

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**ΕΞΩΜΟΙΩΣΗ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΠΛΥΘΗΣΜΟΥ Ι-NICOSIA ΣΕ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΙΔΥΝΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

Μάριος Στυλιανού

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2025

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΞΩΜΟΙΩΣΗ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΠΛΥΘΙΣΜΟΥ INICOSIA ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Μάριος Στυλιανού

Επιβλέπων Καθηγητής

Ανδρέας Αριστείδου

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των
απαιτήσεων απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του
Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2025

Ευχαριστίες

Με βαθύ αίσθημα ευγνωμοσύνης, επιθυμώ πρωτίστως να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ανδρέα Αριστείδου, ο οποίος, με την οξυδερκή επιστημονική του καθοδήγηση, την υπομονετική διάθεσή του για συζήτηση, τις εμπειριστατωμένες υποδείξεις και την αταλάντευτη πίστη του στις δυνατότητές μου, υπήρξε ο καθοριστικός φάρος πορείας σε κάθε στάδιο της έρευνας και της συγγραφής. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στο Κέντρο Αριστείας CYENS, που με προθυμία μου διέθεσε το τρισδιάστατο FBX μοντέλο (digital twin) της παλιάς Λευκωσίας, η συνεισφορά αυτή δεν πρόσθεσε απλώς τεχνικό ρεαλισμό στη simulation, αλλά ανέδειξε και την πολιτισμική ταυτότητα του εγχειρήματος, δίνοντάς του ξεχωριστή αίσθηση αυθεντικότητας. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τον πολυαγαπημένο συνάδελφό μου, Μάριο Δημητρίου, του οποίου η ευρηματική σκέψη, ο γόνιμος προβληματισμός και οι πρακτικές ιδέες μεταφράστηκαν σε ουσιαστικές βελτιώσεις του τελικού συστήματος. Παράλληλα, εκφράζω τη βαθιά μου εκτίμηση προς την οικογένειά μου και τους πιστούς φίλους μου, με το ανεξάντλητο ηθικό τους στήριγμα, τις ακούραστες καθημερινές ενθαρρύνσεις, αλλά και τις πολύτιμες στιγμές χαλάρωσης που μου προσέφεραν, μου έδωσαν το κουράγιο να συνεχίσω ακόμη και στις πιο απαιτητικές φάσεις του έργου. Τέλος, επιτρέψτε μου να αναγνωρίσω και τη δική μου προσπάθεια: η επιμονή, η πειθαρχία και η αφοσίωση που επέδειξα απέναντι σε ένα τόσο φιλόδοξο και απαιτητικό εγχείρημα αποτέλεσαν την κινητήρια δύναμη για την επιτυχή ολοκλήρωσή του, επιβεβαιώνοντας ότι η αφοσίωση και το πάθος μπορούν να μετατρέψουν μια ιδέα σε πραγματικότητα.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά για πρώτη φορά σε τρισδιάστατο digital twin, την ταχύτητα και ασφάλεια με την οποία μπορεί να εκκενωθεί ο εντός τειχών ιστορικός πυρήνας της Λευκωσίας σε σενάρια σεισμού ή άλλων κρίσεων. Βασίζεται στο μοντέλο iNicosia του CYENS Centre of Excellence και υλοποιήθηκε στην τελευταία έκδοση Unity 6, ώστε να αξιοποιηθούν πλήρως τα πραγματικά μορφολογικά και κυκλοφοριακά δεδομένα της πόλης. Κίνητρό μας υπήρξε η ανάγκη τεκμηριωμένων αποφάσεων για την αστική ανθεκτικότητα. Ο περίπλοκος ιστός μονόδρομων και η υψηλή πυκνότητα κατοίκων και επισκεπτών καθιστούν κρίσιμη τη γνώση του πόσο έγκαιρα μπορεί να απομακρυνθεί ο πληθυσμός σε μία πραγματική κρίση. Για να επιτευχθεί ρεαλιστική προσομοίωση, ανακατασκευάστηκε το οδικό δίκτυο με EasyRoads3D και δημιουργήθηκε ένα δίκτυο(Nav-Mesh) πλοήγησης, ενώ οι μονόδρομοι υλοποιήθηκαν με one-way Off-Mesh Links επικυρωμένα μέσα από Google Street View. Οι έτοιμες λύσεις πλοήγησης της Unity απευθύνονται κυρίως σε πεζούς, έτσι αναπτύχθηκε ένα εξ' ολοκλήρου δικό μου σύστημα οδήγησης που μεταφράζει τα μονοπάτι που παράγεται σε ρεαλιστικές καμπύλες επιτάχυνσης-φρεναρίσματος, στροφής και αποφυγής συγκρούσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, με όλες τις πέντε κύριες εξόδους ανοιχτές, 700 οχήματα εγκαταλείπουν τα τείχη σε 11-12 λεπτά (το 80 % μέσα στα πρώτα 5-6). Η επίδοση όμως εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τρεις κομβικές εξόδους, Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II, Γέφυρα Δώρου Λοΐζου και Βασιλέως Γεωργίου Β όπου η απώλεια οποιασδήποτε σχεδόν διπλασιάζει τον χρόνο διαφυγής του 90-95 % των οχημάτων και μεταφέρει τη συμφόρηση στις γύρω αρτηρίες. Αντίθετα, το κλείσιμο περιφερειακών εξόδων όπως σε Πλατεία Σολωμού και οδός Πάφου αλλά και κύριας αρτηρίας όπως η οδός Άρεως αυξάνει τον μέσο χρόνο λιγότερο από ένα λεπτό. Έξι εσωτερικές οδοί (Άρεως, Αχιλλέως, Ονήσιλου, Αθηνών, Χατζηγεωργάκη Κορνέσιου, Πατριάρχου Γρηγορίου) αποτελούν σταθερά bottlenecks και πάνω από 80 % των οδηγών παραμένει πιστό στην αρχική έξοδο, ένδειξη περιορισμένης γνώσης εναλλακτικών διαδρομών. Συνεπώς, η προστασία και λειτουργικότητα των δύο κρίσιμων εξόδων, σε συνδυασμό με έγκαιρη ψηφιακή ενημέρωση οδηγών, είναι καθοριστικές για να διατηρηθεί ο συνολικός χρόνος εκκένωσης κάτω από τα 12 λεπτά. Η προσέγγιση αυτή αναδεικνύει τη δύναμη των 3D digital twins και των εξατομικευμένων αλγορίθμων κίνησης ως εργαλεία στρατηγικού σχεδιασμού για μία πιο ασφαλή και ανθεκτική πόλη.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	ii
Περίληψη.....	iii
Περιεχόμενα.....	iv
Κεφάλαιο 1	1
Εισαγωγή	1
1.1 Ποιο είναι το θέμα	1
1.2 Ποιο είναι το κίνητρο.....	1
1.3 Συνεισφορά	2
1.4 Πως υλοποιήθηκε (εν συντομία).....	3
Κεφάλαιο 2	4
Θεωρητικό Πλαίσιο	4
2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	4
2.1.1 Εισαγωγή στο Unity και στο πακέτο AI Navigation	4
2.1.1.1 Unity AI Navigation	4
2.1.1.2 NavMesh.....	4
2.1.1.3 NavMesh Agents.....	4
2.1.1.4 NavMesh Obstacles	5
2.1.2 Εσωτερική Λειτουργία του Συστήματος Πλοήγησης.....	5
2.1.2.1 Συλλογή Γεωμετρίας και Καθορισμός Περιοχών Κίνησης.....	5
2.1.2.2 Εφαρμογή Παραμέτρων Baking	6
2.1.2.3 Δημιουργία και Βελτιστοποίηση Πλέγματος.....	6
2.1.2.4 Δρομολόγηση και Εύρεση Διαδρομής.....	6
2.1.2.5 Ακολούθηση Διαδρομής	7
2.1.2.6 Αποφυγή Εμποδίων	7
2.1.2.7 Κίνηση του Agent.....	8
2.1.2.8 Παγκόσμια vs. Τοπική Πλοήγηση	8
2.1.2.9 Διαχείριση Εμποδίων.....	8
2.1.2.10 Off-Mesh Links (Nav Links)	9
2.2 Έννοιες.....	10
2.3 Προηγούμενες Μελέτες	11
2.3.1 Προσομοίωση Ροής Πεζών και Συμπεριφοράς Πλήθους.....	11
2.3.1.1 Γενική Περιγραφή της Έρευνας	11
2.3.1.2 Τεχνικές και Μεθοδολογία	11
2.3.1.3 Περιγραφή των Σεναρίων Προσομοίωσης	12

2.3.1.4 Σύγκριση με τη Δική μου Έρευνα	13
2.3.2 Προσομοίωση Εκκένωσης Αστικής Κοινότητας κατά τη Διάρκεια Καταστροφικών Βροχοπτώσεων στην Κίνα.....	14
2.3.2.1 Γενική Περιγραφή της Έρευνας	14
2.3.2.2 Κύρια Στοιχεία και Μεθοδολογία.....	14
2.3.2.3 Σύγκριση με τη Δική μου Έρευνα	15
Κεφάλαιο 3	17
Μεθοδολογία/Υλοποίηση	17
3.1 Υλοποίηση	17
3.1.1 Πιλοτική Σκηνή (Pilot Scene).....	17
3.1.1.1 Αρχικές Δοκιμές και Βασικές Ρυθμίσεις.....	17
3.1.1.1.1 Προκαταρκτικές Δοκιμές με το Ενσωματωμένο Πακέτο AI της Unity	17
3.1.1.1.2 Προσαρμογή και Δοκιμή Μοντέλου Αυτοκινήτου από το Unity Asset Store	18
3.1.1.2 Προσαρμοσμένη Προσομοίωση Οδήγησης.....	19
3.1.1.2.1 Ανάπτυξη Προσαρμοσμένου Script για Κίνηση Οχημάτων	19
3.1.1.2.2 Δημιουργία Ρεαλιστικών Δρόμων με το EasyRoads Asset	19
3.1.1.2.3 Εξερεύνηση Αλληλεπιδράσεων Πολλαπλών Οχημάτων.....	20
3.1.1.2.4 Πειραματισμός με Δύο Τύπους Οδηγικής Συμπεριφοράς.....	20
3.1.1.2.5 Μικρή Ανασκόπηση	21
3.1.2 Κύρια Σκηνή (Main Scene)	21
3.1.2.1 Δημιουργία του Περιβάλλοντος/Διαμόρφωση του Οδικού Δικτύου..	21
3.1.2.1.1 Δημιουργία Οδικού Δικτύου.....	23
3.1.2.1.2 Ρύθμιση και Ενσωμάτωση του Δικτύου στο Μοντέλο.....	23
3.1.2.1.3 Ενσωμάτωση του NavMesh.....	23
3.1.2.1.4 Επιπρόσθετες Τροποποιήσεις	24
3.1.2.1.5 Προσδιορισμός και Οργάνωση Εξόδων	24
3.1.2.1.6 Μικρή Ανασκόπηση	24
3.1.2.2 Υλοποίηση Μονόδρομων	25
3.1.2.2.1 Αρχικές Προσεγγίσεις.....	25
3.1.2.2.2 Αναζήτηση Εναλλακτικών Λύσεων	25
3.1.2.2.3 Χρήση Nav Links για Εφαρμογή Μονοδρομικών Οδών.....	25
3.1.2.2.4 Προσαρμογή τοποθέτησης Nav Links με Βοήθεια Google Maps Street View	25
3.1.2.3 Δημιουργία Πρακτόρων και Ορισμός Προορισμών	26
3.1.2.3.1 Triangulation του NavMesh για Τυχαία Επιλογή Θέσεων (Spawn Points).....	26

3.1.2.3.2 Υπολογισμός Κοντινότερου Προορισμού μέσω NavMesh Pathfinding.....	26
3.1.2.3.3 Διαχωρισμός Ρόλων Ηγέτη(Leader) και Ακολούθου(Follower) .	27
3.1.2.3.4 Τυχαία Αναδιάταξη των Spawn Locations (Shuffle)	27
3.1.2.3.5 Χειρισμός Απομάκρυνσης (DeSpawn) με Coroutines	28
3.1.2.3.6 Ενημέρωση Μετρικών και Καταγραφή Συμβάντων	28
3.1.2.4 Χειρισμός Κίνησης Πρακτόρων(Car Driving Behaviour).....	28
3.1.2.4.1 Απόκτηση και Χρήση του Μονοπατιού του NavMesh Agent	29
3.1.2.4.2 Εφαρμογή Κίνησης με Rigidbody και Καθορισμός Νέας Προσέγγισης	29
3.1.2.4.3 Ανίχνευση Στροφών και Εφαρμογή Επιβράδυνσης	29
3.1.2.4.4 Ανίχνευση Εμποδίων μέσω Raycasts/Αποφυγή Συγκρούσεων...	30
3.1.2.4.5 Εξασφάλιση Επαφής με το Δρόμο.....	30
3.1.2.4.6 Εξέλιξη και Βελτιστοποίηση του Script	31
3.1.2.5 Road Congestion.....	31
3.1.2.5.1 Αρχικές Δοκιμές	31
3.1.2.5.2 Ανίχνευση Συμφόρησης και Δυναμική Αλλαγή Κόστους.....	32
3.1.2.5.3 Υπολογισμός Δυναμικής Διαδρομής/Νέου Προορισμού	32
3.1.2.5.4 Συμπεράσματα και Βελτιώσεις στην Απόδοση	33
3.1.2.6 Metrics Manager	33
3.1.2.6.1 Αναγκαιότητα και Σημασία των Μετρικών.....	34
3.1.2.6.2 Λειτουργίες και Δεδομένα που Καταγράφονται.....	34
3.1.2.6.3 Συνολική Συνεισφορά στις Βελτιστοποιήσεις	35
3.1.2.7 Camera, UI Settings και Set-Up Scene.....	35
3.1.2.7.1 Οργάνωση Παραμέτρων μέσω του Set-Up Scene.....	36
3.1.2.7.2 Μεταφορά Παραμέτρων στο Κύριο Simulation Scene	36
3.1.2.7.3 Διαχείριση Καμερών και Εμφάνιση UI	36
3.1.2.7.4 Βελτιωμένη Απόδοση σε Built Έκδοση	37
3.2 Συγκέντρωση Δεδομένων	37
3.2.1 Χαρακτηριστικά Υπολογιστή	37
3.2.2 Δομή αποτελεσμάτων	38
3.2.2.1 Simulation Metrics.....	38
3.2.2.2 Exits	38
3.2.2.3 Agent Details	38
3.2.3 Ανάλυση	39

Κεφάλαιο 4	40
Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων	40
4.1 Περιγραφή Υποθέσεων και Σεναρίων Προσομοίωσης	40
4.1.1 Υπόθεση.....	41
4.1.1.1 Πιλοτική Δοκιμή (Baseline)	41
4.1.1.2 Σενάριο Σεισμού	41
4.1.1.2.1 Κλείσιμο Εξόδων	41
4.1.1.2.2 Κλείσιμο Οδών με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο.....	42
4.2 Περιγραφή Δεδομένων	42
4.2.1 Δεδομένα Για Πιλοτική Δοκιμή (Baseline)	44
4.2.1.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο	44
4.2.1.2 Κατανομή Πυκνότητας Αυτοκινήτων κατά την εκκίνηση της Προσομοίωσης.....	46
4.2.1.3 Σημεία Έναρξης σε σχέση με τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης	47
4.2.1.4 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων	48
4.2.1.5 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου	48
4.2.1.6 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο	49
4.2.2 Δεδομένα Για Σενάριο Σεισμού.....	51
4.2.2.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II	52
4.2.2.1.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο	52
4.2.2.1.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης....	53
4.2.2.1.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων	54
4.2.2.1.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου	54
4.2.2.1.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο	55
4.2.2.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου	56
4.2.2.2.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο	56
4.2.2.2.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης....	57
4.2.2.2.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων	58
4.2.2.1.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου	59
4.2.2.1.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο	60
4.2.2.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β.....	61
4.2.2.3.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο	61
4.2.2.3.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης....	62
4.2.2.3.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων	63
4.2.2.3.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου	63
4.2.2.3.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο	64
4.2.2.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού	65

4.2.2.4.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο	65
4.2.2.4.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης....	66
4.2.2.4.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων	67
4.2.2.4.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου	67
4.2.2.4.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο	68
4.2.2.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου	69
4.2.2.5.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο	69
4.2.2.5.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης....	70
4.2.2.5.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων	71
4.2.2.5.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου	71
4.2.2.5.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο	72
4.2.2.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως.....	73
4.2.2.6.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο	73
4.2.2.6.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης....	74
4.2.2.6.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων	74
4.2.2.6.4 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο	75
Κεφάλαιο 5	76
Συζήτηση	76
5.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίων με Πιλοτική Δοκιμή	76
5.1.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο	76
5.1.1.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II	77
5.1.1.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου	78
5.1.1.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β.....	79
5.1.1.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού	80
5.1.1.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου	81
5.1.1.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως.....	82
5.1.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης	83
5.1.2.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II	83
5.1.2.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου	83
5.1.2.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β.....	84
5.1.2.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού	84
5.1.2.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου	84
5.1.2.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως.....	85
5.1.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων	85
5.1.3.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II	86
5.1.3.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου	87

5.1.3.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β.....	88
5.1.3.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού	89
5.1.3.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου	90
5.1.3.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως.....	91
5.1.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου	91
5.1.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο	93
5.1.5.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου ΙΙ	93
5.1.5.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου	94
5.1.5.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β.....	95
5.1.5.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού	96
5.1.5.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου	97
5.1.5.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως.....	98
5.2 Κύρια ποιοτικά ευρήματα.....	99
Κεφάλαιο 6	101
Συμπεράσματα	101
6.1 Συμπεράσματα	101
6.2 Περιορισμοί - Limitations.....	102
6.3 Μελλοντική Δουλειά	103
Βιβλιογραφία	107

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ποιο είναι το θέμα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η προσομοίωση της εκκένωσης πλήθους ανθρώπων με οχήματα, από την παλιά πόλη της Λευκωσίας σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το έργο αυτό θα βασιστεί στο “iNicosia Project” του CYENS Centre of Excellence, το οποίο παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα και υποδομές για την ανάλυση της κίνησης και της συμπεριφοράς των χρηστών μέσα στην αστική περιοχή της Λευκωσίας παρέχοντας ένα πιστό εικονικό αντίγραφο της πόλης (3D digital twin) [6]. Η υλοποίηση της προσομοίωσης θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση του Unity και σχετικών προσφερόμενων πακέτων (packages), επιτρέποντας τη δημιουργία ενός δυναμικού περιβάλλοντος, στο οποίο εικονικοί πράκτορες (agents) θα αλληλοεπιδρούν με το οδικό και αστικό δίκτυο, προσομοιάζοντας ρεαλιστικές συνθήκες εκκένωσης. Στο πλαίσιο αυτό, χρησιμοποιούνται δεδομένα από τον δήμο της Λευκωσίας σχετικά με μονόδρομους (one-way roads), καθώς και στατιστικά πληθυσμού που αφορούν κυρίως την ηλικιακή σύνθεση, με στόχο να προσδιοριστεί ο αντίκτυπος της γνώσης των κατοίκων για τα σημεία εξόδου και τις διαδρομές προς αυτά, στον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης και στα ποσοστά επιτυχίας της διαδικασίας, σε διάφορα σενάρια κινδύνου όπως φωτιάς, σεισμού και ενδεχόμενης απειλής από βομβιστικές επιθέσεις. Παράλληλα, στόχος είναι η διερεύνηση για το ποιοι δρόμοι, ενδέχεται να προκαλέσουν είτε θετική είτε αρνητική επίδραση στην εκκένωση, ώστε να προταθούν τροποποιήσεις που θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη ροή και την ασφάλεια των πολιτών.

1.2 Ποιο είναι το κίνητρο

Το κίνητρο για την παρούσα διπλωματική εργασία πηγάζει από την ανάγκη λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με την ασφάλεια και την αποτελεσματική διαχείριση καταστάσεων κρίσης στην παλιά πόλη της Λευκωσίας. Η ύπαρξη πυκνού οδικού δικτύου με μονόδρομους, σε συνδυασμό με τον αυξημένο αριθμό κατοίκων και επισκεπτών, καθιστά επιτακτική την ανάγκη προσομοίωσης ρεαλιστικών σεναρίων εκκένωσης, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στον εντοπισμό των κύριων σημείων συμφόρησης ή κινδύνου. Επιπλέον, μέσα από τη χρήση ενός ψηφιακού διδύμου (3D digital twin) της πόλης, η τοπική

αυτοδιοίκηση έχει την ευκαιρία να αξιοποιήσει τα δεδομένα που θα εξάγουμε για την ανάπτυξη αποδοτικότερων στρατηγικών αντιμετώπισης φυσικών ή ανθρωπογενών απειλών, όπως σεισμοί, φωτιές και τρομοκρατικές επιθέσεις. Παράλληλα, επιδιώκεται η ευαισθητοποίηση τόσο του δήμου της Λευκωσίας όσο και των ίδιων των κατοίκων ως προς τη σημασία που έχει η γνώση των διαθέσιμων οδών διαφυγής και σημείων εξόδου, ώστε να μπορούν να εγκαταλείπουν γρήγορα και με ασφάλεια την παλιά πόλη σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται η ανθεκτικότητα της πόλης, προάγεται η ασφάλεια των πολιτών και διευκολύνονται οι μελλοντικές αστικές παρεμβάσεις που θα εστιάζουν στην καλύτερη οργάνωση του οδικού δικτύου, αλλά και στην κατάλληλη εκπαίδευση του πληθυσμού σχετικά με σημεία εξόδου και καταφύγια.

1.3 Συνεισφορά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μια πρωτοποριακή προσέγγιση στην προσομοίωση της εκκένωσης πλήθους ανθρώπων και οχημάτων από την παλιά πόλη της Λευκωσίας, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, βασιζόμενη στα δεδομένα και την υποδομή του iNicosia Project του CYENS Centre of Excellence [\[6\]](#). Η συνεισφορά μου επικεντρώνεται στην υλοποίηση ενός δυναμικού και ρεαλιστικού περιβάλλοντος προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας το Unity και τα σχετιζόμενα πακέτα, με σκοπό την αναπαράσταση της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ εικονικών πρακτόρων (agents) και του οδικού δικτύου της πόλης. Συγκεκριμένα, μέσω της ενσωμάτωσης δεδομένων σχετικά με τους μονόδρομους και τα δημογραφικά χαρακτηριστικά του πληθυσμού της Λευκωσίας, επιδιώχθηκε η μελέτη του αντίκτυπου που έχει η γνώση των σημείων διαφυγής και των διαδρομών προς αυτά στην αποτελεσματικότητα της διαδικασίας εκκένωσης.

Η εφαρμογή της προσομοίωσης υπό το πρίσμα διαφορετικών σεναρίων κινδύνου (π.χ. πυρκαγιάς, σεισμού και απειλής από βομβιστικές επιθέσεις) επέτρεψε την αξιολόγηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη ροή και την ασφάλεια κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Μέσω της ανάλυσης των αποτελεσμάτων, η εργασία συμβάλλει στην τεκμηρίωση των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη από τις τοπικές αρχές, προτείνοντας τροποποιήσεις στο υπάρχον οδικό δίκτυο και ενισχύοντας τις στρατηγικές διαχείρισης κρίσεων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση, εκτός από το ότι αναδεικνύει τη σημασία της χρήσης ψηφιακών διδύμων (3D digital twin) στην ανάλυση αστικών καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, προσφέρει επίσης ένα πλαίσιο για την εφαρμογή εργαλείων προσομοίωσης σε

περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας πληθυσμού και οδικής κίνησης, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην ανάπτυξη μελλοντικών εφαρμογών για την αστική διαχείριση κρίσεων.

1.4 Πως υλοποιήθηκε (εν συντομία)

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε το Unity σε συνδυασμό με το πακέτο AI Navigation, ώστε να δημιουργηθεί ένα Nav Mesh πάνω στην επιφάνεια των δρόμων (οι εκδόσεις αναφέρονται αναλυτικά σε [σχετικό κεφάλαιο στη συνέχεια](#)) [1]. Το Nav Mesh υπολογίζεται και δημιουργείται (baked) σε συγκεκριμένες επιφάνειες που μπορούν να διασχίσουν οι agents, ενώ διατίθενται διάφορες ρυθμίσεις για την προσαρμογή του με τη χρήση layers, τοίχων και εμποδίων. Οι δρόμοι έχουν μοντελοποιηθεί με το πακέτο EasyRoads, αποτυπώνοντας πιστά το οδικό δίκτυο της παλιάς πόλης, ενώ το FBX μοντέλο του iNicosia τοποθετείται πάνω από αυτές τις επιφάνειες, εξασφαλίζοντας ρεαλιστική κίνηση των πρακτόρων αντί για απλή χρήση κάποιου γενικού road asset που να μην συνάδει με την πραγματικότητα όσο αφορά την επιφάνεια του οδικού δικτύου και των πεζοδρομίων [4], [6].

Δεδομένου ότι η παλιά πόλη διαθέτει πλήθος μονόδρομων, η ακριβής λειτουργία τους προσομοιώθηκε με τη χρήση Nav Links. Τα Nav Links συνδέουν δύο διαφορετικές επιφάνειες του Nav Mesh, ρυθμίζοντας τη ροή της κίνησης προς μία κατεύθυνση (not bidirectional), ώστε τα οχήματα να μην κινούνται αντίθετα στον μονόδρομο. Η κίνηση των οχημάτων (agents) ελέγχεται μέσω ενός custom script, αφού οι ενσωματωμένες ρυθμίσεις κίνησης στο AI Navigation είναι περισσότερο προσαρμοσμένες σε humanoid characters (ανθρώπους) και δεν παρέχουν ρεαλιστική προσομοίωση για αυτοκίνητα. Το προ-υπολογισμένο μονοπάτι (path) από το Nav Mesh αξιοποιείται για τη εύρεση της διαδρομής, ενώ η συμπεριφορά κίνησης (επιτάχυνση, επιβράδυνση, στροφές) υλοποιείται χειροκίνητα. Για την αποφυγή συγκρούσεων, τα οχήματα χρησιμοποιούν ακτίνες (rays) που εκπέμπονται από το μπροστινό μέρος και υπό γωνία ± 30 μοιρών, ώστε να εντοπίζουν έγκαιρα άλλα οχήματα και να επιβραδύνουν. Παράλληλα, το pre-calculated path επιτρέπει τον εντοπισμό επερχόμενων στροφών, ώστε τα οχήματα να μειώνουν την ταχύτητά τους και να μην βγαίνουν εκτός δρόμου. Η παραπάνω αρχιτεκτονική παρέχει το επίπεδο ρεαλισμού που απαιτείται για τη μελέτη της ροής κίνησης σε σενάρια εκκένωσης και επιτρέπει την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων και ρυθμίσεων του οδικού δικτύου.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Πλαίσιο

2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1.1 Εισαγωγή στο Unity και στο πακέτο AI Navigation

Το Unity είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη πλατφόρμα ανάπτυξης παιχνιδιών και διαδραστικών εφαρμογών, η οποία παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για τη δημιουργία γραφικών 2D, 3D και φωτισμού, καθώς και εργαλείων προγραμματισμού και διαχείρισης περιεχομένου. Με τη χρήση της γλώσσας C#, οι δημιουργοί μπορούν να αναπτύσσουν από απλά παιχνίδια μέχρι πολύπλοκες προσομοιώσεις, ενώ η ευελιξία της πλατφόρμας επιτρέπει την εύκολη μεταφορά σε διάφορες συσκευές και λειτουργικά συστήματα.

2.1.1.1 Unity AI Navigation

Το Unity AI Navigation είναι ένα εγγενές εργαλείο πλοήγησης που επιτρέπει την εύρεση και βελτιστοποίηση διαδρομών σε εικονικά περιβάλλοντα [\[1\]](#). Αξιοποιεί κυρίως τις έννοιες του NavMesh (πλέγμα πλοήγησης), των NavMesh Agents (πράκτορες πλοήγησης) και των NavMesh Obstacles (εμπόδια). Η λειτουργικότητά του βασίζεται στην αυτόματη «ανάγνωση» της γεωμετρίας μιας σκηνής και στη δημιουργία ασφαλούς περιοχής κίνησης, κάτι που προσφέρει υψηλή ακρίβεια και δυνατότητα άμεσων προσαρμογών.

2.1.1.2 NavMesh

Το NavMesh αποτελεί τον κεντρικό μηχανισμό πλοήγησης. Με βάση τη γεωμετρία της σκηνής, το Unity σαρώνει τα μοντέλα και τις επιφάνειες, δημιουργώντας ένα πλέγμα το οποίο υποδεικνύει τις περιοχές όπου οι χαρακτήρες ή τα οχήματα μπορούν να κινηθούν. Η διαδικασία αυτή συχνά αναφέρεται ως “baking” και μπορεί να γίνεται μερικά ή συνολικά ανάλογα με τη συχνότητα των αλλαγών στον χώρο. Το NavMesh ενσωματώνει βασικούς αλγορίθμους αναζήτησης διαδρομής (όπως ο A*) και επιτρέπει τον εντοπισμό της βέλτιστης διαδρομής λαμβάνοντας υπόψη τα όρια κίνησης και τα τυχόν εμπόδια.

2.1.1.3 NavMesh Agents

Τα NavMesh Agents είναι αντικείμενα στη σκηνή (όπως χαρακτήρες, οχήματα ή οποιαδήποτε οντότητα χρειάζεται πλοήγηση) που αλληλοεπιδρούν με το NavMesh για να

εντοπίσουν και να ακολουθήσουν την κατάλληλη διαδρομή. Διαθέτουν ρυθμίσεις όπως η ακτίνα, η ταχύτητα και η επιτάχυνση, που επηρεάζουν την κίνησή τους. Έτσι, μπορούν να διαχειριστούν δυναμικά στροφές, αποφυγή συγκρούσεων και γενικότερα την ομαλή ενσωμάτωση στο περιβάλλον της προσομοίωσης ή του παιχνιδιού.

