

Μεθοδολογία Εκτίμησης της Απόδοσης Συγκοινωνιακών Δικτύων υπό Συνθήκες Πληροφόρησης Βέλτιστης Διαδρομής

Α. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Θ. ΤΣΕΚΕΡΗΣ

Δρ Πολιτικός Μηχανικός

Περίληψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη και εφαρμογή μιας πρωτότυπης μεθοδολογίας εκτίμησης της λειτουργικής απόδοσης συγκοινωνιακών δικτύων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχει τη δυνατότητα της δυναμικής εκτίμησης της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου αλλά υπό την επίδραση παροχής πληροφοριών βέλτιστης διαδρομής στους χρήστες. Επίσης, λαμβάνει υπόψη την προσαρμογή των επιλογών μετακίνησης των χρηστών στις συνθήκες πληροφόρησης για την εκτίμηση της μελλοντικής κατάστασης του δικτύου. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων προσομοίωσης δείχνουν την ικανότητα της μεθοδολογίας να αναπαράγει τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες χρησιμοποιώντας πραγματικές πληροφορίες κυκλοφοριακών φόρτων. Οι μεγάλες συχνότητες επικαιροποίησης των πληροφοριών, που παρέχονται στους χρήστες σχετικά με τις βέλτιστες διαδρομές, όπως αυτή των τριάντα δευτερολέπτων, προκαλούν τις μεγαλύτερες βελτιώσεις των διαφόρων μεγεθών της λειτουργικής απόδοσης του δικτύου, ιδιαίτερα μετά την αναπαράσταση της προσαρμογής των επιλογών μετακίνησης των χρηστών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά στην εκτίμηση της λειτουργικής απόδοσης συγκοινωνιακών δικτύων, ιδιαίτερα οδικών δικτύων αστικής κλίμακας, με σκοπό την αποτελεσματικότερη παρακολούθηση και έλεγχο της λειτουργίας τους. Η διερεύνηση του προβλήματος αυτού είναι ιδιαίτερα περιορισμένη στη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία επικεντρώνεται κυρίως στην εκτίμηση των χρόνων μετακίνησης σε συγκεκριμένους συνδέσμους και διαδρομές του δικτύου [1]. Οι χρόνοι και οι ροές των μετακινήσεων, που εκτελούνται ανά ζεύγος ζωνών Προέλευσης - Προορισμού (Π-Π), προσδιορίζουν την κατάσταση ενός δικτύου και μπορούν να εκτιμηθούν δυναμικά, δηλαδή ανά διαδοχικά χρονικά διαστήματα εντός της ημέρας (ή της περιόδου μελέτης), μέσω των προτύπων δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας. Ωστόσο, τα υφιστάμενα πρότυπα δυναμικού καταμερισμού αναφέρονται σε πειραματικά ή απλουστευμένα δίκτυα, τα οποία φορτίζουν με βάση κάποιο (ιστορικό) πρότυπο ζήτησης Π-Π. Το πρότυπο της ζήτησης διαμερίζε-

ται χρονικά με βάση μια (θεωρούμενη ως) δεδομένη στατιστική κατανομή και αναπαριστά τις μέσες αναμενόμενες (επιθυμητές) ροές μετακινήσεων κατά την αναφερόμενη περίοδο μελέτης. Συνεπώς, οι υπάρχουσες εφαρμογές των προτύπων αυτών, που αναφέρονται κυρίως σε πειραματικά (μη πραγματικά) δίκτυα, δεν λαμβάνουν υπόψη τη χρονική εξέλιξη της τρέχουσας ζήτησης για μετακινήσεις κατά τη διαδικασία εκτίμησης της κατάστασης του δικτύου [2]. Η ζήτηση για μετακινήσεις εκφράζεται από τα μητρώα Π-Π. Τα μητρώα αυτά συνήθως βασίζονται σε πληροφορίες που προκύπτουν από μετρήσεις κυκλοφοριακών φόρτων μέσω φωρατών, δηλαδή επαγωγικών, βρόγχων τοποθετημένων κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Οι μετρούμενες πληροφορίες τροφοδοτούν τα πρότυπα δυναμικής εκτίμησης μητρώων Π-Π με σκοπό την επικαιροποίηση των δεδομένων της ζήτησης, που εισάγονται στα πρότυπα του δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας [3]. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει ένα συνδυασμένο πρότυπο δυναμικής εκτίμησης μητρώων Π-Π και δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας για την εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης οδικών δικτύων μεγάλης κλίμακας σε πραγματικό χρόνο.

Επιπρόσθετα, οι υφιστάμενες διερευνήσεις για την εφαρμογή μέτρων δυναμικής κυκλοφοριακής διαχείρισης και ελέγχου, όπως η καθοδήγηση (παροχή πληροφοριών) βέλτιστης διαδρομής, περιορίζονται στην αξιολόγηση της σκοπιμότητας και την ανάλυση των κριτηρίων σχεδιασμού τους σε πειραματικά ή γραμμικά δίκτυα (αυτοκινητόδρομους) και εκτός πραγματικού χρόνου (off-line) [4, 5]. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη μεθοδολογική προσέγγιση για την προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο των επιπτώσεων της καθοδήγησης βέλτιστης διαδρομής στην κατάσταση εκτεταμένων δικτύων μεταφορών, χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα πρότυπα.

Επίσης, η διερεύνηση της επίδρασης της καθοδήγησης βέλτιστης διαδρομής επεκτείνεται στην εκτίμηση της κατάστασης του δικτύου μετά την προσαρμογή της συμπεριφοράς μετακίνησης των χρηστών στις νέες κυκλοφοριακές συνθήκες. Η συμπεριφορά αυτή αφορά στους μηχανισμούς

προσαρμογής του χρόνου αναχώρησης και της επιλογής διαδρομής των χρηστών. Επομένως, η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της απόδοσης δικτύων καθιστά εφικτή την ανάλυση της σχέσης αλληλεπίδρασης μεταξύ της καθοδήγησης διαδρομής και της δυναμικής εξέλιξης της ζήτησης για μετακινήσεις. Στα ακόλουθα κεφάλαια περιγράφεται αναλυτικά μια ολοκληρωμένη μεθοδολογική προσέγγιση για την εκτίμηση της λειτουργικής απόδοσης συγκοινωνιακών δικτύων, όπως εκφράζεται από διαφορετικά μεγέθη (βλ. κεφάλαιο 4), σύμφωνα με τις απαιτήσεις εφαρμογής των σύγχρονων μέτρων κυκλοφοριακού ελέγχου σε αστικές περιοχές. Επιπρόσθετα, εκτεταμένα πειράματα προσομοίωσης παρουσιάζονται για την κατανόηση και την ερμηνεία της χρήσης κάθε επιμέρους παράγοντα (σταδίου) της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

- $\alpha_{ij}^{\tau,d}$: ποσοστό των μετακινήσεων μεταξύ του ζεύγους $(i-j)$ που αναχωρούν κατά το διάστημα αναχωρήσεων τ_d και χρησιμοποιούν το σύνδεσμο m κατά το διάστημα μέτρησης (ή παρατήρησης) τ
- μ : εκτιμώμενη εκθετική παράμετρος
- π : χρονικό διάστημα ελέγχου
- T : συνολική χρονική περίοδος μελέτης
- KAE : Κάτω Διάστημα Εμπιστοσύνης
- AUE : Άνω Διάστημα Εμπιστοσύνης
- ΣMA : Σφάλμα Μεταβολής στη Δομή του μητρώου
- MAE : Μήκος Διαστήματος Εμπιστοσύνης
- DA : Δείκτης Απόδοσης του δικτύου
- l_τ : μήκος του διαστήματος τ
- n : συνολικός αριθμός διαστημάτων παρατήρησης
- t_m^e : χρόνος εισόδου στο σύνδεσμο m
- t_m^0 : χρόνος μετακίνησης σε συνθήκες ελεύθερης ροής
- t_m^c : χρόνος μετακίνησης όταν $\tilde{y}_m^\tau = y_m^c$
- t_m^u : χρόνος μετακίνησης όταν $\tilde{y}_m^\tau \leq y_m^c$
- t_m^s : χρόνος μετακίνησης όταν $\tilde{y}_m^\tau > y_m^c$
- $x_{ij}^{\tau,d}$: εκτιμώμενη ροή μετακινήσεων μεταξύ $(i-j)$
- $\tilde{x}_{ij}^{\tau,d}$: πρότυπη ροή μετακινήσεων μεταξύ $(i-j)$
- y_m^τ : μετρούμενος κυκλοφοριακός φόρτος (οχήμ.) στο σύνδεσμο m κατά το διάστημα τ
- \tilde{y}_m^τ : εκτιμώμενος κυκλοφοριακός φόρτος (οχήμ.) στο σύνδεσμο m κατά το διάστημα τ
- y_m^c : κυκλοφοριακή ικανότητα του συνδέσμου m
- Z : αριθμός ζευγών Π-Π με ροές μετακινήσεων κατά την περίοδο T
- GEH : στατιστικό μέγεθος σφάλματος των εκτιμώμενων κυκλοφοριακών φόρτων
- $FFTT$: χρόνος μετακίνησης υπό συνθήκες ελεύθερης ροής (οχήμ.-ώρες / ώρα)
- TD : συνολικός απολεσθείς χρόνος λόγω συμφόρησης και ουρών (οχήμ.-ώρες / ώρα)
- VHT : συνολικός χρόνος μετακίνησης (οχήμ.-ώρες / ώρα)

VKT : συνολική απόσταση μετακίνησης (οχήμ.-χλμ. / ώρα)

ATS : μέση ταχύτητα μετακίνησης (χλμ. / ώρα)

3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

3.1. Εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της λειτουργικής απόδοσης συγκοινωνιακών δικτύων μπορεί να διακριθεί σε τρία στάδια, η διαγραμματική ροή των οποίων απεικονίζεται στο σχήμα 1. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου μέσα από ένα συνδυασμένο πρότυπο δυναμικής εκτίμησης μητρώων Π-Π και δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας. Το πρότυπο της δυναμικής εκτίμησης μητρώων Π-Π επικαιροποιεί (προσαρμόζει) το πρότυπο της δυναμικής (χρονικά μεταβαλλόμενης) ζήτησης μετακινήσεων με βάση πληροφορίες κυκλοφοριακών φόρτων που συλλέγονται και τροφοδοτούνται σε αυτό αυτόματα (σε πραγματικό χρόνο). Η διαδικασία αυτή αναπαριστά τις μεταβολές της χρονικής και χωρικής κατανομής της ζήτησης, σε σύγκριση με το πρότυπο της δυναμικής ζήτησης. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να οφείλονται στο πρόγραμμα δραστηριοτήτων των χρηστών για κάθε συγκεκριμένη ημέρα της εβδομάδας αλλά και σε τυχαίους παράγοντες, π.χ. οι καιρικές συνθήκες.

