



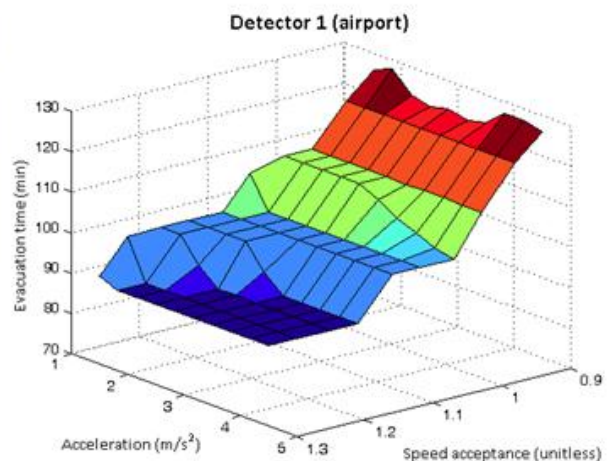
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών

Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Διερεύνηση αποτελεσματικότητας εκκένωσης με
χρήση προσομοίωσης και ταυτόχρονης ανάλυσης
ευαισθησίας***



ΚΩΣΤΟΒΑΣΙΛΗ ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ

Επιβλέπων: Κ. ΑΝΤΩΝΙΟΥ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2014

ΑΘΗΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κωνσταντίνο Αντωνίου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, για την ανάθεση του θέματος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμη βοήθεια και αδιάκοπη υποστήριξή του, καθώς και για την άψογη συνεργασία, η οποία υπήρξε καθοριστικής σημασίας για μένα. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Vincenzo Punzo, Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου της Νάπολης (University of Napoli-Federico II), για την πολύτιμη συμβολή του και την επίλυση αποριών σε προγραμματιστικό επίπεδο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη συνεχή συμπαράσταση και υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των ακαδημαϊκών μου σπουδών στο ΕΜΠ.

Μαργαρίτα Κωστοβασίλη

Νοέμβριος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε όλο τον κόσμο, κατά καιρούς συμβαίνουν ανθρωπογενή ή φυσικά φαινόμενα, τα οποία διαμορφώνουν συνθήκες έκτακτης ανάγκης και αναγκάζουν μικρούς ή μεγάλους πληθυσμούς να εκκενώσουν μια περιοχή για την ασφάλειά τους. Σημαντική παράμετρος για τη λειτουργία της εκκένωσης αποτελεί η συμπεριφορά των οδηγών. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελεί μια αναλυτική μελέτη της αποτελεσματικότητας της εκκένωσης συναρτήσει της συμπεριφοράς των οδηγών, με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας. Η συλλογή δεδομένων για την παράμετρο αυτή είναι δύσκολη έως αδύνατη σε πραγματικές συνθήκες, οπότε επιλέγεται η κυκλοφοριακή προσομοίωση για την περιγραφή της. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει κατά πόσο η επιθετικότητα των οδηγών επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας της εκκένωσης. Η επιλογή του μοντέλου που διέπει τη συμπεριφορά των οδηγών γίνεται μέσω ταυτόχρονης ανάλυσης ευαισθησίας των παραμέτρων. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται για κάποια εύρη τιμών των σημαντικών παραμέτρων σε κάποια σενάρια ζήτησης, με ή χωρίς την εφαρμογή βελτιωτικών μέτρων. Τελικά, προκύπτουν εύρη χρονικής διάρκειας εκκένωσης και ο αριθμός των ανθρώπων που εκκενώνονται. Τα συμπεράσματα της έρευνας περιλαμβάνουν την παρατήρηση ότι η αντιστροφή συνδέσμων αυξάνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας, μειώνοντας τη χρονική διάρκεια, ενώ η αξιοποίηση μέσων μαζικής μεταφοράς αυξάνει σημαντικά τον αριθμό του πληθυσμού που εκκενώνεται.

ABSTRACT

Worldwide, manmade or natural phenomena occasionally occur, that form emergency conditions and force small or big populations to evacuate an area for their safety. Drivers' behavior becomes a very important factor for the evacuation's operation. This dissertation is an analytical research of the effectiveness of evacuation according to drivers' behavior, using the sensitivity analysis method. Collecting real-time data about that factor is a difficult to impossible task, therefore, traffic simulation is the most appropriate method for analysis. Our goal is to investigate how drivers' aggression affects the evacuation effectiveness. The drivers' behavior model is chosen through all-at-once sensitivity analysis of the parameters. This model is applied to some demand scenarios for some important parameters' value ranges, regardless of the application of improvement actions. Finally, many interesting results are coming of this investigation. The most important conclusion is that the contraflow lane reversal increases the evacuation effectiveness, reducing the duration, while using the public transport increases the number of the evacuated people.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	iii
Abstract	v
1. Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός.....	1
1.2 Δομή.....	2
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	5
2.1 Εκκένωση.....	5
2.1.1 Γενικά.....	5
2.1.2 Τεχνικές εκκένωσης.....	7
2.1.2.1 Εκκένωση με διαχείριση κυκλοφορίας.....	7
2.1.2.2 Εκκένωση με προγραμματισμό διαδρομής.....	8
2.1.2.3 Εκκένωση με βάση το χρόνο έναρξης.....	9
2.1.2.4 Εκκένωση με βάση τη συμπεριφορά του οδηγού.....	9
2.1.2.5 Άλλες τεχνικές εκκένωσης.....	10
2.1.3 Παράμετροι σχεδιασμού.....	10
2.1.3.1 Οδικό δίκτυο και πληθυσμιακά στοιχεία.....	11
2.1.3.2 Ζώνη σχεδιασμού εκκένωσης και ασφαλείς ζώνες.....	12
2.1.3.3 Χρόνος αντίδρασης και εκτιμώμενος χρόνος εκκένωσης.....	14
2.1.3.4 Ειδικές συνθήκες.....	14
2.1.4 Μελέτες διαχείρισης εκκένωσης.....	15
2.2 Προσομοίωση.....	23
2.2.1 Λόγοι επιλογής.....	23
2.2.2 Γενικά.....	23
2.2.3 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα μεθόδου.....	24
2.2.4 Τύποι προσομοίωσης.....	25
2.2.5 Εφαρμογές προσομοίωσης.....	29
2.3 Ανάλυση ευαισθησίας.....	30
2.3.1 Γενικά.....	30

2.3.2 Περιορισμοί ανάλυσης ευαισθησίας.....	32
2.3.3 Τεχνικές ανάλυσης ευαισθησίας.....	33
2.3.3.1 One-at-a-Time (OAT).....	34
2.3.3.2 Διαγράμματα συσχέτισης (Scatterplots).....	35
2.3.3.3 Μέθοδοι ανάλυσης διακύμανσης (Variance-based methods).....	35
2.3.4 Συμπεριφορά οδηγών.....	36
3. Μεθοδολογία.....	39
3.1 Γενική.....	39
3.2 Συγκεκριμενοποίηση στο δικό μας.....	43
3.2.1 Συλλογή δεδομένων.....	43
3.2.2 Μαθηματικό μοντέλο.....	45
3.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας.....	46
3.2.4 Εκτέλεση εφαρμογής.....	50
4. Case study.....	53
4.1 Εισαγωγή.....	53
4.2 Επιλογή προσομοιωτή.....	54
4.3 Συλλογή δεδομένων.....	57
4.3.1 Δίκτυο.....	57
4.3.2 Περιοχές προέλευσης.....	59
4.3.3 Ασφαλείς ζώνες.....	59
4.4 Ζήτηση.....	61
4.5 Μαθηματικό μοντέλο.....	67
4.5.1 Ανάλυση ευαισθησίας.....	67
4.5.2 Μεθοδολογία κώδικα.....	71
4.5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.....	73
4.5.4 Σενάρια.....	78
5. Αποτελέσματα.....	81
5.1 Εφαρμογή εκκένωσης.....	81
5.2 Μέτρα βελτίωσης.....	84
6. Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	97

6.1 Συμπεράσματα.....	97
6.2 Προτάσεις.....	98
Αναφορές.....	101
A. Παράρτημα 1: Προγραμματιστική διαδικασία.....	109
B. Παράρτημα 2: Ανάλυση ευαισθησίας.....	117

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Συγκεντρωτική παρουσίαση των βασικότερων μελετών εκκένωσης και προσομοίωσης.....	18-22
Πίνακας 4.1: Μόνιμος πληθυσμός ανά κεντροειδές προέλευσης.....	62-63
Πίνακας 4.2: Αριθμός τουριστών σε συνθήκες αιχμής ανά κεντροειδές προέλευσης.....	63
Πίνακας 4.3: Αριθμός μόνιμου πληθυσμού σε συνθήκες αιχμής ανά κεντροειδές προέλευσης.....	63-64
Πίνακας 4.4: Συνολικός πληθυσμός σε συνθήκες αιχμής ανά κεντροειδές προέλευσης.....	64
Πίνακας 4.5: Φόρτος του πρώτου σεναρίου ανά κεντροειδές προέλευσης.....	65
Πίνακας 4.6: Φόρτος του δεύτερου σεναρίου ανά κεντροειδές προέλευσης.....	66
Πίνακας 4.7: Πίνακας προέλευσης προορισμού (O/D) του πρώτου σεναρίου.....	66
Πίνακας 4.8: Πίνακας προέλευσης προορισμού (O/D) του δεύτερου σεναρίου.....	67
Πίνακας 4.9: Εύρη και τιμές των παραμέτρων που συμμετέχουν στην ανάλυση ευαισθησίας.....	71
Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.....	76
Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.....	76
Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.....	77
Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.....	77
Πίνακας 4.14: Εύρη και τιμές των παραμέτρων που συμμετέχουν στα σεσνάρια.....	78
Πίνακας 5.1: Αριθμός διατιθέμενων μέσων μαζικής μεταφοράς ανά κεντροειδές προέλευσης.....	85
Πίνακας 5.2: Φόρτος του πρώτου σεναρίου ανά κεντροειδές προέλευσης με αξιοποίηση λεωφορείων.....	85

Πίνακας 5.3: Φόρτος του δεύτερου σεναρίου ανά κεντροειδές προέλευσης με αξιοποίηση λεωφορείων.....	86
Πίνακας 5.4: Πίνακας προέλευσης προορισμού του πρώτου σεναρίου με αξιοποίηση λεωφορείων.....	86
Πίνακας 5.5: Πίνακας προέλευσης προορισμού του δεύτερου σεναρίου με αξιοποίηση λεωφορείων.....	87
Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα εύρη του χρόνου εκκένωσης, ανά αισθητήρα και εξεταζόμενο σενάριο.....	97
Πίνακας 6.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον αριθμό των ανθρώπων που εκκενώνονται, ανά αισθητήρα και εξεταζόμενο σενάριο.....	97
Πίνακας Β.1: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.....	125
Πίνακας Β.2: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.....	126
Πίνακας Β.3: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.....	126
Πίνακας Β.4: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.....	127
Πίνακας Β.5: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου του φορτου.....	128
Πίνακας Β.6: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου του φορτου.....	128
Πίνακας Β.7: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου του φορτου.....	128
Πίνακας Β.8: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου του φορτου.....	129
Πίνακας Β.9: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της πυκνότητας.....	130
Πίνακας Β.10: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της πυκνότητας.....	130
Πίνακας Β.11: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της πυκνότητας.....	130
Πίνακας Β.12: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της πυκνότητας.....	131

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Ιδανικό σχεδιάγραμμα μιας πιθανής ανάλυσης ευαισθησίας βασισμένης σε δειγματοληψία [Saltelli, 1999].....	34
---	----

Σχήμα 3.1: Γενική μεθοδολογία κυκλοφοριακής προσομοίωσης.....	39
Σχήμα 3.2: Ορισμός στοιχείων εισόδου με βάση το σχεδιασμό.....	40
Σχήμα 3.3: Ορισμός στοιχείων εισόδου με βάση δεδομένα πραγματικού χρόνου.....	41
Σχήμα 3.4: Εξαγωγή αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	42
Σχήμα 3.5: Ανάλυση ευαισθησίας.....	46
Σχήμα 3.6: Προσαρμογή του προσομοιωτή στα δεδομένα που ορίζει το script.....	47
Σχήμα 3.7: Μέσος όρος παρατηρήσεων συναρτήσει του αριθμού των παρατηρήσεων.....	49
Σχήμα 3.8: Μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησίας.....	50
Σχήμα 3.9: Μεθοδολογία σεναρίων.....	51
Σχήμα 4.1: Επικίνδυνη ζώνη (Πηγή: OpenStreetMap).....	58
Σχήμα 4.2: Επικίνδυνη ζώνη και κατανομή κεντροειδών προέλευσης και προορισμού (Πηγή: OpenStreetMap).....	60
Σχήμα 4.3: Αριθμός οχημάτων ανά κατηγορία οχήματος.....	69
Σχήμα 4.4: Ταχύτητα ανά κατηγορία οχήματος.....	70
Σχήμα 4.5: Φόρτος ανά κατηγορία οχήματος.....	70
Σχήμα 4.6: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της επιβράδυνσης ανά αισθητήρα.....	74
Σχήμα 4.7: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας ανά αισθητήρα.....	75
Σχήμα 5.1: Χρόνος εκκένωσης του πρώτου σεναρίου (best-case scenario) συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.....	82
Σχήμα 5.2: Χρόνος εκκένωσης του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario) συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.....	83
Σχήμα 5.3: Χρόνος εκκένωσης του πρώτου σεναρίου (best-case scenario) με αξιοποίηση λεωφορείων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.....	88
Σχήμα 5.4: Χρόνος εκκένωσης του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario) με αξιοποίηση λεωφορείων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.....	89
Σχήμα 5.5: Χρόνος εκκένωσης του πρώτου σεναρίου (best-case scenario) με αντιστροφή συνδέσμων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.....	91
Σχήμα 5.6: Χρόνος εκκένωσης του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario) με αντιστροφή συνδέσμων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.....	92

Σχήμα 5.7: Χρόνος εκκένωσης του πρώτου σεναρίου (best-case scenario) με αξιοποίηση λεωφορείων και αντιστροφή συνδέσμων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.....	94
Σχήμα 5.8: Χρόνος εκκένωσης του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario) με αξιοποίηση λεωφορείων και αντιστροφή συνδέσμων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.....	95
Σχήμα A.1: Θέση της εφαρμογής Database Explorer εντός του λογισμικού Matlab.....	112
Σχήμα A.2: Δημιουργία νέου JDBC driver.....	113
Σχήμα A.3: Ρύθμιση παραμέτρων JDBC driver.....	113
Σχήμα B.1: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για τον πρώτο αισθητήρα.....	117
Σχήμα B.2: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για το δεύτερο αισθητήρα.....	117
Σχήμα B.3: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.....	118
Σχήμα B.4: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.....	118
Σχήμα B.5: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της επιβράδυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.....	118
Σχήμα B.6: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της επιβράδυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.....	119
Σχήμα B.7: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για τον πρώτο αισθητήρα.....	119
Σχήμα B.8: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για το δεύτερο αισθητήρα.....	119
Σχήμα B.9: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για τον πρώτο αισθητήρα.....	120
Σχήμα B.10: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για το δεύτερο αισθητήρα.....	120
Σχήμα B.11: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.....	120
Σχήμα B.12: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.....	121
Σχήμα B.13: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της επιβράδυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.....	121
Σχήμα B.14: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της επιβράδυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.....	121

Σχήμα Β.15: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για τον πρώτο αισθητήρα.....	122
Σχήμα Β.16: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για το δεύτερο αισθητήρα.....	122
Σχήμα Β.17: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για τον πρώτο αισθητήρα.....	122
Σχήμα Β.18: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για το δεύτερο αισθητήρα.....	123
Σχήμα Β.19: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.....	123
Σχήμα Β.20: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.....	123
Σχήμα Β.21: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της επιβράδυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.....	124
Σχήμα Β.22: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της επιβράδυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.....	124
Σχήμα Β.23: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για τον πρώτο αισθητήρα.....	124
Σχήμα Β.24: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για το δεύτερο αισθητήρα.....	125

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ακραία φυσικά ή ανθρωπογενή φαινόμενα μπορούν να παρουσιαστούν σε ποικίλες περιοχές ή χρονικές περιόδους, θέτοντας σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές και περιουσίες. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί μια αύξηση στη δεινότητα των φυσικών καταστροφών, αφού φαινόμενα όπως τυφώνες και πλημμύρες παρουσιάζονται όλο και συχνότερα, θέτοντας άμεσα τον προβληματισμό για την καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος. Τέτοια φαινόμενα ευθύνονται για την απώλεια μεγάλου αριθμού ανθρώπινων ζωών. Πιο συγκεκριμένα, 315000 ζωές χάθηκαν από το σεισμό στην Αϊτή το 2010 [O'Connor, 2012] και 230000 άνθρωποι έχασαν τη ζωή του από το τσουνάμι που προκλήθηκε στην Ινδονησία το 2004 [Paris et al. 2007]. Προκύπτει, λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη για εφαρμογή σχεδίων εκκένωσης, προκειμένου να διαχειριστούν τέτοια φαινόμενα και να διασωθούν κατά το δυνατόν οι πληττόμενοι πληθυσμοί.

1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας της εκκένωσης υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης, συναρτήσει της συμπεριφοράς των οδηγών. Η διαχείριση έκτακτων αναγκών αποτελεί ιδιαίτερα σύνθετο και ευαίσθητο ζήτημα, μιας και έχει άμεση σχέση με την επιβίωση σημαντικού αριθμού ανθρώπων. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η διεξοδική μελέτη αντίστοιχων εφαρμογών, προκειμένου να αποσαφηνιστούν κάποιες έννοιες, να μελετηθούν πιθανές μέθοδοι και εργαλεία διαχείρισης και να εντοπιστούν πεδία που μπορούν ενδεχομένως να υποστούν περαιτέρω ανάλυση. Ακόμα, πρέπει να αναπτυχθεί μία μεθοδολογία, η οποία περιλαμβάνει ένα σενάριο εκκένωσης με βάση το σχεδιασμό της εφαρμογής, πάνω στο οποίο πρόκειται να γίνει η διερεύνηση της συμπεριφοράς των οδηγών.

Τέτοια σενάρια μπορούν να παρουσιάσουν μεγάλη ποικιλομορφία, μιας και η συμπεριφορά των οδηγών ή η εμφάνιση απρόοπτων γεγονότων είναι τουλάχιστον απρόβλεπτη. Ακόμη, υπό τέτοιες συνθήκες είναι σχεδόν αδύνατο να μπορέσουν οι αρμόδιες αρχές να συλλέξουν στοιχεία, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν μελλοντικά, μιας και κύρια μέριμνα αποτελεί η κατά το δυνατόν διάσωση του συνόλου του πληττόμενου πληθυσμού. Έτσι, λόγω αδυναμίας στη συλλογή πραγματικών δεδομένων, η πειραματική εφαρμογή του εξεταζόμενου σεναρίου επιλέγεται να γίνει με χρήση του εργαλείου της προσομοίωσης, το οποίο αποτελεί βασικό εργαλείο κυκλοφοριακής ανάλυσης.

Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η περίπτωση όπου η εκκένωση του νησιού θα επιτάσσεται λόγω κάποιας φυσικής καταστροφής που θα συνδέεται με το ενεργό ηφαίστειο της περιοχής, όπως ένας σεισμός μεγάλης κλίμακας ή μία έντονη έκρηξη. Και τα δύο αυτά σενάρια ενέχουν τον κίνδυνο πρόκλησης κύματος τσουνάμι, το οποίο θα πλήξει πρώτα απ' όλα τις περιοχές της εσωτερικής πλευράς του νησιού προς την καλντέρα. Πρόκειται για δύο περιστατικά, για τα οποία αφενός δεν υπάρχει η δυνατότητα πρότερης ενημέρωσης ώστε να εφαρμοσθούν προληπτικά μέτρα, και αφετέρου θέτουν εξ ορισμού ένα χρονικό πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να αντιμετωπισθούν, προκειμένου να μην

κινδυνεύσουν ανθρώπινες ζωές. Τονίζεται εδώ ότι η εκκένωση στη συγκεκριμένη περίπτωση θα γίνει με τη χρήση μέσων μεταφοράς, είτε αυτά ανήκουν σε ιδιώτες, είτε είναι δημόσιας χρήσης.

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των οδηγών, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας σε κάποιες από τις παραμέτρους που συμμετέχουν στη διαμόρφωσή της, προκειμένου να προκύψει ο ελάχιστος δυνατός αριθμός παραμέτρων που θα εξεταστεί. Τόσο η διαδικασία αυτή, όσο και η εκτέλεση των σεναρίων πραγματοποιούνται με χρήση του μικροσκοπικού προσομοιωτή Aimsun. Ακόμη, μιας και ο αριθμός των σεναρίων και των επαναλήψεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν ξεπερνά τις δυνατότητες χειροκίνητης προσέγγισης, αξιοποιείται το λογισμικό Matlab, για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Το κίνητρο για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου θέματος αποτέλεσε η ελαφρά αύξηση της δραστηριότητας του ηφαιστείου της Σαντορίνης τα τελευταία χρόνια, η οποία εκδηλώνεται με μικροσεισμούς, μικρομετακινήσεις του εδάφους και ακόμα εντονότερα την ανύψωση της καλντέρας που προκλήθηκε κατά το χρονικό διάστημα 2011-2012, λόγω της συσσώρευσης μάγματος κάτω από την επιφάνεια της Νέας Καμένης [Parks et al. 2012]. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρχε κάποια ολοκληρωμένη μελέτη για την αντιμετώπιση μιας έκτακτης ανάγκης στην περιοχή, ενώ όποιες «αντίστοιχες» περιπτώσεις βρέθηκαν, παρουσίαζαν τεράστιες διαφορές ως προς τις παραμέτρους, με αποτέλεσμα να καθιστούν αδύνατη τη χρήση τους ως υποδείγματα. Συνεπώς, ήταν επιτακτική η ανάγκη κάλυψης του κενού αυτού, η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω συζήτηση και δημιουργία ακόμα πιο ολοκληρωμένων ερευνών και σχεδίων δράσης. Όλοι αυτοί οι λόγοι οδήγησαν στην ανάπτυξη του εν λόγω αντικειμένου, για την κατανόηση του οποίου απαιτείται ο προσδιορισμός και η αποσαφήνιση κάποιων βασικών εννοιών.

1.2 Δομή

Η παρούσα διπλωματική αποτελείται από 6 κεφάλαια και 2 παραρτήματα. Ειδικότερα, το *πρώτο* κεφάλαιο περιλαμβάνει την εισαγωγή, η οποία απαρτίζεται από το σκοπό και τη δομή της διπλωματικής εργασίας.

Το *δεύτερο* κεφάλαιο αφορά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, πάνω στην οποία βασίστηκε η παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει την παρουσίαση και ανάλυση όλων εκείνων των μελετών που αποτέλεσαν το υπόβαθρο για την ανάπτυξη όλων των βασικών πυλώνων αυτής της μελέτης, δηλαδή την εκκένωση, την προσομοίωση, αλλά και την ανάλυση ευαισθησίας.

Το *τρίτο* κεφάλαιο περιλαμβάνει τόσο τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται σε αντίστοιχες περιπτώσεις μελετών, αλλά και αυτή που διαμορφώθηκε συναρτήσει των αναγκών της παρούσας μελέτης και με βάση την οποία αναπτύχθηκε η εξεταζόμενη εφαρμογή.

Στο *τέταρτο* κεφάλαιο, αναπτύσσεται διεξοδικά η εφαρμογή που εξετάζεται. Συγκεκριμένα, αναλύονται όλα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει, και τα οποία αφορούν τη

συλλογή των δεδομένων, το μαθηματικό μοντέλο κλπ. Ακόμη, παρουσιάζονται τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται, αλλά και τα σενάρια που πρόκειται να εξεταστούν.

Στο *πέμπτο* κεφάλαιο, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εξέταση των σεναρίων της εφαρμογής. Ακόμη, προτείνονται πιθανά βελτιωτικά μέτρα, για την αύξηση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας. Τα μέτρα αυτά εξετάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή τους.

Στο *έκτο* κεφάλαιο, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών που διεξάχθηκαν, αλλά και την αξιολόγηση των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν και αναφέρονται ενδεικτικές προτάσεις για περαιτέρω ανάλυση αυτής ή αντίστοιχης μελέτης.

Στο *Παράρτημα 1*, αναλύεται η προγραμματιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση όλων των εξεταζόμενων σεναρίων.

Στο *Παράρτημα 2*, παρουσιάζονται διεξοδικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο ακόλουθο κεφάλαιο παρουσιάζεται με επεξηγηματικό τρόπο το θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο βασίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία και αποτελεί τη βάση της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε στην πράξη. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται σε θέματα που σχετίζονται με την προετοιμασία, τη διαχείριση του οδικού δικτύου και την ανάλυση ενός σχεδίου δράσης που απαιτούνται για μια έκτακτη ανάγκη, καθώς επίσης και σε θέματα που αναλύουν τη συμπεριφορά του δικτύου και των μετακινουμένων, σε τέτοιες περιπτώσεις. Παράλληλα, παρουσιάζεται θεματολογία, που αφορά τη χρήση διαφόρων επιπέδων προσομοίωσης για την αντιμετώπιση έκτακτων αναγκών και τα χαρακτηριστικά τους. Τέλος, παρατίθενται άρθρα και επιστημονικές αναφορές που ασχολούνται με την ανάλυση ευαισθησίας και τους τομείς στους οποίους μπορεί αυτή να αξιοποιηθεί.

2.1 ΕΚΚΕΝΩΣΗ

Η εκκένωση μιας περιοχής σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (emergency evacuation), η οποία αποτελεί το ένα από τα τρία βασικά μέρη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι ένα ερευνητικό πεδίο με πολλές προεκτάσεις και εφαρμογές. Παρουσιάζει πολλές διαστάσεις και μπορεί να αντιμετωπισθεί με πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις. Για το λόγο αυτό, ακολουθεί η παρουσίαση βασικών εννοιών και χαρακτηριστικών της εκκένωσης, παραμέτρων που ορίζουν το σχεδιασμό, καθώς και μελετών διαχείρισης περιπτώσεων εκκένωσης.

2.1.1 Γενικά

Πολλές φορές, φυσικές ή μη καταστροφές, όπως τυφώνες [Fu and Wilmot, 2004], σεισμοί [Naghdi et al. 2008], πλημμύρες [Lim et al. 2013], πυρκαγιές [Korhonen and Hostikka, 2009] ή βιομηχανικά ατυχήματα [Soffer et al. 2008], μπορεί να πλήξουν κατοικημένες περιοχές και να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Απαιτείται, λοιπόν, η εκκένωση των πληττόμενων περιοχών και η μετακίνηση του πληθυσμού σε ασφαλείς περιοχές, προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος. Με τον όρο εκκένωση, λοιπόν, χαρακτηρίζεται η άμεση και εξαναγκασμένη απομάκρυνση από μία χωρική μονάδα, ώστε να μην υπάρξουν ανθρώπινες απώλειες και τραυματισμοί από μία επικείμενη καταστροφή. Είναι σαφές ότι η φύση του προβλήματος επιτάσσει αμεσότητα στην αντιμετώπιση του, καθώς η εξέλιξη του μπορεί να είναι ραγδαία, όπως επίσης και προσδιορισμό των παραμέτρων που το διέπουν, λόγω του μεγάλου εύρους περιστατικών που καλύπτει και τα οποία μπορεί να διαφέρουν αισθητά μεταξύ τους. Ανάλογα με την έκταση που πλήττει η καταστροφή, προκύπτουν δύο τελείως διαφορετικά προβλήματα, αυτό της εκκένωσης κτιρίων και αυτό της εκκένωσης ευρύτερων περιοχών ή και πόλεων. Έτσι, περιστατικά που μπορεί να χρήζουν εκκένωσης είναι για παράδειγμα η απειλή για ύπαρξη βόμβας σε ένα κτίριο, μία πυρκαγιά περιορισμένης έκτασης ή μια έντονη φυσική καταστροφή, όπως ένας τυφώνας, που μπορεί να επέλθει σε μία περιοχή ή πόλη. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η αντιμετώπιση των περιστατικών αυτών απαιτεί τελείως διαφορετικό χειρισμό ανά περίπτωση, καθώς τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητές τους ποικίλλουν και διαμορφώνουν μία τελείως

διαφορετική κατάσταση κάθε φορά. Για παράδειγμα, στην εκκένωση κτιρίων, οι εναλλακτικές διαδρομές διαφυγής είναι σαφώς περιορισμένες από την εκκένωση μεγαλύτερων περιοχών, όπου οι άνθρωποι καλούνται να επιλέξουν τη διαδρομή που θα ακολουθήσουν.

Σύμφωνα με τον Goldblatt (2004), μία διαδρομή εκκένωσης υποκινείται από την ανάγκη απομάκρυνσης από μια περιοχή σε κίνδυνο, με σκοπό την προσωπική ασφάλεια ή επιβίωση. Πρόκειται για μία μετακίνηση απρογραμματίστη και απρόσμενη, με μη οικείο προορισμό και πιθανώς μη οικεία διαδρομή, που απαιτεί προετοιμασία και τη λήψη μέτρων πριν την εκτέλεσή του. Η εκκένωση, λοιπόν, ενός χώρου σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης απαιτεί ένα σχέδιο εκκένωσης, προκειμένου να επιτευχθεί η άμεση, ασφαλής και αποτελεσματική απομάκρυνση των ανθρώπων, προτού υπάρξει κίνδυνος για τη ζωή τους ή τη σωματική τους ακεραιότητα. Το σχέδιο αυτό συγκροτείται αναφορικά με το διαθέσιμο χρόνο, ο οποίος εξαρτάται από την επικινδυνότητα της εκάστοτε περίπτωσης, και προσαρμόζεται στα διαθέσιμα μέσα και το κοινό στο οποίο απευθύνεται. Όσο πιο πιθανή και λιγότερη επικίνδυνη είναι η έκτακτη ανάγκη που παρουσιάζεται, τόσο πιο εύκολο να προβλεφθούν οι διάφορες συνιστώσες, ώστε να σχεδιαστεί ο τρόπος διαχείρισής της. Για παράδειγμα, η αντιμετώπιση μιας τοποθέτησης βόμβας ή μιας φωτιάς σε ένα κτίριο είναι εύκολο να οργανωθεί, καθώς απαιτούνται πιο απλές μέθοδοι και υπάρχουν πολλές αντίστοιχες περιπτώσεις να μελετηθούν και να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπα. Έτσι, η λήψη μέτρων αποτελεί πλέον ουσιαστικό κομμάτι στη δομή και την τοποθέτηση κατασκευών, χωρίς να χρειάζεται ιδιαίτερη ανάλυση και εμβάθυνση.

Από την άλλη, αν η έκτακτη ανάγκη που παρουσιάζεται αφορά μία έντονη φυσική καταστροφή, η οποία επηρεάζει μία μεγάλη περιοχή, είναι πολύ πιο δύσκολο να προβλεφθούν όλες οι παράμετροι που θα καθορίσουν το διαθέσιμο χρόνο για εκκένωση, αλλά και το σχέδιο που θα αξιοποιηθεί. Επίσης, υπάρχουν ελάχιστες ή και καθόλου αντίστοιχες περιπτώσεις, που να μπορούν να αποτελέσουν υποδείγματα, καθώς, ακόμα και όταν υπάρχουν, διαφέρουν ως προς τις παραμέτρους που τις διέπουν. Προκειμένου, λοιπόν, να προβλεφθεί η αποτελεσματικότερη αντιμετώπισή τους, απαιτείται η χρήση μιας μεθόδου, μέσω της οποίας μπορούν να αναπαρασταθούν όλες οι συνιστώσες και να μελετηθούν όλα τα πιθανά σενάρια.

Ο σχεδιασμός της εκκένωσης πραγματοποιείται με τη χρήση σύγχρονων εργαλείων όπως τα μοντέλα εκκένωσης, που επιτρέπουν την εκτίμηση παραμέτρων όπως ο χρόνος εκκένωσης και οι ασφαλέστερες διαδρομές που θα οδηγήσουν σε ασφαλείς περιοχές. Πρόκειται για μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί τη συλλογή πολλών διαφορετικών δεδομένων και τον κατάλληλο συνδυασμό τους σε εναλλακτικές μεθοδολογίες. Οι μεθοδολογίες αυτές προκύπτουν από την πληθώρα διαστάσεων και προσεγγίσεων από τις οποίες μελετάται το πρόβλημα της εκκένωσης. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να αναλυθούν οι παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν προκειμένου να σχεδιαστεί η εκκένωση σε μια περιοχή. Επίσης, θα πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη μεθοδολογία ανάπτυξης της εκκένωσης, αλλά και να μελετηθεί ο τρόπος εφαρμογής της, ώστε αυτή να εξελιχθεί επιτυχώς στην περίπτωση που εφαρμοστεί για κάποια έκτακτη ανάγκη.

2.1.2 Τεχνικές εκκένωσης

Οι τρόποι διαχείρισης μιας εκκένωσης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που αυτή υλοποιείται και τη χρονική στιγμή που ορίζεται το σχέδιο δράσης. Υπάρχουν, λοιπόν, δύο βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση περιστατικών εκκένωσης. Η πρώτη αφορά τον offline σχεδιασμό με προγραμματισμό διαδρομής (route-schedule planning), όπου προσδιορίζονται κάποιες βασικές βιβλιοθήκες σχεδίων δράσης, έτσι ώστε να καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων που μπορεί να παρουσιαστούν. Χρησιμοποιείται συνήθως όταν ένα πρόβλημα είναι πολυδιάστατο και επιτρέπει πολλές και διαφορετικές λύσεις, ενώ παράλληλα η φύση του δεν χρήζει αντιμετώπισης εντός ενός πολύ περιορισμένου χρονικού πλαισίου. Έτσι, μόλις το πρόβλημα προκύψει, οι αρμόδιες αρχές ανατρέχουν στις βιβλιοθήκες του σχεδιασμού που έχει προηγηθεί, επιλέγουν την περίπτωση αυτή που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες του και με βάση αυτή οργανώνουν τα μέτρα που θα ληφθούν για την αντιμετώπισή του.

Πολλές φορές όμως, το πρόβλημα που προκύπτει, εξελίσσεται ραγδαία και δεν επιτρέπει τη σπατάλη χρόνου ώστε να συζητηθεί και να επιλεγεί το σχέδιο δράσης που πρέπει να εφαρμοσθεί. Απαιτείται, λοιπόν, να έχει προηγηθεί η εξέταση κάποιων σεναρίων ανάλογα με την περίπτωση που μπορεί να προκύψει και να έχουν εκτιμηθεί σε κάποιο βαθμό τα αποτελέσματά τους. Το ρόλο αυτό καλείται να παίξει η δεύτερη τεχνική, που είναι η online διαχείριση της κυκλοφορίας, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις υλοποιείται μέσω της προσομοίωσης (traffic assignment-simulation). Με βάση αυτές τις δύο κατηγορίες, υπάρχουν πολλά διατιθέμενα εργαλεία για τη διαχείριση μιας εκκένωσης, που χρησιμοποιούν διαφορετικές προσεγγίσεις. Πρόκειται για εργαλεία που επικεντρώνονται σε συγκεκριμένα στάδια ή χαρακτηριστικά της εκκένωσης, όπως η συμπεριφορά των οδηγών ή ο χρόνος έναρξης της εκκένωσης, και συνήθως χρησιμοποιούνται για να εξειδικεύσουν μία από τις βασικές τεχνικές. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις αυτές με τα χαρακτηριστικά τους και η αλληλεπίδρασή τους με το σχεδιασμό.

2.1.2.1 Εκκένωση με διαχείριση κυκλοφορίας

Η προσέγγιση της διαχείρισης κυκλοφορίας με προσομοίωση εκτελεί μια αναπαράσταση των μετακινήσεων με στοχαστικά μοντέλα, χρησιμοποιώντας εργαλεία προσομοίωσης, όπως τα Aimsun [Barceló, 2002], DynaMIT [Ben-Akiva et al. 2010], TransModeler [Caliper, 2010] κλπ. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στη διαμόρφωση της ζήτησης, όπως αυτή προκύπτει από τα μητρώα Πρόέλευσης-Προορισμού. Παράλληλα, υπάρχουν μοντέλα, όπως τα CLEAR [Loudoun County, Office of Evacuation Management], NetSim [Tetcos, 2002] κ.α. τα οποία συνδυάζουν ένα σύνολο υπολογιστικών προγραμμάτων, προκειμένου να υπολογίσουν το χρόνο εκκένωσης και να δημιουργήσουν σχέδια εκκένωσης μιας περιοχής υπό διαφορετικές συνθήκες, όπως οι καιρικές συνθήκες ή η ώρα της μέρας. Τα μοντέλα αυτά επιτρέπουν την εισαγωγή και εκτέλεση πειραμάτων με παραμέτρους, όπως διαχείριση κυκλοφορίας, εναλλακτικές διαδρομές και προορισμούς ή δείκτες συμμόρφωσης των οδηγών [Chiu et al. 2005]. Ακόμη, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα εκκένωσης, όπως το DYNEV [KLD Associates], από αρχές όπως η αμερικανική Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαχείρισης Εκτάκτων Αναγκών (FEMA), για τη δημιουργία σχεδίων εκκένωσης σε περιοχές που πλήττονται συχνά από φυσικές ή ανθρωπογενείς καταστροφές. Επίσης, έχει

αναπτυχθεί ένα μοντέλο πρόβλεψης και εκτίμησης των κυκλοφοριακών συνθηκών για χρήση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, το οποίο εφαρμόστηκε στην εκκένωση της κεντρικής περιοχής της πόλης της Βοστώνης [Balakrishna et al. 2008].

Τα μοντέλα αυτά, μέσω των πειραμάτων που επιτρέπουν, στοχεύουν στον υπολογισμό μεγεθών όπως ο συνολικός χρόνος εκκένωσης, αλλά και άλλων κυκλοφοριακών μεγεθών, όπως η κυκλοφοριακή ροή, η μέση ταχύτητα, τα μήκη ουρών κλπ. Έτσι, πολλά μοντέλα έχουν παρουσιαστεί, προκειμένου να προσδιοριστούν οι συνθήκες που επικρατούν όταν ο όγκος της ζήτησης βρίσκεται στο μέγιστο, και συνεπώς να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται για την εκκένωση της επικίνδυνης ζώνης [Li et al. 2014]. Μια τυπική προσέγγιση που χρησιμοποιούν τα μοντέλα αυτά είναι η χρήση των λωρίδων αντίθετης κατεύθυνσης, προκειμένου να αυξηθεί η κυκλοφοριακή ικανότητα του δικτύου και συνεπώς, να μειωθεί ο συνολικός χρόνος εκκένωσης της πληττόμενης περιοχής [Min and Lee, 2013]. Ακόμη, έχουν αναπτυχθεί πολλές μελέτες που επικεντρώνονται στη διαχείριση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα, υπολογίζοντας τους φόρτους του οδικού δικτύου και υποδεικνύοντας τις βέλτιστες διαδρομές για κάθε λωρίδα [Cova and Johnson, 2003].

Κάποια από τα μοντέλα που αναφέρθηκαν, όπως τα CLEAR [Moeller et al. 1982] και DYNEV [Urbanik et al. 1988], χρησιμοποιούν μια στατική προσέγγιση της διαχείρισης κυκλοφορίας. Αυτό σημαίνει ότι εκτελούν την προσομοίωση με την αρχική υπόθεση ότι, καθ' όλη τη διάρκεια της εκκένωσης, οι κυκλοφοριακές συνθήκες παραμένουν σταθερές σε όλο το δίκτυο. Κάτι τέτοιο είναι εμφανές ότι δεν μπορεί να ισχύει στην πραγματικότητα, και μάλιστα υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης και εκκένωσης του δικτύου, όπου οι χρόνοι εκκένωσης, για παράδειγμα, μπορεί να διαφέρουν από τους υπολογισμένους λόγω αστάθμητων παραγόντων. Συνεπώς, τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν κάποιους περιορισμούς σε ότι αφορά τη διαχείριση και επίλυση περιστατικών με χρονικά μεταβαλλόμενους φόρτους. Έτσι, προτιμάται η χρήση δυναμικών μοντέλων διαχείρισης κυκλοφορίας σε τέτοιες περιπτώσεις, και μάλιστα σε εφαρμογές όπου αξιολογείται η επίπτωση των κυκλοφοριακών συνθηκών σε μεγέθη όπως η συμπεριφορά των οδηγών κατά την εκκένωση.

Ακόμη, τα μοντέλα διαχείρισης κυκλοφορίας πραγματοποιούν υπολογισμούς για να προσδιορίσουν τα μήκη ουρών που θα σχηματιστούν, προκειμένου να εκτιμηθεί η επίπτωσή τους σε κυκλοφοριακά μεγέθη, όπως η κυκλοφοριακή ικανότητα του δικτύου. Ωστόσο, παρά τα προνόμια και την ευελιξία που προσφέρει η δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας, είναι πιθανό να χρειαστεί πολύς χρόνος για την ολοκλήρωση της εκκένωσης σε ένα μεγάλο δίκτυο, λόγω των πολλών ανακατατάξεων και διαφοροποιήσεων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης στο δίκτυο.

2.1.2.2 Εκκένωση με προγραμματισμό διαδρομής

Η προσέγγιση με προγραμματισμό διαδρομής ανάγει το πρόβλημα το εκκένωσης σε πρόβλημα διαχείρισης φόρτου, καθώς έχει ως αντικείμενο τον ορισμό προγραμματισμένων διαδρομών προέλευσης-προορισμού. Έτσι, ο σχεδιασμός της εκκένωσης αφορά ουσιαστικά την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής (βέλτιστη μαθηματική λύση) για κάθε επιμέρους φόρτο του δικτύου, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους επιλογής διαδρομής και μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού [Shekhar et al. 2012].

Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιπτώσεις μεσαίων δικτύων ή και μεγαλύτερων, όταν όμως το πρόβλημα δεν επικεντρώνεται στη βέλτιστη λύση, αλλά στη δημιουργία ενός σχεδίου εκκένωσης στον ελάχιστο χρόνο. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς σε ότι αφορά τη χρονική παράμετρο, καθώς καλείται ο χρήστης να ορίσει ένα ανώτατο όριο του χρόνου για την ολοκλήρωση της εκκένωσης, το οποίο είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί, ιδιαίτερα για ένα μεγάλο και σύνθετο δίκτυο με αυξημένη ζήτηση [Lu et al. 2005].

Μια τεχνική που χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στον προγραμματισμό διαδρομής είναι η χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), για την ανάλυση σεναρίων εκκένωσης. Μέσω των συστημάτων αυτών, διευκολύνεται τόσο ο προσδιορισμός των διαδρομών εκκένωσης, όσο και το μέγεθος του πληθυσμού που πλήττεται, αλλά και η χωρική αλληλεπίδρασή τους, που οδηγεί σε χρήσιμες εκτιμήσεις [Pal et al. 2002]

2.1.2.3 Εκκένωση με βάση το χρόνο έναρξης

Μια διαφορετική μεθοδολογία εκκένωσης είναι αυτή με βάση το χρόνο έναρξης, όπου σχεδιάζεται και αξιολογείται η ταυτόχρονη ή σε στάδια εκκένωση μιας περιοχής. Στην περίπτωση της ταυτόχρονης εκκένωσης, οι αρχές ενημερώνουν ταυτόχρονα τον πληθυσμό για τη λήψη της απόφασης για εκκένωση. Έτσι, μόλις περάσει ο χρόνος αντίδρασης, οι κάτοικοι ξεκινούν να εκκενώνουν την περιοχή όλοι μαζί ταυτόχρονα. Η τεχνική αυτή οδηγεί πολλές φορές σε έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση, ειδικά σε περίπτωση αστικών περιοχών, όπου η πυκνότητα είναι υψηλή. Όταν όμως πρόκειται για περιοχή όπου το ποσοστό κατοχής οχημάτων ανά νοικοκυριό είναι μικρό, τότε αυτή η τεχνική μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, ίσως και περισσότερο από την εκκένωση κατά στάδια.

Από την άλλη, η εκκένωση κατά στάδια πραγματοποιείται διαχωρίζοντας την περιοχή εκκένωσης σε ζώνες και οι κάτοικοι διαφεύγουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, ανάλογα με τη ζώνη που ανήκουν. Οι ζώνες αυτές ορίζονται και εκκενώνονται ανάλογα με το βαθμό επικινδυνότητας. Πρώτα, εκκενώνεται η ζώνη που πλήττεται περισσότερο και στη συνέχεια ακολουθούν και οι υπόλοιπες, με κριτήριο την εγγύτητα ως προς την πηγή της καταστροφής. Η τεχνική αυτή προτιμάται όταν η περιοχή εκκένωσης παρουσιάζει έντονο αστικό χαρακτήρα, με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, προκειμένου να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα το οδικό δίκτυο, χωρίς να δημιουργηθεί έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση [Zhan and Chen, 2008].

2.1.2.4 Εκκένωση με βάση τη συμπεριφορά του οδηγού

Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότερες μελέτες προσανατολίζονται στη διαχείριση της εκκένωσης με βάση τη συμπεριφορά του οδηγού. Κάτι τέτοιο ήταν σχεδόν ανέφικτο με τα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής που χρησιμοποιούνταν, καθώς ήταν πολύ δύσκολη η εκτίμηση της συμπεριφοράς μεμονωμένων οχημάτων. Με την ανάπτυξη, όμως, των agent-based μοντέλων, κατέστη εύκολη η προσομοίωση μεμονωμένων συμπεριφορών και η μελέτη της επίδρασής τους στο δίκτυο και την εκκένωση εν γένει. Παράλληλα, τα μοντέλα δυναμικής διαχείρισης της κυκλοφορίας επιτρέπουν το σχεδιασμό με βάση την οδηγική συμπεριφορά και την εκτίμηση των κυκλοφοριακών επιπτώσεων [Chiu et al. 2005].

Η μεθοδολογία αυτή λαμβάνει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις των οχημάτων μεταξύ τους και με το περιβάλλον και με βάση αυτές γίνεται και η λήψη των αποφάσεων. Τα agent-based μοντέλα επιτρέπουν τη συλλογική λήψη των αλληλεπιδράσεων αυτών και, με βάση τη γενική συμπεριφορά, τον προσδιορισμό του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εκκένωσης [Zhang et al. 2008].

Οι αλληλεπιδράσεις αυτές είναι όλο και πιο εύκολο να μελετηθούν, μέσω των προηγμένων συστημάτων προσομοίωσης, τα οποία επιτρέπουν την αναπαράσταση του κυκλοφοριακού περιβάλλοντος, αλλά και την παραμετροποίηση κανόνων οδήγησης.

2.1.2.5 Άλλες τεχνικές εκκένωσης

Πέρα από τις βασικές μεθοδολογίες διαχείρισης εκκένωσης που αναφέρθηκαν παραπάνω, κατά καιρούς έχουν προταθεί και άλλες τεχνικές, οι οποίες λειτουργούν κατά κύριο λόγο συμπληρωματικά ως προς τις βασικές. Οι προσεγγίσεις αυτές αφορούν τη θέση των ζωνών ασφαλείας που θα καταφύγουν οι άνθρωποι, την επιλογή της ζώνης ασφαλείας με χωρικά και χρονικά κριτήρια, αλλά και την συμπεριφορά των ανθρώπων που εκκενώνουν την περιοχή.

Οι θέσεις των ζωνών ασφαλείας αποτελούν πολύ σημαντικό κομμάτι του σχεδιασμού, με αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί μελέτες για τον προσδιορισμό των κατάλληλων θέσεων των ζωνών ασφαλείας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος εκκένωσης. Ακόμη, πολλές φορές, επιχειρείται η σύνδεση του σχεδίου εκκένωσης με το πρόβλημα της συνδυασμένης κατανομής των μετακινήσεων και της διαχείρισής τους (Combined trip distribution and assignment, CDA), προκειμένου να διαφύγει ο πληθυσμός μέσω ενός δικτύου, ελαχιστοποιώντας το χρόνο εκκένωσης. Ο συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών οδηγεί σε μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση, όπου η επιλογή των ζωνών ασφαλείας και των διαδρομών είναι λιγότερο αυστηρές και οι αποφάσεις του πληθυσμού λαμβάνονται με συνδυασμένη κατανομή των μετακινήσεων (CDA). Έτσι, οι αποφάσεις των αρχών περιορίζονται σε χωρικές και το πρόβλημα ανάγεται σε προγραμματιστικό πρόβλημα δύο επιπέδων [Kongsomsaksakul et al. 2005].

2.1.3 Παράμετροι σχεδιασμού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κάθε περίπτωση εκκένωσης διέπεται από κάποιες παραμέτρους. Είναι σαφές ότι, χωρίς αυτές, ο σχεδιασμός της εκκένωσης θα ήταν αδύνατος. Απαιτείται λοιπόν ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών, καθώς αποτελούν όλα εκείνα τα στοιχεία που καθορίζουν το εκάστοτε πρόβλημα εκκένωσης και αλληλεπιδρούν με το σχεδιασμό της. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν το οδικό δίκτυο, τον πληθυσμό και το είδος της έκτακτης ανάγκης που επιβάλλει την εκκένωση. Πιο συγκεκριμένα, τα απαιτούμενα στοιχεία είναι:

- Οδικό δίκτυο και πληθυσμιακά στοιχεία.
 - Λεπτομερής περιγραφή του οδικού δικτύου και των συστημάτων διαχείρισης της κυκλοφορίας.
 - Πραγματική κυκλοφοριακή ικανότητα.

- Προσδιορισμός και αναλυτική κατανομή του πληθυσμού που θα εκκενωθεί ανά ώρα της μέρας και ανά εποχή.
 - Περιγραφή του τρόπου που αυξάνεται η ζήτηση για μετακίνηση.
 - Διαθεσιμότητα και επάρκεια των μέσων μαζικής μεταφοράς.
 - Δυναμικότητα και ποσοστό πληρότητας των οχημάτων.
- Ζώνη σχεδιασμού εκκένωσης και ασφαλείς ζώνες.
 - Προσδιορισμός της ζώνης εκκένωσης.
 - Προσδιορισμός των ασφαλών ζωνών.
 - Προσδιορισμός των διαδρομών που θα ακολουθηθούν για την εκκένωση.
- Χρόνος αντίδρασης και εκτιμώμενος χρόνος εκκένωσης.
 - Χρόνος λήψης της απόφασης για εκκένωση από τις αρχές.
 - Χρόνος προετοιμασίας, εκκένωσης και μετακίνησης του πληθυσμού σε ασφαλείς ζώνες.
- Ειδικές συνθήκες.
 - Ειδικές συνθήκες λόγω της φύσης του συμβάντος που επιβάλλει την εκκένωση.
 - Ειδικές καιρικές συνθήκες που μπορεί να δυσχεραίνουν την εκκένωση.
 - Ανθρώπινη συμπεριφορά.
 - Έκτακτα συμβάντα.

2.1.3.1 Οδικό δίκτυο και πληθυσμιακά στοιχεία

Προκειμένου να σχεδιαστεί η εκκένωση μιας περιοχής, απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός του οδικού δικτύου που την εξυπηρετεί, ανεξάρτητα από το ποια μέθοδος θα ακολουθηθεί για το σχεδιασμό της. Έτσι, τα στοιχεία που είναι απαραίτητα είναι η κατηγορία κάθε δρόμου του δικτύου, η κατεύθυνσή του, ο αριθμός των λωρίδων του καθώς και η ύπαρξη ή μη λωρίδων ειδικών χρήσεων, όπως λεωφορειολωρίδες, λωρίδες έκτακτης ανάγκης κλπ. Ακόμη, πρέπει να υπάρχει πληροφορία για κάθε είδους σήμανση που μπορεί να εμποδίσει την ελεύθερη κίνηση των οχημάτων, όπως φωτεινοί σηματοδότες, πινακίδες “STOP” ή σήματα παραχώρησης προτεραιότητας. Εφόσον είναι γνωστά όλα αυτά τα στοιχεία, δίνεται η δυνατότητα στις αρχές να λάβουν μέτρα για τη μείωση του χρόνου εκκένωσης, παρεμβαίνοντας στις κυκλοφοριακές ρυθμίσεις που ισχύουν σε κανονικές συνθήκες κίνησης. Έτσι, επιτρέποντας την ελεύθερη διέλευση στους φωτεινούς σηματοδότες ή απλά ενημερώνοντας εγκαίρως τους οδηγούς μέσω δυναμικών φωτεινών επιγραφών για τις κυκλοφοριακές συνθήκες, είναι δυνατή η επίτευξη της εκκένωσης σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Ακόμη, μπορεί να αποφασιστεί να αλλάξει η κατεύθυνση κάποιας ή κάποιων λωρίδων για την καλύτερη εξυπηρέτηση του προς εκκένωση πληθυσμού ή για την ευκολότερη πρόσβαση των τοπικών αρχών στην περιοχή που εκκενώνεται. Έχοντας, λοιπόν, τόσο λεπτομερή απεικόνιση του δικτύου, καθίσταται πολύ πιο εύκολος ο σχεδιασμός της εκκένωσης και η χρήση εργαλείων μικροσκοπικής προσομοίωσης, που αξιοποιούν ιδιαίτερα τέτοια στοιχεία [Cova and Johnson, 2001].

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας που επιδρά στην εκκένωση είναι η δυναμικότητα του οδικού δικτύου, με την έννοια ότι τα χαρακτηριστικά του πιθανώς να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Για παράδειγμα, μπορεί κάποια σημεία του οδικού δικτύου να καταστραφούν από κάποια φυσική αιτία (π.χ. κατολίσθηση) ή να μην είναι προσβάσιμα από μια χρονική στιγμή και μετά λόγω κάποιου ατυχήματος [Pel et al. 2010]. Εφόσον υπάρχει λεπτομερής πληροφορία για τα χαρακτηριστικά του, τα περισσότερα μοντέλα εκκένωσης είναι σε θέση να συμπεριλάβουν αυτή τη μεταβολή στην κυκλοφοριακή ροή και να προσαρμόσουν στοιχεία όπως η ταχύτητα ή η ικανότητα του δρόμου.

Σε ότι αφορά τον πληθυσμό, είναι εμφανές ότι αποτελεί καθοριστικό παράγοντα, αφού ο σχεδιασμός της εκκένωσης πραγματοποιείται συναρτήσει του αριθμού των ατόμων που πρέπει να εκκενώσουν την περιοχή. Ο αριθμός αυτός εξαρτάται από την έκταση της προς εκκένωση περιοχής, καθώς και από το βαθμό ανάπτυξής της [Barett et al, 2000]. Ενίστε, απαιτείται και πληροφορία για επιπλέον δημογραφικά χαρακτηριστικά του πληθυσμού και πως αυτά διαφοροποιούνται [Cutter et al. 2000].

Πιο αναλυτικά, το βασικότερο χαρακτηριστικό που χρησιμοποιεί ο μελετητής είναι ο συνολικός πληθυσμός ή η πυκνότητά του, ενώ παράλληλα πολλές φορές κρίνονται απαραίτητα στοιχεία όπως ο αριθμός των νοικοκυριών, οι ηλικιακές ομάδες, το βιοτικό και μορφωτικό επίπεδο των κατοίκων, η κατανομή τους μέσα στη διάρκεια της μέρας ή του χρόνου, η οικονομική κατάσταση του πληθυσμού, το ποσοστό κατοχής οχημάτων και άλλα στοιχεία που επιδρούν στο σχεδιασμό της εκκένωσης [Chakraborty et al. 2004]. Είναι πολύ σημαντικό στοιχείο η κατανομή του πληθυσμού κατά τη διάρκεια της μέρας, η οποία εξαρτάται από το είδος της περιοχής εκκένωσης. Για παράδειγμα, σε μια περιοχή γενικής κατοικίας, ο πληθυσμός ενδέχεται να είναι μεγαλύτερος κατά τη διάρκεια της μέρας, ενώ σε μια περιοχή αμιγούς κατοικίας είναι σημαντικά μεγαλύτερος κατά τη νύχτα [Peeta and Hsu, 2009]. Η κατανομή αυτή επηρεάζει άμεσα τον τρόπο διεξαγωγής της εκκένωσης, καθώς και τον αριθμό των οχημάτων που απαιτούνται για την απομάκρυνση του πληθυσμού.