2.1.1.4 NavMesh Obstacles

Τα NavMesh Obstacles αντιπροσωπεύουν εμπόδια και αντικείμενα που περιορίζουν την κίνηση σε ένα χώρο ή επηρεάζουν την τρέχουσα διαδρομή. Μπορεί να είναι στατικά (π.χ. τοίχοι ή δέντρα) ή δυναμικά (π.χ. κινητά εμπόδια). Όταν χρησιμοποιούνται δυναμικά εμπόδια, το Unity μπορεί να ενημερώνει ή να αναδημιουργεί το NavMesh, προκειμένου οι agents να προσαρμοστούν στις αλλαγές του περιβάλλοντος και να επιλέξουν νέες εφικτές διαδρομές.

2.1.2 Εσωτερική Λειτουργία του Συστήματος Πλοήγησης

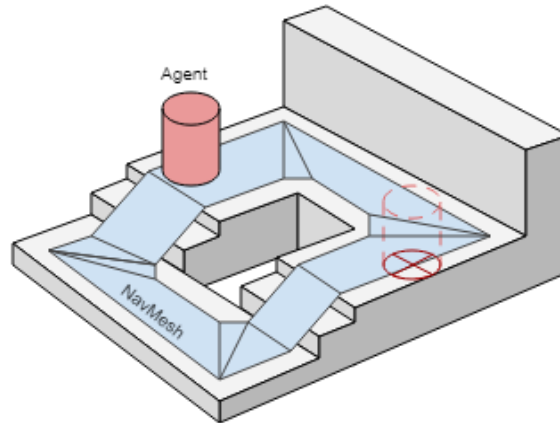
Το σύστημα πλοήγησης στο Unity επιλύει δύο κύρια προβλήματα: (α) την «παγκόσμια» εύρεση διαδρομής (global navigation), δηλαδή τον καθορισμό πορείας σε ολόκληρο το επίπεδο, και (β) την «τοπική» πλοήγηση (local navigation), δηλαδή την εκτέλεση της πορείας λαμβάνοντας υπόψη συγκρούσεις και δυναμικές αλλαγές. Η παγκόσμια αναζήτηση επιδιώκει να βρει μια εφικτή διαδρομή στο συνολικό NavMesh, ενώ η τοπική αναζήτηση αφορά κυρίως την αποφυγή εμποδίων και την προσαρμογή της κίνησης σε πραγματικό χρόνο.

2.1.2.1 Συλλογή Γεωμετρίας και Καθορισμός Περιοχών Κίνησης

Οι περιοχές κίνησης ορίζονται αυτόματα από το Unity βάσει της γεωμετρίας στη σκηνή. Το σύστημα σαρώνει τις επιφάνειες για να εντοπίσει πού μπορεί να σταθεί και να κινηθεί ένας κυλινδρικός agent (χαρακτήρας ή όχημα). Από τη διαδικασία αυτή προκύπτει το λεγόμενο NavMesh, ένα δικτυωτό πλέγμα από κυρτά πολύγωνα (convex polygons). Η κυρτότητα εξασφαλίζει ότι οποιεσδήποτε δύο θέσεις μέσα σε ένα πολύγωνο μπορούν να συνδεθούν χωρίς εμπόδια, ενώ η γειτνίαση (neighbours) μεταξύ πολυγώνων επιτρέπει την παγκόσμια χαρτογράφηση των βατών περιοχών.

2.1.2.2 Εφαρμογή Παραμέτρων Baking

Κατά το λεγόμενο “baking” του NavMesh, λαμβάνονται υπόψη διάφορες ρυθμίσεις, όπως το μέγιστο ύψος σκαλοπατιού, η ακτίνα του agent και η γωνία κλίσης που θεωρείται βατή. Με αυτόν τον τρόπο, φιλτράρονται οι περιοχές όπου είναι εφικτή η κίνηση, ενώ εξαιρούνται εμπόδια ή υπερβολικά απότομες επιφάνειες.



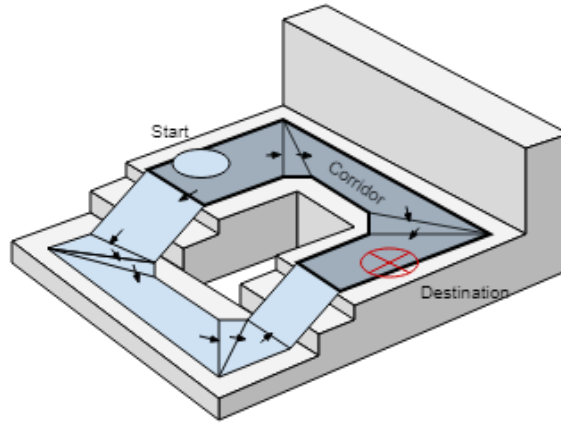
Σχήμα 2.1 Multi-Level NavMesh Walkable Testbed

2.1.2.3 Δημιουργία και Βελτιστοποίηση Πλέγματος

Αφού επιλεγούν οι κατάλληλες επιφάνειες, το Unity προχωρά στη δημιουργία ενός τρισδιάστατου πλέγματος (NavMesh) που αντιπροσωπεύει τις προσβάσιμες περιοχές. Κατά τη φάση βελτιστοποίησης, εφαρμόζονται αλγόριθμοι διαίρεσης και απλοποίησης του πλέγματος ώστε να διατηρείται ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και απόδοσης.

2.1.2.4 Δρομολόγηση και Εύρεση Διαδρομής

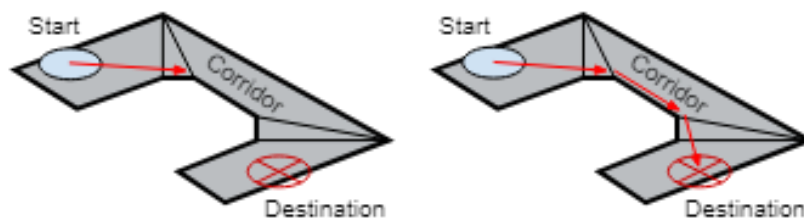
Η εύρεση διαδρομής (pathfinding) ξεκινά εντοπίζοντας τα κοντινότερα πολύγωνα στο σημείο εκκίνησης και στο σημείο προορισμού. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται συνήθως ο αλγόριθμος A* για την αναζήτηση στο γράφημα των πολυγώνων. Με αυτόν τον τρόπο, εντοπίζεται μια «διαδρομή» από πολύγωνο σε πολύγωνο, η οποία ονομάζεται διάδρομος (corridor). Η ακολουθία αυτή αποτελεί τον «σκελετό» πάνω στον οποίο θα κινηθεί ο agent.



Σχήμα 2.2 NavMesh Pathfinding Corridor Arena

2.1.2.5 Καθοδηγούμενη πλοήγηση

Ο agent κατευθύνεται από γωνία σε γωνία (corner) κατά μήκος του διαδρόμου. Σε περιβάλλοντα με έναν μόνο agent, αρκεί η εύρεση όλων των γωνιών εξ αρχής και η απλή κίνηση κατά μήκος των συνδετικών γραμμών. Ωστόσο, σε πολλαπλούς agents, η τοπική πλοήγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη συνεχώς την αποφυγή συγκρούσεων. Γι' αυτό, το Unity προσαρμόζει δυναμικά το διάδρομο που ακολουθεί ο agent, ώστε να επιτρέπει μικρές «παρεκκλίσεις» και να υπολογίζει ξανά το επόμενο ορατό σημείο προς το οποίο θα κινηθεί.



Σχήμα 2.3 Corridor-Based Path-Following on a NavMesh

2.1.2.6 Αποφυγή Εμποδίων

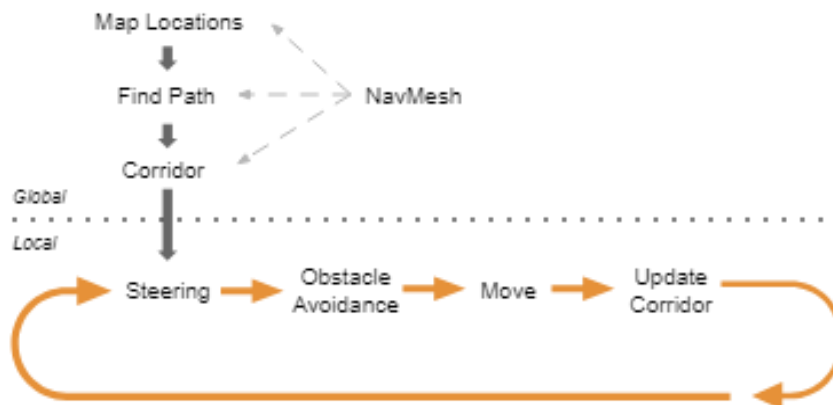
Το επιθυμητό διάνυσμα ταχύτητας του agent (desired velocity) μπορεί να οδηγεί σε συγκρούσεις όταν υπάρχουν πολλοί agents ή κινητά εμπόδια. Το Unity εφαρμόζει την τεχνική Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) για να εκτιμήσει μελλοντικές συγκρούσεις και να επιλέξει προσαρμοσμένη ταχύτητα που ισορροπεί ανάμεσα στη διατήρηση της πορείας και στην ασφαλή αποφυγή των άλλων αντικειμένων. Αυτή η τοπική στρατηγική επιτρέπει πιο φυσική κίνηση και μικρότερο κίνδυνο «μπλοκαρίσματος».

2.1.2.7 Κίνηση του Agent

Αφού προσαρμοστεί η τελική ταχύτητα με βάση την αποφυγή εμποδίων, το Unity εφαρμόζει ένα απλό δυναμικό μοντέλο στον agent, λαμβάνοντας υπόψη επιτάχυνση και ομαλή επιβράδυνση. Στη συνέχεια μπορεί να αξιοποιηθεί root motion για κινούμενα γραφικά (animations) ή να αφαιρεθεί το σύστημα πλοήγησης να διαχειριστεί την κίνηση. Τέλος, η θέση του agent προσαρμόζεται ελαφρώς, ώστε να «κλειδώνει» πάνω στο NavMesh και να διατηρείται η αξιοπιστία της πλοήγησης.

2.1.2.8 Παγκόσμια vs Τοπική Πλοήγηση

Η παγκόσμια πλοήγηση ασχολείται με τον «σχεδιασμό» της διαδρομής σε ολόκληρο το NavMesh, μια διαδικασία με υψηλό υπολογιστικό κόστος. Η τοπική πλοήγηση επικεντρώνεται στη ρεαλιστική εκτέλεση της κίνησης βήμα προς βήμα, αποφεύγοντας συγκρούσεις και προσαρμόζοντας το μονοπάτι. Η συνεργασία αυτών των δύο επιπέδων εξασφαλίζει αποτελεσματική και ρεαλιστική κίνηση σε δυναμικά περιβάλλοντα.



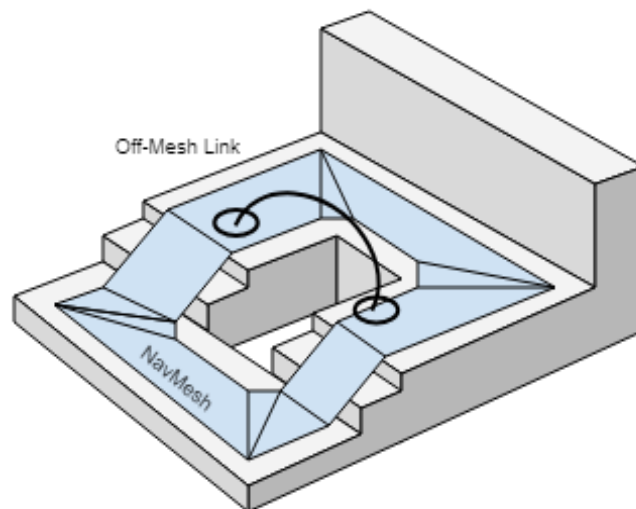
Σχήμα 2.4 Global-Local NavMesh Navigation Loop

2.1.2.9 Διαχείριση Εμποδίων

Για κινητά εμπόδια (π.χ. οχήματα, χαρακτήρες) η τοπική αποφυγή μέσω RVO αρκεί, επειδή επιτρέπει την προβλεπτική αλλαγή διαδρομής. Αντίθετα, όταν ένα εμπόδιο σταματήσει και μπλοκάρει μόνιμα τη διαδρομή, χρειάζεται να επηρεάσει την παγκόσμια πλοήγηση: εισάγεται δηλαδή στο NavMesh ως «στάσιμο εμπόδιο». Αυτή η διαδικασία λέγεται «carving», κατά την οποία «σκαλίζονται» τμήματα από το NavMesh για να υποδείξει ότι το αντικείμενο εμποδίζει εντελώς τη διέλευση. Λόγω του υψηλού κόστους, το carving χρησιμοποιείται μόνο σε καταστάσεις όπου δεν αρκεί η τοπική αποφυγή.

2.1.2.10 Off-Mesh Links (Nav Links)

Τα Off-Mesh Links επιτρέπουν στον agent να μετακινείται μεταξύ σημείων που δεν συνδέονται άμεσα στο NavMesh, όπως για παράδειγμα να πηδήξει πάνω από έναν τοίχο ή να διασχίσει μια πόρτα. Επιπλέον, μπορούν να οριστούν ως μονόδρομοι (one-way), διευκολύνοντας έτσι τον προγραμματιστή να προσομοιώσει ιδιότητες όπως δρόμους που επιτρέπουν κίνηση μόνο σε μία κατεύθυνση. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, θα αξιοποιηθούν τα Off-Mesh Links ακριβώς για τη δημιουργία τέτοιων μονόδρομης κυκλοφορίας, προσφέροντας μεγαλύτερο ρεαλισμό και ακρίβεια στη διαχείριση των διαδρομών που απαιτούν συγκεκριμένη φορά κυκλοφορίας. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει πιο ευέλικτη οργάνωση του κυκλοφοριακού μοντέλου, καθώς και άμεση ενσωμάτωση σε αλγόριθμους πλοήγησης που υποστηρίζει το Unity.



Σχήμα 2.5 “NavMesh Shortcut Arena with Off-Mesh Link

2.2 Έννοιες

- **Colliders**

Αόρατα σχήματα που ορίζουν τις συγκρούσεις για ένα GameObject. Συχνά απλουστευμένα για λόγους απόδοσης.

- **GameObject**

Βασικό αντικείμενο στο Unity, μπορεί να αντιπροσωπεύει οτιδήποτε σε μια σκηνή: χαρακτήρες, props, κάμερες κ.λπ.

- **Scripts**

Κομμάτια κώδικα που επιτρέπουν τη δημιουργία λογικής, την τροποποίηση παραμέτρων και την απόκριση σε συμβάντα ή εισόδους χρήστη.

- **Mesh**

Το βασικό γραφικό δομικό στοιχείο στο Unity (τριγωνοποιημένα ή τετραγωνικά πολύγωνα), σχηματίζοντας 3D αντικείμενα.

- **NavMesh**

Το παραγόμενο πλέγμα που ορίζει τις βατές περιοχές και τα εμπόδια του περιβάλλοντος, χρησιμοποιείται για πλοήγηση και εύρεση διαδρομής.

- **NavMesh Agents**

Αντικείμενα που χρησιμοποιούν το NavMesh για να βρουν και να ακολουθήσουν διαδρομές, έχοντας ρυθμίσεις όπως ακτίνα, ταχύτητα κ.ά.

- **NavMesh Obstacles**

Προσθέτουν εμπόδια στα οποία αντιδρούν οι NavMesh Agents. Μπορεί να είναι στατικά ή δυναμικά.

- **Off-Mesh Links (Nav Links)**

Συνδέσεις που επιτρέπουν κίνηση εκτός του βασικού NavMesh (π.χ. άλματα, μονοκατευθυνόμενες διαβάσεις), διευκολύνοντας την προσθήκη ειδικών μεταβάσεων.

- **Baking**

Η διαδικασία σάρωσης της σκηνής για τη δημιουργία ή ενημέρωση του NavMesh, λαμβάνοντας υπόψη την τοπογραφία και τις ιδιότητες των agents.

- **Local Obstacle Avoidance**

Μέθοδος όπου οι agents προσαρμόζουν τοπικά την κίνησή τους για να αποφύγουν συγκρούσεις, χωρίς ολικό επανυπολογισμό της διαδρομής.

- **Rigidbody** [\[3\]](#)

Συστατικό που επιτρέπει σε ένα GameObject να αλληλοεπιδρά με δυνάμεις και βαρύτητα στο Unity.

- **Scenes**

Ανεξάρτητα αρχεία που περιέχουν επίπεδα, περιβάλλοντα, μενού κ.λπ. Σε κάθε σκηνή τοποθετούνται αντικείμενα και ρυθμίσεις που απαρτίζουν το παιχνίδι.

2.3 Προηγούμενες Μελέτες

2.3.1 Προσομοίωση Ροής Πεζών και Συμπεριφοράς Πλήθους

(A Research by the CFD Science Group at George Mason University)

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε από την ομάδα CFD (Computational Fluid Dynamics) στο George Mason University [\[8\]](#).

2.3.1.1 Γενική Περιγραφή της Έρευνας

Η συγκεκριμένη έρευνα εστιάζει στη λεπτομερή ανάλυση της ροής πεζών μέσω προηγμένων υπολογιστικών τεχνικών, κυρίως με τη χρήση Computational Fluid Dynamics (CFD) και Computational Crowd Dynamics (CCD). Ο κύριος στόχος είναι η κατανόηση των μηχανισμών κίνησης, οι οποίοι καθορίζουν τον σχηματισμό ροών, τη δημιουργία διαδρόμων και τη συγκέντρωση σε σημεία εξόδου, ιδίως σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή πανικού.

2.3.1.2 Τεχνικές και Μεθοδολογία

- **Μοντελοποίηση και Προσομοίωση:**

Η έρευνα αναπτύσσει αριθμητικά μοντέλα που προσομοιώνουν την κίνηση των πεζών λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμες παραμέτρους όπως η ταχύτητα, οι προσωπικές αποστάσεις και οι επιλεγόμενες διαδρομές. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την καταγραφή φαινομένων όπως η δημιουργία διαδρόμων και ο σχηματισμός περιοχών υψηλής πυκνότητας.

- **Επικύρωση με Πειραματικά Δεδομένα:**

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίνονται με δεδομένα που συλλέγονται από πραγματικές καταστάσεις και βίντεο, γεγονός που ενισχύει την ακρίβεια των μοντέλων και επιτρέπει την προσαρμογή τους σε διαφορετικά αστικά περιβάλλοντα.

- **Ανάλυση Σεναρίων:**

Η έρευνα παρουσιάζει πολλαπλά σενάρια που καλύπτουν διάφορα περιβάλλοντα και καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, δίνοντας έμφαση στην ασφαλή διαχείριση και εκκένωση των πλήθων.

2.3.1.3 Περιγραφή των Σεναρίων Προσομοίωσης

1. St. Peter's, Rome:

Το σενάριο αυτό εστιάζει στην ασφαλή λειτουργία μεγάλων κέντρων προσκυνήματος, όπως το St. Peter's στην Rome. Εδώ, παρουσιάζονται διαφορετικές οπτικές της ίδιας προσομοίωσης για να αναλυθεί η κίνηση των προσκυνητών και να εντοπιστούν πιθανά σημεία συμφόρησης.

2. NIST 10-Story Building:

Η προσομοίωση αυτή αναπαριστά λεπτομερώς ένα ξέσπασμα φωτιάς στο κτίριο του Johnson Centre στο George Mason University. Τα input data συλλέγονται από κάμερες στο χώρο, επιτρέποντας την ακριβή αναπαράσταση της κίνησης του πλήθους σε συνθήκες πυρασφάλειας.

3. Evacuation of a Theater:

Εδώ, το σενάριο επικεντρώνεται στην εκκένωση θεατρικών χώρων και κινηματογράφων. Η προσομοίωση εστιάζει στον ορθό σχεδιασμό των διαδρόμων και των εξόδων, σημαντικό για την πιστοποίηση των κτιριακών προδιαγραφών.

4. Evacuation of a Stadium:

Αυτό το σενάριο παρουσιάζει την προσομοίωση της εκκένωσης ενός σταδίου, όπου εμφανίζονται χαρακτηριστικά όπως η δημιουργία ουρών και περιοχές υψηλής πυκνότητας, δίνοντας έμφαση στους κινδύνους που σχετίζονται με μεγάλα πλήθη.

5. Post-Blast Evacuation in Metro Station:

Στο συγκεκριμένο σενάριο, αναπαρίσταται η εκκένωση ενός σταθμού μετρό (π.χ. του Atocha στη Μαδρίτη) λίγο μετά από μια βομβιστική επίθεση. Η προσομοίωση δείχνει τις άμεσες αντιδράσεις του πλήθους και τους μηχανισμούς ασφαλούς εξόδου σε κρίσιμες στιγμές.

6. Evacuation of Metro Station During Fire Alarm:

Σε αυτό το σενάριο, συνδυάζονται οι τεχνικές CFD και CCD. Υποθέτοντας την έναρξη πυρκαγιάς σε μία από τις σκάλες, ο κώδικας FEFLO υπολογίζει το flow και την θερμοκρασία, ενώ τα δεδομένα εισάγονται στο PEDFLOW για να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις της μειωμένης ορατότητας και της εισπνοής καπνού.

7. Evacuation of a Complete City:

Η πιο φιλόδοξη προσομοίωση αναπαριστά την εκκένωση ολόκληρης της πόλης της Barcelona, με περίπου 1.4 εκατομμύρια πεζούς. Το αστικό δίκτυο αναπαρίσταται με μεγάλη ακρίβεια, ενώ η προσομοίωση εκτελείται σε τεράστιας κλίμακας παραλληλοποίηση, αξιοποιώντας σχεδόν 400 επεξεργαστές, γεγονός που επιτρέπει την ανάλυση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο .

2.3.1.4 Σύγκριση με τη Δική μου Έρευνα

- **Ομοιότητες**

Και οι δύο προσεγγίσεις εστιάζουν στη μελέτη της κίνησης και συμπεριφοράς πλήθους σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Η χρήση simulation models και computational tools αποτελεί κοινό εργαλείο για την κατανόηση των μηχανισμών διαχείρισης πλήθους, προσφέροντας πολύτιμα insights για τη βελτίωση της ασφάλειας.

- **Διαφορές**

Ενώ η παραπάνω έρευνα επικεντρώνεται αποκλειστικά στους πεζούς και στα χαρακτηριστικά τους, η δική σας εργασία επικεντρώνεται στην εκκένωση μέσω οχημάτων στην Παλιά Πόλη της Λευκωσίας. Αυτό συνεπάγεται την αντιμετώπιση διαφορετικών παραμέτρων, όπως το οδικό δίκτυο, η κίνηση οχημάτων και οι περιορισμοί των υποδομών, που δεν αναλύονται στην έρευνα για τη ροή πεζών.

- **Γενικά Σχόλια**

Η έρευνα αυτή παρέχει μια πολύπλευρη προσέγγιση στην ανάλυση της κίνησης πλήθους, προσφέροντας χρήσιμα εργαλεία και μεθοδολογίες που μπορούν να ενσωματωθούν σε υβριδικά μοντέλα.

2.3.2 Προσομοίωση Εκκένωσης Αστικής Κοινότητας κατά τη Διάρκεια

Καταστροφικών Βροχοπτώσεων στην Κίνα [\[7\]](#)

- **Συγγραφείς:** Qing Yang, Ying Sun, Xingxing Liu* και Jinmei Wang
- **Ιδρύματα:**
 - School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan, Κίνα
 - School of Management, Wuhan University of Technology, Wuhan, Κίνα
- **Δημοσίευση:** Sustainability 2020, 12(2), 546

2.3.2.1 Γενική Περιγραφή της Έρευνας

Η παρούσα μελέτη εξετάζει τις επιπτώσεις των αστικών βροχοπτώσεων και της συνεπαγόμενης συσσώρευσης υδάτων στις πόλεις, οι οποίες συχνά οδηγούν σε σοβαρές οικονομικές απώλειες και απώλειες ανθρώπινων ζωών. Η έρευνα επικεντρώνεται στην προσομοίωση της εκκένωσης των πεζών κατά τη διάρκεια αστικών βροχοπτώσεων, αξιοποιώντας ένα multi-agent system (MAS). Σε αυτήν τη μελέτη, δημιουργούνται σενάρια που προσομοιώνουν την επιλογή διαδρομών εκκένωσης από τους πεζούς και την κατανομή των shelters (καταφυγίων) σε διάφορες διατάξεις, ενώ παράλληλα αναλύονται και οι ψυχολογικές και περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους.

2.3.2.2 Κύρια Στοιχεία και Μεθοδολογία

- **Αντικείμενο Μελέτης:**

Η μελέτη εστιάζει σε αστικές βροχοπτώσεις που προκαλούν συσσώρευση υδάτων, οι οποίες, σε συνδυασμό με ανεπαρκείς δραστηριότητες διάσωσης, επιδεινώνουν την καταστροφή. Χρησιμοποιείται η προσομοίωση για να αναλυθεί η επιλογή διαδρομών και η συμπεριφορά των πεζών όταν αντιμετωπίζουν αυτήν την κρίση.
- **Χρήση Multi-Agent System (MAS):**

Η τεχνολογία MAS επιτρέπει σε κάθε agent (πεζό) να διαθέτει ικανότητες αντίληψης, δράσης και λήψης αποφάσεων βάσει εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων, όπως η πληροφορία για τον κίνδυνο, η πυκνότητα του πλήθους και η απόσταση από τα shelters.

- **Μοντελοποίηση και Εξίσωση:**

Οι ερευνητές ενσωματώνουν μαθηματικά μοντέλα και αλγόριθμους (π.χ. Dijkstra για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής) που περιλαμβάνουν εξισώσεις για:

- **Route selection:** Συνδυασμός στατικών και δυναμικών παραμέτρων για την επιλογή διαδρομών.
- **Ενεργειακές απώλειες:** Καθορισμός της ενεργειακής κατανάλωσης με βάση τον χρόνο, την πυκνότητα του πλήθους και τις δυσκολίες που προκαλούν οι συσσωρεύσεις υδάτων.
- **Αλλαγή της ταχύτητας και πληροφορίας:** Ο υπολογισμός της αρχικής ταχύτητας και της μεταβολής της σε συνάρτηση με την πληροφορία που ανταλλάσσεται μεταξύ των πεζών.

- **Σενάρια Προσομοίωσης:**

Τα πειράματα διεξάγονται με διαφορετικές διατάξεις κατανομής των shelters (dense, dispersed, scattered) και με ποικίλους λόγους μεταξύ των τύπων πεζών (rebellious vs. following). Επιπλέον, εφαρμόζεται clustering analysis (DBSCAN) για την ανάλυση των συμπεριφορών επιβίωσης, καθώς και προσομοιώσεις για τη βιώσιμη διάσωση μετά την άφιξη στα shelters.

2.3.2.3 Σύγκριση με τη Δική μου Έρευνα

- **Ομοιότητες**

Και οι δύο έρευνες εστιάζουν στην ανάλυση καταστάσεων εκκένωσης σε αστικά περιβάλλοντα, χρησιμοποιώντας υπολογιστικά μοντέλα για να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά του πλήθους. Οι μεθοδολογίες που ακολουθούν παρέχουν εργαλεία για την πρόβλεψη των ροών και την αξιολόγηση των διαδικασιών διάσωσης, προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες για την ασφάλεια σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

- **Διαφορές**

Η έρευνα με το MAS επικεντρώνεται στις επιπτώσεις των αστικών βροχοπτώσεων και στην επιλογή διαδρομών εκκένωσης σε συνδυασμό με τη κατανομή των shelters, ενώ η δική μου εργασία ασχολείται με την εκκένωση μέσω αυτοκινήτων από την Παλιά Πόλη της Λευκωσίας. Επιπλέον, ενώ η μελέτη στο MDPI δίνει έμφαση στις

ψυχολογικές παραμέτρους και την ενεργειακή κατανάλωση των πεζών, η δική μου προσέγγιση περιλαμβάνει παράγοντες που σχετίζονται με την κίνηση οχημάτων και την υποδομή των δρόμων.

- **Γενικά Σχόλια**

Η σύγκριση των δύο ερευνών αναδεικνύει τη σημασία της ερευνητικής προσέγγισης στην κατανόηση και αντιμετώπιση καταστάσεων εκκένωσης. Ενώ οι κοινές μεθοδολογίες υποστηρίζουν τη βελτίωση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών διάσωσης στις αντίστοιχες περιπτώσεις, ενώ οι διαφορετικές παράμετροι που εξετάζονται στις δύο μελέτες προσφέρουν πολύτιμα πληροφορίες για την προσαρμογή των στρατηγικών διάσωσης ανάλογα με το περιβάλλον και τη φύση του κινδύνου αλλά και το είδος εκκένωσης (πεζοί ή αυτοκίνητα).

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία/Υλοποίηση

3.1 Υλοποίηση

Κατά την υλοποίηση της προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα εργαλεία και πακέτα που συνέβαλαν στη δημιουργία ενός ρεαλιστικού και δυναμικού περιβάλλοντος. Κάποια από τα βασικά στοιχεία είναι:

- **Unity:** Unity 6 Preview (έκδοση: 6000.0.19f1 με DX11)
- **EasyRoads3D Free v3 Package:** (έκδοση: 3.2.4f3) [\[4\]](#)
- **Unity AI Navigation Package:** (έκδοση: 2.0.4) [\[1\]](#)
- **Προσαρμοσμένα Scripts:** Για τη δημιουργία πρακτόρων, τη διαχείριση της κίνησης οχημάτων, την ανίχνευση συμφόρησης και τη συλλογή μετρικών

Αυτά τα εργαλεία σε συνδυασμό προσφέρουν ένα ευέλικτο πλαίσιο που επιτρέπει την ακριβή προσομοίωση της κυκλοφορίας και την ανάλυση της απόδοσης του οδικού δικτύου.

