, w-> section
25                section = model.getCatalog().find(w)
26                VDF_old = section.getDataValue(columnVDF)
27                test.append(VDF_old)
28                VDF_new = model.getCatalog().find(683546) # new vdf of the section with high cost (simulating the removal of the section)
29                VDF = section.setDataValueObject(columnVDF, VDF_new)
30                experiment = model.getCatalog().find(683515) # experiment id
31                experiment.getOutputPathAssignment().getPathAssignmentPath() # path assignment result
32                experiment.getOutputPathAssignment().setFolderPath("C:\\Users\\user\\Desktop\\closeness centrality\\")
33                experiment.getOutputPathAssignment().setFileName(str(i)+".apa")
34                GKSystem.getSystem().executeAction("execute", experiment, [], "") # execution of the experiment
35                x = console.save("C:\\Users\\user\\Desktop\\closeness centrality\\" + str(i) + ".ang")
36                for s, r in enumerate(a[i]):
37                    section = model.getCatalog().find(r)
38                    x = test[q][0]
39                    VDFold = model.getCatalog().find(x)
40                    VDF = section.setDataValueObject(columnVDF, VDFold)
41                    q=q+1
42            console.close()
43        else:
44            console.getLog().addError( "Cannot load the network" )
45            print ("cannot load network")
46    if __name__ == "__main__":
47        sys.exit(main(sys.argv))

```

Σχήμα 23: Διεξαγωγή προσομοίωσης και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .ang (απόσπασμα από τον κώδικα Python)

```

2 import sys
3 from PyANGBasic import *
4 from PyANGKernel import *
5 from PyANGConsole import *
6 def main(argv):
7     if len(argv) < 5:
8         print("Usage: aconsole -script %s ANG_FILE MATRIX_ID" % (argv[0]))
9         return -1
10    # Start a Console
11    console = ANGConsole()
12    # Load a network
13    if console.open(argv[1]):
14        model = console.getModel()
15        print("load network")
16        list_b = [[555244, 555242, 555254, 555256, 555250, 555252, 552434, 552432],
17                [376047, 551582, 551580, 554898, 554960, 554962], [381515, 554814, 551578, 551582, 551580],
18                [555252, 555250, 555258, 555260, 555262, 555264, 552440, 552438],
19                [555326, 555324, 555388, 678919, 555318, 678933], [555598, 555296, 555324, 555326, 554868],
20                [555264, 555262, 555314, 555294, 555292, 552452], [554896, 554898, 554900, 554904, 554902, 554894],
21                [555292, 555294, 555302, 678924, 555296, 555298], [551566, 552510, 554812, 551576, 551578, 551564],
22                [555048, 555050, 555052, 555044, 555046, 551702],
23                [555062, 555060, 555070, 555072, 555074, 555076, 555096, 551704],
24                [551432, 551430, 551438, 551552, 551554, 551550], [555046, 555044, 555058, 555060, 555062, 551688],
25                [552428, 552426, 552432, 552434, 552358, 552356, 552430],
26                [551364, 551362, 551428, 551430, 551432, 551384], [374463, 552780, 552782, 551832, 552778, 552776],
27                [552786, 552788, 552784, 552782, 552780, 374479, 374477],
28                [551416, 551418, 376001, 375999, 551412, 551414, 551410], [552336, 552338, 552340, 552342, 552324]]
29    columnVDF = model.getColumn("GKSSection:vdfAtt")
30    test = []
31    a = []
32    q = 0
33    sections = list_b
34    for i, j in enumerate(sections): # i -> enumeration, j -> section
35        a.append(j)
36        for z, w in enumerate(a[i]): # z->enumeration, w-> section
37            section = model.getCatalog().find(w) # find the section
38            VDF_old = section.getDataValue(columnVDF)
39            test.append(VDF_old)
40            VDF_new = model.getCatalog().find(683546) # new vdf of the section with high cost (simulating the removal of the section)
41            VDF = section.setDataValueObject(columnVDF, VDF_new)
42            experiment = model.getCatalog().find(683515) # experiment id
43            experiment.getOutputPathAssignment().getPathAssignmentPath() # path assignment result
44            experiment.getOutputPathAssignment().setFolderPath("C:\\Users\\user\\Desktop\\betweenness_centrality\\")
45            experiment.getOutputPathAssignment().setFileName(str(i) + ".apa")
46            GKSystem.getSystem().executeAction("execute", experiment, [], "") # execution of the experiment
47            x = console.save("C:\\Users\\user\\Desktop\\betweenness_centrality\\" + str(i) + ".ang")
48            for s, r in enumerate(a[i]):
49                section = model.getCatalog().find(r)
50                x = test[q][0]
51                VDFold = model.getCatalog().find(x)
52                VDF = section.setDataValueObject(columnVDF, VDFold)
53                q = q + 1
54    console.close()
55    else:
56        console.getLog().addError("Cannot load the network")
57        print("cannot load network")
58    if __name__ == "__main__":
59        sys.exit(main(sys.argv))

```

Σχήμα 24: Διεξαγωγή προσομοίωσης και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο .ang (απόσπασμα από τον κώδικα Python)

Τέλος, στο Σχήμα 25 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα στιγμιότυπο (του Windows command line) από την διαδικασία της προσομοίωσης στη διάρκεια ενός πειράματος για τους κόμβους με την υψηλότερη closeness centrality. Έτσι, γίνεται εμφανής η αξιοποίηση των αρχείων batch (.bat) που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις προσομοιώσεις για την ταχύτερη εκτέλεση των εντολών και για εξοικονόμηση χρόνου.