Όλα τα παραπάνω πληθυσμιακά στοιχεία έχουν καθοριστικό ρόλο για μια μελέτη εκκένωσης, καθώς είναι αυτά που οδηγούν στον ορισμό της ζήτησης και τη δημιουργία του μητρώου Προέλευσης-Προορισμού. Το μητρώο αυτό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία εισόδου της εκκένωσης, αλλά μπορεί και να οριστεί με τη χρήση μοντέλων κατανομής διαδρομών. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να εκτιμηθεί η κατανομή του πληθυσμού σε ασφαλείς περιοχές.

2.1.3.2 Ζώνη σχεδιασμού εκκένωσης και ασφαλείς ζώνες

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κατά το σχεδιασμό της εκκένωσης είναι ο ορισμός των ορίων της περιοχής που χρειάζεται να εκκενωθεί. Η ζώνη αυτή ονομάζεται ζώνη σχεδιασμού εκκένωσης και εξαρτάται απόλυτα από το φαινόμενο που μελετάται. Έτσι, ανάλογα με τις απαιτήσεις του σεναρίου που εξετάζεται, καθορίζεται η ζώνη εκκένωσης. Φυσικά, η ζώνη αυτή παρουσιάζει προβλήματα στον ορισμό της, καθώς δεν είναι πάντα εύκολο να εκτιμηθεί η περιοχή επίδρασης και η εξέλιξη των επιπτώσεων μιας καταστροφής, ιδίως όταν το φαινόμενο είναι μεγάλης κλίμακας. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά του φαινομένου, αλλά και οι πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν στη γύρω περιοχή καθ'

όλη τη διάρκεια της εκκένωσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον ορισμό της ζώνης εκκένωσης.

Αφού οριστεί η περιοχή εκκένωσης, είναι πολύ σημαντικό να εξετασθεί συναρτήσει του οδικού δικτύου, καθώς πρόκειται για αλληλένδετα στοιχεία, τα οποία αν δεν λειτουργούν σε αρμονία, μπορούν να εμποδίσουν την ομαλή και έγκαιρη εκκένωση και να κινδυνέψουν ανθρώπινες ζωές. Πιο συγκεκριμένα, αν η ζήτηση είναι δυσανάλογα μεγάλη για το οδικό δίκτυο που διατίθεται, η εκκένωση είναι αδύνατη. Προκειμένου να λυθεί αυτό το πρόβλημα, μπορούν να καθοριστούν υποπεριοχές στη ζώνη σχεδιασμού και να υπολογιστεί η ζήτηση ανά λωρίδα με τη χρήση ειδικών μοντέλων [Church and Cova, 2000]. Με τον τρόπο αυτό, είναι εύκολος ο εντοπισμός των περιοχών που πιθανότατα θα παρουσιάσουν δυσκολίες κατά τη εκκένωση και μπορεί να καθοριστεί πιο στοχευμένα η ζώνη εκκένωσης.

Αφού καθοριστεί η ζώνη εκκένωσης, ακολουθεί η επιλογή των ζωνών ασφαλείας (safe zones) που θα οδηγηθεί ο πληθυσμός μετά την απομάκρυνση από την περιοχή εκκένωσης. Οι περιοχές αυτές πρέπει να βρίσκονται σε ικανοποιητική απόσταση από την περιοχή εκκένωσης, ώστε να παρέχουν ασφάλεια στους μετακινούμενους. Η απόσταση αυτή εξαρτάται από την έκταση του φαινομένου, τη γεωμορφολογία της περιοχής και άλλα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περίπτωσης. Παράλληλα, οι ζώνες ασφαλείας πρέπει να μπορούν να προσεγγιστούν από σύντομες και ασφαλείς διαδρομές και να μπορούν να φιλοξενήσουν ικανό αριθμό μετακινούμενων. Ακόμη, είναι σημαντικό να υπάρχει η δυνατότητα στοιχειωδών παροχών διαβίωσης, όπως ρεύμα και νερό, για να καλυφθούν οι άμεσες ανάγκες του πληθυσμού.

Οι ζώνες ασφαλείας μπορούν να βρίσκονται σε στρατηγικές θέσεις γύρω από την περιοχή εκκένωσης. Η επιλογή των περιοχών που θα λειτουργήσουν ως ζώνες ασφαλείας μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους εποπτείας της ευρύτερης περιοχής, όπως αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές παρατηρήσεις, επιτόπια παρατήρηση στο πεδίο ή χρήση αναλυτικών χαρτών με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής [Saadatseresht et al. 2007]. Κάποιες φορές, για υπολογιστικούς λόγους, οι ζώνες ασφαλείας συγκεντρώνονται σε μία ενιαία περιοχή που καθορίζεται από ένα κεντροειδές σημείο [Chiu, 2004].

Κατά την εκκένωση, οι μετακινούμενοι επιλέγουν μία από τις ζώνες ασφαλείας, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν. Ένας σημαντικός παράγοντας που λαμβάνουν υπόψη οι μετακινούμενοι είναι το είδος του καταφυγίου που διατίθεται και ο αριθμός των ανθρώπων που μπορεί να φιλοξενήσει [Cuellar et al. 2009]. Με βάση, λοιπόν, τα καταφύγια αυτά, ορίζονται οι διαδρομές εκκένωσης και η κατανομή τους στην περιοχή. Έχει παρατηρηθεί ότι οι μετακινούμενοι επιλέγουν συνήθως μια ζώνη ασφαλείας με κριτήρια την κοντινότερη απόσταση και την ασφαλή μετάβαση σε αυτή [Cheng et al. 2008]. Η ιδανική προσέγγιση για έναν μελετητή είναι ο διαχωρισμός της ζώνης εκκένωσης σε υποπεριοχές και ο ορισμός της καταλληλότερης ζώνης ασφαλείας και της βέλτιστης διαδρομής για κάθε μία από αυτές [Saadatseresht et al. 2007]. Με τον τρόπο αυτό, είναι πιο εύκολη η εκτίμηση της έκβασης της εκκένωσης και υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να τηρηθεί το αρχικό σχέδιο.

2.1.3.4 Χρόνος αντίδρασης και εκτιμώμενος χρόνος εκκένωσης

Ένας καθοριστικός παράγοντας για την έκβαση μιας εκκένωσης είναι ο χρόνος αντίδρασης των αρμόδιων αρχών και ο χρόνος που απαιτείται για να απομακρυνθεί ο πληθυσμός από την επικίνδυνη ζώνη. Η απόφαση των αρχών για εκκένωση πρέπει να ληφθεί σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, το οποίο εξαρτάται από το είδος του φαινομένου που αναμένεται και το βαθμό ετοιμότητας των εμπλεκομένων. Πάντως, η αντίδραση των αρχών και η πληροφόρηση των μετακινούμενων πρέπει να είναι άμεση για να ξεκινήσει η εκκένωση το συντομότερο δυνατό [Regnier, 2006]. Η καλή εκτίμηση του χρόνου έναρξης της εκκένωσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια του κοινού και μπορεί να υποδείξει τις δυνατότητες για ακραίες συνθήκες [Tu et al. 2010].

Είναι προφανές ότι η πληροφόρηση και η προετοιμασία του πληθυσμού απαιτεί κάποιο σημαντικό χρονικό διάστημα, το οποίο δεν είναι πάντα διαθέσιμο κατά την έναρξη μιας εκκένωσης. Είναι προτιμότερο, λοιπόν, να έχει προηγηθεί η ενημέρωση του κόσμου, ώστε να είναι σε θέση να γνωρίζει πως πρέπει να λειτουργήσει σε μία τέτοια περίπτωση, προκειμένου να ολοκληρωθεί επιτυχώς η εκκένωση. Η ενημέρωση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί από τις αρμόδιες αρχές της υπό μελέτη περιοχής, διενεργώντας διάφορες εκστρατείες. Αυτή η εκ των προτέρων ενημέρωση είναι πολύ σημαντική, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι όσο λιγότερο προετοιμασμένοι είναι οι μετακινούμενοι, τόσο τείνουν να αγνοούν τον κίνδυνο και να μην εγκαταλείπουν την περιοχή εκκένωσης [Gershon et al. 2007].

Ο χρόνος εκκένωσης που απαιτείται για να απομακρυνθεί το σύνολο του πληθυσμού από την επικίνδυνη περιοχή, εκτιμάται συνήθως από εμπειρικά στοιχεία ή βασιζόμενος στους χρόνους διαδρομής των προσομοιώσεων. Έχει παρατηρηθεί ότι, σύμφωνα με τα εμπειρικά στοιχεία, οι εκτιμώμενοι χρόνοι είναι μεγαλύτεροι, καθώς υπεισέρχονται παράγοντες όπως η καθυστέρηση ενημέρωσης του πληθυσμού ή έναρξης της εκκένωσης, που δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν κατά την προσομοίωση. Σε κάθε περίπτωση, ο εκτιμώμενος χρόνος εκκένωσης είναι το μέγεθος που χρησιμοποιούν οι αρχές για να πάρουν την απόφαση για την έναρξη της εκκένωσης.

Μία ακόμα χρήσιμη μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως αφορά την αλληλεπίδραση των χρόνων διαδρομής με τη χωρική διάσταση, δηλαδή με την ικανότητα του οδικού δικτύου [Cova and Johnson, 2001]. Έτσι, υπολογίζονται οι χρόνοι διαδρομής που απαιτούνται από κάθε υποπεριοχή της ζώνης εκκένωσης, αλλά και ο συνολικός χρόνος εκκένωσης του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη και τις καθυστερήσεις των οχημάτων.

2.1.3.5 Ειδικές συνθήκες

Είναι προφανές ότι κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης, μπορεί να προκύψουν ειδικές συνθήκες που δυσχεραίνουν την ομαλή λειτουργία της και συνεπώς, επιβάλλεται η ενσωμάτωση τους κατά το σχεδιασμό. Οι συνθήκες αυτές μπορεί να αφορούν τη συμπεριφορά των οδηγών, περιβαλλοντικές συνθήκες ή άλλα απρόοπτα συμβάντα που εμποδίζουν την εκκένωση.

Σε ότι αφορά τη συμπεριφορά των οδηγών, αποτελεί ιδιαίτερα απρόβλεπτο παράγοντα και δεν είναι καθόλου εύκολο να εκτιμηθεί ο τρόπος που θα αντιδράσουν οι μετακινούμενοι και ο βαθμός συμμόρφωσής τους στο σχέδιο εκκένωσης. Παρόλα αυτά, είναι δυνατό να γίνουν κάποιες εκτιμήσεις, βασιζόμενες σε εμπειρικά κυρίως στοιχεία. Έχει παρατηρηθεί ότι, όταν οι άνθρωποι έρχονται αντιμέτωποι με κάποιο κίνδυνο, συνήθως λειτουργούν κάτω από συνθήκες πίεσης και άγχους και μειώνεται σημαντικά η ικανότητά τους να λάβουν λογικές αποφάσεις [Kongsomsaksakul et al. 2005]. Έτσι, οι αντιδράσεις των ανθρώπων σε αυτές τις περιπτώσεις βασίζονται στο ένστικτο και όχι στη λογική. Υπάρχουν, λοιπόν δύο κατηγορίες αντιδράσεων: η πρώτη αφορά τους ανθρώπους που, αν και θα φοβηθούν, θα αντιδράσουν ψύχραιμα και πιθανώς αυτοματοποιημένα, ενώ η δεύτερη αυτούς που θα πανικοβληθούν και οι αντιδράσεις τους θα είναι ανεξέλεγκτες. Έχει παρατηρηθεί ότι η συχνότερη αντίδραση είναι η δεύτερη, με αποτέλεσμα να μειώνεται αισθητά η συμμόρφωση στον αρχικό σχεδιασμό και κατά συνέπεια, να μειώνεται και η αποτελεσματικότητα της εκκένωσης [Pel et al. 2010].

Παράλληλα, οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορεί να αποτελέσουν εμπόδια για την προσέγγιση κάποιας ζώνης ασφαλείας ή για τη χρήση κάποιας διαδρομής. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, ο σχεδιασμός να είναι δυναμικός και να προσφέρει εναλλακτικές, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα διαφοροποίησης κάποιας διαδρομής ή αλλαγής της ζώνης ασφαλείας που θα χρησιμοποιηθεί από τους μετακινούμενους.

Ακόμη, μπορεί να προκύψουν απρόοπτα συμβάντα, τα οποία να εμποδίσουν την ομαλή μετάβαση των οδηγών στις ζώνες ασφαλείας. Για την αντιμετώπιση τέτοιων συμβάντων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα δυναμικής διαχείρισης της κυκλοφορίας που θα ενημερώνουν τους οδηγούς για το τι έχει συμβεί και τι εναλλακτικές προσφέρονται. Έτσι, γεγονότα όπως ο αποκλεισμός κάποιας λωρίδας κυκλοφορίας λόγω κάποιας ατυχήματος ή άλλης εξέλιξης που χρήζει αλλαγής της πορείας, θα μπορούν να γνωστοποιούνται εύκολα στους οδηγούς, χωρίς επιπλέον καθυστερήσεις στην εκκένωση.

2.1.4 Μελέτες διαχείρισης εκκένωσης

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες που επικεντρώνονται σε θέματα εκκένωσης περιοχών σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Οι μελέτες αυτές παρουσιάζουν αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περίπτωσης και σε συνδυασμό με τα στοιχεία σχεδιασμού που έχουν συλλεχθεί για το οδικό δίκτυο, τη ζήτηση και τα υπόλοιπα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω, οδηγούν στη δημιουργία ενός σχεδίου εκκένωσης και διαχείρισης της κυκλοφορίας. Φυσικά, η κυκλοφορία των οχημάτων είναι ένα δυναμικό φαινόμενο, το οποίο πιθανότατα θα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις κατά την εκκένωση μιας περιοχής. Έτσι, το σχέδιο εκκένωσης θα πρέπει να εξασφαλίζει όχι μόνο την πρόληψη, αλλά και την ορθή και έγκαιρη αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων που θα προκύψουν. Κάθε μελέτη που ασχολείται με την εκκένωση μιας περιοχής, εστιάζει σε διαφορετικό στάδιο της εκκένωσης και το προσεγγίζει από διαφορετική οπτική γωνία, οπότε προτείνει και διαφορετικό τρόπο χειρισμού του προβλήματος.

Μία σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό της εκκένωσης είναι ο προσδιορισμός του χρόνου έναρξης της εκκένωσης και της συμμόρφωσης των οδηγών σε αυτό. Πολλές μελέτες

έχουν ασχοληθεί με την εκτίμηση του ποσοστού του πληθυσμού που ακολουθεί το σχέδιο εκκένωσης που προτείνεται και απομακρύνεται από την περιοχή σε δεδομένες χρονικές στιγμές [Fu and Wilmot, 2007]. Άλλες πάλι μελέτες εκτιμούν το χρόνο αντίδραση του πληθυσμού, χρησιμοποιώντας μοντέλα διακριτών επιλογών logit [Fu and Wilmot, 2004], προσομοίωση [Henson and Goulias, 2006] και νευρωνικά δίκτυα [Wilmot and Mei, 2003].

Ένας άλλος τρόπος διαχείρισης της κυκλοφορίας είναι η πληροφόρηση των οδηγών για τις εναλλακτικές διαδρομές που είναι διαθέσιμες, κάτι που τους επιτρέπει να επιλέξουν οι ίδιοι ποια θα ακολουθήσουν και ποια θα απορρίψουν. Σε πολλές μελέτες, η πληροφόρηση αυτή παρέχεται μέσω ανεπτυγμένων συστημάτων πληροφόρησης των οδηγών (Advanced Traveller information Systems, ATIS) και αξιολογείται ο τρόπος με τον οποίο ανταποκρίνονται οι οδηγοί σε αυτά τα συστήματα πληροφόρησης [Lively et al. 2006]. Μία άλλη μέθοδος για την πληροφόρηση των οδηγών είναι η χρήση πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων για πιθανά έκτακτα συμβάντα, η οποία έχει αξιοποιηθεί σε μελέτες διαχείρισης και έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα [Ullman et al. 2006].

Μια διαφορετική σκοπιά για τη δημιουργία σχεδίου εκκένωσης είναι η οργάνωση της εκκένωσης ανάλογα με το είδος του οδικού δικτύου σε ταυτόχρονη ή κατά στάδια εκκένωση, αξιοποιώντας το εργαλείο της προσομοίωσης [Zhan and Chen, 2008]. Επίσης, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες που χρησιμοποιούν μοντέλα, όπου η εκκένωση γίνεται κατά στάδια, σε ένα δίκτυο που έχει χωριστεί σε κελιά [Liu et al. 2006]. Παράλληλα, μια άλλη προσέγγιση του θέματος είναι η υλοποίηση σχεδίων διαχείρισης έκτακτων αναγκών, που χρησιμοποιούν συστήματα παρακολούθησης της κυκλοφορίας, γεγονός που διευκολύνει τη διαχείρισή της [Chiu et al. 2005]. Ακόμη, έχουν αναπτυχθεί μελέτες που χρησιμοποιούν ένα πλαίσιο ελέγχου για τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο κατά την εκκένωση [Jiang et al. 2010]. Πολλοί μελετητές έχουν προτείνει τη χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης, η οποία αποτελεί σύγχρονο εργαλείο σχεδιασμού και αξιολόγησης τεχνικών εκκένωσης [Chen, 2012]. Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότεροι μελετητές, χρησιμοποιούν τη μικροσκοπική προσομοίωση για τη διαχείριση διαφόρων περιστατικών που χρήζουν εκκένωσης, όπως πλημμύρες [Hori and Shiiba, 2004], τυφώνες [Chen et al. 2006] ή τσουνάμι [Takada et al. 2013].

Ένα άλλο χρήσιμο εργαλείο που αξιοποιείται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια είναι τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (Geographic Information Systems, G.I.S.), τα οποία παρουσιάζουν αυξημένες δυνατότητες και μπορούν να συνδυαστούν με πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις μιας εκκένωσης. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί μελέτες που αξιοποιούν τα G.I.S. για τη δημιουργία μοντέλων εκκένωσης [Pal et al. 2003], πλαισίων λογικών δεδομένων [Laefter and Pradhan, 2006] και την οργάνωση σχεδίων εκκένωσης για συγκεκριμένες φυσικές καταστροφές [Wilmot and Meduri, 2005]. Παράλληλα, ευρέως διαδεδομένα είναι και τα συστήματα δυναμικής διαχείρισης της κυκλοφορίας (Dynamic Traffic Assignment, D.T.A.), τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο για τη δημιουργία μοντέλων εκκένωσης [Bu and Xie, 2010], όσο και για την αξιολόγηση άλλων στρατηγικών εκκένωσης [Brown et al. 2009].

Είναι εμφανές, ότι κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης, μπορεί να προκύψουν απρόβλεπτα συμβάντα, τα οποία να έχουν επιπτώσεις στη διαδικασία της εκκένωσης. Οι συνέπειες

αυτές πρέπει να ληφθούν υπόψη όσο είναι εφικτό κατά το σχεδιασμό και τη δημιουργία μοντέλων εκκένωσης [Alsnih and Stopher, 2004]. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνέπειες αυτές, έχουν αναπτυχθεί διάφορες στρατηγικές διαχείρισης, όπως η χρήση ενός αντιπροσωπευτικού δικτύου [Zhang et al. 2009]. Μία σημαντική συνέπεια που μπορεί να προκύψει είναι η ύπαρξη αυξημένης ζήτησης, η οποία πολλές φορές ξεπερνάει τις δυνατότητες του υπάρχοντος δικτύου και συνεπώς καθυστερεί την ολοκλήρωση της εκκένωσης. Προκειμένου, λοιπόν, να αντιμετωπιστεί η δυσχέρεια αυτή και να αυξηθεί η κυκλοφοριακή ικανότητα του δικτύου, πολλοί μελετητές έχουν προτείνει τη χρήση λωρίδων κυκλοφορίας αντίθετης κατεύθυνσης, ώστε να επιταχυνθεί η εκκένωση [Hua et al. 2014, Wang et al. 2013, Kim et al. 2008].

Από την άλλη, ένα ακόμα πολύ σημαντικό στοιχείο που έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τους μελετητές και το οποίο έρχεται σε αντίθεση με την προηγούμενη στρατηγική και άλλες στρατηγικές μείωσης του χρόνου εκκένωσης, είναι η προσπελασιμότητα που προσφέρει ένα δίκτυο κατά την εκκένωση για οχήματα έκτακτης ανάγκης. Από τη μία, υπάρχει προσπάθεια για μεγιστοποίηση της κυκλοφοριακής ικανότητας του δικτύου, για ταχεία εκκένωση της περιοχής, ενώ από την άλλη, είναι προφανές ότι υπάρχει ανάγκη για προσέγγιση της περιοχής από οχήματα έκτακτης ανάγκης, όπως περιπολικά, ασθενοφόρα ή και πυροσβεστικά οχήματα, προκειμένου είτε να τεθεί η κατάσταση υπό έλεγχο είτε να αντιμετωπισθεί κάποιο ζήτημα ασφάλειας που έχει προκύψει και δυσχεραίνει την εκκένωση. Παράλληλα, η ίδια ανάγκη προκύπτει και για οχήματα μαζικής μεταφοράς, όπως π.χ. λεωφορεία, τα οποία είναι σε θέση να διευκολύνουν την εκκένωση, απομακρύνοντας μεγάλο όγκο του πληθυσμού, περιορίζοντας σημαντικά την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Οι στρατηγικές αυτές έχουν αναλυθεί και αξιοποιηθεί σε πολλές μελέτες, είτε αυτές αφορούν οχήματα έκτακτης ανάγκης [Balakrishna et al. 2008], είτε οχήματα μαζικής μεταφοράς [Elmitiny et al. 2007]. Φυσικά, η χρήση τέτοιων στρατηγικών έρχεται σε σύγκρουση με την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση του δικτύου. Συνεπώς, αυτό που προέχει είναι η αξιολόγηση των τεχνικών αυτών, ώστε να συνδυαστούν με τέτοιο τρόπο, που θα επιτυγχάνεται το καλύτερο δυνατό μοντέλο σχεδιασμού εκκένωσης [Ng and Waller, 2010].

Τέλος, μια διαφορετική προσέγγιση του ζητήματος της εκκένωσης είναι αυτή της βελτιστοποίησης του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη χωρικούς και χρονικούς παράγοντες που δύσκολα υπεισέρχονται σε άλλα μοντέλα σχεδιασμού. Έτσι, είναι πιο εύκολο για το μελετητή να εκτιμήσει τις πιθανές συνέπειες μιας εκκένωσης και να αναπτύξει μια στρατηγική βελτίωσης του μοντέλου σχεδιασμού [Yuan and Han, 2010, Li et al. 2014]. Παρακάτω, ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 1.1), στον οποίο παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν για τη θεωρητική προσέγγιση της εφαρμογής.

Μελετητές	Έτος	Τίτλος	Στόχος	Μέθοδος	Εργαλεία
Pal et al.	2003	Emergency evacuation modeling based on Geographical Information System data	Ανάπτυξη μοντέλων κυκλοφοριακής προσομοίωσης βασισμένα σε GIS	Συνδυασμός προσομοίωσης και GIS	OREMS
Wilmot and Mei	2003	Comparison of Alternative Trip Generation Models For Hurricane Evacuation	Σύγκριση της σχετικής ακρίβειας εναλλακτικών μεθόδων γένεσης μετακινήσεων κατά την εκκένωση	Χρήση λογιστικής παλινδρόμησης και νευρωνικών δικτύων για πρόβλεψη της πιθανότητας εκκένωσης	Έρευνα με Ερωτηματολόγια για συλλογή στοιχείων του πληθυσμού
Alsnih and Stopher	2004	A Review of the Procedures Associated with Devising Emergency Evacuation Plans	Αξιολόγηση μοντέλων εκκένωσης	Ανάλυση σχεδίων εκκένωσης και των παραμέτρων που επηρεάζουν	
Hori and Shiiba	2004	Micro Model Simulation Tools for Performance-based Design of a Flood Risk Management System	Σχεδιασμός μικροσκοπικών μοντέλων προσομοίωσης εκκένωσης λόγω πλημμύρας	Παραμετροποίηση διαδικασιών ανθρώπινων λήψεων αποφάσεων για εκκένωση	
Fu and Wilmot	2004	Sequential Logit Dynamic Travel Demand Model for Hurricane Evacuation	Ανάπτυξη δυαδικού μοντέλου logit για την εκτίμηση της πιθανότητας εκκένωσης σε ορισμένα χρονικά πλαίσια	Συνδυασμός κοινωνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών του πληθυσμού, χαρακτηριστικών του τυφώνα και αποφάσεων από της αρχές	Δυαδικό μοντέλο logit
Chiu et al.	2005	Dynamic Traffic Management for Evacuation	Ενίσχυση της διαχείρισης της κυκλοφορίας στην εκκένωση	Δυναμική Κυκλοφοριακή Διαχείριση (DTA)	Χρήση βρόχου ανταπόκρισης με σύστημα παρακολούθησης

Wilmot and Meduri	2005	Methodology to Establish Hurricane Evacuation Zones	Ανάπτυξη μεθοδολογίας καθορισμού ζωνών εκκένωσης λόγω τυφώνα	Συνδυασμός GIS και μοντέλων εκτίμησης πλημμυρών και αυτοματοποίηση της διαδικασίας	TransCAD
Chen et al.	2006	Agent-Based Modeling and Analysis of Hurricane Evacuation Procedures for the Florida Keys	Εκτίμηση ελάχιστου χρόνου εκκένωσης λόγω τυφώνα και εκτίμηση πληθυσμού που πλήττεται σε περίπτωση κατολισθήσεων	Agent-based προσομοίωση	VISSIM
Henson and Goulias	2006	An Assessment of Activity-based Modeling and Simulation for Applications in Operational Studies, Disaster Preparedness, and Homeland Security	Ανάπτυξη μοντέλου εκκένωσης νοικοκυριών	Προσομοίωση	TRANSIMS
Laefer and Pradhan	2006	Evacuation Route Selection Based on Tree-Based Hazards Using Light Detection and Ranging and GIS	Εντοπισμός των δρόμων που αποκλείονται από τα δέντρα και προσδιορισμός των καλύτερων δυνατών διαδρομών εκκένωσης	Συνδυασμός δεδομένων GIS και συστημάτων σάρωσης με laser	COMPASS
Liu et al.	2006	A Cell-Based Network Optimization Model for Staged Evacuation Planning Under Emergencies	Συλλογή κρίσιμων στοιχείων για εκκένωση κατά στάδια	Μοντέλο μετάδοσης κελιών	Μοντέλο βελτιστοποίησης δικτύου

Lively et al.	2006	Advanced Traveler Information Systems: Overview of California's System Application and Its Performance as Part of Emergency Response Planning	Μελέτη επίδρασης συστημάτων ATIS στην ανταπόκριση των οδηγών σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης		ATIS/511
Ullman et al.	2006	Amber Alert and Major Catastrophe Messages on Dynamic Message Signs: Focus Group Studies in Texas	Ανάλυση αποτελεσματικότητας πληροφόρησης των οδηγών μέσω της χρήσης πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων		Dynamic Message Signs (DMS)
Elmitiny et al.	2007	Emergency Evacuation Planning and Preparedness of Transit Facilities: Traffic Simulation Modeling	Σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών εκκένωσης και αξιολόγηση της	Computer-based μοντέλο προσομοίωσης	VISSIM
Fu and Wilmot	2007	Static Versus Dynamic and Aggregate Versus Disaggregate: Comparison Between Practice and Research in Hurricane Evacuation Travel Demand Modeling	Εκτίμηση της συνολικής ζήτησης εκκένωσης και της διακύμανσής της	Σύγκριση εκτιμήσεων από καμπύλες απόκρισης και δυαδικά μοντέλα logit	Δυαδικά μοντέλα logit και καμπύλες απόκρισης
Balakrishna et al.	2008	Simulation-Based Framework for Transportation Network Management in Emergencies	Ανάπτυξη μεθοδολογίας προσομοίωσης για εκτίμηση της απόδοσης δικτύων κατά τη διάρκεια εκκένωσης	Δυναμική Κυκλοφοριακή Διαχείριση (DTA), ανάπτυξη στρατηγικών σε διαφορετικές συνθήκες και δημιουργία σχεδίων ανταπόκρισης με προσομοίωση	DynaMIT-E

Kim et al.	2008	Contraflow Transportation Network Reconfiguration for Evacuation Route Planning	Ανάπτυξη μεθοδολογίας σχεδιασμού εκκένωσης με χρήση λωρίδων αντίθετης κατεύθυνσης για ελαχιστοποίηση χρόνου εκκένωσης	Χρήση λωρίδων αντίθετης κατεύθυνσης για απομάκρυνση οχημάτων από την κρίσιμη περιοχή	RELAX, αλγόριθμος CCRP
Zhan and Chen	2008	Agent-based modeling and evacuation planning	Εκτίμηση χρόνου εκκένωσης	Agent-based modelling	VISSIM
Brown et al.	2009	Development of a Strategic Hurricane Evacuation–Dynamic Traffic Assignment Model for the Houston, Texas, Region	Αξιολόγηση κύριων διαδρομών εκκένωσης	DTA, Χρήση λωρίδων αντίθετης κατεύθυνσης, Προγραμματισμός αναχωρήσεων	
Zhang et al.	2009	Agent-based modeling for household level hurricane evacuation	Σύγκριση χρόνων εκκένωσης ανάλογα με διαφορετικές συμπεριφορές οδηγών	Agent-based modelling	MATSim
Bu and Xie	2010	Research on seismic evacuation dynamic traffic assignment based on cell transmission model	Ανάλυση παραγόντων που επηρεάζουν τη διαδικασία εκκένωσης για σεισμό	Πλαίσιο μοντέλου μετάδοσης κελιών (Cell Transmission Model)	
Jiang et al.	2010	Traffic Adaptive Control Framework for Real Time Large-Scale Emergency Evacuation	Ανάπτυξη μοντέλου αναφοράς και συστήματος ελέγχου	Πλαίσιο ελέγχου διαχείρισης εκκένωσης σε πραγματικό χρόνο	
Ng and Waller	2010	Reliable Evacuation Planning via Demand Inflation and Supply Deflation	Δημιουργία μοντέλου σχεδιασμού διαδρομής με αβεβαιότητα ζήτησης και κυκλοφοριακής ικανότητας	Πλαίσιο μοντέλου μετάδοσης κελιών (Cell Transmission Model, CTA)	GAMS/MINOS

Yuan and Han	2010	A multi-objective optimization approach for evacuation planning	Ανάπτυξη μοντέλου εκκένωσης που περιλαμβάνει χωρο-χρονικούς παράγοντες	Βελτιστοποίηση πολλών κριτηρίων και χρήση χρόνου εκκένωσης ως μέτρο αποτελεσματικότητας	VISSIM
Chen	2012	Agent-based micro-simulation of staged evacuations	Ανάπτυξη δομής εκκένωσης σε ζώνες για στρατηγικές εκκένωσης σε στάδια	Agent-based microsimulation	VISSIM
Takada et al.	2013	Development of Traffic Simulation for Tsunami Evacuation - Case Study for Kesennuma city -	Ανάπτυξη σχεδίου εκκένωσης σε περίπτωση τσουνάμι και μέτρων αντιμετώπισης	Προσομοίωση	Aimsun6
Wang et al.	2013	Evacuation Planning Based on the Contraflow Technique With Consideration of Evacuation Priorities and Traffic Setup Time	Ανάπτυξη μοντέλου βελτιστοποίησης πολλών παραγόντων	Χρήση λωρίδων αντίθετης κατεύθυνσης	Αλγόριθμος δύο επιπέδων
Hua et al.	2014	An Integrated Contraflow Strategy for Multimodal Evacuation	Βελτίωση αποτελεσματικότητας εκκένωσης πολλών παραγόντων	Αθροιστική μέθοδος διαχείρισης δικτύου, Χρήση λωρίδων αντίθετης κατεύθυνσης	Transit-based μοντέλο εκκένωσης
Li et al.	2014	Optimization and Planning of Emergency Evacuation Routes Considering Traffic Control	Βελτιστοποίηση δικτύου εκκένωσης με έλεγχο κυκλοφορίας	Μοντέλο μέγιστης ροής και μοντέλο μέγιστης ροής-ελάχιστου κόστους	

Πίνακας 1.1: Συγκεντρωτική παρουσίαση των βασικότερων μελετών εκκένωσης και προσομοίωσης.

2.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

2.2.1 Λόγοι επιλογής

Σε όλες τις μελέτες εκκένωσης που αναλύθηκαν παραπάνω, παρατηρείται ότι χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα για να προσδιοριστούν ορισμένα στοιχεία που επηρεάζουν και διαμορφώνουν το σχεδιασμό της εκκένωσης. Τα στοιχεία αυτά αφορούν:

- Την ανταπόκριση και την αντίδραση των οδηγών.
- Τη διαχείριση της αυξανόμενης κυκλοφοριακής ροής.
- Τη μεταφορά του πληθυσμού σε ασφαλείς ζώνες.
- Τη δυναμικότητα των στρατηγικών εκκένωσης με βάση τη μεταβλητότητα του δικτύου.
- Τη διατήρηση διαδρομών προς την περιοχή εκκένωσης.
- Τη διαχείριση έκτακτων συμβάντων.
- Την εκτίμηση των χρόνων έναρξης και ολοκλήρωσης της εκκένωσης της περιοχής.

Είναι λογικό ότι είναι πολύ δύσκολο να υπάρξουν δεδομένα για τα στοιχεία αυτά, που να βασίζονται σε πραγματικές συνθήκες έκτακτης ανάγκης και εκκένωσης μιας περιοχής. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι, κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης, πρωταρχική μέριμνα των αρμόδιων αρχών είναι η έγκαιρη μετακίνηση των πληττόμενων πληθυσμών σε ασφαλείς ζώνες, προκειμένου να μην τεθεί θέμα ασφάλειας ανθρώπινων ζώων. Έτσι, η συλλογή των στοιχείων αυτών περνάει σε δεύτερη μοίρα και ακόμα και να γίνει σε κάποιο βαθμό, είναι πολύ δύσκολο να είναι ολοκληρωμένα. Παράλληλα, κάθε περίπτωση εκκένωσης λόγω έκτακτης ανάγκης παρουσιάζει τέτοιες ιδιαιτερότητες και χαρακτηρίζεται από τόσο διαφορετικές παραμέτρους, που ακόμα και να ήταν εφικτή η ολοκληρωμένη καταγραφή και αξιολόγηση των παραπάνω στοιχείων, θα ήταν πολύ δύσκολο να αξιοποιηθούν σε επόμενη μελέτη. Συνεπώς, το πρόβλημα αυτής της έλλειψης στοιχείων μπορεί εύκολα να λυθεί με χρήση συστημάτων προσομοίωσης και εφαρμογής μοντέλων και στρατηγικών εκκένωσης μέσω αυτών. Η λύση αυτή δίνει τη δυνατότητα ενός ολοκληρωμένου σχεδιασμού εκκένωσης, αφού επιτρέπει τη δημιουργία και αξιολόγηση πολλών και διαφορετικών σεναρίων, με βάση τα χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες τις εκάστοτε περίπτωσης, που θα οδηγήσουν στην εξαγωγή αξιόπιστων δεδομένων και συμπερασμάτων.

2.2.2 Γενικά

Με τον όρο προσομοίωση εννοούμε γενικά ένα σύνολο μεθόδων και διαδικασιών, με το οποίο αναπαρίσταται η λειτουργία ενός συστήματος. Πρόκειται στην ουσία για ένα «πείραμα», το οποίο μπορεί να βασίζεται σε πραγματικά ή φανταστικά δεδομένα, με σκοπό την επεξεργασία τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων και την προσέγγιση μελλοντικών αντίστοιχων καταστάσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσομοίωση άρχισε να αναπτύσσεται ως εργαλείο έρευνας και διαχείρισης σεναρίων με την διάδοση των προσωπικών ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Στην περίπτωση των κυκλοφοριακών συστημάτων, η προσομοίωση έχει συμβάλλει σημαντικά στην εξέλιξη της έρευνας, ενώ παράλληλα έχει δώσει λύση σε προβλήματα, που

χωρίς την αξιοποίησή της θα ήταν δύσκολο έως αδύνατο να προσεγγισθούν. Έτσι, χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές που παρουσιάζουν μεγάλη δυναμικότητα ως προς τα χαρακτηριστικά τους, όπως περιπτώσεις σχεδιασμού υποδομών ή διαχείρισης συμβάντων που επηρεάζουν τις κυκλοφοριακές υποδομές. Κάποιες από τις εφαρμογές αυτές επιτρέπουν την ανάλυση με χρήση βασικών σχέσεων μεταξύ των κυκλοφοριακών μεγεθών, μόνο όμως στην περίπτωση συγκεκριμένων τμημάτων του οδικού δικτύου. Εφόσον η εφαρμογή αφορά φαινόμενα μεγάλης έκτασης, τότε συνίσταται η χρήση μοντέλων προσομοίωσης για την ορθότερη αξιολόγησή τους.

Η βασική λειτουργία της προσομοίωσης είναι η δημιουργία μοντέλων και η αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών της εκάστοτε περίπτωσης. Ο βαθμός ανάλυσης και λεπτομέρειας των συνθηκών αυτών καθορίζονται από το μοντέλο που έχει επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί, με βάση τη φύση της εφαρμογής. Έτσι, δημιουργείται ένα «σενάριο» που παρουσιάζει χαρακτηριστικά αντίστοιχα με αυτά του προβλήματος που εξετάζεται και πάνω σε αυτό γίνονται πολλές και διαφορετικές δοκιμές, ώστε να προκύψουν κάποια ζητούμενα. Τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης, ανάλογα με τον τρόπο απεικόνισής τους, διακρίνονται σε αριθμητικά και γραφικά.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι αυτά που μπορούν να παρουσιάσουν λεπτομερώς και να οδηγήσουν σε συμπεράσματα για τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου και τα ενδεχόμενα πιθανά συμβάντα υπό τις δεδομένες συνθήκες. Από την άλλη, τα γραφικά αποτελέσματα είναι σε θέση να κάνουν εμφανείς τους λόγους για τους οποίους αντιδρά με αυτόν τον τρόπο το δίκτυο και πως η αντίδραση αυτή επηρεάζεται από μικρές μεταβολές των συνθηκών του μοντέλου. Φυσικά, και οι δύο κατηγορίες αποτελεσμάτων απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία και αξιολόγηση από τον μελετητή, προκειμένου να οδηγήσουν σε αξιόπιστα συμπεράσματα και να καταστήσουν την προσομοίωση χρήσιμο εργαλείο για την έρευνα.

2.2.3 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα μεθόδου

Η κυκλοφοριακή προσομοίωση, ως εργαλείο μελέτης κυκλοφοριακών φαινομένων, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, αλλά και αρκετά μειονεκτήματα. Αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο έρευνας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αλλά πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή και να πραγματοποιείται συστηματικός έλεγχος και αξιολόγηση στα αποτελέσματά της, προτού επιλεγεί ως κατάλληλη μέθοδος διαχείρισης ενός κυκλοφοριακού φαινομένου. Παρακάτω, ακολουθούν τα κύρια θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά της προσομοίωσης, που πρέπει να ληφθούν υπόψη από τον ερευνητή πριν τη χρήση της.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί η δυνατότητα που παρέχει να αναπαριστά με μεγάλη λεπτομέρεια τα στοιχεία του δικτύου δημιουργώντας ένα «σενάριο» που ανταποκρίνεται σε μεγάλο βαθμό στην εφαρμογή που αναλύεται και να εκτελεί πολλαπλές επαναλήψεις της πειραματικής αυτής διαδικασίας. Με τον τρόπο αυτό, όχι μόνο ελέγχονται τα αποτελέσματα, αλλά και επιτρέπεται στο χρήστη να κατανοήσει σε μεγάλο βαθμό τις αλληλεπιδράσεις των διαφόρων στοιχείων εισόδου και να κατευθυνθεί ως προς το ποια στοιχεία είναι αυτά που διαμορφώνουν ουσιαστικά τη συμπεριφορά του

δικτύου και ποια πιθανώς δεν προσφέρουν ιδιαίτερη πληροφορία στο τελικό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που διεξάγονται επαναλαμβανόμενες διαδρομές από το ίδιο υποκείμενο, παρουσιάζεται η δυνατότητα μείωσης του μεγέθους του δείγματος, αλλά και να μελετηθούν οι επιλογές διαδρομής των οδηγών ως προς τις εναλλακτικές διαδρομές [Zhao et al. 2013].

Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα είναι και το χαρακτηριστικό ότι υπάρχει ευελιξία στη διαμόρφωση των συνθηκών του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η δημιουργία και αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων για τη διαχείριση ενός κυκλοφοριακού φαινομένου και συνεπώς η εξαγωγή ποικίλων συμπερασμάτων για την συμπεριφορά των οδηγών. Κάτι τέτοιο είναι αδύνατο να προκύψει από μελέτη σε πραγματικές συνθήκες, γεγονός που δίνει ακόμα μεγαλύτερη αξία στην προσομοίωση.

Ένα ακόμα πολύ θετικό χαρακτηριστικό της προσομοίωσης είναι το γεγονός ότι μπορεί να παρέχει δεδομένα που περιλαμβάνουν πραγματικά στοιχεία οδηγικής συμπεριφοράς στο δίκτυο, και τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές μελέτης κυκλοφοριακών φαινομένων. Έτσι, μέσω αυτής της αλληλεπίδρασης, η αναπαράσταση των συνθηκών κάθε περίπτωσης γίνεται ακόμα πιο αληθοφανής και τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα, καθιστώντας την προσομοίωση ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων.

Ωστόσο, η προσομοίωση, όπως και όλα τα εργαλεία μελέτης κυκλοφοριακών φαινομένων, δεν αποτελεί την ιδανική λύση για κάθε περίπτωση, καθώς παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, τα οποία οφείλει να λάβει υπόψη του ο μελετητής, προτού την επιλέξει ως τρόπο διαχείρισης του φαινομένου που μελετά.

Το βασικό μειονέκτημα της κυκλοφοριακής προσομοίωσης είναι ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορεί να μην είναι απολύτως ορθά και να εμπεριέχουν μικρά ή μεγάλα σφάλματα. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να οφείλονται σε λανθασμένη εκτίμηση της συμπεριφοράς των οδηγών ή στην τυχαιότητα της εκάστοτε εκτέλεσης του ίδιου σεναρίου προσομοίωσης. Προκειμένου να αποφευχθούν τα σφάλματα αυτά, ο μελετητής οφείλει να εμβαθύνει ιδιαίτερα στα χαρακτηριστικά της περίπτωσης που εξετάζει, ώστε να είναι σε θέση να κάνει σωστές εκτιμήσεις και επιλογές ως προς τον τρόπο εκτέλεσης της προσομοίωσης. Έτσι, η αξιοπιστία της μεθόδου έγκειται στην ανάλυση και αξιολόγησή της από τον ίδιο το μελετητή, γεγονός που πολλές φορές δεν είναι επιθυμητό, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις χαμηλής κατάρτισης, αφού μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε παρερμηνείες από παρατηρητές μη ειδικευμένους με το αντικείμενο εφαρμογής. Συνεπώς, γίνεται εύκολα αντιληπτή η αξία της εφαρμογής των διαδικασιών βαθμονόμησης (calibration) και επαλήθευσης (validation) στα στοιχεία εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, οι οποίες διαδραματίζουν πολύ σημαντικό και καταλυτικό ρόλο για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων μιας εφαρμογής.

2.2.4 Τύποι προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κάθε περίπτωση που πρόκειται να διαχειριστεί με προσομοίωση, παρουσιάζει ιδιαιτερότητες και χαρακτηριστικά, που μπορεί να διαφέρουν αισθητά από κάποια άλλη. Είναι λογικό, λοιπόν, ότι, ακόμα και αν έχει επιλεχθεί η

προσομοίωση ως κοινός τρόπος διαχείρισής τους, απαιτείται μια διαφορετική προσέγγιση, ανάλογη με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περίπτωσης. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί πρότυπα προσομοίωσης, τα οποία επικεντρώνονται στη διαχείριση διαφορετικών κατηγοριών φαινομένων, ανάλογα με το βαθμό λεπτομέρειας, τη συμπεριφορά των οδηγών κλπ.

Σε ότι αφορά το επίπεδο προσομοίωσης που εκτελούν, τα πρότυπα προσομοίωσης διακρίνονται σε 3 κατηγορίες: μικροσκοπικά, μεσοσκοπικά και μακροσκοπικά. Το βασικό χαρακτηριστικό των μικροσκοπικών προτύπων είναι ότι αντιμετωπίζουν κάθε όχημα και κάθε οδηγό ως ξεχωριστή οντότητα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και βασίζονται στην αλληλεπίδραση ενός οχήματος με κάποιο άλλο. Από την άλλη, τα μακροσκοπικά πρότυπα έχουν μία συνολικότερη αντιμετώπιση του κυκλοφοριακού συστήματος, ακολουθώντας ένα αθροιστικό μοντέλο παρουσίασης του προβλήματος, ως ενιαία κυκλοφοριακή ροή, χωρίς να διαχωρίζουν τα οχήματα ή τους οδηγούς ως προς την συμπεριφορά τους. Μία πιο ουδέτερη αντιμετώπιση έρχονται να επιδείξουν τα μεσοσκοπικά πρότυπα, τα οποία συνδυάζουν κάποια χαρακτηριστικά των μικροσκοπικών και μακροσκοπικών μοντέλων και ακολουθούν ένα μέσο επίπεδο λεπτομέρειας. Έτσι, η προσομοίωση αναλύει κάθε όχημα ξεχωριστά, ακολουθώντας όμως μία αθροιστική συμπεριφορά στους συνδέσμους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των οχημάτων.

Πιο αναλυτικά, τα μακροσκοπικά μοντέλα προσομοιάζουν την κυκλοφοριακή ροή, λαμβάνοντας υπόψη αθροιστικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής κίνησης (ταχύτητα, ροή και πυκνότητα), καθώς και τις μεταξύ τους σχέσεις. Η προσομοίωση με τη χρήση ενός μακροσκοπικού μοντέλου γίνεται τμηματικά και όχι με την παρακολούθηση μεμονωμένων οχημάτων. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν εξισώσεις για τη διατήρηση της κυκλοφοριακής ροής και για το πώς οι κυκλοφοριακές διαταραχές διαδίδονται μέσω του συστήματος σαν κρουστικά κύματα. Έχουν ευρεία χρήση σε εφαρμογές μακροπρόθεσμης πρόβλεψης, όπου δεν απαιτούνται λεπτομερή στοιχεία εισόδου και εξετάζονται πολλά εναλλακτικά σενάρια. Έτσι, επιλέγεται μικρός αριθμός λύσεων, που μπορούν να αξιολογηθούν σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια [Antonίου et al. 2008]. Πρόκειται για ένα είδος προσομοίωσης που δεν απαιτεί μεγάλη υπολογιστική υποδομή και έχει εφαρμοσθεί σε πολλές περιπτώσεις σχεδιασμού, με αποτέλεσμα να έχει δοκιμασθεί και βελτιωθεί ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της. Τα μακροσκοπικά μοντέλα αναπτύχθηκαν αρχικά για να αναπαραστήσουν την κυκλοφορία σε διακριτά επιμέρους δίκτυα μεταφορών, όπως π.χ. οι αυτοκινητόδρομοι, ενώ πλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τη χωρική και διαδοχική έκταση μιας συμφόρησης, που οφείλεται σε κυκλοφοριακή ζήτηση ή σε κάποια περιστατικά στο δίκτυο. Ωστόσο, δεν μπορούν να μοντελοποιήσουν τις αντιδράσεις των οχημάτων σε εναλλακτικές διατάξεις σχεδιασμού. Παραδείγματα μακροσκοπικών προσομοιωτών αποτελούν τα λογισμικά OmniTRANS, OREMS, TransCAD και PTV Visum.

Τα μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης χρησιμοποιούν μια μέθοδο πιο λεπτομερή από τη μακροσκοπική και μεσοσκοπική προσομοίωση, ενώ προσφέρουν τη δυνατότητα της ακριβούς προτυποποίησης λεπτομερειών όπως στρατηγικές σηματοδότησης και γεωμετρίας της οδού [Mosseri et al. 2004]. Επίσης, η προσέγγιση της κίνησης πραγματοποιείται με βάση τις διαδρομές που ορίζουν τα μητρώα προέλευσης και προορισμού της προσομοίωσης. Η προσομοίωση με μικροσκοπικά μοντέλα απαιτεί υψηλή

υπολογιστική ισχύ, το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα είναι οι απαιτήσεις για περισσότερα και πιο λεπτομερή δεδομένα, που συχνά είναι αδύνατο να συγκεντρωθούν. Τα μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης εντοπίζουν τις επιμέρους κινήσεις οχημάτων ανά δευτερόλεπτο ή κλάσμα δευτερολέπτου. Γενικά, η προσομοίωση βασίζεται σε τυχαίους αριθμούς προκειμένου να παράξει οχήματα, να επιλέξει αποφάσεις δρομολογίων και να καθορίσει συμπεριφορές. Λόγω αυτής της διακύμανσης, είναι απαραίτητα να τρέξει το μοντέλο αρκετές φορές με διαφορετικές γεννήτριες τυχαίων αριθμών, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια. Θα υπάρξει, λοιπόν, μία περίοδος «προθέρμανσης», προτού το σύστημα έρθει σε μία σταθερή κατάσταση, η οποία θα πρέπει να εξαιρεθεί από τα αποτελέσματα. Τα μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης συνήθως παράγουν δύο τύπους αποτελεσμάτων: κινούμενες παραστάσεις και αριθμητικά αποτελέσματα σε αρχεία κειμένου. Είναι σημαντικό να αντιληφθούμε πως το λογισμικό συσσωρεύει και συνοψίζει τα αριθμητικά αποτελέσματα, προκειμένου να αποφευχθούν παρερμηνείες. Η κινούμενη παράσταση μπορεί να επιτρέψει στον αναλυτή να εκτιμήσει γρήγορα την απόδοση, είναι, ωστόσο, περιορισμένη σε ποιοτικές συγκρίσεις. Η κύρια ένδειξη ενός προβλήματος που μπορεί εύκολα να εντοπιστεί σε μια κινούμενη παρουσίαση είναι η διαμόρφωση επίμονων ουρών. Κάποια μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης είναι το Aimsun, το MATSim, το TransModeler και το VISSIM.

Τα μεσοσκοπικά μοντέλα συνδυάζουν τις ιδιότητες και των μικροσκοπικών και των μακροσκοπικών μοντέλων προσομοίωσης. Πρόκειται για μοντέλα ελαφρώς λιγότερο συνεπή από τα εργαλεία μικροπροσομοίωσης, είναι όμως ανώτερα από κάποιες άλλες τεχνικές ανάλυσης κίνησης. Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν μεμονωμένα οχήματα, αλλά περιγράφουν τις δραστηριότητες και τις αλληλεπιδράσεις τους με βάση τις συνολικές (μακροσκοπικές) σχέσεις σε συγκεντρωτικό επίπεδο [Burghout, 2004]. Μπορούν να προσομοιώσουν τις διαδρομές μεμονωμένων οχημάτων, τα οποία είναι εξοπλισμένα με συστήματα πληροφόρησης πραγματικού χρόνου ταξιδιού εντός του οχήματος. Οι χρόνοι ταξιδιού προσδιορίζονται από τις μέσες προσομοιωμένες ταχύτητες στους συνδέσμους του δικτύου, οι οποίες με τη σειρά τους υπολογίζονται από μία σχέση ταχύτητας-ροής. Τυπικές εφαρμογές μεσοσκοπικών μοντέλων είναι οι αξιολογήσεις συστημάτων πληροφοριών των επιβατών. Οι πιο διαδεδομένοι μεσοσκοπικοί προσομοιωτές είναι οι DynaMIT, Dynasmart και Mezzo.

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν και προσομοιωτές, οι οποίοι επίσης παρέχουν τη δυνατότητα εκτέλεσης υβριδικών προσομοιώσεων, όπως το Aimsun ή το TransModeler, που συνδυάζουν δύο ή και όλα τα επίπεδα προσομοίωσης, με αποτέλεσμα να είναι πιο ευέλικτοι και να έχουν ένα πιο διευρυμένο πεδίο επιλογών και θεματολογίας, στα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν. Αυτό δεν σημαίνει, βέβαια, ότι υπερτερούν σε σχέση με κάποιους άλλους, σε ότι αντικείμενο προκύψει. Είναι ιδανικοί για περιπτώσεις, όπου η προσομοίωση πρέπει να κάνει χρήση περισσότερων του ενός επιπέδου ανάλυσης, ωστόσο, όταν αυτό δεν απαιτείται, η επιλογή πρέπει να είναι συνάρτηση των στοιχείων του εκάστοτε αντικειμένου, ώστε να επιλεγεί ο προσομοιωτής που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ιδιαιτερότητές του.

Παράλληλα, παρουσιάζεται και μια ακόμα κατηγορία μοντέλων προσομοίωσης, τα μοντέλα τύπου Data-hub. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν μια εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης σε

μεγάλο αριθμό δεδομένων, που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από το πεδίο. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές συστημάτων διαχείρισης κυκλοφορίας, στα οποία τα αντικείμενα μελέτης είναι μεγάλα δίκτυα [Antonioni et al. 2008]. Συνδυάζουν πληροφορίες που προέρχονται από διαφορετικές πηγές, όπως κυκλοφοριακούς αισθητήρες ή εκτιμήσεις με βάση παλαιότερα δεδομένα, χωρίς να είναι απαραίτητη η λειτουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης μιας περιοχής. Το κατάλληλο πλαίσιο στο οποίο συνδυάζονται όλες οι πληροφορίες είναι ένα κυκλοφοριακό μοντέλο, το οποίο επιτρέπει την εφαρμογή του τρόπου με τον οποίο διεξάγεται η κυκλοφορία [Ploss et al. 2006]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συστημάτων κυκλοφοριακής προσομοίωσης, που χρησιμοποιούν μοντέλα Data-hub, είναι το INRIX.

Ένας άλλος διαχωρισμός των προτύπων προσομοίωσης είναι αυτός ανάλογα με την ελευθερία χρήσης. Έτσι διακρίνονται σε λογισμικά ανοιχτού κώδικα (open-source) και λογισμικά για τα οποία απαιτείται η λήψη άδειας από την αρχή έκδοσής τους, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν. Η κάθε κατηγορία παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή λογισμικού, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος που καλείται ο αναλυτής να αντιμετωπίσει.

Από τη μία, τα λογισμικά ανοιχτού κώδικα είναι προσιτά και διαθέσιμα σε όλους τους χρήστες που επιθυμούν να τα αξιοποιήσουν, χωρίς να χρειάζεται να γνωστοποιήσουν το χρονικό διάστημα ή το λόγο χρήσης τους. Συνήθως, είναι πολύ πιο φιλικά προς το χρήστη (user-friendly), αφού δεν απευθύνονται μόνο σε εξειδικευμένους χρήστες. Χρησιμοποιούνται από ένα ευρύ κοινό, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολο να εντοπισθούν πιθανά προβλήματα που προκύπτουν κατά τη λειτουργία τους και να προταθούν πολλές και διαφορετικές λύσεις για αυτά. Ωστόσο, η επίλυση ενός προβλήματος μπορεί να διαρκέσει σημαντικό χρονικό διάστημα, από τη στιγμή που δεν αποτελεί αποκλειστική απασχόληση κάποιου εξειδικευμένου ατόμου. Επίσης, ακριβώς επειδή όλοι οι χρήστες έχουν δικαίωμα παρέμβασης στον κώδικα του λογισμικού και τροποποίησής του, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να δημιουργηθούν νέα σφάλματα στην προσπάθεια επίλυσης κάποιου άλλου. Έτσι, ο εκάστοτε χρήστης θα πρέπει να είναι σε επιφυλακή, ώστε να ενημερώνεται για τυχόν αλλαγές και να προμηθεύεται συνεχώς τις νέες εκδόσεις του λογισμικού, προκειμένου να είναι σίγουρος για το αποτέλεσμα.