3.1.1 Πιλοτική Σκηνή (Pilot Scene)

3.1.1.1 Αρχικές Δοκιμές και Βασικές Ρυθμίσεις

3.1.1.1.1 Προκαταρκτικές Δοκιμές με το Ενσωματωμένο Πακέτο ΑΙ της Unity

Στην αρχή της υλοποίησης, προχώρησα σε μια σειρά δοκιμών με το ενσωματωμένο πακέτο ΑΙ της Unity, το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία NavMesh. Είχα ως αφετηρία μια απλή δοκιμαστική σκηνή (test scene) στην οποία τοποθέτησα έναν κύλινδρο ως agent, ενεργοποίησα το NavMesh Agent component και όρισα ένα NavMesh στην επιφάνεια του εδάφους, ένα απλό plane. Η αρχική λειτουργία στόχευε στο να επιλέγω με κλικ το σημείο-προορισμό και να βλέπω τον πράκτορα να ακολουθεί τη διαδρομή που υπολόγιζε το NavMesh. Με αυτόν τον τρόπο εξοικειώθηκα με τις βασικές αρχές λειτουργίας του πακέτου και επαλήθευσα ότι οι ρυθμίσεις κλίμακας, τα colliders και οι παράμετροι του NavMesh Agent component, όπως ο ρυθμός περιστροφής (angular speed) και η μέγιστη ταχύτητα (speed), μπορούσαν να επηρεάσουν αισθητά την κίνηση του agent. [\[11\]](#), [\[12\]](#), [\[13\]](#), [\[14\]](#)

3.1.1.1.2 Προσαρμογή και Δοκιμή Μοντέλου Αυτοκινήτου από το Unity Asset Store

Στη συνέχεια, θέλοντας να στραφώ σε πιο ρεαλιστικές προσομοιώσεις που να περιλαμβάνουν οχήματα, χρησιμοποίησα ένα μοντέλο αυτοκινήτου από το Unity Asset Store [5]. Το βασικό μοντέλο όπως φαίνεται πιο κάτω, περιείχε ήδη κάποια βασικά components, όπως mesh renderer και colliders, ενώ δεν είχε ιδιαίτερη φυσική συμπεριφορά (physics) ενσωματωμένη. Όταν επιχείρησα να προσαρμόσω το NavMesh Agent στο αυτοκίνητο, παρατήρησα αμέσως ότι το πακέτο είναι φτιαγμένο με επίκεντρο τους Humanoid Agents. Ακόμα και με τροποποιήσεις στη διάμετρο του collider, στο ύψος ή προσθέτοντας Rigidbody στο GameObject του αυτοκινήτου, δεν ήταν εφικτό να αναπαραχθεί μία κίνηση που να θυμίζει οδήγηση. Επιπλέον, το σύστημα δεν προσφέρει καμία λειτουργία για στροφή τιμονιού, για οπισθοπορεία ή για τις αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν μεταξύ οχημάτων. Τα προβλήματα αυτά κατέστησαν σαφές ότι το πακέτο από μόνο του δεν θα επαρκούσε για μια ικανοποιητική προσομοίωση οδικής κυκλοφορίας.



Σχήμα 3.1 Red Car Model Represents the Rational Drivers and the Blue Model the Egoistic

3.1.1.2 Προσαρμοσμένη Προσομοίωση Οδήγησης

3.1.1.2.1 Ανάπτυξη Προσαρμοσμένου Script για Κίνηση Οχημάτων

Έχοντας κατανοήσει τους περιορισμούς, αποφάσισα να γράψω ένα εξ ολοκλήρου ένα προσαρμοσμένο script που θα «βλέπει» το μονοπάτι που ήδη υπολογίζει το NavMesh Agent Component, αλλά θα καθορίζει την κίνηση του οχήματος βάσει δυνάμεων (forces) και ροπών (torque) στο Rigidbody του αυτοκινήτου. Ξεκίνησα με το να παίρνω την ακολουθία των σημείων (path corners) που δίνει το NavMesh Agent και υλοποίησα μια συνάρτηση που υπολογίζει την απαιτούμενη κατεύθυνση και μετατρέπει αυτή την κατεύθυνση σε δυνάμεις και ροπή στο αυτοκίνητο. Με αυτόν τον τρόπο, είχα μεγαλύτερο έλεγχο στη συμπεριφορά του αυτοκινήτου, επιτυγχάνοντας σταδιακά ομαλότερη επιτάχυνση και πιο ρεαλιστικές στροφές.

3.1.1.2.2 Δημιουργία Ρεαλιστικών Δρόμων με το EasyRoads Asset

Παράλληλα, επεκτείνοντας τη σκηνή μου, αναζήτησα έναν τρόπο να δημιουργήσω ρεαλιστικούς δρόμους, όχι απαραίτητα ορθογώνιους ή εντελώς επίπεδους. Έτσι κατέληξα στο πακέτο EasyRoads, το οποίο ήταν διαθέσιμο δωρεάν και προσφέρει δυνατότητες κατασκευής δρόμων, γεφυρών και άλλων στοιχείων υποδομής όπως στροφές με κλίση [\[4\]](#). Κατασκεύασα μια μικρή πίστα με στροφές διαφόρων ακτινών και ίσια τμήματα, όπου δοκίμαζα διαρκώς τη συμπεριφορά του αυτοκινήτου ώστε να βρω ιδανικές τιμές σε μεταβλητές επιτάχυνσης, φρεναρίσματος και γωνίας στροφής. Ένα πρώτο βήμα ήταν να ανιχνεύω πότε το αυτοκίνητο βρίσκεται κοντά σε στροφή, μειώνοντας εγκαίρως την ταχύτητά του. Αυτό έγινε μέσω μιας μεθόδου που εξετάζει τα επόμενα σημεία του path και, αν ανιχνευτεί απότομη αλλαγή κατεύθυνσης, μειώνεται η ισχύς επιτάχυνσης και αυξάνεται αυτή της επιβράδυνσης.



Σχήμα 3.2 Initial Testing Plane with green destinations and some parking areas

3.1.1.2.3 Εξερεύνηση Αλληλεπιδράσεων Πολλαπλών Οχημάτων

Αφού πέτυχα μια ικανοποιητική βάση κίνησης για ένα μόνο αυτοκίνητο, θέλησα να εξετάσω την αλληλεπίδραση πολλών οχημάτων ταυτόχρονα. Για τον σκοπό αυτό, υλοποίησα «χώρους στάθμευσης» (parking lots) που λειτουργούσαν ως spawn points, ώστε να μπορούν να δημιουργούνται οχήματα σε διαφορετικά σημεία του χάρτη. Παράλληλα, όρισα διάφορους προορισμούς, σημεία ενδιαφέροντος (destinations) διασκορπισμένα στο χάρτη, όπου τα οχήματα μπορούσαν να κατευθύνονται αυτόματα χωρίς να χρειάζεται η συνεχής παρέμβαση μου για επιλογή προορισμού. Αυτή η διαδικασία με βοήθησε επίσης να εντοπίσω και να επιλύσω πιθανές συγκρούσεις μεταξύ αυτοκινήτων (π.χ. δύο οχήματα που θα προσπαθούσαν να καταλάβουν την ίδια λωρίδα δρόμου σε μια στενή στροφή και χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν το ένα το άλλο).

3.1.1.2.4 Πειραματισμός με Δύο Τύπους Οδηγικής Συμπεριφοράς

Επιπλέον, εισήγαγα δύο διαφορετικές «προσωπικότητες» οδήγησης, ώστε να προσομοιώσω εναλλακτικούς τρόπους συμπεριφοράς στον δρόμο. Ο «ορθολογικός» (rational) οδηγός ακολουθεί πιο ομαλή επιτάχυνση και φρενάρισμα, ενώ κάνει προσεκτικές στροφές ώστε να

διατηρεί μια σταθερή μέση ταχύτητα. Από την άλλη, ο «εγωιστής» (egoistic) οδηγός επιταχύνει πιο επιθετικά και φρενάρει πιο απότομα, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε πιο ριψοκίνδυνες αλλαγές λωρίδας ή σε μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης αν το σύστημα αποφυγής συγκρούσεων δεν είναι επαρκώς προσαρμοσμένο. Με αυτόν τον διαχωρισμό μπορούσα να μελετήσω αν η ύπαρξη πολλών επιθετικών οδηγών δημιουργούσε συμφόρηση ή περισσότερες καθυστερήσεις στο δίκτυο των δρόμων.

Σε κάποιο στάδιο, πειραματίστηκα και με την ιδέα οι πράκτορες χωρίς συγκεκριμένο προορισμό να ακολουθούν τυχαία άλλους πράκτορες που είχαν ορίσει έναν προορισμό, αποσκοπώντας σε μια «κοινωνική» συμπεριφορά τύπου “follow the leader”. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή αποδείχθηκε πιο πολύπλοκη από το αναμενόμενο, καθώς δημιούργησε ασυνέπειες στην κίνηση (π.χ. αν η ταχύτητα του ηγέτη ήταν σημαντικά μεγαλύτερη, ο «απροσανατόλιστος» οδηγός εγκατέλειπε το “κυνήγι” πολύ γρήγορα, οδηγώντας σε άσκοπη πλοήγηση). Τελικά, αποφάσισα να επικεντρωθώ στους δύο τύπους οδηγών (ορθολογικό και εγωιστικό) για να διατηρήσω τη συνοχή του σεναρίου, καθώς η τυχαιότητα και η αβεβαιότητα του «ακολουθήματος» δεν προσθέτει αξία στο κύριο εγχείρημα.

3.1.1.2.5 Μικρή Ανασκόπηση

Όλα αυτά τα βήματα, από τις πρώτες δοκιμές με τους κυλίνδρους-agents έως την εφαρμογή του custom script κίνησης και τις διαφορετικές συμπεριφορές οδήγησης, συνέβαλαν στη διαμόρφωση μιας πλήρως λειτουργικής βάσης για την προσομοίωση. Το κρίσιμο σημείο ήταν η αντίληψη ότι το Unity NavMesh Agent εξ ορισμού υποστηρίζει ανθρωποειδείς χαρακτηρισμούς κινούμενων αντικειμένων, ενώ για την προσομοίωση οχημάτων απαιτείται πιο εξειδικευμένη λογική οδήγησης. Με τον τρόπο αυτό, κατάφερα να διαχωρίσω τη διαδικασία υπολογισμού του μονοπατιού (pathfinding) από τον έλεγχο κίνησης (car controller), κρατώντας μεν την ευκολία του NavMesh για πλοήγηση στο περιβάλλον, αλλά προσθέτοντας έναν πιο ρεαλιστικό και δυναμικό τρόπο κίνησης που ανταποκρίνεται στις φυσικές αρχές οδήγησης.

3.1.2 Κύρια Σκηνή (Main Scene)

3.1.2.1 Δημιουργία του Περιβάλλοντος/Διαμόρφωση του Οδικού Δικτύου

Στη δημιουργία του περιβάλλοντος, ξεκίνησα με την απόκτηση του μοντέλου FBX της παλαιάς πόλης Λευκωσίας, το οποίο προήλθε από το έργο iNicosia του Κέντρου Αριστείας

CYENS [6]. Το μοντέλο αυτό, αν και είχε κάποιες περιορισμένες λεπτομέρειες λόγω της ανάγκης για λειτουργία σε υπολογιστή με χαμηλότερα χαρακτηριστικά, αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία θα φτιάξω το περιβάλλον μου. Αφού το έκανα import στο Unity μαζί με τα textures του προχώρησα στη δημιουργία του οδικού δικτύου.



Σχήμα 3.3 Model Showcase

3.1.2.1.1 Δημιουργία Οδικού Δικτύου

Για την κατασκευή του οδικού δικτύου, επέλεξα την δωρεάν έκδοση του EasyRoads, που προσφέρει τις βασικές λειτουργίες που απαιτούνταν για το έργο μου [4]. Η επιλογή αυτή με υποχρέωσε να δημιουργήσω κάθε οδό χειροκίνητα, μία προς μία, με μεγάλη προσοχή και ακρίβεια. Η διαδικασία ξεκίνησε με την ανάλυση του μοντέλου της Λευκωσίας και τη σχεδίαση του δικτύου σύμφωνα με αυτό, ενώ παράλληλα χρησιμοποίησα το Google Maps για να επαληθεύσω και να διορθώσω τυχόν ανακρίβειες που υπήρχαν στο μοντέλο, δεδομένου ότι η ποιότητα του μοντέλου δεν ήταν άριστη [10].



Σχήμα 3.4 Road Network

3.1.2.1.2 Ρύθμιση και Ενσωμάτωση του Δικτύου στο Μοντέλο

Αφού ολοκλήρωσα την τοποθέτηση των οδών, προχώρησα στην προσαρμογή τους σε τέτοιο επίπεδο ώστε να βρίσκονται ελαφρώς κάτω από το αρχικό μοντέλο. Αυτή η προσέγγιση διασφάλισε ότι τα οχήματα φαίνονταν πως κινούνται πάνω στη σάρωση της πόλης, αντί να ακολουθούν μια ανεξάρτητη επιφάνεια δρόμου, όπως θα συνέβαινε με ένα τυπικό asset.

3.1.2.1.3 Ενσωμάτωση του NavMesh

Για να επιτρέψω στους agents να περιηγούνται σωστά στο περιβάλλον, ανάθεσα μια ετικέτα σε κάθε δρόμο, χαρακτηρίζοντάς τους ως προσπελάσιμους. Αυτή η διαδικασία ήταν καθοριστική για το baking του NavMesh, αφού επέτρεψε στο σύστημα να εντοπίσει με ακρίβεια τις περιοχές που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την πλοήγηση. Μετά το αρχικό baking, πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω ρυθμίσεις στις οδούς για να εξασφαλιστεί

ότι το NavMesh ήταν ομαλό και χωρίς εμφανή προβλήματα όπως απότομες γωνίες ή άλλα σφάλματα που θα μπορούσαν να προκαλέσουν "κολλήματα" των agents κατά το simulation.

3.1.2.1.4 Επιπρόσθετες Τροποποιήσεις

Ένας ακόμη σημαντικός έλεγχος αφορούσε την απενεργοποίηση των πεζόδρομων, έτσι ώστε τα οχήματα να μην καταλήγουν να κινούνται σε διαδρομές που δεν πρέπει. Επιπλέον, εντόπισα τους ευρύτερους χώρους στάθμευσης που υπήρχαν στο μοντέλο και τους επεξεργάστηκα ώστε να επιτρέπεται το spawn οχημάτων σε αυτές τις περιοχές, δημιουργώντας έτσι μια πιο ρεαλιστική εμπειρία. Αυτό έγινε με την τοποθέτηση κάποιων τρισδιάστατων invisible κύβων που οριοθετούν τον κάθε χώρο στάθμευσης για να μπορώ στην συνέχεια με κάποιο script να τοποθετήσω τους agents σε κάποιο ρεαλιστικό σημείο.

3.1.2.1.5 Προσδιορισμός και Οργάνωση Εξόδων

Τέλος, ολοκλήρωσα το σύνολο της οδικής δικτύωσης με την προσθήκη πέντε εξόδων που είναι προσβάσιμες από τα οχήματα. Συγκεκριμένα, οι εξοδοί που επιλέχθηκαν, μαζί με τις αντίστοιχες διευθύνσεις τους, είναι οι εξής:

- Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II
- Γέφυρα Δώρου Λοΐζου
- Πλατεία Σολωμού
- Βασιλέως Γεωργίου Β
- Πάφου

3.1.2.1.6 Μικρή Ανασκόπηση

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει μια σειρά από πολύ προσεκτικές προσαρμογές και δοκιμές, εξασφαλίζοντας ότι το τελικό περιβάλλον ήταν τόσο λειτουργικό για τους agents όσο και οπτικά συνεπές με το πρωτότυπο μοντέλο της Λευκωσίας. Η λεπτομερής προσέγγιση, από την κατασκευή του οδικού δικτύου με το EasyRoads μέχρι τις προσαρμογές του NavMesh και τις τελικές ρυθμίσεις των εξόδων, συνέβαλε στην επίτευξη ενός ρεαλιστικού και λειτουργικού περιβάλλοντος για την εφαρμογή μου.

3.1.2.2 Υλοποίηση Μονόδρομων

3.1.2.2.1 Αρχικές Προσεγγίσεις

Στην αρχή προσπάθησα να εφαρμόσω οδούς μονής κατεύθυνσης με τη χρήση αόρατων τοίχων (invisible walls) στις αρχές και τα τέλη των οδών, ώστε να εμποδίζω τα οχήματα από το να εισέρχονται ανάποδα. Αυτή η μέθοδος απαιτούσε την ανάπτυξη επιπρόσθετου script για να αποφασίζει αν ένα όχημα μπορεί να εισέλθει ή όχι. Παρ' όλα αυτά, δεν λειτούργησε όπως θα περίμενα, διότι επηρέαζε το ήδη υπολογισμένο μονοπάτι πλοήγησης των πρακτόρων, δημιουργώντας ανακολουθίες στην κίνηση.

3.1.2.2.2 Αναζήτηση Εναλλακτικών Λύσεων

Ακολουθώντας την αναζήτηση, μελέτησα τις δυνατότητες που προσφέρονταν από το Unity AI package, δοκιμάζοντας διάφορα modifiers για να προσομοιώσω κίνηση μιας κατεύθυνσης. Καμία από αυτές τις μεθόδους δεν απέδιδε το επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς δεν ήταν δυνατή η αξιόπιστη αναπαράσταση της μονόδρομης κυκλοφορίας για οχήματα.

3.1.2.2.3 Χρήση Nav Links για Εφαρμογή Οδών Μίας Κατεύθυνσης

Τελικά, βρήκα μια λειτουργική λύση μέσω των Nav Links που παρέχει το Unity AI package. Σε μια αρχική δοκιμαστική σκηνή, κατάφερα να ρυθμίσω τα Nav Links απενεργοποιώντας την επιλογή bidirectional movement, έτσι ώστε να επιτρέπεται μόνο η κίνηση προς μία κατεύθυνση. Για να επιτευχθεί αυτό, ήταν απαραίτητο να διαχωριστούν οι οδικές επιφάνειες στα σημεία που απαιτούνται μεταβάσεις μίας κατεύθυνσης και να συνδεθούν οι δύο περιοχές με τα ειδικά Nav Link GameObjects.

3.1.2.2.4 Προσαρμογή τοποθέτησης Nav Links με Βοήθεια Google Maps Street View

Η χρήση των Nav Links, όμως, εισήγαγε επιπλέον προκλήσεις. Όταν τα Nav Links τοποθετούνταν κοντά σε γωνίες ή σε διασταυρώσεις, τα οχήματα άρχιζαν να στρίβουν πρόωρα και να πέφτουν εκτός δρόμου, διότι το NavMesh Agent επηρεαζόταν από την εγγενή του λογική. Για να αντιμετωπίσω αυτό το ζήτημα, χρειάστηκε να μετακινήσω τα Nav Links πιο πίσω από τις γωνίες και στροφές του δικτύου, διατηρώντας παράλληλα την κατεύθυνση του δρόμου.

Για την ορθή τοποθέτηση των Nav Links και για να επιβεβαιώσω την ακριβή κατεύθυνση των μονόδρομων, χρησιμοποίησα έντονα το Google Maps Street View [\[10\]](#). Μέσα από το Street View, είχα την ευκαιρία να παρατηρήσω από κοντά τα πραγματικά οδικά σήματα και τις δείξεις που υποδεικνύουν τη φορά κίνησης στις οδούς μίας κατεύθυνσης. Επιπλέον,

στηρίχθηκα σε έναν χάρτη από το δήμο της παλαιάς Λευκωσίας που περιείχε δείκτες για τις εν λόγω οδούς, αν και σε πολλές περιπτώσεις έπρεπε να βασιστώ στο Google Maps για να επιβεβαιώσω την κατεύθυνση, λόγω περιορισμένης διασταύρωσης με τα δεδομένα του δήμου [9], [10]. Αυτή η προσέγγιση, συνδυάζοντας τις πληροφορίες από το Google Maps Street View με την προσεκτική τοποθέτηση των Nav Links, επέτρεψε την επίτευξη της επιθυμητής κυκλοφοριακής ρύθμισης στον οδικό δίκτυο.

3.1.2.3 Δημιουργία Πρακτόρων και Ορισμός Προορισμών

Η υλοποίηση βασίζεται σε μια σειρά τεχνικών για τη δημιουργία ενός δυναμικού και λειτουργικού περιβάλλοντος, όπου οι πράκτορες (agents) μπορούν να γεννηθούν, να ακολουθήσουν το κατάλληλο μονοπάτι και να απομακρυνθούν μόλις φτάσουν στον προορισμό τους. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές μέθοδοι και τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο Agent Spawner script, μαζί με μια ανάλυση του πώς λειτουργούν και γιατί είναι απαραίτητες.

3.1.2.3.1 Triangulation του NavMesh για Τυχαία Επιλογή Θέσεων (Spawn Points)

Η διαδικασία της τριγωνοποίησης χρησιμοποιείται για να διαιρέσει την επιφάνεια του NavMesh σε τρίγωνα, μέσω των οποίων δημιουργούνται έγκυρα spawn points.

- **Τι είναι η τριγωνοποίηση:** Η τριγωνοποίηση μετατρέπει την επιφάνεια του NavMesh σε μια συλλογή από τρίγωνα, οι οποίοι ορίζονται από κορυφές (vertices) και τους δείκτες που τους συνδέουν (indices).
- **Πώς χρησιμοποιείται:** Επιλέγοντας τυχαία τρίγωνα και υπολογίζοντας τυχαία σημεία εντός αυτών μέσω Barycentric coordinates, το script εξασφαλίζει ότι οι πράκτορες γεννιούνται σε περιοχές που είναι ορθά προσπελάσιμες και κατάλληλες για πλοήγηση.

3.1.2.3.2 Υπολογισμός Κοντινότερου Προορισμού μέσω NavMesh Pathfinding

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον υπολογισμό του μονοπατιού που δημιουργείται από το NavMesh για κάθε διαθέσιμο προορισμό. Ουσιαστικά, το script παίρνει τις "γωνίες" (corners) που αποτελούν το μονοπάτι και τις χρησιμοποιεί για να υπολογίσει το συνολικό μήκος της διαδρομής. Κάθε γωνία αντιπροσωπεύει ένα σημείο καμπής ή αλλαγής κατεύθυνσης, και η συνολική απόσταση υπολογίζεται ως το άθροισμα των αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών γωνιών.

Αυτή η προσέγγιση μοιάζει σε κάποιο βαθμό με τον υπολογισμό της απόστασης Manhattan, καθώς λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές κατά μήκος διαδοχικών διαδρομών, παρά τον ευθύ υπολογισμό της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του αρχικού σημείου και του προορισμού. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα εξασφαλίζει ότι επιλέγεται ο προορισμός με τη μικρότερη υπολογιζόμενη διαδρομή, διασφαλίζοντας ότι οι πράκτορες κατευθύνονται προς το πιο κοντινό και προσβάσιμο σημείο.

Η υλοποίηση αυτής της μεθόδου είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση της πλοήγησης, αφού εξαλείφει περιττές διαδρομές και συμβάλλει σε μια πιο ρεαλιστική συμπεριφορά κατά την κίνηση των πρακτόρων μέσα στο περιβάλλον.

3.1.2.3.3 Διαχωρισμός Ρόλων Ηγέτη(Leader) και Ακολούθου(Follower)

Αρχικά, η διάκριση μεταξύ "ηγέτη" και "ακολούθου" χρησιμοποιήθηκε ως μια πειραματική προσέγγιση για την προσομοίωση πολύπλοκων συμπεριφορών μεταξύ πρακτόρων. Σε αυτήν την εφαρμογή, κατά τη διαδικασία δημιουργίας (spawn), οι πράκτορες κατανέμονταν σε δύο κατηγορίες: οι "ηγέτες" καθορίζουν το μονοπάτι, ενώ οι "ακόλουθοι" ακολουθούν τους ηγέτες, προκειμένου να δημιουργηθούν πιο πλούσιες αλληλεπιδράσεις στην κυκλοφορία και στις οδικές συνθήκες.

Ωστόσο, μετά από εκτεταμένες δοκιμές, διαπιστώθηκε ότι αυτή η προσέγγιση δεν είναι ρεαλιστική για την προσομοίωση οδήγησης οχημάτων. Τα αυτοκίνητα, σε αντίθεση με τους ανθρωποειδείς πράκτορες, απαιτούν μια πιο ανεξάρτητη και φυσική κίνηση, όπου ο καθορισμός του μονοπατιού και η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον δεν μπορούν να βασίζονται αποκλειστικά στη δυναμική ενός ηγέτη και την τάση των υπολοίπων να τον ακολουθούν του. Εξαιτίας αυτού, η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται πλέον στην τελική υλοποίηση, αφού αποδείχθηκε ότι δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της ρεαλιστικής προσομοίωσης οδικής κυκλοφορίας για οχήματα.

3.1.2.3.4 Τυχαία Αναδιάταξη των Spawn Locations (Shuffle)

Η τυχαία αναδιάταξη των spawn locations(χώροι στάθμευσης) εξασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή των πρακτόρων στο περιβάλλον.

- **Πώς λειτουργεί:** Με τη χρήση μιας μεθόδου ανακατέματος, οι καθορισμένες περιοχές χώρων στάθμευσης ανακατεύονται κάθε φορά που γίνεται spawn κάποιος πράκτορας, έτσι ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση πρακτόρων σε συγκεκριμένες περιοχές.

- **Χωρίς αυτήν τη διαδικασία:** Θα μπορούσαν να δημιουργηθούν περιοχές με υπερβολική συγκέντρωση πρακτόρων, οδηγώντας σε μη ρεαλιστικές συμπεριφορές και πιθανά προβλήματα στην πλοήγηση.

3.1.2.3.5 Χειρισμός Απομάκρυνσης (Despawn) με Coroutines

Η διαδικασία που ελέγχει την απομάκρυνση(despawn) των πρακτόρων χρησιμοποιεί coroutines για να παρακολουθεί συνεχώς την κατάσταση κάθε πράκτορα.

- **Λειτουργία:** Με την επανάληψη ελέγχων σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, το script διαπιστώνει πότε ένας πράκτορας έχει φτάσει στον τελικό προορισμό του.
- **Αναγκαιότητα:** Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ακριβή καταγραφή των χρόνων απομάκρυνσης(despawn) και την εξασφάλιση ότι οι πράκτορες αφαιρούνται από το σύστημα μόλις ολοκληρώσουν τη διαδρομή τους.

3.1.2.3.6 Ενημέρωση Μετρικών και Καταγραφή Συμβάντων

Τα scripts του Agent Spawner και του Metrics Manager(σύστημα καταγραφής μετρικών) είναι στενά συνδεδεμένα και σε συνεχή επικοινωνία για να εξασφαλίσουν μια ολοκληρωμένη παρακολούθηση και ανάλυση της προσομοίωσης.

- **Τι κάνει:** Καταγράφει συμβάντα όπως το spawn, την εκκίνηση της κίνησης, και την απομάκρυνση(despawn) των πρακτόρων, καθώς και χρόνους που σχετίζονται με κάθε πράξη.
- **Σημασία:** Αυτά τα δεδομένα είναι κρίσιμα για την αξιολόγηση της απόδοσης της προσομοίωσης και την ανάλυση των συμπεριφορών των πρακτόρων, επιτρέποντας μελλοντικές βελτιστοποιήσεις.

3.1.2.4 Χειρισμός Κίνησης Πρακτόρων(Car Driving Behaviour)

Καθώς αναφέρθηκε στη δοκιμαστική σκηνή, το ενσωματωμένο πακέτο AI της Unity δεν υποστηρίζει επαρκώς την κίνηση οχημάτων και, σε γενικές γραμμές, δεν λειτουργεί καλά για αυτοκίνητα. Επομένως, αναγκάστηκα να δημιουργήσω από το μηδέν ένα script που χειρίζεται τόσο την κίνηση όσο και τη συμπεριφορά του αυτοκινήτου.

3.1.2.4.1 Απόκτηση και Χρήση του Μονοπατιού του NavMesh Agent

Αρχικά, το script εξασφαλίζει την απόκτηση του μονοπατιού από το NavMesh Agent. Με αυτή τη μέθοδο, ο ελεγκτής μπορεί να γνωρίζει με ακρίβεια πότε πρέπει να επιβραδύνει – για παράδειγμα, όταν ανιχνεύεται μια επερχόμενη στροφή ή όταν υπάρχουν άλλα οχήματα μπροστά ή στο πλάι. Οι πληροφορίες αυτές, οι οποίες προκύπτουν από τις γωνίες (corners) του μονοπατιού, χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί πόσο μακριά και πόσο απότομη είναι μια στροφή. Αυτός ο υπολογισμός, που βασίζεται σε μια προσέγγιση παρόμοια με την απόσταση Manhattan, επιτρέπει την αναπροσαρμογή της ταχύτητας του αυτοκινήτου ώστε να επιβραδύνει αναλογικά στις ανάγκες της διαδρομής.

