

Μαθηματικά πρότυπα Δυναμικής Οικολογικής Οδήγησης σε Σηματοδοτούμενες Αρτηρίες στο Πλαίσιο Συνεργατικών Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής του κ. Ευάγγελου Μίντση

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για οδικές μετακινήσεις δύναται να επιδεινώσει σε σημαντικό βαθμό τις επιπτώσεις της οδικής κυκλοφορίας στο περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά, οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών έχουν καταστήσει εφικτή την ανάπτυξη και εφαρμογή συστημάτων διασυνδεδεμένης οδήγησης (Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών) που δίνουν τη δυνατότητα βελτίωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών, της οδικής ασφάλειας, καθώς και την βιωσιμότητας του συστήματος οδικών μεταφορών. Για παράδειγμα, η διασύνδεση υποδομής-οχήματος μέσω εξειδικευμένου εξοπλισμού και κατάλληλων τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων επιτρέπει σε διασυνδεδεμένα οχήματα (ΔΟ) να πληροφορηθούν μελλοντικές μεταβολές των υφιστάμενων προγραμμάτων σηματοδότησης και να σχεδιάσουν και υλοποιήσουν περιβαλλοντικά φιλικές τροχιές κίνησης πέριξ σηματοδοτημένων διασταυρώσεων. Επιπλέον, ο σχεδιασμός του τρόπου κίνησης των ΔΟ για την επίτευξη στόχων σχετιζόμενων με την βελτίωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του περιορισμού των αέριων ρύπων τους (περιβαλλοντικά φιλική οδήγηση) δύναται να λάβει υπόψη τις ενέργειες και τις προθέσεις παρακείμενων ΔΟ μέσω κατάλληλων τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων διασύνδεσης οχήματος-οχήματος σε ένα οδικό περιβάλλον εξοπλισμένο με σύγχρονες τεχνολογίες διασύνδεσης και τηλεπικοινωνιών.

Κατά την περασμένη δεκαετία, πλήθος μαθηματικών μοντέλων και συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης πέριξ σηματοδοτημένων διασταυρώσεων προτάθηκαν και διερευνήθηκαν. Η παρούσα διδακτορική διατριβή σκιαγραφεί την ερευνητική δραστηριότητα γύρω από τις παραπάνω τεχνολογίες, αναδεικνύει τα πλεονεκτήματά και τους περιορισμούς τους, αλλά και καταδεικνύει πτυχές τους που δεν έχουν διερευνηθεί με συστηματικό τρόπο ακόμα. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε ενδελεχής βιβλιογραφική ανασκόπηση βάσει της οποίας προέκυψε ότι τα υφιστάμενα συστήματα περιβαλλοντικής οδήγησης διαφέρουν σε σημαντικό βαθμό ως προς τις

δομές ελέγχου που παρουσιάζουν, τους δείκτες βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούν, τα ενεργειακά και συγκοινωνιακά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη, καθώς και το χωρικό εύρος εφαρμογής τους. Επίσης, προσδιορίστηκε ένα σύνολο επιθυμητών χαρακτηριστικών για τα συστήματα περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης τα οποία αναμένεται ότι θα επαυξήσουν την αποτελεσματικότητά τους και παρουσιάζονται αναλυτικώς παρακάτω:

