



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών  
Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης  
Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διερεύνηση στρατηγικών εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης  
τριώροφου υπόγειου χώρου στάθμευσης με χρήση  
προσομοίωσης**



**ΛΟΥΚΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**

Επιβλέπουσα: Ι. ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΥ, Επίκουρη Καθηγήτρια Τομέα Έργων Υποδομής  
και Αγροτικής Ανάπτυξης

ΜΑΡΤΙΟΣ 2016  
ΑΘΗΝΑ

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Σε αυτό το σημείο νιώθω χρέος μου να ευχαριστήσω τους κ. Κωνσταντίνο Αντωνίου για την ανάθεση του θέματος της πτυχιακής μου εργασίας και κ. Ιωάννα Σπυροπούλου για την άψογη συνεργασία κατά τη διάρκεια της εκπόνησης. Η συνεχής πνευματική καθοδήγηση της καθώς και η άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας αποτέλεσαν κίνητρο για την περαίωση της εργασίας μου.

Λουκάς Ευάγγελος

Μάρτιος 2016

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	5
Abstract.....	5
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....</b>	<b>9</b>
2.1 Εκκένωση.....	9
2.1.1 Γενικά.....	9
2.1.2 Εκκένωση μεγάλης κλίμακας.....	10
2.1.3 Εκκένωση μικρής κλίμακας.....	12
2.1.4 Εκκένωση κατά στάδια (Staged evacuation).....	13
2.1.5 Μέθοδοι σχεδιασμού της εκκένωσης.....	14
2.1.6 Συστήματα προειδοποίησης και πληροφόρησης οδηγών.....	15
2.2 Προσομοίωση.....	18
2.2.1 Προσέγγιση προσομοίωσης εκκένωσης.....	19
2.2.2 Λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN.....	22
2.3 Ανάλυση ευαισθησίας.....	27
2.3.1 Γενικά.....	27
2.3.2 Περιορισμοί ανάλυσης ευαισθησίας.....	29
2.3.3 Συμπεριφορά οδηγών.....	31
2.3.4 Τεχνικές ανάλυσης ευαισθησίας.....	33
2.3.5 Ψευδοτυχαίοι και μερικώς τυχαίοι αριθμοί.....	38
<b>3. Σχεδιασμός και υλοποίηση μεθοδολογίας.....</b>	<b>40</b>
3.1 Γενικά.....	40
3.2 Σχεδιασμός μεθοδολογίας πειράματος.....	41
3.3 Σχεδιασμός δικτύου προσομοίωσης.....	44
3.4 Επιλογή παραμέτρων.....	46
3.5 Σχεδιασμός κυκλοφοριακών ρυθμίσεων εκκένωσης.....	46
3.6 Μέθοδοι σχεδιασμού της εκκένωσης.....	50
3.7 Ανάλυση ευαισθησίας.....	51
<b>4. Αποτελέσματα.....</b>	<b>53</b>
4.1 Αξιολόγηση σεναρίων.....	53
4.2 Ανάλυση ευαισθησίας.....	55
4.2.1 Μέθοδος input and output scatter plot (διαγράμματα συσχέτισης).....	56
4.2.2 Μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης (variance based method).....	58
4.2.3 Μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης με χρήση μερικώς τυχαίων αριθμών.....	62
4.2.4 Αποτελέσματα στα υπόλοιπα σενάρια.....	64
<b>5. Συμπεράσματα.....</b>	<b>70</b>
<b>6. Αναφορές.....</b>	<b>73</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Χρόνοι εκκένωσης σεναρίων για ένα ζεύγος παραμέτρων.....	53
Πίνακας 4.2: Τελικοί χρόνοι εκκένωσης σεναρίων.....	65
Πίνακας 4.3: Επίδραση του ποσοστού συμμόρφωσης στο χρόνο εκκένωσης.....	67
Πίνακας 4.4: Τιμές δεικτών επίδρασης πρώτης και συνολικής ευαισθησίας.....	68

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Οι θέσεις των οχημάτων στο μοντέλο του Gipps (Olstam and Tapani, 2004).....	27
Σχήμα 2.2: Ιδανικό σχεδιάγραμμα μιας πιθανής ανάλυσης ευαισθησίας βασισμένης σε δειγματοληψία (Saltelli, 1999).....	33
Σχήμα 2.3: Ψευδοτυχαίοι και μερικώς τυχαίοι αριθμοί.....	39
Σχήμα 3.1: Μεθοδολογία.....	44
Σχήμα 3.2: Απεικόνιση κεντροειδών.....	45
Σχήμα 3.3: Σενάριο 1 (Σενάριο Βάσης).....	47
Σχήμα 3.4: Σενάριο 2 (Ράμπες).....	48
Σχήμα 3.5: Σενάριο 3 (Ράμπες & έξοδοι).....	48
Σχήμα 3.6: Σενάριο 4 (Ράμπες & έξοδοι & 2 λωρίδες).....	49
Σχήμα 3.7: Σενάριο 5 (Ράμπες & έξοδοι & 2 λωρίδες & αντίδρόμηση).....	49
Σχήμα 3.8: Εκκένωση κατά στάδια (Κλείσιμο ραμπών ανόδου).....	50
Σχήμα 3.9: Εκκένωση με παροχή πληροφορίας.....	51
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα συσχέτισης χρόνου αντίδρασης (input and output method).....	57
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα συσχέτισης ελάχιστης απόστασης οχημάτων (input and output method).....	57
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα συσχέτισης μέγιστης επιτάχυνσης (input and output method).....	58
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα συσχέτισης χρόνου αντίδρασης (variance based method).....	59
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα συσχέτισης μέγιστης επιτάχυνσης (variance based method).....	59
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα μεταβολής δείκτη πρώτης επίδρασης (ψευδοτυχαίοι αριθμοί).....	61
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα μεταβολής δείκτη συνολικής επίδρασης (ψευδοτυχαίοι αριθμοί).....	61
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα συσχέτισης χρόνου αντίδρασης (ψευδοτυχαίοι αριθμοί).....	62
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα συσχέτισης μέγιστης επιτάχυνσης (ψευδοτυχαίοι αριθμοί).....	63
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα μεταβολής δείκτη πρώτης επίδρασης (ψευδοτυχαίοι αριθμοί).....	63
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα μεταβολής δείκτη συνολικής επίδρασης (ψευδοτυχαίοι αριθμοί).....	63
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα χρόνων εκκένωσης σεναρίων για τις μεθόδους σχεδιασμού της εκκένωσης.....	67

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Διαγράμματα συσχέτισης σεναρίων.....	79
--------------------------------------	----

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης.....	84
--	----

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν όλες οι σύγχρονες πυκνοδομημένες μεγαλουπόλεις είναι αυτό της στάθμευσης. Η Αθήνα φυσικά δε θα μπορούσε να αποτελεί εξαίρεση. Μία λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελεί η κατασκευή υπόγειων χώρων στάθμευσης. Σχεδόν κάθε σύγχρονο κτίριο (κατοικίες, γραφείο κτλ) διαθέτει πλέον το δικό της υπόγειο χώρο στάθμευσης. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως ο σχεδιασμός κι η οργάνωση σχεδίων εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης αυτών των χώρων αποτελεί προτεραιότητα. Σε αυτήν την εργασία διερευνώνται οι στρατηγικές εκκένωσης ενός τριώροφου υπόγειου χώρου στάθμευσης με χρήση κυκλοφοριακής προσομοίωσης. Ο χώρος στάθμευσης που εξετάζεται είναι ο Cityzen <<Δικαστήρια Ευελπίδων>>, ο οποίος βρίσκεται στην Αθήνα και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή Πεδίον του Άρεως μεταξύ των οδών Ευελπίδων και Μουστοξύδη. Αρχικά σχεδιάζεται το ψηφιακό του μοντέλο στο πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN και στη συνέχεια δημιουργούνται πέντε διαφορετικά σενάρια εκκένωσης τροποποιώντας τις ρυθμίσεις της κυκλοφορίας εντός του χώρου και στις εισόδους-εξόδους του χώρου στάθμευσης με σκοπό να επιτευχθεί η εκκένωση στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας εξετάζεται επίσης η επιρροή βασικών παραμέτρων της κίνησης των οχημάτων στο χρόνο εκκένωσης. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι: ο χρόνος αντίδρασης, η μέγιστη επιτάχυνση κι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των οχημάτων. Για κάθε σενάριο εξετάζονται τρεις μέθοδοι σχεδιασμού της εκκένωσης. Εκκένωση χωρίς πληροφόρηση, όπου οι οδηγοί δρουν κατά το δοκούν χωρίς να ακολουθούν οδηγίες. Εκκένωση με πληροφόρηση, όπου παρέχονται οδηγίες εκκένωσης στους οδηγούς και ταυτόχρονα εξετάζεται η διαφοροποίηση του χρόνου εκκένωσης σε σχέση με το ποσοστό συμμόρφωσης των οδηγών με τις πληροφορίες. Τέλος κατά τον τρίτο τρόπο εκκένωσης υλοποιείται ένα σχέδιο εκκένωσης κατά στάδια (staged evacuation) με έλεγχο των κινήσεων των οδηγών με τη χρήση μπαρών (control). Στη συνέχεια κάθε σενάριο εξετάζεται και για τους τρεις τρόπους εκκένωσης με την μέθοδο ανάλυσης της ευαισθησίας. Με τη μέθοδο αυτή αντιμετωπίζονται οι δυσκολίες συλλογής δεδομένων πραγματικού χρόνου για τις παραμέτρους του μοντέλου, εντοπίζονται οι σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα το χρόνο εκκένωσης και τελικά υπολογίζεται ο χρόνος εκκένωσης για κάθε σενάριο. Από τα αποτελέσματα της εργασίας προκύπτει ότι ο ελάχιστος χρόνος εκκένωσης επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της εκκένωσης κατά στάδια, η οποία προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση χρόνου.

## **Abstract**

One of the most important problems modern big cities deal with is parking. Athens is not an exception to this rule. The construction of underground parking garages constitutes a possible solution to this problem. Almost every modern building includes its own underground parking garage. Therefore it is considered essential to design and implement emergency evacuation plans for all these places. This paper deals with the evacuation of the three-level indoor parking lot “Cityzen” located in Athens. First, a simulation model was developed through AIMSUN and then five evacuation scenarios considering traffic management were designed in order to achieve minimum evacuation time. Each scenario is simulated under three different conditions. Concerning the first one, the drivers are free to act on their own without following any instructions. In the second one, drivers are given clear directions and the effect of the compliance rate on the evacuation time is observed. Finally, in the third one, drivers follow a staged evacuation plan where the evacuation route of the vehicles is controlled by traffic barriers. A multi-step sensitivity analysis framework is implemented on all the scenarios to overcome the uncertainties that could emerge from the model assumptions, inaccuracies and data shortage as well as to estimate the total evacuation time. The results of this research prove that minimum evacuation time occurs during staged evacuation which offers a significant saving of time.

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρόλο που οι στρατηγικές εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης, ιδίως τα τελευταία χρόνια, αποτελούν αντικείμενο εκτεταμένης διερεύνησης δεν ισχύει το ίδιο και για τις περιπτώσεις εκκένωσης κλειστών χώρων μικρής κλίμακας, όπως οι υπόγειοι χώροι στάθμευσης. Οι περισσότερες έρευνες αφορούν εκκενώσεις μεγάλης κλίμακας ανοικτών χώρων, όπως εκκένωση πόλεων, εργοστασίων, γηπέδων κτλ. Η συνεχής αύξηση του αριθμού των κλειστών χώρων στάθμευσης καθιστά επιτακτική την ανάγκη διερεύνησης αυτών των ειδικών περιπτώσεων, καθώς συνιστούν χώρους υψηλής επικινδυνότητας σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, καθώς η περιορισμένη πρόσβαση, στοιχείο που διακρίνει την πλειοψηφία αυτών των χώρων, αποτρέπει τη δυνατότητα μαζικής και άμεσης εκκένωσης της περιοχής.

Ένα ακόμα γεγονός που μετατρέπει σε πρόκληση τη διαδικασία εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης κλειστών χώρων είναι η αντίδραση κι η συμπεριφορά των οδηγών υπό αγχωτικές καταστάσεις. Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι αμφίβολη η συμμόρφωση των οδηγών με τις οδηγίες που τους παρέχονται. Οι οδηγοί αναμένεται να οδηγούν πιο επιθετικά, καταλήγοντας να αφήνουν μικρότερα κενά τόσο στη συμπεριφορά ακολουθίας οχημάτων, όσο και στην αλλαγή λωρίδας. Μία ακόμα δυσκολία που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι ερευνητές είναι η συλλογή αντιπροσωπευτικών δεδομένων πραγματικού χρόνου υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης καθώς οι εκκενώσεις έκτακτης ανάγκης είναι σπάνια φαινόμενα και δε συναντιούνται σε καθημερινή βάση κι επιπλέον είναι πιθανό κάθε εκκένωση να έχει το δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και να χρησιμεύει μόνο για σχέδια εκκένωσης του ίδιου χώρου. Είναι εμφανές λοιπόν πως η ακριβής εκτίμηση των παραμέτρων ενός μοντέλου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη.

Το λογισμικό προσομοίωσης που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη διερεύνηση είναι το πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), το οποίο κρίθηκε ως το πιο κατάλληλο ανάμεσα σε μία πληθώρα επιλογών. Το AIMSUN είναι ένα μικροσκοπικό λογισμικό προσομοίωσης κυκλοφορίας οδικών δικτύων και στη συγκεκριμένη περίπτωση αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες του για τη διερεύνηση ενός κλειστού χώρου στάθμευσης. Δημιουργήθηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια εκκένωσης και εξετάστηκαν εκτενώς το καθένα ξεχωριστά μέσα από ένα μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων. Για εξοικονόμηση χρόνου

χρησιμοποιήθηκαν επίσης οι προγραμματιστικές γλώσσες Python και Matlab, οι οποίες καλούν το πρόγραμμα, εισάγουν τις παραμέτρους του μοντέλου και εκτελούν τις απαραίτητες προσομοιώσεις.

Τέλος καθώς τα περισσότερα μοντέλα και συστήματα που είναι διαθέσιμα κάνουν υποθέσεις για τη συμπεριφορά των οδηγών, οι οποίες βασίζονται σε δεδομένα που συλλέχθηκαν υπό κανονικές συνθήκες και δεν αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά των οδηγών υπό πίεση, κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή ανάλυσης ευαισθησίας, ώστε να προσδιοριστούν οι πιο σημαντικές παράμετροι και να εξαλειφθούν οι ανακρίβειες και τα σφάλματα που περιέχει το μοντέλο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο συγκεντρώνεται όλη η βιβλιογραφία της εργασίας και αναλύονται συγκεκριμένες έννοιες όπως η εκκένωση, η κυκλοφοριακή προσομοίωση και η ανάλυση ευαισθησίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται και υλοποιείται η μεθοδολογία της εργασίας, η οποία περιγράφει όλα τα στάδια της διαδικασίας της προσομοίωσης, από τον ορισμό των στοιχείων εισόδου μέχρι και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ορίζονται τα στοιχεία εισόδου του συστήματος, ο πίνακας προέλευσης – προορισμού (OD matrix) και το μαθηματικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί. Επίσης δημιουργούνται τα σενάρια, επιλέγονται οι μέθοδοι σχεδιασμού της εκκένωσης και οι παράμετροι που θα εξεταστούν, καθώς και οι μέθοδοι ανάλυσης της ευαισθησίας που θα χρησιμοποιηθούν

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται και αναλύονται τα αποτελέσματα της εργασίας με τη χρήση πινάκων και διαγραμμάτων. Για κάθε σενάριο και για κάθε διαφορετικό τρόπο εκκένωσης καταγράφονται οι χρόνοι εκκένωσης (μέγιστος, ελάχιστος και μέσος) και το ποσοστό μείωσης του χρόνου εκκένωσης σε σχέση με το σενάριο βάσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της εργασίας, εξετάζεται η αποτελεσματικότητα των σεναρίων και των τρόπων διαχείρισης της κυκλοφορίας, αξιολογείται η χρησιμότητα της συγκεκριμένης εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.



## **2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που συγκεντρώθηκε από τη διεθνή βιβλιογραφία και χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Αναλύονται συγκεκριμένες έννοιες όπως αυτές της εκκένωσης, της πληροφόρησης και της συμμόρφωσης των οδηγών, των μοντέλων ακολουθίας και της ανάλυσης ευαισθησίας, πάνω στις οποίες βασίστηκε η συγκεκριμένη εργασία.

### **2.1 ΕΚΚΕΝΩΣΗ**

Εκκένωση ονομάζεται μια επείγοντος χαρακτήρα διαδικασία που έπεται ενός γεγονότος εκτάκτου ανάγκης (πυρκαγιά, σεισμός, πλημμύρα κοκ) και προβλέπει την άμεση απομάκρυνση πεζών και οχημάτων και τη μετάβαση αυτών σε απόσταση ασφαλείας. Η αποτελεσματικότητα της εκκένωσης εξαρτάται κατά μεγάλο ποσοστό από τον προγραμματικό και προληπτικό σχεδιασμό της. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια οι διαδικασίες της εκκένωσης τυγχάνουν αντικείμενο ευρείας διερεύνησης. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν τη διαδικασία της εκκένωσης προκύπτουν διάφορες κατηγορίες, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.

#### **2.1.1 Γενικά**

Από τα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα και έπειτα μοντέλα εκκένωσης αναπτύσσονται με σκοπό να αναλύσουν και να αξιολογήσουν τα σχέδια εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης. Οι πρώτες έρευνες τη δεκαετία του ογδόντα επικεντρώθηκαν κυρίως στην εκκένωση σε περίπτωση ατυχήματος σε πυρηνικά εργοστάσια λόγω του ατυχήματος που συνέβη στο Three Mile Island το 1979. Έπειτα μετά από μία σειρά από καταστροφικούς τυφώνες που έπληξαν τις ακτές των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής τη δεκαετία του ενενήντα το ενδιαφέρον των μελετών εκκένωσης στράφηκε στην αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων. Μετά από την ενδεκάτη Νοεμβρίου 2001 και το τρομοκρατικό χτύπημα στο Διεθνές Κέντρο Εμπορίου των Ηνωμένων Πολιτειών, γνωστό και ως Δίδυμοι Πύργοι η έρευνα επικεντρώθηκε στην εκκένωση μεγάλων δημόσιων χώρων υπό την απειλή βομβιστικών και τρομοκρατικών επιθέσεων. Αργότερα τα τσουνάμι που έπληξαν περιοχές της Ανατολικής Ασίας, όπως η Ινδονησία και οι μεγάλες πυρκαγιές στην Αυστραλία οδήγησαν σε εξειδικευμένες έρευνες για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις. Οι πιο πρόσφατες το 2011 επικέντρωσαν την προσοχή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και την συνεχή άνοδο της στάθμης της θάλασσας, που

οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας και το λιώσιμο των πάγων στους Πόλους, γεγονός που απειλεί περιοχές που βρίσκονται σε υψόμετρο κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, όπως η Ολλανδία (Barrett et al. 2000). Σε πολλές παλαιότερες έρευνες, η εκκένωση χαρακτηρίζεται ως ένα έκτακτο γεγονός με πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά ανά περίπτωση με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν πολλά νέα μοντέλα εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης. Μερικά από αυτά εφαρμόστηκαν μάλιστα εκτενώς, όπως το μικροσκοπικό μοντέλο OREMS (Rathi et al. 1993) και τα μακροσκοπικά μοντέλα DYNEV (KLD, 1984) και MASSVAC (Hobeika and Jamei, 1985). Το μοντέλο MASSVAC θεωρείται ο διάδοχος του μοντέλου NETVAC (Sheffi et al. 1980), ενώ το OREMS βασίστηκε στο μικροσκοπικό μοντέλο CORSIM, το οποίο προσομοιώνει φυσιολογικές συνθήκες κυκλοφορίας. Πιο πρόσφατα ένας μεγάλος αριθμός μελετών εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης διεξάγεται με τη χρήση γνωστών προγραμμάτων προσομοίωσης κυκλοφορίας οδικών δικτύων, συμπεριλαμβανομένων τόσο μικροσκοπικών μοντέλων, όπως τα PARAMICS (Cova and Johnson, 2003), CORSIM (Williams et al. 2007), VISSIM (Han and Yuan, 2005) όσο και μεσοσκοπικά ή μακροσκοπικά, όπως τα DYNASMART (Murray-Tuite, 2007), DynaMIT (Balakrishna et al. 2008), DynysT (Noh et al. 2009), TransCAD (Wang et al. 2010) και INDY (Klunder et al. 2009). Σε ορισμένες έρευνες που χρησιμοποιούν μικροσκοπικά μοντέλα, οι παράμετροι του μοντέλου που περιγράφουν την οδηγική συμπεριφορά, όπως ο χρόνος αντίδρασης και η επιτάχυνση αναπροσαρμόστηκαν για να ταιριάζουν σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπου κυριαρχεί η βιασύνη το άγχος και η αβεβαιότητα (Tu et al. 2010). Πέρα απ' αυτό η δομή του μοντέλου και οι υπόλοιπες παράμετροι δεν αλλάζουν σημαντικά.

### **2.1.2 Εκκένωση μεγάλης κλίμακας**

Ο σχεδιασμός εκκενώσεων εκτάκτου ανάγκης, μεγάλης κλίμακας αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης διερεύνησης. Οι εκκενώσεις μεγάλης κλίμακας περιλαμβάνουν την μαζική μετακίνηση ανθρώπων και οχημάτων για να αντιμετωπίσουν μία απειλή σε εξέλιξη ή μία μελλοντική απειλή. Οι απειλές αυτές μπορεί να είναι είτε φυσικές (τσουνάμι, σεισμοί, πυρκαγιές, πλημμύρες) είτε ανθρωπογενείς (τρομοκρατικά χτυπήματα, πυρηνικά ατυχήματα, πόλεμοι). Σε κάποια σημεία, όπως σε μεγάλα εμπορικά κέντρα, σε οικισμούς κοντά σε δασική έκταση, περιοχές κοντά σε πυρηνικά εργοστάσια η ύπαρξη αποτελεσματικού και γρήγορου σχεδίου εκκένωσης είναι ζωτικής σημασίας

(Johansson et al. 2010). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση της πυρκαγιάς στο Oakland Hill, όπου ελλείπει σχεδίου εκκένωσης χάθηκαν ανθρώπινες ζωές ακόμα και μισή ώρα μετά την μετά το ξέσπασμα της πυρκαγιάς (Church and Sexton, 2002). Μία ακόμα περίπτωση απουσίας σχεδίου εκκένωσης μεγάλης κλίμακας που κόστισε την απώλεια πάνω από 16000 ανθρώπων είναι το τσουνάμι που έπληξε την Ινδονησία το 2004. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μάλιστα η απουσία οποιουδήποτε συστήματος πληροφόρησης του πληθυσμού ήταν προκλητική (Asian Development Bank, 2006). Συχνά η οργάνωση των στρατηγικών εκκένωσης βασίζεται στην εμπειρία από παλαιότερα περιστατικά. Σε μεγάλες περιοχές που έχουν πληγεί ή πλήττονται συχνά από φυσικές ή ανθρωπογενείς καταστροφές και επιβάλλεται η εκκένωσή τους, αρχές όπως η αμερικανική Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαχείρισης Εκτάκτων Αναγκών (FEMA), έχουν αναπτυχθεί μοντέλα όπως το DYNEV (KLD Associates), τα οποία έχουν ως αντικείμενο τη δημιουργία σχεδίων εκκένωσης. Άξια αναφοράς είναι επίσης τα μοντέλα CLEAR, DYMOD, MASSVAC και NETSIM. Τα μοντέλα αυτά αποτελούνται από ένα σύνολο υπολογιστικών προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του χρόνου εκκένωσης και τη δημιουργία σχεδίων εκκένωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής για διαφορετικά συμβάντα ή σενάρια, όπως καλές ή κακές καιρικές συνθήκες ή αν το σενάριο διαδραματίζεται την ημέρα ή τη νύχτα. Τα μοντέλα επιτρέπουν τον πειραματισμό με παραμέτρους όπως εναλλακτικές διαδρομές και προορισμούς, διαχείριση κυκλοφορίας αλλά και δείκτες ανταπόκρισης και συμμόρφωσης του πληθυσμού που εκκενώνει την περιοχή (Chu et al. 2004). Έχει αναπτυχθεί επίσης, ένα μοντέλο εκτίμησης και πρόβλεψης των κυκλοφοριακών συνθηκών για χρήση σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης το οποίο εφαρμόστηκε στην εκκένωση της κεντρικής περιοχής της πόλης της Βοστώνης (Balakrishna et al. 2008).

Επίσης, μακροσκοπικές μέθοδοι δυναμικών μοντέλων κατανομής της κυκλοφορίας DTA (dynamic traffic assignment) εφαρμόστηκαν για την εκκένωση μεγάλων πόλεων και περιοχών, με χρήση των προγραμμάτων προσομοίωσης MITSIM και DYNASMART. Το πλεονέκτημα με την χρήση αυτών των μεθόδων είναι πως μπορούν να προσεγγίσουν με πολύ απλό και κατανοητό τρόπο τις δυναμικές της εκκένωσης. Ωστόσο η χρήση μακροσκοπικών μεθόδων προσομοίωσης δεν μπορεί να αποτυπώσει ικανοποιητικά την συμπεριφορά των οδηγών που είναι αποτέλεσμα της ανομοιογένειας που επικρατεί σε μια ομάδα οδηγών με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Για το λόγο αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί και μικροσκοπικά μοντέλα για την διερεύνηση εκκενώσεων μεγάλης κλίμακας. Τα μοντέλα αυτά αντιμετωπίζουν τον κάθε οδηγό ως ξεχωριστή οντότητα με τα δικά της χαρακτηριστικά. Έτσι αποτυπώνονται με πιο ρεαλιστικό τρόπο οι διαφορές που μπορεί να υπάρχουν στην οδηγική συμπεριφορά δύο διαφορετικών ατόμων, όπως παραδείγματος μεταξύ ενός νεαρού οδηγού και ενός υπερήλικα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διερεύνηση στρατηγικών εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης σε περίπτωση πλημμύρας του νησιού Wilhelmsburg στην πόλη του Αμβούργου στη Γερμανία λόγω κατάρρευσης του τεχνητού φράγματος (Durst et al. 2014). Το ιδιαίτερο στοιχείο σε αυτήν τη διερεύνηση είναι πως ο μόνος τρόπος εκκένωσης της περιοχής είναι μέσω γεφυρών που συνδέουν την περιοχή αυτή με το Αμβούργο. Για την υλοποίηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το μικροσκοπικό πρόγραμμα προσομοίωσης MATSim. Οι μικροσκοπικές προσομοιώσεις βασίζονται συχνά στα μοντέλα CA (cellular automata), όπου ο κάθε οδηγός έχει διαφορετικά εύρη παραμέτρων και γενικά μια πιο σύνθετη συμπεριφορά. Αναφέρεται ενδεικτικά ότι υπάρχει η δυνατότητα ο οδηγός να έχει την τάση να αγνοεί τις προειδοποιητικές πινακίδες ή να ακολουθεί το δρομολόγιο που επιλέγουν τα προπορευόμενα οχήματα. Υιοθετώντας αυτές τις σύνθετες συμπεριφορές στα μοντέλα συχνά οδηγεί σε αύξηση του χρόνου εκκένωσης (Lammel and Flötteröd 2009).