3.1.2.4.2 Εφαρμογή Κίνησης με Rigidbody και Καθορισμός Νέας Προσέγγισης

Για να μην επηρεάζεται το Rigidbody από την αυτόματη κίνηση του NavMesh Agent, απενεργοποιείται η κίνηση του agent και αναλαμβάνει αποκλειστικά ο script ο χειρισμός της κίνησης [3]. Στην αρχική φάση, η κίνηση του Rigidbody υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την επιθυμητή ταχύτητα που προσφέρει ο agent, και με τη χρήση quaternion slerp και μετασχηματισμών, το αυτοκίνητο κατευθύνεται κατά μήκος του μονοπατιού. Αρχικά, το αυτοκίνητο ξεκινά με μια ελάχιστη ταχύτητα και επιταχύνει σταδιακά προς την μέγιστη ταχύτητα του, αλλά όταν ανιχνεύει μια στροφή ή κάποιο εμπόδιο (άλλο αυτοκίνητο), η ταχύτητα μειώνεται μέσω μιας διαβαθμισμένης διαδικασίας (interpolation) που εξασφαλίζει ομαλή επιβράδυνση. Στη συνέχεια, η νέα ταχύτητα εφαρμόζεται στο Rigidbody ως ταχύτητα κίνησης, ενώ ταυτόχρονα ενημερώνεται η θέση του NavMesh Agent ώστε να φαίνεται ότι το agent κινείται με το αυτοκίνητο. Έτσι, το αυτοκίνητο κινείται και στρίβει ομαλά, ακολουθώντας το μονοπάτι που είχε υπολογιστεί από τον agent. Καλό θα ήταν να αναφέρω πως το RVO του NavMesh Agent, είναι ακόμη σε λειτουργία και χρησιμοποιείτε, καθώς προσφέρει τα απαραίτητα vectors και επιθυμητή ταχύτητα τα οποία παίρνει και χρησιμοποιεί το script, βοηθώντας έτσι την ομαλότερη κίνηση οχημάτων.

3.1.2.4.3 Ανίχνευση Στροφών και Εφαρμογή Επιβράδυνσης

Για να εντοπιστεί αν υπάρχει στροφή εμπρός, το script περιλαμβάνει μια μέθοδο “IsTurnAhead”. Η μέθοδος αυτή λειτουργεί εξετάζοντας τις γωνίες που δημιουργούνται μεταξύ διαδοχικών σημείων (corners) στο υπολογισμένο μονοπάτι του NavMesh Agent. Μετρώντας την απόσταση μεταξύ αυτών των σημείων, το script υπολογίζει το συνολικό μήκος της διαδρομής μέχρι την επόμενη στροφή, καθώς και το πόσο απότομη είναι αυτή (μετρώντας τη γωνία μεταξύ των διαδρομών). Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε μια

δυναμική αναπροσαρμογή της απόστασης που ελέγχει η μέθοδος, λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα ταχύτητα του αυτοκινήτου, ώστε να προβλέπει το χρονικό διάστημα και την απόσταση που απομένει μέχρι την επερχόμενη στροφή. Αν η στροφή ανιχνευθεί εντός μιας καθορισμένης απόστασης (που προσαρμόζεται δυναμικά με βάση την ταχύτητα), τότε υπολογίζεται ένας παράγοντας επιβράδυνσης, ο οποίος μειώνει την ταχύτητα στόχου του αυτοκινήτου. Αυτή η διαβαθμισμένη μείωση της ταχύτητας επιτρέπει στο όχημα να επιβραδύνει ομαλά και να προσαρμοστεί χωρίς να "πετάγεται" στις στροφές.

3.1.2.4.4 Ανίχνευση Εμποδίων μέσω Raycasts/Αποφυγή Συγκρούσεων

Πριν καταλήξω στη χρήση των raycasts, δοκίμασα διάφορες μεθόδους για την ανίχνευση εμποδίων [2]. Σε μερικές από τις πρώτες εκδόσεις του script, προσπαθούσα να χρησιμοποιήσω γεωμετρικές μεθόδους και διανυσματικούς υπολογισμούς για την παρουσία άλλων οχημάτων σε προκαθορισμένες περιοχές γύρω από το αυτοκίνητο. Αυτές οι προσεγγίσεις όμως, λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους και της δυσκολίας στην προσαρμογή των τιμών σε ρεαλιστικές συνθήκες, απέτυχαν να παράσχουν αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς να επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του συστήματος. Η λύση που τελικά επέλεξα ήταν η χρήση raycasts. Με την τοποθέτηση τριών raycasts εμπρός (έναν στο κέντρο και δύο με απόκλιση 15 μοιρών προς τα πλάγια), κατάφερα να ανιχνεύω αποτελεσματικά την παρουσία άλλων οχημάτων στην πορεία του αυτοκινήτου. Όταν κάποιο από τα raycasts ανιχνεύει ένα εμπόδιο, ενεργοποιείται μια διαδικασία που υπολογίζει πόσο κοντά βρίσκεται το εμπόδιο και πόσο πρέπει να μειωθεί η ταχύτητα για να αποφευχθεί μια σύγκρουση. Αυτή η μέθοδος παρέχει μια αξιόπιστη και αποτελεσματική λύση για την αποφυγή συγκρούσεων με χαμηλό υπολογιστικό κόστος, εξασφαλίζοντας ότι το αυτοκίνητο προσαρμόζει την ταχύτητά του ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

3.1.2.4.5 Εξασφάλιση Επαφής με το Δρόμο

Ένα ακόμη ζήτημα που αντιμετωπίστηκε ήταν το "πέταγμα" του αυτοκινήτου, δηλαδή η περίπτωση που το αυτοκίνητο απομακρύνεται από την επιφάνεια του δρόμου λόγω των μετασχηματισμών του Rigidbody [3], με αποτέλεσμα να φαίνεται πως πετά. Για την αντιμετώπιση αυτής της δυσκολίας, χρησιμοποιείται ένα raycast από το κάτω μέρος του αυτοκινήτου για να ανιχνεύει την επαφή με τον δρόμο [2]. Όταν ανιχνεύεται ότι το αυτοκίνητο "πετάγεται" πάνω από το δρόμο με ένα προκαθορισμένο όριο κάθετης απόστασης, το script αναγκάζει(μετακινεί) το αυτοκίνητο να επανέλθει στην επιφάνεια, διασφαλίζοντας έτσι μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση.

3.1.2.4.6 Εξέλιξη και Βελτιστοποίηση του Script

Το Car Controller script εξελίχθηκε σταδιακά μέσα από πολλές εκδόσεις και βελτιστοποιήσεις. Στην αρχική του μορφή, το script υλοποιούσε απλά τη μεταφορά της επιθυμητής ταχύτητας από το NavMesh Agent στο Rigidbody, αλλά έλειπαν σημαντικές λειτουργίες όπως η ανίχνευση στροφών, η δυναμική επιβράδυνση και η ανίχνευση άλλων αυτοκινήτων [3]. Με τη σειρά δοκιμών και πειραμάτων, υλοποιήθηκαν οι λειτουργίες:

- Ανίχνευσης επερχόμενων στροφών και προσαρμογής της ταχύτητας.
- Χρήσης raycasts για την ανίχνευση εμποδίων και την αποφυγή συγκρούσεων με άλλα οχήματα [2].
- Εξασφάλισης της επαφής του αυτοκινήτου με το δρόμο μέσω ενός ειδικού raycast.

Όλα αυτά τα στοιχεία συνδυάστηκαν για να δημιουργήσουν μια προσομοίωση οδήγησης που αποδίδει όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά τα χαρακτηριστικά της πραγματικής οδήγησης, χωρίς να "πετάγονται" τα οχήματα μέσα στις στροφές και με ομαλή επιβράδυνση όταν απαιτείται. Η ανάπτυξη αυτού του script απαιτούσε πολλές δοκιμές, πειραματισμούς και προσαρμογές στις παραμέτρους ώστε να επιτευχθεί το πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα σύστημα που προσομοιώνει την κίνηση του αυτοκινήτου με ρεαλιστικές επιταχύνσεις, φρεναρίσματα και στροφές, ενώ λαμβάνει υπόψη και την παρουσία άλλων οχημάτων στο περιβάλλον, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη και ακριβή προσομοίωση οδήγησης.

3.1.2.5 Road Congestion

Η ανάγκη για τη δυναμική προσομοίωση της κυκλοφορίας, καθώς και η ανάγκη για ανακατεύθυνση των οχημάτων σε περίπτωση συμφόρησης, προέκυψε από τη διαπίστωση ότι όλα τα αυτοκίνητα είχαν καθορισμένο μονοπάτι κατά την αρχή της προσομοίωσης και συνέχιζαν να ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι παρά την συμφόρηση σε κάποιες οδούς. Αυτή η προσέγγιση δεν ήταν ρεαλιστική, καθώς οι οδηγοί στον πραγματικό κόσμο συχνά αλλάζουν τη διαδρομή τους όταν ανιχνεύουν συμφόρηση, επιδιώκοντας ταχύτερους δρόμους κάτι που δεν αποδεικνύεται πάντα σοφό.

3.1.2.5.1 Αρχικές Δοκιμές

Αρχικά, σκέφτηκα να τροποποιήσω το κόστος των οδών με συμφόρηση (στην περιοχή του NavMesh) για να αναγκάσω τα άλλα αυτοκίνητα να επιλέξουν διαφορετική διαδρομή.

Προσπάθησα να τροποποιήσω την περιοχή (nav-mesh area type) του δρόμου χρησιμοποιώντας το NavMesh Modifier, αλλά κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης ενός script που απλά άλλαζε το area type σε ένα 'Heavy Traffic Area', το Unity πάγωνε και οι πράκτορες σταματούσαν εντελώς, με αποτέλεσμα τη διακοπή της προσομοίωσης και τον πρόωρο τερματισμό του editor. Μετά από πολλές δοκιμές και πειραματισμούς, κατέληξα στη λύση όπου χρησιμοποιώ προκαθορισμένους δρόμους, που συνήθως αντιμετωπίζουν συμφόρηση, και έχουν μια ξεχωριστή περιοχή τύπου "High Congestion" που μπορεί να τροποποιηθεί δυναμικά, χωρίς να προκαλέσει η διακοπή της προσομοίωσης αλλάζοντας απλά το κόστος αυτής μόνο της περιοχής(area cost) και χωρίς να προκαλεί πρόβλημα αλλαγής του NavMesh κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Κάθε δρόμος έχει ένα NavMesh Modifier Component που ορίζει την περιοχή της σε "High Congestion 1" ή "High Congestion 2", και ούτω καθεξής καθώς κάθε δρόμος θα έχει μια τέτοια ξεχωριστή περιοχή (area type), και μέσω ενός script όταν ανιχνεύσω συμφόρηση, μπορώ να τροποποιώ το κόστος της περιοχής αυτής σε μεγαλύτερη τιμή χωρίς να προκαλείται κορεσμός στο σύστημα.

3.1.2.5.2 Ανίχνευση Συμφόρησης και Δυναμική Αλλαγή Κόστους

Η συμφόρηση ανιχνεύεται μέσω ενός Cube GameObject που έχει τοποθετηθεί πάνω σε κάθε οδό, και καλύπτει ολόκληρο τον δρόμο. Κάθε Cube είναι ένα trigger που ανιχνεύει τα αυτοκίνητα που εισέρχονται και εξέρχονται από την οδό. Μέσω αυτής της διαδικασίας, το script που είναι τοποθετημένο σε κάθε Cube υπολογίζει τον αριθμό των οχημάτων πάνω στον δρόμο και συγκρίνει αυτόν τον αριθμό με ένα καθορισμένο όριο συμφόρησης (Congestion threshold) που είναι διαφορετικό και ανάλογο με το μέγεθος του δρόμου. Όταν ο αριθμός των οχημάτων ξεπεράσει το όριο αυτό, το κόστος της περιοχής του δρόμου αυξάνεται (area cost), επισημαίνοντάς την ως "υψηλής συμφόρησης"(congested).

3.1.2.5.3 Υπολογισμός Δυναμικής Διαδρομής/Νέου Προορισμού

Μια από τις προκλήσεις ήταν η ανάγκη να υποχρεώσω τους πράκτορες να υπολογίσουν ξανά το μονοπάτι τους, λόγω της αλλαγής του κόστους των δρόμων σε πραγματικό χρόνο. Το πρόβλημα ήταν ότι οι πράκτορες δεν υπολογίζουν εκ νέου το μονοπάτι τους όταν το κόστος ενός NavMesh Area αλλάζει, οπότε έπρεπε να αναγκάσω την επανυπολογισμό της διαδρομής όταν το κόστος αυξάνεται λόγω συμφόρησης.

Αρχικά, προσπάθησα να υποχρεώσω όλους τους πράκτορες να υπολογίσουν εκ νέου το μονοπάτι τους όταν εντοπίζω συμφόρηση. Ωστόσο, αυτό είχε το αποτέλεσμα να σταματούν

όλοι οι πράκτορες και να επανυπολογίζουν τις διαδρομές τους ταυτόχρονα, γεγονός που προκαλούσε καθυστερήσεις, "πάγωμα" της προσομοίωσης για αρκετά δευτερόλεπτα και τους agents να ξεκινούν χωρίς κάποιο συγχρονισμό σιγά σιγά. Η λύση που βρήκα ήταν μια νέα μέθοδος που υπολογίζει δυναμικά τα κόστη για όλες τις νέες διαδρομές που έχουν προκύψει και αναθέτει νέους προορισμούς και μονοπάτια στους πράκτορες, λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές στο κόστος των δρόμων και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που βασίζεται σε Manhattan distance πολύ παρόμοια με αυτή που αναπτύχθηκε στο script του Agent Spawner. Έχω περιορίσει τη διαδικασία επανυπολογισμού μονοπατιών σε μόνο το 25% των πρακτόρων, ώστε να μειώσω την επίπτωση στην απόδοση αλλά και σημαντικότερα για να είναι πιο ρεαλιστική η προσομοίωση, καθώς δεν γνωρίζουν όλοι οι οδηγοί κάποια άλλη διαδρομή που ίσως αποφεύγει την κίνηση, οπότεν ένα μέρος από αυτούς θα επανυπολογιστεί το καλύτερο μονοπάτι προς την έξοδο.

Επιπλέον, για να αποφύγω τη συνεχιζόμενη ανακατεύθυνση των πρακτόρων σε κυκλικές πορείες λόγω των συχνών αλλαγών της συμφόρησης στον ίδιο δρόμο, καθώς εισέρχονται και εξέρχονται συνέχεια αυτοκίνητα στον δρόμο, εισήγαγα μια λίστα που κράτα ποιοι agents έχουν αλλάξει πρόσφατα μονοπάτι η οποία χρησιμοποιείται για να αποφεύγονται στις τυχόν επόμενες αλλαγές του κόστους.

3.1.2.5.4 Συμπεράσματα και Βελτιώσεις στην Απόδοση

Η λύση που ανέπτυξα με τη χρήση των NavMesh Modifiers, την ανίχνευση συμφόρησης μέσω triggers και την δυναμική αλλαγή του κόστους των περιοχών, προσφέρει μια ρεαλιστική προσομοίωση κυκλοφορίας όπου τα αυτοκίνητα αλλάζουν διαδρομές για να αποφύγουν τη συμφόρηση. Οι προσαρμογές στην ανακατεύθυνση των πρακτόρων και ο περιορισμένος επανυπολογισμός των μονοπατιών προσφέρουν βελτιωμένη απόδοση και μειωμένο σταμάτημα της προσομοίωσης, διατηρώντας την κινητικότητα των πρακτόρων χωρίς να θυσιάζεται η ρεαλιστικότητα του συστήματος.

3.1.2.6 Metrics Manager

Η συλλογή και ανάλυση των μετρικών αποτελεί έναν κρίσιμο πυλώνα για την αξιολόγηση και τη βελτίωση του οδικού δικτύου, ιδίως σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης στην παλιά πόλη της Λευκωσίας. Το script του MetricsManager έχει σχεδιαστεί για να συλλέγει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των πρακτόρων καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για την ανάλυση και την πρόταση βελτιώσεων.

3.1.2.6.1 Αναγκαιότητα και Σημασία των Μετρικών

Η καταγραφή των μετρικών είναι απαραίτητη για αρκετούς λόγους:

- **Αξιολόγηση Απόδοσης:** Μετρώντας τον χρόνο που χρειάζεται κάθε πράκτορας για να φτάσει σε μια από τις διαθέσιμες εξόδους, μπορούμε να εντοπίσουμε τυχόν αδυναμίες στο δίκτυο και να προτείνουμε αλλαγές που θα βελτιώσουν την εκκένωση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.
- **Καταγραφή Συμπεριφορών:** Η παρακολούθηση των προορισμών που επιλέγονται, οι αλλαγές που γίνονται στη διαδρομή και οι χρόνοι που απαιτούνται για την επίτευξη των στόχων επιτρέπουν την ανάλυση της συμπεριφοράς των πρακτόρων και των οδηγιών τους.

3.1.2.6.2 Λειτουργίες και Δεδομένα που Καταγράφονται

Το MetricsManager script συλλέγει και εμφανίζει διάφορες σημαντικές πληροφορίες, οι οποίες είναι κρίσιμες για τη μελέτη και την πρόταση βελτιώσεων:

- **Αριθμός Πρακτόρων:** Καταγράφει τον συνολικό αριθμό των πρακτόρων που συμμετέχουν στην προσομοίωση, καθώς και πόσοι από αυτούς έφτασαν επιτυχώς σε έναν από τους προορισμούς.
- **Χρόνοι Εκκένωσης:** Για κάθε πράκτορα, καταγράφεται ο χρόνος που απαιτήθηκε για να φτάσει σε μια έξοδο, παρέχοντας έτσι δεδομένα για τον συνολικό χρόνο εκκένωσης και την απόδοση κάθε διαδρομής.
- **Συγκεκριμένες Έξοδοι:** Το script αναφέρει ποιες εξοδοι ήταν ενεργές (ανοιχτές) ή ανενεργές (κλειστές) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, βοηθώντας στην αξιολόγηση της κατανομής της κυκλοφορίας.
- **Καταγραφή Αρχικών και Τελικών Θέσεων:** Καταγράφει την αρχική θέση του κάθε πράκτορα, και τις αλλαγές στα σημεία προορισμού που του ανατέθηκαν, προσφέροντας μια εικόνα της διαδρομής του κάθε οχήματος.
- **Καταγραφή Διαδρομής ανά 5 δευτερόλεπτα:** Καταγράφει κάθε 5 δευτερόλεπτα την τοποθεσία του αυτοκινήτου σε x και z άξονες, έτσι ώστε να αναλυθεί το μονοπάτι και η κίνηση κατά την προσομοίωση.
- **Αυτόματη Διακοπή Προσομοίωσης:** Σε περίπτωση που κάποιοι πράκτορες κολλήσουν ή δεν καταφέρουν να φτάσουν στον προορισμό τους εντός ενός

καθορισμένου χρονικού ορίου (15 λεπτών), η προσομοίωση τερματίζεται αυτόματα για να μην επηρεάσει τα συνολικά αποτελέσματα.

3.1.2.6.3 Συνολική Συνεισφορά στις Βελτιστοποιήσεις

Με τη λεπτομερή καταγραφή των παραπάνω δεδομένων, το σύστημα επιτρέπει:

- **Ανάλυση Στατιστικών:** Τα δεδομένα παρέχουν τη δυνατότητα να εντοπιστούν προβλήματα στο δίκτυο (π.χ., οδοί με υπερβολική συμφόρηση ή αδυναμία εκκένωσης) και να προταθούν συγκεκριμένες λύσεις για την βελτίωση του οδικού συστήματος σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.
- **Προτάσεις για Βελτιώσεις:** Η ακριβής παρακολούθηση των χρόνων, των διαδρομών και της συμπεριφοράς των πρακτόρων δίνει τη δυνατότητα να γίνουν συγκεκριμένες προτάσεις για αλλαγές στο οδικό δίκτυο και στη γενική διαχείριση της κυκλοφορίας όπως για παράδειγμα η αλλαγή ή κατάργηση της μίας κατεύθυνσης σε συγκεκριμένη οδό.
- **Ενσωμάτωση με τον Agent Spawner:** Η στενή σύνδεση του MetricsManager με το Agent Spawner εξασφαλίζει ότι οι πληροφορίες, όπως η αρχική θέση και ο χρόνος εκκίνησης κάθε πράκτορα, καταγράφονται από την αρχή της προσομοίωσης, παρέχοντας ένα πλήρες ιστορικό για κάθε συμμετέχοντα και διευκολύνοντας την ανάλυση και τη σύγκριση διαφορετικών εκτελέσεων.

Η υλοποίηση αυτών των μετρικών αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την κατανόηση της συμπεριφοράς του οδικού δικτύου σε περιπτώσεις εκκένωσης, και παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα για την προτεινόμενη βελτιστοποίηση, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη πιο ασφαλών και αποτελεσματικών σχεδίων διαχείρισης κρίσεων στην παλιά πόλη της Λευκωσίας.

3.1.2.7 Camera, UI Settings και Set-Up Scene

Η δημιουργία ενός ξεχωριστού set-up scene ήταν απαραίτητη για την εύκολη ρύθμιση παραμέτρων πριν από την έναρξη της προσομοίωσης. Σε αυτό το σκηνικό, οι χρήστες μπορούν να ορίσουν τον αριθμό των πρακτόρων (οχημάτων) που θα δημιουργηθούν, να επιλέξουν ποιοι έξοδοι θα είναι ανοιχτοί ή κλειστοί, καθώς και να καθορίσουν έναν χρονικό όριο για την προσομοίωση. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει μια πιο ευέλικτη και οργανωμένη μέθοδο διαχείρισης των βασικών παραμέτρων σε σχέση με την απευθείας ρύθμιση μέσω

του inspector, εξασφαλίζοντας ότι όλες οι απαραίτητες τιμές μεταφέρονται σωστά στα αντίστοιχα scripts που διαχειρίζονται την προσομοίωση.

3.1.2.7.1 Οργάνωση Παραμέτρων μέσω του Set-Up Scene

Το set-up scene επιτρέπει στους χρήστες να εισάγουν αριθμητικές τιμές όπως τον αριθμό των οχημάτων και το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης καθώς και να επιλέγουν μέσω toggle επιλογών για το ποιες εξόδους θα είναι διαθέσιμες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του script SetUpSceneUI, το οποίο:

- Διαβάζει τις τιμές από τα input fields και τα toggles
- Αποθηκεύει αυτές τις τιμές στο singleton GameManager
- Μεταφέρει τις ρυθμίσεις στο κύριο simulation scene όταν ξεκινά η προσομοίωση.

Η χρήση του set-up scene προσφέρει επίσης την ευκολία να τροποποιούνται οι παράμετροι χωρίς να απαιτείται η μεταβολή κώδικα ή χειροκίνητη επεξεργασία στο inspector κάθε φορά που πραγματοποιείται μια νέα προσομοίωση.

3.1.2.7.2 Μεταφορά Παραμέτρων στο Κύριο Simulation Scene

Τα scripts SetUpSceneUI και GameManager συνεργάζονται για να διασφαλίσουν ότι όλες οι καθορισμένες ρυθμίσεις μεταφέρονται σωστά στο κύριο simulation scene. Ο GameManager αποθηκεύει τις παραμέτρους που ορίστηκαν (όπως ο αριθμός των οχημάτων, ο χρόνος προσομοίωσης και η κατάσταση των εξόδων) και τις διατηρεί διαθέσιμες για τα υπόλοιπα scripts που τις χρειάζονται για να διαμορφώσουν και να ελέγξουν τη συμπεριφορά της προσομοίωσης. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο βελτιώνει τη διαχειρισσιμότητα των παραμέτρων αλλά επίσης εξασφαλίζει τη συνέπεια των δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

3.1.2.7.3 Διαχείριση Καμερών και Εμφάνιση UI

Στο κύριο simulation scene, οι κάμερες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην παρακολούθηση και την ανάλυση της κυκλοφορίας:

- **Σταθερές Κάμερες:** Πέντε σταθερές κάμερες τοποθετημένες σε προκαθορισμένα σημεία του αστικού περιβάλλοντος παρέχουν μια σταθερή επισκόπηση της κυκλοφορίας και των κρίσιμων σημείων της πόλης.
- **Κινητή Κάμερα:** Μια δυναμική κάμερα η οποία διαθέτει script που της επιτρέπει να κινείται ελεύθερα, να εισέρχεται σε στενούς χώρους και να προσφέρει πιο

λεπτομερείς εικόνες της κυκλοφορίας, επιτρέποντας έτσι την παρακολούθηση συγκεκριμένων περιοχών ή οδών.

- **UI Οθόνης:** Μικρό UI στο simulation scene παρέχει οδηγίες για τη χρήση της κάμερας και πληροφορίες για το ποια κάμερα είναι ενεργή, βοηθώντας τους χειριστές να μεταβαίνουν εύκολα μεταξύ διαφορετικών προβολών και να επιλέγουν την καταλληλότερη οπτική γωνία για την ανάλυση της κυκλοφορίας.

3.1.2.7.4 Βελτιωμένη Απόδοση σε Built Έκδοση

Η προσομοίωση σε ένα built version της εφαρμογής προσφέρει καλύτερη απόδοση και πιο ακριβή αποτελέσματα, καθώς εξαλείφονται πιθανές καθυστερήσεις ή προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν στο Unity editor. Αυτό είναι κρίσιμο σε μια προσομοίωση που στοχεύει στην αξιολόγηση της κυκλοφορίας και την εκκένωση της παλιάς πόλης, καθώς οι ακριβείς χρόνοι και οι στατιστικές είναι απαραίτητες για την ανάλυση και την πρόταση βελτιώσεων.

3.2 Συγκέντρωση Δεδομένων

3.2.1 Χαρακτηριστικά Υπολογιστή

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υπολογιστή στον οποίο θα εκτελεστούν οι προσομοιώσεις και θα συλλεχθούν τα μετρικά αποτελέσματα. Η επιλογή ενός υψηλών προδιαγραφών συστήματος είναι καθοριστική για την εξασφάλιση σταθερής απόδοσης και την αξιόπιστη καταγραφή των δεδομένων.

Προδιαγραφές Υπολογιστή:

- **Λειτουργικό Σύστημα:** Windows 10 Pro (Build 19045)
- **Επεξεργαστής (CPU):** 11th Gen Intel® Core™ i9-11900K @ 3.50 GHz (8 πυρήνες / 16 νήματα)
- **Μητρική Πλακέτα:** ASUS ROG Maximus XIII Extreme
- **Κύρια Μνήμη (RAM):** 64 GB
- **Κάρτα Γραφικών (GPU):** NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti

Με τον παραπάνω συνδυασμό υλικού, η προσομοίωση μπορεί να εκτελεστεί με υψηλή σταθερότητα, προσφέροντας ακριβή αποτελέσματα και μειώνοντας τον κίνδυνο καθυστερήσεων ή σφαλμάτων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα των μετρικών.

3.2.2 Δομή αποτελεσμάτων

Το Metrics Manager Script συλλέγει δεδομένα καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το script καταγράφει διάφορες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των πρακτόρων, τα εξόδους και άλλα βασικά στοιχεία της προσομοίωσης. Στο τέλος, το σενάριο δημιουργεί το παρακάτω αρχείο σε μορφή CSV, το οποίο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ανάλυση και αναφορά.

Το αρχείο CSV περιλαμβάνει διάφορες κατηγορίες δεδομένων, όπως τα ακόλουθα:

3.2.2.1 Simulation Metrics

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει συνοπτικά στατιστικά στοιχεία για την προσομοίωση στο σύνολό της, όπως:

- **Time Elapsed:** Ο χρόνος που έχει περάσει από την έναρξη της προσομοίωσης (σε δευτερόλεπτα).
- **Total Agents:** Ο συνολικός αριθμός των πρακτόρων που συμμετείχαν στην προσομοίωση.
- **Reached Destination:** Ο αριθμός των πρακτόρων που έφτασαν στον προορισμό τους.
- **Still Active:** Ο αριθμός των πρακτόρων που παραμένουν ενεργοί και δεν έχουν ολοκληρώσει την πορεία τους.
- **Destroyed/Inact. & Did Not Reach:** Ο αριθμός των πρακτόρων που καταστράφηκαν ή δεν ολοκλήρωσαν την πορεία τους.

3.2.2.2 Exits

Εδώ καταγράφονται τα σημεία εξόδου που ήταν ανοιχτά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για κάθε έξοδο, αναφέρεται η κατάστασή της (π.χ. "Ανοιχτή" ή "Κλειστή").

3.2.2.3 Agent Details

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει λεπτομέρειες για κάθε πράκτορα, όπως:

- **AgentName:** Το όνομα του πράκτορα καθώς και το είδος του.
- **SpawnPosX, SpawnPosY, SpawnPosZ:** Οι συντεταγμένες που δημιουργήθηκε ο πράκτορας στον χώρο.
- **TravelDist:** Η απόσταση που διανύθηκε από τον πράκτορα
- **Destinations:** Ο κατάλογος των προορισμών που ο πράκτορας προσπάθησε να φτάσει.
- **Reached:** Αν ο πράκτορας έφτασε ή όχι στον προορισμό του (True ή False).

- SpawnTime: Ο χρόνος που ο πράκτορας δημιουργήθηκε.
- EndTime: Ο χρόνος που ο πράκτορας ολοκλήρωσε την πορεία του ή καταστράφηκε.
- ActiveDuration: Η διάρκεια της ενεργής πορείας του πράκτορα.
- Status: Η τρέχουσα κατάσταση του πράκτορα (π.χ. "Despawned").
- Pulses: Μια λίστα με τα σημεία του χώρου που πέρασε ο πράκτορας κατά τη διάρκεια της πορείας του (με τις χρονικές στιγμές και τις συντεταγμένες τους).

3.2.3 Ανάλυση

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων από τα αρχεία CSV, θα χρησιμοποιήσω την Python v1.13 για να διαβάσω και να επεξεργαστώ τα δεδομένα, με σκοπό να εξάγω μέσους όρους και άλλες στατιστικές τιμές [\[15\]](#). Δεδομένου ότι η προσομοίωση θα εκτελείται πολλές φορές για κάθε σενάριο, η ανάγκη για συγκέντρωση και επεξεργασία των δεδομένων από πολλές εκτελέσεις είναι επιτακτική. Επίσης, το script θα δημιουργεί γραφήματα που θα απεικονίζουν τα αποτελέσματα [\[16\]](#), [\[17\]](#), [\[18\]](#).