Από την άλλη, τα λογισμικά που ανήκουν σε κάποια εταιρία (στις περισσότερες περιπτώσεις ιδιωτικού τομέα) και απαιτούν τη λήψη άδειας πριν τη χρήση τους, έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία σε ότι αφορά τη σωστή λειτουργία τους, αφού υπεύθυνοι για τυχόν διορθώσεις είναι εξειδικευμένοι εργαζόμενοι, οι οποίοι έχουν ισχυρά κίνητρα για τη σωστή και άμεση διεξαγωγή της δουλειάς τους (οικονομικές απολαβές, επαγγελματική ανέλιξη κλπ.). Ωστόσο, η λήψη άδειας χρήσης τους, απαιτεί την καταβολή ενός, πολλές φορές αρκετά υψηλού, αντίτιμου από το μελετητή, το οποίο δεν είναι πάντα εύκολο να διατεθεί. Ακόμη, σε αρκετές μελέτες, προκύπτει η ανάγκη για παρέμβαση του μελετητή στον κώδικα του λογισμικού, προκειμένου να προσαρμόσει κάποια χαρακτηριστικά του λογισμικού στις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής που εξετάζει. Κάτι τέτοιο είναι ανέφικτο στα εμπορικά λογισμικά και αντιτίθεται στην πολιτική των εταιριών ανάπτυξής τους. Από τα λογισμικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, ανοιχτού κώδικα είναι τα MATSim, Mezzo και OmniTRANS,

ενώ τα υπόλοιπα (Aimsun, TransCAD, TransModeler και VISSIM) απαιτούν τη λήψη άδειας από την εταιρία έκδοσής τους.

Ένας άλλος διαχωρισμός της ανάλυσης που μπορεί να επιτύχει ένας προσομοιωτής αφορά το βαθμό ανταπόκρισης των οδηγών στα δεδομένα του δικτύου (compliance). Πιο συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε σημείου του δικτύου μεταβάλλονται δυναμικά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι παράμετροι που καθορίζουν την κίνηση των οχημάτων. Για παράδειγμα, μία διαδρομή μπορεί να είναι η συντομότερη δυνατή για τη σύνδεση δύο κόμβων και συνεπώς να την προτιμούν σχεδόν όλοι οι χρήστες του δικτύου που επιθυμούν να μετακινηθούν από τον ένα κόμβο στον άλλο. Από ένα σημείο και μετά, όμως, η διαδρομή αυτή φορτίζεται ιδιαίτερα, με αποτέλεσμα να μειώνεται αισθητά η ταχύτητα που μπορεί να αναπτυχθεί κατά μήκος της και να αυξάνεται εντόνως ο χρόνος που απαιτείται για να διανυθεί. Εκεί έρχεται να επέμβει ο αναλυτής, ο οποίος πρέπει να επιλέξει αν θέλει να αφήσει το δίκτυο να λειτουργήσει με τα αρχικά δεδομένα, ανεξαρτήτως πιθανών προβλημάτων που μπορεί να παρουσιάζονται, ή επιθυμεί να επιτρέψει στο δίκτυο να διαμορφώνεται δυναμικά και, αντίστοιχα, να δρουν και οι χρήστες, ανάλογα με τα εκάστοτε στιγμιαία χαρακτηριστικά του. Είναι προφανές ότι η δεύτερη αυτή προσέγγιση αποτελεί πολύ πιο χρονοβόρα και υπολογιστικά απαιτητική διαδικασία, είναι, όμως, σαφώς πιο ρεαλιστική και αξιοποιήσιμη σε ότι αφορά τα αποτελέσματά της.

2.2.5 Εφαρμογές προσομοίωσης

Η διαχείριση της κυκλοφορίας με τη χρήση της προσομοίωσης αποτελεί μια πολύ διαδεδομένη μεθοδολογία τα τελευταία χρόνια, λόγω των ανεπτυγμένων συστημάτων και δυνατοτήτων που προσφέρει. Έτσι, επιδεικνύοντας τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της, όπως τη δυναμικότητα και την επαναληπτικότητα, είναι σε θέση να ανταποκριθεί σε πληθώρα εφαρμογών, διαφορετικών αντικειμένων ή και προσεγγίσεων.

Ο σημαντικότερος λόγος που κάνει επιτακτική τη χρήση της προσομοίωσης είναι ότι, σε πολλές περιπτώσεις, η προσέγγιση με χρήση μαθηματικών μοντέλων είναι ανεπαρκής και οδηγεί σε αναξιόπιστα αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα πρόβλημα κυκλοφοριακής διαχείρισης μπορεί να είναι πολύ πιο σύνθετο, καθώς ο παράγοντας της ανθρώπινης συμπεριφοράς είναι αδύνατο να συμπεριληφθεί στις μαθηματικές εξισώσεις. Έτσι, η κύρια κατηγορία εφαρμογών που αξιοποιεί ιδιαίτερα την προσομοίωση αφορά τη μελέτη, το σχεδιασμό και την εκτέλεση μοντέλων, που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον ανθρώπινο παράγοντα και παρουσιάζουν μεγάλη δυναμικότητα, στοιχεία στα οποία μπορεί να ανταπεξέλθει πολύ καλά η προσομοίωση και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Εξάλλου, η προσομοίωση είναι μία από τις λίγες μεθοδολογίες που επιτρέπει την ανάλυση παραμέτρων ή τροποποιήσεων που δεν έχουν υλοποιηθεί ακόμα [Antonίου et al. 2008].

Παράλληλα, η προσομοίωση μπορεί να δώσει λύση σε περιπτώσεις όπου οι υποθέσεις που προκύπτουν από μαθηματικούς υπολογισμούς εμπεριέχουν σφάλματα στην ακρίβεια ή στον τρόπο που μπορούν αυτές να εφαρμοσθούν, καθώς μέσω της εκτέλεσης επαναλαμβανόμενων διαδικασιών με τα ίδια στοιχεία εισόδου. Με τον τρόπο αυτό, είναι αρκετά εύκολο να εκτιμηθούν με καλύτερη ακρίβεια οι αναμενόμενες συνθήκες και να

αποφευχθούν σφάλματα στα αποτελέσματα [Huang et al. 2006]. Ακόμη, μέσω της προσομοίωσης, διευκολύνεται η μελέτη φαινομένων κυκλοφοριακής συμφόρησης που εξελίσσονται για σημαντικό χρονικό διάστημα, ή η εκτίμηση μακροπρόθεσμων αλλαγών στην κυκλοφορία [Wu, 2011].

Μία άλλη κατηγορία εφαρμογών στις οποίες αξιοποιείται ιδιαίτερα η προσομοίωση είναι αυτή που επικεντρώνεται στην πληροφόρηση των οδηγών μέσω ανεπτυγμένων συστημάτων πληροφόρησης (ATIS). Είναι εμφανές ότι, χάρη στη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη ο ανθρώπινος παράγοντας, η κυκλοφοριακή προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και αξιολόγηση τέτοιων συστημάτων [Florian, 2004]. Η μέθοδος της προσομοίωσης, έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την καλύτερη κατανόηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς σε σχέση με την ανταπόκριση σε τέτοια συστήματα κυκλοφοριακής πληροφόρησης ATIS [Bogers et al. 2004].

Ένα ακόμα πολύ σημαντικό στοιχείο, που έχει οδηγήσει στη διάδοση και αξιοποίηση των μοντέλων προσομοίωσης από πολλές εφαρμογές, είναι η ανάγκη για οπτικοποίηση των προβλέψεων και των αποτελεσμάτων, προκειμένου να υπάρχει καλύτερη κατανόηση των φαινομένων. Με τον τρόπο αυτό, είναι εφικτή η ανάλυση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί το σύστημα και, κατά συνέπεια, και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας [Wei and Jarboe, 2010].

Σε όλες αυτές τις κατηγορίες εφαρμογών, αλλά και σε πολλές ακόμα, έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες και συστήματα κυκλοφοριακής διαχείρισης, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η προσομοίωση και βελτιώνοντας τόσο τον τρόπο εκτέλεσης μιας εφαρμογής, όσο και τις εκτιμήσεις και τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Ωστόσο, απαιτείται σύνεση και προσοχή στη χρήση της προσομοίωσης για την ανάλυση κυκλοφοριακών συστημάτων, καθώς η λανθασμένη εφαρμογή της ή η κακή ποιότητα των στοιχείων εισόδου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα στα αποτελέσματα και λανθασμένες εκτιμήσεις.

2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

2.3.1 Γενικά

Ανάλυση ευαισθησίας είναι η μελέτη του πως η αβεβαιότητα του αποτελέσματος ενός μαθηματικού μοντέλου ή συστήματος (αριθμητικό ή όχι), μπορεί να επιμεριστεί σε διαφορετικές πηγές αβεβαιότητας των δεδομένων του [Saltelli et al. 2008]. Η ανάλυση αυτή μπορεί να είναι χρήσιμη σε πληθώρα εφαρμογών, όπως:

- Έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου ή συστήματος, υπό την παρουσία αβεβαιότητας.
- Αυξημένη κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των στοιχείων εισόδου και εξόδου σε ένα σύστημα ή μοντέλο.
- Μείωση της αβεβαιότητας: αναγνώριση των στοιχείων εισόδου του μοντέλου που προκαλούν σημαντική αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα και οφείλουν να είναι το

επίκεντρο της προσοχής, εφόσον επιδιώκεται η αύξηση της αξιοπιστίας (ενδεχομένως με επιπλέον έρευνα).

- Αναζήτηση σφαλμάτων στο μοντέλο (μέσω της αντιμετώπισης απρόσμενων σχέσεων μεταξύ των στοιχείων εισόδου και εξόδου).
- Απλοποίηση του μοντέλου (σταθεροποίηση των στοιχείων εισόδου του μοντέλου που δεν έχουν καμία επίδραση στο αποτέλεσμα, ή εντοπισμός και εξάλειψη των περιττών τμημάτων της δομής του μοντέλου).
- Ενίσχυση της επικοινωνίας μεταξύ των κατασκευαστών μοντέλων και των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων (π.χ. κάνοντας πιο αξιόπιστες, κατανοητές επιτακτικές ή πειστικές τις συστάσεις τους).
- Εύρεση περιοχών στο διάστημα των παραγόντων εισόδου, για τις οποίες το αποτέλεσμα του μοντέλου είναι είτε μέγιστο ή ελάχιστο ή πληροί κάποιο βέλτιστο κριτήριο (βελτιστοποίηση ή τεχνικές ενσωμάτωσης Monte Carlo).

Ένα μαθηματικό μοντέλο ορίζεται από μία σειρά εξισώσεων, μεταβλητές εισόδου και παραμέτρους που αποσκοπούν στο χαρακτηρισμό κάποιας διαδικασίας υπό διερεύνηση. Μερικά παραδείγματα θα μπορούσαν να είναι ένα κλιματικό μοντέλο, ένα οικονομικό μοντέλο, ή ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στον τομέα της μηχανικής. Ολοένα και περισσότερο, τέτοια μοντέλα παρουσιάζουν ιδιαίτερη πολυπλοκότητα, και σαν αποτέλεσμα οι σχέσεις εισόδου / εξόδου τους μπορεί να είναι ελάχιστα κατανοητές. Αρκετά συχνά, μερικά ή όλα τα στοιχεία εισόδου του μοντέλου υπόκεινται σε πηγές αβεβαιότητας, συμπεριλαμβανομένων των σφαλμάτων μέτρησης, την απουσία των πληροφοριών και φτωχή ή μερική κατανόηση των κινητήριων δυνάμεων και μηχανισμών. Η αβεβαιότητα αυτή επιβάλλει ένα όριο εμπιστοσύνης στην απόκριση ή το αποτέλεσμα του μοντέλου. Επιπλέον, τα μοντέλα μπορεί να χρειαστεί να αντιμετωπίσουν την εγγενή φυσική μεταβλητότητα του συστήματος, όπως η εμφάνιση στοχαστικών γεγονότων [Der Kiureghian and Ditlevsen, 2009].

Η καλή εφαρμογή ενός μοντέλου απαιτεί ότι ο κατασκευαστής παρέχει μία αξιολόγηση της εμπιστοσύνης στο μοντέλο. Αυτό απαιτεί, πρώτα, μια ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε οποιοδήποτε αποτέλεσμα του μοντέλου (ανάλυση αβεβαιότητας), και δεύτερον, την αξιολόγηση του πόσο κάθε στοιχείο εισόδου συμβάλλει στην αβεβαιότητα του αποτελέσματος. Η ανάλυση ευαισθησίας εξετάζει το δεύτερο από αυτά τα θέματα (αν και η ανάλυση αβεβαιότητας είναι συνήθως ένα απαραίτητο βήμα που πρέπει να προηγηθεί), παίζοντας το ρόλο της ταξινόμησης βάσει σημαντικότητας τη δύναμη και την επίδραση των στοιχείων εισόδου στον προσδιορισμό της διακύμανσης του αποτελέσματος [Saltelli et al. 2008]. Σε μοντέλα με πολλές μεταβλητές εισόδου, η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα ουσιαστικό συστατικό της κατασκευής του μοντέλου και της διασφάλισης της ποιότητας. Εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί που συμμετέχουν στις μελέτες εκτίμησης επιπτώσεων, έχουν συμπεριλάβει ενότητες σχετικές με την ανάλυση ευαισθησίας στα εγχειρίδια οδηγιών τους.

2.3.2 Περιορισμοί ανάλυσης ευαισθησίας

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι προσέγγισης της ανάλυσης ευαισθησίας και η επιλογή μίας από αυτές υπαγορεύεται από έναν αριθμό περιορισμών και ρυθμίσεων του εξεταζόμενου προβλήματος. Μερικές από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους ανάλυσης ευαισθησίας είναι:

- Υπολογιστική επιβάρυνση: η ανάλυση ευαισθησίας σχεδόν πάντα πραγματοποιείται εκτελώντας το μοντέλο ένα (πιθανώς μεγάλο) αριθμό φορών, όπως για παράδειγμα μια προσέγγιση που βασίζεται στη δειγματοληψία [Helton et al. 2006]. Η μέθοδος αυτή μπορεί να παρουσιάζει περιορισμούς εφόσον μία μεμονωμένη εκτέλεση του μοντέλου παίρνει ένα σημαντικό χρονικό διάστημα (λεπτά, ώρες ή και περισσότερο), ή το μοντέλο έχει μεγάλο αριθμό αβέβαιων στοιχείων εισόδου. Πολλές φορές, προκειμένου να μειωθεί η υπολογιστική επιβάρυνση χρησιμοποιούνται εξομοιωτές (για μεγάλα μοντέλα), και μέθοδοι διαλογής των περιπτώσεων που θα εξεταστούν (για τη μείωση των διαστάσεων του προβλήματος).
- Συσχετισμένα στοιχεία εισόδου: οι περισσότερες κοινές μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας βασίζονται στην υπόθεση ότι τα στοιχεία εισόδου του μοντέλου είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, αλλά μερικές φορές τα στοιχεία αυτά μπορεί να συσχετίζονται έντονα. Πρόκειται για πεδίο της έρευνας, που δεν έχει μελετηθεί πλήρως, ώστε να καθοριστούν οριστικές μέθοδοι διαχείρισης.
- Μη γραμμικότητα: Μερικές προσεγγίσεις ανάλυσης ευαισθησίας, όπως εκείνες που βασίζονται σε γραμμική παλινδρόμηση, μπορεί να εξάγει ανακριβώς ευαισθησία όταν η απόκριση του μοντέλου είναι μη γραμμική σε σχέση με τα στοιχεία εισόδου. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μετρήσεις που βασίζονται στη διακύμανση θεωρούνται πιο κατάλληλες.
- Αλληλεπιδράσεις μοντέλου: αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν όταν η ταυτόχρονη μεταβολή δύο ή περισσότερων στοιχείων εισόδου προκαλεί διακύμανση του αποτελέσματος, μεγαλύτερη από αυτή που θα προέκυπτε μεταβάλλοντας το καθένα από τα στοιχεία εισόδου ξεχωριστά. Τέτοιες αλληλεπιδράσεις παρουσιάζονται σε οποιοδήποτε μη-αθροιστικό μοντέλο (non-additive model), αλλά δε λαμβάνεται υπόψη σε μεθόδους που χρησιμοποιούν διαγράμματα ή μεταβολή των παραμέτρων, μία τη φορά (one-at-a-time) [Saltelli and Annoni, 2010]. Η επίδραση των αλληλεπιδράσεων αυτών μπορεί να μετρηθεί με τον δείκτη ευαισθησίας συνολικής τάξης (total-order sensitivity index).
- Πολλαπλά στοιχεία εξόδου: ουσιαστικά όλες οι μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας εξετάζουν ένα μοναδικό και μονοδιάστατο στοιχείο εξόδου του μοντέλου, ωστόσο πολλά μοντέλα εξάγουν μεγάλο αριθμός πιθανώς χωρικά ή χρονικά εξαρτώμενων δεδομένων. Αυτό δεν αποκλείει τη δυνατότητα εκτέλεση διαφορετικών αναλύσεων ευαισθησίας για κάθε στοιχείο εξόδου που ενδιαφέρει το μελετητή. Ωστόσο, σε ότι αφορά τα μοντέλα στα οποία τα στοιχεία εξόδου συσχετίζονται, οι μετρήσεις ευαισθησίας μπορεί να παρουσιάσουν δυσκολίες στην κατανόηση και την ερμηνεία τους.
- Δεδομένα στοιχεία: ενώ πολλές φορές ο μελετητής έχει πρόσβαση στο μοντέλο, σε ορισμένες περιπτώσεις, η ανάλυση ευαισθησίας πρέπει να γίνει με «δεδομένα

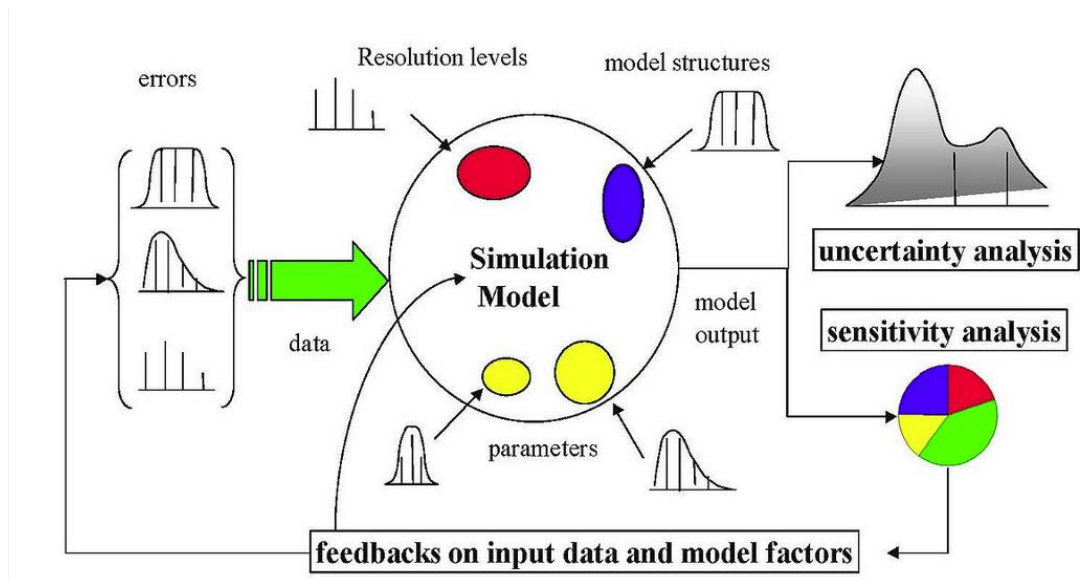
στοιχεία», όπως για παράδειγμα όταν τα σημεία δειγματοληψίας (οι τιμές των εισαγόμενων παραμέτρων για κάθε εκτέλεση) δεν γίνεται να επιλεγούν από τον αναλυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η ανάλυση ευαισθησίας πρέπει να πραγματοποιηθεί εκ των υστέρων, ενδεχομένως χρησιμοποιώντας δεδομένα από μία βελτιστοποίηση ή ανάλυση αβεβαιότητας, ή όταν τα δεδομένα προέρχονται από μια ξεχωριστή πηγή [Paguolo et al. 2012].

2.3.3 Τεχνικές ανάλυσης ευαισθησίας

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός προσεγγίσεων για την εκτέλεση μιας ανάλυσης ευαισθησίας, πολλές από τα οποίες έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση ενός ή περισσοτέρων από τους περιορισμούς που συζητήθηκαν παραπάνω. Διακρίνονται επίσης με βάση τον τύπο της μέτρησης ευαισθησίας, όπως για παράδειγμα με βάση διαχωρισμούς διακύμανσης, μερικά παράγωγα ή στοιχειώδη αποτελέσματα. Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, οι περισσότερες διαδικασίες τηρούν την ακόλουθη δομή:

- Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας για κάθε στοιχείο εισόδου (π.χ. εύρη, κατανομές πιθανοτήτων). Σημειώνεται ότι αυτό μπορεί να είναι δύσκολο και έτσι, υπάρχουν πολλές μέθοδοι, ώστε να προκύψουν κατανομές αβεβαιότητας από υποκειμενικά δεδομένα [O' Hagan, 2006].
- Εντοπισμός του αποτελέσματος του μοντέλου που θα αναλυθεί (το αντικείμενο ενδιαφέροντος πρέπει ιδανικά να έχει άμεση σχέση με το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται από το μοντέλο).
- Εκτέλεση του μοντέλου αρκετές φορές, χρησιμοποιώντας κάποιο σχεδιασμό των πειραμάτων, που υπαγορεύεται από την επιλογή μεθόδου και την αβεβαιότητα των στοιχείων εισόδου.
- Χρήση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το μοντέλο, για τον υπολογισμό των μετρήσεων ευαισθησίας ενδιαφέροντος.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η διαδικασία αυτή πρέπει να επαναληφθεί, όπως για παράδειγμα σε πολυδιάστατα προβλήματα, όπου ο χρήστης πρέπει να απαλείψει ασήμαντες μεταβλητές πριν από την εκτέλεση μιας πλήρους ανάλυσης ευαισθησίας. Στην εικόνα 1, παρουσιάζεται ένα ιδανικό σχεδιάγραμμα μιας ανάλυσης ευαισθησίας βασιζόμενη στη δειγματοληψία. Η αβεβαιότητα που προκύπτει από διαφορετικές πηγές (σφάλματα στα δεδομένα, διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων, εναλλακτικές δομές μοντέλου) διαδίδεται μέσω του μοντέλου για ανάλυση αβεβαιότητας και η σχετική τους σημαντικότητα ποσοτικοποιείται μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας (Σχήμα 2.1). Παρακάτω, αναλύονται κάποιες βασικές μέθοδοι προσέγγισης της ανάλυσης ευαισθησίας, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.



Σχήμα 2.1: Ιδανικό σχεδιάγραμμα μιας πιθανής ανάλυσης ευαισθησίας βασιζόμενης σε δειγματοληψία [Saltelli, 1999].

2.3.3.1 One-at-a-time (OAT)

Μία από τις πιο απλές και κοινές προσεγγίσεις είναι η μεταβολή ενός παράγοντα τη φορά (one-at-a-time), ώστε να διαπιστωθεί τι επίδραση δημιουργεί αυτό στο αποτέλεσμα [Murphy et al. 2004]. Η προσέγγιση OAT συνήθως περιλαμβάνει:

- Μεταβολή μιας από τις μεταβλητές εισόδου, διατηρώντας τις υπόλοιπες στην αρχική τους τιμή, και έπειτα,
- Επιστροφή αυτής της μεταβλητής στην αρχική της τιμή και επανάληψη της διαδικασίας για κάθε μία από τις άλλες μεταβλητές με τον ίδιο τρόπο.

Έτσι, η ευαισθησία μπορεί να μετρηθεί μέσω της παρακολούθησης των μεταβολών στο αποτέλεσμα, όπως για παράδειγμα μέσω μερικών παραγώγων ή γραμμικής παλινδρόμησης. Πρόκειται για μία λογική προσέγγιση, καθώς όποια μεταβολή παρατηρείται στο αποτέλεσμα, αναμφίβολα οφείλεται στη μοναδική μεταβλητή που έχει αλλάξει. Επιπλέον, μεταβάλλοντας μία μεταβλητή τη φορά, ο μελετητής μπορεί να διατηρήσει όλες τις υπόλοιπες στην κεντρική ή βασική τους τιμή. Αυτό αυξάνει τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων (όλες οι επιδράσεις υπολογίζονται με βάση το ίδιο κεντρικό σημείο στο χώρο) και ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες διακοπής της λειτουργίας του υπολογιστικού λογισμικού, κάτι που είναι αρκετά πιθανό όταν αρκετοί παράγοντες εισόδου αλλάζουν ταυτόχρονα. Η προσέγγιση OAT συχνά προτιμάται από τους κατασκευαστές μοντέλων για πρακτικούς λόγους. Σε περίπτωση αποτυχίας του μοντέλου υπό ανάλυση OAT, ο κατασκευαστής ξέρει αμέσως ποιος από τους παράγοντες εισόδου είναι υπεύθυνος για την αποτυχία [Saltelli and Annoni, 2010]. Ωστόσο, παρά την απλότητά της, αυτή η προσέγγιση δε διερευνά πλήρως το χώρο των στοιχείων εισόδου, δεδομένου ότι δεν λαμβάνει υπόψη την ταυτόχρονη μεταβολή των μεταβλητών εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι η προσέγγιση OAT δεν μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου [Frey and Jugulum, 2006].

2.3.3.2 Διαγράμματα συσχέτισης (Scatterplots)

Ένα απλό αλλά χρήσιμο εργαλείο είναι ο σχεδιασμός διαγραμμάτων συσχέτισης της μεταβλητής εξόδου ως προς μεμονωμένες μεταβλητές εισόδου, μετά από (τυχαία) δειγματοληψία του μοντέλου με βάση τις κατανομές των στοιχείων εισόδου του το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι μπορεί να διαχειριστεί και δοσμένα στοιχεία, όπως για παράδειγμα, ένα σύνολο αυθαίρετα τοποθετημένων σημείων δεδομένων, και να δώσει μία άμεση οπτική ένδειξη της ευαισθησίας. Μπορούν ακόμα να εξαχθούν ποσοτικές μετρήσεις, όπως για παράδειγμα, υπολογίζοντας τη συσχέτιση μεταξύ του Y και του X_i , ή ακόμα και εκτιμώντας μετρήσεις που βασίζονται στη διακύμανση μέσω μη γραμμικής παλινδρόμησης [Paruolo et al. 2012].

2.3.3.3 Μέθοδοι ανάλυσης διακύμανσης (Variance-based methods)

Οι μέθοδοι που βασίζονται στην ανάλυση της διακύμανσης είναι μία κατηγορία πιθανολογικών προσεγγίσεων που ποσοτικοποιούν τις αβεβαιότητες των στοιχείων εισόδου και εξόδου σαν κατανομές πιθανοτήτων, και αποσυνθέτουν τη διακύμανση του αποτελέσματος σε μέρη που αποδίδονται στις μεταβλητές εισόδου και σε συνδυασμούς μεταβλητών [Saltelli et al. 2010]. Επομένως, η ευαισθησία του αποτελέσματος σε μια μεταβλητή εισόδου μετράται από την ποσότητα της διακύμανσης στο αποτέλεσμα που οφείλεται σε αυτή τη μεταβλητή εισόδου. Οι ευαισθησίες αυτές μπορούν να εκφραστούν ως υπό συνθήκες προσδοκίες, όπως για παράδειγμα, θεωρώντας ένα μοντέλο $Y=f(\mathbf{X})$, όπου $\mathbf{X}=\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$, μία μέτρηση ευαισθησίας της i -οστής μεταβλητής X_i ορίζεται ως:

$$Var_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y|X_i))$$

όπου Var και E ορίζονται η διακύμανση και οι εξισώσεις αναμενόμενης τιμής αντίστοιχα, και το $X_{\sim i}$ συμβολίζει το σύνολο όλων των μεταβλητών εισόδου, εκτός από το X_i . Αυτή η έκφραση ουσιαστικά μετράει τη συμμετοχή της X_i μόνη της στην αβεβαιότητα (διακύμανση) του Y (μέσο όρο σύμφωνα με τις μεταβολές των άλλων μεταβλητών) και είναι γνωστή ως δείκτης ευαισθησίας πρώτης τάξης ή δείκτης κύριας επίδρασης. Είναι σημαντικό ότι δεν μετρά την αβεβαιότητα που προκαλείται από αλληλεπιδράσεις με τις άλλες μεταβλητές. Μία άλλη μέτρηση, γνωστή ως δείκτης συνολικής επίδρασης, δίνει τη συνολική διακύμανση του Y που προκαλείται από το X_i και της αλληλεπιδράσεις του με οποιαδήποτε από τις άλλες μεταβλητές εισόδου. Και τα δύο μεγέθη συνήθως τυποποιούνται διαιρώντας με τη διακύμανση $Var(Y)$.

Οι μέθοδοι που βασίζονται στη διακύμανση επιτρέπουν πλήρη εξερεύνηση του χώρου εισόδου, λαμβάνοντας υπόψη αλληλεπιδράσεις και μη γραμμικές αποκρίσεις. Για αυτούς τους λόγους, χρησιμοποιούνται ευρέως όταν είναι εφικτό να υπολογιστούν. Συνήθως, αυτός ο υπολογισμός εμπεριέχει τη χρήση μεθόδων Monte Carlo, αλλά μιας και αυτό μπορεί να εμπλέκει πολλές χιλιάδες εκτελέσεις του μοντέλου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι (όπως εξομοιωτές), προκειμένου να μειωθεί η υπολογιστική επιβάρυνση, όταν είναι απαραίτητο. Σημειώνεται ότι οι αποσυνθέσεις πλήρους διακύμανσης έχουν νόημα μόνο όταν οι συντελεστές εισόδου είναι ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλο [Saltelli and Tarantola, 2002].

2.3.4 Συμπεριφορά οδηγών

Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότερες μελέτες αξιοποιούν το εργαλείο της ανάλυσης ευαισθησίας, προκειμένου να αυξήσουν το βαθμό εμπιστοσύνης των αποτελεσμάτων τους και να μειώσουν το χρόνο και την υπολογιστική διαδικασία που απαιτείται για την εξαγωγή τους. Κάτι τέτοιο παρατηρείται και σε αρκετές μελέτες με θέμα την κυκλοφοριακή λειτουργία, και πιο συγκεκριμένα τη συμπεριφορά των οδηγών. Είναι γεγονός ότι η συμπεριφορά των οδηγών και συνεπώς και η λειτουργία του δικτύου εξαρτώνται από πληθώρα παραμέτρων, οι οποίες δεν είναι εύκολο πάντα να υπολογιστούν και να προσαρμοστούν στις εκάστοτε ιδιαιτερότητες και περιορισμούς της εφαρμογής που εξετάζεται. Ακόμη, πολλές φορές, υπάρχει έλλειψη στατιστικών στοιχείων και μετρήσεων για τα μεγέθη που απαρτίζουν το μοντέλο της οδηγικής συμπεριφοράς, με αποτέλεσμα να πρέπει να γίνει εκτίμηση των μεγεθών αυτών, γεγονός που ενέχει κίνδυνο για ύπαρξη σφαλμάτων στα στοιχεία εισόδου και συνεπώς και στα στοιχεία εξόδου.

Το πρόβλημα αυτό έρχεται να λύσει η ανάλυση ευαισθησίας, καθώς επιτρέπει την ανάλυση της επίδρασης κάθε μεταβλητής, αλλά και συνδυασμού κάποιων μεταβλητών στο τελικό αποτέλεσμα. Έτσι, εξάγονται οι παράμετροι αυτές που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη λειτουργία του μοντέλου και προσαρμόζονται με βάση τις εξεταζόμενες συνθήκες, μειώνοντας δραστικά το χρόνο και την υπολογιστική διαδικασία για την προετοιμασία του κυκλοφοριακού μοντέλου. Επιπλέον, σε περιπτώσεις που δεν διατίθενται στοιχεία για τη συμπεριφορά των οδηγών υπό τις εξεταζόμενες συνθήκες, μελετώντας και μεταβάλλοντας μόνο τις παραμέτρους που έχουν οριστεί ως σημαντικές μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας, μπορούν να εξεταστούν πολλοί και διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του μοντέλου και οι αντίστοιχες αποκρίσεις του συστήματος.

Ένα ακόμα πεδίο στο οποίο έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα η ανάλυση ευαισθησίας είναι αυτό της κυκλοφοριακής προσομοίωσης. Όλα τα λογισμικά κυκλοφοριακής προσομοίωσης τελευταίας γενιάς, χρησιμοποιούν πολυδιάστατα μοντέλα κυκλοφορίας, τα οποία συνθέτονται από πολύ μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Ακόμη, τα εργαλεία προσομοίωσης χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν μετρήσεις για τις παραμέτρους αυτές, μιας και επιτρέπουν την άμεση και εύκολη εκτέλεση πολλών επαναλήψεων, μεταβάλλοντας τα στοιχεία εισόδου. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι η προσέγγιση με ανάλυση ευαισθησίας είναι σε θέση να υποδείξει τις σημαντικές παραμέτρους στο μελετητή, ο οποίος μπορεί να περιορίσει την ανάλυσή του μόνο σε αυτές, μειώνοντας το χρόνο ανάλυσης και αυξάνοντας το βαθμό εμπιστοσύνης του μοντέλου.

Χαρακτηριστική μελέτη που έγκειται στην παραπάνω προσέγγιση είναι αυτή των Prionisti and Antoniou (2012), όπου περιγράφεται η σύγκριση ορισμένων κυκλοφοριακών μοντέλων στη συμπεριφορά των οδηγών υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται μέσω κυκλοφοριακής προσομοίωσης ενός σεναρίου εκκένωσης λόγω ενός πυρηνικού ατυχήματος. Στη μελέτη αυτή, συγκρίνονται τέσσερα μοντέλα οδηγικής συμπεριφοράς, για τα οποία πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας OAT. Έτσι, δεν εξετάζονται τα αποτελέσματα που πιθανώς να προκύψουν από ταυτόχρονη μεταβολή περισσότερων της μιας παραμέτρων, και ενδεχομένως απουσιάζει από τα εξαγόμενα συμπεράσματα η ανάλυση κάποιας επιπλέον συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων.

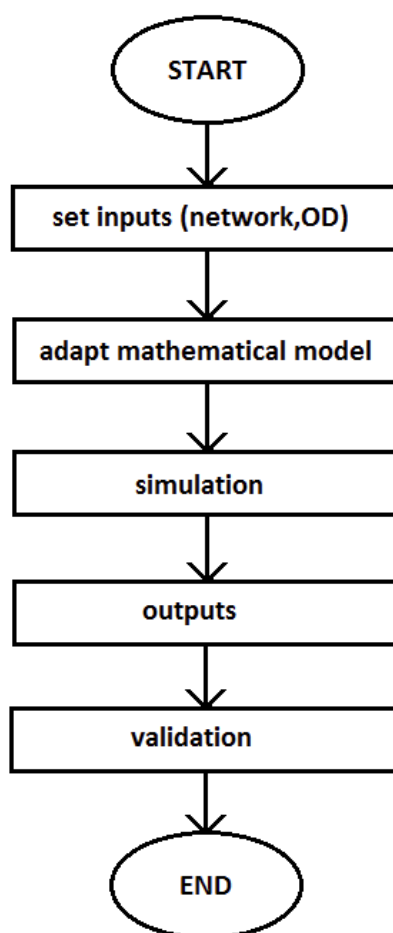
Σε ότι αφορά το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN, έχουν πραγματοποιηθεί λίγες μελέτες ανάλυσης ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου, με σημαντικότερη αυτή των Ciuffo et al. (2013), σύμφωνα με την οποία εξετάστηκε μία τεχνική βασισμένη σε μεταμοντέλο και εφαρμόστηκε στο μεσοσκοπικό μοντέλο του AIMSUN. Στη μελέτη αυτή, εκφράστηκε ο ισχυρισμός ότι η εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας είναι ζωτικής σημασίας για την πραγματική κατανόηση και τη σωστή χρήση του μοντέλου κυκλοφοριακής προσομοίωσης, ενώ παράλληλα αναγνωρίστηκε ότι το κύριο εμπόδιο για εκτεταμένη χρήση πιο εξελιγμένων τεχνικών είναι ο υψηλός αριθμός εκτελέσεων του μοντέλου που συνήθως απαιτούνται. Για το λόγο αυτό, ελέγχθηκε η πιθανότητα εφαρμογής ανάλυσης ευαισθησίας όχι σε ένα μοντέλο, αλλά στην προσέγγισή του ως μεταμοντέλο. Κατά την εκτίμηση αυτού του μεταμοντέλου προέκυψαν σημαντικά ζητήματα, μεταξύ των οποίων η σημασία επιλογής κατάλληλης στρατηγικής δειγματοληψίας με βάση ακολουθίες τυχαίων αριθμών χαμηλής απόκλισης, καθώς και η σημασία επιλογής μιας κατηγορίας μεταμοντέλων ικανής να αναπαράγει τη σχέση μεταξύ στοιχείων εισόδου και εξόδου με ισχυρό και αξιόπιστο τρόπο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει ότι, αν και έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες εκκένωσης και έχει εφαρμοστεί σε αυτές ανάλυση ευαισθησίας, εντούτοις υπάρχει μία έλλειψη σε ότι αφορά την ολοκληρωμένη προσέγγιση της ανάλυσης ευαισθησίας και μάλιστα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπου τα δεδομένα για τη συμπεριφορά των οδηγών είναι ανύπαρκτα.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

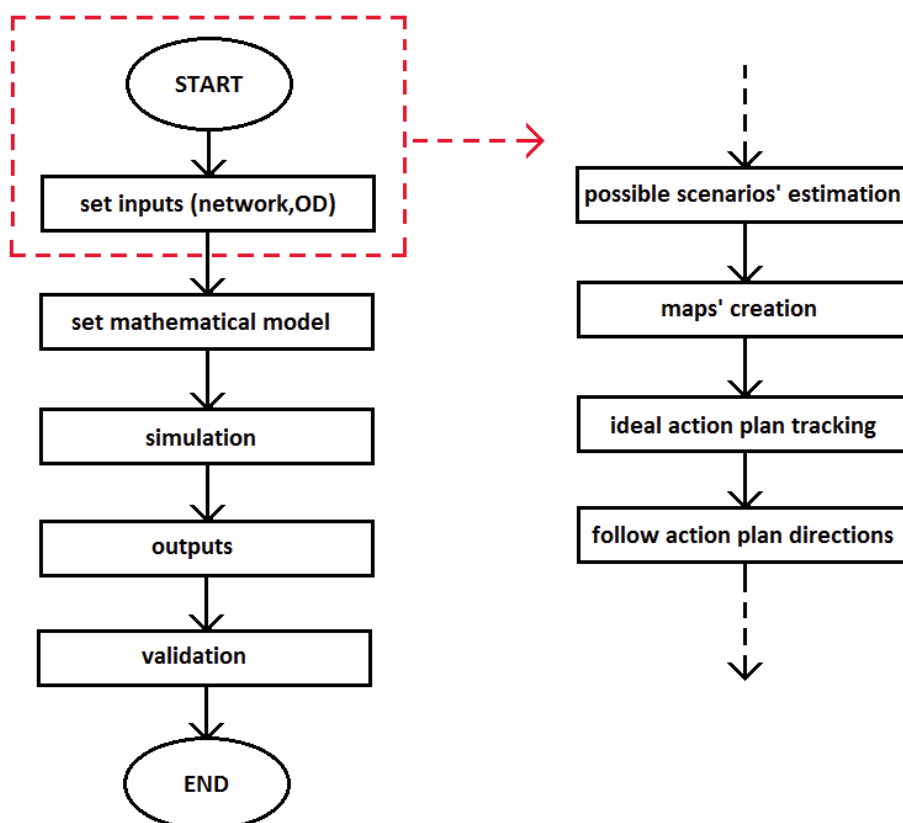
3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Προκειμένου να εφαρμοσθεί η κυκλοφοριακή προσομοίωση σε μια μελέτη εκκένωσης, ακολουθείται μία γενική μεθοδολογία, η οποία περιγράφει όλα τα στάδια που πραγματοποιούνται, από τον ορισμό των στοιχείων εισόδου, μέχρι την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Είναι προφανές ότι η μεθοδολογία αυτή ξεκινάει με τον ορισμό του συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία εισόδου που το περιγράφουν. Τα στοιχεία αυτά αφορούν κυρίως το δίκτυο στο οποίο θα εκτελεστεί η προσομοίωση, καθώς και τους πίνακες προέλευσης-προορισμού, που θα αποτελέσουν τη βάση για τον προσδιορισμό των πιθανών διαδρομών. Στη συνέχεια, ορίζεται το μαθηματικό μοντέλο, που εκφράζει το γενικό τρόπο λειτουργίας της προσομοίωσης, μέσω εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών του συστήματος. Τέλος, εκτελείται η προσομοίωση και συλλέγονται τα αποτελέσματα, τα οποία και αξιολογούνται από τον μελετητή. Η γενική αυτή μεθοδολογία παρουσιάζεται σε μορφή διαγράμματος ροής παρακάτω (Σχήμα 3.1).



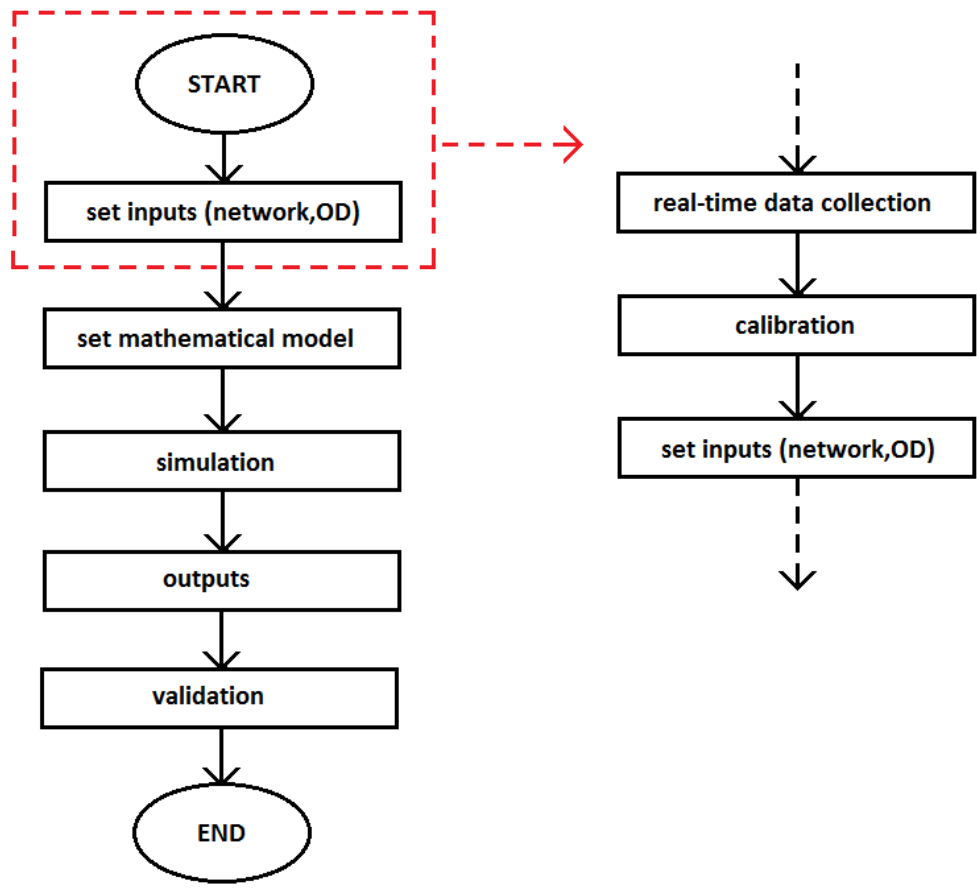
Σχήμα 3.1: Γενική μεθοδολογία κυκλοφοριακής προσομοίωσης.

Αναλύοντας το παραπάνω σχήμα, διαπιστώνεται εύκολα ότι κάποια από τα στάδια της εφαρμογής απαιτούν την εκτέλεση άλλων ενεργειών, προκειμένου να διευκρινιστούν ορισμένα στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο βήμα της μεθοδολογίας περιλαμβάνει τον ορισμό όλων εκείνων των στοιχείων που θα αποτελέσουν τη βάση της προσομοίωσης, με κυριότερο εκείνο του πίνακα προέλευσης-προορισμού. Προκειμένου, όμως, να οριστούν τα στοιχεία αυτά, κρίνεται απαραίτητη η συλλογή σχετικών δεδομένων και η αξιολόγηση τους. Κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εύκολο, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για όλες τις πιθανές περιπτώσεις που μπορεί να εξεταστούν. Διακρίνονται, λοιπόν, δύο μεγάλες κατηγορίες: η πρώτη αφορά το σχεδιασμό, μέσω του οποίου εκτιμώνται όλα τα πιθανά στοιχεία εισόδου και με βάση αυτά δημιουργούνται χάρτες διαχείρισης κυκλοφορίας. Στην περίπτωση αυτή, εφόσον προκύψει ανάγκη εκκένωσης, ο μελετητής ανατρέχει στους χάρτες αυτούς, εντοπίζει το σχέδιο δράσης που ανταποκρίνεται καλύτερα στις συνθήκες του τρέχοντος συμβάντος και λαμβάνει τις αποφάσεις με βάση αυτό. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Ορισμός στοιχείων εισόδου με βάση το σχεδιασμό.

Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται στη συλλογή πραγματικών δεδομένων ζήτησης (real-time data), όπως πληθυσμιακά στοιχεία ή φόρτος, καθώς και αποτελέσματα ανάλυσης προηγούμενων μελετών. Με βάση τα στοιχεία αυτά, εισάγονται τα απαραίτητα δεδομένα και εκτελούνται και τα υπόλοιπα βήματα της μεθοδολογίας. Φυσικά, τα στοιχεία αυτά χρήζουν αξιολόγησης, προκειμένου να βαθμονομηθούν και να προσαρμοστούν στα χαρακτηριστικά της εκάστοτε εφαρμογής. Η βαθμονόμηση αυτή γίνεται μέσω ανάλυσης των συνθηκών που εξετάζονται και συλλογής των αντίστοιχων πραγματικών δεδομένων, μέσω των οποίων προκύπτουν τα δεδομένα αυτά που τελικά θα χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία εισόδου στην προσομοίωση (Σχήμα 3.3). Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί παράλληλα με το σχεδιασμό, προκειμένου να ισχυροποιήσει την αξιοπιστία της διαδικασίας σχεδιασμού.

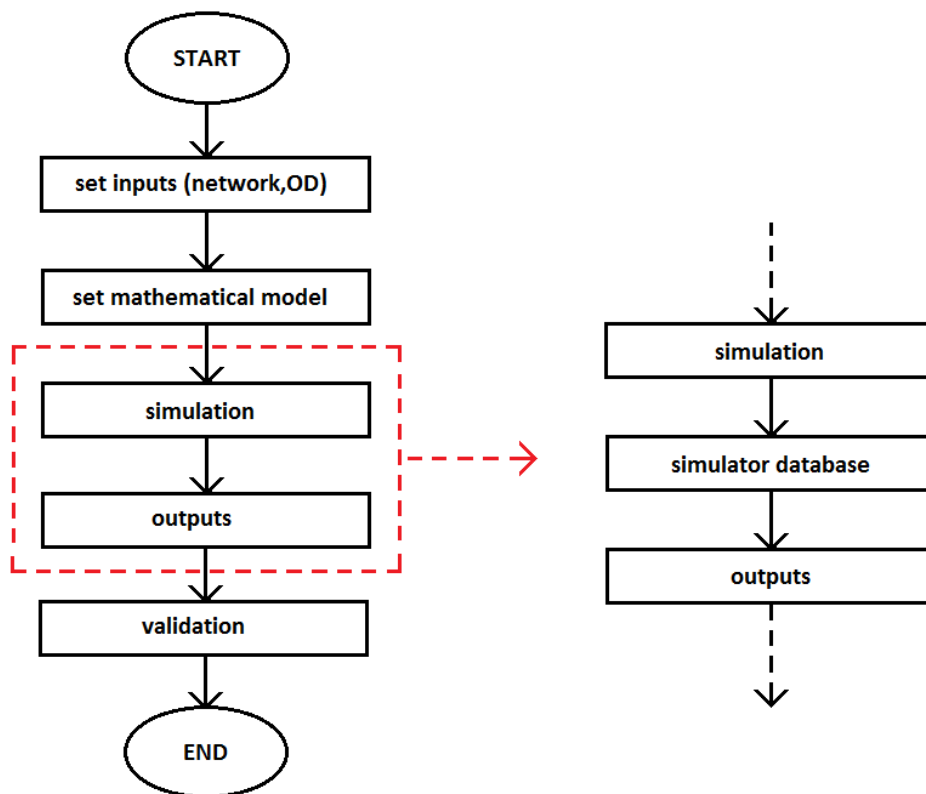


Σχήμα 3.3: Ορισμός στοιχείων εισόδου με βάση δεδομένα πραγματικού χρόνου.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί, το οποίο ορίζεται συναρτήσει των αναγκών και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της εκάστοτε περίπτωσης. Ανάλογα, λοιπόν, με το σκοπό της εφαρμογής, ορίζεται ένα γενικό πλαίσιο αλγορίθμων που αποτελείται από εξισώσεις μεταξύ των μεταβλητών και καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος. Φυσικά, οι τιμές που παίρνουν οι σταθερές του συστήματος εξαρτώνται και αυτές από τη φύση και τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής που εξετάζεται. Έτσι, ανάλογα με το σενάριο που

αναπαρίσταται, ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων που εκφράζουν τη συμπεριφορά των οδηγών (επιθετικότητα, συμμόρφωση στα πρότυπα κλπ.).

Το στάδιο των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει και αυτό επιπλέον ενέργειες που απαιτείται να πραγματοποιηθούν, προκειμένου να οδηγηθεί ο μελετητής από την προσομοίωση στη συλλογή των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, κάθε προσομοιωτής, αφού εκτελέσει την προσομοίωση που έχει οριστεί από το χρήστη, δημιουργεί μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει όλα εκείνα τα μεγέθη που έχουν επίσης οριστεί από το χρήστη ως στοιχεία εξόδου. Η καταμέτρηση των μεγεθών αυτών γίνεται καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ανά χρονικά και χωρικά διαστήματα που ορίζονται από το χρήστη. Κάποια από τα μεγέθη αυτά μπορούν να επιλεγθούν να οπτικοποιηθούν στο γραφικό περιβάλλον του προσομοιωτή, είτε με γραφικές προσθήκες στο υπάρχον δίκτυο, είτε με τη μορφή διαγραμμάτων. Έτσι, η συλλογή των δεδομένων γίνεται μέσω της επεξεργασίας της βάσης δεδομένων του προσομοιωτή από το χρήστη, ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Εξαγωγή αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει η ανάγκη για αξιολόγηση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε. Προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα μιας μεθοδολογίας, πρέπει να εφαρμοστεί σε κάποιο πρόβλημα, ώστε να διαπιστωθεί αν είναι δυνατόν να το επιλύσει. Όσο πιο πολύ βασίζεται στην πραγματικότητα το πρόβλημα αυτό, τόσο πιο αντικειμενικά θα είναι τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας. Φυσικά, αυτό δεν

σημαίνει ότι στην περίπτωση ενός φανταστικού προβλήματος, η εφαρμογή μιας μεθοδολογίας είναι άτοπη. Απλά, η αντικειμενικότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αξιοπιστία των στοιχείων εισόδου και των παραμέτρων που ορίζουν το πρόβλημα. Από την άλλη, όταν το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι υπαρκτό και βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα, αυτόματα ξεπερνιέται το στάδιο της αξιολόγησης των δεδομένων και η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από την σωστή εφαρμογή της μεθοδολογίας και μόνο. Ωστόσο, είναι προφανές ότι δεν έχουν όλες οι περιπτώσεις έκτακτων αναγκών παρόμοια χαρακτηριστικά και δεν διέπονται από τους ίδιους κανόνες και τις ίδιες παραμέτρους, είτε βασίζονται στη πραγματικότητα είτε όχι. Συνεπώς, η αντιμετώπισή τους απαιτεί την προσαρμογή της γενικής μεθοδολογίας στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

3.2 ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η παραπάνω μεθοδολογία αφορά τη γενική προσέγγιση της εκκένωσης με κυκλοφοριακή προσομοίωση. Όπως αναφέρθηκε όμως και προηγουμένως, σε πολλά σημεία, η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας και τα βήματα που πρέπει να εκτελεστούν εξαρτώνται από το σκοπό της περίπτωσης που εξετάζεται και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της. Προκειμένου, λοιπόν, να διευκρινιστούν οι ενέργειες που απαιτούνται για την εφαρμογή της μεθοδολογίας, χρειάζεται η περιγραφή του σκοπού της μελέτης και των χαρακτηριστικών του σεναρίου που εξετάζεται.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, προτιμήθηκε να μελετηθεί ένα σχεδόν υπαρκτό σενάριο, προκειμένου να αποφευχθεί η είσοδος μη αξιόπιστων στοιχείων, και μάλιστα ένα σενάριο, το οποίο είναι πολύ πιθανό να χρειαστεί να αντιμετωπιστεί στο άμεσο μέλλον και έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τους επιστήμονες τα τελευταία χρόνια. Η περίπτωση αυτή αφορά την εκκένωση του νησιού της Σαντορίνης, η οποία επιβάλλεται λόγω μιας φυσικής καταστροφής που συνδέεται με το ενεργό ηφαίστειο της περιοχής, όπως κάποιος δυνατός σεισμός ή ακόμα και έκρηξη του ίδιου του ηφαιστείου. Πρόκειται για μια περίπτωση που παρουσιάζει αυξημένες πιθανότητες εκδήλωσης, καθώς υπάρχει ιδιαίτερη κινητικότητα του ηφαιστείου σε σχέση με την μέχρι πρόσφατα εξέλιξή του και ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αφού όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για να στηθεί η εφαρμογή και να οριστούν οι παράμετροί της, βασίστηκαν σε αληθινά δεδομένα. Τα στοιχεία αυτά αναλύονται παρακάτω και παρουσιάζονται και οι πηγές τους.

3.2.1 Συλλογή δεδομένων

Σε ότι αφορά τα δεδομένα που χρειάζονται για την εφαρμογή μιας τέτοιας μεθοδολογίας, αυτά διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη αφορά το δίκτυο στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η εφαρμογή, η δεύτερη στη ζήτηση που θα υπάρχει κατά την εκτέλεση της εφαρμογής και η τρίτη στις περιοχές που θα οριστούν ως safe zones. Κάθε μία από τις κατηγορίες αυτές περιλαμβάνει πολλά επιμέρους στοιχεία, μικρότερης ή μεγαλύτερης σημασίας, τα οποία όμως, όλα μαζί συνθέτουν το γενικό πλαίσιο της εφαρμογής. Είναι προφανές ότι χωρίς σωστά και αντιπροσωπευτικά δεδομένα, η εφαρμογή δεν θα είχε κάποιο πρακτικό νόημα, αφού τα αποτελέσματά της δεν θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν

με κάποιο τρόπο. Προκειμένου, λοιπόν, να εξαχθούν κάποια ουσιαστικά συμπεράσματα, πρέπει τα αποτελέσματα να είναι αντιπροσωπευτικά και αξιοποιήσιμα. Όσο περισσότερο ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα τα στοιχεία εισόδου, τόσο θα ισχύει το ίδιο και για τα αποτελέσματα, γεγονός που δίνει μεγάλη βαρύτητα στη συλλογή των δεδομένων.