### **2.1.3 Εκκένωση μικρής κλίμακας**

Οι εκκενώσεις μικρής, τοπικής κλίμακας αφορούν την εκκένωση χώρων στάθμευσης κατά κύριο λόγο. Δεν αποτελούν αντικείμενο εκτεταμένης διερεύνησης για τον λόγο πως κάθε σχέδιο εκκένωσης μικρής κλίμακας αφορά μόνο το συγκεκριμένο χώρο στάθμευσης και τα αποτελέσματα-συμπεράσματα της έρευνας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες περιπτώσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε χώρος στάθμευσης έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από τους υπόλοιπους, όπως πολυπλοκότητα της γεωμετρίας, διαφορετικό αριθμό εισόδων-εξόδων, κίνηση σε μονή ή διπλή κατεύθυνση, διαδρόμους και ράμπες, κυκλοφορία σε διαφορετικές ταχύτητες κτλ. Οι εκκενώσεις μικρής κλίμακας είναι λοιπόν μια ειδική κατηγορία εκκενώσεων πλην όμως απαραίτητη για την πρόληψη και αντιμετώπιση μιας πιθανής απειλής. Οι Caicedo et al. (2006) χρησιμοποίησαν επίσης ένα μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης για την βέλτιστη αναπαράσταση της κυκλοφορίας σε έναν υπόγειο χώρο στάθμευσης. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται μικροσκοπικές μέθοδοι προσομοίωσης, σε

προγράμματα όπως τα Transmodeler, AIMSUN, PARAMISCS και VISSIM, καθώς ζητούμενο σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η εκτίμηση του χρόνου εκκένωσης με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια (Hidas, 2005).

#### **2.1.4 Εκκένωση κατά στάδια (Staged Evacuation)**

Μία μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως σε καταστάσεις εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης είναι αυτή της εκκένωσης κατά στάδια (staged evacuation). Η φιλοσοφία αυτής της μεθόδου είναι να παρέχει προτεραιότητα στην κίνηση των οχημάτων που διατρέχουν άμεσο κίνδυνο μπλοκάροντας την κίνηση των υπόλοιπων οχημάτων στο δίκτυο (Liu et al. 2006). Η στρατηγική, σταδιακή εκκένωση του δικτύου οδηγεί σε μείωση του χρόνου εκκένωσης, καθώς με τον τρόπο αυτό διανέμεται καλύτερα ο φόρτος των οχημάτων στο χρονικό διάστημα της εκκένωσης και μειώνει έτσι τα επίπεδα συμφόρησης του οδικού δικτύου. Το πιο κομβικό σημείο για τη σωστή εκτέλεση της εκκένωσης κατά στάδια είναι ο σωστός καταρτισμός των ζωνών εκκένωσης. Σε ένα χώρο στάθμευσης με πολλά επίπεδα, ο κάθε όροφος μπορεί να αποτελεί και μία ζώνη. Ταυτόχρονα ένα επίπεδο του χώρου στάθμευσης μπορεί να περιέχει πολλές διαφορετικές ζώνες εκκένωσης. Το κοινό στοιχείο των οχημάτων που βρίσκονται στην ίδια ζώνη είναι ο χρόνος εκκίνησης. Κάθε ζώνη ξεκινάει τη διαδικασία εκκένωσης όταν είναι η σειρά της και κινείται απρόσκοπτη, χωρίς να διασταυρώνεται με άλλα κινούμενα οχήματα. Έτσι αποφεύγεται ο σχηματισμός ουρών και καθυστερήσεων. Αν καθοριστεί σωστά το χρονικό σημείο έναρξης της εκκένωσης για κάθε ζώνη το αποτέλεσμα θα είναι η εκκένωση των οχημάτων σε συνεχή ροή με μείωση του αριθμού των διασταυρώσεων στο ελάχιστο δυνατό (Liu et al. 2006). Η μέθοδος αυτή προτιμάται επίσης στις περιπτώσεις που η περιοχή εκκένωσης είναι έντονα αστική, με υψηλές πυκνότητες πληθυσμού, αφού με τον τρόπο αυτό, υπάρχει καλύτερη διαχείριση του οδικού δικτύου, χωρίς να προκαλούνται συνθήκες έντονης κυκλοφοριακής συμφόρησης (Zhan and Chen, 2008). Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται σημαντική μείωση του χρόνου εκκένωσης των οχημάτων, αλλά και αύξηση της ασφάλειας της διαδικασίας, καθώς σε καθεστώς έκτακτης ανάγκης το άγχος και ο πανικός που διακατέχει τους οδηγούς καθιστά τις διασταυρώσεις κινούμενων οχημάτων σημείο υψηλής επικινδυνότητας.

Επίσης, έχει διερευνηθεί και προταθεί η χρήση ενός εναλλακτικού μοντέλου εκκένωσης κατά στάδια, στο οποίο το οδικό δίκτυο χωρίζεται σε κελιά και οι μετακινήσεις των οχημάτων πραγματοποιούνται από κελί σε κελί με βάση ορισμένους κανόνες (Daganzo, 1995). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στην οργάνωση της εκκένωσης και λαμβάνει κρίσιμα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την εκκένωση κατά στάδια (Liu et al. 2006).

### **2.1.5 Μέθοδοι σχεδιασμού της εκκένωσης**

Οι μέθοδοι σχεδιασμού της εκκένωσης καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι αρμόδιες αρχές θα καθοδηγήσουν τους οδηγούς ώστε να ακολουθήσουν τη βέλτιστη διαδρομή για να επιτευχθεί η εκκένωση στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Η μία επιλογή είναι αυτή του απόλυτου ελέγχου της κίνησης των οχημάτων με τη χρήση μπαρών ελέγχου της κυκλοφορίας ή άλλων παρόμοιων μεθόδων (control). Στα θετικά αυτής της μεθόδου συγκαταλέγεται η υλοποίηση της εκκένωσης σύμφωνα με το πλάνο καθώς δεν αφήνει περιθώρια αυτοσχεδιασμού και μη συμμόρφωσης των οδηγών με τις οδηγίες εκκένωσης και έτσι επιτυγχάνεται η εκκένωση στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Η μέθοδος έλεγχου της κυκλοφορίας των οχημάτων είναι η πλέον ενδεδειγμένη επιλογή στην εκκένωση μικρής κλίμακας κατά στάδια, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις για τη βέλτιστη λειτουργία του σχεδίου εκκένωσης το βασικό στοιχείο είναι η διασφάλιση της έναρξης εκκένωσης κάθε ζώνης στο προβλεπόμενο χρονικό σημείο (Liu et al. 2006). Μειονέκτημα του ελέγχου κυκλοφορίας των οχημάτων αποτελεί το γεγονός πως δεν είναι εύκολη η εφαρμογή της σε εκκενώσεις μεγάλης κλίμακας. Επίσης πρόκειται για μια μέθοδο ιδανική για το σύστημα σαν σύνολο (system optimal) και όχι για το κάθε όχημα μεμονωμένα (user optimal). Αυτό σημαίνει ότι η εκκένωση πραγματοποιείται με κριτήριο την εξασφάλιση του ελάχιστου δυνατού συνολικού χρόνου εκκένωσης, χωρίς ωστόσο να εξασφαλίζεται απαραίτητα ο ελάχιστος δυνατός χρόνος για κάθε οδηγό ξεχωριστά. Παρ' όλο που αυτό το γεγονός φαίνεται το ιδανικό, δεν είναι το ιδεατό από ηθικής σκοπιάς. Το σύστημα επιτυγχάνει τον ελάχιστο χρόνο εκκένωσης σε βάρος όμως των οδηγών που καλούνται να ξεκινήσουν τελευταίοι τη διαδικασία της εκκένωσης (Jahn et al. 2005). Ηθικά ο συγκεκριμένος τρόπος εκκένωσης θεωρείται άδικος για τους οδηγούς που καλούνται να περιμένουν καθηλωμένοι μέχρι να έρθει η σειρά τους να ξεκινήσουν την εκκένωση. Πέρα όμως από το ηθικό κομμάτι, η απαγόρευση κυκλοφορίας κι η καθήλωση των οδηγών σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης,

όπου κυριαρχούν το άγχος κι ο πανικός μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα στη διαδικασία της εκκένωσης, καθώς μπορεί να επικρατήσει πλήρης αναρχία και τα αποτελέσματα να είναι τα ακριβώς αντίθετα από τα επιθυμητά.

Ο δεύτερος τρόπος κατεύθυνσης της κυκλοφορίας των οχημάτων είναι η παροχή πληροφόρησης στους οδηγούς ως προς τη βέλτιστη διαδρομή εκκένωσης. Σε αυτήν την περίπτωση οι οδηγοί λαμβάνουν τις οδηγίες εκκένωσης (information) και στη συνέχεια καλούνται να επιλέξουν αν θα συμμορφωθούν με αυτές ή όχι (compliance). Η εκκένωση εξαρτάται από τον χρόνο αναχώρησης των οδηγών, τη διαδρομή που θα ακολουθήσουν και τον προορισμό. Ο οδηγός επιλέγει να συμμορφωθεί ή όχι με τις πληροφορίες που λαμβάνει με βάση το πόσο απέχουν οι οδηγίες από τις προτιμήσεις του, από την πρόθεση του να συμβιβαστεί με τις οδηγίες και από την ποιότητα των οδηγιών (Pel et al. 2010). Η ποιότητα της πληροφορίας επηρεάζει άμεσα το ποσοστό συμμόρφωσης (Chen et al. 2000). Πολλές έρευνες έχουν δείξει επίσης πως το ποσοστό συμμόρφωσης των οδηγών με τις οδηγίες είναι απόλυτα συνδεδεμένο με τον χρόνο εκκένωσης. Μικρό ποσοστό συμμόρφωσης με τις οδηγίες εκκένωσης μπορεί αποφέρει σημαντικές καθυστερήσεις στο σύστημα και αυξάνει το χρόνο εκκένωσης. Η παροχή πληροφοριών είναι ο πλέον διαδεδομένος τρόπος χειρισμού της κυκλοφορίας των οχημάτων σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε εκκενώσεις μεγάλης όσο και σε μικρής κλίμακας. Ο τρόπος παροχής πληροφοριών στους οδηγούς θα παρουσιαστεί στην αμέσως επόμενη ενότητα.

### **2.1.6 Συστήματα προειδοποίησης και πληροφόρησης οδηγών**

Όπως αναφέρθηκε στο παραπάνω κεφάλαιο ένας τρόπος ελέγχου της κυκλοφορίας των οχημάτων σε καταστάσεις εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης είναι η πληροφόρηση των οδηγών για τις ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιήσουν και για το δρομολόγιο που πρέπει να ακολουθήσουν για να επιτευχθεί ο ελάχιστος χρόνος εκκένωσης. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν τα συστήματα προειδοποίησης και πληροφόρησης των οδηγών που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης. Σε περίπτωση εκκένωσης τα συστήματα πληροφόρησης των οδηγών και των πεζών έχουν διττό ρόλο, καθώς παρέχουν όχι μόνο πληροφόρηση για την αιτία της εκκένωσης του χώρου (σεισμός, πυρκαγιά), αλλά και οδηγίες ασφαλείας ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες ενέργειες. Γενικά η πληροφόρηση των οδηγών είναι μια σύνθετη

κοινωνική διαδικασία. Όταν οι οδηγοί λάβουν το μήνυμα για εκκένωση εκτάκτου ανάγκης είτε θα επιλέξουν να συμμορφωθούν με τις παρεχόμενες πληροφορίες και να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή η ταχύτερη και ασφαλέστερη εκκένωση του χώρου ή να έχουν την αντίθετη συμπεριφορά, μη εφαρμόζοντας τις οδηγίες ασφαλείας, δημιουργώντας μια κατάσταση πανικού και αναρχίας.

Το σύστημα πληροφόρησης αποτελείται από δύο σκέλη. Την προειδοποίηση και την πληροφόρηση. Το πρώτο σκέλος αφορά την ενημέρωση του πληθυσμού για τον επικείμενο κίνδυνο και τη σοβαρότητα της κατάστασης. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση ασυνήθιστα υψηλών ηχητικών πηγών (σειρήνες, συναγερμούς), οι οποίοι ωθούν τους οδηγούς και τους πεζούς να αναζητήσουν οδηγίες για την αντιμετώπιση της κατάστασης. Το δεύτερο σκέλος επικεντρώνεται στον τρόπο με τον οποίο ο πληθυσμός ερμηνεύει το μήνυμα ώστε να υιοθετήσει στη συνέχεια την κατάλληλη συμπεριφορά και να ανταποκριθεί με επιτυχία στις περιστάσεις.

Η πληροφορία που θα φτάσει στους οδηγούς πρέπει να διανεμηθεί όσο το δυνατόν πιο γρήγορα, να γίνεται εύκολα κατανοητή, να είναι προσωπική και εξακριβωμένη. Το μήνυμα αυτό μπορεί να είναι προειδοποιητικού χαρακτήρα ή να ενημερώνει για μία άμεση κατάσταση υψηλού κινδύνου. Στη δεύτερη περίπτωση η διατύπωση του μηνύματος πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να δίνει την απαραίτητη καθοδήγηση στους οδηγούς και να τους ενημερώνει για τη σοβαρότητα της κατάστασης χωρίς ωστόσο να τους ωθήσει σε μια κατάσταση πανικού, γεγονός που θα οδηγούσε σε πιθανή κατάρρευση του όλου συστήματος.

Σε πολλές έρευνες, η πληροφόρηση αυτή παρέχεται μέσω εξελιγμένων συστημάτων πληροφόρησης των μετακινούμενων ATIS (Advanced Traveller information Systems) και αξιολογείται ο τρόπος με τον οποίο ανταποκρίνονται οι οδηγοί σε αυτά τα συστήματα πληροφόρησης (Lively et al. 2006). Η πληροφόρηση των οδηγών μέσω της χρήσης πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων για έκτακτα συμβάντα έχει επίσης αναλυθεί ως προς την αποτελεσματικότητά της (Ullman et al. 2006). Τα πιο διαδεδομένα και αποτελεσματικά από αυτά τα συστήματα πληροφόρησης σε περίπτωση εκκένωσης περιλαμβάνουν σειρήνες, συναγερμούς, ραδιοφωνικά και τηλεφωνικά συστήματα, αποστολή SMS, ροές RSS και συνδυασμό των παραπάνω συστημάτων. 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).

Τα τηλεφωνικά συστήματα αποτελούν ένα από τα πιο αποτελεσματικά συστήματα πληροφόρησης, καθώς σχεδόν όλοι έχουν μαζί τους το κινητό τους τηλέφωνο ανά πάσα στιγμή και θα το απαντήσουν όταν αυτό χτυπήσει. Επίσης έρευνες έχουν δείξει πως η συντριπτική πλειοψηφία θα ακούσει με προσοχή το μήνυμα ειδικά όταν γίνει σαφές πως πρόκειται για μια κατάσταση εκτάκτου ανάγκης. Επιπροσθέτως, ο τρόπος αυτός, προσφέρει έναν πολύ άμεσο διάλογο επικοινωνίας και μειώνει την αβεβαιότητα του οδηγού προμηθευόντάς τον με επιπρόσθετες πληροφορίες όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο. Με τη χρήση του κινητού τηλεφώνου λειτουργούν επίσης συστήματα πληροφόρησης SMS και ροών RSS (εμφανίζεται αυτοματοποιημένο ενημερωτικό μήνυμα στην οθόνη του κινητού τηλεφώνου), χωρίς ωστόσο να προσεγγίζουν τα επίπεδα αμεσότητας και την αποτελεσματικότητα των τηλεφωνικών συστημάτων.

Τα ραδιοφωνικά συστήματα κρίνονται λιγότερο αποτελεσματικά από τα τηλεφωνικά, καθώς κάποιος ίσως δεν ακούσουν τον ραδιόφωνο να ενεργοποιείται ή δυσκολευτούν να κατανοήσουν το μήνυμα. Επίσης αυτή η μέθοδος δεν παρέχει δυνατότητα αλληλεπίδρασης μεταξύ του παραλήπτη και της πηγής μετάδοσης του μηνύματος.

Συστήματα σειρήνων ή συναγερμού όταν λειτουργούν αυτούσια κρίνονται ανεπαρκή καθώς δεν περιλαμβάνουν οδηγίες αντιμετώπισης της κατάστασης και οι παρευρισκόμενοι καλούνται να αντιδράσουν αποκλειστικά και μόνο βασιζόμενοι στη δική τους κρίση. Ωστόσο ο συνδυασμός τηλεφωνικών συστημάτων μαζί με συστήματα συναγερμών είναι πιθανών ένας από τους πλέον αποτελεσματικούς τρόπους ενημέρωσης και πληροφόρησης των οδηγών συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων (Rogers and Sorensen, 1993).

Μία άλλη μέθοδος για την πληροφόρηση των οδηγών είναι η χρήση πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων (VMS) για πιθανά έκτακτα συμβάντα, η οποία έχει αξιοποιηθεί σε έρευνες διαχείρισης και έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα (Ullman et al. 2006). Σε πρώιμο στάδιο οι πινακίδες μεταβλητών συστημάτων περιλάμβαναν τη χρήση στατικών πινακίδων με φωτιζόμενες λέξεις χρησιμοποιώντας σωλήνες νέον κι

επισημαίναν το γεγονός που είχε συμβεί. Από το 1990 και μετά η πιο διαδεδομένη μορφή πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων είναι οθόνες LED, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν έγχρωμο κείμενο και γραφικά.

## 2.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Οι μεθοδολογίες κι η εφαρμογή της προσομοίωσης στο πλαίσιο της εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης τελούν υπό ανάπτυξη εδώ και πολλά χρόνια κι αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των αναλυτών για διάφορους λόγους.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της προσομοίωσης αποτελεί η δυνατότητα που παρέχει να αναπαριστά με μεγάλη λεπτομέρεια τα στοιχεία του δικτύου προσεγγίζοντας ικανοποιητικά την πραγματικότητα 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.

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 διερεύνηση σε πραγματικό χρόνο, 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 έρευνας 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 διερεύνησης 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, καθώς 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.

### **2.2.1 Προσέγγιση προσομοίωσης εκκένωσης**

Γενικά υπάρχουν τρεις τρόποι προσέγγισης της προσομοίωσης εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης. Μικροσκοπική, μεσοσκοπική και μακροσκοπική προσομοίωση.

Η μικροσκοπική προσομοίωση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στα χέρια των αναλυτών για την εκτίμηση και την αξιολόγηση της κυκλοφορίας, καθώς εστιάζει στην λεπτομέρεια εξετάζοντας το κάθε όχημα ξεχωριστά προσδίδοντας του τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Κάθε οδηγός-όχημα λοιπόν αποτελεί και μία ξεχωριστή μονάδα του συστήματος με τα δικά της χαρακτηριστικά και έτσι ευνοείται η ποικιλομορφία. Για κάθε όχημα εξετάζεται η κίνηση του κι η αλληλεπίδραση του με τα υπόλοιπα οχήματα. Η προσομοίωση ενός ελιγμού αλλαγής λωρίδας πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη το προπορευόμενο όχημα στη λωρίδα που βρίσκεται, αλλά και το υποτιθέμενο προπορευόμενο και ακολουθούμενο όχημα της λωρίδας στην οποία θα

μεταβεί (Lieberman and Rathi 1997). Τα μικροσκοπικά μοντέλα 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 απαραίτητο να υπάρξει ικανοποιητικός αριθμός προσομοιώσεων του ίδιου σεναρίου με διαφορετικές τιμές παραμέτρων, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια. 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. Τα πιο διαδεδομένα λογισμικά μικροσκοπικής προσομοίωσης είναι τα AIMSUN, MATSim, TransModeler και VISSIM.

Τα μακροσκοπικά μοντέλα προσομοιώνουν την κυκλοφοριακή ροή, λαμβάνοντας υπόψη αθροιστικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής κίνησης, όπως 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 (Antonioni 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 δοκιμαστεί 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 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 συμβάντα στο οδικό δίκτυο. Ωστόσο, δεν μπορούν να μοντελοποιήσουν τις αντιδράσεις των οχημάτων σε εναλλακτικές διατάξεις σχεδιασμού. Υστερούν σε ακρίβεια σε σχέση με τα μικροσκοπικά μοντέλα, απαιτούν όμως λιγότερη υπολογιστική ισχύ, άρα και λιγότερο υπολογιστικό χρόνο (Farah et al. 2013). Για παράδειγμα, το ρεύμα κυκλοφορίας μπορεί να αναπαρίσταται με ενιαίο τρόπο, ως στατιστικό ιστόγραμμα ή με μονόμετρα μεγέθη όπως ο φόρτος κυκλοφορίας, η κυκλοφοριακή πυκνότητα και η ταχύτητα. Επίσης, οι ελιγμοί αλλαγής λωρίδας είναι πιθανό να μη λαμβάνονται υπόψη (Lieberman et al. 1997). Παραδείγματα μακροσκοπικών προγραμμάτων προσομοίωσης αποτελούν τα λογισμικά OmniTRANS, OREMS, TransCAD και PTV Visum.

Τα μεσοσκοπικά μοντέλα αποτελούν πιο ουδέτερη αντιμετώπιση, συνδυάζοντας τις ιδιότητες και των μικροσκοπικών και των μακροσκοπικών μοντέλων προσομοίωσης. Πρόκειται για μοντέλα λιγότερο λεπτομερή από τα εργαλεία μικροσκοπικής προσομοίωσης, είναι όμως ανώτερα από κάποιες άλλες τεχνικές ανάλυσης κίνησης. Έτσι 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). Όσον αφορά εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, η εφαρμογή των μοντέλων αυτά γίνεται μόνο σε ερευνητικό επίπεδο (Pravinvongvuth and Loudon, 2009). Μπορούν ωστόσο να προσομοιώσουν τις διαδρομές μεμονωμένων οχημάτων, τα οποία είναι εξοπλισμένα με συστήματα πληροφόρησης πραγματικού χρόνου ταξιδιού εντός του οχήματος. Οι ελιγμοί αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας αναπαρίστανται για μεμονωμένα οχήματα ως στιγμιαίο γεγονός, ενώ η απόφαση για τον ελιγμό βασίζεται σε σχετικές πυκνότητες μεταξύ των λωρίδων κυκλοφορίας (Lieberman and Rathi, 1997). 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. Τα πιο

διαδεδομένα μεσοσκοπικά λογισμικά προσομοίωσης είναι τα DynaMIT, Dynasmart και Mezzo.

Τέλος ορισμένα λογισμικά 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 το γεγονός τα καθιστά ιδανικά 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 το πρόγραμμα προσομοίωσης που ανταποκρίνεται καλύτερα στην κάθε περίπτωση.

### **2.2.2 Λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN**

Το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) είναι ένα μικροσκοπικό πρόγραμμα προσομοίωσης κυκλοφορίας οδικών δικτύων (Barceló, 2002). 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. Η προσομοίωση στο AIMSUN γίνεται σε περιβάλλον AIMSUN NG πράγμα που σημαίνει ότι η συμπεριφορά κάθε οχήματος στο δίκτυο μοντελοποιείται καθώς το όχημα διέρχεται μέσα από το δίκτυο σύμφωνα με διάφορα μοντέλα συμπεριφοράς οχημάτων. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσομοίωσης έχει σχεδιαστεί ώστε να παράγει όσο το δυνατόν λιγότερα σφάλματα όταν έχει σαν αναφορά πραγματικά σενάρια (Farah et al. 2013). Στο AIMSUN υπάρχουν στοιχεία του συστήματος, όπως οχήματα, φωρατές (detectors) και άλλα, των οποίων η κατάσταση αλλάζει περιοδικά ανά καθορισμένα χρονικά διαστήματα και άλλα στοιχεία όπως φωτεινοί σηματοδότες ή σημεία εισόδου που η κατάσταση τους αλλάζει σε συγκεκριμένες στιγμές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και λόγω αυτού αποτελεί ένα πρόγραμμα διακριτών και συνεχών καταστάσεων. Το AIMSUN έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει με λεπτομέρεια ένα οδικό δίκτυο και να μοντελοποιήσει τα περισσότερα στοιχεία που υπάρχουν σε πραγματικά δίκτυα, όπως ράμπες, στάσεις λεωφορείων, πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων (VMS) και φωτεινούς σηματοδότες. Αποτελεί,

αναμφίβολα, ένα σημαντικό εργαλείο σχεδιασμού και αξιολόγησης κυκλοφοριακών συστημάτων και στρατηγικών καθώς έχει και την δυνατότητα να εξετάζει νέα συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας που στηρίζονται σε παλιές αλλά και σε νέες τεχνολογίες. Το πρόγραμμα προσομοίωσης χρειάζεται για την λειτουργία του ένα Σενάριο (Aimsun Scenario) και ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν το Πείραμα (Aimsun Experiment). Το Σενάριο αποτελείται από μια περιγραφή του οδικού δικτύου, τα δεδομένα κυκλοφοριακής ζήτησης (σενάριο ζήτησης) και τα δεδομένα κυκλοφοριακού ελέγχου. Οι παράμετροι που καθορίζουν το Πείραμα μπορεί να είναι σταθερές όπως για παράδειγμα ο χρόνος προσομοίωσης αλλά μπορεί και ν' αλλάζουν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ώστε να βελτιώνουν την απόδοση του μοντέλου. Στοιχεία εξόδου της προσομοίωσης, εκτός από μια συνεχή γραφική αναπαράσταση της εξέλιξης του οδικού δικτύου, αποτελούν και κάποια στατιστικά στοιχεία, όπως ροή οχημάτων, ταχύτητα, καθυστερήσεις, αλλά και δεδομένα που συλλέγονται από τους φωρατές, όπως ο αριθμός των οχημάτων ή το ποσοστό κατάληψης, τα οποία ο χρήστης τα επεξεργάζεται ανάλογα με τον σκοπό της έρευνας. Στο AIMSUN μπορεί να σχεδιαστεί ένα οδικό δίκτυο όσο πολύπλοκο κι αν είναι με σχετικά μεγάλη ακρίβεια. Τα τμήματα των δρόμων, οι κατευθύνσεις αυτών αλλά και άλλες ιδιότητες που επηρεάζουν τον τρόπο κίνησης των οχημάτων προσδιορίζονται από τον χρήστη και συνθέτουν το μοντέλο του οδικού δικτύου. Η σύνδεση των τμημάτων των δρόμων γίνεται με κόμβους, ακόμα και με διαφορετικά χαρακτηριστικά κυκλοφορίας. Δίνει τη δυνατότητα τριών επιπέδων μοντελοποίησης των μεταφορών (μικροσκοπικό, μεσοσκοπικό και μακροσκοπικό) μέσα στην ίδια εφαρμογή, γεγονός που επιτρέπει τη δισδιάστατη και τρισδιάστατη οπτικοποίηση των σεναρίων σε μεγάλες πόλεις του κόσμου, σε λεπτομερή και υψηλά επίπεδα απόδοσης. Μία ακόμα σημαντική ιδιότητα είναι η δυνατότητα που δίνει για προσομοίωση και αλληλεπίδραση οχημάτων και πεζών ταυτοχρόνως. Γενικά το Aimsun προσφέρει στον αναλυτή μια τεράστια γκάμα παραμέτρων, όπως κατανάλωση καύσιμου, μήκος και πλάτος οχήματος, ποσοστό προσπέρασης κ.α. τις οποίες μπορεί να επεξεργαστεί και να αλλάξει τις τιμές τους ανάλογα με τους σκοπούς της έρευνας.