Κεφάλαιο 4

Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κύριες υποθέσεις που θέσαμε για την προσομοίωση της εκκένωσης της παλιάς πόλης της Λευκωσίας και τα σενάρια που υλοποιήθηκαν για την αξιολόγηση τους. Στόχος είναι να αναλυθούν οι επιπτώσεις των διαφόρων παραμέτρων, όπως ο αριθμός και η τοποθεσία των εξόδων, καθώς και η ύπαρξη εναλλακτικών διαδρομών, χωρίς όμως να παρουσιαστούν αναλυτικά τα δεδομένα των αποτελεσμάτων, αλλά να συζητηθούν οι γενικές τάσεις και οι συνέπειες που προκύπτουν από τα σενάρια.

4.1 Περιγραφή Υποθέσεων και Σεναρίων Προσομοίωσης

Στην προσομοίωση, έχουν οριστεί βασικές παράμετροι που αντανakλούν τις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας στην παλιά πόλη της Λευκωσίας. Τα οχήματα διακινούνται με βασική ταχύτητα περίπου 30 km/h, που αντιστοιχεί στο νόμιμο όριο για τους δρόμους αυτούς, ενώ μόνο ορισμένες διαδρομές επιτρέπουν ταχύτερη κίνηση έως 50 km/h, όπου τα οχήματα επιταχύνουν εάν δεν εντοπίζονται επερχόμενες στροφές. Η ταχύτητα αυτή μετρήθηκε επανειλημμένα κατά τη διάρκεια δοκιμών σε διάφορες διαδρομές, χρησιμοποιώντας χρονικές μετρήσεις και αναφορές από το Google Maps, προκειμένου να επιτευχθεί μια μέση τιμή κοντά στα 30 km/h.

Επιπλέον, η κατανομή των οδηγών έχει οριστεί ώστε το 80% να συμπεριφέρεται ως "ορθολογικοί"(rational) οδηγοί, ενώ το υπόλοιπο 20% αντιπροσωπεύει τους "εγωιστές"(egoistic) οδηγούς, αντανakλώντας επακριβώς την κατανομή συμπεριφοράς των Κυπρίων οδηγών.

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί πως κατά την διάρκεια της προσομοίωσης εφαρμόζεται μια βασική υπόθεση, το ότι δεν θα εισέρχονται καθόλου αυτοκίνητα εντός των τειχών της παλιάς πόλης της Λευκωσίας, καθώς αυτό θα περιέπλεκε περισσότερο τις μετρήσεις αλλά θα συνέβαλε και σε ανακρίβειες αφού πολύ πιθανόν να δημιουργούταν περισσότερη κίνηση στις εξόδους κάτι που θα επηρέαζε αρνητικά την οδική συμπεριφορά των πρακτόρων. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο όσοι δρόμοι είναι διαθέσιμοι στο fbx μοντέλο του iNicosia Project έχουν ληφθεί υπόψη στην προσομοίωση και δρόμοι που βρίσκονται πιο κοντά στην πράσινη γραμμή πιθανόν να μην υπάρχουν ή και να μην είναι υλοποιημένοι στην προσομοίωση. Επίσης για σκοπούς υλοποίησης στα πρόθυρα της πτυχιακής αυτής εργασίας, κάνουμε την

παραδοχή πως οι οδηγοί βρίσκονται ήδη στα αυτοκίνητά τους και είναι έτοιμοι να ξεκινήσουν την εκκένωση και να κατευθυνθούν προς την κοντινότερη τους έξοδο. Δεν θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη τυχόν καθυστέρηση στην μετάδοση της εντολής για εκκένωση, τα φώτα τροχαίας που μπορεί να υπάρχουν εντός των τειχών και οποιαδήποτε μικροατυχήματα - αγγίγματα μεταξύ των αυτοκινήτων που μπορεί να τύχουν κατά την προσομοίωση. Αυτό προκύπτει γιατί υπάρχουν λιγοστά πράγματα που μπορούμε να κάνουμε χρησιμοποιώντας τα πακέτα(assets) που έχουμε βρει αλλά και περιορισμένου χρόνου διεκπεραίωσης της εργασίας, καθώς πολύ μεγάλο ποσοστό από αυτά θα έπρεπε να υλοποιηθεί από το μηδέν.

4.1.1 Υπόθεση

Το οδικό δίκτυο στην παλιά πόλη της Λευκωσίας συνιστά ένα κρίσιμο σημείο συμφόρησης (bottleneck) στη διαδικασία εκκένωσης των οχημάτων σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, γεγονός που αναδεικνύει την επιτακτική ανάγκη για ουσιαστικές αλλαγές.

4.1.1.1 Πιλοτική Δοκιμή (Baseline)

Σε αυτό το σενάριο, όλες οι εξοδοι και οι οδικές διαδρομές είναι διαθέσιμες χωρίς εξωτερικές παρεμβάσεις.

Στόχος: Η καθιέρωση ενός σημείου αναφοράς (baseline) για τον μέσο χρόνο εκκένωσης και το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης. Επιπλέον, μέσω αυτής της δοκιμής εντοπίζονται οι οδικές περιοχές με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, παρέχοντας τα δεδομένα που απαιτούνται για την περαιτέρω ανάλυση.

4.1.1.2 Σενάριο Σεισμού

Σε αυτό το σενάριο, ένας σεισμός προκαλεί καθίζηση δρόμων ή κατάρρευση μίας εξόδου ή πτώση κτιρίων σε κύριες αρτηρίες της πόλης καθιστώντας τις ως μη-προσπελάσιμες.

Στόχος: Ο προσδιορισμός του βαθμού συμφόρησης όταν μια ήδη περιορισμένη έξοδος καθίσταται μη προσβάσιμη, και η εκτίμηση του πώς επηρεάζει την ομαλή εκκένωση των οχημάτων. Παράλληλα, εξετάζεται η επίδραση του κλεισίματος κρίσιμων δρόμων με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο.

4.1.1.2.1 Κλείσιμο Εξόδων

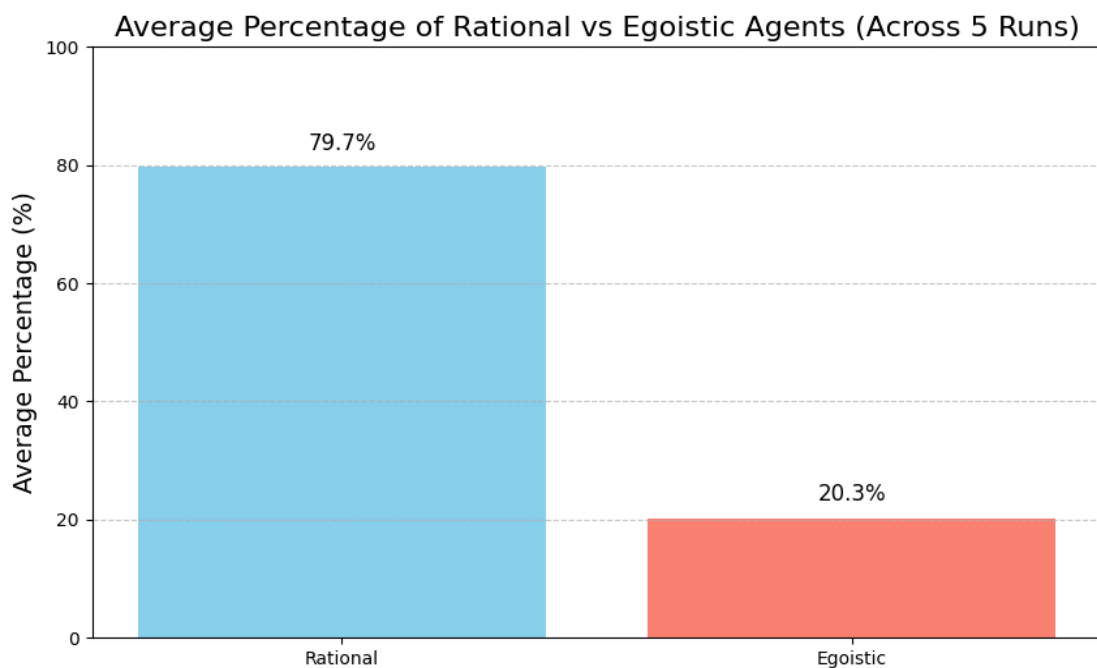
Το πρώτο υπό-σενάριο εξετάζει το εύρος της διαταραχής που μπορεί να προκληθεί από τον σεισμό, έτσι επιλέχθηκαν διαδοχικά προς προσωρινό αποκλεισμό όλες οι εξοδοι.

4.1.1.2.2 Κλείσιμο Οδών με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

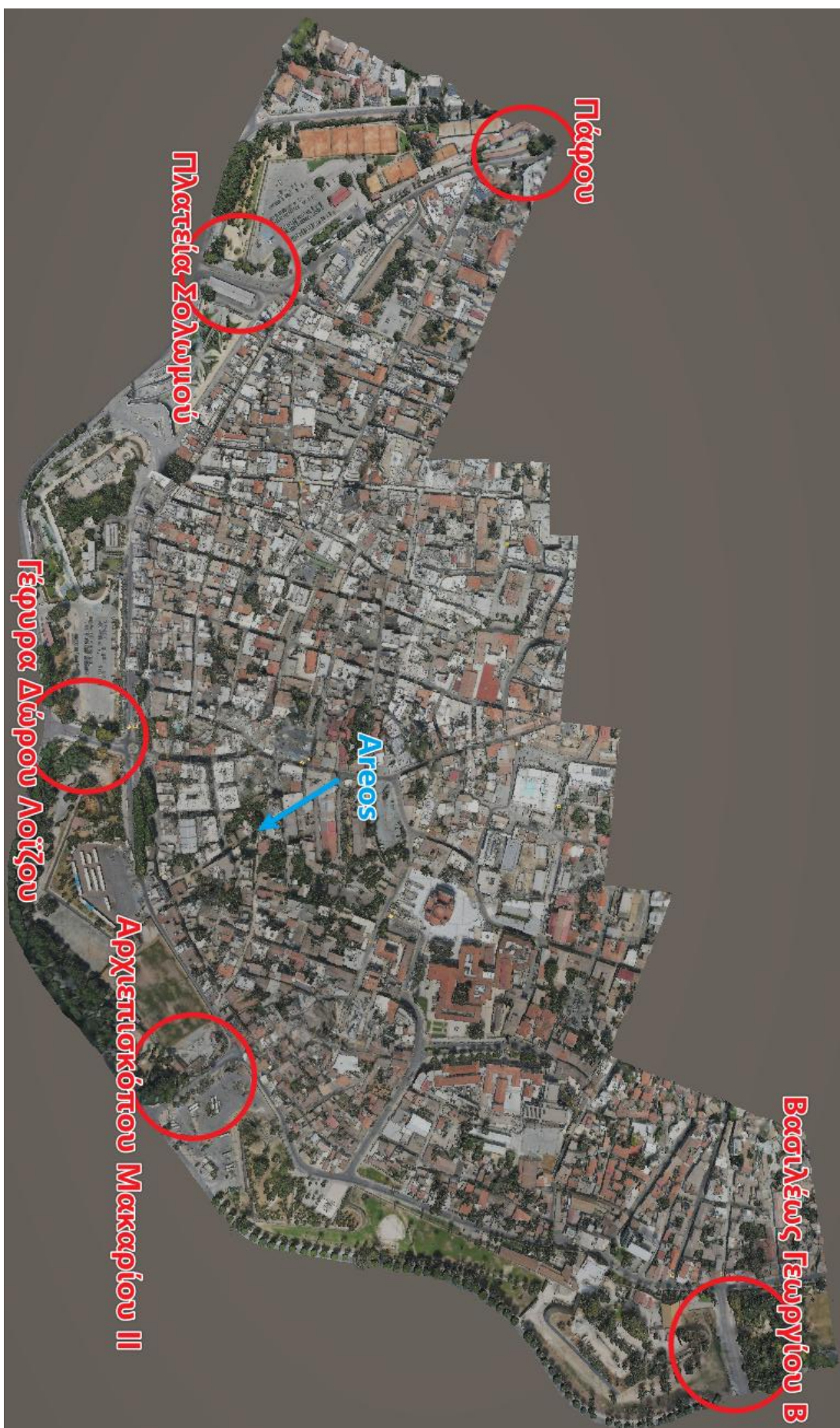
Το δεύτερο υπό-σενάριο εξετάζει την επίπτωση από αποσπασματικές κατολισθήσεις κτιρίων πάνω σε κύριες εσωτερικές αρτηρίες. Ως κρίσιμα τμήματα επιλέχθηκαν οι οδοί Άρεως, Αχιλλέως, Ονήσιλου, Αθηνών, Χατζηγεωργάκη Κορνέσιου και Πατριάρχου Γρηγορίου, οι οποίες είχαν αναδειχθεί ως σταθερά bottlenecks στην πιλοτική δοκιμή. Σημειώνοντας πως μόνο η οδός Άρεως έχει κλίσει στα πλαίσια της έρευνας.

4.2 Περιγραφή Δεδομένων

Για κάθε προσομοίωση σεναρίου πραγματοποιήθηκαν 5 εκτελέσεις ώστε να υπολογιστούν οι μέσοι όροι κάθε πιθανής μετρικής που το επιτρέπει. Επιπρόσθετα, οι εκτελέσεις της προσομοίωσης περιορίστηκαν σε 15 λεπτά το πολύ, διότι ο μέσος χρόνος εκκένωσης για 700 οχήματα είναι χαμηλότερος, και κάποιες ατέλειες που μπορεί να προκύψουν κατά την κάθε εκτέλεση ενδέχεται να οδηγήσουν σε ελάχιστους πράκτορες να "κολλήσουν" στο NavMesh, καθιστώντας τους ανίκανους να κινηθούν. Όπως έχει προαναφερθεί, η κατανομή των οδηγών έχει οριστεί ώστε το 80% να συμπεριφέρεται ως "ορθολογικοί" οδηγοί, ενώ το υπόλοιπο 20% αντιπροσωπεύει τους "εγωιστές" οδηγούς, αντανakλώντας την κατανομή συμπεριφοράς των Κυπρίων οδηγών. Το παρακάτω γράφημα, που προέκυψε από τις πέντε εκτελέσεις, παρουσιάζει του ποσοστού που βρέθηκε στις προσομοιώσεις και επιβεβαιώνει τη συγκεκριμένη διαμόρφωση. Επιπρόσθετα ακολουθεί μια κάτοψη του χάρτη που χρησιμοποιείται μαζί με τις εξόδους διαφυγής από την πόλη.



Σχήμα 4.1 Average Percentage of Rational vs Egoistic Agents (Across 5 Runs)



Σχήμα 4.2 Map With Marked Exits (5) and Road 'Areas'

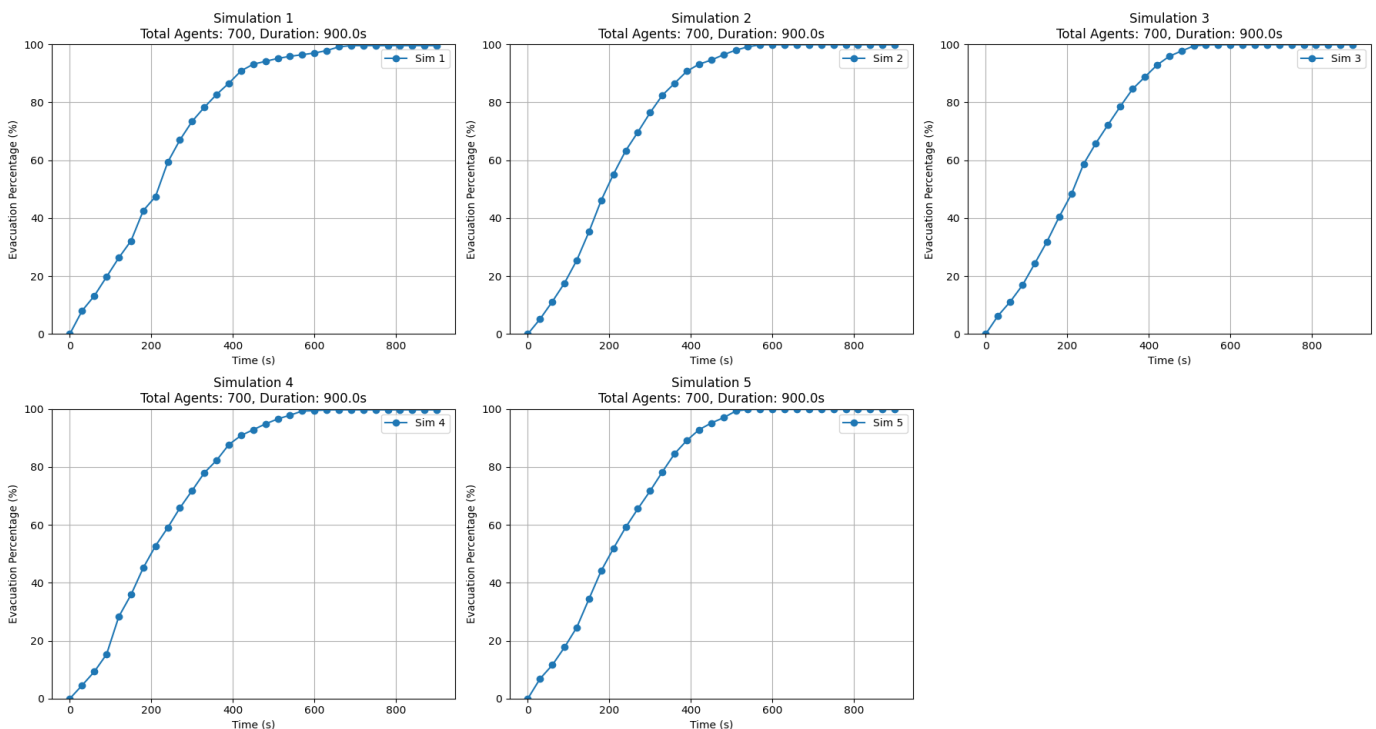
4.2.1 Δεδομένα Για Πιλοτική Δοκιμή (Baseline)

Σε αυτό το σενάριο, όλες οι εξοδοί και οι οδικές διαδρομές είναι διαθέσιμες χωρίς εξωτερικές παρεμβάσεις. Ο κύριος στόχος είναι η καθιέρωση ενός σημείου αναφοράς για τον μέσο χρόνο εκκένωσης και το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης. Επιπλέον, εντοπίζονται οι οδικές περιοχές με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, παρέχοντας τα δεδομένα για περαιτέρω ανάλυση.

Τα παρακάτω γραφήματα, που έχουν παρατεθεί, παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των εκτελέσεων καθώς και τις βασικές επιδόσεις του συστήματος στο συγκεκριμένο σενάριο.

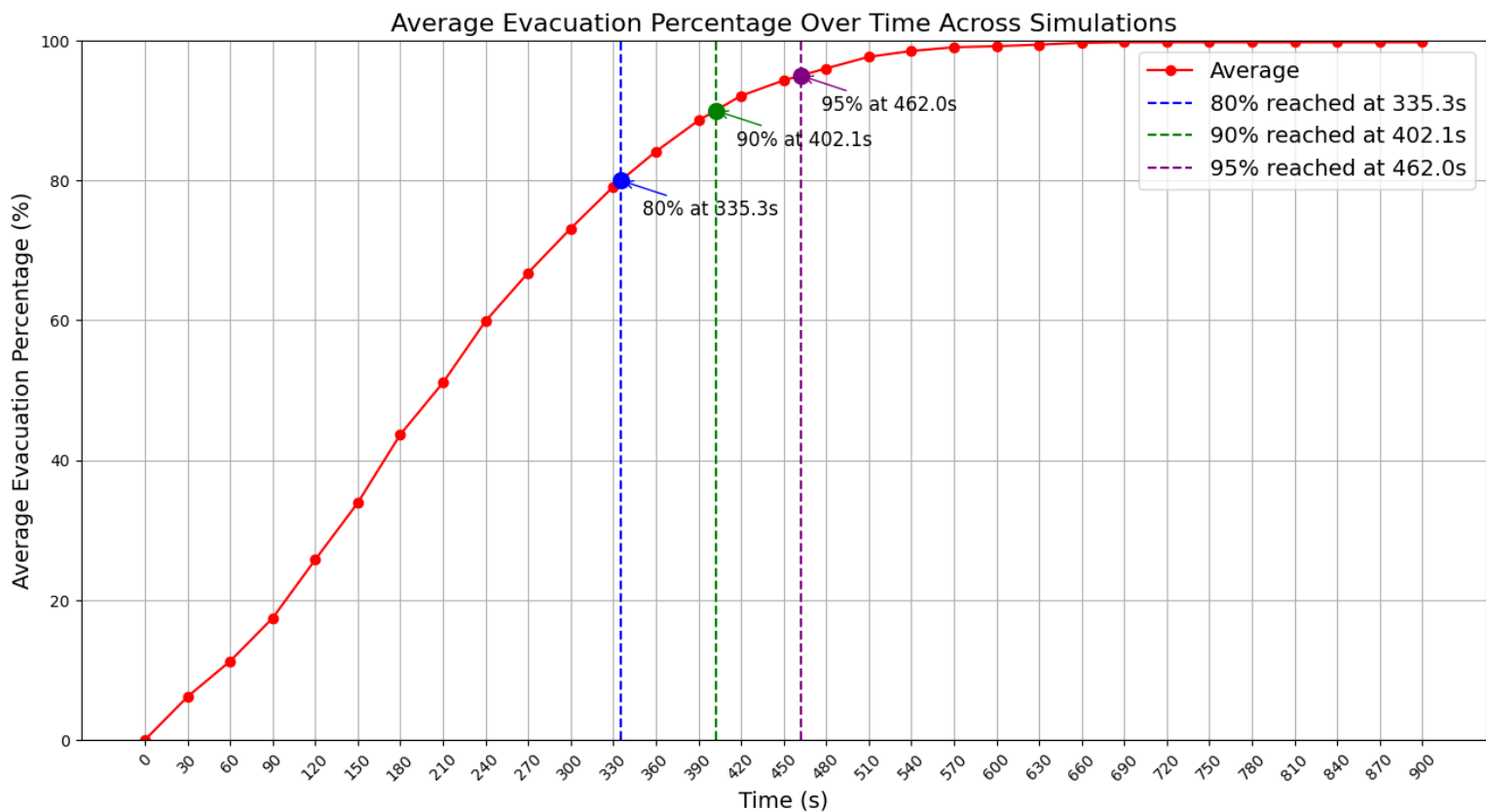
4.2.1.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο

- Στα πέντε επιμέρους γραφήματα (Simulation 1 έως 5) παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού εκκένωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο για κάθε μία από τις πέντε εκτελέσεις. Σε κάθε γράφημα, ο άξονας x αντιστοιχεί στον χρόνο (σε δευτερόλεπτα) και ο άξονας y στο ποσοστό των οχημάτων που έχει ολοκληρώσει την εκκένωση. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις το ποσοστό εκκένωσης αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, φτάνοντας κοντά στο 100% πριν από τη λήξη της προσομοίωσης (στα 15 λεπτά).



Σχήμα 4.3 Graphs for each of 5 Simulation Runs – Evacuation Percentage

- Στο συγκεντρωτικό γράφημα (Average Evacuation Percentage Over Time Across Simulations) παρουσιάζεται ο μέσος όρος του ποσοστού εκκένωσης για τις πέντε εκτελέσεις. Ο χρόνος έχει επιμεριστεί σε διαστήματα των 30 δευτερολέπτων, ώστε η απεικόνιση να είναι πιο ευανάγνωστη. Όπως φαίνεται, ο μέσος όρος ακολουθεί παρόμοια τάση με τις επιμέρους προσομοιώσεις, ξεκινώντας από το 0% και καταλήγοντας σταδιακά κοντά στο 100%, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης.

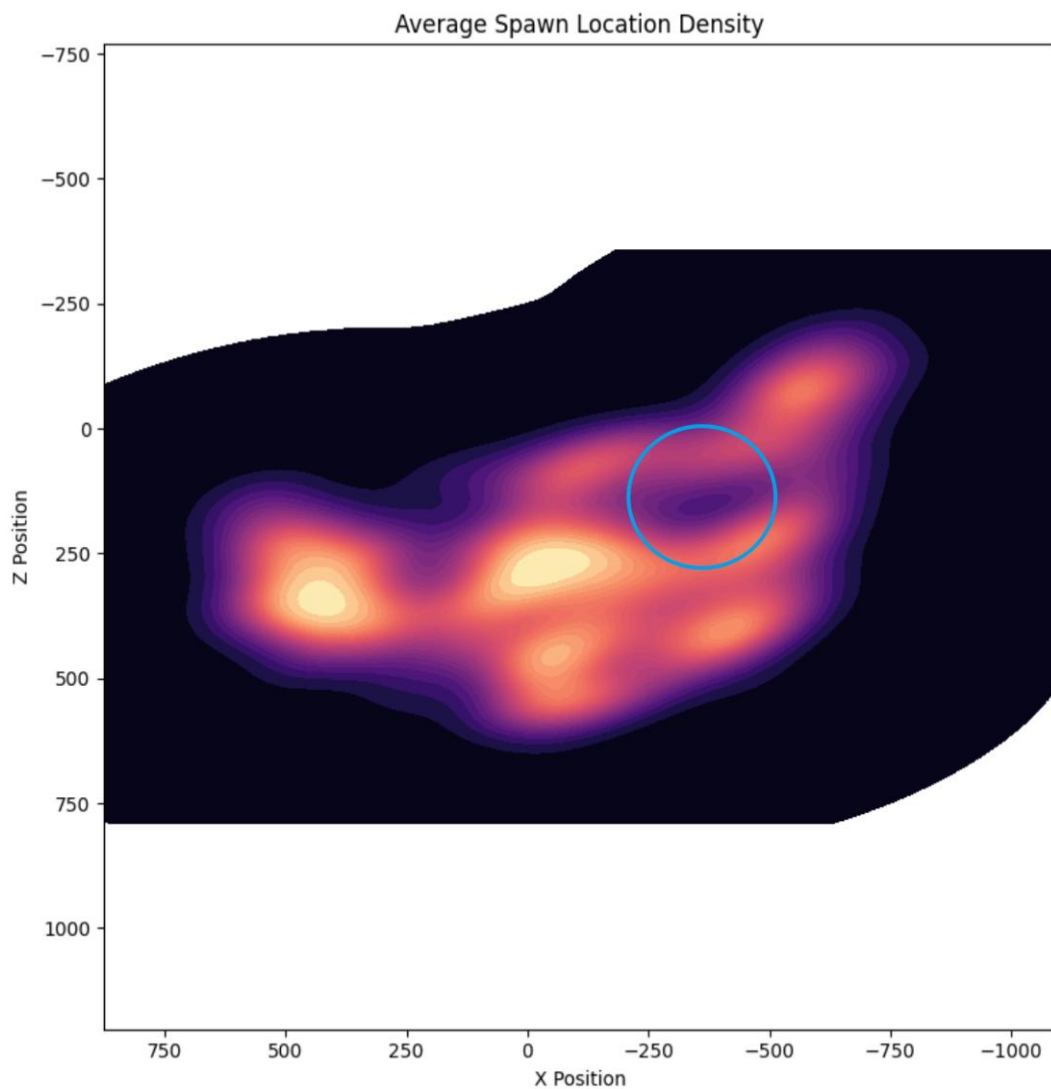


Σχήμα 4.4 Average Evacuation Percentage Over Time Across Simulations Pilot

- Παρατηρείται ότι, το 80% των αυτοκινήτων καταφέρνουν να εκκενώσουν στα 335 δευτερόλεπτα (5.58 λεπτά), το 90% στα 402 δευτερόλεπτα (6.7 λεπτά), το 95% στα 462 δευτερόλεπτα (7,7 λεπτά) κατά μέσο όρο, ενώ το 100% χρειάστηκε 660 δευτερόλεπτα (11 λεπτά).

