

Διερεύνηση Κυκλοφοριακών Μεγεθών σε Αυτοκινητοδρόμους σε Συνθήκες Πυκνής Ροής

A. Κονδύλη¹, I. Σπυροπούλου², K. Αντωνίου², B. Ψαριανός²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των κυκλοφοριακών μεγεθών σε αυτοκινητόδρομο, σε συνθήκες πυκνής ροής, πριν την κατάρρευση της κυκλοφορίας. Ταυτόχρονα, πραγματοποιείται μία προσέγγιση προτυποποίησης των βασικών σχέσεων των τριών κυκλοφοριακών μεγεθών. Στα πλαίσια της εργασίας προσδιορίστηκαν ανεξάρτητα τα κυκλοφοριακά μεγέθη του κυκλοφοριακού φόρτου, της μέσης ταχύτητας και της πυκνότητας ανά λωρίδα κυκλοφορίας, με τη χρήση μη μετρητικής ψηφιακής βιντεοκάμερας. Από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτει ότι σε συνθήκες πυκνής αλλά σταθερής ροής, παρατηρείται μια τάση επαναφοράς σε μικρότερους φόρτους και πυκνότητες. Παράλληλα, η φόρτιση των λωρίδων κυκλοφορίας γίνεται ανισομερώς, με την αριστερή λωρίδα κυκλοφορίας να φτάνει πρώτη σε κορεσμό, γεγονός που υποδηλώνει την αναγκαιότητα διερεύνησης της λειτουργίας και της κυκλοφοριακής ικανότητας των αυτοκινητοδρόμων σε επίπεδο λωρίδας κυκλοφορίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αυτοκινητόδρομοι αποτελούν σημαντικό τμήμα του οδικού δικτύου, ενώ ταυτόχρονα η χρήση τους για μετακινήσεις αστικού χαρακτήρα ολοένα και αυξάνεται με αποτέλεσμα την παρουσίαση φαινομένων κορεσμού σε καθημερινή βάση. Κατά συνέπεια η διερεύνηση του κυκλοφοριακού χαρακτήρα των αυτοκινητοδρόμων αποτελεί σημαντικό βήμα για την κατανόηση της δυναμικής της κυκλοφορίας σε αυτούς και κατ' επέκταση τη διαχείριση της κυκλοφορίας με στόχο τη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών με έμφαση στο ελληνικό οδικό περιβάλλον, όπου υπάρχει σοβαρή έλλειψη τέτοιων μεγεθών.

Οι κυκλοφοριακές συνθήκες σε αυτοκινητόδρομο καθώς και η περιγραφή τους μέσα από μοντέλα έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας διεθνώς. Τα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας, όπως αυτά προκύπτουν με βάση βασικά κυκλοφοριακά μεγέθη διαφέρουν σε σχέση με τη λωρίδα κίνησης (Allen et al., 1985). Πιο συγκεκριμένα, η αριστερή λωρίδα παρουσιάζει εξυπηρετεί υψηλότερους κυκλοφοριακούς φόρτους για δεδομένες τιμές της πυκνότητας (Hall and Gunter, 1986; Hurdle et al., 1997). Αυτό δύναται να είναι αποτέλεσμα διαφορετικής οδικής συμπεριφοράς στη συγκεκριμένη λωρίδα, και πιο συγκεκριμένα της επιλογής μικρών χρονικών διαχωρισμών από τους οδηγούς που κινούνται στην αριστερή λωρίδα (Smulders, 1990). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ασταθείς συνθήκες ροής σε υψηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους και έχει ως αποτέλεσμα την κατάρρευση της κυκλοφορίας στην αριστερή λωρίδα πριν από τις υπόλοιπες λωρίδες του αυτοκινητόδρομου (Ferrari et

¹ ANKA Σύμβουλοι Μηχανικοί, Ερυθραίας 9, 11363, Αθήνα

² Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Ζωγράφου

al., 1982). Όσον αφορά στο μέγεθος της ταχύτητας, η ταχύτητα στην αριστερή λωρίδα είναι μεγαλύτερη από αυτές στις υπόλοιπες λωρίδες κυκλοφορίας παρόλο που τα οχήματα στη συγκεκριμένη λωρίδα κινούνται με χαμηλούς χρονικούς διαχωρισμούς (Okura and Somasundaraswaran, 1996). Ταυτόχρονα, η ταχύτητα κίνησης στη δεξιά λωρίδα είναι χαμηλότερη και μεταβάλλεται με μεγαλύτερο ρυθμό με τη μεταβολή του κυκλοφοριακού φόρτου (Gunter and Hall, 1986). Η μέση ταχύτητα κίνησης στους αυτοκινητοδρόμους λίγο πριν την κατάρρευση της κυκλοφορίας κυμαίνεται μεταξύ 70-90 χλμ/ώρα (Lorenz and Elefteriadou, 2001; Brilon et al., 2007). Ταυτόχρονα, οι Hurdle και Datta (1983) θεωρούν ότι η τιμή των 80χλμ/ώρα αποτελεί το όριο για κίνηση σε ουρά «υψηλών ταχυτήτων» που προσεγγίζει συνθήκες μέγιστης χωρητικότητας.

Παρόλη τη διαφορετική συμπεριφορά των οδηγών σε σχέση με τη λωρίδα κίνησης, ο προσδιορισμός προτύπων για την εκτίμηση των κυκλοφοριακών μεγεθών και των σχέσεών τους δύναται να πραγματοποιηθεί και σε επίπεδο διατομής (μέσης λωρίδας) (Hurdle et al., 1997). Μεγάλος όμως αριθμός ερευνών αφορά στο σχεδιασμό προτύπων που αφορούν στις σχέσεις των κυκλοφοριακών μεγεθών σε αυτοκινητόδρομο για την εκτίμηση των κυκλοφοριακών συνθηκών (Michalopoulos et al., 1984; Papageorgiou et al., 1990; Cassidy, 1998; Tebaldi et al., 2002; Schadschneider et al, 2004; Schadschneider, 2006; Bassana and Cederb, 2008; Guan and He, 2008). Οι απόψεις για το κατά πόσο τα προτεινόμενα πρότυπα δύναται να αναπαραστήσουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις κυκλοφοριακές συνθήκες σε αυτοκινητόδρομο δίδονται καθώς οι Smilowitz και Daganzo (2002) θεωρούν ότι η προτυποποίηση του κυκλοφοριακού φόρτου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό εξαιτίας των ασταθών κυκλοφοριακών συνθηκών και ότι είναι προτιμότερη η προτυποποίηση του αθροιστικού φόρτου.

Στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί ο προσδιορισμός των κυκλοφοριακών συνθηκών σε αυτοκινητόδρομο όπως αυτές εκφράζονται μέσα από τα μεγέθη του κυκλοφοριακού φόρτου, της μέσης ταχύτητας και της πυκνότητας σε συνθήκες πυκνής ροής. Ταυτόχρονα, πραγματοποιείται και μία προσέγγιση προτυποποίησης των βασικών σχέσεων των τριών βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών. Αρχικά περιγράφεται η διαδικασία των μετρήσεων ώστε να εξαχθούν τα κατάλληλα κυκλοφοριακά μεγέθη και στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση των κυκλοφοριακών συνθηκών στην εξεταζόμενη διατομή. Τέλος, προσδιορίζονται οι σχέσεις των τριών βασικών μεγεθών με βάση τα συλλεχθέντα στοιχεία και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες σχέσεις που προκύπτουν από τη διεθνή βιβλιογραφία.

2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στον ανεξάρτητο προσδιορισμό των κυκλοφοριακών μεγεθών του κυκλοφοριακού φόρτου, της μέσης ταχύτητας και της πυκνότητας ανά λωρίδα κυκλοφορίας, με τη χρήση μη μετρητικής ψηφιακής βιντεοκάμερας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διατομή της Εθνικής Οδού Αθηνών – Λαμίας (43^ο χιλιόμετρο – θέση «Σ.Ε.Α. Σείριος») στο ρεύμα κατεύθυνσης προς Αθήνα. Στην εξεταζόμενη διατομή η οδός καταλήγει οριζοντιογραφικά σε ευθυγραμμία, με μικρή κατά μήκος κλίση, έχει τρεις λωρίδες ανά κατεύθυνση, με λωρίδα έκτακτης ανάγκης και διαχωριστική νησίδα τύπου New Jersey (κατηγορία διατομής Α6νσ). Η ψηφιακή βιντεοκάμερα ήταν τοποθετημένη στον πρόβολο του Σ.Ε.Α. Σείριος, σε θέση ώστε να είναι δυνατή η μετωπική λήψη του ρεύματος

κυκλοφορίας, καλύπτοντας παράλληλα τις απαιτήσεις τόσο του εύρους λήψης όσο και της επιθυμητής ευκρίνειας της εικόνας.