- οι αλγόριθμοι των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη πληροφορία σχετικά με τη μελλοντική κατάσταση των φωτεινών σηματοδοτών (τόσο πλήρη όσο και μερική), τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ΔΟ, τη διαδικασία δημιουργίας και απόσβεσης ουρών ανάντη φωτεινών σηματοδοτών, καθώς και την κατάσταση του προπορευόμενου οχήματος μέσω τηλεπικοινωνιών διασύνδεσης οχήματος-οχήματος,
- οι αλγόριθμοι των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης θα πρέπει να βελτιστοποιούν ταυτοχρόνως την κατανάλωση ενέργειας, μικροσκοπικά κυκλοφοριακά μεγέθη, καθώς και δείκτες οδικής ασφάλειας για τον υπολογισμό ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης,
- οι συναρτήσεις βελτιστοποίησης των αλγορίθμων προτείνεται να ενσωματώνουν μη γραμμικά μοντέλα ισχύος των ΔΟ ή μικροσκοπικά μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας που χρησιμοποιούν ως εισαγόμενα δεδομένα τιμές ταχυτήτων και επιταχύνσεων,
- η επίλυση των προαναφερθέντων προγραμμάτων μαθηματικής βελτιστοποίησης θα πρέπει να είναι αποδοτική και γρήγορη σε βαθμό που να επιτρέπει τη λειτουργία των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης σε επιχειρησιακές συνθήκες,
- ο υπολογισμός των ενεργειακά αποδοτικών τροχιών κίνησης των ΔΟ συνίσταται να λαμβάνει υπόψη γραμμικά μοντέλα επιβράδυνσης ανάντη των φωτεινών σηματοδοτών, και μη γραμμικά μοντέλα επιτάχυνσης κατόντη των φωτεινών σηματοδοτών,
- η επίδραση της εναλλαγής σχέσεων του ΔΟ στην υλοποίηση ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών κίνησης προτείνεται να συνεκτιμάται,
- τα συστήματα περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης θα πρέπει να συνεργάζονται με διαφορετικά προγράμματα σηματοδότησης (π.χ. σταθερού χρόνου, επενεργούμενα, δυναμικά προσαρμοζόμενα στις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες, συντονισμένα), αλλά και λαμβάνουν υπόψη τη μελλοντική μεταβολή της κατάστασης πλήθους φωτεινών σηματοδοτών που βρίσκονται κατόντη του ΔΟ, ώστε να επιτυγχάνονται υψηλότερα οφέλη σε κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές αέριων ρύπων σε επίπεδο οδικής αρτηρίας ή και δικτύου.

Πέραν του προσδιορισμού ενός συνόλου επιθυμητών χαρακτηριστικών που επιτρέπουν μια πιο ολιστική μαθηματική έκφραση του προβλήματος της περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών, η κριτική επισκόπηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας κατέδειξε και ορισμένους τομείς στην έρευνα των συγκεκριμένων συστημάτων που δεν έχουν διερευνηθεί διεξοδικά και εκθέτονται παρακάτω:

- ανθρωποκεντρικός σχεδιασμός συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης,
- προτυποποίηση συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού τύπου, όπου ο οδηγός του ΔΟ είναι επιφορτισμένος με την εκτέλεση της προτεινόμενης ενεργειακά αποδοτικής στρατηγικής οδήγησης,
- αξιολόγηση τεχνολογιών περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης βάσει πιλοτικών εφαρμογών που έχουν πραγματοποιηθεί σε πραγματικά οδικά δίκτυα και υπό ρεαλιστικές κυκλοφοριακές συνθήκες.

Συγκεκριμένα, τα υφιστάμενα συστήματα περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης δίνουν περιορισμένη έμφαση στην υπολογισμό ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης που συνεκτιμούν παράγοντες όπως η άνεση των επιβατών, η αποδοχή των συστημάτων από τους οδηγούς, και η οδική ασφάλεια. Δηλαδή, δίνεται προτεραιότητα στην επίτευξη ενεργειακών και περιβαλλοντικών στόχων, ενώ επίσης οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες υποθέτουν ότι τα ΔΟ διαθέτουν και συστήματα αυτοματοποιημένης οδήγησης που επιτρέπουν την επακριβή εφαρμογή των ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών κίνησης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μετάβαση προς ένα πλήρως διασυνδεδεμένο και αυτοματοποιημένο οδικό περιβάλλον θα διαρκέσει δεκαετίες, αλλά και ότι η ενσωμάτωση εξοπλισμού διασύνδεσης σε εμπορικά διαθέσιμα οχήματα υπολείπεται των συστημάτων αυτοματοποιημένης οδήγησης, καθίσταται σαφές ότι ο ανθρωποκεντρικός σχεδιασμός συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης είναι απαραίτητος για την επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων. Επιπλέον η διερεύνηση της προσαρμογής των οδηγών σε οδηγίες συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού χαρακτήρα θα δώσει τη δυνατότητα αξιολόγησης των επιπτώσεων περισσότερων σχετικών τεχνολογιών και για διαφορετικά επίπεδα διείσδυσής τους στο συνολικό στόλο των οχημάτων. Παρόλα αυτά, είναι αξιοσημείωτο ότι η ανάπτυξη και διερεύνηση των παραπάνω τεχνολογιών θα πρέπει να βασίζεται σε επαρκή δεδομένα από αντίστοιχες πιλοτικές εφαρμογές ευρείας κλίμακας που λαμβάνουν υπόψη τη μεταβλητότητα της οδικής συμπεριφοράς των

οδηγών, των κυκλοφοριακών συνθηκών, αλλά και των χαρακτηριστικών των οχημάτων. Προς το παρόν, η συντριπτική πλειοψηφία των υφιστάμενων ερευνητικών έργων αξιολογεί τις άνωθεν τεχνολογίες με τη χρήση μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης και μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας.

