



Munich Personal RePEc Archive

## **Macroscopic fundamental diagrams: Simulation based findings from the road network of Thessaloniki.**

Iraklis Stamos and Josep Maria Salanova Grau and  
Evangelos Mitsakis

Centre for Research and Technology Hellas - Hellenic Institute of  
Transport, Centre for Research and Technology Hellas - Hellenic  
Institute of Transport, Centre for Research and Technology Hellas -  
Hellenic Institute of Transport

1. September 2013

Online at <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/61538/>

MPRA Paper No. 61538, posted 25. January 2015 09:20 UTC

# Μακροσκοπικά Θεμελιώδη Διαγράμματα: Ευρήματα μέσω Προσομοίωσης για το Οδικό Δίκτυο της Θεσσαλονίκης

Ηρακλής Στάμος, Josep Maria Salanova Grau, Ευάγγελος Μητσάκης

Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Βιώσιμης Κινητικότητας και Δικτύων  
Μεταφορών

Email: [stamos@certh.gr](mailto:stamos@certh.gr), [jose@certh.gr](mailto:jose@certh.gr), [emit@certh.gr](mailto:emit@certh.gr)

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η ύπαρξη Μακροσκοπικού Θεμελιώδους Διαγράμματος (ΜΘΔ) κυκλοφοριακής ροής και πυκνότητας για την πόλη της Θεσσαλονίκης μέσω της χρήσης λογισμικού προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Τα ευρήματα δείχνουν ότι υπάρχει ένα σαφώς καθορισμένο ΜΘΔ ως ιδιότητα του δικτύου, και ανεξάρτητο από μεταβολές στην ζήτηση για μετακινήσεις, καθώς διατηρεί τη μορφή και το σχήμα του. Το ΜΘΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τον έλεγχο της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο και τη βελτίωση της προσβασιμότητας σε μια περιοχή, μέσω πολιτικών τιμολόγησης, στρατηγικών ελέγχου των εισόδων στη περιοχή βάσει της συσσώρευσης των οχημάτων.

**Λέξεις κλειδιά:** Μακροσκοπικό Θεμελιώδες Διάγραμμα, Προσομοίωση της κυκλοφορίας, Κυκλοφοριακή ροή, Κυκλοφοριακή Πυκνότητα.

## Abstract

Within the framework of this paper, the existence of a Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) for the city of Thessaloniki is discussed, obtained through a traffic simulation software. Initial findings show that there is a well-defined MFD, which is a property of a network, as it is not influenced by changes in travel demand. The MFD can be used as tool for managing traffic at real-time and for improving accessibility in an area, through pricing strategies and entrance points control based on the accumulation of vehicles.

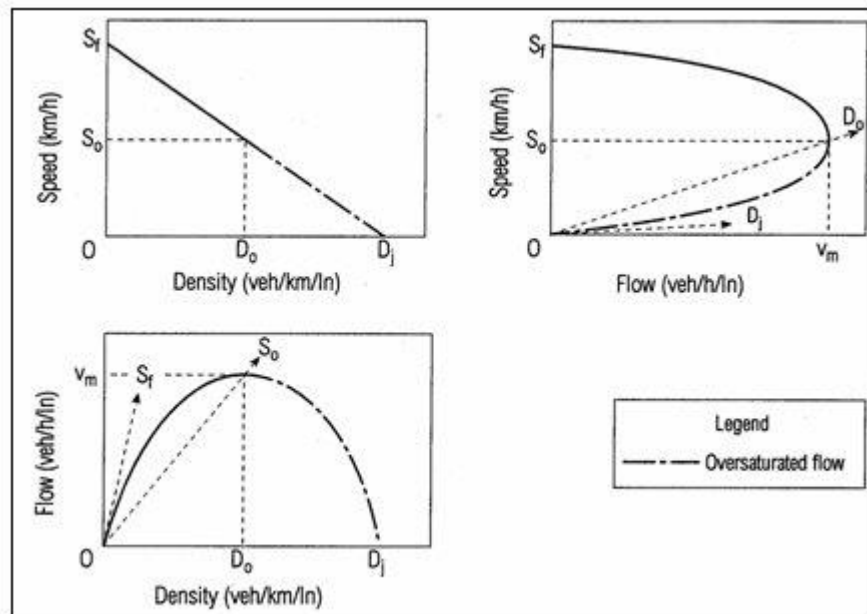
**Keywords:** Macroscopic Fundamental Diagram, Traffic Simulation, Traffic Flow, Traffic Density.

## 1. Εισαγωγή

Παραδοσιακά, η κυκλοφορία των οχημάτων χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές μεταβλητές: τη ροή οχημάτων (αριθμός οχημάτων ανά μονάδα χρόνου), την ταχύτητα και την πυκνότητα (ή πληρότητα) (αριθμός οχημάτων ανά μονάδα μήκους). Οι σχέσεις μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας προσδιορίστηκαν αρχικά μέσω εμπειρικών παρατηρήσεων σε ρεύματα συνεχούς (μη-διακοπτόμενης) ροής της κυκλοφορίας σε συγκεκριμένα τμήματα αυτοκινητοδρόμων (Greenshields, 1934, Greenberg, 1959), και ονομάζονται θεμελιώδη διαγράμματα (ΘΔ) της κυκλοφορίας για ένα οδικό τμήμα. Ως μη-διακοπτόμενη ροή ορίζεται εκείνη η ροή της κυκλοφορίας κατά την οποία ένα όχημα δεν χρειάζεται να σταματήσει ή να επιβραδύνει λόγω οποιασδήποτε αιτίας εκτός του ρεύματος της κυκλοφορίας, όπως λόγω ύπαρξης φωτεινών σηματοδοτών ή πινακίδων σε διασταυρώσεις. Όταν οι μεταβλητές ροής, ταχύτητας και πυκνότητας εκτιμώνται ως μέσες τιμές σε επίπεδο οδικού δικτύου, ορίζονται ως μακροσκοπικά χαρακτηριστικά του, και οι σχέσεις που προκύπτουν ονομάζονται Μακροσκοπικά Θεμελιώδη Διαγράμματα (ΜΘΔ), σε αντίθεση με τα ΘΔ που αναφέρονται σε συγκεκριμένα οδικά τμήματα.

Μια τέτοια σχέση είναι αυτή μεταξύ της ταχύτητας και της ροής οχημάτων που εμφανίζει ένα παραβολικό σχήμα όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 1**, στην οποία η μέση ταχύτητα μειώνεται καθώς η ροή αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη ροή (την χωρητική ικανότητα του

δρόμου) σε καταστάσεις ελεύθερης ροής, και στη συνέχεια τόσο η ροή όσο και η ταχύτητα μειώνονται για να περιγράψουν καταστάσεις συμφόρησης της κυκλοφορίας.