Το πρότυπο της δυναμικής εκτίμησης μητρώων Π-Π βασίζεται στην αρχή της μεγιστοποίησης της εντροπίας και επιλύεται με τη μέθοδο της αλγεβρικής ανασύνθεσης σε συνδυασμό με την εύρεση κατά Newton μιας διαγωνίας κλίσης σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Αναλυτική περιγραφή του χρησιμοποιούμενου προτύπου και της μαθηματικής του επίλυσης παρέχονται σε προηγούμενη εργασία [6]. Συνοπτικά, το συγκεκριμένο πρότυπο μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij}^{\tau,d} \left[\log \left(\frac{x_{ij}^{\tau,d}}{\tilde{x}_{ij}^{\tau,d}} \right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

όπου $x_{ij}^{\tau,d}$ είναι τα στοιχεία του (ζητούμενου) δυναμικά εκτιμώμενου μητρώου Π-Π, τα οποία αναπαριστούν τον αριθμό των οχημάτων μεταξύ του ζεύγους $(i-j)$ που αναχωρούν από τη ζώνη προέλευσης $i \in N$ κατά το χρονικό διάστημα αναχωρήσεων τ_d και κατευθύνονται προς τη ζώνη προορισμού $j \in N$, όπου N είναι το σύνολο των ζωνών (αναχωρήσεων / αφίξεων των μετακινήσεων), στις οποίες διαμερίζεται χωρικά το δίκτυο. Αντίστοιχα, τα στοιχεία $\tilde{x}_{ij}^{\tau,d}$ συνθέτουν το πρότυπο της δυναμικής ζήτησης (target O-D matrix). Το

πρότυπο αυτό μπορεί να προέρχεται από απογραφές μετακινήσεων, εκτιμήσεις προτύπων κατανομής των μετακινήσεων ή/και ιστορικές δυναμικές εκτιμήσεις μητρώων Π-Π για την περιοχή μελέτης.

Η βασική σχέση, που περιγράφει την επίλυση του αναφερόμενου συνδυασμένου προβλήματος, υπό τη μορφή περιορισμού στην αντικειμενική συνάρτηση (3.1), διατυπώνεται ως εξής:

$$y_m^r = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \alpha_{ij}^{rd\tau} x_{ij}^{rd}, \forall m \in M_O, \forall \tau \in T \quad (3.2)$$

όπου y_m^r είναι ο μετρούμενος κυκλοφοριακός φόρτος στον παρατηρούμενο σύνδεσμο m κατά τη διάρκεια του διαστήματος μέτρησης ή παρατήρησης τ (π.χ. διάρκειας 15 λεπτών). Το M_O εκφράζει το σύνολο των παρατηρούμενων συνδέσμων στο δίκτυο, ενώ το T είναι η συνολική περίοδος μελέτης (π.χ. η περίοδος πρωινής αιχμής), η οποία υποδιαιρείται σε ένα σύνολο χρονικών διαστημάτων μέτρησης $\{1, 2, \dots, \tau, \dots\}$. Το δεξιό μέρος της σχ. (3.2) αντιστοιχεί στον εκτιμώμενο κυκλοφοριακό φόρτο \hat{y}_m^r του συνδέσμου m στο διάστημα τ . Ο φόρτος \hat{y}_m^r αποτελεί συνάρτηση του δυναμικά εκτιμώμενου μητρώου Π-Π x_{ij}^{rd} και της παραμέτρου $\alpha_{ij}^{rd\tau}$. Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στο ποσοστό χρησιμοποίησης του συνδέσμου m και αναπαριστά το ποσοστό των μετακινήσεων μεταξύ του ζεύγους $(i - j)$ που αναχωρούν κατά το διάστημα αναχώρησης τ_d και χρησιμοποιούν το σύνδεσμο m κατά τη διάρκεια του διαστήματος μέτρησης τ .

Τα ποσοστά $\alpha_{ij}^{rd\tau}$ υπολογίζονται με βάση τις εκτιμώμενες διαδρομές ελάχιστου κόστους μεταξύ του ζεύγους $(i - j)$. Η εκτίμηση αυτή παρέχεται μέσα από ένα μακροσκοπικό πρότυπο προσομοίωσης του δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας έτσι, όπως αναπτύχθηκε από τους Stathopoulos et al. [7] και εφαρμόστηκε για το σκοπό αυτό σε προηγούμενη εργασία [6]. Το συγκεκριμένο πρότυπο επιτρέπει τον υπολογισμό των $\alpha_{ij}^{rd\tau}$ σε εκτεταμένα συγκοινωνιακά δίκτυα, ενώ η επίλυσή του απαιτεί ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο (μικρότερο του ενός λεπτού) χρησιμοποιώντας συνήθεις προσωπικούς υπολογιστές (PCs).

Ο υπολογισμός των διαδρομών ελάχιστου κόστους βασίζεται στο ιστορικό κόστος μετακίνησης των χρηστών. Σύμφωνα με αυτό, κάθε χρήστης επιλέγει τη διαδρομή μετακίνησής του με βάση την ιστορική (εμπειρική) αντίληψη του σχετικά με τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες τη στιγμή της αναχώρησής του. Τα κόστη μετακίνησης εκτιμώνται κατά την έναρξη κάθε χρονικού διαστήματος τ από κάθε ζώνη προέλευσης i σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις [8]:

$$Av \hat{y}_m^r \leq y_m^c, \quad t_m^u = t_m^0 + \left(\frac{\hat{y}_m^r}{y_m^c} \right)^\mu (t_m^c - t_m^e), \quad (3.3)$$

$$Av \hat{y}_m^r > y_m^c, \quad t_m^s = t_m^u + \frac{1}{2} \left(\frac{\hat{y}_m^r}{y_m^c} - 1 \right) \ell_\tau, \quad (3.4)$$

όπου t_m^0 είναι ο χρόνος μετακίνησης υπό συνθήκες ελεύθερης ροής, t_m^e είναι ο χρόνος μετακίνησης, όταν η κυκλοφοριακή ροή εξισώνεται με την κυκλοφοριακή ικανότητα y_m^c στο σύνδεσμο m , t_m^c είναι ο χρόνος εισόδου στο σύνδεσμο m κατά τη διάρκεια του διαστήματος παρατήρησης τ , ℓ_τ είναι η διάρκεια του διαστήματος τ και μ είναι εκτιμώμενη εκθετική παράμετρος ($\mu = 2,5$ για το δίκτυο της παρούσας εφαρμογής).

Η εξίσωση (3.3) παρέχει το χρόνο μετακίνησης t_m^u υπό συνθήκες συμφόρησης λαμβάνοντας υπόψη την κυκλοφοριακή ικανότητα του συνδέσμου m , όταν $\hat{y}_m^r \leq y_m^c$. Η εξίσωση (3.4) παρέχει το χρόνο μετακίνησης t_m^s υπό συνθήκες υπερκορεσμού ($\hat{y}_m^r > y_m^c$), ενσωματώνοντας τον απολεσθέντα χρόνο λόγω ουρών στα κατάντη του συνδέσμου m .

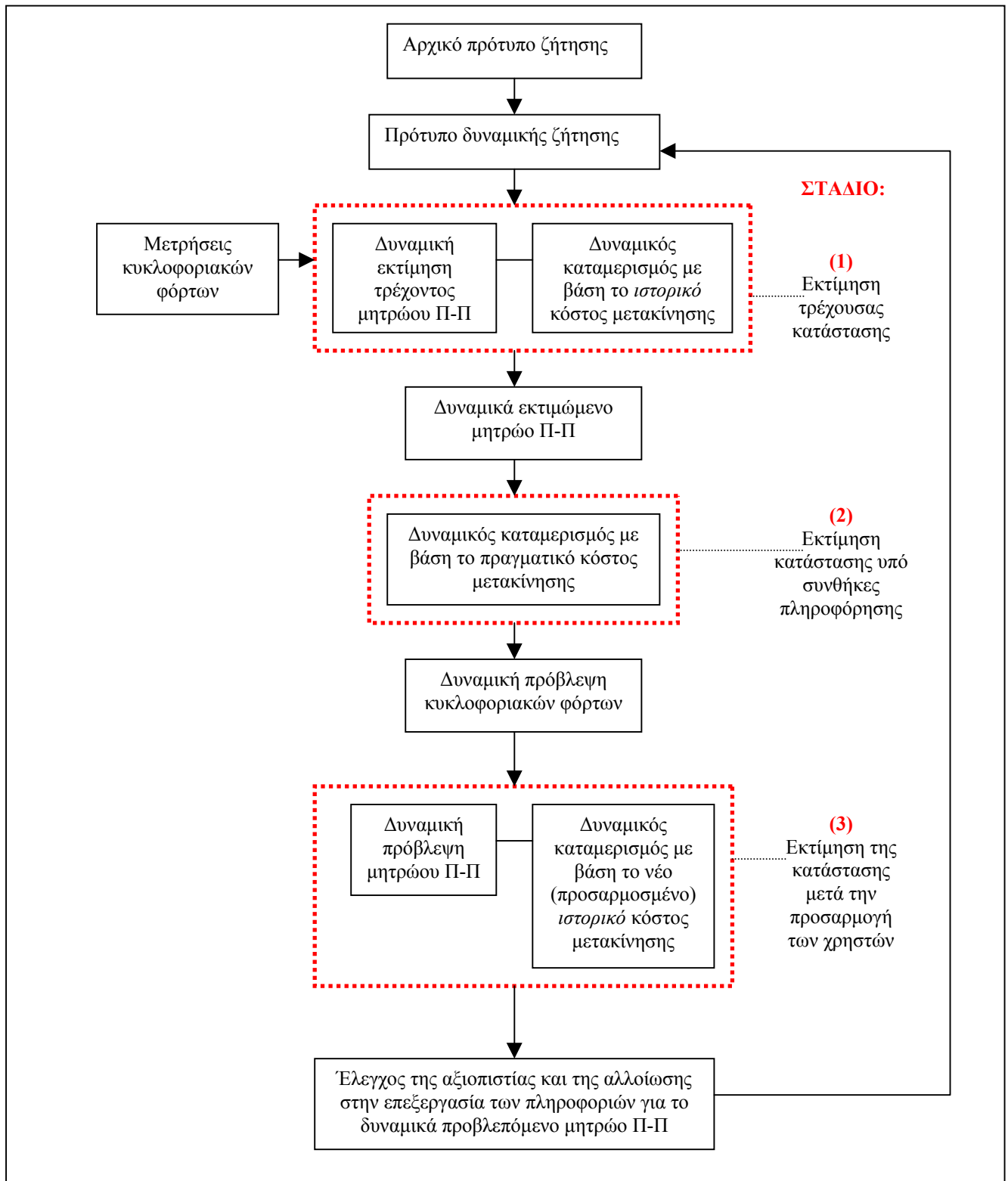
Η ακρίβεια της αναπαράστασης της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου, χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη προσέγγιση, βασίζεται στην εύρεση ενός τέτοιου συνόλου μητρικών στοιχείων x_{ij}^{rd} και ποσοστών $\alpha_{ij}^{rd\tau}$, ώστε η αλλοίωση στην επεξεργασία των πληροφοριών που προκύπτουν από τους μετρούμενους κυκλοφοριακούς φόρτους y_m^r στους παρατηρούμενους συνδέσμους $m \in M_O$, να είναι (στατιστικά) μη σημαντική.