Δεδομένων των ευρημάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες που ενσωματώνουν ανθρωπογενείς παράγοντες σχετιζόμενους με την οδική συμπεριφορά στο σχεδιασμό, λειτουργία και αξιολόγηση συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών. Ειδικότερα, προτάθηκαν γενικευμένες τροποποιήσεις στη δομή των αλγόριθμων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης, ώστε να βελτιωθεί η άνεση των οδηγών κατά την εκτέλεση ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης αλλά και η ασφάλεια του συστήματος κατά την εφαρμογή στρατηγικών επιβράδυνσης. Οι προτεινόμενες τροποποιήσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

- αποφυγή υπολογισμού στρατηγικών επιβράδυνσης που συμπεριλαμβάνουν πολύ χαμηλές ταχύτητες κίνησης και οι οποίες θα τυγχάνουν χαμηλής αποδοχής από τους οδηγούς/μετακινούμενους και θα επιτυγχάνουν χαμηλή ενεργειακή αποδοτικότητα,
- υπολογισμός στρατηγικών επιβράδυνσης που ολοκληρώνονται πρωθύστερα της μεταβολής της ένδειξης του φωτεινού σηματοδότη από κόκκινο σε πράσινο και δε συνεπάγονται την άφιξη του ΔΟ στη διασταύρωση ταυτόχρονα με την παραπάνω μεταβολή.

Η δεύτερη προτεινόμενη τροποποίηση εξασφαλίζει ότι οι οδηγοί δε θα είναι υποχρεωμένοι να οδηγούν το ΔΟ σε υψηλή ταχύτητα πολύ κοντά στον φωτεινό σηματοδότη ενώ αυτός παραμένει σε κόκκινη ένδειξη, ενώ επίσης θα παρέχει περιθώριο ασφαλούς τροποποίησης της τροχιάς κίνησης του ΔΟ σε περίπτωση παραβίασης του φωτεινού σηματοδότη από διασταυρούμενη κατεύθυνση που λαμβάνει πράσινη ένδειξη κατά τη διάρκεια υλοποίησης της στρατηγικής επιβράδυνσης από το ΔΟ.

Επιπλέον, διερευνήθηκε και προτυποποιήθηκε μαθηματικά η προσαρμογή των οδηγών σε ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών με τη χρήση εμπειρικών δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά την πιλοτική εφαρμογή ενός συστήματος περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού χαρακτήρα κατά μήκος μιας αστικής οδικής αρτηρίας. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των εμπειρικών δεδομένων με αλγόριθμους CFS

οι οποίοι αναγνώρισαν τους κάτωθι παράγοντες ως επιδραστικότερους στο βαθμό προσαρμογής των οδηγών σε ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών:

- τύπος προτεινόμενης ενεργειακά αποδοτικής στρατηγικής οδήγησης (επιτάχυνση, επιβράδυνση, διατήρηση ταχύτητας),
- απόσταση ΔO από το φωτεινό σηματοδότη,
- υπολειπόμενος χρόνος της τρέχουσας φωτεινής ένδειξης.

Ακολούθως, αναπτύχθηκε δένδρο αποφάσεων το οποίο εκτιμά τον βαθμό προσαρμογής των οδηγών σε ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών βάσει των παραπάνω παραγόντων. Συγκεκριμένα, το δένδρο αποφάσεων προσδιορίζει ένα εύρος πιθανών αποκλίσεων από το ιδεατό προφίλ ταχύτητας μιας υπολογισθείσας ενεργειακά αποδοτικής στρατηγικής οδήγησης βάσει των τιμών των παραπάνω παραγόντων. Η τελική τιμή της απόκλισης που μετασχηματίζει το ιδεατό προφίλ ταχύτητας καθορίζεται με τη χρήση στατιστικών μεθόδων. Η ανάπτυξη του δένδρου αποφάσεων δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης συστημάτων περιβαλλοντικής οδήγησης συμβουλευτικού τύπου αλλά τη σύγκρισή τους με αντίστοιχα συστήματα αυτοματοποιημένου τύπου, όπου το όχημα είναι ταυτοχρόνως εξοπλισμένο με συστήματα αυτοματοποιημένης οδήγησης που επιτρέπουν την ακριβή προσαρμογή σε ενεργειακά αποδοτικά προφίλ ταχυτήτων.