```
C:\WINDOWS\System32\cmd.exe
iteration" : 6,"rgap" : 0.488423},{ "iteration" : 7,"rgap" : 0.420431},{ "iteration" : 8,"rgap" : 0.358524},{ "iteration" : 9,"rgap" : 0.303977},{ "iteration" : 10,"rgap" : 0.307262},{ "iteration" : 11,"rgap" : 0.254671},{ "iteration" : 12,"rgap" : 0.250671},{ "iteration" : 13,"rgap" : 0.201415},{ "iteration" : 14,"rgap" : 0.204045},{ "iteration" : 15,"rgap" : 0.179281},{ "iteration" : 16,"rgap" : 0.170567},{ "iteration" : 17,"rgap" : 0.162058},{ "iteration" : 18,"rgap" : 0.159043},{ "iteration" : 19,"rgap" : 0.140544},{ "iteration" : 20,"rgap" : 0.120347},{ "iteration" : 21,"rgap" : 0.127577},{ "iteration" : 22,"rgap" : 0.107545},{ "iteration" : 23,"rgap" : 0.109707},{ "iteration" : 24,"rgap" : 0.122927},{ "iteration" : 25,"rgap" : 0.096106},{ "iteration" : 26,"rgap" : 0.090241},{ "iteration" : 27,"rgap" : 0.091228},{ "iteration" : 28,"rgap" : 0.088731},{ "iteration" : 29,"rgap" : 0.080272},{ "iteration" : 30,"rgap" : 0.085544},{ "iteration" : 31,"rgap" : 0.084400},{ "iteration" : 32,"rgap" : 0.073874},{ "iteration" : 33,"rgap" : 0.076219},{ "iteration" : 34,"rgap" : 0.080888},{ "iteration" : 35,"rgap" : 0.067004},{ "iteration" : 36,"rgap" : 0.074681},{ "iteration" : 37,"rgap" : 0.063912},{ "iteration" : 38,"rgap" : 0.089756},{ "iteration" : 39,"rgap" : 0.062335},{ "iteration" : 40,"rgap" : 0.064566},{ "iteration" : 41,"rgap" : 0.057126},{ "iteration" : 42,"rgap" : 0.070648},{ "iteration" : 43,"rgap" : 0.053685},{ "iteration" : 44,"rgap" : 0.055628},{ "iteration" : 45,"rgap" : 0.053838},{ "iteration" : 46,"rgap" : 0.058180},{ "iteration" : 47,"rgap" : 0.049945},{ "iteration" : 48,"rgap" : 0.059986},{ "iteration" : 49,"rgap" : 0.046574},{ "iteration" : 50,"rgap" : 0.067080}}
[2021-10-22 17:12:29.820] [info] Static Assignment Experiment 683515: Assignment time = 0 h 0 m 44 s.
[2021-10-22 17:12:29.820] [info] Static Assignment Experiment 683515: Static Traffic Assignment finished.
[2021-10-22 17:12:29.821] [info] Previous Storer Type: File
[2021-10-22 17:12:29.823] [info] New Storer Type: File
[2021-10-22 17:12:29.829] [info] START IO COMPRESSION
[2021-10-22 17:12:36.541] [info] END IO COMPRESSION
[2021-10-22 17:12:36.542] [info] Session Changes sinc last save NEW 0 MOD 9 DEL 0
[2021-10-22 17:12:36.564] [info] FILE SAVE took 6.74 s
[2021-10-22 17:12:36.598] [info] Document saved in file C:\Users\user\Desktop\RUNS_NEW_2\3.ang.
[2021-10-22 17:12:36.708] [info] Static Assignment Experiment 683515: Automatic database C:/Users/user/Desktop/RUNS_NEW_2/3.sqlite has been successfully created.
[2021-10-22 17:12:36.754] [info] DO A TRAFFIC ASSIGNMENT USING ENGINE FrankWolfe
[2021-10-22 17:12:36.755] [info] Static Assignment Experiment 683515: Static Traffic Assignment started.
[2021-10-22 17:12:37.231] [info] "C:/Users/user/AppData/Local/Temp/Aimsun Console.eSWaAh"
```

Σχήμα 25: Στιγμιότυπο από την διαδικασία της προσομοίωσης στη διάρκεια ενός πειράματος για τους κόμβους με την υψηλότερη closeness centrality (στιγμιότυπο από το Windows command line)

### **4.3 Αποτελέσματα**

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα στην Πλατφόρμα Προσομοίωσης Οδικού Δικτύου. Η στατιστική ανάλυση και μοντελοποίηση των μετρικών της ανθεκτικότητας περιλαμβάνει την προκαταρκτική στατιστική ανάλυση των μετρικών, τις προσπάθειες ομαδοποίησης που έγιναν για περαιτέρω εξέταση των αλληλεπιδράσεων των χρησιμοποιούμενων μετρικών και τη στατιστική ανάλυση που έγινε για την προσαρμογή μιας συνάρτησης που περιγράφει με τον καλύτερο τρόπο τη σχέση μεταξύ κρισιμότητας και αποτελεσματικότητας.

#### **4.3.1 Διαδοχική αφαίρεση συνδέσμων και προκαταρκτική στατιστική ανάλυση**

Το Σχήμα 26 απεικονίζει τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας για την αφαίρεση καθενός από τους συνδέσμους του γράφου  $G$ . Η τιμή  $E_i$  σχετίζεται άμεσα με τον εκάστοτε σύνδεσμο που αφαιρείται από το γράφο κατά την επαναληπτική μέθοδο. Παρόμοια, το Σχήμα 27 απεικονίζει την ευπάθεια του γράφου μετά την αφαίρεση κάθε συνδέσμου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τιμή της ευπάθειας  $V$  σχετίζεται άμεσα με τον σύνδεσμο που αφαιρείται από το γράφο σε κάθε επανάληψη, κατά την εφαρμογή της διαδικασίας.

Η υπόθεση που έγινε προηγουμένως, ότι δηλαδή οι τιμές της ευπάθειας θα είναι χαμηλές λόγω της αφαίρεσης μόνο ενός συνδέσμου ανά επανάληψη, είναι προφανής από το Σχήμα 27 και τον Πίνακα 4. Οι τιμές της αποδοτικότητας ανά επανάληψη  $E_i$  είναι κοντά στην τιμή  $E_0$  (τιμή της μέτρησης της αποδοτικότητας χωρίς την αφαίρεση οποιουδήποτε δομικού στοιχείου του γραφήματος  $G$ ) και οι τιμές τόσο της αποδοτικότητας όσο και της ευπάθειας έχουν χαμηλή διασπορά (low scattered) (Πίνακας 4). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις η ευπάθεια λαμβάνει αρνητικές τιμές. Το γεγονός αυτό είναι γνωστό ως παράδοξο Braess (Braess, 1968; Braess, Nagurney & Wakolbinger, 2005) και αποδεικνύει ότι η αφαίρεση συνδέσμων από το γράφο/δίκτυο μπορεί να βελτιώσει τη λειτουργική του απόδοση.



Σχήμα 26: Αποδοτικότητα μετά την αφαίρεση κάθε συνδέσμου από το γράφο  $G$



Σχήμα 27: Ευπάθεια μετά την αφαίρεση κάθε συνδέσμου από το γράφο G

Πίνακας 4: Προκαταρκτική στατιστική ανάλυση για την αποδοτικότητα και την ευπάθεια

Στατιστικές μετρήσεις	Αποδοτικότητα	Ευπάθεια
Μέση Τιμή	0,06790	0,00001
Τυπικό Σφάλμα	0,00000	0,00000
Διάμεσος	0,06791	0,00000
Τυπική Απόκλιση	0,00003	0,00003
Διακύμανση του Δείγματος	0,00000	0,00000
Κύρτωση	41,05449	41.05960
Λοξότητα	-4,53810	4,53839
Ελάχιστη Τιμή	0,06747	0,00000
Μέγιστη Τιμή	0,06792	0,00044
Επίπεδο εμπιστοσύνης (95,0 %)	0,00000	0,00000

Όσον αφορά την κεντρικότητα, το Σχήμα 28 απεικονίζει τον δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου (Network Component Importance index)  $l(g)$  για κάθε σύνδεσμο του δικτύου. Στη συνέχεια, ο Πίνακας 5 απεικονίζει τη διασπορά των τιμών του  $l(g)$ . Όπως και στην περίπτωση της



ευπάθειας, η αφαίρεση ορισμένων συνδέσεων φαίνεται πως βελτιώνει τη λειτουργική απόδοση του δικτύου (Braess, 1968; Braess, Nagurney & Wakolbinger, 2005). Όσον αφορά τις τιμές του δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου (Πίνακας 5) παρατηρείται ότι, οι τιμές που παρουσιάζονται είναι περισσότερο διεσπαρμένες σε σύγκριση με τις τιμές της μέτρησης αποδοτικότητας  $E_i$  και της ευπάθειας  $V$ .



Σχήμα 28: Δείκτης Σημασίας Στοιχείων Δικτύου για τον εσωτερικό δακτύλιο του αστικού οδικού δικτύου των Αθηνών

Πίνακας 5: Προκαταρκτική στατιστική ανάλυση για την κρισιμότητα

Στατιστικές μετρήσεις	Σημασία Στοιχείου Δικτύου
Μέση Τιμή	0,01600
Τυπικό Σφάλμα	0,00050
Διάμεσος	0,00839
Τυπική Απόκλιση	0,02336
Διακύμανση του Δείγματος	0,00055
Κύρτωση	8,49439
Λοξότητα	2,72759
Ελάχιστη Τιμή	-0,03987
Μέγιστη Τιμή	0,21563
Επίπεδο εμπιστοσύνης (95,0 %)	0,00097

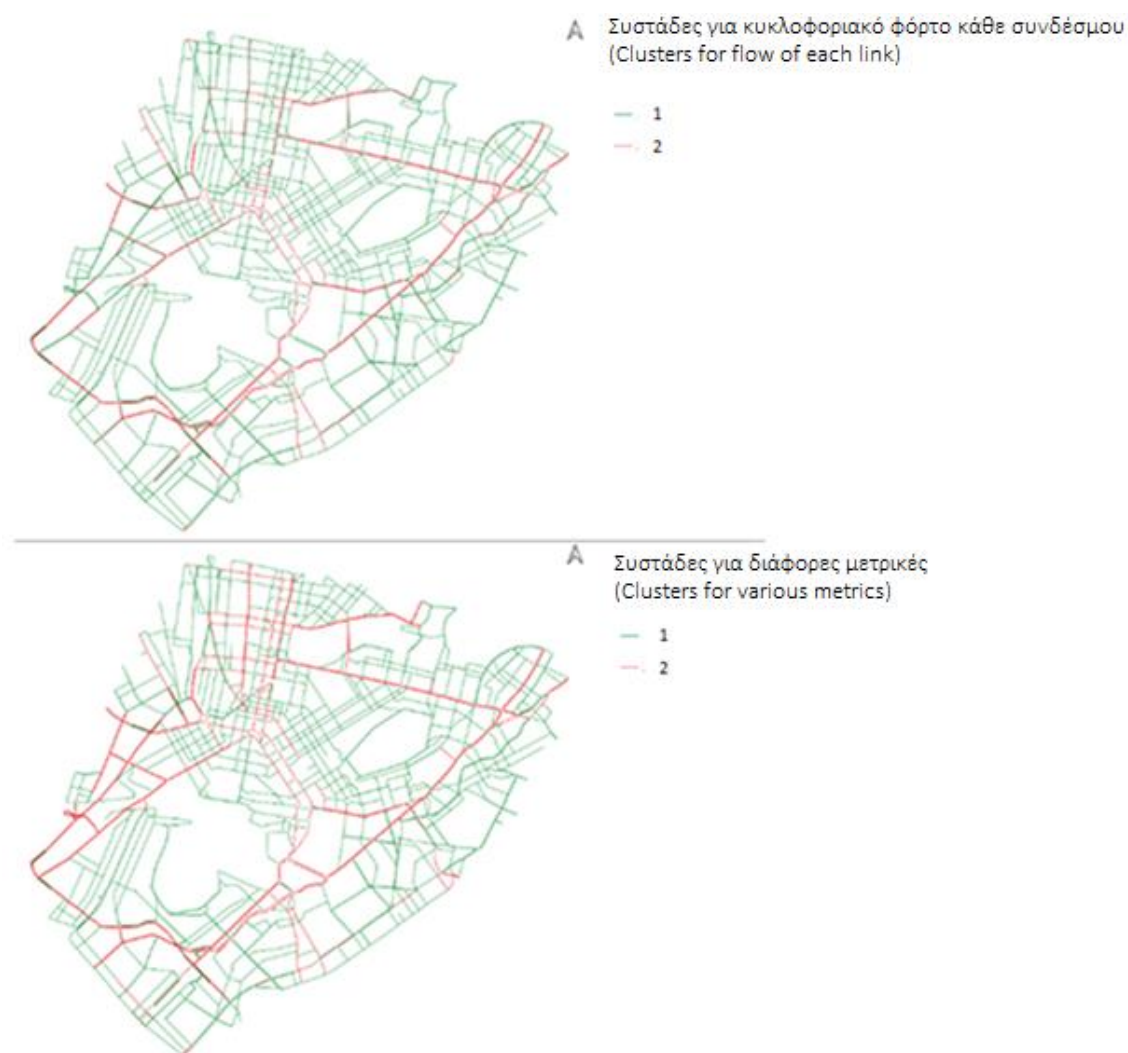
### 4.3.2 Ομαδοποίηση ανθεκτικότητας του δικτύου

Στη συγκεκριμένη ενότητα εξετάστηκε εάν η ομαδοποίηση του εσωτερικού δακτυλίου του αστικού οδικού δικτύου των Αθηνών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις τιμές των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Η ομαδοποίηση βασίζεται στον αλγόριθμο Hartigan-Wong k-means (Hartigan & Wong, 1979). Με βάση τη μέθοδο Elbow, ο βέλτιστος αριθμός ομάδων (clusters) που χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία είναι ίσος με δύο. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας ομαδοποίησης απεικονίζονται στο Σχήμα 29.



Σχήμα 29: Ομαδοποίηση του δικτύου με βάση τη μετρική της αποδοτικότητας (επάνω), την ευπάθεια (μέση) και τον δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου (κάτω)

Είναι προφανές από το Σχήμα 29 ότι δεν εμφανίζονται ουσιώδεις και σημαντικές συστάδες όταν χρησιμοποιούνται διακριτές μετρικές στη μεθοδολογία ομαδοποίησης k-means. Σε μια προσπάθεια εξαγωγής μιας σημαντικής ομαδοποίησης από τη μεθοδολογία ομαδοποίησης k-means, η αποδοτικότητα και ο δείκτης Σημασίας Στοιχείων Δικτύου μαζί με τη χωρητικότητα (capacity) και την ταχύτητα κάθε συνδέσμου του δικτύου τροφοδοτούνται στον αλγόριθμο ομαδοποίησης k-means. Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 30 μοιάζουν πολύ με την ομαδοποίηση που συμβαίνει όταν για κάθε σύνδεσμο του δικτύου τροφοδοτείται στον αλγόριθμο ομαδοποίησης k-means μόνο ο κυκλοφοριακός φόρτος. Μέσω των προαναφερθέντων είναι δυνατόν να παρουσιαστεί μια εικόνα για το πώς συσχετίζονται οι μετρικές και πώς ο συνδυασμός τους μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών όσον αφορά τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την επιχειρησιακή έρευνα.



**Σχήμα 30:** Ομαδοποίηση του δικτύου με βάση τον κυκλοφοριακό φόρτο κάθε συνδέσμου (πάνω) και την αποδοτικότητα, τον δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου, τη χωρητικότητα και την ταχύτητα (κάτω)

### **4.3.3 Συσχέτιση αποδοτικότητας και κρισιμότητας**

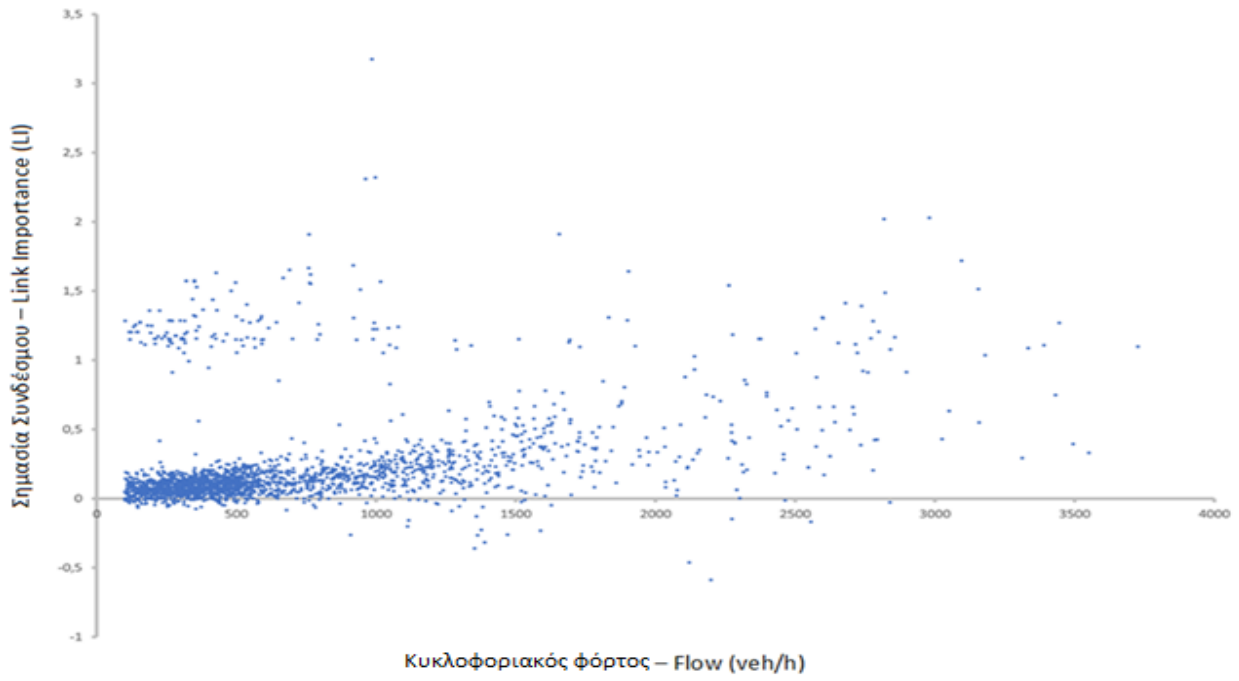