Η αλλοίωση αυτή μετράται εδώ χρησιμοποιώντας το στατιστικό μέγεθος GEH [9] για τη σύγκριση της διαφοράς μεταξύ των μετρούμενων κυκλοφοριακών φόρτων y_m^r και των αντίστοιχων εκτιμώμενων φόρτων \hat{y}_m^r , οι οποίοι προκύπτουν από το δυναμικό καταμερισμό του εκτιμώμενου μητρώου Π-Π στο δίκτυο.

Η μέση τιμή του GEH μεταξύ όλων των παρατηρούμενων συνδέσμων $m \in M_O$ για κάθε διάστημα μέτρησης $\tau \in T$ υπολογίζεται ως εξής:

$$GEH = \sqrt{\frac{(y_m^r - \hat{y}_m^r)^2}{(y_m^r + \hat{y}_m^r)/2}} \quad (3.5)$$

Σύμφωνα με τα κριτήρια αποδοχής της εκτιμώμενης αλλοίωσης στην επεξεργασία πληροφοριών [9], στην περίπτωση όπου η μέση τιμή του GEH είναι μικρότερη από 5 ($GEH < 5$) για το 85% τουλάχιστον των παρατηρούμενων συνδέσμων $m \in M_O$, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι οι εκτιμώμενοι φόρτοι \hat{y}_m^r αναπαράγουν ικανοποιητικά τις πραγματικές (μετρούμενες) κυκλοφοριακές συνθήκες. Με άλλα λόγια, στην περίπτωση αυτή, η αλλοίωση στην επεξεργασία των μετρούμενων πληροφοριών είναι στατιστικά μη σημαντική.



Σχήμα 1: Διαγραμματική αναπαράσταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την εκτίμηση της λειτουργικής απόδοσης συγκοινωνιακών δικτύων υπό συνθήκες πληροφόρησης βέλτιστης διαδρομής.

Figure 1: Schematic representation of the proposed methodology for estimating the traffic network performance under route guidance information.

3.2. Εκτίμηση της κατάστασης υπό συνθήκες πληροφόρησης

Το δεύτερο στάδιο της περιγραφόμενης μεθοδολογίας περιλαμβάνει την εκτίμηση της κατάστασης του δικτύου υπό συνθήκες πληροφόρησης βέλτιστης διαδρομής. Στο στάδιο αυτό διερευνάται η επίδραση της παροχής πληροφοριών βέλτιστης διαδρομής στους χρήστες σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή κατά τη διάρκεια μετακίνησής τους στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας διαφορετικές συχνότητες επικαιροποίησης της πληροφόρησης. Οι συχνότητες αυτές προσδιορίζονται από τα διαστήματα ελέγχου π , τα οποία μπορεί να είναι χρονικά ίσα ή, συνήθως, υποδιαίρεσεις των διαστημάτων παρατήρησης τ .

Η εκτίμηση της απόδοσης στο στάδιο αυτό παρέχεται μέσα από τη φόρτιση του δυναμικά εκτιμώμενου μητρώου Π-Π με στοιχεία $x_{ij}^{r,d}$ στο δίκτυο χρησιμοποιώντας ένα δεύτερο πρότυπο προσομοίωσης του *δυναμικού* καταμερισμού της κυκλοφορίας, αναφερόμενο ως *DNA* (Dynamic Network Assignment) [10]. Το πρότυπο αυτό βασίζεται στις ίδιες διαδικασίες εύρεσης των δένδρων ελάχιστου κόστους και τις συναρτήσεις υπολογισμού του κόστους μετακίνησης, οι οποίες χρησιμοποιούνται και από το πρότυπο δυναμικού καταμερισμού, το οποίο περιγράφηκε στην ενότητα 3.1. Ωστόσο, οι διαδρομές ελάχιστου κόστους μεταξύ του ζεύγους $(i - j)$, οι οποίες υπολογίζονται στην έναρξη κάθε διαστήματος παρατήρησης τ , επικαιροποιούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα ελέγχου π (π.χ. διάρκειας ενός λεπτού). Η επικαιροποίηση αυτή βασίζεται στις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες στο δίκτυο, δηλαδή το κόστος μετακίνησης του προηγούμενου διαστήματος $\pi - 1$.

Η περιγραφόμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται σε ένα πλαίσιο κυλιόμενου οριζοντιακού πραγματικού χρόνου μέχρι την ολοκλήρωση όλων των διαστημάτων τ , δηλαδή τον τερματισμό της συνολικής χρονικής περιόδου μελέτης T . Το πρότυπο *DNA* αναπαριστά (προσομοιώνει) τις μεταβολές στην κατάσταση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, υπό την παραδοχή ότι όλοι οι χρήστες λαμβάνουν και αποδέχονται τις πληροφορίες υπόδειξης των διαδρομών ελάχιστου κόστους προς τις ζώνες των επιθυμητών προορισμών j εντός κάθε διαστήματος ελέγχου π . Μια τέτοια παραδοχή εξαρτάται από το είδος της διαθέσιμης τεχνολογίας καθώς και το είδος της διεπιφάνειας ανάμεσα στο χρήστη και την τεχνολογία (man-machine interface). Στην παρούσα εργασία η παραδοχή της πλήρους αποδοχής της πληροφορίας εκλαμβάνεται ως η ευνοϊκότερη δυνατή κατάσταση (best-case scenario). Το ενδεχόμενο της μη πρόσβασης στην πληροφόρηση ή της μερικής αποδοχής της πληροφορίας από τους χρήστες μπορεί να αντιμετωπιστεί με μια στοχαστική διαδικασία διπλού παράλληλου καταμερισμού της κυκλοφορίας στο δίκτυο [11].

Μία από τις κυριότερες διαφορές του προτύπου *DNA* σε σύγκριση με αυτό, που βασίζεται στο ιστορικό κόστος μετακίνησης, είναι η παραδοχή του πρώτου ότι το σύνολο της κυκλοφοριακής ζήτησης κατά τη συνολική χρονική

περίοδο T παραμένει σταθερό. Ωστόσο, η παραδοχή αυτή δεν ισχύει για κάθε διάστημα ελέγχου π , λόγω των ουρών οι οποίες σχηματίζονται στους κόμβους που βρίσκονται υπό συνθήκες κορεσμού, δηλαδή όταν $\hat{y}_m^r > y_m^c$. Οι ουρές αυτές αναπαριστώνται μέσω των *μητρώων ουρών*, κάθε στοιχείο των οποίων εκφράζει την κυκλοφοριακή ζήτηση που δεν εξυπηρετείται κατά τη διάρκεια του διαστήματος π . Από την άλλη πλευρά, οι μετακινήσεις, που δεν ολοκληρώνονται κατά τη διάρκεια του π , αναπαριστώνται μέσα από τα *μητρώα μεταβατικής ζήτησης*. Κάθε στοιχείο του μητρώου αυτού εκφράζει τον αριθμό των οχημάτων των ημιτελών μετακινήσεων, τα οποία (οχήματα) «αποθηκεύονται» στο σημείο του τελικού κόμβου (κατάντη) του συνδέσμου m , στον οποίο κινούνται κατά τη στιγμή τερματισμού του διαστήματος π .

Τα στοιχεία των μητρώων των ουρών και της μεταβατικής ζήτησης προστίθενται σε αυτά του εκτιμώμενου μητρώου ζήτησης για το συγκεκριμένο διάστημα π . Το τελευταίο μητρώο προκύπτει μέσα από παραδοχή σχετικά με τον τρόπο που οι μετακινήσεις $x_{ij}^{r,d}$ (οι οποίες εκτιμώνται με βάση το ιστορικό κόστος για το διάστημα παρακολούθησης τ) κατανέμονται στα επιμέρους διαστήματα ελέγχου π . Στην παρούσα εφαρμογή οι εκτιμώμενες μετακινήσεις $x_{ij}^{r,d}$ κατανέμονται (διαμερίζονται) ομοίμορφα κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος παρατήρησης τ . Το μητρώο, που προκύπτει από το άθροισμα των στοιχείων των μητρώων των ουρών της μεταβατικής ζήτησης και της (διαμερισμένης) ζήτησης, συνιστά τη συνολική κυκλοφοριακή ζήτηση που πρόκειται να καταμεριστεί στο δίκτυο κατά τη διάρκεια του επόμενου διαστήματος ελέγχου $\pi + 1$.