Η αξιοποίηση εμπειρικών δεδομένων από την πιλοτική εφαρμογή ενός συστήματος περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού χαρακτήρα κατά μήκος μιας αστικής οδικής αρτηρίας για την ανάπτυξη των προαναφερθέντων μαθηματικών προτύπων αποτελεί μια από τις βασικές καινοτομίες της παρούσας διδακτορικής διατριβής, καθώς η βιβλιογραφική ανασκόπηση δεν εντόπισε προηγούμενο αντίστοιχο ερευνητικό έργο. Για την υλοποίηση της πιλοτικής εφαρμογής εγκαταστάθηκε τεχνολογικός εξοπλισμός σε 200 ταξί και 12 φωτεινούς σηματοδότες, ώστε να καταστεί εφικτή η διασύνδεση υποδομής-οχήματος και η ενημέρωση των οδηγών σχετικά με τις ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές οδήγησης. Κατά τη διάρκεια της πιλοτικής εφαρμογής, ΔO που εισέρχονταν σε προκαθορισμένες ζώνες της αστικής οδικής αρτηρίας (οδικά τμήματα ανάντη φωτεινών σηματοδοτών) λάμβαναν πληροφόρηση μέσω κατάλληλου τηλεπικοινωνιακού πρωτοκόλλου σχετικά με τις μελλοντικές μεταβολές των αντίστοιχων προγραμμάτων σηματοδότησης, ενώ λογισμικό εγκατεστημένο στον εξοπλισμό του ΔO αξιοποιούσε την παρεχόμενη πληροφόρηση προκειμένου να υπολογίσει και μεταβιβάσει στον οδηγό μέσω

κατάλληλης απεικόνισης τις ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές οδήγησης (υπό τη μορφή συνιστώμενης ταχύτητας κίνησης) και τον υπολειπόμενο χρόνο της τρέχουσας φωτεινής ένδειξης. Παράλληλα, λειτουργούσε σύστημα επισκόπησης και καταγραφής της λειτουργίας της εφαρμογής περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης, μέσω του οποίου αποθηκεύονταν σε κατάλληλη βάση δεδομένων τα ακόλουθα λεπτομερή στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης διδακτορικής διατριβής:

- μοναδικός αριθμός κάθε διασυνδεδεμένου ταξί που λάμβανε πληροφόρηση σχετικά με ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές οδήγησης,
- χρονικές στιγμές κατά τις οποίες κάθε διασυνδεδεμένο ταξί λάμβανε πληροφόρηση,
- κωδικός προκαθορισμένης ζώνης στην οποία εισερχόταν κάθε διασυνδεδεμένο ταξί που λάμβανε οδηγίες σχετικά με περιβαλλοντικά φιλική οδήγηση,
- τύπος προτεινόμενης ενεργειακά αποδοτικής στρατηγικής οδήγησης (επιτάχυνση, επιβράδυνση, διατήρηση ταχύτητας),
- τιμή ενεργειακά αποδοτικής ταχύτητας κίνησης που παρέχονταν ως συμβουλή στον οδηγό μέσω κατάλληλης οθόνης απεικόνισης της σχετικής πληροφορίας,
- στιγμιαία ταχύτητα κίνησης του διασυνδεδεμένου ταξί,
- απόσταση του διασυνδεδεμένου ταξί από τον φωτεινό σηματοδότη,
- φάση του προγράμματος σηματοδότησης για την οποία πραγματοποιούνταν ο υπολογισμός της εκάστοτε ενεργειακά αποδοτικής στρατηγικής οδήγησης,
- υπολειπόμενος χρονική διάρκεια της τρέχουσας ένδειξης του φωτεινού σηματοδότη,
- τύπος ένδειξης του φωτεινού σηματοδότης (πράσινη ή κόκκινη).

Τα παραπάνω δεδομένα ανανεώνονταν και καταγράφονταν στη βάση δεδομένων κάθε 3 δευτερόλεπτα.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ανέπτυξε επίσης ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση των επιπτώσεων διαφορετικών τεχνολογιών περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών, το οποίο βασίζεται στη χρήση εργαλείων μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου ερευνητικού έργου, προσομοιώθηκε στο λογισμικό μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας Aimsun το δίκτυο της αστικής οδικής αρτηρίας επί της οποίας πραγματοποιήθηκε η πιλοτική εφαρμογή του συστήματος περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού τύπου. Το μοντέλο μικροσκοπικής προσομοίωσης της

κυκλοφορίας του παραπάνω δικτύου βαθμονομήθηκε σχολαστικά με τη χρήση κυκλοφοριακών μετρήσεων (κυκλοφορικοί φόρτοι και χρόνοι διαδρομής) και κατάλληλων στατιστικών ελέγχων προκειμένου να εξασφαλιστεί η ρεαλιστική αναπαράσταση των πραγματικών κυκλοφοριακών συνθηκών που επικρατούν επί της συγκεκριμένης οδικής αρτηρίας.