Η συλλογή στοιχείων πραγματοποιήθηκε ημέρα αργίας, την Δευτέρα 28 Οκτωβρίου, όπου κατά τις απογευματινές ώρες αναμένεται να παρουσιαστούν περίοδοι αιχμής με πυκνή κυκλοφορία στο εξεταζόμενο ρεύμα (Κονδύλη, 2003). Η συνολική διάρκεια της βιντεοσκόπησης ήταν οκτώ ώρες, και ξεκίνησε από νωρίς το μεσημέρι (13:45) ενώ ολοκληρώθηκε αργά το βράδυ (22:30), έτσι ώστε να συμπεριληφθούν στα δεδομένα περίοδοι αιχμής λόγω επιστροφής και μεταβατικές περίοδοι πριν και μετά τις περιόδους αιχμής.

Προκειμένου να εξαχθούν μετρητικές πληροφορίες από το σύστημα των μη-βαθμονομημένων εικόνων της βιντεοσκόπησης, πραγματοποιήθηκαν τοπογραφικές μετρήσεις φωτοσταθερών σημείων (πάνω στο κατάστρωμα της οδού) με τη μέθοδο της εμπροσθοτομίας. Με τη βοήθεια των τοπογραφικών μετρήσεων επιβεβαιώθηκε ότι η οδός μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια επίπεδη επιφάνεια (με σφάλμα $\pm 3\text{cm}$), συνεπώς ήταν δυνατή η εφαρμογή της απλής μονοεικονικής μεθόδου της φωτογραμμετρικής αναγωγής.

2.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

Η φωτογραμμετρική αναγωγή (ή αλλιώς προβολικός μετασχηματισμός) χρησιμοποιείται κυρίως στην φωτογραμμετρική απόδοση του χώρου από μετρήσεις σε εικόνες. Μέσω του προβολικού μετασχηματισμού συνδέονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες σημείων που βρίσκονται επί επιπέδου XY στον χώρο, με τις αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες τους x, y με βάση τις δύο κλασματικές εξισώσεις:

$$x = \frac{a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}}{a_{31}X + a_{32}Y + 1} \quad (1)$$

$$y = \frac{a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}}{a_{31}X + a_{32}Y + 1} \quad (2)$$

Όπου $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}$ οι προβολικοί συντελεστές.

Ο προβολικός μετασχηματισμός πραγματοποιήθηκε στην αρχή και τέλος κάθε ωριαίου δείγματος βιντεοσκόπησης για τον έλεγχο της σταθερότητας της γεωμετρίας λήψης για να υπολογιστούν οι ζητούμενοι συντελεστές του μετασχηματισμού (Σχέσεις 1 και 2) καθώς και τα εναπομένοντα σφάλματα των εικονοσυντεταγμένων. Επιπλέον, υπολογίστηκε και το τυπικό σφάλμα της μιας μέτρησης σ_0 , καθώς και τα συνολικά σφάλματα κατά x και y των γεωδαιτικών συντεταγμένων και των εικονοσυντεταγμένων. Μέσω της διαδικασίας αυτής, ήταν δυνατός ο προσδιορισμός των θέσεων των οχημάτων πάνω στο κατάστρωμα της οδού καθώς και των αποστάσεων που διανύουν μετρώντας τις αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες τους (στο επίπεδο του καταστρώματος), και κατ' επέκταση και ο υπολογισμός της ταχύτητας του κάθε οχήματος. Το τυπικό σφάλμα της μιας μέτρησης ανέρχεται στα 20cm, ενώ η ταχύτητα μπορεί να προσδιοριστεί με σφάλμα μικρότερο των 2 χλμ/ώρα.

Κατά τη διάρκεια των βραδινών λήψεων, δεν φαινόταν με σαφήνεια το σημείο επαφής των οχημάτων με το κατάστρωμα και επομένως υπήρχε δυσχέρεια στον ακριβή προσδιορισμό της θέσης τους (και συνεπώς της ταχύτητας τους). Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, προσδιορίστηκαν οι εικονοσυντεταγμένες των πίσω φώτων των οχημάτων, ενώ παράλληλα έγινε

διόρθωση της κλίμακας, λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο που περιγράφουν τα φώτα των οχημάτων και το επίπεδο του καταστρώματος.

2.3. ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

Η περιγραφή του υπό μελέτη κυκλοφοριακού ρεύματος επετεύχθη με τον υπολογισμό των βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών, δηλαδή του φόρτου, της πυκνότητας και της ταχύτητας.

2.3.1. Κυκλοφοριακός Φόρτος

Η μέτρηση του κυκλοφοριακού φόρτου έγινε ανά λεπτό και ανά λωρίδα κυκλοφορίας και αφορά όλο το δείγμα της βιντεοσκόπησης. Κατά τη διάρκεια μέτρησης του φόρτου καταγράφηκαν και τα βαρέα οχήματα, τα οποία μετατράπηκαν σε μοναδιαία επιβατικά οχήματα (ΜΕΑ).

Η μέτρηση των υπολοίπων κυκλοφοριακών μεγεθών έγινε δειγματοληπτικά, λαμβάνοντας από κάθε ώρα βιντεοσκόπησης ένα δείγμα της τάξης των 15 με 20 λεπτών, ανάλογα με το μέγεθος του φόρτου της εκάστοτε ώρας. Από τα 466 λεπτά λήψης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 133 λεπτά, δηλαδή το 30%.

2.3.2. Πυκνότητα

Πραγματοποιήθηκαν, ως επί το πλείστον, μετρήσεις της πυκνότητας ενώ συμπληρωματικά στοιχεία ελήφθησαν από μετρήσεις της κατάληψης. Η μονάδα μήκους που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της πυκνότητας ήταν τα 330 μέτρα, μιας και αυτό ήταν το μέγιστο επιτρεπτό εύρος λήψης στο οποίο τα οχήματα διακρίνονται με ευκολία. Οι μετρήσεις της πυκνότητας έγιναν στην αρχή και στο τέλος του κάθε λεπτού του δείγματος, λαμβάνοντας ως τελική τιμή τον μέσο όρο των μετρήσεων. Το μέγεθος της πυκνότητας μετρήθηκε για κάθε λωρίδα, με καταγραφή και της σύνθεσης του κυκλοφοριακού φόρτου. Οι τελικές μονάδες του μεγέθους, κατόπιν αναγωγής του μήκους αναφοράς στο χιλιόμετρο, είναι ΜΕΑ ανά χιλιόμετρο ανά λωρίδα.

Σε περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις πυκνότητας στην αρχή και στο τέλος του κάθε λεπτού παρουσίαζαν σημαντική απόκλιση, έγιναν συμπληρωματικές μετρήσεις της κατάληψης, μέγεθος το οποίο μετριέται συνήθως στο πεδίο με την εφαρμογή διατάξεων επαγωγικών βρόγχων. Στην προκειμένη περίπτωση υλοποιήθηκε το μήκος ανίχνευσης των βρόγχων (5 μέτρα) στις εξαγόμενες εικόνες, μέσω της φωτογραμμετρικής αναγωγής. Με τη θεώρηση ενός μέσου μήκους οχημάτων ίσου με 4 μέτρα, μετρήθηκε ο χρόνος εισόδου και εξόδου του οπίσθιου τμήματος των οχημάτων από μια περιοχή συνολικού μήκους 9 μέτρων.

2.3.3. Μέση (Χωρική) Ταχύτητα

Τα οχήματα που κατεγράφησαν μόνο κατά τη χρονική διάρκεια του δείγματος ήταν περίπου 10.000. Λόγω χρονικών περιορισμών αποφασίστηκε να μετρηθούν δειγματοληπτικά οι ταχύτητες των οχημάτων, και για τον υπολογισμό του μεγέθους του δείγματος εφαρμόστηκε η κατανομή t - Student. Συνολικά εκτιμήθηκε η ταχύτητα για περισσότερα από 1.600 οχήματα.

Η μέτρηση της ταχύτητας έγκειται στον προσδιορισμό της εκάστοτε θέσης των οχημάτων και συνεπώς της απόστασης που αυτά διανύουν. Έγινε προσπάθεια ώστε η συνολική διανυόμενη απόσταση να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη (περίπου 100 μέτρα) και να παρέχει ταυτόχρονα εικόνα