**Σχήμα 1:** Θεμελιώδη διαγράμματα ταχύτητας – ροής οχημάτων – πυκνότητας (TCSH, 2008)

Μεταγενέστερες εμπειρικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι παρόμοιες σχέσεις υπάρχουν και σε επίπεδο δικτύου όπου οι κυκλοφοριακές ροές διακόπτονται τακτικά από ελεγχόμενες διασταυρώσεις. Για παράδειγμα, ο Thomson (1967) ανέπτυξε μια γραμμική σχέση μεταξύ ταχύτητας και ροής από δεδομένα που συλλέχτηκαν από δρόμους στο κέντρο του Λονδίνου για πολλά χρόνια. Ο Godfrey (1969) βρήκε μια παραβολική σχέση μεταξύ μέσης ταχύτητας ταξιδιού και διανυθείσων οχηματοχιλιόμετρων στο δίκτυο για το κεντρικό Λονδίνο, και έδειξε ότι οι ταχύτητες είναι αντιστρόφως ανάλογες προς τη συγκέντρωση (ορισμένη ως ο αριθμός των οχημάτων στο δίκτυο του κεντρικού Λονδίνου σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα). Σε μια πιο θεωρητική προσέγγιση, ο Wardrop (1968) πρότεινε μια γενική σχέση μεταξύ της μέσης ταχύτητας και της ροής, η οποία εξαρτάται από το μέσο πλάτος του δρόμου και το μέσο μήκος της διασταύρωσης, η οποία όμως εξακολουθεί να μειώνεται μονοτονικά, συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε και ο Zahavi (1972) εξετάζοντας τα δεδομένα από αστικά δίκτυα στην Αγγλία και στις ΗΠΑ, όπου βρήκε ότι οι μέσες ταχύτητες είναι αντιστρόφως ανάλογες με τη ροή. Η μονοτονικότητα όμως έχει μόνο τότε νόημα, όταν η κίνηση στους δρόμους είναι χαμηλή, καθώς δεν μπορεί να περιγράψει καταστάσεις με πολύ χαμηλές ταχύτητες και ροές και συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τις ώρες αιχμής ενός δικτύου. Αργότερα, οι Herman και Prigogine (1979) και Herman και Ardekani (1984) πρότειναν το «μοντέλο 2-fluid» για την κυκλοφορία στις πόλεις, όπου υπέθεσαν ότι η κατανομή της ταχύτητας χωρίζεται σε δύο μέρη: ένα μέρος που αντιστοιχεί σε κινούμενα οχήματα και ένα άλλο για τα οχήματα που έχουν σταματήσει λόγω τοπικών συνθηκών (κυκλοφοριακή συμφόρηση, έλεγχος της κυκλοφορίας, ατυχήματα κλπ.).

Οι Williams et al. (1987) και Mahmassani et al. (1987) διερεύνησαν μέσω προσομοίωσης τις σχέσεις μεταξύ των τριών βασικών μεταβλητών της ροής της κυκλοφορίας σε επίπεδο δικτύου, βασιζόμενοι στη θεωρία του μοντέλου «2-fluid», ωστόσο, τα στοιχεία από αυτές τις μελέτες δεν ήταν αρκετά για να αποδειχθεί η ύπαρξη μιας αμετάβλητης μακροσκοπικής σχέσης για πραγματικά αστικά δίκτυα, καθώς δεν αναλύθηκε η εγκυρότητα τους σε συνθήκες μεταβλητής ζήτησης και το μοντέλο τους δεν αναπτύχθηκε έτσι ώστε να μπορεί να

περιγράψει δυναμικά την ώρα αιχμής ενός δικτύου. Η ύπαρξη και η μοναδικότητα ενός κοίλου ΘΔ για ένα δρόμο με διάφορα οδικά τμήματα χωρίς στροφές και με ύπαρξη φωτεινών σηματοδοτών αποδείχτηκε από τον Daganzo (2005a, b). Αργότερα ο ίδιος υπέθεσε ότι μια καλά καθορισμένη σχέση μεταξύ ροής και πυκνότητας μπορεί να προκύψει εάν ένα δίκτυο είναι "ομοιόμορφα συμφορημένο" στο χώρο και η ζήτηση αλλάζει αργά με το χρόνο (Daganzo, 2007).

Οι Geroliminis και Daganzo (2007) αναδιατύπωσαν στη συνέχεια αυτή τη θεωρία μέσω δύο αξιωμάτων: (α) ότι ομοιογενώς συμφορημένες περιοχές (γειτονιές) παρουσιάζουν ΜΘΔ συσχετίζοντας την «παραγωγή» (το προϊόν της μέσης ροής και του μήκους του δικτύου) και τη «συσσώρευση» (το προϊόν της πυκνότητας και του μήκους του δικτύου) και (β) ότι ο ρυθμός ολοκλήρωσης μετακινήσεων είναι ανάλογος προς την παραγωγή. Μια σειρά προσομοιώσεων κατά την ώρα αιχμής στο κέντρο του Σαν Φρανσίσκο (με πολύ διαφορετικές κατανομές της ζήτησης τόσο στο χώρο και το χρόνο) απέδειξε (α) ότι υπάρχουν ΜΘΔ ανεξάρτητα από τη ζήτηση, (β) ότι η συσσώρευση μπορεί να προβλεφθεί δυναμικά, καθώς και (γ) ότι τα συστήματα ελέγχου της περιμέτρου για τη βελτίωση της προσβασιμότητας λειτουργούν όπως αναμενόταν.

Η εμπειρική επαλήθευση της ύπαρξης ΜΘΔ έγινε πρόσφατα μέσω συνδυασμού μετρήσεων από 500 μετρητές στην πόλη της Yokohama, Ιαπωνία και ενός μεγάλου δείγματος δεδομένων προερχόμενων από συσκευές GPS σε ταξί (Geroliminis & Daganzo, 2008). Οι αναλύσεις και οι προσομοιώσεις σε αυτές τις αναφορές (Geroliminis & Daganzo, 2007, 2008) δείχνουν ότι τα ΜΘΔ είναι καμπύλες που μπορούν να αναπαραχθούν κάτω από ομοιογενείς συνθήκες σε αστικά δίκτυα ακόμα και αν τα ΘΔ ροής - πυκνότητας για μεμονωμένα οδικά τμήματα παρουσιάζουν σημαντική διασπορά (Daganzo & Geroliminis, 2008). Οι αναφορές αυτές έδειξαν επίσης ότι τα ΜΘΔ είναι ιδιότητα της υποδομής ενός δικτύου και όχι της ζήτησης, δηλαδή η μέση ροή σε ένα δίκτυο είναι μέγιστη για την ίδια τιμή της πυκνότητας, ανεξάρτητα από τους χρονικά μεταβαλλόμενους πίνακες προέλευσης-προορισμού. Περαιτέρω έρευνα έχει αποδείξει ότι η μορφή και το σχήματος του ΜΘΔ εξαρτώνται από τη ζήτηση (Laval 2010) και από την τοποθέτηση των μετρητών (Buisson and Ladier 2009), παρουσιάζοντας σημαντική διασπορά σε πολύπλοκα δίκτυα (Courbon and Leclercq 2011). Η επίπτωση της χωρικής κατανομής της συμφόρησης είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας του ΜΘΔ (Buisson and Ladier 2009, Ji and Geroliminis 2011, Knoor et al. 2012, Mazlounian et al. 2010). Έχουνε διατυπωθεί διάφορες μεθοδολογίες με σκοπό να λυθούν τα παραπάνω ζητήματα όπως το γενικευμένο ΜΘΔ (Knoor and Hoogendoorn 2012). Η έρευνα της ύπαρξης και των χαρακτηριστικών του ΜΘΔ έχει επεκταθεί σε δίκτυα αρτηριών (Geroliminis and Sun 2011a) και δίκτυα αυτοκινητοδρόμων (Geroliminis and Sun 2011b and Cassidy et al. 2011).