Για την προσομοίωση συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης στο Aimsun αναπτύχθηκε εξειδικευμένη Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών (ΔΠΕ). Η ΔΠΕ δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών τόσο συμβουλευτικού όσο και αυτοματοποιημένου τύπου, ενώ επίσης διαθέτει μια απλοποιημένη και ευέλικτη δομή που επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση μελλοντικών αλγόριθμων αντίστοιχων συστημάτων. Μέσω του σχεδιασμού και της υλοποίησης ενός εύχρηστου γραφικού περιβάλλοντος στα πλαίσια ανάπτυξης της ΔΠΕ, διευκολύνεται η παραμετροποίηση της λειτουργίας των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης πριν την αξιολόγηση των αντίστοιχων πειραμάτων μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα, δύναται να οριστούν:

- τα οδικά τμήματα επί των οποίων τα συστήματα περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ΔΟ,
- οι φάσεις των επιμέρους προγραμμάτων σηματοδότησης για τις οποίες πραγματοποιείται υπολογισμός ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης,
- τιμές παραμέτρων που σχετίζονται αποκλειστικά με τους αλγόριθμους υπολογισμού ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης,
- τύποι οχημάτων που θεωρούνται εξοπλισμένα με συστήματα περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης στα πλαίσια της προσομοίωσης,
- αριθμός στοχαστικών προσομοιώσεων για τις οποίες επαναληπτικά και αυτοματοποιημένα θα αξιολογούνται οι επιπτώσεις των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, κάθε ΔΟ που εισέρχεται σε κάποιο οδικό τμήμα όπου έχει οριστεί ως ενεργό το σύστημα περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης λαμβάνει και υλοποιεί μέσω της ΔΠΕ μια ενεργειακά αποδοτική στρατηγική οδήγησης (υπό τη μορφή ενός διανύσματος ταχυτήτων) η οποία ενδέχεται να αναιρεθεί δυναμικά εφόσον η κίνηση του ΔΟ παρακωλυθεί από προπορευόμενο όχημα στην ίδια λωρίδα κυκλοφορίας. Όταν το ΔΟ εφαρμόσει πλήρως την ενεργειακά αποδοτική στρατηγική οδήγησης και διασχίσει την κατάντη σηματοδοτημένη

διασταύρωση δίχως να σταματήσει, τότε η συμπεριφορά του υποδεικνύεται εν συνεχεία από τα μαθηματικά υποδείγματα του Aimsun.

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης πραγματοποιήθηκε μέσω της κατάρτισης δύο υποομάδων πειραμάτων μικροσκοπικής προσομοίωσης. Η πρώτη υποομάδα πειραμάτων καταρτίστηκε με στόχο την αξιολόγηση των προτεινόμενων τροποποιήσεων στους αλγόριθμους περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης που αποσκοπούν στη βελτίωση της άνεσης του οδηγού κατά την εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης αλλά και της ασφαλούς λειτουργίας των σχετικών συστημάτων. Η συγκεκριμένη υποομάδα πειραμάτων έλαβε υπόψη διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες (μη συμφορημένες, σχεδόν συμφορημένες, συμφορημένες) και πολλαπλά επίπεδα διείσδυσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας στο σύνολο του στόλου οχημάτων. Η δεύτερη υποομάδα πειραμάτων σχεδιάστηκε με στόχο τη σύγκριση επιδόσεων ανάμεσα σε συστήματα περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού και αυτοματοποιημένου τύπου, αλλά και κυκλοφοριακών ροών που απαρτίζονται αποκλειστικά από συμβατικά οχήματα που δεν έχουν δυνατότητες διασύνδεσης με τα στοιχεία της οδικής υποδομής. Η συγκεκριμένη υποομάδα πειραμάτων έλαβε υπόψη μη συμφορημένες κυκλοφοριακές συνθήκες και διαφορετικά επίπεδα διείσδυσης των διαφορετικών τεχνολογιών περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης στο σύνολο του στόλου οχημάτων.