3.3. Εκτίμηση κατάστασης μετά την προσαρμογή της ζήτησης στις συνθήκες πληροφόρησης

Το τρίτο στάδιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας αφορά στην πρόβλεψη της ζήτησης, δηλαδή την εκτίμηση των μεταβολών των δυναμικά εκτιμώμενων μετακινήσεων $x_{ij}^{r,d}$ λόγω της προσαρμογής της συμπεριφοράς επιλογής χρόνου αναχώρησης και διαδρομής των χρηστών στις νέες κυκλοφοριακές συνθήκες υπό την επίδραση πληροφόρησης. Πιο συγκεκριμένα, οι κυκλοφοριακοί φόρτοι \hat{y}_m^π , οι οποίοι εκτιμώνται από το πρότυπο *DNA* κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος ελέγχου π , αθροίζονται ανά διαστήματα διάρκειας ίσης με αυτή του διαστήματος παρατήρησης τ . Στη συνέχεια, οι αθροιζόμενοι κυκλοφοριακοί φόρτοι $\sum_{\pi \in \tau} \hat{y}_m^\pi$ για κάθε παρατηρούμενο σύνδεσμο $m \in M_o$ χρησιμοποιούνται ως οι νέες «πραγματικές» μετρούμενες πληροφορίες για τη δυναμική πρόβλεψη του μητρώου Π-Π. Για την πρόβλεψη αυτή χρησιμοποιείται το συνδυασμένο πρότυπο δυναμικής εκτίμησης μητρώων Π-Π και δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας με βάση το ιστορικό κόστος μετακίνησης (βλ. 3.1). Στην περίπτωση αυτή, το εκτιμώμενο κόστος αναπαρι-

στά το νέο ιστορικό κόστος μετακίνησης των χρηστών έτσι, όπως έχει προσαρμοστεί λόγω των νέων κυκλοφοριακών συνθηκών υπό την επίδραση πληροφόρησης.

Στη συνέχεια η μεθοδολογία ελέγχει την αποτελεσματικότητα του συνδυασμένου προτύπου σε σχέση με την ικανότητα της αναπαραγωγής των νέων «πραγματικών» κυκλοφοριακών φόρτων από τους προβλεπόμενους κυκλοφοριακούς φόρτους σε κάθε διάστημα παρατήρησης $\tau \in T$. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το στατιστικό μέγεθος του GEH (βλ. σχ. (3.5)). Επιπρόσθετα, η μεθοδολογία εκτιμά την αξιοπιστία του δυναμικά προβλεπόμενου μητρώου Π-Π, δηλαδή το βαθμό μεταβολής της δομής του σε σύγκριση με τη δομή του προτύπου της δυναμικής ζήτησης, το οποίο χρησιμοποιείται ως η αρχική λύση στη διαδικασία επίλυσης του συνδυασμένου προτύπου. Ένα κατάλληλο μέγεθος εκτίμησης της αξιοπιστίας του δυναμικά εκτιμώμενου (ή προβλεπόμενου) μητρώου Π-Π παρέχεται από το Διάστημα Εμπιστοσύνης (ΔE) του Σφάλματος Μεταβολής στη Δομή ($\Sigma \Delta$) του μητρώου, το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta E = \sum_{\tau \in T} \frac{(\Sigma \Delta)_{\tau}}{n} \mp t_{95} \left[\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad (3.6)$$

$$\text{όπου } (\Sigma \Delta)_{\tau} = \frac{1}{Z} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left| \frac{x_{ij}^{\tau} - \hat{x}_{ij}^{\tau}}{\hat{x}_{ij}^{\tau}} \right|$$

$$\text{και } \sigma = \sqrt{\frac{n \sum_{\tau \in T} (\Sigma \Delta)_{\tau}^2 - \left[\sum_{\tau \in T} (\Sigma \Delta)_{\tau} \right]^2}{n(n-1)}}$$

με n τον αριθμό των διαστημάτων μέτρησης (παρατήρησης) και Z τον αριθμό των ζευγών Π-Π με ροές μετακινήσεων κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης T . Η εξίσωση (3.6) παρέχει το Κάτω Διάστημα Εμπιστοσύνης ($K\Delta E$) και το Άνω Διάστημα Εμπιστοσύνης ($A\Delta E$), ανάλογα με το αρνητικό ή το θετικό πρόσημο αντίστοιχα, του $\Sigma \Delta$ των δυναμικά εκτιμώμενων (ή προβλεπόμενων) μητρώων Π-Π σε σύγκριση με τη δομή του προτύπου της δυναμικής ζήτησης. Η τιμή t_{95} προσδιορίζει το $K\Delta E$ και το $A\Delta E$ σύμφωνα με το επίπεδο εμπιστοσύνης του 95% της στατιστικής κατανομής t . Το εκτιμώμενο μέγεθος της αξιοπιστίας εκφράζει την έκταση πιθανών μεταβολών στη συνήθη συμπεριφορά επιλογών Π-Π των χρηστών, όπως αντανακλάται στο πρότυπο της δυναμικής ζήτησης, λόγω της παροχής πληροφοριών βέλτιστης διαδρομής.

4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της λειτουργικής απόδοσης εφαρμόζεται στο πραγματικό δίκτυο της

κεντρικής περιοχής της Αθήνας, η οποία περικλείεται περίπου από τα όρια του εσωτερικού (μικρού) δακτυλίου, με μητρώο Π-Π διαστάσεων (44×44), δηλαδή περιλαμβάνει 1936 ζεύγη Π-Π. Η χρονική περίοδος μελέτης αντιστοιχεί στη συνολική πρωινή περίοδο $T = \{6:00 \text{ π.μ.} - 9:00 \text{ π.μ.}\}$ μιας Δευτέρας του μήνα Φεβρουαρίου του έτους 2000. Η σύνθεση του αντίστοιχου προτύπου δυναμικής ζήτησης βασίζεται σε ιστορικές απογραφές της ζήτησης μετακινήσεων στη συγκεκριμένη περιοχή σε συνδυασμό με μια χρονοσειρά δυναμικά εκτιμώμενων μητρώων Π-Π και αντίστοιχων μετρήσεων κυκλοφοριακών φόρτων, οι οποίες συλλέχθηκαν κατά τη χρονική περίοδο 1989-2000 [12]. Οι κυκλοφοριακές μετρήσεις, οι οποίες διατίθενται από το Εργαστήριο Σιδηροδρομικής και Μεταφορών του Ε.Μ.Π., προέρχονται από ένα σύστημα φωρατών, εγκατεστημένων για το σκοπό αυτό σε κύριες οδικές αρτηρίες του δικτύου της Αθήνας [6, 7]. Οι φωρατές παρατηρούν περίπου το 10% του συνολικού αριθμού των συνδέσμων στο δίκτυο. Το σύστημα φωρατών τροφοδοτεί το συνδυασμένο πρότυπο δυναμικής εκτίμησης μητρώων Π-Π και δυναμικού καταμερισμού με επεξεργασμένες πληροφορίες κυκλοφοριακών φόρτων κάθε 15 λεπτά.

Πίνακας 1: Ποσοστά συνδέσμων με μέση τιμή $GEH < 5$.
Table 1: Percentages of links with mean value $GEH < 5$.

Χρονικό διάστημα (έναρξη)	Τρέχουσα κατάσταση	900 δλπ	300 δλπ	60 δλπ	30 δλπ
6:00	80	95	90	90	90
6:15	78	100	95	95	95
6:30	88	94	100	94	94
6:45	90	88	100	89	88
7:00	85	100	94	94	94
7:15	85	82	100	95	95
7:30	80	81	89	94	86
7:45	85	94	100	95	94
8:00	88	100	95	94	94
8:15	77	78	94	94	94
8:30	95	100	100	96	95
8:45	94	85	91	94	94
Μέση τιμή:	85	91	96	94	93

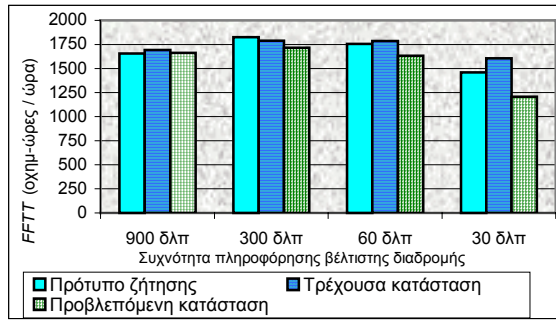
Η επίδραση διαφορετικών στρατηγικών (συχνοτήτων) επικαιροποίησης των πληροφοριών βέλτιστης διαδρομής στη λειτουργική απόδοση του δικτύου εκφράζεται από την υπόθεση της χρήσης εναλλακτικών τιμών του χρονικού διαστήματος ελέγχου π . Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στα διαστήματα των 5 λεπτών (300 δλπ), του 1 λεπτού (60 δλπ) και του μισού λεπτού (30 δλπ). Επίσης, εξετάζεται και η περίπτωση όπου η διάρκεια του διαστήματος ελέγχου π ταυτίζεται με αυτή του διαστήματος παρατήρησης τ , δηλαδή τα 15 λεπτά (900 δλπ).

Ο πίνακας 1 παρουσιάζει την ακρίβεια των παραγόμενων κυκλοφοριακών φόρτων, βάσει του μεγέθους *GEH*, για το πρώτο στάδιο (πρώτη στήλη) και το τρίτο στάδιο (υπόλοιπες στήλες) της μεθοδολογίας εκτίμησης. Σε όλες τις περιπτώσεις ο δυναμικός καταμερισμός των εκτιμώμενων (ή προβλεπόμενων) μητρώων Π-Π αναπαράγει ικανοποιητικά τους πραγματικούς (ή προσομοιωμένους) κυκλοφοριακούς φόρτους, αφού το ποσοστό των παρατηρούμενων συνδέσμων με μέση τιμή *GEH* < 5 είναι ίσο ή μεγαλύτερο του 85% κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης *T*. Σημειώνεται ότι το κριτήριο αποδοχής ικανοποιείται σε κάθε διάστημα παρατήρησης τ μόνο υπό τη χρήση μικρότερων διαστημάτων ελέγχου π (≤ 300 δλπ). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι οι μικρότερες τιμές του π μπορούν να οδηγήσουν σε μια ακριβέστερη πρόβλεψη της δυναμικής εξέλιξης της ζήτησης μετακινήσεων Π-Π, σε σύγκριση με μεγαλύτερα διαστήματα ελέγχου, όπως αυτά των 900 δλπ.

