

Προσομοίωση της Κίνησης των Λεωφορείων στις Στάσεις σε Περιοχή Σηματοδοτούμενων Κόμβων

Δ. ΤΣΑΜΠΟΥΛΑΣ
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Π. ΓΚΙΟΚΑΣ
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

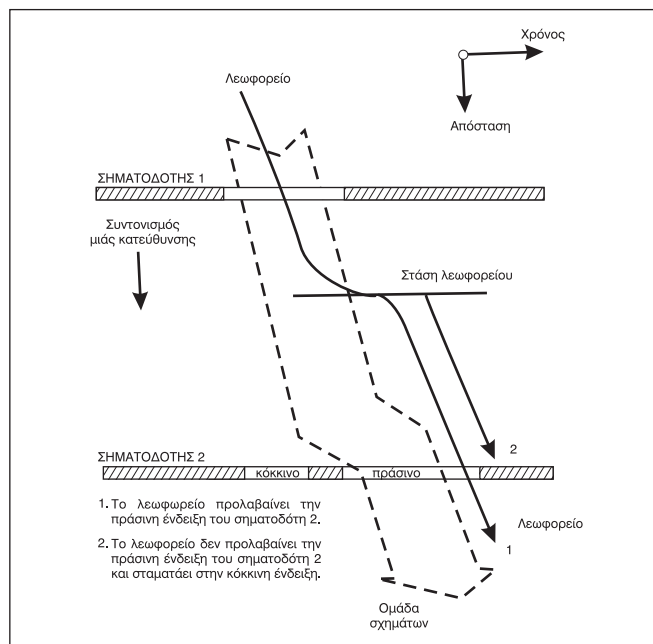
Περίληψη

Σημαντικό τμήμα του συνολικού χρόνου διαδρομής των Μαζικών Μέσων Μεταφορών (ΜΜΜ) καταναλώνεται στις περιοχές των σηματοδοτούμενων κόμβων. Η βελτίωση της κίνησής τους στις περιοχές αυτές μπορεί να έχει ευεργετικά αποτελέσματα τόσο για την κίνηση των ΜΜΜ όσο και γενικότερα για την κίνηση των υπολοίπων οχημάτων στην πόλη. Στην παρούσα εργασία αναλύεται η κίνηση των λεωφορείων στην περιοχή των σηματοδοτούμενων κόμβων ποιοτικά και ποσοτικά. Στη συνέχεια, προτείνονται μαθηματικά πρότυπα για τον υπολογισμό του τμήματος εκείνου του χρόνου παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση, το οποίο συμπίπτει είτε με την πράσινη ένδειξη είτε με την κόκκινη ένδειξη του φωτεινού σηματοδότη. Τα πρότυπα αυτά έχουν ως ανεξάρτητες μεταβλητές το λόγο της διάρκειας της πράσινης ένδειξης του σηματοδότη προς τη συνολική διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης, καθώς και το συνολικό χρόνο παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση. Η εφαρμογή των προτύπων παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βελτίωση και η προνομιακή μεταχείριση των Μαζικών Μέσων Μεταφορών (ΜΜΜ) αποτελούν κατηγορία μέτρων που μπορεί να έχει τα πιο ευεργετικά αποτελέσματα τόσο για την καλύτερη αξιοποίηση των υφιστάμενων συστημάτων μεταφορών και την αποφυγή κατασκευής νέων, όσο και για τη βελτίωση των αρνητικών επιπτώσεων από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση των επιβατικών αυτοκινήτων [1, 2].

Εκτιμάται ότι στις κεντρικές περιοχές των πόλεων το 10–20% του συνολικού χρόνου διαδρομής των λεωφορείων αφορά στην αναμονή τους στους σηματοδοτούμενους κόμβους [1]. Ένα σημαντικό τμήμα αυτής της καθυστέρησης οφείλεται στο γεγονός ότι η δυνατότητα συνεχούς κίνησης, που προσφέρει μια κατάλληλα συντονισμένη σηματοδότηση (πράσινο κύμα) στα επιβατικά αυτοκίνητα, δεν αξιοποιείται από τα οχήματα των δημοσίων συγκοινωνιών (σχήμα 1). Αυτό συμβαίνει, επειδή λόγω των στάσεων δεν είναι δυνατόν να ακολουθήσουν τη μέση ταχύτητα κίνησης για την οποία έχουν συντονιστεί οι φωτεινοί σηματοδότες [1, 2, 8].



Πηγή: [2]

Σχήμα 1: Διάγραμμα χρόνων – αποστάσεων για λεωφορείο.
Figure 1: Time – Space diagram for bus.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι αφ' ενός μεν η ανάλυση της κίνησης των λεωφορείων κοντά σε σηματοδοτούμενους κόμβους και ειδικότερα των χρόνων αναμονής για επιβίβαση ή αποβίβαση επιβατών, και αφ' ετέρου η μαθηματική προσομοίωση (με ανάπτυξη μαθηματικών προτύπων) της παραμονής τους στη στάση για επιβίβαση και αποβίβαση επιβατών σε σχέση με την ένδειξη του φωτεινού σηματοδότη.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

C

Η συνολική διάρκεια της σηματοδότησης (περίοδος).

G/C	Ο λόγος της διάρκειας της πράσινης ένδειξης (G) προς τη συνολική διάρκεια της σηματοδότησης (C).
R/C	Ο λόγος της διάρκειας της κόκκινης ένδειξης (R) προς τη συνολική διάρκεια της σηματοδότησης (C).
Dt	Ο συνολικός χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση.
t_c	Χρόνος εκκένωσης.
R^2	Πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού της ανάλυσης παλινδρόμησης.
F	Τιμή στατιστικού ελέγχου F.
[Dt(G)/G]	Το τμήμα του συνολικού χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση Dt(G), το οποίο συμπίπτει με την πράσινη ένδειξη του σηματοδότη, ως ποσοστό (%).
[Dt(R)/R]	Το τμήμα του συνολικού χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση Dt(R), το οποίο συμπίπτει με την κόκκινη ένδειξη του σηματοδότη, ως ποσοστό (%).
constant	Σταθερή παράμετρος του μαθηματικού προτύπου.
dummy	Ποιοτική μεταβλητή.
t	Στατιστικός έλεγχος t – Student.
α	Διάστημα εμπιστοσύνης.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σε μία στάση, που βρίσκεται κοντά σε σηματοδότη, ένα λεωφορείο μπορεί να αφιχθεί με ένδειξη του σηματοδότη είτε πράσινη είτε κόκκινη. Κατά συνέπεια ο χρόνος παραμονής στη στάση που απαιτείται για την αποβίβαση και/ή επιβίβαση των επιβατών είναι δυνατόν να συμπίπτει με τμήμα ή ακόμα και με το σύνολο της χρονικής διάρκειας της πράσινης (G) ή/και της κόκκινης (R) ένδειξης.

Το τμήμα του χρόνου παραμονής στη στάση, που συμπίπτει με την πράσινη ένδειξη, είναι αυτό που επηρεάζει την κίνηση των λεωφορείων και κατά συνέπεια την κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού, αφού τα υπόλοιπα οχήματα επηρεάζονται από τις στάσεις των λεωφορείων. Το τμήμα του χρόνου παραμονής στη στάση, που συμπίπτει με την κόκκινη ένδειξη, δεν επηρεάζει τίποτα από τα παραπάνω, αφού έτσι και αλλιώς πρόκειται για χρόνο που το λεωφορείο παραμένει ακινητοποιημένο [1, 8].

Επομένως παράμετροι, όπως είναι ο λόγος G/C και ο συνολικός χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση, είναι ιδιαίτερα σημαντικές και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ανάπτυξη των προτύπων προσομοίωσης. Άλλη σημαντική παράμετρος είναι η ένδειξη του σηματοδότη (πράσινη ή κόκκινη) κατά την οποία το λεωφορείο σταματά στη στάση για να εξυπηρετήσει τους επιβάτες.

Απαιτείται λοιπόν ο προσδιορισμός του τμήματος του συνολικού χρόνου παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση, ο οποίος συμπίπτει με τμήμα της πράσινης ή της κόκκινης ένδειξης του σηματοδότη. Για το σκοπό αυτόν αναπτύσσονται μαθηματικά πρότυπα, στα οποία οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι ο λόγος G/C και ο συνολικός χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση Dt. Τα μαθηματικά πρότυπα αναπτύσσονται για διάφορες περιπτώσεις: για το σύνολο των λεωφορείων που σταμάτησαν στις στάσεις, για τα λεωφορεία που φθάνουν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη είναι πράσινη ή κόκκινη αντίστοιχα.

Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω, απαιτείται αρχικά η συλλογή του κατάλληλου στατιστικού δείγματος, τόσο από άποψη μεγέθους όσο και από άποψη είδους στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν κυρίως την άφιξη του λεωφορείου στη στάση σε σχέση με την ένδειξη του σηματοδότη, το χρόνο παραμονής του λεωφορείου στη στάση, το τμήμα του χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση που συμπίπτει με τμήμα ή το σύνολο της πράσινης ή κόκκινης ένδειξης κ.ά. Αναφορικά με τη σηματοδότηση γίνεται η παραδοχή ενός συστήματος συντονισμένης σηματοδότησης σταθερού χρόνου, δηλαδή ενός συστήματος που εξασφαλίζει συνεχή ροή κατά μήκος των οδών που κινούνται τα λεωφορεία. Επίσης, οι φάσεις της σηματοδότησης μεταβάλλονται σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές περιόδους (π.χ πρωινή ή απογευματινή αιχμή) με εφαρμογή ενός κατάλληλου προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Για τη συλλογή του κατάλληλου στατιστικού δείγματος απαιτούνται η σωστή επιλογή οδών και στάσεων (όπου θα γίνουν οι μετρήσεις), η χρονική περίοδος συλλογής των στοιχείων και η διάρκεια των μετρήσεων.

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

4.1. Ο τρόπος συλλογής των στοιχείων

Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν ήταν τόσο ποσοτικά, όπως οι χρονικές στιγμές της άφιξης και της αναχώρησης των λεωφορείων από τη στάση, όσο και ποιοτικά, όπως η φωτεινή ένδειξη του σηματοδότη κατά την άφιξη του λεωφορείου στη στάση. Προκειμένου να συλλεγούν με ακρίβεια τα στοιχεία αυτά, χρησιμοποιήθηκε βιντεοκάμερα [10]. Παράλληλα έγινε και ταυτόχρονη καταγραφή από παρατηρητές ορισμένων στοιχείων σε κατάλληλα έντυπα, ώστε να είναι ευκολότερη η επεξεργασία τους.

4.2. Η επιλογή των οδών

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κεντρικές οδούς που έχουν κατεύθυνση από και προς το κέντρο της πόλης και

πιο συγκεκριμένα στις λεωφόρους Κηφισίας, Αλεξάνδρας και Μεσογείων, αφού ένας πολύ μεγάλος αριθμός λεωφορείων και λεωφορειακών γραμμών διέρχεται από αυτές, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται υψηλοί φόρτοι μετακινουμένων επιβατών. Άρα οποιοδήποτε μέτρο βελτίωσης της κίνησης των λεωφορείων θα έχει οφέλη σε ικανό αριθμό επιβατών που μετακινούνται με τα λεωφορεία στις γραμμές αυτές. Εξάλλου στις οδούς αυτές μετακινείται μεγάλος αριθμός επιβατικών αυτοκινήτων ΙΧ, ταξί κ.λπ., τα οποία επηρεάζουν, σε πολλές περιπτώσεις, σημαντικά την κίνηση των λεωφορείων και καθιστούν απαραίτητη την καταγραφή στοιχείων κυκλοφοριακού φόρτου.