Στόχο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της ύπαρξης ενός ΜΘΔ ροής – πυκνότητας για το δίκτυο της Θεσσαλονίκης χρησιμοποιώντας εργαλεία προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Η υπόλοιπη εργασία δομείται ως εξής: Στην ενότητα 2 παρουσιάζεται το δίκτυο της Θεσσαλονίκης, αναλύονται τα εργαλεία προτυποποίησης και προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του ΜΘΔ ροής - πυκνότητας και παρουσιάζονται επιγραμματικά τα δεδομένα εισόδου για τα παραπάνω εργαλεία. Στη συνέχεια αναφέρεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης καθώς και το ΜΘΔ ροής – πυκνότητας για το δίκτυο της Θεσσαλονίκης. Στην ενότητα 3 γίνεται περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξετάζεται πώς το διάγραμμα επηρεάζεται από τον αριθμό των οδικών τμημάτων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του σε ένα δίκτυο, από τα χρονικά διαστήματα και τη διάρκεια ανάλυσης των αποτελεσμάτων και από τις μεταβολές της ζήτησης. Τέλος, στην ενότητα 4 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

## 2. Το Δίκτυο της Θεσσαλονίκης

### 2.1 Δίκτυο Αναφοράς

Η Θεσσαλονίκη είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας με 1.006.730 πολίτες στην ευρύτερη περιοχή της. Βρίσκεται στη Βόρεια Ελλάδα και καλύπτει συνολικά 1.455,68 τ.χλμ. με μέση πυκνότητα 665,2 κατοίκων ανά τ.χλμ.. Λόγω της γεωγραφικής της θέσης, η Θεσσαλονίκη διαδραματίζει σημαντικό κοινωνικό, οικονομικό και εμπορικό ρόλο τόσο εντός συνόρων όσο και στην ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων. Το οδικό δίκτυο της πόλης περιλαμβάνει δρόμους διαφόρων κατηγοριών, με τις διασταυρώσεις στο κέντρο της να έχουν σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ τους (100m-400m) και να ελέγχονται από φωτεινούς σηματοδότες. Οι δρόμοι έχουν μια έως τέσσερις (1-4) λωρίδες κυκλοφορίας σε κάθε κατεύθυνση. Το όριο ταχύτητας είναι 50 χλμ./ώρα στις κεντρικές αρτηρίες. Οι κεντρικές διασταυρώσεις της πόλης ελέγχονται από πολυφασικά συστήματα σηματοδότησης, τα οποία εναλλάσσονται βάσει ώρας ημέρας (έως και 5 ημερήσια προγράμματα με κύκλο 45, 60, και 90 δευτερολέπτων). Το τμήμα του κέντρου της πόλης της Θεσσαλονίκης που εξετάζεται είναι περίπου 2,86 τ.χλμ. με άκρα την Πλατεία ΧΑΝΘ, την Πλατεία Σιντριβανιού, τη συμβολή των οδών Λαγκαδά-Μοναστηρίου, τα Δικαστήρια και το Λευκό Πύργο.

### 2.2 Πρότυπα καταμερισμού και προσομοίωσης της κυκλοφορίας

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία καταμερισμού της κυκλοφορίας σε μακροσκοπικό επίπεδο, τα αποτελέσματα των οποίων εισήχθησαν στη συνέχεια σε εργαλείο προσομοίωσης της κυκλοφορίας σε μικροσκοπικό επίπεδο. Στο

Σχήμα 2 απεικονίζεται η ροή εργασιών που ακολουθήθηκε.



Σχήμα 2: Ροή εργασιών για την εξαγωγή και ανάλυση των αποτελεσμάτων

#### 1) Πρότυπο καταμερισμού των μετακινήσεων

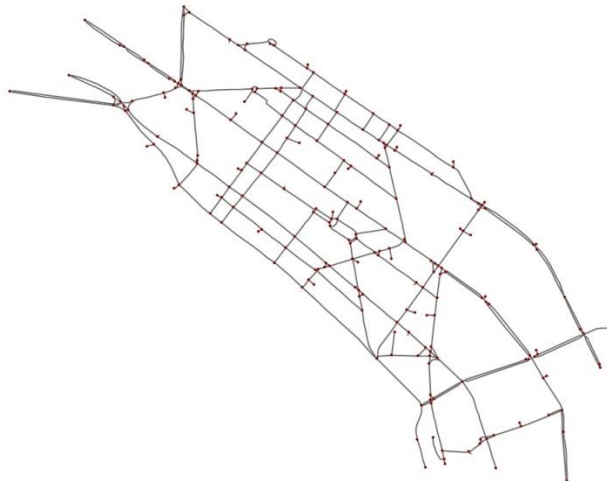
Το αρχικό δίκτυο, όπως αυτό κωδικοποιήθηκε στο λογισμικό κυκλοφοριακού σχεδιασμού VISUM, αποτελείται από 290 κόμβους (εκ των οποίων οι 91 είναι σηματοδοτούμενες) (Σχήμα 3α). Η σύνδεση των κόμβων πραγματοποιείται μέσω 802 οδικών τμημάτων, που φέρουν γεωμετρικά (μήκος, θέση στο δίκτυο) και κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά (αριθμός λωρίδων, ταχύτητα ελεύθερης ροής, διεύθυνση κυκλοφορίας, χωρητικότητα οδικού τμήματος ανά λωρίδα, μεταφορικά μέσα στα οποία επιτρέπεται η χρήση του οδικού τμήματος, ύπαρξη λωρίδας αποκλειστικής χρήσης λεωφορείων, χρήση αριστερής/δεξιάς λωρίδας για στάθμευση, αριθμός διελεύσεων Μέσων Μαζικής Μεταφοράς ανά ώρα ανά οδικό τμήμα). Στο δίκτυο έχουν οριστεί 44 κυκλοφοριακές ζώνες και η ζήτηση για μετακινήσεις μεταφέρεται στο οδικό δίκτυο μέσω των 104 συνδετήριων συνδέσμων (ψευδό-οδικά τμήματα με οριακά μηδενικό μήκος), που ενώνουν τα κεντροειδή των ζωνών με διάφορους κόμβους.

Η ζήτηση για μετακινήσεις στο δίκτυο αναφέρεται στην πρωινή ώρα αιχμής 08:00-09:00 και ο πίνακας προέλευσης-προορισμού έχει διορθωθεί με μετρήσεις κυκλοφοριακού φόρτου σε πραγματικό χρόνο σε 17 σημεία στο δίκτυο. Τα δεδομένα αναφέρονται στο Μάρτιο του 2013 και ο συνολικός αριθμός μετακινήσεων είναι 19.632.

Ο καταμερισμός στο δίκτυο έγινε σύμφωνα με τον αλγόριθμο Linear User Cost Equilibrium (Gentile & Noelel, 2009) ώστε να προκύψει η φόρτιση των οδικών τμημάτων.