ικανοποιητικής ευκρίνειας. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του κάθε οχήματος μετρήθηκε η ταχύτητα σε 2 ή 3 διαδοχικές θέσεις του οχήματος. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του λεπτού μέτρησης, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος της μέσης χωρικής ταχύτητας:

$$\bar{u}_s = \frac{D}{\frac{1}{N} \cdot \sum t_i} \quad (3)$$

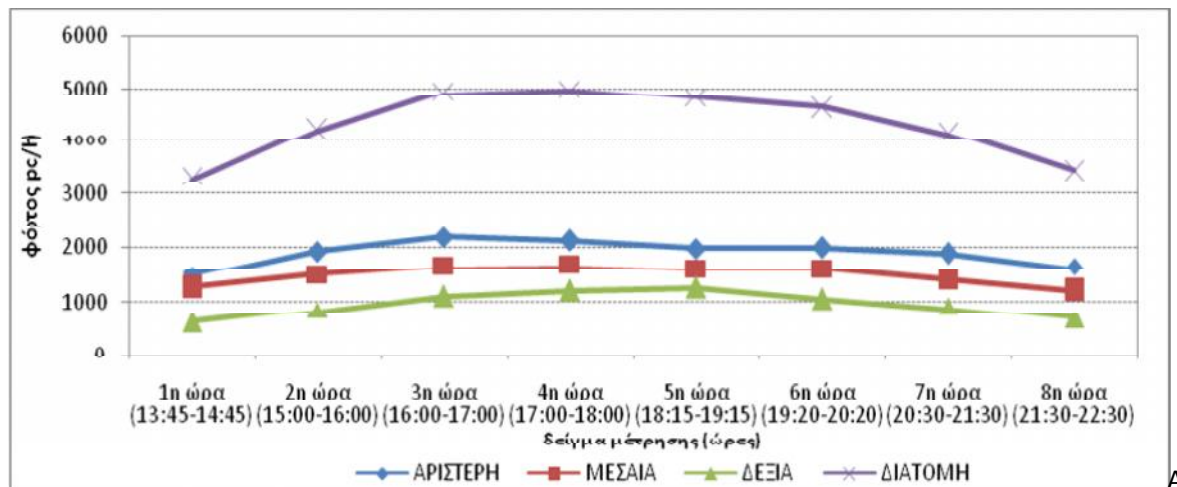
όπου D το μέσο μήκος μέτρησης, N ο αριθμός των οχημάτων που μετρήθηκαν στο λεπτό, και t_i οι χρόνοι που χρειάστηκαν τα διάφορα οχήματα για να διανύσουν το εν λόγω τμήμα.

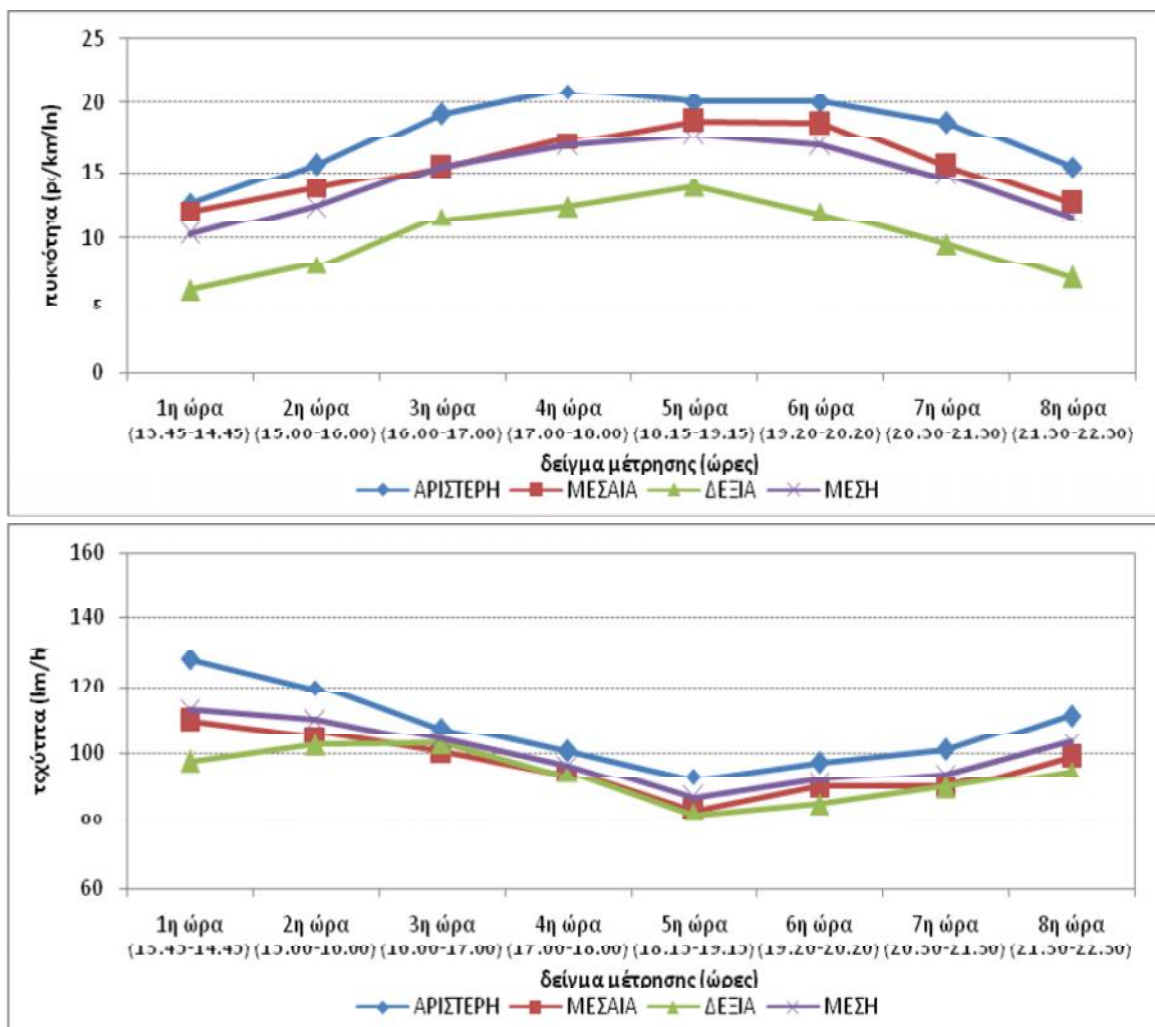
3. ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα κυκλοφοριακά διαγράμματα των βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών φόρτου, πυκνότητας και ταχύτητας, παραθέτοντας αρχικά μία σύντομη περιγραφή των επικρατούσων κυκλοφοριακών συνθηκών στην εξεταζόμενη διατομή.

3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Οι επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες στην εξεταζόμενη διατομή αποτυπώνονται μέσω των κυκλοφοριακών μεγεθών: κυκλοφοριακός φόρτος, πυκνότητα και μέση ταχύτητα (Σχήμα 1).



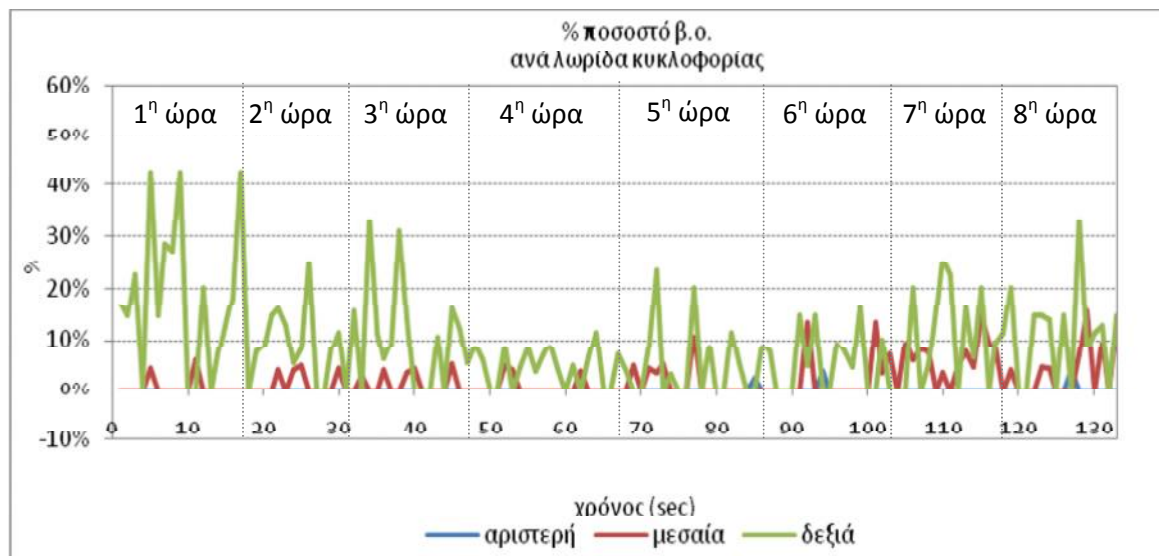


Σχήμα 1 Κυκλοφοριακά μεγέθη ανά ώρα δειγματος (Α) κυκλοφοριακός φόρτος, (Β) πυκνότητα, (Γ) χωρική ταχύτητα

Ο κυκλοφοριακός φόρτος ήταν ιδιαίτερα υψηλός καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων ενώ υπάρχουν διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη λωρίδα κίνησης, με τις μέγιστες τιμές του να είναι περίπου 2.100ΜΕΑ/ώρα, 1.650ΜΕΑ/ώρα και 1.250ΜΕΑ/ώρα στην αριστερή, μεσαία και δεξιά λωρίδα αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στη χρονική εξέλιξη των εξεταζόμενων μεγεθών παρουσιάζεται αύξηση του φόρτου και της πυκνότητας από την έναρξη των μετρήσεων έως το διάστημα μεταξύ 3^{ης} και 6^{ης} ώρας, κατά τη διάρκεια του οποίου οι τιμές των μεγεθών είναι ιδιαίτερα αυξημένες, ενώ και στη συνέχεια παρουσιάζεται σταδιακή μείωσή τους. Με βάση τις τιμές των κυκλοφοριακών μεγεθών διαφαίνεται μία περίοδος αιχμής που διαρκεί περίπου τρεις ώρες (3^η, 4^η και 5^η ώρα, από 16:00-19:00) κατά την οποία παρουσιάζονται σταθερά υψηλές τιμές κυκλοφοριακού φόρτου και πυκνότητας και χαμηλές μέσης ταχύτητας και στις τρεις λωρίδες της διατομής. Οι τιμές των τριών μεγεθών για την αριστερή λωρίδα στην περίοδο αιχμής υποδεικνύουν ότι η αριστερή λωρίδα λειτουργεί κοντά στη μέγιστη χωρητικότητά της, με χαμηλά επίπεδα εξυπηρέτησης. Επισημαίνεται ότι στη μεσαία και δεξιά λωρίδα η πυκνότητα γίνεται μέγιστη σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα από αυτό που ισχύει για την αριστερή λωρίδα, το οποίο υποδεικνύει ότι η κυκλοφορία στη μεσαία και δεξιά λωρίδα αυξάνει σημαντικά αφού πρώτα η αριστερή παρουσιάζει κυκλοφοριακούς

