



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ  
ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ ΣΕ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥΣ



**Νικόλαος Γ. Παπαγεωργίου**

Επιβλέπουσα: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη

**Αθήνα, Μάρτιος 2013**



# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα κυρία Ελένη Βλαχογιάννη, Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, την υποστήριξη και την πολύτιμη καθοδήγηση της σε όλα τα στάδια εκπόνησής της. Η διάθεση για συζήτηση οποιουδήποτε προβληματισμού και απορίας συνέβαλε στο μέγιστο για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και ιδιαίτερα του τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής για τις γνώσεις που μου παρείχαν σε όλη την πορεία της φοίτησής μου και για την καθοριστική συμβολή τους στο να με εξοπλίσουν με τα κατάλληλα εφόδια για την μελλοντική επαγγελματική μου σταδιοδρομία.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα την οικογένεια μου για την αμέριστη αγάπη και συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια του προπτυχιακού κύκλου σπουδών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και τα κοντινά μου πρόσωπα που ήταν δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα, για τις ωραίες αλλά και τις δύσκολες στιγμές που περάσαμε μαζί όλα αυτά τα χρόνια. Η ενθάρρυνση και προτροπή τους μου έδιναν κουράγιο για να συνεχίσω να προσπαθώ και να υπερνικώ τις όποιες δυσκολίες συναντούσα στην πορεία.

Νικόλαος Γ. Παπαγεωργίου  
Αθήνα  
Μάρτιος 2013

# ΣΥΝΟΨΗ

---

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση της επίδρασης που ασκούν διάφορα συμβάντα στην κυκλοφορία των οχημάτων σε αυτοκινητοδρόμους. Παρόλο που η πραγματική επιρροή ενός συμβάντος που διαδραματίζεται σε κάποιο αυτοκινητόδρομο δεν μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα, μπορεί να προσδιοριστεί εμμέσως χρησιμοποιώντας ως δείκτες το μέγιστο μήκος της σχηματιζόμενης διαταραχής (ουράς) οχημάτων που σχηματίζεται ανάντη του ατυχήματος και τη χρονική διάρκειά της. Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται σε δομικά πρότυπα εξισώσεων, μια γενικευμένη πολυπαραγοντική στατιστική τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στις κοινωνικές επιστήμες και που μπορεί να ενσωματώσει χαρακτηριστικά-δομές που δεν μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα. Το παραπάνω πλαίσιο υλοποιείται χρησιμοποιώντας πρότυπα πολλαπλών δεικτών-πολλαπλών αιτιών (Multiple Indicators Multiple Input Causes -MIMIC). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία δεδομένων που προήλθαν από καταγραφές περιστατικών της Αττικής Οδού στην Αθήνα, Ελλάδα δείχνουν ότι τα πρότυπα MIMIC είναι σε θέση να προσδιορίσουν με ακρίβεια την επίδραση ενός συμβάντος στην ανάντη κυκλοφορία με πιθανότητα 72% το μέσο τετραγωνικό σφάλμα να προκύψει μικρότερο από 0.05. Παράγοντες όπως είναι η ταχύτητα, ο κυκλοφοριακός φόρτος, η γεωμετρική χάραξη της οδού (ευθυγραμμία ή καμπύλη), η ένταση της βροχόπτωσης, ο χρόνος καθαρισμού της περιοχής, ο τύπος του ατυχήματος (εάν είναι πρωτογενές ή δευτερογενές), είναι ανάμεσα στους πιο καθοριστικούς όσον αφορά στην αξιολόγηση της επίδρασης των συμβάντων στην κυκλοφορία.

# ABSTRACT

---

The aim of this thesis is to examine the effects of incident occurrence on freeway traffic. Although the true influence of a freeway incident may not be directly observed, it may be identified using the spatial and temporal extent of the disturbance induced to upstream traffic. Spatial and temporal extent is susceptible to various traffic, weather, geometry and incident specific factors. The above framework is implemented using a Multiple Indicators-Multiple Causes (MIMIC) latent variable model. Results using data from Athens, Greece indicate that the MIMIC model is able to accurately determine the influence of an incident on upstream traffic with 72% probability of producing mean square errors less than 0.05. Speed, lane volume, alignment, rainfall intensity, clearance time and whether the incident is a secondary or a primary one are among the most influential factors for assessing the anticipatory effect of incidents to traffic.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Στους αυτοκινητοδρόμους, έπειτα από ένα συμβάν, για παράδειγμα ένα τροχαίο ατύχημα, είναι συχνό φαινόμενο ο σχηματισμός περιοχών συμφόρησης ανάντη του συμβάντος και η δημιουργία ουρών. Στις περιοχές αυτές επικρατούν συνθήκες χαμηλών ταχυτήτων και υψηλής πυκνότητας, ενώ τα όρια επιρροής των περιοχών συμφόρησης μπορεί να εκτείνονται σε μεγάλα οδικά τμήματα για μακρά χρονικά διαστήματα. Σε αυτού του είδους τις κυκλοφοριακές συνθήκες είναι αυξημένη η πιθανότητα εμφάνισης νέων ατυχημάτων, τα αποκαλούμενα δευτερογενή συμβάντα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται διερεύνηση και αξιολόγηση της επίδρασης που ασκούν διάφορα συμβάντα στην κυκλοφορία των οχημάτων σε αυτοκινητοδρόμους. Παρόλο που η πραγματική επιρροή ενός συμβάντος που διαδραματίζεται σε κάποιο αυτοκινητόδρομο δεν μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα, μπορεί να προσδιοριστεί εμμέσως χρησιμοποιώντας ως δείκτες το μέγιστο μήκος της σχηματιζόμενης διαταραχής (ουράς) ανάντη του ατυχήματος και τη χρονική διάρκεια της. Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι η κατανόηση της συμβολής ορισμένων παραγόντων στην δημιουργία σύγχρονων κυκλοφοριακών προβλημάτων, όπως είναι η κυκλοφορική συμφόρηση, η δημιουργία ουρών και η πρόκληση δευτερευόντων ατυχημάτων υπό την εμφάνιση μη αναμενόμενων συμβάντων. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας ορίστηκε ως περιοχή μελέτης το τμήμα της Αττικής Οδού Ελευσίνα – Αεροδρόμιο και στις δύο κατευθύνσεις. Για την ανίχνευση των περιοχών συμφόρησης χρησιμοποιήθηκαν κυκλοφοριακά στοιχεία από το υπάρχον δίκτυο φωρατών, που είναι τοποθετημένοι ανά πεντακόσια μέτρα στον ανοιχτό αυτοκινητόδρομο και ανά εξήντα μέτρα στις σήραγγες σε όλη την περιοχή μελέτης και στοιχεία από βάση δεδομένων των ατυχημάτων που συνέβησαν στην περιοχή μελέτης κατά τα έτη 2007 και 2009.

Το μέγιστο μήκος της διαταραχής και η χρονική διάρκεια της (ουράς) η οποία σχηματίζεται ανάντη ενός ατυχήματος, υπολογίστηκε βάση αναλυτικών και εμπειρικών προσεγγίσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές συμφόρησης ανιχνεύτηκαν ως προς το μήκος και τη διάρκειά τους με μια δυναμική μεθοδολογία η οποία βασίστηκε στις εξισώσεις του Kerner (2004) για την παρακολούθηση της εξέλιξης μιας κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης έπειτα από ένα συμβάν. Οι χρόνοι εκτιμήθηκαν βάσει μιας τροποποιημένης εκδοχής του αλγόριθμου του Chen et al. (2004) που βασίζεται σε οριοθέτηση κατωφλιού τιμών ταχύτητας. Οι τροποποιήσεις που έγιναν στην μέθοδο του Chen et al. (2004) αναφέρονται στην τιμή του

ανώτατου κατωφλιού τιμών ταχύτητας και τις διαφορές ταχύτητας μεταξύ διαδοχικών φωρατών. Για τον προσδιορισμό χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές μετρήσεις ταχύτητας. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι το ανάντη μέτωπο της διαταραχής είχε φτάσει ένα ανιχνευτή κάποια στιγμή εάν ικανοποιούνταν 3 καθορισμένα κριτήρια. Στις περιπτώσεις όπου ο αναλυτικός τρόπος κρίθηκε δύσκολο να εφαρμοστεί, οι περιοχές επιρροής καθορίστηκαν από μια εμπειρική μέθοδο και ο υπολογισμός έγινε ως εξής: ακριβώς μετά την εμφάνιση ενός πρωτεύοντος ατυχήματος από τη χρονική στιγμή που ο κοντινότερος ανάντη ανιχνευτής κατέγραφε τα δεδομένα ταχύτητας που ικανοποιούσαν τα 3 συγκεκριμένα κριτήρια, η θέση αυτή του δρόμου θεωρήθηκε ότι παρουσίαζε συμφόρηση μέχρι τη χρονική στιγμή που τα κριτήρια έπαυαν να ισχύουν. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε σε κάθε ανιχνευτή που ήταν τοποθετημένος ανάντη του ατυχήματος και είχε καταγράψει, σύμφωνα με τα κριτήρια, μειωμένη ταχύτητα. Συνδιάζοντας όλες αυτές τις πληροφορίες σχετικά με τη διάρκεια της συμφόρησης σε κάθε θέση σε ένα χωροχρονικό διάγραμμα, γίνεται εφικτό να “εντοπιστούν” τα πραγματικά όρια μιας περιοχής επιρροής και επίσης τον ακριβό τρόπο σχηματισμού και αποσχηματισμού της.

Η παραπάνω προσέγγιση για τον εντοπισμό της επιρροής ενός συμβάντος, χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των δευτερογενών συμβάντων, θεωρώντας ότι δευτερογενή χαρακτηρίζονται τα ατυχήματα που λαμβάνουν χώρα εντός ή στα όρια μίας περιοχής συμφόρησης προκαλούμενης από κάποιο πρωτογενές συμβάν. Κάθε συμβάν που λαμβάνει χώρα εντός αυτής της χωροχρονικής περιοχής, μπορεί να χαρακτηριστεί με ένα καλό βαθμό βεβαιότητας ως δευτερογενές.

Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά μεγέθη των περιοχών συμφόρησης, η επεξεργασία των δεδομένων έδειξε ότι οι μεγάλες ουρές δεν σχηματίζονται απαραίτητα στα σοβαρά περιστατικά, αλλά έχουν περισσότερο σχέση με την ώρα διεξαγωγής του ατυχήματος και τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Η προσπάθεια ερμηνείας του φαινομένου της διάρκειας και του μήκους των ουρών και γενικά της επιρροής του ατυχήματος στην επικρατούσα κυκλοφορία με απλά γραμμικά πρότυπα, παρόλο που δίνει κάποια χρήσιμα συμπεράσματα, εντούτοις κρίθηκε ανεπαρκής. Συνεπώς, η κύρια μεθοδολογική προσέγγιση που υιοθετείται βασίζεται κυρίως σε δομικά πρότυπα εξισώσεων, μια γενικευμένη πολυπαραγοντική στατιστική τεχνική που μπορεί να ενσωματώσει χαρακτηριστικά-δομές που δεν μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα. Το παραπάνω πλαίσιο υλοποιείται χρησιμοποιώντας δομικά πρότυπα εξισώσεων της μορφής πολλαπλών δεικτών-πολλαπλών αιτιών (Multiple Indicators-Multiple Input Causes - MIMIC), όπου οι δείκτες (Indicators) είναι η διάρκεια και το μέγιστο μήκος της δημιουργούμενης διαταραχής και οι επεξηγηματικοί παράγοντες (explanatory

Variables) τα κυκλοφοριακά, γεωμετρικά και καιρικά χαρακτηριστικά της στιγμής του συμβάντος. Η πραγματική επιρροή του συμβάντος συμβολίζεται ως μια μη παρατηρήσιμη μεταβλητή (latent variable) .

Με τη βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης και των δομικών προτύπων εξισώσεων (SEM) φάνηκε ότι τα μεγάλα μήκη ουρών είναι συσχετισμένα με τις μεγάλες διάρκειες. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εκτιμήθηκαν δύο δομικά πρότυπα για την περιγραφή της διάρκειας και του μέγιστου μήκους των σχηματιζόμενων ουρών.

Όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς για το Πρότυπο 1, διάφοροι παράγοντες όπως είναι η ταχύτητα, ο κυκλοφοριακός φόρτος, η γεωμετρική χάραξη της οδού (ευθυγραμμία ή στροφή), η ύπαρξη ράμπας γειτονικά (ανάντη) του σημείου όπου διαδραματίζεται το συμβάν, η ένταση-ύψος βροχόπτωσης, η διάρκεια καθαρισμού του ατυχήματος και ο τύπος συμβάντος διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο και επηρεάζουν σε στατιστικά σημαντικό βαθμό τη διάρκεια και το μήκος της σχηματιζόμενης ουράς ενός συμβάντος. Το δεύτερο δομικό πρότυπο παρουσίαζε μια σημαντική διαφοροποίηση συγκριτικά με το πρώτο. Ενώ στο Πρότυπο 1 εφαρμόστηκε μόνο ένα κύριο γραμμικό πρότυπο παλινδρόμησης (regression model) όπου επιδρούσαν απευθείας σε μια λανθάνουσα μεταβλητή όλοι οι προγνωστικοί παράγοντες, στο Πρότυπο 2 εφαρμόστηκε ένα παράλληλο κύριο γραμμικό πρότυπο παλινδρόμησης το οποίο εξέφραζε την επιρροή που έχουν οι παράγοντες βαρέα οχήματα, αριθμός αποκλεισμένων λωρίδων κυκλοφορίας και σοβαρότητα ατυχήματος στην χρονική διάρκεια εκκαθάρισης του ατυχήματος (clearance time). Ακολούθως η τελευταία μεταβλητή συνδέθηκε σε δεύτερη φάση με την λανθάνουσα μεταβλητή.

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των δυο δομικών προτύπων δείχνουν ότι παράγοντες όπως είναι η ταχύτητα, ο κυκλοφοριακός φόρτος, η γεωμετρική χάραξη της οδού, η ύπαρξη ράμπας γειτονικά του σημείου όπου διαδραματίζεται το συμβάν, η ένταση-ύψος βροχόπτωσης, η διάρκεια εκκαθάρισης του ατυχήματος και ο τύπος συμβάντος επηρεάζουν σε στατιστικά σημαντικό βαθμό τη διάρκεια και το μήκος της σχηματιζόμενης ουράς ενός συμβάντος. Αξιοσημείωτο είναι ότι και στα δύο πρότυπα, όπως προέκυψε από την ανάλυση, ο κυκλοφοριακός φόρτος έχει αρκετά μικρή επιρροή πάνω στο μέγιστο μήκος και τη διάρκεια της ουράς που δημιουργείται στην περιοχή συμφόρησης. Το Πρότυπο 2 υστερεί συγκριτικά με το πρώτο σε όρους προσαρμοστικότητας που περιγράφονται από τα κριτήρια καλής προσαρμογής, παρ' όλα αυτά κρίνεται πιο κατάλληλο για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης διάφορων παραγόντων με τη διάρκεια και το μήκος των ουρών, καθώς εξετάζει 3 επιπλέον παραμέτρους και συνεπώς έχει αυξημένη εξηγηματική δύναμη.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup></b> .....	<b>12</b>
1.1 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΕ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥΣ .....	12
1.2 ΣΥΜΒΑΝΤΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ.....	13
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	15
1.4 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup></b> .....	<b>18</b>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	18
2.2 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ.....	19
2.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ .....	22
2.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ .....	34
2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup></b> .....	<b>36</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	36
3.2 ΣΧΕΣΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΥΜΒΑΝΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ .....	37
3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ .....	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup></b> .....	<b>50</b>
4.1 ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	50
4.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΥΜΒΑΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ.....	52
4.1.2 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ.....	54
4.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΚΟΥΣ ΟΥΡΑΣ .....	56
4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ .....	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup></b> .....	<b>79</b>
5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	79
5.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	80
5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	82
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>84</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	<b>87</b>
ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ASDA .....	93
ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ASDA .....	94
ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ASDA .....	98

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ .....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ .....	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΖΟΜΕΝΗΣ ΟΥΡΑΣ .....	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΈΛΕΓΧΟΣ BREUSCH-RAGAN ΓΙΑ ΥΠΑΡΞΗ ΕΤΕΡΟΣΚΕΔΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΜΗΚΟΣ ΟΥΡΑΣ .....	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΟΥΡΑΣ.....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΗΚΟΥΣ ΟΥΡΑΣ .....	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΚΑΛΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ 1 (GOODNESS OF FIT STATISTICS).....	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ 1 .....	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΚΑΛΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ 2 (GOODNESS OF FIT STATISTICS).....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ 2 .....	75
ΣΧΗΜΑ 1: ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ.....	19
ΣΧΗΜΑ 2: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΖΕΥΓΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ – ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ (ΠΗΓΗ : MOORE, 2004) .....	25
ΣΧΗΜΑ 3: ΠΟΣΟΣΤΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΟΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ. (ΠΗΓΗ: MOORE, 2004).....	27
ΣΧΗΜΑ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΘΕΩΡΙΑ ΟΥΡΩΝ. (ΠΗΓΗ: ZHANG ΚΑΙ ΚΗΑΤΤΑΚ, 2009) .....	29
ΣΧΗΜΑ 5: ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ .....	38
ΣΧΗΜΑ 6: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΟΜΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ MIMIC .....	46
ΣΧΗΜΑ 7: ΔΟΜΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 1 - ΔΟΜΗ, ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ .....	63
ΣΧΗΜΑ 8: ΔΟΜΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 2 - ΔΟΜΗ, ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ .....	71
ΣΧΗΜΑ 9: ΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΙΝΟΥΜΕΝΗΣ ΦΑΛΑΓΓΑΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ ΔΥΟ ΦΩΡΑΤΕΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΕΣ. (ΠΗΓΗ: KERNER B., "THE PHYSICS OF TRAFFIC") .....	93
ΣΧΗΜΑ 10: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ASDA ΓΙΑ ΡΑΜΠΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ ΑΝΑΝΤΗ (A-C) ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΤΗ (D-F) ΤΗΣ ΚΙΝΟΥΜΕΝΗΣ ΦΑΛΑΓΓΑΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ (ΠΗΓΗ: KERNER.ET.AL.) .....	99

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

---

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΕΣ ΟΜΑΔΕΣ (ΠΗΓΗ: SHRANK AND LOMAX 2003).....	13
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΧΡΟΝΟΥ-ΧΩΡΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΓΙΑ 16 ΠΙΘΑΝΑ ΖΕΥΓΗ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ- ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ (ΠΗΓΗ: MOORE, 2004) .....	27
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΚΑΜΠΥΛΗ (ΜΗΚΟΥΣ ΟΥΡΑΣ-ΧΡΟΝΟΥ) ΠΡΟΟΔΟΥ ΣΥΜΒΑΝΤΟΣ IPC .....	30
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΚΑΜΠΥΛΗ ΠΡΟΟΔΟΥ ΣΥΜΒΑΝΤΟΣ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΑ ΚΑΤΩΤΑΤΑ ΟΡΙΑ (ΠΗΓΗ: SUN ΚΑΙ CHILUKURI, 2010) .....	31
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ ΛΟΓΟ ΦΟΡΤΟΥ/ΚΑΤΑΛΗΨΗΣ. (ΠΗΓΗ: <a href="http://www.ctre.iastate.edu/mtc/reports/secondary-accidents.htm">HTTP://WWW.CTRE.IASTATE.EDU/MTC/REPORTS/SECONDARY-ACCIDENTS.HTM</a> ) .....	32
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ ΠΛΗΘΟΣ ΤΩΝ ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΥΜΒΑΝ. (ΠΗΓΗ: <a href="http://www.ctre.iastate.edu/mtc/reports/secondary-accidents.htm">HTTP://WWW.CTRE.IASTATE.EDU/MTC/REPORTS/SECONDARY-ACCIDENTS.HTM</a> ) .....	33
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΔΕΙΓΜΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ .....	54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8 : ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ .....	55

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΕ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟΥΣ

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση (traffic congestion) αποτελεί, ίσως, το μεγαλύτερο πρόβλημα στη λειτουργία των ελεύθερων λεωφόρων και των αυτοκινητοδρόμων. Προκύπτει από την αύξηση της χρήσης της οδού και χαρακτηρίζεται από χαμηλές ταχύτητες, μεγαλύτερους χρόνους διαδρομής και αύξηση του φαινομένου του σχηματισμού ουρών οχημάτων. Εμφανίζεται όταν η ζήτηση της οδού αυξάνεται τόσο ώστε να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ των οχημάτων με αποτέλεσμα τη μείωση των ταχυτήτων σε ένα κυκλοφοριακό ρεύμα. Καθώς η ζήτηση συνεχίζει να αυξάνεται, πλησιάζει, και συχνά ξεπερνάει, τη χωρητικότητα της οδού. Στην περίπτωση αυτή, τα οχήματα συχνά είναι πλήρως ακινητοποιημένα για κάποιες χρονικές περιόδους.

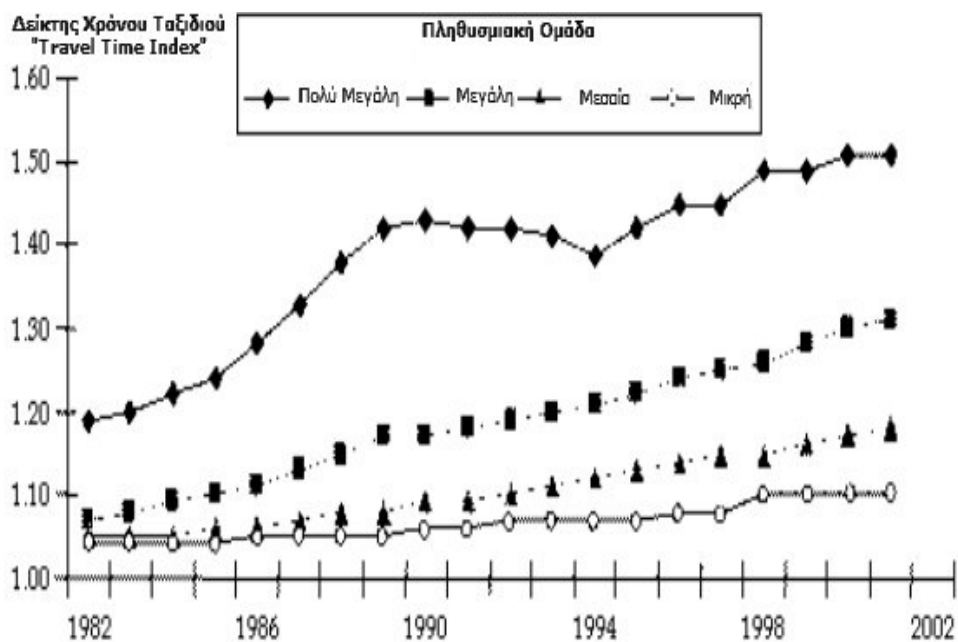
Η κυκλοφοριακή συμφόρηση στο οδικό δίκτυο είναι το αποτέλεσμα πολλών διαφορετικών παραγόντων που αλληλεπιδρούν, οι οποίοι μπορούν να συνοψιστούν σε δύο κατηγορίες:

- Η κυκλοφοριακή κίνηση υπερβαίνει τη κυκλοφοριακή ικανότητα του οδικού δικτύου.
- Διάφορα συμβάντα, που επηρεάζουν την κυκλοφορία, όπως διάφορα τροχαία ατυχήματα και η κακοκαιρία.

Ειδικότερα σχετίζονται με την αύξηση της ζήτησης των οχημάτων ή με την μείωση της χωρητικότητας της οδού. Αύξηση της ζήτησης παρατηρείται κυρίως κατά τις ώρες αιχμής, όπου υπάρχει μαζική ανάγκη μετακινήσεων, ενώ μείωση της χωρητικότητας υπάρχει όταν συμβεί ένα μη περιοδικό περιστατικό, όπως τα τροχαία ατυχήματα, ή οι εργασίες στο δρόμο ή έντονα καιρικά φαινόμενα. Όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Διάγραμμα 1 παρακάτω η κυκλοφοριακή συμφόρηση αυξάνεται και αναμένεται επίσης να αυξηθεί περαιτέρω στο μέλλον.

Ο Δείκτης Χρόνου Μετακίνησης (Travel Time) αποτελεί μέτρο του συνολικού ύψους της συμφόρησης και ορίζεται ως ο λόγος των ημερών της εβδομάδας του χρόνου ταξιδιού σε περίοδο αιχμής προς το χρόνο ταξιδιού κάτω από ιδανικές συνθήκες. Για παράδειγμα η τιμή του δείκτη 1,3 δείχνει ότι απαιτείται 30 τοις εκατό

περισσότερος χρόνος ταξιδιού σε περίοδο αιχμής παρά από ότι κάτω από ιδανικές συνθήκες. Οι πληθυσμιακές ομάδες είναι οι εξής: Πολύ μεγάλη (μεγαλύτερη από τρία εκατομμύρια), μεγάλη (ένα έως τρία εκατομμύρια), μεσαία (500 χιλιάδες έως ένα εκατομμύριο), μικρή (λιγότερο από 500 χιλ.).



Διάγραμμα 1: Συμμόρφηση σε περιόδους αιχμής ανάλογα με πληθυσμιακές ομάδες (Πηγή: Shrank and Lomax 2003)

Η συμμόρφηση έχει πολλές αρνητικές επιπτώσεις στους χρήστες του οδικού δικτύου, και όχι μόνο, με κυριότερη τις καθυστερήσεις. Οι καθυστερήσεις οδηγούν σε αδυναμία υπολογισμού του χρόνου ταξιδιού, σπατάλη εν δυνάμει παραγωγικού χρόνου, δυσκολία διεκπεραίωσης υποχρεώσεων και κατά συνέπεια σε εκνευρισμό. Ακόμα, λόγω των παραπάνω έχουν αρνητικές συνέπειες στην οικονομία μιας περιοχής. Επίσης, δεν μπορεί να αμεληθεί η μόλυνση της ατμόσφαιρας που προκαλείται από τις εκπομπές καυσαερίων οι οποίες είναι αυξημένες όταν υπάρχουν χαμηλές ταχύτητες και φρεναρίσματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

## 1.2 ΣΥΜΒΑΝΤΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ

Ως συμβάντα ορίζονται τα απρόβλεπτα περιστατικά που λαμβάνουν χώρα στο οδικό δίκτυο και έχουν αρνητικές επιπτώσεις στους χρήστες του, μεταξύ των οποίων αυξημένες καθυστερήσεις, υλικές ζημιές, τραυματισμούς, θάνατο, καθυστερήσεις,

ανασφαλείς οδικές συνθήκες ή ακόμα και νέα συμβάντα. Τα ατυχήματα που συνηθέστερα εμφανίζονται στους αυτοκινητόδρομους είναι οι συγκρούσεις δύο ή περισσότερων οχημάτων και οι εκτροπές από την οδό, τα οποία είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς οχημάτων που κινούνται σε αυτούς. Τα αίτια των ατυχημάτων ποικίλουν, ανάλογα με την περίπτωση, και έχουν άμεση σχέση με τον ανθρώπινο παράγοντα, τη γεωμετρία της οδού, την κατάσταση των οχημάτων και άλλα.

Τα ατυχήματα είναι μη περιοδικά περιστατικά που προκαλούν μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας. Συνήθως ευθύνονται για το 30-50% της συμφόρησης σε αστικές περιοχές. Πολλά ατυχήματα δεν προκαλούν καθόλου συμφόρηση σε αντίθεση με άλλα που καταλήγουν σε μεγάλου μήκους ουρές και καθυστερήσεις λόγω, συνήθως, του αποκλεισμού ορισμένων λωρίδων της οδού μέχρις ότου να απομακρυνθούν τα εμπλεκόμενα, στο ατύχημα, οχήματα από την περιοχή.

Σε αρκετές περιπτώσεις όπου συμβαίνει ένα πρωτογενές ατύχημα, παρατηρείται και κάποιο δευτερογενές συμβάν ως αποτέλεσμα του αυξημένου κυκλοφοριακού κινδύνου που δημιουργείται από την επικρατούσα κυκλοφοριακή συμφόρηση. Τα δευτερογενή ατυχήματα είναι αποτέλεσμα ενός άλλου συμβάντος το οποίο προηγείται χρονικά. Δηλαδή, ένα δευτερογενές ατύχημα συμβαίνει στην περιοχή όπου υπάρχει η ουρά η οποία έχει σχηματιστεί λόγω ενός προγενέστερου ατυχήματος το οποίο ονομάζεται πρωτογενές. Έχει βρεθεί ότι δευτερογενή συμβάντα μπορεί να διεξαχθούν έπειτα από ατυχήματα μικρής ή μεγάλης κλίμακας κατά τις δύο κατευθύνσεις της κυκλοφορίας και όχι μόνο κατά τη διεύθυνση του αρχικού ατυχήματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να πραγματοποιηθούν περισσότερα από ένα ατυχήματα στη διάρκεια της συμφόρησης που προκλήθηκε από το πρωτογενές.

Τα δευτερογενή ατυχήματα, όπου παρατηρούνται, προκαλούν επιδείνωση των κυκλοφοριακών συνθηκών που επικρατούν σε ένα αυτοκινητόδρομο. Αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα που κρίνεται αναγκαίο να εξετάζεται και να λαμβάνεται υπ' όψιν στην προσπάθεια ερμηνείας διαφόρων κυκλοφοριακών καταστάσεων. Έχει αποδειχθεί από την παγκόσμια βιβλιογραφία ότι συμβάλλουν στην αύξηση της συνολικής χρονικής διάρκειας των ατυχημάτων και στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια ερμηνείας τους για το εάν και πώς αυτά επηρεάζουν τη διάρκεια των σχηματιζόμενων ουρών καθώς επίσης και το μέγιστο μήκος των οχημάτων που τις απαρτίζουν.

Ο χαρακτηρισμός ενός ατυχήματος ως δευτερογενές δεν είναι πάντα εύκολος είτε λόγω της παντελούς έλλειψης στοιχείων, είτε λόγω της αμφισβητούμενης αξιοπιστίας τους. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι με τις οποίες εντοπίζονται τα

δευτερογενή ατυχήματα, διαφορετικές μεταξύ τους, οι οποίες γενικά βασίζονται στην προσπάθεια αποτύπωσης της χωρικής και χρονικής περιοχής όπου επικρατούσαν συνθήκες συμφόρησης μετά το πρωτογενές συμβάν. Εάν υπάρχουν ατυχήματα που έχουν διεξαχθεί στην περιοχή αυτή εξάγεται το συμπέρασμα ότι αυτά είναι δευτερογενή. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει μία σχετικά ασφαλή σύνδεση των δύο συμβάντων.

Είναι αμφίβολο κατά πόσο υπάρχει η δυνατότητα μείωσης των πρωτογενών ατυχημάτων διότι στην εμφάνιση αυτών παίζουν πρωταρχικό ρόλο τα ανθρώπινα σφάλματα όπως η κούραση, η επιθετική οδήγηση, η υπερβολική κατανάλωση αλκοόλ και άλλα. Παρόλα αυτά, ενώ τα δευτερογενή ατυχήματα δεν διαφέρουν ως προς τις συνέπειες που επιφέρουν –στους χρήστες και στο δίκτυο- με τα πρωτογενή, είναι εφικτό έπειτα από λήψη συγκεκριμένων μέτρων να μειωθούν. Το γεγονός δε, ότι ένα μεγάλο ποσοστό του συνόλου των ατυχημάτων ( μεγαλύτερο από 15% όπως έχει βρεθεί από τους Raub (1997) και Karlaftis et.al. (1999)) είναι δευτερογενή ατυχήματα, καθιστά προφανές το συμπέρασμα ότι η μείωσή τους θα είναι σημαντικά ωφέλιμη για την οδική ασφάλεια. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους όπως για παράδειγμα με τη βοήθεια συσκευών μεταβλητών μηνυμάτων αλλά και του προσωπικού περιπολίας, του εκάστοτε αυτοκινητοδρόμου, όπου μπορούν να πληροφορούν εγκαίρως τους οδηγούς για το ότι κατευθύνονται προς περιοχή όπου έχει συμβεί κάποιο ατύχημα και ότι υπάρχει πιθανότητα σχηματισμού ουράς. Μία τέτοια πληροφορία είναι ικανή να αλλάξει την συμπεριφορά των οδηγών στην περιοχή αυτή με πολύ πιθανό αποτέλεσμα την ελάττωση του πλήθους των δευτερογενών ατυχημάτων και άρα και του συνόλου των ατυχημάτων. Για να συμβεί όμως κάτι τέτοιο, θα πρέπει να είναι δυνατή η πρόβλεψη του φαινομένου της ουράς αλλά και ο προσδιορισμός του μήκους και της χρονικής διάρκειάς της. Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν κινηθεί πολλές μελέτες που είτε στοχεύουν στο να εντοπίσουν τα χαρακτηριστικά των πρωτογενών ατυχημάτων τα οποία οδηγούν σε δευτερογενή, είτε στο σχηματισμό μίας γενικευμένης χωροχρονικής καμπύλης η οποία να αποτυπώνει την εξέλιξη της ουράς ανάντη της θέσης του αρχικού συμβάντος.

### **1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση της επίδρασης που ασκούν διάφορα συμβάντα στην κυκλοφορία των οχημάτων σε αυτοκινητοδρόμους. Πιο συγκεκριμένα, σε έναν αυτοκινητόδρομο, θα εξεταστεί η επιρροή που εμφανίζουν ατυχήματα, που έλαβαν χώρα σε συνολική χρονική διάρκεια 2 ετών, στο μέγιστο μήκος και στη διάρκεια της ουράς των οχημάτων που σχηματίζεται ανάντη του ατυχήματος. Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται σε

δομικά πρότυπα εξισώσεων, μια γενικευμένη πολυπαραγοντική στατιστική τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στις κοινωνικές επιστήμες και που μπορεί να ενσωματώσει χαρακτηριστικά - δομές που δεν μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα (λανθάνουσες μεταβλητές) (Washington et al. 2010). Ένα συμβάν προκαλεί μια διαταραχή στην κυκλοφορία, η οποία μεταδίδεται ανάντη του ατυχήματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται η υπόθεση ότι πραγματική επιρροή ενός συμβάντος σε κάποιο αυτοκινητόδρομο, δεν μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα, αλλά μπορεί να προσδιοριστεί εμμέσως χρησιμοποιώντας ως δείκτες το μέγιστο μήκος της σχηματιζόμενης διαταραχής (ουράς) οχημάτων που σχηματίζεται ανάντη του ατυχήματος και τη χρονική διάρκεια της. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι αυτοί οι δείκτες επηρεάζονται από ποικίλους προγνωστικούς παράγοντες (predictors), οι οποίοι εκφράζουν διάφορα κυκλοφοριακά, καιρικά, γεωμετρικά και άλλα συγκεκριμένα μεγέθη, όπως είναι η ταχύτητα και ο κυκλοφοριακός φόρτος κατά την εμφάνιση του ατυχήματος, η ένταση της βροχόπτωσης, η ύπαρξη ράμπας γειτονικά του σημείου, ο αριθμός των αποκλεισμένων λωρίδων κυκλοφορίας κ.α.

#### **1.4 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η διπλωματική εργασία είναι χωρισμένη στα παρακάτω επιμέρους κεφάλαια:

1. Στο (1<sup>ο</sup>) κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του φαινομένου της κυκλοφοριακής συμφόρησης στις ελεύθερες λεωφόρους και γίνεται η εισαγωγή στα ατυχήματα ως το κύριο αίτιο πρόκλησης κυκλοφοριακής συμφόρησης.
2. Στο δεύτερο (2<sup>ο</sup>) κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σε παλαιότερες έρευνες που έχουν γίνει πάνω στις διάρκειες των ατυχημάτων και τη δημιουργία ουρών και σε δεύτερη φάση γίνεται αναφορά στα δευτερεύοντα ατυχήματα.
3. Στο τρίτο (3<sup>ο</sup>) κεφάλαιο γίνεται διερεύνηση της σχέσης διάρκειας και μέγιστου μήκους επιρροής συμβάντος με την πιθανότητα εμφάνισης δευτερεύοντος ατυχήματος και έπειτα διατυπώνονται τρία γραμμικά πρότυπα παλινδρόμησης όπου παρουσιάζονται απλές γραμμικές σχέσεις μεταξύ μεταβλητών. Τέλος γίνεται η εισαγωγή στα πρότυπα δομικών εξισώσεων (SEM).
4. Στο τέταρτο (4<sup>ο</sup>) κεφάλαιο, αρχικά γίνεται αναφορά στην περιοχή μελέτης, τα στοιχεία που συλλέχθηκαν και τη μεθοδολογία καταγραφής τους, έπειτα περιγράφεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της διάρκειας και του μέγιστου μήκους επιρροής του ατυχήματος στην



κυκλοφορία (αναλυτική και εμπειρική). Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς των πρωταρχικών γραμμικών προτύπων παλινδρόμησης. Τέλος διατυπώνεται η κύρια χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία, αναπτύσσονται δύο πρότυπα δομικών εξισώσεων (SEM-MIMIC models) και γίνεται η κατάλληλη στατιστική ανάλυση.