## 2) Πρότυπο προσομοίωσης της κυκλοφορίας

Η γεωμετρία του δικτύου, όπως αυτό κωδικοποιήθηκε στο λογισμικό κυκλοφοριακού σχεδιασμού, καθώς και τα αποτελέσματα της διαδικασίας καταμερισμού των μετακινήσεων (διαδρομές, κυκλοφοριακοί φόρτοι ανά διαδρομή και ανά οδικό τμήμα, χρόνοι διαδρομών, καθυστερήσεις στους κόμβους) εισήχθησαν στο πρότυπο προσομοίωσης της κυκλοφορίας VISSIM (Σχήμα 3β). Ο συνολικός αριθμός των οδικών τμημάτων αυξήθηκε σε 1762, καθώς σε αυτό το πρότυπο, οι επιτρεπόμενες στρέφουσες κινήσεις κωδικοποιούνται ως ξεχωριστά οδικά τμήματα. Στη συνέχεια έγινε προσομοίωση της κυκλοφορίας σε μικροσκοπικό επίπεδο και ακολούθησε η ανάλυση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3: Το κωδικοποιημένο δίκτυο της Θεσσαλονίκης

## 2.3 Μεθοδολογία ανάλυσης αποτελεσμάτων

Για την αναπαραγωγή της καμπύλης που συσχετίζει τη ροή κυκλοφορίας με τη πυκνότητα και τη διερεύνηση της ύπαρξης ΜΘΔ, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Προσομοίωση της κυκλοφορίας στο λογισμικό VISSIM.
- Αποθήκευση πληροφορίας ροής οχημάτων και πυκνότητας σε όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου κάθε 1 λεπτό.
- Κάθε προσομοίωση επαναλήφθηκε 5 φορές με διαφορετική γεννήτρια τυχαίων αριθμών (Γ.Τ.Α) (random seed)
- Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 5 ωριαίες προσομοιώσεις κυκλοφορίας

Στη συνέχεια, εξάχθηκαν οι παρακάτω σταθμισμένοι μέσοι όροι για κάθε χρονικό διάστημα αξιολόγησης των αποτελεσμάτων (0 έως 1 ώρα για κάθε 1 λεπτό):

$$q_w = \frac{\sum_i q_i \cdot l_i}{\sum_i l_i} \quad (1)$$

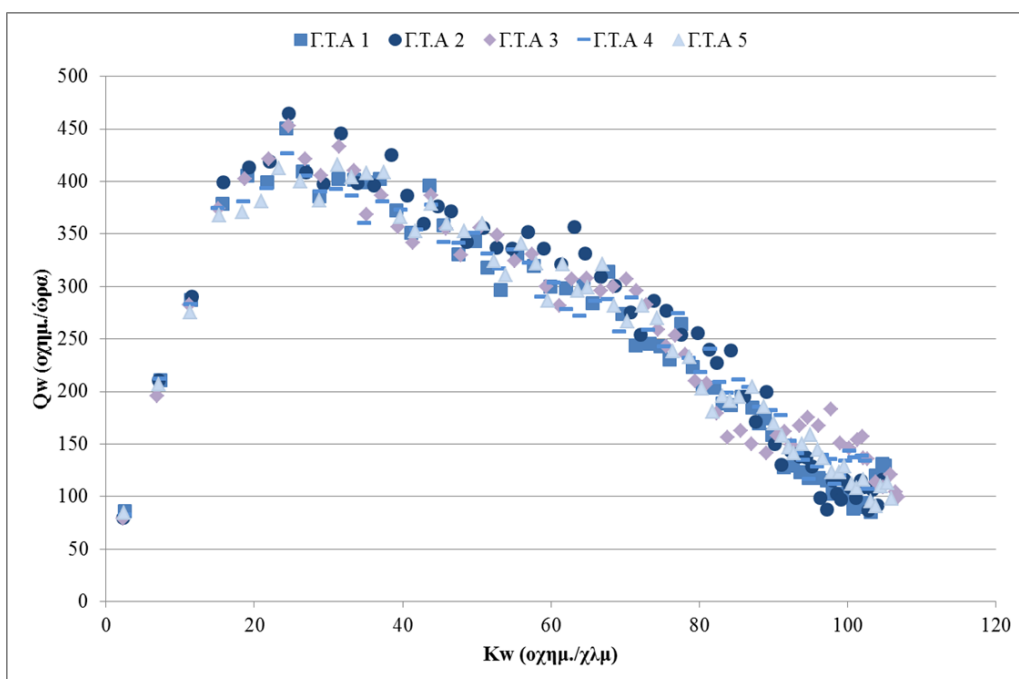
$$k_w = \frac{\sum_i k_i \cdot l_i}{\sum_i l_i} \quad (2)$$

όπου  $q_w$  είναι ο σταθμισμένος κυκλοφοριακός φόρτος,  $q_i$  είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος στο οδικό τμήμα  $i$ ,  $k_w$  είναι η σταθμισμένη πυκνότητα,  $k_i$  είναι η πυκνότητα στο οδικό τμήμα  $i$  και  $l_i$  είναι το μήκος του οδικού τμήματος  $i$ .

#### **2.4 Ύπαρξη ΜΘΔ ροής – πυκνότητας**

Οι σταθμισμένοι μέσοι όροι ροής και πυκνότητας συσχετίστηκαν γραφικά για όλες τις επιμέρους γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο

Σχήμα 4, όπου διακρίνεται το ΜΘΔ του κεντρικής περιοχής της Θεσσαλονίκης.



**Σχήμα 4:** Μακροσκοπικό Θεμελιώδες Διάγραμμα ροής – πυκνότητας για το δίκτυο της Θεσσαλονίκης

Όπως φαίνεται, η μέση σταθμισμένη ωριαία χωρητικότητα του δικτύου για όλα τα οδικά τμήματα είναι μεταξύ 400 και 500 οχημάτων. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένα, ανεξαρτήτως της εκάστοτε Γ.Τ.Α. και δεν παρουσιάζουν σημαντική διασπορά. Είναι επίσης εμφανές από το

Σχήμα 4, το σημείο στο οποίο το δίκτυο λειτουργεί με την μέγιστη τιμή μέσης σταθμισμένης χωρητικότητας, το οποίο αντιστοιχεί σε μια πυκνότητα της τάξης των 25-30 οχημάτων ανά χιλιόμετρο.