φόρτους σε επίπεδα μέγιστης χωρητικότητας. Κατά συνέπεια, η πρωταρχική επιλογή της πλειοψηφίας των οδηγών είναι η κίνησή τους στην αριστερή λωρίδα, με εναλλακτικές λωρίδες κίνησης τη μεσαία και τη δεξιά. Οι τιμές της μέσης ταχύτητας στη μεσαία και δεξιά λωρίδα κατά την περίοδο αιχμής τείνουν να εξισωθούν το οποίο υποδεικνύει ότι ποσοστό των οδηγών που επέλεξαν τη δεξιά λωρίδα κινούνταν με ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η γενικότερη μείωση της ταχύτητας στις λωρίδες κίνησης κατά την περίοδο αιχμής είναι αποτέλεσμα τόσο της αύξησης του κυκλοφοριακού φόρτου όσο και της αύξησης των ελιγμών των οδηγών μεταξύ λωρίδων προς αναζήτηση της λωρίδας κίνησης με τις καλύτερες συνθήκες κυκλοφορίας.

Τέλος εξετάστηκε και η κατανομή των βαρέων οχημάτων ανά λωρίδα στη διατομή καθώς αναμένεται να επηρεάζουν τόσο την επιλογή λωρίδας κίνησης όσο και τα κυκλοφοριακά μεγέθη στη λωρίδα. Επισημαίνεται ότι η επιλογή λωρίδας – σε σχέση με το κριτήριο που αφορά στην κίνηση βαρέων οχημάτων – αναμένεται να επηρεάζεται τόσο από την γενικότερη αντίληψη των οδηγών για την δεξιά λωρίδα όσο και από τις επικρατούσες συνθήκες οι οποίες δύναται να διαφέρουν και μεταβάλλονται συνεχώς. Κατά συνέπεια κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση της κατανομής των βαρέων οχημάτων ανά λωρίδα σε μικρότερα διαστήματα από αυτά της ώρας ώστε να αποτυπώνεται η ακριβής διακύμανσή της (Σχήμα 2).

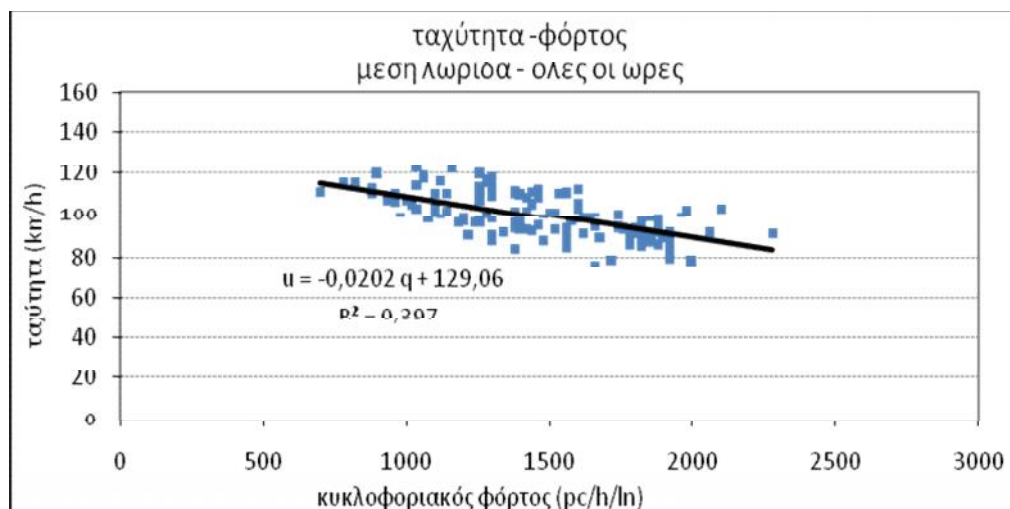


Σχήμα 2 Ποσοστά βαρέων οχημάτων ανά λωρίδα κυκλοφορίας

Τα ποσοστά των βαρέων οχημάτων παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή και πιο συγκεκριμένα μείωση μετά την 4^η ώρα κάτι που δικαιολογεί τη «σχετική» αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου και των ταχυτήτων που παρουσιάζονται στη δεξιά λωρίδα σε σχέση με τις υπόλοιπες λωρίδες κίνησης.

3.2. ΣΧΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ – ΦΟΡΤΟΥ

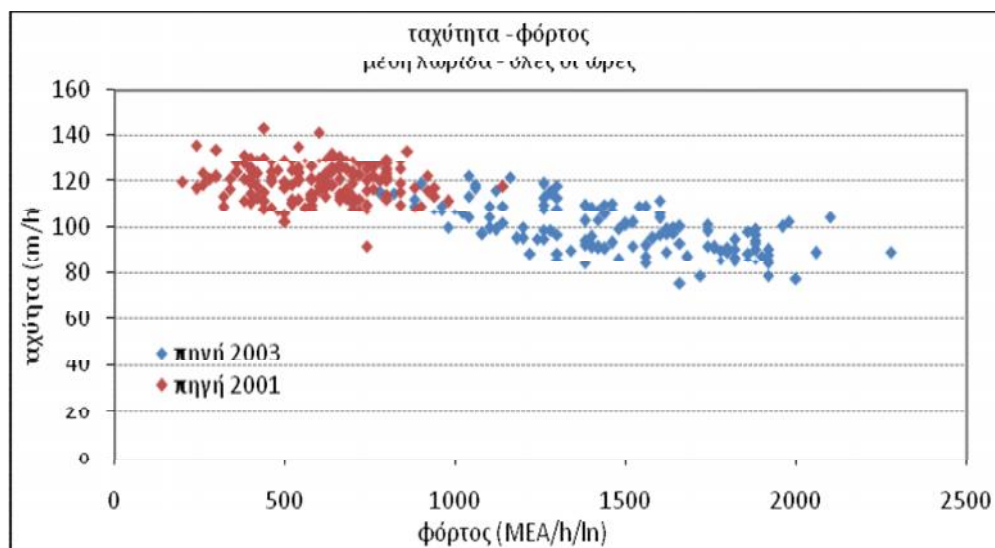
Η σχέση ταχύτητας – φόρτου διερευνήθηκε σε επίπεδο μέσης διατομής, αλλά και για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας ξεχωριστά. Το Σχήμα 3 παρουσιάζει το συνολικό διάγραμμα για τη μέση διατομή λαμβάνοντας υπόψη τις οκτώ ώρες μετρήσεων.



Σχήμα 3 Διάγραμμα φόρτου – ταχύτητας

Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της «μέσης» λωρίδας χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των φόρτων και των ταχυτήτων των τριών λωρίδων ανά λεπτό μέτρησης. Η μορφή της γραμμής τάσης, η οποία υπολογίστηκε με παλινδρόμηση, καθώς και οι αυξημένοι κυκλοφοριακοί φόρτοι υποδηλώνουν ότι προσεγγίζουμε σε περιοχή συμφορημένης ροής. Σε όλο το δείγμα παρατηρείται μείωση της ταχύτητας καθώς αυξάνονται οι φόρτοι, η οποία όμως γίνεται ιδιαίτερα εμφανής όταν ο φόρτος ξεπερνά τα 1.000 ΜΕΑ/ώρα. Η τιμή της μέσης ταχύτητας φτάνει τα 80 χλμ/ώρα, δηλαδή υπάρχει μια πτώση της τάξης των 40 χλμ/ώρα από το όριο ταχύτητας στον αυτοκινητόδρομο.

Στον συγκεκριμένο δρόμο έχει προηγηθεί παρόμοια μελέτη κυκλοφοριακού χαρακτήρα (Χωριανόπουλος, 2001), τα στοιχεία της οποίας, αν και αφορούν τη σταθερή περιοχή κυκλοφορίας, κρίνεται σκόπιμο να προβληθούν μαζί με τα δεδομένα της παρούσας εργασίας, προκειμένου να διαμορφωθεί μια ολοκληρωμένη αντίληψη για την κυκλοφοριακή λειτουργία της οδού.