4.3. Η επιλογή των κατάλληλων στάσεων

Προκειμένου να προσομοιωθεί η παραμονή του λεωφορείου στη στάση για την επιβίβαση και αποβίβαση επιβατών σε σχέση με την ένδειξη του φωτεινού σηματοδότη, θα πρέπει να επιλεγούν στάσεις που βρίσκονται σε τέτοια απόσταση από το σηματοδότη, ώστε να επηρεάζονται από αυτόν. Επομένως οι στάσεις που επιλέχθηκαν βρίσκονται αμέσως μετά ή πριν από μία σηματοδοτούμενη διασταύρωση. Επίσης, επειδή στην Αθήνα τα οικοδομικά τετράγωνα είναι μικρά, επιλέχθηκε για το δείγμα και μία στάση που να βρίσκεται στο μέσο περίπου του οικοδομικού τετραγώνου, σε απόσταση περίπου 100 μέτρων από το σηματοδότη [1, 9], αφού στάσεις, που απέχουν περισσότερο από 100 μέτρα, δεν επηρεάζονται από το φωτεινό σηματοδότη.

Στη συνέχεια, καταγράφηκε από παρατηρητές η κίνηση των λεωφορείων σε διαφορετικού τύπου στάσεις – σε σχέση με τη θέση τους ως προς τη διασταύρωση – χωρίς τη χρήση βιντεοκάμερας. Διαπιστώθηκε ότι μεταξύ των στάσεων που βρίσκονται ακριβώς πριν από το σηματοδότη υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες οφείλονται στην απόσταση ανάμεσα στο σηματοδότη πλησίον της στάσης και στον αμέσως προηγούμενο, και στο αν επιτρέπεται ή όχι η δεξιά στροφή.

Οι διαφορετικές περιπτώσεις που προέκυψαν ήταν αρκετές (περίπου 10–12), από τις οποίες επιλέχθηκαν οι παρακάτω πέντε στάσεις ως πιο αντιπροσωπευτικές, στις οποίες πραγματοποιήθηκαν και οι μετρήσεις:

1. Η στάση Ζέρβα που βρίσκεται στη λεωφόρο Κηφισίας στην κατεύθυνση προς το κέντρο της πόλης. Η στάση αυτή βρίσκεται ακριβώς πριν από το σηματοδότη σε απόσταση 20 μέτρων από αυτόν, ενώ παράλληλα επιτρέπεται και η δεξιά στροφή. Ο αμέσως προηγούμενος σηματοδότης βρίσκεται μακριά και πιο συγκεκριμένα σε απόσταση 250 περίπου μέτρων από το σηματοδότη που είναι πλησίον της στάσης. Επιπλέον, στο συγκεκριμένο τμήμα της λεωφόρου Κηφισίας ισχύει το μέτρο της αποκλειστικής λωρίδας για τα λεωφορεία.

2. Η στάση Ιπποκράτους που βρίσκεται στη λεωφόρο Αλεξάνδρας στην κατεύθυνση από το κέντρο της πόλης. Η στάση αυτή βρίσκεται ακριβώς πριν από το σηματοδότη σε απόσταση 9 μέτρων από αυτόν, ενώ δεν επιτρέπεται η δεξιά στροφή. Ο αμέσως προηγούμενος σηματοδότης βρίσκεται αρκετά πλησίον και πιο συγκεκριμένα σε απόσταση 100 περίπου μέτρων από το σηματοδότη που είναι πλησίον της στάσης.
3. Η στάση 5^η Χολαργού που βρίσκεται στη λεωφόρο Μεσογείων στην κατεύθυνση προς το κέντρο της πόλης. Η στάση αυτή βρίσκεται ακριβώς πριν από το σηματοδότη σε απόσταση 7 μέτρων από αυτόν, ενώ επίσης δεν επιτρέπεται η δεξιά στροφή. Ο αμέσως προηγούμενος σηματοδότης βρίσκεται αρκετά μακριά και πιο συγκεκριμένα σε απόσταση 600 περίπου μέτρων από το σηματοδότη που είναι πλησίον της στάσης. Η περίπτωση της συγκεκριμένης στάσης είναι συμπληρωματική των δύο προηγούμενων.
4. Η στάση 3^η Χολαργού που βρίσκεται στη λεωφόρο Μεσογείων στην κατεύθυνση προς το κέντρο της πόλης. Η στάση αυτή βρίσκεται αμέσως μετά το σηματοδότη σε απόσταση 35 μέτρων από αυτόν (λαμβάνομένου υπόψη και του πλάτους της κάθετα διασταυρούμενης οδού). Ο αμέσως προηγούμενος σηματοδότης βρίσκεται μακριά και πιο συγκεκριμένα σε απόσταση 160 περίπου μέτρων από το σηματοδότη πλησίον της στάσης.
5. Η στάση Σόνια που βρίσκεται στη λεωφόρο Αλεξάνδρας στην κατεύθυνση από το κέντρο της πόλης. Η στάση αυτή βρίσκεται στο μέσο του οικοδομικού τετραγώνου σε απόσταση 80 μέτρων από το σηματοδότη. Ο αμέσως προηγούμενος σηματοδότης βρίσκεται μακριά και πιο συγκεκριμένα σε απόσταση 200 περίπου μέτρων από το σηματοδότη που είναι πλησίον της στάσης. Η περίπτωση της συγκεκριμένης στάσης είναι επίσης συμπληρωματική των προηγούμενων.

4.4. Η επιλογή του χρόνου και της διάρκειας των μετρήσεων

Τυχόν διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά κίνησης των οχημάτων σε ένα οδικό δίκτυο εμφανίζονται λόγω της αλλαγής από μία κατάσταση αυξημένης κυκλοφορίας (περίοδος αιχμής) σε μια πιο ήπια κατάσταση (περίοδος εκτός αιχμής). Ανάλογα με το αν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε περίοδο αιχμής ή εκτός αιχμής διαφοροποιούνται ορισμένες παράμετροι που έχουν σχέση με τα λεωφορεία, όπως είναι ο αριθμός των δρομολογίων, η ταχύτητα κίνησης, ο χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση, η πληρότητα κ.λπ. Οι οποιοσδήποτε διαφοροποιήσεις, που εμφανίζονται στη συνολική κυκλοφορία, απεικονίζονται και στα αντίστοιχα προγράμματα σηματοδότησης, τα οποία εναλλάσσονται κατά περίπτωση (περίοδος αιχμής, περίοδος εκτός αιχμής κ.λπ.).

Πίνακας 1: Ημέρα και ώρα μέτρησης σε κάθε στάση.

Table 1: Day and time for counts at each stop.

Στάση	Ημέρα και ώρα μέτρησης	Συνολική διάρκεια (ώρες)
Ζέρβα (C = 90 δευτερόλεπτα)	- Κυριακή 7/6/98, 11:40–14:40 - Τετάρτη 10/6/98, 07:15–10:15 - Τετάρτη 10/6/98, 11:30–14:30	9
Ιπποκράτους (C = 90 δευτερόλεπτα)	- Δευτέρα 8/6/98, 10:30–13:30 - Πέμπτη 11/6/98, 07:40–10:40 - Πέμπτη 11/6/98, 11:40–14:40	9
3 ^η Χολαργού (C = 120 δευτερόλεπτα)	- Κυριακή 14/6/98, 10:30–13:30 - Τρίτη 16/6/98, 07:00–10:00 - Τρίτη 16/6/98, 11:00–14:00	9
5 ^η Χολαργού (C = 120 δευτερόλεπτα)	- Τετάρτη 17/6/98, 07:00–10:00 - Τετάρτη 17/6/98, 11:00–14:00	6
Σόνια (C = 90 δευτερόλεπτα)	- Παρασκευή 12/6/98, 07:20–10:20 - Παρασκευή 12/6/98, 12:15–14:15	5

Επομένως τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν προέρχονταν από τις εξής διαφορετικές καταστάσεις κυκλοφοριακού φόρτου: (α) μειωμένης κυκλοφορίας, η οποία ονομάζεται 1ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης, (β) αυξημένης κυκλοφορίας, η οποία ονομάζεται 3ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης, και (γ) ενδιάμεσης κυκλοφορίας των δύο προηγούμενων, η οποία ονομάζεται 2ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης [2, 8].

Το 1^ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης χαρακτηρίζεται από μειωμένη κυκλοφορία. Η κίνηση των λεωφορείων δεν επηρεάζεται καθόλου από την κίνηση των υπολοίπων οχημάτων, ο αριθμός των λεωφορείων που δρομολογούνται είναι μικρός και ανάλογα μικρή είναι και η επιβατική κίνηση. Στο τμήμα της οδού μεταξύ του σηματοδότη πλησίον της στάσης και του αμέσως προηγούμενου σηματοδότη από αυτόν παρατηρούνται στάθμες εξυπηρέτησης Α και Β. Η μέση καθυστέρηση στην περιοχή του σηματοδοτούμενου κόμβου δεν ξεπερνά τα 15 δευτερόλεπτα, οπότε οι στάθμες εξυπηρέτησης είναι επίσης Α και Β.

Το 3^ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης χαρακτηρίζεται από αυξημένη κυκλοφορία. Η κίνηση των λεωφορείων επηρεάζεται σημαντικά από την κίνηση των υπολοίπων οχημάτων, ο αριθμός των λεωφορείων που δρομολογούνται είναι μεγάλος και ανάλογα αυξημένη είναι και η επιβατική κίνηση. Στο τμήμα της οδού μεταξύ του σηματοδότη πλησίον της στάσης και του αμέσως προηγούμενου σηματοδότη από αυτόν παρατηρούνται στάθμες εξυπηρέτησης Ε και F. Η μέση καθυστέρηση στην περιοχή του σηματοδοτούμενου κόμβου ξεπερνά τα 40 δευτερόλεπτα, οπότε οι στάθμες εξυπηρέτησης είναι επίσης Ε και F.

Το 2^ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης είναι ενδιάμεσο των δύο προηγούμενων. Η κίνηση των λεωφορείων επηρεάζεται σε ορισμένες περιπτώσεις από την κίνηση των υπολοίπων οχημάτων, ενώ οι στάθμες εξυπηρέτησης είναι C και D.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν: (α) στη χρονική περίοδο μεταξύ 07:00 και 10:30, προκειμένου να καταγραφεί αυξημένη κυκλοφορία (3ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης), (β) στην περίοδο μεταξύ 11:00 και 14:30, προκειμένου να καταγραφεί μέση κυκλοφορία (2ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης) και (γ) Κυριακή για να καταγραφεί μικρή κυκλοφορία (1ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης), γιατί οποιαδήποτε άλλη ημέρα δεν παρατηρείται συνεχής χαμηλή κυκλοφορία για ικανή χρονική περίοδο.

5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Οι μετρήσεις

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα από τις 7/6/1998 έως και τις 17/6/1998, πρωινές και μεσημεριανές ώρες, και είχαν συνολική διάρκεια 38 ώρες (πίνακας 1).

Η βιντεοκάμερα που χρησιμοποιήθηκε ήταν μία Panasonic M10 με κατάλληλο αλουμινένιο τρίποδα στήριξης.