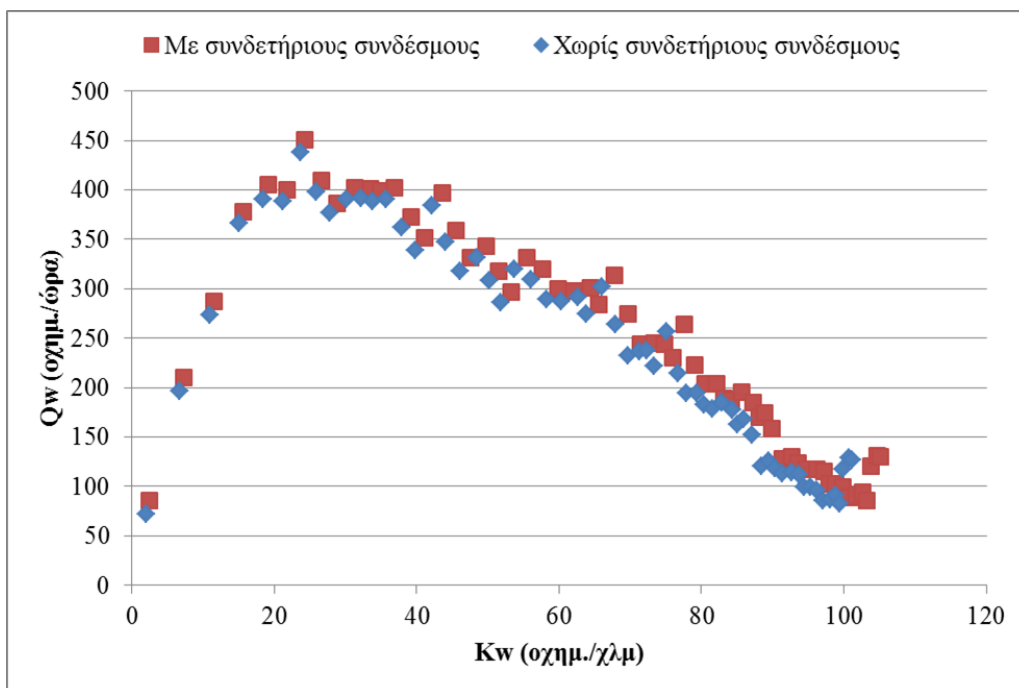
### 3. Ανάλυση αποτελεσμάτων

#### 3.1 Οδικά τμήματα

##### 3.1.1 Συνδεδημένοι σύνδεσμοι

Στην ανάλυση αυτή αφαιρέθηκαν από την αξιολόγηση τα οδικά τμήματα εκείνα που λειτουργούν ως συνδεδημένοι σύνδεσμοι και ρόλο έχουν να «μεταφέρουν» την κυκλοφορία στο δίκτυο. Εξετάζεται έτσι η περίπτωση αξιολόγησης μόνο «ρεαλιστικών» οδικών τμημάτων όπου η ροή και η πυκνότητα της κυκλοφορίας είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Τα οδικά τμήματα που λειτουργούν ως συνδεδημένοι είναι συνολικά 51. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, η μορφή και το σχήμα του ΜΘΔ και στις δύο περιπτώσεις είναι ίδιο, με μόνη διαφορά τη στοιχειώδη μετατόπιση του ΜΘΔ με συνδεδημένους συνδέσμους προς τα πάνω, λόγω του επιπρόσθετου συνολικού φόρτου που μεταφέρεται στο δίκτυο μέσω αυτών των οδικών τμημάτων.

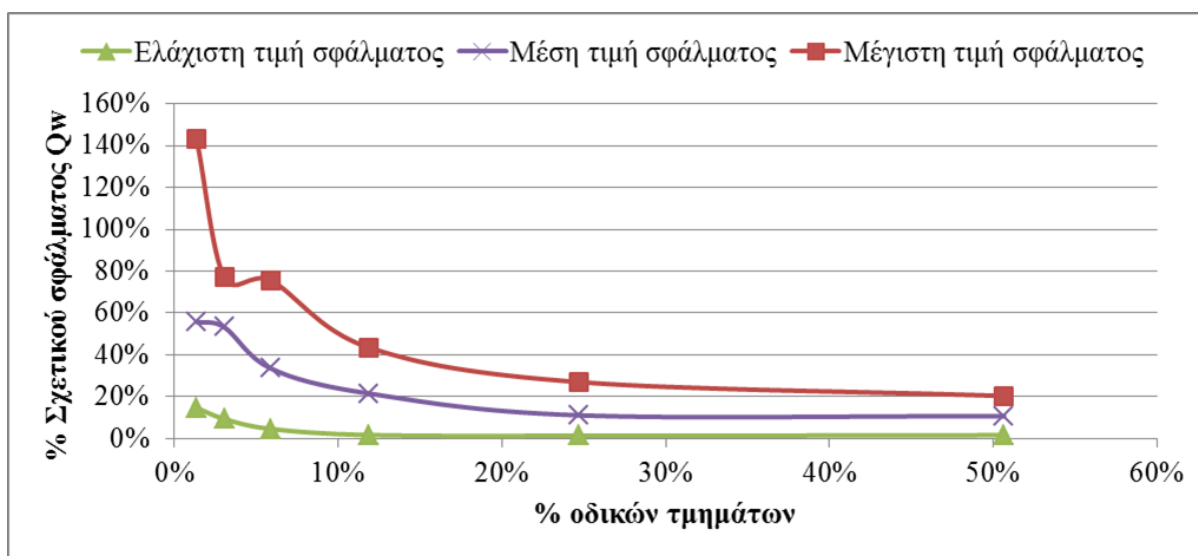




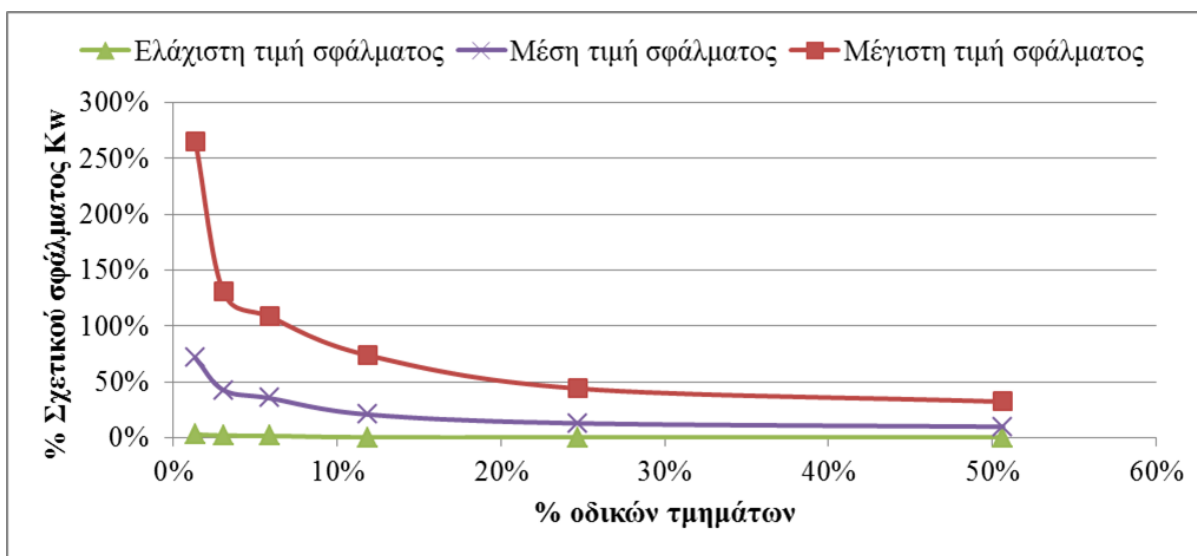
Σχήμα 5: Ανάλυση ΜΘΔ με και χωρίς συνδετήριους συνδέσμους

### 3.1.2 Ανάλυση σε συστάδες

Η αρχική ανάλυση για την εξαγωγή του ΜΘΔ ροής – πυκνότητας έγινε σε όλα τα οδικά τμήματα του δικτύου (1762). Σε αυτή την ενότητα, εξετάστηκαν 10 διαφορετικοί συνδυασμοί 880 (~50%), 440 (~25%), 210 (~12%), 110 (~6%), 60 (~3%) και 20 (~1%) οδικών τμημάτων και αναλύθηκε το ελάχιστο, μέσο και μέγιστο σχετικό σφάλμα για τους σταθμισμένους μέσους όρους ροής και πυκνότητας. Η ανάλυση αυτή έγινε έτσι ώστε να προκύψει ο ελάχιστος αριθμός οδικών τμημάτων, η αξιολόγηση των οποίων δίνει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα σε ότι αφορά το ΜΘΔ. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6 και Σχήμα 7.