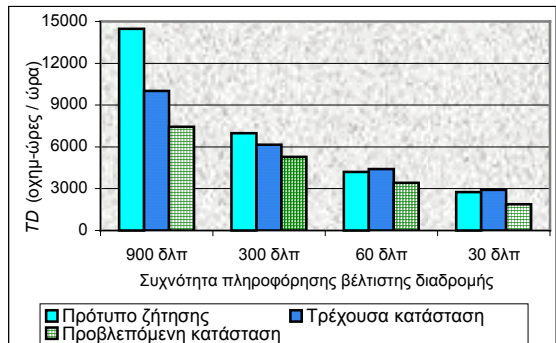
5. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Τα μεγέθη λειτουργικής απόδοσης του δικτύου, που χρησιμοποιούνται συνήθως στη διεθνή βιβλιογραφία, είναι ο χρόνος μετακίνησης υπό συνθήκες ελεύθερης ροής (*Free-Flow Travel Time* ή *FFTT*) σε οχήμ.-ώρες / ώρα, ο συνολικός απολεσθέντας χρόνος λόγω συμφόρησης και ουρών (*Total Delay* ή *TD*) σε οχήμ.-ώρες / ώρα, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης (*Vehicle-Hours Traveled* ή *VHT*) σε οχήμ.-ώρες / ώρα, η συνολική απόσταση μετακίνησης (*Vehicle-Km Traveled* ή *VKT*) σε οχήμ.-χλμ. / ώρα και η μέση ταχύτητα μετακίνησης (*Average Travel Speed* ή *ATS*) σε χλμ. / ώρα.

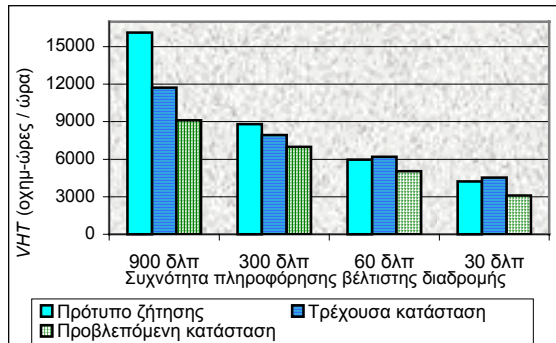
Ορισμένα από τα μεγέθη αυτά είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, ενώ άλλα είναι συμπληρωματικά ή αλληλοσχετιζόμενα. Τα σχ. 2, 3 και 4 απεικονίζουν τα μεγέθη *FFTT*, *TD* και *VHT* αντίστοιχα σε σχέση με εναλλακτικές τιμές του διαστήματος ελέγχου π . Επίσης, τα διάφορα μεγέθη της λειτουργικής απόδοσης διερευνώνται σε σχέση με το δυναμικό καταμερισμό (μέσω του προτύπου *DNA*) του προτύπου της ζήτησης, του εκτιμώμενου μητρώου Π-Π και του προβλεπόμενου μητρώου Π-Π, όπως υπολογίζεται στο τελευταίο (τρίτο) στάδιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα μεγέθη του χρόνου μετακίνησης βελτιώνονται σημαντικά σε σχέση με τη μείωση της διάρκειας του διαστήματος ελέγχου π . Ιδιαίτερα, η μείωση της διάρκειας του π στα 30 δλπ επιφέρει μεγάλη μείωση του *TD* και συνεπώς του *VHT*. Η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου λόγω της χρήσης μικρότερων διαστημάτων ελέγχου π αντανακλάται επίσης στη μείωση της συνολικής απόστασης μετακίνησης (*VKT*) και την αύξηση της μέσης ταχύτητας μετακίνησης (*ATS*), όπως απεικονίζονται στα σχ. 5 και 6 αντίστοιχα.



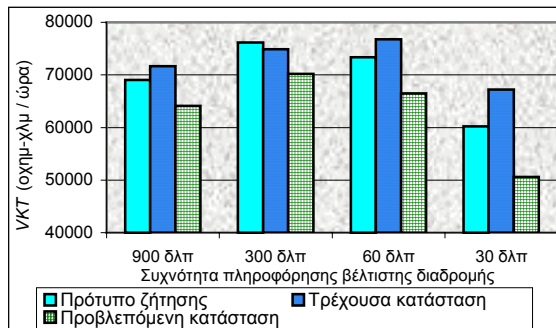
Σχήμα 2: Μεταβολές του μεγέθους *FFTT* (οχήμ.-ώρες / ώρα).
Figure 2: Changes of *FFTT* (veh-hrs / hour).



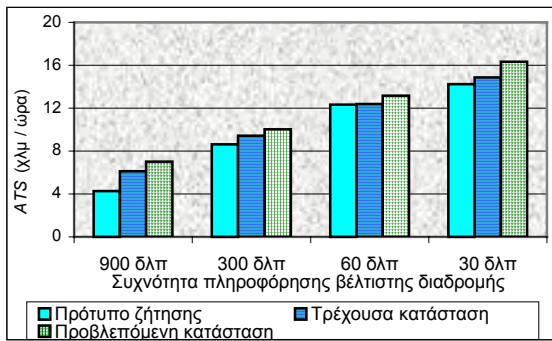
Σχήμα 3: Μεταβολές του μεγέθους *TD* (οχήμ.-ώρες / ώρα).
Figure 3: Changes of *TD* (veh-hrs / hour).



Σχήμα 4: Μεταβολές του μεγέθους *VHT* (οχήμ.-ώρες / ώρα).
Figure 4: Changes of *VHT* (veh-hrs / hour).



Σχήμα 5: Μεταβολές του μεγέθους *VKT* (οχήμ.-χλμ. / ώρα).
Figure 5: Changes of *VKT* (veh-km / hour).



Σχήμα 6: Μεταβολές του μεγέθους ATS (χλμ. / ώρα).
Figure 6: Changes of ATS (km / hour).

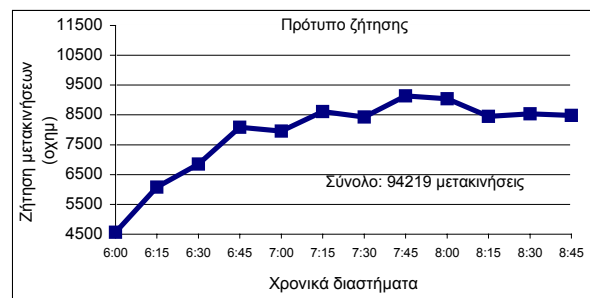
Όπως φαίνεται στα σχήματα 2-6, η εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου μέσω του δυναμικά εκτιμώμενου μητρώου Π-Π με βάση μετρήσεις κυκλοφοριακών φόρτων οδηγεί σε μεταβολές των τιμών των εξεταζόμενων μεγεθών απόδοσης, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τη χρήση του προτύπου της δυναμικής ζήτησης. Οι μεταβολές αυτές αφορούν κυρίως στη μείωση των χρόνων μετακίνησης (TD και VHT) για τα μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα ελέγχου π , δηλαδή αυτά των 300 δλπ και, ιδιαίτερα, των 900 δλπ. Μια αντίστοιχη αυξητική μεταβολή εμφανίζεται στο μέγεθος της ταχύτητας (ATS). Ωστόσο, η καθοδήγηση διαδρομής βάσει της τρέχουσας κυκλοφοριακής κατάστασης επιδρά στην αύξηση της διανυόμενης απόστασης (VKT), ιδιαίτερα για τα μικρότερα διαστήματα ελέγχου π των 60 δλπ και των 30 δλπ. Η αύξηση αυτή αντανακλά την τάση των χρηστών να επιλέγουν διαδρομές Π-Π μεγαλύτερου μήκους έτσι, ώστε να αποφύγουν τους συνδέσμους με τα υψηλότερα επίπεδα συμφόρησης στο δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, ο δυναμικός καταμερισμός του προβλεπόμενου μητρώου Π-Π, μέσω του προτύπου DNA , οδηγεί σε σημαντικές περαιτέρω βελτιώσεις των χρόνων μετακίνησης ($FFTT$, TD και VHT), σε σύγκριση με τους χρόνους μετακίνησης που βασίζονται στο δυναμικό καταμερισμό του «τρέχοντος» εκτιμώμενου μητρώου Π-Π. Οι βελτιώσεις αυτές, οι οποίες αφορούν και στη μέση ταχύτητα μετακίνησης (ATS), αυξάνονται σε σχέση με τη μείωση της διάρκειας του διαστήματος ελέγχου π . Επιπρόσθετα με τα αναφερόμενα μεγέθη απόδοσης, ο δυναμικός καταμερισμός του προβλεπόμενου μητρώου Π-Π στο δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της συνολικής απόστασης που διανύεται από τους χρήστες, ιδιαίτερα για τα μικρότερα χρονικά διαστήματα ελέγχου π , όπως αυτό των 30 δλπ.

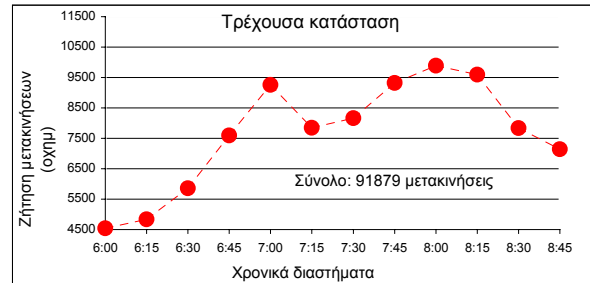
Η μείωση του μεγέθους VKT μπορεί να ερμηνευτεί από τη μείωση των προβλεπόμενων επιπέδων συμφόρησης και από μεταβολές των επιλογών διαδρομής Π-Π των χρηστών με σκοπό την ελάττωση των αποστάσεων μετακίνησης προς τους επιθυμητούς προορισμούς. Επομένως, η πρόβλεψη της κατάστασης του δικτύου μετά την προσαρμογή της συμπεριφοράς των χρηστών στις νέες κυκλοφοριακές συνθήκες επιτρέπει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της επίδρασης των υπηρεσιών παροχής πληροφορήσης βέλτιστης διαδρομής στη λειτουργική απόδοση του δικτύου.

6. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ ΣΤΗ ΖΗΤΗΣΗ Π-Π

Η διερεύνηση της επίδρασης της παροχής πληροφοριών βέλτιστης διαδρομής στη δυναμική εξέλιξη της ζήτησης Π-Π κρίνεται αναγκαία για την πληρέστερη ανάλυση και την ερμηνεία των περιγραφόμενων μεταβολών στη λειτουργική απόδοση του δικτύου. Το σχ. 7 παρέχει τη γραφική απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της ζήτησης μετακινήσεων Π-Π σύμφωνα με το πρότυπο της δυναμικής ζήτησης. Το σχ. 8 απεικονίζει τη χρονική εξέλιξη της «τρέχουσας» ζήτησης μετακινήσεων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του συνδυασμένου προτύπου δυναμικής εκτίμησης μητρώων Π-Π και δυναμικού καταμερισμού χρησιμοποιώντας μετρήσεις κυκλοφοριακών φόρτων.



Σχήμα 7: Κατανομή μετακινήσεων από το πρότυπο ζήτησης.
Figure 7: Demand profile based on the target O-D matrix.