Επίσης, οι βιντεοκασέτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου VHS. Τέλος, σε όλες τις περιπτώσεις η βιντεοκάμερα τοποθετήθηκε στο πεζοδρόμιο, ακριβώς δίπλα στο οδόστρωμα της δεξιάς λωρίδας και σε απόσταση τέτοια, ώστε να καταγράφεται η ταυτόχρονη άφιξη περισσότερων του ενός λεωφορείων.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά παραμονής λεωφορείου σε στάση.

Table 2: Characteristics of bus stationing at a stop.

Χαρακτηριστικό μέγεθος	Σύνολο	Περίοδος αιχμής	Περίοδος εκτός αιχμής
Αριθμός λεωφορείων	1016	428	588
Μέση τιμή χρόνου παραμονής σε δευτερόλεπτα	15.887	17.860	14.451
Τυπική απόκλιση σε δευτερόλεπτα	7.727	8.655	6.622
Μέγιστη τιμή χρόνου παραμονής σε δευτερόλεπτα	65	65	53
Ελάχιστη τιμή χρόνου παραμονής σε δευτερόλεπτα	5	5	5
Διάστημα εμπιστοσύνης χρόνου παραμονής για $\alpha = 0.05$	$15.412 < Dt < 16.362$	$17.040 < Dt < 18.380$	$13.916 < Dt < 14.986$

Τα κυριότερα προβλήματα, που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ήταν τα εξής:

(α) Οι πεζοί που παρέμεναν μπροστά στη βιντεοκάμερα για να διασχίσουν το δρόμο. Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπήρχε καθόλου οπτική επαφή ούτε με το σηματοδότη αλλά ούτε και με τη στάση. Το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλύθηκε είτε με μικρή περιστροφή της βιντεοκάμερας προς τα δεξιά είτε με απομάκρυνση της στάσης και του σηματοδότη με τη λειτουργία zoom είτε, τέλος, με αύξηση της απόστασης της βιντεοκάμερας από το έδαφος μέσω του κατάλληλου τρίποδα.

(β) Τα φορτηγά και τα πούλμαν που εξαιτίας του μεγάλου ύψους τους έμπαιναν στο πεδίο μεταξύ της βιντεοκάμερας και του σηματοδότη περιορίζοντας την οπτική επαφή με το σηματοδότη. Το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλύθηκε με το να υπάρχει ταυτόχρονη οπτική επαφή και με τους δύο σηματοδότες. Ο ένας από τους δύο βρισκόταν στο πεζοδρόμιο δίπλα στη δεξιά λωρίδα και ο δεύτερος στη διαχωριστική νησίδα των δύο κατευθύνσεων, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις υπήρχε και σηματοδότης τοποθετημένος πάνω από την οδό.

5.2. Ποσοτική ανάλυση των συλλεγθέντων στοιχείων

5.2.1. Συνολικός χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση ανεξάρτητα από την ένδειξη σηματοδότη

Ο συνολικός αριθμός των λεωφορείων, τα οποία κατεγράφησαν, ήταν 1115. Από αυτά τα 1016, δηλαδή το 91%, σταμάτησαν στη στάση, προκειμένου να εξυπηρετήσουν επιβάτες, ενώ τα υπόλοιπα 99, δηλαδή το 9%, δεν σταμάτησαν. Για τα λεωφορεία που σταμάτησαν στη στάση υπολογίστηκε η μέση τιμή του συνολικού χρόνου παραμονής σε αυτή καθώς και μια σειρά από άλλα χαρακτηριστικά στοιχεία που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Ο χρόνος εκκένωσης t_c , δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται (α) για το άνοιγμα – κλείσιμο θυρών και (β) έως ότου οι επιβάτες αρχίσουν να επιβιβάζονται/αποβιβάζονται [1], εκτιμήθηκε με βάση στοιχεία από τη βιβλιογραφία, διάφορες μελέτες [1, 8, 11] και με βάση τις μετρήσεις ότι κυμαίνεται από 3–12 δευτερόλεπτα.

Η μεγαλύτερη τιμή του αναφέρεται σε λεωφορεία που είχαν αυξημένη πληρότητα και κατά συνέπεια παρατηρήθηκε σημαντική καθυστέρηση, κυρίως μέχρι να αρχίσουν οι επιβάτες να αποβιβάζονται.

5.2.2. Συνολικός χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση, σε σχέση με την ένδειξη του σηματοδότη

Το 76.5% των λεωφορείων σταμάτησε στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη, ενώ το υπόλοιπο 23.5% σταμάτησε στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν κόκκινη (πίνακας 3). Η διαφορά ανάμεσα στα δύο ποσοστά οφείλεται στο ότι γενικά η πράσινη ένδειξη διαρκούσε περισσότερο από την κόκκινη ένδειξη και στο ότι λόγω της συντονισμένης σηματοδότησης το κάθε λεωφορείο είχε τη δυνατότητα να διανύσει κάποια απόσταση, ακόμα και αν προηγούμενα είχε σταματήσει σε κάποια στάση (σχήμα 1).

Επίσης, το ποσοστό των λεωφορείων, που σταμάτησαν στη στάση με ένδειξη του σηματοδότη πράσινη, σε περίοδο αιχμής είναι 75.4%, και σε περίοδο εκτός αιχμής είναι 77.2%. Το ελάχιστο αυξημένο ποσοστό για την περίοδο εκτός αιχμής οφείλεται στους εξής παράγοντες:

1. Οι συγκεκριμένες στάσεις επιλέχθηκαν με βάση τα κριτήρια της αυξημένης επιβατικής κίνησης και τη θέση τους σε κεντρικές αρτηρίες. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι σε ορισμένες στάσεις η διάρκεια της πράσινης ένδειξης δεν

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά παραμονής λεωφορείου στη στάση, σε σχέση με ένδειξη σηματοδότη.

Table 3: Characteristics of bus stationing at a bus stop, in relation to traffic light indication.

Πράσινη ένδειξη του σηματοδότη			
Χαρακτηριστικό μέγεθος	Σύνολο	Περίοδος αιχμής	Περίοδος εκτός αιχμής
Αριθμός λεωφορείων	777	323	454
Μέση τιμή χρόνου παραμονής σε δευτερόλεπτα	15.440	17.195	14.192
Τυπική απόκλιση σε δευτερόλεπτα	7.416	8.121	6.602
Μέγιστη τιμή χρόνου παραμονής σε δευτερόλεπτα	56	56	53
Ελάχιστη τιμή χρόνου παραμονής σε δευτερόλεπτα	5	5	5
Διάστημα εμπιστοσύνης χρόνου παραμονής για $\alpha = 0.05$	$14.919 < Dt < 15.962$	$16.309 < Dt < 18.081$	$13.585 < Dt < 14.799$
Κόκκινη ένδειξη του σηματοδότη			
Χαρακτηριστικό μέγεθος	Σύνολο	Περίοδος αιχμής	Περίοδος εκτός αιχμής
Αριθμός λεωφορείων	239	105	134
Μέση τιμή χρόνου παραμονής σε δευτερόλεπτα	17.339	19.905	15.329
Τυπική απόκλιση σε δευτερόλεπτα	8.517	9.889	6.641
Μέγιστη τιμή χρόνου παραμονής σε δευτερόλεπτα	65	65	41
Ελάχιστη τιμή χρόνου παραμονής σε δευτερόλεπτα	5	6	5
Διάστημα εμπιστοσύνης χρόνου παραμονής για $\alpha = 0.05$	$16.259 < Dt < 15.962$	$18.014 < Dt < 21.796$	$14.205 < Dt < 16.453$

μεταβαλλόταν μεταξύ των περιόδων αιχμής και εκτός αιχμής (στάσεις Ζέρβα, 5η Χολαργού), ενώ στη στάση Σόνια μεταβαλλόταν η διάρκεια του πρασίνου.

- Επειδή η στάση Ζέρβα έδωσε και το μεγαλύτερο αριθμό παρατηρήσεων από όλες τις άλλες, επηρεάζει σημαντικά το συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Ο μεγάλος αριθμός παρατηρήσεων από τη στάση αυτή οφείλεται στο ότι έχει αυξημένη επιβατική κίνηση και είναι κεντρική, και κατά συνέπεια θεωρείται αναγκαία η λήψη στοιχείων από τέτοιου είδους στάσεις.
- Σε περιόδους αιχμής κάποια από τα λεωφορεία παρέμειναν ακινητοποιημένα σε πάρα πολύ μικρή απόσταση από τη στάση, ενώ η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη. Όταν τελικά ο οδηγός του λεωφορείου άνοιγε τις πόρτες,

στις περισσότερες των περιπτώσεων η ένδειξη του σηματοδότη είχε γίνει κόκκινη, με αποτέλεσμα να μειώνεται το συνολικό ποσοστό των λεωφορείων που αφίχθησαν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη. Αντίθετα, σε περιόδους εκτός αιχμής το φαινόμενο αυτό ήταν σημαντικά περιορισμένο.

Διαπιστώθηκε ακόμα ότι ο μέσος χρόνος παραμονής στη στάση των λεωφορείων που αφίχθησαν, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη, είναι μικρότερος κατά 1.9 δευτερόλεπτα σε σχέση με το χρόνο παραμονής των λεωφορείων που αφίχθησαν, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν κόκκινη.

Ειδικότερα, σε περίοδο αιχμής η διαφορά γίνεται 2.7 δευτερόλεπτα, ενώ σε περίοδο εκτός αιχμής είναι 1.1 δευτερόλεπτα. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στο ότι ο οδηγός

Πίνακας 4: Σύγκριση ποσοστού αφίξεων λεωφορείων σε στάση με το λόγο G/C ή R/C.

Table 4: Comparison of bus stop arrivals percentage and the ratio G/C or R/C.

Στάση	Ποσοστό λεωφορείων που αφίχθησαν στη στάση σε πράσινο	G/C	Ποσοστό λεωφορείων που αφίχθησαν στη στάση σε κόκκινο	R/C
Ζέρβα	0.569	0.611	0.431	0.389
Ιπποκράτους	0.889	0.571	0.111	0.429
3 ^η Χολαργού	0.904	0.82	0.096	0.18
5 ^η Χολαργού	0.783	0.767	0.217	0.233
Σόνια	0.798	0.478	0.202	0.522

του λεωφορείου βλέποντας ότι η ένδειξη του σηματοδότη είναι κόκκινη εξακολουθεί να παραμένει στη στάση, ώστε περισσότεροι επιβάτες να μπορέσουν να προλάβουν το λεωφορείο (πίνακας 3).

Στις τρεις από τις πέντε στάσεις συνολικά όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις διαπιστώθηκε συσχέτιση του αριθμού των λεωφορείων που αφίχθησαν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη ή κόκκινη, με το λόγο της πράσινης ή κόκκινης ένδειξης προς την περίοδο σηματοδότησης, δηλαδή τον λόγο G/C ή R/C. Ειδικότερα υπάρχει συσχέτιση των λόγων G/C ή R/C με το ποσοστό των λεωφορείων που αφικνούνται σε πράσινη ή κόκκινη ένδειξη αντίστοιχα (πίνακας 4).