Σχήμα 6: Ποσοστό σχετικού σφάλματος ροής οχημάτων ανά συνολικό αριθμό εξεταζόμενων οδικών τμημάτων



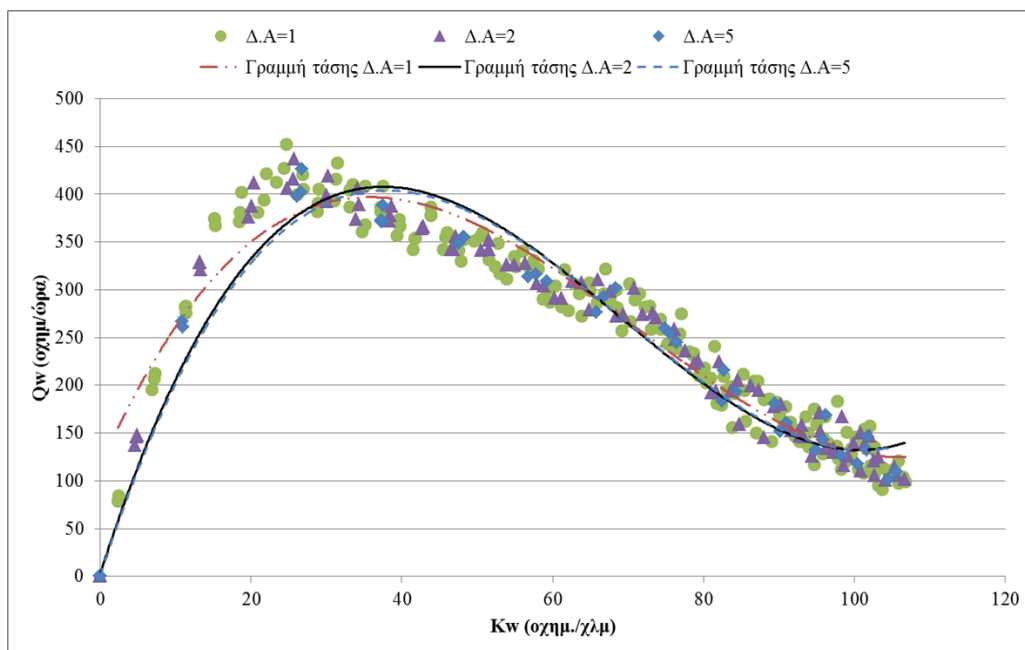
Σχήμα 7: Ποσοστό σχετικού σφάλματος πυκνότητας οχημάτων ανά συνολικό αριθμό εξεταζόμενων οδικών τμημάτων

Όπως φαίνεται, τόσο για το σταθμισμένο μέσο όρο ροής όσο και για τον αντίστοιχο μέσο όρο πυκνότητας των οχημάτων στο δίκτυο, το σχετικό σφάλμα των τιμών σε σχέση με το αρχικές σταθεροποιείται έπειτα από ανάλυση του 25% των συνολικών οδικών τμημάτων, για το οποίο το ΜΘΔ μπορεί να είναι αντιπροσωπευτικό του δικτύου.

### 3.2 Χρονικά Διαστήματα – Διάρκεια ανάλυσης

#### 3.2.1 Χρονικά Διαστήματα

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η διαφοροποίηση του σχήματος και της μορφής του ΜΘΔ όταν τα διαστήματα ανάλυσης (Δ.Α.) μεγαλώνουν και μικραίνουν αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, εκτός της αρχικής ανάλυσης 1 λεπτού (60 διαστήματα ανάλυσης για 1 ώρα προσομοίωσης), χρησιμοποιήθηκαν διαστήματα 2, 5 και 10 λεπτών και τα αντίστοιχα ΜΘΔ ροής – πυκνότητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 8, με την αντίστοιχη καμπύλη τάσης τους.



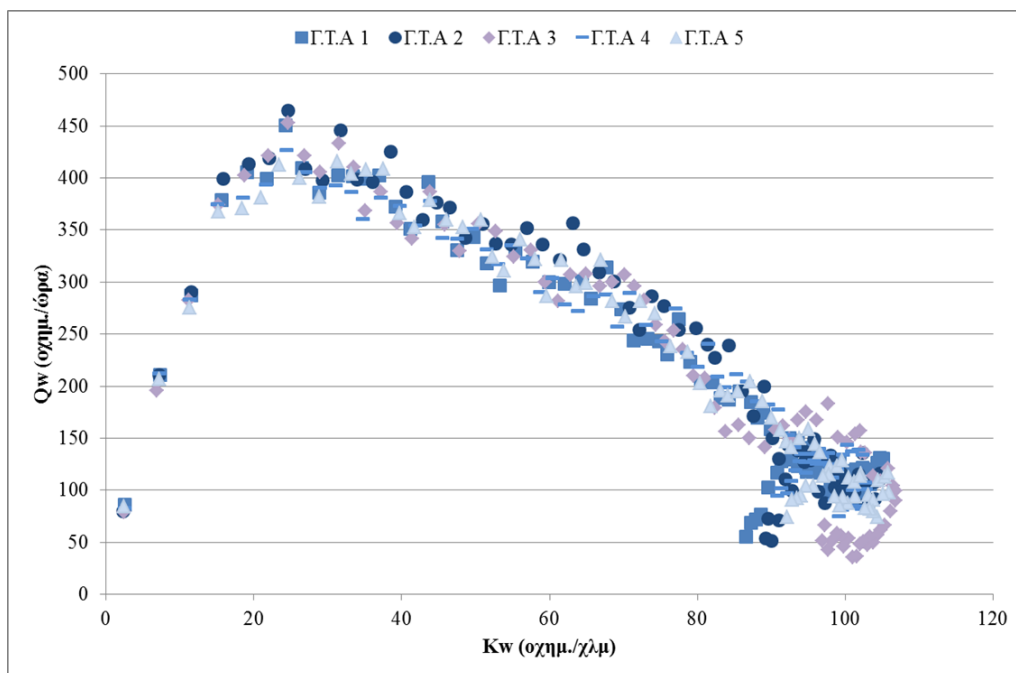
**Σχήμα 8:** Μακροσκοπικό Θεμελιώδες Διάγραμμα ροής - πυκνότητας με διαφορετικά διαστήματα ανάλυσης δεδομένων

Από το Σχήμα 8 φαίνεται ότι η ανάλυση με χρονικό διάστημα 1 λεπτού έχει μικρή διασπορά, η οποία δεν παρουσιάζεται σε αναλύσεις μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης στα διαστήματα 2 και 5 λεπτών αντίστοιχα είναι παρόμοια, γεγονός που αποδεικνύει ότι η ανάλυση με χρονικό διάστημα 2 λεπτών αρκεί για μια ακριβή αποτύπωση του δικτύου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