4.2.1.2 Κατανομή Πυκνότητας Αυτοκινήτων κατά την εκκίνηση της Προσομοίωσης

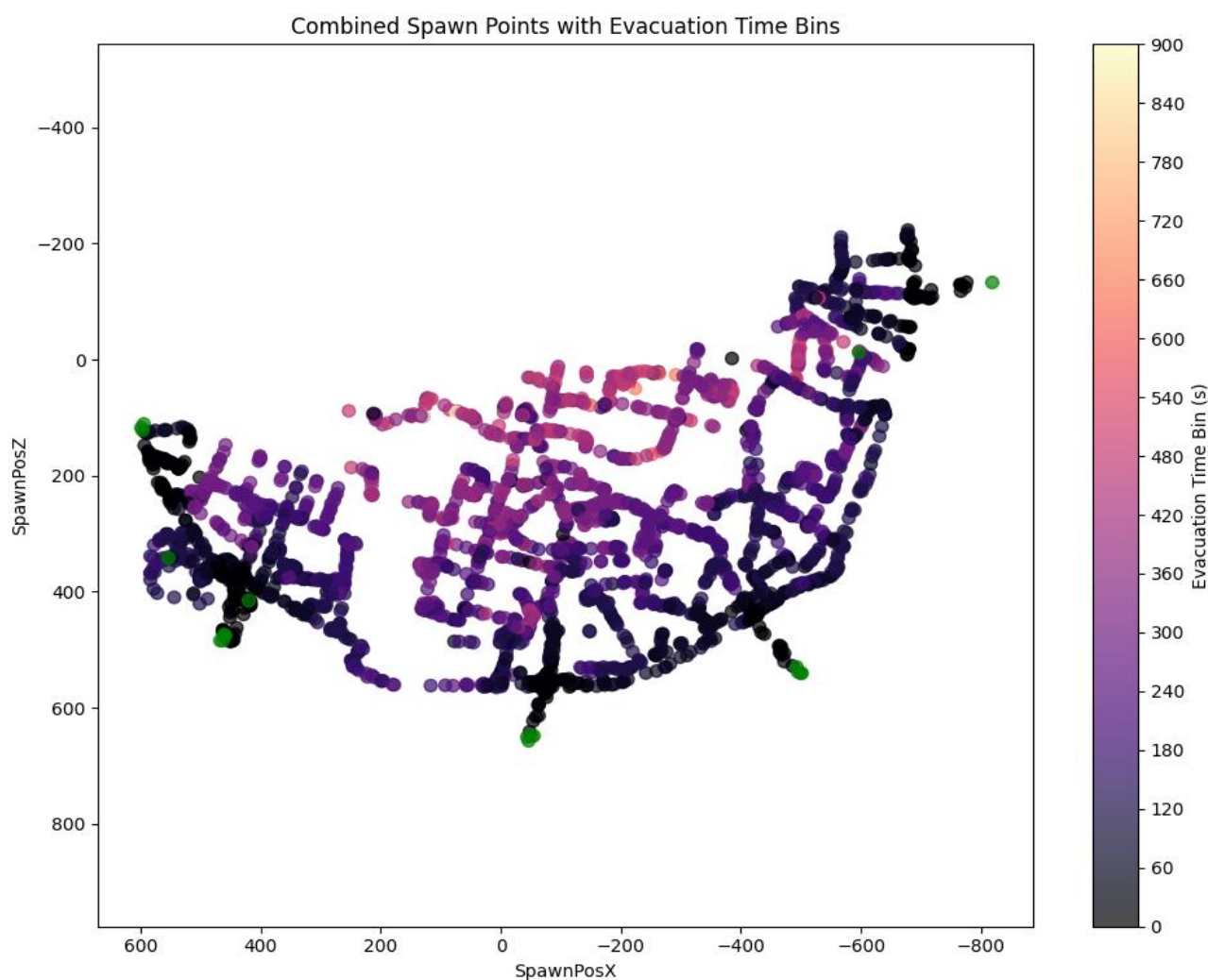
- Στο συγκεντρωτικό γράφημα (Average Spawn Location Density) παρουσιάζεται η μέση πυκνότητα κατανομής των αρχικών θέσεων των οχημάτων σε επίπεδο X-Z για όλες τις προσομοιώσεις μαζί (και τις 5) χρησιμοποιώντας πυρηνική εκτίμηση πυκνότητας (KDE). Αυτό μας επιτρέπει να δούμε με μια ματιά σε ποια σημεία του χώρου εμφανίζεται, κατά μέσο όρο, η μεγαλύτερη πυκνότητα οχημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, αναδεικνύονται οι περιοχές όπου αναμένεται αυξημένος κυκλοφοριακός φόρτος από την αρχή της εκκένωσης, πληροφορία η οποία είναι χρήσιμη για περαιτέρω ανάλυση. Παρατηρείται μια αισθητή απώλεια (μπλε κύκλος) όπου δεν υπάρχουν οχήματα καθώς εκεί βρίσκεται η Αρχιεπισκοπή και ο Καθεδρικός Ναός Αποστόλου Βαρνάβα.



Σχήμα 4.5 Average Spawn Location Density Pilot

4.2.1.3 Σημεία Έναρξης σε σχέση με τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης

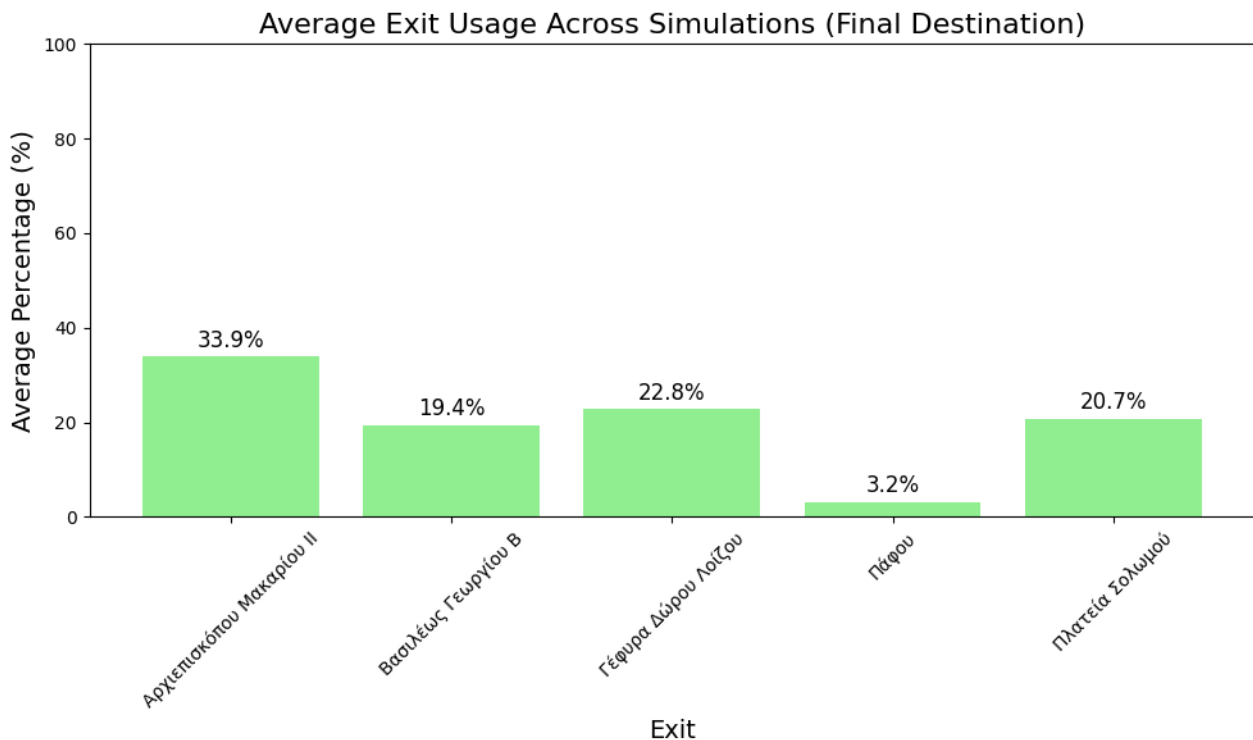
Το συγκεκριμένο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει όλα τα σημεία εκκίνησης (spawn points) των οχημάτων για όλες τις προσομοιώσεις, ενώ το χρώμα κάθε σημείου αντιστοιχεί στον χρόνο που χρειάστηκε ο αντίστοιχος πράκτορας για να εκκενώσει. Ο κατακόρυφος χρωματικός δείκτης (legend) στα δεξιά του γραφήματος δείχνει το εύρος των χρόνων εκκένωσης (σε δευτερόλεπτα). Όσο πιο σκουρόχρωμη είναι η τελεία τόσο πιο γρήγορα έχει εκκένωση ο πράκτορας. Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να διαπιστώσουμε πώς συνδέεται η αρχική θέση ενός οχήματος με τον συνολικό χρόνο που απαιτήθηκε για την εκκένωσή του, προσφέροντας πολύτιμη πληροφορία για την επίδραση της γεωγραφικής θέσης στον χρόνο εκκένωσης. Επιπρόσθετα με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι πράκτορες οι οποίοι είτε ήταν πολύ κοντά σε κάποια έξοδο είτε υπήρξε κάποιο πρόβλημα με τον υπολογισμό μονοπατιού και δεν έχει ληφθεί υπόψη. Όπως παρατηρείται τα αυτοκίνητα όσο πιο μέσα (βαθιά) στην πόλη βρίσκονται τόσο περισσότερο χρόνο χρειάζονται για να εκκενώσουν.



Σχήμα 4.6 Combined Spawn Points with Evacuation Time Bins Pilot

4.2.1.4 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται το ποσοστό των οχημάτων που επέλεξαν κάθε μία από τις τέσσερις διαθέσιμες εξόδους. Οι τέσσερις εξοδοί εμφανίζονται στον οριζόντιο άξονα, ενώ ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει το αντίστοιχο ποσοστό χρήσης. Μέσω αυτής της κατανομής, μπορούμε να διαπιστώσουμε ποιες εξοδοί προτιμήθηκαν περισσότερο και να εντοπίσουμε πιθανά σημεία συμφόρησης ή βελτίωσης για μελλοντικά σενάρια εκκένωσης. Την μεγαλύτερη χρήση έχει η έξοδος στην οδό Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II και ακολουθούν οι υπόλοιπες 3 εξοδοί με μικρή διαφορά στα ποσοστά χρήσης, και τελευταία η έξοδος στην οδό Πάφου καθώς είναι αρκετά απομακρυσμένη και καλύπτεται από την έξοδο στην Πλατεία Σολωμού.

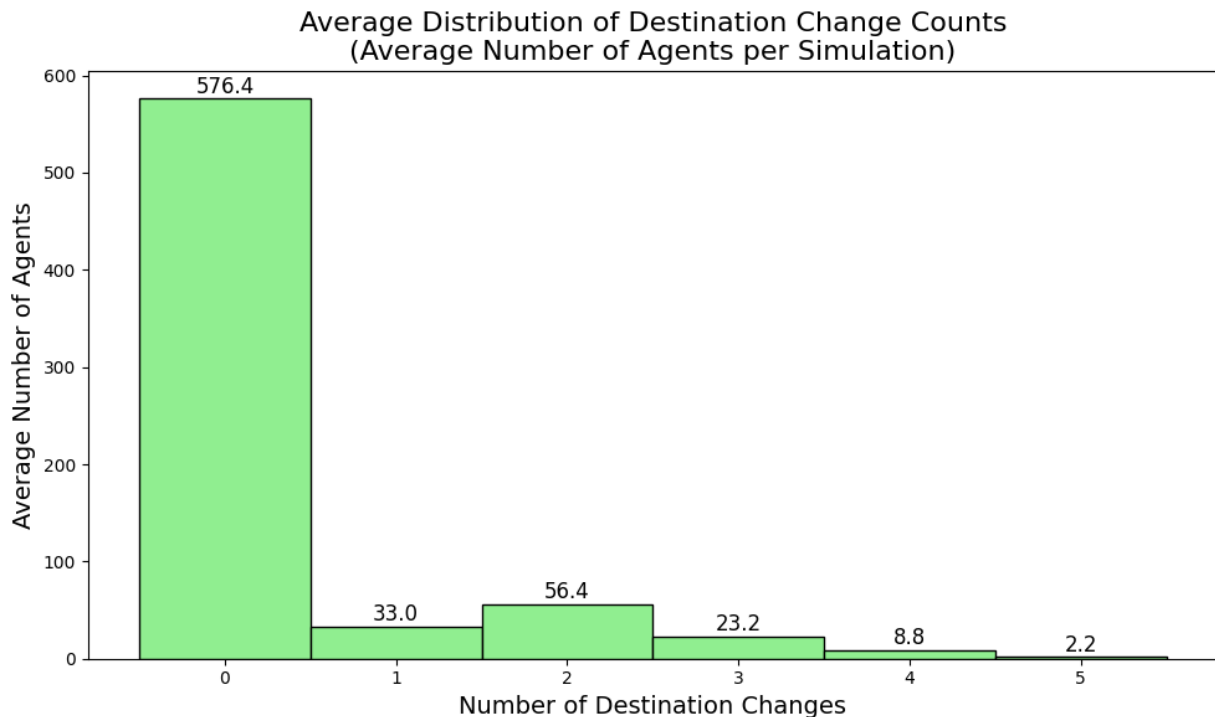


Σχήμα 4.7 Average Exit Usage Across Simulations (Final Destination) Pilot

4.2.1.5 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου

Το παρακάτω γράφημα απεικονίζει τον μέσο αριθμό οχημάτων (κατακόρυφος άξονας) που άλλαξαν προορισμό μία ή περισσότερες φορές (οριζόντιος άξονας). Κάθε αλλαγή προορισμού σχετίζεται με την κατάσταση κυκλοφορίας που συναντούσαν τα οχήματα, η οποία τα ωθούσε να αναζητήσουν μια πλησιέστερη ή πιο προσβάσιμη έξοδο προσπαθώντας να αποφύγουν το κυκλοφοριακό φόρτο. Όπως παρατηρείτε περίπου 580 στα 700 αυτοκίνητα δεν αλλάζουν την διαδρομή τους καθώς όπως αναμένεται ένα πολύ μεγάλο ποσοστό οδηγών

μπορεί να μην γνωρίζει αρκετά καλά το οδικό δίκτυο της πόλης και να επιλέγει να ακολουθεί τους υπόλοιπους που ίσως γνωρίζουν την κοντινότερη διαδρομή προς την έξοδο. Επιπρόσθετα ένα μικρό ποσοστό αλλάζουν την διαδρομή τους προς μια άλλη έξοδο και ίσως μετέπειτα αλλάζουν πάλι γνώμη και πάνε ξανά στην αρχική τους επιλογή κάτι που όπως φαίνεται μπορεί να αλλάξει και άλλες φορές.



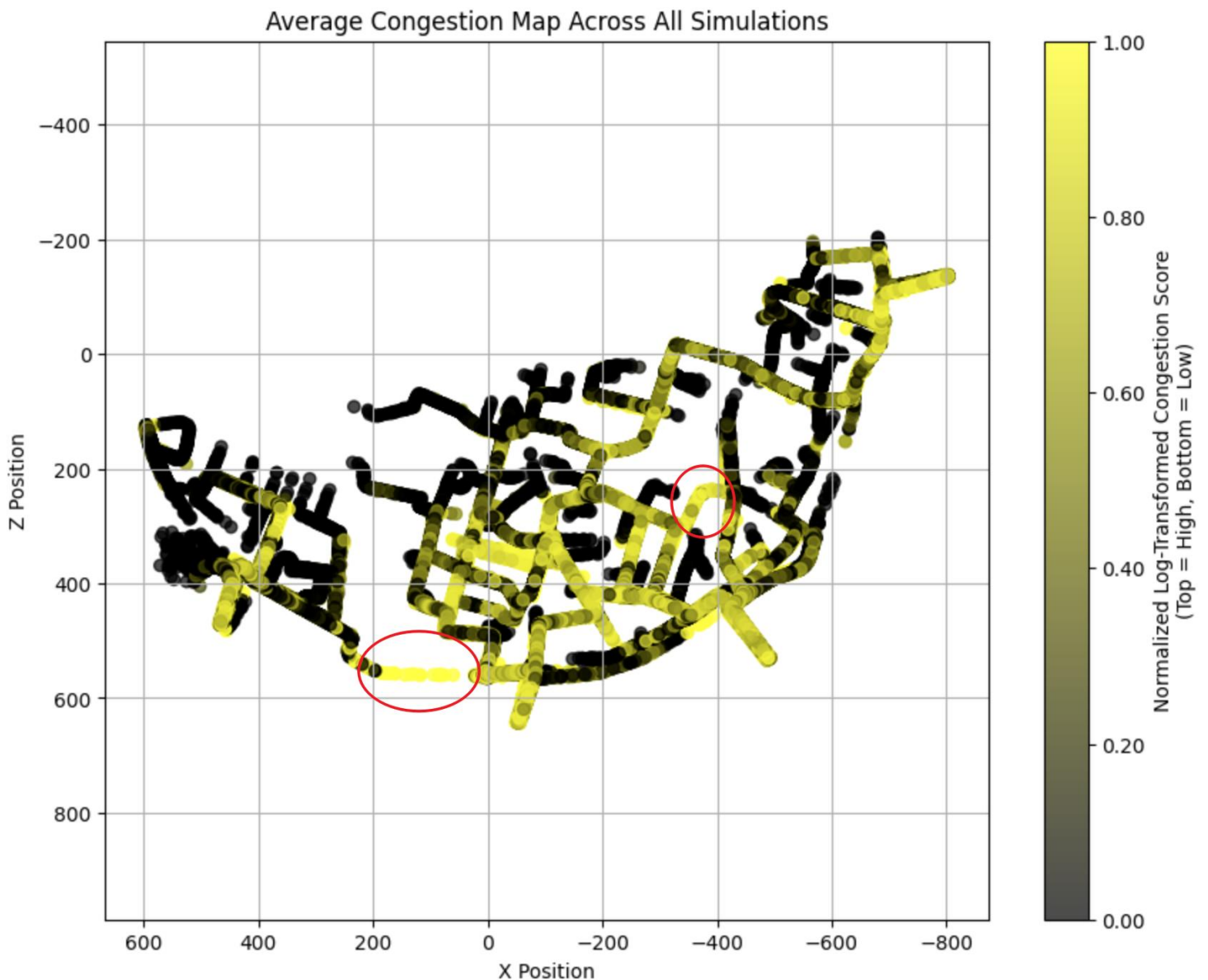
Σχήμα 4.8 Average Distribution Of Destination Change Counts (Average Number Of Agents per Simulation) Pilot

4.2.1.6 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο

Στο παρακάτω διάγραμμα, απεικονίζεται η χωρική κατανομή της συμφόρησης οχημάτων με βάση τον δείκτη συμφόρησης που υπολογίστηκε από τα συνδυασμένα δεδομένα όλων των 5 προσομοιώσεων. Ο οριζόντιος άξονας (X) και ο κατακόρυφος άξονας (Z) αντιστοιχούν στις χωρικές συντεταγμένες της κίνησης, ενώ η κλίμακα χρωμάτων στα δεξιά αποτυπώνει τη φυσιολογικά μετασχηματισμένη και κανονικοποιημένη τιμή της συμφόρησης.

Συγκεκριμένα, το κιτρινωπό (στην ανώτερη περιοχή της κλίμακας) αντιστοιχεί σε υψηλή συμφόρηση (δηλαδή μεγάλες τιμές του δείκτη), ενώ το μαύρο (στην κατώτερη περιοχή της κλίμακας) αντιστοιχεί σε χαμηλή συμφόρηση. Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή στην κλίμακα (κοντά στο 1.00) υποδηλώνει υψηλότερη συγκέντρωση και πυκνότητα οχημάτων, σε συνδυασμό με σχετικά μικρή διασπορά των χρονικών στιγμών που παρατηρήθηκαν τα δεδομένα (χαμηλή χρονική διακύμανση). Αντίθετα, οι σκουρόχρωμες περιοχές (κοντά στο 0.00) υποδηλώνουν μικρότερη ένταση κίνησης.

Πέρα από τις κύριες περιοχές του δικτύου που εμφανίζουν αυξημένη συμφόρηση (έντονο κίτρινο χρώμα), εντοπίζονται και ορισμένα μεμονωμένα σημεία (outliers) που παρουσιάζουν επίσης υψηλή τιμή συμφόρησης (σε κόκκινο κύκλο). Αυτά τα σημεία μπορεί να προκύπτουν από αλληλεπιδράσεις λίγων οχημάτων σε πολύ περιορισμένο χώρο και χρόνο ή από σφάλματα στην καταγραφή των δεδομένων (pulses από τα αυτοκίνητα). Συνεπώς, παρότι το χρώμα τους υποδηλώνει “υψηλή συμφόρηση”, στην πράξη δεν αντιπροσωπεύουν μία εκτεταμένη ή σημαντική κυκλοφοριακή επιβάρυνση, αλλά αποτελούν κυρίως στατιστικές εξαιρέσεις.



Σχήμα 4.9 Average Congestion Map Across All Simulations Pilot

Σύμφωνα με την απεικόνιση της συμφοράρησης στο παραπάνω διάγραμμα, διαπιστώνεται ότι αρκετοί οδικοί άξονες εμφανίζουν σχετικά υψηλή συμφοράρηση. Ενδεικτικά αναφέρονται οι οδοί:

- Άρεως
- Αχιλλέως
- Ονήσιλου
- Αθηνών
- Χατζηγεωργάκη Κορνέσιου
- Πατριάρχου Γρηγορίου

Καθώς και άλλες περιοχές του δικτύου με κιτρινωπή ένδειξη. Η διαπίστωση αυτή υπογραμμίζει την αναγκαιότητα περαιτέρω διερεύνησης ή παρεμβάσεων σε συγκεκριμένες οδούς που παρουσιάζουν συστηματικά αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο.

4.2.2 Δεδομένα Για Σενάριο Σεισμού

Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται η επίδραση ενός σεισμού στο δίκτυο εκκένωσης, όπου η φυσική καταστροφή επιφέρει σοβαρές διαταραχές στην κίνηση και την ομαλή εκκένωση των οχημάτων. Ειδικότερα, οι κύριες παραλλαγές περιλαμβάνουν:

- Την κατάρρευση μίας ή περισσότερων εξόδων, όπου παρατηρείται πώς η απώλεια ενός κρίσιμου σημείου εκκένωσης επηρεάζει τον συνολικό χρόνο και την αποδοτικότητα της διαδικασίας.
- Τη βλάβη κυρίων οδικών αρτηριών με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, που καθιστά αυτές τις διαδρομές μη-προσπελάσιμες και δημιουργεί επιπλέον συμφοράρηση στα εναλλακτικά δίκτυα.

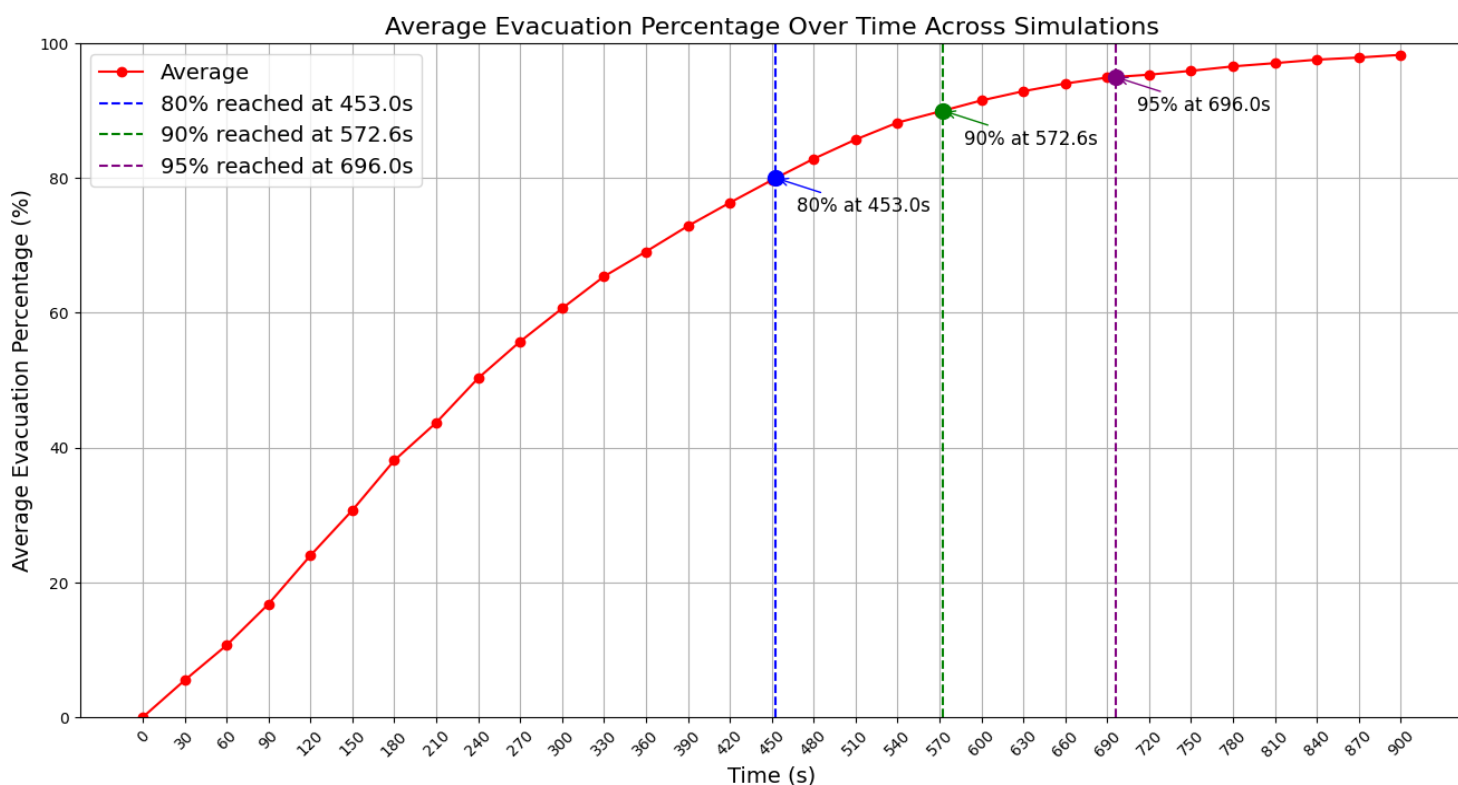
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα που συνοψίζουν τα αποτελέσματα των εκτελέσεων στο συγκεκριμένο σενάριο. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν μια λεπτομερή εικόνα για το πώς η απώλεια μιας ή περισσότερων βασικών εξόδων, καθώς και ο αποκλεισμός κρίσιμων οδών, διαμορφώνουν το συνολικό προφίλ του συστήματος εκκένωσης υπό συνθήκες κρίσης. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τόσο την καταγραφή των επιπτώσεων στον χρόνο εκκένωσης όσο και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των εναλλακτικών διαδρομών, προκειμένου να εντοπιστούν τα κρίσιμα σημεία και να προταθούν μελλοντικές στρατηγικές βελτιστοποίησης.

4.2.2.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II

Σε αυτό το σημείο, προσομοιώνεται η επίδραση του κλεισίματος της εξόδου "Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II" στην εκκένωση των οχημάτων. Ο στόχος της ανάλυσης είναι ο εντοπισμός του βαθμού συμφόρησης και η εκτίμηση του πώς η απώλεια μιας κρίσιμης εξόδου επιδρά στον συνολικό χρόνο εκκένωσης, καθώς και το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης.

4.2.2.1.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο

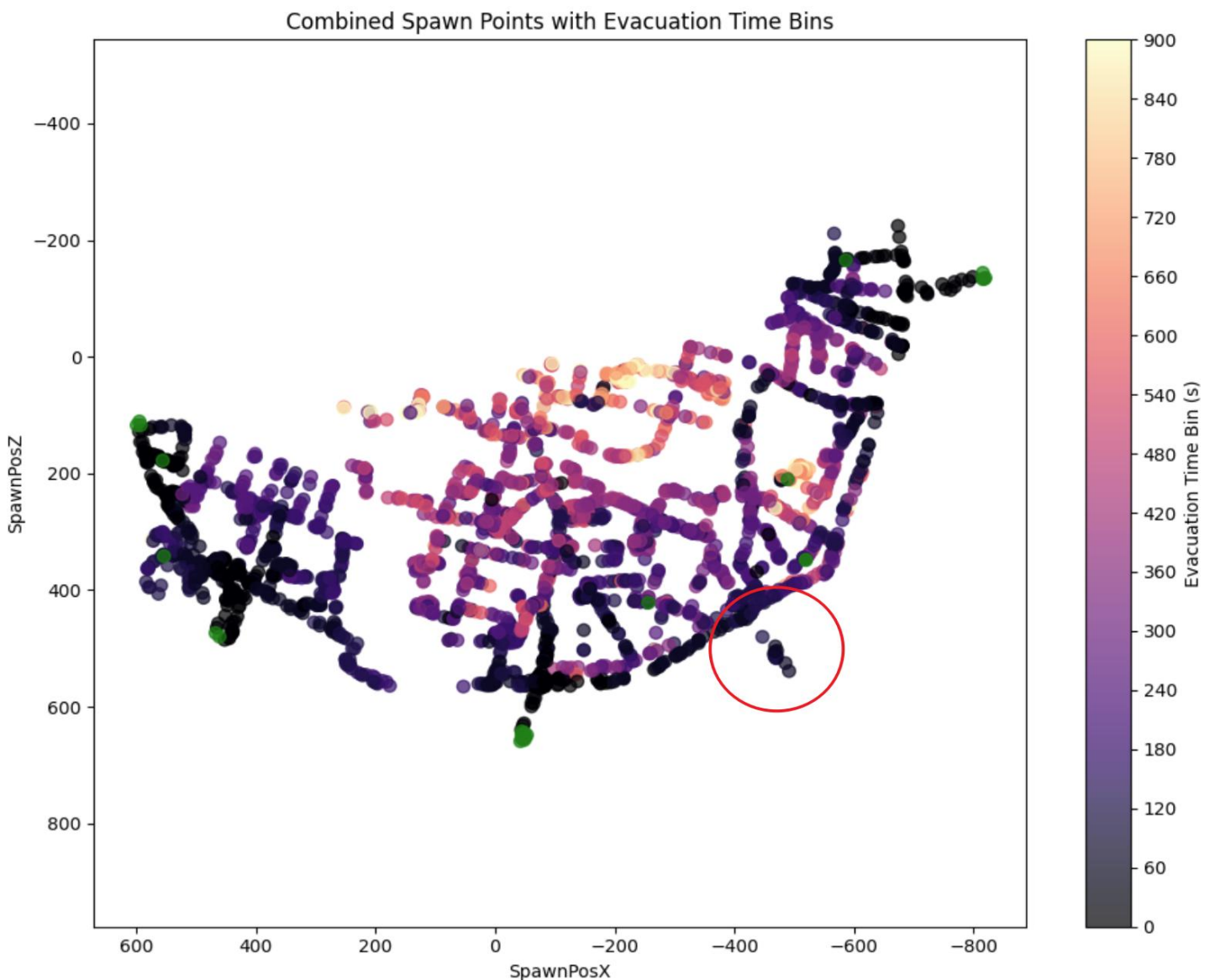
Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε ότι, παρόλο που η πλειονότητα των οχημάτων ολοκληρώνει την εκκένωση, το ποσοστό δεν αγγίζει το 100% εντός του χρονικού ορίου των 15 λεπτών (μέγιστη διάρκεια προσομοίωσης). Αυτό υποδηλώνει ότι το κλείσιμο της εξόδου προκαλεί πρόβλημα σε ένα ποσοστό οδηγών, οι οποίοι καθυστερούν σημαντικά και δεν καταφέρνουν να εκκενώσουν στον διαθέσιμο χρόνο. Παρόλα αυτά το 80% καταφέρνει να εκκενώσει στα 453 δευτερόλεπτα (7,6 λεπτά), το 90% στα 572.6 (9,6 λεπτά) και το 95% στα 696 (11,6 λεπτά). Παρατηρείται μεγαλύτερη καθυστέρηση μετά το 80% (στα 7.5 λεπτά) καθώς το υπόλοιπο 20% των αυτοκινήτων είναι “κολλημένο” σε κυκλοφοριακή συμφόρηση με αποτέλεσμα να χρειάζεται περισσότερος χρόνος για αυτά τα αυτοκίνητα για να διαφύγουν από τα τοίχοι.