Παρατηρούμε ότι στις στάσεις Ζέρβα, 3^η Χολαργού και 5^η Χολαργού οι δύο τιμές είναι κοντά σχετικά, ενώ στις στάσεις Ιπποκράτους και Σόνια τα ποσοστά των λεωφορείων είναι 1.56 φορές στην πρώτη και 1.67 φορές στη δεύτερη μεγαλύτερα από το λόγο G/C. Άρα συμπεραίνεται ότι σε όσες στάσεις ο αμέσως προηγούμενος σηματοδότης βρίσκεται μακριά από τον πλησίον στη στάση, οι δύο τιμές είναι κοντά, ενώ στην περίπτωση που ο αμέσως προηγούμενος σηματοδότης βρίσκεται κοντά στον πλησίον στη στάση ή η στάση βρίσκεται στο μέσο του οικοδομικού τετραγώνου, οι δύο τιμές διαφέρουν περίπου το ίδιο. Εξάλλου στις στάσεις Ιπποκράτους και Σόνια ο λόγος G/C είναι μικρότερος από 0.6, δηλαδή η διάρκεια της κόκκινης ένδειξης είναι αρκετά μεγάλη. Όμως θα πρέπει να επισημανθεί ότι το μέγεθος του στατιστικού δείγματος από τη συγκεκριμένη στάση είναι μικρό για να προκύψει με βεβαιότητα ότι η διαφορά οφείλεται σε αυτήν την αιτία.

Κατά συνέπεια το ποσοστό των λεωφορείων που σταματούν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη είναι πράσινη ή κόκκινη, εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

(α) Τη θέση της στάσης σε σχέση με τη διασταύρωση (πριν, μετά ή μακριά).

(β) Την απόσταση στην οποία βρίσκεται ο αμέσως προηγούμενος σηματοδότης από το σηματοδότη που επηρεάζει τη στάση (μακριά ή κοντά).

(γ) Την περίοδο της σηματοδότησης σε συνδυασμό με τις διάρκειες των επί μέρους ενδείξεων.

5.2.3. Κατανομή των αφίξεων των λεωφορείων σε κάθε στάση

Η εύρεση της θεωρητικής κατανομής των αφίξεων των λεωφορείων στη στάση γίνεται για διάστημα ίσο με την περίοδο σηματοδότησης, προκειμένου να ελεγχθεί ο τρόπος με τον οποίο φθάνουν τα λεωφορεία στη στάση σε σχέση με την περίοδο σηματοδότησης.

Τα δύο βασικά στατιστικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται είναι η μέση τιμή μ και η διακύμανση σ^2 . Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται [3, 4, 6] από τις σχέσεις:

$$\mu = \frac{(\text{συνολικός αριθμός οχημάτων})}{(\text{συνολικός αριθμός χρονικών διαστημάτων})} \text{ και}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^K F_{i\pi} \cdot (x_i - \mu)^2}{\left(\sum_{i=1}^K F_{i\pi} \right) - 1}$$

Η ομαδοποίηση των στοιχείων έγινε ξεχωριστά για κάθε μέτρηση (π.χ στάση Ζέρβα, Κυριακή 7/6/98, 11:40–14:40) σε τμήματα ίσα με την περίοδο της σηματοδότησης στη συγκεκριμένη διασταύρωση. Ο έλεγχος της καλής προσαρμογής πραγματοποιήθηκε με το κριτήριο του χ^2 , η εφαρμογή του οποίου προϋποθέτει ότι οι μετρήσεις κατατάσσονται σε ομάδες ανάλογα με την τιμή τους, για επίπεδο σημαντικότητας 0.01.

Διαπιστώθηκε ότι οι αφίξεις των λεωφορείων στις στάσεις, όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, ακολουθούν την κατανομή Poisson, δηλαδή οι αφίξεις στην κάθε στάση είναι τυχαίες.

Κατά συνέπεια, ο χρόνος που απομένει για να αλλάξει η ένδειξη του σηματοδότη, μέσα στην οποία αφίχθηκε το λεωφορείο, εξαρτάται από τις διάρκειες των ενδείξεων (πράσινης ή κόκκινης) και κατά επέκταση από τη διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης.

Πίνακας 5: Πληρότητα των λεωφορείων στις στάσεις.

Table 5: Buses loading factor at stops.

Συνολικά			Περίοδος αιχμής			Περίοδος εκτός αιχμής		
Λ	Μ	Γ	Λ	Μ	Γ	Λ	Μ	Γ
316	262	438	56	109	263	260	153	175
31.1%	25.8%	43.1%	13.1%	25.4%	61.5%	44.2%	26.0%	29.8%

5.3. Ποιοτική ανάλυση των συλλεχθέντων στοιχείων

5.3.1. Κίνηση των λεωφορείων

Η κίνηση των λεωφορείων διαφοροποιείται ανάλογα με τη θέση της στάσης σε σχέση με το σηματοδότη. Οι στάσεις, που βρίσκονται ακριβώς πριν από το σηματοδότη, εμφανίζουν μεγαλύτερο αριθμό διαφορετικών περιπτώσεων τρόπου κίνησης των λεωφορείων σε σχέση με αυτές που βρίσκονται αμέσως μετά το σηματοδότη ή στο μέσο του οικοδομικού τετραγώνου.

Για τις στάσεις Ζέρβα, Ιπποκράτους και 5^η Χολαργού, που βρίσκονται ακριβώς πριν από το σηματοδότη: το 62.4% των λεωφορείων που σταμάτησαν, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη, πρόλαβαν να διασχίσουν τη διασταύρωση με την ίδια πράσινη ένδειξη. Το υπόλοιπο 37.6% δεν πρόλαβε και αναγκαστικά περίμενε τη νέα πράσινη ένδειξη. Η αιτία, για την οποία δεν πρόλαβαν τα λεωφορεία, οφείλετο είτε στο ότι ο χρόνος, που απέμενε για να τελειώσει η πράσινη ένδειξη του σηματοδότη, ήταν μικρότερος από το συνολικό χρόνο παραμονής του λεωφορείου στη στάση (ποσοστό 79%), είτε στο ότι ο χρόνος, που απέμενε για να τελειώσει η πράσινη ένδειξη του σηματοδότη, δεν επαρκούσε για να διανύσει το λεωφορείο την απόσταση από τη στάση έως το σηματοδότη (ποσοστό 21%).

Βέβαια υπάρχουν διαφοροποιήσεις στα παραπάνω ποσοστά μεταξύ των τριών αυτών στάσεων, οι οποίες οφείλονται στους εξής παράγοντες:

- Διάρκεια της πράσινης ένδειξης: Όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των λεωφορείων που σταματούν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη είναι πράσινη, και δεν χρειάζεται να περιμένουν τη νέα πράσινη ένδειξη. Αυτό αποδεικνύεται από το ότι το ποσοστό των λεωφορείων, που δεν χρειάστηκε να περιμένουν τη νέα πράσινη ένδειξη στη στάση 5^η Χολαργού, όπου η διάρκεια της πράσινης ένδειξης ήταν 92 δευτερόλεπτα, έφθασε το 85.6%.
- Απόσταση μεταξύ του αμέσως προηγούμενου σηματοδότη και του σηματοδότη πλησίον της στάσης: Στην περίπτωση που η απόσταση είναι μικρή, όπως για παράδειγμα στη στάση Ιπποκράτους, το ποσοστό των λεωφορείων που σταματούν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη είναι πράσινη, είναι αυξημένο λόγω της συντονισμένης σηματοδότησης.

- Απόσταση μεταξύ στάσης και του πλησίον σε αυτήν σηματοδότη: Αυτή επηρεάζει το χρόνο που απαιτείται από το λεωφορείο για να διανύσει την απόσταση αυτή και να διέλθει από τη διασταύρωση. Στις ίδιες στάσεις, δηλαδή στις στάσεις Ζέρβα, Ιπποκράτους και 5^η Χολαργού, το 62.1% των λεωφορείων που αφίχθησαν, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν κόκκινη, αναχωρεί αμέσως με την πράσινη ένδειξη. Το υπόλοιπο 37.9% χρησιμοποιεί και τμήμα της νέας πράσινης ένδειξης, προκειμένου να εξυπηρετήσει τους επιβάτες. Τα συγκεκριμένα ποσοστά εξαρτώνται έμμεσα από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω και ιδιαίτερα από τους δύο πρώτους.

Επίσης, για τις προαναφερθείσες στάσεις παρατηρήθηκε για τα λεωφορεία που χρειάστηκε να περιμένουν τη νέα πράσινη ένδειξη ότι: (α) Το 80.4% διένυσε την απόσταση από τη στάση έως το σηματοδότη, όταν ο σηματοδότης είχε κόκκινη ένδειξη, ανεξάρτητα από το πόσο μικρή ή όχι ήταν η διανυόμενη απόσταση. Έτσι κάποιος αριθμός επιβατών δεν πρόλαβε το συγκεκριμένο λεωφορείο, ενώ θα μπορούσε, εάν παρέμενε στη στάση με ανοικτές τις πόρτες, μέχρι να γίνει πράσινη η ένδειξη. (β) Το 17% των λεωφορείων παρέμεινε στη στάση, γιατί το τμήμα από τη στάση έως το σηματοδότη ήταν κατειλημμένο από άλλα οχήματα. Από αυτά μόνο το 17.5% είχε ανοικτές τις πόρτες του. (γ) Το υπόλοιπο 2.6% των λεωφορείων διένυσε την απόσταση από τη στάση έως το σηματοδότη χρησιμοποιώντας και τμήμα της νέας πράσινης ένδειξης.

Για τη στάση 3^η Χολαργού, που βρίσκεται αμέσως μετά το σηματοδότη, παρατηρείται ότι το 22% των λεωφορείων που σταμάτησαν σε αυτή, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη, σταμάτησαν προηγούμενα και στο σηματοδότη.

Για τη στάση Σόνια που βρίσκεται στο μέσο του οικοδομικού τετραγώνου, ο κυριότερος παράγοντας, που επηρεάζει την κίνηση των λεωφορείων, είναι η αυξημένη κυκλοφορία στο τμήμα από τη στάση έως το σηματοδότη. Παράγοντες, όπως ο συνολικός χρόνος παραμονής του λεωφορείου στη στάση, δεν είναι τόσο σημαντικοί όσο στις προηγούμενες περιπτώσεις, γιατί το λεωφορείο, αφού εξυπηρετήσει τους επιβάτες, διανύει μια σχετικά μεγάλη απόσταση για να φτάσει στο σηματοδότη. Κατά συνέπεια, το αν θα διέλθει από τη διασταύρωση ή θα σταματήσει στην κόκκινη ένδειξη εξαρτάται από τον κυκλοφοριακό φόρτο στην οδό.

Τέλος, διαπιστώθηκε ότι συνολικά το 16.1% των λεωφορείων, τα οποία σταμάτησαν στις πέντε στάσεις όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, εμποδίστηκαν από κάποιο όχημα λίγο πριν αφιχθούν στη στάση ή αναγκάστηκαν να κάνουν κάποιον ελιγμό. Ειδικά στην περίπτωση της στάσης Ζέρβα, το αντίστοιχο ποσοστό ήταν 19%, ενώ θα έπρεπε να ήταν πολύ μικρό, αφού υπάρχει αποκλειστική λωρίδα για τα λεωφορεία. Τα οχήματα, που εμποδίζαν την κίνηση των λεωφορείων, ήταν κυρίως τα ταξί και τα φορτηγά, τα οποία σταματούσαν σε ελάχιστη απόσταση από τη στάση: (α) για να εξυπηρετήσουν επιβάτες και (β) για φορτοεκφόρτωση αγαθών αντίστοιχα.