Το δίκτυο αποτελεί τη βάση της εφαρμογής, καθώς ορίζει όλες τις παραμέτρους που αφορούν τον τρόπο που θα μετακινηθούν τα οχήματα. Πιο αναλυτικά, περιλαμβάνει στοιχεία για τους συνδέσμους που συνθέτουν το οδικό δίκτυο, από το μήκος και τον αριθμό των λωρίδων τους, μέχρι τον επιτρεπόμενο φόρτο που μπορούν να εξυπηρετήσουν και τις μέγιστες επιτρεπόμενες ταχύτητες. Όλα αυτά τα στοιχεία, όχι απλά επηρεάζουν, αλλά στην ουσία, ορίζουν την εφαρμογή, καθώς θέτουν τους κανόνες και τα όρια για την εκτέλεση της. Έτσι, απαιτείται μία προσεκτική συλλογή των δεδομένων αυτών, προκειμένου η εκτέλεση της εφαρμογής να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και να βγάζει αξιόπιστα αποτελέσματα. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειαζόταν η χαρτογράφηση και η ψηφιοποίηση της περιοχής, για την γεωμετρική υλοποίησή της, και η συλλογή δεδομένων φόρτου και ταχυτήτων, για την εξαγωγή των στατιστικών χαρακτηριστικών της. Κάτι τέτοιο ήταν εντελώς αντιοικονομικό και χρονοβόρο, και μάλιστα σε αντίθεση με τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Προκειμένου, λοιπόν, να αποφευχθεί αυτή η διαδικασία, επιλέχθηκε η χρήση ενός μικροσκοπικού προσομοιωτή, ο οποίος να είναι συμβατός με κάποια βάση δεδομένων που να περιλαμβάνει έτοιμους ψηφιοποιημένους χάρτες, διαθέσιμους για ελεύθερη χρήση. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση ενός τέτοιου χάρτη ήταν να περιλαμβάνει όλα τα αναγκαία για το σχεδιασμό στοιχεία, τόσο για τα γεωμετρικά όσο και για τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά του δικτύου.

Η δεύτερη κατηγορία δεδομένων ήταν αυτή της ζήτησης, η οποία αποτελεί εξίσου βασικό πυλώνα για την ορθή λειτουργία και το σκοπό της εφαρμογής. Η συλλογή των στοιχείων της ζήτησης παρουσιάζει μία αυξημένη δυσκολία, καθώς πρόκειται για στοιχεία έντονης μεταβλητότητας, που διαφοροποιούνται κατά τη διάρκεια της μέρας, αλλά και του χρόνου. Περιοχές με αυξημένη επαγγελματική δραστηριότητα ελκύουν περισσότερο κόσμο κατά τις πρωινές ώρες σε σχέση με τις βραδινές, ενώ άλλες περιοχές έχουν χαρακτήρα αμιγούς κατοικίας, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνουν πολύ κόσμο τις βραδινές ώρες. Παράλληλα, σημεία που αποτελούν τουριστικούς πόλους προσελκύουν συγκριτικά περισσότερο κόσμο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που ανθίζει η τουριστική περίοδος. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά είναι πολύ σημαντικά για τη διαμόρφωση της ζήτησης, καθώς έχουν άμεσο αντίκτυπο στα αποτελέσματα της εφαρμογής. Είναι σαφές ότι η εξέταση μίας μόνο περίπτωσης δεν θα ήταν ικανή για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων για το σύνολο των συνθηκών και η μελέτη θα ήταν ελλιπής, χωρίς να μπορεί να αξιοποιηθεί για τη διαχείριση μιας αντίστοιχης εφαρμογής. Έτσι, διαμορφώθηκαν κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις ζήτησης, ικανές να καλύψουν τις ανάγκες και το σκοπό της παρούσας μελέτης και να αποδώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα και συμπεράσματα, τα οποία θα ήταν ικανά να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες μελέτες.

Η τρίτη κατηγορία είναι αυτή των safe zones, η οποία προσδιορίζει τις περιοχές ασφαλείας, στις οποίες πρόκειται να οδηγηθούν τα οχήματα για να αποφευχθεί ο κίνδυνος ανθρώπινων ζωών. Πρόκειται για μια εξίσου σημαντική κατηγορία δεδομένων, καθώς ορίζει στην ουσία τα σημεία που θα αποτελέσουν τους προορισμούς για τους πίνακες

προέλευσης- προορισμού και θα συγκεντρώσουν τη ζήτηση των πληττόμενων περιοχών. Από τη θέση των περιοχών αυτών εξαρτώνται όλες οι διαδρομές που θα χρησιμοποιηθούν για την εκκένωση και συνεπώς, η κυκλοφοριακή ικανότητα της υπό εκκένωση ζώνης. Οι περιοχές αυτές ορίζονται με βάση τη γεωγραφική τους θέση, τη μορφολογία της γύρω περιοχής, τη δυνατότητα εύκολης και άμεσης πρόσβασης και φυσικά την ικανότητα συγκέντρωσης μεγάλου αριθμού οχημάτων. Η συλλογή των παραπάνω στοιχείων δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία και έτσι, η επιλογή των περιοχών αυτών μπορεί να βασιστεί στα διατιθέμενα στοιχεία.

3.2.2 Μαθηματικό μοντέλο

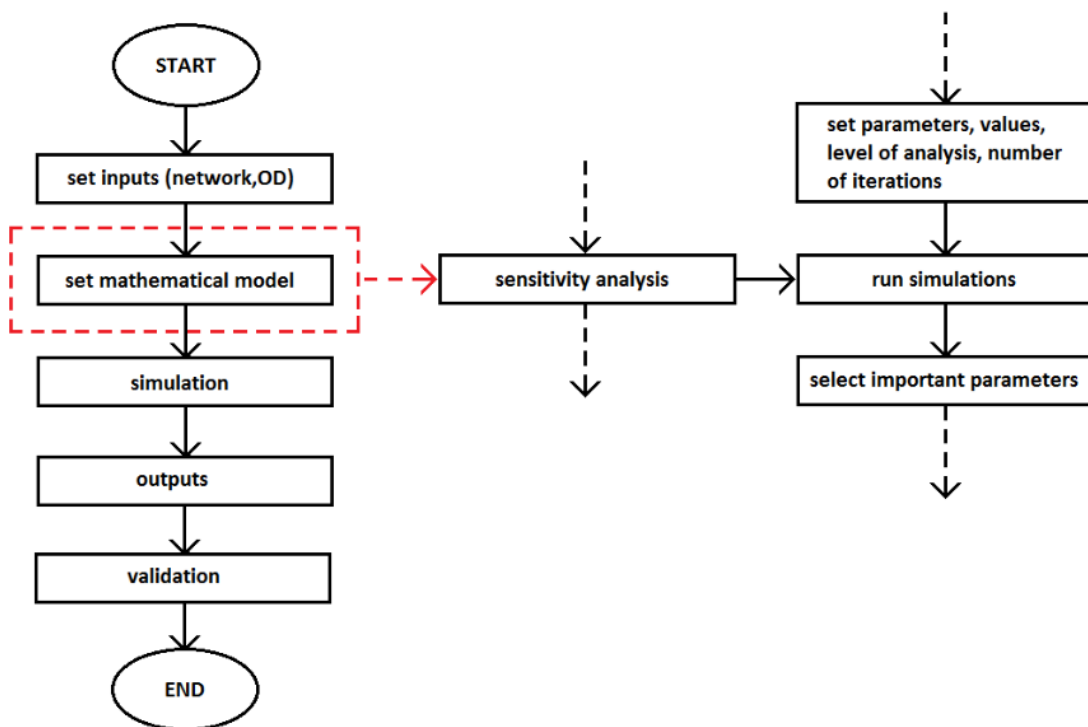
Το δεύτερο στάδιο της γενικής μεθοδολογίας αφορά τον ορισμό του μαθηματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία του συστήματος. Το μοντέλο αυτό ορίζεται από το εργαλείο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται και περιλαμβάνει μεταβλητές που καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου. Οι μεταβλητές αυτές εκφράζουν στοιχεία όπως η δυναμικότητα του σεναρίου, ο τρόπος επιλογής της διαδρομής από τους οδηγούς, η συμπεριφορά των οδηγών κατά την κίνησή τους κλπ. Σε ότι αφορά τη δυναμικότητα του σεναρίου και τα κριτήρια επιλογής διαδρομής, αυτά διαμορφώθηκαν συναρτήσει του σκοπού της παρούσας μελέτης και των συνθηκών που εξετάστηκαν, ώστε να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν καλύτερα στην πραγματικότητα.

Από την άλλη, σε ότι αφορά τη συμπεριφορά των οδηγών, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της εφαρμογής που εξετάστηκε είναι το γεγονός ότι, μιας και πρόκειται για μελέτη φαινομένου έκτακτης ανάγκης που δεν συμβαίνει συχνά, υπάρχει έλλειψη τέτοιων στοιχείων σε αντίστοιχες περιπτώσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ακριβείς μετρήσεις και δεδομένα και οι τιμές των παραμέτρων της οδηγικής συμπεριφοράς να ορίζονται κατ' εκτίμηση. Έτσι, η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου ενέχει κινδύνους, καθώς δεν διαφυλάσσεται η αντικειμενικότητα και η αξιοπιστία της διαδικασίας για την μελέτη μιας έκτακτης ανάγκης. Προκειμένου να λυθεί αυτό το πρόβλημα, επιλέχθηκε η εκτέλεση προσομοιώσεων για σημαντικά εύρη των τιμών των παραμέτρων, ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να καλύπτουν πολλές και διαφορετικές συνθήκες της συμπεριφοράς των οδηγών.

Ωστόσο, σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί και με εργαλεία προσομοίωσης που έχουν αναπτυχθεί, έχει διαπιστωθεί ότι η συμπεριφορά των οδηγών κατά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων, οι οποίες μπορεί να αγγίξουν και τις 200. Είναι προφανές ότι είναι αδύνατο να διαμορφωθούν όλες αυτές οι παράμετροι, και μάλιστα για σημαντικά εύρη τιμών, προκειμένου να εξαχθούν αποτελέσματα που να καλύπτουν τις ανάγκες της εφαρμογής. Παράλληλα, είναι εύκολα αντιληπτό ότι δεν επηρεάζουν στον ίδιο βαθμό όλες οι παράμετροι τα αποτελέσματα. Έτσι, κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός της σημαντικότητας κάθε μεταβλητής, ώστε να αξιοποιηθούν μόνο οι σημαντικές και έτσι, τα αποτελέσματα να παρουσιάζουν ένα υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης. Για να γίνει αυτό, απαιτείται η διεξαγωγή ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου, έτσι ώστε να διαπιστωθεί πως η αβεβαιότητα των στοιχείων εισόδου επηρεάζει την αβεβαιότητα των στοιχείων εξόδου και να προκύψουν οι παράμετροι αυτές που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα.

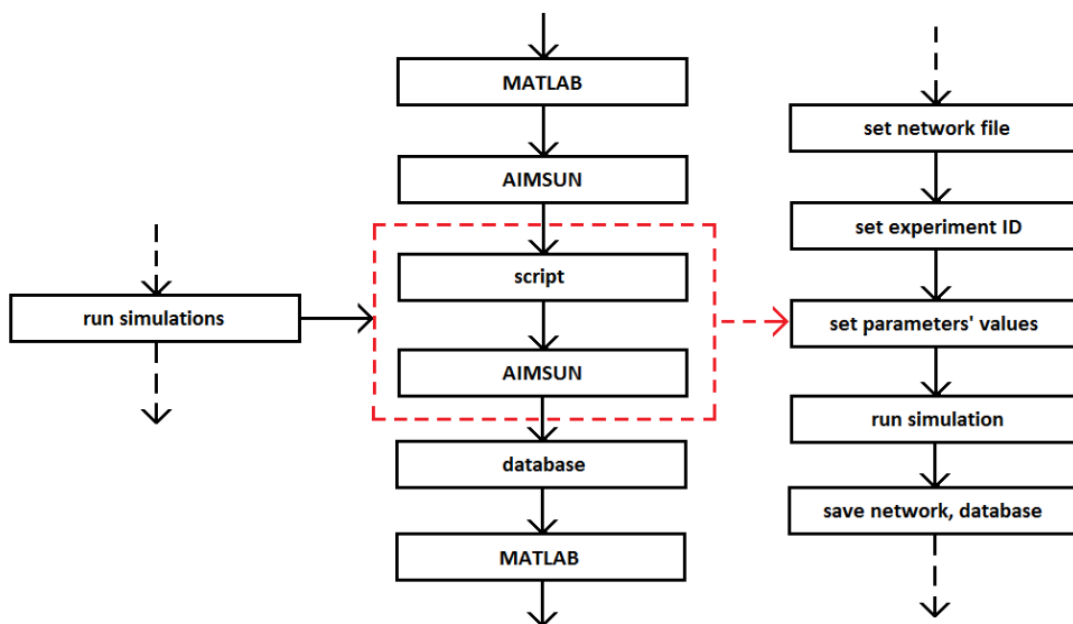
3.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Το στάδιο της ανάλυσης ευαισθησίας αποτελεί σημαντικό κομμάτι της παρούσας μελέτης, καθώς σε αυτό βασίζεται η διερεύνηση και η εκτέλεση των σεναρίων που διαμορφώνονται για τις ανάγκες της εφαρμογής. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι παράμετροι αυτές που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα και να αξιοποιηθούν για την εφαρμογή, απαιτείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από διαφορετικές τιμές των παραμέτρων. Οι τιμές αυτές επιλέγονται τυχαία εντός των προκαθορισμένων ορίων συναρτήσεων των επιπέδων ανάλυσης που θα πραγματοποιηθούν και προκύπτουν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί τιμών παραμέτρων. Ακόμη, για κάθε σετ παραμέτρων ορίζεται ένας ελάχιστος αριθμός επαναλήψεων που είναι απαραίτητος για την ομαλοποίηση του αποτελέσματος και την αποφυγή της τυχαιότητας μιας συγκεκριμένης εκτέλεσης προσομοίωσης. Είναι προφανές ότι ούτε σε αυτή τη φάση είναι εφικτή η εκτέλεση προσομοιώσεων για διαφορετικές τιμές όλων των παραμέτρων. Έτσι, με βάση άλλες μελέτες ανάλυσης ευαισθησίας, επιλέγονται κάποιες παράμετροι που αποδεδειγμένα παρουσιάζουν μεγαλύτερη σημαντικότητα και μεταξύ αυτών πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας. Αντίστοιχα επιλέγεται και ο αριθμός των επιπέδων ανάλυσης, έτσι ώστε η διαδικασία να ολοκληρώνεται σε λογικά χρονικά πλαίσια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η εκτέλεση προσομοιώσεων για μεταβολή 10 παραμέτρων σε 7 επίπεδα ανάλυσης με μία επανάληψη ανά σετ απαιτεί 100 χρόνια για να ολοκληρωθεί. Αφού, λοιπόν, επιλεγούν οι παράμετροι θα εξεταστούν και προκύψουν οι παράμετροι που τελικά θα αξιοποιηθούν, μπορεί να χρησιμοποιηθούν περισσότερα επίπεδα ανάλυσης, εφόσον το επιτρέπουν τα χρονικά πλαίσια, ώστε να πυκνώσει το νέφος τιμών εντός του εύρους για κάθε παράμετρο και να προκύψει πιο σαφής πληροφορία για τα στοιχεία εξόδου. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Ανάλυση ευαισθησίας.

Είναι σαφές ότι ακόμα και με χρήση μικρού αριθμού παραμέτρων και επιπέδων ανάλυσης, η μεταβολή των παραμέτρων και η εκτέλεση των προσομοιώσεων χειροκίνητα, αποτελεί πολύ χρονοβόρα και κουραστική διαδικασία, η οποία ενέχει και μεγάλη πιθανότητα σφάλματος από το χρήστη. Προκειμένου, λοιπόν, να αποφευχθεί κάτι τέτοιο, επιλέχθηκε η προγραμματιστική προσέγγιση της διαδικασίας, όπου, μέσω μιας γλώσσας προγραμματισμού και ενός διαδραστικού περιβάλλοντος ανάπτυξης αλγορίθμων, καλείται το εργαλείο προσομοίωσης. Αυτό με τη σειρά του επικοινωνεί μέσω μιας άλλης γλώσσας προγραμματισμού με ένα άλλο αρχείο (script), το οποίο περιέχει όλη την πληροφορία για την εκτέλεση της προσομοίωσης (αρχείο δικτύου, κωδικός πειράματος, τιμές παραμέτρων κλπ.). Αφού, οριστούν όλες οι παράμετροι και εισαχθούν στο αρχείο του δικτύου, εκτελείται η προσομοίωση και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων που έχει οριστεί. Στη συνέχεια, πάλι μέσω του εξωτερικού αλγορίθμου, πραγματοποιείται σύνδεση με τη βάση, συλλέγονται τα δεδομένα που χρειάζονται και αποθηκεύονται σε εξωτερικό αρχείο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσα και τα σετ των παραμέτρων που έχουν οριστεί επί τον ελάχιστο αριθμό επαναλήψεων που απαιτείται για το καθένα. Στην εφαρμογή της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN, καθώς και ένα script σε γλώσσα rython. Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.6).



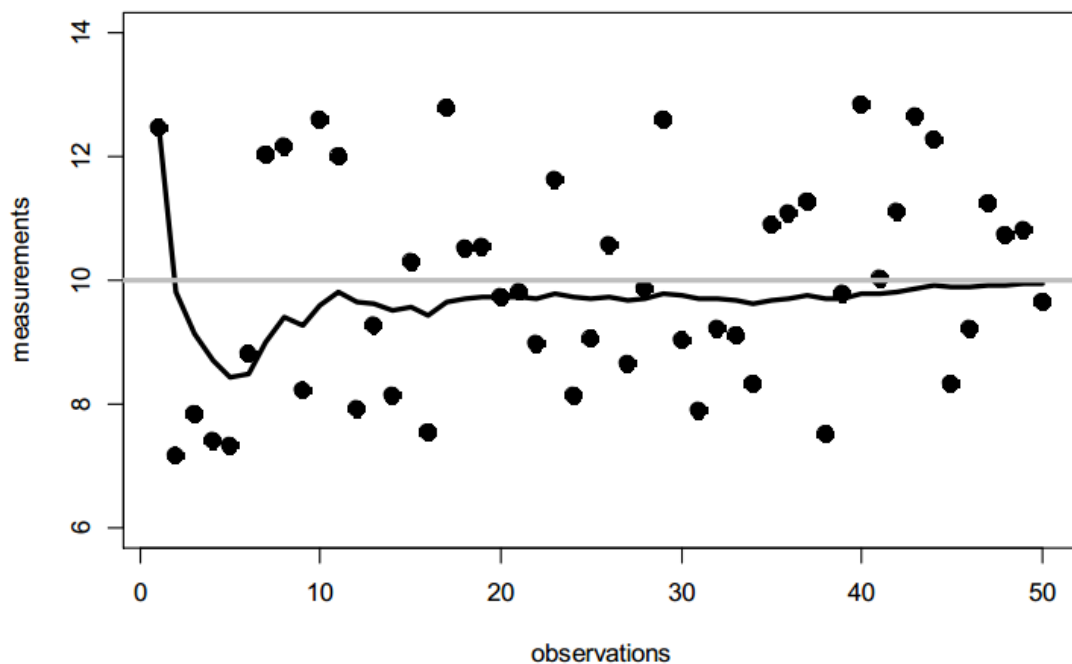
Σχήμα 3.6: Προσαρμογή του προσομοιωτή στα δεδομένα που ορίζει το script.

Σε ότι αφορά τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτείται για κάθε σετ τιμών παραμέτρων, για να απαλειφθεί η τυχαιότητα κάθε προσομοίωσης, αυτός προσδιορίζεται μέσω μιας αντίστοιχης διαδικασίας. Ορίζονται συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων (π.χ. ένα από τα προαναφερθέντα σετ), εισάγονται στα δεδομένα του προσομοιωτή μαζί και με έναν πίνακα προέλευσης-προορισμού (όχι απαραίτητα τον πραγματικό), και εκτελείται μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων (π.χ. 50-100). Ο πίνακας προέλευσης-προορισμού που

θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό τα στάδια δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθότι, αυτό που ενδιαφέρει το μελετητή είναι η τάση των αποτελεσμάτων και όχι οι ακριβείς τους τιμές. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει και για τις τιμές των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς αυτές έχουν άμεσο αντίκτυπο στη συμπεριφορά των οδηγών και συνεπώς στη λειτουργία του δικτύου. Έτσι, οι τιμές αυτές πρέπει να βρίσκονται εντός των προκαθορισμένων ορίων, ώστε να πληρούνται κάποιοι βασικοί κυκλοφοριακοί κανόνες και να έχουν κάποιο φυσικό νόημα τα στοιχεία εξόδου.

Τα αποτελέσματα συλλέγονται από τη βάση δεδομένων, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, και αποθηκεύονται σε εξωτερικό αρχείο. Για κάθε νέα προσομοίωση, υπολογίζεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων μέχρι εκείνη τη στιγμή. Έτσι, στο τέλος των προσομοιώσεων έχουν υπολογιστεί όλοι οι μέσοι όροι, όπως αυτοί έχουν διαμορφωθεί ανά εκτέλεση. Μέσω της γραφικής απεικόνισης των τιμών του μέσου όρου ανά αποτέλεσμα, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του ελάχιστου αριθμού επαναλήψεων που χρειάζεται, προκειμένου να ομαλοποιηθεί το αποτέλεσμα. Αυτό σημαίνει ότι από εκείνη την επανάληψη και μετά, όσες ακόμα και αν πραγματοποιηθούν, δεν θα επιφέρουν σημαντική μεταβολή στο αποτέλεσμα. Έτσι, καθορίζεται ο βέλτιστος συνδυασμός ελάχιστου αριθμού επαναλήψεων και μέγιστης ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Στο παράδειγμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία.

Έστω ότι οι μετρήσεις ενός μεγέθους κυμαίνονται στο εύρος [6,14] και η τιμή του μεγέθους αυτού υπολογίζεται 50 φορές. Αν, μετά το πέρας κάθε παρατήρησης, υπολογιστεί ο μέσος όρος των τιμών του μεγέθους αυτού μέχρι εκείνη την παρατήρηση, θα διαπιστωθεί ότι, όσο αυξάνεται ο αριθμός των παρατηρήσεων, τόσο σταθεροποιείται η τιμή του μέσου όρου. Με λίγα λόγια, από έναν αριθμό παρατηρήσεων και μετά, η συμβολή κάθε νέας είναι πολύ μικρή έως μηδαμινή στο ζητούμενο αποτέλεσμα, που είναι ο πραγματικός μέσος όρος του μεγέθους. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 3.7), παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε παρατήρησης ως σημεία, αλλά και ο μέσος όρος όπως αυτός διαμορφώνεται με κάθε νέα παρατήρηση ως ενιαία γραμμή. Εύκολα παρατηρείται ότι ο μέσος όρος ομαλοποιείται γύρω στις 10 παρατηρήσεις, που σημαίνει ότι αυτός ο αριθμός παρατηρήσεων είναι ικανός για να προσεγγισθεί η ορθή τιμή του αποτελέσματος με μία σχετική ακρίβεια.

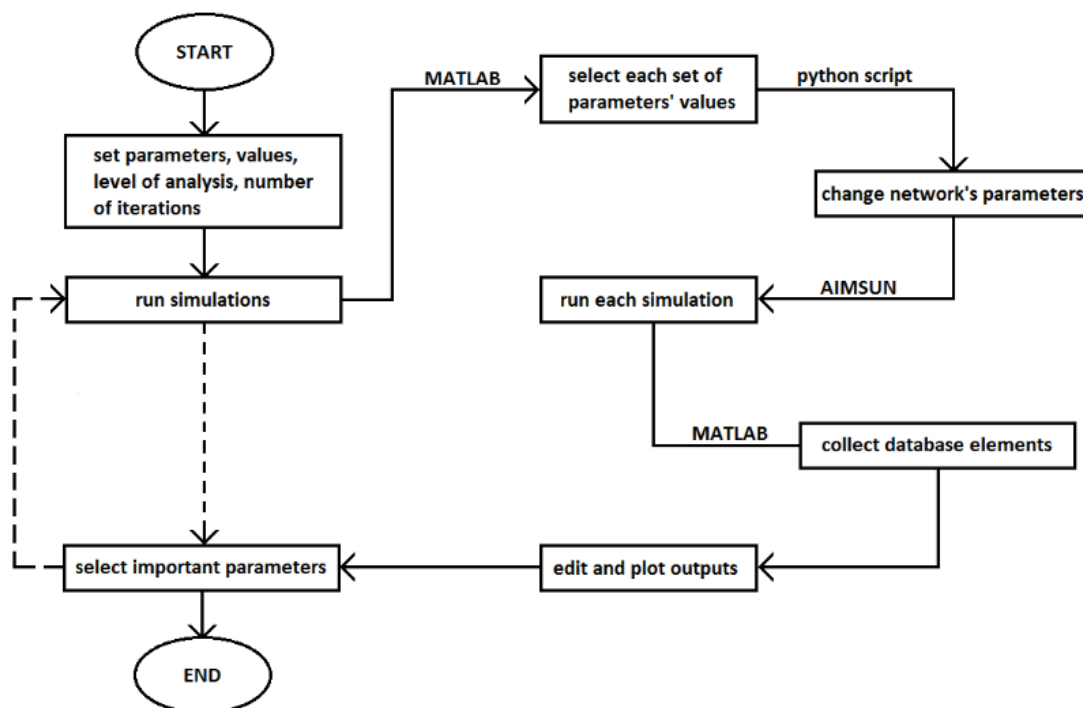


Σχήμα 3.7: Μέσος όρος παρατηρήσεων συναρτήσει του αριθμού των παρατηρήσεων.

Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιείται και για τον καθορισμό του αριθμού των επαναλήψεων που χρειάζονται για να ομαλοποιηθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Να σημειωθεί ότι κάθε αποτέλεσμα μπορεί να ομαλοποιείται σε διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων. Έτσι, προκειμένου να επιτευχθεί ακρίβεια σε όλα τα αποτελέσματα που πρόκειται να αξιοποιηθούν, χρησιμοποιείται ο μεγαλύτερος από τους ελάχιστους αριθμούς επαναλήψεων που απαιτούνται για το καθένα.

Όλες οι παραπάνω ενέργειες πραγματοποιούνται για το σύνολο των προσομοιώσεων και των επαναλήψεων που έχουν οριστεί. Η διαδικασία αυτή τη συνολική μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την ανάλυση ευαισθησίας και η οποία παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής, μαζί και με τα εργαλεία που αξιοποιούνται για την εκτέλεσή κάθε ενέργειας (Σχήμα 3.8).

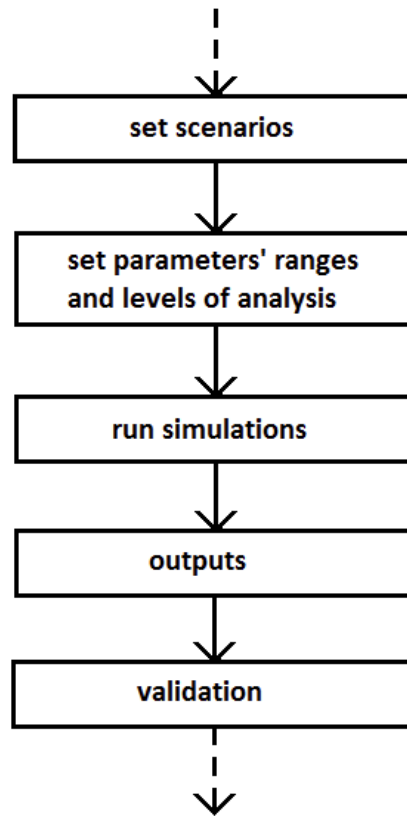
Φυσικά, το διάγραμμα αυτό αποτελεί μια γενίκευση της διαδικασίας, αφού οι ενέργειες αυτές μπορούν να επαναληφθούν όσες φορές χρειάζεται, προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός ελαχιστοποίησης των σημαντικών παραμέτρων και μεγιστοποίησης του βαθμού εμπιστοσύνης. Έτσι, για παράδειγμα, αν σε ένα μοντέλο συμμετέχουν 100 παράμετροι, εφαρμόζοντας μία φορά αυτή τη μεθοδολογία, μπορούν να επιλεγούν πχ. 20 σημαντικές παράμετροι. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για τις 20 αυτές παραμέτρους, οι οποίες έχουν πλέον απαλλαγεί από το θόρυβο των υπόλοιπων 80, μπορούν να ξεχωρίσουν 15 σημαντικές παράμετροι κοκ., μέχρις ότου να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός.



Σχήμα 3.8: Μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησίας.

3.2.4 Εκτέλεση εφαρμογής

Εφόσον ολοκληρωθούν οι ενέργειες αυτές και προσδιοριστούν οι παράμετροι που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη σημαντικότητα για τη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων, ορίζονται τα διαφορετικά σενάρια που θα εξεταστούν, τα οποία στην ουσία διαφέρουν ως προς το φόρτο που πρέπει να εκκενωθεί και την κατανομή του στα κεντροειδή. Στη συνέχεια, ορίζονται τα εύρη και ο αριθμός των επιπέδων ανάλυσης των σημαντικών παραμέτρων, ο οποίος επιλέγεται να είναι μεγαλύτερος από αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να πυκνώσει το νέφος των στοιχείων εξόδου και να αυξηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Έτσι, για κάθε σενάριο εκτελείται ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων, όπως αυτός έχει προκύψει από τον αριθμό των παραμέτρων, τον αριθμό των επιπέδων ανάλυσης και τον αριθμό των επαναλήψεων, συλλέγονται τα αποτελέσματα και αξιολογούνται. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: Μεθοδολογία σεναρίων.

Η εκτέλεση των προσομοιώσεων ακολουθεί την ίδια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε στην ανάλυση ευαισθησίας, και η οποία περιλαμβάνει την επιλογή του αντίστοιχου σετ τιμών παραμέτρων για κάθε προσομοίωση, την εισαγωγή των παραμέτρων αυτών στο δίκτυο, την εκτέλεση της προσομοίωσης και τη συλλογή των απαραίτητων στοιχείων εξόδου. Μέσω αυτής της διαδικασίας, μπορεί ο μελετητής να αξιολογήσει τα αποτελέσματα και να οδηγηθεί στα συμπεράσματα που προκύπτουν για την εφαρμογή που εξετάζει.

4. CASE STUDY

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η υλοποίηση της μεθοδολογίας που αναλύθηκε παραπάνω στην εφαρμογή που επιλέχθηκε να εξεταστεί. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η εφαρμογή αυτή αφορά την εκκένωση μιας περιοχής στο νησί της Σαντορίνης υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Πιο συγκεκριμένα, οι συνθήκες αυτές εκφράζονται από την εκδήλωση φυσικού φαινομένου (σεισμός, έκρηξη) που σχετίζεται με το ενεργό ηφαίστειο που βρίσκεται δίπλα στο νησί. Η προσέγγιση που επιλέχθηκε για την αντιμετώπιση αυτής της εφαρμογής ήταν η διαχείριση κυκλοφορίας με προσομοίωση, για την οποία αξιοποιήθηκε ο προσομοιωτής AIMSUN. Για την επιλογή του συγκεκριμένου εργαλείου προσομοίωσης, λήφθηκαν υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διατιθέμενων προσομοιωτών, τα οποία συγκρίθηκαν, αξιολογήθηκαν και προέκυψε ότι το καταλληλότερο λογισμικό για την αντιμετώπιση του θέματος είναι το συγκεκριμένο. Στη συνέχεια, ακολουθήθηκαν όλες οι ενέργειες που αναλύθηκαν στην περιγραφή της μεθοδολογίας, από τη σύνθεση μέχρι την ολοκλήρωση της εφαρμογής.

Έτσι, συλλέχθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία για τη σύνθεση της εφαρμογής, και πιο συγκεκριμένα ορίστηκε το δίκτυο, οι περιοχές προέλευσης και προορισμού, καθώς και τα στοιχεία ζήτησης για κάθε εξεταζόμενο σενάριο. Για τον προσδιορισμό του μαθηματικού μοντέλου, προκειμένου να ξεπεραστεί η έλλειψη στοιχείων για τη συμπεριφορά των οδηγών, επιλέχθηκε η μεταβολή ορισμένων παραμέτρων, ώστε να ληφθούν υπόψη διαφορετικά μοντέλα λειτουργίας του δικτύου και τα αποτελέσματα να καλύπτουν διαφορετικές συνθήκες συμπεριφοράς οδηγών. Για να επιλεγθούν οι παράμετροι που θα μεταβληθούν, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας, στην οποία συμμετείχαν 4 παράμετροι για 5 επίπεδα ανάλυσης. Έτσι, προέκυψαν 625 συνδυασμοί τιμών παραμέτρων και συνεπώς, 625 προσομοιώσεις. Για κάθε ένα από τους συνδυασμούς των τιμών των παραμέτρων εκτελέστηκαν 10 επαναλήψεις, οπότε συνολικά εκτελέστηκαν 6250 προσομοιώσεις για την ολοκλήρωση της ανάλυσης ευαισθησίας. Ακόμη, ως προσέγγιση της ανάλυσης ευαισθησίας επιλέχθηκε η τεχνική all-at-once, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της μεταβολής τόσο μιας παραμέτρου, όσο και πολλών παραμέτρων ταυτόχρονα.

Αφού προσδιορίστηκαν οι σημαντικές παράμετροι, ορίστηκαν τα νέα εύρη τους και ο αριθμός των επιπέδων ανάλυσης, ώστε να πυκνώσουν τα στοιχεία, και εκτελέστηκαν τα σενάρια που είχαν οριστεί. Από αυτά, συλλέχθηκαν τα αποτελέσματα, αξιολογήθηκαν και προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία παρουσιάζονται στο τέλος της παρούσας μελέτης.

Για την εκτέλεση όλων αυτών των προσομοιώσεων, επιλέχθηκε η χρήση του λογισμικού MATLAB, καθώς και η εκτέλεση ενός `rython script`. Όλη η παραπάνω διαδικασία, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες, συνοψίζεται ως εξής:

- Επιλογή προσομοιωτή
- Ορισμός δικτύου, περιοχών προέλευσης και προορισμού

- Ορισμός πίνακα OD, για κάθε σενάριο
- Ανάλυση ευαισθησίας
 - Επιλογή παραμέτρων και επιπέδων ανάλυσης (4 και 5, αντίστοιχα)
 - Ορισμός τιμών παραμέτρων και συνδυασμών τους (625 συνδυασμοί)
 - Εκτέλεση 10 επαναλήψεων για κάθε προσομοίωση (6250 τρεξίματα)
 - Συλλογή αποτελεσμάτων
 - Επεξεργασία, ομαδοποίηση και δημιουργία διαγραμμάτων των αποτελεσμάτων
 - Επιλογή σημαντικών παραμέτρων
- Ορισμός ευρών και επιπέδων ανάλυσης των σημαντικών παραμέτρων
- Εκτέλεση προσομοιώσεων για κάθε σενάριο
- Εξαγωγή συμπερασμάτων

4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ

Ένας πολύ καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή λογισμικού είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου ανάλυσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, το οποίο εξαρτάται από τις ανάγκες της μελέτης προσομοίωσης και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εφαρμογής. Στην παρούσα μελέτη, το επίπεδο ανάλυσης που επιλέχθηκε ήταν αυτό της μεσοσκοπικής προσομοίωσης, και αυτό γιατί αποτελεί την ιδανική προσέγγιση όταν το δίκτυο είναι μεγάλο και περιλαμβάνει πολλά στοιχεία, περίπτωση στην οποία μία μικροσκοπική αντιμετώπιση θα ήταν άτοπη και θα έδινε βάση σε ανούσια στοιχεία, τα οποία ενδεχομένως να επηρέαζαν αρνητικά, χρονικά και ποιοτικά, τη λειτουργία του δικτύου. Από την άλλη, μία μακροσκοπική αντιμετώπιση θα γενίκευε σε τέτοιο βαθμό την ανάλυση, που θα έχανε την αξιοπιστία της και δεν θα ανταποκρινόταν στην πραγματικότητα.

Ακόμη, αρχικά προτιμήθηκε η αξιοποίηση ενός λογισμικού ανοιχτού κώδικα, ώστε να μην υπάρχουν δυσκολίες και περιορισμοί στην απόκτηση και τη χρήση του. Από τα εργαλεία προσομοίωσης που αναλύθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, παρατηρείται ότι μόνο το Mezzo διαθέτει δυνατότητα μεσοσκοπικής ανάλυσης και ταυτόχρονα είναι ανοιχτού κώδικα. Ωστόσο, ύστερα από δοκιμαστική εφαρμογή της μελέτης σε αυτό το λογισμικό, παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες δυσκολίες και προβλήματα, που οφείλονταν στην ασυμβατότητα των χαρακτηριστικών της εφαρμογής με τον τρόπο λειτουργίας του λογισμικού. Έτσι, επιλέχθηκε η αξιοποίηση ενός εμπορικού λογισμικού, το οποίο να ανταποκρίνεται καλύτερα στις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής, να έχει απλή διεπαφή και να υπάρχει η δυνατότητα απόκτησης και χρήσης του χωρίς περιορισμούς. Το λογισμικό αυτό ήταν το AIMSUN, για το οποίο δεν υπήρχε δυσχέρεια στη λήψη του, αφού αξιοποιήθηκε η άδεια χρήσης του, την οποία είχε προμηθευτεί ο τομέας συγκοινωνιακής τεχνικής της σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για εσωτερική χρήση. Συγκρίνοντας τα δύο λογισμικά, διαπιστώνεται εύκολα ότι, αν και σε κάποια χαρακτηριστικά πιθανώς το Mezzo να υπερέχει σε σχέση με το AIMSUN (ελευθερία χρήσης, δυνατότητα για παρεμβάσεις στον κώδικα κλπ.), εντούτοις, τόσο οι δυσχέρειες που παρουσιάζει στη χρήση του, όσο και οι ιδιαιτερότητες της εφαρμογής που εξετάζεται, το καθιστούν κατώτερο για την αξιοποίησή του στο εν λόγω, ή κάποιο αντίστοιχο, θέμα.

Παρακάτω, περιγράφονται κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του AIMSUN, τα οποία οδήγησαν και στην τελική επιλογή του.

Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο λογισμικό προσομοίωσης των μεταφορών, το οποίο έχει αναπτυχθεί και προωθηθεί από την εταιρία TSS (Transport Simulation Systems), που εδρεύει στη Βαρκελώνη της Ισπανίας. Είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται από κρατικές υπηρεσίες, δήμους, πανεπιστήμια και ερευνητές σε όλο τον κόσμο για τη μηχανική των μεταφορών, την προσομοίωση της κυκλοφορίας, το σχεδιασμό των μεταφορών και τις μελέτες εκκένωσης έκτακτης ανάγκης. Μέσα από την αξιοποίηση των δυνατοτήτων του μπορεί να επιτευχθεί η βελτίωση των οδικών υποδομών, η μείωση των εκπομπών ρύπων, η περικοπή της κυκλοφοριακής συμφόρησης και ο σχεδιασμός αστικού περιβάλλοντος για οχήματα και πεζούς. Δίνει τη δυνατότητα τριών επιπέδων μοντελοποίησης των μεταφορών (μικροσκοπικό, μεσοσκοπικό και μακροσκοπικό) μέσα στην ίδια εφαρμογή, γεγονός που επιτρέπει τη διδιάστατη και τρισδιάστατη οπτικοποίηση των σεναρίων σε μεγάλες πόλεις του κόσμου, σε λεπτομερή και υψηλά επίπεδα απόδοσης. Μία άλλη σημαντική ιδιότητα είναι η δυνατότητα που δίνει για προσομοίωση και αλληλεπίδραση οχημάτων και πεζών. Η λειτουργία αυτή έχει προκύψει από τη συνεργασία με την εταιρία Legion και τη δημιουργία μιας εφαρμογής προσομοίωσης πεζών, η οποία έχει ενσωματωθεί στο λογισμικό ως επέκταση. Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει στους μηχανικούς και τους σχεδιαστές να μοντελοποιήσουν τον τρόπο με τον οποίο οχήματα και πεζοί αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε οποιοδήποτε αστικό περιβάλλον. Ωστόσο, η εν λόγω λειτουργία δεν θα εφαρμοστεί στην παρούσα εργασία, καθώς αποτελεί μία ανάλυση της κυκλοφοριακής κατάστασης αυτής καθαυτής, χωρίς την εξέταση άλλων παραμέτρων.

Άλλα χαρακτηριστικά του λογισμικού αφορούν τη δημιουργία σημάτων των οχημάτων εν κινήσει, την εισαγωγή συστημάτων προτεραιότητας των δημόσιων μεταφορών, τον ορισμό στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας μέσω εναυσιμάτων και δράσεων, την εισαγωγή, επεξεργασία και διαχείριση δεδομένων προέλευσης-προορισμού (OD), τη διαχείριση σεναρίων και επαναλήψεων, καθώς και την παραγωγή αποτελεσμάτων ως εικόνες, βίντεο, πίνακες ή αρχεία raw. Έτσι, κάποιες από τις πρακτικές αναλύσεις στις οποίες το Aimsun μπορεί να φανεί χρήσιμο είναι οι ακόλουθες:

- Ανάλυση των επιπτώσεων του σχεδιασμού των υποδομών
- Περιβαλλοντικές μελέτες και δημιουργία «πράσινων» ζωνών
- Τιμολόγηση δρόμων, διοδίων και φόρτιση της συμφόρησης
- Σχέδιο ελέγχου και βελτιστοποίηση σήμανσης
- Διαχείριση αστικής και υπεραστική κυκλοφοριακής ζήτησης
- Σύστημα υποστήριξης για τη διαχείριση δημόσιων μεταφορών
- Ανάλυση ασφάλειας και σχεδιασμός εκκένωσης έκτακτης ανάγκης

Πιο αναλυτικά, παρακάτω θα παρουσιαστούν αναλυτικά κάποια από τα χαρακτηριστικά του Aimsun και τα πλεονεκτήματά τους.

- *Η μοντελοποίηση της διανυόμενης ζήτησης οδηγεί σε πραγματική ενοποίηση.*
Αυτό σημαίνει ότι δίνεται η δυνατότητα να ξεκινήσει ένα συγκοινωνιακό έργο μοντελοποίησης από το μηδέν, να εισαχθούν τα πρώτα γεωγραφικά και κοινωνικο-

οικονομικά δεδομένα και να ακολουθηθεί όλη η διαδικασία μέχρι την προσομοίωση, χωρίς να χρειαστεί η προσφυγή σε άλλο πακέτο. Έτσι, αυξάνεται η αναλογία κόστους-αποτελεσματικότητα και εξασφαλίζεται συνοχή και ποιότητα για τους χρήστες.

- *Υβριδική προσομοίωση*
Δίνεται η δυνατότητα ταυτόχρονης μικροσκοπικής και μεσοσκοπικής προσομοίωσης, που επιτρέπει τη μοντελοποίηση μεγάλων περιοχών, ενώ παράλληλα εστιάζει σε όλες τις περιοχές που απαιτούν ένα καλύτερο επίπεδο λεπτομερειών. Έτσι, παρέχεται το καλύτερο δυνατό σενάριο, το οποίο συνδυάζει την υψηλή υπολογιστική αποδοτικότητα με ακριβή αναπαράσταση της δυναμικής της κίνησης.
- *Φιλικότητα προς το χρήστη*
Δίνει δυνατότητες που κάθε αναλυτής θα επιθυμούσε, όπως μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση αποτελεσμάτων σε ένα ενιαίο περιβάλλον, ταυτόχρονη διδιάστατη και τρισδιάστατη προβολή, πολλαπλές προβλέψεις του έργου, σύγκριση διαφόρων σεναρίων, κωδικοποίηση σε γλώσσα Python για αυτοματοποίηση επαναλαμβανόμενων εργασιών κλπ.
- *Ταχύτητα*
Αποτελεί τον ταχύτερο μικροσκοπικό προσομοιωτή της αγοράς και το καλύτερο διαθέσιμο εργαλείο μικροπροσομοίωσης στον κόσμο για έργα μεγάλης κλίμακας. Αυτό οφείλεται στην πολυνηματική αρχιτεκτονική του λογισμικού, η οποία επιταχύνει σε τέτοιο βαθμό τη διαδικασία προσομοίωσης, ώστε να επαναπροσδιορίζει εντελώς οτιδήποτε μπορεί να συμπεριληφθεί σε ένα δυναμικό μοντέλο.
- *Αναθεωρήσεις του δικτύου*
Επιτρέπει να γίνεται μία αλλαγή στο βασικό μοντέλο του δικτύου και να εφαρμόζεται αυτόματα, σε όλα τα σχετικά μελλοντικά σενάρια, μειώνοντας έτσι τις δευτερεύουσες εργασίες αντογραφής και επικόλλησης και την πιθανότητα σφαλμάτων.
- *Εισαγωγή OpenStreetMap αρχείων*
Παρέχει εξαιρετική ανεξαρτησία, επιτρέποντας την έναρξη ενός νέου έργου με την εισαγωγή της γεωμετρίας οποιουδήποτε μέρους στον κόσμο, μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, χωρίς να χρειάζεται η παροχή του σωστού υλικού από κανέναν ή να εξαρτάται από το δίκτυο άλλου μοντέλου.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, λήφθηκαν υπόψη και αποτέλεσαν τη βάση για την επιλογή του εν λόγω προσομοιωτή. Αφού επιλέχθηκε, λοιπόν, το AIMSUN ως το εργαλείο προσομοίωσης που ανταποκρινόταν καλύτερα στις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής, ακολούθησε η υλοποίηση όλων των απαραίτητων ενεργειών, προκειμένου να αναπαρασταθεί το σενάριο που εξετάζεται και να συλλεχθούν τα ζητούμενα αποτελέσματα. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, το πρώτο στάδιο μιας τέτοιας εφαρμογής περιλαμβάνει τον προσδιορισμό όλων των δεδομένων, που θα χρησιμοποιηθούν ως

στοιχεία εισόδου και τα οποία ομαδοποιούνται στις ενότητες δίκτυο, ζώνες ασφαλείας και ζήτηση.

4.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της έλλειψης πραγματικών δεδομένων για τη συμπεριφορά των οδηγών υπό καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να εντοπισθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα ζητούμενα αποτελέσματα και να ελεγχθούν πιο διεξοδικά. Ωστόσο, ακόμα και μέσω αυτής της αναλυτικής διαδικασίας, τα αποτελέσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα, εφόσον βασίζονται σε τυχαία στοιχεία εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι, προκειμένου να θεωρηθεί κατάλληλη και να εφαρμοσθεί η παρούσα μελέτη σε περίπτωση που απαιτείται η εκκένωση της Σαντορίνης, θα πρέπει το δίκτυο και η ζήτηση που χρησιμοποιείται να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

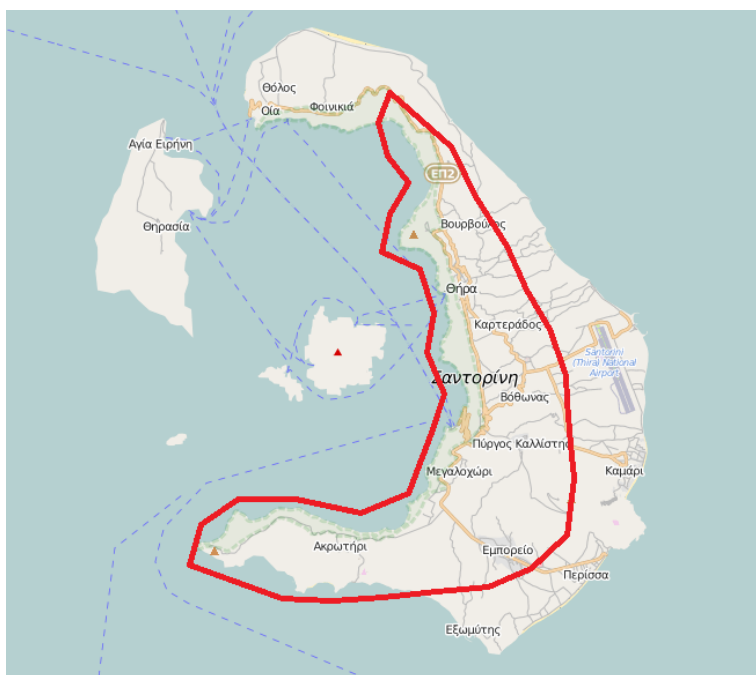
4.3.1 Δίκτυο

Σε ότι αφορά το δίκτυο, οι ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν για την υλοποίησή του δεν παρουσίασαν ιδιαίτερες δυσκολίες, καθώς αξιοποιήθηκε η δυνατότητα του λογισμικού για εισαγωγή αρχείων από τη βάση δεδομένων OpenStreetMap. Η βάση αυτή περιλαμβάνει τον παγκόσμιο χάρτη ψηφιοποιημένο και με βασικά κυκλοφοριακά στοιχεία, επιτρέποντας την αξιοποίηση ενός συγκεκριμένου τμήματός του, για την διεξαγωγή μιας μελέτης που το χρειάζεται, οποιασδήποτε φύσης. Επιλέχθηκε, λοιπόν, η αξιοποίηση των γεωμετρικών και στατιστικών στοιχείων που παρέχει το πρόγραμμα OpenStreetMap, το οποίο είναι ελεύθερο λογισμικό και προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια, για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας. Έτσι, ορίστηκε η περιοχή που καλύπτει όλο το οδικό δίκτυο της Σαντορίνης και αποκόπηκε το συγκεκριμένο αρχείο, το οποίο περιείχε ψηφιοποιημένους τους συνδέσμους και αποθηκευμένα όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω. Φυσικά, τα στοιχεία αυτά κάλυπταν σε γενικές γραμμές τις ανάγκες της εφαρμογής, ωστόσο παρουσίαζαν κάποιες διαφορές και ελλείψεις σε σχέση με την πραγματικότητα. Για παράδειγμα, κάποιοι σύνδεσμοι είχαν οριστεί ως μονής κατεύθυνσης με δύο λωρίδες κυκλοφορίας, ενώ στην πραγματικότητα επρόκειτο για διπλής κατεύθυνσης, με μία λωρίδα σε κάθε ρεύμα. Άλλοι είχαν απλά αποθηκευτεί με αντίθετη φορά από την πραγματική τους. Ακόμη, κάποια από τα στοιχεία για τα όρια ταχύτητας αλλά και την ικανότητα των συνδέσμων (capacity) ήταν λανθασμένα. Όλες αυτές οι μικροδιαφορές διορθώθηκαν και έτσι, το τελικό οδικό δίκτυο πάνω στο οποίο εκτελέστηκε η εφαρμογή, αποτελούσε μία ικανοποιητική απεικόνιση της πραγματικότητας.

Επόμενο βήμα για την προετοιμασία και την ολοκλήρωση του δικτύου ήταν ο καθορισμός των περιοχών, από τις οποίες θα προέκυπταν τα κεντροειδή προέλευσης των οχημάτων. Ως κεντροειδή ορίζονται τα σημεία εκείνα που επιλέγονται για την συγκέντρωση και την τροφοδότηση του δικτύου με οχήματα. Είναι προφανές ότι δεν μπορούν να οριστούν κεντροειδή σε κάθε σημείο του δικτύου που προσεγγίζεται από οχήματα. Ακόμη, κάτι τέτοιο δεν θα είχε πρακτικό νόημα για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, καθώς η ύπαρξη κάποιων μεμονωμένων οχημάτων σε απομακρυσμένες περιοχές, που δεν

καλύπτονται από κάποιο κεντροειδές, θα επηρέαζε σε ελάχιστο βαθμό την εκτέλεση της εφαρμογής και δεν θα είχε κάποιο αντίκτυπο στα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που πρόκειται να εξαχθούν. Συνεπώς, επιλέχθηκε να οριστούν κεντροειδή που να καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό των οχημάτων που πρόκειται να συμμετάσχουν στην εκκένωση και να τοποθετηθούν σύμφωνα με την κατανομή του πληθυσμού στο νησί.

Έτσι, ως περιοχές προέλευσης ορίστηκαν γενικευμένες εκτάσεις που περιελάμβαναν έναν ή και περισσότερους οικισμούς (ανάλογα με το μέγεθος και την απόσταση), και οι οποίες βρίσκονταν στην επικίνδυνη ζώνη. Ως επικίνδυνη ζώνη ορίστηκε η ζώνη που περιλαμβάνει τα εσωτερικά παράλια του νησιού της Σαντορίνης, τα οποία βρίσκονται ακριβώς απέναντι από το ηφαίστειο, μέχρι και τα μέσα της ηπειρωτικής χώρας του νησιού. Για το λόγο αυτό, δεν συμπεριλήφθηκαν τα εξωτερικά παράλια του νησιού, καθώς θεωρήθηκε ότι δεν συνέτρεχαν ιδιαίτερο κίνδυνο, παρουσίαζαν ίδια επίπεδα ασφαλείας με τις ζώνες ασφαλείας και θα δυσχέραιναν σημαντικά τη μετακίνηση πληθυσμού από άλλες περιοχές. Ακόμη, στη μελέτη δεν συμπεριλήφθηκε η περιοχή της Οίας, αφού εκεί βρισκόταν το εργοστάσιο αφαλάτωσης, που αποτελούσε τη μία από τις δύο ζώνες ασφαλείας και το οποίο μπορούσαν να προσεγγίσουν οι κάτοικοι πεζή, χωρίς να επιβαρύνουν το οδικό δίκτυο, καθώς και η Θηρασιά. Η ζώνη αυτή δεν ορίστηκε με τον τρόπο αυτό μόνο για το λόγο ότι θα επηρεαστεί άμεσα από ένα πιθανό ατύχημα, αλλά ορίστηκε να είναι λίγο μεγαλύτερη. Ο λόγος για τον οποίο η περιοχή εκκένωσης είναι μεγαλύτερη, είναι ότι σε συνθήκες εκκένωσης, το αίσθημα της ανασφάλειας που επέρχεται στους κατοίκους της ευρύτερης περιοχής, είναι πιθανό να οδηγήσει σε εκκένωση και από την πλευρά των κατοίκων αυτών. Η μετακίνηση αυτού του πληθυσμού θα έχει άμεση επίπτωση στις κυκλοφοριακές συνθήκες και για το λόγο αυτό συνυπολογίζεται στη μετακίνηση του άμεσα πληττόμενου πληθυσμού. Έτσι, η επικίνδυνη ζώνη που τελικά χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του σεναρίου, παρουσιάζεται με κόκκινο πλαίσιο στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Επικίνδυνη ζώνη (Πηγή: OpenStreetMap).

