



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΔΠΜΣ – ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ, ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΣ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

**Βελτιστοποίηση μεθόδων οικονομικής και λειτουργικής
περιγραφής οδικών δικτύων ευρείας κλίμακας, με τη
συνδυαστική χρήση θεωρίας γράφων και αλγορίθμων
κατανομής κυκλοφορίας**

Διπλωματική Εργασία

Μαρία Σταβάρα
Μεταπτυχιακή φοιτήτρια

Επιβλέπων: Τσιώτας Δημήτριος

Βόλος, Ιούλιος 2023

.....
Copyright © Δημήτριος Τσιώτας, Μαρία Σταβάρα, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Βελτιστοποίηση μεθόδων οικονομικής και λειτουργικής περιγραφής οδικών δικτύων ευρείας κλίμακας, με τη συνδυαστική χρήση θεωρίας γράφων και αλγορίθμων κατανομής κυκλοφορίας

Αφιερωμένη στην οικογένειά μου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς τους ανθρώπους που στάθηκαν στο πλάι μου κατά τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου φοίτησης.

Πρωτίστως, ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου, κ. Τσιώτα Δημήτριο, που είχε την εποπτεία και ευθύνη της διπλωματικής μου εργασίας, και τον χρόνο που αφιέρωσε στην καθοδήγηση μου, έτσι ώστε η εργασία να παραδοθεί στην καλύτερη δυνατή μορφή της.

Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον Χρυσόστομο Μυλωνά, επιστημονικό συνεργάτη του Ινστιτούτου Μεταφορών και υποψήφιο διδάκτορα του ΕΜΠ, για τη συμβουλευτική καθοδήγηση, τη συμπαράσταση, τα ερεθίσματα και τα δεδομένα που μου προσέφερε ώστε να μπορέσω να ολοκληρώσω την παρούσα εργασία.

Κλείνοντας, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, η οποία έπαιξε καταλυτικό ρόλο στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Τους ευχαριστώ για την υποστήριξη και την κατανόηση που μου επέδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	x
Abstract	xi
Πρόλογος	xii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας.....	1
1.2. Μεθοδολογία	1
1.3. Δομή εργασίας.....	2
2. Θεωρία γράφων	4
2.1. Δίκτυα και γράφοι	4
2.2. Ιστορική αναδρομή.....	5
2.3. Τοπολογία δικτύων και γράφων	6
2.3.1. Βασικοί τύποι δικτύων.....	7
2.3.2. Τοπολογία οδικών δικτύων.....	8
2.4. Μέτρα δικτύων (Network measures).....	11
2.4.1. Διάμετρος (Network diameter)	11
2.4.2. Πυκνότητα (Graph density)	11
2.4.3. Μέσο μήκος διαδρομής (Average path length)	12
2.4.4. Modularity.....	12
2.4.5. Αποδοτικότητα (Efficiency)	12
2.5. Μέτρα Κεντρικότητας	12
2.5.1. Βαθμική κεντρικότητα (Degree Centrality).....	12
2.5.2. Ενδιάμεση κεντρικότητα (Betweenness Centrality).....	13
2.5.3. Κεντρικότητα εγγύτητας (Closeness Centrality)	15
2.5.4. Ιδιοκεντρικότητα (Eigenvector Centrality).....	15
2.5.5. Συντελεστής σύμπλεξης (Clustering Coefficient)	16
3. Καταμερισμός της κυκλοφορίας.....	17
3.1. Σημασία στο πλαίσιο του σχεδιασμού των μεταφορών	17
3.2. Θεμελιώδεις αρχές του καταμερισμού της κυκλοφορίας.....	18
3.2.1. Αρχή «όλα ή τίποτα» (All or nothing).....	19
3.2.2. Αρχή της εξισορρόπησης χρηστών (User equilibrium).....	19
3.2.3. Αρχή της εξισορρόπησης δικτύου (System optimum)	21
3.3. Χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι.....	21
4. Οικονομική και λειτουργική περιγραφή οδικών δικτύων	24
4.1. Λειτουργική διάσταση.....	24
4.1.1. Συνδεσιμότητα (connectivity).....	25
4.1.2. Συγκεντρωτικότητα.....	27
4.1.3. Αποδοτικότητα (efficiency)	28
4.2. Οικονομική διάσταση.....	29
4.2.1. Προσβασιμότητα (accessibility)	29

4.2.2. Ενοποιημένη αποδοτικότητα (unified efficiency)	30
4.2.3. Δικαιοσύνη (equity)	31
5. Προτεινόμενοι δείκτες και εφαρμογή.....	34
5.1. Περιγραφή μελέτης περίπτωσης	34
5.2. Αποτελέσματα και αξιολόγηση	37
5.2.1. Δείκτες θεωρίας γράφων	37
5.2.2. Εκτιμώμενοι κυκλοφοριακοί φόρτοι	44
5.2.3. Σύνθετοι δείκτες.....	47
5.2.4. Στατιστικές και ποσοτικές εκτιμήσεις	51
6. Συμπεράσματα	54
Παράρτημα Ι.....	56
Βιβλιογραφία	63

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1: (α) Κατευθυνόμενο δίκτυο δύο κατευθύνσεων με διαφορετικά βάρη, (β) πίνακας γειτνίασης γράφου.....	4
Εικόνα 2.2: (α) πόλη Κένιγκσμπεργκ με τις επτά γέφυρες, (β) αναπαράσταση Euler (Mathimatikos.gr, 2019)	5
Εικόνα 2.3: (α) χάρτης με 4 χρώματα, (β) επίπεδος γράφος του χάρτη.....	6
Εικόνα 2.4: Βασικές τοπολογίες δικτύων (α) δισημειακή, (β) αστέρα, (γ) δακτυλίου, (δ) διαύλου, και (ε) πλήρως κατανεμημένη τοπολογία	8
Εικόνα 2.5: Αναπαραστάσεις δικτύου (α) φυσική μορφή αστικού δικτύου, (β) πρωταρχική αναπαράσταση, (γ) διπλή αναπαράσταση	9
Εικόνα 2.6: (α) Αναπαράσταση δύο διαδρομών με λεωφορείο σε (β) L-space και (γ) P-space.....	10
Εικόνα 2.7: (α) περιοχή μελέτης Columbus Ohio και (β) περιοχή μελέτης Washington D.C.....	10
Εικόνα 2.8: Διάμετρος γράφου που προκύπτει μεταξύ του ζεύγους 1 – 6.....	11
Εικόνα 5.1: Απεικόνιση υιοθετούμενου εθνικού οδικού δικτύου	35
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση διαδρομής που αντικατοπτρίζει τη διάμετρο του δικτύου.....	38
Εικόνα 5.3:Βαθμός κόμβων με βάρος τη χωρητικότητα των δρόμων	40
Εικόνα 5.4: Ενδιάμεση κεντρικότητα κόμβων με βάρος την ταχύτητα ελεύθερης ροής του δικτύου.....	41
Εικόνα 5.5: Ενδιάμεση κεντρικότητα συνδέσμων με βάρος την ταχύτητα ελεύθερης ροής του δικτύου	42
Εικόνα 5.6: Κεντρικότητα εγγύτητας κόμβων με βάρος την ταχύτητα ελεύθερης ροής του δικτύου.....	43
Εικόνα 5.7:Ιδιοκεντρικότητα κόμβων με βάρος τη χωρητικότητα των δρόμων.....	44
Εικόνα 5.8: Απεικόνιση ροών μετακινούμενων – μέθοδος “desire lines”	46
Εικόνα 5.9: Εκτιμώμενοι κυκλοφοριακοί φόρτοι.....	47
Εικόνα 5.10: Βαθμός κόμβων με βάρος τον εκτιμώμενο κυκλοφοριακό φόρτο.....	49
Εικόνα 5.11: Σενάρια βελτίωσης υφιστάμενης οδικής υποδομής	50
Εικόνα 5.12: Διάγραμμα διασποράς και βαθμός συσχέτισης μεταξύ της ενδιάμεσης κεντρικότητας σε επίπεδο κόμβων του δικτύου και της βαθμικής κεντρικότητας των κόμβων του δικτύου μέσω της στάθμισης των ακμών του βάσει του κυκλοφοριακού φόρτου.....	52
Εικόνα 5.13: Διάγραμμα διασποράς και βαθμός συσχέτισης μεταξύ των βαθμικών κεντρικότητων των κόμβων του δικτύου που προκύπτουν από τη στάθμιση των ακμών του με α) τον κυκλοφοριακό φόρτο και β) την κυκλοφοριακή ικανότητα.....	53

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 2.1: Βαθμός του κάθε κόμβου με τη NetworkX.	13
Πίνακας 2.2: Ενδιάμεση κεντρικότητα του κάθε κόμβου με τη NetworkX.....	14
Πίνακας 2.3: Ενδιάμεση κεντρικότητα της κάθε ακμής με τη NetworkX	14
Πίνακας 2.4:Κεντρικότητα εγγύτητας του κάθε κόμβου με τη NetworkX	15
Πίνακας 2.5: Ιδιοκεντρικότητα του κάθε κόμβου με τη NetworkX.....	16
Πίνακας 2.6: Clustering Coefficient ενός κόμβου με τη NetworkX	16
Πίνακας 4.1: Περιγραφή δεικτών που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας οδικών δικτύων.....	24
Πίνακας 4.2: Μεταφορικά οφέλη και κόστη	32
Πίνακας 4.3:Ορισμός των επιμέρους εννοιών της προσέγγισης δυνατοτήτων	33
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά οδικών τμημάτων	36
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα του δείκτη της ενοποιημένης αποδοτικότητας για όλα τα σενάρια.....	50

Συντομογραφίες

Συντομογραφίες	Ορισμός
BPR	Bureau of Public Roads
OD	Origin Destination
TA	Traffic Assignment
MSA	Method of Successive Averages
NAP	National Access Point
CBA	Cost Benefit Analysis
SCBA	Socioeconomic Cost Benefit Analysis
CA	Capability Approach

Περίληψη

Τα οδικά δίκτυα αποτελούν θεμελιώδεις υποδομές για την εξυπηρέτηση των αναγκών μετακίνησης επιβατών και εμπορευμάτων. Ως εκ τούτου οφείλουν να είναι άρτια σχεδιασμένα τόσο από λειτουργικής όσο και οικονομικής σκοπιάς. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την παροχή ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου για την αξιολόγηση των δύο αυτών βασικών διαστάσεων στα οδικά δίκτυα. Για το λόγο αυτό επιχειρείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη συνεισφορά της θεωρίας γράφων στην αξιολόγηση των οδικών δικτύων περιλαμβάνοντας δείκτες που περιγράφουν τη συνδεσιμότητα, την αποδοτικότητα και τη συγκεντρωτικότητα των εν λόγω δικτύων. Για τον ίδιο λόγο, παρατίθεται οι βασικές αρχές του υπολογιστικού πλαισίου που αφορά στον καταμερισμό της κυκλοφορίας σε δίκτυα μεταφορών. Επιπλέον, αναλύονται και επιπρόσθετες έννοιες όπως η προσβασιμότητα και η δικαιοσύνη που χαρακτηρίζουν ένα οδικό δίκτυο. Στη βάση αυτής της θεωρητικής διερεύνησης διατυπώνονται σχετικοί δείκτες που εμπλέκουν τόσο λειτουργικά όσο και οικονομικά χαρακτηριστικά ενός οδικού δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό σχεδιάζεται μια μελέτη περίπτωσης που περιλαμβάνει ένα πραγματικό οδικό δίκτυο και συγκεκριμένα το δίκτυο υπεραστικών οδικών μετακινήσεων της ηπειρωτικής Ελλάδας. Στόχο αυτής της μελέτης αποτελεί η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας και της χρηστικότητας των προτεινόμενων δεικτών και του βαθμού που οι δείκτες αυτοί συσχετίζονται μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας φανερώνουν ότι οι δείκτες που διατυπώθηκαν είναι σε θέση να υποβοηθήσουν την αξιολόγηση πιθανών παρεμβάσεων στο δίκτυο, την πρόβλεψη κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών σε περιπτώσεις μερικής διαθεσιμότητας δεδομένων, καθώς και την ικανοποιητική μεν, μη βέλτιστη δε, κοινωνικοοικονομική επίδοση του εθνικού οδικού δικτύου.

Λέξεις κλειδιά: Θεωρία γράφων, Οδικά δίκτυα, Καταμερισμός της κυκλοφορίας, Οικονομική διάσταση, Λειτουργική διάσταση

Abstract

Road networks constitute fundamental infrastructure for serving the transportation needs of passengers and goods. Therefore, their design should comply to both functional and economical requirements. The current thesis aims to provide an integrated methodological framework for evaluating these two main dimensions in road networks. On top of that, a literature review is conducted on the application of graph theory in assessing road networks, focusing on indicators that describe their connectivity and efficiency, as well as the centrality of their structural components. Moreover, concepts such as accessibility and equity, which characterize a road network, are also examined. Based on the derived theoretical and conceptual framework, indicators involving both functional and economic characteristics of a road network are formulated. In this context, a case study is designed revolving around a real road network, i.e., the interurban road network of mainland Greece. The objective of this case study is to investigate the applicability and usefulness of the proposed indicators and the degree to which they are correlated with each other. The findings reveal that the proposed indicators can assist the evaluation of potential interventions in the network, the estimation of traffic volumes in cases of limited data availability. They also indicate that the socio-economic performance of the national road network is satisfactory, albeit not fully optimized.

Keywords: Graph theory, Road networks, Traffic assignment, Economical performance, Functional performance

Πρόλογος

Ο σχεδιασμός των συστημάτων μεταφορών αποτελούσε από πάντα μεγάλη πρόκληση στους μηχανικούς και τους υπεύθυνους για τη λήψη συγκοινωνιακών αποφάσεων. Η ιστορία των μεταφορών διαθέτει βάθος πολλών αιώνων αφού οι απαρχές της έχουν εκκίνηση στην αρχαιότητα. Από τα αρχαία χρόνια λοιπόν, οι μετακινήσεις έπαιζαν τον κυρίαρχο ρόλο στη ζωή της κάθε κοινωνίας και συνεχίζουν να κατέχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στις ζωές μας μέχρι και σήμερα. Στη σημερινή εποχή, ο τομέας των μεταφορών χαρακτηρίζεται από σημαντικές προκλήσεις που κυρίως αφορούν το χρόνο, την οικονομία, την ασφάλεια, και την αποδοτικότητα των μετακινήσεων που προσφέρονται στον άνθρωπο. Ζούμε σε μια κοινωνία υψηλών ταχυτήτων, όπου οι μετακινήσεις δε διακρίνονται από την απλότητα τους όπως γινόταν στο παρελθόν, αλλά αντιθέτως επικρατεί ο αγχώδης τρόπος ζωής, όπου ο κάθε άνθρωπος προσπαθεί να ανταπεξέλθει στις καθημερινές υποχρεώσεις τους, δαπανώντας το λιγότερο δυνατό χρόνο. Συνεπώς, κάθε οργανωμένη κοινωνία στοχεύει στις γρηγορότερες και ασφαλέστερες μετακινήσεις των πολιτών της.

Βασική προϋπόθεση για την επίτευξη αποδοτικών και λειτουργικών δικτύων αποτελεί η συστηματική τους ανάλυση. Η ανάλυση αυτή μπορεί να στηριχθεί στη χρήση μιας σειράς εργαλείων που έχουν ως θεωρητικό υπόβαθρο είτε τη θεωρία γράφων, είτε τον κλασικό σχεδιασμό των μεταφορών. Ακολουθώντας την πρώτη τεχνική, το δίκτυο απεικονίζεται ως ένας γράφος και αναλύεται ως προς τα τοπολογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Με τη δικτυωτή αυτή ανάλυση το δίκτυο αναπαρίσταται με κόμβους που συνδέονται μεταξύ τους με προσανατολισμένες (ή και μη) ακμές. Πρωταρχικός στόχος της ανάλυσης είναι η επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με το σχεδιασμό συστημάτων μεταφορών και πιο συγκεκριμένα με τον εντοπισμό του βέλτιστου τρόπου σύνδεσης δύο ή και περισσότερων σημείων (ή και περιοχών) μέσω εναλλακτικών μονοπατιών διασύνδεσης. Ακολουθώντας από την άλλη το κλασικό μοντέλο του σχεδιασμού των μεταφορών, το δίκτυο αποκτά μια πιο ρεαλιστική διάσταση καθώς λαμβάνονται υπόψιν επιπλέον παράμετροι όπως είναι η ζήτηση και ο καταμερισμός της κυκλοφορίας μέσα στο δίκτυο. Βασικά βήματα του σχεδιασμού των μεταφορών αποτελούν α) η γένεση των μετακινήσεων β) η κατανομή των μετακινήσεων γ) ο καταμερισμός των μετακινήσεων ανά μέσο και δ) ο καταμερισμός της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Καθώς η ζήτηση για μετακίνηση ολοένα και αυξάνεται, έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για συστηματική θεώρηση και ανάλυση της κυκλοφοριακής συμφοράς στο δίκτυο, που έχει οδηγήσει με τη σειρά της στην εύρεση εναλλακτικών λύσεων μέσω ευρετικών αλγορίθμων και τεχνικών.

Γίνεται συνεπώς αντιληπτή η ανάγκη για συνδυαστική ανάλυση δικτύων χρησιμοποιώντας αφενός δείκτες της Θεωρίας Γράφων και αφετέρου αποτελέσματα που προκύπτουν από ευρετικούς αλγορίθμους κατανομής της κυκλοφορίας με απώτερο στόχο την αναλυτική και βέλτιστη διερεύνηση της οικονομικής και λειτουργικής διάστασης των δικτύων.

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας

Αποστολή της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αναλυτική και βέλτιστη διερεύνηση των μεθόδων και πρακτικών που οδηγούν στην πληρέστερη κατανόηση και αποσαφήνιση της λειτουργικής και οικονομικής διάστασης οδικών δικτύων μεταφορών. Απώτερος σκοπός είναι η ανάδειξη και διατύπωση νέων δεικτών και υπολογιστικών τεχνικών που περιγράφουν με καλύτερο και πιο ρεαλιστικό τρόπο τόσο τα γεωμετρικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά του ίδιου του δικτύου, όσο και της αλληλεπίδρασής του με τα κοινωνικοοικονομικά συστήματα που τα περιβάλλουν.

1.2. Μεθοδολογία

Για την εξυπηρέτηση των παραπάνω στόχων, το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική στηρίζεται σε σημαντικό βαθμό στο θεωρητικό υπόβαθρο της θεωρίας γράφων και στις θεμελιώδεις αρχές του καταμερισμού της κυκλοφορίας. Συνεπώς, πρώτο βήμα της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας με αντικείμενο (α) την εξέλιξη της θεωρίας γραφημάτων, (β) την τοπολογία των δικτύων και των βασικών μορφολογικών δομών ενός δικτύου, (γ) τις βασικές αρχές και υπολογιστικές τεχνικές καταμερισμού της κυκλοφορίας σε ένα οδικό δίκτυο, (δ) την καταγραφή σημαντικών δεικτών αξιολόγησης δικτύων και επιμέρους συστατικών αυτών όπως οι κόμβοι και οι ακμές), καθώς και (ε) την κατανόηση θεμελιωδών εννοιών μέσω των οποίων μπορεί να επιτευχθεί η λειτουργική και οικονομική περιγραφή ενός οδικού δικτύου. Επόμενο βήμα της μεθοδολογίας θεωρήθηκε η επιλογή του οδικού δικτύου, το οποίο και αποτέλεσε τη βάση για την υλοποίηση και εφαρμογή της θεωρητικής προσέγγισης της βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε το οδικό πανελλαδικό δίκτυο σε γενικευμένη μορφή, το οποίο συναποτελείται από 866 κόμβους (nodes) και 2211 ακμές (links). Περισσότερες λεπτομέρειες για τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της μελέτης περίπτωσης παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5. Η τοπολογία και η γεωμετρία του χρησιμοποιούμενου δικτύου καθορίστηκε με τη χρήση του πακέτου λογισμικού ArcGIS. Ακολούθως, μοντελοποιήθηκε ως κατευθυνόμενος γράφος με τη χρήση δύο εργαλείων.

Το πρώτο εργαλείο αποτελεί η βιβλιοθήκη NetworkX¹, που παρέχει ένα πλήρες πακέτο εκτίμησης δεικτών που προέρχονται από τη θεωρία γράφων σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Η NetworkX είναι κατάλληλη για την ανάλυση περίπλοκων πραγματικών δικτύων που μπορούν να υπερβούν τους 10 εκατομμύρια κόμβους και 100 εκατομμύρια ακμές.

Το δεύτερο εργαλείο αποτελεί η βιβλιοθήκη AequilibraE, που επιλύει προβλήματα καταμερισμού της κυκλοφορίας σε γλώσσα προγραμματισμού Python και παρέχει οπτικοποίηση αποτελεσμάτων στο περιβάλλον του QGIS. Επιπρόσθετα, η βιβλιοθήκη αυτή περιλαμβάνει διαδικασίες για τον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής καθώς

¹ <https://networkx.org/documentation/networkx-3.0/reference/index.html>

και παρέχει τη δυνατότητα για υπολογισμό του μητρώου γενικευμένου κόστους μετακίνησης.

Στη συνέχεια, βασική παράμετρος για να μπορέσει να τρέξει ο αλγόριθμος κατανομής της κυκλοφορίας αποτέλεσε ο καθορισμός της ζήτησης της κάθε ζώνης. Για τον υπολογισμό αυτής χρησιμοποιήθηκε το βαρυτικό μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψιν τόσο το μέγεθος του πληθυσμού της κάθε ζώνης, όσο και την μεταξύ τους απόσταση.

Επιπλέον, το μεθοδολογικό πλαίσιο της εργασίας περιλαμβάνει τη διατύπωση νέων δεικτών και υπολογιστικών τεχνικών συνδυάζοντας αφενός τους δείκτες της θεωρίας γράφων και αφετέρου τα αποτελέσματα του αλγορίθμου καταμερισμού της κυκλοφορίας με στόχο την καλύτερη και πληρέστερη ερμηνεία της λειτουργικής και οικονομικής διάστασης των οδικών δικτύων. Τέλος, τα αποτελέσματα εξετάζονται και αναλύονται με τη χρήση στατιστικών εργαλείων και γίνεται σχολιασμός σχετικά με τη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης των προτεινόμενων δεικτών και τεχνικών.

1.3. Δομή εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας οργανώνεται σε έξι κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει το αντικείμενο και τους στόχους της εργασίας καθώς και το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε.

Έπειτα ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο το οποίο περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο της θεωρίας γράφων. Γίνεται αρχικά μια σύντομη περιγραφή των δικτύων και των γράφων αναλύοντας τους βασικούς τύπους τοπολογίας αλλά και το εφαρμοστικό πλαίσιο που μπορεί να ενταχθεί ο κάθε ένας από αυτούς. Ακολουθεί εν συνεχεία μια γρήγορη ιστορική αναδρομή της θεωρίας γράφων αποδεικνύοντας τους λόγους που οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα να ασχοληθεί με το συγκεκριμένο γνωστικό πεδίο των διακριτών μαθηματικών. Μέσω την ιστορικής αναδρομής, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η θεωρία γράφων βρίσκει εφαρμογή σε πολλές επιστήμες και αν και η απαρχές της θεμελιώθηκαν τον 17 αιώνα, ωστόσο η εξέλιξή της οδήγησε την ανάπτυξη ενός ξεχωριστού κλάδου που αργότερα εντάχθηκε στον κλάδο των εφαρμοσμένων μαθηματικών. Κύριο αντικείμενο των δικτύων και των γραφημάτων αποτελεί η σημαντικότητα που εμφανίζουν τα επιμέρους στοιχεία του (κόμβοι και ακμές) και ο ρόλος αυτών στο σύνολο του δικτύου/γραφήματος. Η κεντρικότητα ενός δικτύου ή γράφου καθορίζει ταυτόχρονα και τη σημαντικότητα αυτού. Συνεπώς η διπλωματική συνεχίζει με την ανάλυση των μέτρων κεντρικότητας ενός δικτύου μέσω ενός παραδειγματικού γράφου. Ο συγκεκριμένος γράφος αποτελεί μια μορφή απλού και τετριμμένου γράφου και χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για λόγους καλύτερης κατανόησης των μέτρων και συμπλήρωσης του θεωρητικού υποβάθρου που προέκυψε από βιβλιογραφική επισκόπηση.

Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει αφενός στη σημασία που διακατέχουν οι μετακινήσεις στη ζωή μας και αφετέρου στη διαδικασία πρόβλεψης των μετακινήσεων. Μέρος της διαδικασίας πρόβλεψης των μετακινήσεων είναι α) η γένεση των μετακινήσεων, (β) η κατανομή των μετακινήσεων στο χώρο, (γ) ο καταμερισμός των μετακινήσεων κατά μεταφορικό μέσο και (δ) ο καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο. Η διαδικασία

αυτή έχει παραμείνει γνωστή ως τα τέσσερα στάδια του σχεδιασμού των μεταφορών. Εν συνεχεία, το κεφάλαιο αυτό κάνει λόγο για τις βασικές αρχές του καταμερισμού της κυκλοφορίας βάσει των οποίων παρέχεται μια συστηματική και επιστημονική προσέγγιση για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι μετακινούμενοι λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με την επιλογή διαδρομής και τον τρόπο ροής της κυκλοφορίας σε ένα οδικό δίκτυο μεταφορών. Χρησιμοποιώντας αυτές τις αρχές, μπορούν να αναπτυχθούν πιο ακριβή μοντέλα πρόβλεψης των μετακινήσεων, παρέχοντας έτσι καλύτερες επενδυτικές αποφάσεις σχετικά με τις μεταφορικές υποδομές. Συνοπτικά οι αρχές αυτές είναι α) αρχή του «όλα ή τίποτα», β) αρχή της εξισορρόπησης χρηστών και γ) αρχή της εξισορρόπησης δικτύου. Τέλος, το Κεφάλαιο 3 κάνει μια σύντομη ανασκόπηση των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων που έχουν ως στόχο την επίλυση του προβλήματος του καταμερισμού της κυκλοφορίας στο δίκτυο και παράλληλα παραθέτει και το μαθηματικό πλαίσιο στο οποίο στηρίζονται.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις έννοιες της οικονομικής και λειτουργικής ανάλυσης των οδικών δικτύων και την περιγραφή αυτών. Σημαντικό σημείο του κεφαλαίου είναι η διάκριση ανάμεσα στη λειτουργική και οικονομική ανάλυση, όπου η πρώτη επικεντρώνεται στην απόδοση και τα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου με βάση μόνο τις παραμέτρους της προσφοράς, ενώ η δεύτερη αναλύει το βαθμό που η προσφορά καλύπτει τη ζήτηση για οδικές μετακινήσεις σύμφωνα με το πληθυσμιακό δυναμικό της κάθε περιοχής. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και αναλύονται διάφοροι δείκτες που περιγράφουν τόσο τη λειτουργική όσο και την οικονομική πλευρά του οδικού δικτύου. Οι κύριες έννοιες που περιλαμβάνονται αφορούν τη συνδεσιμότητα, τη συγκεντρωτικότητα και την αποδοτικότητα, καθώς και την προσβασιμότητα, την ενοποιημένη αποδοτικότητα και τη δικαιοσύνη. Οι μετρικές αυτές χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν αφενός το πόσο συνδεδεμένο και λειτουργικό είναι ένα δίκτυο, αφετέρου το πόσο δίκαιη και εύκολη γίνεται η πρόσβαση σε αυτό.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η εφαρμογή των προτεινόμενων δεικτών και υπολογιστικών τεχνικών που περιγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο με απώτερο σκοπό να αξιολογηθούν οι δείκτες αυτοί στο πλαίσιο μιας πραγματικής μελέτης και να διερευνηθεί ο βαθμός στον οποίο μπορούν να προσομοιάσουν την κυκλοφορία σε πραγματικά δίκτυα.

Στο Κεφάλαιο 6 που είναι και το τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα της περίπτωσης μελέτης που διεξήχθη.

2. Θεωρία γράφων

2.1. Δίκτυα και γράφοι

Σύμφωνα με τους Gross & Yellen γράφος μπορεί να θεωρηθεί οποιοδήποτε μαθηματικό αντικείμενο περιλαμβάνει σημεία και συνδέσεις μεταξύ τους (Gross & Yellen, 2003). Ένα δίκτυο ή γράφημα αποτελεί ένα πεπερασμένο σύνολο κόμβων ή αλλιώς κορυφών και γραμμών ή αλλιώς ακμών $G = \{V, E\}$, όπου V είναι το σύνολο των κόμβων και E το σύνολο των ακμών. Η ακμή που συνδέει τους κόμβους i και j συμβολίζεται απλά (i, j) . Μία ακμή με διεύθυνση (i, j) οδηγεί από τον κόμβο i στον κόμβο j (Freeman, 1983). Αν κάθε ακμή έχει μία συγκεκριμένη διεύθυνση, τότε το δίκτυο ονομάζεται κατευθυνόμενο (directed graph), σε αντίθετη περίπτωση ονομάζεται μη κατευθυνόμενο (undirected graph). Ένας μη κατευθυνόμενος γράφος μπορεί να εμφανίσει το πολύ:

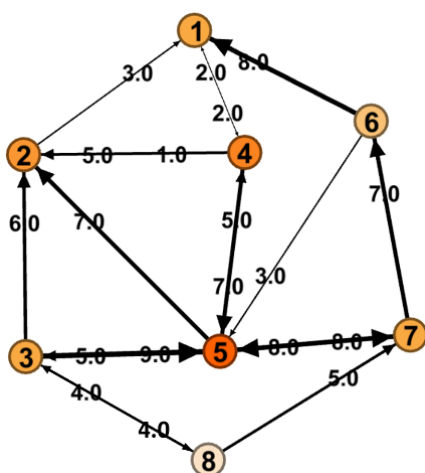
$$a = \frac{n(n-1)}{2} \text{ ακμές}$$

Από την άλλη πλευρά, ένας κατευθυνόμενος γράφος μπορεί να εμφανίσει το πολύ:

$$a = n(n - 1) \text{ ακμές}$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις κάποιες ακμές εμφανίζουν διεύθυνση και κάποιες όχι. Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο ονομάζεται μεικτό (mixed graph). Σημαντικό είναι να σημειωθεί πως σε έναν κατευθυνόμενο γράφο παίζουν κυρίαρχο ρόλο τα βάρη των ακμών καθώς η σχέση $w_i - w_j$ δεν ταυτίζεται πάντα με τη σχέση $w_j - w_i$ (Szczerbicki, 2001). Ουσιαστικά, ως βάρος εκχωρείται μια τιμή (Barrat et al., 2004) η οποία μπορεί να εκδηλώσει το κόστος μετάβασης ή και τον απαιτούμενο χρόνο διέλευσης μεταξύ των κορυφών. Δύο κόμβοι που συνδέονται με μία ακμή καθώς και δύο ακμές που συνδέονται με έναν κόμβο ονομάζονται γειτονικοί.

Η Εικόνα 2.1(α) παρουσιάζει ένα κατευθυνόμενο δίκτυο, αποτελούμενο από 8 κορυφές και 13 ακμές και η Εικόνα 2.1(β) παρουσιάζει τον αντίστοιχο πίνακα γειτνίασης (Jiang et al., 2019).