5.3.2. Αύξηση χρόνου δρομολογίου λεωφορείου λόγω παραμονής στη στάση

Για κάθε στάση υπολογίστηκε η αύξηση χρόνου δρομολογίου λεωφορείου. Η αύξηση του χρόνου αυτού οφείλεται στο χρόνο παραμονής των λεωφορείων στη στάση για επιβίβαση και αποβίβαση επιβατών, αλλά δεν ισούται σε όλες τις περιπτώσεις με το χρόνο παραμονής στις στάσεις. Ο τρόπος υπολογισμού της αύξησης του χρόνου είναι διαφορετικός ανάλογα με το αν η άφιξη του λεωφορείου στη στάση πραγματοποιήθηκε, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη ή κόκκινη.

Στην περίπτωση που η άφιξη του λεωφορείου στη στάση πραγματοποιείται, όταν η ένδειξη του σηματοδότη είναι κόκκινη, ο αυξημένος χρόνος ισούται με το τμήμα της πράσινης ένδειξης που χρησιμοποιείται από το λεωφορείο για την εξυπηρέτηση των επιβατών, δεδομένου ότι το λεωφορείο θα παρέμενε στο φωτεινό σηματοδότη ούτως ή άλλως λόγω της κόκκινης ένδειξης.

Στην περίπτωση που η άφιξη του λεωφορείου στη στάση πραγματοποιείται, όταν η ένδειξη του σηματοδότη είναι πράσινη, ο αυξημένος χρόνος ισούται με το άθροισμα του μήματος του συνολικού χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση, που συμπίπτει με τμήμα της πράσινης ένδειξης και την αναμονή στην κόκκινη ένδειξη, δεδομένου ότι θα διερχόταν με την πράσινη ένδειξη το λεωφορείο, εάν δεν υπήρχε η στάση.

Διαπιστώθηκε ότι η μέση τιμή του αυξημένου χρόνου, όταν η άφιξη στη στάση συνέπιπτε με την πράσινη ένδειξη του σηματοδότη, είναι 20.6 δευτερόλεπτα. Αντίθετα, η μέση τιμή του χρόνου, όταν η άφιξη στη στάση συνέπιπτε με την κόκκινη ένδειξη του σηματοδότη, είναι μόνο 3.5 δευτερόλεπτα.

Η διαφορά ανάμεσα στις δύο τιμές οφείλεται στο ότι τα λεωφορεία που αφίχθησαν στις στάσεις, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη, σταμάτησαν για χρονική περίοδο στην οποία υπήρχε η δυνατότητα κίνησής τους. Επίσης, ένα σημαντικό ποσοστό από αυτά δεν πρόλαβε να διασχίσει τη

διασταύρωση και περίμενε τη νέα πράσινη ένδειξη. Αντίθετα, τα λεωφορεία που αφίχθησαν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν κόκκινη, αύξησαν το χρόνο δρομολογίου, μόνο στην περίπτωση που χρειάστηκαν και τμήμα της πράσινης ένδειξης για να εξυπηρετήσουν τους επιβάτες.

Εξάλλου η χωροθέτηση των στάσεων, στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, είναι σωστή σε σχέση με τη θέση του σηματοδοτούμενου κόμβου, αν ληφθούν υπόψη η περίοδος της σηματοδότησης και ο τρόπος που χρησιμοποιείται ο χώρος γύρω από τη στάση. Για παράδειγμα, αν η στάση Ιπποκράτους ήταν αμέσως μετά το σηματοδότη, τότε λόγω της μικρής σχετικά διάρκειας της πράσινης ένδειξης ($G/C=0.58$) πολλά από τα λεωφορεία θα σταματούσαν και στη στάση και στην κόκκινη ένδειξη του σηματοδότη, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις τα λεωφορεία θα έκλειναν τον κόμβο, οπότε το αποτέλεσμα θα ήταν δυσμενέστερο για την κυκλοφορία των οχημάτων.

5.3.3. Πληρότητα των λεωφορείων

Η πληρότητα του κάθε λεωφορείου δίνεται από μια κλίμακα λεκτικών αποδόσεων, ανάλογα με το πόσο γεμάτο ή όχι παρατηρήθηκε το λεωφορείο, τη στιγμή που έφθανε στη στάση. Έτσι το «Α» αντιστοιχεί σε λεωφορείο, στο οποίο δεν υπήρχαν καθόλου όρθιοι επιβάτες και υπήρχαν πολλές κενές θέσεις. Το «Μ» αντιστοιχεί σε λεωφορείο, στο οποίο υπήρχαν λίγοι όρθιοι επιβάτες και ελάχιστες κενές θέσεις. Τέλος, το «Γ» αντιστοιχεί σε λεωφορείο, στο οποίο υπήρχαν αρκετοί όρθιοι επιβάτες και καθόλου κενές θέσεις.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στις στάσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 5.

6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΣΤΑΣΕΙΣ

Με τα μαθηματικά πρότυπα είναι δυνατή η προσομοίωση οποιουδήποτε φαινομένου. Ειδικότερα, στη συγκεκριμένη περίπτωση επιχειρείται η προσομοίωση της στάσης των λεωφορείων για εξυπηρέτηση επιβατών σε σχέση με την ένδειξη του φωτεινού σηματοδότη.

Ανάλογα με το αν η άφιξη ενός λεωφορείου στη στάση πραγματοποιήθηκε, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη ή κόκκινη, υπολογίστηκε το τμήμα του συνολικού χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση που συμπίπτει με κάποιο τμήμα των ενδείξεων του σηματοδότη.

Ευρέθηκε ότι το 30% του συνόλου των λεωφορείων χρησιμοποίησαν τμήμα και της πράσινης και της κόκκινης ένδειξης του σηματοδότη.

Η διαδικασία ανάπτυξης των κατάλληλων μαθηματικών προτύπων χωρίζεται σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη χρησι-

μοποιήθηκε το σύνολο των διαθέσιμων στοιχείων, ανεξάρτητα από το αν η άφιξη του λεωφορείου στη στάση συνέπιπτε με την πράσινη ή με την κόκκινη ένδειξη του σηματοδότη. Προκειμένου να διαχωριστούν τα λεωφορεία που αφίχθησαν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη, από εκείνα που αφίχθησαν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν κόκκινη, χρησιμοποιήθηκε ποιοτική μεταβλητή (dummy). Η μεταβλητή αυτή λαμβάνει την τιμή 0, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη, και την τιμή 1, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν κόκκινη. Στη δεύτερη περίπτωση διαχωρίστηκε το δείγμα των λεωφορείων ανάλογα με το αν η άφιξη του λεωφορείου στη στάση συνέπιπτε με την πράσινη ή με την κόκκινη ένδειξη του σηματοδότη. Σε αυτήν την περίπτωση η ποιοτική μεταβλητή (dummy) προφανώς δεν συμμετέχει στα μαθηματικά πρότυπα.

Η μέθοδος, που χρησιμοποιήθηκε για την κατάρτιση των μαθηματικών προτύπων, ήταν η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, δηλαδή η Ανάλυση Παλινδρόμησης [4, 5]. Όλοι οι υπολογισμοί και οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή SPSS Release 8.0. Τα κριτήρια, με βάση τα οποία επιλέξαμε τα μαθηματικά πρότυπα, είναι τα εξής:

- Οι μεγάλες τιμές του πολλαπλού συντελεστή προσδιορισμού R^2 και του ελέγχου F.
- Η βέλτιστη ικανοποίηση των υποθέσεων για το τυχαίο σφάλμα ε. Ο όρος ε σχετίζεται με τα σφάλματα στους υπολογισμούς των παραμέτρων β. Η θεωρητική κατανομή, που ακολουθεί το ε, καθορίζει σε ένα σημαντικό επίπεδο το πόσο καλά ή όχι το διαθέσιμο μαθηματικό πρότυπο περιγράφει τη σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και των ανεξάρτητων μεταβλητών [5].
- Οι τιμές του ελέγχου t του Student για τις παραμέτρους β του μαθηματικού προτύπου. Απορρίφθηκαν εκείνα τα μαθηματικά πρότυπα, στα οποία η τιμή του t για μία παράμετρο β λαμβάνει τιμή εντός μιας περιοχής, οπότε προκύπτει ότι υπάρχει η πιθανότητα η παράμετρος β να λαμβάνει μηδενική τιμή. Η περιοχή απόρριψης, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05, περιλαμβάνει τιμές εντός του διαστήματος +1.96 έως -1.96 [5].

Σύμφωνα με τα προηγούμενα για κάθε μία περίπτωση αναπτύχθηκε ένα ζεύγος μαθηματικών προτύπων: το πρώτο μαθηματικό πρότυπο εκτιμά το τμήμα του συνολικού χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση, το οποίο συμπίπτει με τμήμα της πράσινης ένδειξης του σηματοδότη, και το άλλο εκτιμά το τμήμα του συνολικού χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση, το οποίο συμπίπτει με τμήμα της κόκκινης ένδειξης του σηματοδότη. Για το λόγο αυτόν είναι αναγκαίο οι δύο μαθηματικές σχέσεις να έχουν τις ίδιες ανεξάρτητες μεταβλητές, για να είναι δυνατή η οποιαδήποτε

σύγκριση μεταξύ τους. Εξάλλου το άθροισμα των αποτελεσμάτων των δύο μαθηματικών προτύπων είναι ίσο με το συνολικό χρόνο παραμονής του λεωφορείου στη στάση.

Ο συνολικός αριθμός μαθηματικών προτύπων, τα οποία αναπτύχθηκαν, είναι 6: το πρώτο ζεύγος αναφέρεται στο σύνολο των λεωφορείων που κατεγράφησαν (σχέσεις 5.1, 5.2 στον πίνακα 6), το άλλο στα λεωφορεία που αφίχθησαν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη (σχέσεις 5.3, 5.4 στον πίνακα 7), και το τρίτο ζεύγος στα λεωφορεία που αφίχθησαν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν κόκκινη (σχέσεις 5.5, 5.6 στον πίνακα 8).

Ως ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιούνται ο λόγος (G/C) και ο συνολικός χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση (Dt), αφού οι τιμές που λαμβάνουν δεν εξαρτώνται από την άφιξη ενός λεωφορείου στη στάση και την ένδειξη του σηματοδότη. Ο λόγος (G/C) εξαρτάται από το επιλεγμένο πρόγραμμα σηματοδότησης και ο χρόνος (Dt) από τον αριθμό των επιβατών που εξυπηρετούνται στη στάση.

Ο λόγος $[Dt(G)/G]$ εκφράζει το τμήμα του συνολικού χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση, το οποίο συμπίπτει με την πράσινη ένδειξη του σηματοδότη, ως ποσοστό (%). Αντίστοιχα, ο λόγος $[Dt(R)/R]$ εκφράζει το τμήμα του συνολικού χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση, το οποίο συμπίπτει με την κόκκινη ένδειξη του σηματοδότη, ως ποσοστό (%).

Τέλος, είναι σκόπιμο να δοθεί το εύρος τιμών, το οποίο προέκυψε από τις μετρήσεις, που λαμβάνουν οι ανεξάρτητες μεταβλητές των προτύπων. Αυτό είναι χρήσιμο για μελλοντικές εφαρμογές των προτύπων, επειδή εκτιμήσεις είναι δυνατόν να γίνουν, μόνον όταν οι τιμές των ανεξαρτήτων μεταβλητών βρίσκονται εντός του διαστήματος των τιμών που είναι διαθέσιμα από το δείγμα [5]. Έτσι ο συνολικός χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση (Dt) λαμβάνει τιμές από 5 έως και 65 δευτερόλεπτα και ο λόγος (G/C) λαμβάνει τιμές από 0.367 έως και 0.833.