5. Στο πέμπτο κεφάλαιο (5<sup>ο</sup>) παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από την εν λόγω έρευνα και καταλήγοντας γίνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

---

## *ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ*

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

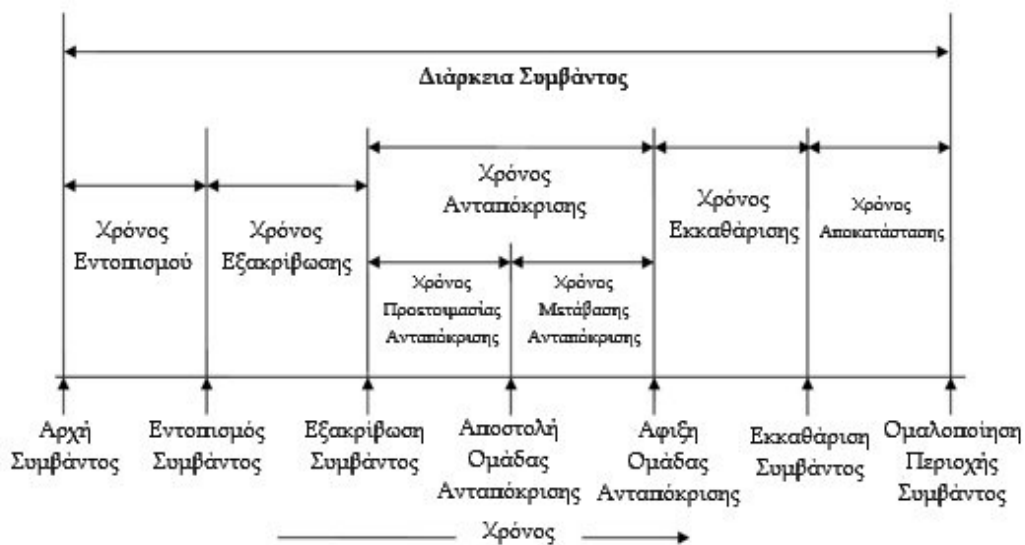
Το πιο σημαντικό μάθημα που πρέπει να αντληθεί από τις πολυάριθμες σχετικές μελέτες της κυκλοφοριακής συμφόρησης που διεξήχθησαν, είναι ότι το πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με την κατασκευή ολοένα και περισσότερων αυτοκινητοδρόμων. Στις περιπτώσεις που η αύξηση της χωρητικότητας των οδικών δικτύων ως μέτρο μείωσης της κυκλοφοριακής συμφόρησης δεν είναι εφικτή λόγω των τεράστιων ποσοτήτων των πόρων που απαιτούνται, όπως η γη, τα χρήματα, τα καύσιμα και το εργατικό δυναμικό, άλλες εναλλακτικές λύσεις όπως είναι η αλλαγές στη χρήση γης, βελτίωση της λειτουργίας των οδών, διαχείριση της ζήτησης των μετακινήσεων, διαχείριση οδικών συμβάντων (που αφορούν ατυχήματα ή συμβάντα που προκαλούν κυκλοφοριακά προβλήματα), διαχείριση πληροφοριών σχετικά με τον καιρό, έχουν προταθεί ως εφικτές και αποτελεσματικές. Μεταξύ αυτών των εναλλακτικών λύσεων, η διαχείριση οδικών συμβάντων είναι πιθανόν το πιο υποσχόμενο βραχυπρόθεσμο μέτρο για την άμβλυνση των προβλημάτων της κυκλοφοριακής συμφόρησης στους αυτοκινητοδρόμους και τις αστικές αρτηρίες. Η μεγάλη επιτυχία των προγραμμάτων αυτών έχει οδηγήσει όλο και περισσότερες πόλεις να υιοθετούν προγράμματα διαχείρισης οδικών συμβάντων ως ένα βήμα προς την βελτίωση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας στις μετακινήσεις.

Η διαχείριση οδικών συμβάντων είναι μια συλλογική και συντονισμένη προσπάθεια από διάφορους οργανισμούς για την αντιμετώπιση των διαταραχών της κυκλοφορίας, αποφέροντας σημαντικά οφέλη μέσω της μείωσης των καθυστερήσεων των οχημάτων και την αυξημένης ασφάλειας των αυτοκινητιστών μέσω της μείωσης της συχνότητας εμφάνισης ατυχημάτων ή άλλων συμβάντων και μέσω της βελτίωσης της απόκρισης και του χρόνου μέχρι να καθαριστεί ο χώρος όπου έγινε το συμβάν και να επανέλθει η κυκλοφορία στο αρχικό της στάδιο. Οι κυριότερες ειδικότητες που απαρτίζουν ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα διαχείρισης οδικών συμβάντων είναι οι κρατικές και τοπικές υπηρεσίες μεταφορών (DOTs), οργάνων επιβολής του νόμου, η πυροσβεστική, φορείς διάσωσης, φορείς ρυμούλκησης, πάροχοι ταξιδιωτικών πληροφοριών όπως είναι τα μέσα μαζικής ενημέρωσης, κ.α.

Δεδομένου ότι ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα διαχείρισης συμβάντων αφορά τον συντονισμό των λειτουργιών πολλών από αυτών των οργανισμών για την αντιμετώπιση των περιστατικών, η διαχείριση της κυκλοφορίας αποτελεί μια σημαντική πρόκληση. Πολλές πόλεις έχουν πλέον κέντρα διαχείρισης της κυκλοφορίας τα οποία συμβάλλουν στην ένταξη συστημάτων επικοινωνίας αυτών των διαφορετικών υπηρεσιών και συνεπώς, συμβάλλουν στο να επιτευχθεί μια συλλογική προσπάθεια για την ταχεία και αποτελεσματική διαχείριση περιστατικών.

## 2.2 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

Ένας από τους κύριους στόχους ενός προγράμματος διαχείρισης οδικών συμβάντων, είναι η μείωση των επιπτώσεων ενός συμβάντος στους μετακινούμενους. Ο πιο προφανής τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να καθαριστεί η σκηνή του συμβάντος όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Η διάρκεια ενός συμβάντος μπορεί να οριστεί ως ο χρόνος που διανύθηκε μεταξύ της έναρξης του συμβάντος μέχρις ότου αποκατασταθούν οι κανονικές συνθήκες του ταξιδιού. Το χρονοδιάγραμμα μιας τυπικής διαδικασίας διαχείρισης ενός συμβάντος με τις διάφορες φάσεις που το απαρτίζουν, φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Χρονοδιάγραμμα Διαχείρισης Οδικών Συμβάντων. (Σημείωση: Τα διαστήματα δεν αντιστοιχούν στη χρονική διάρκεια κάθε φάσης)

Η συνολική διάρκεια ενός συμβάντος μπορεί να υποδιαιρεθεί ως εξής:

- Χρόνος για τον εντοπισμό συμβάντος (incident detection time). Είναι ο χρόνος μεταξύ της αρχής του συμβάντος (Start of the Incident) και του εντοπισμού του (Incident Detected).
- Χρόνος εξακρίβωσης συμβάντος (incident verification time). Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να διαπιστωθεί η παρουσία του συμβάντος.
- Χρόνος προετοιμασίας ανταπόκρισης συμβάντος (incident response preparation time). Είναι ο χρόνος μεταξύ ενημέρωσης της ομάδας ανταπόκρισης συμβάντος και την αποστολή της).
- Χρόνος μετάβασης της ομάδας ανταπόκρισης συμβάντος. (incident response travel time). Είναι ο χρόνος που χρειάζεται η ομάδα ανταπόκρισης να φτάσει στο σημείο του συμβάντος, αφού ενημερώθηκε για το περιστατικό.
- Χρόνος για την εκκαθάριση της περιοχής του συμβάντος (incident clearance time).
- Χρόνος αποκατάστασης συμβάντος (incident recovery time). Είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε το σύστημα να επανέλθει στα κανονικά του πλαίσια (ομαλοποίηση).

Η διαδικασία εκκαθάρισης (που αφορά την ασφαλή και έγκαιρη απομάκρυνση των τυχόν μπλοκαρισμένων οχημάτων, συντριμμιών, θραυσμάτων από τον δρόμο και την αποκατάσταση του οδοστρώματος ώστε να επανέλθουν συνθήκες ελεύθερης και ανεμπόδιστης ροής της κυκλοφορίας), είναι συνήθως η πιο χρονοβόρα φάση στο πρόγραμμα διαχείρισης οδικών συμβάντων και ως εκ τούτου, η μείωση του χρόνου εκκαθάρισης συμβάντων (incident clearance time), έχει το μεγαλύτερο όφελος όσον αφορά την βελτίωση του συνολικού χρόνου διαχείρισης των περιστατικών. Συνήθως, η όλη διαδικασία εκκαθάρισης ενός συμβάντος, χρειάζεται τουλάχιστον τον διπλάσιο χρόνο από οποιαδήποτε άλλη φάση στο χρονοδιάγραμμα της διαχείρισης οδικών συμβάντων. Καταγράφοντας τους χρόνους εκκαθάρισης συμβάντων και κατανοώντας τις ιδιότητες τους, θα επιτρέψει την καλύτερη αξιολόγηση και την δημιουργία βελτιωμένων προγραμμάτων αποτελεσματικότερης αντιμετώπισης στο μέλλον.

Το ερευνητικό έργο για την δημιουργία τεχνικών πρόβλεψης της διάρκειας ατυχημάτων ξεκίνησε το 1987. Παρόλο που έχει γίνει αρκετή έρευνα πάνω στο θέμα αυτό, δεν υπάρχει συμφωνία ανάμεσα στις διάφορες μελέτες και αυτό οφείλεται κυρίως στην φύση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τις μελέτες αυτές. Σχεδόν κάθε μια από αυτές τις μελέτες χρησιμοποιεί διαφορετικά δεδομένα, διαφορετικές μεταβλητές πρόβλεψης και διαφορετικές τεχνικές μοντελοποίησης.

Μια από τις πρώτες μελέτες, διεξήχθη από τον Golob και άλλους (1987) και αφορούσε την ανάλυση ατυχημάτων με φορτηγά σε αυτοκινητοδρόμους. Χρησιμοποιώντας στατιστικές δοκιμές, όπως ο έλεγχος  $\chi^2$  και η δοκιμή Kolmogorov-Smirnov, κατάφεραν να μοντελοποιήσουν την συνολική διάρκεια του συμβάντος σύμφωνα με μια κανονική λογαριθμική κατανομή. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης μια στατιστικής κατανομής, είναι ο άμεσος τρόπος υπολογισμού της πιθανότητας ενός ατυχήματος να διαρκέσει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το ποσοστό των περιστατικών που διαρκούν λιγότερο από μια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια μπορεί επίσης να υπολογιστεί με την βοήθεια της αθροιστικής συνάρτησης της διάρκειας του συμβάντος.

Οι θετικές τιμές της διάρκειας των ατυχημάτων-συμβάντων, σε συνδυασμό με μεγαλύτερες αναλογίες μικρής διάρκειας συμβάντων κάνουν κατάλληλη την χρήση στατιστικών κατανομών όπως είναι η λογαριθμική και η κατανομή Weibull. Στην πραγματικότητα, έρευνες από τους Giuliano (1989), Garib και άλλους (1997) και Sullivan (1997), έχουν υποστηρίξει την χρήση μιας κανονικής λογαριθμικής κατανομής για την περιγραφή της διάρκειας ατυχημάτων σε ελεύθερους αυτοκινητοδρόμους. Οι Nam και Mannering το 2000 βρήκαν ότι η κατανομή Weibull θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή ορισμένων δεδομένων ατυχημάτων.

Πρότυπα πρόβλεψης βασισμένα στην μέθοδο της παλινδρόμησης, έχουν επίσης αναπτυχθεί κατά το παρελθόν. Τα πρότυπα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξετάσουν την επίδραση ορισμένων χαρακτηριστικών των ατυχημάτων που έχουν να κάνουν με τη διάρκεια τους. Ο Garib και άλλοι (1997), ανέπτυξαν ένα πρότυπο που βασίζεται στην γραμμική παλινδρόμηση. Βάση ανάλυσης αποτελούμενης από 205 ατυχήματα που συνέβηκαν σε διάρκεια 2 μηνών στο Oakland της Καλιφόρνιας, ανέπτυξαν ένα πρότυπο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με έξι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές : αριθμός λωρίδων που επηρεάζονται (X1), αριθμός των οχημάτων που εμπλέκονται (X2), δυαδική μεταβλητή για την εμπλοκή φορτηγών (X3), δυαδική μεταβλητή για την περίοδο της ημέρας (X4), φυσικό λογάριθμο του χρόνου απόκρισης της αστυνομίας (X5) και μια δυαδική μεταβλητή για τις καιρικές συνθήκες (X6).

Ο Khattak και άλλοι (1995), υποστηρίζουν ότι τα περισσότερα πρότυπα πρόβλεψης διάρκειας ατυχημάτων, έχουν μηδαμινή λειτουργική αξία αφού απαιτούν γνώση όλων των μεταβλητών/παραμέτρων του συμβάντος, ενώ στην πράξη, πληροφορίες για το ατύχημα λαμβάνονται ακολουθιακά και αυτό πρέπει να προβλέπεται στο πρότυπο. Στην μελέτη τους, εντόπισαν διάφορα στάδια ενός συμβάντος βασισμένα στις διάφορες διαθέσιμες πληροφορίες και ανέπτυξαν πρότυπα παλινδρόμησης για κάθε ένα από αυτά τα στάδια. Όσο περισσότερες πληροφορίες σχετικές με το

συμβάν γίνονται διαθέσιμες, το πρότυπο προσθέτει περισσότερες μεταβλητές για να προβλέψει τη διάρκεια του συμβάντος, βασιζόμενο στις διαθέσιμες πληροφορίες στο στάδιο αυτό. Η μελέτη αυτή βασίστηκε σε ένα μικρό δείγμα συμβάντων και είχε στόχο να επιδείξει την ύπαρξη μιας νέας μεθοδολογίας. Το συγκεκριμένο όμως πρότυπο, δεν έχει ούτε επικυρωθεί από τότε, ούτε εφαρμόστηκε σε κάποια μελλοντική μελέτη σχετικά με την πρόβλεψη διάρκειας ατυχημάτων.

Το κύριο μειονέκτημα της γραμμικής παλινδρόμησης είναι το μεγάλο μέγεθος της προγνωστικής εξίσωσης που προκύπτει, λόγω της κατηγορηματικής φύσης των ανεξάρτητων μεταβλητών, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολλές “ψευδομεταβλητές”. Ένα άλλο μειονέκτημα της χρήσης γραμμικών προτύπων είναι η παραδοχή μιας “απλουστευμένης” γραμμικής σχέσης ανάμεσα στην εξαρτημένη μεταβλητή και τις μεταβλητές πρόβλεψης.

Πρότυπα που βασίζονται σε όρους πιθανοτήτων, έχουν επίσης αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας. Αυτά είναι πρότυπα πρόβλεψης της πιθανότητας διάρκειας συμβάντων, δεδομένου ότι το συμβάν έχει διαρκέσει ήδη ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο Jones και άλλοι, πρότειναν ένα πρότυπο που βασίζεται σε όρους πιθανοτήτων το 1991. Οι Nam και Mannering έδωσαν συνέχεια στην ιδέα αυτή, με την εφαρμογή προτύπων επικινδυνότητας (hazard-based models), χρησιμοποιώντας όρους πιθανοτήτων για την εύρεση της πιθανότητας ότι ένα συμβάν θα τελειώσει στο επόμενο σύντομο χρονικό διάστημα, για την ανάπτυξη προτύπων διάρκειας συμβάντων. (Nam and Mannering 2000).

### **2.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ**

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τα δευτερεύοντα ατυχήματα και τη διάρκεια τους, τα οποία αποτελούν συνέπεια της κυκλοφοριακής συμφόρησης που παρατηρείται έπειτα από κάποιο ατύχημα. Οι μελέτες τους στοχεύουν άλλοτε στην αποσαφήνιση του όρου δευτερογενές ατύχημα και στον εντοπισμό τους και άλλοτε στα αίτια που είναι πιθανό να την προκάλεσαν και τον καθορισμό της χρονικής διάρκειας που καταλαμβάνουν. Απώτερος σκοπός όλων αυτών των ερευνών είναι η κατανόηση του φαινομένου που μπορεί να οδηγήσει, λαμβάνοντας τα κατάλληλα μέτρα, στη μείωση του και κατά συνέπεια στην μείωση των αρνητικών του επιπτώσεων.

Το πρώτο πρότυπο διερεύνησης δευτερευόντων ατυχημάτων αναπτύχθηκε από τον Raub (1997). Αυτό ήταν ένα πρότυπο συχνότητας δευτερευόντων ατυχημάτων (συγκρούσεις οχημάτων), το οποίο προβλέπει τον αριθμό δευτερευόντων ατυχημάτων ανά περιστατικό. Ο Raub επισημαίνει τα προβλήματα σχετικά με τον

καθορισμό και τη μέτρηση των δευτερογενών ατυχημάτων διότι συχνά είναι δύσκολο να γίνει η σύνδεση του αρχικού και του μεταγενέστερου συμβάντος και στη συνέχεια να επιβεβαιωθεί ότι το πρωτογενές πράγματι συνείσφερε στην διεξαγωγή του δευτερογενούς. Ο Karlaftis και άλλοι (1998) χρησιμοποιώντας δεδομένα από την υπηρεσία περιπολίας των αυτοκινητοδρόμων στην περιοχή της Ιντιάνα ανέπτυξαν λογιστικά πρότυπα τα οποία εξέταζαν ποια είναι τα χαρακτηριστικά των πρωτογενών ατυχημάτων που μπορεί να επηρεάζουν την πιθανότητα εμφάνισης ενός δευτερογενούς ατυχήματος. Ο Latoski και άλλοι (1999) υπολόγισαν τα οικονομικά οφέλη και επιπλέον τη μείωση των καθυστερήσεων από τη μείωση των δευτερογενών ατυχημάτων.

Οι Moore και Giuliano (2004) ανέπτυξαν και εφάρμοσαν μία μέθοδο εντοπισμού των δευτερογενών ατυχημάτων βασισμένη στη χρήση ειδικών δεδομένων με στόχο την εκτίμηση του ποσοστού των δευτερογενών ατυχημάτων στις ελεύθερες λεωφόρους στη περιοχή του Λος Άντζελες. Η ερευνά τους κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα δευτερογενή ατυχήματα είναι πολύ σπανιότερα από ότι οι προηγούμενες μελέτες υποστήριζαν.

Οι περισσότερες έρευνες υποθέτουν ότι ένα ατύχημα το οποίο συνέβη, χωρικά και χρονικά, κοντά σε ένα άλλο είναι δευτερογενές. Οι Moore και Giuliano (2004) επισήμαναν ότι μία τέτοια υπόθεση μπορεί να οδηγήσει σε υπολογισμούς που περιέχουν ουσιαστικά σφάλματα. Για το λόγο αυτό όρισαν τις εξής προϋποθέσεις για το χαρακτηρισμό ενός ατυχήματος ως δευτερογενές:

1. Πρέπει να έχει συμβεί εντός των ορίων της περιοχής υψηλής πυκνότητας η οποία σχηματίζεται έπειτα από ένα αρχικό ατύχημα ή άλλο περιστατικό που προκαλεί μείωση της χωρητικότητας στην οδό, ή
2. Ανάντη της περιοχής του αρχικού ατυχήματος, σε οποιαδήποτε από τις δύο κατευθύνσεις, εντός της ουράς.

Τα πρωτογενή συμβάντα αποτελούνται από ατυχήματα ή άλλα περιστατικά τα οποία πραγματοποιούνται επί της οδού και μπορούν να επηρεάσουν την κυκλοφορία και στις δύο κατευθύνσεις. Μπορούν να οδηγήσουν σε περισσότερα από ένα δευτερογενή ατυχήματα. Όσα περιστατικά δεν έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ουράς δεν μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή ατυχήματα.

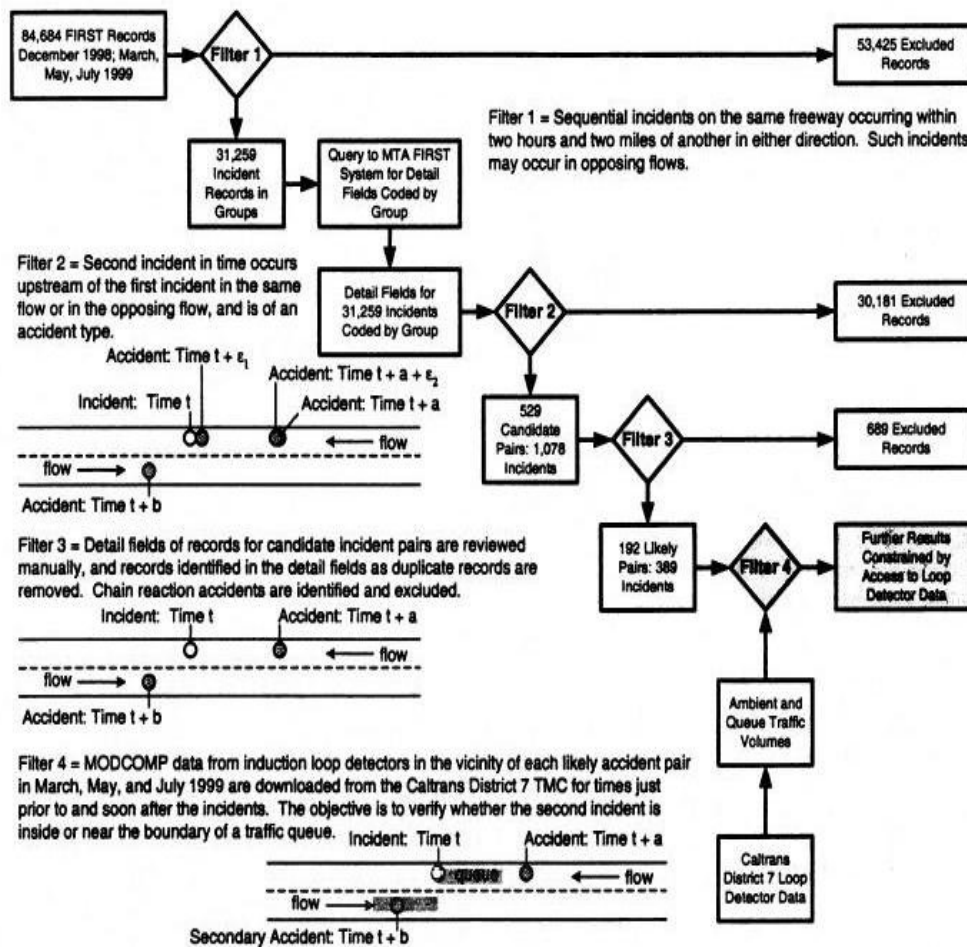
Τα δευτερογενή ατυχήματα, λόγω της υπόθεσης ότι συμβαίνουν πάντα σε περιοχές συμφόρησης, έχουν χαμηλότερες ταχύτητες, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την απομάκρυνσή τους από την οδό. Πρέπει να διευκρινιστεί η διαφοροποίηση των δευτερογενών ατυχημάτων από τα ατυχήματα αλυσιδωτής αντίδρασης τα οποία

συμβαίνουν λίγα δευτερόλεπτα μετά το αρχικό συμβάν και έχουν άμεση σχέση με αυτό.

Οι Moore και Giuliano (2004) χρησιμοποίησαν στοιχεία από μία βάση δεδομένων (MTA/CHP First Incident Response Services Tracking (FIRST) System) που κατέγραφε όλα τα συμβάντα και παρείχε λεπτομέρειες για το καθένα όπως η χιλιομετρική θέση, οι συνθήκες που επικρατούσαν στην οδό πριν από το περιστατικό και το είδος του ατυχήματος. Επίσης χρησιμοποίησαν μετρήσεις από φωρατές που βρίσκονται στους αυτοκινητοδρόμους του Λος Άντζελες, όπου ήταν και η περιοχή μελέτης τους. Επέλεξαν να αναλύσουν τα ατυχήματα που έγιναν σε τρεις αντιπροσωπευτικούς μήνες το Μάρτιο, το Μάιο και τον Ιούλιο του 1999 καθώς και στη τελευταία εβδομάδα του Δεκεμβρίου του 1998. Το Μάρτιο εμφανίζονται συχνά βροχοπτώσεις στην περιοχή σε αντίθεση με το Μάιο, όπου οι βροχοπτώσεις είναι πιο σπάνιες. Τον Ιούλιο, όπου δεν έχει βροχοπτώσεις, υπάρχει υψηλή ζήτηση στους αυτοκινητοδρόμους λόγω των μετακινήσεων εκδρομέων. Η τελευταία εβδομάδα του Δεκεμβρίου μελετήθηκε διότι είναι η μοναδική χρονική περίοδος όπου δεν λειτουργεί η υπηρεσία περιπολίας των αυτοκινητοδρόμων.

Για να εντοπίσουν τα υποψήφια ζεύγη πρωτογενών-δευτερογενών συμβάντων οι Moore και Giuliano (2004) χρησιμοποίησαν μία ακολουθία βημάτων (Σχήμα 2). Σε κάθε βήμα, ή φίλτρο, όπως το αποκαλούν, εξετάζονται κάποια κριτήρια ώστε να αποκλείονται σταδιακά τα ατυχήματα τα οποία δεν είναι δευτερογενή ούτως ώστε στο τέλος να προκύψουν πραγματικά ζευγάρια πρωτογενούς - δευτερογενούς συμβάντος.





Σχήμα 2: Παρουσίαση των τεσσάρων φίλτρων για τον εντοπισμό ζευγών πρωτογενών – δευτερογενών συμβάντων (Πηγή : Moore, 2004)

### Φίλτρο 1: Εγγύτητα στο χώρο και στο χρόνο

Το πρώτο βήμα είχε ως στόχο να εντοπίσει γεγονότα που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, χωρικά και χρονικά, στον ίδιο αυτοκινητόδρομο. Το βήμα αυτό έχει γίνει σε όλες τις αντίστοιχες μελέτες για τα δευτερογενή ατυχήματα. Η βιβλιογραφία προσφέρει μικρή εμπειρική καθοδήγηση στο σημείο αυτό. Σε ορισμένες έρευνες χρησιμοποιήθηκε η απόσταση του 1 μιλίου (Raub 1997b). Το πιο συνηθισμένο κριτήριο είναι αυτό των 15 λεπτών έπειτα από την ολοκλήρωση του αρχικού ατυχήματος (Raub 1997b; Latoski et al. 1999). Σύμφωνα όμως με τη μελέτη του Al-Deek και άλλων (1995) για περιστατικά στην περιοχή της Καλιφόρνια βρέθηκαν ουρές μήκους 2,1-5 μιλίων και χρονικής διάρκειας 42 λεπτών έως 2 ωρών και 24 λεπτών. Κατόπιν παρατηρήσεων των μηκών ουράς στην περιοχή μελέτης τους οι Moore και Giuliano θέσπισαν το όριο των 2 μιλίων και των 2 ωρών και για τις δύο κατευθύνσεις της κυκλοφορίας. Με το φίλτρο 1 εντοπίστηκαν ομάδες συμβάντων που απείχαν μεταξύ τους 2 ώρες και 2 μίλια, το πολύ, και έλαβαν χώρα στην ίδια

οδό. Από το αρχικό πλήθος των 84.684 συμβάντων ικανοποιούσαν τα παραπάνω κριτήρια τα 31.259 (37%).

#### Φίλτρο 2: Τοποθεσία και τύπος συμβάντος

Με το φίλτρο 1 δεν επιβεβαιώνεται αν τα ατυχήματα τα οποία έπονται του αρχικού βρίσκονται πίσω από αυτό κατά τη διεύθυνση της κυκλοφορίας. Αυτό είναι σημαντικό διότι εάν ένα ατύχημα συμβεί στην ίδια διεύθυνση αλλά κατάντη του πρωτογενούς τότε δεν μπορεί να θεωρηθεί δευτερογενές. Με το φίλτρο 2 λαμβάνονταν τα επιλεγμένα ατυχήματα, από το φίλτρο 1, και αποκλείονται όλα όσα λόγω της θέσης τους δεν μπορεί να είναι δευτερογενή. Επίσης, εντοπίζει τα υποψήφια δευτερογενή ατυχήματα από τον τύπο τους, δηλαδή αποκλείοντας τα περιστατικά που δεν ήταν ατυχήματα και τα ατυχήματα αλυσιδωτής αντίδρασης. Από τα 31.259 συμβάντα, που εισάχθηκαν στο φίλτρο 2, μόλις τα 1.078 (529 ζευγάρια) παρέμειναν.

#### Φίλτρο 3: Διπλοεγγραφές

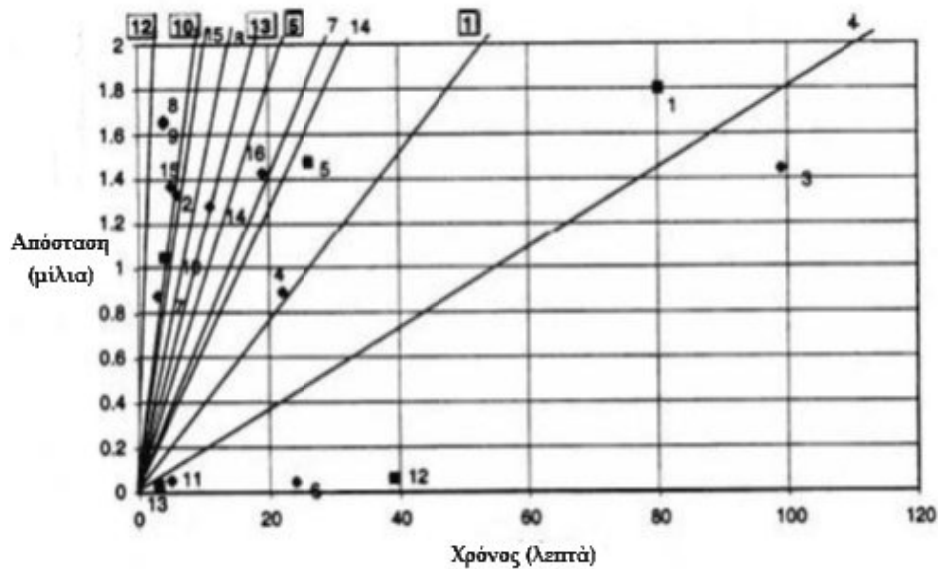
Στο βήμα αυτό τα ζεύγη ατυχημάτων που έχουν επιλεγθεί από το φίλτρο 2 ελέγχονται ως προς το αν υπάρχουν καταχωρημένα στη βάση δεδομένων περισσότερες από μία φορές. Διασταυρώνοντας τα στοιχεία από τη βάση δεδομένων, τα υποψήφια ζευγάρια μειώνονται σχεδόν κατά τα δύο τρίτα αυτών του φίλτρου 2. Πιο συγκεκριμένα, από 529 τα ζευγάρια έφτασαν τα 192.

#### Φίλτρο 4: Θέση σε σχέση με την ουρά

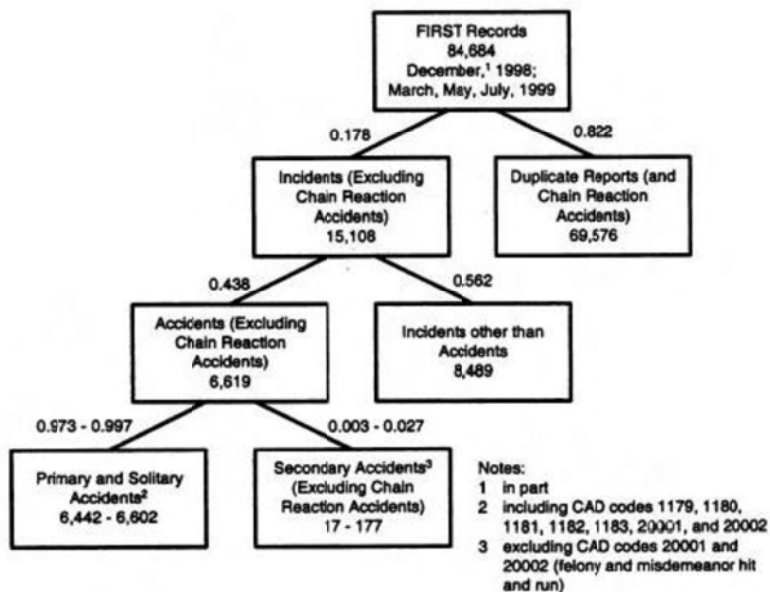
Η επεξεργασία αυτού του βήματος βασίστηκε στα δεδομένα που λήφθηκαν από τους φωρατές. Από τα στοιχεία αυτά, εντοπίζεται η περιοχή συμφόρησης που δημιουργήθηκε, έπειτα από το αρχικό συμβάν, και στις δύο κατευθύνσεις. Τα δευτερογενή ατυχήματα εμφανίζονται μέσα σε αυτή την περιοχή υψηλής πυκνότητας.

Η ταχύτητα των κυμάτων επιβράδυνσης και επιτάχυνσης μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς από τα δεδομένα που παρέχουν οι φωρατές καθιστώντας πιθανό να προσδιοριστεί σε ποια πλευρά του μετώπου του κύματος συμβαίνει το δευτερογενές ατύχημα. Η ταχύτητα του κύματος εξαρτάται από το ρυθμό ροής και τη πυκνότητα πάνω από το αρχικό περιστατικό και το ρυθμό ροής και την πυκνότητα μέσα στην περιοχή υψηλής πυκνότητας που σχηματίζεται πίσω από αυτό. Όταν οι συντεταγμένες του υποψήφιου δευτερογενούς ατυχήματος βρίσκονται κάτω από τη διαγώνιο γραμμή του διαγράμματος, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2, τότε βρίσκονται εντός της περιοχής συμφόρησης και επομένως το ατύχημα που αντιπροσωπεύουν είναι ασφαλώς δευτερογενές.

Δυστυχώς, λόγω έλλειψης στοιχείων από τους φωρατές από τα 192 ζεύγη ατυχημάτων κατάφεραν να αναλυθούν με τον παραπάνω τρόπο μόλις 16. Από αυτά, εντοπίστηκαν 5 επιβεβαιωμένα ζευγάρια πρωτογενούς-δευτερογενούς. Εκτιμήθηκε ότι το ποσοστό των δευτερογενών ατυχημάτων κυμάνθηκε από 0,003- 0,027% όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.



Διάγραμμα 2: Συντεταγμένες χρόνου-χώρου και υπολογισμένα κυκλοφοριακά κύματα για 16 πιθανά ζεύγη πρωτογενών- δευτερογενών συμβάντων (Πηγή: Moore, 2004)

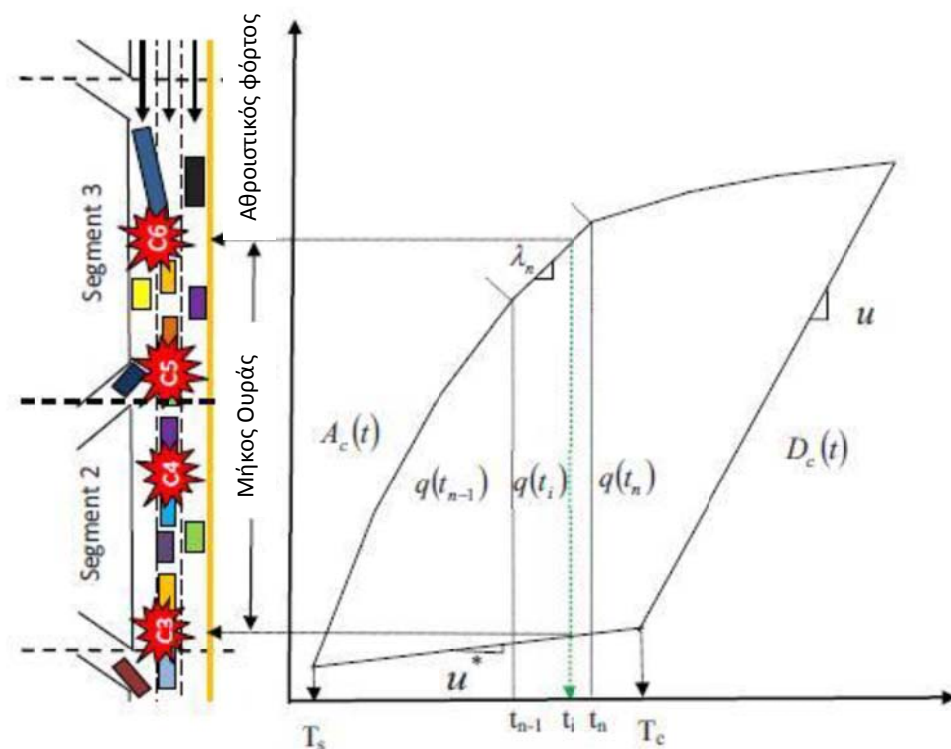


Σχήμα 3: Ποσοστά περιστατικών και ατυχημάτων όπως υπολογίστηκαν από τη μέθοδο των τεσσάρων φίλτρων. (Πηγή: Moore, 2004)

Οι Zhang και Khattak (2009) μελέτησαν για πρώτη φορά τα πολλαπλά δευτερογενή συμβάντα σε αντίθεση με τις προγενέστερες έρευνες όπου εξέταζαν τα πρωτογενή και τα δευτερογενή ατυχήματα δυαδικά, αγνοώντας την πιθανότητα εμφάνισης περισσότερων από ένα δευτερογενών ατυχημάτων. Η σκοπιμότητα της μελέτης των παραπάνω σχετίζεται με τις προφανώς σοβαρότερες επιπτώσεις που μπορούν να επιφέρουν στην κυκλοφορία.