Σχήμα 4.10 Average Evacuation Percentage Over Time Across Simulations Arch. Makariou Closed

4.2.2.1.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης

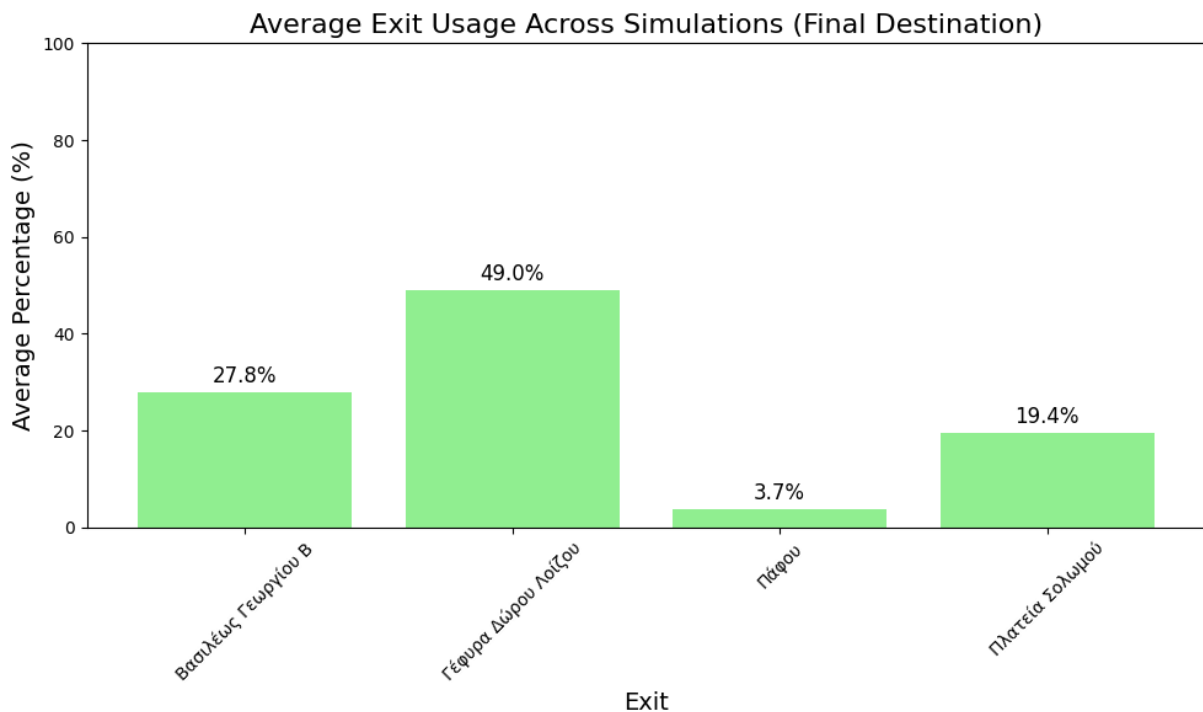
Στο παρακάτω διάγραμμα, κάθε σημείο αντιστοιχεί στη θέση εκκίνησης (spawn point) ενός πράκτορα και ο χρωματικός κώδικας υποδεικνύει τον χρόνο εκκένωσης του (σε δευτερόλεπτα), με πράσινο χρώμα αφορά αυτοκίνητα που είτε ξεκίνησαν πολύ κοντά σε έξοδο είτε δεν μπόρεσαν να υπολογίσουν κάποιο μονοπάτι προς κάποια έξοδο. Όπως διακρίνεται, οι πράκτορες που ξεκίνησαν από πιο απομακρυσμένα σημεία (ιδιαίτερα προς τα πίσω τμήματα του χάρτη) χρειάστηκαν περισσότερο χρόνο για να εκκενώσουν. Αυτό οφείλεται στο κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου (σε κόκκινο κύκλο), γεγονός που περιορίσε τις διαθέσιμες επιλογές και αύξησε τη συμφόρηση σε άλλα σημεία του δικτύου, επεκτείνοντας τον συνολικό χρόνο εκκένωσης για ορισμένους οδηγούς.



Σχήμα 4.11 Combined Spawn Points with Evacuation Time Bins Arch. Makariou Closed

4.2.2.1.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων

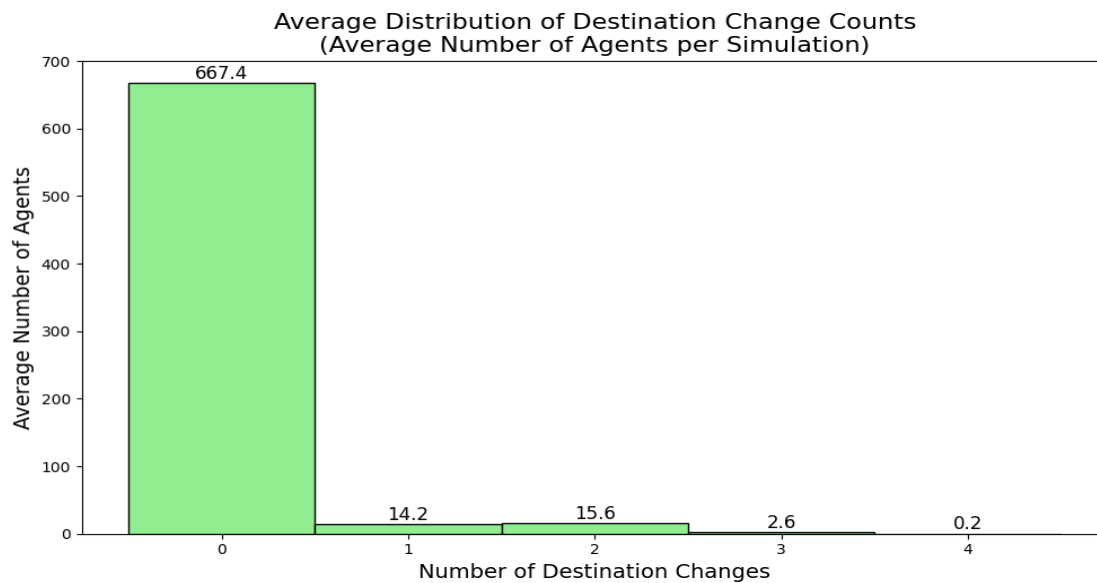
Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η κατανομή των πρακτόρων ανά έξοδο, μετά το κλείσιμο της Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II. Όπως διαπιστώνεται, το μεγαλύτερο ποσοστό οδηγών κατευθύνθηκε στη Γέφυρα Δώρου Λοΐζου, η οποία αποτελούσε την επόμενη πιο κοντινή διαθέσιμη έξοδο. Κατά συνέπεια, οι ροές κυκλοφορίας ανά κατανεμήθηκαν στις υπόλοιπες εξόδους, με το μεγαλύτερο μέρος να συγκεντρώνεται σε αυτήν που βρισκόταν σε πιο βολική τοποθεσία σε σχέση με την κλειστή έξοδο.



Σχήμα 4.12 Average Exit Usage Across Simulations (Final Destination) Arch. Makariou Closed

4.2.2.1.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου

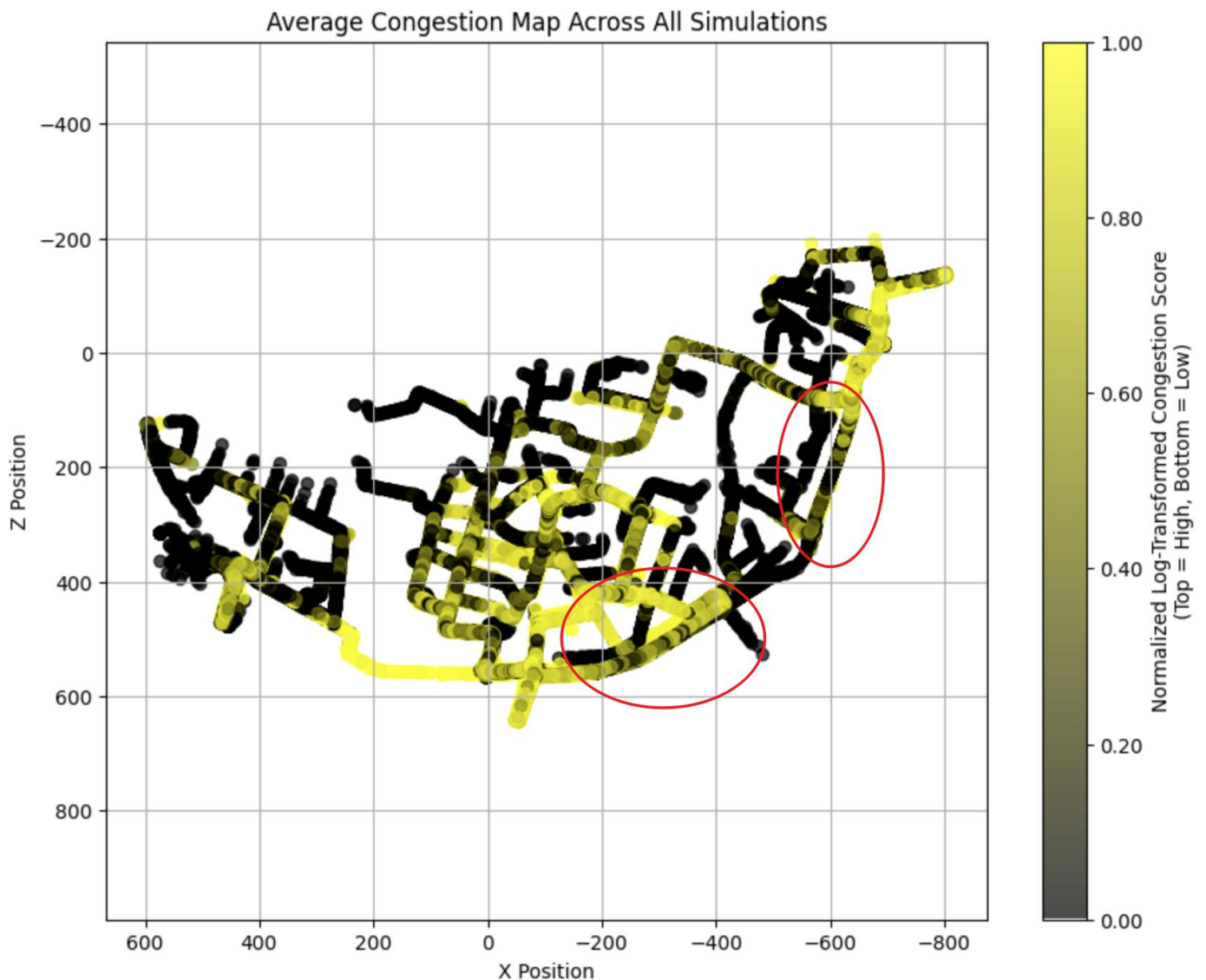
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο αριθμός των αλλαγών προορισμού (destination changes) ανά όχημα. Όπως διακρίνεται, σχεδόν όλα τα οχήματα παρέμειναν στην αρχική τους επιλογή, καθώς το κλείσιμο της εξόδου που βρισκόταν σε κεντρικό σημείο δεν οδήγησε τους οδηγούς σε εναλλακτική, λόγω της απόστασης των υπολοίπων εξόδων. Έτσι, μόνο ελάχιστοι πράκτορες άλλαξαν τελικά προορισμό, καθώς οι υπόλοιποι δεν έκριναν ότι υπάρχει σημαντικό όφελος από την επιλογή κάποιας πιο μακρινής διαδρομής.



Σχήμα 4.13 Average Distribution Of Destination Change Counts Arch. Makariou Closed

4.2.2.1.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο

Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται η μέση κατανομή συμφόρησης σε όλα τα σημεία του οδικού δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως διακρίνεται, η κλειστή έξοδος δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη συμφόρηση (καθώς δεν ήταν προσβάσιμη), ενώ οι περιοχές με εντονότερο χρωματισμό υποδεικνύουν υψηλότερη συμφόρηση, η οποία επικεντρώνεται στις κοντινές εναλλακτικές εξόδους. Με άλλα λόγια, το κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου είχε ως αποτέλεσμα τη μεταφορά μεγαλύτερου όγκου κυκλοφορίας προς τις γειτονικές διαθέσιμες εξόδους, οδηγώντας σε αυξημένη συμφόρηση στα αντίστοιχα οδικά τμήματα.



Σχήμα 4.14 Average Congestion Map Across All Simulations Arch. Makariou Closed

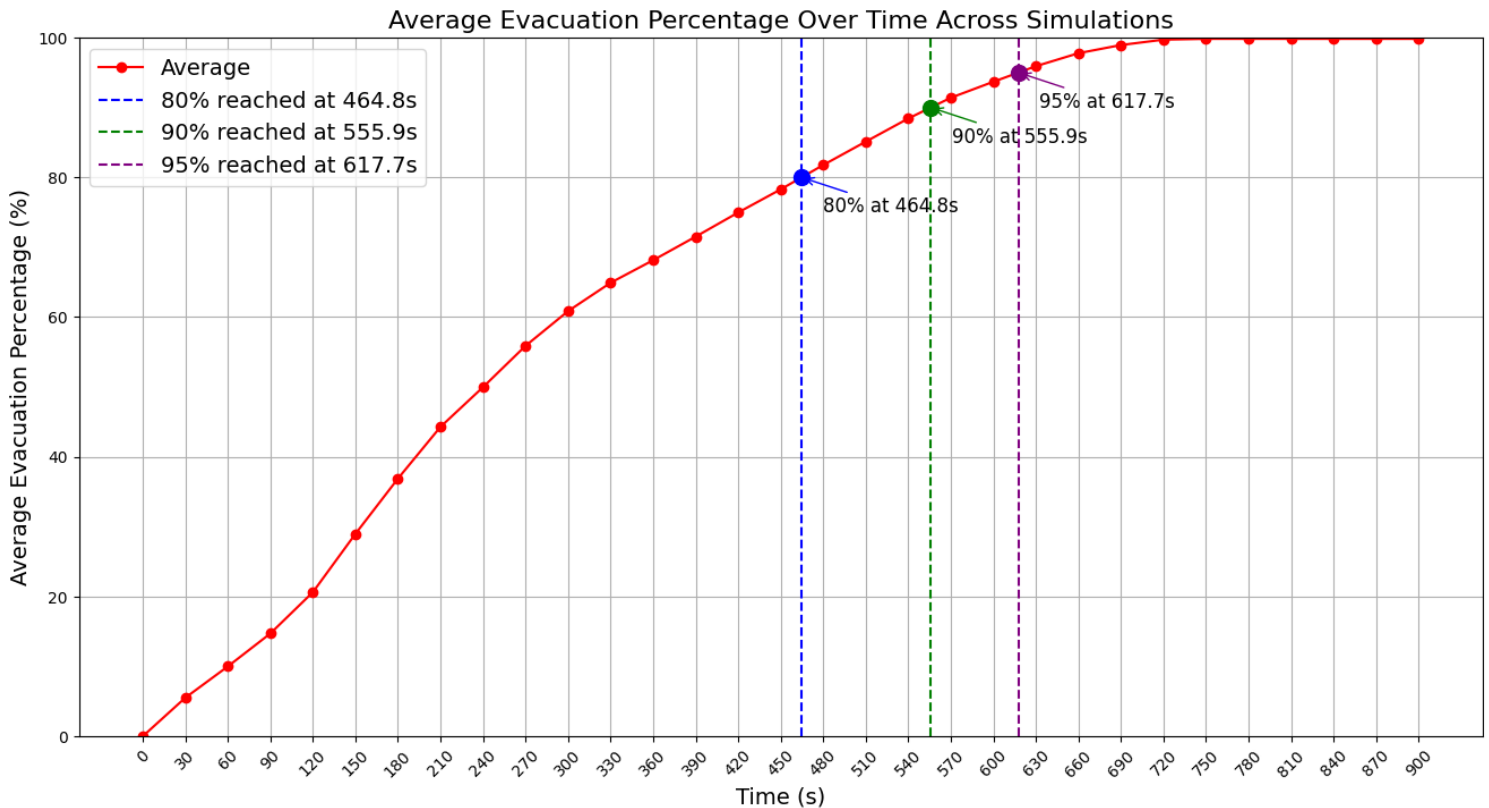
4.2.2.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου

Σε αυτό το σημείο, προσομοιώνεται η επίδραση του κλεισίματος της εξόδου "Γέφυρα Δώρου Λοΐζου" στην εκκένωση των οχημάτων. Ο στόχος της ανάλυσης είναι ο εντοπισμός του βαθμού συμφόρησης και η εκτίμηση του πώς η απώλεια μιας κρίσιμης κεντρικής εξόδου επιδρά στον συνολικό χρόνο εκκένωσης, καθώς και το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης.

4.2.2.2.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο

Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε ότι, η πλειονότητα των οχημάτων ολοκληρώνει την εκκένωση με το ποσοστό να είναι πολύ κοντά στο 100% (99%) . Αυτό υποδηλώνει ότι παρά το κλείσιμο της κεντρικής αυτής εξόδου, τα οχήματα καταφεύγουν στις άλλες κοντινές εξόδους με μια καθυστέρηση αλλά καταφέρνουν να εκκενώσουν στον διαθέσιμο χρόνο.

Έτσι, το 80% καταφέρνει να εκκενώσει στα 464,8 δευτερόλεπτα (7,8 λεπτά), το 90% στα 555.9 (9.3 λεπτά) και το 95% στα 617,7 (10,3 λεπτά). Παρατηρείται μεγαλύτερη καθυστέρηση μετά το 60% (στα 5 λεπτά) καθώς το υπόλοιπο 40% των αυτοκινήτων βρίσκεται σε κυκλοφοριακή συμφόρηση με αποτέλεσμα να χρειάζεται περισσότερος χρόνος για αυτά τα αυτοκίνητα για να διαφύγουν από τα τοίχοι.

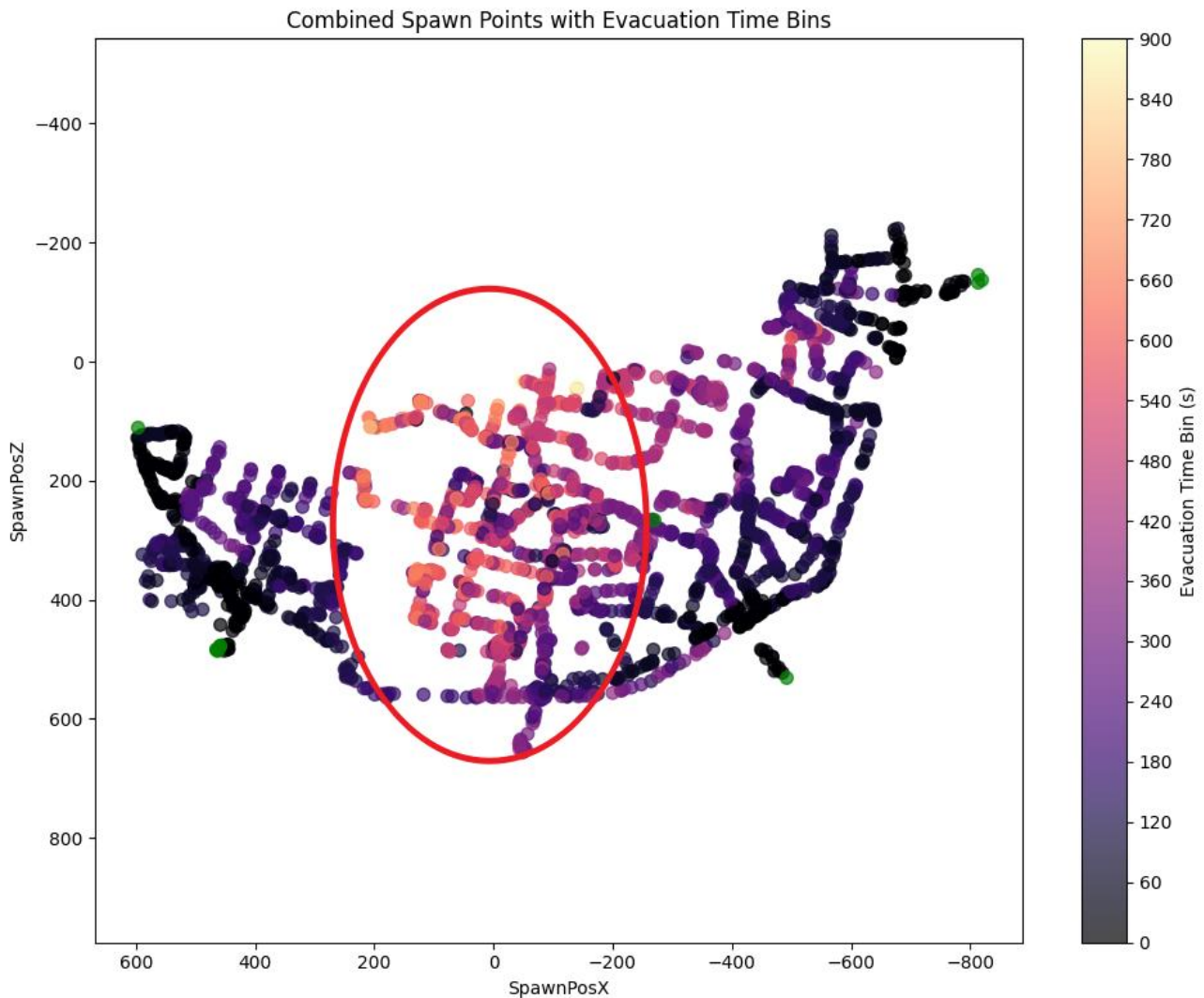


Σχήμα 4.15 Average Evacuation Percentage Over Time Across Simulations D. Loizou Bridge Closed

4.2.2.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης

Στο παρακάτω διάγραμμα, κάθε σημείο αντιστοιχεί στη θέση εκκίνησης (spawn point) ενός πράκτορα και ο χρωματικός κώδικας υποδεικνύει τον χρόνο εκκένωσης του (σε δευτερόλεπτα), με πράσινο χρώμα αφορά αυτοκίνητα που είτε ξεκίνησαν πολύ κοντά σε έξοδο είτε δεν μπόρεσαν να υπολογίσουν κάποιο μονοπάτι προς κάποια έξοδο. Όπως διακρίνεται, οι πράκτορες που ξεκίνησαν από πιο απομακρυσμένα σημεία (ιδιαίτερα προς τα πίσω τμήματα του χάρτη), αλλά και πιο κεντρικά όπως φαίνεται στον κόκκινο κύκλο χρειάστηκαν περισσότερο χρόνο για να εκκενώσουν. Αυτό οφείλεται στο κλείσιμο της συγκεκριμένης κεντρικής εξόδου, γεγονός που περιόρισε τις διαθέσιμες επιλογές και αύξησε

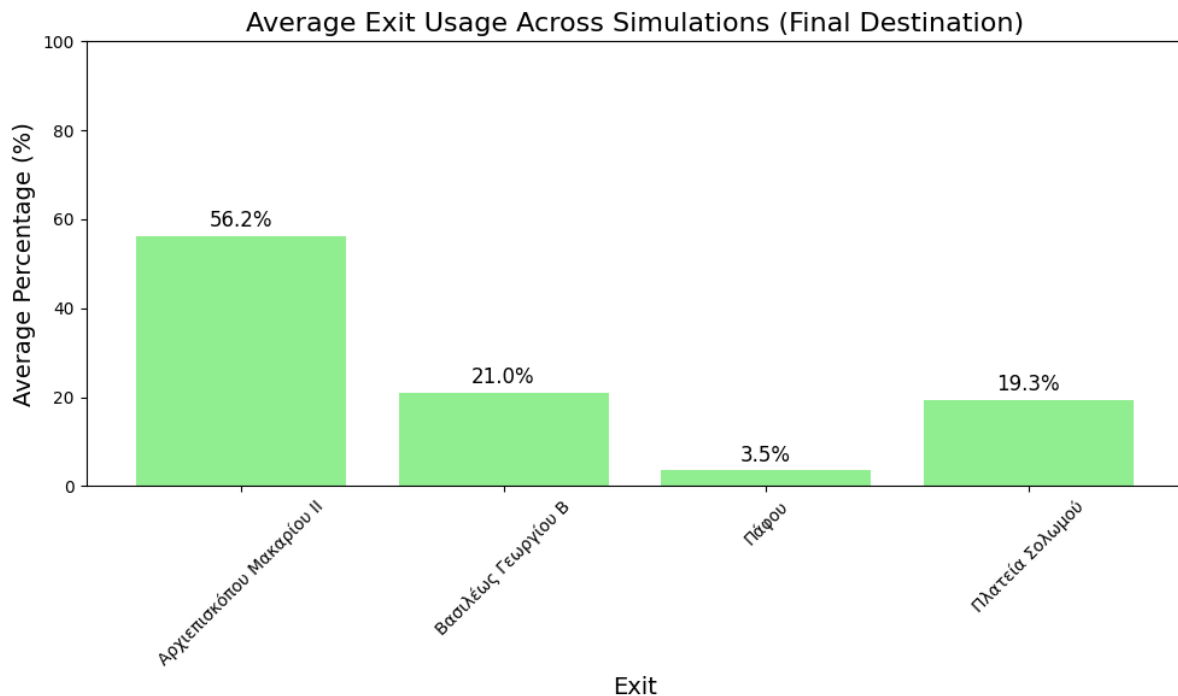
τη συμμόρφωση σε άλλα σημεία του δικτύου, επεκτείνοντας τον συνολικό χρόνο εκκένωσης για ορισμένους οδηγούς που διαφορετικά θα ήταν πολύ κοντά σε έξοδο.



Σχήμα 4.16 Combined Spawn Points with Evacuation Time Bins D. Loizou Bridge Closed

4.2.2.2.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων

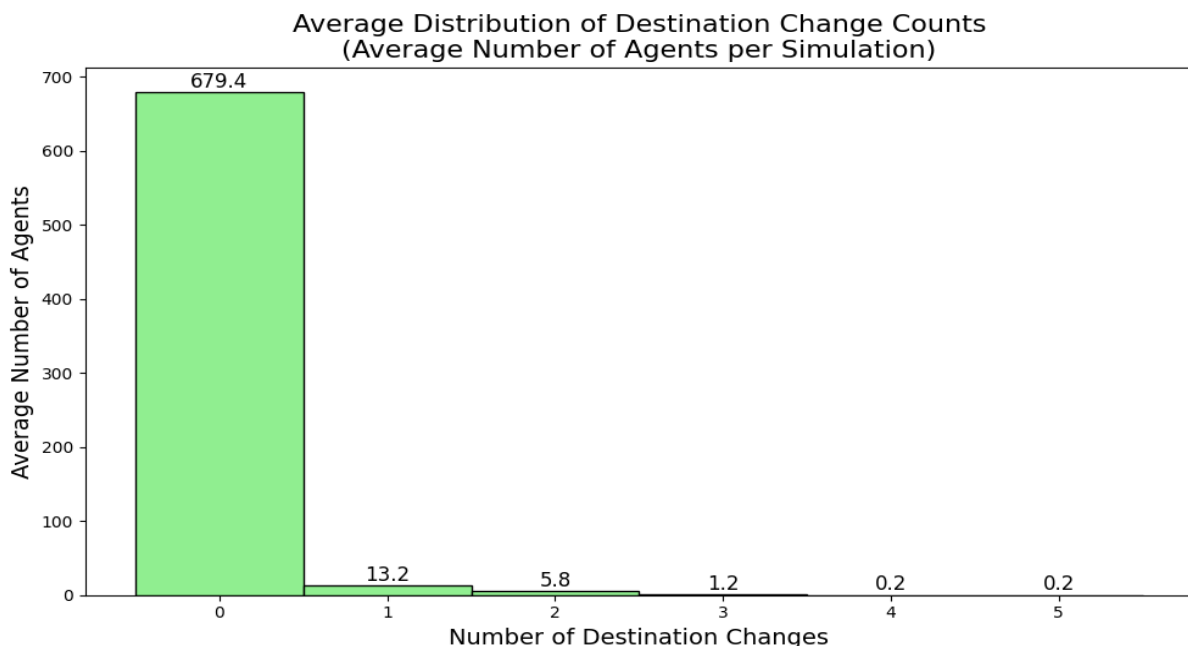
Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η κατανομή των πρακτόρων ανά έξοδο, μετά το κλείσιμο της Γέφυρας Δώρου Λοΐζου. Όπως διαπιστώνεται, το μεγαλύτερο ποσοστό οδηγών κατευθύνθηκε στη Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II, η οποία αποτελούσε την επόμενη πιο κοντινή διαθέσιμη έξοδο. Κατά συνέπεια, οι ροές κυκλοφορίας ανά κατανεμήθηκαν στις υπόλοιπες εξόδους, με το μεγαλύτερο μέρος να συγκεντρώνεται σε αυτήν που βρισκόταν σε πιο βολική τοποθεσία σε σχέση με την κλειστή έξοδο.