Για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων προσομοίωσης σε επίπεδο μεμονωμένων οχημάτων, οδικών τμημάτων αλλά και του συνόλου της αστικής οδικής αρτηρίας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των παρακάτω δεικτών κυκλοφοριακής αποδοτικότητας, περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οδικής ασφάλειας:

- σχέση ταχύτητας-διανυθείσας απόστασης μεμονωμένου οχήματος,
- σχέση ταχύτητας-επιτάχυνσης μεμονωμένου οχήματος,
- χρονοσειρά ταχύτητας μεμονωμένου οχήματος,
- σχέση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα-διανυθείσας απόστασης μεμονωμένου οχήματος,
- εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά διανυθέν χιλιόμετρο,
- αριθμός στάσεων ανά όχημα,
- μέσος χρόνος διαδρομής ανά οδικό τμήμα,
- μέσος χρόνος στάσης ανά διανυθέν χιλιόμετρο,

- μέση ταχύτητα δικτύου,
- αριθμός ενδεχόμενων συγκρούσεων ανά τύπο σύγκρουσης,
- υπολειπόμενος χρόνος έως την σύγκρουση δύο οχημάτων σε περίπτωση που οι τροχιές τους παραμείνουν αμετάβλητες,
- σχετική ταχύτητα οχημάτων εμπλεκόμενων σε δυνητική σύγκρουση.

Ο υπολογισμός των δεικτών κυκλοφοριακής απόδοσης πραγματοποιήθηκε με την χρήση του MS Excel, ενώ για την ανάλυση και απεικόνιση των χαρακτηριστικών των τροχιών κίνησης μεμονωμένων οχημάτων αναπτύχθηκε εξειδικευμένη διαδικτυακή εφαρμογή. Ο υπολογισμός των δεικτών που ποσοτικοποιούν τις επιπτώσεις των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης στην οδική ασφάλεια πραγματοποιήθηκε με το Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) το οποίο έχει τη δυνατότητα να συσχετίζει στατιστικώς με αξιοπιστία δυνητικές συγκρούσεις οχημάτων με πραγματικά δεδομένα ατυχημάτων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το πολύπλευρο μεθοδολογικό πλαίσιο αξιολόγησης των επιπτώσεων των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών δύναται να προσαρμοστεί εύκολα στις ανάγκες μελλοντικών ερευνητικών δραστηριοτήτων μέσω της προσθήκης νέων εργαλείων ή την τροποποίηση των υφιστάμενων.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της πρώτης υποομάδας πειραμάτων μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας κατέδειξαν ότι οι προσαρμογές στη δομή των υφιστάμενων μοντέλων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης που αποσκοπούν στην βελτίωση της αποδοχής τους από τους χρήστες αλλά και στην βελτίωση της ασφαλούς λειτουργίας τους δεν επηρεάζουν αρνητικά την απόδοσή τους αναφορικά με τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών αέριων ρύπων. Ειδικότερα, δύνανται να μειώσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έως και 13% επί μεμονωμένων οδικών τμημάτων και 2.5% σε επίπεδο οδικής αρτηρίας, δίχως να επηρεάζουν αρνητικά του δείκτες κυκλοφοριακής αποδοτικότητας. Επίσης, αναγνωρίστηκε ότι τα οφέλη των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τους παρακάτω παράγοντες:

- γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού,
- μήκος του οδικού τμήματος επί του οποίου είναι ενεργό το σύστημα,
- χαρακτηριστικά του προγράμματος σηματοδότησης,

- πλήθος κατάντη φωτεινών σηματοδοτών για τους οποίους υφίσταται συνεχής πληροφόρηση σχετικά με τον υπολειπόμενο χρόνο της τρέχουσας φωτεινής ένδειξης αλλά και την διάρκεια της επόμενης,
- επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες.