4.3.2 Περιοχές προέλευσης

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, τα κεντροειδή προέλευσης ορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντιπροσωπεύουν ενιαίες εκτάσεις της επικίνδυνης ζώνης, οι οποίες περιλαμβάνουν έναν ή περισσότερους οικισμούς σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Η ομαδοποίηση αυτή έγινε με κριτήριο οι οικισμοί που αντιμετωπίζονται ως ενιαία οντότητα να συγκεντρώνουν όλοι μαζί ικανό αριθμό κατοίκων και τουριστών, τέτοιο ώστε να μην έχει νόημα η ξεχωριστή αντιμετώπιση και διαχείρισή τους, και να μοιράζονται κοινό οδικό δίκτυο για να προσεγγίσουν τις ζώνες ασφαλείας. Σε περιπτώσεις που πολλοί οικισμοί μοιράζονταν στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής το ίδιο οδικό δίκτυο και συγκέντρωναν δυσανάλογα μεγαλύτερο πληθυσμό από τις υπόλοιπες οντότητες, αυτοί χωρίστηκαν και ομαδοποιήθηκαν σε μικρότερες ξεχωριστές οντότητες (π.χ. Καρτεράδος, Μεσαριά Βόθωνας, Έξω γωνιά, Επισκοπή, Πύργος Καλλίστης). Για κάθε μία από αυτές, ορίστηκε διαφορετικό σημείο εισόδου και διαφορετικοί σύνδεσμοι για την προσέγγιση του κοινού δικτύου που τελικά θα χρησιμοποιούσαν για να απομακρυνθούν από την επικίνδυνη ζώνη και να προσεγγίσουν την αντίστοιχη ζώνη ασφαλείας. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύχθηκε η υπερφόρτιση κάποιων συνδέσμων στην αρχή της προσομοίωσης για την είσοδο των οχημάτων στο δίκτυο και η αναπαράσταση της κυκλοφορίας πραγματοποιήθηκε με πιο ομαλό και ρεαλιστικό τρόπο. Έτσι, προέκυψαν 9 κεντροειδή προέλευσης, τα οποία ορίζονται αναλυτικά ως εξής:

- Ημεροβίγλι (συμπεριλαμβάνεται και ο οικισμός Βουρβούλος)
- Θήρα (περιλαμβάνει τους οικισμούς Φηρά, Έξω Κατοικίες, Μέσα Κατοικίες)
- Καρτεράδος
- Μεσαριά (συμπεριλαμβάνεται και ο οικισμός Βόθωνας)
- Λιμάνι (συμπεριλαμβάνεται και ο οικισμός Μεγαλοχώρι)
- Πύργος Καλλίστης
- Επισκοπή (συμπεριλαμβάνεται και ο οικισμός Έξω Γωνιά)
- Εμπορείο
- Ακρωτήρι

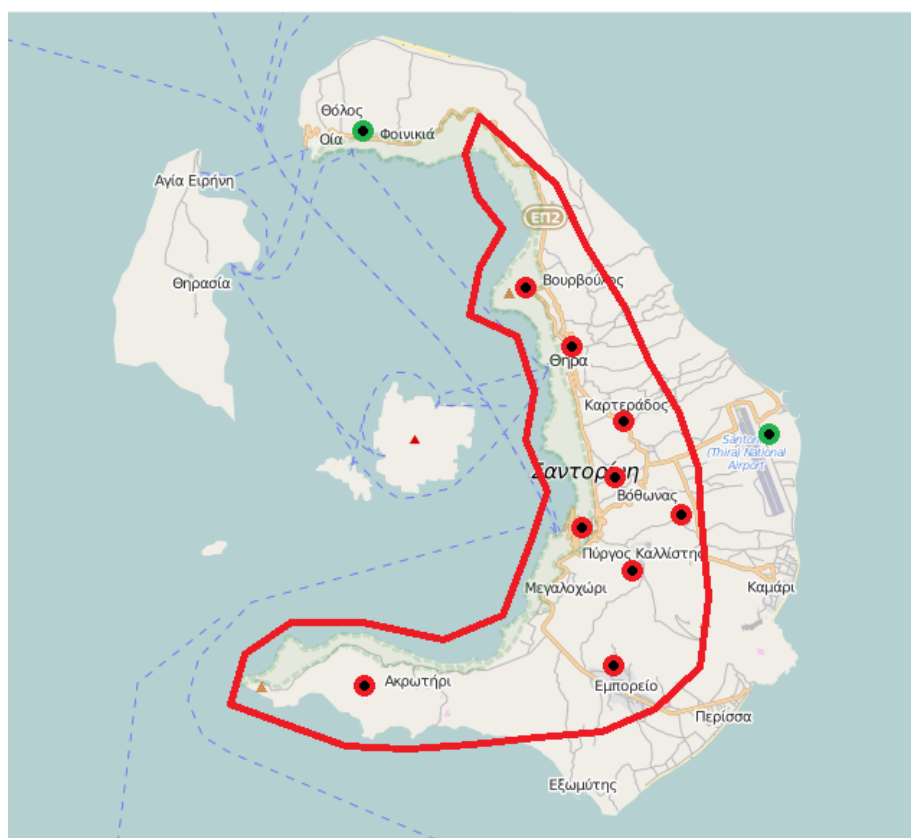
4.3.3 Ασφαλείς ζώνες

Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή της μεθοδολογίας, ο καθορισμός των περιοχών που θα χρησιμοποιηθούν ως ζώνες ασφαλείας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την έκβαση της μελέτης και την εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων. Με βάση τις περιοχές αυτές, ορίζονται οι διαδρομές που θα ακολουθηθούν από τα οχήματα κατά την εκκένωση και συνεπώς, οι συνθήκες που θα εξεταστούν για ένα αντίστοιχο σενάριο.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, ως safe zones ορίστηκαν οι περιοχές του αεροδρομίου και του εργοστασίου της αφαλάτωσης. Το πρώτο βρίσκεται στην ανατολική πλευρά του νησιού, κοντά στην περιοχή της Αγίας Παρασκευής, ενώ το δεύτερο λίγο έξω από τον οικισμό της Οίας. Σε ότι αφορά το αεροδρόμιο, πρόκειται για εγκατάσταση που βρίσκεται στην εξωτερική πλευρά του νησιού, μακριά από την πρώτη ζώνη επίδρασης του ηφαιστείου, και περιστοιχίζεται από σχετικά ομαλό έδαφος, που την προφυλάσσει από τυχόν κατολισθήσεις, που μπορεί να οδηγήσουν σε περαιτέρω ατυχήματα. Από την άλλη, το

εργοστάσιο αφαλάτωσης έχει τοποθετηθεί στην περιοχή της Οίας, η οποία παρουσιάζει έντονη τουριστική δραστηριότητα και βρίσκεται στη βόρεια πλευρά του νησιού, σε μέτριο υψόμετρο, που όμως προσφέρει μία στοιχειώδη προφύλαξη από τις πιθανές εκδηλώσεις του φαινομένου, μιας και περιστοιχίζεται από απότομα βράχια. Λόγω της φύσης και των δύο αυτών περιοχών, προσφέρεται ιδιαίτερα μεγάλος ελεύθερος χώρος, που μπορεί να συγκεντρώσει πολλά οχήματα, ενώ το οδικό δίκτυο που οδηγεί στα σημεία αυτά είναι καλοδιατηρημένο και επιτρέπει τη μεταφορά υψηλού φόρτου. Ακόμη, κρίθηκε επαρκής ο ορισμός μόνο αυτών των δύο περιοχών, καθώς εκτιμήθηκε ότι ο διαθέσιμος χώρος που παρέχουν είναι σε θέση να καλύψει όλο τον εξεταζόμενο φόρτο, ακόμα και υπό τις πιο αντίξοες συνθήκες του σεναρίου που εξετάζεται.

Στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 4.2), παρουσιάζεται η κατανομή των κεντροειδών στην περιοχή μελέτης, τα οποία αποτέλεσαν τη βάση για την πραγματοποίηση της εφαρμογής και χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του πίνακα προέλευσης-προορισμού και την κατανομή του εξεταζόμενου φόρτου. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται τα κεντροειδή προέλευσης, ενώ με πράσινο τα κεντροειδή προορισμού (safe zones).



Σχήμα 4.2: Επικίνδυνη ζώνη και κατανομή κεντροειδών προέλευσης και προορισμού (Πηγή: OpenStreetMap).

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι διαδρομές που θα χρησιμοποιηθούν για την εκκένωση της επικίνδυνης ζώνης, πρέπει να διευκρινιστεί ποια κεντροειδή τροφοδοτούν κάθε ζώνη

ασφαλείας. Η επιλογή της ζώνης ασφαλείας που θα εξυπηρετήσει την κάθε περιοχή προέλευσης έγινε με κριτήρια την απόσταση που απαιτείται για να προσεγγισθεί η ζώνη ασφαλείας, αλλά και η συνολική ικανότητα συγκέντρωσης οχημάτων που παρέχει η καθεμία. Με μία πρόχειρη εκτίμηση του διατιθέμενου χώρου της καθεμιάς, διαπιστώθηκε ότι η περιοχή του αεροδρομίου παρείχε σημαντικά περισσότερο χώρο για τη συγκέντρωση οχημάτων, ενώ παράλληλα βρισκόταν αρκετά πιο κοντά στις περισσότερες περιοχές προέλευσης, συγκριτικά με αυτή του εργοστασίου αφαλάτωσης. Επιλέχθηκε, λοιπόν, η ζήτηση από τα περισσότερα κεντροειδή προέλευσης να διοχετευθεί μέσω του διατιθέμενου δικτύου στην περιοχή του αεροδρομίου, και το εργοστάσιο αφαλάτωσης να συγκεντρώσει την υπόλοιπη, όπως αυτή διαμορφώνεται από τον πληθυσμό των πιο κοντινών σε αυτό περιοχών προέλευσης. Έτσι, η κατανομή έγινε ως εξής: το αεροδρόμιο συγκέντρωσε τα οχήματα που προήλθαν από τις περιοχές Ακρωτήρι, Εμπορείο, Πύργος Καλλίστης, Λιμάνι, Επισκοπή, Μεσαριά και Καρτεράδος, ενώ το εργοστάσιο αφαλάτωσης τα οχήματα από Ημεροβίγλι. Η περιοχή της Θήρας επιλέχθηκε να τροφοδοτήσει και τις δύο ζώνες ασφαλείας, ώστε να μοιραστεί ο υψηλός φόρτος που διαμορφώνεται στην περιοχή, λόγω πυκνότητας μόνιμου πληθυσμού, αλλά και τουριστικής δραστηριότητας.

4.4 ΖΗΤΗΣΗ

Η διαμόρφωση της ζήτησης αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι της μελέτης, το οποίο απαιτεί λεπτούς χειρισμούς, καθώς δεν είναι εύκολο να βρεθούν ακριβή στατιστικά στοιχεία που να καλύπτουν όλο το εύρος των σεναρίων που εξετάζονται. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση του case study, πρόκειται να εξεταστούν σενάρια που να καλύπτουν όλες τις πιθανές συνθήκες ζήτησης, υπό τις οποίες μπορεί να εκδηλωθεί το φαινόμενο. Οι συνθήκες αυτές διαφοροποιούνται εν γένει, ανάλογα με τη χρονική στιγμή εκδήλωσης του φαινομένου, καθώς η κατανομή της ζήτησης διαμορφώνεται συναρτήσει της διάρκειας της μέρας, αλλά και του χρόνου. Αυτό προϋποθέτει τη συλλογή στατιστικών δεδομένων που να αφορούν τα παρακάτω μεγέθη:

- Μόνιμος πληθυσμός του νησιού ανά περιοχή
- Αριθμός νοικοκυριών ανά περιοχή
- Κατανομή του πληθυσμού κατά τη διάρκεια του χρόνου και της μέρας
- Δυναμικότητα και πληρότητα των καταλυμάτων ανά περιοχή και χρονική περίοδο
- Ημερήσιες αφίξεις του λιμένος κατά τη διάρκεια του χρόνου και της μέρας
- Κατανομή τουριστών κατά τη διάρκεια του χρόνου και της μέρας
- Ποσοστό κατοχής ιδιωτικών οχημάτων ανά νοικοκυριό
- Ποσοστό πληρότητας ιδιωτικών οχημάτων
- Αριθμός διατιθέμενων οχημάτων μαζικής μεταφοράς ανά περιοχή και χρονική περίοδο
- Δυναμικότητα διατιθέμενων οχημάτων μαζικής μεταφοράς
- Ποσοστό ενοικίασης οχημάτων ανά περιοχή και χρονική περίοδο

Είναι προφανές ότι όλα αυτά τα στοιχεία παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα και είναι πολύ δύσκολο να συλληχθούν και να μελετηθούν σε όλο το φάσμα τους. Για το λόγο αυτό, τα σενάρια που θα μελετηθούν θα αφορούν δύο βασικές περιπτώσεις:

- Best-case scenario
- Worst-case scenario

Το πρώτο σενάριο (best-case scenario) αφορά τις καλύτερες δυνατές συνθήκες που μπορεί να επικρατούν τη στιγμή της λήψης της απόφασης για εκκένωση, και οι οποίες είναι χαμηλά επίπεδα τουρισμού και χαμηλή κινητικότητα πληθυσμού. Αυτό ισχύει διότι υπάρχει σχεδόν μηδενική ύπαρξη τουριστών και σαφής γνώση της κατανομής του πληθυσμού, γεγονός που δίνει μεγάλη ακρίβεια στη διαμόρφωση της ζήτησης και συνεπώς μεγάλη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Οι συνθήκες αυτές σημειώνονται κατά τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβρης-Μάρτιος) και τις νυχτερινές ώρες (00.00-7.00), όπου το μεγαλύτερο μέρος των κατοίκων βρίσκεται στα σπίτια τους.

Το δεύτερο σενάριο (worst-case scenario) αφορά τις χειρότερες δυνατές συνθήκες που μπορεί να επικρατούν τη στιγμή της λήψης της απόφασης για εκκένωση, και οι οποίες είναι υψηλά επίπεδα τουρισμού και υψηλή κινητικότητα πληθυσμού. Οι συνθήκες αυτές σημειώνονται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) και τις ώρες αιχμής (7.00-10.00 και 14.00-21.00). Ως ώρες αιχμής ορίστηκαν οι συγκεκριμένες, καθώς οι μόνιμοι κάτοικοι μετακινούνται για να πάνε στις δουλειές τους, οι οποίες συγκεντρώνονται ως επί το πλείστον στους οικισμούς που ανήκουν στην επικίνδυνη ζώνη, ενώ οι δε τουρίστες βρίσκονται κατά ένα ποσοστό στις παραλίες του νησιού, οι οποίες δεν ανήκουν στην επικίνδυνη ζώνη, όπως αυτή έχει οριστεί, και συνεπώς δεν διατρέχουν άμεσο κίνδυνο, ώστε να συμμετάσχουν στην εκκένωση, ενώ οι υπόλοιποι κατανέμονται και αυτοί στους οικισμούς της επικίνδυνης ζώνης.

Σε ότι αφορά το μόνιμο πληθυσμό του νησιού ανά περιοχή, τα δεδομένα συλλέχθηκαν από την Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛ.ΣΤΑΤ.), σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα κεντροειδή προέλευσης ορίστηκαν ανά ομάδες οικισμών, οι οποίοι βρίσκονταν πολύ κοντά μεταξύ τους και επρόκειτο να χρησιμοποιήσουν τις ίδιες διαδρομές, ώστε να προσεγγίσουν κάποια ζώνη ασφαλείας. Ενδεικτικά αναφέρεται το κεντροειδές της πρωτεύουσας της Θήρας, το οποίο εκτός από τον οικισμό των Φηρών, περιλαμβάνει και τους οικισμούς Έξω και Μέσα Κατοικίες, με τους οποίους συνορεύει. Ακόμη, κεντροειδές χρησιμοποιήθηκε στην περιοχή του λιμανιού, όπου ο μόνιμος πληθυσμός είναι μηδενικός, και έτσι η ζήτηση διαμορφώθηκε με βάση τους εργαζόμενους της περιοχής και τις ακτοπλοϊκές αφίξεις. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1), παρουσιάζεται ο μόνιμος πληθυσμός που χρησιμοποιήθηκε, ανά κεντροειδές προέλευσης.

Κεντροειδές	Μόνιμος Πληθυσμός
Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	1070
Θήρα	1785
Ακρωτήρι	489
Εμπορείο	1938
Επισκοπή/Έξω Γωνιά	444

Καρτεράδος	1238
Μεσαριά/Βόθωνας	2292
Πύργος Καλλίστης	912
Λιμάνι	594

Πίνακας 4.1: Μόνιμος πληθυσμός ανά κεντροειδές προέλευσης.

Σε ότι αφορά την τουριστική κίνηση του νησιού, έχει σημειωθεί ότι ο αριθμός των τουριστών σε περιόδους τουριστικής αιχμής (καλοκαιρινοί μήνες) αγγίζει τις 10.000 ημερησίως. Η κατανομή του πληθυσμού αυτού στις διάφορες περιοχές του νησιού κατά τη διάρκεια της μέρας διαμορφώνεται συναρτήσει της επισκεψιμότητας των αξιοθέατων που υπάρχουν στους διάφορους οικισμούς, των παραλιών που συγκεντρώνουν μεγάλα ποσοστά πληθυσμού, καθώς και του δυναμικού των κλινών που παρέχει κάθε περιοχή. Έτσι, από την παρούσα μελέτη εξαιρείται σημαντικό κομμάτι του τουριστικού πληθυσμού(30%), που κατά τις ώρες αιχμής βρίσκεται στις παραλίες της εξωτερικής πλευράς του νησιού, οι οποίες δεν ανήκουν στην επικίνδυνη ζώνη. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.2), παρουσιάζεται η κατανομή του πληθυσμού των τουριστών, που βρίσκεται στην επικίνδυνη ζώνη σε ώρα αιχμής κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ανά κεντροειδές προέλευσης.

Κεντροειδές	Τουρίστες σε αιχμή
Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	1136
Θήρα	2248
Ακρωτήριο	452
Εμπορείο	487
Επισκοπή/Εξω Γωνιά	246
Καρτεράδος	779
Μεσαριά/Βόθωνας	427
Πύργος Καλλίστης	261
Λιμάνι	1064

Πίνακας 4.2: Αριθμός τουριστών σε συνθήκες αιχμής ανά κεντροειδές προέλευσης.

Παράλληλα, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες σε ώρες αιχμής, η κατανομή του μόνιμου πληθυσμού του νησιού παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με τις προηγούμενες συνθήκες που παρουσιάστηκαν. Υπό τις νέες αυτές συνθήκες, οι κάτοικοι κατανέμονται στην επικίνδυνη ζώνη συναρτήσει των περιοχών εργασίας τους ως εξής (Πίνακας 4.3):

Κεντροειδές	Μόνιμος Πληθυσμός σε αιχμή
Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	1364
Θήρα	2275
Ακρωτήριο	426
Εμπορείο	1732
Επισκοπή/Εξω Γωνιά	350
Καρτεράδος	1345

Μεσαριά/Βόθωνας	1981
Πύργος Καλλίστης	768
Λιμάνι	653

Πίνακας 4.3: Αριθμός μόνιμου πληθυσμού σε συνθήκες αιχμής ανά κεντροειδές προέλευσης.

Προκειμένου να διαμορφωθεί ο φόρτος που πρόκειται να εκκενωθεί σε κάθε σενάριο που εξετάζεται, πρέπει να προσδιοριστεί ο ακριβής πληθυσμός που βρίσκεται στην επικίνδυνη ζώνη υπό τις συνθήκες που έχουν οριστεί. Σύμφωνα, λοιπόν, με την παραπάνω ανάλυση για τις συνθήκες κάθε σεναρίου, προκύπτει εύκολα ο συνολικός πληθυσμός που πρέπει να εκκενωθεί, καθώς και η κατανομή του στην επικίνδυνη ζώνη, με βάση τα στατιστικά στοιχεία που έχουν συλλεχθεί. Έτσι, προκύπτει ότι ο πληθυσμός του πρώτου σεναρίου (best-case scenario) ορίζεται εύκολα, λαμβάνοντας υπόψη απλά και μόνο τον μόνιμο πληθυσμό της επικίνδυνης ζώνης, και την κατανομή του με βάση την περιοχή κατοικίας του, όπως αυτός παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 παραπάνω.

Ο ορισμός του πληθυσμού του δεύτερου σεναρίου παρουσιάζει ένα μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας, όχι τόσο ως προς τον αριθμό των ανθρώπων που πρέπει να εκκενωθούν, όσο ως προς την κατανομή τους στο δίκτυο. Σύμφωνα, λοιπόν, με στατιστικά στοιχεία για τα ποσοστά και τις περιοχές εργασίας των μόνιμων κατοίκων, καθώς και μελέτες και εκτιμήσεις για την κατανομή των τουριστών υπό τις συνθήκες που έχουν οριστεί, ο συνολικός πληθυσμός προκύπτει αθροιστικά από τον αριθμό και την κατανομή των μόνιμων κατοίκων και των τουριστών. Η κατανομή του συνολικού πληθυσμού παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.4.

Κεντροειδές	Συνολικός Πληθυσμός Αιχμής
Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	2500
Θήρα	4523
Ακρωτήριο	878
Εμπορείο	2219
Επισκοπή/Εξω Γωνιά	596
Καρτεράδος	2124
Μεσαριά/Βόθωνας	2408
Πύργος Καλλίστης	1029
Λιμάνι	1717

Πίνακας 4.4: Συνολικός πληθυσμός σε συνθήκες αιχμής ανά κεντροειδές προέλευσης.

Ωστόσο, η διαδικασία αυτή δεν είναι αρκετή για τη διαμόρφωση του φόρτου που πρόκειται να εισαχθεί στο δίκτυο και να εκκενωθεί. Είναι σαφές ότι χωρίς τη συλλογή πληροφορίας για μεγέθη που αφορούν τα διατιθέμενα οχήματα που θα χρησιμοποιήσει ο πληθυσμός, είναι αδύνατη η ρεαλιστική αναπαράσταση των σεναρίων και της εφαρμογής που εξετάζονται. Αυτό σημαίνει ότι είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός μεγεθών όπως το ποσοστό κατοχής οχημάτων ιδιωτικής χρήσης (Ι.Χ.) του μόνιμου πληθυσμού, το ποσοστό πληρότητας που παρουσιάζουν τα οχήματα αυτά, το ποσοστό κατοχής Ι.Χ. των τουριστών που επισκέπτονται το νησί, το ποσοστό ενοικίασης οχημάτων από τους τουρίστες κλπ. Τα

μεγέθη αυτά θα χρησιμοποιηθούν συναρτήσει του πληθυσμού που θα λάβει μέρος στην εκκένωση, με βάση το εκάστοτε σενάριο. Αυτό σημαίνει ότι, για παράδειγμα, στην περίπτωση του πρώτου σεναρίου (best-case scenario), όπου ο αριθμός των τουριστών έχει θεωρηθεί μηδενικός, δεν πρόκειται να συμπεριληφθούν μεγέθη, όπως το ποσοστό ενοικίασης οχημάτων από αυτούς, για τη διαμόρφωση του φόρτου.

Σε ότι αφορά το ποσοστό κατοχής οχημάτων ιδιωτικής χρήσης, σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από την Στατιστική Υπηρεσία, προκύπτει ότι το 80% των νοικοκυριών της Σαντορίνης έχει στην κατοχή του τουλάχιστον ένα όχημα, ενώ το 60% τουλάχιστον δύο. Αυτό σημαίνει ότι το εν λόγω ποσοστό είναι σε θέση να εκκενώσει την επικίνδυνη ζώνη, χωρίς να χρειαστεί η παρέμβαση μέσω μαζικής μεταφοράς. Παράλληλα, σε συνθήκες αιχμής, ακόμα και αν όλα τα μέλη ενός νοικοκυριού δεν βρίσκονται στο ίδιο σημείο, η κατοχή περισσότερων του ενός οχημάτων επιτρέπει την εκκένωση χωρίς περιορισμούς. Ο αριθμός των οχημάτων αυτών ανέρχεται στο 1/5 του συνολικού αριθμού οχημάτων ιδιωτικής χρήσης του νομού Κυκλάδων. Ακόμη, σύμφωνα με τα στοιχεία της Στατιστικής Υπηρεσίας για το συνολικό αριθμό κατοίκων και οχημάτων του νομού Κυκλάδων, διαπιστώνεται ότι το ποσοστό πληρότητας των οχημάτων που παρατηρείται ανά νοικοκυριό, είναι 1,2 άτομα ανά όχημα. Στην περίπτωση της εκκένωσης, το ποσοστό αυτό αγγίζει το 60% για μέσο όρο πέντε θέσεων ανά όχημα. Με λίγα λόγια, κάθε όχημα ιδιωτικής χρήσης αντιστοιχεί σε 3 άτομα μόνιμου πληθυσμού, υπό συνθήκες εκκένωσης.

Από την άλλη, σε ότι αφορά τους τουρίστες, τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία για τις ενοικιάσεις οχημάτων στο νησί δείχνουν ότι το 40% των τουριστών που επισκέπτονται το νησί νοικιάζουν κάποιο όχημα, με ποσοστό πληρότητας 50%. Παράλληλα, ένα 20% του συνόλου, το οποίο προσεγγίζει το νησί ακτοπλοϊκώς, έχει ήδη στην κατοχή του κάποιο όχημα, ενώ το υπόλοιπο 40% δεν διαθέτει κάποιο μέσο και χρησιμοποιεί τα μέσα μαζικής μεταφοράς για τις μετακινήσεις του. Το ποσοστό πληρότητας των εν λόγω οχημάτων υπό συνθήκες εκκένωσης εκτιμάται και αυτό στο 60%.

Όλα τα παραπάνω στατιστικά στοιχεία λαμβάνονται υπόψη για τη διαμόρφωση της ζήτησης, συναρτήσει των συνθηκών που επικρατούν. Έτσι, οι τελικοί φόρτοι που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε σενάριο για τη δημιουργία των πινάκων προέλευσης-προορισμού, διαμορφώνονται ως εξής (Πίνακες 4.5 και 4.6).

Σενάριο 1 (best-case scenario)	
Κεντροειδές	Αυτοκίνητα
Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	285
Θήρα	476
Ακρωτήρι	130
Εμπορείο	517
Επισκοπή/Εξω Γωνιά	118
Καρτεράδος	330
Μεσαριά/Βόθωνας	611
Πύργος Καλλίστης	243
Λιμάνι	158

Πίνακας 4.5: Φόρτος του πρώτου σεναρίου ανά κεντροειδές προέλευσης.

Σενάριο 2 (worst-case scenario)	
Κεντροειδές	Αυτοκίνητα
Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	591
Θήρα	1057
Ακρωτήρι	204
Εμπορείο	559
Επισκοπή/Εξω Γωνιά	142
Καρτεράδος	515
Μεσαριά/Βόθωνας	613
Πύργος Καλλίστης	257
Λιμάνι	387

Πίνακας 4.6: Φόρτος του δεύτερου σεναρίου ανά κεντροειδές προέλευσης.

Η επιλογή της ζώνης ασφαλείας ανά κεντροειδές προέλευσης ορίζεται από τις αρμόδιες αρχές έτσι ώστε να ισομοιράζεται η κυκλοφορία στο δίκτυο και η συγκέντρωση των οχημάτων ανά ασφαλή ζώνη, συναρτήσει πάντα της χωρητικότητας του οδικού δικτύου και των περιοχών αυτών. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τη ζώνη ασφαλείας που ορίζεται ανά κεντροειδές, καθώς και την κατανομή των οχημάτων ανά κεντροειδές προέλευσης, δημιουργούνται οι τελικοί πίνακες προέλευσης-προορισμού για κάθε εξεταζόμενο σενάριο (Πίνακες 4.7 και 4.8).

Σενάριο 1 (best-case scenario)			
Αυτοκίνητα	Safe zone	Αεροδρόμιο	Οία
	Κεντροειδές		
	Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	0	285
	Θήρα	76	400
	Ακρωτήρι	130	0
	Εμπορείο	517	0
	Επισκοπή/Εξω Γωνιά	118	0
	Καρτεράδος	330	0
	Μεσαριά/Βόθωνας	611	0
	Πύργος Καλλίστης	243	0
	Λιμάνι	158	0

Πίνακας 4.7: Πίνακας προέλευσης προορισμού (O/D) του πρώτου σεναρίου.

Σενάριο 2 (worst-case scenario)			
Αυτοκίνητα	Safe zone	Αεροδρόμιο	Οία
	Κεντροειδές		
	Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	0	591
	Θήρα	157	900
	Ακρωτήρι	204	0
	Εμπορείο	559	0
	Επισκοπή/Εξω Γωνιά	142	0
	Καρτεράδος	515	0
	Μεσαριά/Βόθωνας	613	0
	Πύργος Καλλίστης	257	0
Λιμάνι	387	0	

Πίνακας 4.8: Πίνακας προέλευσης προορισμού (O/D) του δεύτερου σεναρίου.

Και στα δύο εξεταζόμενα σενάρια, διαπιστώνεται εύκολα ότι υπάρχει σημαντικός αριθμός ανθρώπων, είτε μόνιμων κατοίκων είτε τουριστών, οι οποίοι δεν έχουν πρόσβαση σε κάποιο όχημα ιδιωτικής χρήσης, ακόμα και με τα ποσοστά πληρότητας που ισχύουν σε συνθήκες εκκένωσης. Αυτό σημαίνει ότι, χωρίς κάποια παρέμβαση στη διαδικασία της εκκένωσης από τις αρμόδιες αρχές, ο αριθμός αυτός δεν μπορεί να συμμετάσχει στην εκκένωση και οι άνθρωποι αυτοί διατρέχουν σημαντικό κίνδυνο σε ότι αφορά την επιβίωσή τους.

4.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Επόμενο στάδιο της εφαρμογής είναι ο προσδιορισμός του μαθηματικού μοντέλου που θα μελετηθεί. Το μαθηματικό μοντέλο αυτό περιλαμβάνει όλες εκείνες τις εξισώσεις που διέπουν τις μεταβλητές, καθώς και τις παραμέτρους που αφορούν τη συμπεριφορά των οδηγών. Όπως αναφέρθηκε και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, χαρακτηριστικό στοιχείο των μελετών εκκένωσης είναι ότι δεν υπάρχουν στοιχεία για τη συμπεριφορά των οδηγών υπό τέτοιες συνθήκες. Προκειμένου, λοιπόν να ξεπεραστεί η δυσκολία αυτή, επιλέγεται η μελέτη κάποιων από τις παραμέτρους που ορίζουν τη συμπεριφορά των οδηγών, χρησιμοποιώντας κάποια εύρη τιμών, έτσι ώστε τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν να καλύπτουν σημαντικό ποσοστό των συμπεριφορών που μπορεί να παρατηρηθούν. Προκειμένου να οριστούν ποιες παράμετροι θα αξιοποιηθούν για την υλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας σε ένα μεγαλύτερο σύνολο παραμέτρων, ώστε να διαπιστωθεί ποιες από αυτές επηρεάζουν περισσότερο το αποτέλεσμα και συνεπώς, περιέχουν το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας που απαιτείται για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων.

4.5.1 Ανάλυση ευαισθησίας

Ως τεχνική προσέγγισης επιλέχθηκε η μέθοδος all-at-once, μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψη η επίδραση που έχει η μεταβολή όχι μόνο μίας παραμέτρου στα αποτελέσματα,

αλλά και η μεταβολή πολλών παραμέτρων ταυτόχρονα. Έτσι, απεικονίζονται και οι πιθανές συμμεταβλητότητες των παραμέτρων, που σε άλλες τεχνικές (όπως η one-at-a-time) δεν λαμβάνονται υπόψη.

Το σύνολο των παραμέτρων που συμμετείχε στην ανάλυση ευαισθησίας ορίστηκε με βάση αντίστοιχες μελέτες για τη συμπεριφορά των οδηγών και σύμφωνα με τα επίπεδα ανάλυσης που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν. Προφανώς, τα μεγέθη αυτά ορίστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λύση μεταξύ μεγιστοποίησης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και ελαχιστοποίησης της υπολογιστικής διαδικασίας. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, η πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας για 10 παραμέτρους με 7 επίπεδα ανάλυσης και μία επανάληψη ανά σετ παραμέτρων, απαιτεί 100 χρόνια για να ολοκληρωθεί. Λαμβάνοντας, λοιπόν, όλα αυτά τα στοιχεία υπόψη, επιλέχθηκε να γίνει ανάλυση ευαισθησίας για 4 παραμέτρους σε 5 επίπεδα ανάλυσης, στοιχεία τα οποία δημιουργούν 625 προσομοιώσεις. Οι 4 αυτές παράμετροι επιλέχθηκαν να είναι αυτές που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη λειτουργία της κυκλοφορίας και προέκυψαν συναρτήσει άλλων μελετών που είχαν πραγματοποιηθεί με αντικείμενο τη συμπεριφορά των οδηγών σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης. Έτσι, ορίστηκαν ως εξής:

- **Speed acceptance**
Πρόκειται για το μέγεθος εκείνο που ορίζει το ποσοστό συμμόρφωσης των οδηγών στη μέγιστη ταχύτητα, όπως αυτή ορίζεται από το τμήμα του οδικού δικτύου στο οποίο βρίσκονται. Παίρνει τιμές κοντά στο 1, που υποδηλώνει απόλυτη συμμόρφωση στην ταχύτητα, και εκφράζει το κατά πόσο είναι διατεθειμένοι οι οδηγοί να ξεπεράσουν το όριο ταχύτητας.
- **Maximum acceleration (m/s^2)**
Πρόκειται για τη μέγιστη επιτάχυνση που μπορεί να αναπτύξει ένα όχημα, ανεξάρτητα από τη θέση του στο δίκτυο.
- **Normal deceleration (m/s^2)**
Πρόκειται για την επιβράδυνση που υιοθετεί ένα όχημα όταν συναντήσει κάποιο εμπόδιο ή του επιβληθεί να σταματήσει, υπό κανονικές συνθήκες κυκλοφορίας.
- **Reaction time (sec)**
Πρόκειται για το χρόνο που χρειάζεται ένας οδηγός για να αντιδράσει, όταν παρατηρηθεί κάποια μεταβολή στο περιβάλλον του, η οποία απαιτεί διαφορετικό χειρισμό.

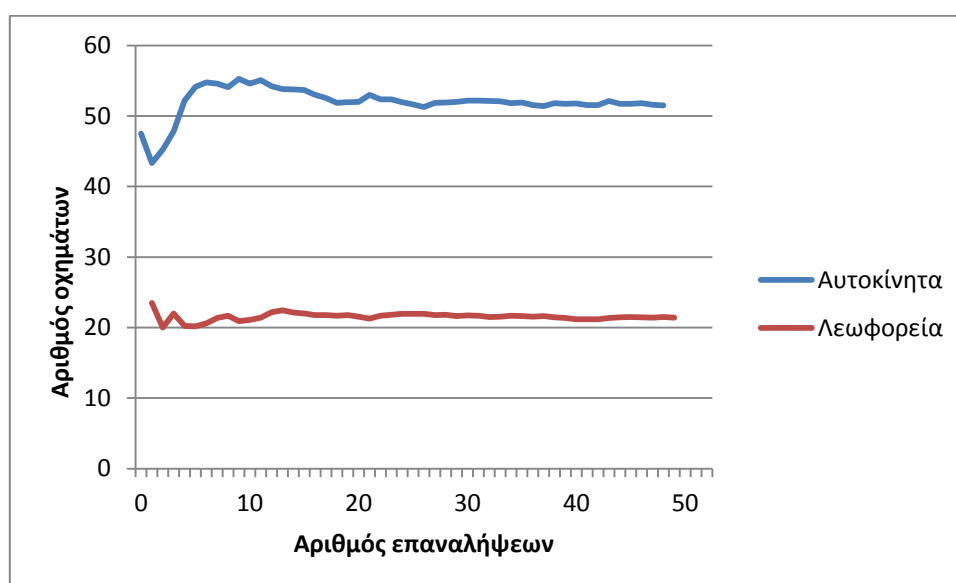
Με βάση τις παραπάνω μεταβλητές, ορίζονται και άλλες που σχετίζονται με αυτές και επηρεάζονται αναλογικά. Έτσι, για παράδειγμα, μία αύξηση στην τιμή του χρόνου αντίδρασης, σημαίνει αυτόματα και αύξηση του χρόνου αντίδρασης σε φωτεινό σηματοδότη. Παράλληλα, οι παράμετροι αυτές διαμορφώνονται για κάθε τύπο οχήματος που συμμετέχει στην εκκένωση, και πάλι αναλογικά, συναρτήσει των προδιαγραφών του

κάθε τύπου οχήματος. Έτσι, η μελέτη ενός πιο επιθετικού μοντέλου στη συμπεριφορά των οδηγών, θα εκφράζεται άμεσα σε όλους τους οδηγούς, ανεξάρτητα από το όχημα που οδηγούν.

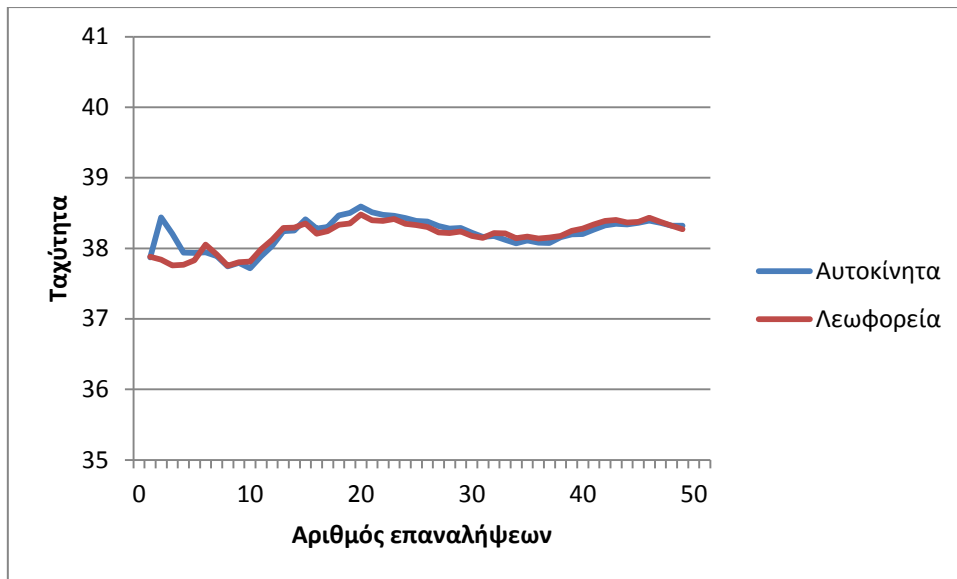
Προκειμένου να υλοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας για αυτές τις παραμέτρους, πρέπει να οριστεί ένας ελάχιστος αριθμός επαναλήψεων που απαιτείται για τη συλλογή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, που δεν θα εμπεριέχουν την τυχαιότητα μιας μεμονωμένης επανάληψης. Ο αριθμός αυτός εκφράζει στη ουσία τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτείται, προκειμένου να ομαλοποιηθεί το αποτέλεσμα. Για να οριστεί ο αριθμός αυτός, ορίστηκαν συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων, οι οποίες επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις default τιμές του λογισμικού, ορίστηκε ένα σχετικά αντιπροσωπευτικός πίνακας προέλευσης-προορισμού και εκτελέστηκαν 50 προσομοιώσεις. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Speed acceptance=1.1
- Maximum acceleration=3 m/s²
- Normal deceleration=4 m/s²
- Reaction time=0.8 sec

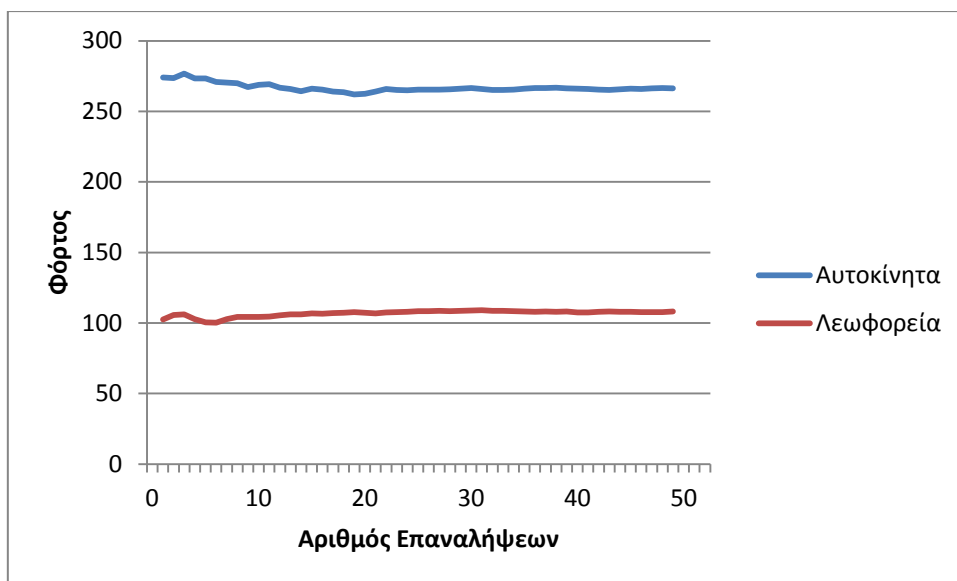
Για το σύνολο των επαναλήψεων, συλλέχθηκαν τα μεγέθη αριθμός οχημάτων, ταχύτητα και φόρτος και υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι, όπως αυτοί προέκυπταν κάθε φορά, μετά από κάθε νέα επανάληψη. Οι μετρήσεις των εν λόγω μεγεθών έγιναν σε προκαθορισμένο σημείο, στο οποίο είχε τοποθετηθεί αισθητήρας συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων (detector). Το σημείο αυτό προέκυψε από τυχαία επιλογή όλων των αισθητήρων που είχαν τοποθετηθεί στο δίκτυο, ώστε να μην υπάρχει εξάρτηση των αποτελεσμάτων από την επιλογή του σημείου μέτρησης. Οι μέσοι όροι αναπαραστάθηκαν σε διαγράμματα, ώστε να διαπιστωθεί μετά από πόσες επαναλήψεις ομαλοποιούνται τα αποτελέσματα. Τα διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήματα 4.3, 4.4 και 4.5).



Σχήμα 4.3: Αριθμός οχημάτων ανά κατηγορία οχήματος.



Σχήμα 4.4: Ταχύτητα ανά κατηγορία οχήματος.



Σχήμα 4.5: Φόρτος ανά κατηγορία οχήματος.

Παρατηρείται ότι και τα 3 μεγέθη παρουσιάζουν μικρή διακύμανση, η οποία σχεδόν εξαλείφεται μετά τις 10 επαναλήψεις, όπου και ομαλοποιούνται τα αποτελέσματα. Έτσι, για το σύνολο του δικτύου, προκύπτει ότι με την εκτέλεση 10 επαναλήψεων για ένα πείραμα, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν θα αποτελούν μία αντιπροσωπευτική εικόνα της πραγματικότητας. Συνεπώς, για κάθε μία από τις 625 προσομοιώσεις που επιλέχθηκε να εξεταστούν, πραγματοποιήθηκαν 10 επαναλήψεις, δηλαδή συνολικά εκτελέστηκαν 6250 τρεξίματα, γεγονός που εκφράζει την ανάγκη για αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Αφού προσδιορίστηκε και ο ελάχιστος αριθμός επαναλήψεων που χρειάζεται, το επόμενο στάδιο είναι ο ορισμός των ευρών των τιμών των παραμέτρων, η επιλογή των αποτελεσμάτων που θα συλλεχθούν για τη σύγκριση και η εκτέλεση των προσομοιώσεων. Τα εύρη ορίστηκαν με βάση τις προκαθορισμένες τιμές του προσομοιωτή για το μοντέλο ακολουθίας οχήματος, και για τιμές γύρω από αυτές. Οι μεμονωμένες τιμές που ορίστηκαν για να εκφράσουν το εύρος των τιμών προσδιορίστηκαν ομοιόμορφα μέσα στο εύρος της κάθε παραμέτρου,, συναρτήσει των επιπέδων ανάλυσης που επιλέχθηκαν. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται αναλυτικά οι προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων, τα εύρη τιμών τους και οι μεμονωμένες τιμές για 5 επίπεδα ανάλυσης.

	Default values	Range	Specific values
Speed acceptance	1.1	[0.9 1.3]	[0.9 1.0 1.1 1.2 1.3]
Maximum acceleration	3 m/s ²	[1.5 4.5]	[1.5 2.25 3.0 3.75 4.5]
Normal deceleration	4 m/s ²	[2.5 5.5]	[2.5 3.25 4.0 4.75 5.5]
Reaction time	0.8 sec	[0.4 1.2]	[0.4 0.6 0.8 1.0 1.2]

Πίνακας 4.9: Εύρη και τιμές των παραμέτρων που συμμετέχουν στην ανάλυση ευαισθησίας.

Ως χρόνος διεξαγωγής της συγκεκριμένης διαδικασίας επιλέχθηκε η μία ώρα για κάθε προσομοίωση, ενώ ο φόρτος διαμορφώθηκε με βάση στατιστικά στοιχεία για τη μέση ζήτηση που παρατηρείται στο δίκτυο σε διάρκεια μιας ώρας, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Οι αφίξεις των οχημάτων επιλέχθηκε να ακολουθήσουν την εκθετική κατανομή, η οποία ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα.

Τα αποτελέσματα που επιλέχθηκαν για να γίνει η σύγκριση της επίδρασης των παραμέτρων ήταν η ταχύτητα, ο φόρτος και η πυκνότητα. Τα μεγέθη αυτά συλλέχθηκαν για κάθε πιθανό συνδυασμό των τιμών των παραμέτρων, για κάθε τύπο οχήματος, ανά δεκάλεπτο λειτουργίας της προσομοίωσης, αλλά και για το σύνολο του χρόνου διεξαγωγής. Οι μετρήσεις των εν λόγω μεγεθών έγιναν στα σημεία στα οποία είχαν τοποθετηθεί αισθητήρες και τα οποία βρίσκονταν πολύ κοντά στα σημεία εξόδου ή συγκέντρωσης των οχημάτων (safe zones), ώστε να συλλεχθεί το σύνολο της πληροφορίας για όλα τα οχήματα που έχουν προλάβει να εκκενώσουν το δίκτυο στον προκαθορισμένο χρόνο. Τόσο η εκτέλεση του συνόλου των προσομοιώσεων, όσο και η συλλογή των αποτελεσμάτων έγινε με προγραμματιστική προσέγγιση. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB, στο οποίο δημιουργήθηκε ένας κώδικας, μέσω του οποίου εκτελούνταν όλες οι ενέργειες που απαιτούνταν για την διεξαγωγή μιας προσομοίωσης. Παρακάτω, ακολουθεί η γενική μεθοδολογία του κώδικα που αναπτύχθηκε.

4.5.2 Μεθοδολογία κώδικα

Όπως αναφέρθηκε, το λογισμικό που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι το MATLAB, καθώς πρόκειται για μια γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς με μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες και υψηλού επιπέδου διεπαφή με το χρήστη. Ξεκινώντας τον κώδικα, αρχικοποιούνται κάποιες μεταβλητές, που αφορούν τα ορίσματα για τα στοιχεία εισόδου, όπως το αρχείο με τις τιμές των παραμέτρων (όπως αυτές έχουν διαμορφωθεί με βάση τα εύρη τους και τον αριθμό των επιπέδων ανάλυσης), το αρχείο του δικτύου φυσικά

και το αρχείο στο οποίο θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα. Ακόμη, ορίζεται ο αριθμός των παραμέτρων, ο αριθμός των επιπέδων ανάλυσης, ο αριθμός των επαναλήψεων, ο αριθμός των κατηγοριών οχημάτων και ο αριθμός των αισθητήρων. Στη συνέχεια, ξεκινάει μια επαναληπτική διαδικασία για κάθε προσομοίωση, μέσα στην οποία, φορτώνονται οι εκάστοτε τιμές των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν για τη συγκεκριμένη εκτέλεση. Οι τιμές αυτές αποθηκεύονται στο αρχείο που έχει ορισθεί στην αρχή του κώδικα. Έπειτα, ξεκινάει δεύτερη επαναληπτική διαδικασία για κάθε επανάληψη της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Μέσα σε αυτή ορίζεται η εκάστοτε τιμή του seed της προσομοίωσης που προκύπτει τυχαία, προκειμένου να διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα μεταξύ των επαναλήψεων. Το επόμενο βήμα είναι και το σημαντικότερο, καθώς αφορά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Για να γίνει αυτό, καλείται η εφαρμογή του AIMSUN μέσω της κονσόλας και συγχρόνως και το script, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις απαιτούμενες κινήσεις για την προσομοίωση.

Πιο αναλυτικά, το script αυτό είναι γραμμένο σε γλώσσα python, που σημαίνει ότι το πρώτο πράγμα που πρέπει να ορισθεί είναι οι βιβλιοθήκες που θα χρησιμοποιηθούν και οι οποίες εξαρτώνται από τις χρήσεις που ζητούνται από αυτό. Έπειτα, ορίζεται το αρχείο που περιέχει το δίκτυο, ο κωδικός του πειράματος που εξετάζεται, οι κωδικοί των οχημάτων που συμμετέχουν στην προσομοίωση, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων της επανάληψης. Ακόμη, υπολογίζονται οι τιμές κάποιων επιπλέον παραμέτρων που μεταβάλλονται αναλογικά με τις εξεταζόμενες. Οι τιμές του συνόλου των παραμέτρων αυτών εισάγονται στα δεδομένα του πειράματος. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται η κονσόλα, φορτώνεται το δίκτυο και δημιουργείται νέος προσομοιωτής. Ακολουθεί ο έλεγχος του προσομοιωτή για να εξακριβωθεί ότι δεν είναι απασχολημένος από προηγούμενη εκτέλεση και φορτώνεται το αντίγραφο του πειράματος που θα προσομοιωθεί. Ελέγχεται η κατάσταση της προσομοίωσης και εφόσον όλα λειτουργούν σωστά και απρόσκοπτα, εκτελείται η προσομοίωση. Τέλος, αποθηκεύεται το δίκτυο με ότι αλλαγές έχουν γίνει (ιδανικά σε διαφορετικό αρχείο από αυτό που εισήχθηκε στην αρχή, προκειμένου να μην χαθούν πληροφορίες που πιθανώς χρειαστούν σε μεταγενέστερο στάδιο) και απενεργοποιείται η κονσόλα.

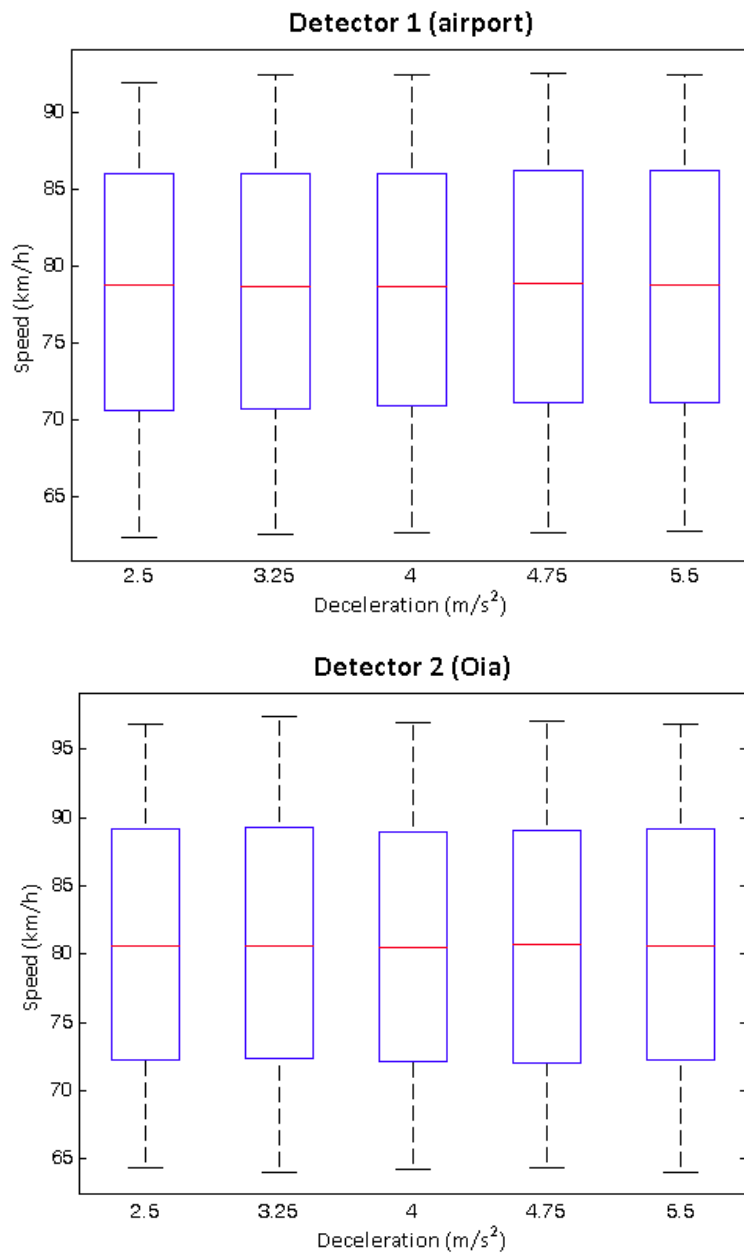
Ολοκληρώνοντας αυτό το βήμα, όχι μόνο έχει αποθηκευτεί η νέα μορφή του δικτύου, αλλά και έχει ενημερωθεί η βάση δεδομένων του, μέσα στην οποία είναι αποθηκευμένα όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση της προσομοίωσης. Μέσω σύνδεσης με τη βάση, συλλέγονται τα αποτελέσματα αυτά που είναι απαραίτητα για της ανάγκες της εφαρμογής. Αφού συλλεχθούν όλα τα ζητούμενα στοιχεία, τερματίζεται η σύνδεση με τη βάση και ελέγχονται οι τιμές των στοιχείων αυτών για πιθανά χονδροειδή σφάλματα, τα οποία και διορθώνονται. Έπειτα, αποθηκεύονται ως εγγραφή ενός πίνακα, μαζί και με τα στοιχεία εισόδου του κάθε τρεξίματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για το σύνολο των επαναλήψεων και των προσομοιώσεων που έχουν οριστεί, και έτσι στο τέλος έχει δημιουργηθεί ένας μεγάλος πίνακας (6250 τρεξίματα), αποθηκευμένος στη μνήμη του MATLAB, που περιλαμβάνει όλη τη ζητούμενη πληροφορία. Ο πίνακας αυτός μεταφέρεται σε εξωτερικό αρχείο, ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία του. Σημειώνεται ότι όλη η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα 1.

4.5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

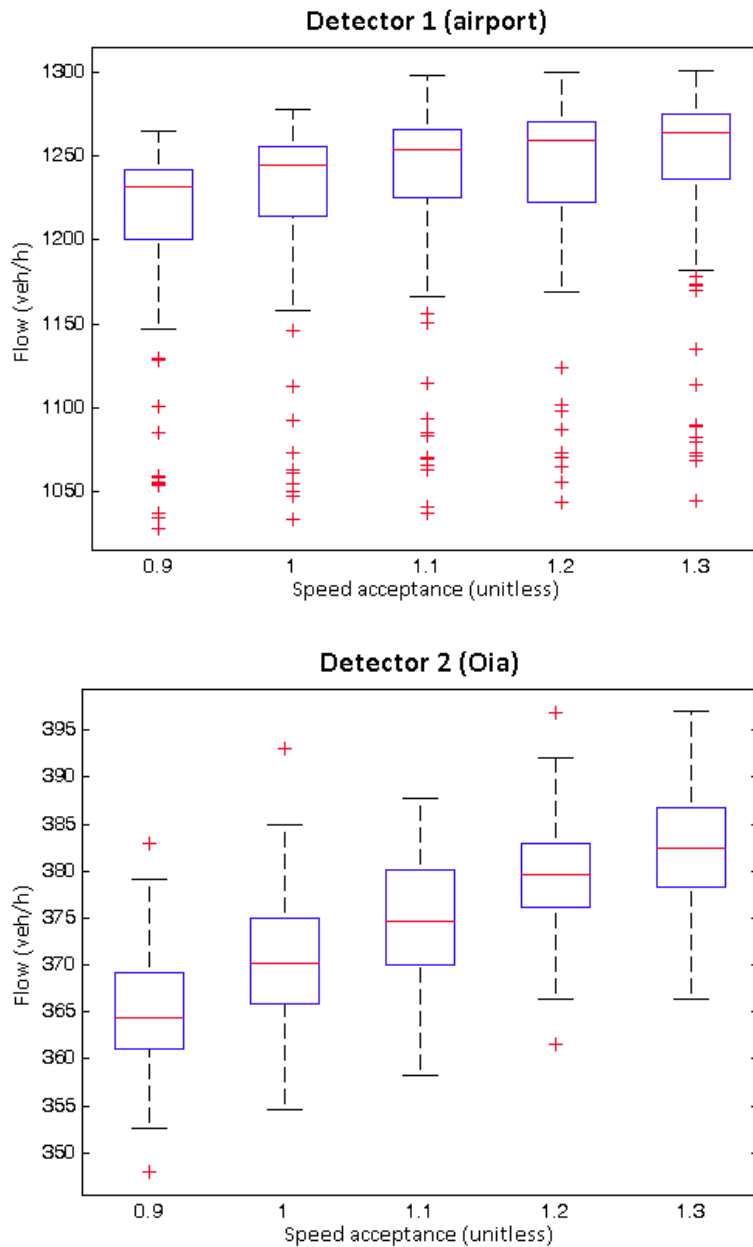
Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση κάθε παραμέτρου στα αποτελέσματα, χρειάζεται μία σχετική επεξεργασία του αρχείου που δημιουργήθηκε από την παραπάνω διαδικασία, το οποίο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία των προσομοιώσεων που έχουν εκτελεστεί. Η επεξεργασία αυτή αφορά την εξαγωγή των μέσων όρων των αποτελεσμάτων, όπως αυτοί διαμορφώνονται από τις 10 επαναλήψεις της κάθε προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό, ομαλοποιούνται τα αποτελέσματα και προκύπτει μία σχετικά αξιόπιστη τιμή των μεγεθών που έχουν οριστεί ως στοιχεία εξόδου (ταχύτητα, φόρτος και πυκνότητα), για κάθε προσομοίωση. Έπειτα, τα στοιχεία αυτά ομαδοποιούνται και προβάλλονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργούνται διαγράμματα, το καθένα από τα οποία δείχνει τη μεταβολή ενός από τα αποτελέσματα (ταχύτητα, φόρτος, πυκνότητα) για έναν αισθητήρα συναρτήσει μίας από τις παραμέτρους, για κάθε τύπο οχήματος, στο σύνολο της προσομοίωσης. Έτσι, μπορεί να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή η επιρροή κάθε παραμέτρου στα αποτελέσματα και να επιλεγθούν τελικά αυτές που επηρεάζουν περισσότερο τα στοιχεία εξόδου και οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε αξιόπιστη εκτίμηση με μεγάλο βαθμό εμπιστοσύνης.