Η αποδοτικότητα και η κρισιμότητα δύναται να αλληλοσχετιστούν ως έννοιες. Η κρισιμότητα και πιο συγκεκριμένα ο δείκτης Σημασίας Στοιχείων Δικτύου, βασίζεται στον δείκτη αποδοτικότητας και ενσωματώνει στον ορισμό του ορισμένα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις μετακινήσεις (ζήτηση κίνησης/traffic demand). Επομένως, η ύπαρξη οποιασδήποτε πιθανής σύνδεσης μεταξύ αυτών των μετρικών στηρίζεται στην παραπάνω παρατήρηση. Για το σκοπό αυτό, γίνεται προσπάθεια οι δείκτες αποδοτικότητας και Σημασίας Στοιχείων Δικτύου να συσχετιστούν με τον κυκλοφοριακό φόρτο ενός συγκεκριμένου συνδέσμου του αστικού συγκοινωνιακού δικτύου, καθώς και με τη λειτουργική τάξη του.

Αρχικά, ο δείκτης Σημασίας Συνδέσμου (LI) ορίζεται ως ο λόγος του δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου και του δείκτη αποδοτικότητας:

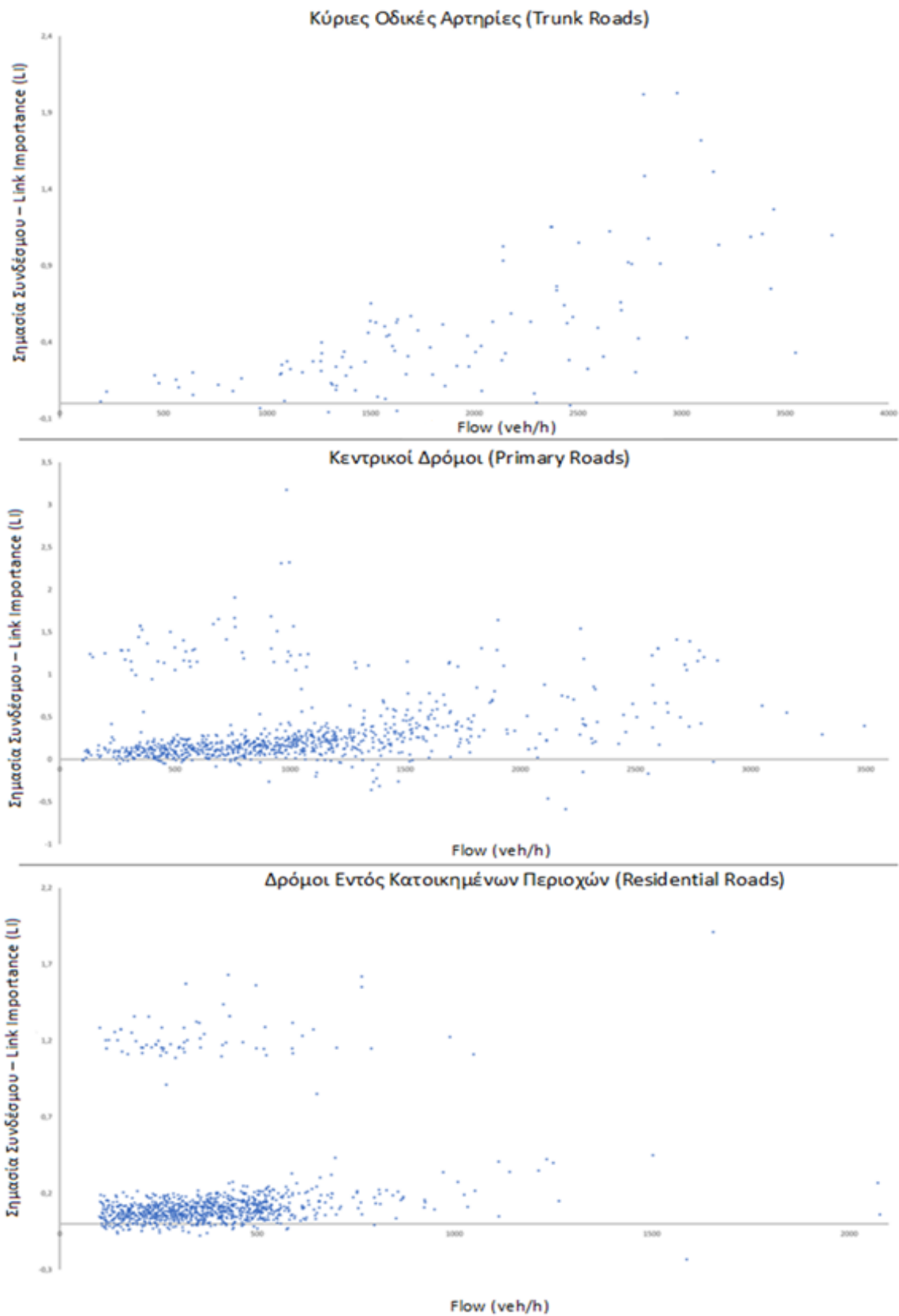
$$LI = \frac{l(g)}{E} \quad (8)$$

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4 και τον Πίνακα 5, η αποδοτικότητα είναι μια μετρική χαμηλής διασποράς (low scattered) ενώ ο δείκτης Σημασίας Στοιχείων Δικτύου έχει μεγαλύτερη διασπορά και υψηλότερες τιμές. Επομένως, καθώς το μέγεθος του LI αυξάνεται η σημασία του αφαιρεθέντος συνδέσμου/στοιχείου του γράφου μεγαλώνει και τελικά το δίκτυο γίνεται λιγότερο ανθεκτικό.

Το Σχήμα 31 απεικονίζει το διάγραμμα διασποράς του LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο κάθε συνδέσμου. Το Σχήμα 32 δείχνει την ίδια σχέση αλλά ανά λειτουργική κατηγορία του δικτύου. Οι λειτουργικές κατηγορίες που χρησιμοποιούνται είναι οι κύριες οδικές αρτηρίες (trunk roads), οι κεντρικοί δρόμοι (primary roads) και οι δρόμοι εντός κατοικημένων περιοχών (residential roads).



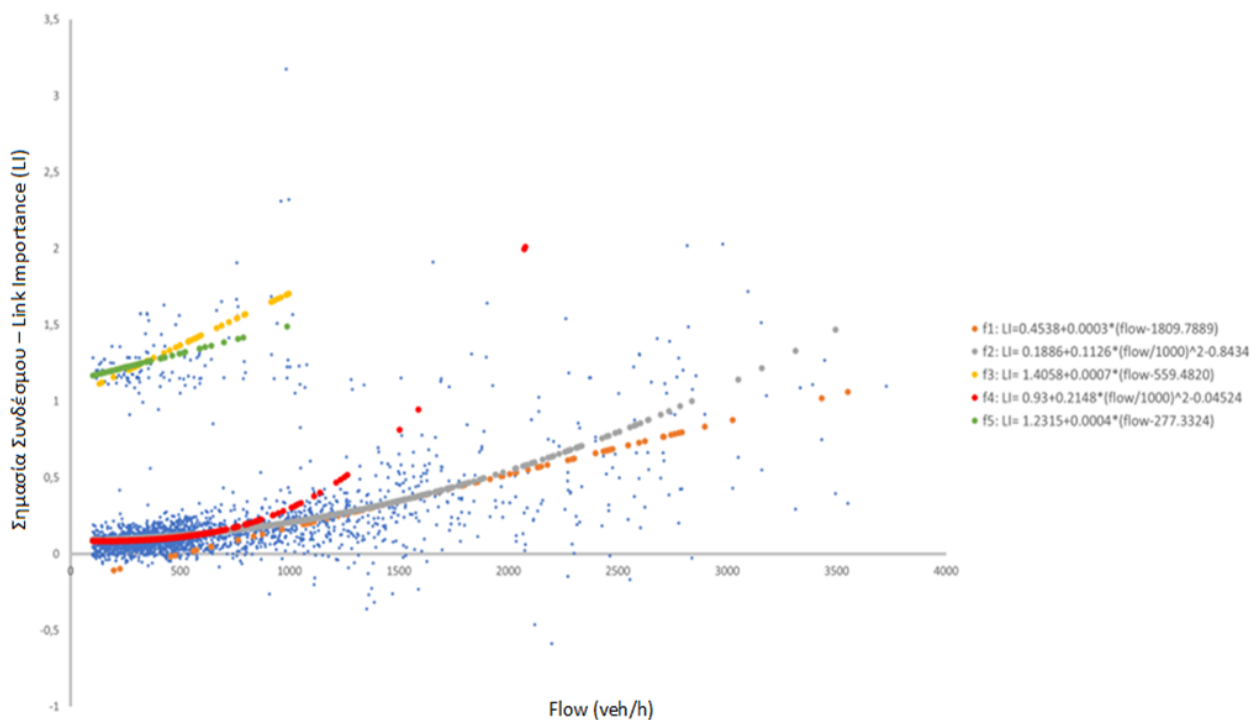
**Σχήμα 31: LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) για κάθε σύνδεσμο**



Σχήμα 32: LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) για κάθε σύνδεσμο ανά λειτουργική κλάση

Για συνδέσμους που κατηγοριοποιούνται ως κύριες οδικές αρτηρίες (trunk roads), δεν απαιτείται περαιτέρω ομαδοποίηση για την εξέταση της σχέσης μεταξύ LI και κυκλοφοριακού φόρτου. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει και για τους συνδέσμους που κατηγοριοποιούνται ως κεντρικοί δρόμοι (primary roads) και δρόμοι εντός κατοικημένων περιοχών (residential roads). Για καθεμία από αυτές τις λειτουργικές τάξεις εμφανίζονται δύο συστάδες. Οι εν λόγω συστάδες προσδιορίζονται με βάση τις τιμές LI και κυκλοφοριακού φόρτου. Σχετικά με το LI, η ομαδοποίηση συμβαίνει για τιμές  $LI < 1$  και για  $LI > 1$ . Επίσης, ιδιαίτερη σημασία έχει η τιμή  $LI = 1$ , η οποία σημαίνει ότι ο αλγόριθμος εκχώρησης διαδρομής (Path Assignment algorithm) δίνει το ίδιο αποτέλεσμα με έναν απλό αλγόριθμο συντομότερης διαδρομής (shortest path algorithm), επομένως η ζήτηση του δικτύου είναι πολύ χαμηλή. Όμως, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στα αστικά οδικά δίκτυα. Όσον αφορά τον κυκλοφοριακό φόρτο, η ομαδοποίηση πραγματοποιείται για φόρτο  $< 1000$  και φόρτο  $> 1000$ . Παράλληλα, η τιμή φόρτος = 1000 είναι σημαίνουσα καθότι για τιμές κυκλοφοριακού φόρτου μεγαλύτερες από 1000 αρχίζει να εμφανίζεται συμφόρηση στους συνδέσμους του δικτύου.

Οι συναρτήσεις που εκφράζουν καλύτερα τη σχέση μεταξύ LI και κυκλοφοριακού φόρτου, ανά λειτουργική κλάση για τους συνδέσμους του δικτύου, απεικονίζονται στο Σχήμα 33.



**Σχήμα 33:** Συναρτήσεις που εκφράζουν το LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) για κάθε σύνδεσμο ανά λειτουργική κλάση

Παρατίθενται πέντε συναρτήσεις για τις λειτουργικές τάξεις των συνδέσμων του εσωτερικού δακτυλίου του αστικού οδικού δικτύου των Αθηνών. Οι εν λόγω συναρτήσεις παρουσιάζονται στις Εξισώσεις 9 – 13. Η στατιστική ανάλυση αυτών των συναρτήσεων πραγματοποιείται στον Πίνακα 6.

$$f1: LI = 0.4538 + 0.0003 * (flow - 1809.7889) \quad (9)$$

$$f2: LI = 0.1886 + 0.1126 * \left(\frac{flow}{1000}\right)^2 - 0.8434 \quad (10)$$

$$f3: LI = 1.4058 + 0.0007 * (flow - 559.4820) \quad (11)$$

$$f4: LI = 0.93 + 0.2148 * \left(\frac{flow}{1000}\right)^2 - 0.04524 \quad (12)$$

$$f5: LI = 1.2315 + 0.0004 * (flow - 277.3324) \quad (13)$$

**Πίνακας 6: Έλεγχος καλής προσαρμογής (goodness of fit) των εξισώσεων 9–13**

Στατιστικές μετρήσεις	Εξίσωση 9	Εξίσωση 10	Εξίσωση 11	Εξίσωση 12	Εξίσωση 13
Υπολειπόμενο df (Residual df)	93	782	40	819	56
Παράμετρος κλίμακας	0,0827	0,0261	0,1130	0,0065	0,01437
Απόκλιση	7,6895	20,4195	4,5188	5,3048	0,8049
Pearson	7,6895	20,4195	4,5188	5,3048	0,8049
(1/ df) Απόκλιση	0,08268	0,0261	0,1130	0,0065	0,0144
(1/ df) Pearson	0,0827	0,0261	0,1130	0,0065	0,0144
AIC	0,3660	-0,8049	0,7037	-2.1979	-1,3706
Πιθανότητα καταγραφής (Log likelihood)	-15,3832	317,5354	-12,7774	906.3552	41,7472
BIC	-415,8210	-5191.1480	-144,9880	-5491.6110	-226,5799

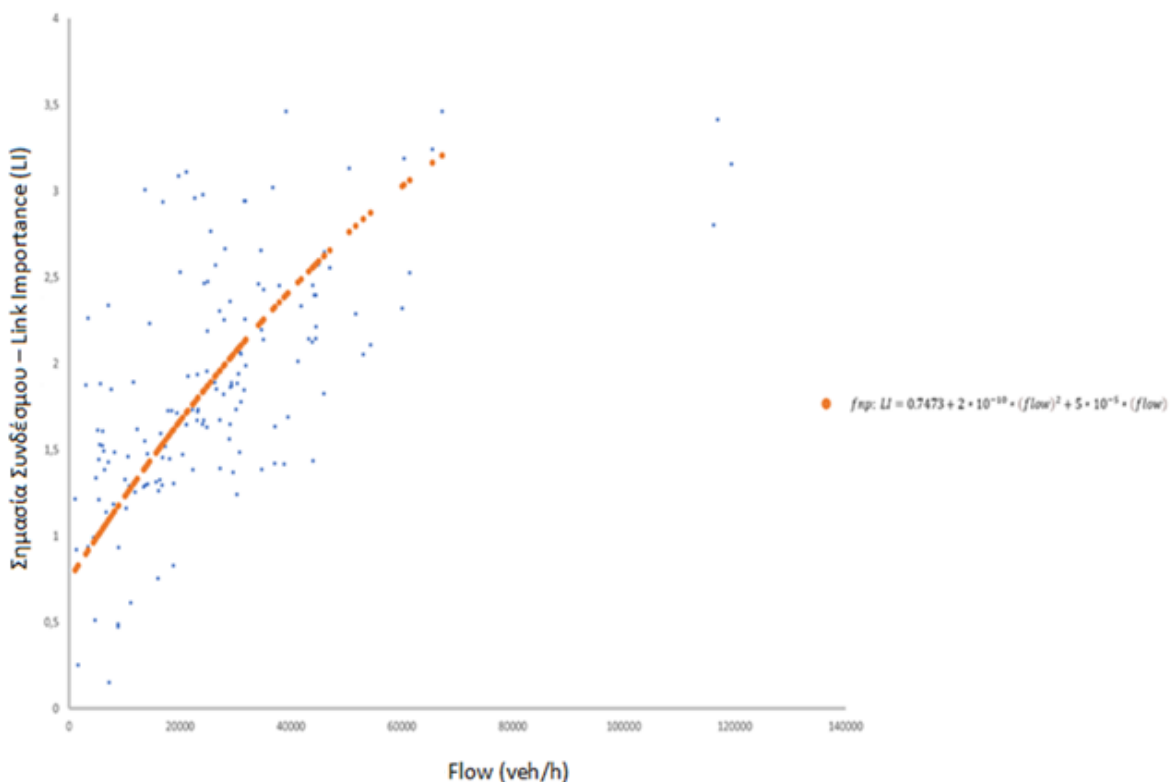
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε μία από τις εξισώσεις αντιστοιχεί σε μία από τις συστάδες που ορίζονται μέσω των Σχημάτων 30 και 31. Η εξίσωση 9 αντιστοιχεί σε συνδέσμους που κατηγοριοποιούνται ως κύριες οδικές αρτηρίες με  $LI < 1$ . Δεν υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με τον κυκλοφοριακό φόρτο για συνδέσμους που χαρακτηρίζονται ως κύριες οδικές αρτηρίες. Οι εξισώσεις 10 και 11 αναφέρονται σε συνδέσμους που χαρακτηρίζονται ως κεντρικοί δρόμοι. Η εξίσωση 10 αναφέρεται σε  $LI < 1$  χωρίς περιορισμούς για τον κυκλοφοριακό φόρτο και η εξίσωση 11 αναφέρεται σε  $LI > 1$  και  $\text{φόρτο} < 1000$ . Οι δύο τελευταίες εξισώσεις (Εξισώσεις 12 και 13) αναφέρονται σε συνδέσμους που χαρακτηρίζονται ως δρόμοι εντός κατοικημένων περιοχών. Πιο συγκεκριμένα, η εξίσωση 12 αντιστοιχεί σε  $LI < 1$  και η εξίσωση 13 σε  $LI > 1$  και  $\text{φόρτο} < 1000$ .



#### 4.3.4 Συσχέτιση μεταξύ LI και Κυκλοφοριακού φόρτου

Ως επόμενο βήμα στην εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου, ο ίδιος τύπος ανάλυσης έχει εφαρμοστεί για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ LI και κυκλοφοριακού φόρτου μετά από μια διαδικασία Διαδοχικής Αφαίρεσης Δομικών Στοιχείων. Για το σκοπό αυτό, οι διαδρομές και οι κόμβοι Προέλευσης - Προορισμού (OD) αφαιρούνται από το δίκτυο. Όσον αφορά τις διαδρομές OD, αφαιρούνται οι είκοσι με τη μεγαλύτερη ζήτηση, σύμφωνα με τον πίνακα OD. Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση, αφαιρούνται επίσης οι είκοσι κόμβοι με την υψηλότερη κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) και οι είκοσι κόμβοι με την υψηλότερη κεντρικότητα ενδιάμεσότητας (betweenness centrality).

Σχετικά με τη διαδοχική αφαίρεση των διαδρομών, τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι υπάρχει σχέση μεταξύ του LI και του κυκλοφοριακού φόρτου. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί κατηγοριοποίηση, σε αντίθεση με αυτό που ισχύει για τη σχέση LI και κυκλοφοριακού φόρτου στη διαδικασία Διαδοχικής Αφαίρεσης Συνδέσμων. Στο Σχήμα 34 απεικονίζονται τα σημεία διασποράς, καθώς και η συνάρτηση που εκφράζει τη σχέση μεταξύ LI και κυκλοφοριακού φόρτου για την περίπτωση της Διαδοχικής Αφαίρεσης Συνδέσμων.

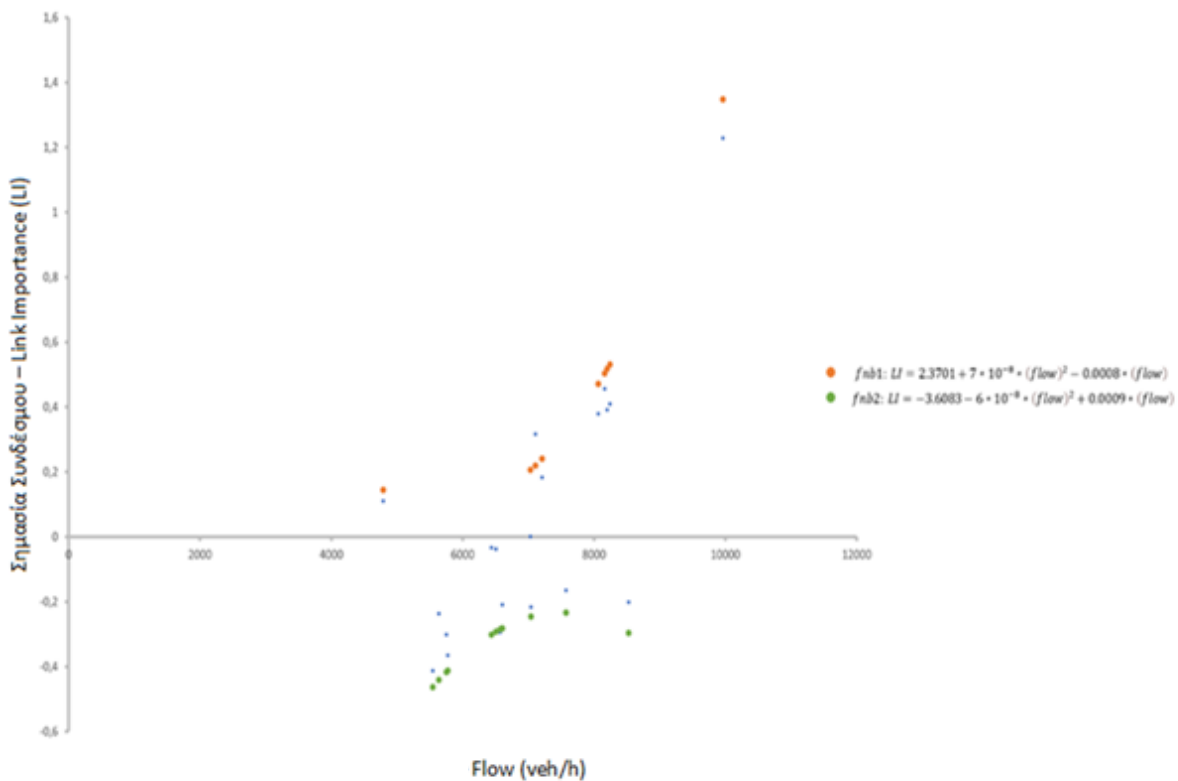


Σχήμα 34: Συνάρτηση που εκφράζει το LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) κάθε διαδρομής

Η συνάρτηση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ LI και κυκλοφοριακού φόρτου για αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στην Εξίσωση 14.

$$fnp: LI = 0.7473 + 2 \cdot 10^{-10} \cdot (flow)^2 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot (flow) \quad (14)$$

Στη συνέχεια, όσον αφορά την Διαδοχική Αφαίρεση Κόμβων, οι πρώτοι είκοσι κόμβοι με την υψηλότερη κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) και κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) αφαιρούνται από το δίκτυο. Η διαδικασία της αφαίρεσης των κόμβων διαφοροποιείται από αυτή των συνδέσμων και των διαδρομών, καθότι αν αφαιρεθεί εντελώς ένας κόμβος καταργείται η δομική ακεραιότητα του γράφου. Συνεπώς, για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, η αφαίρεση των κόμβων πραγματοποιείται τελικά, αφαιρώντας όλους τους συνδέσμους που είτε προέρχονται είτε καταλήγουν στον εκάστοτε κόμβο ενδιαφέροντος. Παράλληλα, για τους κόμβους με υψηλή κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) φαίνεται πως δημιουργείται μια σχέση ανάμεσα στο LI και τον κυκλοφοριακό φόρτο. Είναι επίσης ενδιαφέρον ότι, σε αντίθεση με την περίπτωση των διαδρομών OD, η αφαίρεση κόμβων με υψηλή κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) δεν οδηγεί πάντα σε πτώση απόδοσης στο δίκτυο. Επομένως, εμφανίζονται δύο συστάδες: μία για  $LI > 0$  και μία για  $LI < 0$ . Τα σημεία διασποράς και οι συναρτήσεις για κάθε συστάδα απεικονίζονται στο Σχήμα 35.



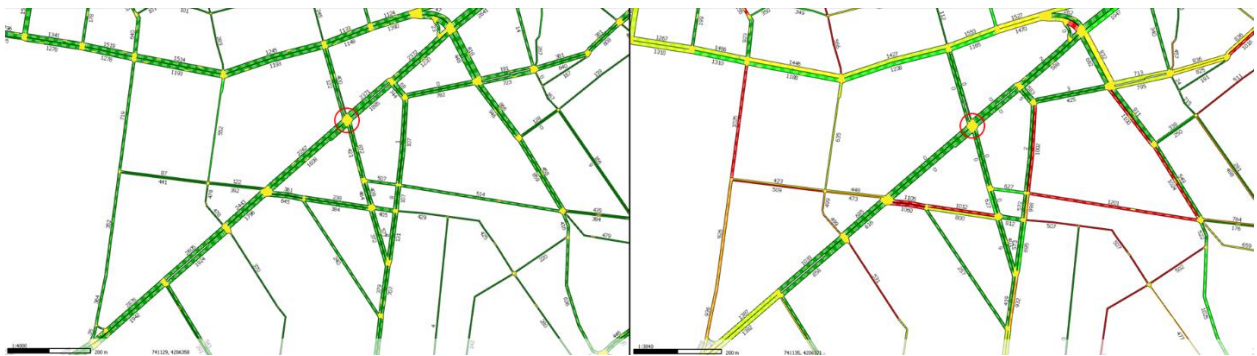
**Σχήμα 35: Συναρτήσεις που εκφράζουν το LI σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο συνδέσμου (veh /h) για κόμβους με υψηλή κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality)**

Η συνάρτηση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ LI και κυκλοφοριακού φόρτου για την συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στις Εξισώσεις 15 και 16. Η Εξίσωση 15 εφαρμόζεται όταν  $LI > 0$  και η Εξίσωση 16 όταν  $LI < 0$ .

$$f_{nb1}: LI = 2.3701 + 7 * 10^{-8} * (flow)^2 - 0.0008 * (flow) \quad (15)$$

$$f_{nb2}: LI = -3.6083 - 6 * 10^{-8} * (flow)^2 + 0.0009 * (flow) \quad (16)$$