### **2.2.3 Μοντέλο ακολουθίας οχημάτων Gipps**

Το AIMSUN χρησιμοποιεί για την προσομοίωση της κίνησης των οχημάτων ένα μοντέλο ακολουθίας που βασίζεται στο μοντέλο που ανέπτυξε ο Gipps το 1981. Τα

μοντέλα ακολουθίας οχημάτων είναι μαθηματικά μοντέλα, τα οποία περιγράφουν τον τρόπο που κινούνται τα οχήματα όταν κινούνται το ένα πίσω από το άλλο χωρίς δυνατότητα προσπέρασης. (Nerem, 2013). Σκοπός αυτών των μοντέλων είναι να προσδιορίσουν πως ένα όχημα αντιδρά στις αλλαγές συμπεριφοράς του προπορευόμενου οχήματος. Οι παράμετροι του μοντέλου ακολουθίας οχημάτων είναι τοπικές και εξαρτώνται από τη γεωμετρία του τμήματος του δρόμου (πχ όρια ταχύτητας), τον τύπου του οδηγού (αποδεκτό όριο ταχύτητας του οχήματος), την επιρροή των οχημάτων στις γειτονικές λωρίδες κτλ. Το μοντέλο ακολουθίας οχημάτων περιέχει δυο συστατικά, την επιτάχυνση και την επιβράδυνση των οχημάτων. Η επιτάχυνση αφορά την πρόθεση του οδηγού να επιτύχει την επιθυμητή γι' αυτόν ταχύτητα και η επιβράδυνση αντιπροσωπεύει τους περιορισμούς που εμπεριέχονται στο σύστημα ή περιορισμού που δημιουργούνται από τα προπορευόμενα οχήματα όταν εκείνα προσπαθούν να προσεγγίσουν τη δική τους επιθυμητή ταχύτητα.

Το μοντέλο του Gipps αποτελεί τη βάση για διάφορα λογισμικά μικροσκοπικής προσομοίωσης, όπως AIMSUN, DRACULA (Liu R, 2010), SISTM 1 (Liu R, 2010), SIGSIM (Silcock J.P, 1993), SITRAS (Hidas P, 1998). Η διαδομένη χρήση του αποδίδεται στο σαφές περιεχόμενο και τις ξεκάθαρες υποθέσεις του (Ciuffo et al. 2013) Στο μοντέλο αυτό τα οχήματα κατατάσσονται σε ελεύθερα και περιορισμένα ανάλογα με το προπορευόμενο όχημα. Όταν το όχημα είναι περιορισμένο από την κίνηση του προπορευόμενου οχήματος, ο οδηγός προσαρμόζει την ταχύτητα του ώστε να διατηρήσει απόσταση ασφαλείας (Ciuffo et al. 2013). Σε περίπτωση ελεύθερης ροής, η ταχύτητα το οχήματος καθορίζεται από την επιθυμητή ταχύτητα και από τη μέγιστη επιτάχυνση. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η ταχύτητα του οχήματος ( $n$ ) που ακολουθεί ένα προπορευόμενο όχημα ( $n-1$ ) υπόκειται σε τρεις περιορισμούς:

- Η ταχύτητα του οχήματος  $n$  δεν υπερβαίνει την ταχύτητα με την οποία ο οδηγός του οχήματος επιθυμεί να κινείται ( $V_n$ ).
- Το όχημα επιταχύνει με ταχύ ρυθμό μέχρι να φτάσει την επιθυμητή ταχύτητα και έπειτα από αυτό το σημείο η επιτάχυνση τείνει στο μηδέν και το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα.
- Εάν το προπορευόμενο όχημα βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, το όχημα που ακολουθεί λειτουργεί σε συνθήκες ελεύθερης ροής.



Στην περίπτωση που τα δύο οχήματα βρίσκονται μακριά μεταξύ τους, δηλαδή συμπεριφέρονται όπως σε κατάσταση ελεύθερης ροής, οι δύο πρώτες συνθήκες συνοψίζονται στην εξίσωση:

$$u_n(t+\tau) \leq u_n(t) + 2.5 \cdot a_n \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{u_n(t)}{V_n}\right) \cdot \sqrt{\left(0.025 + \frac{u_n(t)}{V_n}\right)}$$

Σύμφωνα με την τρίτη συνθήκη στην περίπτωση που η κίνηση του πίσω οχήματος περιορίζεται από την κίνηση του προπορευόμενου οχήματος ισχύει:

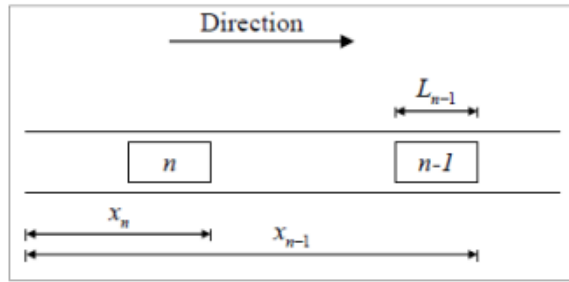
$$u_n(t+\tau) \leq b_n \cdot \tau + \sqrt{\left(b_n^2 \cdot \tau^2 - b_n \left[2 \cdot [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - u_n(t) \cdot \tau - \frac{u_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right]\right)}$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση η ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί επηρεάζεται από το χρόνο αντίδρασης του οδηγού, την απόσταση του οχήματος που ακολουθεί από το προπορευόμενο όχημα, τις ταχύτητες των δυο οχημάτων και τον ρυθμό επιβράδυνσης που οι δυο οδηγοί επιθυμούν να έχουν. Επίσης, ο Gipps (1981) επισήμανε ότι στον χρόνο αντίδρασης του οδηγού θα πρέπει να προστεθεί ένα επιπλέον περιθώριο ασφαλείας  $\theta$  το οποίο θα εξασφαλίζει το έγκαιρο σταμάτημα του οχήματος σε περίπτωση που η αντίδραση του οδηγού καθυστερήσει για κάποιο λόγο. Το περιθώριο ασφαλείας θεωρείται σταθερό και ίσο με το μισό του χρόνου αντίδρασης ( $\tau/2$ ) (Rakha and Gao, 2010). Επίσης, ο οδηγός του οχήματος  $n$  προσαρμόζει την ταχύτητα του σύμφωνα με την μέγιστη εκτιμώμενη πέδηση που μπορεί να επιφέρει ο οδηγός του οχήματος  $n-1$  αλλά μπορεί να ασκήσει μεγαλύτερη επιβράδυνση αν αυτό κριθεί αναγκαίο. Επομένως ακόμα και αν η θέληση επιβράδυνσης του μπροστινού οδηγού υποτιμηθεί από τον οδηγό του οχήματος που ακολουθεί, το μοντέλο δεν καταρρίπτεται. Συνολικά, σύμφωνα με τους παραπάνω περιορισμούς η ταχύτητα του οχήματος  $n$  σε χρόνο  $(t+\tau)$  μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$u_n(t + \tau) = \min \left\{ \begin{array}{l} u_n(t) + 2.5 \cdot a_n \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{u_n(t)}{V_n}\right) \cdot \sqrt{\left(0.025 + \frac{u_n(t)}{V_n}\right)} \\ b_n \cdot \tau + \sqrt{\left(b_n^2 \cdot \tau^2 - b_n \left[2 \cdot [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - u_n(t) \cdot \tau - \frac{u_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right]\right)} \end{array} \right\}$$

, όπου:

- $a_n$ : η μέγιστη επιτάχυνση την οποία ο οδηγός του οχήματος n επιθυμεί να αποκτήσει ( $m/s^2$ )
- $b_n$ : η μέγιστη πέδηση την οποία ο οδηγός του οχήματος n επιθυμεί να επιφέρει ( $b < 0$ ) προκειμένου να αποφύγει μια σύγκρουση,  $b_n < 0$  ( $m/s^2$ )
- $\hat{b}$ : η εκτιμώμενη μέγιστη πέδηση που ο οδηγός του προπορευόμενου οχήματος (n-1) επιθυμεί να επιφέρει. Πρόκειται για μια εκτίμηση καθώς είναι αδύνατο ο οδηγός του δεύτερου οχήματος να γνωρίζει ακριβώς πόσο θα φρενάρει ο οδηγός του μπροστινού οχήματος ( $m/s^2$ ).
- $s_{n-1} = L_{n-1} + \text{Safety}$ , δηλαδή το μέγεθος του προπορευόμενου οχήματος (n-1) συμπεριλαμβανομένου του μήκους του και της απόστασης ασφαλείας την οποία το όχημα n δεν επιθυμεί να παραβιάσει ακόμη και όταν τα δύο οχήματα είναι σταματημένα (m)
- $V_n$ : η ταχύτητα με την οποία ο οδηγός του οχήματος n επιθυμεί να κινείται (m/s)
- $X_n(t)$ ,  $x_{n-1}(t)$ : η θέση του μπροστινού μέρους του αντίστοιχου οχήματος (n ή n-1) την χρονική στιγμή t (m)
- $u_{n-1}(t)$ : η ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος (n-1) την χρονική στιγμή t (m/s)
- $u_n(t)$ : η ταχύτητα του πίσω οχήματος (n) την χρονική στιγμή t (m/s)
- $\tau$ : ο χρόνος αντίδρασης (μια σταθερά για όλα τα οχήματα) (s)



Σχήμα 2.1: Οι θέσεις των οχημάτων στο μοντέλο του Gipps (Olstam and Tapani, 2004)

Το μοντέλο του Gipps έχει βαθμονομηθεί από τον ίδιο χρησιμοποιώντας την κανονική κατανομή για τις εξής παραμέτρους:

- Η μέγιστη επιτάχυνση  $a_n$
- Η μέγιστη επιθυμητή επιβράδυνση  $b_n$
- Η εκτιμώμενη μέγιστη επιβράδυνση  $b^{\wedge}$
- Η απόσταση  $s_{n-1}$
- Η επιθυμητή ταχύτητα  $V_n$
- Ο χρόνος αντίδρασης  $\tau$  ισούται με  $2/3$  s

## 2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

### 2.3.1 Γενικά

Κάθε μοντέλο ανεξαρτήτως του βαθμού πολυπλοκότητας του είναι μια αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου. Για τον λόγο αυτό πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες και τα σφάλματα τα οποία ενδέχεται να περιέχει. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο 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). Σε μοντέλα με πολλές μεταβλητές εισόδου, η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα ουσιαστικό συστατικό της σχεδιασμού του μοντέλου και της διασφάλισης της ποιότητας

Η ανάλυση ευαισθησίας αποδεικνύεται χρήσιμη σε πληθώρα εφαρμογών, καθώς ελέγχει την αξιοπιστία του μοντέλου, υπό την παρουσία αβεβαιότητας και βοηθάει στην κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των στοιχείων εισόδου και εξόδου. Επίσης μειώνει την αβεβαιότητα, υπογραμμίζοντας τα στοιχεία εισόδου του μοντέλου που αυξάνουν

σημαντικά την αβεβαιότητα, και στη συνέχεια αυτά εξετάζονται ενδελεχώς προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Ταυτόχρονα αναγνωρίζει τα στοιχεία που έχουν μηδαμινή συνεισφορά στο μοντέλο, τα οποία μπορούν να απαλειφθούν και έτσι να απλοποιηθεί το μοντέλο.

Σε ότι αφορά το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN, έχουν πραγματοποιηθεί λίγες έρευνες 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. Στην έρευνα 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.

Γενικά αν και έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες 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.

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι παράμετροι 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 σενάριο 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. Όταν 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.

### **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.

Ο πιο σημαντικός περιορισμός είναι η υπολογιστική επιβάρυνση, ο χρόνος δηλαδή που απαιτεί για να ολοκληρωθεί η ανάλυση ευαισθησίας για κάθε μοντέλο. Η ανάλυση σχεδόν πάντα πραγματοποιείται εκτελώντας το μοντέλο έναν (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.

Ένας ακόμα περιορισμός είναι το γεγονός πως ορισμένα στοιχεία εισόδου μπορεί να είναι συσχετισμένα μεταξύ τους. Οι περισσότερες κοινές μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας βασίζονται στην υπόθεση ότι τα στοιχεία εισόδου του μοντέλου είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, αλλά είναι πιθανόν τα στοιχεία αυτά να έχουν ισχυρή συσχέτιση. Πρόκειται για ένα πεδίο της έρευνας, που δεν έχει μελετηθεί πλήρως, ώστε να καθοριστούν οριστικές μέθοδοι διαχείρισης.

Μερικές προσεγγίσεις ανάλυσης ευαισθησίας, όπως εκείνες που βασίζονται σε γραμμική παλινδρόμηση, μπορεί να εξάγουν εσφαλμένα αποτελέσματα για την ευαισθησία όταν η απόκριση του μοντέλου είναι μη γραμμική σε σχέση με τα στοιχεία

εισόδου, λόγω μη γραμμικότητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μετρήσεις που βασίζονται στη διακύμανση θεωρούνται πιο κατάλληλες.

Ένας ακόμα περιορισμός είναι το μέγεθος της επίδρασης των αλληλεπιδράσεων στο μοντέλο. 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 λαμβάνονται 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).

Ένα ακόμα περιορισμό αποτελεί το γεγονός πως ουσιαστικά όλες οι μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας εξετάζουν ένα μοναδικό και μονοδιάστατο στοιχείο εξόδου του μοντέλου, ωστόσο πολλά μοντέλα εξάγουν μεγάλο αριθμό πιθανώς χωρικά ή χρονικά εξαρτώμενων δεδομένων. Αυτό δεν αποκλείει τη δυνατότητα εκτέλεσης 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.

Τέλος, 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 Συμπεριφορά οδηγών**

Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότερες έρευνες 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 έρευνες με θέμα την κυκλοφορία και πιο συγκεκριμένα τη συμπεριφορά των οδηγών. Η περιγραφή της οδηγικής συμπεριφοράς με τη χρήση μοντέλων δεν είναι εύκολη διαδικασία, ακόμα και σε συνθήκες φυσιολογικής ροής της κυκλοφορίας. Τις μεγαλύτερες δυσκολίες αποτελούν η έλλειψη δεδομένων και η ετερογένεια του πληθυσμού των οδηγών, με αποτέλεσμα η βαθμονόμηση τέτοιων μοντέλων να είναι δύσκολη. Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, οι δυσκολίες πολλαπλασιάζονται, αφού οι κυκλοφοριακοί φόρτοι αυξάνονται κατακόρυφα και ο ανθρώπινος φόβος και η αγωνία, καθιστούν τις συμπεριφορές στην οδήγηση τουλάχιστον απρόβλεπτες. Επίσης, σε μια περίπτωση έκτακτης ανάγκης, κύριο μέλημα της πολιτείας είναι η αντιμετώπιση του φαινομένου και η ασφάλεια του πληθυσμού και όχι η διεξαγωγή κυκλοφοριακών μετρήσεων και η παρατήρηση ανθρώπινων συμπεριφορών. Για το λόγο αυτό, είναι αδύνατη η συλλογή αξιόπιστων δεδομένων της οδηγικής συμπεριφοράς υπό αυτές τις συνθήκες, ενώ αν χρησιμοποιηθούν μοντέλα βαθμονομημένα σε φυσιολογικές συνθήκες, τα αποτελέσματα μπορεί τελικά να είναι αναληθή και μη αντιπροσωπευτικά.

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 απαρτίζονται 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 (Prionisti and Antoniou, 2012)

Χαρακτηριστική έρευνα 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. 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.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει ότι, αν και έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες για την εκκένωση 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.

### **2.3.4 Τεχνικές ανάλυσης ευαισθησίας**

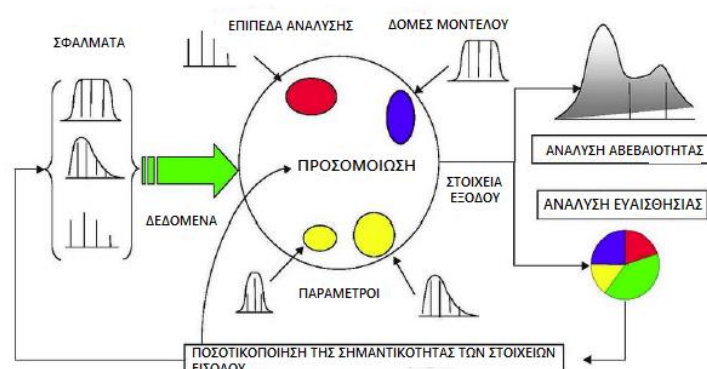
Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός προσεγγίσεων για την εκτέλεση μιας ανάλυσης ευαισθησίας, πολλές από τα οποίες έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση ενός ή περισσότερων από τους περιορισμούς που συζητήθηκαν παραπάνω. Οι μεθοδολογίες διακρίνονται επίσης με βάση τον τύπο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ευαισθησίας, όπως για παράδειγμα με βάση διαχωρισμούς διακύμανσης, μερικά παράγωγα ή στοιχειώδη αποτελέσματα.

Αρχικά υπολογίζεται το ποσοστό 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 (Ο' Hagan, 2006). Στη συνέχεια εντοπίζεται το αποτέλεσμα του μοντέλου που θα αναλυθεί και έπειτα το μοντέλο εκτελείται αρκετές φορές, χρησιμοποιώντας κάποιο σχεδιασμό των πειραμάτων, που υπαγορεύεται από την επιλογή μεθόδου και την αβεβαιότητα των στοιχείων εισόδου. Τέλος τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο χρησιμοποιούνται 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. 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, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2: Ιδανικό σχεδιάγραμμα μιας πιθανής ανάλυσης ευαισθησίας βασισμένης σε δειγματοληψία (Saltelli, 1999).

Στη συνέχεια αναλύονται κάποιες βασικές μέθοδοι προσέγγισης της ανάλυσης ευαισθησίας, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.

- One-at-a-time (OAT)

Μία από τις πιο απλές και κοινές προσεγγίσεις είναι η μεταβολή μίας παραμέτρου τη φορά (one-at-a-time), ώστε να διαπιστωθεί τι επίδραση δημιουργεί αυτή στο αποτέλεσμα (Murphy et al. 2004).

Η προσέγγιση OAT προβλέπει τη μεταβολή μιας από τις μεταβλητές εισόδου, διατηρώντας τις υπόλοιπες σταθερές και στη συνέχεια 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 και ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες διακοπής της λειτουργίας του υπολογιστικού λογισμικού, κάτι που είναι αρκετά πιθανό όταν αρκετοί παράγοντες εισόδου αλλάζουν ταυτόχρονα. Η προσέγγιση OAT εφαρμόζεται σε αρκετά μοντέλα για πρακτικούς λόγους. Σε περίπτωση αποτυχίας του μοντέλου υπό ανάλυση OAT, γίνεται αμέσως αντιληπτό ποιο στοιχείο 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). Η επίδραση των αλληλεπιδράσεων αυτών μπορεί να μετρηθεί με τον δείκτη ευαισθησίας συνολικής τάξης (total-order sensitivity index).

- Διαγράμματα συσχέτισης (Scatter plots)

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 (Paguolo et al. 2012).

Η μέθοδος input and output Scatter plot είναι μία από τις πιο απλές και διαδεδομένες μεθόδους διεξαγωγής της ανάλυσης ευαισθησίας καθώς αναπαριστά τον τρόπο που οι διακυμάνσεις των τιμών των στοιχείων εισόδου επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

Θεωρώντας το παρακάτω μοντέλο:  $Y=f(Z_1,Z_2,\dots,Z_r)$ , όπου  $Z_i$  τα στοιχεία εισόδου του μοντέλου και  $Y$  τα στοιχεία εξόδου, δημιουργείται ένα πείραμα Monte Carlo παράγονται  $N$  πιθανοί συνδυασμοί των παραμέτρων, ώστε να προκύψει ο εξής πίνακας:

$$M = \begin{pmatrix} z_1^{(1)} & z_2^{(1)} & \dots & z_r^{(1)} \\ z_1^{(2)} & z_2^{(2)} & \dots & z_r^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{(N)} & z_2^{(N)} & \dots & z_r^{(N)} \end{pmatrix}$$

Έπειτα προκύπτει το διάνυσμα των στοιχείων εξόδου  $Y$  υπολογίζοντας το  $y_i$  για κάθε σειρά του διανύσματος:

$$Y = \begin{pmatrix} y^{(1)} \\ y^{(2)} \\ \vdots \\ y^{(N)} \end{pmatrix}$$

Τέλος, για κάθε παράμετρο, αναπαριστούνται σε διαγράμματα Scatter plots τα στοιχεία του διανύσματος σε σχέση με τη στήλη  $i$  του πίνακα  $M$ . Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν  $r$  διαγράμματα, όπου  $r$  ο αριθμός των εξεταζόμενων παραμέτρων. Η ανάλυση αυτών των διαγραμμάτων υποδεικνύει τις πιο σημαντικές παραμέτρους του μοντέλου, αυτές δηλαδή που επηρεάζουν περισσότερο το αποτέλεσμα. Αν τα σημεία του διαγράμματος είναι σε μορφή κυκλικού νέφους, τότε η παράμετρος δεν ασκεί σημαντική επιρροή στο μοντέλο και μπορούν να εξαιρεθεί, ενώ παράμετροι που δίνουν νέφος σημείων σε μορφή ευθείας ή καμπύλης ασκούν σημαντική επιρροή και χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης.

- 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.

Το πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι δεν κάνουν υποθέσεις για τη γραμμικότητα των στοιχείων του μοντέλου κι έτσι μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα είδη μοντέλων (Zheng and Rundell, 2006).

Για την υλοποίηση της μεθόδου αρχικά δημιουργούνται δύο πίνακες A και B διαστάσεων (N,r), όπου N το μέγεθος του πειράματος Monte Carlo, δηλαδή ο αριθμός των απαραίτητων συνδυασμών και r ο αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου.

$$A = \begin{pmatrix} z_1^{(1)} & z_2^{(1)} & \dots & z_r^{(1)} \\ z_1^{(2)} & z_2^{(2)} & \dots & z_r^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{(N)} & z_2^{(N)} & \dots & z_r^{(N)} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} z_{r+1}^{(1)} & z_{r+2}^{(1)} & \dots & z_{2r}^{(1)} \\ z_{r+1}^{(2)} & z_{r+2}^{(2)} & \dots & z_{2r}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_{r+1}^{(N)} & z_{r+2}^{(N)} & \dots & z_{2r}^{(N)} \end{pmatrix}$$

Στη συνέχεια προκύπτουν r πίνακες C ως εξής:

$$C_i = \begin{pmatrix} z_1^{(1)} & z_2^{(1)} & \dots & z_{r+i}^{(1)} & \dots & z_{2r}^{(1)} \\ z_1^{(2)} & z_2^{(2)} & \dots & z_{r+i}^{(2)} & \dots & z_{2r}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & z_{r+i}^{(3)} & \dots & \vdots \\ z_1^{(N)} & z_2^{(N)} & \dots & z_{r+i}^{(N)} & \dots & z_{2r}^{(N)} \end{pmatrix} \text{ for } i = 1 \text{ to } r$$

Στη συνέχεια το μοντέλο αναπαράγεται για όλους τους  $[N(r+2)]$  συνδυασμούς όπως προκύπτουν από τους πίνακες A, B και  $C_i$  παράγοντας τα διανύσματα  $y_A = f(A)$ ,  $y_B = f(B)$  and  $y_{C_i} = f(C_i)$  for  $i = 1, \dots, r$ .

Αυτά τα διανύσματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δεικτών ευαισθησίας πρώτης τάξης και συνολικής επίδρασης.

Ο δείκτης ευαισθησίας πρώτης ή κύριας επίδρασης ουσιαστικά μετράει τη συμμετοχή της  $X_i$  μόνη της στην αβεβαιότητα (διακύμανση) του  $Y$  (μέσο όρο σύμφωνα με τις μεταβολές των άλλων μεταβλητών). Αποτελεί επίσης ένα πολύ σημαντικό μέτρο για να προσδιοριστεί πόσο μειώνει ο σωστός ορισμός των παραμέτρων εισόδου την συνολική διακύμανση (Ciuffo et al. 2014) και προκύπτει με τον παρακάτω τύπο:

$$S_i = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_B^{(j)} (y_{C_i}^{(j)} - y_A^{(j)})}{\frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)} + y_B^{(j)})^2 - \left( \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} + y_B^{(j)} \right)^2}$$

Ο δείκτης συνολικής επίδρασης με τη σειρά του, δίνει τη συνολική διακύμανση του  $Y$  που προκαλείται από το  $X_i$  και τις αλληλεπιδράσεις του με οποιαδήποτε από τις άλλες μεταβλητές εισόδου (Ciuffo et al., 2014) και ισούται με:

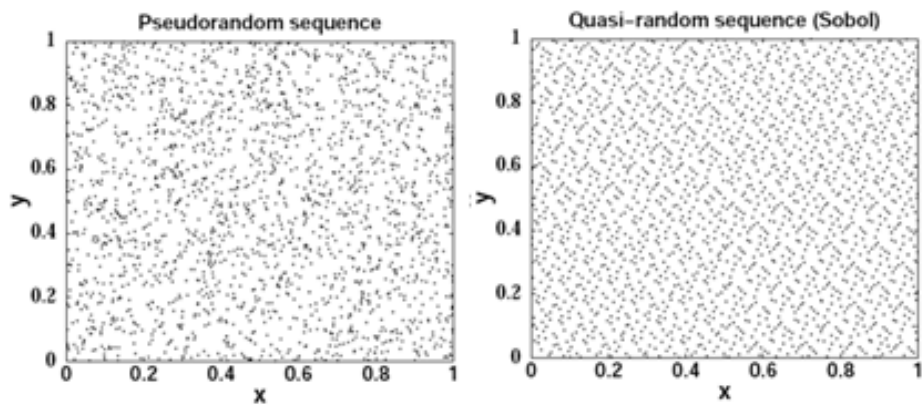
$$S_i = \frac{\frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)} - y_{C_i}^{(j)})^2}{\frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)} + y_B^{(j)})^2 - \left( \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} + y_B^{(j)} \right)^2}$$

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 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).