(α)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	2	0	0	0	0
2	3	0	0	1	0	0	0	0
3	0	6	0	0	9	0	0	4
4	2	5	0	0	7	0	0	0
5	0	7	5	5	0	0	8	0
6	8	0	0	0	3	0	0	0
7	0	0	0	0	8	7	0	0
8	0	0	4	0	0	0	5	0

(β)

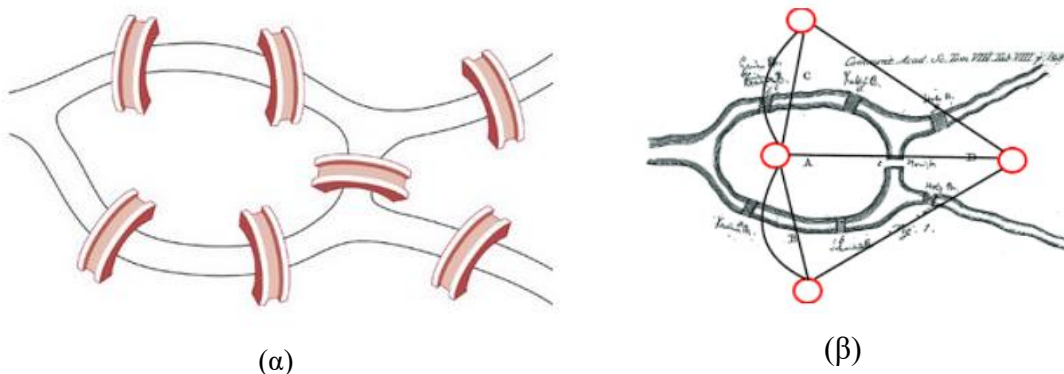
Εικόνα 2.1: (α) Κατευθυνόμενο δίκτυο δύο κατευθύνσεων με διαφορετικά βάρη, (β) πίνακας γειτνίασης γράφου

Πίνακας γειτνίασης ονομάζεται στη θεωρία γράφων ένας πίνακας τετραγωνικής μορφής που χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει ένα πεπερασμένο γράφημα. Τα στοιχεία του

πίνακα υποδεικνύουν εάν τα ζεύγη κορυφών είναι γειτονικά, άρα και επιτυγχάνεται η αντίστοιχη σύνδεση, ή όχι. Στην Εικόνα 2.1(α) το δίκτυο εμφανίζει βάρη μεταξύ των κορυφών για αυτό και τα στοιχεία ij του πίνακα γειτνίασης προβάλλουν τα βάρη. Τα στοιχεία με βάρος ίσο του μηδενός αντιπροσωπεύουν την έλλειψη γειτονικότητας, άρα και σύνδεσης μεταξύ των κορυφών.

2.2. Ιστορική αναδρομή

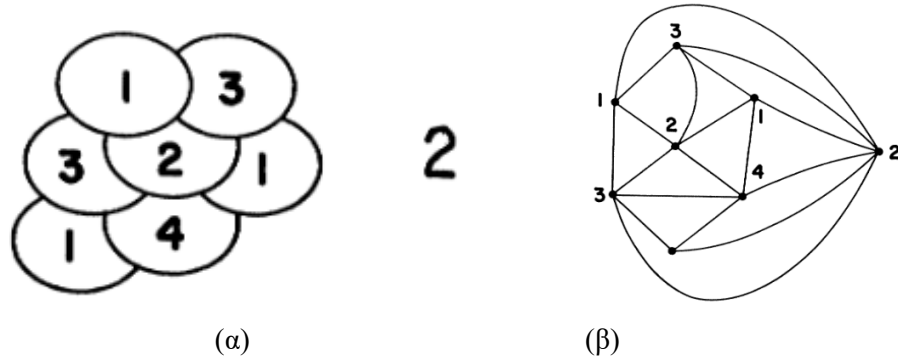
Για πάρα πολλούς αιώνες οι ιδέες που ενσωματώνονται τώρα στο πεδίο της Θεωρίας Γράφων αποτελούσαν άγραφες συζητήσεις μεταξύ επιστημόνων. Παρ' όλα αυτά οι απαρχές της θεωρίας μετράνε πολλά χρόνια με τον σημαντικότερο συντελεστή αυτής τον Leonhard Euler, ο οποίος είναι γνωστός για τη διατύπωση του προβλήματος των επτά γεφυρών του Κένιγκσμπεργκ το 1736 (Barnes & Harary, 1983). Σύμφωνα με το πρόβλημα αυτό, η πόλη Κένιγκσμπεργκ και τα νησάκια γύρω από αυτήν επικοινωνούσαν μέσω των επτά γεφυρών. Το γνωστό ερώτημα που τέθηκε ως προβληματισμός ήταν αν υπάρχει διαδρομή κατά την οποία μπορεί κάποιος να διασχίσει κάθε μια από τις γέφυρες αλλά μια μοναδική φορά. Το επίτευγμα του L. Euler συνδέεται με το γεγονός ότι κατάφερε να αποδείξει πως δεν υπάρχει τρόπος να ενωθούν όλες οι γέφυρες με μοναδική διαδρομή, θέτοντας ταυτόχρονα τα θεμέλια για την ανάπτυξη της θεωρίας γράφων, η οποία είναι ένας από τους σημαντικότερους κλάδους των μαθηματικών με πολλές προεκτάσεις. Για να καταφέρει να φτάσει στη λύση του προβλήματος μετέτρεψε τα κομμάτια ξηράς της πόλης και των νησιών σε σημεία (nodes) και τις γέφυρες σε ακμές (edges). Με την αναπαράσταση αυτή της σχέσης (Εικόνα 2.2) κατάφερε να αποδείξει πως υπάρχει λύση *αν και μόνο αν* όλες οι εκτάσεις ξηράς έχουν *άρτιο* αριθμό γεφυρών, ή όταν δυο *ακριβώς* εκτάσεις ξηράς έχουν *περιττό* αριθμό γεφυρών.



Εικόνα 2.2: (α) πόλη Κένιγκσμπεργκ με τις επτά γέφυρες, (β) αναπαράσταση Euler (Mathimatikos.gr, 2019)

Ύστερα από τον προβληματισμό των επτά γεφυρών που είχε τεθεί, πολλοί επιστήμονες ξεκίνησαν να ασχολούνται με τη θεωρία γράφων εστιάζοντας σε συγκεκριμένα πεδία. Ένας από αυτούς ήταν ο A. Cayley το 1857 ο οποίος ασχολήθηκε με συγκεκριμένη κατηγορία γράφων, αυτή των δέντρων (trees) που βρήκε άμεση εφαρμογή σε πεδία χημείας καθώς ένας γράφος σε μορφή δέντρου μπορούσε εύκολα να παρομοιαστεί με τον τρόπο σύνδεσης των χημικών ενώσεων. Το θεώρημα του συνδέεται με την απαριθμητική θεωρία γράφων αποδεικνύοντας πως το πλήθος των διαφορετικών δέντρων με n επισημασμένες κορυφές είναι ακριβώς n^{n-2} (Harary, 1960). Η εικασία των 4 χρωμάτων γνωστή και ως 4 color conjecture ήταν ακόμη ένας προβληματισμός που τέθηκε από τον Cayley το 1878. Το πρόβλημα έθετε ως ερώτημα το ελάχιστο απαιτούμενο πλήθος

χρωμάτων ώστε να χρωματιστεί ένας χάρτης, με μοναδική προϋπόθεση δύο γειτονικά κράτη μέλη να μην εμφανίζουν το ίδιο χρώμα. Ο προβληματισμός αυτός έμεινε για 125 έτη άλυτος καθώς δεν μπορούσε να βρεθεί η σχετική απόδειξη αν και εμπειρικά ήταν φανερό πως τέσσερα χρώματα είναι αρκετά. Την πρώτη προσπάθεια την έκανε ο Kempe το 1879 και το 1880 έδωσε την πρώτη λύση στο πρόβλημα όπου και θεωρήθηκε ότι λύθηκε. Για να φτάσει στη λύση μετέτρεψε τα κράτη μέλη σε σημεία (nodes) και τα ένωσε με ακμές (edges) μόνο όπου υπήρχαν σύνορα (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: (α) χάρτης με 4 χρώματα, (β) επίπεδος γράφος του χάρτη

Δέκα χρόνια αργότερα το 1890 ο Heawood απέδειξε το λάθος της λύσης. Ο Franklin το 1931 απέδειξε πως ο ισχυρισμός των 4 χρωμάτων ισχύει για χάρτες αριθμό χωρών ≤ 31 και αργότερα το 1943 ο Winn απέδειξε τον ίδιο ισχυρισμό για χάρτες αριθμό χωρών ≤ 35 . Αργότερα το 1968 ο Ore-Stemple απέδειξε πως η εικασία των 4 χρωμάτων ισχύει για χάρτες αριθμό χωρών ≤ 40 . Το 1976 οι Kenneth Appel και Wolfgang Haken ανακοίνωσαν την λύση με χρήση υπολογιστή για χάρτες ανεξαρτήτως αριθμό χωρών που επαληθεύουν τον προβληματισμό των 4 χρωμάτων. Ο προβληματισμός αυτός έμεινε ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα του μαθηματικού κλάδου και έθεσε τις πρώτες βάσεις για τη θεωρία των επίπεδων γράφων (Harary, 1960). Εξίσου σημαντικοί πρωτεργάτες της θεωρίας γράφων ήταν ο Menger και ο Whitney οι οποίοι αναφέρθηκαν στη συνδεσιμότητα/ συνεκτικότητα ενός γράφου. Ουσιαστικά ένας γράφος χαρακτηρίζεται από μεγάλη συνεκτικότητα όταν δεν είναι ευάλωτος σε περιπτώσεις που αποσπώνται κόμβοι από το γράφο.

Πατώντας και εμβαθύνοντας στα θεωρήματα των πρώτων πρωτεργατών που ασχολήθηκαν με τη θεωρία γραφημάτων, πολλοί από τότε διακεκριμένοι στο χώρο επιστήμονες ασχολήθηκαν και εμβάθυναν σε αυτά με αποτέλεσμα η θεωρία γράφων να εξελιχθεί και να διευρυνθεί σημαντικά. Μέχρι και σήμερα η θεωρία γράφων αναπτύσσεται ραγδαία, βρίσκοντας εφαρμογή σε ολοένα και περισσότερα πεδία.

2.3. Τοπολογία δικτύων και γράφων

Με τον όρο τοπολογία ενός δικτύου νοείται η τοπολογική αναπαράσταση αυτού στο χώρο. Οι αναπαραστάσεις δικτύου έχουν χρησιμοποιηθεί από την αρχαιότητα σε πολλαπλούς και διαφορετικούς τομείς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το δίκτυο διαδικτύου ή τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα τα οποία είναι δίκτυα που περιγράφουν αφενός τον τρόπο που επικοινωνούν οι συνδρομητές μεταξύ τους, αφετέρου το μέσο με το οποίο ανταλλάσσεται η πληροφορία μεταξύ των χρηστών (πχ, γραμμή επικοινωνίας). Συνδρομητές μπορούν να θεωρηθούν είτε φυσικά πρόσωπα που προσπαθούν να

επικοινωνήσουν μεταξύ τους, είτε και οποιαδήποτε διασυνδεδεμένα υπολογιστικά συστήματα (Park & Yilmaz, 2010). Ωστόσο, δίκτυα συναντώνται και σε άλλες επιστήμες, όπως αυτή της βιολογίας και της χημείας όπου το δίκτυο αποτελεί το μέσο αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης των πρωτεϊνών και των ατόμων (Wu et.al., 2006). Στον τομέα της κοινωνιολογίας, οι ερευνητές θεωρούσαν από καιρό ότι τα κοινωνικά δίκτυα αντιπροσωπεύουν τις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων σε ένα κοινωνικό περιβάλλον (Freeman, 1978; Knoke & Yang, 2019). Αυτές οι αναπαραστάσεις έχουν φανεί ισχυρό εργαλείο στη διεξαγωγή πολλών ερευνών που αναλύουν διάφορα τεχνολογικά και κοινωνικά φαινόμενα.

2.3.1. Βασικοί τύποι δικτύων

Οι πιο συνήθεις και βασικοί τύποι τοπολογίας δικτύων είναι αυτοί που εντοπίζονται στην Εικόνα 2.2 (Bisht & Singh, 2015; Ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια):

α) δισημειακή τοπολογία (point to point topology), η οποία συνιστά την πιο απλή μορφή τοπολογίας και ενώνει δύο κόμβους με μία ακμή,

β) τοπολογία αστέρα (star topology), στην οποία χρησιμοποιείται ένας κεντρικός κόμβος που κατέχει το ρόλο του «διαμεσολαβητή» για τη διανομή όλων των πληροφοριών. Στην τοπολογία αυτή όλοι οι περιφερειακοί κόμβοι για να μπορέσουν να επικοινωνήσουν, πρέπει να αποστείλουν την πληροφορία στον κεντρικό. Η τοπολογία αυτή εμφανίζει ορισμένα πλεονεκτήματα όπως είναι η εύκολη και γρήγορη διασύνδεση πολλών κόμβων και ο εύκολος εντοπισμών σφαλμάτων, αλλά παράλληλα εμφανίζει και ένα σημαντικό μειονέκτημα το οποίο σχετίζεται με την πλήρη εξάρτηση όλων των κόμβων από έναν, όπου σε περιπτώσεις βλάβης το κεντρικού κόμβου παύει η ύπαρξη ολόκληρου του δικτύου,

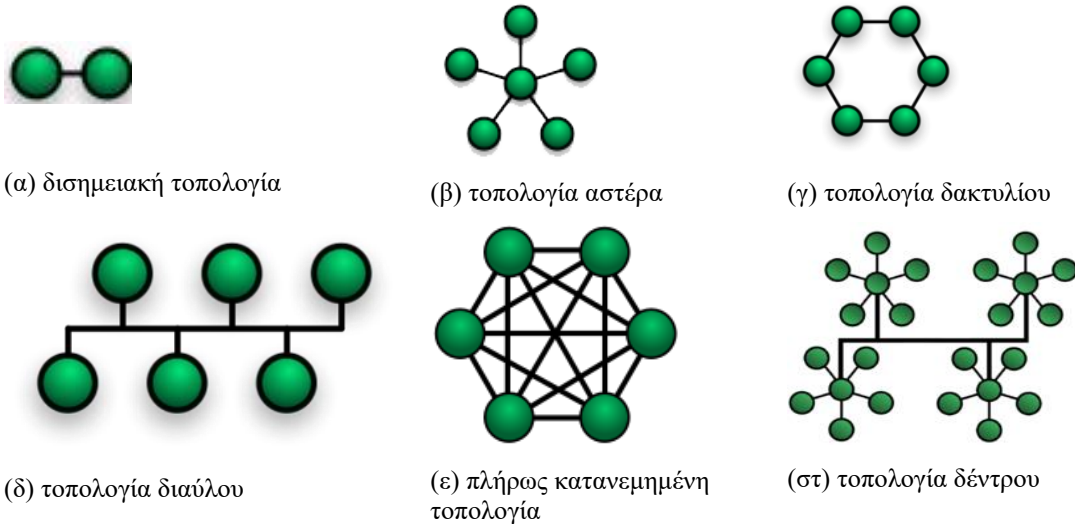
γ) τοπολογία δακτυλίου (ring topology), όπου οι κόμβοι έχουν τη μορφή δακτυλιδιού και τα δύο άκρα ενώνονται σε έναν κλειστό βρόγχο. Στην περίπτωση αυτή η πληροφορία που αποστέλλεται από έναν κόμβο διατρέχει όλο το δακτύλιο έως ότου φτάσει στον κόμβο προορισμού. Ένα από τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει αυτή η τοπολογία είναι η εύκολη επέκταση του δικτύου, ενώ ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ο δύσκολος εντοπισμός της ψευδούς πληροφορίας,

δ) τοπολογία διαύλου (bus topology), κάθε κόμβος συνδέεται σε μια κεντρική αρτηρία από την οποία μεταφέρεται η αποστέλλουσα πληροφορία. Η αρτηρία αυτή είναι διπλής κατεύθυνσης με αποτέλεσμα να εξυπηρετεί αμφίδρομες αποστολές. Ένα πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η εύκολη εγκαθίδρυση του δικτύου καθώς δεν απαιτούνται πολλαπλές συνδέσεις στον κάθε κόμβο, αλλά ισχυρό μειονέκτημα αποτελεί η πιθανή βλάβη της κεντρικής αρτηρίας καθώς είναι το μέσο από το οποίο περνούν όλα τα μηνύματα,

ε) πλήρως κατανεμημένη τοπολογία (mesh topology), στην οποία τα δύο άκρα ενώνονται σε έναν κλειστό βρόγχο παράλληλα όμως ο κάθε κόμβος έχει ξεχωριστή σύνδεση με όλους τους υπόλοιπους του δικτύου. Σημαντικό πλεονέκτημα εμφανίζεται στην απουσία εξάρτησης των κόμβων καθώς ο κάθε ένας παρουσιάζει δική του ξεχωριστή σύνδεση με τους υπόλοιπους, με αποτέλεσμα κάποια πιθανή βλάβη να μην επηρεάζει ολόκληρο το

δίκτυο. Αντίθετα, αυτή η τοπολογία δεν είναι βολική και χρήσιμη για μεγάλα και περίπλοκα δίκτυα.

στ) τοπολογία δέντρου, η οποία εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με τη δομή αστέρα και τη δομή διαύλου, πρόκειται για μια υβριδική τοπολογία δικτύου στην οποία τα δίκτυα αστέρων διασυνδέονται μέσω δικτύων διαύλου. Τα δίκτυα δέντρου είναι συνήθως ιεραρχικά και κάθε κόμβος μπορεί να έχει έναν αυθαίρετο αριθμό θυγατρικών κόμβων.



Εικόνα 2.4: Βασικές τοπολογίες δικτύων (α) δισημειακή, (β) αστέρα, (γ) δακτυλίου, (δ) διαύλου, και (ε) πλήρως κατανεμημένη τοπολογία

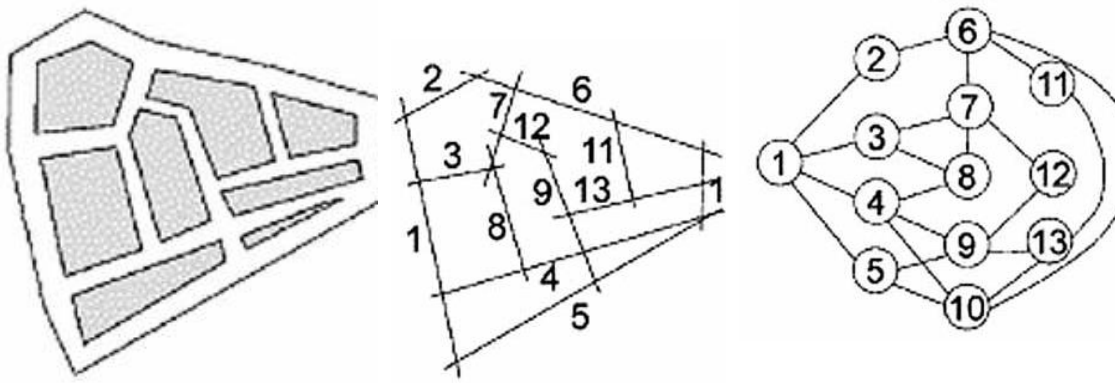
2.3.2. Τοπολογία οδικών δικτύων

Στο σημείο αυτό να αναφερθεί πως η συγκεκριμένη εργασία εφεξής εστιάζει και αναλύει τα οδικά δίκτυα και την τοπολογία αυτών. Συνεπώς, σύμφωνα με τους Park και Yilmaz (2010), η τοπολογία ενός οδικού δικτύου είναι συγκρίσιμα διαφορετική από άλλους κοινούς τύπους δικτύων καθώς ο σχεδιασμός τους στηρίζεται σε μια «επίπεδη» τοπολογία (planar topology) που εμπίπτει στον Ευκλείδειο χώρο όπου οι ακμές των κόμβων (links) δεν τέμνονται μεταξύ τους.

Η αναπαράσταση ενός αστικού δικτύου στηρίζεται σε σημαντικό βαθμό στην τοπολογία που παρουσιάζουν οι οδικές αρτηρίες και κατ' επέκταση εκδηλώνεται ο τρόπος με τον οποίο είναι συνδεδεμένη η πόλη (Lin & Ban, 2013; Marshall et al., 2018). Έχουν επικρατήσει δύο αναπαραστάσεις οδικών δικτύων. Η πρώτη αναπαράσταση πρόκειται για την πιο συνηθισμένη αναπαράσταση η οποία λαμβάνει τμήματα διαδρομής ως ακμές/συνδέσμους και τις διασταυρώσεις ή τα άκρα τους ως κόμβους (Crucitti et.al., 2006). Λόγω της απλότητάς της έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως τα τελευταία χρόνια από πολλούς ερευνητές και επιστήμονες σε διάφορες κυκλοφοριακές αναλύσεις που απαιτούν προσομοιώσεις δικτύων. Η δεύτερη (γνωστή και ως διπλή) αναπαράσταση ήρθε στο προσκήνιο αρκετών ερευνητών λίγα χρόνια αργότερα κατά την προσπάθεια να ερμηνεύσουν την ιεραρχία των οδικών αρτηριών σε μία πόλη. Όπως αναφέρεται με αναλυτικότερο τρόπο σε επόμενη ενότητα, η ιεραρχία και συνεπώς σημαντικότητα ενός κόμβου, καθορίζεται από τον αριθμό με τον οποίο είναι συνδεδεμένος με γειτονικούς κόμβους. Στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας, οι Jiang και Claramunt (2002), αναφέρονται στη δεύτερη αναπαράσταση κατά την οποία κάθε οδική αρτηρία εκφράζεται

με τη μορφή κόμβων και κάθε διασταύρωση με τη μορφή ακμής. Με αυτή τη μεθοδολογία το δίκτυο μετασχηματίζεται σε μια νέα τοπολογική αναπαράσταση, η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό διαφόρων δεικτών της θεωρίας γράφων που αναφέρεται διεξοδικά στην πορεία της διπλωματικής εργασίας.

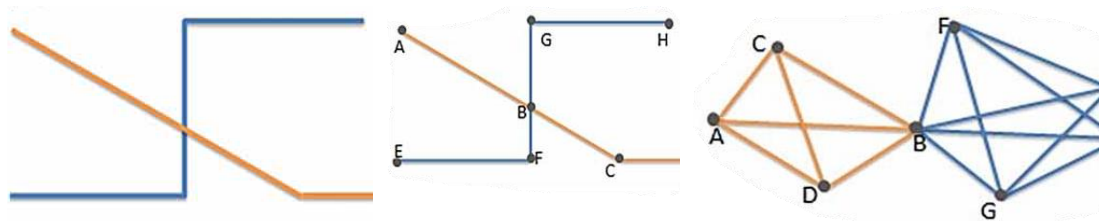
Οι δύο διαφορετικές μορφές αναπαράστασης εμφανίζονται στην Εικόνα 2.3 (Lin & Ban, 2013).



(α) αρχική μορφή αστικού δικτύου (β) πρώτη αναπαράσταση δικτύου (γ) δεύτερη αναπαράσταση δικτύου

Εικόνα 2.5: Αναπαραστάσεις δικτύου (α) φυσική μορφή αστικού δικτύου, (β) πρωταρχική αναπαράσταση, (γ) διπλή αναπαράσταση

Στη συνέχεια, γίνεται προσπάθεια αναπαράστασης του δικτύου των συστημάτων δημόσιων συγκοινωνιών. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο διαδρομών που περιλαμβάνουν κατανεμημένες στάσεις ή σταθμούς. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι ερευνητές προσπαθούσαν από τα πρώτα χρόνια που ξεκίνησε η μελέτη της τοπολογίας των δικτύων να συσχετίσουν και να αναλύσουν τα δίκτυα δημόσιων συγκοινωνιών, λόγω της σημαντικότητας που κατείχαν στη ζωή του ανθρώπου αλλά και της ανάγκης για μεγαλύτερη εξοικείωση. Οι Ferber, Holovatch και Palchykon (2007), επιχείρησαν να αναλύσουν τα δίκτυα δημοσίων συγκοινωνιών στο χώρο των στάσεων L-space και P-space. Βάσει της αναπαράστασης L-space η διαδρομή ενός λεωφορείου, μετρό ή τραμ (ή οποιοδήποτε άλλου μεταφορικού μέσου που εκτελεί προκαθορισμένες στάσεις), μπορεί να απεικονιστεί φυσικά στο χώρο ως εξής: οι στάσεις ή οι σταθμοί αποτελούν τις κορυφές του δικτύου και η σύνδεση δύο κορυφών θεωρείται επιτρεπτή αν και μόνο αν είναι διαδοχικές σε μια οποιαδήποτε διαδρομή (Εικόνα 2.4β). Αντίθετα, βάσει της αναπαράστασης P-space, όλες οι στάσεις μιας διαδρομής μπορούν να συνδεθούν καθώς υπάρχει έστω και μία κατευθυνόμενη γραμμή/διαδρομή μεταξύ τους (Εικόνα 2.4γ).

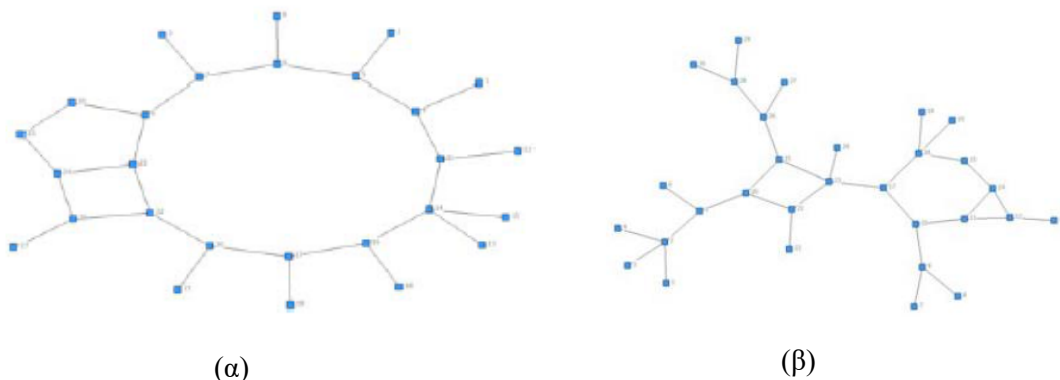


(α) δύο διαδρομές δημόσιων λεωφορείων (β) αναπαράσταση των γραμμών σε L-space (γ) αναπαράσταση των γραμμών σε P-space

Εικόνα 2.6: (α) Αναπαράσταση δύο διαδρομών με λεωφορείο σε (β) L-space και (γ) P-space

Συνεπώς, το μήκος διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων υποδεικνύει τους απαιτούμενους χρόνους μεταφοράς ενός επιβάτη κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Για το λόγο αυτό ο χώρος των στάσεων P-space ονομάζεται σύμφωνα με τους Kurant και Thiran, (2006) και χώρος μεταφοράς (space of transfer). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μεταφορά ενός επιβάτη από τον κόμβο Η στον Β που απαιτεί μόνο μία μεταφορά στο P-space ενώ στην πραγματικότητα υπάρχουν πολλές στάσεις μεταξύ τους στον L-space.

Κατόπιν, στην Εικόνα 2.5 παρατίθενται ορισμένα οδικά πραγματικά δίκτυα και γίνεται μια προσπάθεια να αλληλεσυσχετιστούν με τους βασικούς τύπους τοπολογίας δικτύων που αναφέρθηκαν και αναλύθηκαν νωρίτερα. Ως εκ τούτου, επιλέχθηκαν δύο χαρακτηριστικές περιοχές μελέτης, η μία περιοχή μελέτης είναι το Columbus Ohio και η άλλη περιοχή μελέτης είναι η περιοχή της Ουάσιγκτον D.C. Η πρώτη περιοχή μελέτης όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.5α μπορεί να συγκριθεί με την τοπολογία δακτυλίου αν και ακολουθεί ελαφρώς διαφορετική μορφολογία όντας πραγματικό δίκτυο. Οι περισσότεροι κόμβοι είναι περιφερειακοί, ενώ ορισμένοι βρίσκονται εκτός του δακτυλίου και συνδέονται με μεμονωμένο κόμβο αυτού. Η δεύτερη περιοχή μελέτης όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.5β μπορεί να συγκριθεί με την τοπολογία δέντρου. Κάθε κόμβος έχει έναν αυθαίρετο αριθμό δικών του κόμβων σύνδεσης με αποτέλεσμα το δίκτυο να θεωρείται αρκετά ανθεκτικό σε τυχόν διαταραχές. Συμπερασματικά τα συστήματα αστικών μεταφορών είναι ευάλωτα σε κυκλοφοριακή συμφόρηση, ατυχήματα, καιρικές συνθήκες, και οποιοδήποτε άλλο τυχαίο γεγονός. Έτσι συγκρίνοντας τα δύο αυτά δίκτυα μεταξύ τους προκύπτει πως στην περιοχή μελέτης στο Οχάιο, αν το δίκτυο διαταραχθεί και αναγκαστεί να αποσυνδεθεί κάποια ακμή, τότε το δίκτυο συνεχίζει να είναι λειτουργικό και αποτελεσματικό καθιστώντας το αρκετά ανθεκτικό σε διαταραχές. Αντιθέτως, στην περιοχή μελέτης στην Ουάσιγκτον το δίκτυο είναι σημαντικό πιο ευάλωτο καθώς ή διάσπασή του μπορεί να οδηγήσει σε ολοκληρωτική απομόνωση κόμβων άρα και περιοχών. Ωστόσο, μια τέτοια παρατήρηση χρήζει σίγουρα περαιτέρω ανάλυσης μέσω προσομοιώσεων που είναι case specific ώστε να αποτυπώνεται κάθε φορά η πραγματική διάσταση του προβλήματος.

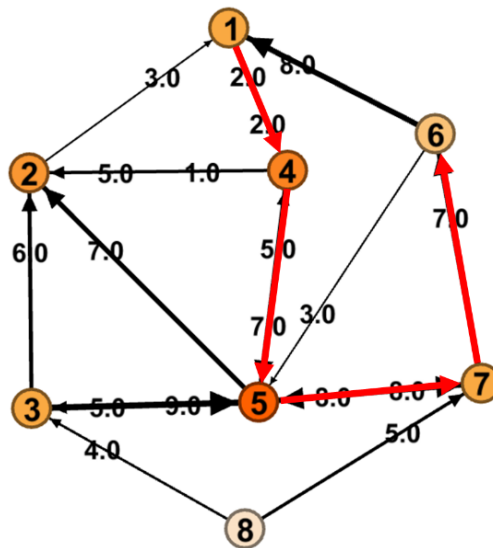


Εικόνα 2.7: (α) περιοχή μελέτης Columbus Ohio και (β) περιοχή μελέτης Washington D.C

2.4. Μέτρα δικτύων (Network measures)

2.4.1. Διάμετρος (Network diameter)

Διάμετρος ενός δικτύου ορίζεται η μακρύτερη εκκεντρότητα της μικρότερης διαδρομής (shortest path) μεταξύ οποιονδήποτε δύο ακμών στο γράφο. Με σκοπό τη καλύτερη ερμηνεία της διαμέτρου, χρησιμοποιήθηκε η Εικόνα 2.1 ως παραδειγματικός γράφος για την υπολογιστική διαδικασία. Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python ώστε να υπολογιστεί η διάμετρος του δικτύου. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας. Όπως φαίνεται παρακάτω η διάμετρος του συγκεκριμένου γράφου είναι $d = 24$ και η μακρύτερη εκκεντρότητα της μικρότερης διαδρομής είναι από τον κόμβο 1 στον κόμβο 6.



Εικόνα 2.8: Διάμετρος γράφου που προκύπτει μεταξύ του ζεύγους 1 – 6

2.4.2. Πυκνότητα (Graph density)

Η πυκνότητα γραφήματος αντιπροσωπεύει την αναλογία μεταξύ των ακμών που υπάρχουν σε ένα γράφημα και του μέγιστου πιθανού αριθμού ακμών που μπορεί να περιέχει το γράφημα. Εννοιολογικά, παρέχει μια ιδέα για το πόσο πυκνό είναι ένα γράφημα από την άποψη της συνδεσιμότητας ακμών. Σε έναν μη κατευθυντικό γράφο η πυκνότητα ορίζεται ως:

$$d = \frac{2m}{n(n-1)}$$

,όπου n ο αριθμός των κόμβων και m ο αριθμός των ακμών.

Σε έναν κατευθυντικό γράφο η πυκνότητα ορίζεται ως:

$$d = \frac{m}{n(n-1)}$$

,όπου n ο αριθμός των κόμβων και m ο αριθμός των ακμών.

Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python ώστε να υπολογιστεί η πυκνότητα του δικτύου. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας. Η τιμή της πυκνότητας για τον γράφο της Εικόνας 2.1 αντιστοιχεί με την τιμή $d = 0.3392857142857143$

2.4.3. Μέσο μήκος διαδρομής (Average path length)

Το μέσο μήκος διαδρομής είναι μια έννοια στην τοπολογία δικτύου που ορίζεται ως ο μέσος αριθμός βημάτων κατά μήκος των συντομότερων διαδρομών για όλα τα πιθανά ζεύγη κόμβων του δικτύου. Ωστόσο μέσο μήκος διαδρομής μπορεί να υπολογιστεί και για γράφο με βάρη, όπου στην περίπτωση αυτή το μέσο μήκος δεν αφορά τον μέσο αριθμό βημάτων αλλά τον μέσο αριθμό βαρών του γράφου (Niu & Li, 2020). Το μέσο μήκος διαδρομής υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη συνάρτηση:

$$a = \sum_{\substack{k \neq 0 \\ s, t \in V}} \frac{d(s, t)}{n(n-1)}$$

, όπου $d(s,t)$ η πιο σύντομη διαδρομή από το s στο t και n ο αριθμός των κόμβων.

Στον Πίνακα 4 φαίνονται τα αποτελέσματα του γράφου της Εικόνας 2.1. Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε ώστε να υπολογιστεί το μέσο μήκος διαδρομής του δικτύου βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας. Η τιμή για το μέσο μήκος διαδρομής του γράφου της Εικόνας 2.1 αντιστοιχεί με την τιμή $avpl = 10.410714285714286$

2.4.4. Modularity

Το modularity είναι ένα μέτρο της δομής των δικτύων (ή των γραφημάτων) που μετρά την ισχύ της διαίρεσης ενός δικτύου σε επιμέρους ενότητες ή συμπλέγματα. Το modularity κυμαίνεται από -1 έως 1, με το 1 να θεωρείται το βέλτιστο. Ωστόσο, η μέγιστη επιτεύξιμη τιμή για ένα δεδομένο γράφημα δεν είναι απαραίτητα 1 αλλά πιθανώς χαμηλότερη, ανάλογα με την ιδιαίτερη δομή του γράφου (Brandes, et al., 2008).

2.4.5. Αποδοτικότητα (Efficiency)

Η αποδοτικότητα είναι ένα μέτρο το οποίο αφορά ένα ζεύγος κόμβων και εκφράζεται ως το αντίστροφο της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων. Σύμφωνα με τους Latora και Marchiori (2001), η αποδοτικότητα ενός δικτύου μαθηματικά εκφράζεται ως εξής (Latora & Marchiori, 2001):

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

,όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων και d_{ij} η συντομότερη διαδρομή μεταξύ αυτών των κόμβων. Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε ώστε να υπολογιστεί η αποδοτικότητα του δικτύου βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας. Η τιμή για την αποδοτικότητα είναι ίση με: $eff = 0.14644082441682457$

2.5. Μέτρα Κεντρικότητας

2.5.1. Βαθμική κεντρικότητα (Degree Centrality)

Με τη βαθμική κεντρικότητα (ή degree centrality) ή βαθμό ενός κόμβου μετράμε πόσο συνδεδεμένος είναι ένας κόμβος σε ένα δίκτυο. Σε ένα μη κατευθυνόμενο δίκτυο δηλαδή, καλείται ο αριθμός των ακμών που συνδέονται με τον συγκεκριμένο κόμβο. Σε ένα

κατευθυνόμενο δίκτυο ο βαθμός διαχωρίζεται σε εσω-βαθμός όπου ονομάζεται ο αριθμός των ακμών που καταλήγουν σε αυτό τον κόμβο (indegree) και σε εξω-βαθμός που είναι ο αριθμός των ακμών που φεύγουν από αυτό τον κόμβο (outdegree) (Steen, 2010). Η κεντρικότητα ενός κόμβου ορίζεται ως εξής (Hevey et al., 2013):

$$dc = \frac{di(g)}{(n - 1)}$$

, όπου d_i είναι ο βαθμός του κόμβου i , δηλαδή το άθροισμα των ακμών που περνούν από τον κόμβο i στο δίκτυο g και n είναι το πλήθος των κόμβων του δικτύου g .

Για να γίνει περισσότερο σαφής η έννοια του βαθμού ενός δικτύου θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα ο γράφος της Εικόνας 2.1. Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python ώστε να υπολογιστεί ο βαθμός του κάθε κόμβου του συγκεκριμένου γράφου. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας. Τα αποτελέσματα του κώδικα και συνεπώς ο βαθμός του εκάστοτε κόμβου εμφανίζονται στον Πίνακα 1. Όπως φαίνεται στον πίνακα το αποτέλεσμα βγαίνει σε δεκαδική μορφή καθώς ο βαθμός προκύπτει από το κλάσμα των συνδεδεμένων σε αυτόν κόμβων προς τον αριθμό των μη συνδεδεμένων σε αυτόν κόμβων. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για το κάτωθεν αποτέλεσμα είναι βασισμένη στη βιβλιοθήκη της NetworkX.

Πίνακας 2.1: Βαθμός του κάθε κόμβου με τη NetworkX.

degree	id
0.428571	6
0.571429	1
0.571429	7
0.428571	8
0.714286	3
0.714286	2
1.142857	5
0.857143	4

2.5.2. Ενδιάμεση κεντρικότητα (Betweenness Centrality)

Η ενδιάμεση κεντρικότητα (ή betweenness centrality) είναι ένα μέτρο που βασίζεται στις συντομότερες διαδρομές. Πρακτικά για κάθε ζεύγος κόμβων σε ένα συνδεδεμένο γράφο, υπάρχει τουλάχιστον ένα συντομότερο μονοπάτι μεταξύ των κόμβων αυτών, έτσι ώστε είτε ο αριθμός των ακμών από τις οποίες διέρχεται η διαδρομή (για μη σταθμισμένα γραφήματα) είτε το άθροισμα των βαρών των ακμών (για σταθμισμένα γραφήματα) ελαχιστοποιείται. Η ενδιάμεση κεντρικότητα για κάθε κόμβο είναι ο αριθμός αυτών των συντομότερων μονοπατιών (shortest paths) που διέρχονται από τον συγκεκριμένο κόμβο (Barthélemy, 2004). Η βιβλιοθήκη NetworkX ορίζει την ενδιάμεση κεντρικότητα ως το κλάσμα που περιλαμβάνει ως αριθμητή τον αριθμό των συντομότερων διαδρομών που διέρχονται από τον κόμβο και ως παρονομαστή το σύνολο των συντομότερων διαδρομών στο γράφο. Η μαθηματική συνάρτηση φαίνεται παρακάτω:

Βελτιστοποίηση μεθόδων οικονομικής και λειτουργικής περιγραφής οδικών δικτύων ευρείας κλίμακας, με τη συνδυαστική χρήση θεωρίας γράφων και αλγορίθμων κατανομής κυκλοφορίας

$$b = \sum_{s,t \in V} \frac{\sigma(s,t|u)}{\sigma(s,t)}$$

,όπου $\sigma(s, t)$ ο σύνολο των συντομότερων διαδρομών στο γράφο και $\sigma(s,t|u)$ τον αριθμό των συντομότερων διαδρομών που διέρχονται από τον συγκεκριμένο κόμβο u .

Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται τα αποτελέσματα του γράφου της Εικόνας 2.1. Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python ώστε να υπολογιστεί η ενδιάμεση κεντρικότητα του κάθε κόμβου. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 2.2: Ενδιάμεση κεντρικότητα του κάθε κόμβου με τη NetworkX

betweenness	id
0.0119048	6
0	1
0.154762	7
0.047619	8
0.22619	3
0.0952381	2
0.511905	5
0.333333	4

Η ενδιάμεση κεντρικότητα μπορεί εκτός από μέτρο κόμβου να υπολογιστεί αντιστοίχως και για οποιαδήποτε ακμή του γράφου. Σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση παραμένει ίδια απλώς στη θέση του κόμβου μπαίνει η εκάστοτε ακμή. Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται τα αποτελέσματα για το γράφο της Εικόνας 2.1. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 2.3: Ενδιάμεση κεντρικότητα της κάθε ακμής με τη NetworkX

betweenness	from node	to node
0.0267857	6	1
0.107143	6	5
0.125	1	4
0.133929	7	6
0.107143	7	5
0.0803571	8	7
0.0803571	8	3
0.107143	3	2
0.0267857	3	5
0.160714	3	8
0.0267857	2	1

0.169643	2	4
0.160714	5	7
0.214286	5	3
0.0803571	5	4
0.0535714	5	2
0.267857	4	5
0.0357143	4	2
0.0714286	4	1

2.5.3. Κεντρικότητα εγγύτητας (Closeness Centrality)

Με την κεντρικότητα εγγύτητας (ή closeness centrality) υπολογίζεται πόσο εύκολα δύναται να μεταφερθούμε από έναν κόμβο σε κάποιον άλλο κόμβο (Okamoto et al., 2008). Ορίζεται ως το αντίστροφο της μέσης απόστασης μεταξύ αυτού και οποιοδήποτε άλλου κόμβου και αναπαρίσταται μαθηματικά ως εξής:

$$C_c = \frac{n - 1}{\sum_{u=0}^{n-1} d(v, u)}$$

,όπου $d(v, u)$ είναι το μήκος του συντομότερου μονοπατιού μεταξύ δύο κόμβων v και u . Στον Πίνακα 2.4 φαίνονται τα αποτελέσματα του γράφου της Εικόνας 2.1. Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python ώστε να υπολογιστεί η κεντρικότητα εγγύτητας του κάθε κόμβου. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 2.4: Κεντρικότητα εγγύτητας του κάθε κόμβου με τη NetworkX

closeness	id
0.055118	6
0.122807	1
0.0864198	7
0.0752688	8
0.101449	3
0.116667	2
0.122807	5
0.148936	4

2.5.4. Ιδιοκεντρικότητα (Eigenvector Centrality)

Στην ιδιοκεντρικότητα θεωρείται, ότι η αξία, δηλαδή το κύρος του ενός κόμβου εξαρτάται από την αξία των γειτόνων του, πόσους βαθμικά σημαντικότερους γείτονες έχει (Agryzkon et al., 2019). Στον Πίνακα 2.5 φαίνονται τα αποτελέσματα του γράφου της Εικόνας 2.1. Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στη γλώσσα

προγραμματισμού Python ώστε να υπολογιστεί η ιδιοκεντρικότητα του κάθε κόμβου. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 2.5: Ιδιοκεντρικότητα του κάθε κόμβου με τη NetworkX

eigenvector	id
0.19367325811975253	6
0.2753735331173838	1
0.3709128769937367	7
0.07054281946093029	8
0.23642485119536974	3
0.5173862529741241	2
0.5774653928318007	5
0.2950523846755315	4

2.5.5. Συντελεστής σύμπλεξης (Clustering Coefficient)

Ο συντελεστής σύμπλεξης είναι ένα μέτρο που αφορά τον κάθε κόμβο, υποδεικνύοντας τη συνδεσιμότητα των γειτόνων του κάθε κόμβου. Ουσιαστικά, για μη σταθμισμένους γράφους είναι το κλάσμα των πιθανών τριγώνων που δημιουργούνται διαμέσου του κόμβου αυτού. Μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$C_u = \frac{2T(u)}{\deg(u)(\deg(u) - 1)}$$

, όπου $T(u)$ ο αριθμός των τριγώνων του κόμβου u και $\deg(u)$ ο βαθμός του συγκεκριμένου κόμβου.

Για σταθμισμένους γράφους ο συντελεστής σύμπλεξης εκφράζεται με διάφορους τρόπους ένας εκ των οποίων είναι ο γεωμετρικός μέσος όρος των βαρών των ακμών του γραφήματος. Η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής σύμπλεξης του κάθε κόμβου. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα I της παρούσας εργασίας. Τα αποτελέσματα διαφαίνονται στον Πίνακα 2.6.

Πίνακας 2.6: Clustering Coefficient ενός κόμβου με τη NetworkX

clustering coefficient	id
0.3333333333333333	6
0.4	1
0.2	7
0	8
0.125	3
0.5555555555555556	2
0.16	5
0.3333333333333333	4

3. Καταμερισμός της κυκλοφορίας

3.1. Σημασία στο πλαίσιο του σχεδιασμού των μεταφορών

Η διαδικασία πρόβλεψης των μετακινήσεων βρισκόταν στο επίκεντρο του σχεδιασμού των αστικών συγκοινωνιακών μεταφορών καθώς συγκροτούσε ένα από τα πρώτα μαθηματικά μοντέλα που προσπαθούσε να διασφαλίσει τη σύνδεση μεταξύ των επικρατουσών χρήσεων γης και της ανάγκης των ανθρώπων για μετακίνηση. Τα μοντέλα πρόβλεψης των μετακινήσεων χρησιμοποιούνται για την προβολή της μελλοντικής κυκλοφορίας στο οδικό δίκτυο και αποτελούν τη βάση για τον προσδιορισμό της ανάγκης για νέες οδικές υποδομές, καθώς και αλλαγές στις πολιτικές χρήσης γης (Ahmed, 2012). Η μοντελοποίηση των μελλοντικών μετακινήσεων περιλαμβάνει μια σειρά μαθηματικών μοντέλων που επιχειρούν να προσομοιώσουν και να αντικατοπτρίσουν την ανθρώπινη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια μιας μετακίνησης. Τα μοντέλα υλοποιούνται ακολουθώντας συγκεκριμένα βήματα καθώς παράλληλα καλούνται να δεχτούν υποθέσεις σχετικά με τον τρόπο που οι άνθρωποι λαμβάνουν τις αποφάσεις αλλά και τον τρόπο που αντιδρούν σε υπάρχουσες εναλλακτικές λύσεις μεταφορών. Η διαδικασία πρόβλεψης των μετακινήσεων έχει παραμείνει γνωστή ως τα τέσσερα στάδια του σχεδιασμού των μεταφορών ξεκινώντας από (α) τη γένεση των μετακινήσεων, (β) την κατανομή των μετακινήσεων στο χώρο, (γ) τον καταμερισμό των μετακινήσεων κατά μεταφορικό μέσο και (δ) τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο.

Η γένεση των μετακινήσεων απαντά στο αν υπάρχει επιθυμία για μετακίνηση (επιβατική ή εμπορευματική) και αν τελικά θα πραγματοποιηθεί. Συνδέεται άμεσα με κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες όπως επίσης και με τη χρήση γης της εκάστοτε περιοχής. Παραδείγματα τέτοιων παραγόντων που θεωρούνται καθοριστικά για την παραγωγή ή έλξη μιας μετακίνησης αποτελούν η θέση και η προσιτότητα της συγκεκριμένης κυκλοφοριακής ζώνης από το δημόσιο σύστημα συγκοινωνιών, το εισόδημα μιας οικογένειας, καθώς και η ύπαρξη ή μη αυτοκινήτου στην οικογένεια. Επιπρόσθετοι παράγοντες που συγκαταλέγονται στα κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά μιας ζώνης είναι η κατανομή ηλικιών του πληθυσμού της, καθώς αναμένεται πως οι νεότερες ηλικίες θα πραγματοποιήσουν μεγαλύτερο αριθμό μετακινήσεων για κοινωνικούς σκοπούς συγκριτικά με τους ηλικιωμένους κατοίκους της περιοχής αυτής. Τέλος και συμπληρωματικά με τους παράγοντες αυτούς, ο ρυθμός μια μετακίνησης τείνει να διαφέρει από ζώνη σε ζώνη, καθώς η ελκυστικότητα της κάθε περιοχής διαφέρει σημαντικά. Η ελκυστικότητα αντανακλάται από το είδος της χρήσης γης (κατοικία, χώροι αναψυχής και διασκέδασης, βιομηχανικοί χώροι κτλ.) και συνεπώς επηρεάζει την έλξη των μετακινήσεων (Yao et al., 2008).

Η κατανομή των μετακινήσεων στο χώρο συνιστά το δεύτερο βήμα της διαδικασίας πρόβλεψης των μετακινήσεων και είναι υπεύθυνη για την κατανομή του αριθμού γένεσης και έλξης των μετακινήσεων στις αντίστοιχες κυκλοφοριακές ζώνες. Πρακτικά σε αυτό το βήμα δημιουργείται ένας πίνακας προέλευσης – προορισμού (origin-destination matrix) που αντιστοιχίζει τον αριθμό των γεννώμενων μετακινήσεων από κάθε προέλευση σε κάθε προορισμό. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για την κατανομή αυτή χρησιμοποιώντας τύπους που «αιχμαλωτίζουν» τις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων επηρεασμού της κάθε μετακίνησης. Ωστόσο, ανεξαρτήτως της χρησιμοποιούμενης

μεθόδου, το βασικό κοινό μεθοδολογικό πλαίσιο είναι το ίδιο το οποίο δηλώνει πως ο αριθμός των ταξιδιών από μια ζώνη προέλευσης σε μια ζώνη προορισμού είναι ανάλογος των κινήτρων που πυροδοτούν τη γέννηση της μετακίνησης της κάθε ζώνης και αντιστρόφως ανάλογος του κόστους για αυτές τις μετακινήσεις (Γιαννόπουλος, 2002).

Ο καταμερισμός των μετακινήσεων κατά μεταφορικό μέσο σχετίζεται με το μοντέλο το οποίο καταμερίζει τις μετακινήσεις που έχουν προκύψει από τα προηγούμενα δύο βήματα ανά μεταφορικό μέσο. Ο καταμερισμός των μετακινήσεων ανά μέσο προκύπτει βάσει της συμπεριφοράς του ατόμου ή των αναγκών των μεταφερόμενων αγαθών. Οι παράγοντες αυτοί σχετίζονται αφενός με το κόστος της μετακίνησης, αφετέρου με την άνεση και τη διάρκεια του ταξιδιού. Αναφορικά με την κατανομή των επιβατικών μετακινήσεων, ο διαχωρισμός επικεντρώνεται στο ιδιωτικό όχημα και στα δημόσια μέσα συγκοινωνίας. Από την άλλη πλευρά, οι εμπορευματικές μεταφορές επιμερίζονται στα μέσα αναλόγως της αξίας του προϊόντος, της ποιότητάς του και της σχέσης όγκου προς βάρος. Μια εμπορευματική μετακίνηση μπορεί να εκτελεστεί από ένα μόνο μεταφορικό μέσο ή και από συνδυασμό αυτών. Το τρίτο στάδιο του καταμερισμού των μετακινήσεων ανά μέσο αποκτά ενδιαφέρον καθώς το μοντέλο αυτό μπορεί να μελετηθεί και ανεξάρτητα της συνολικής διαδικασίας πρόβλεψης των μετακινήσεων ώστε να αξιολογήσει ανάγκες διάφορων οικονομοτεχνικών μελετών που αφορούν τη βελτίωση συγκεκριμένων υποδομών ή και την κατασκευή νέων (Γιαννόπουλος, 2002).

Τέλος, το τέταρτο και τελικό στάδιο στο οποίο και επικεντρώνεται η διπλωματική εργασία είναι ο καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο. Ο καταμερισμός αυτός αφορά τη διαδρομή κατά την οποία μια μετακίνηση θα ακολουθήσει πάνω στο δίκτυο. Έχει επικρατήσει η ονομασία Traffic Assignment (TA) και περιλαμβάνει τεχνικές εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής (συντομότερης διαδρομής – shortest path) έτσι ώστε να εκτιμηθεί όσο γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια ο τρόπος που θα κατανεμηθούν πάνω στα διάφορα τμήματα του δικτύου οι μετακινήσεις και θα προκύψει τελικά ο κυκλοφοριακός φόρτος του δικτύου. Μια κατανομή των μετακινήσεων στο δίκτυο που δεν ακολουθεί την ισορροπία οδηγείται τελικά σε φαινόμενα συμφόρησης όπου οι ταξιδιώτες δεν μπορούν να φτάσουν στον προορισμό τους μέσα στον προβλεπόμενο χρόνο (Galib et al., 2014).

3.2. Θεμελιώδεις αρχές του καταμερισμού της κυκλοφορίας

Ο καταμερισμός της κυκλοφορίας στο δίκτυο στηρίζεται σε ορισμένες αρχές που αντικατοπτρίζουν τον τρόπο επιλογής διαδρομής από τους χρήστες ενός οδικού δικτύου λαμβάνοντας υπόψιν διάφορους παράγοντες όπως η επίδραση της συμφόρησης και η γνώση των επικρατουσών συνθηκών. Επιπλέον, αυτές οι αρχές αντικατοπτρίζουν και τη συμπεριφορά των χρηστών μέσα σε ένα οδικό δίκτυο η οποία μπορεί να είναι είτε εγωκεντρική, είτε προσανατολισμένη στο συμφέρον του συνόλου των χρηστών. Ανάλογα με την υιοθετηθείσα αρχή ο καταμερισμός της κυκλοφορίας στο δίκτυο μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη επιτρέπει την επιλογή μίας μόνο διαδρομής ανά ζεύγος προέλευσης προορισμού, ενώ η δεύτερη καθιστά δυνατή την επιλογή περισσότερων διαδρομών ανά ζεύγος προέλευσης προορισμού.

Βασική παράμετρος που χρησιμοποιείται κατά τον καταμερισμό της κυκλοφορίας αποτελεί ο χρόνος διέλευσης του κάθε τμήματος του οδικού δικτύου. Στην απλούστερη περίπτωση ο χρόνος αυτός υπολογίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να διασχίσει ένας χρήστης το εκάστοτε οδικό τμήμα σε συνθήκες ελεύθερης ροής. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν είναι ρεαλιστικό ιδίως σε αστικά οδικά κέντρα όπου η επίδραση της συμφόρησης είναι σημαντική. Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί διάφορες συναρτήσεις φόρτου – καθυστέρησης οι οποίες εκτιμούν το χρόνο διέλευσης ενός οδικού τμήματος συναρτήσει του κυκλοφοριακού του φόρτου. Η πιο γνωστή από αυτές είναι η συνάρτηση BPR (Bureau of Public Roads) η οποία μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$t_{ij}(x_{ij}) = t_{ij}^0 \left(1 + a \left(\frac{x_{ij}}{u_{ij}} \right)^\beta \right)$$

,όπου t_{ij}^0 ο χρόνος που απαιτείται για να διασχίσει ένας χρήστης το εκάστοτε οδικό τμήμα σε συνθήκες ελεύθερης ροής, u_{ij} είναι η χωρητικότητα του οδικού τμήματος και x_{ij} ο φόρτος που εισέρχεται στο οδικό τμήμα. Οι τιμές a και β είναι σταθερές της συνάρτησης και ισοδυναμούν με $a=0.15$ και $\beta=4$.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η συνάρτηση είναι καλά καθορισμένη για οποιαδήποτε τιμή του x_{ij} , ακόμη και όταν οι ροές υπερβαίνουν την αναφερόμενη χωρητικότητα u_{ij} (Boyles et al., 2020).

3.2.1. Αρχή «όλα ή τίποτα» (All or nothing)

Η αρχή του «όλα ή τίποτα» θεωρείται από τους απλούστερους τρόπους που κατανέμονται οι μετακινήσεις στο δίκτυο. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο υπολογισμός των συντομότερων διαδρομών προκύπτει από κάποιο κριτήριο κόστους (συνήθως το χρόνο διέλευσης ενός οδικού τμήματος υπό συνθήκες ελεύθερης ροής) και βάσει αυτών καταμερίζονται οι μετακινήσεις στο δίκτυο. Με άλλα λόγια, θεωρείται πως το σύνολο των μετακινήσεων που αντιστοιχούν στο κάθε ζεύγος προέλευσης – προορισμού υλοποιείται μέσω της συντομότερης διαδρομής σε συνθήκες ελεύθερης ροής. Η αρχή αυτή θεωρείται μη ρεαλιστική μη λαμβάνοντας υπόψιν τη χωρητικότητα των τμημάτων μέσα στο δίκτυο και κατ' επέκταση την επίδραση της συμφόρησης (Saw et al., 2015). Ωστόσο, αυτό το μοντέλο μπορεί να είναι λογικό σε μη συμφορημένα δίκτυα ή και σε υπεραστικά δίκτυα όπου υφίστανται περιορισμένες εναλλακτικές διαδρομές μεταξύ των ζωνών προέλευσης – προορισμού (υπάρχει δηλαδή σημαντική διαφορά στο κόστος μετακίνησης) και οι κυκλοφοριακοί φόρτοι είναι αρκετά μικροί.

3.2.2. Αρχή της εξισορρόπησης χρηστών (User equilibrium)

Η αρχή αυτή ταυτίζεται και με την πρώτη αρχή του Wardrop κατά την οποία το συμπεριφορικό μοντέλο των οδηγών θεωρείται πλήρως εγωκεντρικό, αφού οι οδηγοί επιθυμούν να ελαχιστοποιήσουν τον ατομικό τους χρόνο διαδρομής χωρίς να ενδιαφέρονται για τις επιπτώσεις που προκαλούνται από την εκλογή τους αυτή στο χρόνο διαδρομής των υπόλοιπων μετακινούμενων στο δίκτυο. Συνεπώς ο χρήστης επιλέγει τη διαδρομή που ελαχιστοποιεί το δικό του χρόνο ανεξαρτήτως της επιλογής των υπολοίπων χρηστών. Η αυστηρή διατύπωση της πρώτης αρχής του Wardrop είναι ότι κανένας οδηγός δεν μπορεί να μειώσει μονομερώς το κόστος μετακίνησης του ακολουθώντας μια

άλλη διαδρομή. Αυτό συμβαίνει διότι οι φόρτοι έχουν ήδη καταμεριστεί στο δίκτυο ώστε να επέλθει «ισορροπία».

Οι υποθέσεις που γίνονται για την αρχή της εξισορρόπησης των χρηστών είναι οι ακόλουθες:

- Ο χρήστης έχει τέλεια γνώση του κόστους διαδρομής
- Ο χρόνος ταξιδιού σε ένα δεδομένο οδικό τμήμα είναι συνάρτηση του κυκλοφοριακού φόρτου μόνο σε αυτό το οδικό τμήμα
- Οι συναρτήσεις χρόνου ταξιδιού είναι θετικές και αυξανόμενες.

Σύμφωνα με τον Beckman η λύση στις παραπάνω συνθήκες ισορροπίας δίνεται από τη λύση ενός ισοδύναμου μη γραμμικού προγράμματος μαθηματικής βελτιστοποίησης η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του οποίου διαφαίνονται παρακάτω (Matheu, 2011).

$$\text{Minimize } Z = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(x_a) dx \quad (1)$$

Με περιορισμούς:

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} : \forall r, s \quad (2)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs} : \forall a \quad (3)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 : \forall k, r, s \quad (4)$$

$$x_a \geq 0 : a \in A \quad (5)$$

,όπου k είναι η διαδρομή, x_a ο κυκλοφοριακός φόρτος του link a , t_a ο χρόνος διαδρομής του link a , f_k^{rs} ο κυκλοφοριακός φόρτος του k που ενώνει ζώνες προέλευσης – προορισμού r - s , q_{rs} ο αριθμός των οχημάτων που αντιστοιχούν στο ζεύγος ζωνών r - s , $\delta_{a,k}^{rs}$ είναι ένας δυικός περιορισμός και ορίζεται ως εξής:

$$\delta_{a,k}^{rs} = \begin{cases} 1 & \text{αν το link } a \text{ συμμετέχει στη διαδρομή } k, \\ 0 & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (6)$$

Οι εξισώσεις 2 – 6 είναι περιορισμοί που ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση 1 και αποτελούν την αρχή εξισορρόπησης του χρήστη. Η διαδρομή που συνδέει το ζεύγος OD μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: στη διαδρομή που εξυπηρετεί κυκλοφοριακό φόρτο και στη διαδρομή που δεν εξυπηρετεί κυκλοφοριακό φόρτο καθώς ο χρόνος διαδρομής είναι μεγαλύτερος (ή ίσος) με τον ελάχιστο χρόνο διαδρομής του συγκεκριμένου OD. Όταν ικανοποιούνται οι εξισώσεις αυτές ταυτοχρόνως υποδηλώνεται πως κανένας οδηγός δεν μπορεί να μειώσει το χρόνο διαδρομής του αλλάζοντας την ατομική του διαδρομή αφού όλες οι εναλλακτικές διαδρομές διακατέχονται από μεγάλους χρόνους διαδρομής.

3.2.3. Αρχή της εξισορρόπησης δικτύου (System optimum)

Η αρχή της εξισορρόπησης δικτύου βασίζεται στη δεύτερη αρχή του Wardrop, η οποία δηλώνει ότι οι οδηγοί συνεργάζονται μεταξύ τους προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός χρόνος διαδρομής ολόκληρου του δικτύου. Προφανώς η αρχή αυτή δεν αποτελεί ένα ρεαλιστικό μοντέλο συμπεριφοράς αφού είναι ανέφικτο οι οδηγοί να γνωρίζουν κάθε στιγμή το προς τα πού επιθυμούν οι υπόλοιποι χρήστες του δικτύου να κατευθυνθούν. Συνεπώς, αν και στην αρχή της εξισορρόπησης δικτύου ισχύει η ίδια υπόθεση της αρχής της εξισορρόπησης χρηστών, όπου δηλαδή οι χρήστες έχουν τέλεια γνώση του κόστους διαδρομής και κατ' επέκταση του τί συμβαίνει μέσα στο δίκτυο από πλευράς κυκλοφοριακού φόρτου, είναι μη ρεαλιστική η υπόθεση ότι θα έχουν την τέλεια γνώση για τις διαδρομές που επιθυμούν οι χρήστες να επιλέξουν και ταυτόχρονα ότι η ίδια λογική θα είναι συλλογική για όλους τους οδηγούς του δικτύου. Παρ' όλα αυτά, μπορεί να θεωρηθεί ένα ρεαλιστικό μοντέλο στην περίπτωση όπου υπάρχει ένα κέντρο ελέγχου της κυκλοφορίας και μπορεί να κατευθύνει και να ελέγξει την επιλεγθείσα διαδρομή των χρηστών. Η αρχή αυτή διέπεται από ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος διαδρομής και επομένως επιτυγχάνεται μια βέλτιστη κοινωνική ισορροπία στο δίκτυο (Matheu, 2011). Η αντικειμενική συνάρτηση και οι αντίστοιχοι περιορισμοί φαίνονται παρακάτω.

$$\text{Minimize } Z = \sum_a x_a t_a(x_a) \quad (7)$$

Με περιορισμούς:

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} : \forall r, s \quad (8)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs} : \forall a \quad (9)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 : \forall k, r, s \quad (10)$$

$$x_a \geq 0 : a \in A \quad (11)$$

,όπου k είναι η διαδρομή, x_a ο κυκλοφοριακός φόρτος του link a , t_a ο χρόνος διαδρομής του link a , f_k^{rs} ο κυκλοφοριακός φόρτος του k που ενώνει ζώνες προέλευσης – προορισμού r - s , q_{rs} ο αριθμός των οχημάτων που αντιστοιχούν στο ζεύγος ζωνών r - s .

3.3. Χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι

Με εξαίρεση την επίλυση του προβλήματος του καταμερισμού της κυκλοφορίας στο δίκτυο σύμφωνα με τις αρχές του «all or nothing», βασικό στόχο της προαναφερθείσας επίλυσης αποτελεί η εξισορρόπηση του δικτύου σύμφωνα με τις αρχές του Wardrop. Σύμφωνα με τον Boyle (2020), δεν υπάρχει κάποια μαγική «συνταγή» η οποία οδηγεί απευθείας στη λύση του προβλήματος, αντιθέτως υπάρχει μια επαναληπτική διαδικασία που ακολουθείται η οποία προσπαθεί να πλησιάσει στη λύση του προβλήματος μέσω διαδοχικών βημάτων. Μια τέτοια λογική ακολουθεί και η μέθοδος Newton η οποία επαναλαμβάνει μία σειρά βημάτων μέχρι η συνάρτηση να φτάσει αρκετά κοντά στο μηδέν. Η γενική δομή που ακολουθείται από όλους τους ευρέως χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους είναι η παρακάτω:

- Εύρεση συντομότερης διαδρομής μεταξύ κάθε ζώνης προέλευσης – προορισμού μέσω του αλγορίθμου dijkstra
- Κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στις συντομότερες διαδρομές
- Υπολογισμός του χρόνου διαδρομής και του κυκλοφοριακού φόρτου του κάθε link του δικτύου
- Επιστροφή στο πρώτο βήμα εκτός και αν ήδη έχει επέλθει η ισορροπία

Το τρίτο βήμα μπορεί να υπολογιστεί αρκετά απλά μέσω της ποσοτικοποίησης της συνάρτησης φόρτου – καθυστέρησης (μέσω της h_{ij}) για το κάθε link του δικτύου με τους νέους φόρτους. Το βήμα που χρειάζεται περαιτέρω προσοχή είναι το δεύτερο καθώς εγκυμονεί ο κίνδυνος της ατέρμονης επαναληπτικής διαδικασίας στην περίπτωση που η κατανομή του φόρτου στις σύντομες διαδρομές γίνει για πάρα πολλούς ταξιδιώτες ταυτόχρονα. Αν από την άλλη πλευρά η κατανομή των ταξιδιωτών γίνεται με πολύ μικρό βήμα κάθε φορά τότε ο αλγόριθμος θα καθυστερήσει να φτάσει στη λύση πάρα πολύ, και τότε ελλοχεύει ο κίνδυνος να μη βρεθεί λύση στο δίκτυο.