Σχετικά με τις περιπτώσεις όπου  $LI < 0$ , επισημαίνεται πως το αποτέλεσμα αυτό προέρχεται από το γεγονός ότι παρά την υψηλή κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) αυτών των κόμβων, ο αλγόριθμος Εκχώρησης Διαδρομής εκτρέπει την κυκλοφορία στην γύρω τους περιοχή. Με βάση αυτή την πληροφορία και σε συνδυασμό με τη φύση του δοκιμαστικού δικτύου της Αθήνας (αστικό οδικό δίκτυο) αλλά και τη μέτρια αναλογία Χωρητικότητας Κυκλοφοριακού Φόρτου (Volume Capacity) στο δίκτυο, είναι δυνατόν να δικαιολογηθεί η αρνητική LI. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 36) απεικονίζεται ο Εκχωρημένος Κυκλοφοριακός Φόρτος (Assigned Volume) για έναν συγκεκριμένο κόμβο με υψηλή κεντρικότητα ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) και  $LI < 0$ .



**Σχήμα 36:** Εκχωρημένος Κυκλοφοριακός Φόρτος (Assigned Volume) υπό κανονικές συνθήκες (αριστερά) και μετά από αφαίρεση κόμβου (δεξιά)

Όσον αφορά την Διαδοχική Αφαίρεση Κόμβων για τους είκοσι κόμβους με την υψηλότερη κεντρικότητα εγγύτητας, δεν έχει εντοπιστεί σημαντική συσχέτιση μεταξύ LI και κυκλοφοριακού φόρτου. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο, ότι σε όλες τις περιπτώσεις το LI είναι αρνητικό. Αυτό οφείλεται στον προσδιορισμό πολλών εναλλακτικών διαδρομών από τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο Εκχώρησης Διαδρομής.



## **5. Συμπεράσματα και προτάσεις**

### **5.1 Εισαγωγή**

Λόγω της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των συστημάτων μεταφορών η ανάγκη για έλεγχο και παρακολούθηση των διάφορων επιμέρους στοιχείων τους είναι πρόδηλη. Ένας από τους σημαντικότερους τρόπους αξιολόγησης των συστημάτων αυτών είναι μέσω της ανθεκτικότητας. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία είχε ως γενικό αντικείμενο μελέτης τις μετρικές της ανθεκτικότητας και το πως αυτές συνδέονται και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω έρευνα είχε ως στόχο τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της αποδοτικότητας, της ευπάθειας και της κρισιμότητας σε ένα πραγματικό αστικό οδικό δίκτυο. Για το σκοπό αυτό, μια σειρά από πειράματα σχεδιάστηκαν και εφαρμόστηκαν στην Πλατφόρμα Προσομοίωσης Οδικού Δικτύου που αποτελείται τόσο από το μακροσκοπικό οδικό δίκτυο όσο και από τον κατευθυνόμενο γράφο του αστικού οδικού δικτύου του κέντρου της Αθήνας. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση των εν λόγω πειραμάτων ήταν η επαναληπτική αφαίρεση συνδέσμων από το δίκτυο και έπειτα ο υπολογισμός των εκάστοτε μετρικών. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν ερμηνεύθηκαν στατιστικά.

## **5.2 Βασικά συμπεράσματα**

Η εκτενής έρευνα που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι η αποδοτικότητα και η ευπάθεια έχουν χαμηλότερη διασπορά (lower scattered) σε σύγκριση με την κρισιμότητα και επίσης ότι οι τιμές τους είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με την κρισιμότητα (ειδικά όταν λαμβάνεται υπόψη η ευπάθεια). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην προκαταρκτική ανάλυση υπήρξαν και κάποιες αρνητικές τιμές ευπάθειας, γεγονός το οποίο είναι γνωστό ως Παράδοξο Braess (Braess Paradox).

Κατόπιν, μέσω της χρήσης μίας μεθοδολογίας ομαδοποίησης βασισμένης στον αλγόριθμο ομαδοποίησης k-means, παρατηρήθηκε ότι η σύνδεση μεταξύ αποτελεσματικότητας, ευπάθειας και κρισιμότητας είναι ιδιαίτερα περίπλοκη. Παράλληλα, ευρέθηκε πως είναι δυνατόν να προσεγγιστεί ακόμα περισσότερο η συσχέτιση των προαναφερθέντων μετρικών διά της ενσωμάτωσης κάποιων μεταβλητών που σχετίζονται με τις μεταφορές, όπως είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος και η χωρητικότητα. Επιπρόσθετα, η κοινή εξέταση της κρισιμότητας και της αποδοτικότητας κατέδειξε την ύπαρξη μίας πολυωνυμικής σχέσης μεταξύ του λόγου του δείκτη Σημασίας Στοιχείου Δικτύου και του δείκτη αποδοτικότητας (δείκτης Σημασίας Συνδέσμου) και του κυκλοφοριακού φόρτου κάθε συνδέσμου του δικτύου.

### **5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Για την βαθύτερη διερεύνηση των θεμάτων που εξετάζει η συγκεκριμένη εργασία θα ήταν ορθό να μελετηθούν περαιτέρω κάποια σημαντικά σημεία.

#### **Εφαρμογή της μεθοδολογίας και σε άλλα δίκτυα**

Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην εφαρμογή της μεθοδολογικής προσέγγισης και των ευρημάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας σε άλλα αστικά οδικά δίκτυα. Αυτό θα οδηγήσει τόσο στην ανάπτυξη του διαθέσιμου συνόλου δεδομένων με πληροφορίες που θα αφορούν την αποδοτικότητα, την ευπάθεια και την κρισιμότητα διαφόρων αστικών οδικών δικτύων, όσο και στην εξέταση των προγνωστικών τιμών των συναρτήσεων που παρουσιάζονται σε αυτήν την έρευνα.

#### **Διερεύνηση περισσότερων μεταβλητών και μετρικών**

Οι ερευνητές που επιθυμούν να καταπιαστούν με τα εν λόγω ζητήματα θα μπορούσαν να καταβάλουν προσπάθεια για τη διερεύνηση άλλων πιθανών μεταβλητών που μπορεί να οδηγήσουν σε πιο σημαντικά αποτελέσματα. Επιπλέον, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η ανάλυση και άλλων μετρικών αλλά και η εκτενέστερη μελέτη των προτεινόμενων συναρτήσεων, προκειμένου να ευρεθεί μία καθολική και πλήρως εφαρμόσιμη μέτρηση για την ανθεκτικότητα.

#### **Αξιοποίηση των αποτελεσμάτων σε πραγματικές συνθήκες**

Ένας ακόμη τομέας που θα ήταν δυνατόν να επεκταθεί η συγκεκριμένη μελέτη είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο θα μπορούσαν να εφαρμοστούν οι πληροφορίες που ευρέθησαν σε πραγματικές συνθήκες. Δηλαδή, οι βελτιώσεις και οι διαφοροποιήσεις που θα πραγματοποιούνταν σε διάφορους τομείς των αστικών οδικών δικτύων όπως είναι η εφαρμογή κυκλοφοριακών ρυθμίσεων, η εκτροπή της κυκλοφορίας, η σήμανση κλπ. μέσω της χρησιμοποίησης των αποτελεσμάτων της εργασίας.





## **Βιβλιογραφία**

- Abdulla, B., & Birgisson, B. (2020). Characterization of vulnerability of road networks to random and nonrandom disruptions using network percolation approach. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000938](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000938)
- Ahmed, S., & Dey, K. (2020). Resilience modeling concepts in transportation systems: a comprehensive review based on mode, and modeling techniques. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s43065-020-00008-9>
- Aimsun Next 20 User's Manual, Aimsun Next Version 20.0.3*. Aimsun, Barcelona, Spain. <qthelp://aimsun.com.aimsun.20.0/doc/UsersManual/Intro.html>. Accessed Jun. 25, 2021
- Almotahari, A., & Yazici, A. (2020a). Practice friendly metric for identification of critical links in road networks. *Transportation Research Record*, 2674(8), 219–229. <https://doi.org/10.1177/0361198120925475>
- Almotahari, A., & Yazici, A. (2020b). Impact of topology and congestion on link criticality rankings in transportation networks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102529. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102529>
- Almotahari, A., & Yazici, A. (2021). A computationally efficient metric for identification of critical links in large transportation networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 209, 107458. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107458>
- Ayyub, B. M. (2020). Infrastructure Resilience and Sustainability: Definitions and relationships. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 6(3). <https://doi.org/10.1061/ajrua6.0001067>
- Balakrishnan, S., Zhang, Z., Machemehl, R. B., & Murphy, M. R. (2020). Mapping resilience of Houston freeway network during Hurricane Harvey using extreme travel time metrics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47, 101565. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101565>
- Baroud, H., Barker, K., Ramírez-Márquez, J. E., & Rocco, M. S. C. (2014a). Importance measures for inland waterway network resilience. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.11.010>
- Baroud, H., Ramírez-Márquez, J. E., Barker, K., & Rocco, C. M. (2014b). Stochastic measures of network resilience: applications to waterway commodity flows. *Risk Analysis*, 34(7), 1317–1335. <https://doi.org/10.1111/risa.12175>
- Berche, B., Von Ferber, C., Holovatch, T., & Holovatch, Y. (2009). Resilience of public transport networks against attacks. *The European Physical Journal B*, 71(1), 125–137. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2009-00291-3>
- Braess, D. (1968). Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. *ZOR. Zeitschrift Für Operations-Research*, 12(1), 258–268. <https://doi.org/10.1007/bf01918335>

- Braess, D., Nagurney, A., & Wakolbinger, T. (2005). On a paradox of traffic planning. *Transportation Science*, 39(4), 446–450. <https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0127>
- Brandes, U. (2001). A faster algorithm for betweenness centrality\*. *Journal of Mathematical Sociology*, 25(2), 163–177. <https://doi.org/10.1080/0022250x.2001.9990249>
- Chen, L., & Miller-Hooks, E. (2012). Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport. *Transportation Science*, 46(1), 109–123. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0376>