Οι Zhang και Khattak (2009) προσπάθησαν να εντοπίσουν, να κατηγοριοποιήσουν και να αναλύσουν τα δευτερογενή ατυχήματα με σκοπό την εύρεση των παραγόντων που σχετίζονται με την πρόκλησή τους αλλά και τις επιπτώσεις τους. Έχοντας στη διάθεσή τους μία μεγάλη βάση δεδομένων περιστατικών και κυκλοφοριακών συνθηκών για την περιοχή μελέτης τους (Hamptons Road Area), που περιλαμβάνει αρκετές πόλεις των Η.Π.Α και έχει πληθυσμό περί το 1,6 εκατομμύρια κατοίκους, χρησιμοποίησαν μία δυναμική μέθοδο βασισμένη στη θεωρία ουρών. Με τη μέθοδο αυτή εντοπίζονται τα δευτερογενή ατυχήματα που έχουν διεξαχθεί στην ίδια κατεύθυνση με το πρωτογενές. Εάν ένα αρχικό συμβάν προκαλέσει συμφόρηση, το μήκος της ουράς που σχηματίζεται υπολογίζεται μέσω του ντετερμινιστικού προτύπου της θεωρίας ουρών (D/D/1) (Al-Deek et al. 1998). Η διαδικασία εντοπισμού των δευτερογενών φαίνεται στο Σχήμα 4. Η κυκλοφορία φτάνει στην περιοχή του περιστατικού σύμφωνα με την καμπύλη  $A_c(t)$  η οποία αποτελείται από έναν αριθμό μικρών χρονικά εξαρτώμενων ρυθμών αφίξεων ανά χρονικά διαστήματα των 15 λεπτών περίπου. Η καμπύλη  $D_c(t)$  δείχνει την αποχώρηση από την περιοχή του ατυχήματος. Ο ρυθμός ροής της αποχώρησης είναι αρχικά ίσος με  $\mu^*$ , δηλαδή με τη μειωμένη χωρητικότητα της περιοχής στένωσης και στη συνέχεια, αφού το περιστατικό καθαριστεί δηλαδή απομακρυνθούν τα οχήματα που εμποδίζουν την κυκλοφορία, σε χρόνο  $T_c$ , είναι ίσος με  $\mu$  δηλαδή με την αποκαταστημένη χωρητικότητα. Επιπρόσθετα, οι  $t_{n-1}$  και  $t_n$  αναπαριστούν το «n-1-στο» και το «n-στο» χρονικό διάστημα από το χρόνο έναρξης του ατυχήματος  $T_s$ , και τα  $q(t_{n-1})$  και  $q(t_n)$  είναι τα αντίστοιχα μήκη ουράς. Ο όρος  $t_n$  λη συμβολίζει το συνεχές ρυθμό αφίξεων από το χρόνο  $t_{n-1}$  έως τον  $t_n$ . Το μήκος της ουράς για ένα δεδομένο χρόνο  $t_i$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 q(t_i) &= q(t_{n-1}) + (t_i - t_{n-1}) * (\lambda_n - \mu^*) && \text{για } t_{n-1}, t_i < T_c \quad (\text{a}) \\
 q(t_i) &= q(t_{n-1}) + (t_i - t_{n-1}) * (\lambda_n - \mu) && \text{για } t_{n-1}, t_i > T_c \quad (\text{b})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



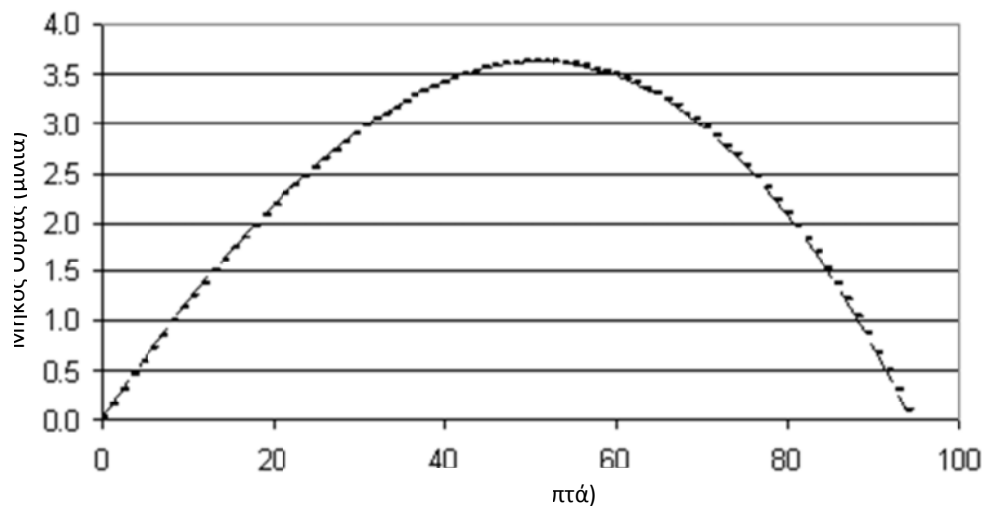
Σχήμα 4: Παρουσίαση της διαδικασίας εντοπισμού δευτερογενών συμβάντων βασισμένη στην θεωρία ουρών. (Πηγή: Zhang και Khattak, 2009)

Εάν το μήκος της ουράς υπερέβαινε το ενιαίο οδικό τμήμα (segment) όπου το πρωτογενές ατύχημα συνέβη, τότε το χωρικό όριο που χρησιμοποιούνταν για τον εντοπισμό των δευτερογενών ατυχημάτων επεκτεινόταν στο παρακείμενο ενιαίο οδικό τμήμα. Εάν η ουρά ξεπερνούσε και το μήκος αυτού, η παραπάνω διαδικασία συνεχιζόταν μέχρις ότου ολόκληρη η ουρά να έχει προσδιοριστεί. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4 η ουρά που σχηματίστηκε λόγω του περιστατικού C3, το οποίο έγινε στο ενιαίο οδικό τμήμα 2 (segment 2) φτάνει μέχρι και το ενιαίο οδικό τμήμα 3 (segment 3). Τα περιστατικά C5 και C6 καλύπτονται χωρικά από το όριο αυτό και έτσι χαρακτηρίζονται μαζί και με το C4 ως δευτερογενή του C3.

Οι Sun και Chilukuri (2010) μελέτησαν τα δευτερογενή συμβάντα με διαφορετικό τρόπο από αυτόν που συνήθως οι προγενέστερες έρευνες ακολουθούσαν. Οι περισσότερες μελέτες εντόπιζαν τα δευτερογενή ατυχήματα χρησιμοποιώντας σταθερά κατώτατα όρια (static thresholds) για τον καθορισμό της περιοχής συμφόρησης πίσω από ένα ατύχημα, όπως αυτά του Moore και άλλων των 2 μιλίων και των 2 ωρών ή αυτά των Hirunyanitiwattana και Mattingly των 2 μιλίων και 1 ώρας. Οι Sun και Chilukuri (2010) υποστήριξαν ότι η μέθοδος αυτή οδηγεί σε

σημαντικά σφάλματα. Θέλησαν, για το λόγο αυτό, να αποτυπώσουν όσο καλύτερα είναι δυνατό την περιοχή της οδού όπου η κυκλοφορία έχει επηρεαστεί από το πρωτογενές συμβάν, δηλαδή τη συμφορημένη περιοχή. Η περιοχή αυτή μπορεί να σκιαγραφηθεί από την ουρά που σχηματίζεται πίσω από τη περιοχή του πρωτογενούς ατυχήματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Αυτή η χωροχρονική περιοχή που επισημαίνει την επιρροή ενός ατυχήματος στην κυκλοφορία των οχημάτων ονομάστηκε «καμπύλη προόδου συμβάντος». (Incident Progression Curve, IPC)

Ο οριζόντιος άξονας του διαγράμματος παριστάνει το χρόνο σχηματισμού της ουράς μετρούμενο από τη χρονική στιγμή της διεξαγωγής του ατυχήματος. Ο κάθετος άξονας παριστάνει το μήκος της ουράς που σχηματίζεται αμέσως πίσω από το ατύχημα. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3, τη στιγμή του ατυχήματος θεωρείται ότι δεν υπάρχει ουρά. Από την αρχή των αξόνων μέχρι και το σημείο όπου το μήκος της ουράς γίνεται μέγιστο, έχουμε σχηματισμό ουράς. Από την αμέσως επόμενη στιγμή και έπειτα, η ουρά ξεκινά να αποσχηματίζεται σταδιακά μέχρι η καμπύλη να τμήσει τον οριζόντιο άξονα. Σε αυτή τη χρονική στιγμή η ουρά έχει αποσχηματιστεί πλήρως και επομένως οι κυκλοφοριακές συνθήκες έχουν επανέλθει σε φυσιολογικά επίπεδα.

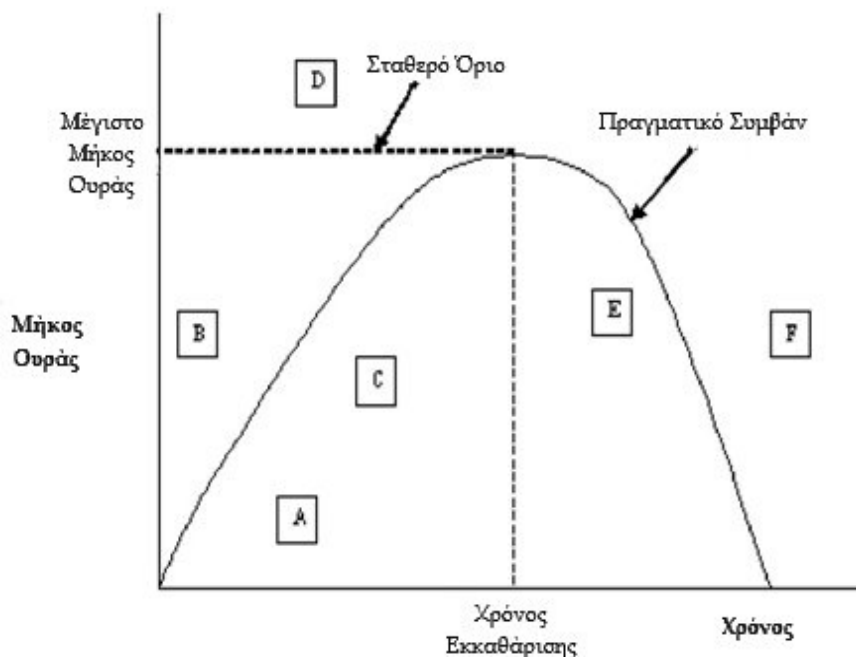


Διάγραμμα 3: Καμπύλη (μήκους ουράς-χρόνου) προόδου συμβάντος IPC  
(Πηγή: <http://www.ctre.iastate.edu/mtc/reports/secondary-accidents.htm>)

Για τη μόρφωση μίας τέτοιας καμπύλης απαιτούνται λεπτομερή στοιχεία για το συμβάν τα οποία, όμως, λόγω της μη περιοδικότητας της εμφάνισης των ατυχημάτων, είναι δύσκολο να συλλεχθούν. Για το λόγο αυτό κυρίως επικράτησε η χρήση της μεθόδου των κατώτατων ορίων. Η μέθοδος αυτή αντικειμενικά είναι πιο

απλή στην εφαρμογή και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και αν υπάρχουν ελάχιστα στοιχεία διαθέσιμα. Παρ' όλα αυτά, αδυνατεί να εντοπίσει όλα τα δευτερογενή ατυχήματα που συμβαίνουν ενώ συχνά χαρακτηρίζει άλλα ως δευτερογενή ενώ συνέβησαν έξω από τη χωροχρονική ζώνη επιρροής του ατυχήματος.

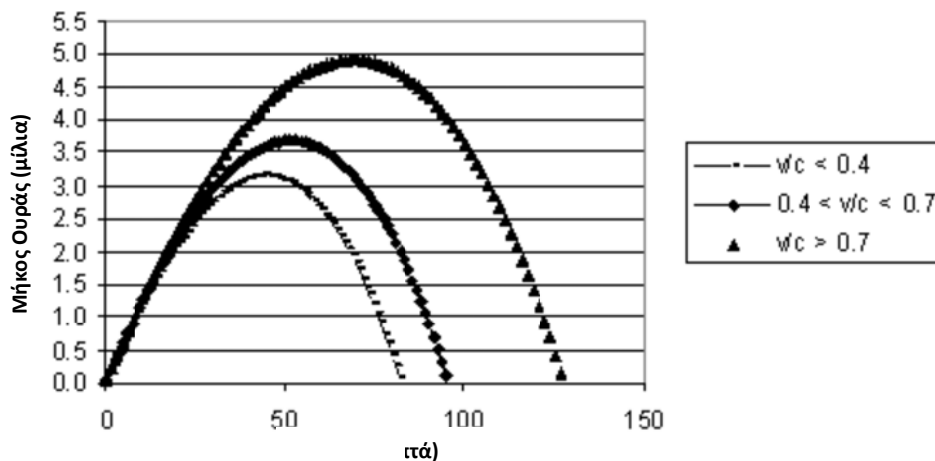
Στο το Διάγραμμα 4 των Sun και Chilukuri (2010) αποτυπώνεται η χωροχρονική επιρροή ενός υποθετικού ατυχήματος όπως παρουσιάζεται από μία «καμπύλη προόδου συμβάντος» και από τα σταθερά κατώτατα όρια. Με τα γράμματα A,B,C,D,E και F συμβολίζονται ατυχήματα που έπονται του πρωτογενούς. Όσα βρίσκονται εντός της χωροχρονικής περιοχής χαρακτηρίζονται ως δευτερογενή. Παρατηρούμε ότι ενώ και με τις δύο μεθόδους ο απόλυτος αριθμός των δευτερογενών ατυχημάτων είναι ο ίδιος, με τη μέθοδο των σταθερών κατώτατων ορίων χαρακτηρίζεται ως δευτερογενές το ατύχημα B το οποίο όπως φαίνεται δεν έλαβε χώρα μέσα στην ουρά του πρώτου, ενώ παράλληλα δεν χαρακτηρίζει ως δευτερογενές το E το οποίο συνέβη κατά τη φάση αποσχηματισμού της ουράς του πρώτου και άρα είναι δευτερογενές. Επομένως για την ορθή αποτύπωση της ουράς πίσω από ένα ατύχημα και κατά συνέπεια τον εντοπισμό των δευτερογενών ατυχημάτων είναι ιδιαίτερα σκόπιμη η μόρφωση των «καμπυλών προόδου συμβάντος».



Διάγραμμα 4: Καμπύλη προόδου συμβάντος σε σύγκριση με περιοχή επιρροής ατυχήματος προσδιορισμένη με σταθερά κατώτατα όρια (Πηγή: Sun και Chilukuri, 2010)



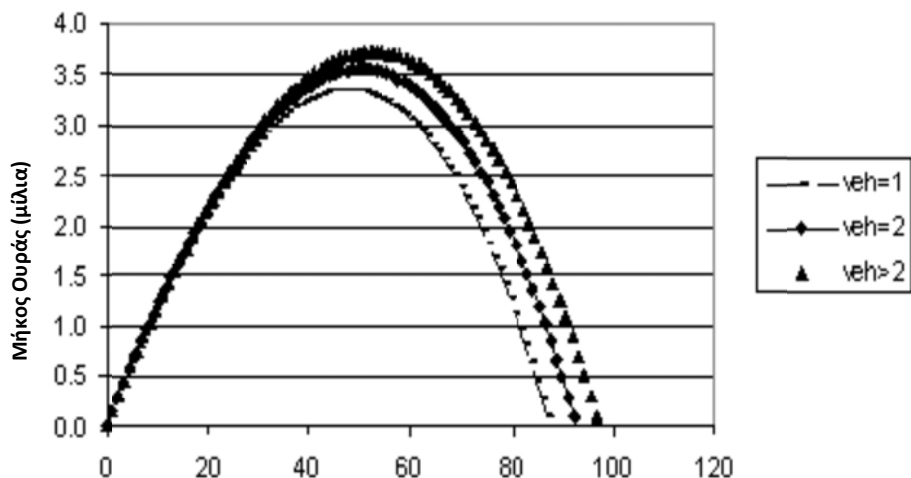
Οι Sun και Chilukuri (2010) για να εντοπίσουν τα δευτερογενή ατυχήματα χρησιμοποίησαν έναν συνδυασμό βάσεων δεδομένων. Έλαβαν υπόψη τη βάση δεδομένων της αστυνομίας η οποία παρείχε πληροφορίες όπως κωδική ονομασία, χιλιομετρική θέση, κατεύθυνση, ώρα, ημερομηνία, κυκλοφοριακή κατάσταση και ταυτόχρονα δεδομένα από κέντρα διαχείρισης κυκλοφορίας τα οποία παρέχουν ευρεία κάλυψη των περιστατικών με τη βοήθεια ελικοπτέρων, καμερών κυκλοφορίας, ομάδων περιπολίας αυτοκινητοδρόμων και άλλα. Χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω στοιχεία εξέτασαν 640 περιστατικά και για κάθε ένα από αυτά σχηματίστηκε μία καμπύλη προόδου συμβάντος. Οι παραπάνω καμπύλες χωρίστηκαν σε ομάδες και υπολογίζοντας τις μέσες τιμές του μέγιστου μήκους ουράς και του χρόνου διάρκειας συμφόρησης παράχθηκαν γενικευμένες καμπύλες προόδου. Λόγω του ότι ορισμένα χαρακτηριστικά του κάθε ατυχήματος επιδρούν στη συμφόρηση που προκαλείται έπειτα από αυτό, χαράχθηκαν επιπλέον και οι πολλαπλές γενικευμένες καμπύλες προόδου συμβάντος. Καθεμία από αυτές σχηματίζεται ξεχωριστά για κάθε τύπο επιπτώσεων όπως για παράδειγμα για ατυχήματα με υλικές ζημιές μόνο (PDO) ή με τραυματισμούς (INJ). Οι κλάδοι της κάθε καμπύλης αντικατοπτρίζουν μία επιπλέον παράμετρο που πρέπει να ληφθεί υπόψη για να αποφασιστεί ποια καμπύλη είναι καταλληλότερη στο να περιγράψει τη συμφόρηση κάθε φορά. Για παράδειγμα, στο Διάγραμμα 5 φαίνεται η πολλαπλή γενικευμένη καμπύλη για περιστατικά που υπήρξαν τραυματισμοί ανάλογα με το λόγο φόρτου-κατάληψης ( $v/c$ ).



Διάγραμμα 5: Πολλαπλή γενικευμένη καμπύλη βασισμένη στο λόγο φόρτου/κατάληψης. (Πηγή: <http://www.ctre.iastate.edu/mtc/reports/secondary-accidents.htm>)

Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται μία άλλου τύπου πολλαπλή γενικευμένη καμπύλη η οποία δείχνει την συμφόρηση σε περιστατικά ανάλογα με το πλήθος των εμπλεκόμενων σε αυτά οχημάτων.





Διάγραμμα 6: Πολλαπλή γενικευμένη καμπύλη βασισμένη στο πλήθος των εμπλεκομένων οχημάτων στο συμβάν. (Πηγή: <http://www.ctre.iastate.edu/mtc/reports/secondary-accidents.htm>)

Από τα παραπάνω, φαίνεται ότι για τον εντοπισμό των δευτερογενών συμβάντων έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι των οποίων ο πρωταρχικός στόχος είναι να οριστεί το εύρος των περιοχών συμφόρησης που σχηματίζονται μετά από το πρωτογενές ατύχημα. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι χρησιμοποιούν στατικά κατώτατα όρια των περιοχών συμφόρησης, τα οποία έχουν προκύψει εμπειρικά, μέσα στα οποία εάν εμφανιστεί κάποιο νέο συμβάν χαρακτηρίζεται ως δευτερογενές. Άλλες, συνδυάζουν τα στατικά κατώτατα όρια με μετρήσεις από φωρατές για μία πληρέστερη αποτύπωση των περιοχών συμφόρησης αποσκοπώντας στον εντοπισμό των δευτερογενών συμβάντων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ακόμα, υπάρχουν μέθοδοι με τις οποίες οι περιοχές συμφόρησης ανιχνεύονται δυναμικά μέσω της εφαρμογής της θεωρίας ουρών ή με τη βοήθεια καταγραφών από βάσεις δεδομένων της αστυνομίας και κέντρων διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Μέχρι στιγμής, όμως, δεν έχει γίνει εντοπισμός δευτερογενών συμβάντων στο εσωτερικό περιοχών συμφόρησης όπως αυτές αποτυπώνονται από δεδομένα φωρατών. Με αυτόν τον τρόπο, οι προκύπτουσες περιοχές συμφόρησης θα περιγράφονται περισσότερο αντικειμενικά με αποτέλεσμα την εξαγωγή πιθανότατα ακριβέστερων αποτελεσμάτων ως προς το πλήθος των δευτερογενών συμβάντων. Ακόμα, υπάρχει ένα κενό στην βιβλιογραφία όσον αφορά την προσπάθεια εφαρμογής και αξιολόγησης δυναμικών αναλυτικών μεθόδων στη μοντελοποίηση της χωρικής και χρονικής εξέλιξης της κυκλοφοριακής ροής ανάντη ενός συμβάντος.

## 2.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ

Οι Li και Bertini (2010) επεσήμαναν την ανάγκη και την σημαντικότητα που έχει η παρακολούθηση και αναγνώριση της κυκλοφοριακής συμφόρησης ως απαραίτητη συνιστώσα του ταξιδιωτικού συστήματος πληροφοριών. Ο αλγόριθμος που προτείνεται στην μελέτη τους, χρησιμοποιείται για την αυτόματη παρατήρηση χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας με την ανάλυση μεγάλου όγκου καταγεγραμμένων ιστορικών δεδομένων. Επιπλέον κάνοντας χρήση δεδομένων που έχουν να κάνουν με καιρικές συνθήκες, υπολογίζεται ο αντίκτυπος του εξωτερικού περιβάλλοντος στην κυκλοφορία. Οι αλγόριθμοι για την αυτόματη παρακολούθηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης περιλαμβάνουν παραμετρικούς αλγόριθμους βασισμένους σε όρια (threshold-based algorithms), όπως είναι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν όρια ταχυτήτων και πρότυπα “Automatische Staudynamikanalyse” (automatic tracking of moving traffic jams—forecasting of traffic objects) [ASDA-FOTO]. Σύγκριναν τέσσερις μεθοδολογικές προσεγγίσεις για την διάγνωση και παρακολούθηση της συμφόρησης σε αυτοκινητοδρόμους. Με τη χρήση ορισμένων επικυρωτικών μεθοδολογιών σύγκριναν τις ομοιότητες και τις διαφορές αυτών των αλγορίθμων. Το εργαλείο της αυτοματοποιημένης μεταβλητής κλίμακας αθροιστικής καμπύλης (rescaled cumulative curve tool) χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας. Πλεονέκτημα του συγκεκριμένου εργαλείου είναι ότι αποκαλύπτει κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά με μεγάλη λεπτομέρεια ενώ ένα μειονέκτημα του είναι ότι αποτελεί οπτικό εργαλείο και όταν χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων συστηματικά σε ένα περιβάλλον επιχειρήσεων, μπορεί να κάνει την ανάλυση επίπονη και χρονοβόρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο εργαλείο λειτούργησε ικανοποιητικά όσον αφορά την παρακολούθηση και τον εντοπισμό κυκλοφοριακής συμφόρησης. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο εργαλείο, εντόπισαν σταθερά κυκλοφοριακά μοτίβα με μεγάλη ακρίβεια και χωρίς διατάραξη από τυχαίες διακυμάνσεις. Ωστόσο, κατά την ανάλυση κάποιων χαρακτηριστικών της κυκλοφοριακής ροής, η μη αυτοματοποιημένη προσέγγιση αποκάλυψε χαρακτηριστικά κίνησης με περισσότερες λεπτομέρειες. Η αυτοματοποιημένη διαδικασία εξομάλυνε τις διακυμάνσεις με στόχο την επισήμανση των χρόνων ενεργοποίησης μιας συμφόρησης.

Πρόσφατα, μια σειρά από μελέτες που έχουν γίνει έχουν επικεντρωθεί στην δυναμική εκτίμηση της χωροχρονικής διάδοσης της επιρροής ενός συμβάντος στις ανάντη περιοχές του οδικού δικτύου με οπτική παρατήρηση της εξέλιξης της ουράς οχημάτων που σχηματίζεται ανάντη ενός πρωτεύοντος συμβάντος (Sun & Chilukuri, 2010), σε αναλυτικές μεθόδους που βασίζονται σε ουρές (Zhang and Khattak, 2010), σε μεθόδους αθροιστικής άφιξης και αποχώρησης οχημάτων (Zhan et al. 2009) και

άλλων αναλυτικών μεθόδων εκτίμησης της κυκλοφοριακής συμφόρησης που εντοπίζεται από επαγωγικούς βρόγχους (Orfanou et al., 2011, Imprialou et al. 2012).

## **2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ**

Όλες οι μέθοδοι που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, είναι σχεδόν αποκλειστικά αφιερωμένες στον προσδιορισμό της διάρκειας ενός συμβάντος ή την ανίχνευση δευτερογενών ατυχημάτων, όπως αυτά συμβαίνουν στο εσωτερικό ή στα όρια της σχηματιζόμενης ουράς (Moore et al. 2004, Zhang and Khattak 2010, Vlahogianni et al. 2012).

Σε αυτές τις έρευνες, η επιρροή στην κυκλοφορία συνήθως ορίζεται με βάση τη διάρκεια της σχηματιζόμενης ουράς (που τις περισσότερες φορές λαμβάνεται ώστε να συμπίπτει με τη διάρκεια του συμβάντος) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι επικρατούσες κυκλοφοριακές και καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του συμβάντος. Επιπλέον, δεν έχει γίνει καμία προσπάθεια για να αναπτυχθούν επεξηγηματικές σχέσεις μεταξύ της χωροχρονικής έκτασης της επιρροής ενός συμβάντος στην κυκλοφορία. Άλλοι παράγοντες κυκλοφοριακοί, γεωμετρικοί, παράγοντες που έχουν να κάνουν με τις καιρικές συνθήκες και διάφοροι άλλοι που συσχετίζονται με τα συμβάντα πρέπει να διερευνηθούν, να αξιολογηθούν και να αντιμετωπιστούν ανάλογα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια απόπειρα να γίνει μια περαιτέρω διεύρυνση της υπάρχουσας έρευνας ως προς τα αναφερθέντα κενά της βιβλιογραφίας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

---

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρχικά, αναπτύσσονται γραμμικά στατιστικά πρότυπα με την μέθοδο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ διάρκειας επιρροής συμβάντος και μέγιστου μήκους επιρροής ανάντη συμβάντος σε ελεύθερες λεωφόρους με την πιθανότητα εμφάνισης δευτερεύοντος ατυχήματος. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας κρίθηκε χρήσιμο να γίνει μια διερεύνηση για το κατά πόσο ορισμένοι παράγοντες επηρεάζουν την πιθανότητα εμφάνισης δευτερευόντων ατυχημάτων, γεγονός που θα βοηθήσει στην εξαγωγή ορισμένων βασικών συμπερασμάτων. Σημειώνεται ότι η εξωγένεια των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μια κρίσιμη παραδοχή στην ανάπτυξη των κλασσικών προτύπων γραμμικής παλινδρόμησης. Αν οι εξεταζόμενες ανεξάρτητες μεταβλητές που εκφράζουν τη διάρκεια και το μέγιστο μήκος ουράς προκύψουν ενδογενείς παράμετροι, τότε τα δυαδικά πρότυπα που υπολογίζονται, κάνοντας την παραδοχή ύπαρξης εξωγένειας, θα είναι προβληματικά.

Στη συνέχεια αναπτύσσονται δομικά πρότυπα εξισώσεων SEM για την διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της επιρροής των ατυχημάτων στην κυκλοφορία και διάφορων κυκλοφοριακών, καιρικών και γεωμετρικών παραγόντων, καθώς και των χαρακτηριστικών του ατυχήματος. Γίνεται η υπόθεση ότι πραγματική επιρροή ενός συμβάντος σε κάποιο αυτοκινητόδρομο, δεν μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα, αλλά μπορεί να προσδιοριστεί εμμέσως χρησιμοποιώντας ως δείκτες το μέγιστο μήκος της σχηματιζόμενης διαταραχής (ουράς) οχημάτων που σχηματίζεται ανάντη του ατυχήματος και τη χρονική διάρκεια της. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι αυτοί οι δείκτες επηρεάζονται από ποικίλους προγνωστικούς παράγοντες (predictors), οι οποίοι εκφράζουν διάφορα κυκλοφοριακά, καιρικά, γεωμετρικά και άλλα συγκεκριμένα μεγέθη όπως είναι η ταχύτητα και ο κυκλοφοριακός φόρτος κατά την εμφάνιση του ατυχήματος, η ένταση της βροχόπτωσης, η ύπαρξη ράμπας γειτονικά του σημείου, ο αριθμός των αποκλεισμένων λωρίδων κυκλοφορίας κ.α. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται στατιστική ανάλυση με στόχο την συσχέτιση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών των περιοχών συμφόρησης.

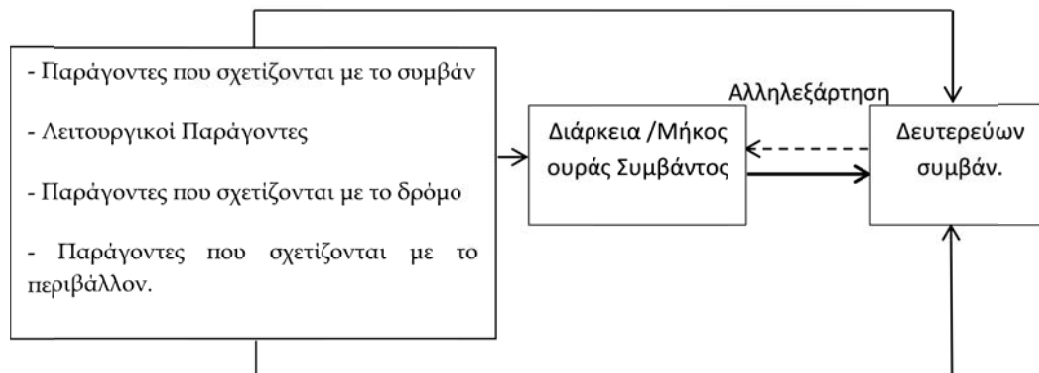
### **3.2 ΣΧΕΣΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΥΜΒΑΝΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ**

Ένα μεγάλο κενό στην παγκόσμια βιβλιογραφία είναι η έλλειψη γνώσης σχετικά με την πολύπλοκη σχέση μεταξύ της διάρκειας ουράς ενός συμβάντος και της εμφάνισης δευτερογενών συμβάντων (ατυχημάτων). Μια έρευνα σχετικά με το πώς οι διάρκειες των ουρών των οχημάτων που σχηματίζονται πίσω από το σημείο του συμβάντος συσχετίζονται με την εμφάνιση δευτερευόντων ατυχημάτων, μπορεί να εμβαθύνει την κατανόηση των κυκλοφοριακών αβεβαιοτήτων που προκαλούνται από απρόβλεπτα γεγονότα, π.χ., πόσο μπορεί να μειωθεί η εμφάνιση δευτερευόντων συμβάντων εάν η διάρκεια των σχηματιζόμενων ουρών μειωθεί. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη διαμόρφωση αποτελεσματικών στρατηγικών για τη διαχείριση περιστατικών έκτακτης ανάγκης.

Στην παγκόσμια βιβλιογραφία βρίσκονται αρκετές μελέτες σχετικά με τη διάρκεια ουρών που σχηματίζονται σε διάφορα συμβάντα και για τον προσδιορισμό των παραγόντων που την επηρεάζουν έγιναν διάφορες προσεγγίσεις μοντελοποίησης, π.χ., γραμμική παλινδρόμηση και διάφορα λογιστικά πρότυπα. Οι διάρκειες των σχηματιζόμενων ουρών είναι συνήθως μεγαλύτερες, αν οι χρόνοι απόκρισης είναι μεγαλύτεροι, εμπλέκονται περισσότερο οχήματα, εμπλέκονται βαρέα οχήματα, όταν υπάρχουν τραυματισμοί, όταν η δομική κατάσταση του αυτοκινητοδρόμου είναι άσχημη, όταν επικρατούν ακραίες καιρικές συνθήκες κ.α. Ωστόσο, τα διάφορα πρότυπα δεν εξετάζουν τις επιπτώσεις των δευτερευόντων συμβάντων στις διάρκειες των ουρών.

Γενικώς, οι αυξήσεις στις διάρκειες ουρών ενός συμβάντος που σχετίζονται με την εμφάνιση δευτερευόντων περιστατικών είναι ένα θέμα σχετικά παραμελημένο στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, με λίγες εξαιρέσεις. Σαφώς, μπορεί να υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που συνδέονται με τις διάρκειες των ουρών που σχηματίζονται και την εμφάνιση δευτερογενών συμβάντων, όπως τύπος συμβάντος, καιρικές συνθήκες, ταχύτητα, μήκος σχηματιζόμενης ουράς κλπ. Σημαντικό επίσης είναι ότι η διάρκεια και το μήκος επιρροής της ουράς ενός συμβάντος και η εμφάνιση δευτερογενούς περιστατικού μπορεί να είναι αλληλοεξαρτώμενα. Ένα πρωτογενές συμβάν μπορεί να προκαλέσει ουρά ανάντη του σημείου πρόκλησής του. Αυτό προκαλεί μείωση της ταχύτητας, και μερικές φορές ξαφνική επιβράδυνση, που με την σειρά του μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του αισθήματος της “έκπληξης” ορισμένων οδηγών. Συνεπώς αυξάνεται η πιθανότητα πρόκλησης δευτερευόντων συμβάντων. Εάν ένα δευτερεύον ατύχημα εμφανίζεται λίγο μετά το πρωτογενές, αυτό θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη διάρκεια του δεύτερου. Οι παράγοντες που μπορεί να σχετίζονται με τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα συμβάντα παρουσιάζονται αναλυτικά στην συνέχεια της παρούσας μελέτης.

Τονίζεται ότι υπάρχει μια πιθανότητα αλληλεξάρτησης μεταξύ της διάρκειας ουράς πρωτεύοντων συμβάντων και της εμφάνισης δευτερευόντων συμβάντων. Δηλαδή, δευτερεύοντα συμβάντα είναι πιο πιθανό να συμβούν εάν η διάρκεια της σχηματιζόμενης ουράς του πρωτεύοντος περιστατικού καταλαμβάνει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Την ίδια στιγμή, οι διάρκειες ουρών των πρωτογενών περιστατικών αναμένεται να είναι μεγαλύτερες εάν συμβούν δευτερεύοντα συμβάντα. Για να ληφθεί υπόψη μια τέτοια αλληλεξάρτηση, κατάλληλες στατιστικές μέθοδοι είναι διαθέσιμες και εφαρμόζονται.