Σχήμα 4 Διάγραμμα φόρτου – ταχύτητας χρησιμοποιώντας δύο πηγές δεδομένων

Στο Σχήμα 4 φαίνεται να υπάρχουν δυο ομάδες σημείων. Τα δεδομένα της πρώτης ομάδας που στηρίζεται στην προγενέστερη μελέτη, περιγράφουν μια σταθερή σχέση φόρτου-ταχύτητας, στην οποία η ταχύτητα είναι σχεδόν αμετάβλητη και ανεξάρτητη του μέσου φόρτου. Το δεύτερο σύνολο σημείων αφορά τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας. Από τη σύγκριση των Σχημάτων 3 και 4 προκύπτει ότι μόλις ένα μικρό μέρος των δεδομένων αντιστοιχεί στη περιοχή της ανεμπόδιστης ροής. Αντίθετα, για φόρτους μεγαλύτερους των 1.000 ΜΕΑ/ώρα ανά λωρίδα, η ταχύτητα μειώνεται ανάλογα με τον φόρτο, αλλά δεν παρατηρείται το φαινόμενο της κατάρρευσης της κυκλοφορίας. Με βάση την παραπάνω ανάλυση προκύπτει το συμπέρασμα ότι βρισκόμαστε ακόμη στη σταθερή περιοχή, και πριν από την κατάρρευση των ταχυτήτων. Στις συγκεκριμένες κυκλοφοριακές συνθήκες, οι οδηγοί δεν επιλέγουν ελεύθερα την ταχύτητα κίνησής τους, αλλά καθορίζεται και από τη δυναμική της κίνησης γειτονικών οχημάτων.

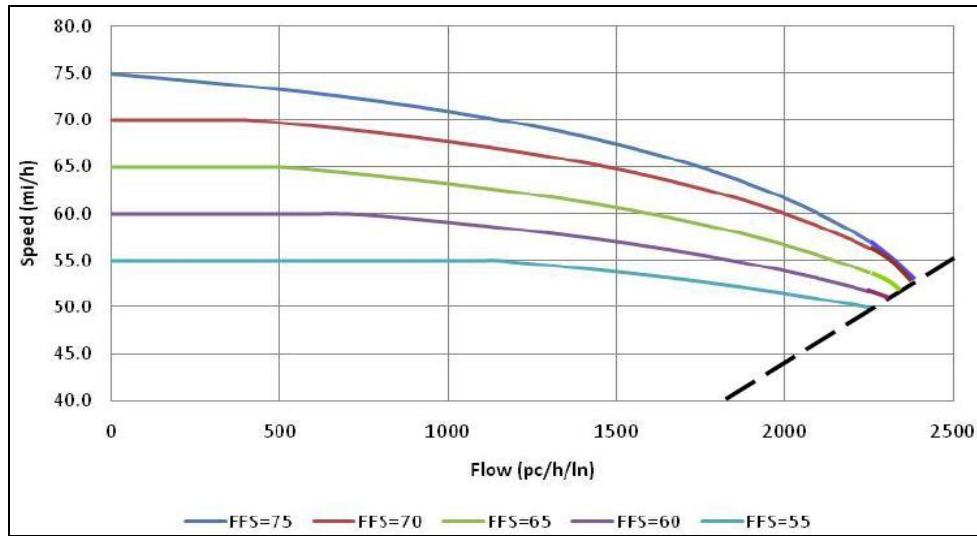
Τα δεδομένα φόρτου - ταχύτητας συγκρίνονται με την καμπύλη φόρτου – ταχύτητας όπως αυτή καθορίζεται από το Highway Capacity Manual - 2010 HCM (TRB, 2011) ανά λωρίδα κυκλοφορίας. Οι καμπύλες φόρτου – ταχύτητας του HCM βασίζονται στις καμπύλες του Brillouin (2011) και έχουν βαθμονομηθεί κατάλληλα (Roess, 2011) ώστε να προσαρμόζονται στα δεδομένα των αμερικανικών αυτοκινητοδρόμων. Η γενική εξίσωση που περιγράφει τη σχέση φόρτου – ταχύτητας είναι:

$$S = \frac{S_o}{1 + \left[\frac{S_o}{L(c - v + BP1)} \right]} \quad (4)$$

Όπου:

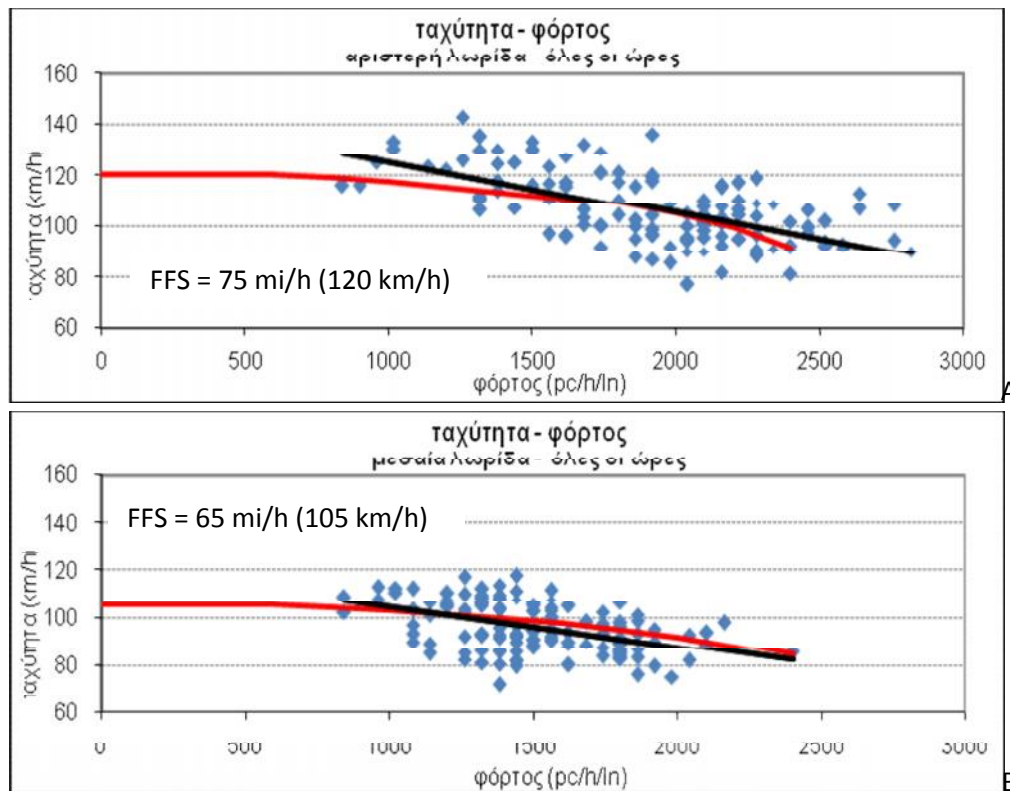
- S = μέση ταχύτητα (μίλια/ώρα)
- S_o = παράμετρος ταχύτητας (μίλια/ώρα)
- L = μήκος υπό εξέταση αυτοκινητόδρομου (μίλια)
- v = φόρτος (ΜΕΑ/ώρα/λωρίδα)
- c = κυκλοφοριακή ικανότητα (ΜΕΑ/ώρα/λωρίδα)
- $BP1$ = φόρτος στο σημείο αλλαγής κλίσης της καμπύλης (ΜΕΑ/ώρα/λωρίδα)

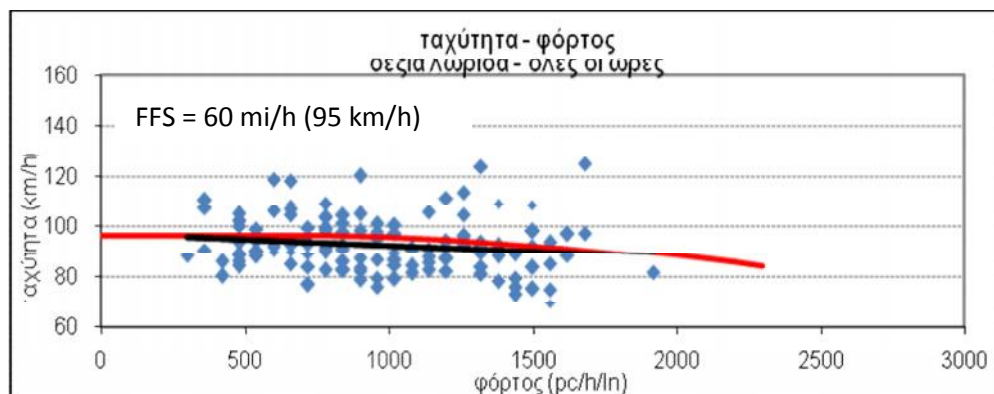
ενώ το ζεύγος των καμπύλων του νέου HCM 2010 παρατίθενται στο Σχήμα 5:



Σχήμα 5 Προσαρμοσμένες καμπύλες φόρτου – ταχύτητας του Brilon στο 2010 HCM (Roess, 2011)

Δεδομένου ότι τα δεδομένα της παρούσας μελέτης υποδεικνύουν άνιση κατανομή φόρτου και ταχύτητας στις λωρίδες κυκλοφορίας, δημιουργήθηκαν διαφορετικά διαγράμματα φόρτου – ταχύτητας ανά λωρίδα κυκλοφορίας, τα οποία αντιπαραβάλλονται με τις καμπύλες του 2010 HCM που πλησιάζουν την μέση ταχύτητα (Σχήμα 6).