- Chen, M., & Lu, H. (2020). Analysis of Transportation Network Vulnerability and Resilience within an Urban Agglomeration: Case Study of the Greater Bay Area, China. *Sustainability*, 12(18), 7410. <https://doi.org/10.3390/su12187410>
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 32(11), 3639–3649. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008>
- Dick, K., Russell, L., Souley Dosso, Y., Kwamena, F., and Green, J. R. (2019). Deep learning for critical infrastructure resilience. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.000047](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.000047)
- Faturechi, R., & Miller-Hooks, E. (2014). Travel time resilience of roadway networks under disaster. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 47–64. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.08.007>
- Francis, R. A., & Bekera, B. B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.07.004>
- Freckleton, D., Heaslip, K., Louisell, W., & Collura, J. (2012). Evaluation of Resiliency of Transportation Networks after Disasters. *Transportation Research Record*, 2284(1), 109–116. <https://doi.org/10.3141/2284-13>
- Freeman, L. C. (1978). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), 215–239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
- Gonçalves, L. a. P. J., & Ribeiro, P. (2020). Resilience of urban transportation systems. *Concept, characteristics, and methods. Journal of Transport Geography*, 85, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102727>
- Guze, S. (2019). Graph Theory Approach to the Vulnerability of Transportation Networks. *Algorithms*, 12(12), 270. <https://doi.org/10.3390/a12120270>
- Hartigan, J., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 28(1), 100. <https://doi.org/10.2307/2346830>
- Henry, D., & Ramírez-Márquez, J. E. (2012). Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.09.002>

- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Hu, M., & Bhouri, N. (2020). Evaluation of Resilience Indicators for Public Transportation Networks by the Grey Relational Analysis. *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. <https://doi.org/10.1109/itsc45102.2020.9294628>
- Hua, W., & Ong, G. B. (2017). Network survivability and recoverability in urban rail transit systems under disruption. *Intelligent Transport Systems*, 11(10), 641–648. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2017.0102>
- Ivanov, D., Sokolov, B., & Dolgui, A. (2013). The Ripple effect in supply chains: trade-off ‘efficiency-flexibility-resilience’ in disruption management. *International Journal of Production Research*, 52(7), 2154–2172. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.858836>
- Jafino, B. A., Kwakkel, J. H., & Verbraeck, A. (2019). Transport network criticality metrics: a comparative analysis and a guideline for selection. *Transport Reviews*, 40(2), 241–264. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1703843>
- Jenelius, E., & Mattsson, L. (2020). Resilience of transport systems. In Elsevier eBooks (pp. 258–267). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102671-7.10719-5>
- Jenelius, E., Petersen, T., & Mattsson, L. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(7), 537–560. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.11.003>
- Jian, L., & Özbay, K. (2012). Evaluation of link Criticality for Day-to-Day Degradable Transportation Networks. *Transportation Research Record*, 2284(1), 117–124. <https://doi.org/10.3141/2284-14>
- Jin, J. G., Tang, L. C., Sun, L., & Lee, D. (2014). Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 63, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.01.002>
- Kammouh, O., Cardoni, A., Marasco, S., Cimellaro, G. P., & Mahin, S. A. (2019). Resilience Assessment of City-Scale transportation networks using Monte Carlo Simulation. In *CRC Press eBooks* (pp. 1902–1910). <https://doi.org/10.1201/9781315189390-259>
- Kasmalkar, I., Serafin, K. A., Yu, M., Bick, I. A., Ortolano, L., Ouyang, D., & Suckale, J. (2020). When floods hit the road: Resilience to flood-related traffic disruption in the San Francisco Bay Area and beyond. *Science Advances*, 6(32). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2423>
- Keogh, M., & Cody, C. (2013). Resilience in regulated utilities. *National Association of Regulatory Utility Commissioners*. Washington DC, November. Accessible at: [www.naruc.org/Grants/Documents/Resilience% 20in% 20Regulated% 20Utilities% 20ONLINE% 2011\\_12. pdf](http://www.naruc.org/Grants/Documents/Resilience%20in%20Regulated%20Utilities%20ONLINE%2011_12.pdf).

- Kermanshachi, S., & Rouhanizadeh, B. (2018). Feasibility analysis of post disaster reconstruction alternatives using automated BIM-based construction cost estimation tool. In *Proceeding of CSCE 6th International Disaster Mitigation Specialty Conference, Montreal: Canadian Society of Civil Engineering, June 13-16, 2018*
- Khaghani, F., & Jazizadeh, F. (2020). MD-Resilience: A Multi-Dimensional Approach for Resilience-Based Performance Assessment in urban transportation. *Sustainability*, 12(12), 4879. <https://doi.org/10.3390/su12124879>
- Kim, Y., Chen, Y. S., & Linderman, K. (2014). Supply network disruption and resilience: A network structural perspective. *Journal of Operations Management*, 33–34(1), 43–59. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.10.006>
- Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of Small-World networks. *Physical Review Letters*, 87(19). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.87.198701>
- Leobons, C. M., Campos, V. B. G., & De Mello Bandeira, R. A. (2019). Assessing Urban Transportation Systems Resilience: A Proposal of Indicators. *Transportation Research Procedia*, 37, 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.199>
- Li, C., Qi, F., Ding, L., Cho, Y., & Chen, K. (2020). Time-dependent resilience analysis of a road network in an extreme environment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85, 102395. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102395>
- Liao, T. W., Hu, T., & Ko, Y. N. (2018). A resilience optimization model for transportation networks under disasters. *Natural Hazards*, 93(1), 469–489. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3310-3>
- Liu, Y., McNeil, S., Hackl, J., & Adey, B. T. (2019). Prioritizing transportation network recovery using a resilience measure. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 7(1), 70–81. <https://doi.org/10.1080/23789689.2019.1708180>
- Mahajan, K., & Kim, A. (2020). Vulnerability assessment of Alberta’s provincial highway network. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100171. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100171>
- Mao, X., Zhou, J., Cao, Y., & Liú, D. (2021). Resilience-Based optimization of postdisaster restoration strategy for road networks. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/8871876>
- Mattsson, L., & Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>
- Miller-Hooks, E., Zhang, X., & Faturechi, R. (2012). Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks. *Computers & Operations Research*, 39(7), 1633–1643. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.017>

- Mitsakis, E., Salanova, J.M., Stamos, I., Chaniotakis, E. (2015). Network Criticality and Network Complexity Indicators for the Assessment of Critical Infrastructures During Disasters. In: *Kotsireas, I., Nagurney, A., Pardalos, P. (eds) Dynamics of Disasters—Key Concepts, Models, Algorithms, and Insights. DOD 2015 2016. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 185*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43709-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43709-5_10)
- Mitsakis, E., Stamos, I., Papanikolaou, A., Aifadopoulou, G., & Kontoes, H. (2014). Assessment of extreme weather events on transport networks: case study of the 2007 wildfires in Peloponnesus. *Natural Hazards*, 72(1), 87–107. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0896-3>
- Morshed, S. A., Arafat, M., Ahmed, A. U., & Saha, R. (2020). Discovering the commuters' assessments on disaster resilience of transportation infrastructure. *International Conference on Transportation and Development 2020*. <https://doi.org/10.1061/9780784483169.003>
- Murray-Tuite, P. M. (2006). A Comparison of Transportation Network Resilience under Simulated System Optimum and User Equilibrium Conditions. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey, CA, USA, 2006*, pp. 1398-1405. <https://doi.org/10.1109/wsc.2006.323240>
- Nagurney, A., & Qiang, Q. (2008). A network efficiency measure with application to critical infrastructure networks. *Journal of Global Optimization*, 40(1–3), 261–275. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9198-1>
- Nipa, T. J., & Kermanshachi, S. (2020a). Identification of the resilience dimensions and determination of their relationships in critical transportation infrastructure. *Construction Research Congress 2020*. <https://doi.org/10.1061/9780784482858.070>
- Nipa, T. J., & Kermanshachi, S. (2020b). Dimensions of Resilience Measurement in Critical Transportation Infrastructure. *International Conference on Transportation and Development 2021*. <https://doi.org/10.1061/9780784483541.028>