Σχήμα 5: Σχέσεις μεταξύ μεταβλητών

### 3.2.1 ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΛΗΛΕΞΑΡΤΗΣΗΣ

Τα δευτερεύοντα συμβάντα (ατυχήματα) αναγνωρίζονται και επισημαίνονται στη βάση δεδομένων. Δημιουργείται η μεταβλητή “accident\_type” η οποία υποδηλώνει εάν το συμβάν είναι πρωτογενές η δευτερογενές. Έπειτα υπολογίζονται ξεχωριστά στατιστικά πρότυπα που συλλαμβάνουν την αλληλεξάρτηση. Το πρώτο είναι ένα πρότυπο παλινδρόμησης Ordinary Least Squares (OLS) (Πρότυπο 1). Εξαρτημένη μεταβλητή τίθεται η διάρκεια ουράς (Qduractualmin) ενώ μεταβλητές όπως ο αριθμός εμπλεκόμενων οχημάτων (Nr\_Vehicles), ταχύτητα (Speed), κυκλοφοριακός φόρτος (Lane\_volume) κ.α. ως προγνωστικοί παράγοντες (ανεξάρτητες μεταβλητές). Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που απαρτίζουν το πρότυπο προέκυψαν από το σύνολο των μετρήσιμων μεταβλητών στη βάση δεδομένων διαγράφοντας αυτές τις οποίες παρουσίαζαν συσχέτιση μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο πρότυπο υιοθετείται λόγω της απλότητας του και της έξυπνης ερμηνείας των συντελεστών, ενώ παράλληλα αναγνωρίζει ότι τα δεδομένα έχουν μη αρνητικές τιμές και η μέθοδος OLS ενδεχομένως μπορεί να δώσει αρνητικές προβλέψεις αν κάποιες από τις ανεξάρτητες μεταβλητές έχουν αρνητική τιμή. Τέλος, πλεονέκτημα εφαρμογής

της γραμμική παλινδρόμησης είναι ότι αυτή θέτει σε εφαρμογή ένα στατιστικό πρότυπο όπου όταν η σχέση μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών είναι σχεδόν γραμμική, δίνει βέλτιστα αποτελέσματα.

$$Q_{duractualmin} = \beta_0 + \beta_1(\text{Accident\_Duration}) + \beta_2(\text{Collision\_Type}) + \beta_3(\text{Nr\_Vehicles}) + \beta_4(\text{Speed}) + \beta_5(\text{lane\_volume}) + \beta_6(\text{RAINFALLmm}) + \beta_7(\text{alignment}) + \beta_8(\text{GEOMETRY\_UPSTREAM}) + \beta_9(\text{tunnel\_down}) + e$$

### (Πρότυπο 1)

Όπου “Q<sub>duractualmin</sub>” η διάρκεια ουράς (λεπτά), “Accident\_Duration” η διάρκεια συμβάντος (λεπτά), “Collision\_Type” ο τύπος σύγκρουσης (0-4, από λιγότερο έως περισσότερο σοβαρό), “Nr\_Vehicles” ο αριθμός εμπλεκόμενων οχημάτων, “Speed” η ταχύτητα (χιλιόμετρα ανά ώρα), “Lane\_volume” ο κυκλοφοριακός φόρτος λωρίδας, “RAINFALLmm” η ένταση βροχόπτωσης (χιλιοστά / λεπτό κατά τη χρονική στιγμή του ατυχήματος), “Alignment” η γεωμετρική χάραξη οδού (0 = ευθυγραμμία, 1 = καμπύλη), “GEOMETRY\_UPSTREAM” η γεωμετρία ανάντη οχήματος (0 = καμία ιδιαίτερη γεωμετρία, 1 = ύπαρξη διοδίων, 2 = ύπαρξη τούνελ, 3 = ύπαρξη εισόδου/εξόδου, 4 = ύπαρξη περισσότερων από ένα εκ των προηγούμενων), “tunnel\_down” ύπαρξη τούνελ κατόντη (0 = όχι, 1 = ναι) και e το σφάλμα στο Πρότυπο 1.

Μια μεταβλητή που να αντιπροσωπεύει τον τύπο του συμβάντος δηλαδή εάν το είναι πρωτογενές η δευτερογενές, προστίθεται στον παραπάνω ισχυρισμό. Εξετάζεται εάν υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ της διάρκειας ουράς (Q<sub>duractualmin</sub>) και του τύπου του συμβάντος (Accident\_Type). Αυτό οδηγεί στον υπολογισμό ενός δεύτερου προτύπου (Πρότυπο 2) που έχει ως ανεξάρτητη μεταβλητή τον τύπο του συμβάντος (Accident\_Type). Σημειώνεται ότι το Πρότυπο 1 υποθέτει ότι η διάρκεια ουράς (Q<sub>duractualmin</sub>) συσχετίζεται με μεταβλητές όπως είναι ο αριθμός εμπλεκόμενων οχημάτων (Nr\_Vehicles), ταχύτητα (Speed), κυκλοφοριακός φόρτος (Lane\_volume) κ.α. που είναι επίσης συσχετισμένες με τον τύπο του συμβάντος. Αυτό δίνει αφορμή για την πιθανότητα ύπαρξης ενδογένειας μεταξύ της διάρκειας ουράς και του τύπου του ατυχήματος, πράγμα που σημαίνει ότι η διάρκεια ουράς μπορεί να σχετίζεται με το υπόλοιπο (όρο σφάλματος) στο Πρότυπο 2. Η ενδογένεια αυτή μπορεί να ελεγχθεί εκτιμώντας ένα πρότυπο διάρκειας ουράς (Πρότυπο 1) και υπολογίζοντας ένα υπόλοιπο (e), έπειτα χρησιμοποιώντας τη διάρκεια ουράς και το υπόλοιπο (e) ως ανεξάρτητες μεταβλητές στο Πρότυπο 3 που έχει ως εξαρτημένη μεταβλητή τον τύπο του ατυχήματος (Accident\_Type). Αν ο συντελεστής του e είναι

σημαντικά διαφορετικός του μηδενός, τότε η διάρκεια της ουράς θεωρείται ενδογενής.

$$\text{Accident\_Type} = \gamma_0 + \gamma_1(\text{Accident\_Duration}) + \gamma_2(\text{Collision\_Type}) + \gamma_3(\text{Nr\_Vehicles}) + \gamma_4(\text{Speed}) + \gamma_5(\text{lane\_volume}) + \gamma_6(\text{RAINFALLmm}) + \gamma_7(\text{alignment}) + \gamma_8(\text{GEOMETRY\_UPSTREAM}) + \gamma_9(\text{tunnel\_down}) + \gamma_{10}(\text{Qduractualmin}) + f$$

**(Πρότυπο 2)**

Όπου “Accident\_Type” ο τύπος συμβάντος (0 = πρωτογενές, 1 = δευτερογενές), “Accident\_Duration” η διάρκεια συμβάντος (λεπτά), “Collision\_Type” ο τύπος σύγκρουσης (0-4, από λιγότερο έως περισσότερο σοβαρό), “Nr\_Vehicles” ο αριθμός εμπλεκόμενων οχημάτων, “Speed” η ταχύτητα (χιλιόμετρα ανά ώρα), “Lane\_volume” ο κυκλοφοριακός φόρτος λωρίδας, “RAINFALLmm” η ένταση βροχόπτωσης (χιλιοστά / λεπτό κατά τη χρονική στιγμή του ατυχήματος), “Alignment” η γεωμετρική χάραξη οδού (0 = ευθυγραμμία, 1 = καμπύλη), “GEOMETRY\_UPSTREAM” η γεωμετρία ανάντη οχήματος (0 = καμία ιδιαίτερη γεωμετρία, 1 = ύπαρξη διοδίων, 2 = ύπαρξη τούνελ, 3 = ύπαρξη εισόδου/εξόδου, 4 = ύπαρξη περισσότερων από ένα εκ των προηγούμενων), “tunnel\_down” ύπαρξη τούνελ κατάντη (0 = όχι, 1 = ναι), “Qduractualmin” η διάρκεια ουράς (λεπτά) και f το σφάλμα στο Πρότυπο 2.

$$\text{Accident\_Type} = \gamma_0 + \gamma_1(\text{Accident\_Duration}) + \gamma_2(\text{Collision\_Type}) + \gamma_3(\text{Nr\_Vehicles}) + \gamma_4(\text{Speed}) + \gamma_5(\text{lane\_volume}) + \gamma_6(\text{RAINFALLmm}) + \gamma_7(\text{alignment}) + \gamma_8(\text{GEOMETRY\_UPSTREAM}) + \gamma_9(\text{tunnel\_down}) + \gamma_{11}(\text{Qduractualmin}) + \gamma_{12}(e) + g$$

**(Πρότυπο 3)**

Όπου “Accident\_Type” ο τύπος συμβάντος (0 = πρωτογενές, 1 = δευτερογενές), “Accident\_Duration” η διάρκεια συμβάντος (λεπτά), “Collision\_Type” ο τύπος σύγκρουσης (0-4, από λιγότερο έως περισσότερο σοβαρό), “Nr\_Vehicles” ο αριθμός εμπλεκόμενων οχημάτων, “Speed” η ταχύτητα (χιλιόμετρα ανά ώρα), “Lane\_volume” ο κυκλοφοριακός φόρτος λωρίδας, “RAINFALLmm” η ένταση βροχόπτωσης (χιλιοστά / λεπτό κατά τη χρονική στιγμή του ατυχήματος), “Alignment” η γεωμετρική χάραξη οδού (0 = ευθυγραμμία, 1 = καμπύλη), “GEOMETRY\_UPSTREAM” η γεωμετρία ανάντη οχήματος (0 = καμία ιδιαίτερη γεωμετρία, 1 = ύπαρξη διοδίων, 2 = ύπαρξη



τούνελ, 3 = ύπαρξη εισόδου/εξόδου, 4 = ύπαρξη περισσότερων από ένα εκ των προηγούμενων), "tunnel\_down" ύπαρξη τούνελ κατάντη (0 = όχι, 1 = ναι), "Qduractualmin" η διάρκεια ουράς (λεπτά), e το σφάλμα στο Πρότυπο 1 και g το σφάλμα στο Πρότυπο 3.

Η εξωγένεια των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μια κρίσιμη παραδοχή στην ανάπτυξη των κλασικών προτύπων γραμμικής παλινδρόμησης. Άρα αν η διάρκεια ουράς προκύψει ενδογενής παράμετρος, τότε τα δυαδικά πρότυπα που υπολογίζονται κάνοντας την παραδοχή ύπαρξης εξωγένειας, θα είναι προβληματικά. Συνεπώς από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν εάν η μεταβλητή Qduractualmin βρεθεί ενδογενής, τότε θα υιοθετηθεί μια διαφορετική προσέγγιση. Διαφορετικά, στην περίπτωση εξωγένειας της εξαρτημένης μεταβλητής, η επεξεργασία θα συνεχιστεί υιοθετώντας πρότυπο Logit.

Επιπλέον, θα εξετασθεί με τον ίδιο τρόπο, όπως παραπάνω, η γραμμική σχέση μεταξύ μέγιστου μήκους σχηματιζόμενης ουράς (Qlmaxkm) και διαφόρων ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς επίσης και η επιρροή που έχει στα δευτερεύοντα ατυχήματα. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με προηγουμένως, κατασκευάζοντας 3 πρότυπα. Το πρώτο είναι ένα πρότυπο παλινδρόμησης Ordinary Least Squares (OLS) (Πρότυπο 1). Εξαρτημένη μεταβλητή τίθεται το μήκος σχηματιζόμενης ουράς (Qlmaxkm) ενώ μεταβλητές όπως αριθμός οχημάτων (Nr\_Vehicles), γεωμετρική χάραξη οδού (alignment), ένταση βροχόπτωσης (RAINFALLmm) κ.α. ως προγνωστικοί παράγοντες (ανεξάρτητες μεταβλητές). Όπως προαναφέρθηκε, οι ανεξάρτητες μεταβλητές που απαρτίζουν το πρότυπο προέκυψαν από το σύνολο των μετρήσιμων μεταβλητών στη βάση δεδομένων διαγράφοντας αυτές τις οποίες παρουσίαζαν συσχέτιση μεταξύ τους.

$$Qlmaxkm = \beta_0 + \beta_1(Accident\_Duration) + \beta_2(Nr\_Vehicles) + \beta_3(Speed) + \beta_4(lane\_volume) + \beta_5(RAINFALLmm) + \beta_6(alignment) + \beta_7(GEOMETRY\_UPSTREAM) + \beta_8(tunnel\_down) + e$$

**(Πρότυπο 1)**

Όπου "Qlmaxkm" το μέγιστο μήκος σχηματιζόμενης ουράς (χιλιόμετρα), "Accident\_Duration" η διάρκεια συμβάντος (λεπτά), "Nr\_Vehicles" ο αριθμός εμπλεκόμενων οχημάτων, "Speed" η ταχύτητα (χιλιόμετρα ανά ώρα), "Lane\_volume" ο κυκλοφοριακός φόρτος λωρίδας, "RAINFALLmm" η ένταση βροχόπτωσης (χιλιοστά / λεπτό κατά τη χρονική στιγμή του ατυχήματος), "Alignment" η γεωμετρική χάραξη οδού (0 = ευθυγραμμία, 1 = καμπύλη), "GEOMETRY\_UPSTREAM" η γεωμετρία ανάντη οχήματος (0 = καμία ιδιαίτερη γεωμετρία, 1 = ύπαρξη διοδίων, 2 = ύπαρξη

τούνελ, 3 = ύπαρξη εισόδου/εξόδου, 4 = ύπαρξη περισσότερων από ένα εκ των προηγούμενων), “tunnel\_down” ύπαρξη τούνελ κατάντη (0 = όχι, 1 = ναι) και e το σφάλμα στο Πρότυπο 1.

Με τον ίδιο τρόπο, μια μεταβλητή που να αντιπροσωπεύει τον τύπο του συμβάντος δηλαδή εάν το είναι πρωτογενές η δευτερογενές, προστίθεται στον παραπάνω ισχυρισμό. Εξετάζεται εάν υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ του μήκους της σχηματιζόμενης ουράς (Qlmaxkm) και του τύπου του συμβάντος (Accident\_Type). Αυτό οδηγεί στον υπολογισμό ενός δεύτερου προτύπου (Πρότυπο 2) που έχει ως ανεξάρτητη μεταβλητή τον τύπο του συμβάντος (Accident\_Type). Σημειώνεται ότι το Πρότυπο 1 υποθέτει ότι το μήκος της σχηματιζόμενης ουράς (Qlmaxkm) συσχετίζεται με μεταβλητές όπως είναι ο αριθμός εμπλεκόμενων οχημάτων (Nr\_Vehicles), ταχύτητα (Speed), κυκλοφοριακός φόρτος (Lane\_volume) κ.α. που είναι επίσης συσχετισμένες με τον τύπο του συμβάντος. Αυτό δίνει αφορμή για την πιθανότητα ύπαρξης ενδογένειας μεταξύ του μήκους της σχηματιζόμενης ουράς και του τύπου του ατυχήματος, πράγμα που σημαίνει ότι το μήκος της ουράς μπορεί να σχετίζεται με το υπόλοιπο (όρο σφάλματος) στο Πρότυπο 2. Η ενδογένεια αυτή μπορεί να ελεγχθεί εκτιμώντας ένα πρότυπο διάρκειας ουράς (Πρότυπο 1) και υπολογίζοντας ένα υπόλοιπο (e), έπειτα χρησιμοποιώντας τη διάρκεια ουράς και το υπόλοιπο (e) ως ανεξάρτητες μεταβλητές στο Πρότυπο 3 που έχει ως εξαρτημένη μεταβλητή τον τύπο του ατυχήματος (Accident\_Type). Αν ο συντελεστής του e είναι σημαντικά διαφορετικός του μηδενός, τότε η διάρκεια της ουράς θεωρείται ενδογενής.

$$\text{Accident\_Type} = \gamma_0 + \gamma_1(\text{Accident\_Duration}) + \gamma_2(\text{Nr\_Vehicles}) + \gamma_3(\text{Speed}) + \gamma_4(\text{lane\_volume}) + \gamma_5(\text{RAINFALLmm}) + \gamma_6(\text{alignment}) + \gamma_7(\text{GEOMETRY\_UPSTREAM}) + \gamma_8(\text{tunnel\_down}) + \gamma_9(\text{Qlmaxkm}) + f$$

### (Πρότυπο 2)

Όπου “Accident\_Type” ο τύπος συμβάντος (0 = πρωτογενές, 1 = δευτερογενές), “Accident\_Duration” η διάρκεια συμβάντος (λεπτά), “Nr\_Vehicles” ο αριθμός εμπλεκόμενων οχημάτων, “Speed” η ταχύτητα (χιλιόμετρα ανά ώρα), “Lane\_volume” ο κυκλοφοριακός φόρτος λωρίδας, “RAINFALLmm” η ένταση βροχόπτωσης (χιλιοστά / λεπτό κατά τη χρονική στιγμή του ατυχήματος), “Alignment” η γεωμετρική χάραξη οδού (0 = ευθυγραμμία, 1 = καμπύλη), “GEOMETRY\_UPSTREAM” η γεωμετρία ανάντη οχήματος (0 = καμία ιδιαίτερη γεωμετρία, 1 = ύπαρξη διοδίων, 2 = ύπαρξη τούνελ, 3 = ύπαρξη εισόδου/εξόδου, 4 = ύπαρξη περισσότερων από ένα εκ των προηγούμενων), “tunnel\_down” ύπαρξη τούνελ κατάντη (0 = όχι, 1 = ναι),

“Qlmaxkm” το μέγιστο μήκος σχηματιζόμενης ουράς (χιλιόμετρα) και e το σφάλμα στο Πρότυπο 1.

$$\text{Accident\_Type} = \gamma_0 + \gamma_1(\text{Accident\_Duration}) + \gamma_2(\text{Nr\_Vehicles}) + \gamma_3(\text{Speed}) + \gamma_4(\text{lane\_volume}) + \gamma_5(\text{RAINFALLmm}) + \gamma_6(\text{alignment}) + \gamma_7(\text{GEOMETRY\_UPSTREAM}) + \gamma_8(\text{tunnel\_down}) + \gamma_9(\text{Qlmaxkm}) + \gamma_{10}(e) + g$$

**(Πρότυπο 3)**

Όπου “Accident\_Type” ο τύπος συμβάντος (0 = πρωτογενές, 1 = δευτερογενές), “Accident\_Duration” η διάρκεια συμβάντος (λεπτά), “Nr\_Vehicles” ο αριθμός εμπλεκόμενων οχημάτων, “Speed” η ταχύτητα (χιλιόμετρα ανά ώρα), “Lane\_volume” ο κυκλοφοριακός φόρτος λωρίδας, “RAINFALLmm” η ένταση βροχόπτωσης (χιλιοστά / λεπτό κατά τη χρονική στιγμή του ατυχήματος), “Alignment” η γεωμετρική χάραξη οδού (0 = ευθυγραμμία, 1 = καμπύλη), “GEOMETRY\_UPSTREAM” η γεωμετρία ανάντη οχήματος (0 = καμία ιδιαίτερη γεωμετρία, 1 = ύπαρξη διοδίων, 2 = ύπαρξη τούνελ, 3 = ύπαρξη εισόδου/εξόδου, 4 = ύπαρξη περισσοτέρων από ένα εκ των προηγούμενων), “tunnel\_down” ύπαρξη τούνελ κατάντη (0 = όχι, 1 = ναι), “Qlmaxkm” το μέγιστο μήκος σχηματιζόμενης ουράς (χιλιόμετρα), e το σφάλμα στο Πρότυπο 1 και g το σφάλμα στο Πρότυπο 3.

Από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, αν το μέγιστο μήκος της ουράς προκύψει ενδογενής παράμετρος, τότε τα δυαδικά πρότυπα που υπολογίζονται κάνοντας την παραδοχή ύπαρξης εξωγένειας, θα είναι προβληματικά. Συνεπώς από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν εάν η μεταβλητή Qlmaxkm βρεθεί ενδογενής τότε θα υιοθετηθεί μια διαφορετική προσέγγιση.

### 3.2.2 Γραμμική και Λογιστική Παλινδρόμηση

Η παλινδρόμηση είναι μια ευρέως χρησιμοποιημένη στατιστική τεχνική μοντελοποίησης για την έρευνα της συσχέτισης μεταξύ μίας εξαρτώμενης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Χρησιμοποιείται με σκοπό την εκχώρηση δεδομένων σε μία πραγματική μεταβλητή πρόβλεψης, όπως ισχύει και στην περίπτωση της κατηγοριοποίησης όταν είναι διακριτή, αλλιώς καλείται παλινδρόμηση αν η μεταβλητή είναι συνεχής. Η παλινδρόμηση προϋποθέτει ότι τα σχετικά δεδομένα ταιριάζουν με μερικά γνωστά είδη συνάρτησης και μετά καθορίζει την καλύτερη συνάρτηση αυτού του είδους που μοντελοποιεί τα δεδομένα που έχουν δοθεί. Αποτέλεσμα της παλινδρόμησης όταν χρησιμοποιείται ως τεχνική εξόρυξης δεδομένων, αποτελεί ένα πρότυπο που χρησιμοποιείται αργότερα για να προβλέψει τις τιμές της κατηγορίας για τα νέα

δεδομένα. Τέτοια παραδείγματα εφαρμογής της παλινδρόμησης αποτελεί η πρόβλεψη της ζήτησης για ένα νέο προϊόν ή υπηρεσία συναρτήσει των δαπανών διαφήμισης ή ο υπολογισμός της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με την θερμοκρασία, την υγρασία και την ατμοσφαιρική πίεση του περιβάλλοντος.

Η παλινδρόμηση είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση και την ανάλυση αριθμητικών δεδομένων, μιας εξαρτημένης μεταβλητής και κάποιων ανεξάρτητων μεταβλητών. Το πρότυπο είναι μια συνάρτηση συσχέτισης της εξαρτημένης μεταβλητής από τις ανεξάρτητες. Η μοντελοποίηση μπορεί να γίνει χωρίς να είναι γνωστή από πριν η γνώση για τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η εξαρτημένη μεταβλητή από τις ανεξάρτητες και τότε ονομάζεται εμπειρική μοντελοποίηση. Στην γραμμική παλινδρόμηση, η απαίτηση του προτύπου που θα παραχθεί είναι: η εξαρτημένη μεταβλητή  $y_i$  να είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των ανεξαρτητών μεταβλητών.

## **Παραδοχές**

### Γραμμικότητα

Η κατανομή της  $Y$  έχει, για τα διάφορα επίπεδα  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  της  $X$ , μέση τιμή  $E(Y / X = x) = \alpha + \beta \cdot x$  ή  $E(Y / X) = \alpha + \beta \cdot X$  όπου,  $\alpha$  και  $\beta$  παράμετροι που εκτιμώνται από το δείγμα  $(x_i, y_i)$   $i = 1, 2, \dots, n$ . Άρα, υποθέτουμε ότι οι μέσες τιμές της  $Y$ , για τα διάφορα επίπεδα της  $X$ , είναι γραμμικές συναρτήσεις της  $X$  (ότι βρίσκονται δηλαδή σε ευθεία γραμμή). Σημειώνουμε ότι στο πρότυπο  $Y = \alpha + \beta \cdot X + \varepsilon$ , τυχαίες μεταβλητές είναι μόνο οι  $Y$  και  $\varepsilon$ .

### Ομοσκεδαστικότητα - Σταθερότητα Διασποράς

Οι κατανομές της  $Y$  έχουν ίδια διασπορά για όλα τα επίπεδα της  $X$ , δηλαδή,  $\text{Var}(Y / X = x_i) = \sigma^2$ .

### Ανεξαρτησία

Οι τιμές της  $Y$  που αντιστοιχούν στα διάφορα επίπεδα της  $X$  είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Εξαρτημένα  $Y$  εμφανίζονται συνήθως όταν παίρνουμε παρατηρήσεις από την ίδια πειραματική μονάδα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (π.χ. μετράμε την πίεση ή το βάρος του ίδιου ατόμου ανά εβδομάδα). Επίσης, σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται μηχανές (π.χ. όργανα μέτρησης, κ.τ.λ.) που αλλάζει η απόδοσή ανάλογα με τη χρήση αν ο χειριστής βελτιώνεται (ή χειροτερεύει) με την πάροδο του χρόνου. Είναι επομένως αναγκαίο, όταν έχουμε πειραματικά δεδομένα που παίρνονται με χρονική σειρά, να κάνουμε ένα διάγραμμα υπολοίπων ως προς το χρόνο έστω και αν ο χρόνος δεν χρησιμοποιείται ως μεταβλητή στο πρότυπο.

## Κανονικότητα

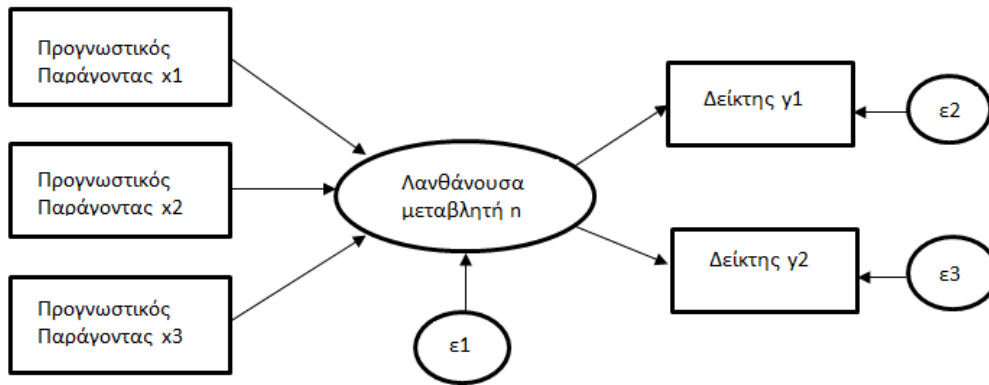
Η κατανομή της  $Y$  για όλα τα επίπεδα της  $X$  είναι κανονική. Η κανονικότητα μπορεί να ελεγχθεί με διάφορους τρόπους όπως:

- Με ιστόγραμμα
- Με φυλλογράφημα (stem and leaf plot)
- Με θηκόγραμμα (box plot)
- Με διάγραμμα πιθανοτήτων (normal probability plot)
- Με στατιστικούς ελέγχους καλής προσαρμογής (goodness-of-fit test) όπως Kolmogorov-Smirnov test ή  $\chi^2$  test.

Όταν διαπιστώνεται παραβίαση της κανονικότητας μπορούμε, σε πολλές περιπτώσεις, να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα με κατάλληλους μετασχηματισμούς στις μεταβλητές.

### **3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ**

Κάθε συμβάν μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργεί μια διαταραχή στην κυκλοφοριακή ροή η οποία διαδίδεται προς τα ανάντη της θέσης όπου συμβαίνει. Γίνεται η υπόθεση ότι η πραγματική επιρροή ενός ατυχήματος σε ελεύθερη λεωφόρο, δεν μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα, αλλά μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας ως δείκτες τη διάρκεια και το μέγιστο μήκος επιρροής της ουράς που σχηματίζεται στο μέτωπο ανάντη του σημείου όπου διαδραματίζεται το περιστατικό. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι αυτοί οι δείκτες είναι ευπαθείς σε διάφορους κυκλοφοριακούς, καιρικούς, γεωμετρικούς και άλλους ειδικούς παράγοντες όπως είναι η ταχύτητα και ο κυκλοφοριακός φόρτος κατά την εμφάνιση του συμβάντος, η ένταση της βροχόπτωσης, η γεωμετρία της οδού δηλαδή αν είναι ευθυγραμμία ή καμπύλη, ο αριθμός των εμπλεκόμενων οχημάτων, ο αριθμός των αποκλεισμένων λωρίδων κυκλοφορίας καθ' ούτω καθεξής. Το παραπάνω πλαίσιο μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο MIMIC (Multiple Indicators – Multiple Causes) με πολλαπλούς δείκτες και πολλαπλές προβλεπτικούς παράγοντες (Σχήμα 6). Στα πρότυπα αυτά η πραγματική επιρροή του συμβάντος θεωρείται μη παρατηρήσιμη μεταβλητή.



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση δομής προτύπου MIMIC

### 3.3.1 ΠΡΟΤΥΠΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΙΣΩΣΕΩΝ

Τα Πρότυπα Δομικών Εισώσεων (Structural Equation Models - SEM) συνήθως χρησιμοποιούνται σαν μια επικυρωτική διαδικασία διαφόρων θεωρητικών υποθέσεων, επειδή δεν υπολογίζουν μόνο τις εκτιμήσεις για τους παράγοντες του προτύπου (όπως διακυμάνσεις και συνδιακυμάνσεις των παραγόντων, τον υπολογισμό της διακύμανσης των καταλοίπων και των λαθών), αλλά εξετάζουν επίσης και το βαθμό προσαρμογής τους με τα δεδομένα.

Γενικά, τα πρότυπα δομικών εξισώσεων είναι μια στατιστική μεθοδολογία που υιοθετεί μια επικυρωτική μέθοδο (εξέταση υποθέσεων) στην πολυμεταβλητή ανάλυση (multivariate analysis) ενός προτύπου, που αφορά κάποιες παρατηρήσεις ή μετρήσεις. Ο όρος SEM δεν υποδεικνύει μια ενιαία στατιστική τεχνική, αλλά αναφέρεται σε μια οικογένεια σχετικών διαδικασιών και στατιστικών αναλύσεων.

Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι ο ερευνητής πρέπει πρώτα να εκτιμήσει τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών και να προτείνει το πρότυπο ανάλυσης και έπειτα να εξετάσει αν οι εκτιμήσεις αυτές επιβεβαιώνονται από τα δεδομένα. Οι σχέσεις αυτές εξετάζονται μέσω γραμμικών εξισώσεων και επιπλέον υπάρχει και η δυνατότητα της γραφικής αναπαράστασης του εκτιμώμενου προτύπου για καλύτερη κατανόηση και επεξεργασία.

Τα SEM μπορούν να θεωρηθούν σαν μια επέκταση της παλινδρόμησης και της παραγοντικής ανάλυσης, η οποία όμως εξετάζει ταυτόχρονα τις σχέσεις μιας ή περισσότερων εξαρτημένων μεταβλητών, και μεταξύ δύο ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι σχέσεις μεταξύ των θεωρητικών εννοιών

αντιπροσωπεύονται από τους συντελεστές παλινδρόμησης ή διαδρομής μεταξύ των διάφορων παραγόντων. Στην πολλαπλή παλινδρόμηση όμως ο αναλυτής θεωρεί ότι, οι μεταβλητές που συμμετέχουν στο σχηματισμό του προτύπου έχουν μετρηθεί απόλυτα, ακόμα και αν αυτό δεν ισχύει. Επιπρόσθετα, το πρότυπο της παλινδρόμησης εκτιμά και αναπαριστά μόνο άμεσες επιδράσεις. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, που μια ανεξάρτητη μεταβλητή δεν είναι απόλυτα παρατηρήσιμη, δημιουργείται πρόβλημα μεροληψίας όχι μόνο στην εκτίμηση του συντελεστή της συγκεκριμένης μεταβλητής, αλλά και στις εκτιμήσεις των συντελεστών των υπόλοιπων μεταβλητών του προτύπου.

Αντίθετα, το πρότυπο διαδρομής (path model) που δημιουργείται στα SEM επιτρέπει τη μελέτη της επίδρασης των επιμέρους μεταβλητών στις οποίες μπορεί να αποσυντεθεί μία αρχική μεταβλητή. Με άλλα λόγια, μια ανεξάρτητη μεταβλητή μπορεί να έχει άμεση αλλά και έμμεση επίδραση σε μια εξαρτημένη μεταβλητή. Μια μεταβλητή μπορεί να φαίνεται μη σημαντική όταν αξιολογείται η άμεση επίδρασή της, αλλά μπορεί να γίνεται σημαντική όταν αξιολογείται η συνολική επίδραση, η οποία λαμβάνει υπόψη της τις διαδρομές σύνδεσης (pathways) που τη συνδέουν με την εξαρτημένη μεταβλητή.

Ένα διάγραμμα στα συστήματα δομικών εξισώσεων αποτελείται από ορθογώνια παραλληλόγραμμα και από κύκλους ή ελλείψεις που συνδέονται μεταξύ τους με απλής ή διπλής κατεύθυνσης βέλη. Τα ορθογώνια παραλληλόγραμμα αντιπροσωπεύουν τις παρατηρηθείσες ή μετρήσιμες μεταβλητές και οι ελλείψεις τις κρυφές ή λανθάνουσες. Πιο συγκεκριμένα, τα απλής κατεύθυνσης βέλη χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις αιτιώδεις σχέσεις στο πρότυπο, όπου η μεταβλητή στην ουρά του βέλους προκαλεί τη μεταβλητή στο σημείο. Τα διπλής κατεύθυνσης βέλη χρησιμοποιούνται για να δείξουν τις συνδιακυμάνσεις ή τους συσχετισμούς μεταξύ των παραγόντων χωρίς καμία αιτιώδη ερμηνεία. Στατιστικά τα απλά βέλη αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές παλινδρόμησης ή τις φορτώσεις των παραγόντων ενώ τα διπλής κατεύθυνσης βέλη δείχνουν τις συνδιακυμάνσεις μεταξύ των παραγόντων. Συνδεδεμένος με κάθε μια παρατηρήσιμη μεταβλητή είναι ένας όρος λάθους, ο οποίος αντιπροσωπεύει το λάθος μέτρησης και απεικονίζει την επάρκεια του προτύπου στη μέτρηση του σχετικού παράγοντα. Επιπλέον, συνδεδεμένος με κάθε κρυφή μεταβλητή είναι ένας όρος υπολοίπου (residual) ο οποίος αντιπροσωπεύει το λάθος στην πρόβλεψη των ενδογενών παραγόντων από τους εξωγενείς παράγοντες. Δεδομένου ότι και οι όροι λάθους και υπολοίπων αντιπροσωπεύουν μεταβλητές που δεν ορίζονται στο πρότυπο έχουν τη μορφή του κύκλου ή της έλλειψης.

Το δομικό πρότυπο εξισώσεων καθορίζει τις αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ των κρυφών παραγόντων καθώς και την προσαρμοστικότητα των προτύπων με τα δεδομένα. Με

τον όρο αιτιώδη σχέση ορίζεται η υπόθεση ότι, θεωρώντας σταθερά όλα τα υπόλοιπα στοιχεία που καθορίζουν το πρότυπο, μια αλλαγή στη μεταβλητή που βρίσκεται στην ουρά του βέλους τι είδους μεταβολή θα προκαλέσει στη μεταβλητή που βρίσκεται στο κεφάλι του βέλους, και αν αυτή η μεταβολή είναι στατιστικά σημαντική. Επομένως, σε ένα δομικό πρότυπο κάθε εξίσωση αντιπροσωπεύει μια αιτιώδη συνάφεια παρά μια εμπειρική ένωση.

Τεχνικά, ένα πρότυπο δομικών εξισώσεων υπονοεί την ύπαρξη μιας μήτρας συνδιακύμανσης των μετρήσεων. Μόλις υπολογιστούν οι παράμετροι του προτύπου, η προκύπτουσα πρότυπος-υπονοούμενη μήτρα συνδιακύμανσης μπορεί να συγκριθεί με μια εμπειρική μήτρα συνδιακύμανσης. Εάν οι δύο μήτρες είναι σύμφωνες ή μια με τη άλλη, τότε για το δομικό πρότυπο εξίσωσης μπορεί να θεωρηθεί σαν μια εύλογη εξήγηση για τις σχέσεις μεταξύ των μετρήσεων.

Υπάρχουν τουλάχιστον δύο λόγοι για τη δημοτικότητα των SEM. Αρχικά, στις επιστήμες που εξετάζουν τη συμπεριφορά ή την αντίδραση των ατόμων σε συγκεκριμένες καταστάσεις, το ενδιαφέρον των ερευνητών εστιάζεται κυρίως στη μελέτη των θεωρητικών κατασκευασμάτων που δεν μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα. Μια μορφή που άμεσα διαπραγματεύονται τα SEM, είναι το πόσο καλά οι μετρήσεις αυτές απεικονίζουν τα προοριζόμενα δομικά πρότυπα. Επιπλέον, οι ερευνητές ενδιαφέρονται κυρίως για ζητήματα πρόβλεψης. Δεδομένου ότι η κατανόηση των σύνθετων φαινομένων έχει αυξηθεί, τα προβλεπτικά πρότυπα έχουν γίνει πιο σύνθετα. Οι τεχνικές που προσφέρουν τα SEM επιτρέπουν τη χρήση ειδικών δοκιμών για σύνθετα πρότυπα διαδρομών (complex path models) που ενσωματώνουν περίπλοκα εννοιολογικά διαγράμματα. Κατά συνέπεια, οι τεχνικές που προσφέρουν τα συστήματα δομικών εξισώσεων είναι πιο προσαρμόσιμες από τις συγκριτικές στατιστικές τεχνικές που βασίζονται στην πολλαπλή παλινδρόμηση.

Το πρότυπο MIMIC (Multiple Indicators – Multiple Causes) είναι μια περίπτωση μοντελοποίησης με δομικά πρότυπα εξισώσεων (SEM), γνωστό επίσης και ως μοντελοποίηση με λανθάνουσες μεταβλητές και αποτελεί μια διεξοδική τεχνική για τον έλεγχο των υποθέσεων όσον αφορά τις σχέσεις μεταξύ των παρατηρούμενων και των μη παρατηρούμενων (λανθανουσών) μεταβλητών. (Washington et al. 2010). Το πρότυπο αποτελείται από δύο συστατικά μέρη: ένα πρότυπο μέτρησης που καθορίζει τις σχέσεις μεταξύ μιας λανθάνουσας μεταβλητής και τους δείκτες της και ένα δομικό πρότυπο το οποίο διευκρινίζει τις περιστασιακές σχέσεις μεταξύ λανθανουσών μεταβλητών και επεξηγεί τις περιστασιακές επιδράσεις. Ένα πρότυπο MIMIC θεωρεί τη λανθάνουσα μεταβλητή  $\eta$  ως μονοδιάστατο μέγεθος και συσχετίζει τον φορέα των δεικτών  $\gamma$  και τις παρατηρούμενες εξωγενείς μεταβλητές  $x$  που την προκαλούν με το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:



$$\begin{aligned}\eta &= \Gamma x + \varepsilon \\ y &= \Lambda \eta + \zeta\end{aligned}\tag{2}$$

Όπου  $\Gamma$  και  $\Lambda$  πίνακες αγνώστων παραμέτρων που υπολογίζονται και  $\varepsilon$  και  $\zeta$  είναι όροι σφάλματος.