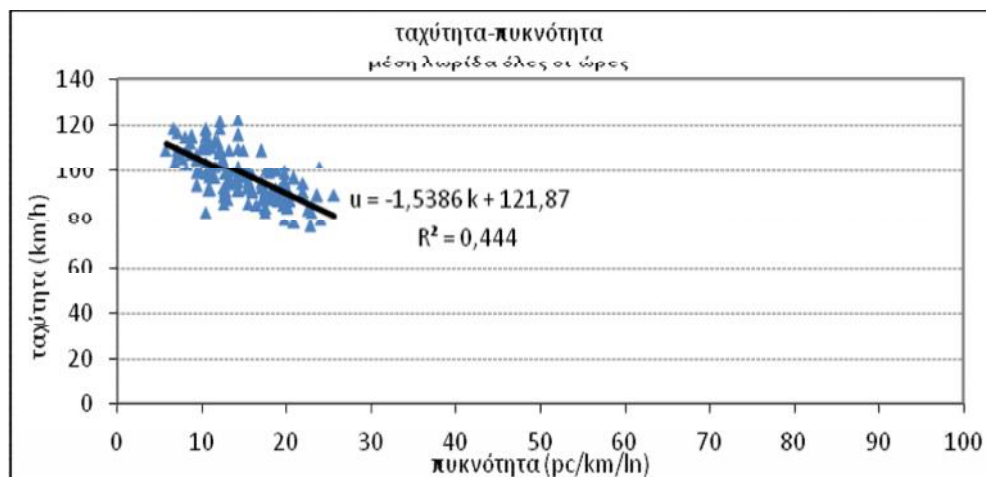
Σχήμα 6 Διάγραμμα ταχύτητας – φόρτου και καμπύλες 2010 HCM για (Α) αριστερή λωρίδα και ταχύτητα FFS=120km/h, (Β) μεσαία λωρίδα και ταχύτητα FFS=105km/h, (Γ) δεξιά λωρίδα και ταχύτητα FFS=95km/h.

Οι γραμμές τάσης των δεδομένων συμπίπτουν ικανοποιητικά με τις καμπύλες φόρτου – ταχύτητας του 2010 HCM, για διαφορετικές τιμές της ταχύτητας ελεύθερης ροής. Τα δεδομένα της αριστερής λωρίδας κυκλοφορίας προσαρμόζονται καλύτερα στην καμπύλη με ταχύτητα ελεύθερης ροής FFS=75 μίλια/ώρα (120 χλμ/ώρα), ενώ τα δεδομένα της μεσαίας και δεξιάς λωρίδας προσαρμόζονται στις καμπύλες των 65 μίλια/ώρα (105 χλμ/ώρα) και 60 μίλια/ώρα (95 χλμ/ώρα) αντίστοιχα.

3.3. ΣΧΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ – ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

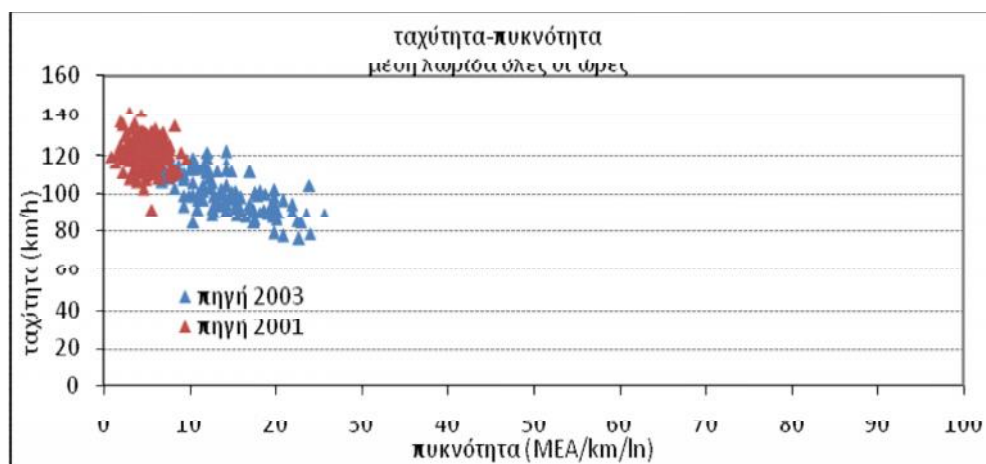
Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το διάγραμμα ταχύτητας – πυκνότητας. Για την περιγραφή της σχέσης των δυο μεγεθών έχουν κατά καιρούς αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα όπως, γραμμικό (Greenshields, 1935), λογαριθμικό (Greenberg, 1959). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η πυκνότητα καλύπτεται από ένα εύρος τιμών το οποίο φτάνει σε εξαιρετικές περιπτώσεις τα 140 οχήματα ανά χιλιόμετρο κι ανά λωρίδα.

Τα δεδομένα που προκύπτουν από μετρήσεις ταχύτητας, πυκνότητας και χρονικής κατάληψης συνθέτουν το εξής γενικευμένο διάγραμμα (Σχήμα 7), το οποίο αντιστοιχεί στη μέση λωρίδα και σε όλα τα λεπτά του δείγματος.



Σχήμα 7 Διάγραμμα ταχύτητας – πυκνότητας

Η σχέση ταχύτητας πυκνότητας μπορεί να περιγραφεί σε ικανοποιητικό βαθμό από γραμμική σχέση. Στις τιμές της πυκνότητας που κατεγράφησαν, η μέση ταχύτητα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα. Βέβαια, δεν παρατηρήθηκαν αρκετά υψηλές πυκνότητες. Παρ' αυτά, από τα δεδομένα προκύπτει ότι οι πυκνότητες που παρατηρήθηκαν, συνέβαλαν στη διαφοροποίηση της ταχύτητας. Με συμπλήρωση του συγκεκριμένου διαγράμματος με παλαιότερα δεδομένα προκύπτει το Σχήμα 8.

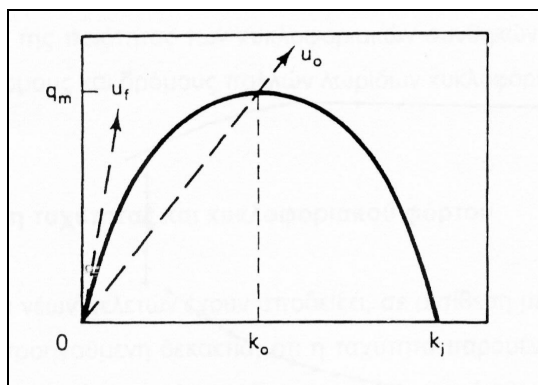


Σχήμα 8 Διάγραμμα ταχύτητας – πυκνότητας χρησιμοποιώντας δύο πηγές δεδομένων

Παρατηρείται ένα νέφος σημείων στις μικρές τιμές της πυκνότητας τα οποία περιγράφουν την περιοχή σταθερών κυκλοφοριακών συνθηκών. Κατόπιν, καθώς το μέγεθος της πυκνότητας αυξάνει, τα οχήματα κινούνται με μικρότερες τιμές ταχύτητας. Φαίνεται λοιπόν, ότι οι οδηγοί αδυνατούν να αναπτύξουν μεγάλες ταχύτητες, όταν βρίσκονται γύρω τους κι άλλα οχήματα, είτε επειδή προσπαθούν να διατηρήσουν σταθερές τις αποστάσεις ασφαλείας είτε επειδή δεν μπορούν να προχωρήσουν σε ελιγμούς προσπέρασης. Συνεπώς, το οδικό τμήμα δεν λειτουργεί σε ικανοποιητικά επίπεδα εξυπηρέτησης.