Αξιοσημείωτο εύρημα το οποίο δεν έχει αποτυπωθεί με σαφήνεια σε προηγούμενα ερευνητικά έργα, είναι και το γεγονός ότι τα συστήματα περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης μεταβάλλουν χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής και σε περιοχές του οδικού δικτύου πέραν αυτών που εφαρμόζονται. Συνεπώς, το πλαίσιο υλοποίησης ενός συστήματος περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών θα πρέπει να διερευνάται επαρκώς κατά περίπτωση και σε συνάρτηση με τους προαναφερθέντες παράγοντες, ώστε να διασφαλίζονται τα μέγιστα εφικτά περιβαλλοντικά και κυκλοφοριακά οφέλη.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της δεύτερης υποομάδας πειραμάτων μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας κατέδειξε ότι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα συνδεδεμένων οχημάτων που είναι εξοπλισμένα με συμβουλευτικού τύπου συστήματα περιβαλλοντικής οδήγησης είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με μη συμβατικά οχήματα όταν το ποσοστό διείσδυσης στο στόλο των παραπάνω συστημάτων είναι υψηλό. Αντιθέτως, τα περιβαλλοντικά οφέλη των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού τύπου είναι μικρότερα των αντίστοιχων αυτοματοποιημένου τύπου, ενώ ο βαθμός προσαρμογής των οδηγών σε ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές οδήγησης εξαρτάται από τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδικού τμήματος όπου εφαρμόζεται το σύστημα περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης. Είναι επίσης αξιοσημείωτο, ότι σε οδικές αρτηρίες πολλαπλών λωρίδων η μεγιστοποίηση των περιβαλλοντικών και κυκλοφοριακών πλεονεκτημάτων των συστημάτων περιβαλλοντικής οδήγησης παρατηρείται όταν αυτά είναι αυτοματοποιημένου τύπου και η διείσδυσή τους στο στόλο είναι μέγιστη.

Τα ευρήματα της παρούσης διδακτορικής διατριβής αναφορικά με τον ανθρωποκεντρικό σχεδιασμό συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης, την ορθή εφαρμογή τους σε πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες, καθώς και τις περιβαλλοντικές και κυκλοφοριακές τους επιπτώσεις είναι πολυσήμαντα για τις εταιρείες και τους φορείς που εμπλέκονται στο οδικό σύστημα μεταφορών. Η αυτοκινητοβιομηχανία και οι πάροχοι υπηρεσιών που σχετίζονται με τα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών μπορούν να αναπτύξουν ενεργειακά αποδοτικές

στρατηγικές οδήγησης που είναι φιλικότερες προς τον χρήστη και πιο ασφαλείς, δίχως να απομειώνονται οι θετικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και στην κυκλοφορία. Οι φορείς διαχείρισης των οδικών δικτύων μπορούν να προβλέψουν τις επιπτώσεις διαφορετικών τεχνολογιών περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών τόσο τοπικά όσο και σε επίπεδο συνολικού δικτύου, ενώ επίσης μπορούν να εξετάσουν το ενδεχόμενο υλοποίησης των παραπάνω τεχνολογιών σε διαφορετικά σημεία των οδικών δικτύων βάσει των γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών τους, αλλά και των προγραμμάτων σηματοδότησης που ρυθμίζουν την κυκλοφορία σ' αυτά. Επίσης, οι φορείς διαμόρφωσης πολιτικών σχετικά με τα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών μπορούν να προωθήσουν την εφαρμογή συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού τύπου ανάντη φωτεινών σηματοδοτών, καθώς βάσει εμπειρικών δεδομένων αποδεικνύεται ότι τα συγκεκριμένα συστήματα μπορούν να παρέχουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη υπό ευνοϊκές συνθήκες υλοποίησής τους στο πεδίο.

Σημαντική πτυχή της παρούσης διδακτορικής διατριβής αποτελεί και η αναγνώριση προοπτικών για πραγματοποίηση περαιτέρω έρευνας επί των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης ανάντη φωτεινών σηματοδοτών. Ειδικότερα, οι τροποποιήσεις που προτάθηκαν για τη βελτίωση της άνεσης και ασφάλειας των ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης πραγματοποιούνται μεταγενέστερα του αρχικού υπολογισμού τους. Μελλοντικά, δύναται να ενσωματωθούν περιορισμοί άνεσης και οδικής ασφάλειας στα μοντέλα μαθηματικής βελτιστοποίησης τα οποία αναπτύσσονται για τον υπολογισμό ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης. Μέσω της παραπάνω προσέγγισης, δύναται να βελτιωθεί η αποδοτικότητα των παραπάνω στρατηγικών, αλλά και να επιταχυνθεί η διαδικασία υπολογισμού τους ώστε να εφαρμόζονται πιο αποτελεσματικά σε πραγματικό χρόνο και υπό ρεαλιστικές κυκλοφοριακές συνθήκες.