Πρότυπα δομικών εξισώσεων έχουν εφαρμοστεί στο παρελθόν σε πολλούς τομείς της επιστήμης των μεταφορών και των συγκοινωνιών συμπεριλαμβανομένων: ποιότητα συστήματος μετακινήσεων της υπηρεσίας (Karlaftis et al. 2001), προτυποποίηση της συμπεριφοράς των μετακινήσεων (Golob 2003), προτυποποίηση τρόπου επιλογής (Johansson et al. 2006), προτυποποίηση οδηγικής συμπεριφοράς (Hassan and Abdel-Aty 2011), ανάλυση της κοινής αποδοχής των νέων τεχνολογιών για την διαχείριση της κυκλοφορίας (Chung et al. 2012).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

---

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Διερευνώνται οι ουρές που σχηματίζονται ανάντη από ατυχήματα. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι με τον όρο “ουρά” δεν εννοείται μια συστοιχία ακινητοποιημένων οχημάτων, όπως αυτές που συχνά παρατηρούνται σε αστικές οδούς ή σε σταθμούς διοδίων, αλλά μία “δυναμική ουρά” στην οποία τα οχήματα κινούνται, αλλά πολύ αργά σε σύγκριση με τις συνήθεις συνθήκες. Σε έναν αυτοκινητόδρομο, όπως η Αττική οδός, όπου η ταχύτητα ελεύθερης ροής σε ιδανικές συνθήκες (στάθμη εξυπηρέτησης A) είναι περί τα 120χλμ/ώρα, όταν για ένα σεβαστό χρονικό διάστημα και μήκος της οδού οι ταχύτητες των οχημάτων κυμαίνονται κάτω από τα 60χλμ/ώρα μπορεί να χαρακτηριστεί ότι στην περιοχή αυτή υπάρχει ουρά.

Τα δεδομένα προέρχονται από την Αττική Οδό, ένας αυτοκινητόδρομος με διόδια μήκους 65 χιλιομέτρων ο οποίος βρίσκεται στα όρια της μητροπολιτικής περιοχής της Αθήνας (Ελλάδα). Η βάση δεδομένων αποτελείται από λεπτομερείς καταγραφές ατυχημάτων και έχουν αναλυθεί ώστε να εντοπιστεί και να αξιολογηθεί η εμφάνιση δευτερογενών ατυχημάτων χρησιμοποιώντας δυναμικές, αναλυτικές και εμπειρικού τύπου προσεγγίσεις. (Vlahogianni et al. 2010, Vlahogianni et al. 2012, Imprialou et al. 2013). Επιπλέον, το σύνολο δεδομένων για τα ατυχήματα έχει εμπλουτιστεί με κυκλοφοριακής φύσεως δεδομένα όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος και η ταχύτητα των οχημάτων στο σημείο του συμβάντος και στη γειτονική περιοχή μέχρι 10 χιλιόμετρα ανάντη του σημείου αναφοράς. Η διερεύνηση των μεταβολών στις ταχύτητες έπειτα από κάθε ατύχημα έγινε με τη βοήθεια φωρατών. Η Αττική οδός είναι εξοπλισμένη με εξακόσιους φωρατές (VDS) οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ανά πεντακόσια μέτρα στον ανοιχτό αυτοκινητόδρομο και ανά εξήντα μέτρα στις σήραγγες. Ακόμη, οι αντίστοιχες πληροφορίες σχετικά με την ένταση της βροχόπτωσης, ήταν διαθέσιμα από το Υδρολογικό Παρατηρητήριο της Αθήνας, το οποίο λειτουργείται από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τα συμβάντα τα οποία εξετάστηκαν είναι αυτά που συνέβησαν κατά τα έτη 2007 και 2009 στις κατευθύνσεις προς Αεροδρόμιο και προς Ελευσίνα. Καθένα ατύχημα

μελετήθηκε ξεχωριστά, ανεξάρτητα από το σημείο και την ώρα που συνέβη, αλλά και από τη σοβαρότητα των επιπτώσεων που είχε. Η μελέτη έγινε με τη βοήθεια του αρχείου “Στοιχεία ατυχημάτων Αττικής οδού” στο οποίο καταγράφονται όλα τα ατυχήματα που έχουν λάβει χώρα στην οδό μαζί με άλλες διευκρινιστικές πληροφορίες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαθέσιμες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται αργότερα στην παρούσα έρευνα για την μοντελοποίηση και για τον υπολογισμό των προτύπων δομικών εξισώσεων (SEM).

Πίνακας 1: Περιγραφή Μεταβλητών

Μεταβλητή	Συμβολισμός	Περιγραφή
Χρονική Διάρκεια Ατυχήματος	Clearance Time	Ο χρόνος που χρειάστηκε μέχρι να καθαριστεί το σημείο του συμβάντος και να αποκατασταθεί η κυκλοφορία
Τύπος Σύγκρουσης	Collision Type	0 μέχρι 4, από λιγότερο σοβαρό έως περισσότερο σοβαρό (0 = χωρίς κάποια συνέπεια ή καθυστέρηση, 1 = καθυστερήσεις, 2 = με ζημιές, 3 = με τραυματίες, 4 = με νεκρούς)
Αριθμός Αποκλεισμένων Λωρίδων Κυκλοφορίας	Blocked Lanes	1 μέχρι 3 (1 = 1 λωρίδα, 2 = 2 λωρίδες, 3 = περισσότερες από 2)
Αριθμός Εμπλεκόμενων Οχημάτων	Nr.Vehicles	1 μέχρι 3 (1 = 1 όχημα, 2 = 2 οχήματα, 3 = περισσότερα από 2 οχήματα)
Βαρύ Όχημα	Heavy Vehicle	0 μέχρι 1 (0 = Δεν εμπλέκεται βαρύ όχημα, 1 = Εμπλέκεται βαρύ όχημα)
Ύψος-Ένταση Βροχόπτωσης	Rainfall Intensity	Ύψος της βροχόπτωσης σε χιλιοστά/λεπτό κατά τη χρονική στιγμή του ατυχήματος.
Γεωμετρική Χάραξη Οδού	Alignment	0 μέχρι 1 (0 = Ευθυγραμμία 1 = Στροφή)
Ράμπα	Ramp	Ύπαρξη ράμπας γειτονικά του σημείου όπου έγινε το συμβάν
Τύπος Συμβάντος	Accident Type	0 = πρωτογενές, 1 = δευτερογενές
Ταχύτητα	Speed	Επικρατούσα ταχύτητα αμέσως πριν την πρόκληση του ατυχήματος σε χιλιόμετρα ανά ώρα
Κυκλοφοριακός Φόρτος	Volume	Κυκλοφοριακός φόρτος αμέσως πριν την πρόκληση του ατυχήματος
Σοβαρότητα	Severity	Η σοβαρότητα του ατυχήματος μετρούμενη ως ο αριθμός των τραυματιών
Μέγιστο Μήκος Σχηματιζόμενης Ουράς	Max Queue Length	Το μέγιστο μήκος της ουράς που σχηματίζεται μετά το συμβάν σε χιλιόμετρα
Χρονική Διάρκεια Ουράς	Queue Duration	Χρονική διάρκεια σχηματιζόμενης ουράς μέχρι την αποσυμφόρηση σε λεπτά

#### 4.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΥΜΒΑΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Το μέγιστο μήκος ουράς και η χρονική διάρκεια της ουράς η οποία σχηματίζεται ανάντη ενός ατυχήματος, υπολογίζεται βάση αναλυτικών και εμπειρικών προσεγγίσεων. Η παρούσα διπλωματική εφαρμόζει την μεθοδολογία που προτάθηκε από την Imperial et al. (2013) η οποία βασίζεται σε ένα συνδυασμό αναλυτικής και εμπειρικής προσέγγισης για την εκτίμηση του μέγιστου μήκους ουράς “Max Queue Length” και τη χρονική διάρκεια της ουράς “Queue Duration” που σχηματίζεται λόγω κάποιου συμβάντος σε αυτοκινητοδρόμους.

Εν συντομία, το αναλυτικό μέρος της μεθοδολογίας βασίζεται στους αλγόριθμους ASDA οι οποίοι παρακολουθούν σε όλες τις χρονικές στιγμές την κίνηση μιας διαταραχής στην κυκλοφορία που οφείλεται σε ένα συμβάν χρησιμοποιώντας στοιχεία από διαδοχικούς ανιχνευτές π.χ. επαγωγικούς βρόχους (loop detectors) (Kerner et al., 2004). Για δύο διαδοχικούς ανιχνευτές ( $Q_o$ ,  $Q_n$ ) που απέχουν μεταξύ τους κατά απόσταση  $L$  σε ένα τμήμα αυτοκινητόδρομου κατά την εμφάνιση μιας διαταραχής στον ανιχνευτή  $Q_n$ , την χρονική στιγμή  $t_0$ , το πρότυπο ASDA αρχίζει να υπολογίζει συνεχόμενα τις θέσεις του ανάντη μετώπου  $x_{up}^{(jam)}(t)$ . Έπειτα, αφού το κατάντη μέτωπο της διαταραχής καταχωρείται στον ανιχνευτή  $Q_n$ , στην μεταγενέστερη χρονική στιγμή  $t_1$ , το πρότυπο ASDA αρχίζει να υπολογίζει συνεχόμενα τις διαδοχικές θέσεις του κατάντη μετώπου,  $x_{down}^{(jam)}(t)$ . Οι θέσεις και των δύο μετώπων διαταραχής που προκαλούνται από το πρωτεύον ατύχημα μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις δυο εξισώσεις που δίνονται παρακάτω (Kerner et al., 2004):

$$x_{up}^{(jam)}(t) = L_{i+1} - \int_{t_0^{(i+1)}}^t \frac{q_0^{(i)}(t) - q_{min}}{\rho_{max} - (q_0^{(i)}(t) / w_0^{(i)}(t))} dt$$

$$x_{down}^{(jam)}(t) = L_j - \int_{t_1^{(j)}}^t \frac{q_{out}^{(j)(jam)}(t) - q_{min}}{\rho_{max} - (q_{out}^{(j)(jam)}(t) / w_{max}^{(j)}(t))} dt \quad (3)$$

Όπου οι δείκτες  $i$  και  $j$  αντιπροσωπεύουν ανιχνευτές, οι οποίοι παίρνουν τις χρονικές τιμές στον χρόνο  $t$  που εξετάζεται,  $L_{i+1}$ ,  $L_j$  είναι οι συντεταγμένες των αντίστοιχων ανιχνευτών,  $t_0^{(i+1)}$  εκφράζει το χρόνο όταν το ανάντη μέτωπο μιας διαταραχής που δημιουργείται εξαιτίας του ατυχήματος έχει παρατηρηθεί στον ανιχνευτή  $i+1$ ,  $t_1^{(j)}$  εκφράζει το χρόνο όταν το κατάντη μέτωπο της διαταραχής έχει παρατηρηθεί στον ανιχνευτή  $j$ ,  $q_0^{(i)}(t)$  και  $w_0^{(i)}(t)$  είναι η μετρούμενη ταχύτητα ροής και η μέση ταχύτητα οχήματος στους ανιχνευτές  $i$  ανάντη της διαταραχής,  $q_{out}^{(j)(jam)}$

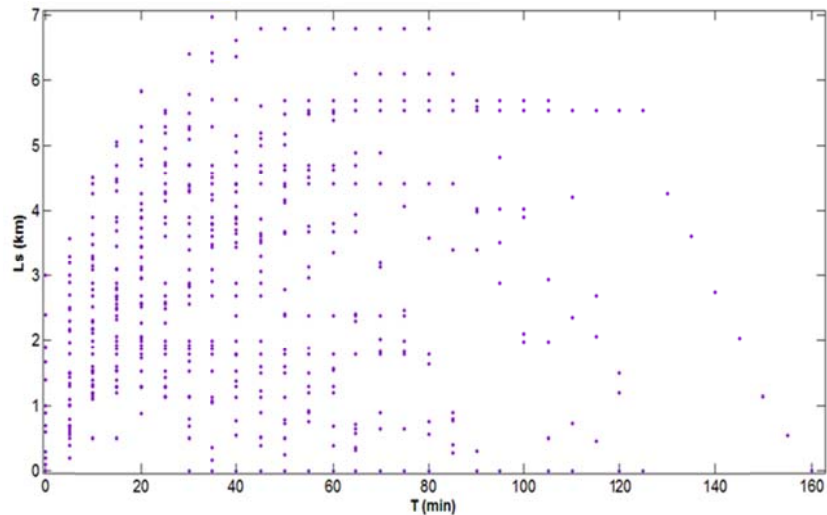
και  $w_{max}^{(j)}$  είναι η μετρούμενη ταχύτητα ροής και η μέση ταχύτητα οχήματος στον ανιχνευτή  $j$  κατάντη της διαταραχής (Kerner et al., 2004).

Ο χρόνος όταν το ανάντη και το κατάντη μέτωπο παρατηρούνται στον κάθε ανιχνευτή, υπολογίζεται βάσει μιας τροποποιημένης εκδοχής του αλγόριθμου του Chen et al. (2004) που βασίζεται σε οριοθέτηση κατωφλιού τιμών ταχύτητας. Οι τροποποιήσεις που έγιναν στην μέθοδο του Chen et al. (2004) αναφέρονται στην τιμή του ανώτατου κατωφλιού τιμών ταχύτητας και τις διαφορές ταχύτητας μεταξύ διαδοχικών φωρατών. Για τον προσδιορισμό των παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές μετρήσεις ταχύτητας. Στην παρούσα εργασία, θεωρείται ότι το ανάντη μέτωπο της διαταραχής έχει φτάσει ένα ανιχνευτή κάποια στιγμή εάν τα τρία ακόλουθα κριτήρια ικανοποιούνται:

1. Η ταχύτητα στον ανιχνευτή είναι κάτω από μια ανώτατη τιμή ταχύτητας,
2. Η μείωση της ταχύτητας στον ανιχνευτή είναι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο όριο (που εκτιμάται από δεδομένα σε πραγματικό χρόνο),
3. Η διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων στον ανιχνευτή και στον επόμενο ανιχνευτή κατάντη είναι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο όριο τιμών.

Στην περίπτωση όπου ο αναλυτικός τρόπος είναι δύσκολο να εφαρμοστεί, οι περιοχές επιρροής καθορίζονται από μια εμπειρική μέθοδο και ο υπολογισμός γίνεται ως εξής: ακριβώς μετά την εμφάνιση ενός πρωτεύοντος ατυχήματος από τη χρονική στιγμή που ο κοντινότερος ανάντη ανιχνευτής καταγράφει τα δεδομένα ταχύτητας που ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια, η θέση αυτή του δρόμου θεωρείται ότι παρουσιάζει συμφόρηση μέχρι τη χρονική στιγμή που τα κριτήρια παύουν να ισχύουν. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε ανιχνευτή που είναι τοποθετημένος ανάντη του ατυχήματος και έχει καταγράψει, σύμφωνα με τα κριτήρια, μειωμένη ταχύτητα. Συνδιάζοντας όλες αυτές τις πληροφορίες σχετικά με τη διάρκεια της συμφόρησης σε κάθε θέση σε ένα χωροχρονικό διάγραμμα, γίνεται εφικτό να “εντοπιστούν” τα πραγματικά όρια μιας περιοχής επιρροής και επίσης τον ακριβό τρόπο σχηματισμού και αποσχηματισμού της.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω προσέγγιση, μπορεί να προσδιοριστεί η εξέλιξη της επιρροής κάθε ατυχήματος στην ανάντη κυκλοφορία. Το Διάγραμμα 7 δείχνει την εξέλιξη της επιρροής του ατυχήματος ανάντη του σημείου όπου αυτό συνέβηκε για τα διαθέσιμα δεδομένα.

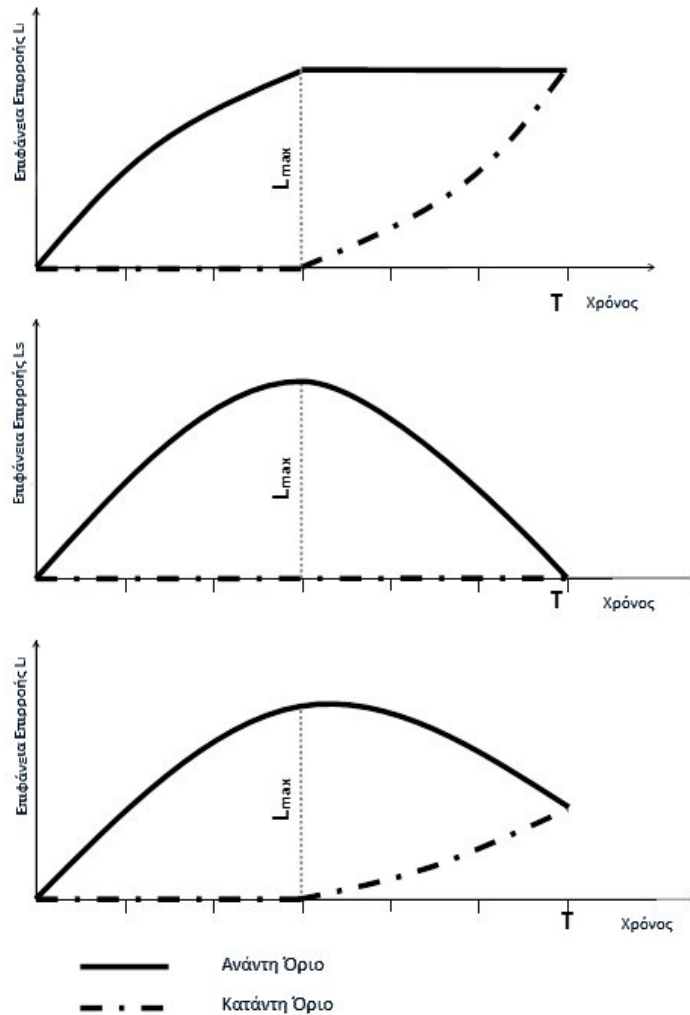


Διάγραμμα 7: Εξέλιξη της επιρροής για ένα δείγμα ατυχημάτων

Είναι προφανές από το διάγραμμα, ότι η σχέση μεταξύ  $L_s$  and  $T$  είναι αρκετά πολύπλοκη και επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως είναι διάφορα χαρακτηριστικά του συμβάντος (τύπος ατυχήματος, σοβαρότητα του ατυχήματος, αριθμός των αποκλεισμένων λωρίδων κυκλοφορίας κλπ.), τον καιρό (βροχόπτωση η όχι) και τις κυκλοφοριακές συνθήκες (ταχύτητα και κυκλοφοριακός φόρτος).

#### 4.1.2 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ

Ως δευτερογενή χαρακτηρίζονται τα ατυχήματα που λαμβάνουν χώρα εντός ή στα όρια μίας περιοχής συμφόρησης προκαλούμενης από κάποιο πρωτογενές συμβάν. Η παραπάνω προσέγγιση για τον εντοπισμό της επιρροής ενός συμβάντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό δευτερογενών συμβάντων. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8, κάθε συμβάν που λαμβάνει χώρα εντός αυτής της χωροχρονικής περιοχής, μπορεί να χαρακτηριστεί με ένα καλό βαθμό βεβαιότητας που επιτρέπει η ποιότητα των δεδομένων που προκύπτουν από τον ανιχνευτή βρόχου, ως δευτερεύον.



**Διάγραμμα 8 : Επιφάνειες Επιρροής**

Αυτό συμβαίνει διότι η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα κάποιου βαθμού βεβαιότητας για το ποια περιστατικά συνέβησαν σε συνθήκες συμφόρησης προκαλούμενης από ένα άλλο, προγενέστερο, συμβάν και ποια όχι. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα των δευτερευόντων συμβάντων που προκύπτουν από αυτή τη μέθοδο, εξαρτώνται σχεδόν εξ' ολοκλήρου στην απόδοση των ανιχνευτών βρόχου.

Όπως υπολογίστηκε, το πραγματικό ποσοστό των δευτερογενών συμβάντων στο σύνολο των 1442 ατυχημάτων της βάσης δεδομένων είναι 1,79%.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι συχνό φαινόμενο όπου χρησιμοποιούνται τα στατιστικά όρια να προκύπτει λανθασμένη κατάταξη στα δευτερογενή, περιστατικά όπου ανήκουν στα πρωτογενή. Ο λόγος που κάτι τέτοιο συμβαίνει είναι εξηγήσιμος, καθότι οι μέθοδοι αυτές δε λαμβάνουν καθόλου υπόψη τις επικρατούσες

κυκλοφοριακές συνθήκες στην οδό παρά μόνο τη χωρική και τη χρονική σχέση των δύο συμβάντων.

Ο Πίνακας 2 δείχνει τον μέσο όρο της διάρκειας των συμβάντων, ο οποίος βάση των μετρήσεων δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ πρωτεύοντων και δευτερευόντων ατυχημάτων. Ο μέσος όρος της διάρκειας όλων των συμβάντων είναι 41,46 λεπτά. Η μέση διάρκεια δευτερευόντων συμβάντων είναι σχεδόν 40 λεπτά γεγονός που υποδηλώνει την σημαντικότητα τους (σε όρους διάρκειας).

Πίνακας 2: Περιγραφικά Στατιστικά διάρκειας συμβάντων

	Μέσος Όρος (λεπτά)	N	Ελάχιστη	Μέγιστη	Τυπική Απόκλιση (λεπτά)
Σύνολο συμβάντων	41,46	1442	3	758	33,902
Πρωτεύοντα	41,57	1347	3	758	33,931
Δευτερεύοντα	39,96	95	7	257	33,63

Ο πίνακας 3 δείχνει ότι ο μέσος όρος του μήκους της σχηματιζόμενης ουράς οχημάτων, όπως αυτή προέκυψε από τα 200 καταγεγραμμένα περιστατικά ατυχημάτων που παρουσίασαν κυκλοφοριακή συμφόρηση και δημιουργία ουράς, είναι 3,97 χιλιόμετρα. Η μέγιστη ουρά οχημάτων μετρήθηκε 13,2 χιλιόμετρα ενώ η ελάχιστη, μόλις μισό χιλιόμετρο.

Πίνακας 3: Περιγραφικά Στατιστικά μέγιστου μήκους σχηματιζόμενης ουράς

	Μέσος Όρος (χλμ.)	N	Ελάχιστη	Μέγιστη	Τυπική Απόκλιση (χλμ.)
Όλα τα συμβάντα	3,97	200	0,5	13,2	2,417

#### 4.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΚΟΥΣ ΟΥΡΑΣ

Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται να εξετασθούν γραμμικές σχέσεις μεταξύ καθορισμένων μεταβλητών που έχουν μετρηθεί και είναι καταγεγραμμένες στη βάση δεδομένων “Στοιχεία ατυχημάτων Αττικής Οδού” οι οποίες να δίνουν επαρκή και ικανοποιητικά αποτελέσματα και να επεξηγούν την επίδραση που έχουν ορισμένοι παράγοντες στην δημιουργία δυσμενών κυκλοφοριακών συνθηκών και συγκεκριμένα στην δημιουργία ουρών από οχήματα μετά από ένα ατύχημα. Οι γραμμικές αυτές σχέσεις αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 3 της παρούσας



διπλωματικής εργασίας, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στην συνέχεια του κεφαλαίου αυτού.

Μία από τις κυριότερες υποθέσεις για την εφαρμογή γραμμικών προτύπων παλινδρόμησης είναι η ομοιογένεια της διακύμανσης των υπολοίπων. Εάν το πρότυπο είναι καλά διαμορφωμένο, δεν πρέπει να παρουσιάζεται κάποιο μοτίβο για τα υπόλοιπα. Αν η διακύμανση των υπολοίπων είναι μη-σταθερή, τότε λέγεται ότι είναι "ετεροσκεδαστική". Υπάρχουν γραφικές και μη-γραφικές μεθόδους για την ανίχνευση της ετεροσκεδαστικότητας. Στην παρούσα μελέτη, γίνεται χρήση του μη γραφικού ελέγχου Breusch-Pagan. Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσω του προγράμματος Stata με χρήση της εντολής `hettest` και ελέγχει την μηδενική υπόθεση ότι η διακύμανση των υπολοίπων είναι ομοιογενής. Επομένως, αν η τιμή  $p$  είναι πολύ μικρή, θα πρέπει να απορριφθεί η υπόθεση αυτή και να γίνει δεκτή η εναλλακτική υπόθεση, ότι δηλαδή η διακύμανση δεν είναι ομοιογενής. Έτσι, σε αυτήν την περίπτωση, τα στοιχεία είναι εναντίον της μηδενικής υπόθεσης ότι δηλαδή η διακύμανση είναι ομοιογενής και άρα παρουσιάζεται ετεροσκεδαστικότητα. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4, τα γραμμικά πρότυπα παλινδρόμησης για την περιγραφή της διάρκειας και μήκους ουράς έχουν τιμή  $p$  μηδενική, οπότε απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση ομοιογενούς διακύμανσης των υπολοίπων. Άρα τα πρότυπα παρουσιάζουν ετεροσκεδαστικότητα.

Πίνακας 4: Έλεγχος Breusch-Pagan για ύπαρξη ετεροσκεδαστικότητας για τη διάρκεια και το μέγιστο μήκος ουράς

Breusch-Pagan	Διάρκεια	Μέγιστο Μήκος
$\chi^2$ (prob> $\chi^2$ )	984.24 (0.000)	785.28 (0.000)

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό των γραμμικών προτύπων παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι οι μεταβλητές έχουν λογικά μεγέθη και τα αναμενόμενα πρόσημα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5, η συνολική χρονική διάρκεια ενός συμβάντος συσχετίζεται με τη χρονική διάρκεια της σχηματιζόμενης ουράς από οχήματα. Παρατηρήθηκε ότι για κάθε επιπλέον 10 λεπτά συνολικής χρονικής διάρκειας ενός συμβάντος, η ουρά οχημάτων που σχηματίζεται πίσω από το σημείο του ατυχήματος διαρκεί 2,5 λεπτά επιπρόσθετα. Η παρατήρηση αυτή έρχεται να επιβεβαιώσει το λογικό συμπέρασμα ότι όσο καθυστερεί η αποκατάσταση της κυκλοφορίας όταν έχει προηγηθεί ένα ατύχημα, τα οχήματα κατά την διέλευσή τους από την περιοχή επιρροής του ατυχήματος, θα αναγκάζονται να μειώσουν ταχύτητα ή και να σταματήσουν, με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η ομαλή κυκλοφορία και να δημιουργείται κυκλοφοριακή συμφόρηση και ουρά οχημάτων.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα προτυποποίησης διάρκειας ουράς

	Συντελεστής	Std. Err.	t	P>t
Διάρκεια Συμβάντος	0,246	0,025	9,700	0,000
Τύπος Σύγκρουσης	1,428	0,807	1,770	0,077
Αριθμός Εμπλεκόμενων Οχημάτων	11,422	1,578	7,240	0,000
Ταχύτητα	-0,102	0,031	-3,290	0,001
Κυκλοφοριακός Φόρτος Λωρίδας	0,015	0,002	8,530	0,000
Ύψος Βροχόπτωσης	0,351	0,798	0,440	0,661
Γεωμετρική Χάραξη Οδού	1,388	1,729	0,800	0,442
Γεωμετρία Ανάντη Οχήματος	-0,648	0,774	-0,840	0,403
Τούνελ κατάντη	-2,256	3,500	-0,640	0,519
Σταθερά	-26,936	5,371	-5,010	0,000

Αριθμός Παρατηρήσεων	1442
R <sup>2</sup>	0,164
Prob>F	0,000

Ο τύπος σύγκρουσης εκφράζει την σοβαρότητα του ατυχήματος σε αύξουσα κλίμακα από 1 –λιγότερο σοβαρό- έως 4 –περισσότερο σοβαρό-. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως ήταν αναμενόμενο η σοβαρότητα του ατυχήματος συσχετίζεται θετικά με τη διάρκεια της σχηματιζόμενης ουράς. Δηλαδή, όσο πιο σοβαρό το ατύχημα τόσο μεγαλύτερη η διάρκεια της ουράς. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στις επιπλέον καθυστερήσεις μέχρι να καθαρίσει ο χώρος του ατυχήματος και να επέμβουν τα κατάλληλα συνεργεία αποκατάστασης της κυκλοφορίας καθώς επίσης και στο χρόνο που χρειάζονται τα ασθενοφόρα για να επέμβουν και να περιποιηθούν τους τραυματίες.

Ο αριθμός των εμπλεκόμενων οχημάτων παρουσίασε την μεγαλύτερη βαρύτητα όσον αφορά τη διάρκεια της ουράς. Για κάθε ένα όχημα που εμπλέκεται στην σύγκρουση, εκτιμάται ότι σχεδόν 12 λεπτά προστίθενται στη διάρκεια της σχηματιζόμενης ουράς. Αυτό πιθανόν συμβαίνει διότι αυξάνεται η πολυπλοκότητα του ατυχήματος και ο χρόνος που απαιτείται για να καθαριστεί το σημείο και να επανέλθει η κυκλοφορία σε ομαλές συνθήκες (περισσότερες ζημιές, μπάζα, τραυματίες κ.α.).

Αρνητική επίδραση στη διάρκεια της ουράς, έχει η ταχύτητα των διερχομένων οχημάτων. Η ταχύτητα προέκυψε βάση των παρατηρήσεων να συσχετίζεται με αρνητικό συντελεστή -0.102. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για ταχύτητα οχήματος 100 χλμ. ανά ώρα παρατηρήθηκε μείωση της διάρκειας της ουράς κατά 10 λεπτά περίπου, ενώ για ταχύτητα οχήματος 50 χλμ. ανά ώρα, η μείωση είναι της τάξης των

5 λεπτών. Η μεταβλητή αυτή υποδηλώνει την ταχύτητα που ακολουθούσε το όχημα ελάχιστο χρόνο πριν το ατύχημα. Αν το ατύχημα συνέβαινε σε συνθήκες ελεύθερης ροής όπου οι ταχύτητες είναι μεγάλες, τότε η επιρροή του ατυχήματος στη διάρκεια της ουράς προέκυπτε μικρότερη.

Ο κυκλοφοριακός φόρτος ναι μεν συσχετίζεται θετικά με τη διάρκεια της ουράς, εντούτοις η επιρροή του είναι μικρή. Συγκεκριμένα εκτιμήθηκε ότι για κάθε επιπλέον 1000 οχήματα κυκλοφοριακού φόρτου, η διάρκεια της ουράς αυξάνεται κατά 15 λεπτά. Η εκτίμηση αυτή είναι λογική, αφού είναι γνωστό ότι μεγαλύτεροι κυκλοφοριακοί φόρτοι προκαλούν μεγαλύτερο συνωστισμό και μειώνουν το επίπεδο εξυπηρέτησης της οδού.

Τέλος, μετά την επεξεργασία της υπάρχουσας βάσης δεδομένων, παράγοντες όπως είναι το ύψος της βροχόπτωσης, η γεωμετρική χάραξη της οδού, η γεωμετρία ανάντη του οχήματος και η ύπαρξη τούνελ ανάντη, προέκυψαν ότι δεν έχουν στατιστικά σημαντική επιρροή. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο σωστό σχεδιασμό και στις υψηλές προδιαγραφές συντήρησης και λειτουργίας της Αττικής οδού.

Όσον αφορά το μήκος της σχηματιζόμενης ουράς, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με αυτά που προέκυψαν για τη διάρκεια της ουράς. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα προτυποποίησης μήκους ουράς

	Συντελεστής	Std. Err.	t	P>t
Διάρκεια Συμβάντος	0,006	0,001	4,670	0,000
Αριθμός Εμπλεκόμενων Οχημάτων	0,508	0,065	7,820	0,000
Ταχύτητα	-0,005	0,001	-3,300	0,001
Κυκλοφοριακός Φόρτος Λωρίδας	0,001	0,000	8,400	0,000
Ύψος Βροχόπτωσης	0,013	0,038	0,350	0,726
Γεωμετρική Χάραξη Οδού	0,145	0,820	1,770	0,076
Γεωμετρία Ανάντη Οχήματος	-0,057	0,037	-1,580	0,115
Τούνελ κατάντη	-0,022	0,166	-0,130	0,894
Σταθερά	-0,814	0,208	-3,920	0,000

Αριθμός Παρατηρήσεων	1442
R <sup>2</sup>	0,142
Prob>F	0,000

Η συνολική χρονική διάρκεια ενός συμβάντος συσχετίζεται με το μήκος της σχηματιζόμενης ουράς. Παρατηρήθηκε ότι για κάθε ώρα συνολικής χρονικής διάρκειας ενός συμβάντος, η ουρά οχημάτων που σχηματίζεται πίσω από το σημείο του ατυχήματος έχει επιπρόσθετο μήκος κοντά στα 400 μέτρα. Η παραπάνω παρατήρηση συμφωνεί με τη λογική και πιθανόν να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως το γεγονός ότι όσο διαδραματίζεται το συμβάν και καθυστερεί η αποκατάσταση της κυκλοφορίας, τα οχήματα συσσωρεύονται το ένα πίσω από το άλλο λόγω της παρεμπόδισης της ομαλής ροής της κυκλοφορίας με αποτέλεσμα τη δημιουργία κυκλοφοριακής συμφόρησης (μποτιλιάρισμα) και το σχηματισμό ολοένα και αυξανόμενου μήκους ουράς.

Ο αριθμός των εμπλεκόμενων οχημάτων, ομοίως όπως προκύπτει για τη διάρκεια της ουράς έτσι και για το μήκος της, παρουσιάζει τον μεγαλύτερο συντελεστή. Για κάθε ένα όχημα που εμπλέκεται στην σύγκρουση, εκτιμάται ότι το μήκος της ουράς αυξάνεται περίπου μισό χιλιόμετρο. Αυτό πιθανόν συμβαίνει διότι η εμπλοκή περισσότερων οχημάτων σε ένα ατύχημα δυσχεραίνει το έργο των συνεργείων αποκατάστασης και των ασθενοφόρων και συνεπώς χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να καθαριστεί το σημείο και να επανέλθει η κυκλοφορία σε κανονικές συνθήκες (περισσότερες ζημιές, μπάζα, τραυματίες κ.α.).

Όπως και στη διάρκεια έτσι και στο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς, η ταχύτητα έχει αρνητική επιρροή. Όταν τα οχήματα διατηρούν μεγαλύτερες ταχύτητες, το μήκος παρουσιάζει μείωση. Συγκεκριμένα όπως προκύπτει από την επεξεργασία των δεδομένων της Αττικής οδού, για ταχύτητα οχήματος 100 χλμ. ανά ώρα, παρατηρήθηκε μείωση του μήκους της σχηματιζόμενης ουράς κατά μισό χιλιόμετρο, ενώ για ταχύτητα οχήματος 50 χλμ. ανά ώρα, η μείωση είναι της τάξης των 250 μέτρων. Αν το ατύχημα συνέβαινε σε συνθήκες ελεύθερης ροής όπου οι ταχύτητες είναι μεγάλες, τότε η επιρροή του ατυχήματος στο μήκος της ουράς προέκυπτε μικρότερη.

Ο κυκλοφοριακός φόρτος συσχετίζεται θετικά με τη διάρκεια της ουράς. Εκτιμήθηκε ότι για κάθε επιπλέον 1000 οχήματα κυκλοφοριακού φόρτου, το μήκος της ουράς αυξάνεται κατά 1 χιλιόμετρο. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με τη λογική, αφού είναι γνωστό ότι μεγαλύτεροι κυκλοφοριακοί φόρτοι προκαλούν μεγαλύτερο συνωστισμό και παρεμποδίζουν την ομαλή ροή των οχημάτων.

Σε αντίθεση με την περίπτωση της διάρκειας, το μήκος μιας ουράς φαίνεται να επηρεάζεται σε στατιστικά σημαντικό βαθμό από την γεωμετρική χάραξη της οδού. Αυτό σημαίνει ότι το μήκος της ουράς επηρεάζεται αν το ατύχημα λαμβάνει μέρος σε καμπύλο τμήμα μιας οδού ή σε ευθυγραμμία. Στην περίπτωση που συμβαίνει το πρώτο, το μήκος της ουράς που σχηματίζεται προσ αυξάνεται κατά 150 μέτρα. Αυτό

πιθανόν να οφείλεται στην ύπαρξη μικρότερου μήκους ορατότητας στη στροφή, γεγονός που εντείνει την εγρήγορση και την επιφυλακτικότητα των οδηγών καθώς την προσεγγίζουν. Επίσης όταν το σημείο πρόκλησης ενός ατυχήματος βρίσκεται σε στροφή, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και περισσότερος χρόνος για τον καθαρισμό της περιοχής και την αποκατάσταση της ομαλής κυκλοφορίας των οχημάτων.

Τέλος, παράγοντες όπως είναι το ύψος της βροχόπτωσης, η γεωμετρία ανάντη του οχήματος και η ύπαρξη τούνελ ανάντη, προέκυψαν ότι δεν έχουν στατιστικά σημαντική επιρροή. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο σωστό σχεδιασμό και στις υψηλές προδιαγραφές συντήρησης και λειτουργίας της Αττικής οδού.

### **4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ**

Η προσπάθεια ερμηνείας του φαινομένου της διάρκειας και του μήκους των ουρών και γενικά της επιρροής του ατυχήματος στην επικρατούσα κυκλοφορία με απλά γραμμικά πρότυπα, παρόλο που δίνει κάποια χρήσιμα συμπεράσματα, εντούτοις δεν επαρκεί. Πρόκειται για ένα πολύ πολύπλοκο φαινόμενο που δεν μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από 2 ανεξάρτητα γραμμικά πρότυπα λόγω της μεγάλης διακύμανσης του όρου σφάλματος στα αποτελέσματα των αναλύσεων που προκύπτουν. Για το λόγο αυτό αναπτύσσονται πρότυπα δομικών εξισώσεων.