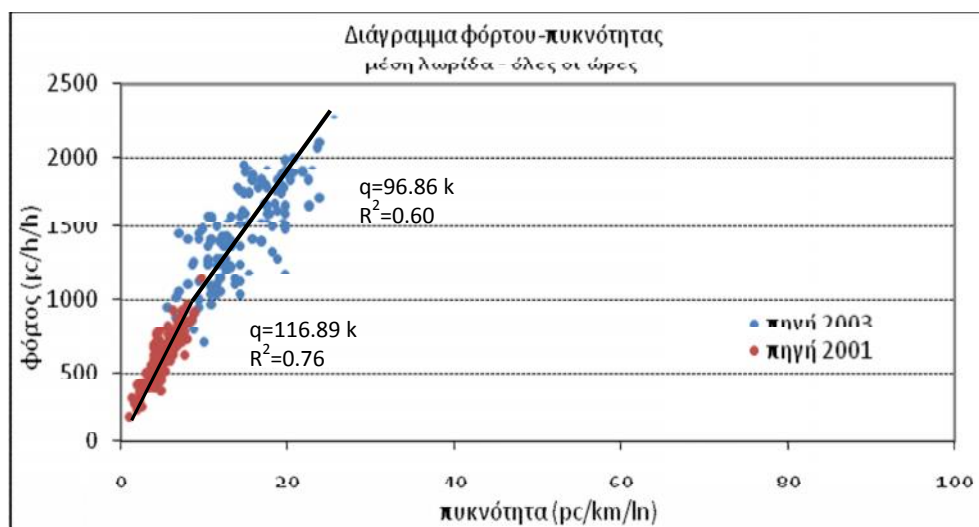
3.4. ΣΧΕΣΗ ΦΟΡΤΟΥ – ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Το διάγραμμα φόρτου – πυκνότητας θεωρείται ως το θεμελιώδες γιατί εμπεριέχει ουσιαστικά και το τρίτο μέγεθος, την ταχύτητα. Η θεωρητική μορφή του θεμελιώδους διαγράμματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 9. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, η ευθεία γραμμή που συνδέει την αρχή των αξόνων με κάθε σημείο της καμπύλης αντιπροσωπεύει το διάνυσμα της στιγμιαίας ταχύτητας. Σύγχρονες μελέτες προσάρμοσαν καλύτερα το διάγραμμα στα εμπειρικά δεδομένα (Gilchrist and Hall, 1989; Banks, 1989). Με βάση αυτά, προκύπτει ότι η ταχύτητα παραμένει σταθερή και ίση με την ταχύτητα ελεύθερης ροής για μεγάλο φάσμα τιμών του φόρτου, ενώ το ίδιο παρατηρείται και στο αριστερό σκέλος του διαγράμματος του May (1990). Στη συνέχεια, αναμένεται μια απότομη πτώση της ταχύτητας, η οποία εξομαλύνεται στην περιοχή της συμφορημένης ροής.



Σχήμα 9 Θεμελιώδες διάγραμμα φόρτου – πυκνότητας (May, 1990)

Η σχέση φόρτου – πυκνότητας όπως αυτή αποτυπώνεται με βάση τις μετρήσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 10:



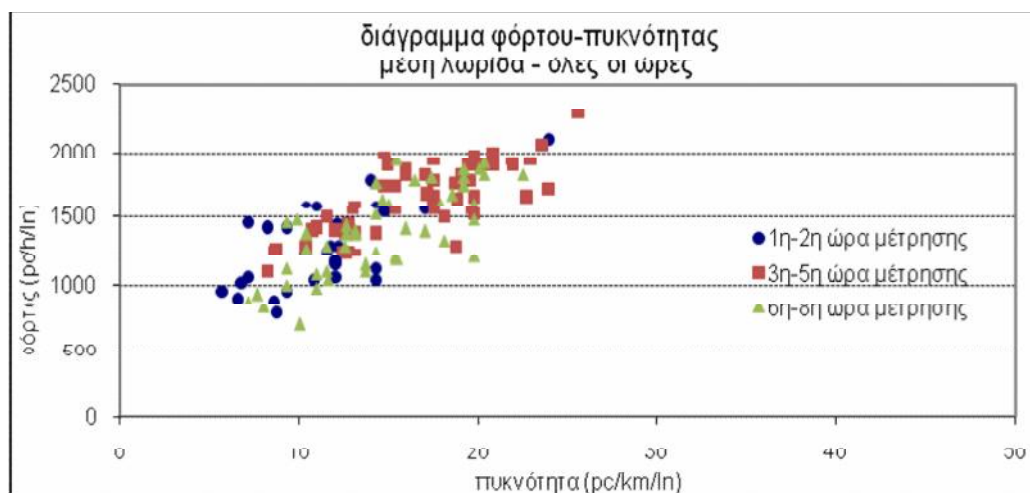
Σχήμα 10 Διάγραμμα φόρτου – πυκνότητας χρησιμοποιώντας δύο πηγές δεδομένων

Οι εξισώσεις των γραμμών τάσης είναι ουσιαστικά αντίστοιχες της θεμελιώδους κυκλοφοριακής εξίσωσης $q=u*k$, καθώς η ταχύτητα u ισούται με την κλίση των δύο ευθειών. Αναφέρεται και πάλι ότι ενώ το συνολικό διάγραμμα περιγράφει όλη τη σταθερή περιοχή κυκλοφορίας, οι διαφορές των δύο σημειοσυνόλων είναι εμφανείς. Έτσι, στην πρώτη ομάδα σημείων (Χωριανόπουλος, 2001) η ταχύτητα κίνησης είναι της τάξης των 117χλμ/ώρα (ταχύτητα ελεύθερης ροής) δείχνοντας πως η κυκλοφορία γίνεται ανεμπόδιστα, ενώ η ταχύτητα της δεύτερης ομάδας σημείων (παρούσα μελέτη) είναι κατά 20χλμ/ώρα μικρότερη καθώς πλησιάζουμε στην περιοχή του μέγιστου φόρτου και προσεγγίζουμε συνθήκες συμφορημένης ροής.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι τα σημεία που βρίσκονται πολύ κοντά στην αρχή των αξόνων περιγράφουν ικανοποιητικά τη γραμμή τάσης. Όσο όμως αυξάνει ο φόρτος και η πυκνότητα, παρατηρείται αύξηση της διασποράς των σημείων από την γραμμή τάσης. Αυτά τα σημεία που απέχουν αρκετά από τη γραμμή και αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές πυκνότητας και φόρτου, προέρχονται από μετρήσεις της 4^{ης} και 5^{ης} ώρας του δείγματος, όπου η ταχύτητα έχει μειωθεί δραστηκά. Στη συνέχεια όμως, καθώς οι φόρτοι ακολουθούν φθίνουσα πορεία, δεν παρατηρείται

επιπλέον αύξηση της πυκνότητας ή μείωση της ταχύτητας. Αυτό που συμβαίνει στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι μια τάση επιστροφής στην προηγούμενη κατάσταση. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι λίγο πριν την περιοχή του μέγιστου φόρτου, η καμπύλη παρουσιάζει φθίνουσα πορεία και κατόπιν τείνει να επανέλθει στην πρότερη κατάσταση.

Το παραπάνω συμπέρασμα γίνεται κατανοητό εξετάζοντας τις μετρήσεις φόρτου και πυκνότητας σε τρεις χρονικές περιόδους. Η πρώτη χρονική περίοδος περιλαμβάνει τις μετρήσεις κατά τις δύο πρώτες ώρες του δείγματος. Η δεύτερη χρονική περίοδος περιλαμβάνει τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια της περιόδου αιχμής (3^{ης}, 4^{ης} και 5^{ης} ώρας μέτρησης), ενώ η τρίτη περίοδος περιλαμβάνει τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων ωρών. Το διάγραμμα φόρτου – πυκνότητας ανά χρονική περίοδο παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11 Χρονική ομαδοποίηση του διαγράμματος φόρτου – πυκνότητας

Είναι εμφανές ότι οι μετρήσεις που αφορούν στην περίοδο αιχμής αντιστοιχούν σε τιμές μέγιστου φόρτου και πυκνότητας. Κατά τη διάρκεια των επόμενων τριών ωρών μέτρησης (6^η ως 8^η ώρα) τα σημεία επιστρέφουν σε μικρότερες τιμές φόρτου και πυκνότητας, υποδηλώνοντας ότι η κυκλοφορία τείνει προς ανάκαμψη και επιστροφή σε περισσότερο σταθερές συνθήκες κυκλοφορίας. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από την μελέτη του Ferrari (1988), σύμφωνα με την οποία, σε καταστάσεις όπου η πυκνότητα έχει μικρές τιμές αλλά συνεχώς αυξάνεται και η ταχύτητα παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, μπορεί να υπεισέλθει αστάθεια στο κυκλοφοριακό σύστημα. Η κυκλοφορία γίνεται ασταθής όταν η πυκνότητα υπερβεί μια οριακή τιμή. Σε αυτή την περίπτωση, δεν τηρούνται σταθερά τα χωρικά διάκενα μεταξύ των οχημάτων με αποτέλεσμα να αυξάνει ο αριθμός των αλλαγών λωρίδων και να μειώνεται η ταχύτητα. Κατόπιν, το σύστημα μπορεί να ανακάμψει μερικώς, με αύξηση της μέσης ταχύτητας και την επιστροφή της κυκλοφορίας σε χαμηλότερα επίπεδα πυκνότητας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Ο στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση του κυκλοφοριακού χαρακτήρα ενός αυτοκινητοδρόμου χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέχθηκαν με φωτογραμμετρικές μεθόδους.

Χαρακτηριστικό είναι ότι στην Ελλάδα δεν έχουν πραγματοποιηθεί αντίστοιχες μελέτες, ενώ τα διαγράμματα των κυκλοφοριακών μεγεθών που χρησιμοποιούνται, προέρχονται από εγχειρίδια κανονισμών ξένων χωρών.