Επιπλέον, η συλλογή λεπτομερέστερων και περισσότερων εμπειρικών δεδομένων κατά την πιλοτική εφαρμογή συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού τύπου θα δώσει τη δυνατότητα ανάπτυξης βελτιωμένων αντίστοιχων αλγόριθμων. Για παράδειγμα, η συλλογή κυκλοφοριακών δεδομένων κατά την πιλοτική εφαρμογή των παραπάνω συστημάτων θα επιτρέψει τη δημιουργία δένδρων αποφάσεων που εκτιμούν την προσαρμογή των οδηγών σε ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές οδήγησης σε συνάρτηση με τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες (μη συμφορημένες, σχεδόν συμφορημένες, συμφορημένες). Η συγκέντρωση

πληροφορίας σχετικά με τη λωρίδα κίνησης των ΔΟ κατά την εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης δύναται να αξιοποιηθεί προκειμένου ο βαθμός προσαρμογή των οδηγών να προβλέπεται σε επίπεδο λωρίδας. Η παραπάνω δυνατότητα θα είχε μεγάλη χρησιμότητα για οδικά τμήματα που εμπεριέχουν λωρίδες αποκλειστικής χρήσης από συγκεκριμένα οχήματα. Επίσης, θα μπορούσε μελλοντικά να προτυποποιηθεί μαθηματικά η μεταβολή του βαθμού προσαρμογής του οδηγού κατά την εκτέλεση μιας ενεργειακά αποδοτικής στρατηγικής οδήγησης σε συνάρτηση του χρόνου και της συμπεριφοράς του οδηγού κατά τα παρελθόντα βήματα εφαρμογής της άνωθεν στρατηγικής. Στην περίπτωση αυτή, ενδεχομένως να καταστεί εφικτή η προσομοίωση ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης που καταλήγουν να έχουν μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα από τη συμβατική οδήγηση ακόμα και σε περιπτώσεις που ο βαθμός προσαρμογής των οδηγών δε θα είναι ιδιαίτερα χαμηλός.

Προηγούμενα ερευνητικά έργα έχουν αποδείξει ότι η συνεργασία διασυνδεδεμένων και αυτοματοποιημένων οχημάτων (ΔΑΟ) μέσω διασύνδεσης οχήματος-οχήματος μπορεί να επαυξήσει σημαντικά τις επιδόσεις των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης αυτοματοποιημένου τύπου σε μεικτές κυκλοφοριακές ροές. Τα υφιστάμενα ερευνητικά έργα επικεντρώνονται όμως στην συνεργασία των προαναφερθέντων οχημάτων σε επίπεδο διαμήκουσ κίνησης προκειμένου να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές ρύπων. Η ενσωμάτωση δυνατοτήτων συνεργατικής αλλαγής λωρίδας σε προγράμματα μαθηματικής βελτιστοποίησης που αναπτύσσονται με στόχο την περιβαλλοντικά φιλική οδήγηση ανάντη φωτεινών σηματοδοτών μπορεί να μειώσει ακόμα περισσότερο το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ΔΑΟ. Τα δυναμικά περιβαλλοντικά οφέλη μπορεί να αυξηθούν έτι περαιτέρω μέσω της διασύνδεση οχήματος-υποδομής όπου η υποδομή δύναται να αναλάβει ένα κεντρικό ρόλο διευκόλυνσης των συνεργασιών μεταξύ ΔΑΟ ώστε να μεγιστοποιηθεί η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών ρύπων σε επίπεδο δικτύου.

Εν τέλει, συνίσταται η ανάπτυξη τεχνικών οδηγιών βάσει των οποίων θα δύναται να αποφασιστεί η υλοποίηση διαφορετικών τεχνολογιών περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης σε συνάρτηση με τις υπολογιστικές τους επιδόσεις, τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των οδών, τον τύπο και τη δομή των προγραμμάτων σηματοδότησης, καθώς και των επικρατουσών κυκλοφοριακών συνθηκών. Στην περίπτωση των συστημάτων περιβαλλοντικά φιλικής οδήγησης συμβουλευτικού τύπου τα παραπάνω στοιχεία δύναται να συνδυαστούν με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε οδηγού αλλά κατά δυναμικά χαρακτηριστικά του ΔΟ κατά την είσοδο σε ένα οδικό τμήμα όπου

Evangelos Mintsis | Mathematical models for dynamic eco-driving in signalized intersections in the context of cooperative intelligent transportation systems

υποστηρίζεται η παραπάνω τεχνολογία, ώστε να αποφασιστεί η αξία ενημέρωσης ενός οδηγού σχετικά με τη δυνατότητα εκτέλεσης μιας ενεργειακά αποδοτικής στρατηγικής οδήγησης.