Σημειώνεται ότι τα δομικά πρότυπα που παρουσιάζονται στην συνέχεια αφορούν ατυχήματα που καταγράφηκαν στο αρχείο EXCEL “Στοιχεία ατυχημάτων Αττικής οδού” αφού αφαιρέθηκαν τα ατυχήματα που παρουσίαζαν μηδενική διάρκεια σχηματιζόμενης ουράς.

#### **4.3.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ**

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε από το “SEM builder” του λογισμικού προγράμματος STATA προέκυψαν τα διαγράμματα δομικών προτύπων που παρουσιάζονται στην συνέχεια και τα οποία απεικονίζουν τις αιτιώδεις σχέσεις που σύμφωνα με τις υποθέσεις μας συνδέουν τις μεταβλητές, καθώς και τα αριθμητικά αποτελέσματα των αναλύσεων.

Για την εξεύρεση ενός δομικού προτύπου που να περιγράφει επαρκώς και ικανοποιητικά την σχέση μεταξύ των διαφόρων μεταβλητών έγιναν διάφορες δοκιμές. Στόχος ήταν να υπολογιστεί μια δομή προτύπου που να είναι μεν απλή ώστε ο αλγόριθμος του προτύπου να συγκλίνει, αλλά από την άλλη να μην εξαιρούνται από το πρότυπο άλλες σημαντικές μεταβλητές. Τελικώς, έγιναν 2 διαφορετικές προσεγγίσεις και αναπτύχθηκαν 2 διαφορετικά δομικά πρότυπα που δίνουν ικανοποιητική ερμηνεία των μεταβλητών και πως συσχετίζονται μεταξύ τους.

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών οπότε και εξαιρέθηκαν. Για παράδειγμα στο Δομικό Πρότυπο 1 υπεισέρχεται η μεταβλητή Clearance\_Time η οποία εμπεριέχει άλλες μεταβλητές και συνεπώς έχει μεγάλη συσχέτιση με αυτές, όπως με την σοβαρότητα του ατυχήματος (Severity), ενώ η μεταβλητή που εκφράζει τον αριθμό των εμπλεκόμενων οχημάτων (Nr\_Vehicles) εμπεριέχει τις μεταβλητές που εκφράζουν τα επιβατικά οχήματα (PC) και τα δίκυκλα (PTW).

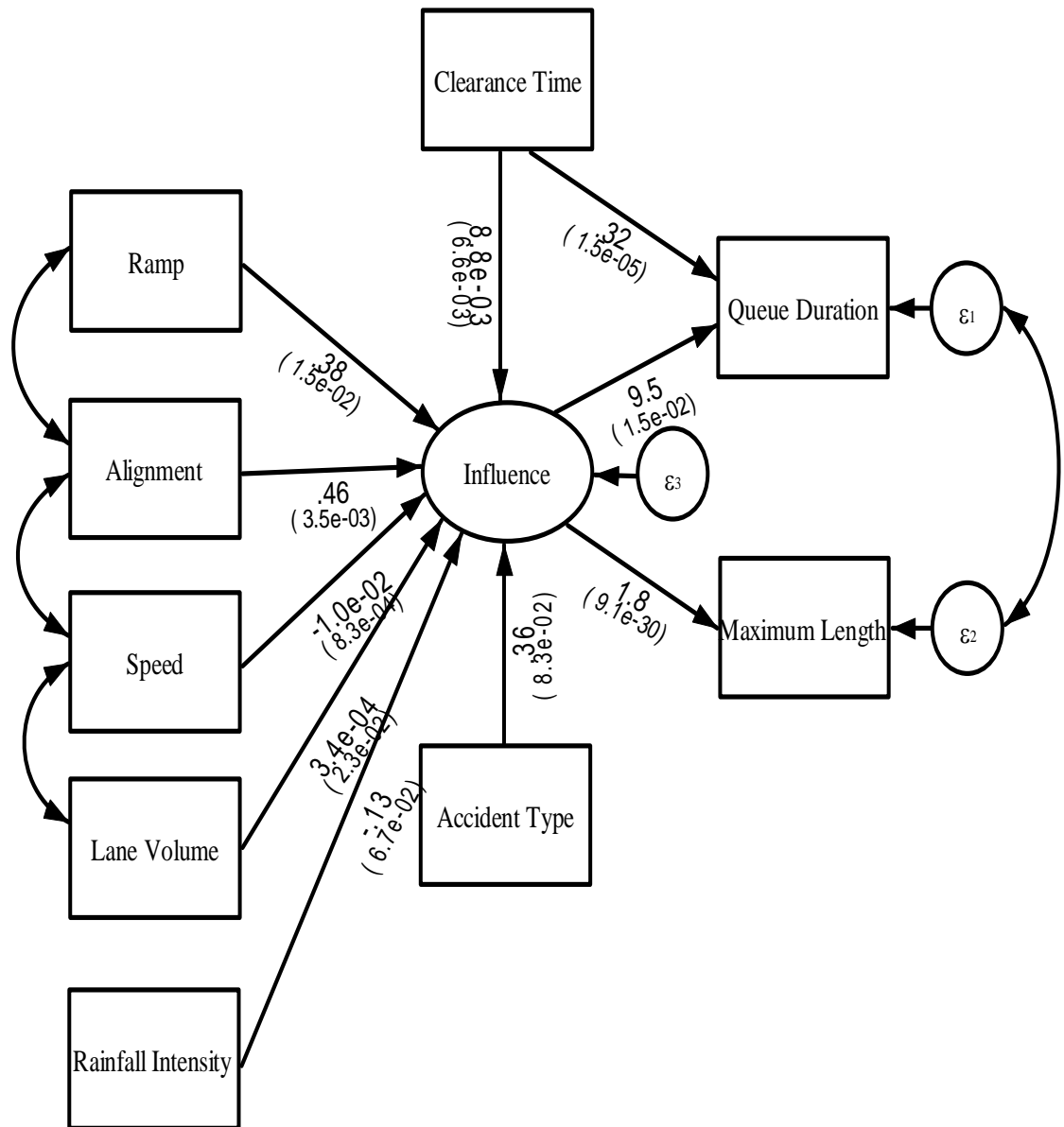
Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται τα 2 δομικά πρότυπα.

### **ΔΟΜΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 1**

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται το δομικό Δομικό Πρότυπο 1 το οποίο περιγράφει την επίδραση που έχουν ορισμένες μεταβλητές που ονομάζονται προγνωστικοί παράγοντες στη διάρκεια και στο μέγιστο μήκος των σχηματιζόμενων ουρών που δημιουργούνται μετά από κάποιο ατύχημα. Οι παράγοντες αυτοί, όπως φαίνονται χαρακτηριστικά και στο σχήμα, δεν επιδρούν άμεσα στους δυο δείκτες που περιγράφουν τη διάρκεια και το μέγιστο μήκος της ουράς, αλλά έμμεσα μέσω μιας μη μετρήσιμης λανθάνουσας μεταβλητής "INFLUENCE". Τα ορθογώνια παραλληλόγραμμα αντιπροσωπεύουν τις παρατηρηθείσες ή μετρήσιμες μεταβλητές και η έλλειψη την κρυφή ή λανθάνουσα. Πιο συγκεκριμένα, τα απλής κατεύθυνσης βέλη χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις αιτιώδεις σχέσεις στο πρότυπο, όπου η μεταβλητή στην ουρά του βέλους προκαλεί τη μεταβλητή στο σημείο. Στατιστικά τα απλά βέλη αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές παλινδρόμησης ή τις φορτώσεις των παραγόντων. Συνδεμένος με κάθε δείκτη είναι ένας όρος λάθους, ο οποίος αντιπροσωπεύει τον όρο σφάλματος και απεικονίζει την επάρκεια του προτύπου στην εκτίμηση του σχετικού παράγοντα. Επιπλέον, συνδεμένος με την λανθάνουσα μεταβλητή είναι ένας όρος υπολοίπου (residual) ο οποίος αντιπροσωπεύει το λάθος στην πρόβλεψη των ενδογενών παραγόντων από τους εξωγενείς παράγοντες. Δεδομένου ότι και οι όροι λάθους και υπολοίπων αντιπροσωπεύουν μεταβλητές που δεν ορίζονται στο πρότυπο έχουν τη μορφή του κύκλου ή της έλλειψης. Αναλυτικότερη περιγραφή των μεταβλητών και των συσχετίσεων τους γίνεται στη συνέχεια.

Η καλή προσαρμογή στις περιπτώσεις προτύπων δομικών συναρτήσεων είναι ένα μέτρο εξακρίβωσης του πόσο καλά ταιριάζουν οι παρατηρηθείσες τιμές-μετρήσεις στο πρότυπο. Στον Πίνακα 7 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι έλεγχοι καλής προσαρμογής που γίνονται για το Δομικό Πρότυπο 1. Οι στατιστικοί δείκτες και οι τιμές τους περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι τα στατιστικά που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο καλής προσαρμογής επεξηγούνται αναλυτικά στο παράρτημα.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7, γίνεται ο έλεγχος  $\chi^2$  (chi2) μεταξύ του Προτύπου 1 και του κορεσμένου (saturated) προτύπου που είναι το πρότυπο που ταιριάζει τέλεια στις διακυμάνσεις. Στο παρόν πρότυπο προέκυψε  $\chi^2$  (chi2) = 5,306 και η πιθανότητα  $p > \chi^2 = 0,505 > 0.5$ . Αυτό δείχνει ότι το πρότυπο είναι τόσο καλό στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων όσο και το κορεσμένο πρότυπο που αφορά όλες τις παραμέτρους.



Σχήμα 7: Δομικό Πρότυπο 1 - Δομή, συντελεστές παραγόντων και δεικτών και σημαντικότητα

Πίνακας 7: Στατιστικά καλής προσαρμογής προτύπου 1 (Goodness of fit statistics)

Στατιστικά προσαρμογής	Τιμή	Περιγραφή
Likelihood ratio		
chi2_ms(6)	5,306	Δομικό Πρότυπο 1 vs. Κορεσμένο Πρότυπο
p > chi2	0,505	
Σφάλμα Πληθυσμού		
RMSEA	0,000	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προσέγγισης
90% CI, κατώτερο όριο	0,000	
ανώτερο όριο	0,093	
pclose	0,728	Πιθανότητα RMSEA <= 0.05
Information criteria		
AIC	8925,771	Akaike's information criterion
BIC	8975,943	Bayesian information criterion
Baseline comparison		
CFI	1,000	Comparative fit index
TLI	1,013	Tucker-Lewis index
Μέγεθος των υπολοίπων		
SRMR	0,022	Κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού υπολοίπου
CD	0,400	συντελεστής προσδιορισμού

Όσον αφορά στην τιμή RMSEA (Root mean squared error of approximation) αυτή αναφέρεται μαζί με το κατώτερο και το ανώτερο της όριο στο 90% διάστημα εμπιστοσύνης του. Γίνεται έλεγχος εάν το κατώτερο όριο είναι μικρότερο του 0,05 ή το ανώτερο όριο είναι μεγαλύτερο από 0,10. Αν το κατώτερο όριο είναι μικρότερο από 0,05, τότε δεν απορρίπτεται η υπόθεση ότι η προσαρμογή ταιριάζει σε ικανοποιητικό βαθμό. Εάν το ανώτερο όριο είναι μεγαλύτερο του 0,10, τότε δεν



απορρίπτεται η υπόθεση ότι η προσαρμογή είναι φτωχή. Στο παρόν πρότυπο βρέθηκε ότι το κατώτερο όριο είναι  $0,00 < 0,05$  άρα δεν απορρίπτεται η υπόθεση ότι η προσαρμογή ταιριάζει σε ικανοποιητικό βαθμό και επιπλέον το ανώτερο όριο βρέθηκε  $0,093 < 0,10$ , συνεπώς η προσαρμογή είναι καλή.

$P_{close}$  είναι η πιθανότητα η τιμή του RMSEA να είναι  $< 0,05$ , μεταφραζόμενη ως την πιθανότητα οι προβλεπόμενες ροπές (μέσος όρος, διακύμανση κλπ) να είναι κοντά στις ροπές του πληθυσμού που μετρήθηκε. Στην προκειμένη περίπτωση η προσαρμογή του προτύπου είναι ικανοποιητική.

Ακολουθούν τα κριτήρια AIC και BIC τα οποία αποτελούν συγκριτικά μεγέθη, εφόσον από μόνα τους δεν παρέχουν πληροφορίες. Όσο μικρότερη τιμή έχουν τόσο καλύτερο θεωρείται το πρότυπο. Αφού έγιναν διάφορες δοκιμές και εναλλακτικά πρότυπα προέκυψαν ως βέλτιστες, οι τιμές που αναγράφονται στον παραπάνω πίνακα.

CFI και TLI είναι δύο δείκτες που όταν παίρνουν τιμές κοντά στην μονάδα υποδηλώνουν καλή προσαρμογή του προτύπου. Για το πρότυπο αυτό και οι δύο δείκτες έχουν τιμή κοντά στην μονάδα, άρα υπάρχει καλή προσαρμογή.

SRMR (standardized root mean squared residual). Τέλεια προσαρμογή του προτύπου αντιστοιχεί σε τιμή SRMR ίση με μηδέν, ενώ μια καλή προσαρμογή αντιστοιχεί σε “μικρή” τιμή μικρότερη από 0,08. Το πρότυπο προσαρμόζεται καλά με αυτό το πρότυπο αφού η τιμή SRMR βρέθηκε ίση με 0,022.

CD (coefficient of determination) είναι κάτι ανάλογο του  $R^2$  για ολόκληρο το πρότυπο. Τιμή κοντά στη μονάδα υποδηλώνει καλή προσαρμογή. Στην προκειμένη περίπτωση η τιμή που υπολογίστηκε 0,400 απέχει σημαντικά από την μονάδα αλλά είναι αναμενόμενη σε πρότυπα που προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις και συνεπώς έχουν μέσα σφάλματα και μεγάλες διακυμάνσεις.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, για το πρότυπο μέτρησης με τις συσχετίσεις, όπως προέκυψαν από τη στατιστική επεξεργασία, παρατηρείται ότι εμφανίζει σημαντικά καλή προσαρμογή αφού οι δείκτες CFI, TLI παίρνουν τιμές κοντά στην μονάδα, ενώ ο δείκτης RMSEA έχει μηδενική τιμή.

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το Δομικό Πρότυπο 1, όπου φαίνονται οι διάφορες μεταβλητές και οι συσχετίσεις που έχουν μεταξύ τους (συντελεστές παλινδρόμησης και την τιμή  $\rho$ ).

Σε αυτό το πρότυπο υπάρχουν 7 εξωγενείς παρατηρήσιμες-μετρήσιμες μεταβλητές (predictors) οι οποίες αποτελούν προγνωστικούς παράγοντες που εκτιμούν την

λανθάνουσα μεταβλητή (latent variable) “Influence”. Είναι εμφανές από το Σχήμα 3 και τον Πίνακα 8, πως η αύξηση των τιμών που παίρνουν οι προγνωστικοί παράγοντες, αυξάνουν την τιμή της μεταβλητής “Influence” η οποία με την σειρά της έχει αντίκτυπο στους δείκτες (indicators) “Queue Duration” και “Max Queue Length”.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα ανάλυσης Δομικού Προτύπου 1

Πρότυπο Δομικών Συναρτήσεων		Αριθμός Παρατηρήσεων = 170		
Log likelihood = -4446,8853				
(1) [var(e.Max Queue Length)]_cons = 1				
(2) [var(e.Influence)]_cons = ,5				
	Συντελεστής	Std. Err.	z	P> z
<b>Structural</b>				
Queue Duration <-				
Influence	9,490	3,890	2,44	0,015
Clearance Time	0,320	0,074	4,33	0,000
_cons	48,432	4,410	10,98	0,000
<b>INFLUENCE &lt;-</b>				
Clearance Time	0,009	0,003	2,72	0,007
Accident Type	0,357	0,206	1,73	0,083
Ramp	0,384	0,158	2,43	0,015
Alignment	0,464	0,159	2,92	0,004
Speed	-0,010	0,003	-3,34	0,001
Lane Volume	0,000	0,000	2,27	0,023
Rainfall Intensity	-1,273	0,069	-1,83	0,067
<b>Measurement</b>				
Max Queue Length <-				
Influence	1,793	0,158	11,33	0,000
_cons	2,198	0,404	5,44	0,000
<b>Διακύμανση</b>				
e.Queue Duration	548,048	72,754		
e.Max Queue Length	1 (constrained)			
e.Influence	0,5 (constrained)			
LR test of model vs. Saturated: chi2 = 5,31 Prob > chi2 = 0,5052				

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι παράγοντες όπως είναι η διάρκεια του ατυχήματος και ειδικότερα η διάρκεια καθαρισμού του σημείου όπου έγινε το

ατύχημα (Clearance Time), ο τύπος συμβάντος (Accident Type), η ύπαρξη ράμπας (Ramp) στην περιοχή του συμβάντος, η γεωμετρική χάραξη της οδού (Alignment), η ταχύτητα (Speed), ο κυκλοφοριακός φόρτος (Lane Volume) και η ένταση της βροχόπτωσης (Rainfall\_Intensity) επηρεάζουν σε στατιστικά σημαντικό βαθμό τη διάρκεια και το μέγιστο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς ενός συμβάντος.

Η λανθάνουσα μεταβλητή (latent variable) μπορεί να παρατηρηθεί από τους δείκτες (indicators) που εκφράζουν τη διάρκεια (Queue Duration) και το μέγιστο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς (Max Queue Length). Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ο δείκτης με την μεγαλύτερη βαρύτητα είναι ο “Queue Duration” με συντελεστή 9,49 έναντι 1,793 που είναι ο συντελεστής για το “Max Queue Length”. Αυτό στην πράξη σημαίνει ότι η διάρκεια της σχηματιζόμενης ουράς είναι πολύ πιο επιρρεπής σε αυξομειώσεις των τιμών που λαμβάνουν οι προγνωστικοί παράγοντες του προτύπου.

Ο κάθε προγνωστικός παράγοντας (predictor) έχει διαφορετικής βαρύτητας επιρροή στο πρότυπο και συμβάλει στην τελική διαμόρφωση του. Ειδικότερα όσον αφορά “Clearance Time” η οποία όπως προαναφέρθηκε εκφράζει το χρόνο του ατυχήματος και πιο συγκεκριμένα εκφράζει το χρονικό διάστημα μέχρι να καθαριστεί ο χώρος και να επανέλθει η ομαλή ροή των οχημάτων, επηρεάζει θετικά την λανθάνουσα μεταβλητή “Influence” σε στατιστικά σημαντικό βαθμό με συντελεστή 0,009. Η διαπίστωση αυτή, συμφωνεί με την λογική ότι μεγαλύτεροι χρόνοι καθαρισμού της περιοχής οδηγούν κατά κανόνα σε μεγαλύτερες διάρκειες και μεγαλύτερα μήκη ουρών. Η διάρκεια του καθαρισμού του συμβάντος κατέχει σημαίνοντα ρόλο στη διάρκεια και στο μήκος των ουρών όπως ήταν αναμενόμενο. Μεγαλύτερη διάρκεια καθαρισμού του σημείου όπου διαδραματίζεται το ατύχημα συνεπάγεται μεγαλύτερες ουρές σε διάρκεια και σε μήκος αφού μέχρι το σημείο να καθαριστεί και να αποκατασταθεί η ομαλή κυκλοφορία μειώνεται η κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού και προκαλούνται συμφορήσεις.

Άλλος ένας παράγοντας που φαίνεται να έχει θετική επιρροή και συνεπώς να συμβάλει σε κάποιο βαθμό στην αύξηση της διάρκειας και του μέγιστου μήκους των ουρών είναι ο τύπος του συμβάντος “Accident Type”, δηλαδή αν είναι πρωτογενές ή δευτερογενές. Από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας προκύπτει το γενικό συμπέρασμα που συμφωνεί με τη διεθνή βιβλιογραφία, ότι η εμφάνιση δευτερεύοντος ατυχήματος σε ένα συμβάν επιδεινώνει την διάρκειά του και συνεπώς επιδεινώνει και την εμφάνιση μεγαλύτερης διάρκειας και μέγιστου μήκους ουρών.

Η ύπαρξη ράμπας γειτονικά του σημείου του ατυχήματος έχει αρνητικές επιπτώσεις στη διάρκεια και στο μέγιστο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς μετά από κάποιο

ατύχημα. Χαρακτηριστικά, εκτιμήθηκε ότι στις περιπτώσεις όπου συνέβηκε κάποιο ατύχημα κοντά σε ράμπα η γραμμική σχέση που συνδέει την μεταβλητή αυτή με την λανθάνουσα μεταβλητή "Influence" αυξάνεται κατά 0,384 μονάδες. Η διαπίστωση αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί με διάφορους τρόπους. Κατ' αρχήν, η ύπαρξη ράμπας λειτουργεί σαν εμπόδιο και αναγκάζει τους οδηγούς να μειώσουν ταχύτητα, διακόπτοντας έτσι με αυτό τον τρόπο την ομαλή και απρόσκοπτη ροή των οχημάτων. Επιπλέον, οι οδηγοί δεν ανταποκρίνονται όλοι με τον ίδιο τρόπο όταν συναντούν μια ράμπα ή κάποιο άλλο εμπόδιο που να διακόπτει την ομοιογένεια στη ροή. Ο καθένας αντιδρά με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με την εμπειρία του, την γνώση του δρόμου, ή ακόμα και ανάλογα με το χρόνο που χρειάζεται κάθε οδηγός για να αντιδράσει. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σύγχυση και να επιφέρει δυσάρεστα αποτελέσματα.

Η γεωμετρική χάραξη της οδού (Alignment) έχει και αυτή θετική επίδραση όπως ήταν αναμενόμενο. Η ύπαρξη στροφής στο σημείο του συμβάντος έχει σημαντική επίδραση στη διάρκεια και στο μήκος της ουράς που δημιουργείται στο σημείο. Οι οδηγοί για διάφορους ευνόητους λόγους όπως είναι η έλλειψη ορατότητας στη στροφή, το αίσθημα ανασφάλειας που δημιουργεί η πιθανή πρόκληση έκπληξης στο σημείο της στροφής, αναγκάζονται να μειώσουν ταχύτητα με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η κυκλοφορία και να σχηματίζονται ουρές.

Ακόμη, παρατηρείται ότι η ταχύτητα των διερχόμενων οχημάτων (Speed) την στιγμή του συμβάντος, έχει αρνητική επίδραση στο πρότυπο και συνεπώς στη διάρκεια και στο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς. Η ταχύτητα προέκυψε βάση των παρατηρήσεων να συσχετίζεται με αρνητικό συντελεστή -0,010. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για ταχύτητα οχήματος 100 χλμ. ανά ώρα παρατηρήθηκε μείωση κατά 1 περίπου μονάδα της επίδρασης που έχει η μεταβλητή αυτή επάνω στην λανθάνουσα μεταβλητή "Influence" που και αυτή με τη σειρά της επιδρά με τους ανάλογους συντελεστές στη διάρκεια και στο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς. Η μεταβλητή αυτή εκφράζει την ταχύτητα που ακολουθούσε το όχημα σε ελάχιστο χρόνο πριν το ατύχημα. Αν το ατύχημα συνέβαινε σε συνθήκες ελεύθερης ροής όπου οι ταχύτητες είναι μεγάλες, τότε η επιρροή του ατυχήματος στη διάρκεια και το μήκος της ουράς προέκυπτε μικρότερη.

Ο κυκλοφοριακός φόρτος ναι μεν συσχετίζεται θετικά, εντούτοις η επιρροή που εμφανίζει στο εξεταζόμενο πρότυπο είναι αμελητέα. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Κατ' αρχήν λόγω του ότι η Αττική οδός παρακολουθείται σε 24ωρη βάση από ένα εκτεταμένο σύστημα παρακολούθησης, στην περίπτωση κάποιου συμβάντος η παρέμβαση από ειδικές μονάδες γίνεται άμεσα. Κινητοποιούνται αμέσως ειδικά συνεργεία στην περιοχή και γίνεται εκτροπή των οχημάτων σε παρακαμπτήριες οδούς. Επίσης ηλεκτρονικές πινακίδες σε

διάφορα σημεία του αυτοκινητοδρόμου χρησιμοποιούνται για να προειδοποιήσουν τους οδηγούς που προσεγγίζουν το σημείο του ατυχήματος, ώστε να είναι σε θέση να επιλέξουν διαφορετική διαδρομή και να παρακάμψουν το ατύχημα. Ακόμη, λόγω του ότι επιδρούν πιο “ισχυροί” παράμετροι στο πρότυπο που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη διάρκεια και το μέγιστο μήκος της ουράς ενός συμβάντος, όπως είναι η ταχύτητα, η παράμετρος που εκφράζει τον κυκλοφοριακό φόρτο δεν εμφανίζει σημαντική επιρροή.

Τέλος, το ύψος της βροχόπτωσης (Rainfall\_Intensity) επηρεάζει σε στατιστικά σημαντικό βαθμό τη διάρκεια και το μήκος της ουράς. Η επίδραση αυτή είναι αρνητική γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο ότι κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης οι οδηγοί έχουν αυξημένη προσοχή στο δρόμο και οδηγούν με χαμηλότερη ταχύτητα ενώ επίσης κατά τις βροχερές μέρες μειώνεται η ζήτηση των μετακινήσεων και έτσι η κίνηση στους δρόμους παρουσιάζεται μειωμένη.

## ΔΟΜΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 2

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το Δομικό Πρότυπο 2 το οποίο περιγράφει την επίδραση που έχουν ορισμένες μεταβλητές που ονομάζονται προγνωστικοί παράγοντες, στη διάρκεια και στο μέγιστο μήκος των σχηματιζόμενων ουρών που δημιουργούνται μετά από κάποιο συμβάν. Ακόμη, φαίνονται οι διάφοροι συντελεστές συσχέτισης των παραμέτρων (συντελεστές παλινδρόμησης) μαζί με την τιμή  $p$  ( $p$ -value). Το Δομικό Πρότυπο 2 παρουσιάζει μια σημαντική διαφοροποίηση από το Δομικό Πρότυπο 1, στο ότι εφαρμόζεται παράλληλα ένα δεύτερο κύριο γραμμικό πρότυπο παλινδρόμησης (regression model) για την εκτίμηση της χρονικής διάρκειας εκκαθάρισης του ατυχήματος (clearance time) η οποία με την σειρά της χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της λανθάνουσας μεταβλητής “Influence”. Οι διάφορες μεταβλητές, όπως φαίνονται χαρακτηριστικά και στο σχήμα, δεν επιδρούν άμεσα στους δυο δείκτες που περιγράφουν τη διάρκεια και το μέγιστο μήκος της ουράς, αλλά έμμεσα μέσω μιας της μη μετρήσιμης λανθάνουσας μεταβλητής “Influence”. Τα ορθογώνια παραλληλόγραμμα αντιπροσωπεύουν τις παρατηρηθείσες ή μετρήσιμες μεταβλητές και η έλλειψη την κρυφή ή λανθάνουσα. Πιο συγκεκριμένα, τα απλής κατεύθυνσης βέλη χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις αιτιώδεις σχέσεις στο πρότυπο, όπου η μεταβλητή στην ουρά του βέλους προκαλεί τη μεταβλητή στο σημείο. Στατιστικά τα απλά βέλη αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές παλινδρόμησης ή τις φορτώσεις των παραγόντων. Συνδεδεμένος με κάθε δείκτη είναι ένας όρος λάθους, ο οποίος αντιπροσωπεύει τον όρο σφάλματος και απεικονίζει την επάρκεια του προτύπου στην εκτίμηση του σχετικού παράγοντα. Επιπλέον, συνδεδεμένος με την λανθάνουσα μεταβλητή είναι ένας όρος υπολοίπου (residual) ο οποίος αντιπροσωπεύει το λάθος στην πρόβλεψη των ενδογενών παραγόντων από τους εξωγενείς παράγοντες.

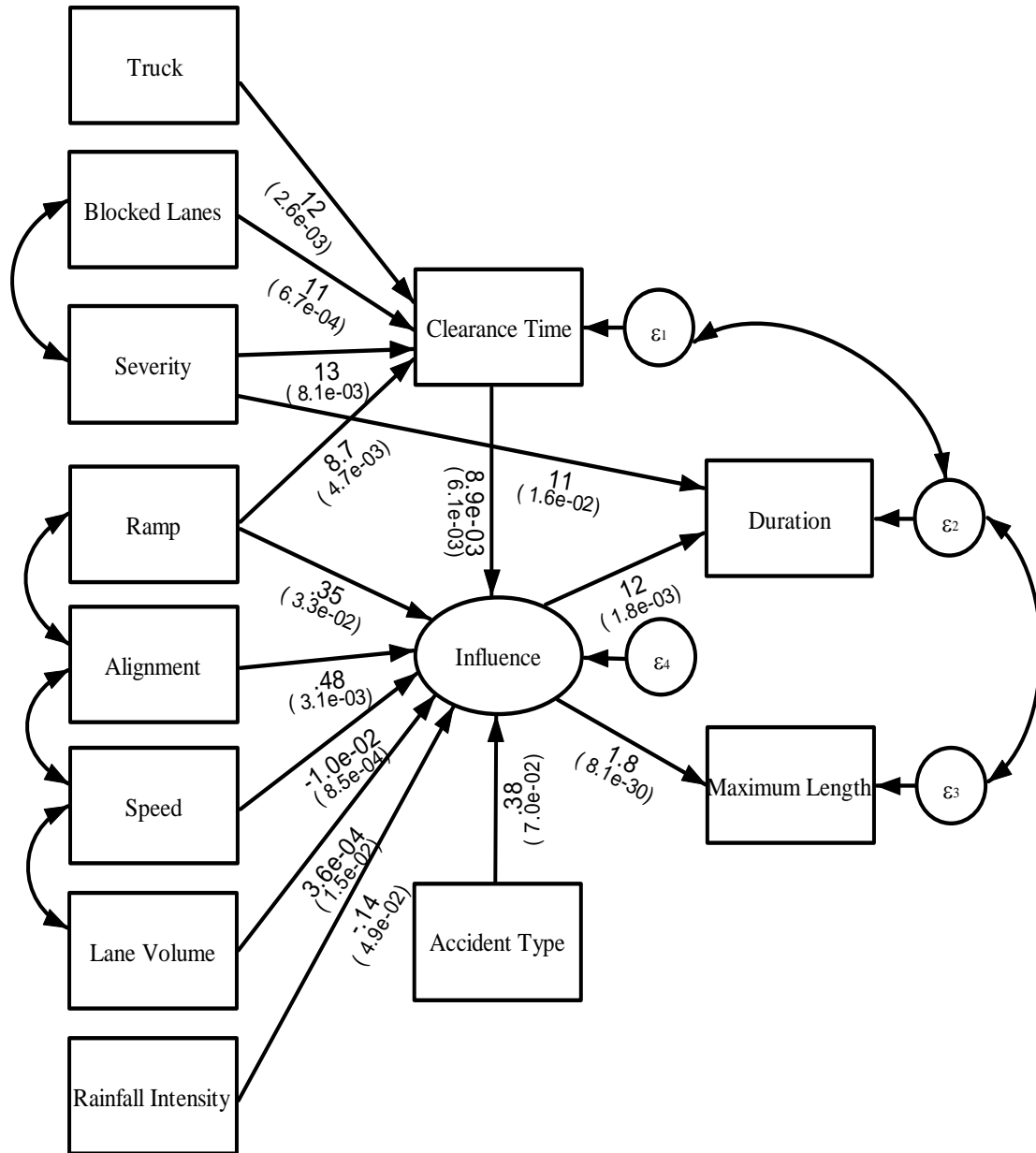
Δεδομένου ότι και οι όροι λάθους και υπολοίπων αντιπροσωπεύουν μεταβλητές που δεν ορίζονται στο πρότυπο έχουν τη μορφή του κύκλου ή της έλλειψης. Αναλυτικότερη περιγραφή των μεταβλητών και των συσχετίσεων τους γίνεται στη συνέχεια.

Όπως έγινε προηγουμένως για το Δομικό Πρότυπο 1, έτσι και για το Δομικό Πρότυπο 2 γίνεται ο έλεγχος για καλή προσαρμογή ως μέτρο εξακρίβωσης του πόσο καλά ταιριάζουν οι παρατηρηθείσες τιμές-μετρήσεις στο πρότυπο. Στον Πίνακα 9 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι έλεγχοι καλής προσαρμογής που γίνονται για το Δομικό Πρότυπο 2. Τα στατιστικά που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο καλής προσαρμογής, περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 9, γίνεται ο έλεγχος  $\chi^2$  (chi2) μεταξύ του Προτύπου 2 και του κορεσμένου (saturated) προτύπου που είναι το πρότυπο που ταιριάζει τέλεια στις διακυμάνσεις. Στο παρόν πρότυπο προέκυψε  $\chi^2$  (chi2) = 12,774 και η πιθανότητα  $p > \chi^2 = 0.689 > 0.5$ . Αυτό δείχνει ότι το πρότυπο είναι τόσο καλό στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων όσο και το κορεσμένο πρότυπο που αφορά όλες τις παραμέτρους.

Όσον αφορά την τιμή RMSEA (Root mean squared error of approximation) αυτή αναφέρεται μαζί με το κατώτερο και το ανώτερο της όριο στο 90% διάστημα εμπιστοσύνης του. Γίνεται έλεγχος εάν το κατώτερο όριο είναι μικρότερο του 0,05 ή το ανώτερο όριο είναι μεγαλύτερο από 0,10. Αν το κατώτερο όριο είναι μικρότερο από 0,05, τότε δεν απορρίπτεται η υπόθεση ότι η προσαρμογή ταιριάζει σε ικανοποιητικό βαθμό. Εάν το ανώτερο όριο είναι μεγαλύτερο του 0,10, τότε δεν απορρίπτεται η υπόθεση ότι η προσαρμογή είναι φτωχή. Στο παρόν πρότυπο βρέθηκε ότι το κατώτερο όριο είναι  $0,00 < 0,05$  άρα δεν απορρίπτεται η υπόθεση ότι η προσαρμογή ταιριάζει σε ικανοποιητικό βαθμό και επιπλέον το ανώτερο όριο βρέθηκε  $0,056 < 0,10$ , συνεπώς η προσαρμογή είναι καλή.

$P_{close}$  είναι η πιθανότητα η τιμή του RMSEA να είναι  $< 0,05$ , μεταφραζόμενη ως την πιθανότητα οι προβλεπόμενες ροπές (μέσος όρος, διακύμανση κλπ) να είναι κοντά στις ροπές του πληθυσμού που μετρήθηκε. Στην προκειμένη περίπτωση η προσαρμογή του προτύπου είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 8: Δομικό Πρότυπο 2 - Δομή, συντελεστές παραγόντων και δεικτών και σημαντικότητα

Πίνακας 9: Στατιστικά καλής προσαρμογής προτύπου 2 (Goodness of fit statistics)

Στατιστικά προσαρμογής	Τιμή	Περιγραφή
Likelihood ratio		
chi2_ms(16)	12,774	Δομικό Πρότυπο vs. Κορεσμένο Πρότυπο
p > chi2	0,689	
Σφάλμα Πληθυσμού		
RMSEA	0,000	Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προσέγγισης
90% CI, κατώτερο όριο	0,000	
ανώτερο όριο	0,056	
pclose	0,924	Πιθανότητα RMSEA <= 0.05
Information criteria		
AIC	9365,124	Akaike's information criterion
BIC	9440,383	Bayesian information criterion
Baseline comparison		
CFI	1,000	Comparative fit index
TLI	1,037	Tucker-Lewis index
Μέγεθος των υπολοίπων		
SRMR	0,026	Κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού υπολοίπου
CD	0,425	συντελεστής προσδιορισμού

Ακολουθούν τα κριτήρια AIC και BIC τα οποία αποτελούν συγκριτικά μεγέθη, εφόσον από μόνα τους δεν παρέχουν πληροφορίες. Όσο μικρότερη τιμή έχουν τόσο καλύτερο θεωρείται το πρότυπο. Αφού έγιναν διάφορες δοκιμές και εναλλακτικά πρότυπα προέκυψαν ως βέλτιστες, οι τιμές που αναγράφονται στον παραπάνω πίνακα.



CFI και TLI είναι δύο δείκτες που όταν παίρνουν τιμές κοντά στην μονάδα υποδηλώνουν καλή προσαρμογή του προτύπου. Για το πρότυπο αυτό και οι δύο δείκτες έχουν τιμή κοντά στην μονάδα (CFI = 1,000 και TLI = 1,037), άρα υπάρχει καλή προσαρμογή.

SRMR (standardized root mean squared residual). Τέλεια προσαρμογή του προτύπου αντιστοιχεί σε τιμή SRMR ίση με μηδέν, ενώ μια καλή προσαρμογή αντιστοιχεί σε “μικρή” τιμή μικρότερη από 0,08. Το πρότυπο προσαρμόζεται καλά με αυτό το πρότυπο αφού η τιμή SRMR βρέθηκε ίση με 0,026.