- Omer, M., Nilchiani, R., & Mostashari, A. (2009). Measuring the resilience of the Trans-Oceanic telecommunication cable system. *IEEE Systems Journal*, 3(3), 295–303. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2009.2022570>
- Panteli, M., & Mancarella, P. (2017). Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events. *IEEE Systems Journal*, 11(3), 1733–1742. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2015.2389272>
- Papa, R., Galderisi, A., Majello, M. C. V., & Saretta, E. (2015). Smart and Resilient Cities. A systemic approach for developing cross-sectoral strategies in the face of climate change. *Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 8(1), 19–49. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/2883>
- Qiang, Y., & Xu, J. (2019). Empirical assessment of road network resilience in natural hazards using crowdsourced traffic data. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(12), 2434–2450. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1694681>

- Queiroz, C., Garg, S., & Tari, Z. (2013). A probabilistic model for quantifying the resilience of networked systems. *IBM Journal of Research and Development*, 57(5), 3:1-3:9. <https://doi.org/10.1147/jrd.2013.2259433>
- Renne, J. L., Wolshon, B., Murray-Tuite, P., & Pande, A. (2019). Emergence of resilience as a framework for state Departments of Transportation (DOTs) in the United States. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 82, 102178. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.007>
- Rouhanizadeh, B., & Kermanshachi, S. (2019). A Systematic Approach to Analysis and Prioritization of the Socioeconomic Policies and Legal barriers to Rapid Post Disaster Reconstruction. In *7th CSCE International Construction Specialty Conference (ICSC)* (pp. 12-15).
- Rouhanizadeh, B., Kermanshachi, S., & Nipa, T. J. (2019). Identification, Categorization, and Weighting of Barriers to Timely Post-Disaster Recovery Process. *Computing in Civil Engineering 2019: Smart Cities, Sustainability, and Resilience*. <https://doi.org/10.1061/9780784482445.006>
- RStudio Users Guide. <https://www2.stat.duke.edu/courses/Spring14/sta101.001/UsersGuide.pdf>. Accessed May 16, 2022
- Sen, M. K., & Dutta, S. (2020). An Integrated GIS-BBN Approach to Quantify Resilience of Roadways Network Infrastructure System against Flood Hazard. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 6(4). <https://doi.org/10.1061/ajrua6.0001088>
- Sharma, N., Tabandeh, A., & Gardoni, P. (2017). Resilience analysis: a mathematical formulation to model resilience of engineering systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 3(2), 49–67. <https://doi.org/10.1080/23789689.2017.1345257>
- Shen, L., Cassottana, B., Heinimann, H. R., & Tang, L. C. (2019). Large-scale systems resilience: A survey and unifying framework. *Quality and Reliability Engineering International*, 36(4), 1386–1401. <https://doi.org/10.1002/qre.2634>
- Shen, L., Shao, H., Wu, T., Fainman, E. Z., & Lam, W. H. K. (2020). Finding the reliable shortest path with correlated link travel times in signalized traffic networks under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 144, 102159. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102159>
- Siri, E., Siri, S., & Sacone, S. (2020). A progressive traffic assignment procedure on networks affected by disruptive events. *2020 European Control Conference (ECC)*. <https://doi.org/10.23919/ecc51009.2020.9143945>
- Stamos, I., Mitsakis, E., Grau, J. M. S., & Aifadopoulou, G. (2015). Impact assessment of extreme weather events on transport networks: A data-driven approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.11.002>

- Starita, S., & Scaparra, M. P. (2020). Assessing road network vulnerability: A user equilibrium interdiction model. *Journal of the Operational Research Society*, 72(7), 1648–1663. <https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1740621>
- Sun, W., Bocchini, P., & Davison, B. D. (2018). Resilience metrics and measurement methods for transportation infrastructure: the state of the art. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 5(3), 168–199. <https://doi.org/10.1080/23789689.2018.1448663>
- Tachaudomdach, S., Upayokin, A., Kronprasert, N., & Arunotayanun, K. (2021). Quantifying Road-Network Robustness toward Flood-Resilient Transportation Systems. *Sustainability*, 13(6), 3172. <https://doi.org/10.3390/su13063172>
- Tamvakis, P., & Xenidis, Y. (2013). Comparative evaluation of resilience quantification methods for infrastructure systems. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 74, 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.03.030>
- Tang, J., Heinimann, H. R., Han, K., Luo, H., & Zhong, B. (2020). Evaluating resilience in urban transportation systems for sustainability: A systems-based Bayesian network model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 121, 102840. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102840>
- Taylor, M. A., Somenahalli, S., & D'Este, G. (2006). Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Networks and Spatial Economics*, 6(3–4), 267–291. <https://doi.org/10.1007/s11067-006-9284-9>
- Titko, M., Havko, J., & Studena, J. (2020). Modelling resilience of the transport critical infrastructure using influence diagrams. *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*, 22(1), 102-118. <https://doi.org/10.26552/com.c.2020.1.102-118>
- Vogiatzis, C., Pardalos, P.M. (2016). Evacuation Modeling and Betweenness Centrality. In: *Kotsireas, I., Nagurney, A., Pardalos, P. (eds) Dynamics of Disasters—Key Concepts, Models, Algorithms, and Insights. DOD 2015 2016. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 185.* Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43709-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43709-5_17)
- Vugrin, E. D., Warren, D. E., & Ehlen, M. A. (2011). A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane. *Process Safety Progress*, 30(3), 280–290. <https://doi.org/10.1002/prs.10437>
- Wan, C., Yang, Z., Zhang, D., Yan, X., & Fan, S. (2018). Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions. *Transport Reviews*, 38(4), 479–498. <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1383532>
- Wang, H., Peng, Z., Wang, D., Meng, Y., Wu, T., Sun, W., & Lu, Q. (2020). Evaluation and prediction of transportation resilience under extreme weather events: A diffusion graph convolutional approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 115, 102619. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102619>

- Wang, L. (2020). A two-stage stochastic programming framework for evacuation planning in disaster responses. *Computers & Industrial Engineering*, 145, 106458. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106458>
- Wang, L., Xue, X., Xue, W., & Zhao, B. (2021). Analyzing the formation mechanism of Cross-City transportation network resilience. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/5524719>
- Wang, L., Xue, X., & Zhou, X. (2020). A new approach for measuring the resilience of transport infrastructure networks. *Complexity*, 2020, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2020/7952309>
- Yu, G., Fu, X., Liu, Z., Xu, X., & Chen, A. (2019). Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 133, 101809. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.11.003>
- Zadeh, L. A. (1983). The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 11(1–3), 199–227. [https://doi.org/10.1016/s0165-0114\(83\)80081-5](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(83)80081-5)
- Zhao, T., & Zhang, Y. (2020). Transportation infrastructure restoration optimization considering mobility and accessibility in resilience measures. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 117, 102700. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102700>
- Zhou, Y., Wang, J., & Yang, H. (2019). Resilience of Transportation Systems: Concepts and Comprehensive review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(12), 4262–4276. <https://doi.org/10.1109/tits.2018.2883766>
- Αγγελιδάκης, Ν. (2015). Εισαγωγή στον προγραμματισμό με την Python. Διαθέσιμο από [http://aggelid.mysch.gr/pythonbook/INTRODUCTION\\_TO\\_COMPUTER\\_PROGRAMMING\\_WITH\\_PYTHON.pdf](http://aggelid.mysch.gr/pythonbook/INTRODUCTION_TO_COMPUTER_PROGRAMMING_WITH_PYTHON.pdf).
- Βερούκιος, Β., Καγκλής, Β., & Σταυρόπουλος, Η. (2016). Η επιστήμη των δεδομένων μέσα από τη γλώσσα R. ISBN: 978-960-603-394-0





## Παράρτημα

Επισυνάπτονται αποσπάσματα από ένα κώδικα Python μέσω του οποίου είναι δυνατή η ομαδοποίηση ανά συνδεδεμένο κόμβο και ανά VDF όλων των sections που συνδέονται με τους 20 κόμβους που είχαν την υψηλότερη closeness centrality και με τους 20 κόμβους που είχαν την υψηλότερη betweenness centrality. Ο κώδικας έχει ως inputs τα «ονόματα» (κωδικούς) και τα VDFs των sections (από το πρόγραμμα Aimsun) με τους οποίους συνδέονται οι προαναφερθέντες κόμβοι.