Προκύπτουν, λοιπόν, 24 διαγράμματα για κάθε τύπο οχήματος (2 αισθητήρες, 3 αποτελέσματα, 4 παράμετροι), κάποια από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Η παρουσίαση που επιλέχθηκε είναι αυτή των boxplot, καθώς παρέχουν καλύτερη αντίληψη των αποτελεσμάτων, αφού επιτρέπουν την απεικόνιση τόσο των μέσων όρων των αποτελεσμάτων για κάθε τιμή παραμέτρου, όσο και της διακύμανσης των αποτελεσμάτων αυτών. Πιο συγκεκριμένα, η κόκκινη γραμμή στο εσωτερικό κάθε boxplot εκφράζει τη μεσαία τιμή του αποτελέσματος για τη συγκεκριμένη τιμή της παραμέτρου, ενώ η πάνω και κάτω γραμμή του boxplot (τα όριά του, μπλε χρώμα), εκφράζουν το 25% και το 75% των τιμών του αποτελέσματος, αντίστοιχα. Οι μαύρες γραμμές εξωτερικά του boxplot (πάνω και κάτω) εκφράζουν το 99,3% του εύρους που καλύπτουν τα αποτελέσματα. Οι τιμές που ξεφεύγουν από αυτό το ποσοστό δεν λαμβάνονται υπόψη για τη διαμόρφωση του μέσου όρου και απεικονίζονται ξεχωριστά εκτός του boxplot με κόκκινο σταυρό.

Για απλούστευση και καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας της ανάλυσης ευαισθησίας, επιλέχθηκε η παρουσίαση των διαγραμμάτων για την κατηγορία των αυτοκινήτων, καθώς μόνο αυτά συμμετέχουν στα σενάρια εκκένωσης που εξετάζονται, και μάλιστα 2 διαγραμμάτων, τα οποία αποτελούν τα 2 άκρα. Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 4.6), παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της παραμέτρου *normal deceleration* δεν επηρεάζει καθόλου τις τιμές της ταχύτητας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση (Σχήμα 4.7), η μεταβολή της τιμής της παραμέτρου *speed acceptance* επηρεάζει σημαντικά την τιμή της ταχύτητας. Αντίστοιχα, προκύπτουν συμπεράσματα για την επίδραση της κάθε παραμέτρου στο κάθε στοιχείο εξόδου, μελετώντας όλα τα διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζονται στο Παράρτημα 2.



Σχήμα 4.6: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της επιβράδυνσης ανά αισθητήρα.



Σχήμα 4.7: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας ανά αισθητήρα.

Παρατηρώντας το σύνολο των διαγραμμάτων (Παράρτημα 2), γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα μεγέθη ταχύτητα, φόρτος και πυκνότητα επηρεάζονται σημαντικά περισσότερο από τις παραμέτρους *speed acceptance* και *max acceleration*, μιας και η μεταβολή των τιμών αυτών των δύο παραμέτρων επιφέρει σημαντικά πιο έντονη διαφοροποίηση στη διαμόρφωση των τιμών των αποτελεσμάτων, από ότι οι άλλες δύο παράμετροι (*normal deceleration* και *reaction time*). Παρατηρείται ότι μικρή διαφοροποίηση στην τιμή της παραμέτρου *speed acceptance*, προκαλεί σημαντική μεταβολή στη διαμόρφωση του μεγέθους ταχύτητα. Παρατηρείται ακόμα, ότι στη δεύτερη αυτή περίπτωση, η μεταβολή του αποτελέσματος δεν είναι απολύτως γραμμική, γεγονός που υποδεικνύει ότι η μεταβολή του αποτελέσματος

φόρτος δεν είναι ανάλογη της μεταβολής της παραμέτρου *max acceleration*, ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες παραμέτρους. Η διακύμανση αυτή που παρουσιάζει υποδηλώνει ότι τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει εμπεριέχουν και την αλληλεπίδραση που παρουσιάζουν οι παράμετροι μεταξύ τους. Το στοιχείο αυτό ενισχύει ακόμα περισσότερο την επιλογή της τεχνικής all-at-once για την ανάλυση ευαισθησίας, καθώς διαπιστώνεται ότι οι παράμετροι δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και η συμμεταβλητότητά τους διαμορφώνει τελείως διαφορετικά τα αποτελέσματα, από ότι αν μεταβαλλόταν η καθεμία ξεχωριστά (one-at-a-time).

Προκειμένου να ισχυροποιηθούν τα συμπεράσματα αυτά και να ποσοτικοποιηθεί ο βαθμός επίδρασης της κάθε παραμέτρου στο κάθε στοιχείο εξόδου, διαμορφώθηκε το μοντέλο λειτουργίας του δικτύου με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν. Αρχικά, το μοντέλο διαμορφώθηκε για το μέγεθος της ταχύτητας, συναρτήσει των 4 παραμέτρων που είχαν οριστεί, του αισθητήρα και του τύπου οχήματος:

$$Speed = \theta_0 + \theta_1 * (speedacc * 10) + \theta_2 * acc + \theta_3 * dec + \theta_4 * reactiontime + \theta_5 * detID + \theta_6 * vehType + e$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.10).

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	5.965	119.009
Επιτάχυνση	0.370	5.539
Επιβράδυνση	0.030	0.449
Χρόνος αντίδρασης	0.378	1.509
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-5.050	-35.623
Όχημα = Λεωφορεία	-10.310	-72.721

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.

Έπειτα, λόγω μικρής σημαντικότητας, αφαιρέθηκε η παράμετρος *deceleration*:

$$Speed = \theta_0 + \theta_1 * (speedacc * 10) + \theta_2 * acc + \theta_3 * reactiontime + \theta_4 * detID + \theta_5 * vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	5.965	119.012
Επιτάχυνση	0.370	5.539
Χρόνος αντίδρασης	0.378	1.509
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-5.050	-35.624
Όχημα = Λεωφορεία	-10.310	-72.722

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε και η παράμετρος *reaction time*, ενώ προστέθηκε ως παράμετρος το γινόμενο των παραμέτρων του αισθητήρα και του τύπου οχήματος:

$$Speed = \beta_0 + \beta_1 \cdot (speedacc \cdot 10) + \beta_2 \cdot acc + \beta_3 \cdot detID + \beta_4 \cdot vehType + \beta_5 \cdot DetID \cdot vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	5.965	130.996
Επιτάχυνση	0.370	6.096
Αισθητήρας = ΟΙΑ	2.788	15.304
Όχημα = Λεωφορεία	-2.472	-13.570
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία	-15.676	-60.854

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.

Τέλος, προστέθηκαν όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων, ώστε να ληφθούν υπόψη και οι συμμεταβλητότητές τους και προέκυψε το τελικό μοντέλο:

$$Speed = \beta_0 + \beta_1 \cdot (speedacc \cdot 10) + \beta_2 \cdot acc + \beta_3 \cdot detID + \beta_4 \cdot vehType + \beta_5 \cdot DetID \cdot vehType + \beta_6 \cdot (speedacc \cdot 10) \cdot DetID + \beta_7 \cdot (speedacc \cdot 10) \cdot vehType + \beta_8 \cdot acc \cdot DetID + \beta_{10} \cdot acc \cdot detID \cdot vehType + \beta_9 \cdot acc \cdot vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	6.535	130.996
Επιτάχυνση	-0.232	6.096
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-2.205	15.304
Όχημα = Λεωφορεία	9.696	-13.570
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία	-12.166	-15.859
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Αποδοχή ορίου ταχύτητας	0.20	2.213
Όχημα = Λεωφορεία & Αποδοχή ορίου ταχύτητας	-1.341	-14.828
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Επιτάχυνση	0.931	5.458
Όχημα = Λεωφορεία & Επιτάχυνση	0.860	5.042
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία & Επιτάχυνση	-1.170	-4.852

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.

Παρατηρείται ότι, στον αισθητήρα της Οίας για την κατηγορία των λεωφορείων, η ταχύτητα διαμορφώνεται περίπου 12 km/h πιο χαμηλά. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τις υπόλοιπες μεταβλητές που συμμετέχουν στο μοντέλο. Ακόμη, με βάση τις τιμές t-test (κατανομή student), προκύπτει ότι όλες οι μεταβλητές παρουσιάζουν βαθμό εμπιστοσύνης πάνω από 95%, που σημαίνει ότι το 95% της πληροφορίας της λειτουργίας του δικτύου διαμορφώνεται από αυτές τις παραμέτρους. Η διαδικασία αυτή

πραγματοποιήθηκε και για τα άλλα δύο μεγέθη (φόρτος, πυκνότητα), από τα οποία προέκυψαν αντίστοιχα μοντέλα με αντίστοιχους βαθμούς εμπιστοσύνης. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα 2.

Με βάση, λοιπόν, τα διαγράμματα, αλλά και τα μοντέλα που προέκυψαν από τα δεδομένα της ανάλυσης ευαισθησίας (Παράρτημα 2), ως σημαντικές παράμετροι ορίστηκαν οι *speed acceptance* και *max acceleration*. Προκειμένου, λοιπόν, να εξεταστεί η επίδραση της συμπεριφοράς των οδηγών στη διεξαγωγή της εκκένωσης, λαμβάνοντας υπόψη ένα ικανοποιητικό ποσοστό της πληροφορίας, όπως αυτή προκύπτει από το σύνολο των παραμέτρων που ορίζουν την κυκλοφορία, αρκούν αυτές οι δύο παράμετροι. Μελετώντας την επίδραση αυτών των δύο παραμέτρων στα εξεταζόμενα αποτελέσματα, και σε συνάρτηση με τους αισθητήρες και τις κατηγορίες των οχημάτων που συμμετέχουν σε κάθε περίπτωση, μπορούν εύκολα να εξαχθούν συμπεράσματα, που να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα με μεγάλο βαθμό εμπιστοσύνης.

4.5.4 Σενάρια

Όπως αναφέρθηκε και στη μεθοδολογία, εφόσον προσδιοριστούν οι παράμετροι αυτές που εμπριέχουν το μεγαλύτερο μέρος της ζητούμενης πληροφορίας, το επόμενο βήμα είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των οδηγών για τα σενάρια που έχουν οριστεί. Σε αυτό το στάδιο, η συμπεριφορά των οδηγών διαμορφώνεται μέσω της μεταβολής των δύο σημαντικών παραμέτρων που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας. Η μεταβολή αυτή εφαρμόζεται για το ίδιο εύρος τιμών, αλλά μεγαλύτερο αριθμό επιπέδων ανάλυσης, ώστε να πυκνώσει το νέφος των τιμών που χρησιμοποιούνται ως στοιχεία εισόδου και συνεπώς να είναι πιο πλήρη και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν. Ο αριθμός των επιπέδων ανάλυσης που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν είναι 10. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.14), παρουσιάζονται αναλυτικά τα εύρη τιμών και οι μεμονωμένες τιμές για 10 επίπεδα ανάλυσης των δύο σημαντικών παραμέτρων.

	Range	Specific values
Speed acceptance	[0.9 1.3]	[0.9 0.944 0.989 1.033 1.078 1.122 1.167 1.211 1.256 1.3]
Maximum acceleration	[1.5 4.5] m/s ²	[1.5 1.83 2.167 2.5 2.83 3.167 3.5 3.83 4.167 4.5]

Πίνακας 4.14: Εύρη και τιμές των παραμέτρων που συμμετέχουν στα σενάρια.

Με βάση τις τιμές αυτές, ορίστηκαν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των τιμών των παραμέτρων (10²), κάθε ένας από τους οποίους εκφράζει μία προσομοίωση, και εκτελέστηκαν 10 επαναλήψεις για κάθε μία από αυτές. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε και για τα 2 σενάρια που έχουν οριστεί. Αυτή τη φορά, η διάρκεια της εκάστοτε προσομοίωσης δεν ορίστηκε στη μία ώρα, καθώς το ζητούμενο είναι να διαπιστωθεί ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για να εκκενωθεί πλήρως όλη η επικίνδυνη ζώνη και να απομακρυνθεί από αυτή το σύνολο των οχημάτων. Ορίστηκε, λοιπόν, στις 3 ώρες, διάστημα που θεωρήθηκε ικανό για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, μέσα από το οποίο θα μπορούσε να διαπιστωθεί σε ποια χρονική περίοδο εξήλθε και το τελευταίο

όχημα από την επικίνδυνη ζώνη. Ακόμη, η είσοδος των οχημάτων ορίστηκε να γίνει όλη κατά την πρώτη ώρα (100%), ακολουθώντας την κανονική κατανομή ακολουθώντας την εκθετική κατανομή.

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της περίπτωσης που εξετάζεται, είναι το γεγονός ότι οι περιγραφόμενες συνθήκες αφορούν κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου σε διαφορετικές ώρες της μέρας ή εποχές του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία εκκένωσης που πραγματοποιείται δεν αφορά κενό δίκτυο, το οποίο φορτίζεται με βάση τη ζήτηση που έχει οριστεί ανά σενάριο. Πρόκειται για πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, που σημαίνει ότι υπάρχει ήδη σημαντικός αριθμός οχημάτων στα διάφορα σημεία τους δικτύου που μετακινείται για διάφορους σκοπούς (εργασία, διασκέδαση κλπ.). Ο αριθμός αυτός εξαρτάται και πάλι από τις συνθήκες που εξετάζονται ως προς το συνολικό πληθυσμό που βρίσκεται στο νησί, τη σύνθεση τους με βάση τους μόνιμους κατοίκους και τους τουρίστες, καθώς και την ώρα της μέρας και την εποχή του χρόνου. Όλα αυτά λαμβάνονται υπόψη, και έτσι η διαδικασία της εκάστοτε προσομοίωσης περιλαμβάνει μία φάση «προθέρμανσης», όπου το δίκτυο φορτίζεται με βάση τη ζήτηση και την κατανομή της, όπως αυτές διαμορφώνονται συναρτήσει των χρονικών συνθηκών του σεναρίου, σε κανονική λειτουργία.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ

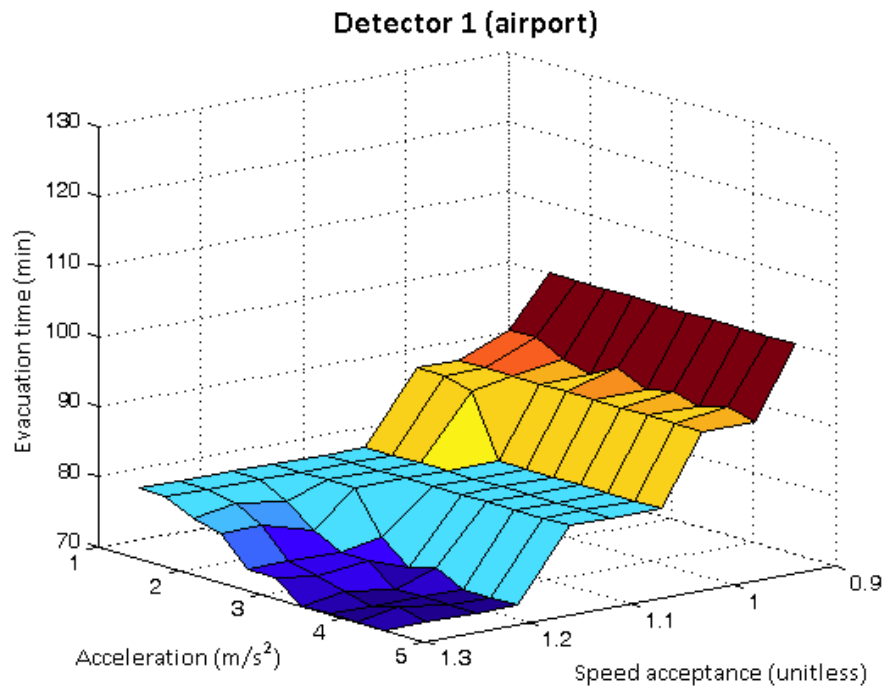
Για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα σενάρια, εκτελέστηκαν 1000 προσομοιώσεις, από τις οποίες συλλέχθηκαν τα στοιχεία που αφορούσαν τον αριθμό των οχημάτων που έχει εκκενώσει το δίκτυο στη 1 ώρα, στη 1μιση ώρα, στις 2 ώρες, αλλά και τη χρονική στιγμή που εξήλθε και το τελευταίο όχημα από το δίκτυο. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν ξεχωριστά για κάθε αισθητήρα κυκλοφορίας, ώστε να υπάρχει πιο σαφής εικόνας της λειτουργίας του δικτύου. Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε στον προσδιορισμό του χρόνου εκκένωσης ήταν της τάξης του δεκαλέπτου, καθώς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι μετρήσεις στους αισθητήρες πραγματοποιούνταν ανά 10 λεπτά. Αυτό σημαίνει ότι, για παράδειγμα, η μέτρηση χρόνου εκκένωσης 80 λεπτών ουσιαστικά αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα 71-80 λεπτά. Άρα, στην προκειμένη περίπτωση, το τελευταίο όχημα εξήλθε σε αυτό το χρονικό διάστημα.

Παράλληλα, οι μετρήσεις αυτές προέκυψαν ως μέσοι όροι των 10 επαναλήψεων κάθε προσομοίωσης, γεγονός που εξηγεί γιατί ορισμένες μετρήσεις δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια δεκάλεπτου. Στην περίπτωση που κάποια μέτρηση είναι ακέραιο πολλαπλάσιο δεκάλεπτου, αυτό σημαίνει ότι για την εν λόγω προσομοίωση (δηλαδή για το συγκεκριμένο συνδυασμό των τιμών των παραμέτρων), όλες οι επαναλήψεις είχαν το ίδιο αποτέλεσμα σε ότι αφορά το δεκάλεπτο εξόδου του τελευταίου οχήματος, για τον αισθητήρα που εξετάζεται. Στα παρακάτω τρισδιάστατα διαγράμματα παρουσιάζεται το χρονικό διάστημα με ακρίβεια 10λεπτου, στο οποίο εξήλθε και το τελευταίο όχημα από το δίκτυο ανά αισθητήρα και συνδυασμό των τιμών των παραμέτρων, για καθένα από τα εξεταζόμενα σενάρια (Σχήματα 5.1 και 5.2). Σε όλα τα τρισδιάστατα διαγράμματα, επιλέχθηκε ο άξονας των z να κυμαίνεται από 70-130 λεπτά, εύρος που καλύπτει όλες τις πιθανές περιπτώσεις που εξετάστηκαν, προκειμένου να μπορεί να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή η διαφοροποίηση μεταξύ των αισθητήρων και των σεναρίων.

Στην περίπτωση του πρώτου σεναρίου (best-case scenario, Σχήμα 5.1), ο πρώτος αισθητήρας σημειώνει εύρος χρόνου εκκένωσης 70-100 λεπτά, ενώ ο δεύτερος 70-74 λεπτά. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ στην περίπτωση του πρώτου αισθητήρα η αύξηση των τιμών των παραμέτρων (πιο επιθετική συμπεριφορά των οδηγών) επιφέρει σημαντική μείωση του χρόνου εκκένωσης, στην περίπτωση του δεύτερου αισθητήρα η μείωση αυτή είναι πολύ μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο πρώτος αισθητήρας (αεροδρόμιο) συγκεντρώνει πολύ μεγαλύτερο φόρτο και άρα παρουσιάζει μεγαλύτερη συμφόρηση. Έτσι, αυξάνοντας τις τιμές επιτάχυνσης και αποδοχής ορίου ταχύτητας (επιτρέποντας ανάπτυξη μεγαλύτερων ταχυτήτων), ο χρόνος εκκένωσης μειώνεται μέχρι και κατά μισή ώρα. Από την άλλη, ο δεύτερος αισθητήρας (Οία), καθώς συγκεντρώνει πολύ λιγότερο φόρτο (σχεδόν 70% χαμηλότερο), δεν απαιτεί πιο επιθετική προσέγγιση από τους οδηγούς προκειμένου να αδειάσει γρήγορα και έτσι, διατηρεί σχετικά σταθερό χρόνο εκκένωσης, ανεξάρτητα από τη συμπεριφορά των οδηγών.

Ακόμη, παρατηρείται ότι, όσο κι αν αυξηθεί η επιθετικότητα των οδηγών (εντός των ορίων των τιμών των παραμέτρων), ο χρόνος εκκένωσης δεν πέφτει κάτω από τα 70 λεπτά (61-70

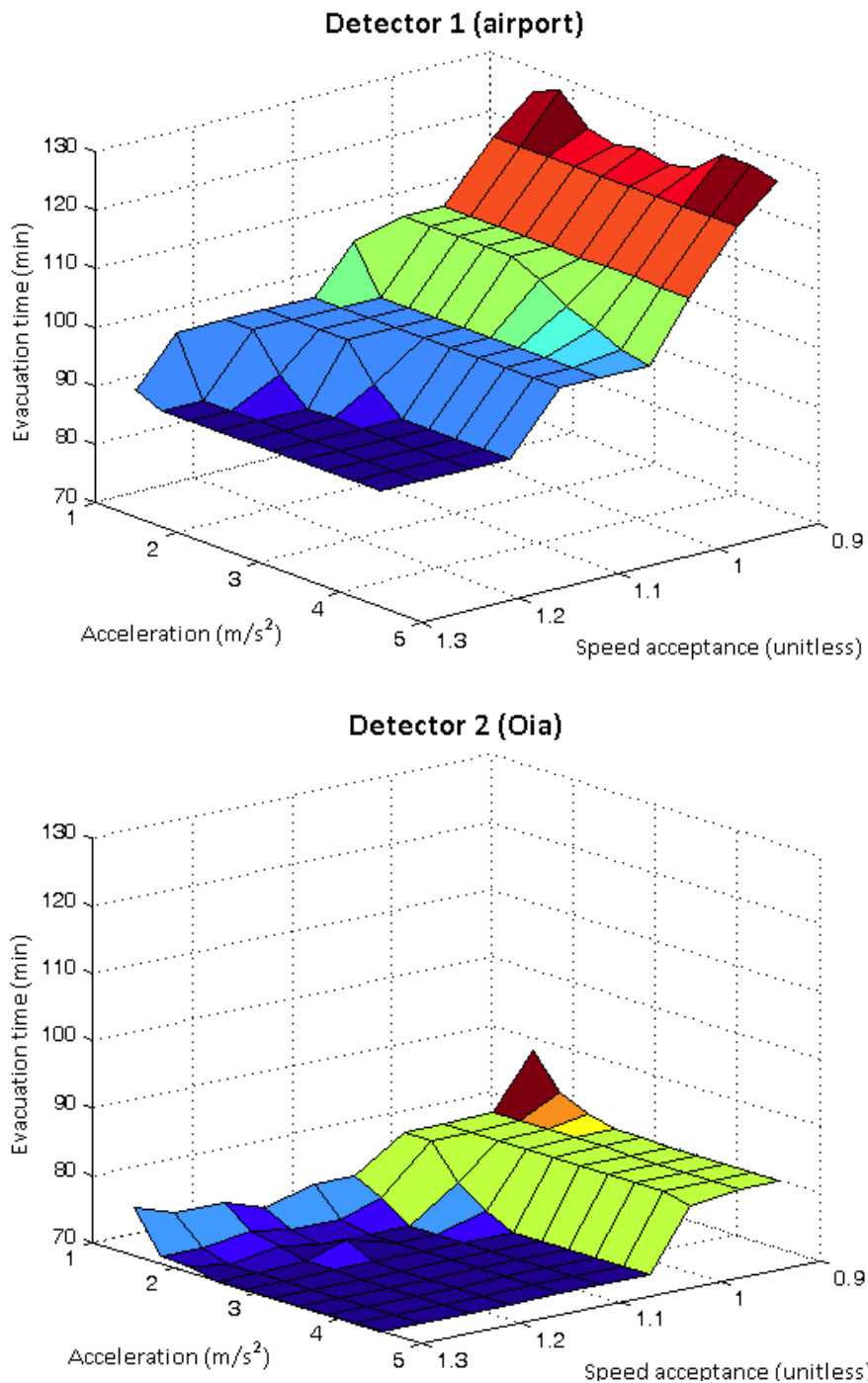
λεπτά), για κανένα από τους δύο αισθητήρες. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα μίας ώρας για την πλήρη εκκένωση όλου του οδικού δικτύου της επικίνδυνης ζώνης, σε περίπτωση που οι συνθήκες ζήτησης και φόρτου διαμορφώνονται με βάση τα χαρακτηριστικά αυτού του σεναρίου.



Σχήμα 5.1: Χρόνος εκκένωσης του πρώτου σεναρίου (best-case scenario) συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.

Στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario, Σχήμα 5.2), ο πρώτος αισθητήρας σημειώνει εύρος χρόνου εκκένωσης 90-130 λεπτά, ενώ ο δεύτερος 70-90

λεπτά. Παρατηρείται ότι, συγκριτικά με το πρώτο σενάριο, ο χρόνος εκκένωσης του πρώτου αισθητήρα (αεροδρόμιο), είναι σταθερά πιο υψηλός κατά 20-30 λεπτά λόγω υψηλού φόρτου (αύξηση κατά 50%), ενώ στο δεύτερο αισθητήρα που ο φόρτος διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και σε αυτό το σενάριο, η διαφορά αυτή κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα (0-15 λεπτά). Ακόμη, παρατηρείται ότι ο ελάχιστος χρόνος εκκένωσης είναι 90 λεπτά για τον πρώτο αισθητήρα και τα 70 λεπτά για τον δεύτερο. Άρα, με βάση τα χαρακτηριστικά αυτού του σεναρίου απαιτείται ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα μιάμισης ώρας για την πλήρη εκκένωση της επικίνδυνης ζώνης.



Σχήμα 5.2: Χρόνος εκκένωσης του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario) συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.

Σημειώνεται ότι τα εύρη των τιμών των παραμέτρων έχουν διαμορφωθεί ομοιόμορφα γύρω από τις προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων της οδηγικής συμπεριφοράς, μιας και σε περιπτώσεις εκκένωσης μπορεί να παρατηρηθούν και πιο επιθετικές προσεγγίσεις, αλλά και πιο αμυντικές. Αυτό σημαίνει ότι, εφόσον οι οδηγοί διατηρήσουν μία συμπεριφορά όπως αυτή που θα είχαν υπό «κανονικές» συνθήκες οδήγησης, ο χρόνος εκκένωσης που απαιτείται ανά αισθητήρα απεικονίζεται στη μέση του καθενός από τα παραπάνω διαγράμματα.

Παρατηρώντας το σύνολο των διαγραμμάτων και για τα δύο σενάρια, προκύπτει ότι η αύξηση της αποδοχής του ορίου ταχύτητας επιφέρει πολύ μεγαλύτερη μείωση του χρόνου εκκένωσης από ότι η αύξηση της μέγιστης επιτάχυνσης, ανεξάρτητα από το φόρτο ο οποίος εκκενώνεται. Αυτό προκύπτει και από το μοντέλο λειτουργίας του δικτύου, όπως αυτό διαμορφώθηκε από την ανάλυση ευαισθησίας, στο οποίο είναι εμφανής η διαφορά του βαθμού επίδρασης των δύο παραμέτρους σε όλα τα στοιχεία εξόδου (άρα και στο συνολικό χρόνο εκκένωσης).

5.2 ΜΕΤΡΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δεν έχουν όλοι οι άνθρωποι που βρίσκονται στο νησί τη δυνατότητα να εκκενώσουν την επικίνδυνη περιοχή, καθώς δεν έχουν πρόσβαση σε κάποιο όχημα ιδιωτικής χρήσης. Ακόμη, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την απλή εφαρμογή της εκκένωσης για κάθε σενάριο, διαπιστώνεται ότι σε μικρό χρονικό διάστημα από την έναρξη της εκκένωσης (πχ. 1 ώρα), έχει εκκενώσει την περιοχή μικρό ποσοστό του φόρτου, καθώς παρατηρείται έντονη συμφόρηση στους συνδέσμους που προσεγγίζουν τις ασφαλείς ζώνες. Για τους λόγους αυτούς, επιλέχθηκε η λήψη κάποιων βελτιωτικών μέτρων, ούτως ώστε να συμπεριληφθούν κατά το δυνατόν όλοι οι άνθρωποι στην εκκένωση και να επιτευχθεί η ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής πιο γρήγορα. Τα μέτρα αυτά αφορούν τη συμμετοχή των διατιθέμενων μέσων μαζικής μεταφοράς, καθώς και την αντιστροφή κάποιων συνδέσμων στους οποίους παρατηρείται έντονη συμφόρηση (contraflow). Με τα μέτρα αυτά, αφενός δίνεται η δυνατότητα σε ανθρώπους που δεν διαθέτουν κάποιο όχημα να εκκενώσουν την περιοχή, είτε πρόκειται για μόνιμους κατοίκους είτε για τουρίστες. Αφετέρου, αυξάνεται σημαντικά η χωρητικότητα των συνδέσμων που οδηγούν στις ασφαλείς ζώνες, γεγονός που επιτρέπει την ολοκλήρωση της διαδικασίας σε σημαντικά μειωμένο χρόνο, κάτι το οποίο μπορεί να αποβεί σωτήριο για τις ζωές πολλών ανθρώπων.

Τα μέτρα αυτά εφαρμόστηκαν το καθένα ξεχωριστά, αλλά και ταυτόχρονα για καθένα από τα σενάρια, αφού πρώτα συλλέχθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία και έγιναν οι απαραίτητες ενέργειες για την εφαρμογή τους. Στην περίπτωση της αξιοποίησης των μέσων μαζικής μεταφοράς, συλλέχθηκαν τα στοιχεία για τον αριθμό των διατιθέμενων οχημάτων, την κατανομή τους ανά οικισμό, καθώς και τα ποσοστά πληρότητας που μπορεί να παρουσιάζουν υπό συνθήκες εκκένωσης. Διαπιστώθηκε, λοιπόν, ότι τα διατιθέμενα μέσα μαζικής μεταφοράς του νησιού δεν παρουσιάζουν διακυμάνσεις ως προς τον αριθμό και την κατανομή τους στο δίκτυο ανάλογα με τις συνθήκες επισκεψιμότητας του νησιού.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Στατιστικής Υπηρεσίας, ο αριθμός των λεωφορείων για το σύνολο των Κυκλάδων διαμορφώνεται στο 1% του αριθμού των αντίστοιχων οχημάτων ιδιωτικής χρήσης. Είναι προφανές ότι, μιας και η Σαντορίνη συγκεντρώνει αρκετά υψηλότερο τουρισμό από τα υπόλοιπα νησιά και ο μόνιμος πληθυσμός της είναι αρκετά μεγαλύτερος από το μέσο όρο των υπολοίπων, το ποσοστό των λεωφορείων στο συγκεκριμένο νησί θα είναι υψηλότερος από το 1%. Στην παρούσα μελέτη, το ποσοστό αυτό εκτιμήθηκε στο 2%. Ωστόσο, αυτό που μεταβάλλεται σημαντικά σχετικά με αυτή την κατηγορία οχημάτων είναι το ποσοστό πληρότητας που παρουσιάζουν σε συνθήκες αιχμής συγκριτικά με περιόδους χαμηλής κινητικότητας. Έτσι, εκτιμάται ότι τα οχήματα αυτά παρουσιάζουν υπό συνθήκες εκκένωσης πληρότητα 50% σε συνθήκες χαμηλής κινητικότητας, 80% σε συνθήκες αιχμής με μέσο όρο θέσεων 50 ατόμων, ενώ ο αριθμός και η κατανομή τους παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5.1).

Κεντροειδές	Μέσα μαζικής μεταφοράς
Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	10
Θήρα	15
Ακρωτήρι	4
Εμπορείο	10
Επισκοπή/Εξω Γωνιά	4
Καρτεράδος	8
Μεσαριά/Βόθωνας	10
Πύργος Καλλίστης	6
Λιμάνι	7

Πίνακας 5.1: Αριθμός διατιθέμενων μέσων μαζικής μεταφοράς ανά κεντροειδές προέλευσης.

Με βάση τα στοιχεία αυτά, διαμορφώνεται η ζήτηση με την οποία φορτίζεται το δίκτυο, εφόσον ληφθεί αυτό το μέτρο, για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα σενάρια (Πίνακες 5.2 και 5.3).

Σενάριο 1-1 (best-case scenario/bus)		
Κεντροειδές	Αυτοκίνητα	Λεωφορεία
Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	273	10
Θήρα	470	15
Ακρωτήρι	129	4
Εμπορείο	517	10
Επισκοπή/Εξω Γωνιά	115	4
Καρτεράδος	330	8
Μεσαριά/Βόθωνας	611	10
Πύργος Καλλίστης	243	6
Λιμάνι	133	7

Πίνακας 5.2 : Φόρτος του πρώτου σεναρίου ανά κεντροειδές προέλευσης με αξιοποίηση λεωφορείων.

Σενάριο 2-1 (worst-case scenario/bus)		
Κεντροειδές	Αυτοκίνητα	Λεωφορεία
Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	591	10
Θήρα	1057	15
Ακρωτήρι	204	4
Εμπορείο	559	10
Επισκοπή/Εξω Γωνιά	142	4
Καρτεράδος	515	8
Μεσαριά/Βόθωνας	613	10
Πύργος Καλλίστης	257	6
Λιμάνι	387	7

Πίνακας 5.3 : Φόρτος του δεύτερου σεναρίου ανά κεντροειδές προέλευσης με αξιοποίηση λεωφορείων.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, εφόσον αξιοποιούνται τα λεωφορεία, προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες προέλευσης-προορισμού για κάθε σενάριο (Πίνακες 5.4 και 5.5).

Σενάριο 1-1 (best-case scenario/bus)			
Αυτοκίνητα	Safe zone	Αεροδρόμιο	Οία
	Κεντροειδές		
	Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	0	273
	Θήρα	70	400
	Ακρωτήρι	129	0
	Εμπορείο	517	0
	Επισκοπή/Εξω Γωνιά	115	0
	Καρτεράδος	330	0
	Μεσαριά/Βόθωνας	611	0
	Πύργος Καλλίστης	243	0
Λιμάνι	133	0	
Λεωφορεία	Safe zone	Αεροδρόμιο	Οία
	Κεντροειδές		
	Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	0	10
	Θήρα	5	10
	Ακρωτήρι	4	0
	Εμπορείο	10	0
	Επισκοπή/Εξω Γωνιά	4	0
	Καρτεράδος	8	0
	Μεσαριά/Βόθωνας	10	0
	Πύργος Καλλίστης	6	0
Λιμάνι	7	0	

Πίνακας 5.4: Πίνακας προέλευσης προορισμού του πρώτου σεναρίου με αξιοποίηση λεωφορείων.

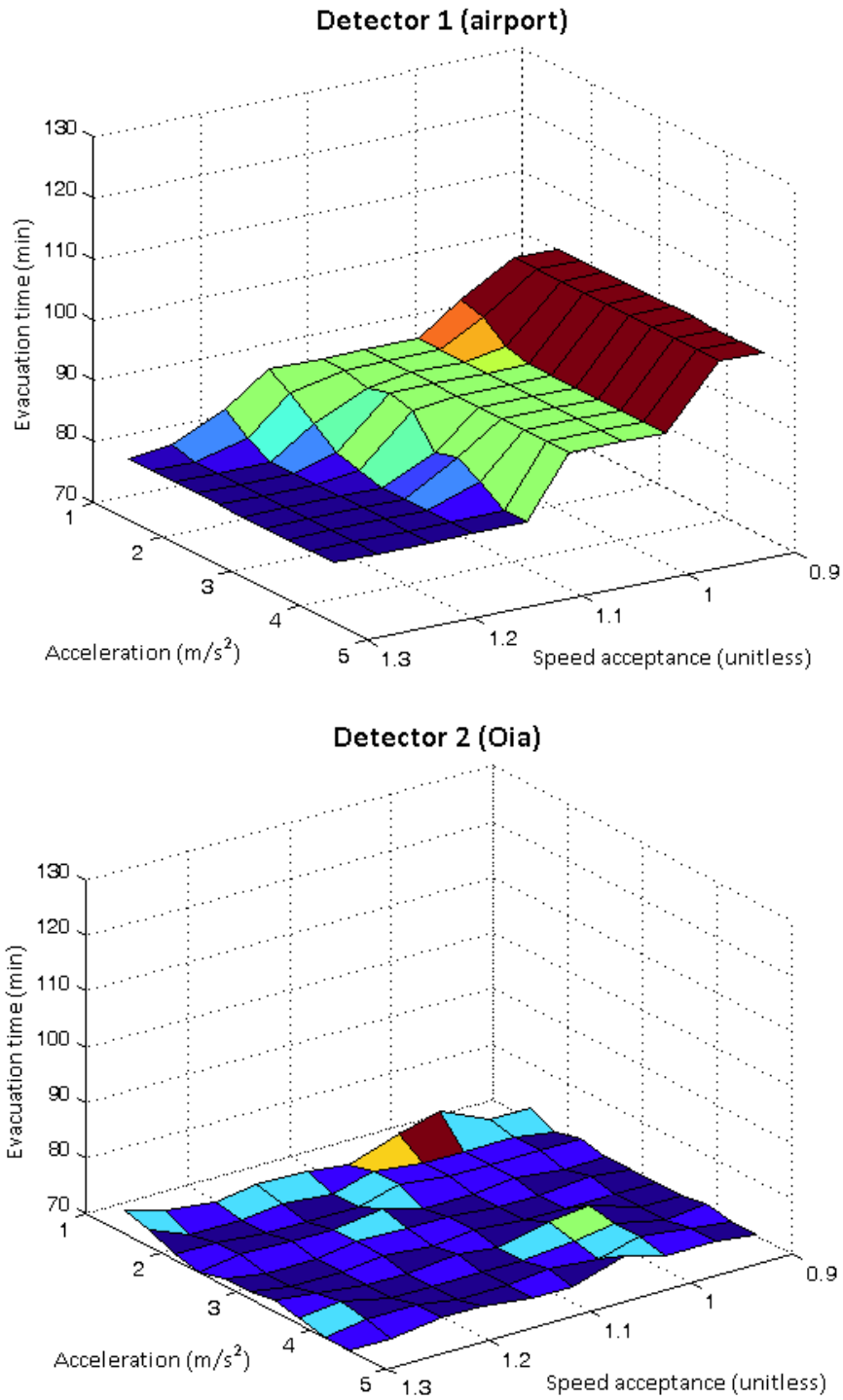
Σενάριο 2-1 (worst-case scenario/bus)			
Αυτοκίνητα	Safe zone Κεντροειδές	Αεροδρόμιο	Οία
	Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	0	591
	Θήρα	157	900
	Ακρωτήρι	204	0
	Εμπορείο	559	0
	Επισκοπή/Εξω Γωνιά	142	0
	Καρτεράδος	515	0
	Μεσαριά/Βόθωνας	613	0
	Πύργος Καλλίστης	257	0
	Λιμάνι	387	0
Λεωφορεία	Safe zone Κεντροειδές	Αεροδρόμιο	Οία
	Ημεροβίγλι/Βουρβούλος	0	10
	Θήρα	5	10
	Ακρωτήρι	4	0
	Εμπορείο	10	0
	Επισκοπή/Εξω Γωνιά	4	0
	Καρτεράδος	8	0
	Μεσαριά/Βόθωνας	10	0
	Πύργος Καλλίστης	6	0
	Λιμάνι	7	0

Πίνακας 5.5: Πίνακας προέλευσης προορισμού του δεύτερου σεναρίου με αξιοποίηση λεωφορείων.

Παρατηρείται ότι η αξιοποίηση των διατιθέμενων μέσω μαζικής μεταφοράς, επιφέρει μία μικρή αύξηση του φόρτου που πρόκειται να εκκενωθεί, η οποία όμως επιτρέπει τη συμμετοχή στην εκκένωση του μεγαλύτερου μέρους του πληθυσμού που δεν διαθέτει κάποιο όχημα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή αυτού του μέτρου παρουσιάζονται παρακάτω. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία συλλογής δεδομένων για το φόρτο και τους χρόνους εκκένωσης κάθε σεναρίου και έτσι προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα ανά αισθητήρα (Σχήματα 5.3 και 5.4).

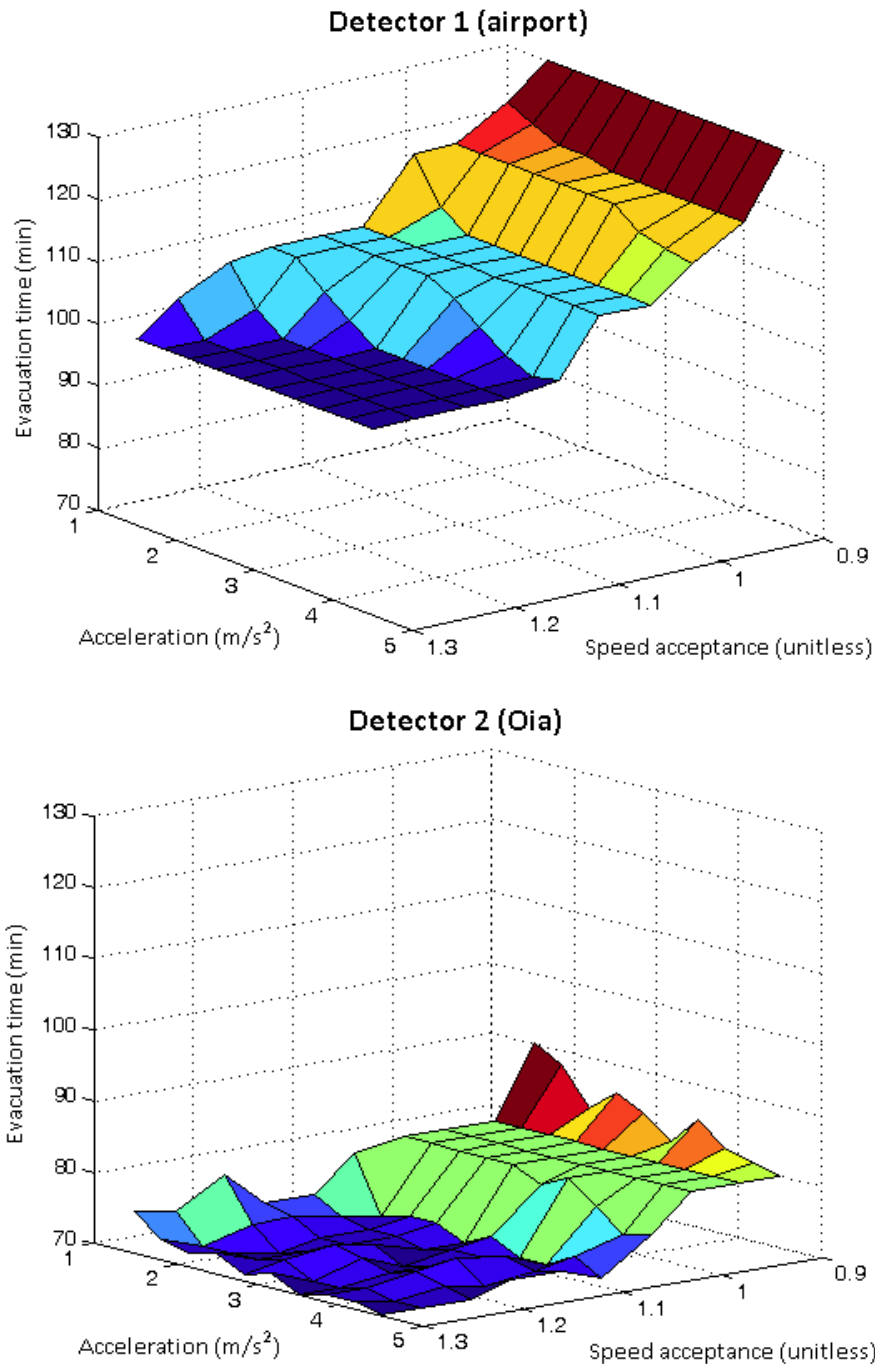
Σε ότι αφορά τον πρώτο αισθητήρα, παρατηρείται ότι η αξιοποίηση των λεωφορείων δεν αυξάνει το μέγιστο χρόνο εκκένωσης που σημειώνεται υπό συνθήκες χαμηλού φόρτου (best-case scenario), αυξάνει όμως τον ελάχιστο. Αυτό δεν οφείλεται τόσο στη μηδαμινή αύξηση του φόρτου που σημειώνεται με την προσθήκη των λεωφορείων στο δίκτυο, όσο στο γεγονός ότι αυτή η κατηγορία οχημάτων ακολουθεί πιο χαμηλά επίπεδα ταχύτητας και επιτάχυνσης και υψηλότερα επίπεδα χρόνου αντίδρασης. Έτσι, ακόμα και υπό συνθήκες ελεύθερης ροής που διαμορφώνονται σε αυτό το σενάριο για επιθετική συμπεριφορά

οδηγών, ο ελάχιστος χρόνος εκκένωσης είναι ελαφρώς υψηλότερος από το αντίστοιχο σενάριο χωρίς την αξιοποίηση των λεωφορείων. Το ίδιο ισχύει και για το δεύτερο αισθητήρα, όπου οι συνθήκες ελεύθερης ροής επιτυγχάνονται ακόμα και με αμυντική συμπεριφορά των οδηγών, λόγω πολύ χαμηλού φόρτου. Η ελάχιστη διακύμανση που παρατηρείται οφείλεται στην στοχαστικότητα της προσέλευσης των οχημάτων και της προσομοίωσης εν γένει.



Σχήμα 5.3: Χρόνος εκκένωσης του πρώτου σεναρίου (best-case scenario) με αξιοποίηση λεωφορείων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.

Και στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario), η αξιοποίηση των λεωφορείων προκαλεί αντίστοιχη συμπεριφορά του δικτύου, όπως και στο πρώτο σενάριο. Παρατηρείται και πάλι αύξηση του ελάχιστου χρόνου εκκένωσης για τον πρώτο αισθητήρα, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενώ ο δεύτερος αισθητήρας παρουσιάζει μηδαμινή μεταβολή, μιας και η αξιοποίηση των λεωφορείων επιφέρει ελάχιστη διαφοροποίηση στη διαμόρφωση του φόρτου στον εν λόγω αισθητήρα.



Σχήμα 5.4: Χρόνος εκκένωσης του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario) με αξιοποίηση λεωφορείων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.

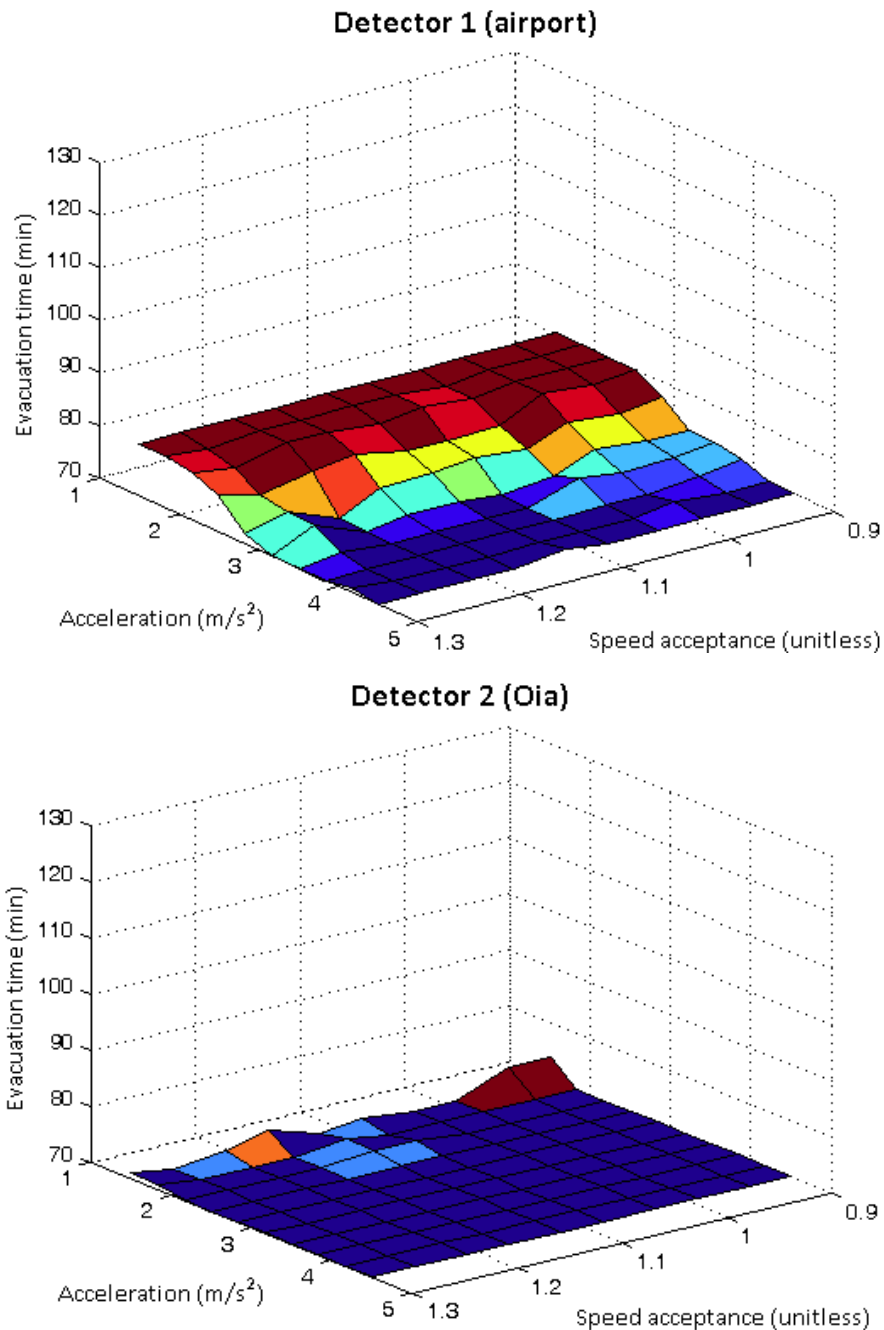
Γενικά, παρατηρείται ότι η αξιοποίηση των μέσων μεταφοράς όχι μόνο δεν μειώνει το συνολικό χρόνο εκκένωσης για κανένα από τα εξεταζόμενα σενάρια, αφού δεν αντικαθιστά τη χρήση των αντίστοιχων οχημάτων ιδιωτικής χρήσης, αλλά και αυξάνει κατά ένα μικρό ποσοστό τον ελάχιστο απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης. Ωστόσο, αποτελεί σημαντική βελτίωση της διαδικασίας της εκκένωσης, μιας και μειώνει δραστικά τον αριθμό των ανθρώπων που δεν έχουν πρόσβαση σε κάποιο όχημα, προκειμένου να εκκενώσουν την επικίνδυνη ζώνη. Έτσι, ενώ χωρίς καμία παρέμβαση, ο αριθμός των ανθρώπων που βρίσκονται σε άμεσο κίνδυνο ανέρχεται στους 2150 και στους 5000 για το πρώτο και το δεύτερο σενάριο αντίστοιχα, με την εφαρμογή αυτού του μέτρου οι αριθμοί αυτοί διαμορφώνονται σε 300 και 2000 ανθρώπους, αντίστοιχα.

Στην περίπτωση του δεύτερου βελτιωτικού μέτρου, προτείνεται η αντιστροφή ορισμένων συνδέσμων του οδικού δικτύου (contraflow), στους οποίους σημειώνεται έντονη συμφόρηση, ούτως ώστε να διπλασιαστεί η χωρητικότητα των εν λόγω συνδέσμων, να μειωθεί η συμφόρηση και να επιταχυνθεί η διαδικασία της εκκένωσης. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με αξιοποίηση του αντίθετου ρεύματος κυκλοφορίας, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες επιτρέπει την απομάκρυνση από ένα σημείο. Αντιστρέφοντας το σύνδεσμο αυτό, απαγορεύεται η απομάκρυνση από το σημείο αυτό και ενισχύεται η προσέγγιση του, αφού πρακτικά έχουν «δημιουργηθεί» δύο σύνδεσμοι για αυτό το σκοπό.

Το μέτρο αυτό, αν και αποτελεί άμεση και ισχυρή παρέμβαση για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να εξεταστούν και να ληφθούν υπόψη για τον τρόπο εφαρμογής αυτού του μέτρου. Ο βασικότερος περιορισμός που παρουσιάζει η αντιστροφή ενός συνδέσμου αφορά την αδυναμία προσέγγιση του υπόλοιπου δικτύου από το εν λόγω σημείο ή κεντροειδές (ανάλογα με το σημείο έναρξης του συνδέσμου), μέσω αυτού του συνδέσμου. Για παράδειγμα, εφόσον αντιστραφεί ένας σύνδεσμος ο οποίος οδηγεί από το αεροδρόμιο σε κάποιο κοντινό οικισμό, αυτόματα καθίσταται αδύνατη η απομάκρυνση κάποιου οχήματος από το αεροδρόμιο μέσω αυτού του συνδέσμου. Κάτι τέτοιο, μπορεί να είναι μικρής σημασίας για τα οχήματα που εκκελώνουν την περιοχή, τα οποία θέλουν να απομακρυνθούν από την επικίνδυνη ζώνη όσο το δυνατόν γρηγορότερα, ωστόσο, είναι καταλυτικής σημασίας για τις αρμόδιες αρχές και τα οχήματα έκτακτης ανάγκης, τα οποία πρέπει να είναι σε θέση να εισέλθουν στην επικίνδυνη ζώνη, προκειμένου να οργανώσουν τη διαδικασία της εκκένωσης και να αντιμετωπίσουν πιθανά έκτακτα συμβάντα. Έτσι, πρωταρχική ενέργεια πριν την εφαρμογή αυτού του μέτρου για έναν ή περισσότερους συνδέσμους, είναι η εξασφάλιση εναλλακτικής διαδρομής για τα οχήματα που κρίνεται απαραίτητο να εισέλθουν στην επικίνδυνη ζώνη. Εφόσον διασφαλιστεί αυτό, η εφαρμογή αυτού του μέτρου είναι σε θέση να βελτιώσει σημαντικά τη διαδικασία της εκκένωσης, τόσο σε ότι αφορά το χρόνο διεξαγωγής της, όσο και στην ασφάλεια που παρέχεται στον υπό εκκένωση πληθυσμό.