Λόγω των ανωτέρω κινδύνων η παραπάνω γενική δομή τροποποιείται ως εξής:

- Εύρεση συντομότερης διαδρομής μεταξύ κάθε ζώνης προέλευσης – προορισμού μέσω του αλγορίθμου Dijkstra
- Εύρεση του κυκλοφοριακού φόρτου που θα προέκυπτε αν αυτός είχε κατανεμηθεί στις συντομότερες διαδρομές (x^*)
- Κατανομή του εξής φόρτου σε κάθε link του δικτύου $x \leftarrow \lambda x^* + (1 - \lambda)x$, όπου $\lambda \in [0,1]$
- Υπολογισμός του χρόνου διαδρομής του κάθε link λαμβάνοντας υπόψιν τον κατανεμημένο φόρτο x
- Επιστροφή στο πρώτο βήμα εκτός και αν ήδη έχει επέλθει η ισορροπία

Ουσιαστικά το λ αποτελεί έναν συντελεστή μέσω του οποίου αποφεύγεται η κατανομή των κυκλοφοριακών φόρτων με πολύ μεγάλο ή μικρό βήμα. Σε αυτό στηρίζεται η μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων (Method of Successive Averages – MSA), η οποία αν και δεν είναι η βέλτιστη μέθοδος συγκριτικά με τις υπόλοιπες, είναι απλή και σαφής όσον αφορά την εφαρμογή των προαναφερθέντων επαναληπτικών βημάτων. Σημαντικό ωστόσο είναι να προσδιοριστεί κατάλληλα το x^* και κατ' επέκταση το βήμα λ με το οποίο αρχίζει η κατανομή των φόρτων. Στην πρώτη επανάληψη η τιμή του x^* υπολογίζεται βάση της αρχής «όλα ή τίποτα» που αναφέρθηκε προηγουμένως. Αυτό πραγματοποιείται αν υποθέσουμε πως οι χρόνοι διαδρομής είναι σταθεροί και συνεπώς και οι συντομότερες διαδρομές μεταξύ μιας ζώνης προέλευσης – προορισμού παραμένουν αμετάβλητες. Στην περίπτωση αυτή το x^* είναι η λύση βάσει της οποίας όλοι οι οδηγοί κατευθύνονται από τις συντομότερες διαδρομές και συνεπώς το $\lambda=1$. Βέβαια, αν όλοι οι οδηγοί ακολουθούσαν τις συντομότερες διαδρομές που έχουν προκύψει από την πρώτη μόνο επανάληψη, τότε είναι σχεδόν βέβαιο πως οι διαδρομές αυτές θα έπαυαν να είναι οι συντομότερες. Συνεπώς τίθεται το ερώτημα της τιμής του λ . Ο αλγόριθμος MSA αυτό που κάνει είναι να υιοθετεί μια λογική μέση λύση. Αρχικά δηλαδή, μετακινεί μεγάλο αριθμό ταξιδιωτών από τα συντομότερα μονοπάτια και καθώς ο αλγόριθμος συγκλίνει το λ μειώνεται μέχρι να πλησιάσει το μέσο όρο. Με αυτόν τον

τρόπο αποφεύγονται και οι δύο προαναφερθέντες κίνδυνοι (της μετακίνησης του μεγάλου και μικρού αριθμού ταξιδιωτών από τα συντομότερα μονοπάτια). Πιο συγκεκριμένα ο MSA στην κάθε i επανάληψη προσδιορίζει το λ ως εξής: $\lambda = \frac{1}{i+1}$

Έτσι, στην πρώτη επανάληψη κατανέμει στις συντομότερες διαδρομές το μισό κυκλοφοριακό φόρτο, στη δεύτερη επανάληψη το 1/3 του φόρτου, στην τρίτη επανάληψη το 1/4 κοκ.

Ένας εξίσου ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος για την κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου είναι ο Frank – Wolfe ο οποίος έρχεται να επιλύσει ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα του MSA που είναι το σταθερό βήμα στο λ και μετακινεί σε κάθε i επανάληψη ακριβώς $\frac{1}{i+1}$ από τον κυκλοφοριακό φόρτο στις συντομότερες διαδρομές, ανεξαρτήτου από το πόσο «κοντά ή μακριά» βρισκόμαστε από την ισορροπία. Ο Frank – Wolfe αλγόριθμος αντιθέτως, χρησιμοποιεί σε κάθε επανάληψη ένα προσαρμοστικό βήμα. Κατά συνέπεια, υπολογίζει ακριβώς τη σωστή ποσότητα κυκλοφοριακού φόρτου που πρέπει να μετακινηθεί για να πλησιάσει όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ισορροπία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να συγκλίνει στη λύση του αρκετά γρήγορα από τις αρχικές επαναλήψεις. Παρ' όλα αυτά το μειονέκτημα που εμφανίζει είναι ότι κάνει "ζιγκ-ζαγκ" καθώς πλησιάζει στη βέλτιστη λύση, πράγμα που σημαίνει ότι η σύγκλισή του επιβραδύνεται καθώς ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνεται. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί παραλλαγές του Frank – Wolfe οι οποίες προσπαθούν να επιλύσουν τα συγκεκριμένα ζητήματα.

4. Οικονομική και λειτουργική περιγραφή οδικών δικτύων

Στον παρόν κεφάλαιο υλοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό την υποστήριξη της οικονομικής και λειτουργικής ανάλυσης των οδικών δικτύων. Με σκοπό τη διάκριση των δύο εννοιών γίνεται μια βασική παραδοχή, βάσει της οποίας, η λειτουργική διάσταση θεωρείται ότι αντικατοπτρίζει την αποδοτικότητα και τα χαρακτηριστικά ενός οδικού δικτύου λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις παραμέτρους της προσφοράς. Από την άλλη, η οικονομική διάσταση θεωρείται ότι αντικατοπτρίζει τον βαθμό που η προσφορά για οδικές μετακινήσεις ικανοποιεί τη ζήτηση για οδικές μετακινήσεις σύμφωνα με το πληθυσμιακό δυναμικό της κάθε περιοχής.

4.1. Λειτουργική διάσταση

Το πρόβλημα της αξιολόγησης της λειτουργικής διάστασης του δικτύου έχει απασχολήσει αρκετούς ερευνητές τα τελευταία χρόνια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εργασίες των Tsiotas και Polyzos (2017) και των Dumedah και Garsonu (2021), που έχουν εφαρμόσει έννοιες και μέτρα της θεωρίας γράφων ώστε να μελετήσουν διάφορες πτυχές των οδικών δικτύων, μέσα σε αυτές η τοπολογία, η προσβασιμότητα και η αποτελεσματικότητά τους. Στον Πίνακα 4.1 παρέχεται μια σύνοψη των δεικτών που έχουν χρησιμοποιηθεί στις προαναφερθείσες εργασίες.

Πίνακας 4.1: Περιγραφή δεικτών που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας οδικών δικτύων

Μέτρα δικτύων	Σύντομη λειτουργική περιγραφή
Degree centrality	Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των συνδέσεων ενός κόμβου, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνδεσιμότητα που αποκτά ο κόμβος με το υπόλοιπο δίκτυο.
Betweenness centrality	Όσο μεγαλύτερη η τιμή της ενδιάμεσης κεντρικότητας ενός κόμβου/ακμής, τόσο πιο «συγκεντρωτικός» και κρίσιμος είναι ο ρόλος που κατέχει το συγκεκριμένο στοιχείο του οδικού δικτύου, καθώς βρίσκεται πολλές φορές στις συντομότερες διαδρομές που έχουν δημιουργηθεί μεταξύ ζωνών προέλευσης – προορισμού.
Graph density	Όσο πιο πυκνό είναι ένα δίκτυο, τόσο πιο αποτελεσματικό καθώς οι πιθανές συνδέσεις μεταξύ κόμβων και ακμών είναι περισσότερες, συνεπώς το δίκτυο είναι καλύτερα συνδεδεμένο.
Network diameter	Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος ενός δικτύου, τόσο λιγότερος χρόνος απαιτείται για να διανύσει κανείς μια διαδρομή. Το δίκτυο εμφανίζει συνεπώς μεγαλύτερη λειτουργικότητα.
Average path length	Όσο μικρότερη είναι η μέση διαδρομή, τόσο πιο συνδεδεμένο, προσβάσιμο και λειτουργικό είναι το δίκτυο καθώς ευκολότερα ένας ταξιδιώτης μεταφέρεται μεταξύ διαφορετικών περιοχών, με μικρότερους χρόνους διαδρομής, λιγότερη συμφόρηση και πιο αποτελεσματική μεταφορά.
Node/edge betweenness centrality	Όσο υψηλότερη η ενδιάμεση κεντρικότητα των κόμβων ή/και ακμών, τόσο μεγαλύτερη και η συνδεσιμότητα καθώς υπάρχουν κόμβοι/ακμές που συνδέουν διαφορετικά μέρη του

	δικτύου και επιτρέπουν αποτελεσματική μεταφορά και προσβασιμότητα.
Eigenvector	Όσο μεγαλύτερη η ιδιοκεντρικότητα του δικτύου, τόσο μεγαλύτερη και η συνδεσιμότητά του. Ένα οδικό δίκτυο με υψηλή ιδιοκεντρικότητα υποδηλώνει ότι υπάρχουν σημαντικοί κόμβοι που συνδέονται με άλλους κόμβους υψηλής σύνδεσης κάνοντας τις μεταφορές πιο αποτελεσματικές και λειτουργικές.
Node/edge connectivity	Ένας κόμβος/ακμή με υψηλή συνδεσιμότητα κόμβου/ακμής, θεωρείται κρίσιμος/η για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας και της προσβασιμότητας του δικτύου. Η συνδεσιμότητα κόμβων/ακμών είναι μέτρα για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας και την ευρωστίας ενός δικτύου.
Page rank	Σε ένα οδικό δίκτυο, το Page rank μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό των πιο σημαντικών κόμβων (δηλ. οι κόμβοι που έχουν περισσότερες συνδέσεις με άλλους σημαντικούς κόμβους θεωρούνται πιο σημαντικοί και τους εκχωρείται υψηλότερο Page rank. Το Page rank μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αξιολόγηση της λειτουργικότητας και αποτελεσματικότητας του δικτύου καθώς οι κόμβοι με υψηλό Page rank είναι κρίσιμοι για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας και της προσβασιμότητας αυτού.

Παρατηρώντας πιο προσεκτικά τους δείκτες και την περιγραφή αυτών που περιλαμβάνονται στον παραπάνω πίνακα, μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι δείκτες αυτοί αποτυπώνουν συγκεκριμένες πτυχές λειτουργικότητας μέσα σε ένα οδικό δίκτυο. Συνεπώς, η λειτουργική διάσταση ενός δικτύου μπορεί να εκφραστεί και να αξιολογηθεί μέσα από διάφορες περιγραφικές «κλάσεις» οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

4.1.1. Συνδεσιμότητα (connectivity)

Ο όρος συνδεσιμότητα σε ένα οδικό δίκτυο αναφέρεται στο πόσο καλά συνδέονται μεταξύ τους οι δρόμοι και οι υποδομές μεταφορών. Ένα οδικό δίκτυο με καλή συνδεσιμότητα επιτρέπει την αποτελεσματική και άνετη μεταφορά μεταξύ διαφορετικών περιοχών και προορισμών. Η αυξημένη συνδεσιμότητα συνεπώς, τείνει σε αυξημένη προσβασιμότητα (Daniel et al., 2020). Τα οφέλη ενός διασυνδεδεμένου δικτύου είναι αρκετά, κάποια από τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

- μείωση του χρόνου ταξιδιού
- μείωση κόστους μεταφοράς
- καλύτερη προσβασιμότητα
- καλύτερη απόκριση έκτακτης ανάγκης

Η θεωρία γράφων μπορεί να σταθεί ως ένα δυνατό εργαλείο για την ανάλυση και την κατανόηση της δομής και της συνδεσιμότητας των οδικών δικτύων. Μέσω συγκεκριμένων δεικτών μπορεί να παρέχεται η πληροφορία που χρειάζεται για να αξιολογηθεί ένα δίκτυο με γνώμονα τις συνδέσεις που εμφανίζουν τα επιμέρους στοιχεία του (κόμβοι/ακμές). Αξιοποιώντας τα πορίσματα που συγκεντρώθηκαν στον παραπάνω πίνακα, γίνεται μια σύντομη ανάλυση στον τρόπο με τον οποίο μπορούν να

χρησιμοποιηθούν οι δείκτες αυτοί ώστε να αξιολογηθεί η λειτουργικότητα του δικτύου βάσει της συνδεσιμότητας του.

Η βαθμική κεντρικότητα ενός κόμβου (degree centrality) μετρά τον αριθμό ακμών που προσπίπτουν στον κόμβο, υποδεικνύοντας τη συνολική συνδεσιμότητά του στο δίκτυο. Από τις υψηλές τιμές της βαθμικής κεντρικότητας συνεπάγεται υψηλή συνδεσιμότητα και περισσότερες εναλλακτικές κινήσεις στους κόμβους (turn options) (Barthelemy, 2018). Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να αντικατοπτριστεί η σχετική σημασία των κόμβων σε ένα δίκτυο είναι μέσω της κατανομής της βαθμικής κεντρικότητας. Οι κόμβοι με υψηλή βαθμική κεντρικότητα θεωρούνται ότι έχουν μεγαλύτερη επιρροή καθώς έχουν περισσότερες συνδέσεις και μπορούν ενδεχομένως να επηρεάσουν περισσότερους κόμβους στο δίκτυο. Μέσω της κατανομής τους μπορεί να παραχθεί σχετικό συμπέρασμα αφενός για τη δομή του δικτύου αφετέρου για την ευρωστία του. Χαρακτηριστικά, ένα δίκτυο που εμφανίζει μερικούς κόμβους πολύ συνδεδεμένους και πολλούς κόμβους με βαθμική κεντρικότητα χαμηλή, τείνει να είναι περισσότερο ευάλωτο σε διαταραχές. Αντίθετα, ένα δίκτυο με πιο ομοιόμορφη κατανομή βαθμικής κεντρικότητας είναι πιο εύρωστο και ανθεκτικό στις πιθανές διαταραχές.

Ένας άλλος ισχυρός δείκτης της θεωρίας γράφων που ενδείκνυται για να περιγράψει τη συνδεσιμότητα ενός δικτύου είναι η πυκνότητα. Ένα οδικό δίκτυο αποτελείται από δρόμους και διασταυρώσεις, όπου κάθε οδικό τμήμα είναι μια ακμή και κάθε διασταύρωση είναι μια κορυφή όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή της εργασίας. Συνεπώς, σε ένα οδικό δίκτυο, μια υψηλή τιμή της πυκνότητας του γράφου υποδηλώνει ότι υπάρχουν πολλοί δρόμοι και διασταυρώσεις και ότι οι δρόμοι συνδέονται αρκετά καλά μεταξύ τους. Αυτό πρακτικά φανερώνει ότι υπάρχουν πολλά εναλλακτικά μονοπάτια για να φτάσει ο ταξιδιώτης σε οποιαδήποτε τοποθεσία επιθυμεί καθώς και ότι είναι εύκολη η πλοήγηση μεταξύ διαφορετικών τμημάτων του δικτύου. Επομένως, ένα πυκνό δίκτυο είναι γενικά επιθυμητό, καθώς υποδηλώνει υψηλό επίπεδο συνδεσιμότητας. Ωστόσο, ένα δίκτυο με χαμηλή πυκνότητα μπορεί να είναι αποδεκτό σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως σε αγροτικές περιοχές όπου υπάρχει φανερά λιγότερη κίνηση και περιορισμένοι προορισμοί. Από την άλλη, σε αστικές περιοχές όπου η κίνηση είναι υψηλή και οι ζώνες διέλευσης είναι πολλές, ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί προβληματικό.

Σύμφωνα με τους Ando et al., (2021) σημαντικός δείκτης για την αξιολόγηση συνδεσιμότητας μεγάλων οδικών δικτύων είναι η ιδιοκεντρικότητα με βάρος τη χωρητικότητα (capacity-weighted eigenvector centrality). Ουσιαστικά, ο δείκτης αυτός πρόκειται για μια επέκταση της βαθμικής κεντρικότητας (Bonacich, 1972), κατά την οποία η σημασία ενός κόμβου αυξάνεται με την ύπαρξη συνδέσεων με άλλους κόμβους που είναι οι ίδιοι σημαντικοί. Παράλληλα, ο δείκτης αυτός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάρος που εκχωρείται στην κάθε ακμή. Στη μελέτη των Ando et al., (2021) χρησιμοποιήθηκε ως βάρος η χωρητικότητα των ακμών. Το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε βασίστηκε στη σύγκριση των τιμών της σταθμισμένης ιδιοκεντρικότητας των κόμβων με τα αποτελέσματα που έδωσε ο δείκτης κρισιμότητας (link criticality index). Ένας σύνδεσμος αναγνωρίζεται ως κρίσιμος εάν η απομάκρυνσή του από το δίκτυο μειώνει τον αριθμό των διακριτών διαδρομών μεταξύ των ζωνών προέλευσης –

προορισμού σημαντικά. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως για να συγκριθούν οι δύο μέθοδοι, μετασχηματίστηκε το δίκτυο σε ένα γραμμικό γράφο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η μέθοδος λειτούργησε με επιτυχία καταφέροντας να υποδείξει τις ισχυρά και ασθενώς συνδεδεμένες περιοχές του δικτύου. Συνεπώς, η ιδιοκεντρικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό διασταυρώσεων που είναι στρατηγικά σημαντικές για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας ενός δικτύου. Εντοπίζοντας λοιπόν εκ των προτέρων αυτές τις κρίσιμες διασταυρώσεις, οι υπεύθυνοι για το σχεδιασμό μεταφορών μπορούν να λάβουν μέτρα *a-priori* σε ένα δίκτυο εφαρμόζοντας εναλλακτικές διαδρομές για να διασφαλίσουν ότι το δίκτυο παραμένει λειτουργικό ακόμη και σε περιπτώσεις που θα δεχτεί διαταραχές.

Επόμενο μέτρο αποτελούν η συνδεσιμότητα κόμβων/ακμών (node/edge connectivity). Πρόκειται για μέτρα που υπολογίζουν τον ελάχιστο αριθμό κόμβων ή ακμών που πρέπει να αφαιρεθούν από ένα δίκτυο για να θεωρηθεί αποσυνδεδεμένο. Πρακτικά, αν ένα δίκτυο έχει υψηλή συνδεσιμότητα κόμβων/ακμών, σημαίνει ότι μπορεί να αντέξει την αποτυχία σημαντικού αριθμού κόμβων ή και ακμών χωρίς να αποσυνδεθεί. Γίνεται συνεπώς αντιληπτό πως τα μέτρα αυτά είναι άμεσα συσχετισμένα με τη συνδεσιμότητα ενός δικτύου παίζοντας καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία και την αποδοτικότητά του.

Ο συντελεστής σύμπλεξης (clustering coefficient) πρόκειται για ένα επόμενο μέτρο που ερμηνεύει το πόσο καλά συνδεδεμένοι είναι οι άμεσοι γείτονές του μεταξύ τους (O'Sullivan, 2014). Ένας υψηλός συντελεστής σύμπλεξης υποδεικνύει ότι οι άμεσοι γείτονες του κόμβου είναι καλά συνδεδεμένοι μεταξύ τους, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο κόμβος είναι μέρος μιας κοινότητας ή περιοχής στο δίκτυο. Αντίθετα, ένας χαμηλός συντελεστής σύμπλεξης υποδηλώνει ότι ο κόμβος βρίσκεται απομονωμένος από το υπόλοιπο δίκτυο (Jiang & Claramunt, 2004). Ένας υψηλός μέσος όρος του συντελεστή ομαδοποίησης σε ένα οδικό δίκτυο μπορεί να καταστήσει το δίκτυο ανθεκτικό στην αστοχία μεμονωμένων κόμβων ή ακμών. Πρακτικά μέσω του δείκτη αυτού υποδηλώνεται πως ο φόρτος του δικτύου μπορεί να αναδρομολογηθεί μέσω κοντινών δρόμων ή διασταυρώσεων.

4.1.2. Συγκεντρωτικότητα

Η ενδιάμεση κεντρικότητα όπως ειπώθηκε και στο Κεφάλαιο 2.5 πρόκειται για έναν δείκτη που μπορεί να ανιχνεύσει τα «κεντρικά» στοιχεία του δικτύου. Τα οδικά τμήματα ή κόμβοι του δικτύου με υψηλή ενδιάμεση κεντρικότητα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη σύνδεση διαφορετικών τμημάτων του οδικού δικτύου και κατά συνέπεια διευκολύνουν τη ροή της κυκλοφορίας μέσα στο δίκτυο. Συνήθως τα στοιχεία αυτά κατέχουν στρατηγική θέση μέσα στο δίκτυο, όπως είναι οι διασταυρώσεις ή κόμβοι αυτοκινητοδρόμων αφού εκεί συγκλίνουν πολλές διαφορετικές διαδρομές. Έμφαση ωστόσο πρέπει να δοθεί και στην κατανομή της ενδιάμεσης κεντρικότητας ενός δικτύου καθώς μπορεί να παρέχει πληροφορίες τόσο για υποκείμενη δομή όσο και την αποτελεσματικότητα του ίδιου του δικτύου. Σύμφωνα με τους Akbarzadeh et al. (2018), όταν η γραφική παράσταση παίρνει τη μορφή νόμου δύναμης (power-law), αυτό αυτόματα αντανακλά πως τα κεντρικά στοιχεία του δικτύου είναι λίγα. Οι συγγραφείς ενώ δηλώνουν πως φαινομενικά ένα τέτοιο δίκτυο μοιάζει να είναι ασταθές και εύθραυστο, παράλληλα αποδεικνύουν πως τα στοιχεία που παρουσιάζουν υψηλή

ενδιάμεση κεντρικότητα δεν είναι απαραίτητα τα πιο σημαντικά, δεδομένου ότι η απώλεια τους δεν βλάπτει οπωσδήποτε το δίκτυο. Συνεπώς, η σημαντικότητα των στοιχείων ενός δικτύου κρίνεται βάσει ποικίλων παραμέτρων και όχι αποκλειστικά με το ρόλο που κατέχουν στις συντομότερες διαδρομές. Αυτό φαίνεται να είναι λογικό καθώς κρίσιμος κόμβος ή δρόμος νοείται αυτός ο οποίος με την απομάκρυνση του οι εναλλακτικές διαδρομές είναι μηδενικές (σε περιπτώσεις γέφυρας) ή ελάχιστες με μεγάλους χρόνους διαδρομής (Berdica, 2002). Παρ' όλα αυτά η ενδιάμεση κεντρικότητα είναι ένας δείκτης που αντιπροσωπεύει την συγκεντρωτικότητα ενός δικτύου χωρίς όμως απαραίτητα να ταυτίζει τα στοιχεία αυτά ως τα πιο σημαντικά που συμπεριλαμβάνονται στο δίκτυο.

4.1.3. Αποδοτικότητα (efficiency)

Η αποδοτικότητα ενός οδικού δικτύου εξαρτάται στον μεγαλύτερο βαθμό από την απόδοση των επιμέρους στοιχείων του, δηλαδή των δρόμων του (ακμές) και των διασταυρώσεων του (κόμβοι) (Akbarzadeh et al., 2019). Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.4 οι Latora, και Marchiori, (2001) εισήγαγαν την έννοια της αποδοτικότητας μέσω του δείκτη που κατάφεραν να ορίσουν, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τον αριθμό των κόμβων, όσο και τις συντομότερες διαδρομές μεταξύ αυτών. Ο δείκτης αυτός είναι αντιπροσωπευτικός για την αξιολόγηση της λειτουργικής διάστασης που εμφανίζει ένα οδικό δίκτυο. Μέσω του υπολογισμού της αποδοτικότητας, γίνεται αντιληπτό το πόσο συνδεδεμένο είναι καθώς και τις εναλλακτικές διαδρομές που διαθέτει σε περιπτώσεις διαταραχών. Σημαντικό είναι να τονιστεί πως μια μεμονωμένη τιμή του δείκτη αυτού μπορεί να μην παρέχει πλήρη εικόνα της απόδοσης του σχετικού δικτύου κι αυτό διότι η τιμή είναι αδιάστατη. Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα ενός οδικού δικτύου, είναι χρήσιμο να υπάρξει κάποια τροποποίηση (της τοπολογίας) του ίδιου του δικτύου όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του ώστε να μπορέσει να διεξαχθεί σύγκριση μεταξύ των διάφορων καταστάσεων που διαδέχεται. Η τροποποίηση της τοπολογίας μπορεί να αφορά την προσθήκη κόμβων/δρόμων ή και την απομάκρυνση αυτών. Με την σύγκριση των τιμών του δείκτη της αποδοτικότητας υπό διαφορετικές συνθήκες, παρέχονται πληροφορίες για τις περιοχές του δικτύου που χρήζουν βελτίωσης. Παραδείγματος χάρη, σε περιπτώσεις προσθήκης νέων δρόμων στο δίκτυο και με την τιμή της αποδοτικότητας να είναι μεγαλύτερη, γίνεται αντιληπτό πως η δεδομένη περιοχή του δικτύου ανταποκρίνεται πιο αποτελεσματικά στις νέες συνθήκες, άρα και το δίκτυο στο σύνολο του κρίνεται περισσότερο λειτουργικό. Αυτό το μέτρο συνεπώς θα μπορούσε να είναι ισχυρό εργαλείο για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων σχετικά με την ιεράρχηση των επενδύσεων και των πόρων που πρόκειται να αποδοθούν σε ένα δίκτυο (μιας πόλης) έχοντας ως γνώμονα τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητά του.

Η διάμετρος ενός δικτύου μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα του δικτύου. Ένα δίκτυο με μεγάλη διάμετρο (χρόνο ταξιδιού) εξυπηρετεί τις ζώνες προέλευσης – προορισμού με μεγαλύτερη καθυστέρηση. Αντίθετα, ένα δίκτυο που παρουσιάζει μια μικρότερη διάμετρο υποδηλώνει πως τα οχήματα φτάνουν γρηγορότερα στον προορισμό τους και συνεπώς η απόδοση και η λειτουργία του δικτύου αυξάνεται. Η διάμετρος του δικτύου συνδέεται άμεσα με δύο συνιστώσες, α) την τοπολογία του δικτύου και β) την κατανομή της χρονικής διαδρομής των ζωνών

προέλευσης – προορισμού. Σχετικά με τη τοπολογία του, η λειτουργικότητά του επηρεάζεται άμεσα καθώς πρακτικά το σχήμα του δικτύου είναι αυτό που καθορίζει και τη διάμετρό του, άρα και κατά ένα βαθμό την αποτελεσματικότητά του. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.3, η τοπολογία μπορεί να παίρνει διάφορες μορφές (πχ., αστέρα, διαύλου κλπ.). Οι αλλαγές στην τοπολογία οδηγούν σε αλλαγές στη συνδεσιμότητα και την αποτελεσματικότητα του δικτύου. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό οι σχεδιαστές υποδομών να διερευνούν και να λαμβάνουν υπόψιν τους τη συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος (Casali et al., 2019). Η δεύτερη συνιστώσα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια ως μέτρο αξιολόγησης της αποδοτικότητας ενός δικτύου. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να καταστρωθεί η κατανομή της χρονικής διαδρομής μεταξύ όλων των ζωνών προέλευσης – προορισμού και να αξιολογηθεί η απόσταση του κέντρου βάρους ή της διαμέσου της κατανομής από το δεξί (άνω) άκρο που εκφράζει τη διάμετρο του δικτύου. Όσο μεγαλύτερη αυτή η τιμή, τόσο πιο αποδοτικό το δίκτυο και αντίστροφα.

4.2. Οικονομική διάσταση

Η κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα οδικά δίκτυα και αποτελεί κρίσιμο συστατικό της δημόσιας υποδομής μιας κοινωνίας (Sarkar et al., 2021). Καθότι τα οδικά δίκτυα καλούνται να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες των κοινωνιών, οφείλουν να συμμορφώνονται στη ζήτηση για μετακινήσεις. Βάσει αυτής της θεμελιώδους παραδοχής, θεωρείται στο παρόν υπό κεφάλαιο ότι η οικονομική διάσταση και εν γένει επίδοση ενός οδικού δικτύου, μπορεί να αξιολογηθεί αντιπαραβάλλοντας τις επιμέρους διαστάσεις της λειτουργικότητας ενός δικτύου με τα βασικά χαρακτηριστικά και μεγέθη της ζήτησης για μετακινήσεις. Στο πλαίσιο αυτό αναλύεται μια σειρά εννοιών που προσπαθούν να εξειδικεύσουν την προαναφερθείσα σύγκριση.

4.2.1. Προσβασιμότητα (accessibility)

Η έννοια της προσβασιμότητας είναι βασικό στοιχείο στον αστικό, περιφερειακό και συγκοινωνιακό σχεδιασμό και αποτελεί σημαντικό σύνδεσμο μεταξύ της ζήτησης για μετακινήσεις και στις χρήσεις γης (Hansen, 2009). Σύμφωνα με τον Hansen, (2009), η προσβασιμότητα μπορεί να οριστεί ως η ευκολία με την οποία οι δραστηριότητες σε ένα μέρος μπορούν να προσεγγιστούν από κάποιο άλλο μέρος μέσω του δικτύου μεταφορών. Κατά συνέπεια, η προσβασιμότητα εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως είναι η χωρική κατανομή των δραστηριοτήτων, η αποτελεσματικότητα του συστήματος μεταφοράς καθώς και τα ίδια τα χαρακτηριστικά του ταξιδιώτη. Με άλλα λόγια η προσβασιμότητα μιας περιοχής A από μια άλλη περιοχή B, ορίζεται ως το κλάσμα που είναι ανάλογο με το μέγεθος του πληθυσμού της περιοχής B και αντιστρόφως ανάλογο με τη χρονική απόσταση που χωρίζει τις δύο περιοχές. Η συνολική προσβασιμότητα στην περιοχή A, είναι το άθροισμα της προσβασιμότητας σε καθεμία από τις επιμέρους περιοχές γύρω από την περιοχή A (Hansen, 1959). Μαθηματικά διατυπώνεται ως εξής:

$$Accessibility_A = \frac{Pop_B}{Dis_{A \rightarrow B}} + \frac{Pop_C}{Dis_{A \rightarrow C}} + \dots + \frac{Pop_n}{Dis_{A \rightarrow n}}$$

Ένα από τα σημαντικότερα ερευνητικά ερωτήματα είναι πώς η αύξηση της προσβασιμότητας των περιοχών μέσω της βελτίωσης των υφιστάμενων υποδομών επηρεάζει την οικονομική ανάπτυξη του τόπου. Σύμφωνα με τους Banerjee et al., 2020, οι μεταφορικές υποδομές αποτελούν το κλειδί για την προώθηση της ανάπτυξης μιας κοινωνίας. Η λογική αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι κάποιος πρέπει πρώτα να έχει πρόσβαση στις υπηρεσίες και τις δραστηριότητες για να μπορέσει να τις αξιοποιήσει. Αυτή η λογική επαληθεύεται αν κοιτάξει κανείς το συγκοινωνιακό σύστημα των ανεπτυγμένων χωρών συγκριτικά με των αναπτυσσόμενων, το οποίο είναι αισθητά πιο εξελιγμένο. Παρ' όλα αυτά, η βελτίωση μιας υποδομής δεν αρκεί από μόνη της για να οδηγήσει ένα ολόκληρο κοινωνικό σύνολο σε οικονομική ευημερία.