Η συμμετοχή του χρόνου Dt στα μαθηματικά πρότυπα είναι πολύ σημαντική και φαίνεται από την αυξημένη τιμή του ελέγχου t. Επίσης, σε όλα τα μαθηματικά πρότυπα η παράμετρος της συγκεκριμένης μεταβλητής έχει θετική τιμή. Αυτό είναι απόλυτα λογικό, γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο συνολικός χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση, τόσο περισσότερο αυξάνει η πιθανότητα να συμπίπτει με μεγαλύτερο τμήμα της πράσινης ή της κόκκινης ένδειξης του σηματοδότη.

Η συμμετοχή του λόγου G/C στα μαθηματικά πρότυπα είναι στατιστικά σημαντική, αλλά όχι τόσο όσο της μεταβλητής Dt, αν ληφθεί υπόψη μόνο η τιμή του ελέγχου t. Η παράμετρος της μεταβλητής G/C έχει αρνητική τιμή για τα περισσότερα πρότυπα. Αυτό σημαίνει ότι όσο περισσότερο

Πίνακας 6: Μαθηματικά πρότυπα για το σύνολο των λεωφορείων.

Table 6: Models for all buses.

Μαθηματικά πρότυπα		F	R ²
(5.1)	$[Dt(G)/G] = -25.232 + 13.087 \cdot \ln(Dt) - 25.070 \cdot \ln\left(\frac{G}{C}\right) - 17.119 \cdot (\text{dummy})$ έλεγχος t για τις μεταβλητές: $t_{[\ln(Dt)]} = 19.046$, $t_{[\ln(G/C)]} = -15.272$, $t_{[\text{dummy}]} = -26.256$, $t_{[\text{constant}]} = -12,872$	396.33794	0.54021
(5.2)	$[Dt(R)/R] = -24.846 + 1.710 \cdot (Dt) + 10.796 \cdot \left(\frac{G}{C}\right) + 28.683 \cdot (\text{dummy})$ έλεγχος t για τις μεταβλητές: $t_{(Dt)} = 28.456$, $t_{(G/C)} = 2.533$, $t_{[\text{dummy}]} = 26.580$, $t_{[\text{constant}]} = -8,397$	565.11824	0.62620

Πίνακας 7: Μαθηματικά πρότυπα για τα λεωφορεία που αφίχθησαν στη στάση με ένδειξη σηματοδότη πράσινη.

Table 7: Models for buses arriving at stop with green traffic signal.

Μαθηματικά πρότυπα		F	R ²
(5.3)	$[Dt(G)/G] = -26,470 + 12.833 \cdot \ln(Dt) - 29.150 \cdot \ln\left(\frac{G}{C}\right)$ έλεγχος t για τις μεταβλητές: $t_{[\ln(Dt)]} = 16.126$, $t_{[\ln(G/C)]} = -16.433$, $t_{[\text{constant}]} = -11.949$	292.16691	0.43018
(5.4)	$[Dt(R)/R] = -61,725 + 69.749 \cdot \left(\frac{G}{C}\right) + 4.538 \cdot \left[\left(1 - \frac{G}{C}\right) \cdot Dt\right]$ έλεγχος t για τις μεταβλητές: $t_{[\ln(G/C)]} = 12.390$, $t_{[(1 - (G/C)) \cdot Dt]} = 24.039$, $t_{[\text{constant}]} = -14.365$	289.58180	0.42801

Πίνακας 8: Μαθηματικά πρότυπα για τα λεωφορεία που αφίχθησαν στη στάση με ένδειξη σηματοδότη κόκκινη.

Table 8: Models for buses arriving at stop with red traffic signal.

Μαθηματικά πρότυπα		F	R ²
(5.5)	$[Dt(G)/G] = -20.695 + 23.217 \cdot \left(\frac{G}{C}\right) + 1.853 \cdot \left[\left(1 - \frac{G}{C}\right) \cdot Dt\right]$ έλεγχος t για τις μεταβλητές: $t_{[\ln(G/C)]} = 3.558$, $t_{[(1 - (G/C)) \cdot Dt]} = 11.997$, $t_{[\text{constant}]} = -4.548$	72.37563	0.38017
(5.6)	$[Dt(R)/R] = -33.323 + 31.564 \cdot \ln(Dt) + 27.378 \cdot \ln\left(\frac{G}{C}\right)$ έλεγχος t για τις μεταβλητές: $t_{[\ln(Dt)]} = 15.817$, $t_{[\ln(G/C)]} = 4.526$, $t_{[\text{constant}]} = -5.168$	140.03605	0.54270

αυξάνει ο λόγος G/C, τόσο περισσότερο μειώνεται το μήμα του συνολικού χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση, το οποίο συμπίπτει με την πράσινη ένδειξη του σηματοδότη.

7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Προκειμένου να διαπιστωθεί το επίπεδο εφαρμογής και χρησιμότητας των προτεινόμενων μαθηματικών προτύπων, συλλέχθηκαν επιπλέον στοιχεία από μία στάση που δεν είχε επιλεγεί για τις συγκεκριμένες μετρήσεις (στάση 4η Χολαργού στην κάθοδο της λεωφόρου Μεσογείων προς το κέντρο της πόλης) και από μία στάση όπου πραγματοποιήθηκαν

μετρήσεις (στάση Ιπποκράτους). Επιλέχθηκαν λοιπόν οι προαναφερθείσες στάσεις, προκειμένου να αξιολογηθούν τα μαθηματικά πρότυπα.

Η στάση 4η Χολαργού, από την οποία και συλλέχθηκαν στοιχεία για πρώτη φορά, βρίσκεται ακριβώς πριν από το σηματοδότη σε απόσταση 20 μέτρων από αυτόν, ενώ ο αμέσως προηγούμενος σηματοδότης βρίσκεται σε απόσταση 80 μέτρων από το σηματοδότη πλησίον της στάσης, δηλαδή βρίσκεται σχετικά κοντά.

Το μέγεθος του δείγματος ήταν 17 λεωφορεία και κάλυπτε τις περιπτώσεις της μέσης και της αυξημένης συνολικής κυκλοφορίας (2^ο και 3^ο επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης).

Πίνακας 9: Βέλτιστα μαθηματικά πρότυπα.

Table 9: Best model configuration.

Dt, G / C, οποιαδήποτε ένδειξη του σηματοδότη	
(5.1)	$[Dt(G)/G] = -25.232 + 13.087 \cdot \ln(Dt) - 25.070 \cdot \ln\left(\frac{G}{C}\right) - 17.119 \cdot (\text{dummy})$
(5.2)	$[Dt(R)/R] = -24.846 + 1.710 \cdot (Dt) + 10.796 \cdot \left(\frac{G}{C}\right) + 28.683 \cdot (\text{dummy})$

Τα κριτήρια αξιολόγησης των αναπτυχθέντων προτύπων βασίζονται στη δυνατότητα καλής προσαρμογής τους και στο αν η μορφή τους και οι εκτιμητές των παραμέτρων είναι ορθοί. Το δεύτερο κριτήριο καλύφθηκε από την παρουσίαση των προτύπων στην προηγούμενη παράγραφο και ειδικότερα με τις τιμές των R^2 , F και t-Student. Στην παρούσα παράγραφο αναλύεται το πρώτο κριτήριο. Ο τρόπος, με τον οποίο γίνεται η εφαρμογή του κριτηρίου αυτού, είναι αρκετά απλός και βασίζεται στον υπολογισμό ενός νέου πολλαπλού συντελεστή προσδιορισμού, ο οποίος συμβολίζεται με $R^2_{\text{πρόβλεψης}}$ [5], και τον έλεγχο χ^2 καλής προσαρμογής.

Ο πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού προκύπτει με βάση ένα καινούργιο δείγμα, το οποίο συλλέχθηκε για αυτόν το σκοπό. Σύμφωνα με τους Montgomery και Peck το καινούργιο δείγμα θα πρέπει να αποτελείται τουλάχιστον από 10 παρατηρήσεις, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση του αποτελέσματος [5].

Αν υποθεθεί ότι τα $y_1, \dots, y_n$ αποτελούν τις n_1 παρατηρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να καταρτιστεί το συγκεκριμένο μαθηματικό πρότυπο και τα $y_{n_1+1}, \dots, y_{n_1+n_2}$ αποτελούν τις n_2 παρατηρήσεις του νέου δείγματος, τότε ο νέος πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού προκύπτει από τη σχέση:

$$R^2_{\text{πρόβλεψης}} = 1 - \frac{\sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} (y_i - \bar{y})^2}$$

όπου το $\hat{y}_i$ είναι προβλεπόμενη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής για την i παρατήρηση με χρήση του διατιθέμενου προτύπου και το $\bar{y}$ είναι η μέση τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής με βάση το αρχικό δείγμα. Στην περίπτωση που ο $R^2_{\text{πρόβλεψης}}$ προκύπτει σημαντικά μικρότερος από τον R^2 που αρχικά είχε υπολογιστεί, η χρήση του συγκεκριμένου προτύπου πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη όσον αφορά στα αποτελέσματα.

Σε καμία περίπτωση μαθηματικού προτύπου δεν παρατηρήθηκε μείωση του συντελεστή $R^2_{\text{πρόβλεψης}}$ σε σχέση με τον πολλαπλό συντελεστή προσδιορισμού που αρχικά είχε υπολογιστεί για κάθε μαθηματικό πρότυπο. Επομένως, με βάση

το συγκεκριμένο έλεγχο δεν υπάρχει πρόβλημα κατά τη χρήση των προτεινόμενων μαθηματικών προτύπων.

Εφαρμόζοντας τον έλεγχο του χ^2 ευρίσκεται το επίπεδο της προσαρμογής του κάθε προτύπου [6]. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται το καινούργιο στατιστικό δείγμα των 17 λεωφορείων θεωρώντας ότι τα αποτελέσματα με τη χρήση των διαφόρων προτύπων αντιστοιχούν στη θεωρητική συχνότητα και οι πραγματικές τιμές στην παρατηρούμενη συχνότητα. Αν και για κάποια πρότυπα (5.2, 5.4 και 5.5) ο έλεγχος προκύπτει οριακά ευνοϊκός, συμπεραίνεται ότι για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 (95%) κατά τον έλεγχο καλής προσαρμογής των προτύπων, το 5% των αποτελεσμάτων, που προκύπτουν από το πρότυπο, θα απορριφθούν.

Κατά συνέπεια, σύμφωνα με τις τιμές των R^2 και F, του συντελεστή $R^2_{\text{πρόβλεψης}}$ και των αποτελεσμάτων του ελέγχου χ^2 προτείνονται για χρήση τα μαθηματικά πρότυπα 5.1 και 5.2 (πίνακας 9). Για την εφαρμογή τους είναι απαραίτητο, όπως έχει αναφερθεί και προηγούμενα, να είναι γνωστοί ο συνολικός χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση Dt και ο χαρακτηριστικός για τη σηματοδότηση λόγος G/C.