CD (coefficient of determination) είναι κάτι ανάλογο του  $R^2$  για ολόκληρο το πρότυπο. Τιμή κοντά στη μονάδα υποδηλώνει καλή προσαρμογή. Στην προκειμένη περίπτωση η τιμή που υπολογίστηκε 0,425 απέχει σημαντικά από την μονάδα αλλά είναι αναμενόμενη σε πρότυπα που προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις και συνεπώς έχουν μέσα σφάλματα και μεγάλες διακυμάνσεις.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, για το πρότυπο μέτρησης με τις συσχετίσεις, όπως προέκυψαν από τη στατιστική επεξεργασία, παρατηρείται ότι εμφανίζει σχεδόν τέλεια προσαρμογή αφού οι δείκτες CFI, TLI παίρνουν τιμές κοντά στην μονάδα, ενώ ο δείκτης RMSEA έχει μηδενική τιμή.

Σημειώνεται ότι το δεύτερο Δομικό Πρότυπο υστερεί συγκριτικά με το πρώτο σε όρους προσαρμοστικότητας που περιγράφονται από τα κριτήρια καλής προσαρμογής, παρ’ όλα αυτά κρίνεται πιο κατάλληλο για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης διάφορων παραγόντων με τη διάρκεια και το μήκος των ουρών, καθώς εξετάζει 3 επιπλέον παραμέτρους (βαρέα οχήματα, αριθμός αποκλεισμένων λωρίδων και σοβαρότητα συμβάντος).

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για το δεύτερο δομικό πρότυπο φαίνονται στον Πίνακα 10. Όπως προαναφέρθηκε, η ιδιαιτερότητα αυτού του προτύπου είναι ότι βασίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες προτύπων γραμμικής παλινδρόμησης. Η πρώτη κατηγορία αφορά την μεταβλητή της διάρκειας του ατυχήματος (Clearance Time) και έχει ως προγνωστικούς παράγοντες τον αριθμό των αποκλεισμένων λωρίδων, την σοβαρότητα του ατυχήματος, την ύπαρξη ράμπας κοντά στο σημείο του ατυχήματος και τέλος την εμπλοκή βαρέων οχημάτων. Έπειτα η μεταβλητή “Clearance Time” επηρεάζει την μη παρατηρηθείσα λανθάνουσα μεταβλητή “Influence”. Η δεύτερη κατηγορία αφορά την ίδια τη λανθάνουσα μεταβλητή “Influence” που έχει ως προγνωστικούς παράγοντες τις μεταβλητές που εκφράζουν την ύπαρξη ράμπας κοντά στο σημείο του ατυχήματος, την γεωμετρική χάραξη της οδού (ευθυγραμμία ή στροφή), την ταχύτητα των οχημάτων, τον κυκλοφοριακό φόρτο, τον τύπο του ατυχήματος και το ύψος-ένταση της βροχόπτωσης. Τελικώς, η

μη παρατηρηθείσα μεταβλητή “Influence” επηρεάζει και καθορίζει την τελική σχέση όλων των παραγόντων στο καθορισμό της διάρκειας και του μέγιστου μήκους σχηματιζόμενης ουράς που δημιουργείται σε κάποιο συμβάν.

Είναι εμφανές από το Σχήμα 8 και τον Πίνακα 10, πως η αυξομείωση των τιμών που παίρνουν οι προγνωστικοί παράγοντες, επηρεάζουν ανάλογα την τιμή της μεταβλητής “Influence” η οποία με την σειρά της έχει αντίκτυπο στους δείκτες (indicators) “Queue Duration” και “Max Queue Length”.

Από τα παραπάνω, όπως και στο Δομικό Πρότυπο 1, προκύπτει ότι παράγοντες όπως είναι ο αριθμός των αποκλεισμένων λωρίδων κυκλοφορίας (Blocked Lanes), η σοβαρότητα του ατυχήματος (Severity), η ύπαρξη ράμπας (Ramp), η συμμετοχή βαρέων οχημάτων στο συμβάν (TRUCK), η διάρκεια του ατυχήματος ή πιο συγκεκριμένα η διάρκεια καθαρισμού του σημείου όπου έγινε το ατύχημα και επαναφορά της ομαλής κυκλοφορίας (Clearance Time), η γεωμετρική χάραξη της οδού (Alignment) η ταχύτητα (Speed), ο κυκλοφοριακός φόρτος (Lane Volume), η ένταση της βροχόπτωσης (Rainfall Intensity) και ο τύπος του ατυχήματος (Accident Type) επηρεάζουν σε στατιστικά σημαντικό βαθμό τη διάρκεια και το μήκος της σχηματιζόμενης ουράς ενός συμβάντος. Οι μεταβλητές και η επιρροή τους στο πρότυπο επεξηγούνται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Ομοίως με το Πρότυπο 1, η λανθάνουσα μεταβλητή (latent variable) μπορεί να παρατηρηθεί από τους δείκτες (indicators) που εκφράζουν τη διάρκεια (Queue Duration) και το μέγιστο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς (Max Queue Length). Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το Δομικό Πρότυπο 2, ο δείκτης με την μεγαλύτερη βαρύτητα είναι ο “Queue Duration” με συντελεστή 11,605 έναντι 1,790 που είναι ο συντελεστής για το “Max Queue Length”. Συγκριτικά με το πρώτο πρότυπο, παρατηρούμε ότι και εδώ η μεταβλητή “Influence” επηρεάζει πολύ περισσότερο σε καθαρές τιμές μονάδος το μέγιστο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς. Η συμφωνία των δύο προτύπων προσδίδει μεγαλύτερη εγκυρότητα και βεβαιότητα όσον αφορά την ορθότητά τους.

Οι προγνωστικοί παράγοντες (predictors) επηρεάζουν ο καθένας με διαφορετική βαρύτητα το πρότυπο και συμβάλουν στην τελική διαμόρφωση του. Αυξομειώσεις στις τιμές των μεταβλητών προκαλούν μεταβολές σε ολόκληρο το πρότυπο που περιγράφεται από ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα ανάλυσης Δομικού Προτύπου 2

Πρότυπο Δομικών Συναρτήσεων		Αριθμός Παρατηρήσεων = 170		
Log likelihood = -4658,5618				
(1) [var(e.Max Queue Length)]_cons = 1				
(2) [var(e.INFLUENCE)]_cons = ,5				
	Συντελεστής	Std. Err.	z	P> z
<b>Structural</b>				
Clearance Time <-				
Ramp	8,750	3,093	2,83	0,005
Severity	12,769	4,819	2,65	0,008
Blocked Lanes	10,618	3,122	3,40	0,001
TRUCK	11,809	3,922	3,01	0,003
_cons	15,994	4,585	3,49	0,000
Queue Duration <-				
Influence	11,605	3,712	3,13	0,002
Severity	11,355	4,704	2,41	0,016
_cons	57,380	4,341	13,22	0,000
Influence <-				
Clearance Time	0,009	0,003	2,74	0,006
Accident Type	0,380	0,209	1,81	0,070
Ramp	0,347	0,162	2,14	0,033
Alignment	0,477	0,161	2,96	0,003
Speed	-0,010	0,003	-3,34	0,001
Lane Volume	0,000	0,000	2,43	0,015
Rainfall Intensity	-0,138	0,070	-1,97	0,049
<b>Measurement</b>				
Max Queue Length <-				
Influence	1,790	0,158	11,34	0,000
_cons	2,166	0,409	5,30	0,000
<b>Διακύμανση</b>				
e.Clearance Time	424,774	46,159		
e.Queue Duration	547,627	80,257		
e.Max Queue Length	1 (constrained)			
e.Influence	0,5 (constrained)			
LR test of model vs. Saturated: chi2 = 12,77 Prob > chi2 = 0,6892				

Η εμπλοκή βαρέων οχημάτων αποτελεί άμεσο προγνωστικό παράγοντα για τη μεταβλητή “Clearance Time”. Συσχετίζεται θετικά με την τελευταία έχοντας συντελεστή 11,809 γεγονός που υποδηλώνει ότι κάθε φορά που εμπλέκεται ένα

βαρύ όχημα, οι χρόνος που απαιτείται για να καθαριστεί ο χώρος και να επανέλθει η ομαλή κυκλοφορία, αυξάνεται περίπου κατά 12 λεπτά. Αυτό έχει σοβαρό αντίκτυπο στις διάρκειες και στα μήκη των ουρών που σχηματίζονται. Τα βαρέα οχήματα απαιτούν ιδιαίτερη αντιμετώπιση και εξειδικευμένα μέσα και σίγουρα απαιτείται περισσότερος χρόνος για να απομακρυνθούν από το δρόμο ώστε να ομαλοποιηθεί η κυκλοφορία και η ροή των οχημάτων.

Όσον αφορά τον αριθμό των αποκλεισμένων λωρίδων που εκφράζεται με την μεταβλητή “Blocked Lanes”, προκύπτει ότι επηρεάζει σημαντικά με ένα χαρακτηριστικό συντελεστή 10,618 την μεταβλητή “Clearance Time”. Πρακτικά, για κάθε μια αποκλεισμένη λωρίδα, χρειάζονται σχεδόν 11 λεπτά επιπλέον χρονικής διάρκειας για τον καθαρισμό του σημείου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεταβλητή αυτή αποτελεί ακόμη μια ιδιαιτερότητα του δεύτερου προτύπου αφού δεν εμφανίζεται στο Δομικό Πρότυπο 1 λόγω της μεγάλης συσχέτισης της με άλλες υπάρχουσες μεταβλητές.

Η μεταβλητή που εκφράζει την σοβαρότητα του συμβάντος (Severity) συσχετίζεται και αυτή θετικά με την μεταβλητή “Clearance Time”. Με συντελεστή 12,769 προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι τραυματισμοί σε κάποιο ατύχημα επηρεάζουν σημαντικά τη διάρκεια του και συνεπώς τη διάρκεια και το μέγιστο μήκος των ουρών που δημιουργούνται. Αυτό πιθανόν να ευθύνεται σε διάφορους λόγους όπως είναι ο επιπλέον χρόνος που χρειάζεται για τον απεγκλωβισμό και την ασφαλή μεταφορά των τραυματιών από το χώρο και ο χρόνος που χρειάζεται για να επέμβουν τα απαραίτητα συνεργεία. Σημειώνεται ότι η μεταβλητή αυτή αποτελεί προγνωστικό παράγοντα μόνο στο δεύτερο πρότυπο καθώς οι συσχετίσεις των μεταβλητών μεταξύ τους στο πρώτο πρότυπο δεν επιτρέπουν την συμμετοχή της στις γραμμικές σχέσεις.

Άλλος ένας παράγοντας που φαίνεται να έχει θετική επιρροή και συνεπώς να συμβάλει σε κάποιο βαθμό στην αύξηση της διάρκειας και του μέγιστου μήκους των ουρών είναι η ύπαρξη ράμπας γειτονικά στο χώρο που διαδραματίζεται το συμβάν. Είναι αναμενόμενο, η ύπαρξη ράμπας και λοιπών εμποδίων που διαταράσσουν την ομαλή κυκλοφορία των οχημάτων να επηρεάζουν δυσμενώς και να επιδεινώνουν την κυκλοφοριακή κατάσταση που επικρατεί στη περιοχή. Συγκριτικά με το Δομικό Πρότυπο 1 η μεταβλητή αυτή συνδέεται με γραμμική σχέση τόσο στη μεταβλητή “Clearance Time” όσο και στη λανθάνουσα μεταβλητή “Influence” ενώ στο Δομικό Πρότυπο 1 συνδέεται γραμμικά μόνο στην λανθάνουσα μεταβλητή “Influence”. Το θετικό πρόσημο με το οποίο γίνεται η σύνδεση, αποδεικνύει ότι και στα 2 πρότυπα η ύπαρξη ράμπας γειτονικά στο σημείο του ατυχήματος αυξάνει την συνολική διάρκεια των σχηματιζόμενων ουρών και το μέγιστο μήκος τους.

Αναφορικά με την επιρροή των προγνωστικών παραγόντων απευθείας στην μη μετρήσιμη λανθάνουσα μεταβλητή “Influence”, τα αποτελέσματα εμφανίζουν ανάλογο ενδιαφέρον. Η μεταβλητή που περιγράφηκε προηγουμένως “Clearance Time” η οποία όπως προαναφέρθηκε εκφράζει το χρόνο του ατυχήματος και πιο συγκεκριμένα εκφράζει το χρονικό διάστημα μέχρι να καθαριστεί από τα μπάζα ο χώρος και να επανέλθει η ομαλή κυκλοφορία των οχημάτων, επηρεάζει θετικά την λανθάνουσα μεταβλητή “Influence” σε στατιστικά σημαντικό βαθμό με συντελεστή 0,009. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με το ευνόητο συμπέρασμα ότι μεγαλύτερες διάρκειες ατυχημάτων επιφέρουν μεγαλύτερες διάρκειες και μήκη σχηματιζόμενων ουρών.

Στο Δομικό Πρότυπο 2, η ύπαρξη ράμπας γειτονικά του σημείου όπου διαδραματίζεται το συμβάν επιδρά και με δεύτερη γραμμική σχέση απ’ ευθείας στην μεταβλητή “Influence” με άμεσο τρόπο. Όπως εκτιμήθηκε και σε αυτή την περίπτωση οι ράμπες δυσχεραίνουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες και επακόλουθα συντελούν στην αύξηση της χρονικής διάρκειας και το μέγιστο μήκος των ουρών.

Η γεωμετρική χάραξη της οδού (Alignment) έχει και αυτή θετική επίδραση, όπως αναμενόταν. Η ύπαρξη στροφής στο σημείο του συμβάντος έχει σημαντική επίδραση στη διάρκεια και στο μήκος της ουράς που δημιουργείται στο σημείο. Οι οδηγοί για διάφορους ευνόητους λόγους όπως είναι η έλλειψη ορατότητας στη στροφή, το αίσθημα ανασφάλειας που δημιουργεί η πιθανή πρόκληση έκπληξης στο σημείο της στροφής, αναγκάζονται να μειώσουν ταχύτητα με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η κυκλοφορία και να σχηματίζονται ουρές. Συγκριτικά με το πρώτο πρότυπο, παρατηρούμε ότι η επίδραση που έχει η γεωμετρική χάραξη της οδού στη διάρκεια και στο μέγιστο μήκος της ουράς είναι περίπου η ίδια, παρόλο που έχουμε ορισμένες διαφοροποιήσεις όσον αφορά τις διάφορες μεταβλητές που επιδρούν στο κάθε πρότυπο.

Ακόμη, παρατηρείται ότι η ταχύτητα των διερχόμενων οχημάτων την στιγμή του συμβάντος (Speed), όπως συμβαίνει και στο προηγούμενο πρότυπο, έχει αρνητική επίδραση στη διάρκεια και στο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς. Η ταχύτητα προέκυψε βάση των παρατηρήσεων να συσχετίζεται με αρνητικό συντελεστή -0,010. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για ταχύτητα οχήματος 100 χλμ. ανά ώρα παρατηρήθηκε μείωση κατά 1 περίπου μονάδα της επίδρασης που έχει η μεταβλητή αυτή επάνω στην λανθάνουσα μεταβλητή “Influence” που και αυτή με τη σειρά της επιδρά με τους ανάλογους συντελεστές στη διάρκεια και στο μήκος της σχηματιζόμενης ουράς. Η μεταβλητή αυτή εκφράζει την ταχύτητα που ακολουθούσε το όχημα σε ελάχιστο χρόνο πριν το ατύχημα. Αν το ατύχημα συνέβαινε σε συνθήκες ελεύθερης ροής όπου οι ταχύτητες είναι μεγάλες, τότε η επιρροή του ατυχήματος στη διάρκεια και το μήκος της ουράς προέκυπτε μικρότερη.

Όπως προέκυψε για το Δομικό Πρότυπο 1, έτσι και για το Δομικό Πρότυπο 2, ο κυκλοφοριακός φόρτος δεν επηρεάζει τη διάρκεια και την περιοχή επιρροής ενός συμβάντος. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Κατ' αρχήν λόγω του ότι η Αττική οδός παρακολουθείται σε 24ωρη βάση από ένα εκτεταμένο σύστημα παρακολούθησης, στην περίπτωση κάποιου συμβάντος η παρέμβαση από ειδικές μονάδες γίνεται άμεσα. Κινητοποιούνται αμέσως ειδικά συνεργεία στην περιοχή και γίνεται εκτροπή των οχημάτων σε παρακαμπτήριες οδούς. Επίσης ηλεκτρονικές πινακίδες σε διάφορα σημεία του αυτοκινητοδρόμου χρησιμοποιούνται για να προειδοποιήσουν τους οδηγούς που προσεγγίζουν το σημείο του ατυχήματος, ώστε να έχουν την επιλογή να επιλέξουν διαφορετική διαδρομή και να παρακάμψουν το ατύχημα. Ακόμη, λόγω του ότι στο πρότυπο επιδρούν πιο "ισχυροί" παράμετροι που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη διάρκεια και το μέγιστο μήκος της ουράς ενός συμβάντος, όπως είναι η ταχύτητα, η παράμετρος που εκφράζει τον κυκλοφοριακό φόρτο δεν εμφανίζει σημαντική επιρροή.

Τέλος, το ύψος της βροχόπτωσης (Rainfall\_Intensity) επηρεάζει σε στατιστικά σημαντικό βαθμό τη διάρκεια και το μήκος της ουράς. Όπως υπολογίστηκε και στο Δομικό Πρότυπο 1, η επίδραση αυτή είναι αρνητική γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο ότι κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης οι οδηγοί έχουν αυξημένη προσοχή στο δρόμο και οδηγούν με χαμηλότερη ταχύτητα ενώ επίσης κατά τις βροχερές μέρες η κίνηση στους δρόμους είναι μειωμένη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

---

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται συμπερασματικά το θέμα αυτής της διπλωματικής έρευνας, σχολιάζονται περιληπτικά τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα επάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης.

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκαν οι περιοχές συμφόρησης που σχηματίζονται έπειτα από τροχαία ατυχήματα σε ελεύθερη λεωφόρο, με την βοήθεια εξακοσίων φωρατών (VDS) οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ανά πεντακόσια μέτρα στον ανοιχτό αυτοκινητόδρομο και ανά εξήντα μέτρα στις σήραγγες, με απώτερο σκοπό τον εντοπισμό δευτερογενών συμβάντων μέσα σε αυτές. Τόσο η ανίχνευση των περιοχών συμφόρησης όσο και ο χαρακτηρισμός ενός συμβάντος ως δευτερογενές, είναι θέματα τα οποία έχουν μελετηθεί από διάφορους με διαφορετικές, μεταξύ τους, μεθόδους στο παρελθόν. Το πολύπλοκο φαινόμενο της δημιουργίας περιοχών συμφόρησης ανάντη κάποιου πρωτογενούς συμβάντος είναι ένα μέγεθος δυναμικό και εξαρτώμενο από πληθώρα παραγόντων, γεγονός που καθιστά την ανίχνευσή τους πολύπλοκη. Παρ' όλα αυτά, για απλουστευτικούς λόγους κυρίως, πολλές από τις επικρατούσες μεθόδους εντοπισμού δευτερογενών συμβάντων είναι βασισμένες στη χρήση περιοχών συμφόρησης με προαποφασισμένα στατικά χωροχρονικά όρια. Αποτέλεσμα της χρήσης αυτών των ορίων είναι η εξαγωγή όχι πάντα έγκυρων αποτελεσμάτων. Κάτι τέτοιο αποκαλύπτει τη σκοπιμότητα της διερεύνησης των περιοχών συμφόρησης, και κατά συνέπεια των δευτερογενών συμβάντων, με δυναμικές μεθόδους. Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι η κατανόηση της συμβολής και αλληλεπίδρασης που έχουν ορισμένοι παράγοντες στην δημιουργία σύγχρονων κυκλοφοριακών προβλημάτων όπως είναι το κυκλοφορικό μποτιλιάρισμα και η δημιουργία ουρών από οχήματα. Εξετάζεται αναλυτικά η επιρροή που έχει ο κάθε παράγοντας στη διάρκεια και στο μήκος των σχηματιζόμενων ουρών που δημιουργείται μετά από ένα συμβάν και γίνεται εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων. Με τον τρόπο αυτό, η κατανόηση του φαινομένου μπορεί να γίνει αμεσότερα εφικτή. Το γεγονός αυτό μπορεί να συμβάλει αποφασιστικά στη μείωση των καθυστερήσεων στην κυκλοφορία έπειτα από κάποιο ατύχημα, φυσικά, με τη λήψη των κατάλληλων μέτρων, έτσι ώστε να αυξηθεί η οδική ασφάλεια στους αυτοκινητοδρόμους.

## 5.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την ανάλυση των δομικών προτύπων (SEM) και την διερεύνηση της βασικής μας υπόθεσης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ταχυτήτων και φόρτων, για τα έτη 2007 και 2009, τα οποία έχουν ληφθεί από φωρατές ανίχνευσης κυκλοφορίας τοποθετημένους ανά τακτές αποστάσεις σε όλη την περιοχή μελέτης. Τα συμβάντα τα οποία εξετάστηκαν είναι αυτά που συνέβησαν στις κατευθύνσεις προς Αεροδρόμιο και προς Ελευσίνα. Καθένα ατύχημα μελετήθηκε ξεχωριστά, ανεξάρτητα από το σημείο και την ώρα που συνέβη, αλλά και από τη σοβαρότητα των επιπτώσεων που είχε. Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με τη βάση δεδομένων “Στοιχεία ατυχημάτων Αττικής οδού” των 1442 καταγεγραμμένων ατυχημάτων στην περιοχή έκαναν εφικτό τον πρωταρχικό εντοπισμό των 235 συμβάντων στα οποία έπειτα από την εμφάνισή τους επικράτησαν αποδεδειγμένα συνθήκες συμφόρησης. Το μέγιστο μήκος ουράς και η χρονική διάρκεια της ουράς η οποία σχηματίζεται ανάντη ενός ατυχήματος, υπολογίστηκε βάση αναλυτικών και εμπειρικών προσεγγίσεων.

Για την παρούσα διπλωματική εργασία, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που προτάθηκε από την Imperial et al. (2013) η οποία βασίζεται σε ένα συνδυασμό αναλυτικής και εμπειρικής προσέγγισης για την εκτίμηση του μέγιστου μήκους ουράς και τη χρονική διάρκεια της ουράς που σχηματίζεται. Οι περιοχές συμφόρησης ανιχνεύτηκαν ως προς το μήκος και τη διάρκειά τους με μια δυναμική μεθοδολογία η οποία βασίστηκε στις εξισώσεις του Kerner για τις συνθήκες κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης, αφού υποτέθηκε ότι αυτές επικρατούν έπειτα από ένα συμβάν. Οι χρόνοι εκτιμήθηκαν βάσει μιας τροποποιημένης εκδοχής του αλγόριθμου του Chen et al. (2004) που βασίζεται σε οριοθέτηση κατωφλιού τιμών ταχύτητας. Οι τροποποιήσεις που έγιναν στην μέθοδο του Chen et al. (2004) αναφέρονται στην τιμή του ανώτατου κατωφλιού τιμών ταχύτητας και τις διαφορές ταχύτητας μεταξύ διαδοχικών φωρατών. Για τον προσδιορισμό χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές μετρήσεις ταχύτητας. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι το ανάντη μέτωπο της διαταραχής είχε φτάσει ένα ανιχνευτή κάποια στιγμή εάν ικανοποιούνταν 3 καθορισμένα κριτήρια. Στις περιπτώσεις όπου ο αναλυτικός τρόπος κρίθηκε δύσκολο να εφαρμοστεί, οι περιοχές επιρροής καθορίστηκαν από μια εμπειρική μέθοδο και ο υπολογισμός έγινε ως εξής: ακριβώς μετά την εμφάνιση ενός πρωτεύοντος ατυχήματος από τη χρονική στιγμή που ο κοντινότερος ανάντη ανιχνευτής κατέγραφε τα δεδομένα ταχύτητας που ικανοποιούσαν τα 3 συγκεκριμένα κριτήρια, η θέση αυτή του δρόμου θεωρήθηκε ότι παρουσίαζε συμφόρηση μέχρι τη χρονική στιγμή που τα κριτήρια έπαυαν να ισχύουν. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε σε κάθε ανιχνευτή που ήταν τοποθετημένος ανάντη του ατυχήματος και είχε καταγράψει, σύμφωνα με τα κριτήρια, μειωμένη ταχύτητα.



Συνδιάζοντας όλες αυτές τις πληροφορίες σχετικά με τη διάρκεια της συμφόρησης σε κάθε θέση σε ένα χωροχρονικό διάγραμμα, γίνεται εφικτό να “εντοπιστούν” τα πραγματικά όρια μιας περιοχής επιρροής και επίσης τον ακριβό τρόπο σχηματισμού και αποσχηματισμού της. Η αναγκαιότητα για την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου προέκυψε από την εμφανή υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση των μεγεθών των περιοχών συμφόρησης από την πρώτη μέθοδο σε ορισμένες περιπτώσεις, καθότι παρατηρήθηκε ότι στις μισές, σχεδόν, περιπτώσεις ο αποσχηματισμός της περιοχής συμφόρησης έγινε με τρόπο ακανόνιστο.

Ο εντοπισμός των δευτερογενών συμβάντων, έγινε με την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από τους ανιχνευτές βρόχου. Κάθε συμβάν που λάμβανε χώρα εντός μιας καθορισμένης χωροχρονικής περιοχής, χαρακτηρίστηκε με τον βαθμό βεβαιότητας που επιτρέπεται από την ποιότητα των δεδομένων που προέκυψαν από τους ανιχνευτές, ως δευτερεύον. Από τα αποτελέσματα τα οποία θεωρήθηκαν έγκυρα, εντοπίστηκαν 23 δευτερογενή.

Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά μεγέθη των περιοχών συμφόρησης, η επεξεργασία των δεδομένων έδειξε ότι οι μεγάλες ουρές δεν σχηματίζονται απαραίτητα στα σοβαρά περιστατικά αλλά έχουν περισσότερο σχέση με την ώρα διεξαγωγής του ατυχήματος και τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Η προσπάθεια ερμηνείας του φαινομένου της διάρκειας και του μήκους των ουρών και γενικά της επιρροής του ατυχήματος στην επικρατούσα κυκλοφορία με απλά γραμμικά πρότυπα, παρόλο που δίνει κάποια χρήσιμα συμπεράσματα, εντούτοις κρίθηκε ανεπαρκής. Πρόκειται για ένα πολύ πολύπλοκο φαινόμενο που δεν μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από 2 ανεξάρτητα γραμμικά πρότυπα λόγω της μεγάλης διακύμανσης του όρου σφάλματος στα αποτελέσματα των αναλύσεων που προκύπτουν. Για το λόγο αυτό αναπτυχθήκαν πρότυπα δομικών εξισώσεων.

Ακόμη, με τη βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης και των δομικών προτύπων εξισώσεων (SEM), φάνηκε ότι τα μεγάλα μήκη ουρών είναι συσχετισμένα με τις μεγάλες διάρκειες. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εκτιμήθηκαν 2 δομικά πρότυπα για την περιγραφή της διάρκειας και του μέγιστου μήκους των σχηματιζόμενων ουρών. Όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς για τα Δομικά Πρότυπα, διάφοροι παράγοντες όπως είναι η ταχύτητα, ο κυκλοφοριακός φόρτος, η γεωμετρική χάραξη της οδού (ευθυγραμμία ή στροφή), η ύπαρξη ράμπας γειτονικά του σημείου όπου διαδραματίζεται το συμβάν, η ένταση-ύψος βροχόπτωσης, η διάρκεια καθαρισμού του ατυχήματος και ο τύπος συμβάντος επηρεάζουν σε στατιστικά σημαντικό βαθμό τη διάρκεια και το μήκος της σχηματιζόμενης ουράς ενός συμβάντος. Αξιοσημείωτο είναι ότι τόσο στο Δομικό Πρότυπο 1 όσο και στο Δομικό Πρότυπο 2 όπως προέκυψε από την ανάλυση, ο κυκλοφοριακός φόρτος έχει αρκετά μικρή επιρροή πάνω στο μέγιστο μήκος της ουράς στην περιοχή

συμφόρησης αλλά και στη διάρκειά της. Το δεύτερο δομικό πρότυπο παρουσίαζε μια σημαντική διαφοροποίηση συγκριτικά με το πρώτο. Ενώ στο Δομικό Πρότυπο 1 είχαμε μόνο ένα κύριο γραμμικό πρότυπο παλινδρόμησης (regression model) όπου επιδρούσαν απευθείας σε μια λανθάνουσα μεταβλητή όλοι οι προγνωστικοί παράγοντες, στο Δομικό Πρότυπο 2 εφαρμόστηκε ένα παράλληλο κύριο γραμμικό πρότυπο παλινδρόμησης το οποίο εξέφραζε την επιρροή που έχουν οι παράγοντες βαρέα οχήματα, αριθμός αποκλεισμένων λωρίδων κυκλοφορίας και σοβαρότητα ατυχήματος στην χρονική διάρκεια καθαρισμού του ατυχήματος (clearance time). Ακολούθως η τελευταία μεταβλητή συνδέθηκε σε δεύτερη φάση με την λανθάνουσα μεταβλητή.

Το δεύτερο Δομικό Πρότυπο υστερεί συγκριτικά με το πρώτο σε όρους προσαρμοστικότητας που περιγράφονται από τα κριτήρια καλής προσαρμογής, όμως θεωρείται καλύτερο διότι δίνει μια αναλυτικότερη και πιο εκτεταμένη περιγραφή της αλληλεπίδρασης των διάφορων παραγόντων με τη διάρκεια και το μήκος των ουρών, καθώς περιλαμβάνει 3 επιπλέον παραμέτρους (βαρέα οχήματα, αριθμός αποκλεισμένων λωρίδων και σοβαρότητα συμβάντος).

### **5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε μια προσπάθεια ερμηνείας ενός μεγάλου κυκλοφοριακού προβλήματος που εμπλέκει και απασχολεί πολλούς φορείς. Το συγκεκριμένο θέμα είναι αναμφίβολα δύσκολο ως προς τη διερεύνησή του, παρ' όλα αυτά η έρευνα και η γνώση περαιτέρω πληροφοριών προσδίδει ενδιαφέρον όσον αφορά και άλλους παράγοντες που ενδεχομένως να επηρεάζουν το κυκλοφοριακό πρόβλημα της δημιουργίας ουρών έπειτα από κάποιο συμβάν σε αυτοκινητοδρόμους. Στην συγκεκριμένη έρευνα λόγω κάποιων περιορισμών, η προσπάθεια επικεντρώθηκε σε συγκεκριμένα σημεία περισσότερο και σε άλλα όχι. Ως εκ τούτου, κρίνεται σημαντικό να επισημανθούν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο θέμα.

Αρχικά, σημαντικό θα ήταν η έρευνα να επεκταθεί σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις οδών και κυρίως στα αστικά οδικά δίκτυα. Η ανάπτυξη και η δομή των πόλεων σε Ελλάδα και σε άλλες χώρες της Ευρώπης παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την οδηγική συμπεριφορά των οδηγών, ως προς την διαμόρφωση των δρόμων (κατασκευή με γερμανικούς ή αμερικάνικους κανονισμούς), ως προς τους τρόπους επέμβασης στο σημείο όπου έγινε το ατύχημα, ως προς τα διαφορετικά όρια ταχύτητας κ.α. Ο σχολιασμός και η σύγκριση των

αποτελεσμάτων θα μπορούσε να δώσει πιο μεγάλη βαρύτητα ως προς την ορθότητα τους και θα μπορούσε να εξάγει ακόμη περισσότερα συμπεράσματα.

Στην παρούσα έρευνα δεν έχει ληφθεί υπόψη η εμφάνιση συγχρονισμένης ροής εντός των περιοχών συμφόρησης διότι θεωρήθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις επικρατούν συνθήκες μέγιστης πυκνότητας (άρα και κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης) το οποίο πιθανότατα δεν αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα (η κυκλοφορία δεν είναι ομογενής και στάσιμη μεταξύ των φωρατών λόγω π.χ. της γεωμετρίας κ.α.). Η πολυπλοκότητα αυτή επηρεάζει σημαντικά τις παραμέτρους της αναλυτικής μεθόδου που παρουσιάστηκε και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη σε μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες.

Σημαντική κρίνεται και η διερεύνηση της επιρροής παραγόντων στην ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής που προκαλείται από ένα συμβάν. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η επιρροή του συμβάντος περιγράφηκε από δύο μη δυναμικούς δείκτες, που δεν εμπεριέχουν την ταχύτητα με την οποία δημιουργείται η συμφορημένη περιοχή (δηλαδή έως  $L_{max}$ ), αλλά και η ταχύτητα αποσυμφόρησής της.

Τέλος, χρήσιμο θα ήταν να γίνει μια κριτική αξιολόγηση των ευρημάτων της παρούσας έρευνας ως προς τη διαμόρφωση κατάλληλων πολιτικών και μέτρων για τη βέλτιστη διαχείριση της κυκλοφορίας υπό την επιρροή μη αναμενόμενων συμβάντων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- Browne, M. W., and R. Cudeck. 1993. Alternative ways of assessing model fit. Reprinted in *Testing Structural Equation Models*, ed. K. A. Bollen and J. S. Long, pp. 136–162. Newbury Park, CA: Sage.
- Chung Y., Song T., Park J. (2012). Freeway booking policy: Public discourse and acceptability analysis *Transport Policy*, 24, 223–231
- Garib, A., Radwan, A., and Al-Deek, H. (1997). Estimating Magnitude and Duration of Incident Delays, *J. Transp. Eng.*, 123(6), 459–466.
- Golob, T.F., 2003. Structural equation modeling for travel behavior research. *Transportation Research Part B: Methodological* 37 (1), 1–25.
- Hassan, H. M., Abdel-Aty, N. A. (2011). Analysis of drivers' behavior under reduced visibility conditions using a Structural Equation Modeling approach *Transportation Research Part F* 14 614–625
- Imprialou, M.-I., Orfanou, F. P., Vlahogianni, E. I. and Karlaftis, Matthew G. (2013). Defining Spatiotemporal Influence Areas in Freeways for Secondary Accident Detection, *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting Compendium of Papers*, 13-0955, 13-17 January, Washington DC, US.
- Jeong, Y.-S., Castro-Neto, M., Jeong, M. K. and Han, L. D., (2011). A wavelet-based freeway incident detection algorithm with adapting threshold parameters, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(1), 1-19.
- Johansson M. V., Heldt T., Johansson P. (2006). The effects of attitudes and personality traits on mode choice *Transportation Research Part A* 40, 507–525.
- Joreskog, Karl and A. S. Goldberger (1975), "Estimation of a Model with Multiple Indicators and Multiple Causes of a Single Latent Variable," *Journal of the American Statistical Association*, 70 (September), 631–639.
- Karlaftis, M. G., S. Latoski, P., Richards, J. Nadine and K. C. Sinha. (1999). ITS Impacts on Safety and Traffic Management: An Investigation of Secondary Crash Causes, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 5(1), 39-52.

Karlaftis, M.G., Golias, I., Papadimitriou, E. (2001) Transit Quality as an Integrated Traffic Management Strategy: Measuring Perceived Service, *Journal of Public Transportation*, Vol. 4, No. 1, 27-44.

Kerner, B.S., Rehborn, H., Aleksic, M., Haug, A. "Recognition and Tracing of Spatial-Temporal Congested Traffic Patterns on Freeways", *Trans. Rec. C*, Vol. 12, 2004, pp. 369-400.

Kerner B.S. (2004) "The Physics of Traffic- Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory", Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Khattak A., X. Wang, H. Zhang, iMiT: A tool for dynamically predicting incident durations, secondary incident occurrence, and incident delays, *IET Intelligent Transport Systems*, 6:2, Institution of Engineering and Technology 2012.

Kwon J., Mauch M. and Varaiya P. (2006). Components of Congestion: Delay from Incidents, Special Events, Lane Closures, Weather, Potential Ramp Metering Gain, and Excess Demand, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1959(1), 84-91.

Mohamed Ahmed, Mohamed Abdel-Aty A data fusion framework for real-time risk assessment on freeways *Transportation Research Part C* 26 (2013) 203–213

Moore, J.E., Giuliano, G. and Cho, S. (2004). Secondary Accident Rates on Los Angeles Freeways. *Journal of Transportation Engineering* 130.3: 280–285.

Ozbay, K. and Nayan, N. (2006). Estimation of incident clearance times using Bayesian Networks approach, *Accident Analysis & Prevention*, 38(3), 542-555.

Raub, R. A. Secondary crashes: An important component of roadway incident management, *Transportation Quarterly*, (1997). Vol. 51, No. 3, 1997, pp. 93–104.

Schermelleh-Engel, K., Moosbrugger, H., Muller, H., 2003. Evaluating the fit of structural equation models tests of significance and descriptive goodness-of-fit measures, *Methods of Psychological Research Online*, 8(2), 23–74.