Ωστόσο, εστιάζοντας στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αύξηση της προσβασιμότητας σε μια περιοχή, μπορεί να διαπιστωθεί πως η αύξηση κέρδους είναι ένα από αυτά. Ένας από τους κύριους τρόπους με τους οποίους η προσβασιμότητα του οδικού δικτύου επηρεάζει την οικονομία είναι η βελτίωση της μεταφοράς αγαθών και υπηρεσιών. Αυτό κατά συνέπεια οδηγεί σε μειωμένο κόστος μεταφοράς, αυξημένη κερδοφορία για τις επιχειρήσεις και τέλος αύξηση της συνολικής οικονομικής δραστηριότητας. Επιπροσθέτως, το καλύτερο οδικό δίκτυο προσελκύει μεγαλύτερη μερίδα τουριστών. Αυτό συμβαίνει διότι μπορούν να προσεγγίσουν τον τόπο ευκολότερα και στις περισσότερες περιπτώσεις με μικρότερο κόστος. Τέλος, οι επιχειρήσεις είναι πιο πιθανό να επενδύσουν σε μια περιοχή με καλά οδικά δίκτυα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία περισσότερων θέσεων εργασίας και κατ' επέκταση στην αύξηση του πληθυσμού. Και όπως είναι αναπόφευκτο, περισσότερος πληθυσμός επιφέρει περισσότερα κέρδη.

Τέλος, είναι σημαντικό να τονιστεί πως παρά το γεγονός ότι η προσβασιμότητα λειτουργεί ως μηχανισμός οικονομικής ανάπτυξης μιας περιοχής, η αύξηση του πληθυσμιακού δυναμικού που μπορεί να προκληθεί από το υψηλό επίπεδο εξυπηρέτησης ενός οδικού δικτύου είναι σε θέση να καταστήσει ένα ικανοποιητικό επίπεδο προσβασιμότητας σήμερα ως μη ικανοποιητικό σε κάποια μεταγενέστερη χρονική στιγμή. Συνεπώς, η προσβασιμότητα πρέπει να επαναξιολογείται διαρκώς και όταν χρησιμοποιείται ως κριτήριο σχεδιασμού νέων υποδομών, θα πρέπει να υπάρχει ένα επαρκές «περιθώριο» για να καλύπτει παράλληλα και τη μελλοντική ζήτηση.

4.2.2. Ενοποιημένη αποδοτικότητα (unified efficiency)

Είναι ευρέως γνωστό ότι ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα στη λειτουργία σύγχρονων δικτύων, συμπεριλαμβανομένου το δίκτυο των αστικών μεταφορών, είναι η «συμφόρηση». Σε άλλα δίκτυα, όπως το δίκτυο παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και το διαδίκτυο η συμφόρηση γίνεται αντιληπτή με την έννοια της αργής μεταφοράς της «πληροφορίας» μέσω του συστήματος. Ως εκ τούτου, ένα κατάλληλο μέτρο απόδοσης δικτύου για τέτοια σύνθετα δίκτυα κρίνεται απαραίτητο. Σύμφωνα με τους Nagurney και Qiang (2007), το μέτρο αυτό αποτελεί μια εναλλακτική του απλού δείκτη της αποδοτικότητας που αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.4, λαμβάνοντας υπόψιν το γενικευμένο κόστος μετακίνησης από κάθε ζώνη προέλευσης σε κάθε ζώνη προορισμού, που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος καταμερισμού της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

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

όπου G το δίκτυο και d η ζήτηση. Με τον όρο nw νοείται ο αριθμός των ζωνών προέλευσης – προορισμού, με τον όρο d_w η μεταφορική ζήτηση που αντιστοιχεί στο ζεύγος προέλευσης – προορισμού w , ενώ με τον όρο λ_w το γενικευμένο κόστος μετακίνησης που αντιστοιχεί στο ζεύγος προέλευσης – προορισμού w μετά την εξισορρόπηση του δικτύου.

Η ενοποιημένη αποδοτικότητα (unified efficiency) πρόκειται για τον δείκτη αυτόν που μπορεί να προσδιορίσει ποιοι κόμβοι ή σύνδεσμοι είναι κρίσιμοι ή πιο σημαντικοί σε ένα συμφορημένο δίκτυο, καθώς η αφαίρεσή τους θα έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη μείωση της ενοποιημένης αποδοτικότητας (Nagurney & Qiang, 2007). Επιπλέον, τα σημαντικά στοιχεία του δικτύου είναι σαφώς εκείνα που θα πρέπει να προστατεύονται και να διασφαλίζονται καλύτερα, καθώς η αφαίρεσή τους έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στη συνολική λειτουργία του δικτύου. Ακόμη, ο συγκεκριμένος δείκτης εμφανίζει και οικονομική ερμηνεία καθώς μετρά τη μέση απόδοση του οδικού δικτύου με βάση τα ζεύγη προέλευσης – προορισμού, σε σχέση με το γενικευμένο κόστος του ταξιδιού. Η απόδοση αναφέρεται στο πόσο καλά το δίκτυο είναι σε θέση να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις και τις ανάγκες των χρηστών του, ενώ το κόστος μετράται ως προς τη δυσκολία ταξιδιού που βιώνουν οι χρήστες. Με άλλα λόγια, η ενοποιημένη αποδοτικότητα αποτυπώνει πόσο καλά αποδίδει το οδικό δίκτυο όσον αφορά την κάλυψη των απαιτήσεων των χρηστών, σε σχέση με το κόστος ή το τίμημα που πρέπει να πληρώσουν (πχ., χρόνος) όσον αφορά την πραγματοποίηση των ταξιδιών.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται χρήση του δείκτη αυτού λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την κατανομή της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Αυτό που αναλύεται εκτενέστερα και έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον, είναι η προσαρμογή της τιμής του δείκτη κατά την αφαίρεση ενός οδικού τμήματος που εμπίπτει στο μονοπάτι του δικτύου αυτό που καθορίζει την διάμετρό του. Αυτό που αναμένεται είναι η τιμή του δείκτη της απόδοσης του δικτύου να μειώνεται υποδηλώνοντας πως η επίδοση του χειροτέρευσε καθώς οι χρόνοι διαδρομής έχουν αυξηθεί σημαντικά.

4.2.3. Δικαιοσύνη (equity)

Σαν έννοια η δικαιοσύνη στις μεταφορές έχει μακρά ιστορία στις ανθρωπιστικές επιστήμες. Τα τελευταία χρόνια πολλοί είναι αυτοί που προσπαθούν να ερμηνεύσουν την δικαιοσύνη και την ισότητα των μεταφορών μέσα σε ένα πιο αυστηρά ορισμένο πλαίσιο, δίνοντας της σάρκα και οστά με ένα μαθηματικό μοντέλο. Σύμφωνα με τους Beyazit, (2011) και Litman (2019) η δικαιοσύνη των μεταφορών είναι ένα αρκετά σύνθετο θέμα που δεν μπορεί να οριστεί με απόλυτη ακρίβεια. Ωστόσο, υποστηρίζουν πως πρόκειται για τη δίκαιη κατανομή των «οφελών» και των «επιβαρύνσεων» (κόστη) των μεταφορικών υποδομών μέσα σε ένα δίκτυο, διασφαλίζοντας ότι όλα τα άτομα μιας κοινωνίας έχουν δίκαιη και ίση πρόσβαση σε πόρους, ευκαιρίες και υπηρεσίες μεταφοράς, ανεξάρτητα από τα κοινωνικά, οικονομικά ή δημογραφικά χαρακτηριστικά τους (Beyazit, 2011; Litman, 2019). Ο Πίνακας 4.2 δείχνει τα οφέλη και τις επιβαρύνσεις των μεταφορών (Wennink, & Krapp, 2020).

Πίνακας 4.2: Μεταφορικά οφέλη και κόστη

Μεταφορικά οφέλη	Μεταφορικά κόστη
Αυξημένη προσβασιμότητα	Μειωμένη πρόσβαση
Εξοικονόμηση χρόνου ταξιδιού	Αυξημένοι χρόνοι ταξιδιού
Εξοικονόμηση κόστους	Μεγάλο κόστος μεταφοράς
Μειωμένη συμφόρηση	Κυκλοφοριακή συμφόρηση
Μείωση της ρύπανσης	Αυξημένη ρύπανση
Μείωση ατυχημάτων	Έκθεση σε τροχαίους κινδύνους

Παρ' όλα αυτά, οι περισσότερες αποφάσεις για επενδύσεις στον τομέα των μεταφορών εξαρτώνται κυρίως από τη μοντελοποίηση της ζήτησης και της προσφοράς, καθώς παράλληλα χρησιμοποιούνται και μέθοδοι κόστους-οφέλους (CBA) χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι κοινωνικές επιπτώσεις και οι πραγματικές ανάγκες και επιθυμίες των μελών της κοινωνίας. Συνεπώς, προκειμένου να εξεταστούν οι κοινωνικές και ευρύτερες οικονομικές επιπτώσεις των μεταφορικών έργων, έχουν αναπτυχθεί και ενσωματωθούν μέθοδοι αξιολόγησης όπως η ανάλυση κόστους-οφέλους, σε ένα πλαίσιο γνωστό ως ανάλυση κοινωνικού κόστους-οφέλους (SCBA). Μέσω της ανάλυσης αυτής, αναγνωρίζεται ότι τα έργα που αφορούν μεταφορικές υποδομές, μπορούν να έχουν περαιτέρω επιπτώσεις πέρα από το οικονομικό κόστος και όφελος. Έτσι, επιδιώκει να διασφαλίσει ότι τα έργα αυτά αξιολογούνται όχι μόνο με βάση την οικονομική τους κερδοφορία, αλλά και με τις πιθανές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις τους τόσο σε μεμονωμένα άτομα, όσο και στην κοινωνία στο σύνολό της. Παρέχεται δηλαδή, μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αξιολόγηση μεταφορικών έργων, λαμβάνοντας υπόψη ένα ευρύτερο φάσμα παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική ευημερία μιας κοινωνίας (Thomopoulos et al., 2008).

Οι Nussbaum και Sen, (1993), προτείνουν ένα θεωρητικό πλαίσιο σύμφωνα με το οποίο τα συστήματα μεταφορών μπορούν να επιτρέψουν ή να περιορίσουν τις δυνατότητες και τις ελευθερίες των ατόμων και κατ' επέκταση η δίκαιη πρόσβαση στις μεταφορές να επηρεάσει άμεσα την κοινωνική δικαιοσύνη. Το πλαίσιο αυτό είναι γνωστό ως «προσέγγιση δυνατοτήτων» (Capability Approach – CA) και έχει ευρέως εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς εκτός τον τομέα των μεταφορών. Στο πλαίσιο των μεταφορών, η προσέγγιση δυνατοτήτων τονίζει τη σημασία των ικανοτήτων των ατόμων να έχουν πρόσβαση σε διάφορες επιλογές μεταφοράς και να μπορούν αν το επιθυμούν να συμμετέχουν σε δραστηριότητες, όπως η εργασία, η εκπαίδευση και η συμμετοχή στα κοινά. Το μεταφορικό σύστημα συνεπώς σε μια κοινωνία, είναι ο βασικός παράγοντας που επιτρέπει ή αποκλείει στα άτομα να έχουν πρόσβαση σε ίσες ευκαιρίες. Η προσέγγιση δυνατοτήτων αποτελείται από διάφορες έννοιες όπως είναι οι λειτουργίες, οι ικανότητες, η ελευθερία, οι ευκαιρίες και η ευημερία (Beyazit, (2011). Ο Πίνακας 4.3 αναλύει περαιτέρω την κάθε μία έννοια ξεχωριστά.

Πίνακας 4.3: Ορισμός των επιμέρους εννοιών της προσέγγισης δυνατοτήτων

Έννοιες	Ορισμός
Λειτουργίες	Οι λειτουργίες αναφέρονται στις διάφορες πράξεις που μπορεί να επιτύχει ένα άτομο στη ζωή του, όπως εκπαίδευση, απασχόληση, κοινωνική και πολιτική συμμετοχή. Πρόκειται για τα αποτελέσματα που μπορούν να επιτύχουν τα άτομα μέσω των ικανοτήτων τους.
Ικανότητες	Οι ικανότητες αναφέρονται στις πραγματικές ευκαιρίες που έχουν τα άτομα για να επιτύχουν λειτουργίες. Περιλαμβάνουν τα προσωπικά χαρακτηριστικά, τους πόρους και το κοινωνικό και περιβαλλοντικό πλαίσιο στο οποίο ζουν τα άτομα.
Ελευθερία	Η ελευθερία θεωρείται ο τρόπος για να φτάσει ένα άτομο σε ενέργειες και αποφάσεις. Η ελευθερία των ανθρώπων επηρεάζεται από τις αξίες, τις ικανότητες και τις ευκαιρίες τους.
Ευκαιρίες	Οι ευκαιρίες αναφέρονται στις εξωτερικές συνθήκες και τους πόρους που είναι διαθέσιμοι στα άτομα, που τους επιτρέπουν να επιδιώκουν διαφορετικές λειτουργίες και ικανότητες.
Ευημερία	Η ευημερία αναφέρεται στη συνολική ποιότητα ζωής και ευημερίας των ατόμων, η οποία επηρεάζεται από τα επιτεύγματά τους όσον αφορά τις λειτουργίες και τις δυνατότητές τους.

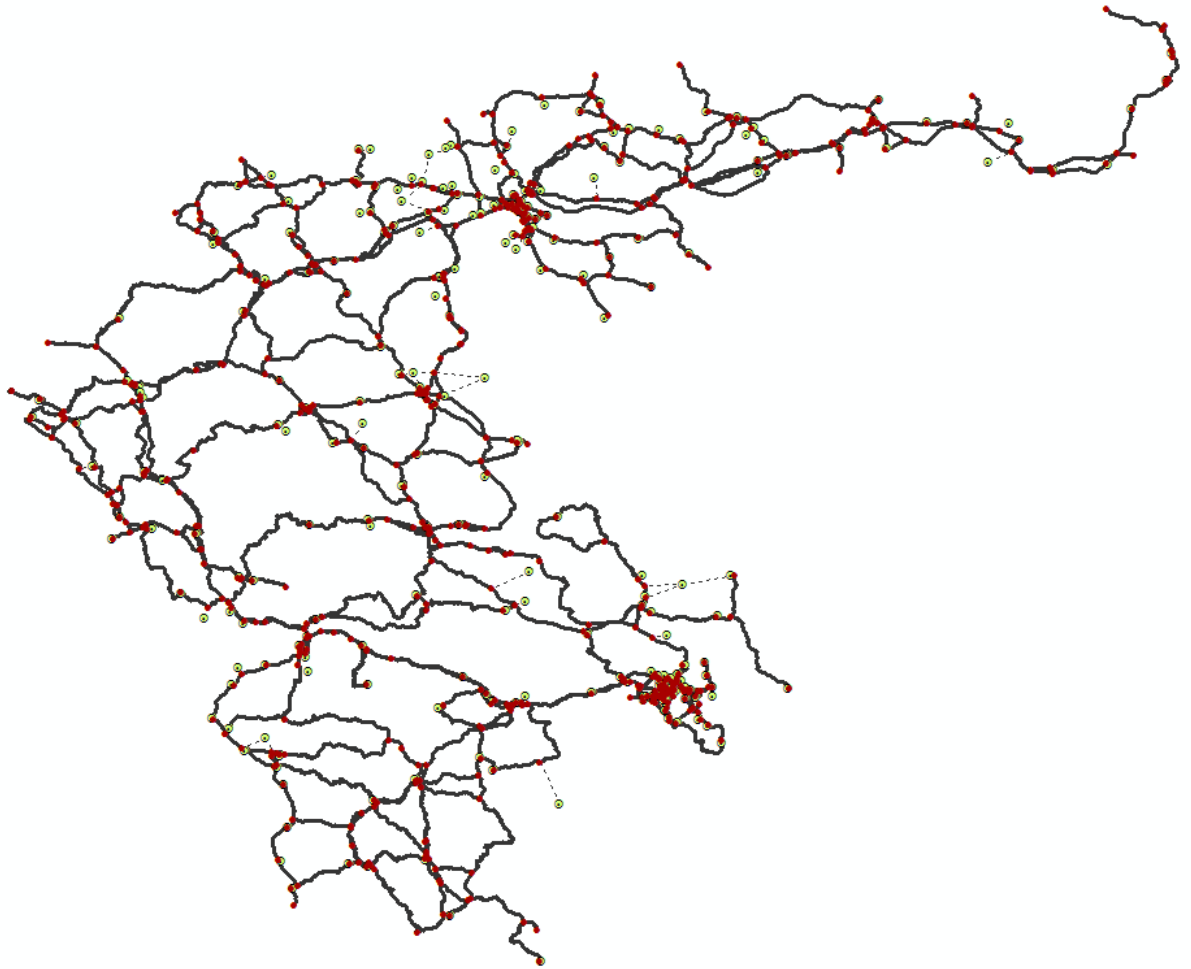
Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τις συνιστώσες της προσέγγισης των δυνατοτήτων, οι υπεύθυνοι σχεδιασμού μεταφορών μπορούν να συμβάλουν στην προώθηση της δικαιοσύνης και της ισότητας των μεταφορικών υποδομών σε μια κοινωνία, διασφαλίζοντας ότι οι επιλογές μεταφοράς είναι ίδιες, ίσες, προσιτές και αξιόπιστες για όλα τα άτομα, ανεξάρτητα από την κοινωνικοοικονομική τους κατάσταση, το φύλο, την ηλικία ή άλλα χαρακτηριστικά τους. Παρ' όλα αυτά, καθώς πρόκειται για σύνθετη έννοια, υπάρχουν πολλοί άλλοι παράγοντες που καθορίζουν ένα μεταφορικό σύστημα αν θα είναι δίκαιο ή όχι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γεωγραφική θέση μιας περιοχής η οποία μπορεί να επηρεάσει τον σχεδιασμό του οδικού δικτύου και κατ' επέκταση της μεταφορικής κάλυψης της περιοχής, μειώνοντας τις ευκαιρίες των ατόμων για πρόσβαση. Τέλος, παρατηρείται συχνά πως οι καλύτερες μεταφορικές υποδομές και το πιο «δίκαιο» σύστημα βρίσκονται σε περιοχές όπου ο πληθυσμός είναι υψηλός. Γίνεται συνεπώς αντιληπτό πως η έννοια της δικαιοσύνης των μεταφορών διεγείρει και ηθικούς προβληματισμούς όπως για παράδειγμα ποια επιλογή είναι προτιμότερη για την ευημερία μια κοινωνίας: η τέλεια εξυπηρέτηση των ανθρώπων που βρίσκονται σε περιοχές με μεγάλο πληθυσμό και η μειωμένη πρόσβαση των ανθρώπων στις απομονωμένες περιοχές; ή η ισότιμη εξυπηρέτηση όλων των ανθρώπων ακόμη κι αν αυτό συνεπάγεται σε κακή εξυπηρέτηση περιοχών με υψηλό πληθυσμιακό δυναμικό; Είναι επομένως εύληπτο πως η δικαιοσύνη των μεταφορών πρόκειται για μια σύνθετη και πολύπλοκη έννοια που διασταυρώνεται παράλληλα με επιπρόσθετα κοινωνικά και ηθικά ζητήματα γι' αυτό και θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν από τους υπεύθυνους για το σχεδιασμό των μεταφορών και τη λήψη σχετικών αποφάσεων.

5. Προτεινόμενοι δείκτες και εφαρμογή

5.1. Περιγραφή μελέτης περίπτωσης

Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η περιγραφή και η ανάλυση του Εθνικού δικτύου όπως αναφέρθηκε και στο μεθοδολογικό πλαίσιο της εργασίας, με σκοπό την εφαρμογή των δεικτών της θεωρίας γράφων σε ένα δίκτυο μεγάλης κλίμακας. Απώτερος σκοπός βέβαια, είναι να αξιολογηθούν οι δείκτες αυτοί στο πλαίσιο μιας πραγματικής μελέτης και να διερευνηθεί ο βαθμός στον οποίο μπορούν να προσομοιάσουν την κυκλοφορία σε πραγματικά δίκτυα.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί το επιλεγθέν δίκτυο απαρτίζεται από 866 κόμβους (nodes) και 2211 ακμές (links). Σημαντικό είναι να επισημανθεί πως από τους 866 κόμβους οι 250 αποτελούν τις ζώνες προέλευσης-προορισμού του δικτύου και οι 616 διασταυρώσεις και απαραίτητα λοιπά στοιχεία του δικτύου. Αντίστοιχα, οι 250 ακμές του δικτύου συντελούν μη φυσικά τοπολογικά στοιχεία αυτού, καθώς θεωρούνται οι connectors των αντίστοιχων ζωνών – από πού δηλαδή ξεκινάει και καταλήγει ο φόρτος της συγκεκριμένης ζώνης. Στο σημείο αυτό να αναφερθεί πως οι ζώνες επιλέχθηκαν με δύο κύρια κριτήρια. Πρώτο και βασικότερο κριτήριο θεωρήθηκε ο πληθυσμός και δεύτερο η κάλυψη του εθνικού δικτύου έτσι ώστε να επιφορτίζεται στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Συνεπώς, επιλέχθηκαν όλοι οι δήμοι των νομών που ξεπερνούσαν τον αριθμό των 9.500 κατοίκων. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζεται το γενικευμένο εθνικό οδικό δίκτυο που επιλέχθηκε.



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση υιοθετούμενου εθνικού οδικού δικτύου

Όπως φαίνεται και στην εικόνα οι κόμβοι που συντελούν τις ζώνες προέλευσης – προορισμού εμφανίζονται με ένα λαχανί χρώμα. Οι κόμβοι με το βαθύ κόκκινο αποτελούν τις διασταυρώσεις και τα λοιπά στοιχεία του δικτύου. Οι διακεκομμένες ακμές του δικτύου χαρακτηρίζονται ως συνδετήριες ακμές (connectors) καθώς ενώνουν το κεντροειδές μια ζώνης με το υπόλοιπο δίκτυο. Για υπολογιστικούς λόγους, τόσο στους κόμβους του δικτύου όσο και στις ακμές του, χρειάστηκε η προσθήκη επιπλέον χαρακτηριστικών ώστε το κάθε στοιχείο να είναι εύκολα διακριτό από τα υπόλοιπα. Πιο αναλυτικά, ο κάθε κόμβος αποτελείται από τα ακόλουθα πεδία:

- **node id:** Το συγκεκριμένο πεδίο είναι μοναδικό για κάθε κόμβο και ορίζεται ως «κλειδί» του συγκεκριμένου κόμβου.
- **centroid:** Το συγκεκριμένο πεδίο δηλώνει αν ο κόμβος αποτελεί ζώνη προέλευσης – προορισμού ή όχι. Με την τιμή 1 ο κόμβος ανήκει στο μητρώο προέλευσης – προορισμού, ενώ αντίθετα το 0 υποδεικνύει πως ο κόμβος είναι μια διασταύρωση ή απαραίτητο τεχνητό σημείο για το δίκτυο.
- **population:** Ο πληθυσμός της κάθε δημοτικής ενότητας η οποίας προήλθε από την απογραφή του 2011. Προφανώς το πεδίο αυτό παίρνει τιμή μόνο στην περίπτωση που ο κόμβος είναι κεντροειδές. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση δεν εκχωρείται καμία τιμή στο πεδίο.

Από την άλλη πλευρά η κάθε ακμή περιλαμβάνει τα ακόλουθα πεδία:

- **type:** Το συγκεκριμένο πεδίο παίρνει τιμές από 1 έως 18, όπου η κάθε τιμή ταυτίζεται με συγκεκριμένη κατηγορία δρόμου. Ο Πίνακας 5.1 περιλαμβάνει τα επιμέρους στοιχεία της κάθε κατηγορίας.
- **length:** Το συγκεκριμένο πεδίο είναι το μήκος του κάθε δρόμου σε χιλιόμετρα όπως έχει προκύψει από το ArcGIS.
- **from node:** Το συγκεκριμένο πεδίο δείχνει τον κόμβο έναρξης του συγκεκριμένου link
- **to node:** Το συγκεκριμένο πεδίο δείχνει τον τερματικό κόμβο του συγκεκριμένου link.
- **lanes:** Στο πεδίο αυτό διαφαίνεται ο αριθμός λωρίδων του κάθε τμήματος.
- **speed:** Το συγκεκριμένο πεδίο περιλαμβάνει την ταχύτητα του κάθε τμήματος. Η ταχύτητα αλλάζει σύμφωνα με την κατηγορία του κάθε οδικού τμήματος. Περισσότερες πληροφορίες έχει ο Πίνακας 5.1 Για τα τμήματα που είναι οι connectors του δικτύου η ταχύτητα έχει πάρει την τιμή 999999 για υπολογιστικούς κυρίως λόγους.
- **fftt:** Το πεδίο αυτό περιλαμβάνει το free flow travel time του κάθε τμήματος το οποίο προκύπτει από το κλάσμα που έχει ως αριθμητή το length και παρονομαστή το speed.
- **capacity lane:** Στο πεδίο αυτό εμπίπτει η χωρητικότητα της κάθε λωρίδας. Για τους αυτοκινητοδρόμους η τιμή πάρθηκε από το Highway Capacity Manual. Για τις υπόλοιπες κατηγορίες έγιναν κατά βάση παραδοχές.
- **capacity:** Το πεδίο αυτό περιλαμβάνει την ολική χωρητικότητα η οποία προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του capacity lane με τον αριθμό των λωρίδων. Για τα τμήματα που είναι οι connectors του δικτύου η χωρητικότητα έχει πάρει την τιμή 999999999 για υπολογιστικούς κυρίως λόγους.
- **modes:** Η τιμή στο πεδίο αυτό είναι σταθερή και ίση με «c» όπου c =car. Η τιμή αυτή είναι απαραίτητη για το traffic assignment.
- **b:** Η τιμή στο πεδίο αυτό είναι σταθερή και ίση με 0.1. Η τιμή αυτή είναι απαραίτητη για το traffic assignment.
- **power:** Η τιμή στο πεδίο αυτό είναι σταθερή και ίση 4. Η τιμή αυτή είναι απαραίτητη για το traffic assignment.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά οδικών τμημάτων

Κατηγορία	Χωρητικότητα ανά λωρίδα	Αρ. Λωρίδων (ανά κατεύθυνση)	Ταχύτητα	Link type
Αυτοκινητόδρομος	1950	2	130	2
Αυτοκινητόδρομος	1950	3	130	3
Εθνική Οδός Τύπου 1	1500	1	90	4
Εθνική Οδός Τύπου 2	1500	1	80	5
Εθνική Οδός Τύπου 3	1500	3	90	16
Περιφερειακός Τύπου 1	1600	3	100	7
Περιφερειακός Τύπου 2	1600	2	100	8
Περιοδική Οδός Τύπου 1	1100	3	80	9
Περιοδική Οδός Τύπου 2	1100	2	70	14

Εντός πόλης ταχείας κυκλοφορίας Τύπου 1	1000	3	70	10
Εντός πόλης ταχείας κυκλοφορίας Τύπου 2	1000	2	60	11
Πρωτεύουσες αστικές αρτηρίες Τύπου 1	800	2	50	12
Πρωτεύουσες αστικές αρτηρίες Τύπου 2	800	1	50	15
Πρωτεύουσες αστικές αρτηρίες Τύπου 3	800	3	50	17
Δευτερεύουσες αστικές αρτηρίες Τύπου 1	600	1	50	13
Δευτερεύουσες αστικές αρτηρίες Τύπου 2	600	2	50	18
Επαρχιακή Οδός	900	1	70	6

5.2. Αποτελέσματα και αξιολόγηση

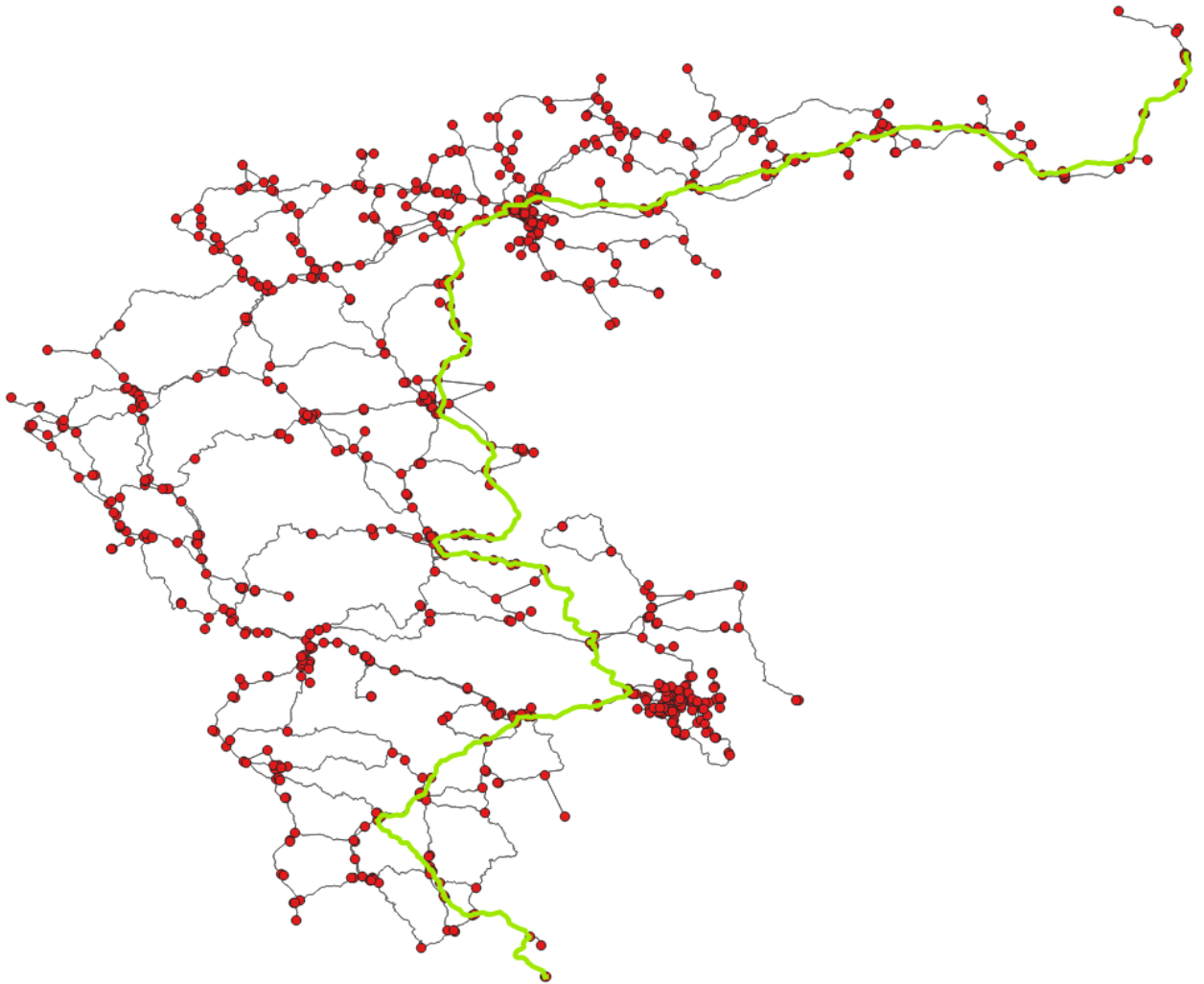
Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση και η επεξήγηση σημαντικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν το υιοθετούμενο οδικό δίκτυο. Τα μεγέθη αυτά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τα μεγέθη που περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους δείκτες της θεωρίας γράφων και τα μεγέθη που ερμηνεύουν το δίκτυο από διαφορετική σκοπιά, αυτή της συγκοινωνιακή ανάλυσης. Κατόπιν, το κεφάλαιο εστιάζει στην τροποποίηση ορισμένων μεγεθών /δεικτών που έχουν ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, με σκοπό την καλύτερη αποσαφήνιση της λειτουργικότητας ενός δικτύου. Για να μπορέσει να ερμηνευτεί καλύτερα η λειτουργική διάσταση του δικτύου χρησιμοποιούνται συνδυαστικά οι υπολογιστικές τεχνικές και των δύο προαναφερθέντων βασικών κατηγοριών. Επιπλέον, γίνεται σύνθεση νέων δεικτών βάσει των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει με στόχο τη περιγραφή νέων οικονομικών και λειτουργικών διαστάσεων του οδικού δικτύου. Τέλος, το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει μέσω στατιστικών αναλύσεων σε μια προσπάθεια να ερμηνευτεί η συσχέτιση που εμφανίζεται μεταξύ συγκεκριμένων μεγεθών/ δεικτών του οδικού δικτύου.