Κατά την εφαρμογή των μαθηματικών προτύπων στο νέο δείγμα, προέκυψαν οι εξής επισημάνσεις:

- Κάποια αποτελέσματα, παρ' όλο που προκύπτουν ως ποσοστό, έχουν αρνητική τιμή. Σε αυτήν την περίπτωση το αποτέλεσμα θα πρέπει να θεωρείται ίσο με το 0%.
- Με βάση την προηγούμενη παρατήρηση, αν και στο συγκεκριμένο δείγμα δεν προέκυψε τέτοια περίπτωση, κάποια αποτελέσματα μπορεί να έχουν τιμή μεγαλύτερη από το 100%. Σε αυτήν την περίπτωση το αποτέλεσμα θα πρέπει να θεωρείται ίσο με το 100%.
- Υπάρχει σχετική αδυναμία στην προσέγγιση εκείνων των παρατηρήσεων που έχουν πολύ μικρή τιμή, ενώ δεν συμβαίνει αυτό, όταν οι παρατηρήσεις έχουν πολύ μεγάλη τιμή. Αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που κάποιο από τα $[Dt(G)/G]$ και $[Dt(R)/R]$ είναι ίσο με το 0.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι καταρτίστηκαν συμπληρωματικά μαθηματικά πρότυπα, στα οποία συμμετείχε και η μεταβλητή $(Dt/Y_{\text{π.ένδ.}})$. Ο όρος $[Y_{\text{π.ένδ.}}]$ αναφέρεται στο χρόνο που απαιτείται για να τελειώσει η ένδειξη (πράσινη ή κόκκινη) του σηματοδότη, κατά τη διάρκεια της οποίας

Πίνακας 10: Εφαρμογή μαθηματικών προτύπων.

Table 10: Application example.

α/α	Ένδειξη σηματοδότη η	Dt (δευτ.)	Υπόλοιπο ένδειξης (δευτ.)	Dt(G)/G από 5.1 (%)	Dt(G)/G πραγματικό (%)	Dt(R)/R από 5.2 (%)	Dt(R)/R πραγματικό (%)	Dt' από 5.1 και 5.2 (δευτ.)
1	G	12	17	19.639	21.818	2.27	0.0	11.6
2	R	30	17	14.511	23.636	61.733	48.571	29.6
3	R	27	22	13.133	9.091	56.603	62.857	27.0
4	G	24	7	28.71	12.727	22.79	48.571	23.8

κάποιο λεωφορείο σταμάτησε στη στάση για να εξυπηρετήσει επιβάτες.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ένα μαθηματικό πρότυπο για το σύνολο των λεωφορείων: $[Dt(G)/G] = -38.939 + 17.284 \cdot \ln(Dt) - 27.802 \cdot \ln\left(\frac{G}{C}\right) - 3.585 \cdot \ln\left(\frac{Dt}{Y_{\pi.ένδ.}}\right) - 16.771 \cdot (\text{dummy})$, όπου $R^2 = 0.60$ και $F = 378.32$.

Γενικά τα αποτελέσματα προκύπτουν σε σχέση με τα πρότυπα (5.1) και (5.2) έως και 29% καλύτερα λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του ελέγχου F. Περισσότερο σημαντική είναι η διαφορά στα μαθηματικά πρότυπα που αναφέρονται στα λεωφορεία που σταμάτησαν στη στάση, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν αποκλειστικά πράσινη ή κόκκινη.

Όμως για την εφαρμογή τέτοιων μαθηματικών προτύπων απαιτείται η επιπλέον διερεύνηση της ύπαρξης γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του αποτελέσματος που δίνει το μαθηματικό πρότυπο, δηλαδή της εξαρτημένης μεταβλητής και της ανεξάρτητης μεταβλητής ($Dt/Y_{\pi.ένδ.}$). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε μόνο υπολογισμός του γραμμικού συντελεστή συσχέτισης μεταξύ της εξαρτημένης ($Dt(G)/G$ ή $Dt(R)/R$) και της ανεξάρτητης μεταβλητής ($Dt/Y_{\pi.ένδ.}$). Η μεγαλύτερη τιμή που προέκυψε ήταν -0.457, που δείχνει την ύπαρξη ασθενούς γραμμικής σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών.

Η χρησιμοποίηση του λόγου ($Dt/Y_{\pi.ένδ.}$) ως μία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με την εύρεση της πιθανοτικής κατανομής της συγκεκριμένης ποσότητας. Σε αυτήν την περίπτωση με κατάλληλους διαχωρισμούς, ανάλογα με την ένδειξη του σηματοδότη και το μέγεθος της κυκλοφορίας, είναι δυνατή η εφαρμογή στα μαθηματικά πρότυπα των αναμενόμενων τιμών για κάθε περίπτωση.

8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Προκειμένου να γίνει περισσότερο κατανοητή η πρακτική χρησιμότητα των προτύπων, παρουσιάζεται ο τρόπος με βάση τον οποίο εφαρμόζονται τα προτεινόμενα μαθηματικά πρότυπα σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις λεωφορείων.

Τα λεωφορεία αυτά καταγράφηκαν στη στάση Ιπποκράτους, σε περίοδο που η συνολική κυκλοφορία ήταν αυξημένη.

Οι σχέσεις που εφαρμόζονται είναι οι 5.1 και 5.2, οι οποίες έχουν προκύψει με βάση το σύνολο των λεωφορείων. Θα πρέπει να αναφερθεί, επίσης, ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο λόγος (G/C) είναι ίσος με 0.611 και η περίοδος σηματοδότησης C ίση με 90 δευτερόλεπτα. Επιπλέον αναφέρεται ο χρόνος που απομένει για να τελειώσει η ένδειξη του σηματοδότη, μέσα στην οποία το συγκεκριμένο λεωφορείο αφίχθηκε στη στάση. Το γράμμα R σημαίνει ότι η άφιξη του λεωφορείου στη στάση πραγματοποιήθηκε, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν κόκκινη, και το γράμμα G ότι η άφιξη του λεωφορείου στη στάση πραγματοποιήθηκε, όταν η ένδειξη του σηματοδότη ήταν πράσινη (πίνακας 10).

Συγκρίνοντας τις τιμές, που προκύπτουν για τους λόγους $Dt(G)/G$ και $Dt(R)/R$ από τις σχέσεις 5.1 και 5.2, με τις πραγματικές παρατηρείται ότι αυτές διαφέρουν αρκετά σε μία μόνο περίπτωση (α/α 4). Όμως, υπολογίζοντας και το χρόνο Dt' , που προκύπτει ως το άθροισμα του $Dt(G)$ και του $Dt(R)$, τα οποία με τη σειρά τους προκύπτουν με αναγωγή σε δευτερόλεπτα των αποτελεσμάτων των σχέσεων 5.1 και 5.2, παρατηρείται ότι αυτός διαφέρει κατά μία μικρή μόνο ποσότητα από την πραγματική τιμή του χρόνου Dt. Οι διαφορές μεταξύ πραγματικής και υπολογιζόμενης τιμής είναι σαφώς μεγαλύτερες στα επιμέρους τμήματα του συγκεκριμένου αθροίσματος και σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατό να απέχουν σημαντικά από την πραγματικότητα.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία ανάλυσης της κίνησης των λεωφορείων κοντά σε σηματοδοτούμενους κόμβους και προσομοίωσης της παραμονής τους στη στάση σε σχέση με την ένδειξη του φωτεινού σηματοδότη. Αναπτύχθηκαν μαθηματικά πρότυπα για την προσομοίωση της παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση, η εφαρμογή των οποίων έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι δυνατό να δώσουν μια εικόνα για τον τρόπο, με τον οποίο τα λεωφορεία

κινούνται κοντά σε ένα σηματοδοτούμενο κόμβο, και την αλληλοεπίδρασή τους με τα υπόλοιπα οχήματα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τον καθορισμό των βέλτιστων προγραμμάτων σηματοδότησης σε ένα πρόγραμμα ενεργητικής προτεραιότητας των λεωφορείων. Με αυτόν τον τρόπο οι κινήσεις των λεωφορείων λαμβάνονται υπόψη με αυξημένους συντελεστές βαρύτητας και παράλληλα επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου αναμονής των λεωφορείων στους σηματοδοτούμενους κόμβους αξιοποιώντας την κόκκινη ένδειξη του φωτεινού σηματοδότη για την παραμονή των λεωφορείων στη στάση. Ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι το BUS TRANSYT, το οποίο αποτελεί μέρος του γενικότερου προγράμματος TRANSYT, το οποίο βελτιστοποιεί τους χρόνους έναρξης και τη διάρκεια των πράσινων ενδείξεων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος των καθυστερήσεων και στάσεων στο εξεταζόμενο δίκτυο [1, 2, 7].

Επίσης, η μεθοδολογία αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της θέσης μιας στάσης που επηρεάζεται από φωτεινό σηματοδότη. Ο έλεγχος αυτός θα μπορούσε να γίνει λαμβάνοντας υπόψη την περίοδο της σηματοδότησης, τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο χώρος γύρω από τη στάση, και τη συνολική κυκλοφορία.

Ο έλεγχος της θέσης μιας στάσης θα μπορούσε να επεκταθεί και στην εύρεση της βέλτιστης σχέσης ανάμεσα στο συνολικό χρόνο παραμονής ενός λεωφορείου στη στάση και το λόγο G/C, ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη χρησιμοποίηση της κόκκινης ένδειξης. Έτσι στην περίπτωση μιας στάσης που βρίσκεται ακριβώς πριν από το σηματοδότη και χαρακτηρίζεται από μεγάλη ζήτηση για επιβίβαση/αποβίβαση επιβατών, με αποτέλεσμα αυξημένο χρόνο παραμονής του λεωφορείου στη στάση, η μείωση του λόγου G/C θα μπορούσε να οδηγήσει στη βελτίωση της εξυπηρέτησης που παρέχουν τα λεωφορεία.

Με βάση τα προηγούμενα η συμμετοχή των λεωφορείων σε ένα πρόγραμμα σηματοδότησης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη της και τη θέση των στάσεων που επηρεάζονται από τους σηματοδότες και όχι μόνο τους συντελεστές στάθμισης των λεωφορείων με τα υπόλοιπα οχήματα, όπως συμβαίνει.

Τέλος, επειδή η αλληλοεπίδραση λεωφορείων και υπολοίπων οχημάτων είναι περισσότερο έντονη στους σηματο-

δοτούμενους κόμβους και ιδιαίτερα όταν υπάρχουν στάσεις σε μικρή απόσταση, είναι εφικτό, μέσω της ανάλυσης της κίνησης των λεωφορείων και τους παράγοντες που την επηρεάζουν, να ελεγχθεί η επίδραση στα λεωφορεία της κίνησης κάποιας άλλης κατηγορίας οχημάτων, όπως για παράδειγμα των ταξί.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία θα μπορούσε να επεκταθεί συλλέγοντας στοιχεία από περισσότερες στάσεις, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που προτείνεται, ώστε τα εύρη τιμών να είναι μεγαλύτερα και να ληφθούν υπόψη περισσότερες διαφορετικές περιπτώσεις. Επίσης, θα μπορούσε να επεκταθεί συλλέγοντας ξεχωριστά στοιχεία ανάλογα με το αν η κυκλοφορία είναι αυξημένη ή όχι, ώστε να καταρτιστούν διαφορετικά μαθηματικά πρότυπα για κάθε επίπεδο εξυπηρέτησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ι.Μ. Φραντζεσκάκης, Μ.Χ. Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, Δ.Α. Τσαμπούλας, “**Διαχείριση Κυκλοφορίας**”, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1997.
2. Ι.Μ. Φραντζεσκάκης, Γ.Α. Γιαννόπουλος, “**Σχεδιασμός των Μεταφορών και Κυκλοφοριακή Τεχνική – Τόμος 1**”, Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη, 1986.
3. Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, “**Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική**”, Συμεών, Αθήνα, 1991.
4. Π.Α. Κιόχος, “**Στατιστική**”, Interbooks, Αθήνα, 1993.
5. W. Mendenhal, T. Sincich, “**A Second Course in Statistics – Regression Analysis**”, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
6. Ι. Γκόλιας, “**Σημειώσεις για τη Χρήση Στατιστικών Κατανομών στην Περιγραφή της Κυκλοφοριακής Ροής**”, διδακτικό βοήθημα, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 1996.
7. “**Transyt-7F Users Manual**”, University of Florida, Transportation Research Center, Gainesville, Florida, Revised, February 1983.
8. “**Highway Capacity Manual**”, **Special Report 209**, Transportation Research Board, Washington D.C., 1985.
9. “**Guidelines for the Location and Design of Bus Stops**”, **TCRP Report 19**, Transportation Research Board, Washington D.C.
10. J.A. Bonnenson, J.W. Fitts, “**Traffic Data Collection Using Video-Based Systems**”, **Transportation Research Record 1477**, Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 31-39.
11. Α. Μιχαλόπουλος, Ε. Μπασδάνη, “**Διερεύνηση Λειτουργικών Χαρακτηριστικών των Μέσων Μαζικής Συγκοινωνίας της Αθήνας**”, **Τεχνικά Χρονικά – Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Α**, τόμος 4, τεύχος 4, 1984, σελ. 246-265.