Έτσι, προκειμένου να εφαρμοστεί το μέτρο αυτό στα εξεταζόμενα σενάρια της παρούσας μελέτης, ελέγχθηκε διεξοδικά το οδικό δίκτυο, σημειώθηκαν οι σύνδεσμοι που παρουσίαζαν τη μεγαλύτερη συμφόρηση, και αφού ορίστηκαν οι πιθανές εναλλακτικές διαδρομές, αντιστάθηκε η κυκλοφορία τους. Οι σύνδεσμοι αυτοί βρίσκονταν στο οδικό τμήμα που οδηγούσε στην περιοχή του αεροδρομίου και το οποίο παρουσίαζε τη μεγαλύτερη συμφόρηση σε όλο το οδικό δίκτυο. Στην περίπτωση του εργοστασίου

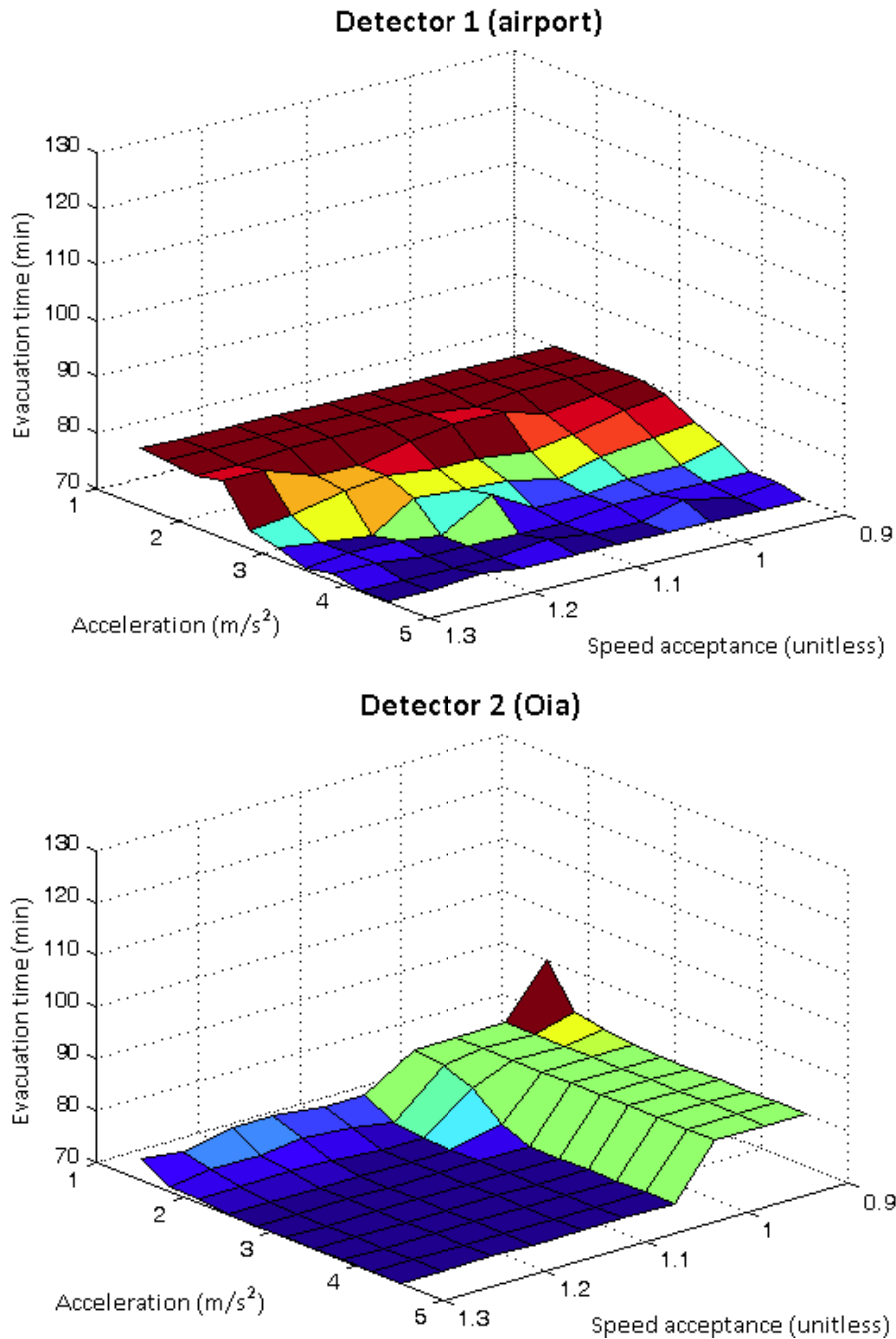
αφαλάτωσης δεν αντιστράφηκε κανένας σύνδεσμος, αφού, ακόμα και στο σενάριο υψηλού φόρτου (worst-case scenario), η κυκλοφορία πραγματοποιούνταν σχεδόν απρόσκοπτα, λόγω μεγάλης κυκλοφοριακής ικανότητας του δικτύου σε σχέση με την αντίστοιχη ζήτηση. Τα αποτελέσματα αυτής της ενέργειας σε ότι αφορά το συνολικό χρόνο εκκένωσης ανά περίπτωση παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήματα 5.5 και 5.6).



Σχήμα 5.5: Χρόνος εκκένωσης του πρώτου σεναρίου (best-case scenario) με αντιστροφή συνδέσμων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.

Στην περίπτωση του πρώτου σεναρίου και του πρώτου αισθητήρα (αεροδρόμιο), παρατηρείται ότι η αντιστροφή των συνδέσμων, επέφερε σημαντική μείωση του χρόνου εκκένωσης (της τάξης του 20%), εφόσον η συμπεριφορά των οδηγών ακολουθεί μια πιο αμυντική προσέγγιση (κατώτατα όρια παραμέτρων). Από την άλλη, σε περίπτωση που οι

οδηγοί είναι πιο επιθετικοί, η αντιστροφή των συνδέσμων δεν επιφέρει αλλαγή στον ελάχιστο χρόνο εκκένωσης που απαιτείται. Αυτό συμβαίνει διότι η χωρητικότητα και το μέγεθος του οδικού δικτύου είναι τέτοια, που ανεξάρτητα από την οδηγική συμπεριφορά, απαιτείται ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα 70 λεπτών για την ολοκλήρωση της εκκένωσης. Στην περίπτωση του δεύτερου αισθητήρα, η μεταβολή του χρόνου εκκένωσης είναι αμελητέα σε σχέση με το αρχικό σενάριο, μιας και δεν αντιστράφηκε κανένας σύνδεσμος στο τμήμα που ανήκει ο αισθητήρας, ούτως ώστε να μεταβληθούν τα δεδομένα. Αυτή η ελάχιστη διακύμανση που παρουσιάζεται οφείλεται καθαρά σε λόγους στοχαστικότητας των προσομοιώσεων.



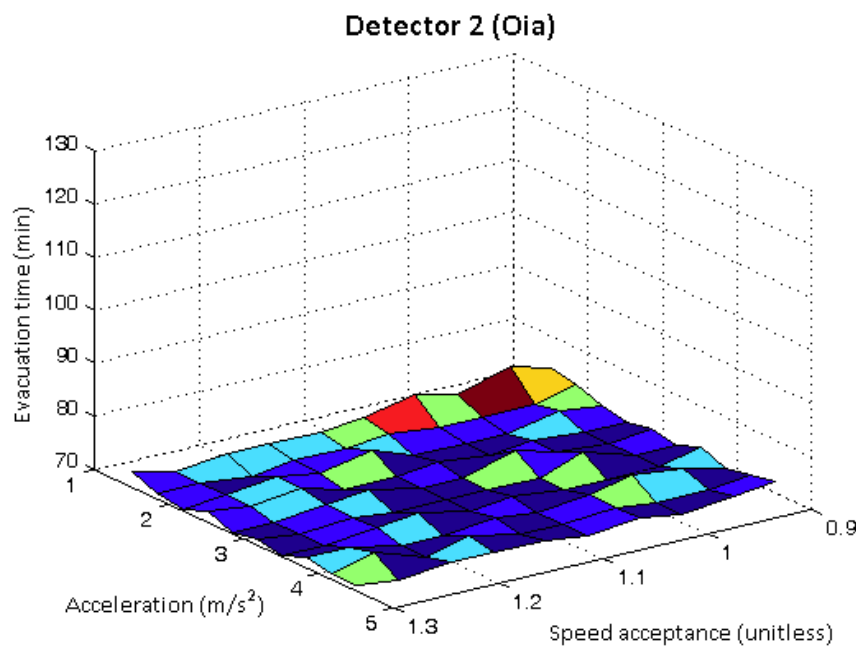
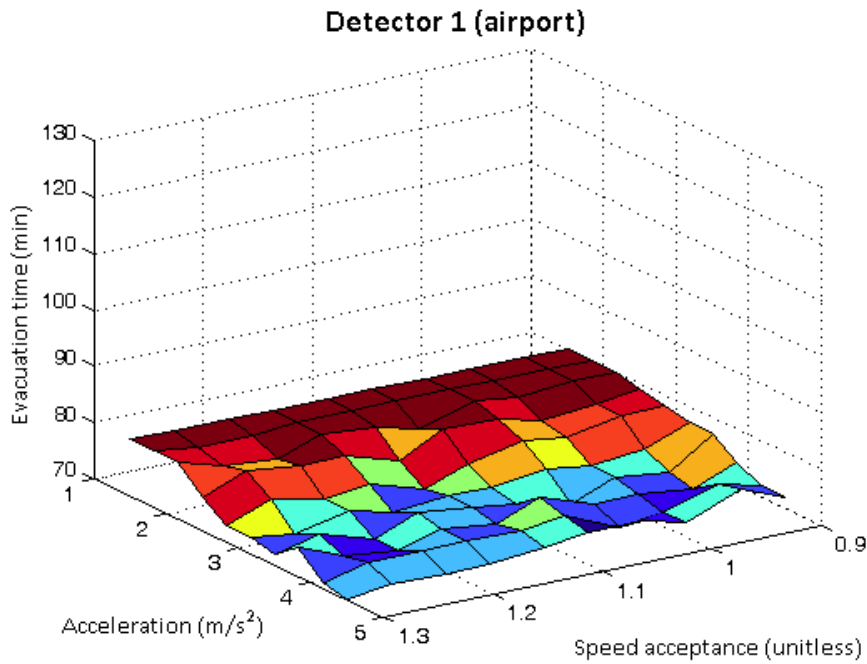
Σχήμα 5.6: Χρόνος εκκένωσης του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario) με αντιστροφή συνδέσμων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.

Όπως στην περίπτωση της αντιστροφής συνδέσμων στο πρώτο σενάριο, έτσι και εδώ (worst-case scenario), η μείωση του χρόνου εκκένωσης είναι σημαντική (της τάξης του 38%) για αμυντική οδήγηση, ενώ ο χρόνος αυτός προσεγγίζει την ίδια κατώτατη τιμή (70 λεπτά) με τα υπόλοιπα σενάρια για πιο επιθετική οδήγηση. Είναι αξιοσημείωτο ότι με την αντιστροφή των επιλεγμένων συνδέσμων, ο χρόνος εκκένωσης του οδικού δικτύου υπό συνθήκες υψηλού φόρτου είναι σχεδόν ίδιος με τον χρόνο εκκένωσης υπό συνθήκες χαμηλού φόρτου, για την αντίστοιχη προσέγγιση οδηγικής συμπεριφοράς. Αυτό συμβαίνει διότι, στην περίπτωση του χαμηλού φόρτου (best-case scenario), η ζήτηση και η προσέλευση των οχημάτων είναι τέτοια που δεν αξιοποιείται πλήρως η χωρητικότητα του δικτύου και η μείωση του χρόνου είναι μεν αισθητή, αλλά όχι ιδιαίτερα υψηλή. Από την άλλη, στην περίπτωση του υψηλού φόρτου (worst-case scenario), η ζήτηση και η προσέλευση των οχημάτων είναι πολύ πιο υψηλή, με αποτέλεσμα να αξιοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό η χωρητικότητα του δικτύου, και συνεπώς να μειώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό ο χρόνος εκκένωσης, τόσο που να φτάνει τα επίπεδα του αντίστοιχου χρόνου εκκένωσης υπό συνθήκες χαμηλού φόρτου. Στην περίπτωση του δεύτερου αισθητήρα (Οία), η διαφοροποίηση είναι και πάλι αμελητέα, καθώς δεν έχει αντιστραφεί κανένας σύνδεσμος από το οδικό τμήμα στο οποίο ανήκει.

Εν γένει, η αντιστροφή ορισμένων συνδέσμων του οδικού τμήματος που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συμφόρηση, επιφέρει σημαντική μείωση του χρόνου εκκένωσης και για τα δύο σενάρια, σε σημείο να διαμορφώνεται σχεδόν ανεξάρτητα από τον εξεταζόμενο φόρτο.

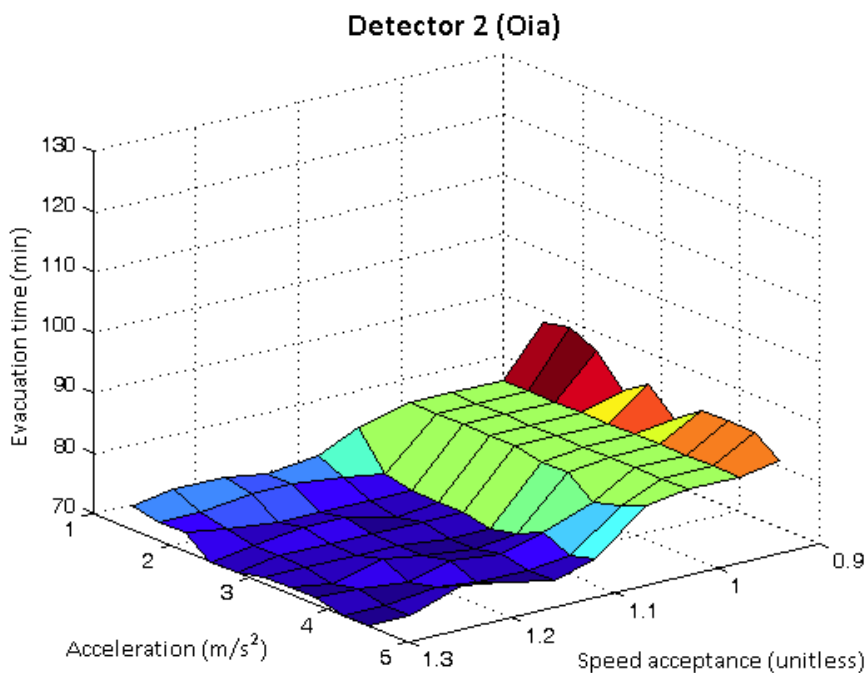
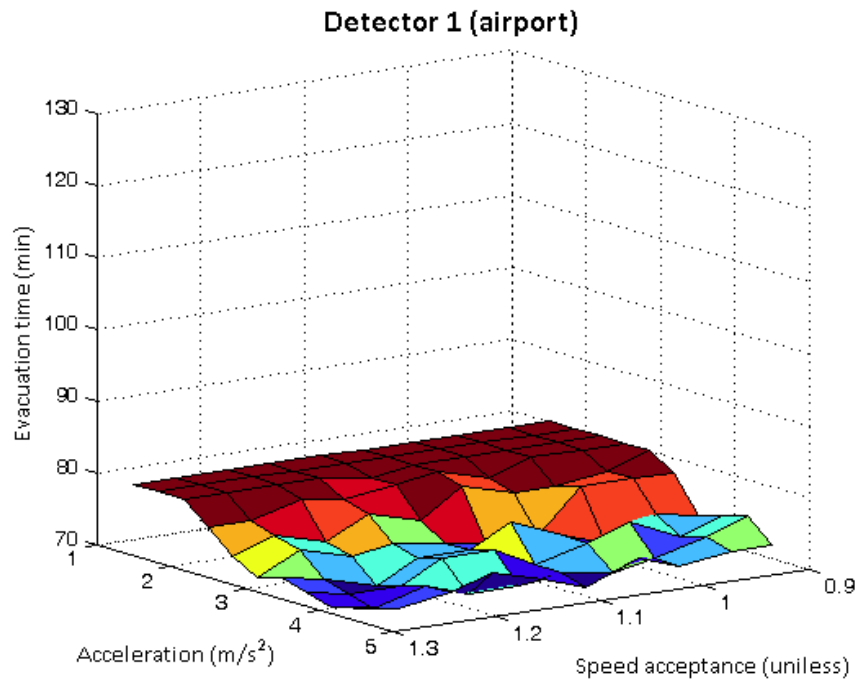
Προκειμένου να εφαρμοστούν ταυτόχρονα τα δύο παραπάνω μέτρα βελτίωσης της διαδικασίας της εκκένωσης, συνδυάστηκαν τα στοιχεία που αφορούσαν τόσο τα στοιχεία εισόδου, όσο και τις απαραίτητες ενέργειες για την εφαρμογή του καθενός. Έτσι, αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία που αφορούσαν τα διαθέσιμα μέσα μαζικής μεταφοράς και το φόρτο, όπως αυτός διαμορφώνεται από την εφαρμογή του πρώτου μέτρου, αλλά και πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες ενέργειες για την αντιστροφή ορισμένων συνδέσμων, όπως αυτοί επιλέχθηκαν στο δεύτερο μέτρο (πχ. προσδιορισμός εναλλακτικών διαδρομών). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ταυτόχρονη εφαρμογή των δύο μέτρων σε καθένα από τα σενάρια παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήματα 5.7 και 5.8).

Στην περίπτωση του πρώτου σεναρίου (best-case scenario), ο συνδυασμός λεωφορείων και αντιστροφής συνδέσμων επιφέρει σημαντική μείωση του συνολικού χρόνου εκκένωσης, αντίστοιχη αυτής που προκύπτει από την αντιστροφή των συνδέσμων και μόνο. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του πρώτου αισθητήρα, ο συνολικός χρόνος εκκένωσης διαμορφώνεται μεταξύ 70-80 λεπτών, όπως και στην εφαρμογή του δεύτερου βελτιωτικού μέτρου (αντιστροφή συνδέσμων), με πολύ μικρές διακυμάνσεις που οφείλονται στην εισαγωγή των λεωφορείων στο δίκτυο. Από την άλλη, στο δεύτερο αισθητήρα, ο χρόνος εκκένωσης διαμορφώνεται όπως και στην περίπτωση του πρώτου βελτιωτικού μέτρου (αξιοποίηση λεωφορείων), μιας και η αντιστροφή των συνδέσμων δεν έχει εφαρμοστεί σε κοντινό τμήμα του οδικού δικτύου.



Σχήμα 5.7: Χρόνος εκκένωσης του πρώτου σεναρίου (best-case scenario) με αξιοποίηση λεωφορείων και αντιστροφή συνδέσμων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.

Και στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario), ο συνδυασμός των δύο βελτιωτικών μέτρων επιφέρει αντίστοιχα αποτελέσματα στη διαμόρφωση του χρόνου εκκένωσης, όπως και στο πρώτο σενάριο. Ο χρόνος αυτός διαμορφώνεται και στους δύο αισθητήρες όπως και στην απλή εφαρμογή της αντιστροφής συνδέσμων, με μικρές διακυμάνσεις λόγω αξιοποίηση των λεωφορείων.



Σχήμα 5.8: Χρόνος εκκένωσης του δεύτερου σεναρίου (worst-case scenario) με αξιοποίηση λεωφορείων και αντιστροφή συνδέσμων συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων, ανά αισθητήρα.

Συνολικά, σε ότι αφορά το συνδυασμό των δύο βελτιωτικών μέτρων, ο χρόνος εκκένωσης κυμαίνεται στα ίδια εύρη που ισχύουν για την απλή αντιστροφή συνδέσμων και για τα δύο σεναρία. Παρατηρείται πολύ μικρή διακύμανση συναρτήσει της συμπεριφορά των οδηγών που οφείλεται στην εισαγωγή των λεωφορείων στο δίκτυο και η οποία δεν επηρεάζει τα ανώτατα και κατώτατα όρια του χρόνου εκκένωσης. Έτσι, ο μέγιστος χρόνος που απαιτείται για την πλήρη εκκένωση του δικτύου είναι 90 λεπτά, και αυτό λόγω του δεύτερου συνδέσμου, στον οποίο πρακτικά έχει εφαρμοστεί μόνο η αξιοποίηση των λεωφορείων.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξετάζοντας όλα τα παραπάνω σενάρια όπως διαμορφώνονταν συναρτήσει του φόρτου και της εφαρμογής ή όχι κάποιου βελτιωτικού μέτρου, προέκυψαν τα πιθανά εύρη του χρόνου εκκένωσης που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ανά περίπτωση. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.1), παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα εύρη του χρόνου εκκένωσης, με βάση τη συμπεριφορά των οδηγών, ανά αισθητήρα, για καθένα από τα εξεταζόμενα σενάρια.

Reaction time (min)	Best-case scenario		Worst-case scenario	
	Airport	Oia	Airport	Oia
Base	70-100	70-75	90-130	70-90
Bus	80-100	70-75	100-130	70-90
Contraflow	70-80	70-75	70-80	70-90
Contraflow/Bus	70-80	70-75	70-80	70-90

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα εύρη του χρόνου εκκένωσης, ανά αισθητήρα και εξεταζόμενο σενάριο.

Ένας ακόμα πίνακας που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ο παρακάτω (Πίνακας 6.2), στον οποίο παρουσιάζεται ο αριθμός των ανθρώπων που εκκενώνονται μέσα σε μία ώρα, αλλά και συνολικά, για κάθε σενάριο και εφαρμοζόμενο μέτρο.

Evacuated people	Best-case scenario				Worst-case scenario			
	Airport		Oia		Airport		Oia	
	1 hour	total	1 hour	total	1 hour	total	1 hour	total
Base	4785	6540	1780	2055	4890	8490	3565	4470
Bus	5125	7800	2135	2525	5580	10665	3940	5275
Contraflow	6090	6540	1810	2055	7740	8490	3610	4470
Contraflow/Bus	7125	7800	2150	2525	9540	10665	4050	5275

Πίνακας 6.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον αριθμό των ανθρώπων που εκκενώνονται, ανά αισθητήρα και εξεταζόμενο σενάριο.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει ότι η μείωση του χρόνου εκκένωσης μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω της αντιστροφής των συνδέσμων που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συμφόρηση. Στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται αυτό (αισθητήρας αεροδρομίου), η μείωση μπορεί να είναι μέχρι και της τάξης του 40% για συνθήκες υψηλού φόρτου. Έτσι, ο χρόνος εκκένωσης αγγίζει τα επίπεδα του χαμηλού φόρτου και τα αποτελέσματα διαμορφώνονται ανεξάρτητα από τον εξεταζόμενο φόρτο, με βάση τα στοιχεία που έχουν συλλεχθεί, μιας και η κυκλοφοριακή ικανότητα του δικτύου είναι μεγαλύτερη από τον φόρτο που εισάγεται σε οποιαδήποτε περίπτωση κι αν εξετάζεται.

Ακόμη, σημειώνεται ότι η αξιοποίηση των λεωφορείων επιφέρει μικρή αύξηση του χρόνου εκκένωσης, είτε εφαρμόζεται ως μοναδικό βελτιωτικό μέτρο στα αρχικά σενάρια, είτε συμπληρωματικά με την αντιστροφή συνδέσμων. Αυτό οφείλεται καθαρά στην αύξηση του φόρτου που πρόκειται να εκκενωθεί, καθώς και στην αδυναμία των εν λόγω οχημάτων να αναπτύξουν μεγάλες ταχύτητες. Ωστόσο, αυτό δεν θα πρέπει να αποτελεί ανασταλτικό

παράγοντα για την εφαρμογή αυτού του μέτρου, μιας και με τον τρόπο αυτό είναι σε θέση να εκκενώσουν την επικίνδυνη ζώνη πολλοί περισσότεροι άνθρωποι. Παρατηρείται ότι, στην περίπτωση του πρώτου σεναρίου (best-case scenario), εφόσον δεν εφαρμόζεται η αντιστροφή συνδέσμων, η αξιοποίηση των λεωφορείων επιτρέπει την εκκένωση περίπου 10% περισσότερων ανθρώπων σε σχέση με την απλή εκκένωση του δικτύου, στη διάρκεια μιας ώρας, ενώ για το σύνολο της διαδικασίας, το ποσοστό αυτό αγγίζει το 20%. Αντίστοιχα, στο δεύτερο σενάριο (worst-case scenario), η αύξηση αυτή του πληθυσμού που εκκενώνεται ανέρχεται στο 12% στη διάρκεια της μιας ώρας και στο 23% για το σύνολο της διαδικασίας.

Εφόσον η αξιοποίηση των λεωφορείων εφαρμόζεται παράλληλα με την αντιστροφή των συνδέσμων, τα ποσοστά αυτά αυξάνονται περαιτέρω και ανέρχονται σε 17,5% και 20% για το πρώτο σενάριο και σε 20% και 23% για το δεύτερο σενάριο. Παρατηρείται ότι και στα δύο σενάρια, η αξιοποίηση των λεωφορείων επιφέρει την ίδια αύξηση πληθυσμού που εκκενώνεται για το σύνολο της διαδικασίας, είτε εφαρμόζεται η αντιστροφή συνδέσμων είτε όχι, ενώ υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στη διάρκεια της μιας ώρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αντιστροφή των συνδέσμων αυξάνεται σημαντικά η κυκλοφοριακή ικανότητα του δικτύου και έχει σαν αποτέλεσμα την αμεσότερη εκκένωση περισσότερων οχημάτων. Έτσι, στη διάρκεια της μιας ώρας, μαζί με τα αυτοκίνητα προλαβαίνουν να εκκενώσουν περιοχή και περισσότερα λεωφορεία, που μεταφέρουν σημαντικό αριθμό ανθρώπων, αυξάνοντας το αντίστοιχο ποσοστό και μειώνοντας το συνολικό χρόνο εκκένωσης.

Ακόμη, ο αισθητήρας της Οίας δεν παρουσιάζει σχεδόν καμία αυξομείωση στο χρόνο εκκένωσης, μιας και η αντιστροφή των συνδέσμων δεν επηρεάζει το οδικό τμήμα στο οποίο ανήκει, ενώ η εισαγωγή των λεωφορείων στο δίκτυο αυξάνει ελάχιστα το φόρτο που εξυπηρετείται από τη συγκεκριμένη ασφαλή ζώνη, σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια.

Σε ότι αφορά το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων, παρατηρείται ότι, ανεξάρτητα από τον φόρτο που εξετάζεται ή την εφαρμογή πιθανών βελτιωτικών μέτρων, ο ελάχιστος χρόνος εκκένωσης δεν ξεπερνάει το κατώτατο όριο των 70 λεπτών. Αυτό σημαίνει ότι, σε κάθε περίπτωση, απαιτείται ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα μίας ώρας, προκειμένου να αδειάσει πλήρως το οδικό δίκτυο. Σε περίπτωση που η έκτακτη ανάγκη είναι τέτοια που δεν επιτρέπει αυτό το χρονικό περιθώριο, είναι αδύνατη η ολοκλήρωση της διαδικασίας της εκκένωσης πριν την εκδήλωση του φαινομένου.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεράσματα, προτείνονται η άμεση αξιοποίηση των λεωφορείων και στα δύο εξεταζόμενα σενάρια, προκειμένου να συμμετάσχουν όσο το δυνατόν περισσότεροι άνθρωποι στη διαδικασία της εκκένωσης, μιας και κύρια μερίμνα των αρμόδιων αρχών είναι να κινδυνέψουν όσο το δυνατόν λιγότερες ανθρώπινες ζωές. Ακόμη, προτείνεται η αντιστροφή των συνδέσμων που παρουσιάζουν υψηλή συμφόρηση, ιδιαίτερα στο σενάριο υψηλού φόρτου, καθώς μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση του χρόνου εκκένωσης. Στο σενάριο αυτό, προτείνεται ενδεχομένως και η αντιστροφή συνδέσμων στο οδικό τμήμα που οδηγεί στη Οία, ώστε να αυξηθεί η κυκλοφοριακή

ικανότητα, να μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος και να ολοκληρωθεί η εκκένωση εντός του χρονικού εύρους που διαμορφώνεται στον αισθητήρα του αεροδρομίου.

Ένα άλλο μέτρο που θα μπορούσε να εφαρμοστεί και ενδεχομένως να βελτιώσει τη διαδικασία της εκκένωσης είναι η εκκένωση της επικίνδυνης περιοχής με βάση το χρόνο έναρξης της διαδικασίας. Το μέτρο αυτό περιλαμβάνει το διαχωρισμό του δικτύου σε ζώνες, ανάλογα με το βαθμό επικινδυνότητας που παρουσιάζουν και η εκκένωση πραγματοποιείται τμηματικά ανά ζώνη. Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί η μικρότερη δυνατή συμφόρηση του δικτύου και πιθανώς να μειωθεί ο συνολικός χρόνος εκκένωσης.

Φυσικά όλα τα παραπάνω συμπεράσματα και οι προτάσεις αφορούν τη συγκεκριμένη εφαρμογή που εξετάστηκε, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας για τη συμπεριφορά των οδηγών. Αυτό σημαίνει ότι, σε περαιτέρω ανάλυση μπορούν να αξιοποιηθούν περισσότερες ή διαφορετικές παράμετροι, προκειμένου να διαμορφωθεί ακόμα πιο αντιπροσωπευτικό μοντέλο και να προκύψουν ακόμα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα και συμπεράσματα. Επιπλέον, εφόσον υπάρχει δυνατότητα να συλλεχθούν πραγματικά δεδομένα για τη συμπεριφορά των οδηγών, αφού πρώτα βαθμονομηθούν, μπορούν να επιτρέψουν την εξέταση και ανάλυση διαφορετικών και ενδεχομένως πιο αξιόπιστων σεναρίων. Έτσι, μπορούν να προκύψουν αποτελέσματα, τα οποία ύστερα από αξιολόγηση, είναι σε θέση να οδηγήσουν σε συμπεράσματα που να ανταποκρίνονται καλύτερα στην πραγματικότητα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Aimsun 8 Scripting Manual (2013), TSS- Transport Simulation Systems

Aimsun 8 Users' Manual (2014), TSS- Transport Simulation Systems

Aimsun 8 Dynamic Simulators Users' Manual (2014), TSS- Transport Simulation Systems

Alsnih R., P. R. Stopher (2004), *Review of the Procedures Associated with Devising Emergency Evacuation Plans*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1865, pp. 89-97

Antoniou C., R. Balakrishna, H. N. Koutsopoulos (2008), *Emerging Data Collection Technologies and their Impact on Traffic Management Applications*, Proceedings of the 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation, Athens, Greece

Balakrishna R., Y. Wen, M. Ben-Akiva, C. Antoniou (2008), *Simulation-Based Framework for Transportation Network Management in Emergencies*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2041, pp. 80-88

Barceló J. (2002), *Dynamic Network Simulation with AIMSUN*, Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation, Yokohama, Japan, pp. 1-25

Barrett B., B. Ran, R. Pillai (2000), *Developing a dynamic traffic management modeling framework for hurricane evacuation*, Transportation Research Record, vol. 1733, pp. 115-121

Ben-Akiva M., H. N. Koutsopoulos, C. Antoniou, R. Balakrishna (2010), *Traffic Simulation with DynaMIT*, In J. Barcelo (ed.) "Fundamentals of traffic simulation", (ISBN: 978-1-4419-6141-9), Springer

Bogers E. A. I., F. Viti, S. P. Hoogendoorn (2004), *Joint modeling of ATIS, habit and learning impacts on route choice by laboratory simulator experiments*, Transportation Research Record 1926, pp. 189-197

Brown C., W. White, C. Van Slyke, J. D. Benson (2009), *Development of a Strategic Hurricane Evacuation–Dynamic Traffic Assignment Model for the Houston, Texas, Region*, Transportation Research Board of the National Academies, vol. 2137, pp. 46-53

Bu F., Q. Xie (2010), *Research on seismic evacuation dynamic traffic assignment based on cell transmission model*, Progress in Informatics and Computing (PIC), 2010 IEEE International Conference, vol. 2, pp. 1174 – 1178

Burghout W. (2004), *Hybrid microscopic-mesoscopic traffic simulation*, Doctoral Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, pp.14-23

Chakraborty J., G. A. Tobin, B. E. Montz (2004), *Population Evacuation: Assessing Spatial Variability in Geophysical Risk and Social Vulnerability to Natural Hazards*, National Hazards Review, vol. 6

Chen X., J. W. Meaker, F. B. Zhan (2006), *Agent-Based Modeling and Analysis of Hurricane Evacuation Procedures for the Florida Keys*, *Natural Hazards*, Vol. 38, pp. 321-338

Chen X. (2012), *Agent-based micro-simulation of staged evacuations*, *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*. Vol. 4, pp.22-35

Cheng G., C. G. Wilmot, E. J. Baker (2008), *A destination choice model for hurricane evacuation*, *Proceedings of the 87th Annual Meeting Transportation Research Board*, Washington, DC, USA

Chiu Y. C. (2004), *Traffic Scheduling Simulation and Assignment for Area-Wide Evacuation*, *Intelligent Transportation Systems*, The 7th International IEEE Conference, pp. 537-542

Chiu Y. C., P. Korada, P. B. Mirchandani (2005), *Dynamic Traffic Management for Evacuation*, *Transportation Research Board*, 84th annual meeting, Washington D.C., U.S.A.

Church R. L., T. J. Cova (2000), *Mapping evacuation risk on transportation networks using a spatial optimization model*, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 8, Issue 1-6, pp. 321-336

Ciuffo B., J. Casas, M. Montanino, J. Perarnau, V. Punzo (2013), *From theory to practice: Gaussian process metamodels for the sensitivity analysis of traffic simulation models. A case study of the Aimsun mesoscopic model*, *Transportation Research Board*, 92th annual meeting, Washington D.C., U.S.A.

Cova T. J., J. P. Johnson (2001), *Microsimulation of neighborhood evacuations in the urban – wildland interface*, *Environment and Planning A*, volume 34, pp. 2211-2229

Cutter S. L., J. T. Mitchell, M. S. Scott (2000), *Revealing the vulnerability of people and places: A case study of Georgetown County, South Carolina*, *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 90(4), pp. 713-737.

Der Kiureghian A., O. Ditlevsen (2009), *Aleatory or epistemic? Does it matter?*, *Structural Safety* 31(2), pp. 105-112.

Elmitiny N., S. Ramasamy, E. Radwan (2007), *Transit Facilities' Emergency Evacuation Planning and Preparedness Using Traffic Simulation*, *The 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., U.S.A.

Florian D.G. (2004), *Simulation-based evaluation of Advanced Traveler Information Services (ATIS)*, *Massachusetts Institute of Technology, Technology and Policy Program*

Frey D., Jugulum R. (2006), *The Mechanisms by Which Adaptive One-factor-at-a-time Experimentation Leads to Improvement*, *Transactions of the ASME*, vol. 128, pp. 1050-1060

Fu H., C. G. Wilmot (2004), *Sequential Logit Dynamic Travel Demand Model for Hurricane Evacuation*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1882, pp. 19-26

Fu H., C. G. Wilmot (2007), *Static Versus Dynamic and Aggregate Versus Disaggregate: Comparison Between Practice and Research in Hurricane Evacuation Travel Demand Modeling*, The 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., U.S.A.

Gershon R., K. Qureshi, M. Rubin, V. Raveis (2007), *Factors Associated with High-Rise Evacuation: Qualitative Results from the World Trade Center Evacuation Study*, Prehospital and Disaster Medicine, vol.22, pp 165-173

Goldblatt R. (2004), *Evacuation Planning: A Key of Emergency Planning*, 83rd Annual Meeting Transportation Research Board, Washington, D.C.

Helton J.C., J.D. Johnson, C.J. Salaberry, C.B. Storlie (2006), *Survey of sampling based methods for uncertainty and sensitivity analysis*. Reliability Engineering and System Safety, 91:1175–1209.

Henson K. M., K. G. Goulias (2006), *An Assessment of Activity-based Modeling and Simulation for Applications in Operational Studies, Disaster Preparedness, and Homeland Security*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1942, pp. 23-30

Hori T., M. Shiiba (2004), *Micro Model Simulation Tools for Performance-based Design of a Flood Risk Management System*, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 26, No. 2, pp. 73-80

Hua J., G. Ren, Y. Cheng, B. Ran (2014), *An Integrated Contraflow Strategy for Multimodal Evacuation*, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2014, article ID 159473, 10 pages

Huang Z., D. Kosterev, R. Guttromson, T. Nguyen (2006), *Model Validation with Hybrid Dynamic Simulation*, IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006

Jiang G., Z. Meng, Z. Wu, Q. Li (2010), *Traffic Adaptive Control Framework for Real Time Large-Scale Emergency Evacuation*, Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference, vol. 3, pp. 1065-1068

Kalafatas G., S. Peeta (2009), *Planning for evacuation: insights from an efficient network design model*, Journal of Infrastructure Systems, vol. 15, no. 1, pp. 21–30

Kim S., S. Shekhar, M. Min (2008), *Contraflow Transportation Network Reconfiguration for Evacuation Route Planning*, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 20, no. 8, pp. 1115 – 1129

Kongsomsaksakul S., A. Chen, C. Yang (2005), *Shelter location-allocation model for flood evacuation planning*, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 4237-4252

Korhonen T., S. Hostikka (2009), *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac*, Technical Reference and User's Guide VTT, Finland

Laefer D. F., A. R. Pradhan (2006), *Evacuation Route Selection Based on Tree-Based Hazards Using Light Detection and Ranging and GIS*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 4, April 2006, pp. 312-320

Li G., L. Zhang, Z. Wang (2014), *Optimization and Planning of Emergency Evacuation Routes Considering Traffic Control*, The Scientific World Journal, vol. 2014, article ID 164031, 15 pages

Lim H. Jr., M.B. Lim, M. Piantanakulchai (2013), *A Review of Recent Studies on Flood Evacuation Planning*, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 9, pp. 147-162

Liu Y., X. Lai, G.-L. Chang (2006), *A Cell-Based Network Optimization Model for Staged Evacuation Planning Under Emergencies*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1964, pp. 127-135

Lively D., O. Elhamshary, B. Tournay (2006), *Advanced Traveler Information Systems: Overview of California's System Application and Its Performance as Part of Emergency Response Planning*, The 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., U.S.A.

Lu Q., B. George, S. Shekhar (2003), *Capacity Constrained Routing Algorithms for Evacuation Planning: A Summary of Results*, Department of Computer Science and Engineering, University of Minnesota, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3633/2005, pp. 291-307

Min M., J. Lee (2013), *Maximum Throughput Flow-Based Contraflow Evacuation Routing Algorithm*, Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2013 IEEE International Conference, pp 511-516

Moeller M., T. Urbanik, A. Desrosiers (1981), *CLEAR (calculated logical evacuation and response): a generic transportation network evacuation model for the calculation of evacuation time estimates*, Nuclear Regulatory Commission by Pacific Northwest Laboratory, NUREG/CR-2504, Washington, DC

Mosseri G., M. Hall, J. Meyers (2004), *VISSIM Micro-simulation Modelling of Complex Geometry and Traffic Control: A Case Study of Ocean Parkway, NY*, Institute of Transportation Engineers Annual Meeting and Exhibit 2004

Murphy J., D. Sexton, D. Barnett, G. Jones, M. Webb, M Collins, D. Stainforth (2004), *Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations*, Nature 430, pp. 768-772

Naghawi H. (2010), *Transit-Based Emergency Evacuation Modelling with Microscopic Simulator*, The 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., U.S.A.

- Naghdi K., A. Mansourian, M.J. Valandazoej, M. Saadatseresht (2008), *Evacuation Planning in Earthquake Disasters, Using RS and GIS*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 37, part B4, pp. 1671-1676
- Ng M., T. Waller (2010), Reliable Evacuation Planning via Demand Inflation and Supply Deflation, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, Issue 6, pp. 1086-1094
- O'Connor M. (2012), *Two Years Later, Haitian Earthquake Death Toll in Dispute*, *Columbia Journalism Review*
- O'Hagan A. (2006), *Uncertain Judgements: Eliciting Experts' Probabilities*, Wiley, Chichester
- Pal A., A. J. Graettinger, M. H. Triche (2003), *Emergency evacuation modeling based on Geographical Information System data*, Transportation Research Board, 82nd annual meeting, Washington D.C., U.S.A.
- Paris R., Lavigne F., Wassimer P., Sartohadi J. (2007), *Coastal sedimentation associated with the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, west Banda Aceh (Sumatra, Indonesia)*, *Marine Geology (Elsevier)*, vol. 238 (1–4), pp. 93–106.
- Parks M., J. Biggs, P. England, T. Mather, P. Nomikou, K. Palamartchouk, X. Papanikolaou, D. Paradissis, B. Parsons, D. Pyle, C. Raptakis, V. Zacharis (2012), *Evolution of Santorini Volcano dominated by episodic and rapid fluxes of melt from depth*, *Nature Geoscience*, vol. 5, pp.749–754
- Paruolo, P., M. Saisana, A. Saltelli (2012), *Ratings and rankings: voodoo or science?*, *The Royal Statistical Society: Journal Series A*
- Peeta S., Y. T. Hsu (2009), *Integrating Supply and Demand Aspects of Transportation for Mass Evacuation under Disasters*, USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report, NEXTRANS Project No 019PY01
- Pel A. J., M. C. J. Bliemer, S. P. Hoogendoorn (2010), *A review on travel behaviour modeling in dynamic traffic simulation models for evacuations*, *Transportation*, vol. 38, pp. 97-123
- Ploss G., P. Vortisch (2006), *Estimating Real-Time Urban Traffic States in VISUM Online*, PIARC International Seminar on Intelligent Transport Systems (ITS) In Road Network Operations, Kuala Lumpur, Malaysia
- Prionisti E., K. Antoniou (2012), *Sensitivity Analysis of Driver Behavior under Emergency Conditions*, *Proceedings of the 15th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*, September 16-19, Anchorage, Alaska, USA
- Regnier E. (2006), *Public Evacuation Decisions and Hurricane Track Uncertainty*, *Management Science*, Vol. 54, No. 1, pp. 16-28

- Saadatseresht M., A. Mansourian, M. Taleai (2007), *Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach*, European Journal of Operational Research, Vol. 198, pp. 305-314
- Saltelli A., S. Tarantola (2002), *On the relative importance of input factors in mathematical models: safety assessment for nuclear waste disposal*, Journal of American Statistical Association, vol. 97, pp. 702–709
- Saltelli A., M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola (2008), *Global Sensitivity Analysis: The Primer*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Saltelli A., P. Annoni (2010), *How to avoid a perfunctory sensitivity analysis*, Environmental Modeling and Software 25, pp. 1508-1517.
- Saltelli A., P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, S. Tarantola (2010), *Variance based sensitivity analysis of model output*, Design and estimator for the total sensitivity index, Computer Physics Communications, vol. 181(2), pp. 259-270
- Shekhar S., K. Yang, V.M.V. Gunturi, L. Manikonda, D. Oliver, X. Zhou, B. George, S. Kim., J. M. R. Wolff, Q. Lu (2012), *Experiences with evacuation route planning algorithms*, International Journal of Geographical Information Science, vol. 26, pp. 2253–2265
- Soffer Y., D. Schwartz, A. Goldberg, M. Henefeld, Y. Bar-Dayana (2008), *Population Evacuations in Industrial Accidents: A Review of the Literature about Four Major Events*, Prehospital and disaster medicine, vol. 23 (3), pp. 276-281
- Takada K., M. Fujiu, M. Ohara, K. Onomura (2013), *Development of Traffic Simulation for Tsunami Evacuation - Case Study for Kesenuma city -*, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol.9
- Tu H., G. Tamminga, H. Drolenga (2010), *The impacts of driving behaviors on traffic safety in case of evacuation*, 12th World Conference on Transport Research Society, Lisbon, Portugal
- Ullman B. R., C. L. Dudek, N. D. Trout (2006), *Amber Alert and Major Catastrophe Messages on Dynamic Message Signs: Focus Group Studies in Texas*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1959, pp. 114-121
- Urbanik T., M. Moeller, K. Barnes, *Benchmark study of the I-DYNEV evacuation time estimate computer code*, Division of Radiation Protection and Emergency Preparedness, Office of Nuclear Reactor Regulation, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1988)
- Wang J. W., H.F. Wang, W. J. Zhang, . H. Ip (2013), *Evacuation Planning Based on the Contraflow Technique With Consideration of Evacuation Priorities and Traffic Setup Time*, Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions, vol. 14, pp. 480-485
- Wei T., P. Jarboe (2010), *Integrating Traffic Simulation into Design Visualization: A Case Study*, Journal of the Transportation Research Board, issue no. 2165, pp. 89-95

Wilmot C. G., B. Mei (2003), *Comparison of Alternative Trip Generation Models for Hurricane Evacuation*, The 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., U.S.A.

Wilmot C. G., N. Meduri (2005), *Methodology to Establish Hurricane Evacuation Zones*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1922, pp. 129-137

Wu N. (2011), *Long-Term Assessment of Traffic Quality in a Large Freeway Network by Macroscopic Simulation*, Proceedings of the 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals

Yuan F., L. D. Han (2010), *A multi-objective optimization approach for evacuation planning*, A multi-objective optimization approach for evacuation planning, Procedia Engineering, vol. 3, pp. 217-227

Zhao X., G. Ren, C. Fan, C. Z. Ding (2012), *A Simulation-Based Dynamic Stochastic Route Choice Model for Evacuation*, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2012, article ID 396248

Zhan F. B., X. Chen (2008), *Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies*, Journal of the Operational Research Society, Nr. 59, pp. 25-33

Zhang B., W. K. Chan, S. V. Ukkusuri (2009), *Agent-based modeling for household level hurricane evacuation*, WSC '09 Winter Simulation Conference, pp. 2778-2784

A. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Προγραμματιστική διαδικασία

Η προγραμματιστική διαδικασία, τόσο για την ανάλυση ευαισθησίας, όσο και για την εκτέλεση των σεναρίων, βασίστηκε στην επικοινωνία και αλληλεπίδραση του προσομοιωτή AIMSUN, του λογισμικού MATLAB και της γλώσσας Rython. Όπως αναφέρθηκε και στη μεθοδολογία, στο λογισμικό MATLAB ορίζονται κάποιες παράμετροι χρήσιμες για την προσομοίωση και εκτελείται μια επαναληπτική διαδικασία για κάθε μία από τις προσομοιώσεις που έχουν οριστεί. Για κάθε προσομοίωση, εκτελούνται 10 επαναλήψεις με τα ίδια δεδομένα, τόσες όσες χρειάζονται ώστε να ομαλοποιούνται τα αποτελέσματα (βλ. σελ. 43-44). Στη διαδικασία αυτή καλείται ο προσομοιωτής AIMSUN μέσω της κονσόλας και το rython script, μέσα στο οποίο περιλαμβάνεται όλη η απαραίτητη πληροφορία για την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Ο κώδικας του MATLAB περιλαμβάνει τις εξής διαδικασίες:

- Ορισμός αριθμού παραμέτρων και αριθμού επιπέδων ανάλυσης
- Υπολογισμός αριθμού προσομοιώσεων
- Ορισμός αριθμού χρονικών διαστημάτων, αριθμού αισθητήρων κίνησης και αριθμού κατηγοριών οχημάτων
- Επαναληπτική διαδικασία 1:
 - Εισαγωγή παραμέτρων επανάληψης
 - Επαναληπτική διαδικασία 2:
 - Ορισμός του seed
 - Εκτέλεση του script μέσω της κονσόλας του AIMSUN
 - Σύνδεση με τη βάση δεδομένων και εξαγωγή των απαραίτητων στοιχείων
 - Αποθήκευση σε εξωτερικό αρχείο

Οι διαδικασίες που εκτελούνται μέσω αυτού του script είναι:

- Ορισμός του κωδικού του πειράματος
- Ορισμός των τύπων των οχημάτων που συμμετέχουν στο πείραμα
- Φόρτωση των τιμών των παραμέτρων και εισαγωγή αυτών σε μεταβλητές, ανά τύπο οχήματος
- Υπολογισμός επιπλέον μεταβλητών που εξαρτώνται από τις παραμέτρους, ανά τύπο οχήματος
- Ενεργοποίηση της κονσόλας του προσομοιωτή
- Άνοιγμα του αρχείου AIMSUN που περιλαμβάνει το δίκτυο(.ang), μέσω της κονσόλας
- Εισαγωγή μοντέλου και επεκτάσεων
- Φόρτωση της επανάληψης του πειράματος
- Φόρτωση του seed και εισαγωγή του στην επανάληψη του πειράματος
- Δημιουργία προσομοιωτή
- Εκτέλεση προσομοίωσης
- Αποθήκευση του δικτύου
- Απενεργοποίηση της κονσόλας

Προκειμένου να υλοποιηθεί όλη η παραπάνω διαδικασία, πρέπει να προηγηθεί ο καθορισμός των τιμών των παραμέτρων και όλων των πιθανών συνδυασμών τους. Έτσι, για

κάθε παράμετρο, προσδιορίζεται το εύρος τιμών και μέσα σε αυτό ορίζονται τόσες τιμές όσα και τα επίπεδα ανάλυσης. Οι τιμές αυτές μπορούν να προκύψουν είτε τυχαία είτε σε προκαθορισμένα σημεία του εύρους που έχει αρχικά οριστεί, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του sensitivity analysis, οι τιμές ορίστηκαν σε συγκεκριμένες τιμές του εύρους, ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη κάλυψη και καλύτερη κατανόηση της απόκρισης του συστήματος. Αντίθετα, στην περίπτωση των σεναρίων, οι τιμές αυτές προέκυψαν τυχαία, με σκοπό τα αποτελέσματα που θα συλλέγονταν να μην ήταν εξαρτημένα από το χρήστη, τουλάχιστον σε ότι αφορά τις συνθήκες της οδηγικής συμπεριφοράς. Αφού ορίστηκαν λοιπόν οι τιμές της κάθε παραμέτρου, διαμορφώθηκαν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των τιμών αυτών όλων των παραμέτρων, και οι οποίοι αποθηκεύτηκαν σε εξωτερική βάση δεδομένων. Κάθε γραμμή της βάσης αυτής περιελάμβανε ένα από όλα τα πιθανά σετ τιμών των παραμέτρων και στην ουσία αφορούσε μία προσομοίωση. Ακόμη, δημιουργείται ένα αρχείο με τυχαίες τιμές του seed, τόσες όσες και οι προσομοιώσεις με τις επαναλήψεις τους, ώστε να διαφυλάσσεται η τυχαιότητα και η ανεξαρτησία μεταξύ των «τρεξιμάτων».

-Κώδικας MATLAB

Ξεκινώντας ο κώδικας, καθαρίζεται η προσωρινή μνήμη του MATLAB, ώστε να μην υπάρξει σύγχυση με προηγούμενες μεταβλητές που έχουν οριστεί. Ορίζεται ο αριθμός των παραμέτρων που πρόκειται να εξεργαστούν και των επιπέδων ανάλυσης των παραμέτρων αυτών (4 παράμετροι, 5 επίπεδα ανάλυσης). Υπολογίζεται ο αριθμός των προσομοιώσεων που θα εκτελεστούν, και οι οποίες προκύπτουν για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των τιμών των παραμέτρων. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των προσομοιώσεων ορίζεται ως [(αριθμός επιπέδων ανάλυσης)^(αριθμός παραμέτρων)=5⁴=625]. Στη συνέχεια ορίζεται ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων που χρησιμοποιεί ο προσομοιωτής για αποθήκευση των αποτελεσμάτων στη βάση δεδομένων του δικτύου (μία μέτρηση για κάθε δεκάλεπτο της ώρας και μία συνολική), και οι κωδικοί των αισθητήρων κίνησης και των κατηγοριών οχημάτων που συμμετέχουν στην προσομοίωση. Ακόμη, αρχικοποιείται ένας αύξων αριθμός για την κάθε εκτέλεση και μια ακόμα μεταβλητή, που εκφράζει το σημείο εγγραφής των αποτελεσμάτων στο εξωτερικό αρχείο. Διαγράφεται το εξωτερικό αρχείο με τα αποτελέσματα, σε περίπτωση που υπάρχει, ώστε να μη δημιουργηθεί σύγχυση με πιθανά στοιχεία παλιότερων προσομοιώσεων, και ορίζεται το εξωτερικό αρχείο αποθήκευσης των αποτελεσμάτων.

Το επόμενο στάδιο του κώδικα είναι η πρώτη επαναληπτική διαδικασία, η οποία ουσιαστικά αφορά το κάθε σετ των τιμών των παραμέτρων. Για κάθε επανάληψη (προσομοίωση), οι τιμές αυτές φορτώνονται από την εξωτερική βάση δεδομένων σειριακά, «διαβάζοντας» την αντίστοιχη γραμμή εγγραφών (ένα σετ τιμών παραμέτρων), και αποθηκεύονται σε αρχείο κειμένου, ώστε να είναι εύκολα διαχειρίσιμες από το rython script. Έπειτα, ξεκινάει η επόμενη επαναληπτική διαδικασία, η οποία αφορά των αριθμό επαναλήψεων της εκάστοτε προσομοίωσης. Πρώτη ενέργεια της διαδικασίας αυτής είναι η ενημέρωση του αύξοντος αριθμού επανάληψης και η διαγραφή της βάσης δεδομένων του δικτύου, σε περίπτωση που υπάρχει, ώστε να μη δημιουργηθεί σύγχυση με πιθανά στοιχεία παλιότερων προσομοιώσεων. Ακόμη, διαγράφεται η μνήμη της java εντός του MATLAB (θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω), για τους ίδιους λόγους. Στη συνέχεια, καλείται η κονσόλα του

MATLAB μαζί με το python script, μέσω του οποίου εκτελείται η προσομοίωση. Οι ενέργειες του script αναλύονται παρακάτω. Προκειμένου να κληθεί η κονσόλα του προσομοιωτή και το script, η εντολή πρέπει να έχει την εξής μορφή:

```
! "<console_path>/aconsole.exe" -script "<script_path>/script.py"
```

Τα ορίσματα console_path και script_path διαμορφώνονται με βάση τη θέση του δίσκου, στην οποία είναι αποθηκευμένα τα εν λόγω αρχεία. Πολύ σημαντική λεπτομέρεια για την εισαγωγή των paths των αρχείων, τόσο στην κονσόλα, όσο και στο MATLAB και το script, είναι η χρήση του slash (/), και όχι του backslash (\).

Αφού εκτελεστεί, λοιπόν η προσομοίωση, όχι μόνο έχει αποθηκευτεί η νέα μορφή του δικτύου, αλλά έχει ενημερωθεί και η βάση δεδομένων με όλα τα δεδομένα που έχουν προκύψει από την εκτέλεση αυτή. Σημειωτέον ότι το αρχείο στο οποίο αποθηκεύεται η βάση ορίζεται μέσα από το ίδιο το AIMSUN και συνεπώς μπορεί να μην «ακολουθεί» το νέο αποθηκευμένο δίκτυο, αλλά το αρχικό, έχοντας γράψει τα νέα δεδομένα πάνω στα παλιά.

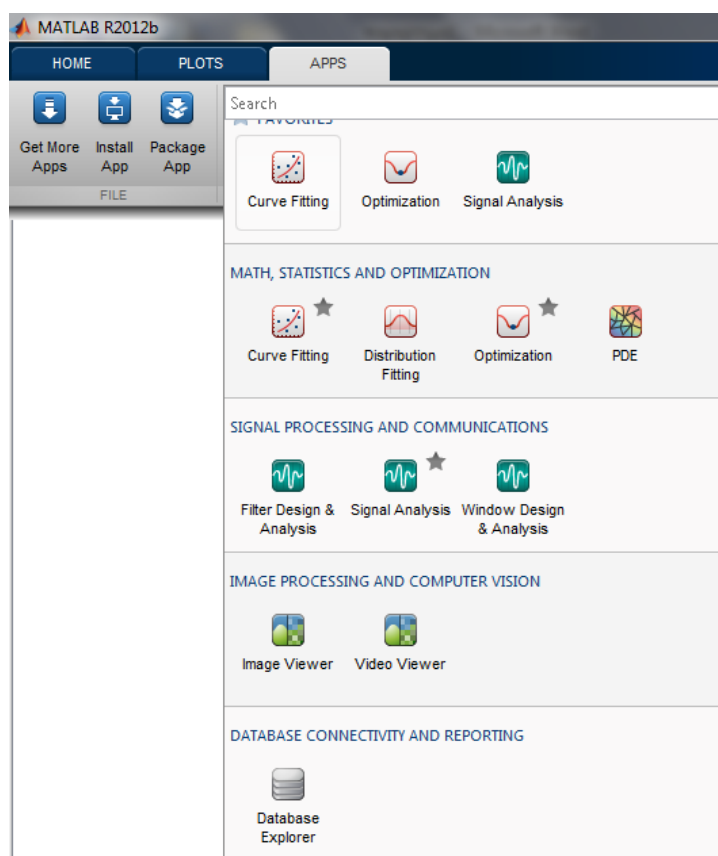
Πιο συγκεκριμένα, η βάση δεδομένων περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

Κωδικός αντιγράφου πειράματος (replicationID), Κωδικός αισθητήρα, Κωδικός κατηγορίας οχήματος, Χρονικό διάστημα, Αριθμός οχημάτων, Φόρτος, Ταχύτητα, Πληρότητα, Πυκνότητα, Χρονικό διάκενο.