```
2 vdf_b = [683545, 683545, 683541, 683541, 683545, 683545, 683544, 683544, 683544, 683541, 683541, 683544,
3 #x=len(vdf_sections_b)
4 #print(x)
5 vdf_c = [683541, 683541, 683541, 683541, 683544, 683541, 683544, 683541, 683544, 683541, 683544, 683541,
6 #x=len(vdf_sections_c)
7 #print(x)
8 list_b = [555244, 555242, 555254, 555256, 555250, 555252, 552434, 552432, 376047, 551582, 551580, 554898,
9 list_c = [552138, 552188, 552190, 552156, 552272, 552276, 552274, 552194, 552192, 552194, 552198, 552188,
10
```

Απόσπασμα από δεδομένα input του κώδικα Python (ονόματα και VDFs των sections)

```
1199 ##### node_623923 #####
1200 print('')
1201 print("node_623923")
1202 node_c_623923 = [623920, 623964, 623922]
1203 node_c_623923_vdf_683541 = []
1204 node_c_623923_vdf_683544 = []
1205 for i in range(len(node_c_623923)):
1206     for j in range(len(total_sections_vdf_c_683541)):
1207         if node_c_623923[i] == total_sections_vdf_c_683541[j]:
1208             y = node_c_623923[i]
1209             node_c_623923_vdf_683541.append(y)
1210 print("the sections of node_623923 with vdf 683541 are:", node_c_623923_vdf_683541)
1211 for i in range(len(node_c_623923)):
1212     for j in range(len(total_sections_vdf_c_683544)):
1213         if node_c_623923[i] == total_sections_vdf_c_683544[j]:
1214             y = node_c_623923[i]
1215             node_c_623923_vdf_683544.append(y)
1216 print("the sections of node_623923 with vdf 683544 are:", node_c_623923_vdf_683544)
1217
1218 #####
1219
1220 ##### node_504050 #####
1221 print('')
1222 print("node_504050")
1223 node_c_504050 = [551450, 623922, 551444]
1224 node_c_504050_vdf_683541 = []
1225 node_c_504050_vdf_683544 = []
1226 for i in range(len(node_c_504050)):
1227     for j in range(len(total_sections_vdf_c_683541)):
1228         if node_c_504050[i] == total_sections_vdf_c_683541[j]:
1229             y = node_c_504050[i]
1230             node_c_504050_vdf_683541.append(y)
1231 print("the sections of node_504050 with vdf 683541 are:", node_c_504050_vdf_683541)
1232 for i in range(len(node_c_504050)):
1233     for j in range(len(total_sections_vdf_c_683544)):
1234         if node_c_504050[i] == total_sections_vdf_c_683544[j]:
1235             y = node_c_504050[i]
1236             node_c_504050_vdf_683544.append(y)
1237 print("the sections of node_504050 with vdf 683544 are:", node_c_504050_vdf_683544)
```

Απόσπασμα κώδικα Python