Δ. Τσαμπούλας,

Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου.

Π. Γκιόκας,

Πολιτικός μηχανικός Ε.Μ.Π., Αγίας Μαρίνης 13-15, 151 27 Μελίσσια, Αθήνα.

Extended summary

Simulation of Bus Movements at Stops near Signalized Intersections

D. TSAMBOULAS

Assistant Professor N.T.U.A.

P. GIOKAS

Civil Engineer N.T.U.A.

Abstract

A significant part of total travel time for Public Transport takes place in the areas of traffic light intersections. The improvement in bus movement in those areas might provide beneficial results for all traffic in the city. Bus movements were analyzed at bus stops qualitatively and quantitatively, based on data collected at several bus stops during peak and off-peak periods. A number of models were developed for the calculation of the portion of the total time the bus remained at a stop that coincided with the green or the red indication of the traffic light.

1. INTRODUCTION

The improvement and preferential treatment of Public Transport constitute the kind of measures that might provide the most beneficial results. Using management transport systems techniques and avoiding construction of new facilities, it is possible to alleviate part of the negative consequences arising from the extended use of private car.

The aim of this paper is the analysis of bus movement near traffic light intersections and the simulation of their stops for picking up and discharging passengers in relation to the indications of traffic light (green or red). For this purpose models were developed and the corresponding advantages from their applications were determined.

2. METHODOLOGY

At a bus stop affected by the traffic light located near it, a bus arrives when the traffic light is either green or red (figure 1).

It is evident that a portion of the total time that the bus remains at the stop coincides with part of the green and red signal of the traffic light. These portions of time could be related to the length of the green and red light signal.

Models were developed to simulate such relations. They include the value G/C (green time period / total signaling

period) and the total time the bus stops at the bus stop. In certain circumstances other values are included. The models are developed for the following categories: (a) for all buses, (b) for buses arriving at the stop when the traffic light indication is green, (c) for buses arriving at the stop when the traffic light indication is red. In order to achieve the above the necessary data were collected.

A coordinated fixed time traffic light system was assumed. The models were implemented in order to determine the range of implementation as well to verify their usefulness and the validity of the results.

3. SAMPLING METHODOLOGY

Data were collected from bus stops located in central arteries having traffic direction to and from the center of the city of Athens; more specifically, in Kifissias Ave., Alexandras Ave. and Messogion Ave.

Both quantitative and qualitative data were collected. This accounts for the use of a video camera.

Stops were selected according to their distance to the traffic light, and being near enough to be affected by this. Specifically, the stops selected were located either before or after a traffic light. Furthermore, since city blocks are small, a stop in the middle of block was selected, with a minimum distance of 100 meters from the traffic light. It was considered that stops located at a distance greater than 100 meters are not affected by the traffic light.

The number of different cases encountered were many (10–12 cases), taking into account: the distance between the previous traffic light and the one near the stop, the distance between the stop and traffic light and whether the right turn was prohibited or not. Therefore, it was necessary to determine the most representative cases. Thus, the following five stops were selected for data collection:

1. A stop located before the traffic light, while having the previous traffic light at a close distance with right turn prohibition (Hippocratous stop).
2. A stop located before the traffic light, while far from the previous traffic light with right turn prohibition (5th Holargos stop).
3. A stop located before the traffic light, with the next traffic light at a relative distance from the stop, allowing right turn (Zerva stop).
4. A stop located in the middle of the block, where the driver has visual contact with the traffic light (Sonia stop).
5. A stop located after the traffic light with the previous traffic light relatively far (3rd Holargos stop).

Data were collected during all traffic conditions: reduced traffic (which is called 1st stage of services provided), increased traffic (which is called 3rd stage of services provided) and a traffic condition between the previous two (which is called 2nd stage of services provided).

The data were collected during the period from 6/7/1998 until to 17/6/1998, during the morning and afternoon hours, for a total of 38 hours (table 1).

4. ANALYSIS OF DATA

4.1. Total time the bus remained at a stop

The number of buses recorded was 1115. Of these, 91% made a stop in order to serve passengers. It was calculated that the average total time spent at the stop was equal to 15.9 seconds. During peak hours it increased by 2 seconds and during off-peak hours it decreased by 1.5 seconds (table 2).

The clearance time between successive buses (tc) was estimated to fluctuate between 3 to 12 seconds. Its highest value refers to fully loaded buses causing significant delays, mostly during boarding.

It was found that 76.5% of buses stopped when the traffic light was green, while the remaining 23.5% stopped when the traffic light was red.

The average value of the total time buses remained at the stop was 17.4 seconds, if they arrived when the traffic light was red. This time was on the average shorter by 1.9 seconds if they arrived when the traffic signal was green (table 3).

It may be concluded (table 4) that the percentage of the buses that remained at the stop when the traffic light was green or red was subject to the following factors:

- (a) The location of the stop in relation to the intersection (before, after, far).
- (b) The distance at which the previous traffic light was located (near, far).
- (c) The signaling period in combination with the duration of green/red signal.

4.2. Distribution of bus arrivals at each stop

A theoretical distribution of arrivals of buses at a stop was done for a period equal to the signaling period, in order to control the way buses arrived at a stop in relation to the signaling period.

It was found that buses arriving at the stops follow the Poisson distribution, where arrivals at each stop occur randomly, at a significance level of 0.01. This means that, at the time the bus arrived at the stop, the remaining time left for the traffic light signal to change could have any value.

4.3. Bus movements

The bus movements change according to the bus stop location in relation to the traffic light. Stops located immediately before the traffic light presented a greater number of different situations compared to those located after the traffic light and in the middle of the block.

For stops Zerva, Hippocratous, 5th of Holargos located before the traffic light: 62.4% of buses that stopped at any of the above when the signal was green, managed to cross the intersection with the same green signal. The remaining 37.6% did not manage to cross and had to wait for the new green light indication. 62.1% of buses arriving at these stops when the signal was red, had to wait for the new green light indication. The remaining 37.9% used part of the new green light indication in order to serve the passengers.

For 3rd Holargos stop, located immediately after the traffic light, the most significant observation is that 22% of the buses stopped when the traffic light indication was green and had made a stop at the previous traffic light.

As for Sonia stop located in the middle of the block, the main factor affecting the movement of buses at this stop was the severe traffic volumes between the bus stop and the traffic light.

Finally, it was concluded that overall 16% of all buses that stopped at the stops had been obstructed by another vehicle or had to make a maneuver before arriving at the stop. The vehicles obstructing the buses were mainly taxis and trucks, which stopped before the stop to serve passengers or load/unload goods, respectively.

4.4. Increase of bus trip time due to bus stops

The increase of bus trip time is caused by the time spent at a bus stop for boarding and alighting passengers. However the actual time increase is not equal in all cases to the time spent at bus stop. This is due to the time lost or gained due to the traffic signal at the near-by traffic light.

It was concluded that the average time spent by a bus at a bus stop when its arrival coincided with the green light indication was 20.6 seconds. On the other hand, the average time

when its arrival coincided with the red light indication was 3.5 seconds.

4.5. Buses loading factor

The load factor of each bus was given in a descriptive scale, depending on the number of passengers on the bus in relation to the bus capacity at the time it arrived at the stop. It was concluded that a great number of buses have increased loading factors during peak hours (table 5).

5. SIMULATION MODELS

Simulation models were developed for two categories. In the first, the total number of buses was included, regardless whether arrival of the bus at the stop coincided with the green or red signal.

In order to classify the buses, a dummy variable was used. The variable received a 0 value when the traffic signal was green at the bus arrival and a value of 1 when the traffic light signal was red.

In the second category the buses were classified depending on the arrival at the bus stop coinciding with the green or red signal. In this case the dummy variable did not participate in the model.

The method used for the estimation of the model parameters was the least squares (Regression Analysis). All calculations and controls were carried out using the software program SPSS Release 8.0.

After the Regression Analysis, 6 models out of the total developed models were selected. The models were developed in pairs, one model for the time spent in relation to green indication and the other for the time spent in relation to the red indication. The first pair (5.1, 5.2 - table 6) refer to all buses recorded, the second pair refer exclusively to the buses arriving at the stop when the signal was green (5.3, 5.4 - table 7) and the third pair to the buses arriving at the stop when the signal was red (5.5, 5.6 - table 8).

In order to choose one pair of the recommended models, they were applied with additional data collected from a new bus stop and from a stop already used. For such a choice criteria related to the models' performance, as well their practice power were used (table 10).

The above applications suggested the use of the models presented in formulae 5.1 and 5.2 with independent variables Dt (time remaining at bus stop) and G/C (ratio of green to total signal) or R/C (ratio of red to total signal). The dependent variable $Dt(G)/G$ or $Dt(R)/R$ provides for the percentage of total green or red time, respectively, that a bus remains at a bus stop (table 9).

6. CONCLUSIONS

In the above analysis a methodology was developed to analyse the movement of buses near traffic light intersections and the simulation of bus stops in relation to the traffic light signal.

The results provide a picture of the way in which the buses behave near a traffic light intersection and how they influence and are influenced by other vehicles. Moreover, these results can be used to determine a better signaling program for activated program bus preference (BUS TRANSYT).

In addition, this methodology could be used to suggest the location of a bus stop affected by traffic light signal. This could be done considering the signaling period, the way the area around the stop is used and the traffic in general.

The assessment of the bus stop location could also be extended towards finding an improvement in the relation between the total time a bus remains in a stop and the G/C ratio, in order to achieve greater use of the red signal during bus stops.

Selecting data from more stops, according to the suggested classification, could expand the methodology developed, so that the ranges of parameters values are larger, taking into consideration more different cases. It could also be expanded selecting additional data according to traffic volume increases in order to elaborate different models for each level of service.

D. Tsamboulas,

Assistant professor, Faculty of Civil Engineering, Department of Transportation Planning and Engineering, Iroon Polytechniou 9, GR-157 80 Zografou, Athens.

P. Giokas,

Civil engineer NTUA, Agias Marinis 13-15, GR-151 27 Melissia, Athens.