### **2.3.5 Ψευδοτυχαίοι και μερικώς τυχαίοι αριθμοί**

Οι ψευδοτυχαίοι και οι μερικώς τυχαίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται συχνά στη διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας και πιο συγκεκριμένα στην μέθοδο ανάλυσης της διακύμανσης. Η έννοια των πραγματικά τυχαίων αριθμών είναι μία μαθηματική έννοια. Δεν υπάρχουν τέτοιοι αριθμοί στη φύση (Sobol, 1998). Οι ψευδοτυχαίοι αριθμοί προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τους τυχαίους αριθμούς και παράγονται μέσω αλγόριθμου. Η χρήση τους στον τομέα της προσομοίωσης θεωρείται αρκετά πρακτική, καθώς παράγονται πολύ εύκολα και γρήγορα για όλα τα εύρη τιμών των παραμέτρων. Επίσης αν μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης απαιτούνται περισσότερα τρεξίματα μπορούν εύκολα να παραχθούν νέοι αριθμοί χωρίς να χαθούν τα παλαιότερα αποτελέσματα. Το μειονέκτημα ωστόσο των ψευδοτυχαίων αριθμών είναι πως παρουσιάζουν κενά και συσπειρώσεις. Όπου υπάρχουν συσπειρώσεις οι κοντινές τιμές της συνάρτησης υπεραναλύονται, ενώ αντίστοιχα όπου υπάρχουν κενά οι τιμές δεν αναλύονται σε ικανοποιητικό βαθμό (Saltelli et al. 2008). Αυτό το γεγονός μπορεί να αυξήσει τον χρόνο που απαιτείται για να επέλθει σύγκλιση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συχνά μερικώς τυχαίοι αριθμοί ή αριθμοί χαμηλής ασυνέπειας οι οποίοι είναι πιο ομοιόμορφα κατανομημένοι και προσφέρουν ταχύτερη σύγκλιση. Αυτή η σειρά αριθμών παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Sobol το 1976 και θεωρείται μια από τις πιο κατάλληλες σειρές αριθμών στην εκτίμηση των δεικτών ευαισθησίας πρώτης και συνολικής τάξης στις variance-based μεθόδους (Saltelli et al. 2008). Η 'γένεση' των μερικώς τυχαίων αριθμών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση της προγραμματιστικής γλώσσας Matlab.



Σχήμα 2.3: Ψευδοτυχαίοι και μερικώς τυχαίοι αριθμοί

### **3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ**

Όλες οι έρευνες εκκένωσης που χρησιμοποιούν κυκλοφοριακή προσομοίωση ακολουθούν μια γενική μεθοδολογία η οποία περιγράφει όλα τα στάδια της διαδικασίας της προσομοίωσης, από τον ορισμό των στοιχείων εισόδου μέχρι και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Σε αυτό το στάδιο ορίζονται ο πίνακας προέλευσης – προορισμού (OD matrix), τα στοιχεία εισόδου του συστήματος, το μαθηματικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί και έπειτα εκτελείται η προσομοίωση συλλέγονται τα αποτελέσματα και καταλήγουμε σε συμπεράσματα. Τα στοιχεία αυτά ορίζονται με γνώμονα το σκοπό και τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε έρευνας για τον λόγο αυτό ο ερευνητής οφείλει να καθιστά σαφές το αντικείμενο ενδιαφέροντός της. Επίσης δημιουργείται και φορτίζεται το ψηφιακό μοντέλο του χώρου στάθμευσης, δημιουργούνται τα σενάρια και ορίζονται οι τρόποι εκκένωσης και οι τιμές των παραμέτρων.

#### **3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

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 η συλλογή πραγματικών δεδομένων ζήτησης (real-time data) δεν είναι δυνατή για όλες τις πιθανές περιπτώσεις που μπορεί να εξεταστούν. Με βάση τα στοιχεία αυτά, εισάγονται τα απαραίτητα δεδομένα και εκτελούνται και τα υπόλοιπα βήματα της μεθοδολογίας. Τα στοιχεία αυτά χρήζουν αξιολόγησης, προκειμένου να βαθμονομηθούν και να προσαρμοστούν στα χαρακτηριστικά της εκάστοτε εφαρμογής

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί, το οποίο ορίζεται συναρτήσεως 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. 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 στις οδηγίες κλπ.).

Τέλος στο στάδιο των αποτελεσμάτων, αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση που έχει οριστεί από το χρήστη, δημιουργείται μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει όλα εκείνα τα μεγέθη που έχουν επίσης οριστεί από το χρήστη ως στοιχεία εξόδου. Ο υπολογισμός 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 προγράμματος προσομοίωσης, 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 προγράμματος προσομοίωσης από το χρήστη, ανάλογα με τις ανάγκες της εργασίας.

### **3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

Όπως προαναφέρθηκε η μεθοδολογία κάθε έρευνας εξαρτάται από τον σκοπό και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της. Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται την εκκένωση ενός τριώροφου υπόγειου χώρου στάθμευσης, σε περίπτωση ενός έκτακτου συμβάντος, όπως πυρκαγιά, πλημμύρα, σεισμός κτλ. Κατά συνέπεια η μεθοδολογία λοιπόν της συγκεκριμένης εργασίας πρέπει να προσαρμοστεί στα ειδικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει.

Ο ορισμός του μαθηματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία του συστήματος γίνεται αυτόματα από το εργαλείο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται και περιλαμβάνει μεταβλητές που καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου. Οι μεταβλητές αυτές εκφράζουν στοιχεία όπως:

- Η συμπεριφορά των οδηγών κατά την κίνησή τους
- Η δυναμικότητα του σεναρίου
- Ο τρόπος επιλογής της διαδρομής από τους οδηγούς

Όσον αφορά τη συμπεριφορά των οδηγών ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της εφαρμογής που εξετάστηκε είναι το γεγονός ότι καθώς πρόκειται για διερεύνηση φαινομένου έκτακτης ανάγκης 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 διερεύνηση μιας κατάστασης εκτάκτου ανάγκης.

Στη συνέχεια με βάση τους σκοπούς της εργασίας δημιουργούνται στο επιλεγμένο πρόγραμμα προσομοίωσης τα διαφορετικά σενάρια που θα εξεταστούν μετέπειτα. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη και τους περιορισμούς που θέτει η γεωμετρία του συγκεκριμένου χώρου στάθμευσης δημιουργούνται πέντε διαφορετικά σενάρια, ώστε να προσεγγιστεί ο ελάχιστος χρόνος εκκένωσης του χώρου στάθμευσης.

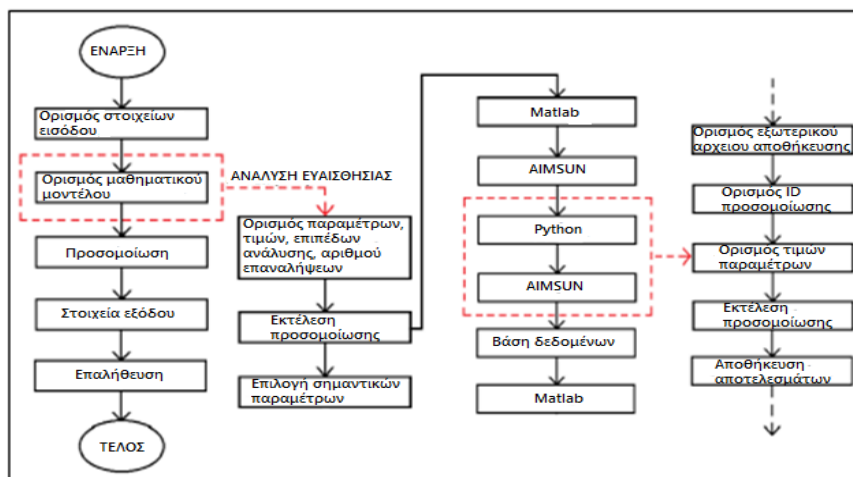
Το επόμενο στάδιο της εργασίας είναι η πραγματοποίηση ανάλυσης της ευαισθησίας, η οποία κρίνεται απαραίτητη λόγω της απουσίας δεδομένων για τη συμπεριφορά των οδηγών σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης και για εκκενώσεις κλειστών χώρων με ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (3 όροφοι, ράμπες ανόδου – καθόδου κ.α). Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας επιμερίζονται τα ποσοστά αβεβαιότητας που αναλογούν σε κάθε στοιχείο εισόδου, εντοπίζονται τυχόν σφάλματα που περιέχει το μοντέλο και προσδιορίζονται οι σημαντικές παράμετροι. Στη συγκεκριμένη εργασία στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας εξετάζονται τρεις παράμετροι με τη μέθοδο input and output με διαγράμματα συσχέτισης. Η μέγιστη επιτάχυνση, η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων όταν αυτά βρίσκονται σε στάση και ο χρόνος αντίδρασης των οδηγών. Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζονται οι παράμετροι που ασκούν τη μεγαλύτερη επιρροή και οι υπόλοιπες απαλείφονται από τη συνέχεια της ανάλυσης απλοποιώντας έτσι το μοντέλο.

Στη συνέχεια με τη μέθοδο variance-based για ένα μεγάλο εύρος τιμών για κάθε παράμετρο προσδιορίζεται η αβεβαιότητα των στοιχείων εισόδου κι εξόδου μέσω του υπολογισμού των δεικτών πρώτης και συνολικής ευαισθησίας. Οι τιμές των παραμέτρων επιλέγονται τυχαία εντός των προκαθορισμένων ορίων συναρτήσεων των επιπέδων ανάλυσης που θα πραγματοποιηθούν και προκύπτουν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί τιμών παραμέτρων. Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων πραγματοποιείται ένας ελάχιστος αριθμός επαναλήψεων, ώστε να σταθεροποιηθεί το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και να απαλειφθεί το σφάλμα της τυχαιότητας.

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό επαναλήψεων της προσομοίωσης (τρεξίματα) και για τον λόγο αυτό δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χειροκίνητα. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η δυνατότητα επικοινωνίας του AIMSUN με τις προγραμματιστικές γλώσσες Matlab και Python. Ο κώδικας Matlab καλεί το AIMSUN και ορίζει τον αριθμό των επαναλήψεων και ο κώδικας Python παρέχει τις αναγκαίες πληροφορίες (αρχείο δικτύου, κωδικός πειράματος, τιμές παραμέτρων κλπ). 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 έπειτα από αυτό τον αριθμό επαναλήψεων, 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. Η ανάλυση αυτών των αποτελεσμάτων προσδιορίζει τις σημαντικές παραμέτρους και τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται για να επέλθει σύγκλιση.

Στη συνέχεια η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε σενάριο, για λιγότερες ωστόσο επαναλήψεις, καθώς έχει προσδιοριστεί προηγουμένως ο αριθμός επαναλήψεων όπου επέρχεται σύγκλιση. Έτσι μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων του κάθε σεναρίου.

Στο τέλος της διαδικασίας έχει προκύψει για κάθε σενάριο ο μέσος, ο μέγιστος κι ο ελάχιστος χρόνος εκκένωσης, η συμμετοχή κάθε παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα, η μέση ταχύτητα, η ροή των οχημάτων και η πυκνότητα.



Σχήμα 3.1: Μεθοδολογία.

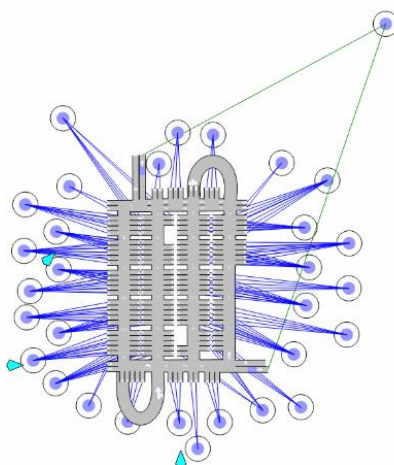
### 3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για το σχεδιασμό του ψηφιακού μοντέλου του χώρου στάθμευσης και για τη διαδικασία της προσομοίωσης της εκκένωσης επιλέχθηκε το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN. Για την επιλογή του συγκεκριμένου εργαλείου προσομοίωσης, λήφθηκαν υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διατιθέμενων λογισμικών, τα οποία συγκρίθηκαν, αξιολογήθηκαν και προέκυψε ότι το καταλληλότερο λογισμικό για την αντιμετώπιση του θέματος είναι το συγκεκριμένο. Το AIMSUN πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο λογισμικό προσομοίωσης των μεταφορών, το οποίο έχει αναπτυχθεί και προωθηθεί από την εταιρία TSS (Transport Simulation Systems).

Ο υπόγειος χώρος στάθμευσης Cityzen, που βρίσκεται στο κέντρο της Αθήνας, στο Πεδίον του Άρεως αποτελείται από τρία επίπεδα-ορόφους και περιλαμβάνει συνολικά 602 θέσεις στάθμευσης. Οι διάδρομοί του είναι μίας λωρίδας, άρα μονής κατεύθυνσης, ενώ η σύνδεση των επιπέδων πραγματοποιείται με τη χρήση ραμπών ανόδου και καθόδου. Συνολικά υπάρχουν τέσσερις ράμπες, δύο ανόδου και δύο καθόδου. Οι έξοδοι του χώρου στάθμευσης, στις οποίες πρέπει να φτάσουν τα οχήματα, ώστε να ολοκληρώσουν τη διαδικασία της εκκένωσης βρίσκονται στο πρώτο επίπεδο, μία στο βόρειο τμήμα του ορόφου και μία στο νότιο.

Το AIMSUN έχει σχεδιαστεί ώστε να αναπαριστά με ακρίβεια μεγάλα οδικά δίκτυα, να προγραμματίζει τον σχεδιασμό των μεταφορών και να προσομοιώνει εκκενώσεις μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο ο σχεδιασμός κλειστών χώρων μικρής κλίμακας, όπως ο χώρος στάθμευσης στη συγκεκριμένη εργασία, δεν περιλαμβάνεται ακόμα στη λίστα των δυνατοτήτων του. Έτσι για την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του χώρου στάθμευσης χρειάστηκαν να γίνουν μερικές παραδοχές.

Αρχικά, οι θέσεις στάθμευσης σχεδιάστηκαν σαν μικρά τμήματα δρόμου μονής κατεύθυνσης. Στον πίνακα Προέλευσης – Προορισμού (OD matrix) οι έξοδοι του χώρου στάθμευσης θεωρήθηκαν ο προορισμός και οι θέσεις στάθμευσης η προέλευση των οχημάτων.



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση κεντροειδών

Επίσης τη στιγμή της εκκένωσης ο χώρος στάθμευσης θεωρείται πως έχει το μέγιστο αριθμό οχημάτων, 602 οχήματα, και όλα τους επιβατικά οχήματα. Απουσιάζουν δηλαδή βαρέα οχήματα και μοτοσυκλέτες. Τέλος τα οχήματα που παράγονται, εισάγονται στο δίκτυο μόλις υπάρχει διαθέσιμο χώρος, δηλαδή μόλις υπάρχει ένα ικανό κενό μπροστά από τη θέση στάθμευσης. Με τον τρόπο αυτό τα οχήματα εισέρχονται στο δίκτυο με τον ταχύτερο δυνατό τρόπο, γεγονός που εξυπηρετεί τους σκοπούς της εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης. Για κάθε χρονική στιγμή η συνολική ροή των οχημάτων που θέλει να εισέλθει στο δίκτυο συγκεντρώνεται στο σημείο εισόδου και εισέρχονται ένα ένα στο δίκτυο μόλις το βρεθεί αρκετό κενό διάστημα (TSS-Aimsun, 2013).

### **3.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**

Για τη συγκεκριμένη εργασία οι παράμετροι που επιλέχθηκαν να εξεταστούν είναι ο χρόνος αντίδρασης, η μέγιστη επιτάχυνση κι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των οχημάτων. Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες ο χρόνος αντίδρασης των οδηγών και η μέγιστη επιτάχυνση των οχημάτων φαίνεται πως συνδέονται άμεσα με τον χρόνο εκκένωσης, ενώ η μέγιστη ταχύτητα και η επιβράδυνση δεν επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα (Sfeir, 2015). Ωστόσο δεν υπάρχει κάποια έρευνα που να εξετάζει την επιρροή της παραμέτρου της ελάχιστης απόστασης μεταξύ των οχημάτων όταν αυτά βρίσκονται σε στάση. Πιο αναλυτικά εξετάζονται κατά σειρά :

- Μέγιστη επιτάχυνση οχήματος, δηλαδή η μέγιστη επιτάχυνση που μπορεί να επιτευχθεί κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.
- Ελάχιστη απόσταση οχημάτων, δηλαδή η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας που τηρεί ο οδηγός από το προπορευόμενο όχημα όταν τα οχήματα βρίσκονται σε στάση.
- Χρόνος αντίδρασης, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο οδηγός να προσαρμοστεί στις αλλαγές της ταχύτητας του προπορευόμενου οχήματος.

Μεγάλος αριθμός παραμέτρων απαιτεί αυξημένο υπολογιστικό χρόνο, αφού για κάθε παράμετρο απαιτούνται μερικές χιλιάδες 'τρεξίματα'. Οι παράμετροι εξετάζονται για τα ακόλουθα εύρη τιμών :

- Μέγιστη επιτάχυνση [0,8 – 3,5 m<sup>2</sup>/s]
- Ελάχιστη απόσταση οχημάτων [0,5 – 1,5 m]
- Χρόνος αντίδρασης [0,4 – 2,5 s]

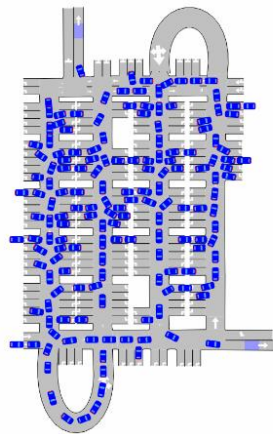
Τα εύρη των τιμών των παραμέτρων ορίστηκαν με βάση αναφορές (Gipps, 1981, Parathanasopoulou & Antoniou, 2015, Shao et al. 2008), λαμβάνοντας υπόψη και τις διαστάσεις του χώρου στάθμευσης (μήκος, πλάτος λωρίδας), οι οποίες θέτουν περιορισμούς στο εύρος τιμών της μέγιστης επιτάχυνσης.

### **3.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ**

Στόχος κάθε σχεδίου εκκένωσης είναι να συνδυάσει αποτελεσματικότητα και ταχύτητα. Να επιτευχθεί δηλαδή η πλήρης εκκένωση στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Για να

επιτευχθεί αυτό αρχικά πρέπει να παρέχεται πληροφόρηση – καθοδήγηση στους οδηγούς ως προς τη βέλτιστη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσουν. Η βέλτιστη διαδρομή ορίζεται με γνώμονα την ταχύτερη διαδρομή σε συνδυασμό με την μείωση της συμφόρησης, ώστε να επιτευχθεί ο ελάχιστος χρόνος εκκένωσης στο σύστημα. Ένα επιπλέον μέτρο για την μείωση του χρόνου εκκένωσης είναι η αλλαγή ορισμένων ρυθμίσεων κυκλοφορίας του χώρου στάθμευσης, ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία της εκκένωσης. Πιο συγκεκριμένα, με βάση αυτά τα κριτήρια κατασκευάζονται τα παρακάτω σενάρια με στόχο να προσεγγιστεί ο ελάχιστος δυνατός χρόνος εκκένωσης:

- Σενάριο 1 (Σενάριο Βάσης): Δεν πραγματοποιείται καμία αλλαγή στη διαρρύθμιση του χώρου στάθμευσης και τα οχήματα κατευθύνονται προς τις εξόδους. Τα οχήματα κατευθύνονται από τα χαμηλότερα επίπεδα προς το πρώτο επίπεδο, όπου βρίσκονται οι εξοδοί χρησιμοποιώντας μόνο τις ράμπες ανόδου



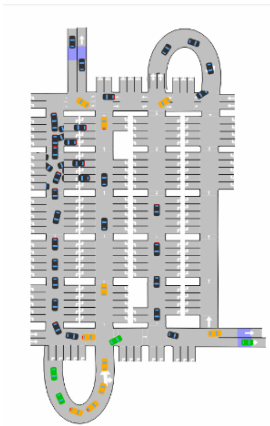
Σχήμα 3.3: Σενάριο 1 (Σενάριο Βάσης)

- Σενάριο 2: Στο σενάριο 2 οι ράμπες καθόδου χρησιμοποιούνται ως ράμπες ανόδου. Με τον τρόπο αυτό κάθε επίπεδο συνδέεται πλέον με δύο ράμπες με το υψηλότερο επίπεδο δημιουργώντας συνολικά τέσσερις ράμπες ανόδου.



Σχήμα 3.4: Σενάριο 2 (Ράμπες)

- Σενάριο 3: Στο σενάριο αυτό πέρα από τις τέσσερις ράμπες ανόδου προστίθεται μία ακόμα κυκλοφοριακή ρύθμιση. Οι οδηγοί μπορούν να εξέλθουν από τον χώρο στάθμευσης και να ολοκληρώσουν τη διαδικασία της εκκένωσης χρησιμοποιώντας και τις εισόδους ως εξόδους. Έτσι δημιουργούνται συνολικά τέσσερις εξοδοί στο πρώτο επίπεδο. Ωστόσο αυτό το μέτρο προϋποθέτει πως έχει αποκλειστεί η κυκλοφορία περιμετρικά του χώρου εκκένωσης, καθώς σε κανονικές κυκλοφοριακές συνθήκες η έξοδος των οχημάτων από τις εισόδους θα δημιουργούσε προβλήματα τόσο ως προς την ασφάλεια αλλά και ως προς τη ροή της διαδικασίας.

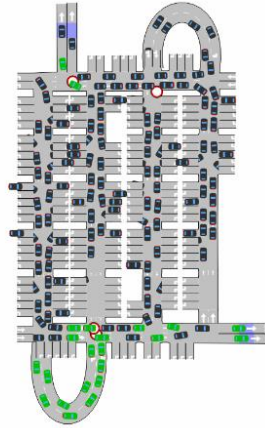


Σχήμα 3.5: Σενάριο 3 (Ράμπες & εξοδοί)

- Σενάριο 4: Στο τέταρτο σενάριο, πέρα από τις αλλαγές στις ράμπες και στις εξόδους, οι διάδρομοι μετατρέπονται σε διαδρόμους δύο λωρίδων. Το πλάτος των διαδρόμων του συγκεκριμένου χώρου στάθμευσης είναι 6 μέτρα, οπότε

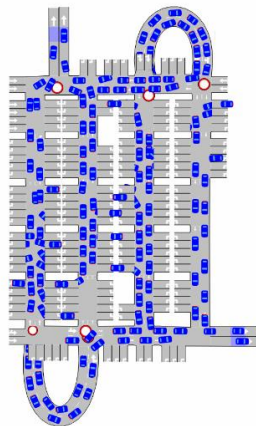


μετατρέπονται σε διαδρόμους δύο λωρίδων με πλάτος λωρίδας 3 μέτρα (ελάχιστο πλάτος λωρίδας με βάση ΟΜΟΕ 2,5 μέτρα). Με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται στο μέγιστο βαθμό η γεωμετρία του.



Σχήμα 3.6: Σενάριο 4 (Ράμπες & εξοδοί & 2 λωρίδες)

- Σενάριο 5: Στο πέμπτο σενάριο διατηρούνται όλες οι κυκλοφοριακές ρυθμίσεις του τέταρτου σενάριου και πραγματοποιείται αντιδρόμηση συγκεκριμένων διαδρόμων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Με τον τρόπο αυτό τα οχήματα προσεγγίζουν άμεσα την πλησιέστερη ράμπα ανόδου ή την πλησιέστερη έξοδο.



Σχήμα 3.7: Σενάριο 5 (Ράμπες & εξοδοί & 2 λωρίδες & αντιδρόμηση)

### 3.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ

Για κάθε σενάριο εξετάζονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι σχεδιασμού της εκκένωσης :

- Χωρίς πληροφόρηση: Οι οδηγοί καλούνται να αποφασίσουν μόνοι τους το βέλτιστο δρομολόγιο σύμφωνα με τις κυκλοφοριακές ρυθμίσεις που ισχύουν σε κάθε σενάριο με πλήρη απουσία πληροφόρησης.
- Με εφαρμογή εκκένωσης κατά στάδια (staged evacuation) κι έλεγχο της κίνησης των οχημάτων (control): Με τη χρήση κυκλοφοριακών μπαρών οι οδηγοί καλούνται να ακολουθήσουν υποχρεωτικά το προτεινόμενο σχέδιο εκκένωσης κατά στάδια. Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιείται εκκένωση ανά όροφο, κλείνοντας την κυκλοφορία στις ράμπες ανόδου μέχρι να ολοκληρωθεί η εκκένωση του πρώτου επίπεδου. Εκκένωση κατά στάδια πραγματοποιείται και στα πλαίσια του ίδιου ορόφου, ανά διάδρομο, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο, ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι διασταυρώσεις οχημάτων και να αυξηθεί η ροή.



Σχήμα 3.8: Εκκένωση κατά στάδια (Κλείσιμο ραμπών ανόδου)

- Με παροχή πληροφόρησης και επιλογή συμμόρφωσης ή μη με το προτεινόμενο σχέδιο εκκένωσης: Οι οδηγοί λαμβάνουν πληροφόρηση για τη βέλτιστη διαδρομή και επιλέγουν αν θα συμμορφωθούν ανάλογα με τις προτιμήσεις τους. Εξετάζονται επίσης οι επιπτώσεις της συμμόρφωσης στο συνολικό χρόνο εκκένωσης μεταβάλλοντας σταδιακά κατά 10% το ποσοστό συμμόρφωσης των οδηγών από 100% ως 0%.



Σχήμα 3.9: Εκκένωση με παροχή πληροφορίας

Στο σημείο αυτό πρέπει να υπογραμμιστεί πως παρόλο που εξετάζεται το ποσοστό συμμόρφωσης των οδηγών με τις παρεχόμενες πληροφορίες, δεν ισχύει το ίδιο για το φαινόμενο της παραβατικότητας, κατά το οποίο οι οδηγοί μπορεί να παραβιάζουν τις κυκλοφοριακές ρυθμίσεις που ισχύουν (πχ να κινούνται στην αντίθετη κατεύθυνση) προκειμένου να εξέλθουν από το χώρο στάθμευσης το συντομότερο δυνατό. Αυτό συμβαίνει γιατί το AIMSUN δεν παρέχει τη δυνατότητα εξέτασης της παραβατικότητας και για τον λόγο αυτό επιλέγεται να αγνοηθεί.

### 3.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ανάλυση ευαισθησίας στη συγκεκριμένη εργασία αφορά τρεις παραμέτρους.

Αρχικά για να εντοπιστούν οι παράμετροι με την μεγαλύτερη επιρροή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος input & output scatter plot, η οποία είναι μια πολύ απλή μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας. Ανήκει στην κατηγορία των screening methods, απλοποιεί δηλαδή το μοντέλο ξεχωρίζοντας τις πιο σημαντικές από τις παραμέτρους και απαλείφοντας τις υπόλοιπες. Επιλέχθηκαν λοιπόν πέντε επίπεδα ανάλυσης για τρεις παραμέτρους, επομένως προκύπτουν 125 ( $5^3$ ) πιθανοί συνδυασμοί τιμών των παραμέτρων. Επίσης για κάθε ένα από τους συνδυασμούς των τιμών των παραμέτρων εκτελέστηκαν 10 επαναλήψεις για να απαλειφθεί το σφάλμα της τυχαιότητας της μίας επανάληψης. Η ανάλυση ευαισθησίας εφαρμόστηκε στο πρώτο σενάριο (σενάριο βάσης) και αφού συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα προέκυψε πως η μέγιστη επιτάχυνση και ο χρόνος αντίδρασης επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό το μοντέλο και θα αναλυθούν περαιτέρω στη συνέχεια, ενώ η ελάχιστη απόσταση οχημάτων δεν

επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα, όπως θα φανεί από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας (Κεφάλαιο 4.2) και αποκλείστηκε.