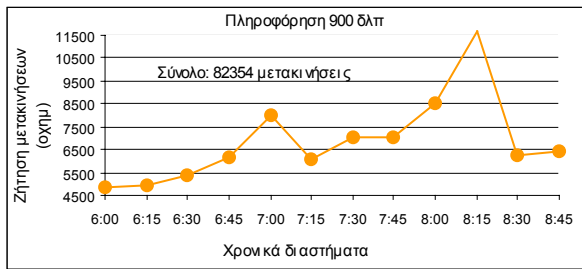


Σχήμα 8: Κατανομή μετακινήσεων βάσει του «τρέχοντος» δυναμικά εκτιμώμενου μητρώου Π-Π.

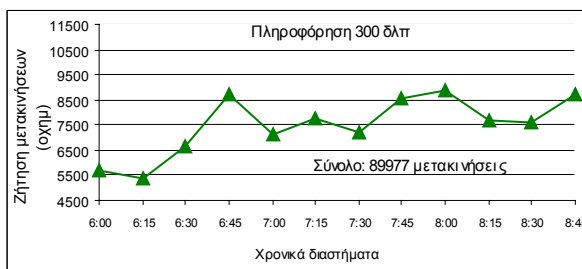
Figure 8: Demand profile based on the estimated dynamic O-D matrix.

Τα σχ. 9, 10, 11 και 12 απεικονίζουν τη χρονική εξέλιξη της προβλεπόμενης ζήτησης μετακινήσεων, μετά την προσαρμογή των χρηστών, για τα χρονικά διαστήματα ελέγχου π των 900 δλπ, των 300 δλπ, των 60 δλπ και των 30 δλπ αντίστοιχα.

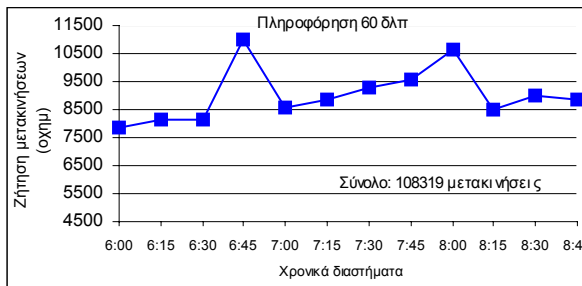
Από τη γραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία για την εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης οδηγεί σε σημαντική μεταβολή της χρονικής κατανομής των εκτιμώμενων μετακινήσεων Π-Π, σε σύγκριση με την κατανομή των μετακινήσεων σύμφωνα με το πρότυπο της δυναμικής ζήτησης. Επιπρόσθετα, η διαδικασία της πρόβλεψης των μητρώων Π-Π, ανά διαφορετικά διαστήματα ελέγχου π , οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές της χρονικής κατανομής αλλά και του μεγέθους της ζήτησης, σε σύγκριση με το πρότυπο της δυναμικής ζήτησης καθώς και το «τρέχον» δυναμικά εκτιμώμενο μητρώο Π-Π.



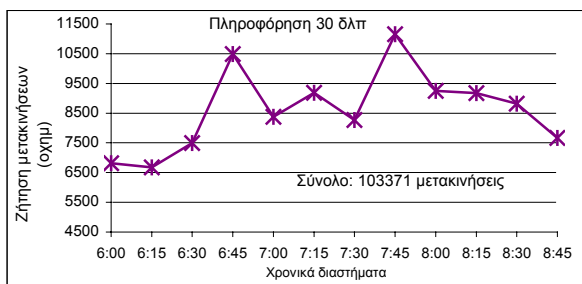
Σχήμα 9: Κατανομή μετακινήσεων βάσει του δυναμικά προβλεπόμενου μητρώου Π-Π για π των 900 δλπ.
 Figure 9: Demand profile based on the predicted dynamic O-D matrix for interval π of 900 sec.



Σχήμα 10: Κατανομή μετακινήσεων βάσει του δυναμικά προβλεπόμενου μητρώου Π-Π για π των 300 δλπ.
 Figure 10: Demand profile based on the predicted dynamic O-D matrix for interval π of 300 sec.



Σχήμα 11: Κατανομή μετακινήσεων βάσει του δυναμικά προβλεπόμενου μητρώου Π-Π για π των 60 δλπ.
 Figure 11: Demand profile based on the predicted dynamic O-D matrix for interval π of 60 sec.



Σχήμα 12: Κατανομή μετακινήσεων βάσει του δυναμικά προβλεπόμενου μητρώου Π-Π για π των 30 δλπ.
 Figure 12: Demand profile based on the predicted dynamic O-D matrix for interval π of 30 sec.

Τα παραπάνω σχήματα δείχνουν ότι η χρήση διαστημάτων ελέγχου π μικρότερης διάρκειας, όπως αυτά των 60 δλπ και των 30 δλπ (σχ. 11 και 12) οδηγεί σε έμμεση αύξηση του συνολικού μεγέθους της ζήτησης μετακινήσεων (λανθάνουσα ή εν δυνάμει ζήτηση), σε σύγκριση με τη ζήτηση μετακινήσεων η οποία αντιστοιχεί στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου (δίχως πληροφόρηση) και τις ιστορικές πληροφορίες (του προτύπου της δυναμικής ζήτησης). Η αύξηση αυτή μπορεί να σχετιστεί με τη σημαντική μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης για τις αντίστοιχες περιπτώσεις των 60 δλπ και των 30 δλπ. Δηλαδή η μείωση του χρόνου και της συνολικής απόστασης μετακίνησης και η αύξηση της μέσης ταχύτητας έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των χρηστών, οι οποίοι διέρχονται από το κεντρικό τμήμα του δικτύου της Αθήνας.

Αντίθετα, η χρήση διαστημάτων ελέγχου π μεγαλύτερης διάρκειας, όπως αυτά των 900 δλπ και των 300 δλπ (σχ. 9 και 10) οδηγεί σε μείωση του συνολικού μεγέθους της ζήτησης μετακινήσεων, σε σύγκριση με τη ζήτηση μετακινήσεων που αντιστοιχεί στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου καθώς και τις ιστορικές πληροφορίες. Η μείωση αυτή μπορεί να αποδοθεί στο ότι οι βελτιώσεις των κυκλοφοριακών συνθηκών λόγω της καθοδήγησης διαδρομής ανά 900 δλπ ή 300 δλπ δεν είναι τόσο μεγάλες σε σύγκριση με αυτές που αντιστοιχούν στα διαστήματα μικρότερης διάρκειας, ώστε να προκαλέσουν αύξηση της λανθάνουσας ζήτησης μετακινήσεων στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Συνεπώς, κάποιοι χρήστες, μετά την προσαρμογή της συμπεριφοράς τους, πιθανώς μεταβάλλουν τους συνήθεις χρόνους αναχώρησής τους πριν ή μετά τη συγκεκριμένη περίοδο μελέτης T ή / και επιλέγουν διαδρομές κατά τη μετακίνησή τους που δεν περιλαμβάνουν συνδέσμους εντός της συγκεκριμένης περιοχής μελέτης.

Το γεγονός της βελτίωσης της λειτουργικής απόδοσης του δικτύου για τη χρήση μικρών διαστημάτων ελέγχου (60 δλπ και 30 δλπ) παρά την αντίστοιχη αύξηση του μεγέθους των μετακινήσεων μπορεί να ερμηνευτεί περαιτέρω μέσα από την στατιστική ανάλυση των διακυμάνσεων στη χρονική εξέλιξη της ζήτησης Π-Π. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τις τιμές του ΣMA , των αντίστοιχων κάτω και άνω διαστημάτων εμπιστοσύνης (KAE και ADE), όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με την εξίσωση (2.6), και του $Μήκους του Διαστήματος Εμπιστοσύνης (MAE)$, όπου $MAE = ADE - KAE$, για κάθε περίπτωση.

Το ΣMA για τα προβλεπόμενα μητρώα Π-Π εμφανίζει μια στατιστικά σημαντική αύξηση (εκτός από την περίπτωση του διαστήματος των 300 δλπ) σε σύγκριση με το ΣMA που αντιστοιχεί στο «τρέχον» εκτιμώμενο μητρώο Π-Π. Η αύξηση αυτή λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της για το μικρότερο διάστημα ελέγχου π των 30 δλπ. Με άλλα λόγια, οι μεταβολές των επιλογών μετακίνησης Π-Π των χρηστών από το πρότυπο της δυναμικής ζήτησης αυξάνονται για τις μεγαλύτερες συχνότητες επικαιροποίησης των πληροφοριών βέλτιστης διαδρομής.

Πίνακας 2: Οι τιμές των ΣΜΔ, ΚΔΕ, ΑΔΕ και ΜΔΕ.
Table 2: Estimated values of ΣΜΔ, ΚΔΕ, ΑΔΕ and ΜΔΕ.

Στατιστικό μέγεθος	Τρέχουσα κατάσταση	900 δλπ	300 δλπ	60 δλπ	30 δλπ	
ΣΜΔ		1,93	2,11	1,64	2,08	2,24
ΚΔΕ		1,69	1,76	1,31	1,67	1,81
ΑΔΕ		2,06	2,46	1,98	2,48	2,67
ΜΔΕ		0,37	0,70	0,67	0,81	0,86

Επιπρόσθετα, το ΜΔΕ για τα προβλεπόμενα μητρώα Π-Π, που αντιστοιχούν στα μικρότερα διαστήματα ελέγχου (των 60 δλπ και των 30 δλπ.), εμφανίζει σημαντική αύξηση σε σύγκριση με το ΜΔΕ που αντιστοιχεί στα μεγαλύτερα διαστήματα ελέγχου (των 300 δλπ και των 900 δλπ.) καθώς και το «τρέχον» εκτιμώμενο μητρώο Π-Π.

Δηλαδή, όσο μειώνεται η διάρκεια του διαστήματος π , τόσο στατιστικά σημαντικότερη γίνεται η αύξηση της χρονικής διασποράς των μετακινήσεων Π-Π σε σχέση με το πρότυπο της δυναμικής ζήτησης.

Η μεγαλύτερη αυτή διασπορά επιτρέπει τη βελτίωση των συνθηκών συμφόρησης, ενώ παράλληλα παρέχει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης μεγαλύτερου αριθμού χρηστών εντός της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου και περιοχής μελέτης.