5.2.1. Δείκτες θεωρίας γράφων

Στο δεύτερο κεφάλαιο προηγήθηκε μια αρχική περιγραφή των δεικτών της θεωρίας γράφων που αφενός χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ενός δικτύου και αφετέρου για την διερεύνηση των επιμέρους στοιχείων αυτού (κόμβους, ακμές). Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δεικτών της θεωρίας γράφων που αντιστοιχούν στο γενικευμένο εθνικό δίκτυο που σχολιάστηκε εκτενώς νωρίτερα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για τον υπολογισμό των δεικτών που βασίζονται στη χρήση του αλγορίθμου dijkstra για τον προσδιορισμό των συντομότερων διαδρομών σαν κόμβοι αφετηρίας και προορισμού ορίζονται μόνο οι ζώνες προέλευσης – προορισμού του δικτύου (και όχι το σύνολο των κόμβων).

Διάμετρος δικτύου

Η διάμετρος του δικτύου που αποτελεί τη μέγιστη διαδρομή μεταξύ των συντομότερων διαδρομών, όπως υπολογίστηκε ισούται με 13.5 ώρες. Ο υπολογισμός της διαμέτρου βασίστηκε στον πίνακα που περιλαμβάνει τη χρονική απόσταση για όλα τα ζεύγη ζωνών. Το ζεύγος που ορίζει τη διάμετρο έχει id 30301 – 430503 και περιγράφει τη διαδρομή από τη δημοτική ενότητα Βοιών που ανήκει στην Περιφέρεια Λακωνίας μέχρι και τη δημοτική ενότητα Ορεστιάδας που ανήκει στην Περιφέρεια του Έβρου. Η διαδρομή αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Απεικόνιση διαδρομής που αντικατοπτρίζει τη διάμετρο του δικτύου

Πυκνότητα δικτύου

Η πυκνότητα του δικτύου όπως αναφέρθηκε σχετίζεται με το βαθμό κατά τον οποίο τα επιμέρους στοιχεία του δικτύου είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους. Ένα δίκτυο έχει τη μέγιστη πυκνότητα όταν είναι πλήρως συνδεδεμένο, δηλαδή, από και προς κάθε κόμβο υπάρχει μία ακμή. Η πυκνότητα του εθνικού γενικευμένου δικτύου υπολογίστηκε ίση με 0.00295. Η τιμή αυτή φανερώνει χαμηλή συνδεσιμότητα του δικτύου γεγονός που επαληθεύεται αν αναλογιστεί κανείς την τοπολογία που έχει η Ελλάδα. Η τοπολογία μοιάζει περισσότερο με τοπολογία δέντρου εμφανίζοντας συγκεκριμένα κέντρα ανά

περιοχές και κατ' επέκταση η πυκνότητα δεν είναι ομοιόμορφη. Γενικότερα, η πυκνότητα είναι ένας δείκτης που έχει συνήθως μεγαλύτερο νόημα σε δίκτυα υπολογιστών, τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ή ακόμη και δίκτυο αεροπορικών συνδέσεων παρά σε δίκτυα οδικά καθώς στα δεύτερα, η ομοιόμορφη πυκνότητα είναι σχεδόν ακατόρθωτο να επιτευχθεί. Παρ' όλα αυτά, είναι ένας δείκτης στον οποίο βασίζονται μελέτες που εστιάζουν στην εξέταση πιθανών νέων συνδέσεων σε μια πόλη/ χώρα.

Μέσο μήκος διαδρομής

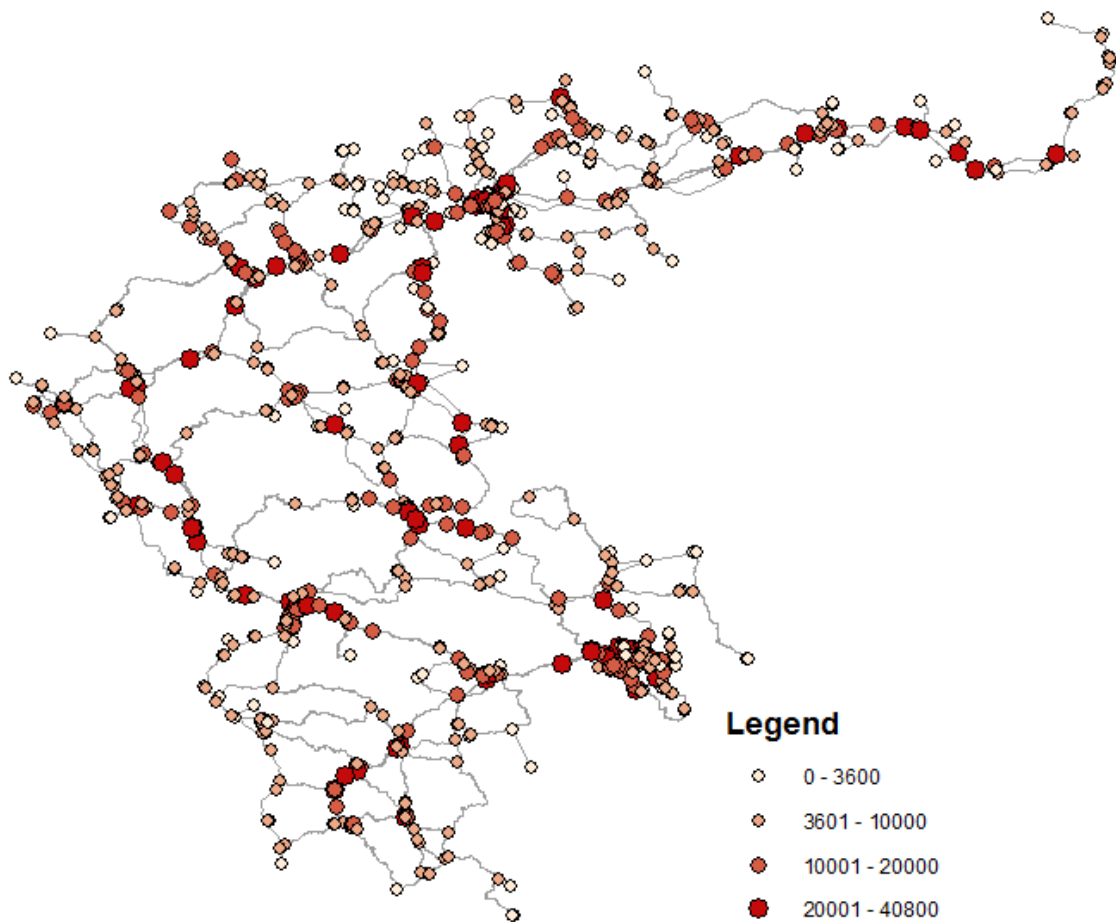
Το μέσο μήκος διαδρομής του δικτύου υποδηλώνει την αποδοτικότητα που εμφανίζει το δίκτυο και όπως ήδη έχει αναφερθεί υπολογίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος των συντομότερων διαδρομών προς τον αριθμό των κόμβων πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό που προκύπτει από την αφαίρεση ενός μόλις κόμβου. Στο εθνικό δίκτυο το μέσο μήκος διαδρομής ισούται με 3.85 ώρες. Για να μπορέσει να διεξαχθεί κάποιο συμπέρασμα θα πρέπει το μέσο μήκος διαδρομής να συγκριθεί με τη διάμετρο του δικτύου. Στην προκειμένη περίπτωση, το μέσο μήκος διαδρομής είναι περίπου το ¼ της διαμέτρου, υποδεικνύοντας τη σχετικά καλή αποδοτικότητα του δικτύου. Ακόμη, πολλές μελέτες έχουν γίνει με σκοπό τον καθορισμό της χρησιμότητας αυτού του δείκτη καθώς πέρα από ένα στατικό χαρακτηριστικό, αποτελεί και μια σημαντική μεταβλητή ελέγχου σε καταστάσεις που ο χρόνος συντελεί τον καθοριστικό παράγοντα για την έκβαση των γεγονότων (π.χ., ατύχημα). Η μείωση του μέσου μήκους διαδρομής μπορεί να επιτευχθεί από την αύξηση των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων μελέτης επηρεάζοντας έτσι τις συντομότερες διαδρομές. Αυτές οι επιπλέον ακμές ονομάζονται “shortcuts” και το πρόβλημα της εύρεσης του καλύτερου συνόλου αυτών έχει επικρατήσει ως πρόβλημα “shortcut-selection”.

Αποδοτικότητα δικτύου

Αρκετά συχνά γίνεται λόγος για την αποδοτικότητα που εμφανίζουν τα οδικά δίκτυα μεταφορών καθώς αποτελούν τη σημαντικότερη δημόσια υποδομή για τη μεταφορά ανθρώπων και αγαθών. Με τον όρο αυτό νοείται το πόσο «καλά» εξυπηρετούνται οι μετακινούμενοι και μεταφέρονται τα αγαθά μέσα σε αυτό το δίκτυο. Για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης των Latora και Marchiori (2001), ο οποίος λαμβάνει υπόψιν του το άθροισμα των συντομότερων διαδρομών (στην περίπτωσή μας το άθροισμα των συντομότερων διαδρομών από ζώνη σε ζώνη) και το πλήθος των κόμβων (στη δική μας περίπτωση το πλήθος των ζωνών προέλευσης – προορισμού). Συνεπώς, ο δείκτης της αποδοτικότητας του δικτύου για το εθνικό δίκτυο υπολογίστηκε ίσος με 128.76616. Ο δείκτης της αποδοτικότητας για να μπορέσει να αξιολογηθεί θα πρέπει να υπολογισθεί και να συγκριθεί στο πλαίσιο πολλαπλών σεναρίων. Ένα τέτοιο σενάριο θα μπορούσε να θεωρηθεί η αποκοπή ενός δρόμου ή ακόμα και η ένταξη (ή ενίσχυση) ενός υφιστάμενου. Στο σενάριο που ο δείκτης της αποδοτικότητας εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή, το δίκτυο θεωρείται ταυτόχρονα πιο αποδοτικό και πιο λειτουργικό.

Βαθμική κεντρικότητα (degree centrality)

Η βαθμική κεντρικότητα όπως ήδη αναφέρθηκε πρόκειται για το πιο απλό μέτρο ενός κόμβου που πρακτικά ορίζει τον αριθμό των γειτόνων του κόμβου αυτού και κατ' επέκταση τη σημαντικότητά του στο δίκτυο. Λόγω της ιδιαιτερότητας σχεδιασμού του εθνικού δικτύου, αξίζει να επισημανθεί πως ο βαθμός υπολογίζεται μόνο για κάθε φυσικό κόμβο του δικτύου που δεν αποτελεί κεντροειδές. Όλα τα κεντροειδή στο δίκτυο έχουν μία μοναδική σύνδεση (η οποία θεωρείται και μη πραγματική) και χαρακτηρίζεται τόσο από υψηλή ταχύτητα, όσο και από πολύ μικρό χρόνο διαδρομής. Συνεπώς ο βαθμός δεν αποτελεί κάποια χαρακτηριστική ένδειξη για τους κόμβους αυτούς στο ευρύτερο πλαίσιο του δικτύου. Επίσης, στον υπολογισμό του βαθμού για τους φυσικούς κόμβους, δεν λαμβάνεται υπόψιν σαν σύνδεση ο σύνδεσμος (connector) που ενώνει το κεντροειδές με το φυσικό κόμβο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι σύνδεσμοι αυτοί αποτελούν μη υπαρκτά στοιχεία και χρησιμοποιούνται μόνο για τεχνικά σχεδιαστικούς λόγους. Στην Εικόνα 5.3 οπτικοποιείται ο βαθμός των φυσικών κόμβων χρησιμοποιώντας ως βάρος στην πρώτη περίπτωση τη χωρητικότητα (capacity) των δρόμων.

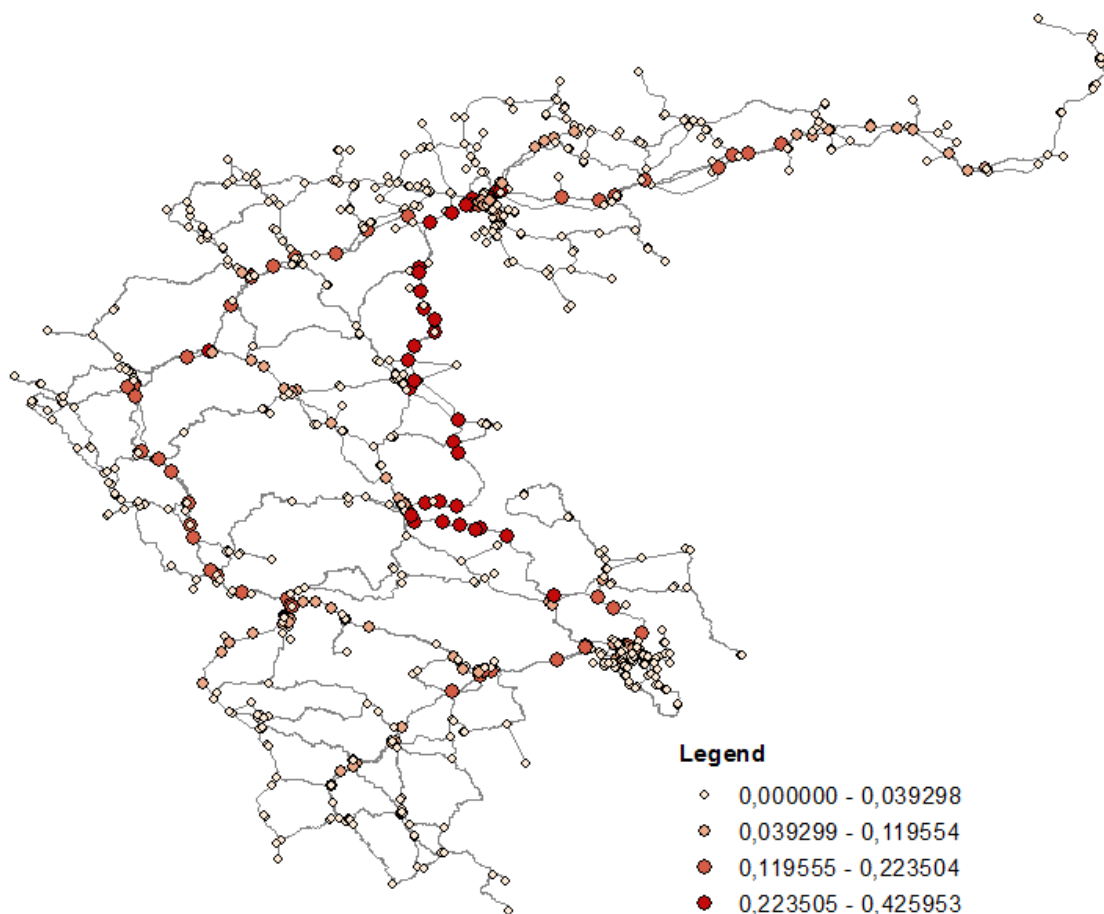


Εικόνα 5.3: Βαθμός κόμβων με βάρος τη χωρητικότητα των δρόμων

Ενδιάμεση κεντρικότητα (Betweenness Centrality)

Η ενδιάμεση κεντρικότητα όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 πρόκειται για ένα μέτρο κόμβου ή και συνδέσμου το οποίο αντικατοπτρίζει τον αριθμό των συντομότερων

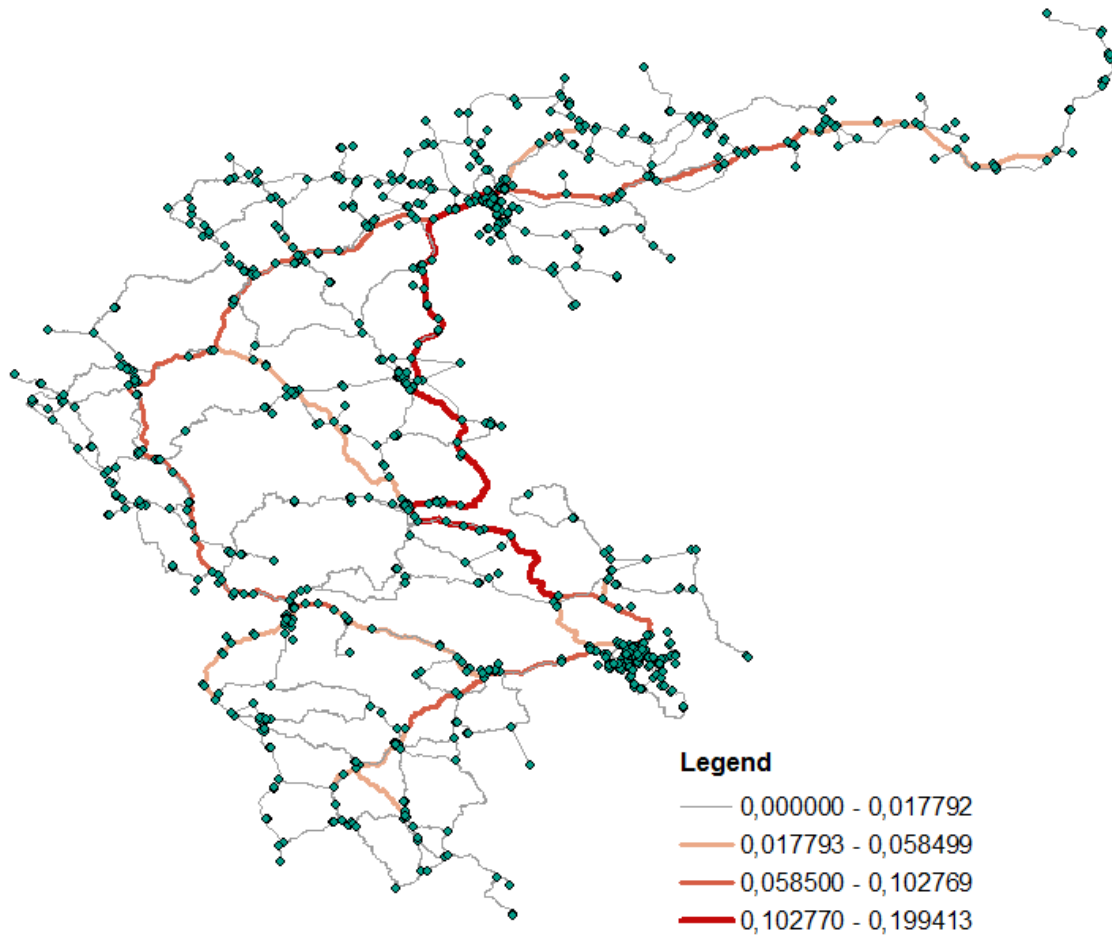
διαδρομών που διέρχονται από το στοιχείο του δικτύου αυτό (κόμβο ή σύνδεσμο). Κόμβοι με υψηλή ενδιάμεση κεντρικότητα είναι εκείνοι που βρίσκονται σε πολλά από τα συντομότερα μονοπάτια μεταξύ άλλων κόμβων στο δίκτυο. Αυτοί οι κόμβοι λειτουργούν ως βασικοί σύνδεσμοι και ορίζονται ως οι κρίσιμοι για την αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου. Στα δίκτυα μεταφορών, η ενδιάμεση κεντρικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό των πιο κρίσιμων συνδέσμων και κόμβων ή και τον εντοπισμό σημείων συμφόρησης. Επιπροσθέτως, η ενδιάμεση κεντρικότητα είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση αλγορίθμων δρομολόγησης ή τον εντοπισμό εναλλακτικών διαδρομών (rerouting) σε περίπτωση διαταραχών μέσα στο δίκτυο. Στην Εικόνα 5.4 φαίνεται η ενδιάμεση κεντρικότητα των κόμβων του γενικευμένου εθνικού δικτύου, ενώ στην Εικόνα 5.5 αντικατοπτρίζεται η ενδιάμεση κεντρικότητα των συνδέσμων του ίδιου δικτύου.



Εικόνα 5.4: Ενδιάμεση κεντρικότητα κόμβων με βάρος την ταχύτητα ελεύθερης ροής του δικτύου

Οι κόμβοι με το βαθύ κόκκινο χρώμα παρουσιάζουν και τη μεγαλύτερη ενδιάμεση κεντρικότητα. Αντίθετα, οι πιο μικροί και κίτρινοι κόμβοι παρουσιάζουν τη μικρότερη ενδιάμεση κεντρικότητα του δικτύου. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι κόμβοι που βρίσκονται στους αυτοκινητοδρόμους έχουν υψηλή ενδιάμεση κεντρικότητα, καθώς οι αυτοκινητόδρομοι τείνουν να είναι οι κύριες αρτηρίες μεταφοράς που συνδέουν διαφορετικές περιοχές και πόλεις. Επιπλέον, οι αυτοκινητόδρομοι έχουν μεγάλο όγκο κυκλοφορίας από την οπτική των υπεραστικών μετακινήσεων και συνεπώς συνδέουν

μεγάλα πληθυσμιακά κέντρα. Αυτό υποδηλώνει την υψηλή ενδιάμεση κεντρικότητα καθώς αποτελούν κρίσιμους κρίκους του οδικού δικτύου μεταφορών.



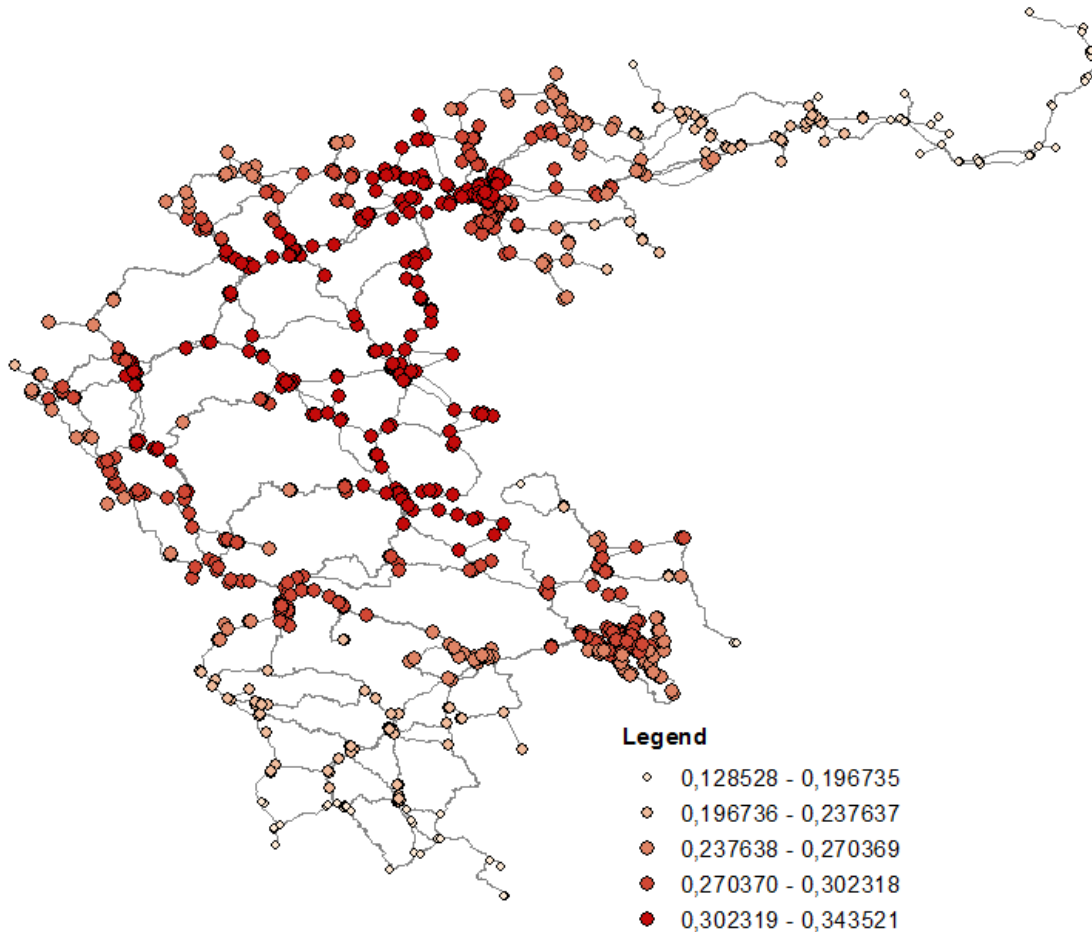
Εικόνα 5.5: Ενδιάμεση κεντρικότητα συνδέσμων με βάρος την ταχύτητα ελεύθερης ροής του δικτύου

Αντίστοιχα με την ενδιάμεση κεντρικότητα των κόμβων, η υψηλή ενδιάμεση κεντρικότητα και των συνδέσμων φανερώνεται κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων. Συνεπώς, με έντονο βαθύ κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι σύνδεσμοι αυτοί του δικτύου που συμμετέχουν περισσότερο στο σύνολο των συντομότερων διαδρομών. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο καθώς οι αυτοκινητόδρομοι αποτελούν μέρος της κύριας διαδρομής μεταξύ μεγάλων πληθυσμιακών κέντρων και κατ' επέκταση συμμετέχουν σε πολλές από τις συντομότερες διαδρομές μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών στο δίκτυο.

Κεντρικότητα εγγύτητας (Closeness Centrality)

Η κεντρικότητα εγγύτητας μετρά τη σχετική "εγγύτητα" ενός κόμβου σε όλους τους άλλους κόμβους σε ένα δίκτυο. Στο πλαίσιο των οδικών δικτύων, η κεντρικότητα εγγύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό των πιο κεντρικών ή σημαντικών κόμβων στο δίκτυο με βάση την εγγύτητά τους με άλλους κόμβους. Συγκεκριμένα, ένας κόμβος με υψηλή κεντρικότητα εγγύτητας είναι αυτός που μπορεί να προσεγγιστεί γρήγορα και αποτελεσματικά από όλους τους άλλους κόμβους του δικτύου, καθιστώντας τον ένα κρίσιμο σημείο σύνδεσης. Αναλυτικότερα, οι κόμβοι αυτοί αντιπροσωπεύουν

σημαντικούς κόμβους, διασταυρώσεις ή και κόμβους μεταφοράς που είναι απαραίτητοι για τις αποτελεσματικές μετακινήσεις τόσο ανθρώπων όσο και προϊόντων εντός του δικτύου. Συνήθως, πρόκειται για κεντρικές διασταυρώσεις οι οποίες συνδέουν πολλούς διαφορετικούς δρόμους και επιτρέπουν την εύκολη πρόσβαση σε πολλούς προορισμούς. Στην Εικόνα 5.6 παρουσιάζεται η κεντρικότητα εγγύτητας των κόμβων χρησιμοποιώντας ως βάρος την ταχύτητα ελεύθερης ροής.

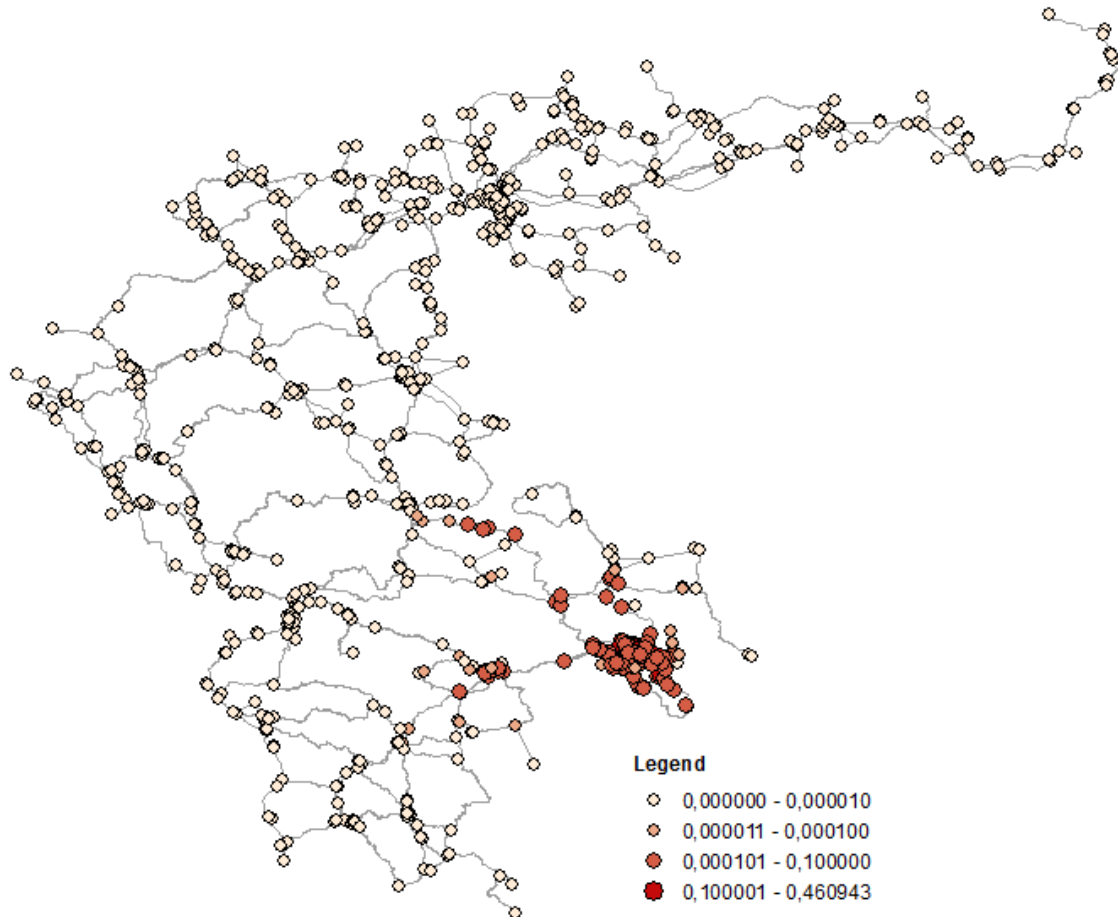


Εικόνα 5.6: Κεντρικότητα εγγύτητας κόμβων με βάρος την ταχύτητα ελεύθερης ροής του δικτύου

Όπως φανερώνεται από την εικόνα οι κόμβοι με την μεγαλύτερη κεντρικότητα εγγύτητας είναι αυτοί που βρίσκονται στην κεντρική Ελλάδα και σε μεγάλα αστικά κέντρα όπως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη. Πράγματι, αυτό το αποτέλεσμα δεν προκαλεί έκπληξη καθώς ο δείκτης αυτός βασίζεται στην ιδέα των συντομότερων αποστάσεων διαδρομής μεταξύ των κόμβων και οι κόμβοι σε κεντρικές τοποθεσίες και μεγάλα αστικά κέντρα τείνουν να είναι καλά συνδεδεμένοι με πολλούς άλλους κόμβους στο δίκτυο. Στην Ελλάδα, η κεντρική χώρα φιλοξενεί πολλούς μεγάλους αυτοκινητόδρομους και συγκοινωνιακές διαδρομές κατ' επέκταση, ενώ η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη είναι τα μεγαλύτερα και πιο πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα με εκτεταμένα οδικά δίκτυα και πολλούς συγκοινωνιακούς κόμβους. Για το λόγο αυτό, παρά το γεγονός ότι η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη δεν βρίσκονται στο κέντρο της Ελλάδας, εμφανίζουν υψηλή κεντρικότητα εγγύτητας.

Ιδιοκεντρικότητα (Eigenvector Centrality)

Η ιδιοκεντρικότητα όπως έχει ήδη επισημανθεί πρόκειται για έναν δείκτη που μετρά τη σημασία ή την κεντρική θέση ενός κόμβου σε ένα δίκτυο με βάση τις συνδέσεις του με άλλους σημαντικούς κόμβους του δικτύου. Η βασική ιδέα που στηρίζεται ο δείκτης αυτός είναι ότι ένας κόμβος είναι πιο σημαντικός εάν είναι συνδεδεμένος με άλλους σημαντικούς κόμβους στο δίκτυο. Συνεπώς, κόμβοι με υψηλή ιδιοκεντρικότητα είναι όσοι συνδέονται με άλλους κόμβους με υψηλή ιδιοκεντρικότητα. Η Εικόνα 5.7 αντικατοπτρίζει την ιδιοκεντρικότητα των κόμβων στο εθνικό γενικευμένο δίκτυο.