Έπειτα έχοντας πλέον δύο παραμέτρους εφαρμόζεται η μέθοδος variance based. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανάλυση της διακύμανσης και ποσοτικοποιεί τις αβεβαιότητες των στοιχείων εισόδου και εξόδου σαν κατανομές πιθανοτήτων. Μέσω του υπολογισμού των δεικτών πρώτης και συνολικής ευαισθησίας υπολογίζεται η επιρροή της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά και η επιρροή της αλληλεπίδρασης των παραμέτρων αντίστοιχα. Η μέθοδος προβλέπει τον σχεδιασμό δύο πινάκων A και B με 500 ζεύγη pseudo-random τιμών των παραμέτρων έκαστος και στη συνέχεια το σχεδιασμό άλλων δύο πινάκων C<sub>i</sub> κι αυτοί με 500 ζεύγη τιμών που προκύπτουν από τους πίνακες A και B. Συνολικά το σενάριο βάσης προσομοιώνεται για 2.000 τιμές παραμέτρων και για 10 επαναλήψεις για κάθε ζεύγος, άρα συνολικά 20.000 φορές. Έπειτα υπολογίζονται οι δείκτες πρώτης και συνολικής ευαισθησίας. Στη συγκεκριμένη εργασία παρατηρείται πως μέχρι τις 2.000 προσομοιώσεις επιτυγχάνεται σύγκλιση για τον δείκτη συνολικής ευαισθησίας, όχι όμως και για τον δείκτη πρώτης ευαισθησίας.

Για τον λόγο αυτό η διαδικασία επαναλαμβάνεται αλλά με μερικώς τυχαίους αριθμούς (quasi random) αυτήν τη φορά. Οι μερικώς τυχαίοι αριθμοί είναι μια σειρά αριθμών που παρουσίασε πρώτος ο Sobol και έχουν την ιδιότητα να προσφέρουν ταχύτερη σύγκλιση. Μετά από τον εκ νέου υπολογισμό των δεικτών ευαισθησίας παρατηρείται ότι επέρχεται σύγκλιση και για τους δύο δείκτες και μάλιστα σε μικρότερο αριθμό επαναλήψεων από ότι τα pseudo-number.

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά και με την βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας. Για κάθε σενάριο και για κάθε διαφορετική μέθοδο εκκένωσης καταγράφονται οι χρόνοι εκκένωσης (μέγιστος, ελάχιστος και μέσος) που προκύπτουν για τα καθορισμένα εύρη τιμών των παραμέτρων καθώς και το ποσοστό μείωσης του χρόνου εκκένωσης σε σχέση με το σενάριο βάσης (Σενάριο 1).

### 4.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Σε πρώτο στάδιο, πριν τη διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας, τα σενάρια αξιολογούνται χρησιμοποιώντας ένα κοινό σετ παραμέτρων, ώστε να διαπιστωθεί αν όντως επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου εκκένωσης από σενάριο σε σενάριο και για κάθε διαφορετική μέθοδο εκκένωσης.

Για να διαπιστωθεί λοιπόν η αποτελεσματικότητα τόσο των σεναρίων, όσο και των μεθόδων εκκένωσης επιλέγεται να γίνει μία προσομοίωση χρησιμοποιώντας τους μέσους όρους από τα εύρη τιμών για κάθε παράμετρο. Έτσι η προσομοίωση πραγματοποιείται με τις παρακάτω τιμές για τις παραμέτρους:

- Μέγιστη επιτάχυνση:  $2,00 \text{ m/s}^2$  [0,8 – 3,5  $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- Ελάχιστη απόσταση οχημάτων 1m [0,5 – 1,5 m]
- Χρόνος αντίδρασης 1,5s [0,4 – 2,5 s]

Με βάση τις παραπάνω τιμές των παραμέτρων προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα για τον χρόνο εκκένωσης:

Σενάρια	Τρόπος εκκένωσης	Χρόνος εκκένωσης (min)
Σενάριο 1	Χωρίς πληροφόρηση	30

(σενάριο βάσης)	Με πληροφόρηση	28
	Εκκένωση κατά στάδια	28
<b>Σενάριο 2</b>  (ράμπες)	Χωρίς πληροφόρηση	25
	Με πληροφόρηση	19
	Εκκένωση κατά στάδια	19
<b>Σενάριο 3</b>  (ράμπες + έξοδοι)	Χωρίς πληροφόρηση	24
	Με πληροφόρηση	20
	Εκκένωση κατά στάδια	20
<b>Σενάριο 4</b>  (ράμπες + έξοδοι + διπλές)	Χωρίς πληροφόρηση	16
	Με πληροφόρηση	15

λωρίδες)	Εκκένωση κατά στάδια	15
<b>Σενάριο 5</b>  (ράμπες + έξοδοι + διπλές λωρίδες + αντιδρόμηση )	Χωρίς πληροφόρηση	13
	Με πληροφόρηση	12
	Εκκένωση κατά στάδια	12

Πίνακας 4.1: Χρόνοι εκκένωσης σεναρίων για ένα ζεύγος παραμέτρων

Ο παραπάνω πίνακας φανερώνει πως τόσο η εκκένωση κατά στάδια, όσο και η εκκένωση με παροχή πληροφόρησης μειώνουν σημαντικά το συνολικό χρόνο εκκένωσης για όλα τα σενάρια και κρίνονται αποτελεσματικές μέθοδοι σε πρώτη φάση. Επίσης παρατηρείται ότι ο χρόνος εκκένωσης μειώνεται δραστικά από το σενάρια βάσης μέχρι το πέμπτο σενάριο για κάθε αλλαγή που προστίθεται ανά σενάριο. Οπότε τα σενάρια κρίνονται αποτελεσματικά και δεν πραγματοποιείται κάποια αλλαγή.

## 4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε στάδιο της διαδικασίας μέχρι να παραχθούν τα τελικά αποτελέσματα και να υπολογιστούν οι χρόνοι εκκένωσης για κάθε σενάριο και για κάθε διαφορετική μέθοδο εκκένωσης. Η ανάλυση ευαισθησίας κρίθηκε αναγκαία για να υποδειχθούν ποιες είναι οι παράμετροι της κίνησης των οδηγών που επηρεάζουν την εκκένωση ενός χώρου στάθμευσης, όπως αυτές αποτυπώνονται μέσα από το πρότυπο Gipps.

#### **4.2.1 Μέθοδος input and output scatter plot (διαγράμματα συσχέτισης)**

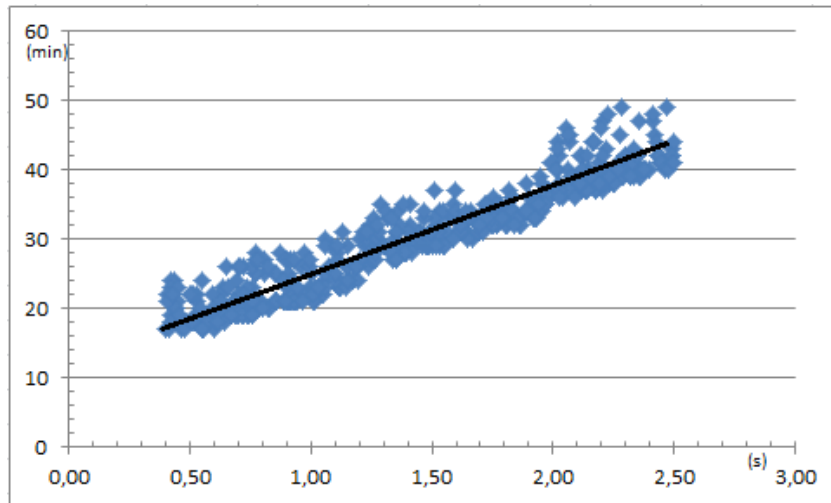
Η μέθοδος input and output Scatter plot ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων αξιολόγησης (screening methods), οι οποίες χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν τις παραμέτρους που επηρεάζουν περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα. Στο στάδιο αυτό ουσιαστικά γίνεται μία ‘διαλογή’ των σημαντικών παραμέτρων που θα εξεταστούν αναλυτικά στη συνέχεια, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι απαλείφονται από το μοντέλο, καθώς θεωρείται ότι ασκούν μηδαμινή επιρροή. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο απλοποιείται, μειώνονται τα σφάλματα που περιέχονται σε αυτό και εξοικονομείται υπολογιστικός χρόνος.

Η μέθοδος input and output Scatter plot είναι μία από τις πιο απλές και διαδοσμένες μεθόδους διεξαγωγής της ανάλυσης ευαισθησίας καθώς αναπαριστά τον τρόπο με τον οποίο οι διακυμάνσεις των τιμών των στοιχείων εισόδου επηρεάζουν το αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας διαγράμματα συσχέτισης.

Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζονται τρεις παράμετροι. Η μέγιστη επιτάχυνση, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των οχημάτων και ο χρόνος αντίδρασης. Το σενάριο βάσης προσομοιώθηκε για 500 συνδυασμούς των τιμών των τριών παραμέτρων χρησιμοποιώντας ψευδοτυχαίους αριθμούς, με κάθε ζεύγος παραμέτρων να εκτελείται δέκα φορές, ώστε να εξαλειφθεί το σφάλμα της τυχαιότητας της μίας μέτρησης. Συνολικά το μοντέλο του AIMSUN προσομοιώθηκε 5.000 φορές (500x10) και προέκυψαν τρία διαγράμματα συσχέτισης. Για κάθε διάγραμμα τοποθετήθηκαν 500 σημεία για την τιμή της κάθε παραμέτρου (άξονας x) σε αντιστοιχία με τον χρόνο εκκένωσης (άξονας y) που προέκυψε για την συγκεκριμένη τιμή.

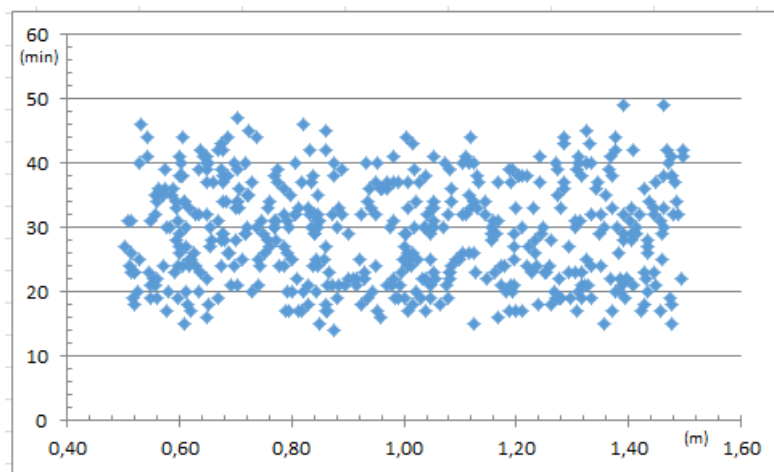
Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα συσχέτισης:





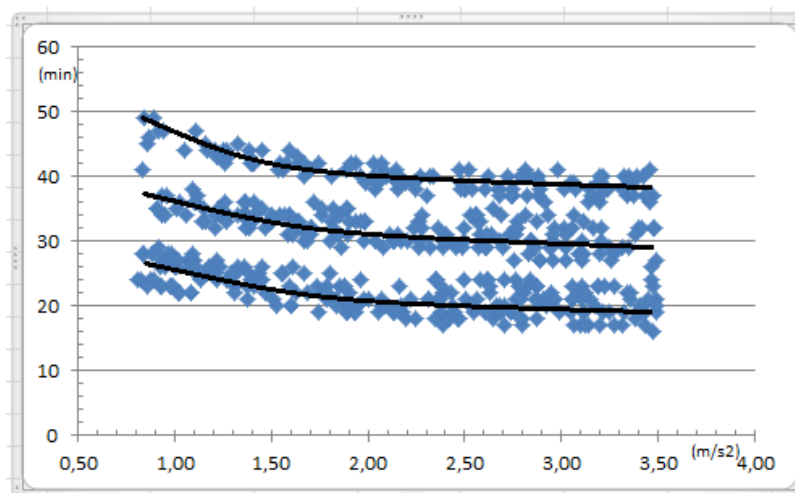
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα συσχέτισης χρόνου αντίδρασης (input and output method)

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα η άμεση συσχέτιση του χρόνου αντίδρασης με τον χρόνο εκκένωσης. Ο χρόνος εκκένωσης αυξάνεται σχεδόν γραμμικά όσο αυξάνεται ο χρόνος αντίδρασης, οπότε αυτή η παράμετρος επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα και θεωρείται σημαντική.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα συσχέτισης ελάχιστης απόστασης οχημάτων (input and output method)

Το νέφος των σημείων είναι διασκορπισμένο και δεν διαφαίνεται κάποιο σαφές προφίλ και άρα συσχέτιση της ελάχιστης απόστασης με το χρόνο εκκένωσης. Αυτό σημαίνει πως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των οχημάτων, όταν αυτά βρίσκονται σε στάση δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα και μπορεί να εξαιρεθεί από τη συνέχεια της ανάλυσης.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα συσχέτισης μέγιστης επιτάχυνσης (input and output method)

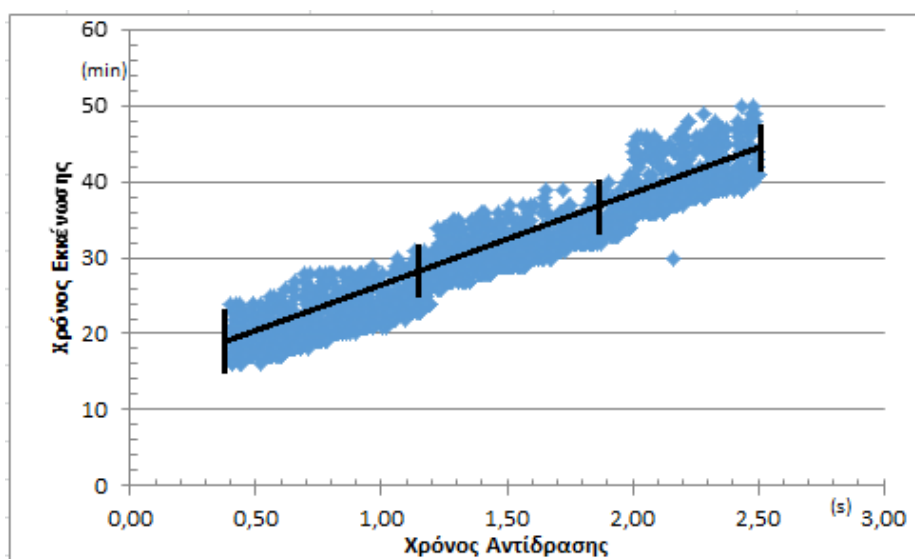
Στο διάγραμμα της μέγιστης επιτάχυνσης παρατηρείται ο σχηματισμός τριών καμπύλων εκθετικής μορφής. Η πρώτη καμπύλη περιλαμβάνει τις παραμέτρους που δίνουν χρόνο εκκένωσης από 15 ως 25 λεπτά, η δεύτερη από 25 ως 35, ενώ η τρίτη καμπύλη από 35 ως 45 λεπτά. Από την εκθετική μορφή των καμπυλών που σχηματίζει το νέφος των σημείων προκύπτει το συμπέρασμα πως η μέγιστη επιτάχυνση αποτελεί σημαντική παράμετρο και επηρεάζει το αποτέλεσμα, ωστόσο δεν υποδεικνύεται το είδος της συσχέτισης μεταξύ της μέγιστης επιτάχυνσης και του χρόνου εκκένωσης, όπως παραδείγματος χάρη στην περίπτωση του χρόνου αντίδρασης που τα δύο μεγέθη συνδέονται γραμμικά. Ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται η μέγιστη επιτάχυνση με τον χρόνο εκκένωσης θα ερευνηθεί αναλυτικά στη συνέχεια.

#### 4.2.2 Μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης (Variance-based method)

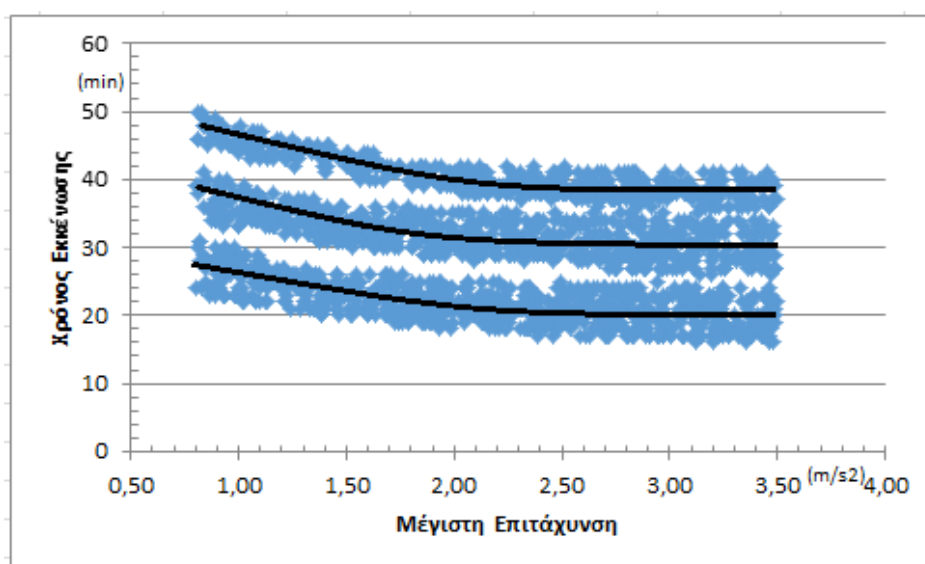
Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης της ευαισθησίας, έχοντας πλέον δύο παραμέτρους, χρησιμοποιείται η μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης, η οποία προσδιορίζει τον βαθμό στον οποίο τα στοιχεία εισόδου επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Υπολογίζεται δηλαδή η ευαισθησία του αποτελέσματος σε μια μεταβλητή εισόδου μετρώντας την ποσότητα της διακύμανσης στο αποτέλεσμα που οφείλεται σε αυτή τη μεταβλητή εισόδου.

Αρχικά δημιουργούνται δύο πίνακες A και B [500x2] με 500 ζεύγη τιμών των παραμέτρων έκαστος χρησιμοποιώντας ψευδοτυχαίους αριθμούς. Στη συνέχεια, από τους πίνακες A και B, προκύπτουν ακόμα δύο πίνακες C<sub>1</sub> και C<sub>2</sub>. Ο πίνακας C<sub>1</sub>

αποτελείται από την πρώτη στήλη του πίνακα Β και την δεύτερη στήλη του πίνακα Α, ενώ ο  $C_2$  από την πρώτη στήλη του Α και τη δεύτερη στήλη του Β. Έτσι δημιουργούνται 2.000 σετ τιμών των παραμέτρων και καθένα από αυτά προσομοιώνεται 10 φορές για να εξαλειφθεί το σφάλμα της τυχαιότητας της μιας μέτρησης, οπότε το μοντέλο του AIMSUN προσομοιώνεται συνολικά 20.000 φορές. Στο σημείο αυτό παράγονται εκ νέου τα διαγράμματα συσχέτισης της μέγιστης επιτάχυνσης και του χρόνου αντίδρασης.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα συσχέτισης χρόνου αντίδρασης (variance based method)



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα συσχέτισης μέγιστης επιτάχυνσης (variance based method)

Σε σχέση με τα προηγούμενα διαγράμματα συσχέτισης, αυτήν τη φορά είναι εμφανής ο σχηματισμός των τριών εκθετικών καμπύλων όσον αφορά τη μέγιστη επιτάχυνση, ενώ για το χρόνο αντίδρασης παρατηρείται ο σχηματισμός τριών διαφορετικών νεφών σημείων. Όπως και για τη μέγιστη επιτάχυνση, τα νέφη σημείων αποτελούνται από τις τιμές του χρόνου αντίδρασης που δίνουν χρόνο εκκένωσης από 15 ως 25, από 25 ως 35 και από 35 ως 45 λεπτά αντίστοιχα. Έτσι διαπιστώνεται πως το αποτέλεσμα του μοντέλου επηρεάζεται άμεσα από τη συσχέτιση και την αλληλεπίδραση του χρόνου αντίδρασης και της μέγιστης επιτάχυνσης.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι δείκτες ευαισθησίας πρώτης και κύριας επίδρασης για τα 2.000 σετ των παραμέτρων ως εξής:

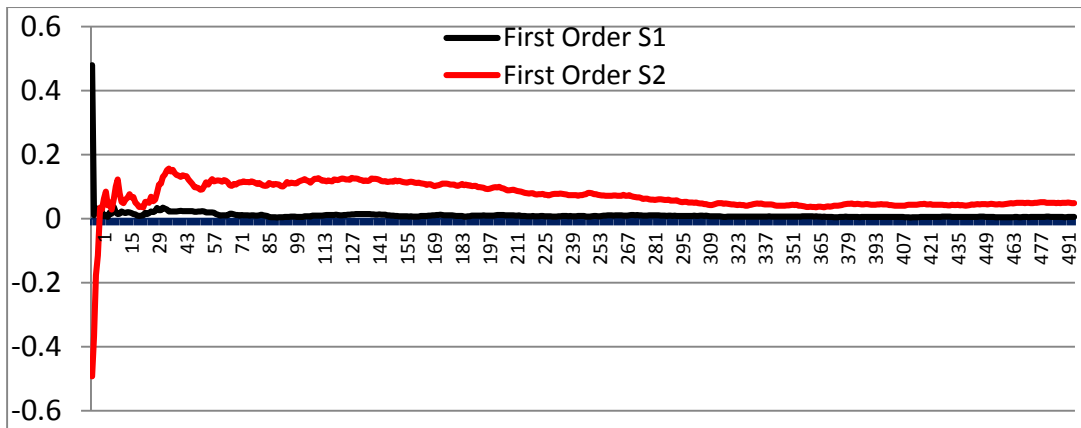
- Δείκτης πρώτης επίδρασης:

$$S_i = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_B^{(j)} (y_{C_i}^{(j)} - y_A^{(j)})}{\frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)} + y_B^{(j)})^2 - \left( \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} + y_B^{(j)} \right)^2}$$

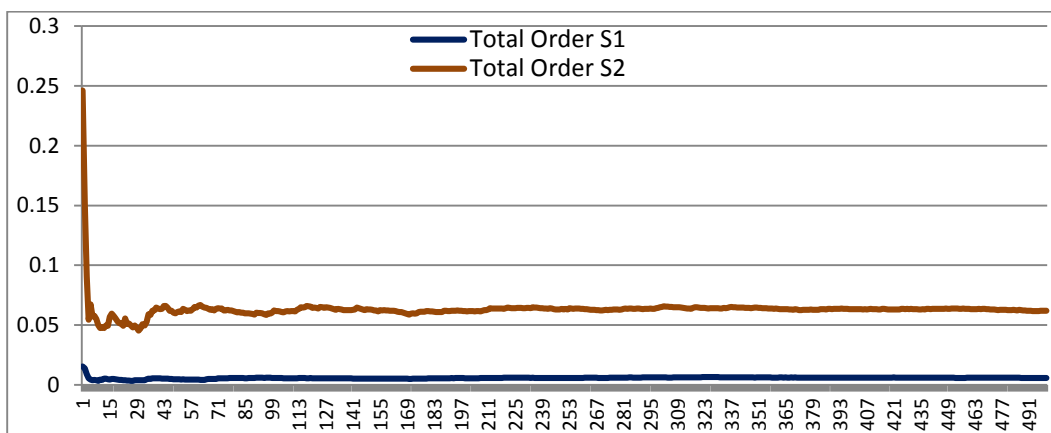
- Δείκτης συνολικής επίδρασης:

$$S_i = \frac{\frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)} - y_{C_i}^{(j)})^2}{\frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)} + y_B^{(j)})^2 - \left( \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} + y_B^{(j)} \right)^2}$$

Για όλους τους δείκτες επίδρασης πρέπει να επέλθει σύγκλιση, δηλαδή να σταθεροποιηθούν οι τιμές τους, έτσι ώστε μετά από έναν συγκεκριμένο αριθμό προσομοιώσεων να μην μεταβάλλονται οι τιμές τους όσες προσομοιώσεις και να προστεθούν.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα μεταβολής δείκτη πρώτης επίδρασης (ψευδοτυχαίοι αριθμοί)



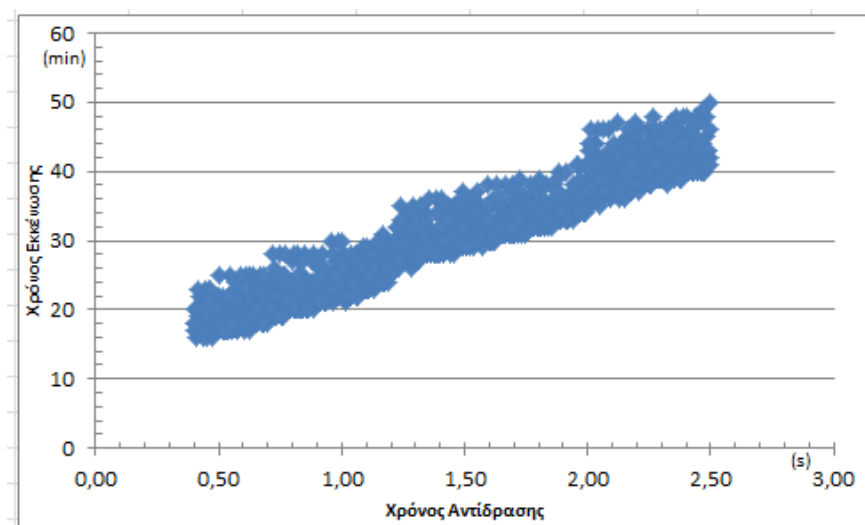
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα μεταβολής δείκτη συνολικής επίδρασης (ψευδοτυχαίοι αριθμοί)

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μέχρι τον αριθμό των 500 προσομοιώσεων έχει επέλθει σύγκλιση για τους δείκτες συνολικής επίδρασης S1 και S2, όσο και για το δείκτη πρώτης επίδρασης S1 όχι όμως και για τον δείκτη πρώτης επίδρασης S2. Συνεπώς οι 500 προσομοιώσεις δεν είναι αρκετές για τη σταθεροποίηση του αποτελέσματος. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος υπάρχουν δύο πιθανές προσεγγίσεις. Να αυξηθεί το πλήθος των προσομοιώσεων μέχρι να επέλθει σύγκλιση του προβληματικού δείκτη σε ένα αριθμό άνω των 500 ή να χρησιμοποιηθούν μερικώς τυχαίοι αριθμοί, μια σειρά αριθμών σχεδιασμένη από τον Sobol, ώστε να προσδίδουν ταχύτερη σύγκλιση. Προκειμένου να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος επιλέγεται η επανάληψη της μεθόδου ανάλυσης της διακύμανσης με τη χρήση μερικώς τυχαίων αριθμών.