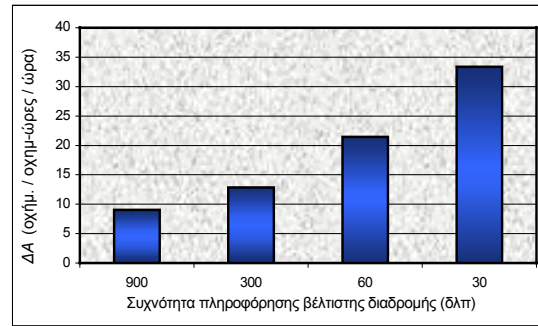
Επίσης, τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν την ανάγκη βελτίωσης του προτύπου της δυναμικής ζήτησης, π.χ. μέσω νέων απογραφών ζήτησης Π-Π, ιδιαίτερα στην περίπτωση χρήσης μικρότερων διαστημάτων ελέγχου π , όπου η αξιοπιστία των προβλεπόμενων μητρώων Π-Π μειώνεται σημαντικά.

Η περιγραφόμενη μεθοδολογία σχετικά με τη δυναμική πρόβλεψη μητρώων Π-Π παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της λειτουργικής απόδοσης του δικτύου σε συνάρτηση με τις μεταβολές στο μέγεθος της ζήτησης. Πιο συγκεκριμένα, ο Δείκτης Απόδοσης (ΔΑ) του δικτύου μπορεί να εκφραστεί από τον εξής λόγο:

$$\Delta A = \frac{\text{Συνολικές μετακινήσεις Π-Π}}{VHT} \quad (6.1)$$

Το μέγεθος του ΔΑ οχήμ./οχημ-ώρες/ώρα εκφράζει την αναλογία μεταξύ της συνολικής ποσότητας μετακινήσεων Π-Π που εξυπηρετούνται κατά την περίοδο μελέτης T προς το συνολικό χρόνο μετακίνησης ανά ώρα, ο οποίος απαιτείται για την εξυπηρέτηση των μετακινήσεων αυτών.

Το σχήμα 13 δείχνει ότι ο ΔΑ αυξάνεται ραγδαία σε σχέση με τη μείωση της διάρκειας του διαστήματος ελέγχου π . Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση του μεγέθους της λανθάνουσας ζήτησης μετακινήσεων στην περίπτωση χρήσης μικρών διαστημάτων ελέγχου (60 δλπ και 30 δλπ), σε συνδυασμό με τη μείωση του συνολικού χρόνου μετακίνησης.



Σχήμα 13 : Βελτίωση του ΔΑ σε σχέση με το διάστημα π .
Figure 13: Improvement of ΔΑ wrt length of interval π .

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την ποσοτικοποίηση των ωφελειών που μπορούν να προκύψουν από την παροχή πληροφοριών βέλτιστης διαδρομής. Τα οφέλη αυτά αντιστοιχούν σε σημαντικές μειώσεις των χρόνων μετακίνησης και, κατ' επέκταση, σε μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης των αστικών περιοχών για τη μέση ή τυπική μετακίνηση. Η χρήση του συνδυασμένου προτύπου δυναμικής εκτίμησης μητρώων Π-Π και δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας, χρησιμοποιώντας πληροφορίες κυκλοφοριακών φόρτων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέπει την ορθότερη αναπαράσταση της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου, σε αντίθεση με το δυναμικό καταμερισμό ιστορικών προτύπων ζήτησης.

Οι χρήστες, οι οποίοι λαμβάνουν και έχουν τη δυνατότητα να αποδέχονται και να ακολουθούν τις υποδείξεις βέλτιστης διαδρομής ανά μικρά χρονικά διαστήματα ελέγχου, όπως αυτά των 60 δλπ και 30 δλπ, με βάση τη φόρτιση του εκτιμώμενου μητρώου Π-Π στο δίκτυο μέσω του προτύπου δυναμικού καταμερισμού DNA, μειώνουν τον απαιτούμενο χρόνο μετακίνησης στις διαδρομές και αυξάνουν τη μέση ταχύτητα μετακίνησής τους. Η προσομοίωση της προσαρμογής της συμπεριφοράς μετακίνησης των χρηστών στις νέες κυκλοφοριακές συνθήκες υπό την επίδραση πληροφόρησης έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική περαιτέρω βελτίωση των μεγεθών αυτών. Ιδιαίτερα, η προσαρμογή της συμπεριφοράς των χρηστών βρέθηκε ότι οδηγεί στην αύξηση της συνολικής ζήτησης μετακινήσεων (βλ. κεφάλαιο 6), που μπορεί να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο στη δεδομένη περίοδο αλλά και στον περιορισμό της επιλογής διαδρομών μεγαλύτερου μήκους στο δίκτυο (βλ. κεφάλαιο 5).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης μπορεί να συμβάλει στον προσδιορισμό της διάρκειας διαστημάτων ελέγχου, για τα οποία η προβλεπόμενη ζήτηση μετακινήσεων υπόκειται σε συγκεκριμένες μεταβολές σε σχέση με τις τρέχουσες εκτιμήσεις και τις ιστορικές πληροφορίες ζήτησης Π-Π. Επίσης, η μεθοδολογία αυτή, σε αντίθεση με τις υφιστάμενες προσεγγίσεις, παρέχει τη δυνατότητα αξι-

ολόγησης διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου του οδικού συγκοινωνιακού δικτύου σε σχέση με δυναμικές μεταβολές στη ζήτηση για μετακινήσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tsekeris, T., Skabardonis, A., "On-line performance measurement models for urban arterial networks", **Proc. of the Transportation Research Board 83rd Annual Meeting**, National Research Council, Washington, D.C., 2004.
2. Ziliaskopoulos, A.K., Peeta, S., "Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future", **Networks and Spatial Economics**, Vol. 1, No 3-4, 2001, pp. 233-265.
3. Stathopoulos, A., Tsekeris, T., "Framework for analysing reliability and information degradation of demand matrices in extended transport networks", **Transport Reviews**, Vol. 23, No 1, 2003, pp. 89-103.
4. Polydoropoulou, A., Ben-Akiva, M., Kaysi, I., "Influence of traffic information on drivers' route choice behavior", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Vol. 1453, 1994, pp. 56-65.
5. Nihan, N., Hamed, M., Davis, G., "Interactions between driver information, route choice, and optimal signal timing on a simple network", **Journal of Advanced Transportation**, Vol. 29, No 2, 1995, pp. 163-182.
6. Tsekeris, T., Stathopoulos, A., "Real-time dynamic Origin-Destination matrix adjustment with simulated and actual link flows in urban networks", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Vol. 1857, 2003, pp. 117-127.
7. Stathopoulos, A., Polak, J., Tillis, A., Mitropoulos, S., Ryan, B., "Parking management and control", **Advanced Telematics in Road Transport, Vol. 1: Proc. of the DRIVE Conference**, Brussels, 1991, Elsevier, Oxford, pp. 752-777.
8. Van Vliet, D., "SATURN – A modern assignment model", **Traffic Engineering and Control**, No 23, 1982, pp. 578-581.
9. U.K. Highways Agency, **UK Design Manual for Roads and Bridges**, HMSO, London, U.K., 1996.
10. Tsekeris, T., Stathopoulos, A., "Quasidynamic network assignment procedure with transient demand matrices", **Journal of Transportation Engineering**, Vol. 131, No 2, 2005, 89-100.
11. Stathopoulos, A., Argyrakos, G., "Control strategies for reducing environmental pollution from road traffic", **The Science of the Total Environment**, Vol. 134, No 1-3, 1993, pp. 315-324.
12. Stathopoulos, A., Tsekeris, T., "Enhanced dynamic origin-destination matrix updating by use of long-term flow information", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2004, in press.

Α. Σταθόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π., Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου, 157 73, Αθήνα.

Θ. Τσέκερης

Διδάκτορας Ε.Μ.Π., Πολιτικός Μηχανικός - Συγκοινωνιολόγος, Γοργοποτάμου 20, Ζωγράφου, 157 72, Αθήνα.

Extended summary

Methodology for Estimating Traffic Network Performance under Routing Information

A. STATHOPOULOS

Professor N.T.U.A.

T. TSEKERIS

Civil Engineer, Ph.D.

Abstract

This paper presents the development and implementation of a prototype methodology for estimating the operational performance of extended traffic networks. The proposed methodology enables the real-time estimation of the network state based on the current link traffic conditions. Next, it provides the network state estimate under the influence of route guidance information, which is provided to users to diminish their travel times. Next, the methodology evaluates the future traffic network state, incorporating the adjustment of the travel behavior of users to the new traffic conditions generated by the routing information. The simulation experiments demonstrate that the increase of the updating frequency of routing information provided to users, such as at 30-second intervals, results in the largest improvements in the various network performance measures. The evaluation of the future state leads to further significant improvements in travel times and speeds, shorter travel distances and growth in the demand size, in comparison to the estimated 'current' network state without provision of routing information and without considering users' adjustment.

1. INTRODUCTION

The development and implementation of models suitable for the real-time *monitoring* and *control* of extended traffic networks is particularly limited in the existing literature [1]. The dynamic traffic assignment (DTA) models currently used to describe (offline) the temporal evolution of traffic flows and travel times in the network are fed with fixed (known) demand information [2]. This information typically refers to historical or survey-based average estimates, which represent the customary travel behavior of users and are reflected in a time-disaggregated (dynamic) target origin-destination (O-D) trip matrix [3]. In addition, current model implementations are mostly restricted to experimental and linear (freeway) networks. Existing approaches do not take into account the influence of mechanisms of users' cost adjustment to the new traffic conditions generated by the provision of route guidance (or routing) information on the future traffic network performance [4, 5].

Submitted: Sept. 15, 2004 Accepted: Jan. 4, 2005

This paper describes a three-stage prototype methodology for estimating the performance of extended traffic networks under the effect of routing information. At the first stage, a combined dynamic O-D matrix estimation and DTA model is resolved for the real-time monitoring of the current network traffic state using readily available link traffic counts [6, 7]. At the second stage, the 'current' dynamic O-D matrix (estimated at the first stage) is loaded onto the network through another DTA model, known as *Dynamic Network Assignment (DNA)* [10]. The DNA model provides the online simulation of route diversion decisions of users under the effect of routing information. At the third stage, the proposed methodology extends the estimation of the network performance through incorporating the future effects of routing information to both the trip departure time and route choices of users. Furthermore, these effects include changes in the size and the temporal distribution of the predicted O-D matrix.

2. DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE PERFORMANCE OF TRAFFIC NETWORKS

Figure 1 provides a schematic representation of the suggested methodology for estimating the performance of traffic networks under the influence of routing information. At the first stage of the methodology, the problem of dynamic O-D matrix estimation is formulated as an entropy maximization model (rel. (2.1)) and is resolved through an algebraic reconstruction technique enhanced by a Newton-type diagonal gradient search [6]. The above model is fed with two sources of information. The first source refers to a historical target O-D matrix and the second source corresponds to a time-series of traffic counts at selected network links across the given study period. The O-D matrix

estimation problem is subject to the DTA constraints (rel. (2.2)). These constraints ensure the consistency between the actual (counted) and the estimated (assigned) traffic flows.

The DTA model used here provides the simulation-based mapping of the O-D matrix to the link flows counted in each *observation (or count) interval* [7]. It employs a deterministic macroscopic shortest path-finding procedure that is appropriate for real-time applications on extended traffic networks using commonly available PC facilities. This procedure assumes that users take their path decisions at the instant of their departure on the basis of the *historical (habitual)* travel cost that have experienced in the network in the past.

The cost calculation functions (rel. (2.3) - (2.4)) take explicitly into account the effect of congestion, queues and oversaturation (at those junctions where traffic demand exceeds capacity) on the network performance, in terms of the link travel times [8]. The degradation of the information obtained from the traffic counts and used in the dynamic O-D estimation procedure is analyzed within the statistical criterion of *GEH* [9]. The magnitude of *GEH* (rel. (2.5)) indicates whether the differences between the actual and the estimated link flows are statistically significant or non-significant.

The second stage of the methodology refers to the estimation of the network performance under the effect of the routing information provided to the users. This estimation is carried out within the *DNA* model [10]. The structure of this model is based on a rolling-horizon estimation and implementation framework. In this framework, the route choice behavior of users is constantly updated using the assumption that users receive, accept and are able to follow the route guidance information provided to them within each *control interval*, into which the observation intervals are subdivided.

The *DNA* model uses the same shortest path-finding procedure and cost calculation functions as the DTA model used at the first stage. However, the *DNA* procedure assumes that users take (update) their path decisions on the basis of the *actual* travel cost during their trip implementation in the network. Furthermore, the *DNA* procedure is based on the loading of a *combined* demand matrix onto the network during each control interval. This combined matrix constitutes the sum of three different demand matrices. The first one refers to the *queue matrix*, which captures the suppressed traffic demand of the queuing vehicles at the oversaturated junctions. The second one refers to the *transient demand matrix*, composed of the number of uncompleted trips that are stored at the end of each control interval to the furthest reached *transient* zone or junction along the currently estimated shortest path. The third one corresponds to that demand matrix which is obtained from the disaggregation of the 'currently' estimated O-D matrix to a number of sub-matrices equal to the number of control intervals.

In the third stage, the combined dynamic O-D matrix estimation and DTA model are used to predict the new O-D matrix on the basis of the information obtained from

the simulated link flows, as produced by the *DNA* model. The predicted O-D matrix is loaded onto the network using the *DNA* model in order to calculate the new values of the various performance measures under the effect of routing information and after the adjustment of the trip departure time and route choice behavior of users. The degradation of the information obtained from the simulated link flows and used for the dynamic O-D matrix prediction is analyzed using the *GEH* statistics. Moreover, the reliability of the estimated and predicted O-D matrices is examined using the t-test statistics (rel. (2.6)). This reliability analysis provides a measure of the statistical significance of the changes in the structure of the predicted O-D matrices with respect to the structure of the target O-D matrix, due to the effect of the routing information provision.

3. CHARACTERISTICS OF THE PRESENT APPLICATION OF THE METHODOLOGY

The proposed estimation methodology has been implemented in the inner road network of Athens, Greece, composed of 44 (departure / arrival) zones. The target O-D matrix corresponds to the morning period (6:00 am – 9:00 am) of a Monday in February 2000. This matrix has been estimated using a combination of travel survey estimates and historical dynamic O-D matrices based on link traffic counts collected across the timescale 1989–2000 [12]. The traffic counts, which correspond approximately to 10% of the total network links, are fed to the combined dynamic O-D matrix estimation and DTA model every 15 minutes. The prior demand and flow information used in this study has been provided by the Railways and Transportation Laboratory of the NTUA.

The effect of the frequency with which the routing information is updated was investigated by assuming different control interval lengths, such as those of 900 sec, 300 sec, 60 sec and 30 sec. The results of the *GEH* error statistics indicate that the estimated (at the first stage) and the predicted (at the third stage) traffic flows reproduce without statistically significant differences the actual and the simulated (produced by the *DNA* model) traffic flows respectively (table 1).

4. IMPACT OF ROUTING INFORMATION ON THE NETWORK PERFORMANCE

The operational performance of the traffic network was estimated here within five measures. These measures refer to the *Free-Flow Travel Time (FFTT)* in veh-hrs/hr, the *Total Delay (TD)* in veh-hrs/hr, the *Vehicle-Hours Traveled*

(*VHT*) in veh-hrs/hr, the *Vehicle-Kilometers Traveled (VKT)* in veh-km/hr and the *Average Travel Speed (ATS)* in km/hr. Figures 2-6 illustrate the magnitude of these measures with respect to different control interval lengths. The estimation methodology was investigated with regard to three cases. In the first case, the performance measures were obtained from the loading of the target O-D matrix onto the network through the DNA model. In the second case, the performance measures were obtained from the loading of the ‘current’ dynamic O-D matrix (estimated at the first stage) onto the network through the DNA model. In the third case, the performance measures were obtained from the loading of the ‘predicted’ dynamic O-D matrix (estimated at the third stage) onto the network through the DNA model.

The results demonstrate that the loading of the ‘current’ dynamic O-D matrix leads to a significant reduction of the *TD* and the *VHT* for the longest control intervals (of 900 sec and 300 sec) and to an increase of the *ATS* for all control intervals, in comparison to the loading of the target O-D matrix. However, the loading of the ‘current’ dynamic O-D matrix results in an increase of the *VKT*, particularly for the shortest control intervals (of 30 sec and 60 sec), in comparison to the loading of the target O-D matrix. This behavior may be attributed to the *path spreading* effects of the routing information provision.

On the other hand, the loading of the predicted dynamic O-D matrix leads to significantly larger improvements in all performance measures, in comparison to the case of using the target O-D matrix as well as the ‘current’ dynamic O-D matrix. These improvements grow with respect to the increase (from 900 sec to 30 sec) of the frequency in which the routing information is provided to users. The results demonstrate that the adjustment of the trip departure time and route choice behavior of users to the new traffic conditions under the effect of routing information causes a considerable reduction of the congestion levels in the network. In turn, the shorter travel times and the higher travel speeds enable users to decrease the traveled O-D distances by avoiding their path spreading.

5. IMPACT OF ROUTING INFORMATION ON THE O-D DEMAND

The temporal evolution of the trip demand across the given study period is illustrated on the basis of the target O-D matrix (figure 7), the ‘current’ dynamic O-D matrix (figure 8) and the predicted dynamic O-D matrices that correspond to the control intervals of 900 sec, 300 sec, 60 sec and 30 sec (see figures 9, 10, 11 and 12 respectively). The adoption of shorter control intervals (30 sec and 60 sec) leads to the increase of the predicted demand size through the release of trips comprising latent demand, in comparison to the demand size corresponding to the target O-D matrix

and, especially, to the ‘current’ dynamic O-D matrix. This demand growth may be considered as the result of the reducing travel times and the increasing travel speeds due to the routing information provided to users within the above control intervals.

On the contrary, the adoption of longer control intervals (300 sec and 900 sec) leads to the decrease of the predicted demand which can be satisfied within the study period, in comparison to the demand size corresponding to the target O-D matrix and to the ‘current’ dynamic O-D matrix. This decrease shows that some users, after the adjustment of their travel decisions, probably prefer to shift their trip departure time before or after the study period or select travel paths outside the given study area.

The reliability analysis (table 2) demonstrates that the change in the structure of the predicted O-D matrix, with respect to the structure of the target O-D matrix, is increasing in the case of shorter control intervals. In addition, it was found that the more frequent the routing information provided to users the more statistically significant becomes the temporal dispersion of the predicted O-D matrix cells, in comparison to the target O-D matrix.

The greater dispersion of the predicted O-D trips may justify the reduction of the network congestion levels in conjunction with the increase of the demand size for the shortest control intervals (of 30 sec and 60 sec). These results signify that the adoption of shorter control intervals increases the need for collecting new demand information about the adjusted travel behavior of users in order to make the target O-D matrix more realistic and enhance the reliability of the predicted O-D matrix.

The proposed methodology enables the estimation of the network performance in relation to changes in the size of O-D demand. This fact leads to the definition of a new performance measure, which is referred to here as performance index. The *performance index* is expressed by the ratio of the total number of O-D trips to the *VHT* (rel. (5.1)). Figure 13 indicates that the numerical value of the performance index increases rapidly with respect to the increase of the routing information updating frequency. This is due to the growth of the demand size and the reduction of the travel times for the case of the shortest control intervals (of 30 sec and 60 sec).

6. CONCLUSIONS

The present paper describes a prototype methodology for estimating the operational performance of extended traffic networks under the effect of routing information provision. The combined dynamic O-D matrix estimation and DTA model, fed with link flow information in real-time, enables a more sound representation of the current traffic network conditions, in comparison to the loading of a historical target

O-D matrix onto the network. The loading of the ‘current’ dynamic O-D matrix onto the network using the DNA model provides the real-time simulation of users’ responses to the provision of route guidance information. The simulation results verified the positive impact of routing information on the reduction of travel times and the increase of travel speeds.

The estimation of the adjustment of the trip departure time and route choices of users to the new traffic conditions under the routing information effect led to significant further improvements of the aforementioned measures. Moreover, it

was found to increase the predicted O-D demand size (latent demand) while reducing the total distances traveled in the network. The proposed methodology can be used to enhance the design of Advanced Traffic Information Systems (ATIS), particularly in terms of using suitable information updating frequencies in real-time. The development of new performance measures, such as the performance index, which take into account changes in the size of O-D demand, can provide a more plausible evaluation of the effect of routing information on the performance of extended traffic networks.

A. Stathopoulos

Professor, Dept. of Transportation Planning and Eng., School of Civil Engng, N.T.U.A., 5 Iroon Polytechniou, GR-157 73, Zografou, Athens.

T. Tsekeris

Civil Engineer, Transportation Engineer, Ph.D., 20 Gorgopotamou str., GR-157 72, Zografou, Athens.