### 3.2.2 Διάρκεια ανάλυσης

Η χρονική διάρκεια αξιολόγησης του δικτύου είναι από το 1<sup>ο</sup> λεπτό μέχρι και το 60<sup>ο</sup>, όπου και συμπληρώνεται 1 ώρα προσομοίωσης. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μια σειράς αναλύσεων όπου το τελευταίο χρονικό διάστημα αξιολόγησης των οδικών τμημάτων επιμηκύνεται έως και 30 λεπτά αργότερα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο

Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Μακροσκοπικό Θεμελιώδες Διάγραμμα ροής – πυκνότητας. Διάρκεια ανάλυσης 0-4800 δευτερόλεπτα

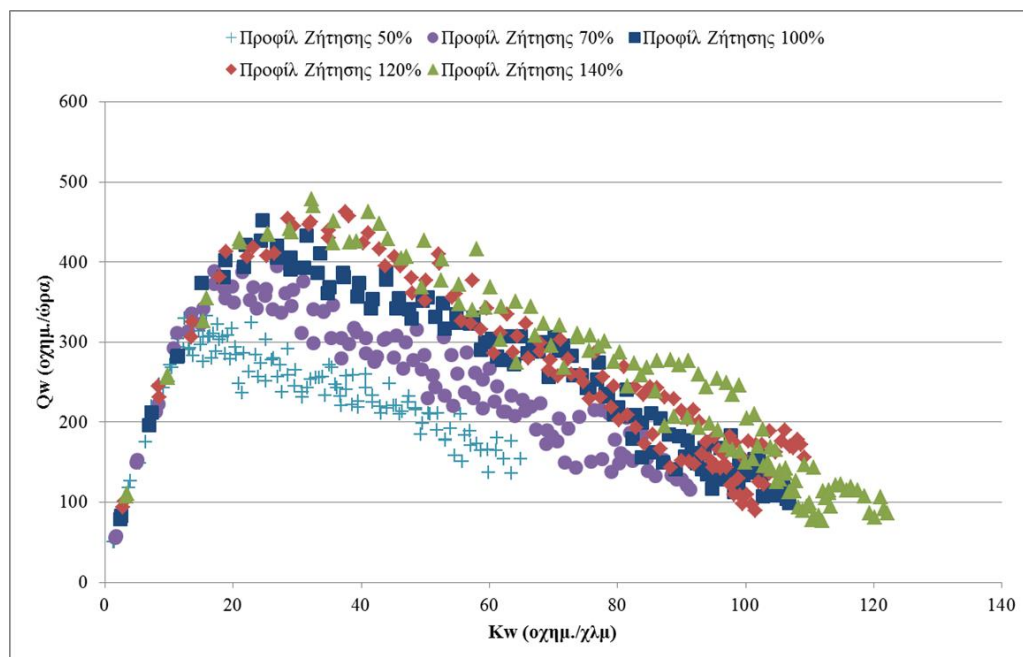
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μόνο σε κατάσταση μεγάλης συμφόρησης του δικτύου (πυκνότητα 90-100 οχημάτων ανά χιλιόμετρο) υπάρχει διαφορά στην επιλογή διάρκειας της περιόδου ανάλυσης. Παρόλα αυτά, σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας στο δίκτυο, όπου η ζήτηση για μετακινήσεις είναι συνεχής (και δεν διακόπτεται όπως στην προσομοίωση της κυκλοφορίας που παρουσιάζεται εδώ μετά τη 1 ώρα), το ΜΘΔ ροής – πυκνότητας δεν παρουσιάζει τη μορφή που φαίνεται στο

Σχήμα 9 σε καταστάσεις μεγάλης συμφόρησης.

### 3.3 Ζήτηση για μετακινήσεις

#### 3.1.1 Μεταβολές ζήτησης

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η ευαισθησία του ΜΘΔ ροής – πυκνότητας για το δίκτυο της Θεσσαλονίκης σε αλλαγές του συνολικού αριθμού της ζήτησης για μετακινήσεις. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, όσο η αναλογία του συνολικού αριθμού της ζήτησης για μετακινήσεις είναι της τάξης του +30% από την αρχική, τότε η μορφή, το σχήμα και οι ανώτατες/κατώτατες τιμές του ΜΘΔ έχουν μικρή διασπορά, σε αντίθεση με την περίπτωση όπου η αναλογία είναι της τάξης του -30%, όπου η μορφή και το σχήμα του ΜΘΔ είναι ίδια αλλά οι ανώτατες/κατώτατες τιμές του διαφοροποιούνται σημαντικά.



**Σχήμα 10:** Μακροσκοπικά Θεμελιώδη Διαγράμματα με διαφορετικά προφίλ ζήτησης για μετακινήσεις

Η διαφορά στην μέγιστη χωρητικότητα του δικτύου οφείλεται στην χωρική κατανομή της συμφόρησης, η οποία δεν είναι ομογενής σε χαμηλότερα επίπεδα ζήτησης.

#### 4. Συζήτηση - Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τη θεωρία που παρουσιάστηκε και αποδείχτηκε σε προηγούμενες εργασίες (Daganzo & Geroliminis, 2008, Geroliminis & Daganzo, 2007), τα ΜΘΔ είναι μια κατά προσέγγιση ιδιότητα της δομής ενός δικτύου που δεν εξαρτάται από τη ζήτηση. Έτσι, όταν εκτιμάται εμπειρικά, μπορεί να προσφέρει στους φορείς πολύτιμες πληροφορίες για την αξιολόγηση μέτρων και πολιτικών σχετιζόμενων με τη διαχείριση της κυκλοφορίας με στόχο τη συνολική βελτίωση της κινητικότητας σε μια περιοχή και την εκμετάλλευση της μέγιστης λειτουργικότητας ενός δικτύου.

Τόσο τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία όσο και αυτά παρόμοιων εργασιών στη βιβλιογραφία είναι ενθαρρυντικά. Δείχνουν μεταξύ άλλων ότι μεγάλα δίκτυα συμπεριφέρονται προβλέψιμα και ανεξάρτητα από τους εκάστοτε πίνακες προέλευσης-προορισμού. Εάν αυτά αποτελέσματα διατηρηθούν και ισχύουν και έπειτα από περαιτέρω ελέγχους, οι ιθύνοντες φορείς θα έχουν αξιόπιστα εργαλεία τόσο για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων των διαφόρων πολιτικών διαχείρισης της κυκλοφορίας, όσο και για τον μελλοντικό σχεδιασμό χωρίς την εγγενή αβεβαιότητα που υπάρχει σήμερα στις προβλέψεις και εκτιμήσεις της κυκλοφορίας. Αυτοί οι περαιτέρω έλεγχοι θα πρέπει να περιλαμβάνουν μετρήσεις πεδίου και αντίστοιχες αναλύσεις, καθώς οι προσομοιώσεις περιλαμβάνουν διάφορες περισσότερο ή λιγότερο ρεαλιστικές υποθέσεις.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα στην παρούσα εργασία, περιοχές της τάξης των 3 τ.χλμ. όπως αυτή του κέντρου της Θεσσαλονίκης, έχουν ένα σαφώς καθορισμένο ΜΘΔ ροής -