Sun, C. and Chilukuri, V. (2010). "Dynamic Incident Progression Curve for Classifying Secondary Traffic Crashes." *J. Transp. Eng.*,136(12), 1153–1158.

Vlahogianni E.I., Karlaftis, M.G., Golias, J. C. and Halkias, B. (2010) Freeway Operations, Spatio-temporal Incident Characteristics, and Secondary-Crash Occurrence, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2778, 1-9.

Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G. and Orfanou, F. P. (2012). Modeling the effects of weather and traffic on the risk of secondary incidents, *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 16(3), 109-117.

Washington, S.P., Karlaftis, M.G., and Mannering, F.L. (2010). *Statistical and econometric methods for transportation data analysis*. 2nd Edition, Boca Raton, FL: CRC Press.

Li H., Bertini R.L., (2010) "Comparison of Algorithms for Systematic Tracking of Patterns of Traffic Congestion on Freeways in Portland, Oregon", *Journal of Transportation Research Board*, No 2178, 101-110.

Shrank D. And Lomax, T., 2003 Annual Urban Mobility Report, Texas Transportation Institute)

Κοκολάκης Γ., Σπηλιώτης Ι.(1999) "Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική", Εκδόσεις Συμμεών

Φρατζεσκάκης Ι., Γκόλιας Ι., Πατσιάβα-Λατινοπούλου Μ. (2009) "Κυκλοφοριακή Τεχνική", Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Ρούσσοσ Π., Ευσταθίου Γ. (2008) "Σύντομο Εγχειρίδιο SPSS 16.0" ([www.psych.uoa.gr/~roussosp/stats/Manual SPSS16.pdf](http://www.psych.uoa.gr/~roussosp/stats/Manual_SPSS16.pdf))

Google:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Traffic\\_congestion:\\_Reconstruction\\_with\\_Kerner%E2%80%99s\\_three-phase\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_congestion:_Reconstruction_with_Kerner%E2%80%99s_three-phase_theory)

Google: [http://en.wikipedia.org/wiki/Traffic\\_congestion](http://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_congestion)

Google: [http://el.wikipedia.org/wiki/Παλινδρόμηση\\_\(στατιστική\)](http://el.wikipedia.org/wiki/Παλινδρόμηση_(στατιστική))

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

---

## ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ

### Πιθανότητα $\chi^2$

Το κύριο μέτρο καθορισμού της συνολικής (καθολικής) προσαρμογής ενός προτύπου, είναι το ποσοστό πιθανοφάνειας (likelihood-ratio). Αυτό είναι και το μόνο μέτρο προσαρμοστικότητας που βασίζεται στη στατιστική και που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα SEM. Μία μεγάλη τιμή του σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας, σημαίνει πως οι παρατηρούμενοι και εκτιμώμενοι πίνακες παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα του δείκτη αυτού είναι ότι, επηρεάζεται σημαντικά από τις διακυμάνσεις στο μέγεθος του δείγματος. Επομένως, προτείνεται η χρήση αυτού του δείκτη να συνοδεύεται πάντα και από άλλους δείκτες προσαρμογής.

Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία ανάλυσης ενός συστήματος δομικών εξισώσεων επικεντρώνεται στην ελαχιστοποίηση μίας συνάρτησης απόκλισης (discrepancy). Εν συντομία, αυτή η συνάρτηση απόκλισης (για τον υπολογισμό της μέγιστης πιθανότητας), ακολουθεί μία κατανομή χ-τετράγωνο, και μπορεί να ερμηνευτεί βασισμένη στους βαθμούς ελευθερίας που σχετίζονται με το πρότυπο. Μία τιμή πιθανότητας (p-value) για αυτήν τη στατιστική ανάλυση είναι η δοκιμή της υπόθεσης ότι «το πρότυπο ταιριάζει άψογα με τον πληθυσμό» (Arbuckle 1997). Χρησιμοποιώντας λιγότερο τεχνικούς όρους, η στατιστική σημασία ενός εκφράζει το βαθμό στον οποίο το αποτέλεσμα είναι "αληθινό" (από την άποψη της ύπαρξης "αντιπροσώπευσης του πληθυσμού"). Πιο τεχνικά, η τιμή της p-value αντιπροσωπεύει έναν δείκτη της αξιοπιστίας ενός αποτελέσματος. Όσο υψηλότερη η p-value, μειώνεται η αξιοπιστία ότι η παρατηρηθείσα σχέση μεταξύ των μεταβλητών στο δείγμα είναι ένας αξιόπιστος δείκτης της σχέσης μεταξύ των αντίστοιχων μεταβλητών στον πληθυσμό. Συγκεκριμένα, η p-value αντιπροσωπεύει την πιθανότητα του λάθους που περιλαμβάνεται στην αποδοχή του παρατηρηθέντος αποτελέσματος μας τόσο έγκυρου, δηλαδή όσο "η αντιπροσώπευση του πληθυσμού". Παραδείγματος χάριν, μια p-value του 0.05 (δηλ., 1/20) δείχνει ότι υπάρχει μια πιθανότητα 5% ότι η σχέση μεταξύ των μεταβλητών που βρίσκονται στο δείγμα μας να είναι "ψευδής". Με άλλα λόγια, υποθέτοντας ότι στον πληθυσμό δεν υπήρξε καμία σχέση μεταξύ εκείνων των μεταβλητών, και επαναληφθούν τα πειράματα, θα μπορούσαμε να αναμείνουμε ότι περίπου σε κάθε 20 επαναλήψεις του πειράματος θα υπήρχε ένα στον οποίο η

σχέση μεταξύ των εν λόγω μεταβλητών θα ήταν ίση ή ισχυρότερη απ' ό,τι στους υπολογισμούς που εκτιμήθηκαν.

Γενικά, ο δείκτης  $\chi^2$  αναφέρεται στην ικανότητα του προτύπου να αναπαράγει τον πίνακα συνδιακύμανσης του δείγματος. Ο  $\chi^2$  αναφέρεται και ως μέτρο ασυμφωνίας (discrepancy). Όσο μικρότερη η τιμή του δείκτη τόσο καλύτερος είναι ο βαθμός προσαρμογής του προτύπου. Εάν η τιμή του είναι μεγάλη, αυτό σημαίνει ότι η διακύμανση του προτύπου είναι πολύ διαφορετική από την παρατηρούμενη. Οι Hair *et al.* (1998) ορίζουν ότι, ο  $\chi^2$  είναι κατάλληλος για μέγεθος δείγματος από 100 μέχρι 200, με το δείκτη να θεωρείται μη σημαντικός για μεγέθη εκτός αυτού του διαστήματος.

### **Ο δείκτης καλής προσαρμογής (GFI)**

Ο δείκτης GFI, επινοήθηκε από τον Joreskog και τον Sorbom το 1984, και αποτελεί ένα μέτρο του συνολικού βαθμού προσαρμογής του προτύπου. Μετράει τη σχετική ποσότητα της διακύμανσης σε ένα δείγμα που το πρότυπο προβλέπει. Είναι ένας μη-στατιστικός δείκτης ο οποίος παίρνει τιμές από 0 (πολύ φτωχή προσαρμογή) μέχρι 1 (τέλεια προσαρμογή). Αναπαριστά το συνολικό βαθμό προσαρμογής (τα τετραγωνισμένα υπόλοιπα της πρόβλεψης συγκρινόμενα με τα πραγματικά δεδομένα) αλλά δεν προσαρμόζεται ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας. Υψηλότερες τιμές καταδεικνύουν καλύτερη προσαρμογή, αλλά δεν υπάρχει κάποιο απόλυτο όριο πάνω από το οποίο το πρότυπο θεωρείται αποδεκτό.

Ικανοποιητικές θεωρούνται τιμές μεγαλύτερες του 0,9 (Hair *et al.* 1998, Bollen 1989), αλλά και μεγαλύτερες του 0,8 (Hoyle 1995, Marcoulides και Schumacker 1996).

Ένας μεγάλος αριθμός μελετών όμως, έχουν δείξει ότι, ο GFI επηρεάζεται από το μέγεθος του δείγματος, γεγονός που οδήγησε τους Anserson και Gerbing (1984) στο συμπέρασμα ότι: «αν και ο GFI είναι ανεξάρτητος του μεγέθους του δείγματος (το μέγεθος του δείγματος δεν είναι μέρος της εξίσωσης που ορίζει τον δείκτη GFI), η κατανομή των τιμών του δείκτη αυτού, επηρεάζεται ισχυρά από το μέγεθος του δείγματος». Η μελέτη τους έδειξε πως το 28.3% της απόκλισης στις τιμές του GFI σχετίζεται με αποκλίσεις στο μέγεθος των δειγμάτων, με το φαινόμενο αυτό να παρουσιάζεται περισσότερο σε μικρά δείγματα (n=50).



### Ο δείκτης Tucker Lewis (TLI)

Ονομάζεται και δείκτης των Bentler-Bonett non-normed fit index (NNFI). Είναι ένας άλλος δείκτης καλής προσαρμογής που επηρεάζεται με την προσθήκη παραμέτρων στο πρότυπο.

Δίνεται από τον τύπο:

$$TLI = \rho_2 = \frac{\frac{C_b}{d_b} - \frac{C}{d}}{\frac{C_b}{d_b} - 1} \quad (1)$$

Όπου:

C,d είναι η εσωτερική ασυμφωνία των παραμέτρων και οι

βαθμοί ελευθερίας για το εκτιμώμενο πρότυπο.

Cb,db είναι οι ίδιοι παράμετροι για το βασικό πρότυπο.

Ο δείκτης αυτός μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 1. Στις περιπτώσεις όπου παίρνει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας τότε ορίζεται ως μονάδα. Όσο η τιμή του TLI πλησιάζει την μονάδα, συνεπάγεται καλύτερη προσαρμογή του προτύπου.

Σημειώνεται ότι ο δείκτης TLI εξαρτάται από το μέσο μέγεθος των συσχετίσεων στα δεδομένα. Εάν η μέση συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών δεν είναι υψηλή, τότε το TLI δεν παίρνει πολύ ψηλές τιμές.

### **Ρίζα των μέσων τετραγώνων του σφάλματος εκτίμησης (RMSEA)**

Άλλος ένας δείκτης, που τείνει να διορθώσει την τάση που εμφανίζει ο δείκτης  $\chi^2$  τετράγωνο να απορρίπτει οποιοδήποτε πρότυπο με αρκετά μεγάλο αριθμό δειγμάτων, είναι ο RMSEA. Η τιμή του εκφράζει την απόκλιση ανά βαθμό ελευθερίας. Η απόκλιση αυτή μετριέται ανάλογα με το συνολικό πληθυσμό και όχι μόνο με το δείγμα που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση (Steiger 1990). Η τιμή αντανακλά την καταλληλότητα που θα ήταν αναμενόμενη εάν η εκτίμηση του προτύπου γινόταν στον ίδιο τον πληθυσμό και όχι μόνο στο δείγμα του πληθυσμού που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη εκτίμηση.

Ο δείκτης RMSEA, αποτελεί ένα μέτρο της ασυμφωνίας ενός προτύπου ανά βαθμό ελευθερίας. Το RMSEA ενσωματώνει μία ανάλυση της πολυπλοκότητας του προτύπου στον υπολογισμό του. Η στατιστική αυτή βασίζεται σε μία εκτίμηση της απόκλισης του πληθυσμού παράλληλα με τους βαθμούς ελευθερίας του προτύπου. Όταν ένα πρότυπο, έχει τέλειο βαθμό προσαρμογής, ο δείκτης έχει την τιμή 0. Οι Browne και Cudeck (1993), εξέφρασαν την άποψη ότι «μία τιμή του RMSEA γύρω στο 0.08 ή και λιγότερο, φανερώνει ένα λογικό σφάλμα προσδιορισμού» και ότι αυτοί δεν θα θέλανε να εφαρμόσουν ένα πρότυπο με RMSEA μεγαλύτερο από 0,1. Τιμές μικρότερες του 0,05 δείχνουν ότι το πρότυπο έχει πολύ καλό βαθμό προσαρμογής, αν και σχετικά πρόσφατα (Hu και Bentler 1999) θεωρήθηκε ως κατώφλι το 0,06.

### **Το υπόλοιπο ρίζας μέσω των τετραγώνων (SRMR)**

Ευρύτατα χρησιμοποιούμενος δείκτης, είναι ο RMSR ή SRMR. Παριστάνει τη διαφορά μεταξύ της διακύμανσης και της συνδιακύμανσης του δείγματος σε σχέση με τις αντίστοιχες ποσότητες όταν το πρότυπο που δοκιμάζεται θεωρείται σωστό. Υπολογιστικά, ο RMR είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγώνου του ποσού της διαφοράς της διακύμανσης και της συνδιακύμανσης του δείγματος, από τα αντίστοιχα ποσά που θα προέκυπταν από ένα σωστό πρότυπο. (Arbuckle και Wothke 1999). Ο δείκτης παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Όσο ο δείκτης πλησιάζει το 0, τόσο πιο μεγάλος είναι ο βαθμός προσαρμογής. Αν το RMR έχει την τιμή μηδέν, τότε αυτό σημαίνει πως το πρότυπο ταιριάζει απόλυτα, ενώ τιμές μεγαλύτερες του 1 θεωρούνται υπερβολικά μεγάλες για το δείκτη αυτόν. Αποδεκτές θεωρούνται τιμές μικρότερες του 0,1 (Hair *et al.* 1992, Bollen 1989).

### **Δείκτης συγκριτικής καταλληλότητας (CFI)**

Για τον τύπο της επαυξητικής προσαρμογής του προτύπου, ο συγκριτικός δείκτης προσαρμογής (CFI) έχει ένα πλεονέκτημα έναντι όλων των άλλων δεικτών της κατηγορίας του. Διότι δεν παρουσιάζει τον κίνδυνο υποεκτίμησης της προσαρμογής των δεδομένων εξαιτίας μικρού δείγματος. Το CFI ορίστηκε από τον Bentler (1990), και βασίστηκε σε μία σύγκριση του προτύπου της υπόθεσης με ένα άλλο πρότυπο το οποίο ονομάζεται «πρότυπο βάσης», ή «ανεξάρτητο πρότυπο».

Οι τιμές του CFI κυμαίνονται αναγκαστικά από το 0 έως το 1, διότι τιμές έξω από αυτά τα όρια περικόπτονται, και παρουσιάζονται ως 0 ή 1 αντίστοιχα. Ο Bentler (1990) πραγματοποίησε μία μελέτη προσομοίωσης και σύγκρισης στην οποία χρησιμοποιήθηκαν 200 αντίγραφα ενός προτύπου δομικών εξισώσεων, και στην οποία μελετήθηκε η επίδραση 6 διαφορετικών σε μέγεθος δειγμάτων που κυμαίνονταν από 50 έως 1600, αυξανόμενα πολλαπλασιαστικά (50, 100, 200, κτλ.).

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι, η τυπική απόκλιση του CFI είναι συνεχώς μικρότερη από αυτή των άλλων δεικτών, και κυμαίνεται από το 0,034 με μέγεθος δείγματος 50, μέχρι 0,01 με μέγεθος δείγματος 1600. Αυτό το αποτέλεσμα βοήθησε στη διατύπωση του ακόλουθου συμπεράσματος: ο CFI φαίνεται να είναι ο καλύτερος δείκτης προσαρμοστικότητας και κυμαίνεται από το 0 έως το 1, έχει μικρή μεταβλητότητα, και υπολογίζει τη σχετική διαφορά στη μη κεντρικότητα (non centrality).

Ο δείκτης δίνεται από τον τύπο:

$$CFI = 1 - \frac{\max(C - d, 0)}{\max(C_b - d_b, 0)} = 1 - \frac{NCP}{NCP_b} \quad (2)$$

Όπου:

$C, d$  είναι η εσωτερική ασυμφωνία των παραμέτρων και οι βαθμοί ελευθερίας αντίστοιχα.

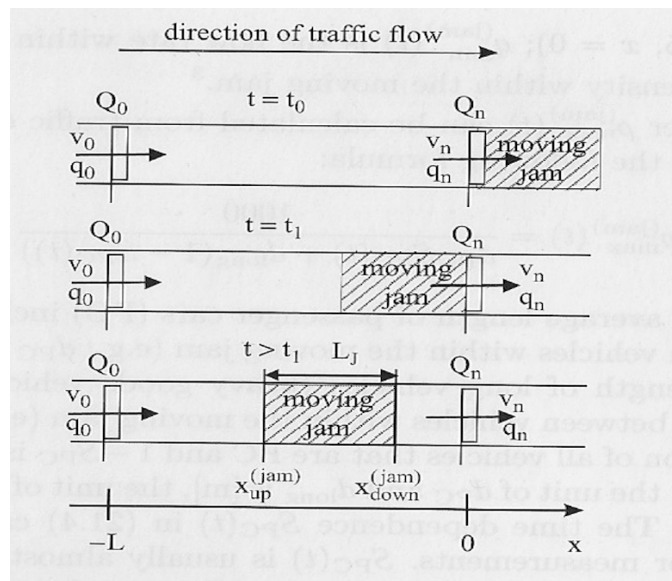
$NCP$  η αρνητική συγκέντρωση των παραμέτρων για το εκτιμώμενο πρότυπο.

$C_b, d_b, NCP_b$  είναι οι ίδιοι παράμετροι για το βασικό πρότυπο.

## ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ASDA

Το πρότυπο ASDA (Automatic Tracking of Moving Traffic Jams) (Kerner et al. 1998; Kerner and Rehbornn, 2000) χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της εκτεταμένου μήκους κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης σε κάθε χρονική στιγμή, ακόμα και όταν αυτό βρίσκεται ανάμεσα σε δύο φωρατές και επομένως δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια. Το σχήμα 6 παρουσιάζει μία απεικόνιση της κίνησης της κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές όταν βρίσκεται ανάμεσα από δύο φωρατές ( $Q_0, Q_n$ ) σε ένα οδικό τμήμα.

Από τη στιγμή που η κινούμενη φάλαγγα συμφόρησης θα εντοπιστεί, από τα δεδομένα που παρέχει ο φωρατής  $Q_n$ , στη χρονική στιγμή  $t_0$  το πρότυπο ASDA ξεκινά να υπολογίζει συνεχόμενα τις θέσεις του ανάντη μετώπου του,  $x_{up}^{jam}(t)$ . Από τη στιγμή που και το κατάντη μέτωπο θα φτάσει στο φωρατή  $Q_n$ , σε κάποιο μεταγενέστερο χρόνο  $t_1$ , το πρότυπο υπολογίζει επαναλαμβανόμενα και τις θέσεις το κατάντη μετώπου  $x_{down}^{jam}(t)$ . Κατά συνέπεια, υπολογίζεται και το μήκος της φάλαγγας σε κάθε χρονική στιγμή επειδή ισούται με  $L_s = x_{down} - x_{up}$ . Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και αν κανένας από τους φωρατές δεν είναι μέσα ή κοντά στη φάλαγγα. Για τον υπολογισμό των θέσεων των μετώπων χρειάζονται οι τιμές των φόρτων  $q_0(t)$ ,  $q_n(t)$ , και των ταχυτήτων  $w_0(t)$ ,  $w_n(t)$  που λαμβάνονται από τους φωρατές.



Σχήμα 9: Θέσεις της κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης ανάμεσα σε δύο φωρατές σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. (Πηγή: Kerner B., "The Physics of Traffic")

## ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ASDA

Στις πραγματικές εφαρμογές, σε ελεύθερες λεωφόρους, υπάρχουν ακολουθίες μεγάλου αριθμού φωρατών. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο προσδιορισμός της θέσης του ανάντη και του κατάντη μετώπου αντίστοιχα μίας κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης καταλήγει στους εξής τύπους:

A) Εξίσωση για τη θέση του ανάντη μετώπου:

$$\begin{aligned}x_{up}^{jam}(t) &= L_{i+1} + \int_{t_0^{(i+1)}}^t v_{up}^{jam}(t) dt \\ &\approx L_{i+1} - \int_{t_0^{(i+1)}}^t \frac{q_o^{(i)}(t) - q_{min}}{p_{max} - (q_o^{(i)}(t)/w_o^{(i)}(t))} dt \quad (1)\end{aligned}$$

όπου  $t \geq t_0^{(i+1)}$ ,  $i=1,2,\dots$

B) Εξίσωση για τη θέση του κατάντη μετώπου:

$$\begin{aligned}x_{down}^{jam}(t) &= L_j + \int_{t_1^{(j)}}^t v_{down}^{jam}(t) dt \\ &\approx L_j - \int_{t_1^{(j)}}^t \frac{q_{out}^{(j)jam}(t) - q_{min}}{p_{max} - (q_{out}^{(j)jam}(t)/w_{max}^{(j)}(t))} dt \quad (2)\end{aligned}$$

όπου  $t \geq t_1^{(j)}$ ,  $j=1,2,\dots$

Οι δείκτες "i" και "j" για την (1) και (2) αντίστοιχα, αναφέρονται στους φωρατές των οποίων οι τιμές χρησιμοποιούνται στο χρόνο t. Οι δείκτες αυτοί αυξάνονται σύμφωνα με τη φορά της κυκλοφορίας.

- $L_m > L_n$  για  $m > n$
- $v_{up}^{(jam)}(t)$ : η ταχύτητα κίνησης του ανάντη μετώπου
- $v_{down}^{(jam)}(t)$ : η ταχύτητα κίνησης του κατάντη μετώπου
- $t_0^{(i+1)}$ : ο χρόνος όπου το ανάντη μέτωπο έφτασε στον φωρατή (i+1)

- $t_1^{(j)}$  : ο χρόνος όπου το κατάντη μέτωπο έφτασε στον φωρατή (j)
- $q_o^{(i)}(t)$ : ο μετρημένος ρυθμός ροής στο φωρατή (i) στο ανάντη μέτωπο της κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης
- $w_o^{(i)}(t)$ : η μετρημένη μέση στιγμιαία ταχύτητα στο φωρατή (i) στο ανάντη μέτωπο της κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης
- $q_{out}^{(j)jam}$  :ο μετρημένος ρυθμός ροής στο φωρατή (j) στο κατάντη μέτωπο της κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης
- $w_{max}^{(j)}$ : η μετρημένη μέση στιγμιαία ταχύτητα στο φωρατή (j) στο κατάντη μέτωπο της κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης
- $q_{min}$  : ο ρυθμός ροής μέσα στην κινούμενη φάλαγγα συμφόρησης
- $p_{max}$  : η πυκνότητα των οχημάτων μέσα στην κινούμενη φάλαγγα συμφόρησης

Η παράμετρος  $p_{max}$  υπολογίζεται ευθέως από τα κυκλοφοριακά δεδομένα μέσω της εξίσωσης:

$$p_{max} = \frac{1000}{L_{PC} * A_{PC} + L_{HGV} * (1 - A_{PC})} \text{ (οχήματα/km)} \quad (3)$$

Όπου:

- $L_{PC}$ : το αναμενόμενο μέσο μήκος των ΙΧ προσθέτοντας και μια ελάχιστη μέση απόσταση ανάμεσα στα οχήματα
- $L_{HGV}$ : το αναμενόμενο μέσο μήκος των βαρέων οχημάτων προσθέτοντας και μια ελάχιστη μέση απόσταση ανάμεσα στα οχήματα
- $A_{PC}$ : το ποσοστό των ΙΧ στο σύνολο της κυκλοφορίας

Στις περιπτώσεις που το  $q_{min}$  δεν μπορεί να μετρηθεί, λόγω απουσίας φωρατή μέσα στην κινούμενη φάλαγγα συμφόρησης, μπορεί να υπολογιστεί με μία εκ των δύο παρακάτω εξισώσεων:

$$q_{min} = \left( t_1^{(j)} - t_o^{(j)} \right)^{-1} \int_{t_o^{(j)}}^{t_1^{(j)}} q_{min}^{(j)}(t) dt \quad (4)$$

ή

$$q_{min} = 0 \quad (5)$$

Για την επιλογή του σωστού φωρατή "i", του οποίου τα δεδομένα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην εξίσωση (1) μπορεί να ακολουθηθεί η παρακάτω μεθοδολογία που αναφέρεται για την περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 6. Το μέτωπο της επιβράδυνσης έχει μόλις περάσει από το φωρατή "k=i+1".

Αρχικά, στην εξίσωση (1) χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις του φωρατή "k-1=i" ενώ το κατάντη μέτωπο δεν έχει φτάσει ακόμη στον "k".

Πρώτα πρέπει να καθοριστούν οι χρονικές στιγμές όπου ο επόμενος για τους υπολογισμούς φωρατής μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αν η παρακάτω ανισότητα ισχύει, τότε:

$$x_{up}^{jam}(t) \leq L_{k-1}$$

οι μετρήσεις του φωρατή "k-2=i" πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην (1).

Με τον όρο  $L_{k-1}$  συμβολίζεται η συντεταγμένη (κατά τον άξονα των χ) του φωρατή "i=k-1".

Από την άλλη μεριά, το ανάντη μέτωπο της κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης στο χρόνο  $t_o^{(k-1)}$  βρίσκεται στο φωρατή "k-1=i" και είναι ίσο με:

$$x_{up}^{jam}(t_o^{(k-1)}) = L_{k-1}$$

$$x_{up}^{jam}(t_o^{(k-1)}) = L_k + \int_{t_o^{(k)}}^t v_{up}^{jam}(t) dt$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι πάντοτε υπάρχει μία διαφορά  $\Delta$  ανάμεσα στο υπολογισμένο  $x_{up}^{jam}$  και στην πραγματική συντεταγμένη του ανάντη μετώπου. Εάν, για παράδειγμα, η ανισότητα ( $x_{up}^{jam}(t) \leq L_{k-1}$ ) (6) δεν ισχύει στο χρόνο  $t_o^{(k-1)}$  όπου το μέτωπο επιβράδυνσης έχει σίγουρα φτάσει στον φωρατή k-1 τότε το υπολογισμένο  $x_{up}^{jam}(t_o^{(k-1)})$  είναι πολύ υψηλό. Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος θέτει ως τιμή του  $x_{up}^{jam}(t_o^{(k-1)})$  το  $L_{k-1}$ .



Σε αντιστοιχία με αυτό, το υπολογισμένο  $x_{up}^{jam}(t)$  είναι αναμφισβήτητα πολύ χαμηλό αν η ανισότητα ( $x_{up}^{jam}(t) \leq L_{k-1}$ ) (6) ισχύει όμως το ανάντη μέτωπο δεν έχει περάσει ακόμα από το φωρατή k-1 στη χρονική στιγμή αυτή. Τότε, θέτουμε το  $x_{up}^{jam}(t)$  ίσο με  $L_{k-1} + \epsilon$ , με το “ $\epsilon$ ” να είναι μια πολύ χαμηλή, δεδομένη τιμή (π.χ.  $\epsilon = 1m$ )

Συνεπώς, η επιλογή του επόμενου φωρατή για την εξίσωση (1) δεν εξαρτάται από την υπολογιζόμενη θέση του ανάντη μετώπου, αλλά από τις χρονικές στιγμές που το μέτωπο διέρχεται στην πραγματικότητα από τους φωρατές. Ο φωρατής “i=k-m-1” χρησιμοποιείται στην εξίσωση (1) μόνο εάν το ανάντη μέτωπο έχει “συναντηθεί” με το φωρατή “k-m” στο χρόνο  $t_o^{(k-m)}$ .

Μία παρόμοια μεθοδολογία χρησιμοποιείται και για την επιλογή φωρατή για τη εξίσωση (2). Η εξίσωση αυτή αρχικά εφαρμόζεται στο χρόνο  $t_1^{(k)}$ , δηλαδή όταν το κατάντη μέτωπο «εντοπιστεί» στο φωρατή “k”. Από τη στιγμή που το μέτωπο της επιτάχυνσης εμφανιστεί στον αμέσως επόμενο φωρατή “k-1”, στη χρονική στιγμή  $t_1^{(k-1)}$  χρησιμοποιούνται τα στοιχεία από το φωρατή “j=k-1” στη (2).

Με αντίστοιχο τρόπο, για να απαλειφθεί η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική και την υπολογιζόμενη θέση του κατάντη μετώπου, της κινούμενης φάλαγγας επιβράδυνσης, γίνονται οι εξής διορθώσεις: Αν το υπολογισμένο  $x_{down}^{jam}(t)$  είναι μεγαλύτερο από το  $L_{k-p}$  ( $x_{down}^{jam}(t) > L_{k-p}$ ) (7) αλλά το μέτωπο έχει φτάσει στο φωρατή “k-p” στην τιμή του  $x_{down}^{jam}(t)$  τίθεται η τιμή  $L_{k-p} - \epsilon$ . Αν πάλι, το υπολογισμένο  $x_{down}^{jam}(t)$  είναι μικρότερο του  $L_{k-p}$  ( $x_{down}^{jam}(t) < L_{k-p}$ ) (7) αλλά το μέτωπο της επιτάχυνσης δεν έχει συναντήσει ακόμη το φωρατή “k-p”, θέτουμε  $x_{down}^{jam}(t) = L_{k-p}$ .

Αν έπειτα από την εμφάνιση μίας κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης –όπως πολύ συχνά συμβαίνει- μία επόμενη κινούμενη φάλαγγα συμφόρησης εμφανιστεί και είναι σε κοντινή απόσταση με το άλλο ώστε να μην υπάρχει κάποιος φωρατής ανάμεσα τους το πρότυπο ASDA πρέπει να επεκταθεί. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα εμπειρικών ερευνών για τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των κινούμενων φαλαγγών συμφόρησης. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα του κατάντη μετώπου είναι μία χαρακτηριστική παράμετρος. Αν η ταχύτητα έχει υπολογιστεί πρόσφατα για κάποια συγκεκριμένη φάλαγγα συμφόρησης, χρησιμοποιείται για την πρόγνωση άλλων φαλαγγών, στις οποίες η ταχύτητα δεν μπορεί να υπολογιστεί. Για να ακολουθηθεί μία φάλαγγα η οποία βρίσκεται ακριβώς πίσω από μία άλλη μπορεί επιπλέον να υποτεθεί ότι η ταχύτητα του ανάντη μετώπου της δεύτερης στη σειρά είναι ίση με τη χαρακτηριστική ταχύτητα του κατάντη μετώπου της πρώτης.

## ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ASDA

α) Επέκταση του προτύπου ASDA για ράμπες εισόδου-εξόδου αυτοκινητοδρόμου και για αλλαγή του αριθμού των λωρίδων κυκλοφορίας ανάντη μίας κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης

Στην περίπτωση αυτή ο συνολικός ρυθμός ροής πρέπει να συσχετίζεται με το ρυθμό ροής ανά λωρίδα.

Σε μία είσοδο αυτοκινητοδρόμου στο ρυθμό ροής  $q_o^{(i)}(t)$  πρέπει να προστεθεί ο ρυθμός ροής των οχημάτων που εισέρχονται. Επομένως:

$$q_o^{*(i)}(t) = q_o^{(i)}(t) + \frac{q_{on}(t)}{n} \quad (8)$$

$n$  : πλήθος λωρίδων αυτοκινητοδρόμου

Αντίστοιχα για τις ράμπες εξόδου:

$$q_o^{*(i)}(t) = q_o^{(i)}(t) - \frac{q_{off}(t)}{n} \quad (9)$$

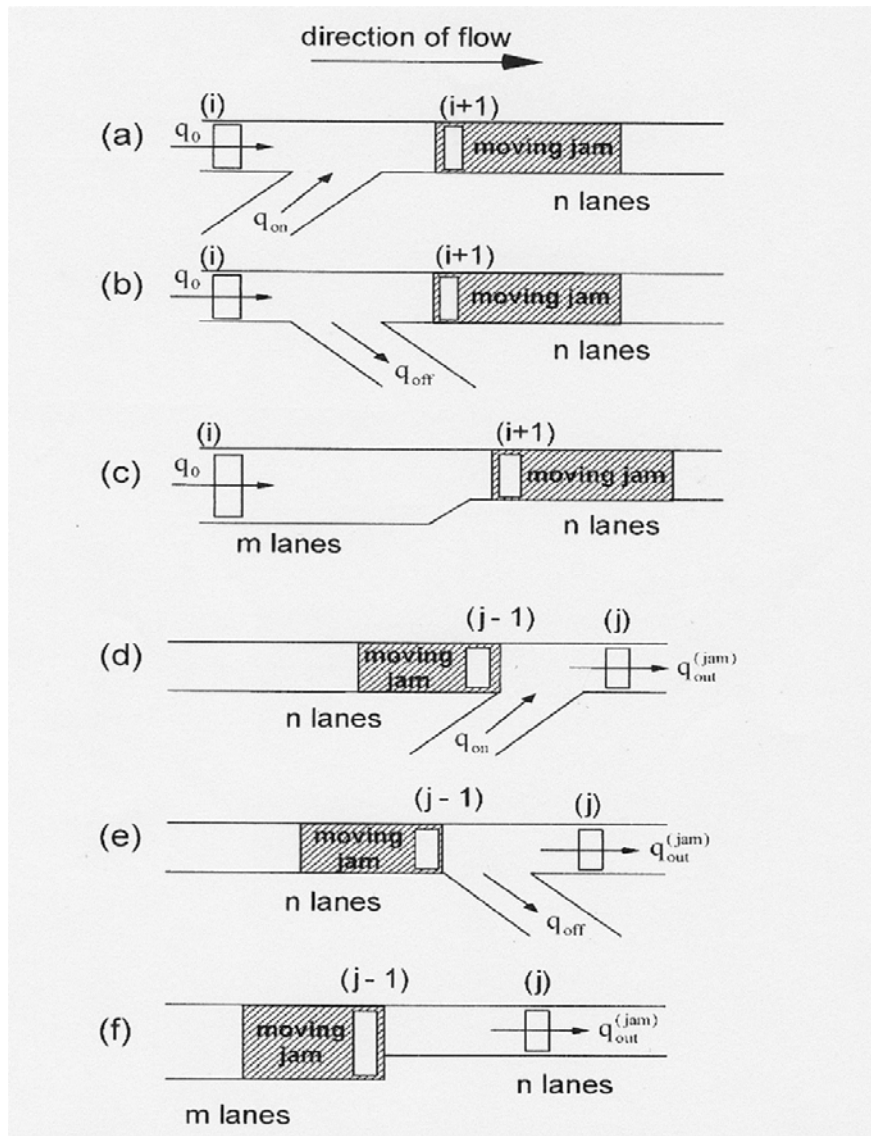
Όταν μειώνονται οι λωρίδες κυκλοφορίας κατά μήκος της οδού από  $m$  σε  $n$  ο ρυθμός ροής γίνεται:

$$q_o^{*(i)}(t) = \frac{m}{n} q_o^{(i)}(t) \quad (10)$$

Στις παραπάνω περιπτώσεις η εξίσωση (1) που δίνει τη θέση του ανάντη μετώπου παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned} x_{up}^{jam}(t) &= L_{i+1} + \int_{t_0^{(i+1)}}^t v_{up}^{jam}(t) dt \\ &\approx L_{i+1} - \int_{t_0^{(i+1)}}^t \frac{q_o^{*(i)}(t) - q_{min}}{p_{max} - (q_o^{*(i)}(t)/w_o^{(i)}(t))} dt \quad (11) \end{aligned}$$

όπου  $t \geq t_0^{(i+1)}$ ,  $i=1,2,\dots$



Σχήμα 10: Επέκταση του προτύπου ASDA για ράμπες εισόδου και εξόδου ανάντη (a-c) και κατάντη (d-f) της κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης (Πηγή: Kerner.et.al.)

β) Επέκταση του προτύπου ASDA για ράμπες εισόδου-εξόδου αυτοκινητοδρόμου και για αλλαγή του αριθμού των λωρίδων κυκλοφορίας κατάντη μίας κινούμενης φάλαγγας συμφόρησης

Σε μία είσοδο αυτοκινητοδρόμου στο ρυθμό ροής  $q_{out}^{(i)}(t)$  πρέπει να αφαιρεθεί ο ρυθμός ροής των οχημάτων που εισέρχονται. Επομένως:

$$q_{out}^{*(j)jam}(t) = q_{out}^{(j)jam}(t) - \frac{q_{on}(t)}{n} \quad (12)$$

Αντίστοιχα για τις ράμπες εξόδου:

$$q_{out}^{*(j)jam}(t) = q_{out}^{(j)jam}(t) + \frac{q_{off}(t)}{n} \quad (13)$$

Όταν μειώνονται οι λωρίδες κυκλοφορίας κατά μήκος της οδού από  $m$  σε  $n$  ο ρυθμός ροής γίνεται:

$$q_{out}^{*(j)jam}(t) = \frac{n}{m} q_{out}^{(j)jam}(t) \quad (14)$$

Στις παραπάνω περιπτώσεις η εξίσωση (2) που δίνει τη θέση του κατάντη μετώπου παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned} x_{down}^{jam}(t) &= L_j + \int_{t_1^{(j)}}^t v_{down}^{jam}(t) dt \\ &\approx L_j - \int_{t_1^{(j)}}^t \frac{q_{out}^{*(j)jam}(t) - q_{min}}{p_{max} - (q_{out}^{*(j)jam}(t)/w_{max}^{(j)})} dt \quad (15) \end{aligned}$$

$$\text{όπου } t \geq t_1^{(j)}, j=1,2,\dots$$