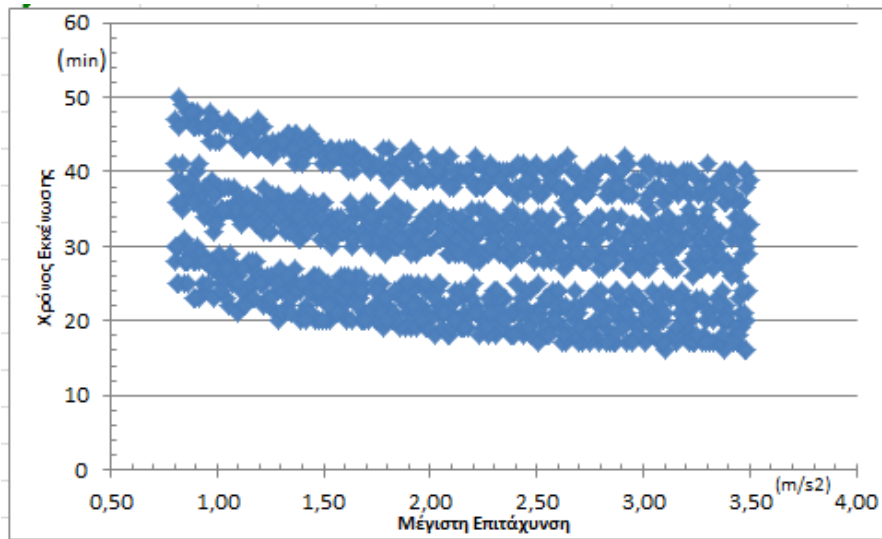
### 4.2.3 Μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης με χρήση μερικώς τυχαίων αριθμών

Η ίδια διαδικασία όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.2 επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας μερικώς τυχαίους αριθμούς αυτήν τη φορά. Χρησιμοποιώντας την προγραμματιστική γλώσσα Matlab παράγονται 1.000 μερικώς τυχαίοι αριθμοί, ώστε να σχεδιαστούν οι πίνακες A και B και στη συνέχεια οι πίνακες C<sub>1</sub> και C<sub>2</sub> διαστάσεων [500x2]. Το σενάριο βάσης προσομοιώνεται λοιπόν 2.000 φορές με την κάθε προσομοίωση να επαναλαμβάνεται 10 φορές, οπότε συνολικά πραγματοποιούνται 20.000 προσομοιώσεις.

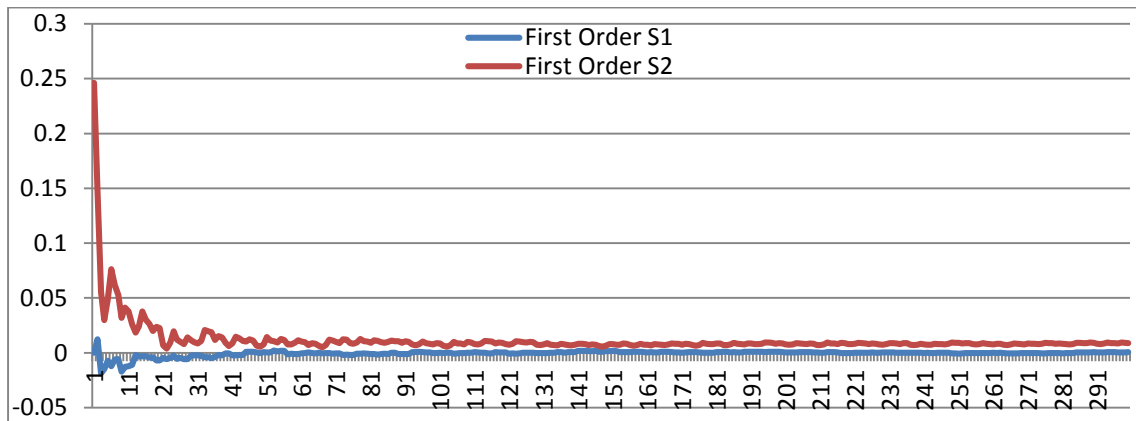
Στη συνέχεια σχεδιάζονται τα διαγράμματα συσχέτισης σύμφωνα με τη γνωστή διαδικασία και υπολογίζονται οι δείκτες πρώτης και συνολικής επίδρασης όπως φαίνεται στο παρακάτω διαγράμματα:



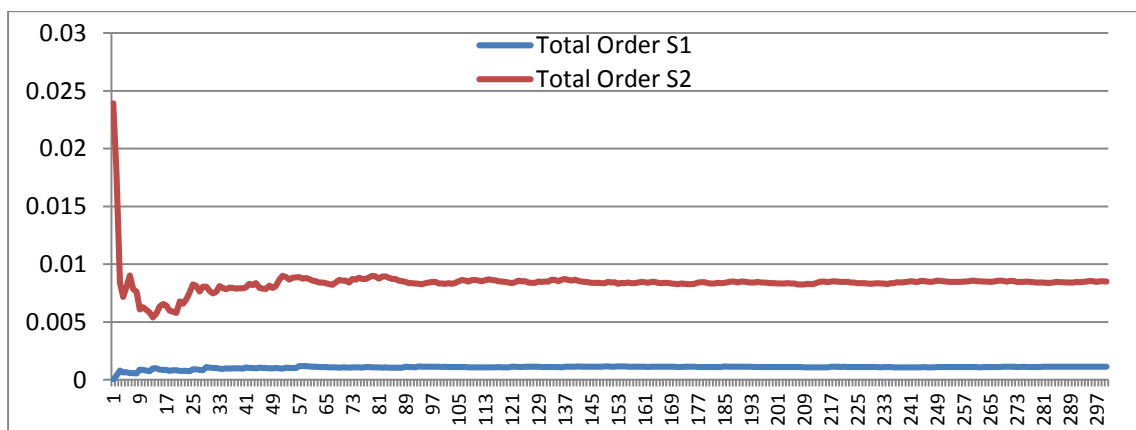
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα συσχέτισης χρόνου αντίδρασης (μερικώς τυχαίοι αριθμοί)



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα συσχέτισης μέγιστης επιτάχυνσης (μερικώς τυχαίοι αριθμοί)



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα μεταβολής δείκτη πρώτης επίδρασης (μερικώς τυχαίοι αριθμοί)



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα μεταβολής δείκτη συνολικής επίδρασης (μερικώς τυχαίοι αριθμοί)

Αυτήν τη φορά παρατηρείται ότι επέρχεται σύγκλιση για όλους του δείκτες επίδρασης μετά τον αριθμό των 250 προσομοιώσεων. Έτσι στη συνέχεια της εργασίας για τα

υπόλοιπα σενάρια θα χρησιμοποιηθεί ο συγκεκριμένος αριθμός προσομοιώσεων για εξοικονόμηση χρόνου, καθώς από εκεί και έπειτα όσες προσομοιώσεις και να προστεθούν δε θα επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα.

#### **4.2.4. Αποτελέσματα στα υπόλοιπα σενάρια**

Για τα υπόλοιπα σενάρια σύμφωνα με τα όσα προέκυψαν από τη μέθοδο ανάλυσης της διακύμανσης με μερικώς τυχαίους αριθμούς θα επαναληφθεί η ίδια διαδικασία, για τον αριθμό των 250 προσομοιώσεων, τις μισές δηλαδή σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο βάσης. Δημιουργούνται οι τέσσερις πίνακες A, B, C<sub>1</sub> και C<sub>2</sub> για κάθε σενάριο και για τους τρεις τρόπους εκκένωσης (εκκένωση χωρίς πληροφόρηση, εκκένωση κατά στάδια, εκκένωση με παροχή πληροφόρησης) και πραγματοποιούνται 10.000 προσομοιώσεις του AIMSUN για το καθένα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται με τη χρήση πινάκων και διαγραμμάτων, τα οποία περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α στο τέλος της εργασίας.

Συνολικά για την ολοκλήρωση της ανάλυσης ευαισθησίας για τη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε ο παρακάτω αριθμός προσομοιώσεων στο AIMSUN.

- 5.000 για 3 παραμέτρους, για την ολοκλήρωση της μεθόδου input and output scatter plot.
- 20.000 για την ολοκλήρωση της μεθόδου ανάλυσης της διακύμανσης (variance based) χρησιμοποιώντας ψευδοτυχαίους αριθμούς, για 2 πλέον παραμέτρους.
- 12.000 για την επανάληψη της μεθόδου ανάλυσης της διακύμανσης χρησιμοποιώντας μερικώς τυχαίους αριθμούς.
- 150.000, { (10.000 προσομοιώσεις) x (5 σενάρια) x (3 μεθόδους εκκένωσης) }, για την εξέταση των πέντε σεναρίων και για τους τρεις τρόπους εκκένωσης.
- Λόγω του μεγάλου όγκου πληροφορίας κάθε ποσοστό συμμόρφωσης προσομοιώνεται για 200 σετ τιμών των παραμέτρων. Έτσι ο μέσος χρόνος εκκένωσης που προκύπτει για κάθε ποσοστό συμμόρφωσης απέχει ελαφρώς από τον πραγματικό χρόνο εκκένωσης δίνει ωστόσο μια ικανοποιητική εικόνα του τρόπου με τον οποίο το ποσοστό συμμόρφωσης των οδηγών με τις παρεχόμενες πληροφορίες εκκένωσης επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Έτσι



πραγματοποιούνται επιπλέον: 90.000 (200 σετ παραμέτρων x 10 επαναλήψεις x 9 ποσοστά συμμόρφωσης x 5 σενάρια).

Οπότε ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων ανέρχεται στις 277.000. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες και διαγράμματα:

Σενάρια	Τρόπος εκκένωσης	Ελάχιστος χρόνος εκκένωσης (λεπτά)	Μέγιστος χρόνος εκκένωσης (λεπτά)	Μέσος χρόνος εκκένωσης (λεπτά) + Τυπική απόκλιση	Ποσοστό μείωσης σε σύγκριση με σενάριο βάσης
<b>Σενάριο 1</b>  (σενάριο βάσης)	Χωρίς πληροφόρηση	16	51	30,27 (7,99)	-
	Με πληροφόρηση	15	45	27,89 (7,20)	7,87%
	Εκκένωση κατά στάδια	16	49	30,32 (8,01)	-0,17%
<b>Σενάριο 2</b>  (ράμπες)	Χωρίς πληροφόρηση	13	40	24,43 (6,19)	19,30%
	Με πληροφόρηση	11	31	19,15 (4,72)	36,74%
	Εκκένωση κατά στάδια	12	28	18,42 (4,31)	39,15%
<b>Σενάριο 3</b>  (ράμπες + έξοδοι)	Χωρίς πληροφόρηση	12	39	23,55 (6,08)	22,20%
	Με πληροφόρηση	11	30	18,96 (4,77)	37,36%
	Εκκένωση κατά στάδια	11	30	18,38 (4,54)	39,28%
<b>Σενάριο 4</b>	Χωρίς πληροφόρηση	9	32	16,24 (4,41)	46,35%
	Με	8	24	13,98 (3,43)	53,82%

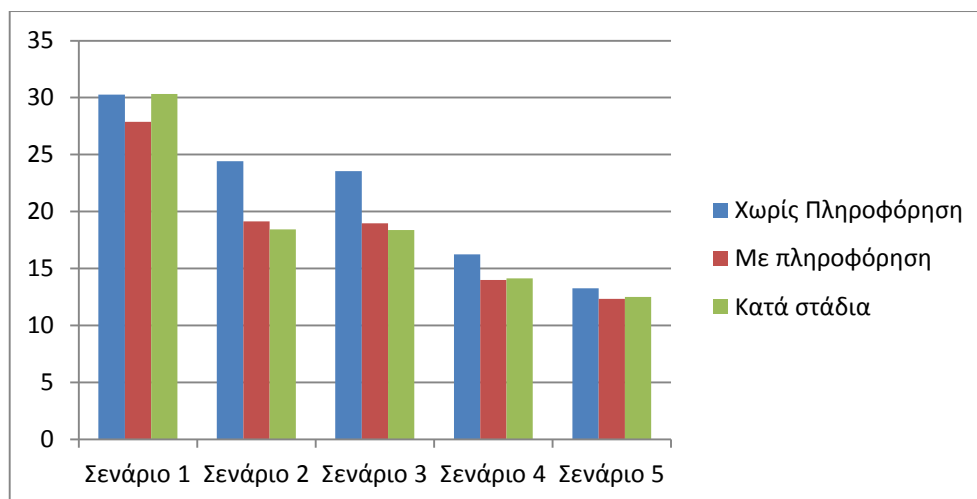
(ράμπες + έξοδοι + διπλές λωρίδες)	πληροφόρηση				
	Εκκένωση κατά στάδια	8	23	14,13 (3,55)	53,32%
<b>Σενάριο 5</b>  (ράμπες + έξοδοι + διπλές λωρίδες + αντιδρόμηση)	Χωρίς πληροφόρηση	8	26	13,27 (3,50)	56,16%
	Με πληροφόρηση	8	20	12,33 (2,65)	59,27%
	Εκκένωση κατά στάδια	8	23	12,50 (2,73)	58,70%

Πίνακας 4.2: Τελικοί χρόνοι εκκένωσης σεναρίων

Σύμφωνα με τον πίνακα 4.2 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο σχεδιασμός των σεναρίων κρίνεται επιτυχημένος, καθώς κάθε σενάριο μειώνει τον χρόνο εκκένωσης του χώρου στάθμευσης με τον ελάχιστο χρόνο (13,27m) να σημειώνεται στο τελικό σενάριο (Σενάριο 5).
- Ο ελάχιστος μέσος χρόνος εκκένωσης του χώρου στάθμευσης προκύπτει στο Σενάριο 5 για εκκένωση με παροχή πληροφόρησης (προϋποθέτοντας πλήρης συμμόρφωση των οδηγών με τις οδηγίες), όπου τα οχήματα ολοκληρώνουν τη διαδικασία της εκκένωσης σε 12,33 λεπτά κατά μέσο όρο, σημειώνεται δηλαδή μείωση 59,27% του μέσου χρόνου εκκένωσης σε σχέση με το σενάριο βάσης.
- Οι διαφορές των τιμών για τους χρόνους που προέκυψαν για όλα τα σεναρία είναι στατιστικά σημαντικές για διάστημα εμπιστοσύνης μεγαλύτερο από 99% και κατ' επέκταση δεν προκύπτουν με τυχαίο τρόπο.

Η σύγκριση των χρόνων εκκένωσης ανάλογα με τη μέθοδο διαχείρισης της εκκένωσης που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε σενάριο, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα δίνει μία καλύτερη εικόνα όσον αφορά την αποτελεσματικότητα των μεθόδων αυτών



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα χρόνων εκκένωσης σεναρίων για τις μεθόδους σχεδιασμού της εκκένωσης

Το παραπάνω διάγραμμα οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι μέθοδοι σχεδιασμού εκκένωσης (εκκένωση κατά στάδια, εκκένωση με παροχή πληροφόρησης) κρίνονται αμφότερες επιτυχημένες, καθώς μειώνουν δραστικά το χρόνο εκκένωσης των οχημάτων. Για τα τρία πρώτα σενάρια ο ελάχιστος χρόνος εκκένωσης επιτυγχάνεται μέσω της εκκένωσης κατά στάδια, ενώ για τα σενάρια 4 και 5 ο ελάχιστος χρόνος σημειώνεται μέσω της εκκένωσης με παροχή πληροφόρησης (προϋποθέτοντας πλήρης συμμόρφωση των οδηγών με τις οδηγίες).

Όσον αφορά τη μέθοδο εκκένωσης με παροχή πληροφόρησης στους οδηγούς εξετάζεται αρχικά η πλήρης συμμόρφωση των οδηγών με αυτές. Στη συνέχεια για τα ζεύγη των παραμέτρων που δίνουν το μέγιστο και τον ελάχιστο χρόνο εκκένωσης για κάθε σενάριο εξετάζονται οι επιπτώσεις της συμμόρφωσης μειώνοντας κάθε φορά το ποσοστό κατά 10%. Ποσοστό συμμόρφωσης 0% ισοδυναμεί με τη μέθοδο εκκένωσης σχεδιασμού χωρίς πληροφόρηση.

Ποσοστό Συμμόρφωσης (%)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Σενάριο 1	27,9	28,0	28,3	28,9	29,0	29,5	29,5	29,8	30,1	30,3
Σενάριο 2	19,2	20,1	20,6	21,8	22,8	24,5	24,9	24,5	24,7	24,6
Σενάριο 3	19,0	20,0	20,8	22,1	23,1	24,5	24,1	23,8	23,7	23,7

<b>Σενάριο 4</b>	14,0	14,3	14,9	15,5	16,2	16,3	16,2	16,1	16,2	16,1
<b>Σενάριο 5</b>	12,3	12,9	13,1	13,4	13,7	13,8	13,6	13,5	13,4	13,2

Πίνακας 4.3: Επίδραση του ποσοστού συμμόρφωσης στο χρόνο εκκένωσης

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν πως το ποσοστό συμμόρφωσης των οδηγών με τις παρεχόμενες οδηγίες επηρεάζει άμεσα τον χρόνο εκκένωσης. Η επιτυχία της μεθόδου σχεδιασμού της εκκένωσης με παροχή πληροφόρησης προϋποθέτει την πλήρη συμμόρφωση των οδηγών με τις οδηγίες. Η μη συμμόρφωση επιφέρει αύξηση του χρόνου εκκένωσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως κατά κύριο λόγο ποσοστό συμμόρφωσης της τάξεως 50-60% επιφέρει τη μεγαλύτερη αύξηση στο χρόνο εκκένωσης, καθώς οι μισοί οδηγοί ακολουθούν τις πληροφορίες κι οι υπόλοιποι λειτουργούν αυθαίρετα με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι διασταυρώσεις των οχημάτων και να σχηματίζονται μεγάλες ουρές.

Στη συνέχεια στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών επίδρασης που προέκυψαν για κάθε σενάριο και μέθοδο εκκένωσης:

Σενάρια	Τρόπος εκκένωσης	Δείκτης πρώτης επίδρασης		Δείκτης συνολικής επίδρασης	
		S1	S2	S1	S2
<b>Σενάριο 1</b> (σενάριο βάσης)	Χωρίς πληροφόρηση	0,0006	0,0089	0,0011	0,0085
	Με πληροφόρηση	-0,0006	0,0007	0,0011	0,0016
	Εκκένωση κατά στάδια	-0,0011	0,0017	0,0012	0,0018
<b>Σενάριο 2</b> (ράμπες)	Χωρίς πληροφόρηση	0,0058	-0,0006	0,0018	0,0022
	Με πληροφόρηση	0,0007	0,0065	0,005	0,0022
	Εκκένωση κατά στάδια	0,0014	0,0031	0,0012	0,0016
	Χωρίς	-0,0010	0,0011	0,0021	0,0018

<b>Σενάριο 3</b>  (ράμπες + έξοδοι)	πληροφόρηση				
	Με πληροφόρηση	-0,0009	-0,0010	0,0018	0,0023
	Εκκένωση κατά στάδια	-0,0005	0,0020	0,0015	0,0019
<b>Σενάριο 4</b>  (ράμπες + έξοδοι + διπλές λωρίδες)	Χωρίς πληροφόρηση	-0,0011	0,0005	0,0061	0,0030
	Με πληροφόρηση	0,0022	0,0065	0,0030	0,0025
	Εκκένωση κατά στάδια	-0,0071	0,0004	0,0028	0,0258
<b>Σενάριο 5</b>  (ράμπες + έξοδοι + διπλές λωρίδες + αντίθετη κατεύθυνση)	Χωρίς πληροφόρηση	0,0018	-0,0029	0,0064	0,0055
	Με πληροφόρηση	0,0011	0,0025	0,0021	0,0028
	Εκκένωση κατά στάδια	-0,0011	0,0083	0,0018	0,0030

Πίνακας 4.4: Τιμές δεικτών επίδρασης πρώτης και συνολικής ευαισθησίας

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα οι τιμές των δεικτών πρώτης και συνολικής επίδρασης για κάθε σενάριο μεταβάλλονται σε σχέση με τις τιμές για το σενάριο βάσης (Σενάριο 1). Οι διαφοροποιήσεις στις τιμές των δεικτών ωστόσο είναι μικρές και θεωρούνται εντός των λογικών πλαισίων, κατά επέκταση θεωρείται ότι έχει επέλθει σύγκλιση για όλα τα σενάρια.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα από τα προβλήματα που προκαλούν την υποβάθμιση της ποιότητας ζωής στις πυκνοδομημένες κεντρικές περιοχές κατοικίας των μεγαλουπόλεων, όπως και στην Αθήνα είναι η έλλειψη χώρων στάθμευσης. Μία από τις πλέον αποτελεσματικές λύσεις στο πρόβλημα αυτό συνιστά η κατασκευή υπόγειων χώρων στάθμευσης, καθώς συντείνει στην επίλυση του λειτουργικού προβλήματος της στάθμευσης χωρίς να προσαυξάνει τον υπάρχοντα ορατό κτιριακό όγκο της περιοχής, ενώ συγχρόνως παρέχει τη δυνατότητα αποδέσμευσης του ελεύθερου κοινόχρηστου δημόσιου χώρου από τα σταθμευμένα οχήματα και την απόδοσή του στους πεζούς ή στην κυκλοφορία. Παρά την αύξηση όμως του αριθμού αυτών των χώρων δεν έχουν σχεδιαστεί σε πολλές περιπτώσεις οι στρατηγικές εκκένωσης ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής εκκένωση του χώρου σε συνδυασμό με την επίτευξη του ελάχιστου δυνατού χρόνου.

Στην προσπάθεια για την ανάπτυξη σχεδίων εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης μικρής κλίμακας το εργαλείο της κυκλοφοριακής προσομοίωσης αποδεικνύεται εξαιρετικά χρήσιμο. Η απουσία δεδομένων από πραγματικές καταστάσεις εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης είναι το σημαντικότερο εμπόδιο, καθώς οι εκκενώσεις αποτελούν ένα σπάνιο φαινόμενο και η κάθε περίπτωση έχει τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει με τη σειρά της η ανάλυση ευαισθησίας μέσω της οποίας αντιμετωπίζεται η έλλειψη δεδομένων, αλλά και οι αβεβαιότητες και τα σφάλματα που ενδέχεται να περιέχει το μοντέλο.

Στη συγκεκριμένη εργασία αναπτύχθηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια εκκένωσης του τριώροφου υπόγειου χώρου στάθμευσης Cityzen στην πόλη της Αθήνας, στην περιοχή του Πεδίου του Άρεως. Τα εξεταζόμενα σενάρια αφορούν αλλαγές στις αρχικές ρυθμίσεις κυκλοφορίας του χώρου στάθμευσης, όπως διπλασιασμό του αριθμού των εξόδων, των ραμπών ανόδου καθώς και του αριθμού των λωρίδων όλων των διαδρόμων του χώρου στάθμευσης και αντιδρομήσεις ορισμένων εξ' αυτών. Κάθε σενάριο εξετάστηκε για τρεις διαφορετικές μεθόδους σχεδιασμού της εκκένωσης. Εκκένωση χωρίς πληροφόρηση, εκκένωση κατά στάδια και εκκένωση με παροχή πληροφόρησης στους οδηγούς. Επιπλέον όσον αφορά στην πληροφόρηση, καθώς δεν δύναται να διασφαλιστεί η συμμόρφωση όλων των οδηγών με αυτές εξετάζονται οι επιπτώσεις του ποσοστού συμμόρφωσης στο συνολικό χρόνο εκκένωσης του χώρου στάθμευσης. Το

ψηφιακό μοντέλου του χώρου στάθμευσης και τα σενάρια δημιουργήθηκαν με τη χρήση του μικροσκοπικού προγράμματος προσομοίωσης AIMSUN. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν να εξεταστούν είναι η μέγιστη επιτάχυνση, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των οχημάτων όταν αυτά είναι εν στάσει και ο χρόνος αντίδρασης. Στη συνέχεια με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας και τις τεχνικές input and output scatter plots (διαγράμματα συσχέτισης) και variance based (ανάλυση της διακύμανσης) με χρήση μερικών τυχαίων αριθμών εντοπίστηκαν οι σημαντικές παράμετροι του μοντέλου και υπολογίστηκαν οι μέγιστοι κι οι ελάχιστοι χρόνοι εκκένωσης σε κάθε περίπτωση.

Έτσι από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας μέσω της μεθόδου input and output με χρήση διαγραμμάτων συσχέτισης προέκυψε ότι ο χρόνος αντίδρασης των οδηγών και η μέγιστη επιτάχυνση των οχημάτων επηρεάζουν το χρόνο εκκένωσης σε αντίθεση με την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των οχημάτων. Ο χρόνος αντίδρασης συνδέεται γραμμικά με το χρόνο εκκένωσης, καθώς αύξηση του χρόνου αντίδρασης οδηγεί σε αύξηση του χρόνου εκκένωσης. Η μέγιστη επιτάχυνση επηρεάζει έμμεσα το χρόνο εκκένωσης, μέσω της αλληλεπίδρασης με τον χρόνο αντίδρασης.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης, ώστε να προσδιοριστεί ο ελάχιστος αριθμός προσομοιώσεων που απαιτείται προκειμένου να σταθεροποιηθεί το αποτέλεσμα του μέσου χρόνου εκκένωσης για κάθε σενάριο. Όσον αφορά την αξιολόγηση των σεναρίων εκκένωσης, σε κάθε σενάριο προστίθεται μία κυκλοφοριακή ρύθμιση στο χώρο στάθμευσης, η οποία συντελούσε στη μείωση του χρόνου εκκένωσης ανά σενάριο, με τον ελάχιστο χρόνο εκκένωσης (13,3 λεπτά) να σημειώνεται στο τελικό σενάριο (σενάριο 5).

Εξίσου αποτελεσματικές φαίνονται να είναι και οι μέθοδοι σχεδιασμού της εκκένωσης, καθώς τόσο η κατά στάδια, όσο και η εκκένωση με παροχή πληροφόρησης συντελούν στη σημαντική μείωση του χρόνου εκκένωσης παράγοντας παραπλήσια αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος της κατά στάδια εκκένωσης διαφαίνεται να είναι η πιο αποτελεσματική για τα σενάρια 2 και 3, ενώ η μέθοδος εκκένωσης με παροχή πληροφόρησης κρίνεται ως η πιο αποτελεσματική για τα σενάρια 4 και 5. Κατά το σενάριο 5, το οποίο είναι το τελικό σενάριο εκκένωσης παρατρώνται ποσοστά μείωσης του χρόνου εκκένωσης σε σχέση με το αρχικό σενάριο (σενάριο 1) της τάξεως του 58,70% και 59,27% αντίστοιχα. Ωστόσο η αποτελεσματικότητα της εκκένωσης με

παροχή πληροφόρησης προϋποθέτει την πλήρη συμμόρφωση των οδηγών με τις οδηγίες εκκένωσης, καθώς χαμηλό ποσοστό συμμόρφωσης συνεπάγεται αύξηση του χρόνου εκκένωσης.