Εικόνα 5.7: Ιδιοκεντρικότητα κόμβων με βάση τη χωρητικότητα των δρόμων

Το αποτέλεσμα που φανερώνεται στην εικόνα αποτελεί μια λογική εξήγηση καθώς οι κόμβοι με υψηλή ιδιοκεντρικότητα είναι αυτοί που συνδέονται με άλλους σημαντικούς κόμβους στο δίκτυο. Η χωρητικότητα στην προκειμένη περίπτωση έχει το ρόλο του βάρους στις ακμές του δικτύου επομένως ισχυρά συνδεδεμένοι κόμβοι είναι αυτοί που όχι απαραίτητα συνδέονται με πολλούς κόμβους, αλλά με κόμβους που γειτνιάζουν με δρόμους μεγάλης χωρητικότητας. Τέτοιοι κόμβοι είναι όσοι βρίσκονται στην Αθήνα και συγκεκριμένα πάνω στην Αττική οδό.

5.2.2. Εκτιμώμενοι κυκλοφοριακοί φόρτοι

Για την εκτίμηση του κυκλοφοριακού φόρτου στα επιμέρους τμήματα του εθνικού οδικού δικτύου χρησιμοποιείται αλγόριθμος κατανομής της κυκλοφορίας στο δίκτυο σύμφωνα με την αρχή εξισορρόπησης χρηστών. Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 1.2

Βασικό μέγεθος για την εκτέλεση αυτού του αλγορίθμου αποτελεί ο προσδιορισμός της μεταφορικής ζήτησης υπό τη μορφή ενός μητρώου προέλευσης – προορισμού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα βαρυτικό μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψιν τόσο το μέγεθος του πληθυσμού της κάθε ζώνης, όσο και την μεταξύ τους απόσταση υψωμένη σε μια δύναμη α . Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, για μία δεδομένη τιμή απόστασης μεταξύ δύο ή περισσότερων ζωνών, οι ζώνες με μεγαλύτερο πληθυσμό εμφανίζουν και μεγαλύτερη μετακίνηση, συνεπώς και μεγαλύτερη έλξη. Μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$OD_{ij} = \frac{pop(i)pop(j)}{tt(ij)^\alpha}$$

,όπου $pop(i)pop(j)$ το προϊόν των πληθυσμών των 2 ζωνών και $tt(ij)$ η ελάχιστη χρονική απόσταση που ενώνει τις ζώνες αυτές.

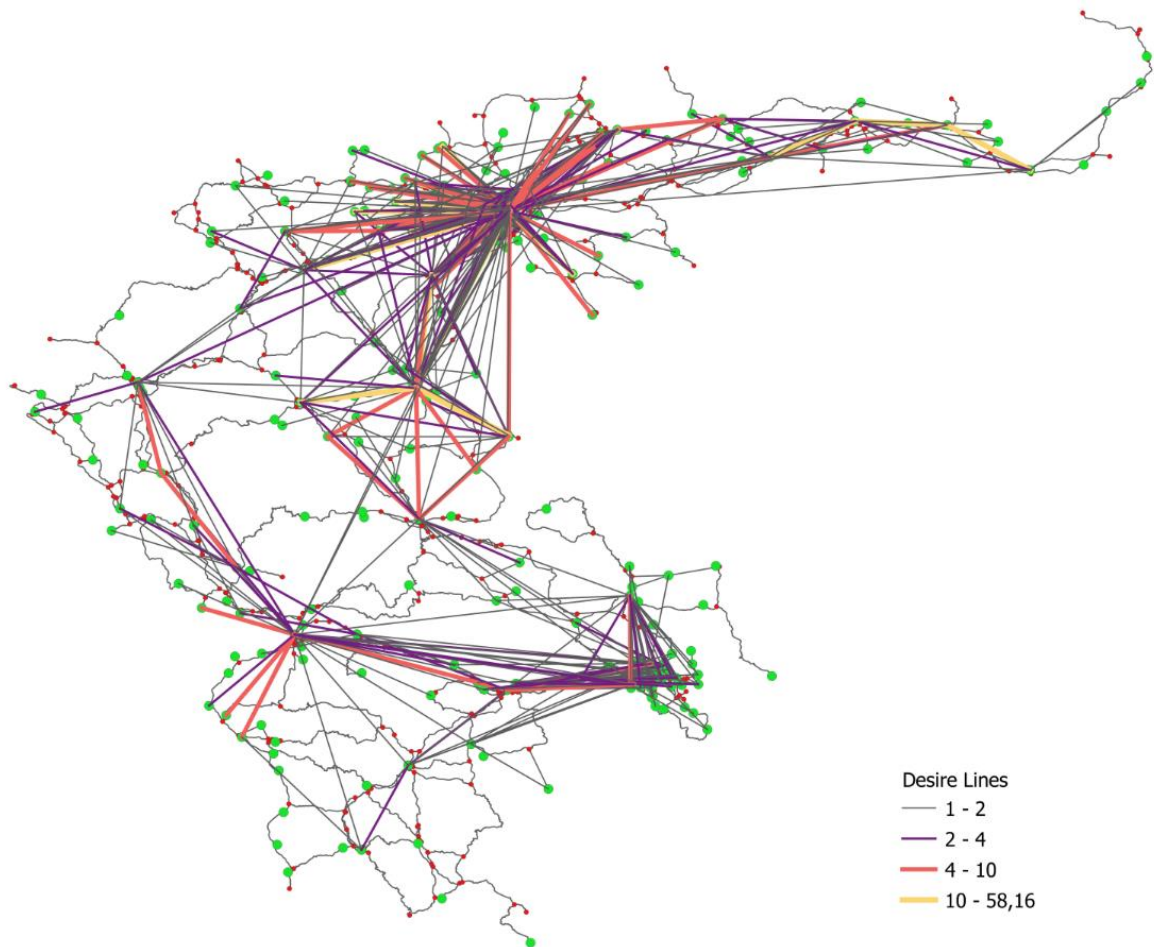
Για τον υπολογισμό της δύναμης α , ο αλγόριθμος κατανομής της κυκλοφορίας χρειάστηκε να τρέξει επαναληπτικά έως ότου οι κατανεμημένοι φόρτοι στις ακμές του δικτύου, να συγκλίνουν όσο το δυνατόν περισσότερο σε πραγματικές τιμές. Για την αξιολόγηση των τιμών, πάρθηκαν δεδομένα από το Εθνικό Σημείο Πρόσβασης² (National Access Point) της Ελλάδας που αφορούσαν πραγματικούς δυναμικούς φόρτους στους Σταθμούς Διοδίων του δίκτυο της Hellastron. Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει τον αυτοκινητόδρομο Αιγαίου, την Αττική Οδό, τη γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου, την Εγνατία Οδό, την Κεντρική Οδό, τον αυτοκινητόδρομο Μορέα, την Ιόνια Οδό, τη Νέα Οδό και την Ολυμπία Οδό. Όσον αφορά τις αποστάσεις μεταξύ των ζωνών αυτές εκτιμήθηκαν μέσω της εφαρμογής του αλγορίθμου εύρεσης της συντομότερης διαδρομής ανάμεσα σε δύο κόμβους χρησιμοποιώντας ως παράμετρο κόστους την χρονική τους απόσταση. Ακολουθώντας τη διαδικασία αυτή, η τιμή της δύναμης α υπολογίστηκε ίση με 2.45.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι κεντρικό αντικείμενο της περίπτωσης μελέτης αποτελεί η ανάλυση του Εθνικού οδικού δικτύου και κατ' επέκταση μετακινήσεις υπεραστικού χαρακτήρα, η τιμή του συντελεστή α διαφοροποιήθηκε σύμφωνα με την παρακάτω παραδοχή. Θεωρούνται ως μη υπεραστικές μετακινήσεις, οι μετακινήσεις αυτές που η προέλευση και προορισμός τους βρίσκεται εντός ίδιου νομού και η χρονική τους απόσταση δεν υπερβαίνει τη μισή ώρα. Σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής α διπλασιάστηκε με σκοπό η ανάλυση να επικεντρωθεί στις υπεραστικές μετακινήσεις. Εξάλλου, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η επιλογή αυτή οδηγεί σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα καθώς τα αστικά οδικά δίκτυα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη συμφόρηση συγκριτικά με τα υπεραστικά. Συνεπώς, θα ήταν ατυχής η χρήση της συντομότερης διαδρομής ως παράμετρο εκτίμησης του χρόνου που χρειάζεται ένας οδηγός να μετακινηθεί από ένα σημείο «Α» σε ένα σημείο «Β».

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτίμηση του μητρώου προέλευσης – προορισμού υπό τη μορφή χάρτη (Εικόνα 5.8). Ο πίνακας που εξήχθη έχει το μέγεθος 250x250 και αναπαριστά τη μέση ωριαία ζήτηση για οδικές μετακινήσεις που αποτελείται από 25.706 οχήματα συνολικά. Λόγω της μεγάλης

² <http://data.nap.gov.gr/>

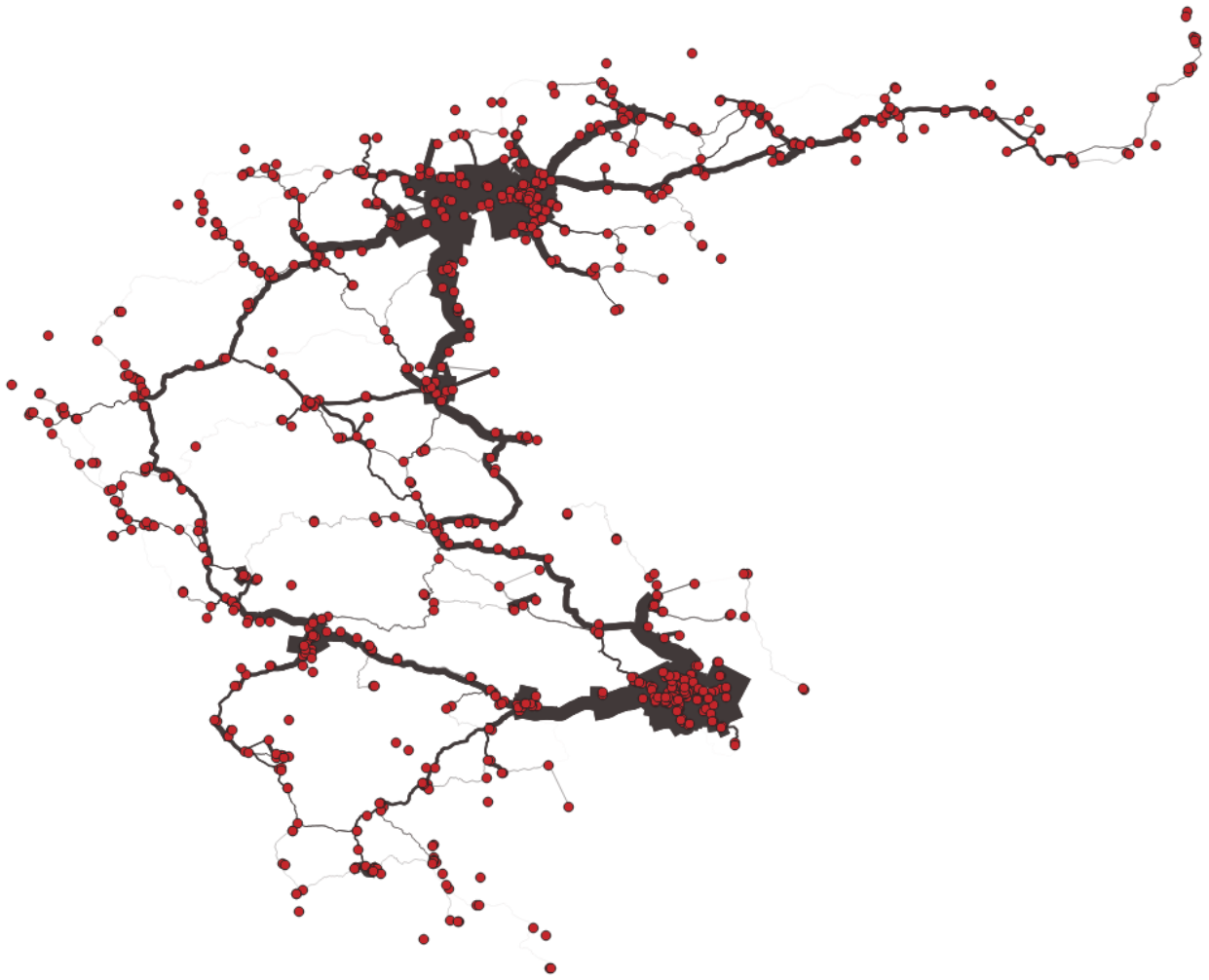
διάστασης του πίνακα και για την καλύτερη κατανόηση του μητρώου επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα με τη μέθοδο των “desire lines”. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη για την απεικόνιση των ροών των μετακινούμενων από κάθε ζώνη προέλευσης σε κάθε ζώνη προορισμού. Στην προκειμένη περίπτωση ο χάρτης έχει υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία (χρήση φίλτρων) ώστε να απεικονίζονται τα σημαντικότερα ζεύγη ζωνών σε όρους οχηματο-ροών καθώς και τα ζεύγη αυτά που υποδεικνύουν μετακινήσεις υπεραστικού χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται τα ζεύγη προέλευσης – προορισμού που παρουσιάζουν οχηματοροές μεγαλύτερες από 1 όχημα και απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον μισή ώρα σε όρους χρόνου ταξιδιού.



Εικόνα 5.8: Απεικόνιση ροών μετακινούμενων – μέθοδος “desire lines”

Ο αλγόριθμος κατανομής της κυκλοφορίας εκτελέστηκε με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης AequilibraE δίνοντας ως τιμές εισόδου τις κατάλληλες παραμέτρους. Οι παράμετροι αφορούν την ταχύτητα ελεύθερης ροής του δικτύου, τη χωρητικότητα του δικτύου όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 5.1, τις παραμέτρους a , b που υποδηλώνουν τις σταθερές της συνάρτησης της BPR όπως περιγράφηκε εκτενώς στην Υποενότητα 3.2 και τέλος τη ζήτηση του δικτύου. Τα αποτελέσματα του κατανεμημένου φόρτου παρουσιάζονται οπτικοποιημένα στην Εικόνα 5.5 και βρίσκονται ανηγμένα στην ώρα. Όπως είναι αναμενόμενο οι μεγαλύτεροι φόρτοι εμφανίζονται γύρω από τα δύο μεγαλύτερα αστικά κέντρα της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Επιπλέον, ο αυτοκινητόδρομος που ενώνει τα κέντρα αυτά (ΠΑΘΕ), καθώς επίσης και τις διερχόμενες μεγάλες

πληθυσμιακά πόλεις, όπως την Κατερίνη, τη Λάρισα, τη Λαμία και τη Θήβα, εμφανίζει σημαντικό φόρτο. Αυτό το αποτέλεσμα αποτελεί ένα ρεαλιστικό στοιχείο του δικτύου αφού η συντομότερη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει κανείς για να μεταβεί από την Αθήνα στη Θεσσαλονίκη και το αντίστροφο είναι μοναδική και είναι ο συγκεκριμένος αυτοκινητόδρομος. Σημαντικοί επίσης φόρτοι εμφανίζονται και στην οδική αρτηρία Αθήνα – Πάτρα, καθώς και σε ολόκληρη την Ιονία οδό και την Εγνατία οδό. Ως εκ τούτου αυτό που μπορεί να συναχθεί ως συμπέρασμα είναι πως ο κατανεμημένος φόρτος της παρακάτω εικόνας, σκιαγραφεί το δίκτυο αυτοκινητοδρόμων της χώρας. Πρακτικά δηλαδή, όπου υπάρχει κυκλοφοριακός φόρτος υπάρχει και αυτοκινητόδρομος που ενώνει μεγάλα αστικά κέντρα.



Εικόνα 5.9: Εκτιμώμενοι κυκλοφοριακοί φόρτοι

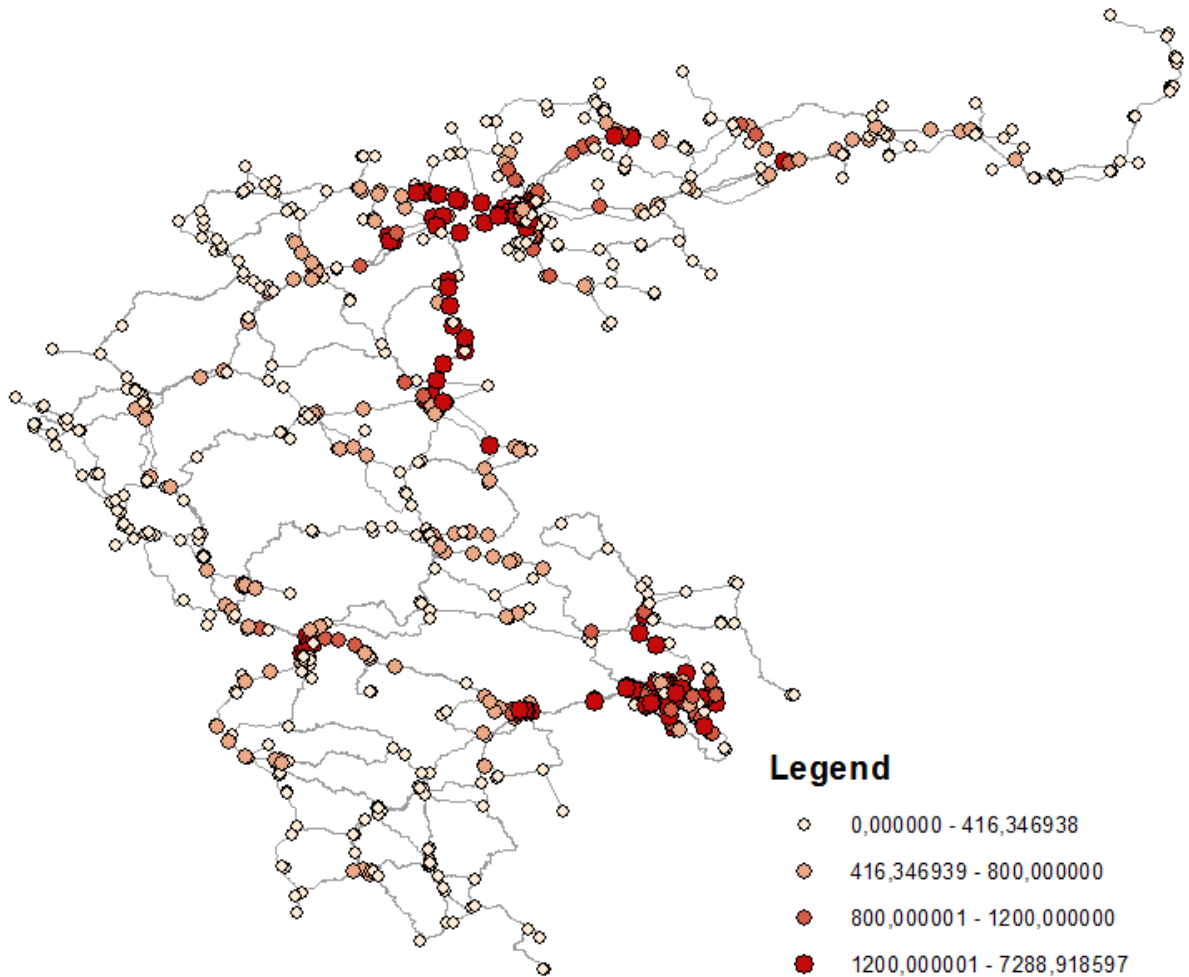
5.2.3. Σύνθετοι δείκτες

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθεται η ποσοτικοποίηση σύνθετων δεικτών που περιλαμβάνουν συγκεκριμένους δείκτες που παρουσιάζονται στην Ενότητα 5.2.1 σταθμισμένους με τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά που εκτιμήθηκαν στην Ενότητα 5.2.2, καθώς και άλλους δείκτες που εντοπίστηκαν κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που έλαβε χώρα στο Κεφάλαιο 4.

Στην Εικόνα 5.10 παρουσιάζεται ο βαθμός των κόμβων του εθνικού γενικευμένου δικτύου, χρησιμοποιώντας ως παράμετρο στάθμισης των ακμών του τους εκτιμώμενους

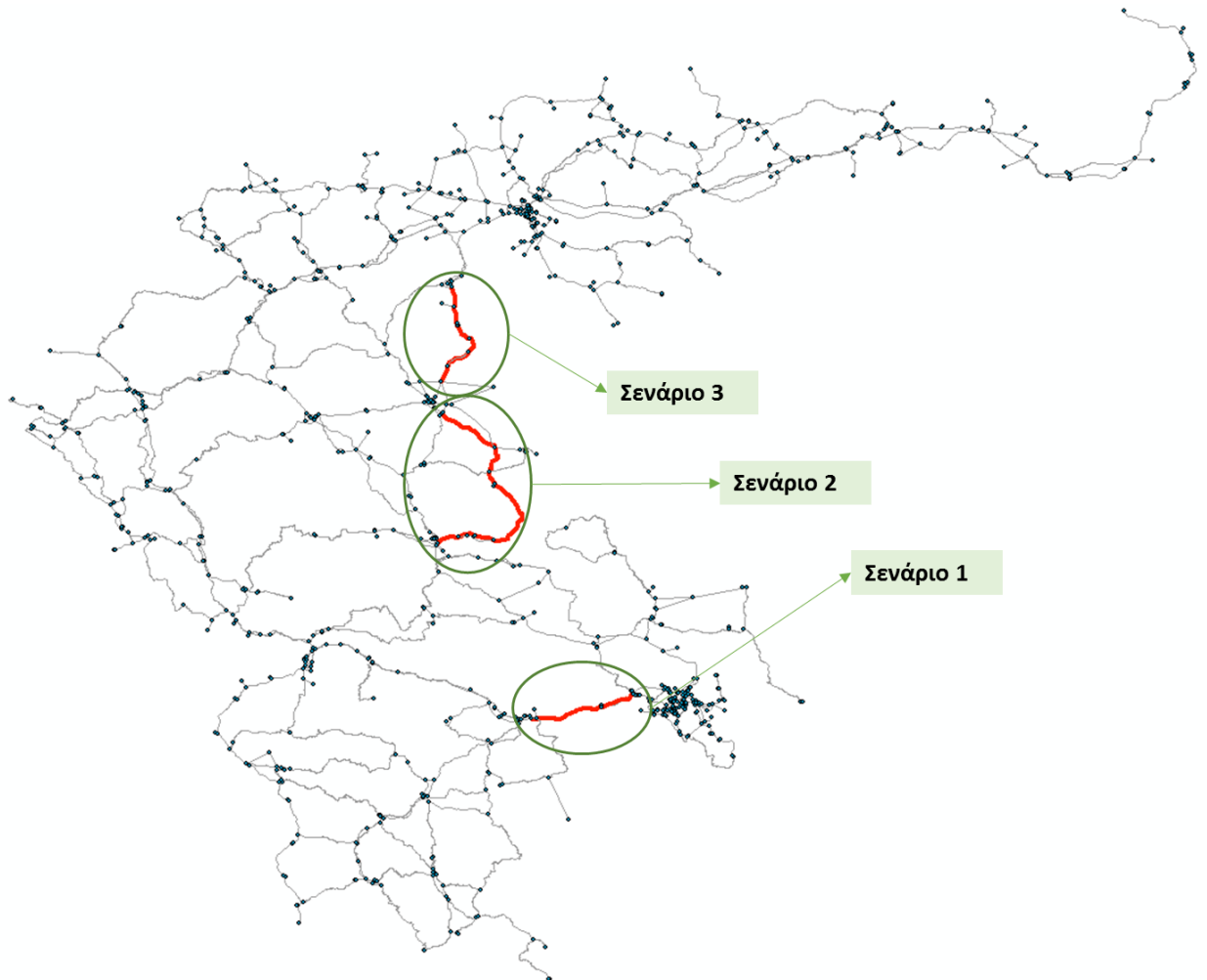
κυκλοφοριακούς φόρτους. Χαρακτηριστικά, αυτό που διαφαίνεται είναι πως οι κόμβοι στρατηγικής σημασίας εντοπίζονται κατά κύριο λόγο εντός των δύο μεγάλων αστικών κέντρων. Ωστόσο, ορισμένοι κόμβοι με υψηλό βαθμό φαίνεται να βρίσκονται κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων (ειδικότερα εντός του ΠΑΘΕ). Τα αποτελέσματα αυτά κρίνονται λογικά καθώς εκεί εντοπίζονται και οι σημαντικότερες κυκλοφοριακές ροές του δικτύου που έχουν προκύψει από τον αλγόριθμο κατανομής της κυκλοφορίας.

Ωστόσο, αυτό που θα αξίζει κι έχει νόημα να σχολιαστεί είναι η σύγκριση μεταξύ των Εικόνων 5.3 και 5.10. Στην πρώτη περίπτωση, η βαθμική κεντρικότητα υπολογίζεται έχοντας ως παράμετρο στάθμισης των ακμών τη χωρητικότητα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση υπολογίζεται βάσει του εκτιμώμενου κυκλοφοριακού φόρτου. Στην πρώτη εικόνα η χωρητικότητα αντανάκλα τους αυτοκινητοδρόμους στη χώρα. Συνεπώς και εφόσον οι αυτοκινητόδρομοι της χώρας εκτείνονται σε όλο το δίκτυο, είναι απόλυτα αναμενόμενο οι κόμβοι με μεγάλο βαθμό να τοποθετούνται κατά μήκος ολόκληρου του δικτύου επίσης. Ο εκτιμώμενος κυκλοφοριακός φόρτος στη δεύτερη περίπτωση, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως «διορθωτικός συντελεστής» του βαθμού, καθώς μετατοπίζει τους στρατηγικά σημαντικούς κόμβους με βάση το βαθμό στις περιοχές που υπάρχει ζήτηση. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, οι περιοχές αυτές εκτός των δύο μεγάλων αστικών κέντρων (Αθήνα και Θεσσαλονίκη), είναι η Πάτρα, η Κόρινθος, η Χαλκίδα, η Λάρισα, ο Βόλος, η Κατερίνη και η Δράμα. Ως αποτέλεσμα, οι ισχυροί κόμβοι εντοπίζονται κυρίως στην ανατολική Ελλάδα που παρουσιάζει τις μεγαλύτερες κυκλοφοριακές ροές.



Εικόνα 5.10: Βαθμός κόμβων με βάρος τον εκτιμώμενο κυκλοφοριακό φόρτο

Ο επόμενος δείκτης που ποσοτικοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης περίπτωση είναι η ενοποιημένη αποδοτικότητα του δικτύου. Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, ο δείκτης αυτός παρέχει πληροφόρηση για το πόσο καλά αποδίδει το δίκτυο λαμβάνοντας υπόψιν τη μεταφορική ζήτηση και τις επιπτώσεις αυτής στο γενικευμένο κόστος μετακίνησης. Ωστόσο, το αποτέλεσμα που εξάγεται από την ποσοτικοποίηση του εν λόγω δείκτη δεν μπορεί να αποτιμηθεί από μόνο του. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να συγκριθεί με τα αποτελέσματα αυτά που προκύπτουν από μεταβολές στο επίπεδο του δικτύου όπως για παράδειγμα η βελτίωση ή η κατάρρευση κάποιας οδικής υποδομής. Για το λόγο αυτό στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται η χρηστικότητα του συγκεκριμένου δείκτη στο πλαίσιο μιας υποθετικής περίπτωσης. Αναλυτικότερα, η υποθετική κατάσταση εμπεριέχει της πρόθεση ενός αρμόδιου φορέα να μελετήσει τρία σενάρια βελτίωσης της οδικής υποδομής. Το πρώτο σενάριο αφορά το τμήμα Αθήνα – Κόρινθος, το δεύτερο σενάριο το τμήμα Λαμία – Λάρισα και το τρίτο σενάριο το τμήμα Λάρισα – Κατερίνη. Οι Εικόνα 5.11 αντικατοπτρίζει τις οδικές αρτηρίες που πρόκειται να βελτιωθούν.



Εικόνα 5.11: Σενάρια βελτίωσης υφιστάμενης οδικής υποδομής

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε και στα τρία σενάρια εμπεριέχει τον υπολογισμό του δείκτη της ενοποιημένης αποδοτικότητας και γίνεται σύγκριση αυτού με τον δείκτη της ενοποιημένης αποδοτικότητας που υπολογίζεται για το βασικό δίκτυο δίχως τα σενάρια βελτίωσης. Προκειμένου να εκτιμηθεί ο δείκτης, σε όλες τις περιπτώσεις έτρεξε επαναληπτικά ο αλγόριθμος κατανομής της κυκλοφορίας με απώτερο στόχο την εξαγωγή του γενικευμένου κόστους μετακίνησης από κάθε ζώνη προέλευσης προς κάθε ζώνη προορισμού. Συνδυαστικά με τη μεταφορική ζήτηση που προέκυψε από το Κεφάλαιο 5.2.2 η ενοποιημένη αποδοτικότητα υπολογίστηκε τέσσερις φορές. Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα του δείκτη της ενοποιημένης αποδοτικότητας για όλα τα σενάρια

Σενάρια	Ενοποιημένη αποδοτικότητα
Βασικό σενάριο	3.9786
Σενάριο 1	3.9794
Σενάριο 2	3.9796
Σενάριο 3	3.9885

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό πως σε όλα τα σενάρια η αποδοτικότητα του δικτύου αυξάνεται. Το βέλτιστο σενάριο εμφανίζεται στην τρίτη

περίπτωση με τιμή 3.9885 που δηλώνει σημαντική βελτίωση του δικτύου ως προς το γενικευμένο κόστος μετακίνησης που αφορά στο σύνολο των μετακινούμενων. Κατά συνέπεια ο αρμόδιος φορέας θα έπρεπε να επιλέξει προς βελτίωση το Σενάριο 3 που αφορά την οδική αρτηρία Λάρισα – Κατερίνη.

5.2.4. Στατιστικές και ποσοτικές εκτιμήσεις

Στόχος του παρόντος υπό-κεφαλαίου αποτελεί η αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο οι προτεινόμενοι δείκτες παρέχουν κοινή πληροφορία για τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου, την εξυπηρέτηση των μετακινούμενων καθώς και την αναγνώριση των στοιχείων αυτών του δικτύου που έχουν βαρύνουσα σημασία. Η αξιολόγηση αυτή υλοποιείται υπό το πρίσμα της εκτίμησης του βαθμού συσχέτισης των προτεινόμενων δεικτών. Στην παρούσα αξιολόγηση οι προτεινόμενοι δείκτες αντιμετωπίζονται ως συνεχείς μεταβλητές και ως εκ τούτου ο βαθμός συσχέτισης αυτών ποσοτικοποιείται μέσω του δείκτη συσχέτισης που πρότεινε ο Pearson (Cohen et al., 2009).

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

Επιπλέον πέραν της ποσοτικής αξιολόγησης μέσω του Pearson παρέχονται και διαγράμματα διασποράς με σκοπό την οπτικοποίηση της πιθανής σχέσης μεταξύ των εξεταζόμενων δεικτών.

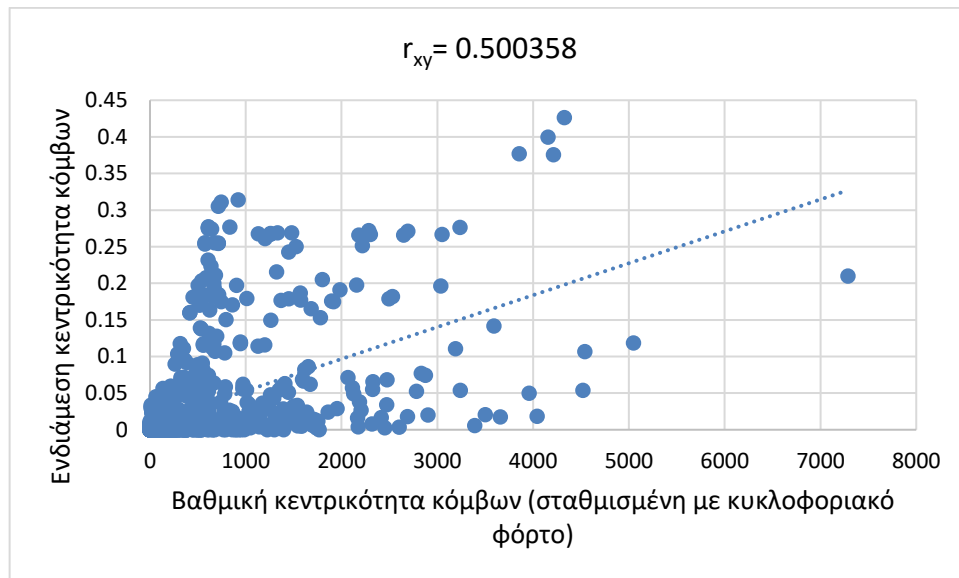
Η αξιολόγηση αυτή περιλαμβάνει α) τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της ενδιάμεσης κεντρικότητας σε επίπεδο κόμβων του δικτύου και της βαθμικής κεντρικότητας των κόμβων του δικτύου μέσω της στάθμισης των ακμών του βάσει του εξυπηρετούμενου κυκλοφοριακού φόρτου και β) τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των βαθμικών κεντρικότητων των κόμβων του δικτύου που προκύπτουν θεωρώντας ως συντελεστή στάθμισης των ακμών του δικτύου τους εξυπηρετούμενους κυκλοφοριακούς φόρτους αλλά και την κυκλοφοριακή ικανότητα των ακμών του δικτύου (capacity).