Στο πλαίσιο της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κυκλοφοριακών μεγεθών σε διατομή της Εθνικής οδού Αθηνών – Λαμίας (43^ο χιλιόμετρο με κατεύθυνση προς Αθήνα) με χρήση μη μετρητικής ψηφιακής βιντεοκάμερας. Η διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων στηρίχτηκε στη φωτογραμμετρική αναγωγή. Σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο ανεξάρτητος προσδιορισμός των κυκλοφοριακών μεγεθών της μέσης ταχύτητας και της πυκνότητας, ανά λωρίδα κυκλοφορίας.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα μελέτη είναι τα εξής:

- Από την ανάλυση των στοιχείων προέκυψε ότι βρισκόμαστε σε συνθήκες πυκνής αλλά σταθερής ροής, πριν από την κατάρρευση της κυκλοφορίας. Σε αυτές τις συνθήκες η κυκλοφορία δεν γίνεται ανεμπόδιστα, αντίθετα παρουσιάζεται μείωση της ταχύτητας ενώ παράλληλα καταγράφηκαν αρκετά υψηλές τιμές κυκλοφοριακού φόρτου.
- Η σχέση φόρτου – ταχύτητας έχει τη μορφή κεκλιμένης γραμμής, η οποία έρχεται σε συμφωνία με το γενικευμένο διάγραμμα φόρτου – ταχύτητας. Αντίστοιχα, η καμπύλη φόρτου – πυκνότητας παρουσιάζει φθίνουσα πορεία, ενώ παρατηρείται μια τάση επαναφοράς σε συνθήκες μικρότερου φόρτου και πυκνότητας.
- Η ανάλυση των στοιχείων ανά λωρίδα κρίνεται αναγκαία, καθώς η φόρτιση των λωρίδων κυκλοφορίας δεν γίνεται ισομερώς. Η αριστερή λωρίδα κυκλοφορίας φαίνεται να φτάνει πρώτη σε κορεσμό ενώ στις άλλες δύο λωρίδες ο ρυθμός αύξησης του κυκλοφοριακού φόρτου είναι μικρότερος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην οδική συμπεριφορά των Ελλήνων οδηγών. Επισημαίνεται ότι οι διαφορές αυτές αποτυπώνονται και στη σχέση μέσης ταχύτητας – κυκλοφοριακού φόρτου ανά λωρίδα, οι οποίες έρχονται σε συμφωνία με τις καμπύλες που προκύπτουν από το HCM, για διαφορετικές ταχύτητες ελεύθερης ροής.
- Η κίνηση των βαρέων οχημάτων – το ποσοστό των οποίων αναμένεται να είναι αυξημένο σε σχέση με αστικά οδικά δίκτυα – διαφοροποιεί τη συμπεριφορά των υπόλοιπων οχημάτων ως προς την επιλογή λωρίδας κυκλοφορίας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεράσματα, διαμορφώνονται οι εξής προτάσεις:

- Η άνιση φόρτιση των λωρίδων κυκλοφορίας και συνεπώς η διαφορετική κυκλοφοριακή ικανότητα καθιστά απαραίτητη την ανάλυση της κυκλοφορίας σε επίπεδο λωρίδας.
- Προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση του κυκλοφοριακού χαρακτήρα των ελληνικών αυτοκινητοδρόμων ιδιαίτερα σε συνθήκες πριν την κατάρρευση της κυκλοφορίας και πλήρους συμφόρησης, ώστε να συμπληρωθεί το θεμελιώδες διάγραμμα φόρτου – πυκνότητας.
- Το συμπέρασμα ότι η αριστερή λωρίδα φτάνει πρώτη σε κορεσμό χρειάζεται να εξακριβωθεί με επιπλέον στοιχεία σε συνθήκες κατάρρευσης της κυκλοφορίας. Η επαλήθευση του συμπεράσματος αυτού μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη για σκοπούς διαχείρισης της κυκλοφορίας των αυτοκινητοδρόμων, όπως π.χ. η χρήση μεταβλητών ορίων ταχύτητας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά τους κ. Γ. Καρρά και Λ. Γραμματικόπουλο για την συμβολή τους στην επεξεργασία των μετρήσεων, καθώς και τον αξιομνημόνευτο κ. Μ. Κονταράτο για την πολύτιμη συνεισφορά στην παρούσα εργασία.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Κονδύλη, Α. (2003). Μελέτη των Κυκλοφοριακών Μεγεθών Σε Αυτοκινητοδρόμους Πυκνής Ροής (Μετρήσεις με Χρήση Φωτογραμμετρικών Μεθόδων). Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Χωριανόπουλος, Π. (2001). Μελέτη του Κυκλοφοριακού Χαρακτήρα Αυτοκινητοδρόμων σε Συνθήκες Σταθερής Ροής με Χρήση Φωτογραμμετρικών Μεθόδων. Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Allen, B.L., F.L. Hall, and M.A. Gunter (1985). Another Look at Identifying Speed-Flow Relationships on Freeways. Transportation Research Record 1005, TRB, Washington, DC, pp. 54-64.

Banks, J.H. (1989). Freeway Speed – Flow Concentration Relationships: More Evidence and Interpretations. Transportation Research Record 1225, TRB, Washington DC, pp. 53-60.

Bassana, S., and A. Cederb (2008). Analysis of Maximum Traffic Flow and its Breakdown on Congested Freeways. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 387(16-17), pp. 4349-4366.

Brilon, W., and J. Lohoff (2011). Freeway Flow Models. In Proceedings of the Transportation Research Board 2011 Annual Meeting, Washington, DC.

Brilon, W., J. Geistefeldt, and H. Zurlinden (2007). Implementing the Concept of Reliability for Highway Capacity Analysis. Transportation Research Record 2027, TRB, Washington DC, pp. 1-8.

Cassidy, M.J. (1998). Bivariate Relations in Nearly Stationary Highway Traffic. Transportation Research Part B, 32(1), pp. 49-59.

Ferrari, P. (1988). The Reliability of the Motorway Transport System. Transportation Research Part B 22(4), pp. 291-310.

Ferrari, P., P. Treglia, E. Cascetta, A. Nuzzolo, and P. Olivotto (1982). A New Method for Measuring the Quality of Circulation on Motorways. Transportation Research Part B, 16(5), pp. 399-418.

Gilchrist, R.S., and F.L. Hall (1989). Three - Dimensional Relationships Among Traffic Flow Theory Variables. Transport Research Record 1225, TRB, Washington DC, pp. 99-108.

Greenberg, H. (1959). An Analysis of Traffic Flow. Operations Research 7.

Greenshields, B.D. (1935). A Study of Traffic Capacity. In Proceedings of the Highway Research Board, (14), p. 468.

Guan, W., and S. He (2008). Statistical Features of Traffic Flow on Urban Freeways. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 387(4), pp. 944-954. Gunter, M.A., and F.H. Hall (1986). Transitions in the Speed-Flow Relationship. Transportation Research Record 1091, TRB, Washington, DC, pp. 18-21.

Hall, F.L. and M.A. Gunter (1986). Further Analysis of the Flow – Concentration Relationship. Transportation Research Record 1091, TRB, Washington DC, pp. 1-9.

Hurdle, V.F., and P.K. Datta (1983). Speeds and Flows on Urban Freeway: Some Measurements and a Hypothesis. Transportation Research Record 905, TRB, Washington DC, pp. 127–137.

Hurdle, V.F., M.I., Merlo, and D. Robertson (1997). Study of Speed-Flow Relationship on Individual Freeway Lanes. Transportation Research Record 1591, TRB, Washington DC, pp. 7-13.

Lorenz, M.R. and L. Elefteriadou (2001). Defining Freeway Capacity as Function of Breakdown Probability. Transportation Research Record 1776, TRB, Washington DC, pp. 43-51.

May, A.D. (1990). *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice-Hall, Inc., ISBN 0-13-926072-2.

Michalopoulos, P.G., D.E. Beskos, and Y. Yamauchi (1984). Multilane Traffic Flow Dynamics: Some Macroscopic Considerations. Transportation Research Part B, 18(4-5), pp. 377-395.

Okura, I., and K. Somasundaraswaran (1996). Lane Distribution of Uncongested Traffic on Multilane Freeways and ITS Applications. In proceedings of the 3rd Congress of Intelligent Transportation Systems, Orlando.

Papageorgiou, M., J.-M. Blosseville, and H. Haj-Salem (1990). Modelling and Real-Time Control of Traffic Flow on the Southern Part of Boulevard Peripherique in Paris: Part II: Coordinated On-Ramp Metering. Transportation Research Part A, 24(5), pp. 361-370.

Roess, R. (2011). Speed Flow Curves for Freeways in the 2011 HCM. In Proceedings of the Transportation Research Board 2011 Annual Meeting, Washington, DC.

Schadschneider, A., W. Knospe, L. Santen, and M. Schreckenberg, (2005). Optimization of Highway Networks and Traffic Forecasting. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 346(1-2), pp. 165-173.

Schadschneider, A. (2006). Cellular Automata Models of Highway Traffic. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 372(1 SPEC. ISS.), pp. 142-150.

Smilowitz, K., and C. Daganzo (2002). Reproducible Features of Congested Highway Traffic. Mathematical and Computer Modeling 35(5-6), pp. 509-516.

Smulders, S. (1990). Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs. Transportation Research Part B, 24(2), pp. 111-132.

Tebaldi, C., M. West, and A.F. Karr (2002). Statistical Analyses of Freeway Traffic Flows. Journal of Forecasting, 21(1), pp. 39-68.