Επιπλέον η παρούσα έρευνα υποδεικνύει πως το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN μπορεί να αντεπεξέλθει σε ικανοποιητικό βαθμό στις ανάγκες της όσον αφορά τη δημιουργία των σεναρίων και την προσομοίωση τους αλλά και ως προς την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ανάλυσης ευαισθησίας και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες μελλοντικές εκκενώσεις κλειστών χώρων. Το AIMSUN υπολείπεται στην αδυναμία απεικόνισης της παραβατικότητας των οδηγών, η οποία δεν δίνεται να προσομοιωθεί με άμεσο τουλάχιστον τρόπο. Μέσα από τη μεθοδολογία αυτή μπορούν να προσδιοριστούν οι σημαντικές παράμετροι του μοντέλου και υπολογίστηκαν οι πιθανοί χρόνοι εκκένωσης για κάθε σενάριο. Επίσης παρατηρήθηκε πως η εκκένωση του χώρου στάθμευσης κατά στάδια και η εκκένωση με πληροφόρηση συνεισφέρουν στη σημαντική μείωση του χρόνου εκκένωσης, γεγονός που σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης μπορεί να αποδειχθεί κομβικό. Η εργασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ασφαλή και άμεση εκκένωση του συγκεκριμένου χώρου στάθμευσης αλλά και να αποτελέσει ‘οδηγό’ για την κατάρτιση σχεδίων εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης για περιπτώσεις με παρόμοια χαρακτηριστικά, όπως η εκκένωση κλειστών χώρων μικρής κλίμακας.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στο φαινόμενο της παραβατικότητας κατά τη διάρκεια εκκένωσης εκτάκτου ανάγκης και τον αντίκτυπο αυτής στον τελικό χρόνο εκκένωσης, ώστε να προσεγγιστεί με όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό τρόπο η διαδικασία της εκκένωσης.



## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

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

Asian Development Bank. 2006. Indonesia: Tsunami Summary

Balakrishna, R., Wen, Y., Ben-Akiva, M., Antoniou, C.: Simulation-based framework for transportation network management for emergencies. *Transp. Res. Rec.*2041, 80–88 (2008)

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

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

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

Caicedo F., Robuste F. and Lopez-Pita A. (2006), “Parking management and modeling of car park patron behavior in underground facilities”, presented at the Annual Meeting of the Transportation Research Board

Chen X.Z., Zhu W.Y., Dong Y.G. et al. “Study on a calculating method of machine fuzzy reliability,” *Journal of Systems Engineering*, Vol. 15, No.1, pp 7-12 (2000)

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

Church, R., and R. Sexton. 2002. Modeling Small Area Evacuation: Can Existing Transportation Infrastructure Impede Public Safety. Caltrans Testbed Center for

Interoperability Task Order 3021 Report, Vehicle Intelligence & Transportation Analysis Laboratory, University of California, Santa Barbara

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., Johnson, J.P.: A network flow model for lane-based evacuation routing. *Transp. Res. A*37 (7), pp 579–604 (2003)

Daganzo, C.F. (1995). The cell transmission model, Part II: network traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 29(2), 79-93

Durst D., Lämmel G., Klüpfel H., Large-Scale Multi-modal Evacuation Analysis with an Application to Hamburg Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012 Part II pp 361-369 (2014)

Farah Nora Aznieta, Parviz Moradipour, Jamaloddin Noorzaei, Mohd Saleh Jaafar, Abdul Aziz, (2013) "An improved computational method in structural dynamics", *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 11 Iss: 3, pp. 288 - 315

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

Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), 105–111

Han, L.D., Yuan, F.: Evacuation modeling and operations using dynamic traffic assignment and mostdesirable destination approaches. In: *Proceedings of the 84th Annual Meeting Transportation ResearchBoard*, Washington, DC, USA (2005)

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.

Hidas, P. (1998). SITRAS: A simulation model for ITS applications. Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, Seoul Korea, CD Rom, Seoul Korea

Hidas, P. (2005). Modelling individual behaviour in microsimulation models. Australian Transport Research Forum 2005

Hobeika AG, Jamie B (1985) MASSVAC: A model for Calculating Evacuation Times under Natural Disaster. In: Carroll JM (ed) Proceedings of the Conference on Computer Simulation in Emergency Planning, vol 15. Soc Comput Simul, pp 23-28

Jahn O., Möhring R.H., Schulz A.S. and Stier-Moses N.E, System-optimal routing of traffic flows with user constraints in networks with congestion, Oper Res 53 (2005), 600–616.

Johansson B, Jain S, Montoya-Torres J, Hugan J, and Yücesan E, eds. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference

KLD: Formulations of the DYNEV and I-DYNEV traffic simulation models used in ESF. Technical report prepared for the Federal Emergency Management Agency, KLD Associates, Washington, DC (1984)

Klunder, G., Terbruggen, S., Mak, J., Immers, B.: Large-scale evacuation of the Randstand: evacuation simulations with the dynamic traffic assignment model Indy. In: Proceedings of the 1st International Conference on Evacuation Modeling and Management, The Hague, The Netherlands (2009)

Lämmel G, Flötteröd G. Towards System Optimum: Finding Optimal Routing Strategies in Time-Dependent Networks for Large-Scale Evacuation Problems KI 2009: Advances in Artificial Intelligence 32nd Annual German Conference on AI, Paderborn, Germany, September 15-18, 2009. pp 532-539 (2009)

Lieberman, E. and Rathi, A. K. (1997) "Traffic Simulation." Chapter 10 of Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report, Oak Ridge National Laboratory

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.

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

Murray-Tuite, P.: Perspectives for network management in response to unplanned disruptions. *J Urban Plan.Dev.*133 (1), 9–17 (2007)

Nerem Sebastian, Vehicle Weight in Gipps Car Following Model, Institutt for bygg, anlegg og transport (2013)

Noh, H., Chiu, Y.C., Zheng, H., Hickman, M., Mirchandani, P.: An approach to modeling demand and supply for a short-notice evacuation. *Transp. Res. Rec.*2091, 91–99 (2009)

O'Hagan A. (2006), *Uncertain Judgements: Eliciting Experts' Probabilities*, Wiley, Chichester

Paruolo, P., M. Saisana, A. Saltelli (2012), Ratings and rankings: voodoo or science? ,*The Royal Statistical Society: Journal Series A*

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

Pravinvongvuth, S., and W. R. Loudon, Development of a Corridor System Management Plan Using a Hybrid Meso-Microsimulation Model, presented at the TRB Integrated Corridor Systems Management Conference, Irvine, California, September 2009

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

Rakha, H., & Gao, Y. (2010). Calibration of Steady-state Car-following Models using Macroscopic Loop Detector Data. In *Proceedings of the 89th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington D.C. ,USA

Rathi, A. K. et al. 1993. User Manual for Oak Ridge Evacuation Modeling System (OREMS) Draft Report, ORNL, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831

Rogers G, Sorensen J (1993) Diffusion of emergency warning: comparing empirical and simulation results. *Adv Risk Anal* 8: 117–117

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

Sfeir George, Simulation-based evacuation planning for large indoor parking facilities using sensitivity analysis (2015)

Sheffi, Y., Mahmassani, H.S., Powell, W.: *NETVAC: A Transportation Network Evacuation Model*. Center for Transportation Studies, MIT, Boston (1980)

Silcock, J.P. (1993). *SIGSIM version 1.0 users guide*. Working Paper from the Centre for Transport Studies, UCL

Sobol, I. M. (1998). On quasi-Monte Carlo integrations, 47, 103–112

Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates, 55, 271–280

Tu, H., Tamminga, G., Drolenga, H., De Wit, J., Van Der Berg, W.: Evacuation plan of the city of Almere: simulating the impact of driving behaviors on evacuation clearance time. In: Hoogendoorn, S.P., Pel, A.J., Taylor, M.A.P., Mahmassani, H. (eds.) *Proceedings of the 1st International Conference on Evacuation Modeling and Management*, pp. 67–75. Elsevier, Amsterdam (2010)

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

Wang, H., Andrews, S., Daiheng, N., Collura, J.: Scenario-based analysis of transportation impacts in case of dam failure flood evacuation in Franklin county, Massachusetts. In: Proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA (2010)

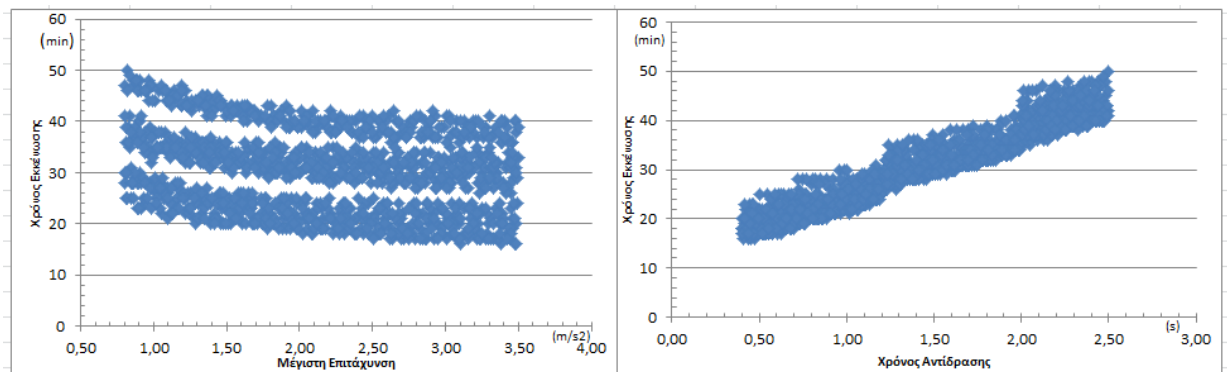
Williams, B., Tagliaferri, A., Meinhold, S., Hummer, J., Roupail, N.: Simulation and analysis of freeway lane reversal for coastal hurricane evacuation. J Urban Plan. Dev. 133 (1), 61–72 (2007)

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

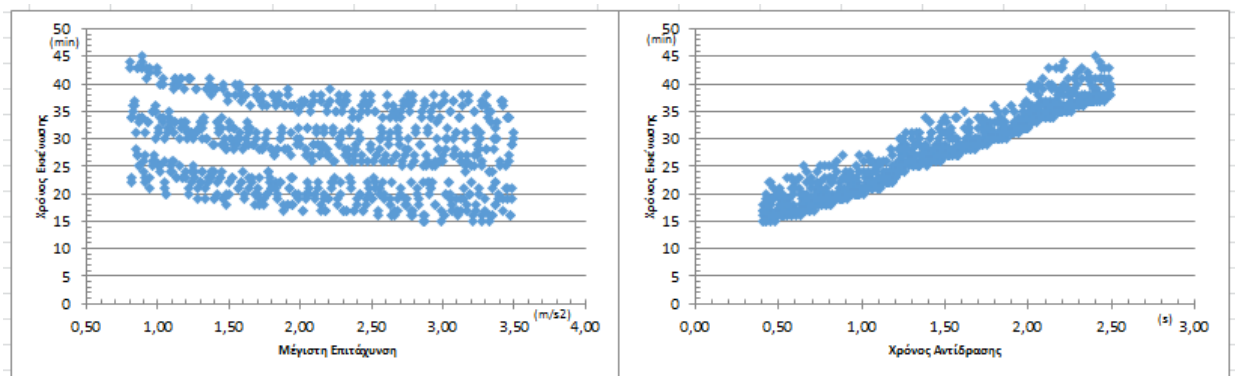
Zheng Y., Rundell A. 2006. Comparative study of sensitivity analyses of the TCR-activated ERK-MAPK signalling pathway. Syst. Biol. 153, 201–211

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

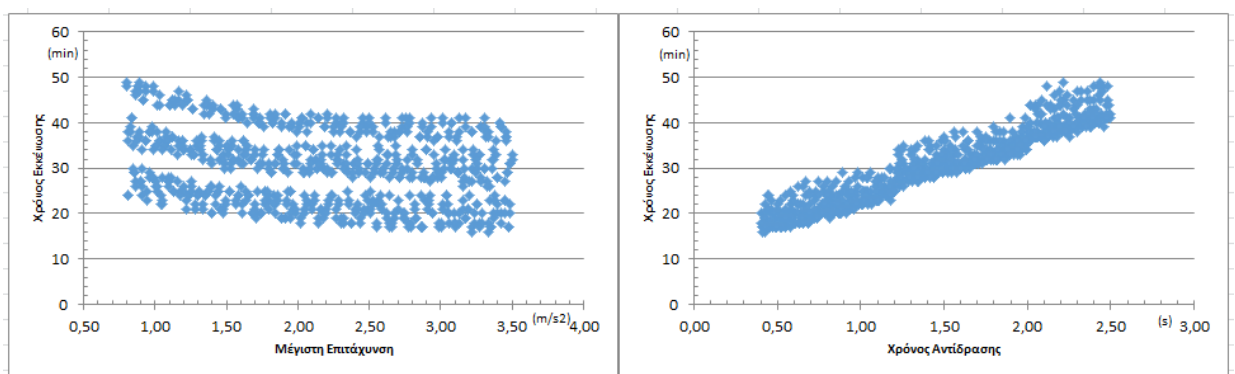
## ΣΕΝΑΡΙΟ 1



Σχήμα Α1: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 1 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση

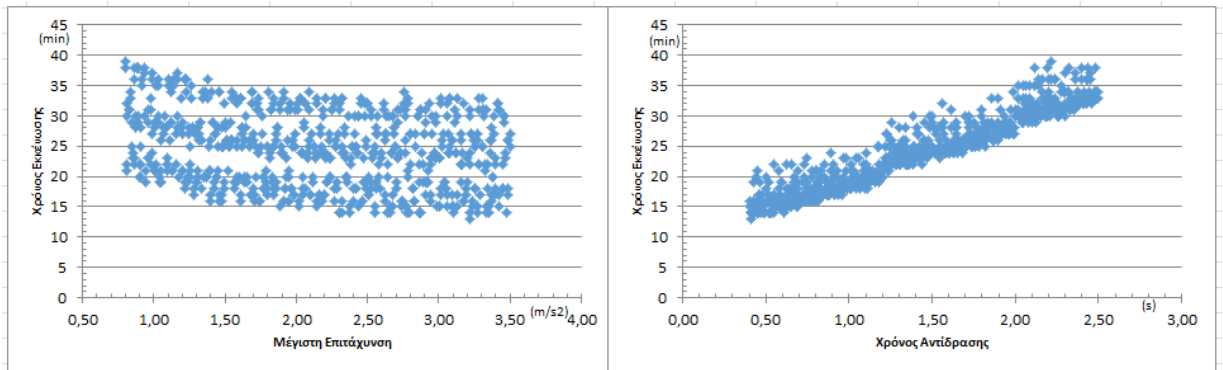


Σχήμα Α2: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 1 για εκκένωση με πληροφόρηση

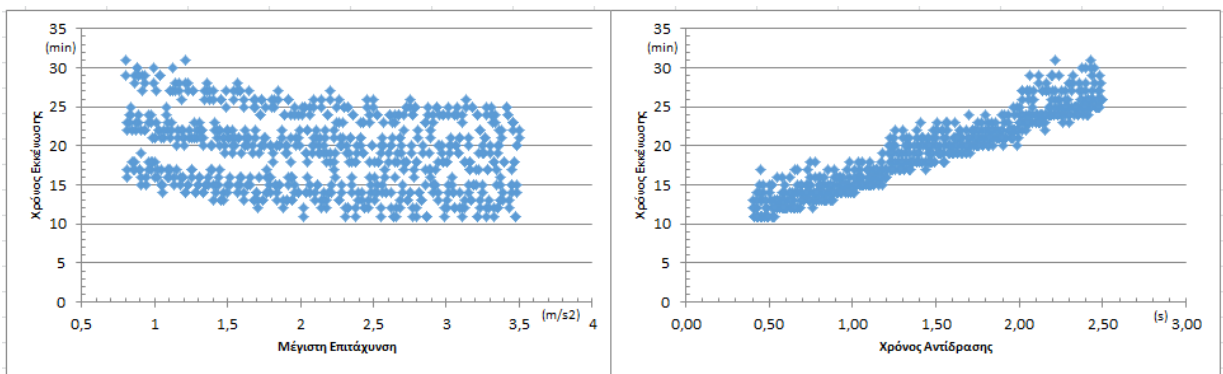


Σχήμα Α3: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 1 για εκκένωση κατά στάδια

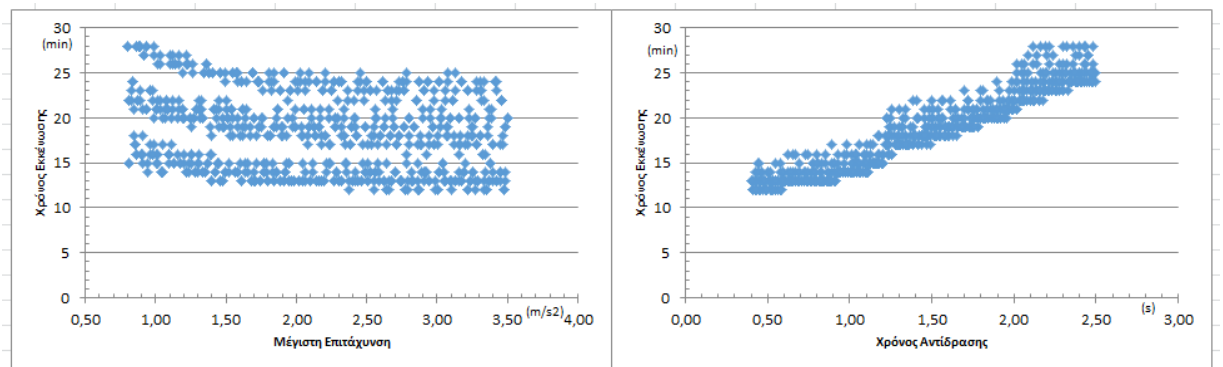
## ΣΕΝΑΡΙΟ 2



Σχήμα Α4: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 2 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση



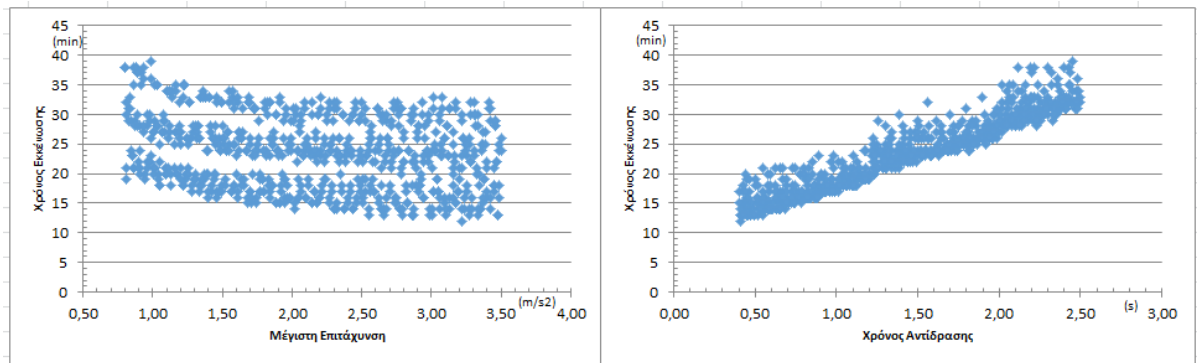
Σχήμα Α5: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 2 για εκκένωση με πληροφόρηση



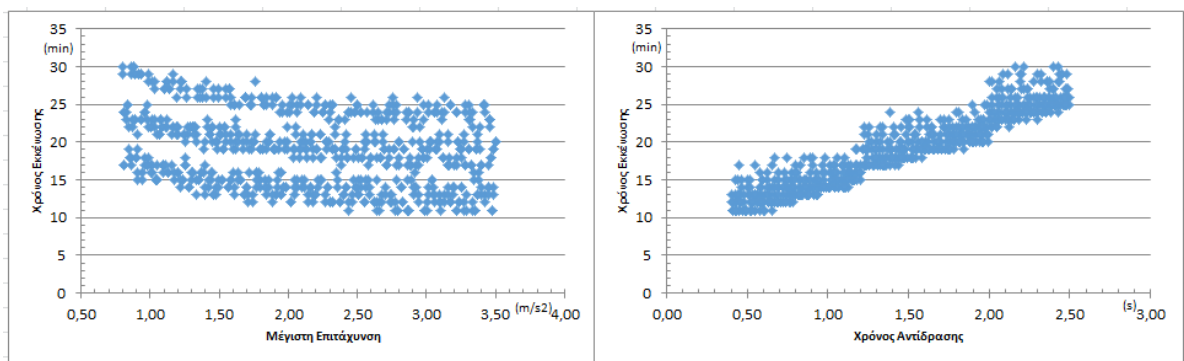
Σχήμα Α6: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 2 για εκκένωση κατά στάδια



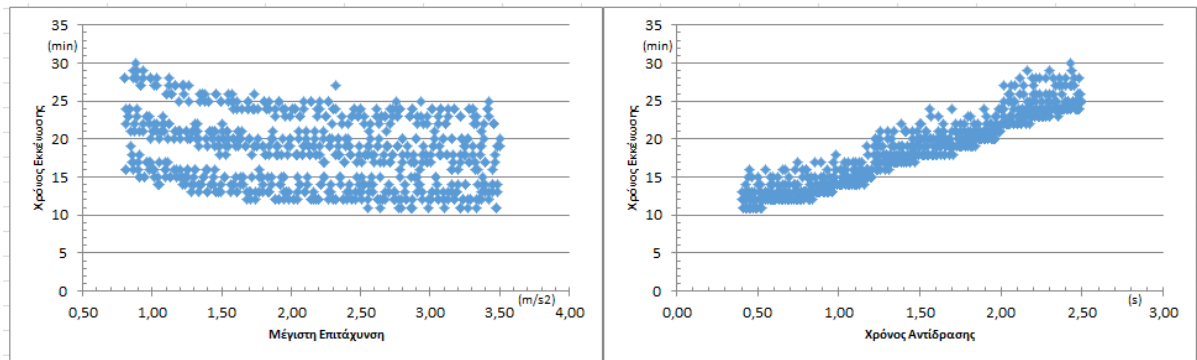
### ΣΕΝΑΡΙΟ 3



Σχήμα A7: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 3 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση

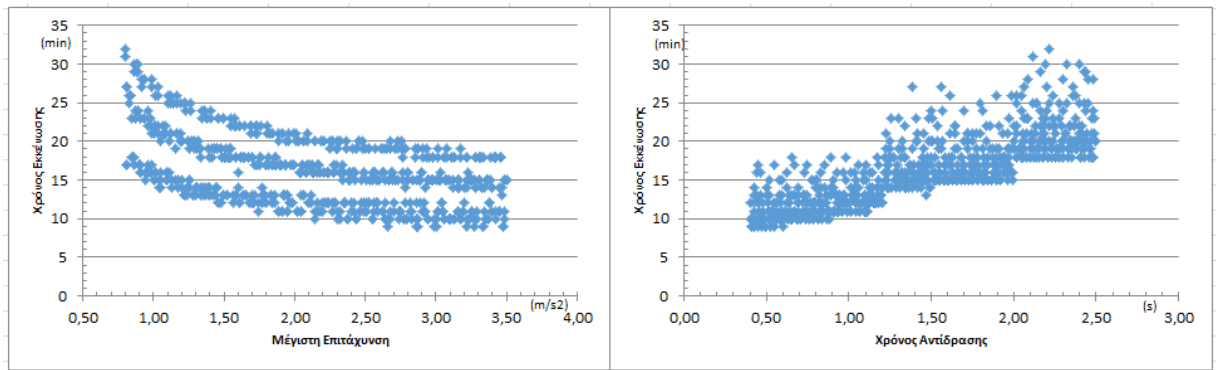


Σχήμα A8: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 3 για εκκένωση με πληροφόρηση

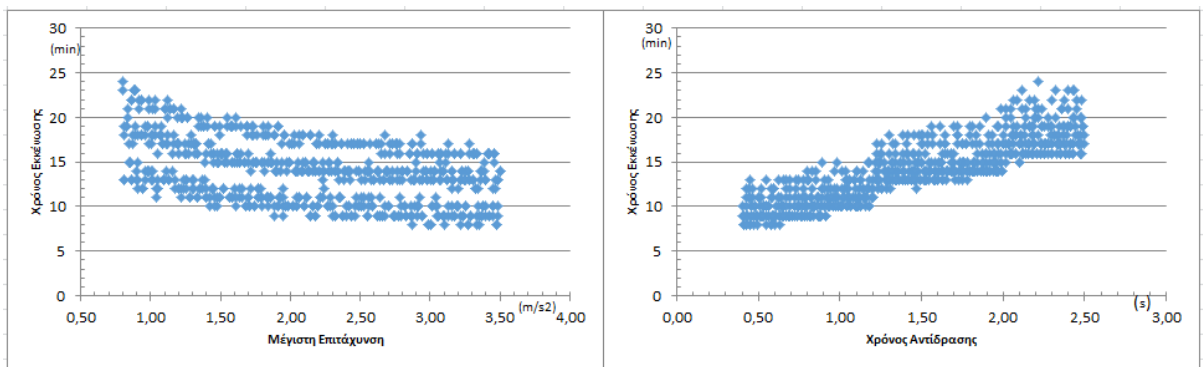


Σχήμα A9: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 3 για εκκένωση κατά στάδια

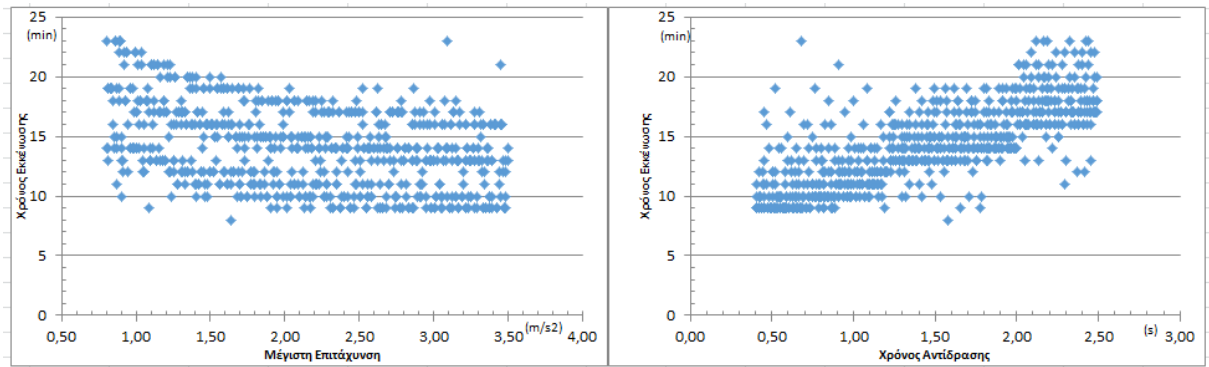
## ΣΕΝΑΡΙΟ 4



Σχήμα A10: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 4 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση

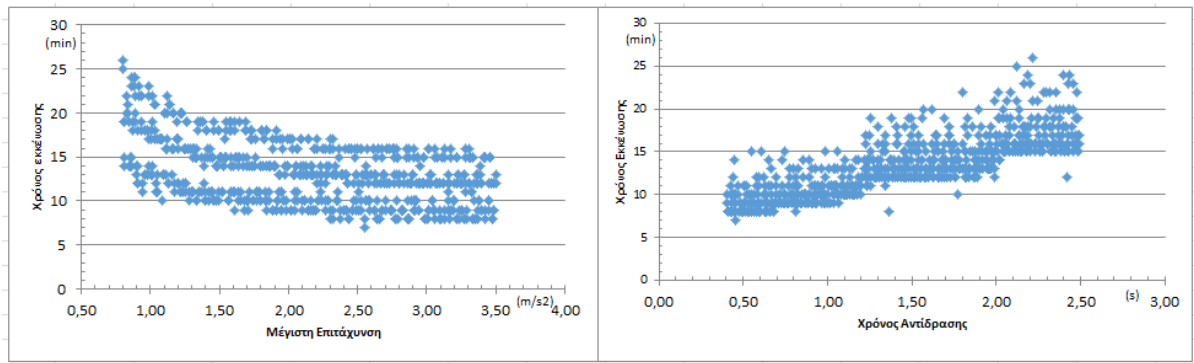


Σχήμα A11: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 4 για εκκένωση με πληροφόρηση

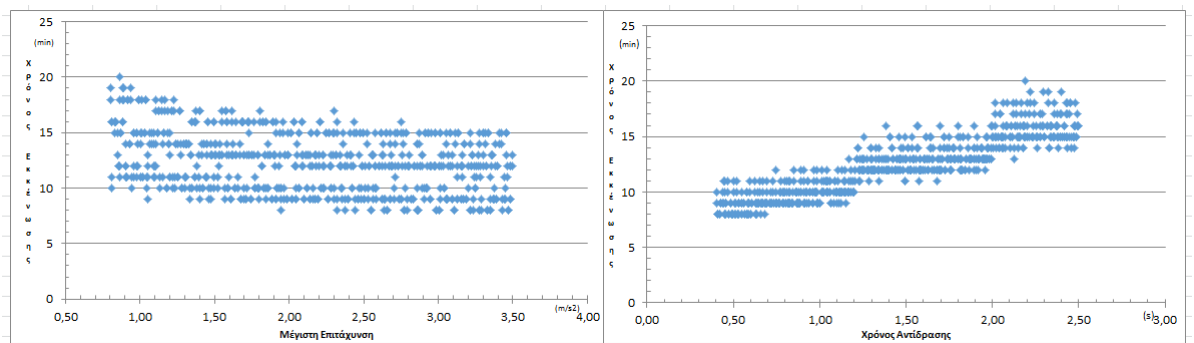


Σχήμα A12: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 4 για εκκένωση κατά στάδια

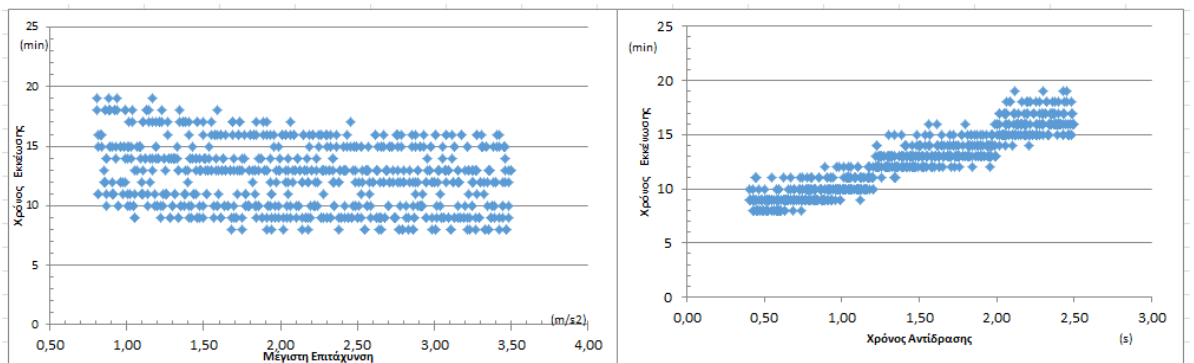
## ΣΕΝΑΡΙΟ 5



Σχήμα A13: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 5 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση



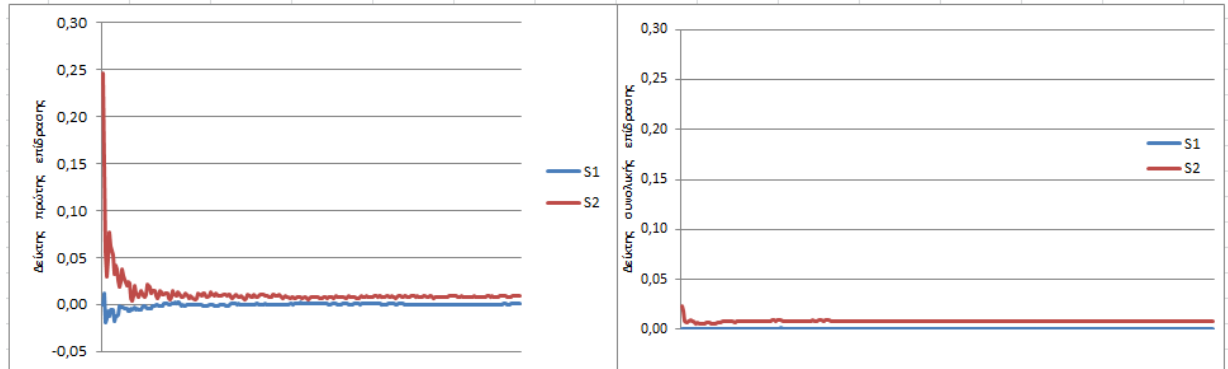
Σχήμα A14: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 5 για εκκένωση με πληροφόρηση



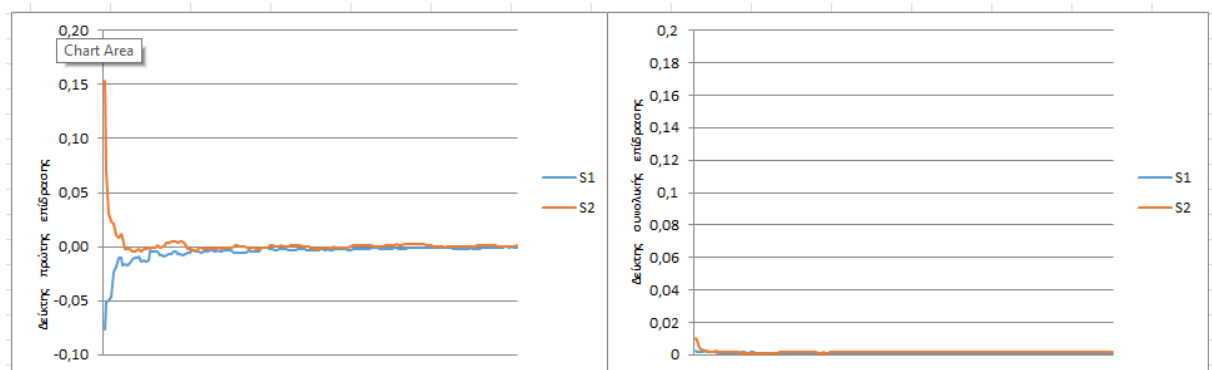
Σχήμα A15: Διαγράμματα συσχέτισης Σενάριο 5 για εκκένωση κατά στάδια

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

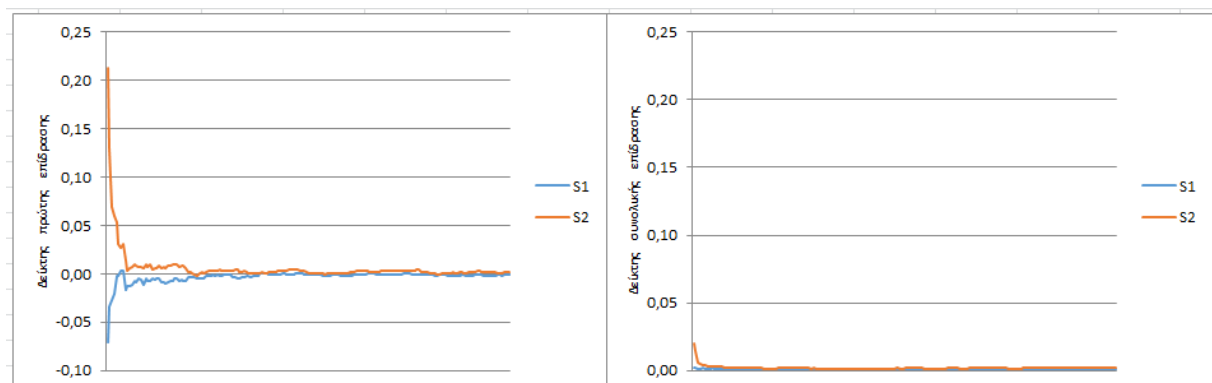
### ΣΕΝΑΡΙΟ 1



Σχήμα Β1: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 1 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση

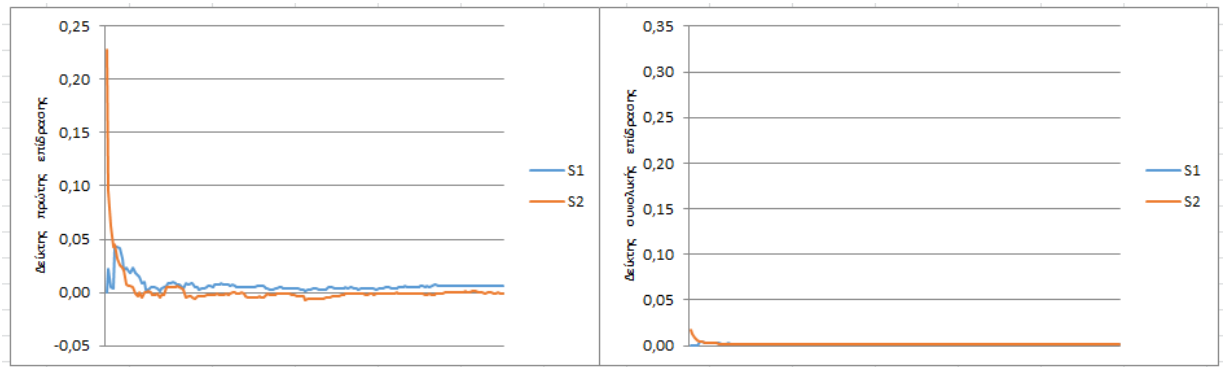


Σχήμα Β2: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 1 για εκκένωση με πληροφόρηση

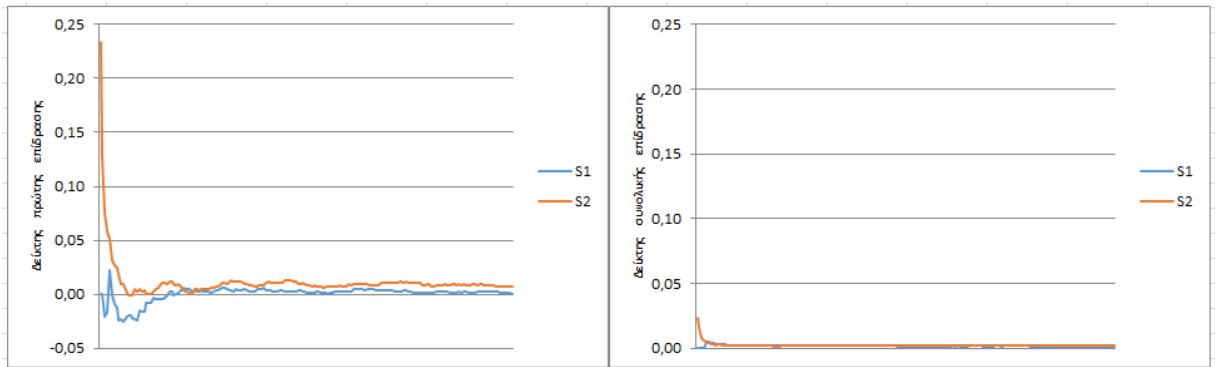


Σχήμα Β3: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 1 για εκκένωση κατά στάδια

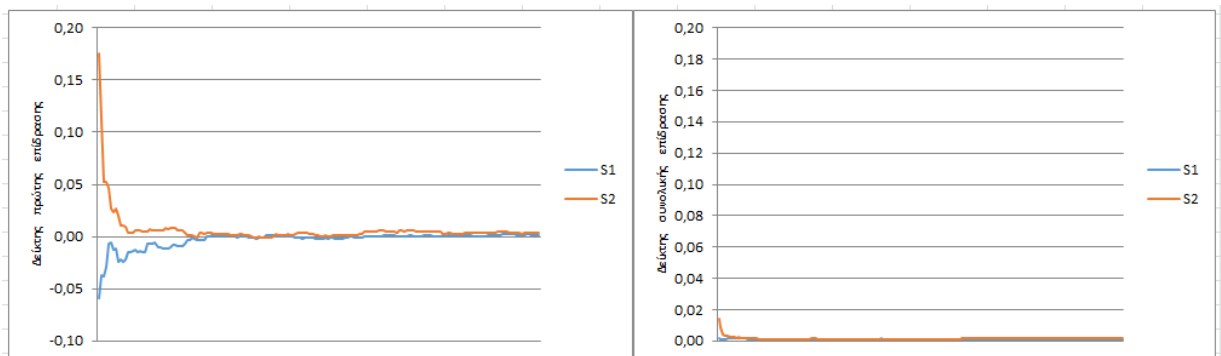
## ΣΕΝΑΡΙΟ 2



Σχήμα Β4: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 2 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση

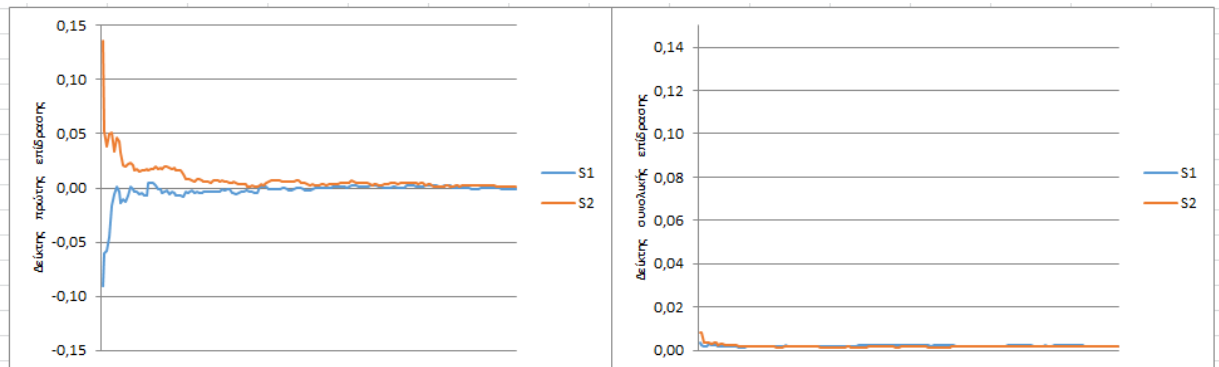


Σχήμα Β5: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 2 για εκκένωση με πληροφόρηση

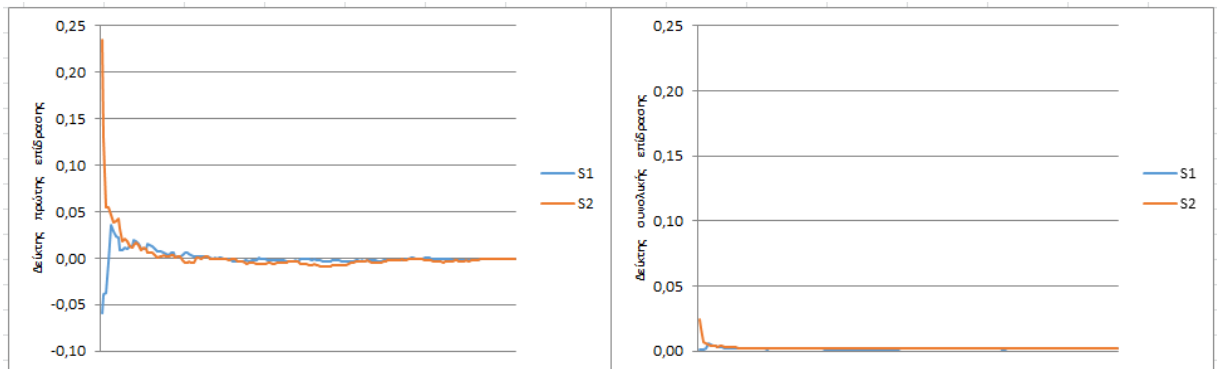


Σχήμα Β6: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 2 για εκκένωση κατά στάδια

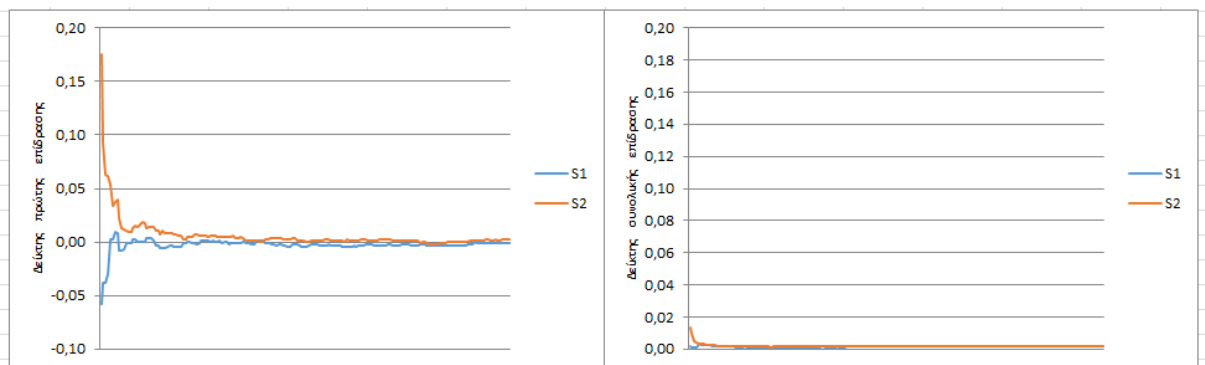
### ΣΕΝΑΡΙΟ 3



Σχήμα Β7: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 3 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση

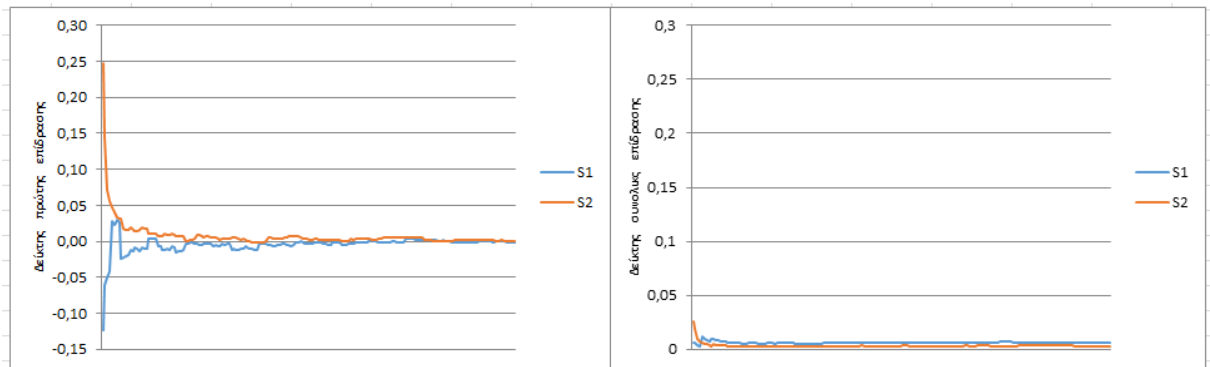


Σχήμα Β8: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 3 για εκκένωση με πληροφόρηση

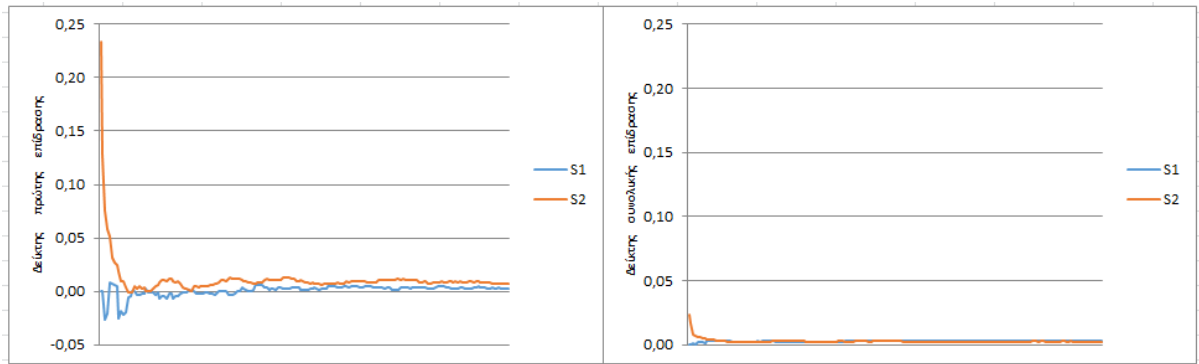


Σχήμα Β9: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 3 για εκκένωση κατά στάδια

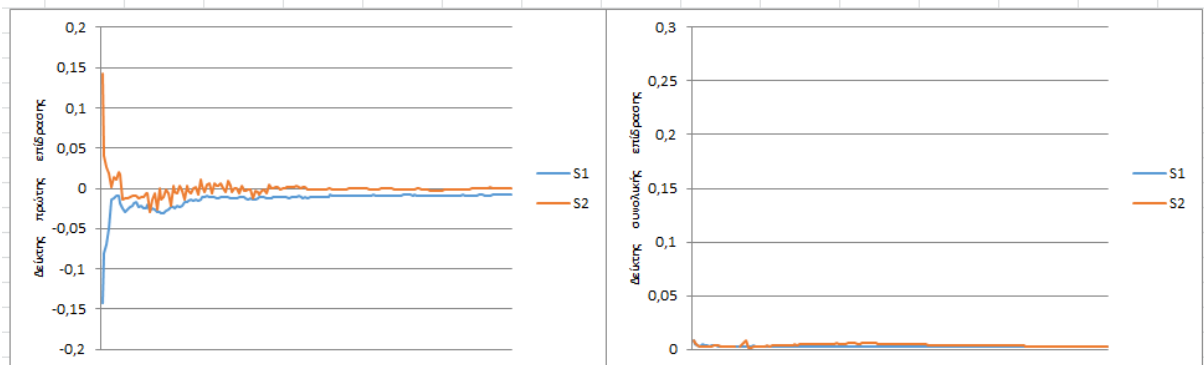
## ΣΕΝΑΡΙΟ 4



Σχήμα B10: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 4 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση

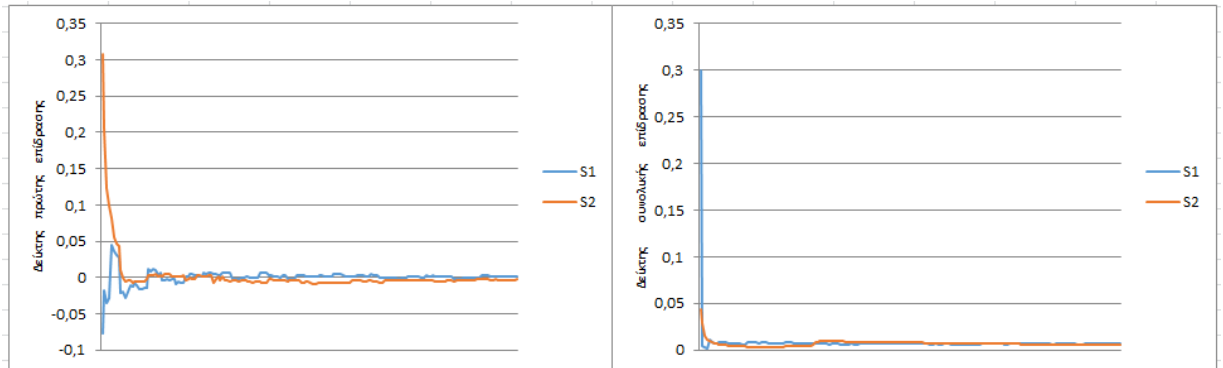


Σχήμα B11: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 4 για εκκένωση με πληροφόρηση

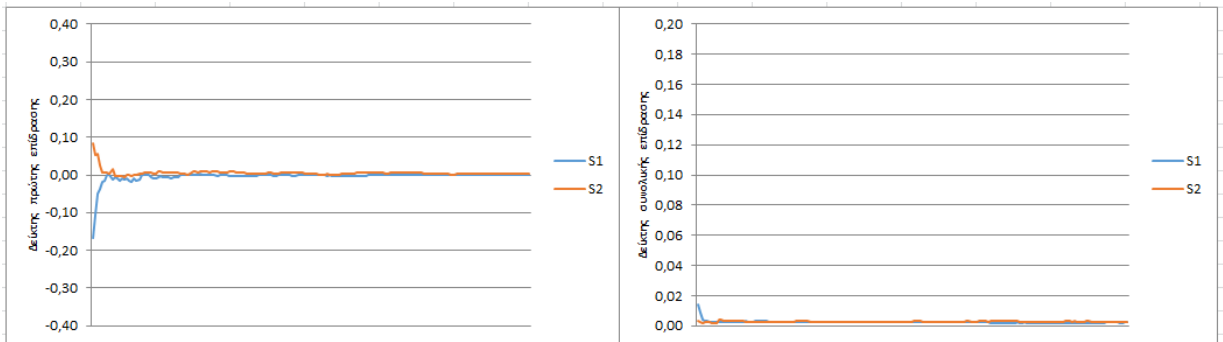


Σχήμα B12: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 4 για εκκένωση κατά στάδια

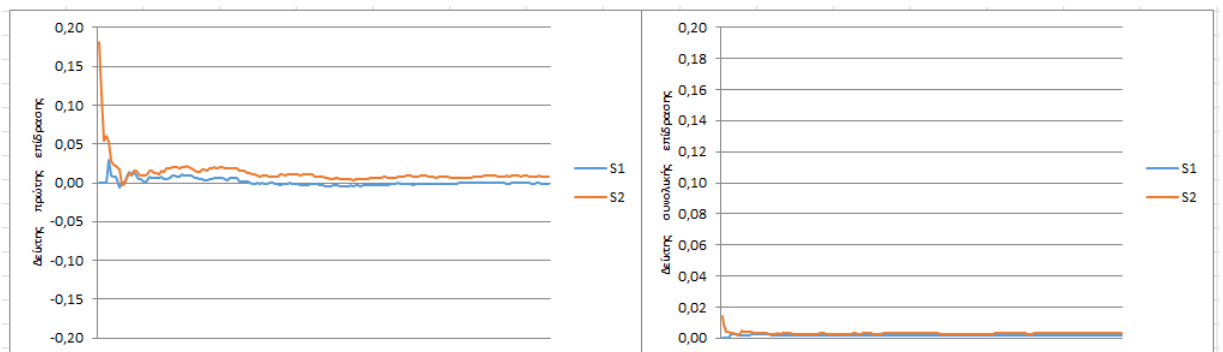
## ΣΕΝΑΡΙΟ 5



Σχήμα B13: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 5 για εκκένωση χωρίς πληροφόρηση



Σχήμα B14: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 5 για εκκένωση με πληροφόρηση



Σχήμα B15: Διαγράμματα μεταβολής δεικτών επίδρασης Σενάριο 5 για εκκένωση κατά στάδια