Η πρώτη αξιολόγηση βασίζεται στην υπόθεση ότι τα δύο μέτρα σχετίζονται μεταξύ τους για τον εξής λόγο. Η ενδιάμεση κεντρικότητα καταδεικνύει τους κόμβους αυτούς που εμφανίζονται με αυξημένη συχνότητα στα συντομότερα δρομολόγια του δικτύου. Από την άλλη, η βαθμική κεντρικότητα σταθμισμένη με τον κυκλοφοριακό φόρτο υποδεικνύει τους κόμβους αυτούς εκ των οποίων διέρχεται ένα μεγάλο μέρος της κυκλοφορίας. Κατά συνέπεια, λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι μετακινούμενοι επιλέγουν διαδρομή με κριτήριο της ελαχιστοποίησης του χρόνου διαδρομής, τα δύο παραπάνω μέτρα οφείλουν σε κάποιο βαθμό να συσχετίζονται. Αν κάτι τέτοιο διαπιστωθεί, διαθέτει σημαντική αξία διότι παρέχεται η δυνατότητα αναγνώρισης των κόμβων αυτών του δικτύου που έχουν βαρύνουσα σημασία από την σκοπιά της εξυπηρέτησης των μετακινούμενων χωρίς να είναι διαθέσιμο το οποιοδήποτε κυκλοφοριακό μοντέλο ή να υλοποιηθεί η οποιαδήποτε κυκλοφοριακή ανάλυση.

Η δεύτερη αξιολόγηση στοχεύει στην υποβοήθηση της σύγκρισης μεταξύ της λειτουργικής και οικονομικής διάστασης του εξεταζόμενου δικτύου. Κάτι τέτοιο βασίζεται στις εξής δύο υποθέσεις. Πρώτον, όπως προαναφέρθηκε η βαθμική κεντρικότητα σταθμισμένη με τον κυκλοφοριακό φόρτο υποδεικνύει τους κόμβους

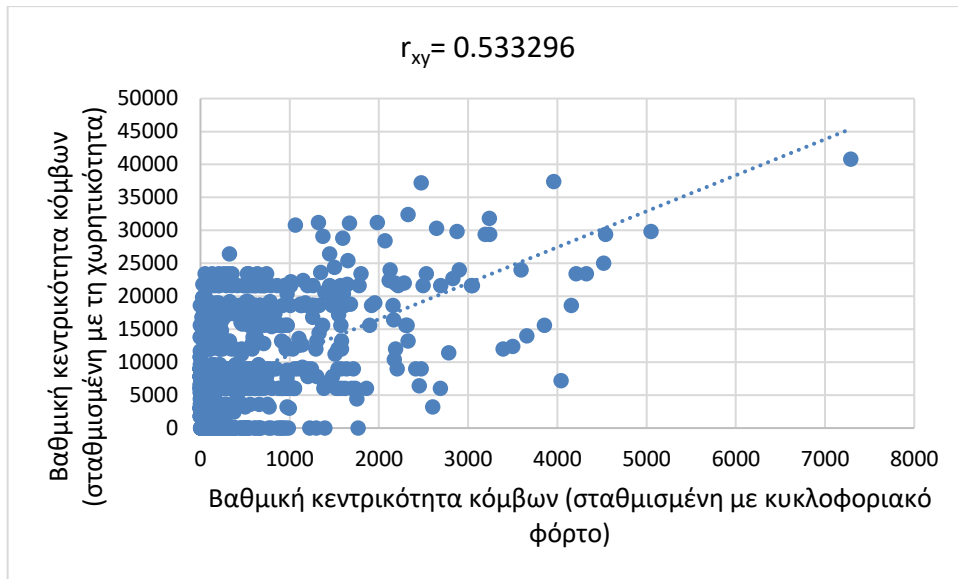
αυτούς εκ των οποίων διέρχεται ένα μεγάλο μέρος της κυκλοφορίας. Δεύτερον, βαθμική κεντρικότητα σταθμισμένη με την χωρητικότητα των ακμών του δικτύου υποδεικνύει τους κόμβους αυτούς που γειτνιάζουν με οδικές υποδομές μεγάλης κυκλοφοριακής ικανότητας. Συνεπώς, η σύγκριση μεταξύ των δύο μέτρων μπορεί να δώσει πληροφορία σχετικά με τον βαθμό που η λειτουργικότητα του δικτύου εξυπηρετεί πραγματικά (ή όχι) τις καθημερινές ανάγκες για μεταφορά ενός κοινωνικοοικονομικού συνόλου.

Στις Εικόνες 5.12 και 5.13 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προαναφερόμενες αξιολογήσεις.



Εικόνα 5.12: Διάγραμμα διασποράς και βαθμός συσχέτισης μεταξύ της ενδιάμεσης κεντρικότητας σε επίπεδο κόμβων του δικτύου και της βαθμικής κεντρικότητας των κόμβων του δικτύου μέσω της στάθμισης των ακμών του βάσει του κυκλοφοριακού φόρτου

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 5.12 ο βαθμός στον οποίο συσχετίζονται τα δύο μέτρα είναι περίπου ίσος με 0.50. Η τιμή αυτή δηλώνει πως οι δύο δείκτες παρουσιάζουν θετική και μέτρια συσχέτιση μεταξύ τους. Συνεπώς, η ενδιάμεση κεντρικότητα μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια ικανοποιητική εκτιμήτρια των κυκλοφοριακών φόρτων σε περιπτώσεις μη διαθεσιμότητας επαρκών δεδομένων και εργαλείων για τη διενέργεια κυκλοφοριακών αναλύσεων. Σε περίπτωση που μια κυκλοφοριακή ανάλυση είναι εφικτή τα εξαγόμενα αποτελέσματα θα έχουν σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 5.13: Διάγραμμα διασποράς και βαθμός συσχέτισης μεταξύ των βαθμικών κεντρικότητων των κόμβων του δικτύου που προκύπτουν από τη στάθμιση των ακμών του με α) τον κυκλοφοριακό φόρτο και β) την κυκλοφοριακή ικανότητα

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 5.13, ο βαθμός στον οποίο συσχετίζονται τα δύο μέτρα είναι περίπου ίσος με 0.53. Κάτι τέτοιο υποδηλώνει ότι ο σχεδιασμός του εθνικού οδικού δικτύου ανταποκρίνεται σε ικανοποιητικό βαθμό στις ανάγκες των μετακινούμενων. Ωστόσο, υποδηλώνει επίσης ότι η διάταξη του εθνικού οδικού δικτύου δεν είναι απολύτως βέλτιστη από οικονομικής σκοπιάς.

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τέθηκε ο στόχος της κατανόησης της λειτουργικής και οικονομικής διάστασης οδικών δικτύων μεταφορών. Για την εξυπηρέτηση του στόχου αυτού, υλοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση με αντικείμενο το πεδίο της θεωρίας γράφων και πιο συγκεκριμένα την αναγνώριση και καταγραφή δεικτών που μπορούν να βοηθήσουν την ανάλυση της τοπολογίας οδικών δικτύων καθώς και της κεντρικότητας των επιμέρους συστατικών τους. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές των μοντέλων καταμερισμού κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο μεταφορών. Κατόπιν, επιχειρήθηκε η διατύπωση σύνθετων δεικτών με απώτερο στόχο την εξατομικευμένη αλλά και ταυτόχρονη αξιολόγηση της λειτουργικής και οικονομικής διάστασης ενός οδικού δικτύου. Στη βάση των παραπάνω, καταστρώθηκε μια περίπτωση μελέτης που αφορά το εθνικό οδικό δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδας, ώστε να δοκιμαστούν οι παραπάνω μετρικές, μεθοδολογίες και δείκτες και να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για την χρηστικότητά τους.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη περίπτωσης είναι τα παρακάτω.

- Η διάμετρος του αναλυόμενου οδικού δικτύου επηρεάζεται σημαντικά από τη γεωμορφολογία της ηπειρωτικής Ελλάδας.
- Οι κόμβοι που παρουσιάζουν υψηλή βαθμική κεντρικότητα σταθμισμένη με την κυκλοφοριακή ικανότητα των ακμών του δικτύου, εντοπίζονται κατά κύριο λόγο κατά μήκος των εθνικών αυτοκινητοδρόμων.
- Τόσο οι κόμβοι όσο και οι ακμές που παρουσιάζουν υψηλή ενδιάμεση κεντρικότητα εντοπίζονται κατά μήκος των εθνικών αυτοκινητοδρόμων εξαιτίας των υψηλών ταχυτήτων που αυτοί διαθέτουν.
- Οι κόμβοι που παρουσιάζουν υψηλή κεντρικότητα εγγύτητας βρίσκονται είτε στο κέντρο βάρους του Ελλαδικού ηπειρωτικού χώρου, είτε πλησίον των μεγάλων αστικών κέντρων.
- Ισχυρά συνδεδεμένοι κόμβοι είναι αυτοί που όχι απαραίτητα συνδέονται με πολλούς κόμβους, αλλά με κόμβους που γειτνιάζουν με δρόμους μεγάλης χωρητικότητας.
- Οι βασικότεροι πόλοι γένεσης και έλξης υπεραστικών μετακινήσεων εντοπίζονται στις αστικές περιοχές που αντιστοιχούν στην Αθήνα, στη Θεσσαλονίκη, στην Πάτρα και στη Λάρισα.
- Οι οδικές υποδομές που εμφανίζουν τον μεγαλύτερο κυκλοφοριακό φόρτο σε επίπεδο υπεραστικών μετακινήσεων είναι οι αυτοκινητόδρομοι.
- Ο δείκτης της ενοποιημένης αποδοτικότητας του δικτύου αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση επενδύσεων σε οδικές υποδομές με σκοπό την ταυτόχρονη επαύξηση της λειτουργικής και οικονομικής επίδοσης ενός οδικού δικτύου.
- Η ενδιάμεση κεντρικότητα μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια ικανοποιητική εκτιμήτρια των κυκλοφοριακών φόρτων σε περιπτώσεις μη διαθεσιμότητας

επαρκών δεδομένων και εργαλείων για τη διενέργεια κυκλοφοριακών αναλύσεων.

- Ο σχεδιασμός του οδικού δικτύου ανταποκρίνεται σε ικανοποιητικό αλλά όχι βέλτιστο βαθμό στις ανάγκες των μετακινούμενων.

Οι προτάσεις επέκτασης της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας περιλαμβάνουν: α) τον επαναυπολογισμό και ανάλυση όλων των δεικτών που χρησιμοποιήθηκαν στη βάση ενός ακριβέστερου δικτύου που συμπεριλαμβάνει μεγαλύτερο πλήθος δευτερευουσών οδικών αρτηριών, β) την εξέταση επιπλέον δεικτών καθώς και της κατανομής αυτών σε επίπεδο δικτύου (ώστε να εξεταστεί η πιθανότητα ύπαρξης δεικτών που ανταποκρίνονται στη συνθήκη power-law) και γ) μια ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιώντας διαφορετικά δεδομένα εισόδου όσον αφορά τη ζήτηση για μετακινήσεις.

Παράρτημα I

Κώδικας υπολογισμού διαμέτρου ενός δικτύου σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
import pandas as pd
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i],weight=edges['weight'][i])
shortest1 = nx.shortest_path_length(G, weight="weight")
shortest2 = dict(shortest1)
ecc = nx.eccentricity(G, sp=shortest2)
diam = nx.diameter(G, e=ecc)
```

Κώδικας υπολογισμού πυκνότητας ενός δικτύου σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
import pandas as pd
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i])
density = nx.density(G)
```

Κώδικας υπολογισμού μέσου μήκους διαδρομής ενός δικτύου σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
import pandas as pd
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i],weight=edges['weight'][i])
avpl = nx.average_shortest_path_length(G, weight="weight")
```

Κώδικας υπολογισμού αποδοτικότητας ενός δικτύου σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import numpy as np
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
list1 = edges['from_node'].tolist()
list2 = edges['to_node'].tolist()
list_nodes = []
list_nodes.extend(list1)
list_nodes.extend(list2)
list_nodes = set(list_nodes)
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i],weight=edges['weight'][i])
lengths = dict(nx.shortest_path_length(G,weight='weight'))
lengths_df = pd.DataFrame(lengths)
lengths_df_transposed = lengths_df.T
lengths_df_transposed.sort_index(axis = 0, inplace = True)
lengths_df_transposed.sort_index(axis = 1, inplace = True)
inverse = 1/lengths_df_transposed
inverse.replace([np.inf, -np.inf], np.nan, inplace=True)
efficiency = (inverse.sum().sum()*(1/(len(list_nodes)*(len(list_nodes)-1))))
print (efficiency)
```

Κώδικας υπολογισμού βαθμού ενός κόμβου σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
import pandas as pd
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i],weight=edges['weight'][i])
node_degree_dict = nx.degree_centrality(G)
node_degree_df = pd.DataFrame.from_dict(node_degree_dict, orient = 'index')
node_degree_df ['id'] = node_degree_df.index
node_degree_df.reset_index(drop=True, inplace=True)
node_degree_df.rename(columns={0: 'degree'}, inplace=True)
node_degree_df.to_csv(r"C:\Users\...\node_DC.csv", index=False)
```

Κώδικας υπολογισμού ενδιάμεσης κεντρικότητας ενός κόμβου σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
```

```
import pandas as pd
import numpy as np
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i],weight=edges['weight'][i])
node_betweenness_dict = nx.betweenness_centrality(G,weight="weight")
node_betweenness_df = pd.DataFrame.from_dict(node_betweenness_dict, orient = 'index')
node_betweenness_df ['id'] = node_betweenness_df.index
node_betweenness_df.reset_index(drop=True, inplace=True)
node_betweenness_df.rename(columns={0: 'Betweenness'}, inplace=True)
node_betweenness_df.to_csv(r"C:\Users\...\node_BWC.csv",index=False)
```

Κώδικας υπολογισμού ενδιάμεσης κεντρικότητας μιας ακμής σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
import pandas as pd
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i],weight=edges['weight'][i])
edge_betweenness_dict = nx.edge_betweenness_centrality(G,weight="weight")
edge_betweenness_df = pd.DataFrame.from_dict(edge_betweenness_dict, orient = 'index')
edge_betweenness_df ['id'] = edge_betweenness_df.index
edge_betweenness_df.reset_index(drop=True, inplace=True)
edge_betweenness_df.rename(columns={0: 'Betweenness'}, inplace=True)
edge_betweenness_df[['from_node','to_node']] =
pd.DataFrame(edge_betweenness_df.id.tolist(), index = edge_betweenness_df.index)
del edge_betweenness_df['id']
edges_BWC_merged =
pd.merge(edge_betweenness_df,edges,on=['from_node','to_node'],how='left')
edges_BWC_merged.to_csv(r"C:\Users\...\edge_BWC.csv",index=False)
```

Κώδικας υπολογισμού κεντρικότητα εγγύτητας ενός κόμβου σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
import pandas as pd
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
```

```
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i],weight=edges['weight'][i])
node_closeness_dict = nx.closeness_centrality(G,distance="weight")
node_closeness_df = pd.DataFrame.from_dict(node_closeness_dict, orient = 'index')
node_closeness_df ['id'] = node_closeness_df.index
node_closeness_df.reset_index(drop=True, inplace=True)
node_closeness_df.rename(columns={0: 'Closeness'}, inplace=True)
node_closeness_df.to_csv(r"C:\Users\...\node_CC.csv",index=False)
```

Κώδικας υπολογισμού ιδιοκεντρικότητας ενός κόμβου σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
import pandas as pd
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i],weight=edges['weight'][i])
eigenvector_dict= nx.eigenvector_centrality(G, max_iter=100, tol=1e-06, weight='weight')
eigenvector_df = pd.DataFrame.from_dict(eigenvector_dict, orient = 'index')
eigenvector_df ['id'] = eigenvector_df.index
eigenvector_df.reset_index(drop=True, inplace=True)
eigenvector_df.rename(columns={0: 'Eigenvector'}, inplace=True)
eigenvector_df.to_csv(r"C:\Users\...\eigenvector.csv",index=False)
```

Κώδικας υπολογισμού συντελεστή σύμπλεξης ενός κόμβου σε γλώσσα προγραμματισμού Python

```
import networkx as nx
import pandas as pd
path = r"C:\Users\...\ExampleNetwork.csv"
edges = pd.read_csv(path, sep=",")
G = nx.DiGraph()
for i in range(0,len(edges)):
G.add_edge(edges['from_node'][i],edges['to_node'][i],key=edges['link_id'][i],weight=edges['weight'][i])
clustering_dict= nx.clustering(G)
clustering_df = pd.DataFrame.from_dict(clustering_dict, orient = 'index')
clustering_df ['id'] = clustering_df.index
clustering_df.reset_index(drop=True, inplace=True)
```

Βελτιστοποίηση μεθόδων οικονομικής και λειτουργικής περιγραφής οδικών δικτύων ευρείας κλίμακας, με τη συνδυαστική χρήση θεωρίας γράφων και αλγορίθμων κατανομής κυκλοφορίας

```
clustering_df.rename(columns={0: 'Clustering'}, inplace=True)
clustering_df.to_csv(r"C:\Users\...\clustering.csv", index=False)
```

Κώδικας υπολογισμού του μητρώου προέλευσης – προορισμού στο δίκτυο

```
import pandas as pd
import numpy as np
df = pd.read_csv(r"C:\Users\...\Exported_skim.csv", delimiter=";", header='infer', index_col=0)
list = []
for i in range(len(df)):
    for j in range(len(df)):
        list.append((df.index[i], df.index[j], df.iloc[i, j]))
df2 = pd.DataFrame(list)
df2.to_csv(r"C:\Users\...\Exported_skim_pairs.csv", header=False, index=False)
df2.rename(columns={0: "origin", 1: "destination", 2: "travel_time"}, inplace=True)
df3 = pd.read_csv(r"C:\Users\mike\OneDrive - Hellenic Institute of Transport (HIT)\Maria+Chrysostomos\Διπλωματική Μαρία\Greece\Populations.csv", delimiter=";")
df2.rename(columns={"origin": "Id"}, inplace=True)
merged = pd.merge(df2, df3, how='left', on=['Id'])
df2.rename(columns={"Id": "origin"}, inplace=True)
merged.rename(columns={"Id": "origin", "destination": "Id", "Population": "Population_origin"}, inplace=True)
merged = pd.merge(merged, df3, how='left', on=['Id'])
merged.rename(columns={"Id": "destination", "Population": "Population_destination"}, inplace=True)
merged['Population_product'] = merged['Population_origin'] * merged['Population_destination']
merged['travel_time_edited'] = merged['travel_time']
merged.loc[merged['travel_time_edited'] < 0.0001, "travel_time_edited"] = np.nan
merged['travel_time_edited'] = merged['travel_time_edited'] * 3600
df_athens = pd.read_csv(r"C:\Users\...\Athens_central_zones.csv", delimiter=";", header='infer', index_col=0)
athens_list = df_athens['Id'].tolist()
df_thessaloniki = pd.read_csv(r"C:\Users\...\Thessaloniki_central_zones.csv", delimiter=";", header='infer', index_col=0)
thessaloniki_list = df_thessaloniki['Id'].tolist()
df_larisa = pd.read_csv(r"C:\Users\...\Larisa_central_zones.csv", delimiter=";", header='infer', index_col=0)
larisa_list = df_larisa['Id'].tolist()
```

```
df_patra =
pd.read_csv(r"C:\Users\...\Patra_central_zones.csv",delimiter=";",header='infer',index_c
ol=0)
patra_list = df_patra['Id'].tolist()
df_katerini =
pd.read_csv(r"C:\Users\...\Katerini_central_zones.csv",delimiter=";",header='infer',inde
x_col=0)
katerini_list = df_katerini['Id'].tolist()
df_giannitsa =
pd.read_csv(r"C:\Users\...\Giannitsa_central_zones.csv",delimiter=";",header='infer',ind
ex_col=0)
giannitsa_list = df_giannitsa['Id'].tolist()

df_karditsa =
pd.read_csv(r"C:\Users\...\Karditsa_central_zones.csv",delimiter=";",header='infer',inde
x_col=0)
karditsa_list = df_karditsa['Id'].tolist()
df_ioannina =
pd.read_csv(r"C:\Users\...\Ioannina_central_zones.csv",delimiter=";",header='infer',inde
x_col=0)
ioannina_list = df_ioannina['Id'].tolist()
df_pyrgos =
pd.read_csv(r"C:\Users\...\Pyrgos_central_zones.csv",delimiter=";",header='infer',index
_col=0)
pyrgos_list = df_pyrgos['Id'].tolist()
df_chalkida =
pd.read_csv(r"C:\Users\...\Chalkida_central_zones.csv",delimiter=";",header='infer',inde
x_col=0)
chalkida_list = df_chalkida['Id'].tolist()
merged['alpha'] = 2.45
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(athens_list)) &
(merged.destination.isin(athens_list)) & (merged.travel_time < 0.35), 4.5, merged.alpha)
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(thessaloniki_list)) &
(merged.destination.isin(thessaloniki_list)) & (merged.travel_time < 0.5), 4.5,
merged.alpha)
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(larisa_list)) &
(merged.destination.isin(larisa_list)) & (merged.travel_time < 0.5), 4.5, merged.alpha)
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(patra_list)) &
(merged.destination.isin(patra_list)) & (merged.travel_time < 0.5), 4.5, merged.alpha)
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(katerini_list)) &
(merged.destination.isin(katerini_list)) & (merged.travel_time < 0.5), 4.5, merged.alpha)
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(giannitsa_list)) &
(merged.destination.isin(giannitsa_list)) & (merged.travel_time < 0.5), 4.5,
merged.alpha)
```

```
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(karditsa_list)) &
(merged.destination.isin(karditsa_list)) & (merged.travel_time < 0.5), 4.5, merged.alpha)
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(ioannina_list)) &
(merged.destination.isin(ioannina_list)) & (merged.travel_time < 0.5), 4.5,
merged.alpha)
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(pyrgos_list)) &
(merged.destination.isin(pyrgos_list)) & (merged.travel_time < 0.5), 4.5, merged.alpha)
merged['alpha'] = np.where((merged.origin.isin(chalkida_list)) &
(merged.destination.isin(chalkida_list)) & (merged.travel_time < 0.5), 4.5,
merged.alpha)
merged['estimated_flow'] =
merged['Population_product']/((merged['travel_time_edited'])**merged['alpha'])
merged['estimated_flow'] = merged['estimated_flow'].fillna(0)
od_table = pd.DataFrame()
od_table['origin'] = merged['origin']
od_table['destination'] = merged['destination']
od_table['estimated_flow'] = merged['estimated_flow']
od_table.to_csv(r"C:\Users\...\od_9.csv",header=True,index=False, sep = ";")
```

Βιβλιογραφία

- Agryzkov, T., Tortosa, L., Vicent, J. F., & Wilson, R. (2019). A centrality measure for urban networks based on the eigenvector centrality concept. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(4), 668–689. <https://doi.org/10.1177/2399808317724444>
- Ahmed, B. (2012). The traditional four steps transportation modeling using a simplified transport network: A case study of Dhaka City, Bangladesh. *International Journal of Advanced Scientific Engineering and Technological Research*, 1(1), 19-40.
- Akbarzadeh, M., Memarmontazerin, S., Derrible, S., & Salehi Reihani, S. F. (2019). The role of travel demand and network centrality on the connectivity and resilience of an urban street system. *Transportation*, 46, 1127-1141.
- Ando, H., Bell, M., Kurauchi, F., Wong, K. I., & Cheung, K. F. (2021). Connectivity evaluation of large road network by capacity-weighted eigenvector centrality analysis. *Transportmetrica A: Transport Science*, 17(4), 648-674.
- Banerjee, A., Duflo, E., & Qian, N. (2020). On the road: Access to transportation infrastructure and economic growth in China. *Journal of Development Economics*, 145, 102442.
- Barnes, J. A., & Harary, F. (1983). Graph theory in network analysis. *Social networks*, 5(2), 235-244.
- Barrat, A., Barthélemy, M., Pastor-Satorras, R., & Vespignani, A. (2004). The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(11), 3747–3752. <https://doi.org/10.1073/pnas.0400087101>
- Barthélemy, M. (2004). Betweenness centrality in large complex networks. *European Physical Journal B*, 38(2), 163–168. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2004-00111-4>
- Barthelemy, M. (2018). *Morphogenesis of spatial networks*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport policy*, 9(2), 117-127.
- Beyazit, E. (2011). Evaluating social justice in transport: Lessons to be learned from the capability approach. *Transport reviews*, 31(1), 117-134.
- Bisht, N., & Singh, S. (2015). Analytical study of different network topologies. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(01), 88-90.
- Bonacich, P. 1972. “Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification” *Journal of Mathematical Sociology*, 2(1), 113-120.

- Boyles, S. D., Lownes, N. E., & Unnikrishnan, A. (2020). Transportation network analysis. First Public Beta Version.
- Brandes, U., Delling, D., Gaertler, M., Görke, R., Hofer, M., Nikoloski, Z., & Wagner, D. (2008). On modularity clustering. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 20(2), 172–188. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2007.190689>
- Casali, Y., & Heinemann, H. R. (2019). A topological analysis of growth in the Zurich road network. *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, 244-253.
- Cohen, I., Huang, Y., Chen, J., Benesty, J., Benesty, J., Chen, J., ... & Cohen, I. (2009). Pearson correlation coefficient. *Noise reduction in speech processing*, 1-4.
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3), 036125.
- Daniel, C. B., Saravanan, S., & Mathew, S. (2020). Gis based road connectivity evaluation using graph theory. In *Transportation Research: Proceedings of CTRG 2017* (pp. 213-226). Springer Singapore.
- Dumedah, G., & Garsonu, E. K. (2021). Characterising the structural pattern of urban road networks in Ghana using geometric and topological measures. *Geo: Geography and Environment*, 8(1), e00095.
- Freeman, L. C. (1978). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social networks*, 1(3), 215-239.
- Freeman, L. C. (1983). Spheres, cubes and boxes: graph dimensionality and network structure. *Social Networks*, 5(2), 139-156.
- Galib, S. M. (2014). Applying Minority Game to Road Traffic Assignment. PhD, Swinburne University of Technology.
- Gross, J. L., & Yellen, J. (2003). *Handbook of graph theory*. CRC press.
- Hansen, W. G. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of planners*, 25(2), 73-76.
- Harary, F. (1960). Some historical and intuitive aspects of graph theory. *Siam Review*, 2(2), 123-131.
- Hevey, D., Collins, A., & Brogan, A. (2013). Network analysis. *Psychologist*, 26(6), 430–431. <https://doi.org/10.1177/1748048511417159>
- Jiang, B., & Claramunt, C. (2002). Integration of space syntax into GIS: new perspectives for urban morphology. *Transactions in GIS*, 6(3), 295-309.
- Jiang, B., & Claramunt, C. (2004). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B: Planning and design*, 31(1), 151-162. <https://doi.org/10.1068/b306>
- Jiang, W., Wang, Y., Huang, Y., & Zhao, Q. (2019). Top Invulnerability Nodes Mining in Dual-Direction Different-Weight Complex Network Based on Node Double-Level Local Structure Weighted Entropy. *IEEE Access*, 7, 86597-86610.

- Knoke, D., & Yang, S. (2019). *Social network analysis*. SAGE publications.
- Kurant, M., & Thiran, P. (2006). Extraction and analysis of traffic and topologies of transportation networks. *Physical Review E*, 74(3), 036114.
- Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical review letters*, 87(19), 198701.
- Lin, J., & Ban, Y. (2013). Complex network topology of transportation systems. *Transport reviews*, 33(6), 658-685.
- Litman, T. M. (2022). *Evaluating Transportation Equity: Guidance for Incorporating Distributional Impacts in Transport Planning*. Institute of Transportation Engineers. *ITE Journal*, 92(4), 43-49.
- Marshall, S., Gil, J., Kropf, K., Tomko, M., & Figueiredo, L. (2018). Street network studies: from networks to models and their representations. *Networks and Spatial Economics*, 18(3), 735-749.
- Matheu, T., V. (2011). *Trip Assignment: Lecture Notes in Transportation Systems Engineering*.
- Nagurney, A., & Qiang, Q. (2007). A network efficiency measure for congested networks. *Europhysics Letters*, 79(3), 38005.
- Niu, M., & Li, R. (2020). The average weighted path length for a class of hierarchical networks. *Fractals*, 28(04), 2050073.
- Nussbaum, M., & Sen, A. (Eds.). (1993). *The quality of life*. Clarendon Press.
- O'Sullivan, D. (2014). Spatial network analysis. In *Handbook of regional science* (pp. 1253-1273). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Okamoto, K., Chen, W., & Li, X. Y. (2008). Ranking of closeness centrality for large-scale social networks. In *International workshop on frontiers in algorithmics* (pp. 186-195). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Park, K., & Yilmaz, A. (2010). A social network analysis approach to analyze road networks. In *ASPRS Annual Conference*. San Diego, CA (pp. 1-6).
- Sarkar, T., Sarkar, D., & Mondal, P. (2021). Road network accessibility analysis using graph theory and GIS technology: a study of the villages of English Bazar Block, India. *Spatial Information Research*, 29(3), 405-415.
- Saw, K., Katti, B. K., & Joshi, G. (2015). Literature review of traffic assignment: static and dynamic. *International Journal of Transportation Engineering*, 2(4), 339-347.
- Steen, V., M. (2010). *An Introduction to Graph Theory and complex networks*. 31–48. <https://doi.org/10.1201/b15352-6>
- Sten Hansen, H. (2009). Analysing the role of accessibility in contemporary urban development. In *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2009: International Conference, Seoul, Korea, June 29-July 2, 2009, Proceedings, Part I* 9 (pp. 385-396). Springer Berlin Heidelberg.

- Szczerbicki, E. (2001). Management of Complexity and Information Flow. In Agile Manufacturing: The 21st Century Competitive Strategy. Elsevier Science Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-008043567-1/50013-9>
- Thomopoulos, N., Grant-Muller, S., & Tight, M. R. (2008). Evaluation of an MCA equity appraisal framework through a TEN-T case study.
- Tsiotas, D., & Polyzos, S. (2017). The topology of urban road networks and its role to urban mobility. *Transportation research procedia*, 24, 482-490.
- von Ferber, C., Holovatch, T., Holovatch, Y., & Palchykov, V. (2007). Network harness: Metropolis public transport. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 380, 585-591.
- Wennink, A., & Krapp, A. (2020). Equity-oriented performance measures in transportation planning. memo, American Planning Association, Planning Advisory Service.
- Wu, D. D., & Hu, X. (2006, April). Mining and analyzing the topological structure of protein-protein interaction networks. In *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Applied computing* (pp. 185-189).
- Yao, L., Guan, H., & Yan, H. (2008). Trip generation model based on destination attractiveness. *Tsinghua Science and Technology*, 13(5), 632-635.
- Γιαννόπουλος, Α.Γ. (2002). Σχεδιασμός των μεταφορών. Η διαδικασία πρόβλεψης των μελλοντικών αναγκών και μετακινήσεων. *Επίκεντρο*, 89-90.
- Ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια, (χ.χ.). Τοπολογία Δικτύου. Ανάκτηση από: <https://el.wikipedia.org/wiki/>