```
node_504054
the sections of node_504054 with vdf 683541 are: [551476, 551472]
the sections of node_504054 with vdf 683544 are: [551474, 623962]

node_504464
the sections of node_504464 with vdf 683541 are: [552268, 552264]
the sections of node_504464 with vdf 683544 are: [552266, 551480]

node_504428
the sections of node_504428 with vdf 683541 are: [552200, 552196]
the sections of node_504428 with vdf 683544 are: [552198]

node_680038
the sections of node_680038 with vdf 683541 are: []
the sections of node_680038 with vdf 683544 are: [551480, 680035, 680037]

node_504386
the sections of node_504386 with vdf 683541 are: [552124, 552134, 552138, 552136]
the sections of node_504386 with vdf 683544 are: []

node_503990
the sections of node_503990 with vdf 683541 are: []
the sections of node_503990 with vdf 683544 are: [551326, 551324, 551328, 551332, 551330, 551334]

node_504412
the sections of node_504412 with vdf 683541 are: [552184, 552178]
the sections of node_504412 with vdf 683544 are: [552164, 552182]

node_623923
the sections of node_623923 with vdf 683541 are: []
the sections of node_623923 with vdf 683544 are: [623920, 623964, 623922]

node_504050
the sections of node_504050 with vdf 683541 are: []
the sections of node_504050 with vdf 683544 are: [551450, 623922, 551444]

Process finished with exit code 0
```

**Απόσπασμα από δεδομένα output του κώδικα Python (ομαδοποίηση των sections ανά συνδεδεμένο κόμβο και ανά VDF)**