Ο κωδικός κατηγορίας οχήματος είναι ένας αύξων αριθμός, ο οποίος παίρνει μία ακέραια τιμή για κάθε κατηγορία οχήματος. Στην παρούσα εφαρμογή, παίρνει τιμή 1 για αυτοκίνητα, τιμή 2 για λεωφορεία και τιμή 0 για συγκεντρωτικά αποτελέσματα (είτε αθροιστικά είτε μέσοι όροι, ανάλογα με τη φύση του αποτελέσματος). Ο κωδικός του αισθητήρα παίρνει τιμές, όπως αυτές έχουν οριστεί κατά την τοποθέτησή τους στο δίκτυο, ενώ το Χρονικό διάστημα παίρνει ακέραιες τιμές ανάλογα με τα διαστήματα στα οποία έχει μοιραστεί η ώρα. Έτσι, για 6 χρονικά διαστήματα, όπου η μέτρηση πραγματοποιείται ανά δεκάλεπτο της ώρας, η μεταβλητή αυτή παίρνει τιμές 1-6 για την πρώτη ώρα, 7-12 για τη δεύτερη κοκ. Για τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα (είτε αθροιστικά είτε μέσοι όροι, ανάλογα με τη φύση του αποτελέσματος), η μεταβλητή αυτή παίρνει τιμή 0 και εκφράζει το σύνολο της προσομοίωσης.

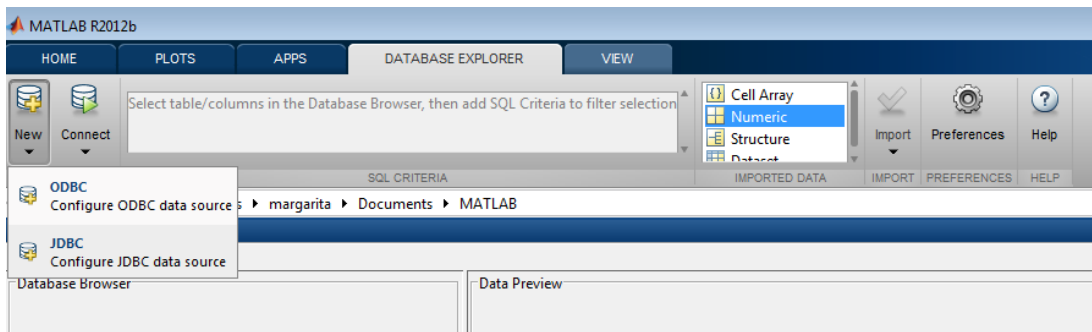
Προκειμένου να συλλεχθούν και να επεξεργαστούν τα αποτελέσματα, πρέπει να γίνει σύνδεση με τη βάση, ώστε να επιλεχθούν τα στοιχεία αυτά που είναι απαραίτητα για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η σύνδεση αυτή γίνεται συνήθως μέσω ενός ODBC driver, ο οποίος επιτρέπει την πρόσβαση σε συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων. Ωστόσο, σύμφωνα με την ίδια την εταιρία του λογισμικού MATLAB, ένα συχνό σφάλμα που παρατηρείται κατά τη σύνδεση σε μία βάση δεδομένων είναι η αδυναμία σύνδεσης μέσω ενός ODBC driver, όταν το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιείται είναι Windows των 64bit. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, προτείνεται η χρήση ενός JDBC driver, ο οποίος βασίζεται στη Java. Εφόσον δεν είναι εγκατεστημένος ο driver αυτός, πρέπει να γίνει λήψη του κατάλληλου αρχείου .jar, ανάλογα με τον τύπο της βάσης που χρησιμοποιείται, και να προστεθεί το αρχείο αυτό στα αρχεία αναζήτησης του MATLAB, με τη μορφή "dynamic". Στην παρούσα εφαρμογή, η βάση δεδομένων ήταν σε format sqlite, και με βάση αυτό έγινε

η λήψη, η εγκατάσταση ή η δημιουργία όλων των απαραίτητων αρχείων που ακολουθούν. Ακόμα, πρέπει να φορτωθεί ένα αρχείο .mat, το οποίο στην ουσία πρόκειται για μία νέα πηγή δεδομένων της μορφής JDBC. Για να δημιουργηθεί το αρχείο αυτό, πρέπει να γίνει σύνδεση στο Database Explorer του MATLAB. Η εφαρμογή αυτή βρίσκεται στην καρτέλα APPS, και συγκεκριμένα στην ενότητα Database Connectivity and Reporting (Σχήμα A.1).

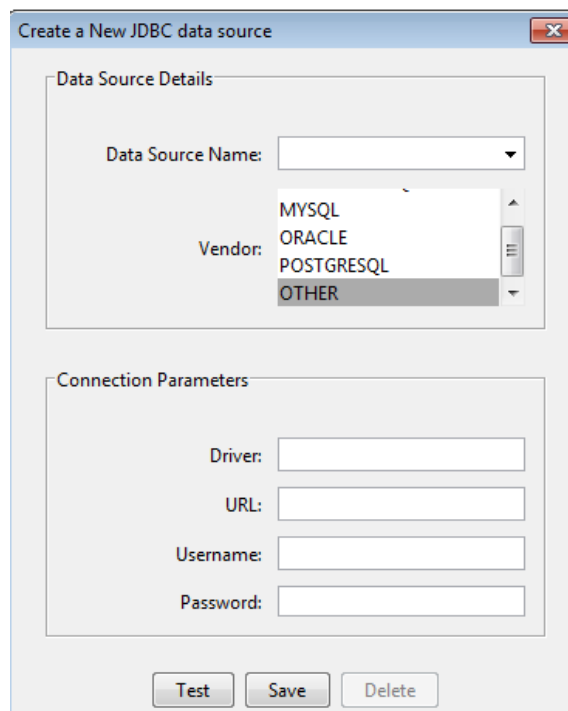


Σχήμα A.1: Θέση της εφαρμογής Database Explorer εντός του λογισμικού Matlab.

Επιλέγοντας New>JDBC (Σχήμα A.2), ορίζεται το όνομα του data source και επιλέγεται ο τύπος της βάσης δεδομένων στην πτυσσόμενη καρτέλα Vendor. Σε περίπτωση που ο τύπος της βάσης δεδομένων δεν είναι καταχωρημένος, όπως στην περίπτωση της παρούσας εφαρμογής που η βάση είναι sqlite, επιλέγεται ο τύπος OTHER. Ακόμη, εισάγονται ο driver και τα στοιχεία σύνδεσής του, όπως URL, username και password (Σχήμα A.3). Ως driver εισάγεται ο org.sqlite.JDBC, ως URL το jdbc:sqlite:dbpath, όπου dbpath είναι το πλήρες μονοπάτι που οδηγεί στο αρχείο που είναι αποθηκευμένη η βάση δεδομένων. Τα στοιχεία username και password μπορούν να παραμείνουν κενά, εφόσον η βάση δεδομένων δεν τα απαιτεί. Πατώντας αποθήκευση, δημιουργείται ένα .mat αρχείο, το οποίο επιτρέπει τη σύνδεση με τη βάση. Επιστρέφοντας στον κώδικα, το μόνο που μένει για να γίνει η σύνδεση είναι να φορτωθεί το αρχείο .mat.



Σχήμα A.2: Δημιουργία νέου JDBC driver.



Σχήμα A.3: Ρύθμιση παραμέτρων JDBC driver.

Έχοντας ολοκληρώσει, λοιπόν, τις προεργασίες που απαιτούνται για τη σύνδεση, ορίζεται το αρχείο της βάσης, γίνεται η σύνδεση και στη συνέχεια η εκτέλεση, επιλέγοντας τα στοιχεία αυτά που κρίνονται απαραίτητα ανάλογα με την περίπτωση. Η εντολή που εκτελεί τη σύνδεση με τη βάση πρέπει να περιέχει όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω (database path, username, password, driver, URL).

conn = database(<dbpath>,<username>,<password>,<driver>,<URL>)

Αφού γίνει η σύνδεση επιτυχώς, συλλέγονται τα στοιχεία που χρειάζονται με βάση την εφαρμογή, ταξινομούνται και ορίζεται η διαχείριση κενών ή μηδενικών κελιών. Η συλλογή των στοιχείων στην εν λόγω εφαρμογή έγινε από την καρτέλα MIDETEC, η οποία εμπεριέχει όλα τα μεγέθη που έχουν μετρηθεί στη θέση των αισθητήρων που έχουν οριστεί, και επιλέχθηκαν τα στοιχεία αυτά που ήταν απαραίτητα τόσο για τις ανάγκες της εφαρμογής, όσο και για την πλήρη κατανόηση και επόπτευση των αποτελεσμάτων αυτών (κωδικός αισθητήρα, κατηγορία οχήματος, χρονικό σημείο εγγραφής, ταχύτητα, φόρτος και πυκνότητα). Τα δεδομένα αυτά εισάγονται σε μία μεταβλητή και ελέγχονται πιθανές

αρνητικές τιμές. Στη συνέχεια, απενεργοποιείται η σύνδεση με τη βάση. Έπειτα, τα αποτελέσματα αυτά μαζί και με άλλα στοιχεία για την πλήρη κατανόηση των δεδομένων (αριθμός προσομοίωσης, αριθμός επανάληψης, seed και τιμές παραμέτρων), εισάγονται ως νέες εγγραφές σε έναν πίνακα. Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία που περιλαμβάνει κάθε εγγραφή είναι:

Προσομοίωση, Επανάληψη, Κωδικός αισθητήρα, Χρονικό διάστημα, Seed, Τιμή παραμέτρου 1, Τιμή παραμέτρου 2, Τιμή παραμέτρου 3, Τιμή παραμέτρου 4, Κωδικός κατηγορίας οχήματος, Ταχύτητα, Φόρτος, Πυκνότητα.

Η θέση των εγγραφών αυτών εξαρτάται από τον αριθμό της προσομοίωσης και της επανάληψής της. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε επανάληψη της προσομοίωσης. Αφού ολοκληρωθούν οι επαναλήψεις μιας προσομοίωσης, ακολουθεί η επόμενη προσομοίωση, για την οποία φορτώνονται οι τιμές των παραμέτρων, ξεκινάνε οι επαναλήψεις κοκ.

Αφού ολοκληρωθούν όλες οι προσομοιώσεις (625) και οι επαναλήψεις τους (10), θα έχει δημιουργηθεί ένας μεγάλος πίνακας (6250 γραμμών και 13 στηλών), ο οποίος θα περιέχει όλη τη χρήσιμη πληροφορία για κάθε «τρέξιμο». Η πληροφορία αυτή, πέρα από τον αύξοντα αριθμό προσομοίωσης και επανάληψης, αφορά τόσο τα στοιχεία εισόδου (τιμές παραμέτρων, seed κλπ.), όσο και τα στοιχεία εξόδου (επιλεγμένα και ομαδοποιημένα αποτελέσματα). Τέλος, αποθηκεύεται το workspace του MATLAB, ώστε να είναι εύκολα και γρήγορα προσβάσιμο για μεταγενέστερη επεξεργασία.

-Κώδικας python script

Σε ότι αφορά το python script, το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός των βιβλιοθηκών που είναι απαραίτητες για την εκτέλεσή του. Σε όλες τις εφαρμογές του scripting είναι απαραίτητες οι βιβλιοθήκες PyANGBasic, PyANGKernel και PyANGGui. Σε περίπτωση που χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί η κονσόλα του προσομοιωτή είναι απαραίτητη και η βιβλιοθήκη PyANGConsole. Ακόμη, προκειμένου να είναι δυνατή η εκτέλεση μικροσκοπικών προσομοιώσεων μέσω του AIMSUN, απαιτείται η εισαγωγή και της βιβλιοθήκης PyANGAimsun. Αφού εισαχθούν όλες οι απαραίτητες βιβλιοθήκες, ορίζονται οι κωδικοί του πειράματος και των κατηγοριών των οχημάτων. Στη συνέχεια, ανοίγει το αρχείο κειμένου που περιέχει τις εκάστοτε τιμές των παραμέτρων, προκειμένου να διαβαστούν τα στοιχεία του (`f=open(file,"r")`), και οι τιμές αυτές εισάγονται στις αντίστοιχες μεταβλητές. Έπειτα, ορίζεται ο συντελεστής συσχέτισης για κάθε κατηγορία οχήματος και υπολογίζονται επιπλέον παράμετροι που εξαρτώνται από αυτές που έχουν μεταβληθεί (`min, max` κλπ).

Αφού υπολογιστούν και ελεγχθούν όλες αυτές οι παράμετροι για κάθε κατηγορία οχήματος, ενεργοποιείται η κονσόλα. Μέσω αυτής, ανοίγει το αρχείο που περιέχει το δίκτυο και φορτώνεται το μοντέλο και η επέκταση "GGetramModule". Ακόμη, φορτώνεται το πείραμα που πρόκειται να προσομοιωθεί. Οι ενέργειες αυτές πραγματοποιούνται μέσω των παρακάτω εντολών:

```
console = ANGConsole()
```

```
console.open( "<network_path>/network.ang" )  
  
model=console.getModel()  
  
plugin = GKSystem.getSystem().getPlugin( "GGetram" )  
  
experiment = model.getCatalog().find( int(experimentId) )
```

Το επόμενο βήμα είναι ίσως και το πιο σημαντικό, καθώς αφορά την εισαγωγή και μεταβολή των παραμέτρων της οδηγικής συμπεριφοράς του δικτύου. Προκειμένου να εισαχθούν τα στοιχεία αυτά, απαιτούνται διαφορετικές εντολές, οι οποίες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, με βάση το αντικείμενο στο οποίο θα εφαρμοστούν. Έτσι, η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στο όχημα, ενώ η δεύτερη στο πείραμα. Για κάθε κατηγορία οχήματος, φορτώνεται η αντίστοιχη κατηγορία οχήματος του AIMSUN, με βάση τον κωδικό και εισάγονται οι παράμετροι που έχουν καθοριστεί προηγουμένως. Η εντολή που εισάγει και μεταβάλλει τις παραμέτρους αυτές έχει σαν ορίσματα τον τύπο του οχήματος, την ενότητα της παραμέτρου που πρόκειται να μεταβληθεί και την τιμή που θα πάρει. Έτσι, για παράδειγμα, οι εντολές για τη μεταβολή της παραμέτρου `speed_acceptance` (mean, deviation, max, min) είναι:

```
vehType_1.setDataValueByID(GKVehicle.speedAcceptanceMean,QVariant(speedAccCar))  
  
vehType_1.setDataValueByID(GKVehicle.speedAcceptanceDev,QVariant(speedAccCarDev))  
  
vehType_1.setDataValueByID(GKVehicle.speedAcceptanceMin,QVariant(speedAccCarMin))  
  
vehType_1.setDataValueByID(GKVehicle.speedAcceptanceMax,QVariant(speedAccCarMax))
```

Αντίστοιχα, προκύπτουν και οι εντολές για τη μεταβολή κάποιας άλλης παραμέτρου, όπως `max_acceleration`:

```
vehType_1.setDataValueByID( GKVehicle.maxAccelMean , QVariant(maxAccCar) κοκ.
```

Η διαδικασία αυτή εκτελείται για όλες τις παραμέτρους που αφορούν την ενότητα όχημα και για όλους τους τύπους οχημάτων που έχουν οριστεί. Η δεύτερη κατηγορία εντολών αφορά το πείραμα και περιλαμβάνει όλες εκείνες τις παραμέτρους που διαμορφώνονται από την ενότητα "Experiment". Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι, για παράδειγμα, ο χρόνος αντίδρασης, ο χρόνος αντίδρασης σε φωτεινό σηματοδότη κλπ. Προκειμένου να μεταβληθούν οι παράμετροι αυτές, πρέπει πρώτα να οριστεί ο τύπος της ενότητας του χρόνου αντίδρασης, δηλαδή αν ο χρόνος αντίδρασης που ορίζεται αφορά όλα τα οχήματα συνολικά, ή διαμορφώνεται διαφορετικά για κάθε τύπο οχήματος. Με κωδικό 0 ορίζεται η ενιαία διαμόρφωση των παραμέτρων αυτών, ενώ με κωδικό 1 η ξεχωριστή διαμόρφωση ανάλογα με τον τύπο του οχήματος. Η εντολή για τον ορισμό του τύπου του χρόνου αντίδρασης είναι:

```
experiment.setDataValueByID(GKExperiment.reactionTimeTypeAtt, QVariant(1))
```

Έπειτα, ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων του χρόνου αντίδρασης του κάθε τύπου οχήματος ως εξής:

```
experiment.setVariableReactionTimesMicro(vehType_1,[GKVehicleReactionTimes(reactionTimeCar,reactionTimeStopCar,reactionTimeTrafficCar,1)])
```

Επίσης, ορίζεται ο αριθμός των threads της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, φορτώνεται το πείραμα με βάση τον κωδικό που έχει οριστεί στην αρχή και η τυχαία τιμή του seed της προσομοίωσης, η οποία εισάγεται στο δίκτυο μέσω της εντολής:

```
replication.setRandomSeed(seed)
```

Αφού εισαχθούν όλες αυτές οι παράμετροι στο δίκτυο, δημιουργείται προσομοιωτής και ελέγχεται εφόσον είναι απασχολημένος. Ορίζεται μικροσκοπική προσομοίωση, φορτώνεται το πείραμα και εκτελείται η προσομοίωση. Εφόσον η προσομοίωση ολοκληρωθεί επιτυχώς, αποθηκεύεται το δίκτυο και κλείνει η κονσόλα. Οι εντολές που υλοποιούν όλες τις παραπάνω ενέργειες είναι οι εξής:

```
simulator = plugin.createSimulator( model )
```

```
if simulator.isBusy() == False:
```

```
    if replication != None and replication.isA( "GKReplication" ):
```

```
        if replication.getExperiment().getSimulatorEngine()== GKExperiment.eMicro:
```

```
            replication.setSimulationStatus( GKGenericExperiment.ePending )
```

```
            simulator.addSimulationTask( GKSimulationTask(replication, GKReplication.eBatch) )
```

```
            simulator.simulate()
```

```
            if replication.getSimulationStatus() == 1 or replication.getSimulationStatus() == 3:
```

```
                model.getLog().addInfo( "Task Done" )
```

```
            else:
```

```
                model.getLog().addError( "Simulation Failed" )
```

```
        else:
```

```
            model.getLog().addError( "Simulation is Busy" )
```

```
    # Save the network
```

```
    model.getLog().addInfo( "Ready to Save" )
```

```
    console.save("H:/diplomati/sensitivity-analysis/teliko.ang" )
```

```
    # Close it
```

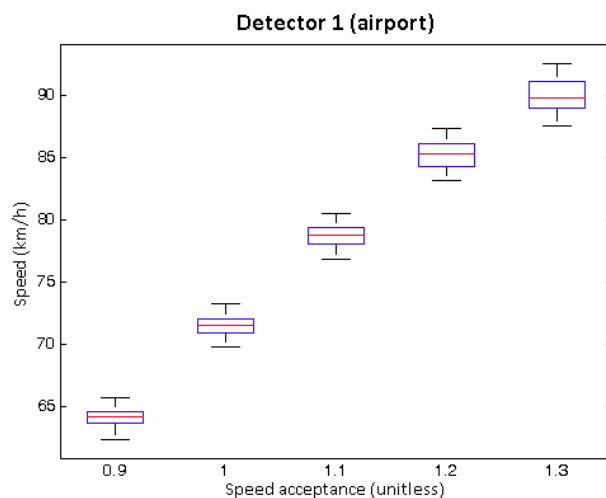
```
    console.close()
```

```
else:
```

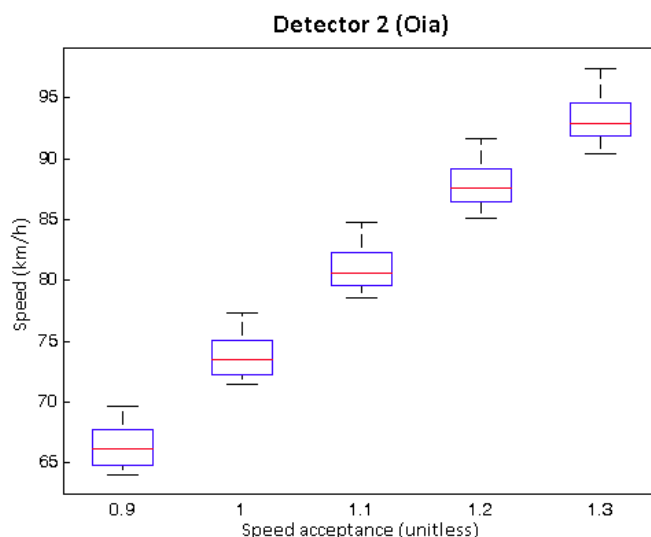
```
    console.close()
```

B. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Ανάλυση ευαισθησίας

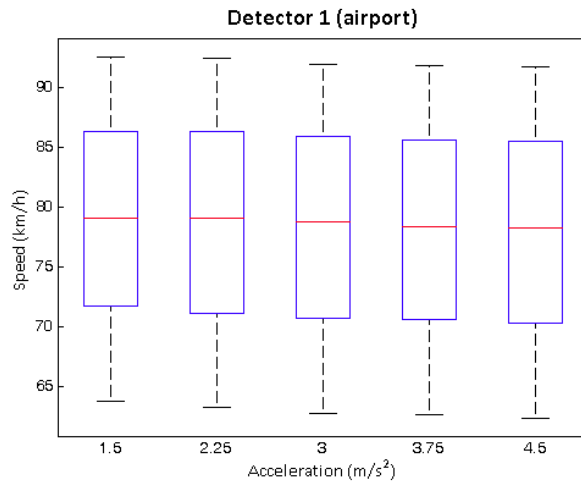
Στο Παράρτημα αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα διαγράμματα που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας, καθώς και τα μοντέλα που διαμορφώθηκαν για κάθε ένα από τα στοιχεία εξόδου. Τα διαγράμματα διαμορφώνονται με βάση τις μετρήσεις ανά αισθητήρα καταγραφής. Στον άξονα των x σημειώνονται οι τιμές που παίρνει η εκάστοτε παράμετρος, ενώ στον άξονα των y ενδεικτικές τιμές εντός του εύρους τιμών που παίρνει το εκάστοτε στοιχείο εξόδου. Σημειώνεται εδώ ότι ο πρώτος αισθητήρας είναι τοποθετημένος κοντά στην έξοδο για το εργοστάσιο αφαλάτωσης στην Οία, ενώ ο δεύτερος κοντά στην έξοδο για το αεροδρόμιο, όπου παρατηρείται και πιο έντονη συμφόρηση του δικτύου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα B.1-B.24.



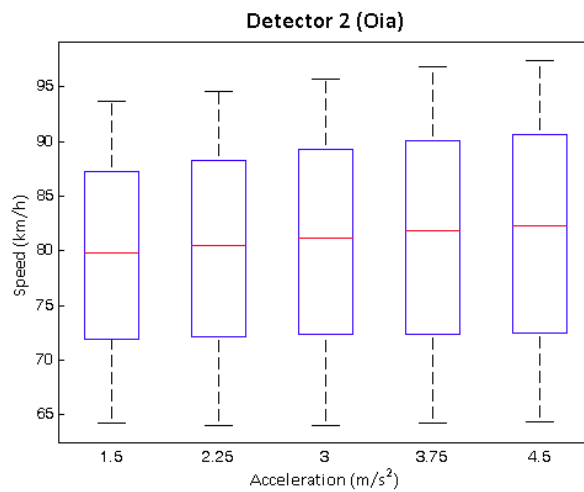
Σχήμα B.1: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για τον πρώτο αισθητήρα.



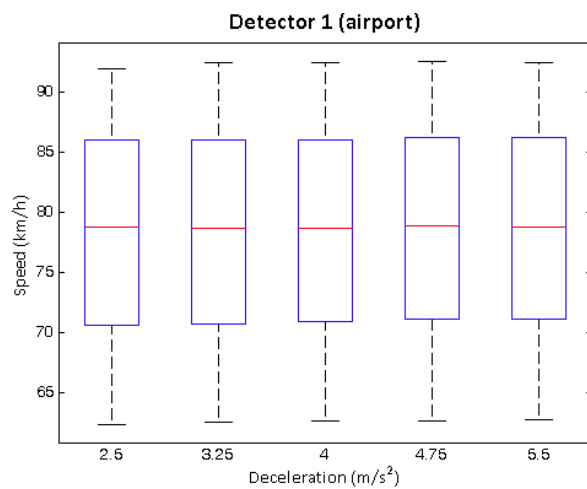
Σχήμα B.2: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για το δεύτερο αισθητήρα.



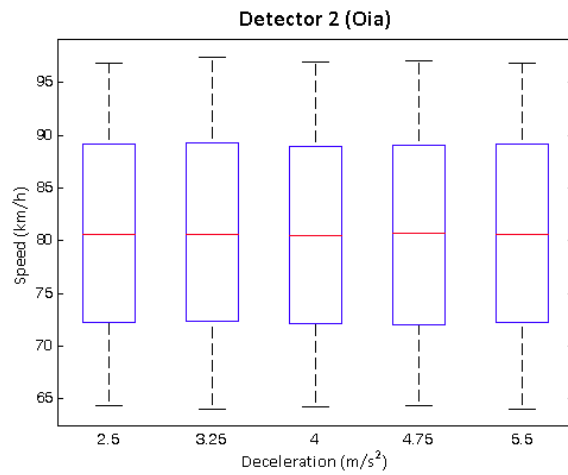
Σχήμα Β.3: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.



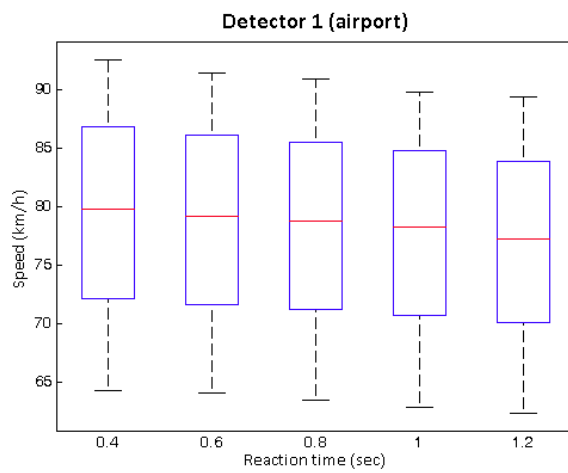
Σχήμα Β.4: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.



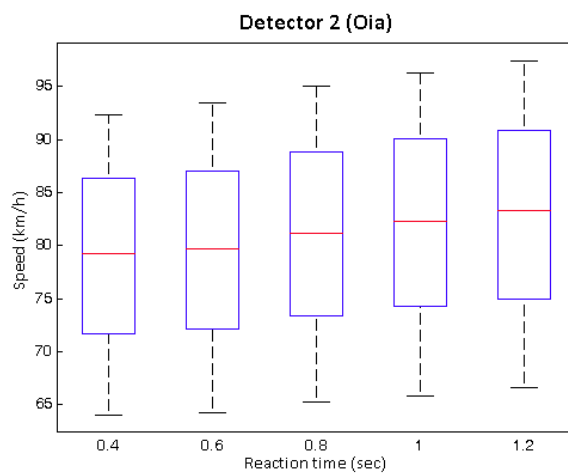
Σχήμα Β.5: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της επιβράδυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.



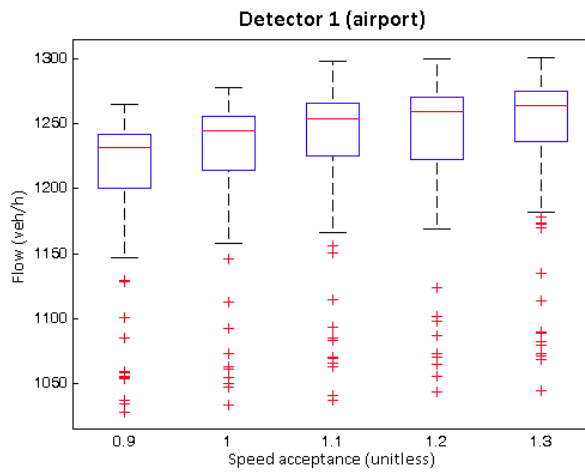
Σχήμα Β.6: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της επιβράδυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.



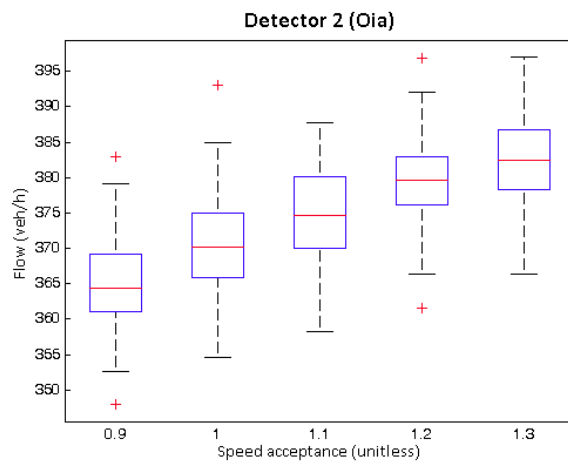
Σχήμα Β.7: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για τον πρώτο αισθητήρα.



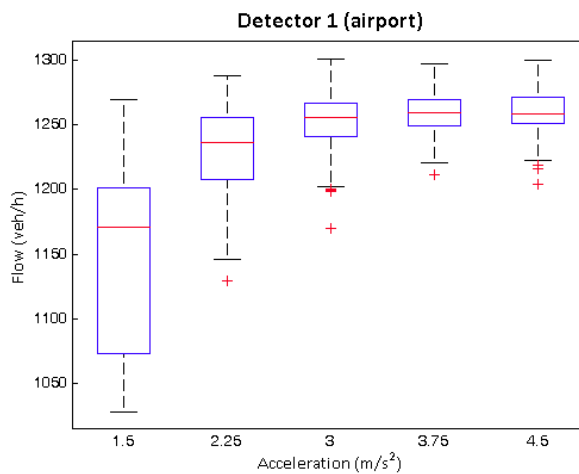
Σχήμα Β.8: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για το δεύτερο αισθητήρα.



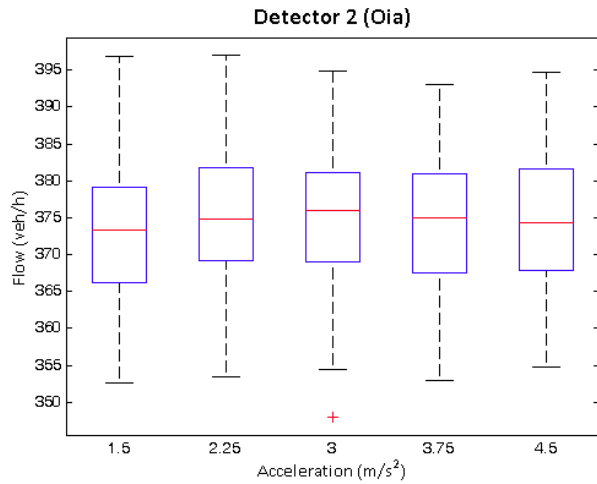
Σχήμα Β.9: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για τον πρώτο αισθητήρα.



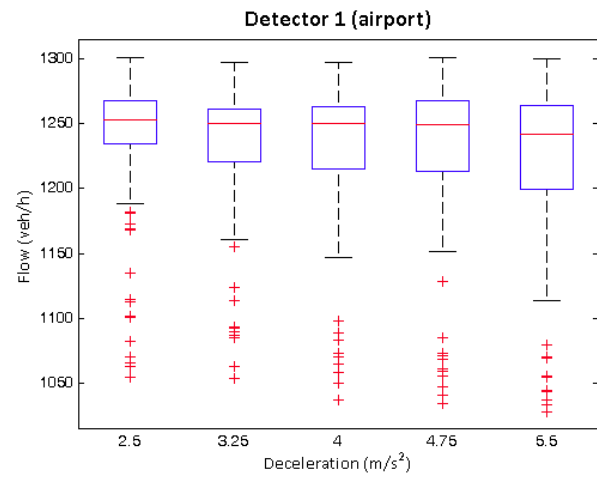
Σχήμα Β.10: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για το δεύτερο αισθητήρα.



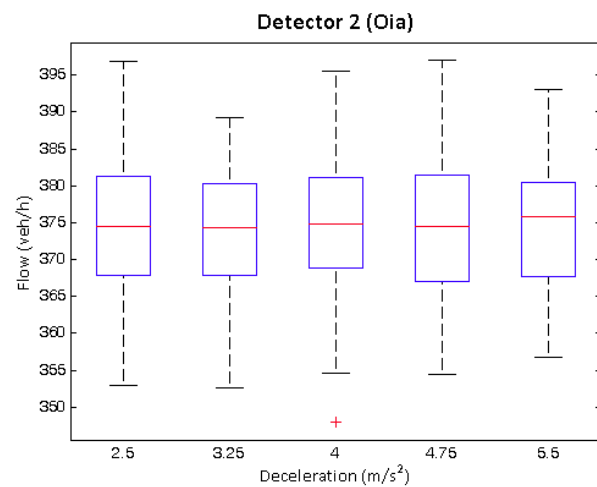
Σχήμα Β.11: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.



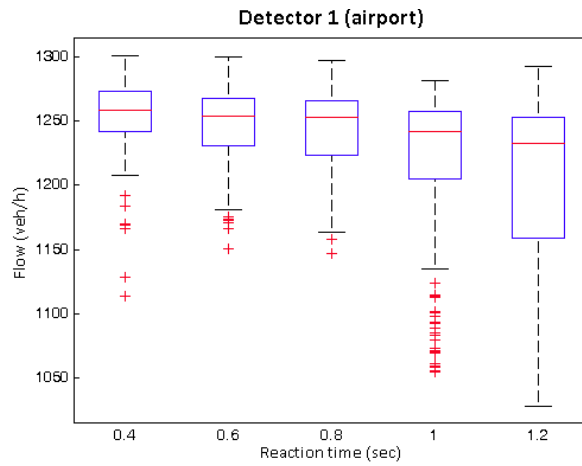
Σχήμα Β.12: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.



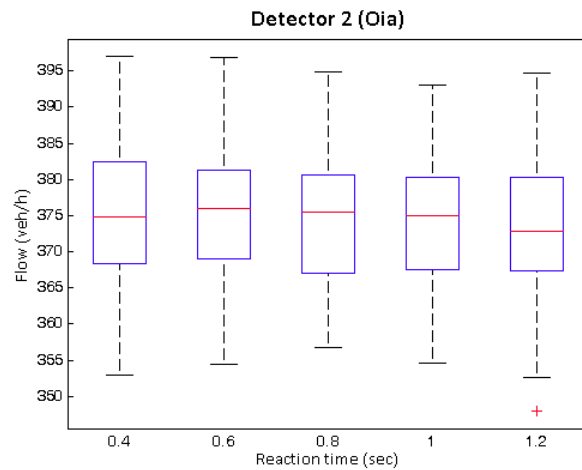
Σχήμα Β.13: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της επιβράδυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.



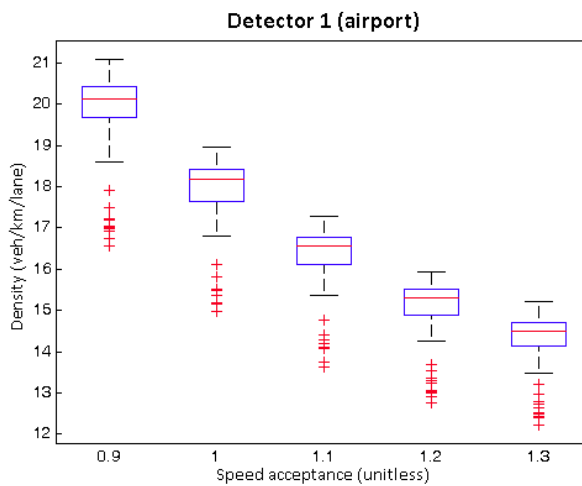
Σχήμα Β.14: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της επιβράδυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.



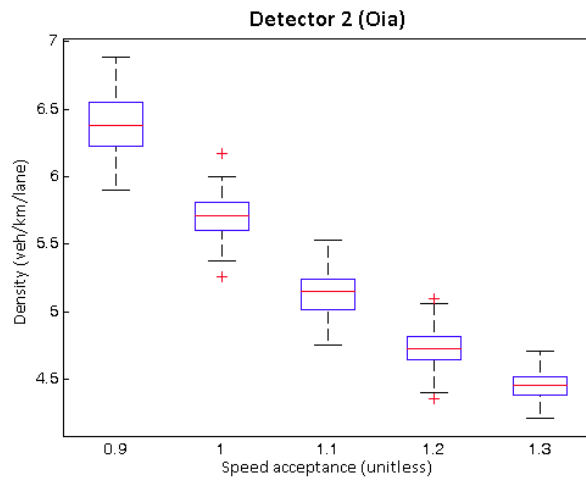
Σχήμα Β.15: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για τον πρώτο αισθητήρα.



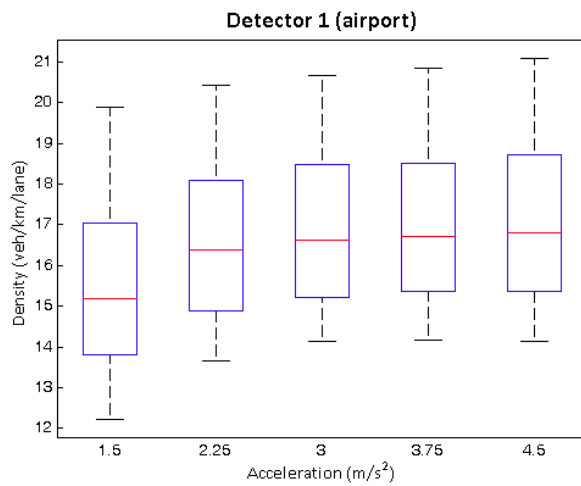
Σχήμα Β.16: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για το δεύτερο αισθητήρα.



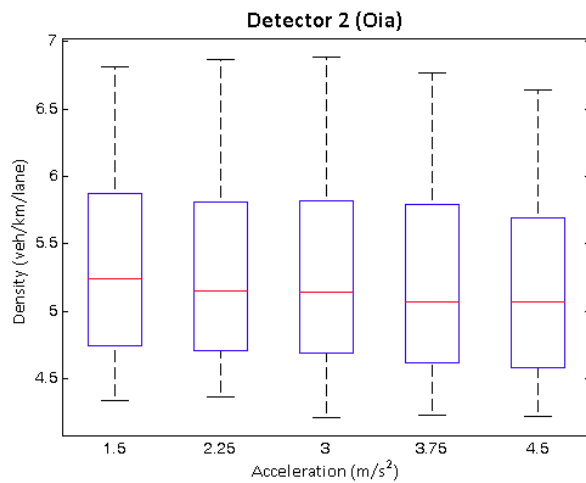
Σχήμα Β.17: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για τον πρώτο αισθητήρα.



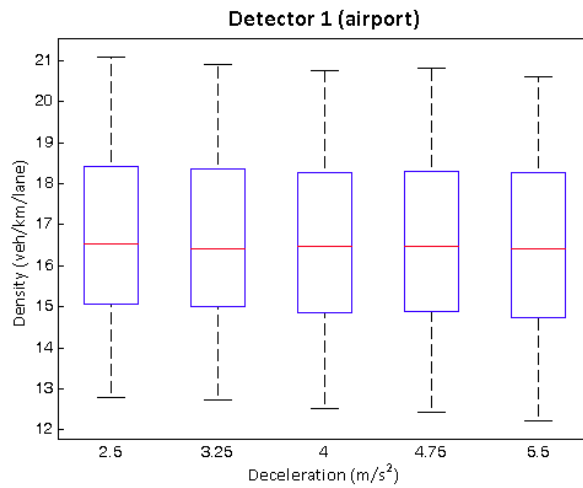
Σχήμα Β.18: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της αποδοχής του ορίου ταχύτητας για το δεύτερο αισθητήρα.



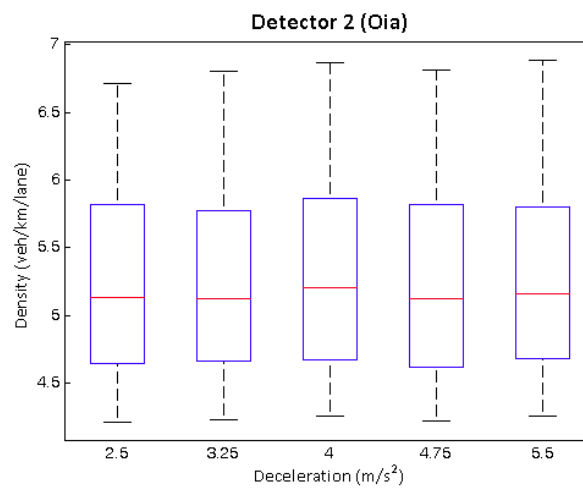
Σχήμα Β.19: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.



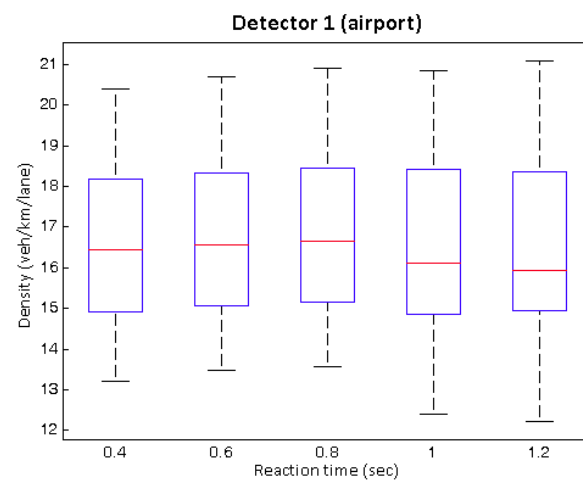
Σχήμα Β.20: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της μέγιστης επιτάχυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.



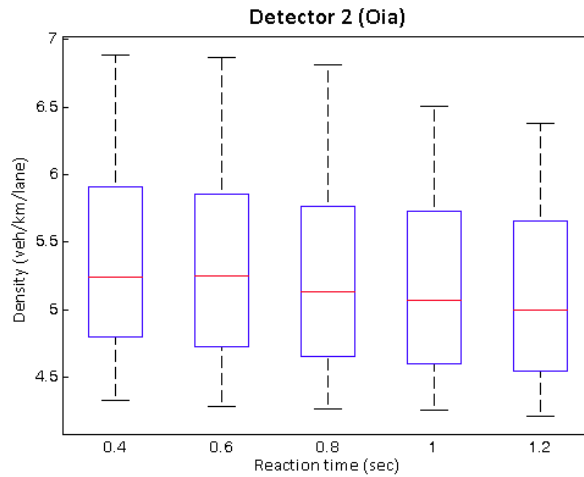
Σχήμα Β.21: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της επιβράδυνσης για τον πρώτο αισθητήρα.



Σχήμα Β.22: Μεταβολή του φόρτου συναρτήσει της επιβράδυνσης για το δεύτερο αισθητήρα.



Σχήμα Β.23: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για τον πρώτο αισθητήρα.



Σχήμα Β.24: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει του χρόνου αντίδρασης για το δεύτερο αισθητήρα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα πιθανά μοντέλα λειτουργίας του δικτύου για καθένα από τα στοιχεία εξόδου (ταχύτητα, φόρτος, πυκνότητα). Το τελικό μοντέλο είναι αυτό που αποτελούσε το βέλτιστο συνδυασμό μεταξύ ελαχιστοποίησης των μεταβλητών και μεγιστοποίησης του βαθμού εμπιστοσύνης, και για τα τρία στοιχεία εξόδου. Τόσο τα μοντέλα που διαμορφώθηκαν για την αναζήτηση του επιθυμητού, όσο και το τελικό μοντέλο που αξιοποιήθηκε για την παρούσα μελέτη, παρουσιάζονται παρακάτω ανά στοιχείο εξόδου.

-Ταχύτητα

Αρχικά, το μοντέλο διαμορφώθηκε συναρτήσει των 4 παραμέτρων που είχαν οριστεί, του αισθητήρα και του τύπου οχήματος:

$$Speed = \beta_0 + \beta_1 * (speedacc * 10) + \beta_2 * acc + \beta_3 * dec + \beta_4 * reactiontime + \beta_5 * detID + \beta_6 * vehType + e$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.10).

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	5.965	119.009
Επιτάχυνση	0.370	5.539
Επιβράδυνση	0.030	0.449
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-5.050	-35.623
Όχημα = Λεωφορεία	-10.310	-72.721

Πίνακας Β.1: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.

Έπειτα, λόγω μικρής σημαντικότητας, αφαιρέθηκε η παράμετρος *deceleration*:

$$Speed = \beta_0 + \beta_1 ** (speedacc * 10) + \beta_2 * acc + \beta_3 * reactiontime + \beta_4 * detID + \beta_5 * vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	5.965	119.012
Επιτάχυνση	0.370	5.539
Χρόνος αντίδρασης	0.378	1.509
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-5.050	-35.624
Όχημα = Λεωφορεία	-10.310	-72.722

Πίνακας Β.2: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε και η παράμετρος *reaction time*, ενώ προστέθηκε ως παράμετρος το γινόμενο των παραμέτρων του αισθητήρα και του τύπου οχήματος:

$$Speed = \beta_0 + \beta_1 ** (speedacc * 10) + \beta_2 * acc + \beta_3 * detID + \beta_4 * vehType + \beta_5 * DetID * vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	5.965	130.996
Επιτάχυνση	0.370	6.096
Αισθητήρας = ΟΙΑ	2.788	15.304
Όχημα = Λεωφορεία	-2.472	-13.570
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία	-15.676	-60.854

Πίνακας Β.3: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.

Τέλος, προστέθηκαν όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων, ώστε να ληφθούν υπόψη και οι συμμεταβλητότητές τους και προέκυψε το τελικό μοντέλο:

$$Speed = \beta_0 + \beta_1 ** (speedacc * 10) + \beta_2 * acc + \beta_3 * detID + \beta_4 * vehType + \beta_5 * DetID * vehType + \beta_6 ** (speedacc * 10) * DetID + \beta_7 ** (speedacc * 10) * vehType + \beta_8 * acc * DetID + \beta_{10} * acc ** detID * vehType + \beta_9 * acc * vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	6.535	83.466
Επιτάχυνση	-0.232	-1.928
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-2.205	-1.946
Όχημα = Λεωφορεία	9.696	8.559
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία	-12.166	-15.859
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Αποδοχή ορίου ταχύτητας	0.20	2.213
Όχημα = Λεωφορεία & Αποδοχή ορίου ταχύτητας	-1.341	-14.828
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Επιτάχυνση	0.931	5.458
Όχημα = Λεωφορεία & Επιτάχυνση	0.860	5.042
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία & Επιτάχυνση	-1.170	-4.852

Πίνακας Β.4: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της ταχύτητας.

Παρατηρείται ότι, στον αισθητήρα της Οίας για την κατηγορία των λεωφορειών, η ταχύτητα διαμορφώνεται περίπου 12 km/h πιο χαμηλά. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τις υπόλοιπες μεταβλητές που συμμετέχουν στο μοντέλο. Ακόμη, με βάση τις τιμές t-test (κατανομή student), προκύπτει ότι όλες οι μεταβλητές παρουσιάζουν βαθμό εμπιστοσύνης πάνω από 95%, που σημαίνει ότι το 95% της πληροφορίας της λειτουργίας του δικτύου διαμορφώνεται από αυτές τις παραμέτρους.

-Φόρτος

Με βάση την παραπάνω διαδικασία, διαμορφώθηκαν τα ίδια μοντέλα και εδώ, ώστε να διαπιστωθεί αν πληρούνταν οι προϋποθέσεις και για το μέγεθος του φόρτου. Έτσι, αρχικά, το μοντέλο διαμορφώθηκε συναρτήσει των 4 παραμέτρων που είχαν οριστεί, του αισθητήρα και του τύπου οχήματος:

$$Flow = \beta_0 + \beta_1 * (speedacc * 10) + \beta_2 * acc + \beta_3 * dec + \beta_4 * reactiontime + \beta_5 * detID + \beta_6 * vehType + e$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Β.5).

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	3.111	2.428
Επιτάχυνση	8.753	5.122
Επιβράδυνση	-1.161	-0.679
Χρόνος αντίδρασης	-18.822	-2.937
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-440.996	-121.658
Όχημα = Λεωφορεία	-777.269	-214.426

Πίνακας Β.5: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου του φόρτου.

Έπειτα, λόγω μικρής σημαντικότητας, αφαιρέθηκε η παράμετρος *deceleration*:

$$Flow = \beta_0 + \beta_1 ** (speedacc * 10) + \beta_2 * acc + \beta_3 * reactiontime + \beta_4 * detID + \beta_5 * vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	3.111	2.428
Επιτάχυνση	8.753	5.122
Χρόνος αντίδρασης	-18.822	-2.937
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-440.996	-121.660
Όχημα = Λεωφορεία	-777.269	-214.430

Πίνακας Β.6: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου του φόρτου.

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε και η παράμετρος *reaction time*, ενώ προστέθηκε ως παράμετρος το γινόμενο των παραμέτρων του αισθητήρα και του τύπου οχήματος:

$$Flow = \beta_0 + \beta_1 ** (speedacc * 10) + \beta_2 * acc + \beta_3 * detID + \beta_4 * vehType + \beta_5 * DetID * vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	3.111	4.804
Επιτάχυνση	8.753	10.136
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-854.842	-329.974
Όχημα = Λεωφορεία	-1191.115	-459.778
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία	827.691	225.916

Πίνακας Β.7: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου του φόρτου.

Τέλος, προστέθηκαν όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων, ώστε να ληφθούν υπόψη και οι συμμεταβλητότητές τους και προέκυψε το τελικό μοντέλο:

$$Flow = \beta_0 + \beta_1^{**}(speedacc*10) + \beta_2*acc + \beta_3*detID + \beta_4*vehType + \beta_5*DetID*vehType + \beta_6^{**}(speedacc*10) *DetID + \beta_7^{**}(speedacc*10) *vehType + \beta_8*acc*DetID + \beta_{10}*acc**detID*vehType + \beta_9*acc*vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	6.874	6.180
Επιτάχυνση	33.763	19.717
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-735.209	-45.688
Όχημα = Λεωφορεία	-1029.037	-63.947
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία	729.940	66.982
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Αποδοχή ορίου ταχύτητας	-1.736	-1.352
Όχημα = Λεωφορεία & Αποδοχή ορίου ταχύτητας	-5.789	-4.507
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Επιτάχυνση	-33.513	-13.839
Όχημα = Λεωφορεία & Επιτάχυνση	-32.801	-13.545
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία & Επιτάχυνση	32.854	9.514

Πίνακας Β.8: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου του φόρτου.

Παρατηρείται ότι, στον αισθητήρα της Οίας ο φόρτος διαμορφώνεται στα 735 οχήματα λιγότερα από τον αισθητήρα του αεροδρομίου, ενώ για την κατηγορία των λεωφορείων στο σύνολο του δικτύου, ο φόρτος διαμορφώνεται στα 1029 οχήματα λιγότερα ανά ώρα. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τις υπόλοιπες μεταβλητές που συμμετέχουν στο μοντέλο. Ακόμη, με βάση τις τιμές t-test (κατανομή student), προκύπτει ότι όλες οι μεταβλητές παρουσιάζουν βαθμό εμπιστοσύνης πάνω από 99%, εκτός από τη μεταβλητή speed acceptance για τον αισθητήρα της Οίας, που παρουσιάζει επίπεδο εμπιστοσύνης 82%. Το ποσοστό αυτό δεν είναι απολύτως ικανοποιητικό, ωστόσο το μοντέλο διαμορφώνεται κατά αυτό τον τρόπο, ώστε να είναι ενιαίο για όλα τα στοιχεία εξόδου, μιας και η μεταβλητή αυτή περιέχει σημαντικό ποσοστό πληροφορίας για τα υπόλοιπα αποτελέσματα.

-Πυκνότητα

Με βάση την παραπάνω διαδικασία, διαμορφώθηκαν τα ίδια μοντέλα και εδώ, ώστε να διαπιστωθεί αν πληρούνταν οι προϋποθέσεις και για το μέγεθος του φόρτου. Έτσι, αρχικά, το μοντέλο διαμορφώθηκε συναρτήσει των 4 παραμέτρων που είχαν οριστεί, του αισθητήρα και του τύπου οχήματος:

$$Density = \beta_0 + \beta_1*(speedacc*10) + \beta_2*acc + \beta_3*dec + \beta_4*reactiontime + \beta_5*detID + \beta_6*vehType + e$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Β.9).

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	-0.423	-23.971
Επιτάχυνση	0.116	4.947
Επιβράδυνση	-0.016	-0.659
Χρόνος αντίδρασης	-0.154	-1.740
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-5.861	-117.410
Όχημα = Λεωφορεία	-10.127	-202.851

Πίνακας Β.9: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της πυκνότητας.

Έπειτα, λόγω μικρής σημαντικότητας, αφαιρέθηκε η παράμετρος *deceleration*:

$$Density = \beta_0 + \beta_1^{**}(speedacc*10) + \beta_2*acc + \beta_3*reactiontime + \beta_4*detID + \beta_5*vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	-0.423	-23.972
Επιτάχυνση	0.116	4.947
Χρόνος αντίδρασης	-0.154	-1.740
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-5.861	-117.412
Όχημα = Λεωφορεία	-10.127	-202.854

Πίνακας Β.10: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της πυκνότητας.

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε και η παράμετρος *reaction time*, ενώ προστέθηκε ως παράμετρος το γινόμενο των παραμέτρων του αισθητήρα και του τύπου οχήματος:

$$Density = \beta_0 + \beta_1^{**}(speedacc*10) + \beta_2*acc + \beta_3*detID + \beta_4*vehType + \beta_5*DetID*vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	-0.423	-43.279
Επιτάχυνση	0.116	8.932
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-11.360	-290.493
Όχημα = Λεωφορεία	-15.625	-399.570
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία	10.996	198.841

Πίνακας Β.11: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της πυκνότητας.

Τέλος, προστέθηκαν όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων, ώστε να ληφθούν υπόψη και οι συμμεταβλητότητές τους και προέκυψε το τελικό μοντέλο:

$$Density = \beta_0 + \beta_1^{**}(speedacc*10) + \beta_2*acc + \beta_3*detID + \beta_4*vehType + \beta_5*DetID*vehType + \beta_6^{**}(speedacc*10) *DetID + \beta_7^{**}(speedacc*10) *vehType + \beta_8*acc*DetID + \beta_{10}*acc**detID*vehType + \beta_9*acc*vehType + e$$

Μεταβλητές	Value	t-test
Αποδοχή ορίου ταχύτητας	-1.060	-67.75
Επιτάχυνση	0.502	20.84
Αισθητήρας = ΟΙΑ	-14.886	-65.76
Όχημα = Λεωφορεία	-22.989	-101.55
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία	9.382	61.20
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Αποδοχή ορίου ταχύτητας	0.470	26.02
Όχημα = Λεωφορεία & Αποδοχή ορίου ταχύτητας	0.804	44.48
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Επιτάχυνση	-0.548	-16.10
Όχημα = Λεωφορεία & Επιτάχυνση	-0.492	-14.44
Αισθητήρας = ΟΙΑ & Όχημα = Λεωφορεία & Επιτάχυνση	0.538	11.17

Πίνακας Β.12: Αποτελέσματα εκτίμησης του επιλεγμένου απλού μοντέλου της πυκνότητας.

Παρατηρείται ότι, στον αισθητήρα της Οίας η πυκνότητα διαμορφώνεται σχεδόν στα 15 οχήματα λιγότερα ανά ώρα και λωρίδα, ενώ για την κατηγορία των λεωφορείων, η πυκνότητα διαμορφώνεται περίπου 23 οχήματα/ώρα/λωρίδα πιο χαμηλά. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τις υπόλοιπες μεταβλητές που συμμετέχουν στο μοντέλο. Ακόμη, με βάση τις τιμές t-test (κατανομή student), προκύπτει ότι όλες οι μεταβλητές παρουσιάζουν βαθμό εμπιστοσύνης πάνω από 99%, που σημαίνει ότι το 99% της πληροφορίας της λειτουργίας του δικτύου διαμορφώνεται από αυτές τις παραμέτρους.