πυκνότητας. Αυτό το ΜΘΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τον έλεγχο της κυκλοφορίας και τη βελτίωση της προσβασιμότητας στην κεντρική περιοχή σε πραγματικό, μέσω πολιτικών τιμολόγησης, στρατηγικών ελέγχου των εισόδων στη περιοχή βάσει της συσσώρευσης των οχημάτων, από τις αρμόδιες αρχές ιδιωτικών και δημόσιων μετακινήσεων. Τέτοιες στρατηγικές έχουν χρησιμοποιηθεί/χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα στη Στοκχόλμη, στο Λονδίνο, στη Σιγκαπούρη και στην πόλη του Μεξικό. Η δυνατότητα όμως που δίνεται μέσω των ΜΘΔ να παρακολουθείται η κατάσταση της κυκλοφορίας συνεχώς, μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη προσαρμοσμένων εξατομικευμένων πολιτικών διαχείρισης της κυκλοφορίας για κάθε περιοχή (π.χ. η ενσωμάτωση του παραπάνω εργαλείου στο σύστημα διαχείρισης αστικής κινητικότητας της Θεσσαλονίκης). Επίσης, το ΜΘΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό και την αποτίμηση επιπτώσεων νέων μέτρων που προτείνονται για την πόλη (π.χ. πεζοδρόμηση, νέα μέσα ΔΣ, κ.α.).

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων για το δίκτυο της Θεσσαλονίκης δείχνει ότι η καμπύλη συσχέτισης των δύο μεγεθών δεν επηρεάζεται τόσο από τη διάρκεια ανάλυσης των αποτελεσμάτων όσο και από τη συχνότητα των χρονικών διαστημάτων ανάλυσης. Φαίνεται επίσης να είναι ευαίσθητη μόνο στη μείωση του συνολικού αριθμού της ζήτησης για μετακινήσεις, διατηρώντας όμως τη μορφή και το σχήμα της (επηρεάζονται μόνο οι τιμές των σταθμισμένων μέσων όρων ροής και πυκνότητας). Αναφορικά με τον αριθμό των οδικών τμημάτων, η ανάλυση των οποίων μπορεί να δώσει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα αναφορικά με το ΜΘΔ ροής – πυκνότητας, φαίνεται ότι χρειάζεται ανάλυση τουλάχιστον 25% του συνολικού αριθμού των οδικών τμημάτων.

Τα επόμενα βήματα σε ότι αφορά τα ΜΘΔ για το δίκτυο της Θεσσαλονίκης πρέπει να είναι προς την κατεύθυνση της ανάλυσης μετρήσεων πεδίου από διάφορες πηγές συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων (επαγωγικοί βρόγχοι, κάμερες, συσκευές BlueTooth), έτσι ώστε να διαπιστωθεί η ύπαρξη ΜΘΔ μέσω εμπειρικών ευρημάτων.

## 5. Αναφορές – Βιβλιογραφία

Buisson, Ch., & Ladier, C. (2009). *Exploring the impact of the homogeneity of Traffic Measurement on the existence of macroscopic fundamental diagrams*. In Proceedings of the 88<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board Transportation Research Board, U.S.A

Courbon, C. & Leclercq, L. (2011). *Cross-comparison of Macroscopic Fundamental Diagram Estimation Methods*. Procedia Social and Behavioral Sciences 20, 417-426.

Cassidy M. J., Jang K. / Daganzo C., (2011). *Macroscopic Fundamental Diagrams for Freeway Networks*. Transportation Research Record 2660, Transportation Research Board, 8-15.

Daganzo, C.F. (2005a). *Improving city mobility through gridlock control: an approach and some ideas*, Working Paper UCB-ITS-VWP-2005-1, U.C. Berkeley Center of Excellence on Future Urban Transport, University of California, Berkeley, CA.

Daganzo, C.F. (2005b). *A variational formulation of kinematic waves: Basic theory and complex boundary conditions*. Transportation Research Part B 39(2), 187-196.

Daganzo, C.F. (2007). *Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches*. Transportation Research part B 41, 49-62.

Daganzo, C.F., & Geroliminis, N. (2008). *An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic*. Transportation Research Part B 42(9), 771-781.

- Gentile G., & Noekel K. (2009). *Linear User Cost Equilibrium: the new algorithm for traffic assignment in VISUM*. Proceedings of European Transport Conference 2009, Leeuwenhorst Conference Centre, Netherlands.
- Geroliminis, N. & Daganzo, C.F. (2007). *Macroscopic modeling of traffic in cities*. 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, paper # 07-0413, Washington DC.
- Geroliminis, N. & Sun J., (2011a). *Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic*. Transportation Research Part B 45, 605-617.
- Geroliminis, N. & Sun J., (2011b). *Hysteresis phenomena of a Macroscopic Fundamental Diagram in freeway networks*. Transportation Research Part A 45, 966-979.
- Godfrey, J.W. (1969). The mechanism of a road network. Traffic Engineering & Control 11 (7).
- Greenberg, H. (1959). *An analysis of traffic flow*. Operation Research 7 (1), 79–85.
- Greenshields, B.D. (1934). *A study of traffic capacity*. Proceedings of Highway Research Board 14, 448–477.
- Herman, R. & Ardekani, S.A. (1984). *Characterizing traffic conditions in urban areas*. Transportation Science 18 (2), 101–140.
- Herman, R. & Prigogine, I. (1979). *A two-fluid approach to town traffic*. Science 204, 148–151.
- Ji, Y., & Geroliminis N., (2011). *Spatial and Temporal Analysis of Congestion in Urban Transportation Networks*. In Proceedings of the 90<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board Transportation Research Board, U.S.A
- Knoop, V. L., Hoogendoorn, S. P. & Van Lint, J. W. C., (2012). *The impact of Traffic Dynamics on the Macroscopic Fundamental Diagram*. In Proceedings of the 92<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board Transportation Research Board, U.S.A
- Knoop, V. L. & Hoogendoorn, (2012). *Empirics of a Generalized Macroscopic Fundamental Diagram*. In Proceedings of the 92<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board Transportation Research Board, U.S.A
- Laval, J. A. (2010). *The Effect Of Signal Timing And Network Irregularities In The Macroscopic Fundamental Diagram*. Presented at the Traffic Flow Theory Summer Meeting, France.
- Mahmassani, H., Williams, J. C. & Herman, R. (1987). *Performance of urban traffic networks*. In: Gartner, N. H., Wilson, N. H. M. (Eds.), 10th Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Mazloumian, A., Geroliminis N. and Helbing D. (2010). *The Spatial Variability of Vehicle Densities as Determinant of Urban Network Capacity*. Philosophical Transactions of Royal Society A.
- Thomson, J.M. (1967). *Speeds and flows of traffic in Central London*. Traffic Engineering and Control 8 (12), 721–725.
- Traffic Control Systems Handbook (TCSH) (2008). Control and management concepts for freeways. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Williams, J. C., Mahmassani, H. S. & Herman R. (1987). *Urban Traffic Network Flow Models*. Transportation Research Record 1112, Transportation Research Board.
- Zahavi, Y. (1972). *Traffic performance evaluation of road networks by the  $\alpha$ -relationship*. Parts 1 and 2 - Traffic Engineering & Control 14 (5 and 6), 228–231 and 292–293.