Σχήμα 4.17 Average Exit Usage Across Simulations (Final Destination) D. Loizou Bridge Closed

4.2.2.1.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου

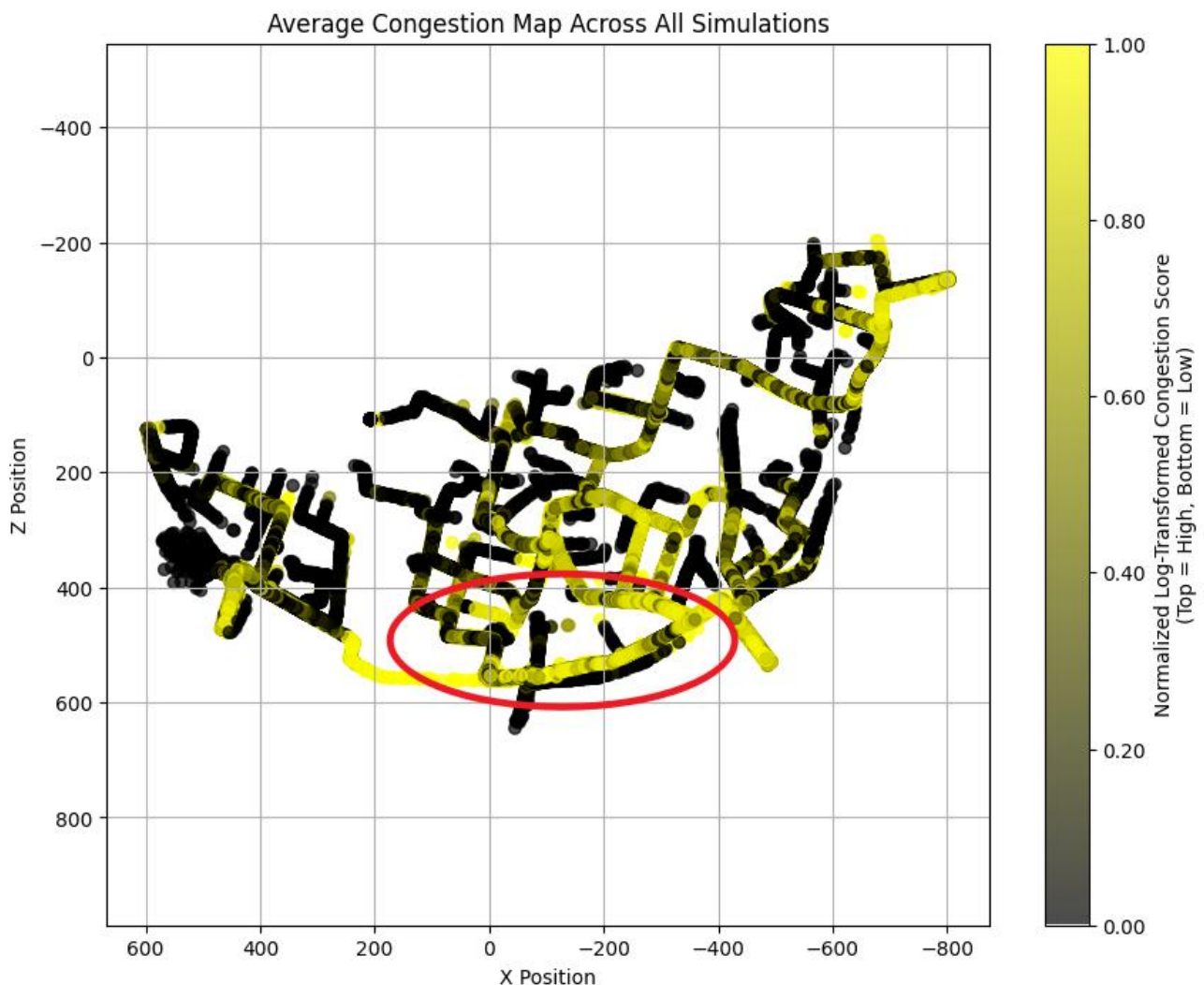
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο αριθμός των αλλαγών προορισμού (destination changes) ανά όχημα. Όπως διακρίνεται, σχεδόν όλα τα οχήματα παρέμειναν στην αρχική τους επιλογή, καθώς το κλείσιμο της εξόδου που βρισκόταν σε κεντρικό σημείο δεν οδήγησε τους οδηγούς σε εναλλακτική, λόγω της απόστασης των υπολοίπων εξόδων. Έτσι, μόνο ελάχιστοι πράκτορες άλλαξαν τελικά προορισμό, καθώς οι υπόλοιποι δεν έκριναν ότι υπάρχει σημαντικό όφελος από την επιλογή κάποιας πιο μακρινής διαδρομής.



Σχήμα 4.18 Average Distribution Of Destination Change Counts D. Loizou Bridge Closed

4.2.2.1.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο

Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται η μέση κατανομή συμφόρησης σε όλα τα σημεία του οδικού δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως διακρίνεται, η κλειστή έξοδος δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη συμφόρηση (καθώς δεν ήταν προσβάσιμη), ενώ οι περιοχές με εντονότερο χρωματισμό υποδεικνύουν υψηλότερη συμφόρηση, η οποία επικεντρώνεται στις κοντινές εναλλακτικές εξόδους. Με άλλα λόγια, το κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου είχε ως αποτέλεσμα τη μεταφορά μεγαλύτερου όγκου κυκλοφορίας προς τις γειτονικές διαθέσιμες εξόδους (κυρίως στην Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II), οδηγώντας σε αυξημένη συμφόρηση στα αντίστοιχα οδικά τμήματα και μείωση σε άλλα.



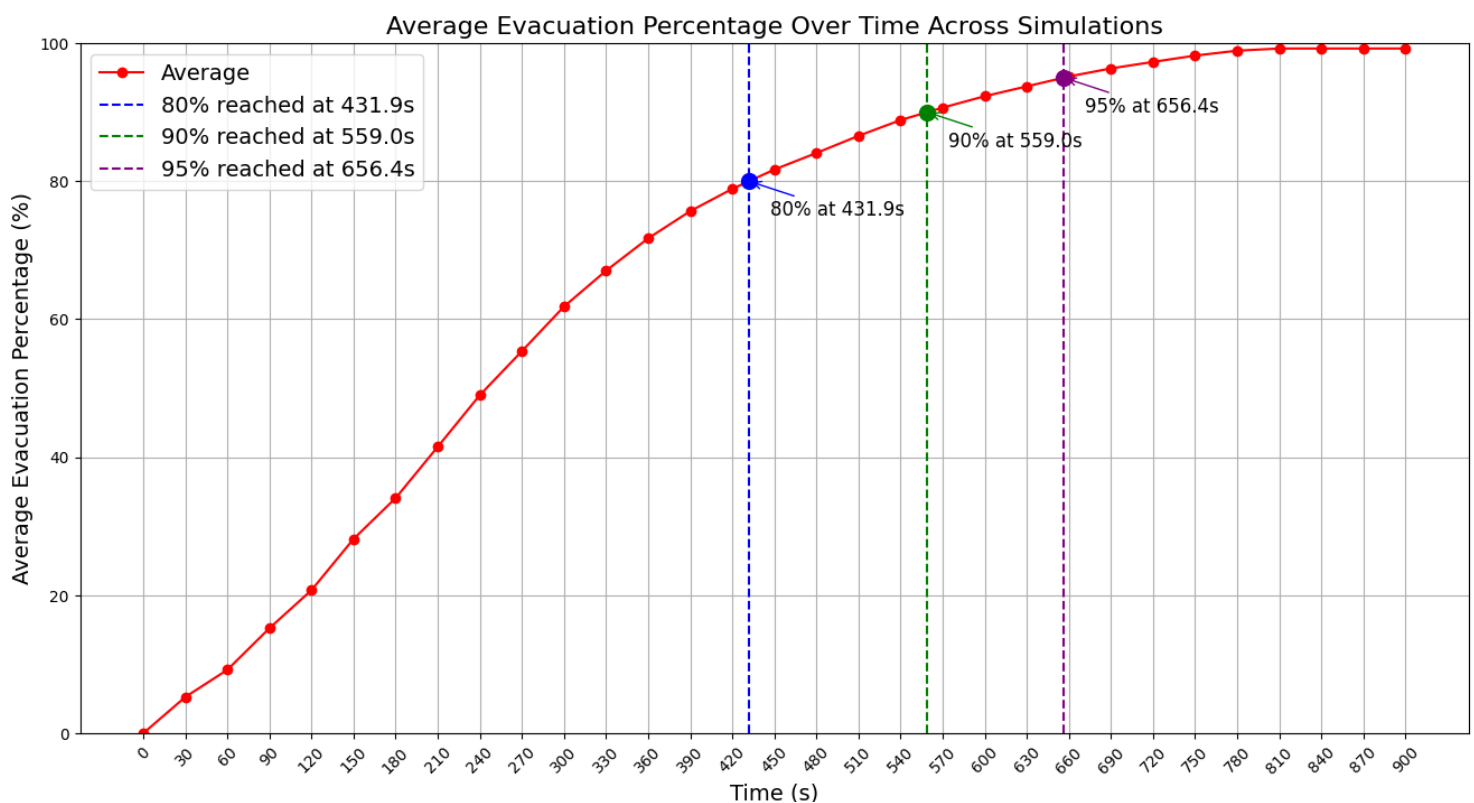
Σχήμα 4.19 Average Congestion Map Across All Simulations D. Loizou Bridge Closed

4.2.2.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β

Σε αυτό το σημείο, προσομοιώνεται η επίδραση του κλεισίματος της εξόδου "Βασιλέως Γεωργίου Β" στην εκκένωση των οχημάτων. Ο στόχος της ανάλυσης είναι ο εντοπισμός του βαθμού συμφόρησης και η εκτίμηση του πώς η απώλεια μιας κρίσιμης κεντρικής εξόδου επιδρά στον συνολικό χρόνο εκκένωσης, καθώς και το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης.

4.2.2.3.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο

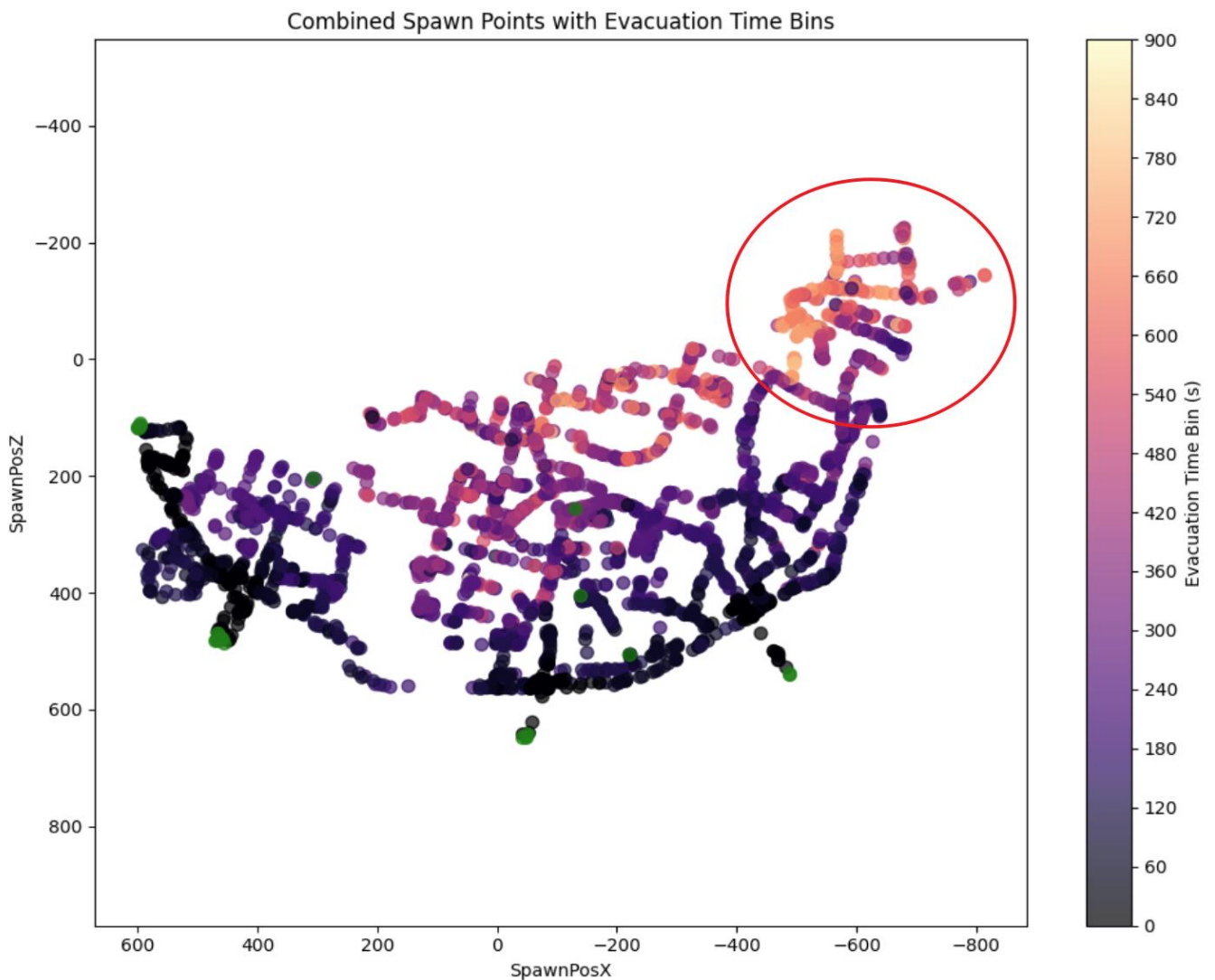
Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε ότι, η πλειονότητα των οχημάτων ολοκληρώνει την εκκένωση με το ποσοστό 99% εντός 15 λεπτών (13,5 λεπτά συγκεκριμένα). Αυτό υποδηλώνει ότι παρά το κλείσιμο της εξόδου, τα οχήματα καταφεύγουν στην επόμενη κοντινότερη έξοδο της Αρχιεπισκόπου Μακαρίου ΙΙ με μια καθυστέρηση αλλά με επιτυχία καταφέρνοντας να εκκενώσουν στον διαθέσιμο χρόνο. Έτσι, το 80% καταφέρνει να εκκενώσει στα 431,9 δευτερόλεπτα (7,2 λεπτά), το 90% στα 559 (9.3 λεπτά) και το 95% στα 656,4 (10,9 λεπτά). Παρατηρείται μεγαλύτερη καθυστέρηση μετά το 79% (στα 7 λεπτά) καθώς το υπόλοιπο 21% των αυτοκινήτων βρίσκεται σε κυκλοφοριακή συμφόρηση με αποτέλεσμα να χρειάζεται περισσότερος χρόνος για αυτά τα αυτοκίνητα για να διαφύγουν από τα τοίχους.



Σχήμα 4.20 Average Evacuation Percentage Over Time Across Simulations V. Georgiou B Closed

4.2.2.3.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης

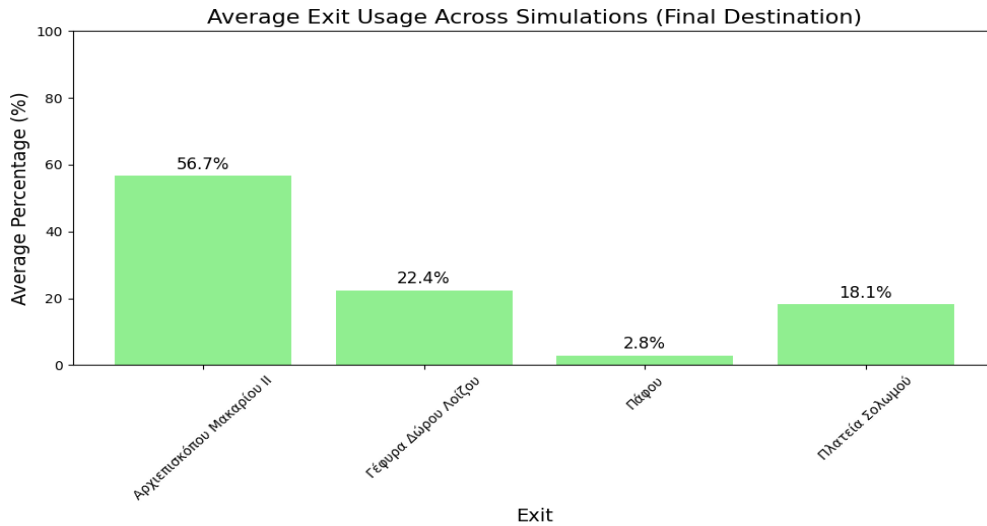
Στο παρακάτω διάγραμμα, κάθε σημείο αντιστοιχεί στη θέση εκκίνησης (spawn point) ενός πράκτορα και ο χρωματικός κώδικας υποδεικνύει τον χρόνο εκκένωσης του (σε δευτερόλεπτα), με πράσινο χρώμα αφορά αυτοκίνητα που είτε ξεκίνησαν πολύ κοντά σε έξοδο είτε δεν μπόρεσαν να υπολογίσουν κάποιο μονοπάτι προς κάποια έξοδο. Όπως διακρίνεται, οι πράκτορες που ξεκίνησαν από πιο απομακρυσμένα σημεία (ιδιαίτερα προς τα πίσω τμήματα του χάρτη), αλλά κυρίως στα δεξιά όπως φαίνεται στον κόκκινο κύκλο χρειάστηκαν περισσότερο χρόνο για να εκκενώσουν. Αυτό οφείλεται στο κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου, γεγονός που περιορίσε τις διαθέσιμες επιλογές και αύξησε τη συμφόρηση σε άλλα σημεία του δικτύου, επεκτείνοντας τον συνολικό χρόνο εκκένωσης για ορισμένους οδηγούς που διαφορετικά θα ήταν πολύ κοντά σε έξοδο.



Σχήμα 4.21 Combined Spawn Points with Evacuation Time Bins V. Georgiou B Closed

4.2.2.3.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων

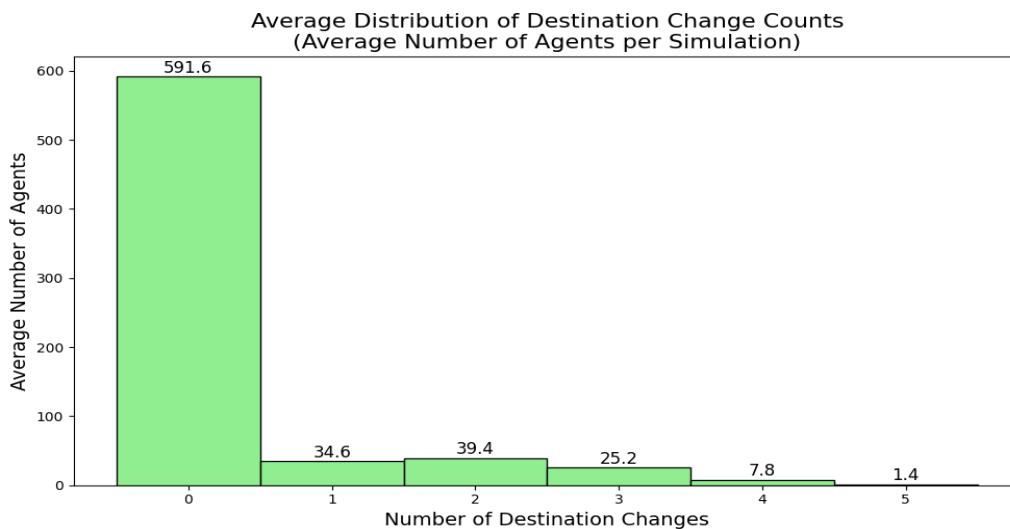
Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η κατανομή των πρακτόρων ανά έξοδο, μετά το κλείσιμο της Βασιλέως Γεωργίου Β. Όπως διαπιστώνεται, η ροή κυκλοφορίας κατευθύνθηκε μόνο στην έξοδο Αρχιεπισκόπου Μακαρίου ΙΙ, η οποία αποτελούσε την επόμενη πιο κοντινή διαθέσιμη έξοδο.



Σχήμα 4.22 Average Exit Usage Across Simulations (Final Destination) V. Georgiou B Closed

4.2.2.3.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου

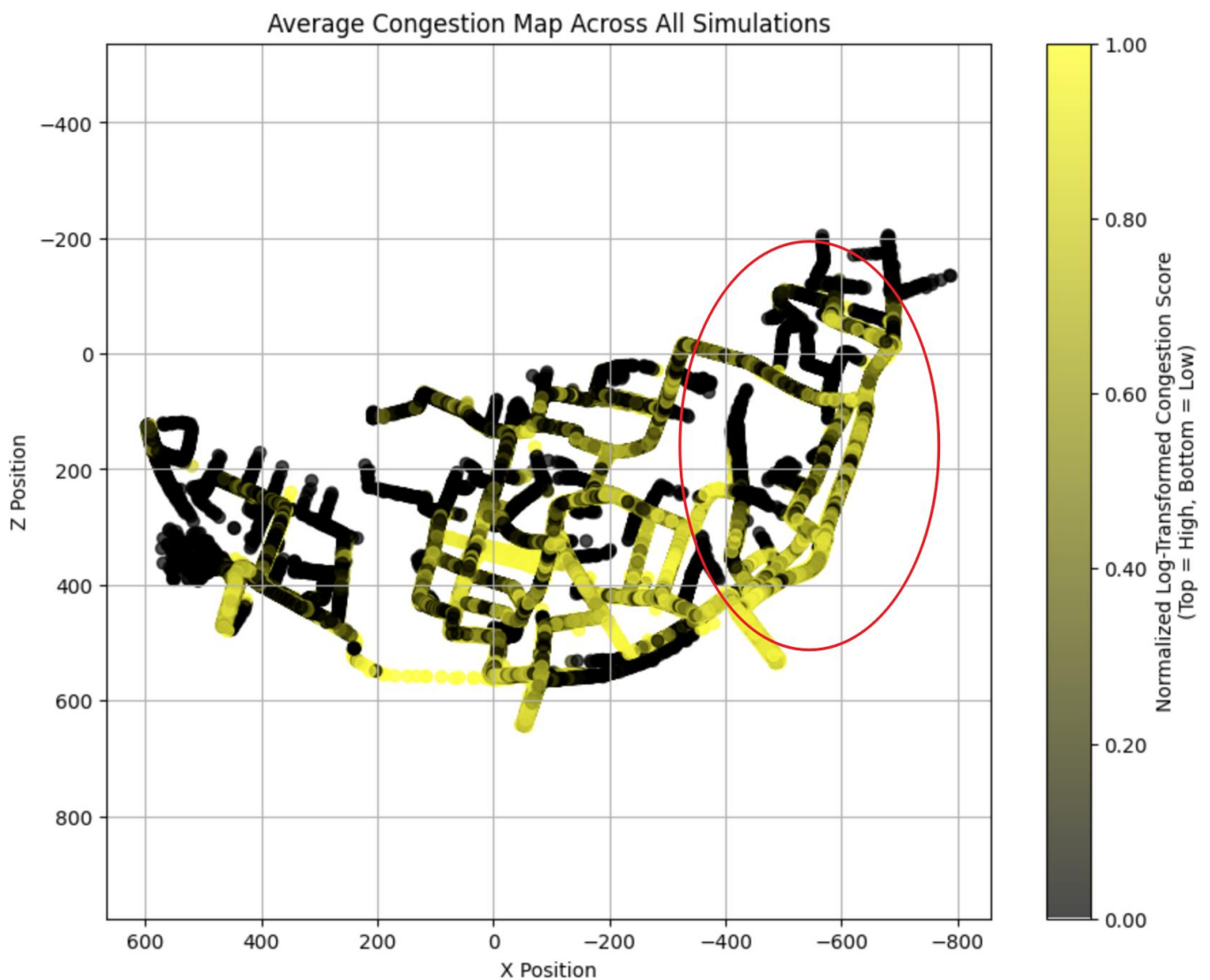
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο αριθμός των αλλαγών προορισμού (destination changes) ανά όχημα. Όπως διακρίνεται, αρκετά από τα οχήματα παρέμειναν στην αρχική τους επιλογή όπως αναμενόταν, καθώς το κλείσιμο της εξόδου που βρισκόταν σε μη-κεντρικό σημείο δεν επηρέασε ιδιαίτερα τους οδηγούς στις επιλογές τους. Παρόλα αυτά, είναι περισσότεροι οι οδηγοί που άλλαξαν την επιλογή τους σε σχέση με τις προηγούμενες φορές.



Σχήμα 4.23 Average Distribution Of Destination Change Counts V. Georgiou B Closed

4.2.2.3.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο

Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται η μέση κατανομή συμφόρησης σε όλα τα σημεία του οδικού δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως διακρίνεται, η κλειστή έξοδος δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη συμφόρηση (καθώς δεν ήταν προσβάσιμη), ενώ οι περιοχές με εντονότερο χρωματισμό υποδεικνύουν υψηλότερη συμφόρηση, η οποία επικεντρώνεται στις κοντινές εναλλακτικές εξόδους. Με άλλα λόγια, το κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου είχε ως αποτέλεσμα τη μεταφορά όλου του όγκου κυκλοφορίας, που σχετίζεται με την έξοδο, προς την Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II, οδηγώντας σε αυξημένη συμφόρηση στα αντίστοιχα οδικά τμήματα και μείωση σε άλλα.



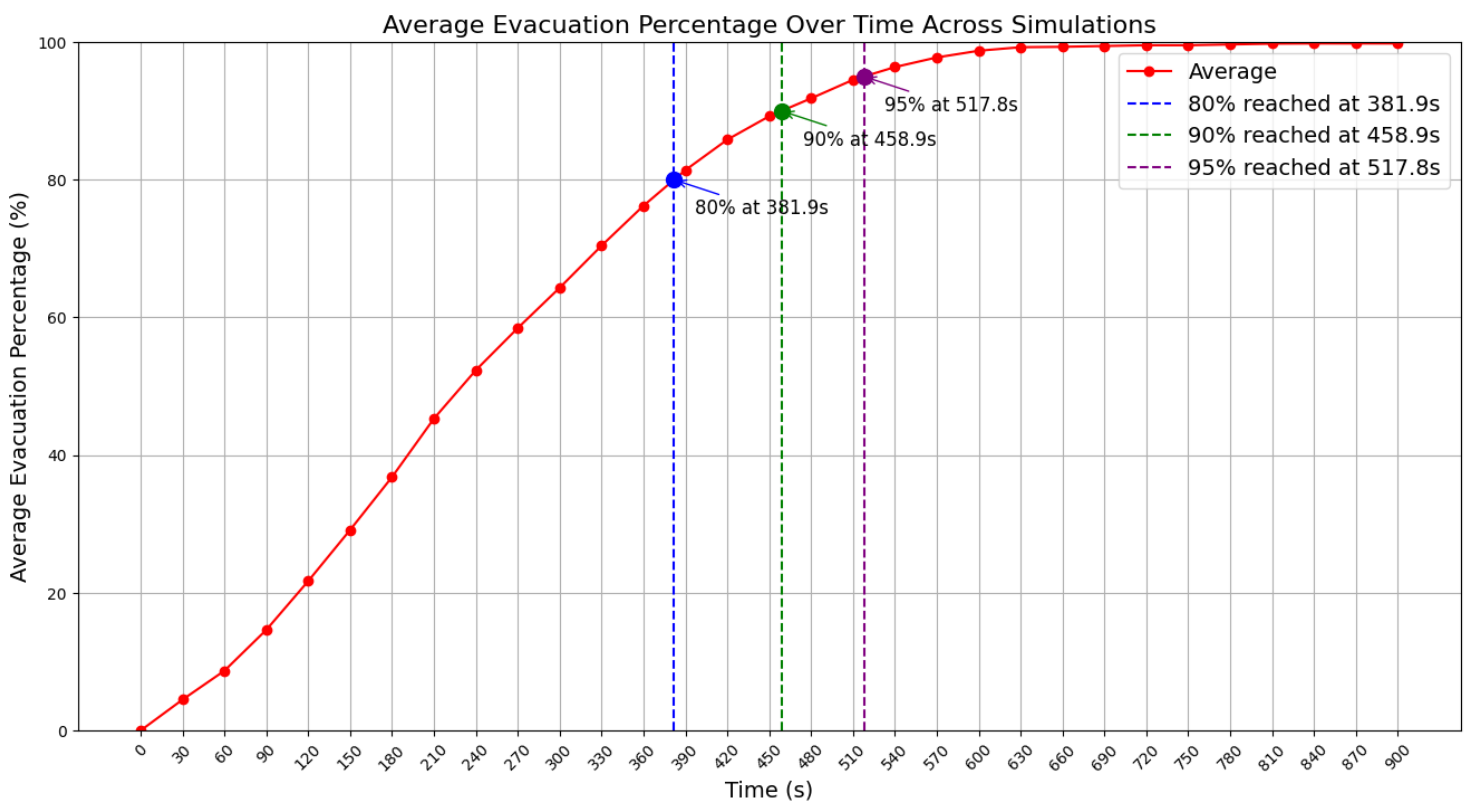
Σχήμα 4.24 Average Congestion Map Across All Simulations V. Georgiou B Closed

4.2.2.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού

Σε αυτό το σημείο, προσομοιώνεται η επίδραση του κλεισίματος της εξόδου " Πλατεία Σολωμού" στην εκκένωση των οχημάτων. Ο στόχος της ανάλυσης είναι ο εντοπισμός του βαθμού συμφόρησης και η εκτίμηση του πώς η απώλεια μιας κρίσιμης κεντρικής εξόδου επιδρά στον συνολικό χρόνο εκκένωσης, καθώς και το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης.

4.2.2.4.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο

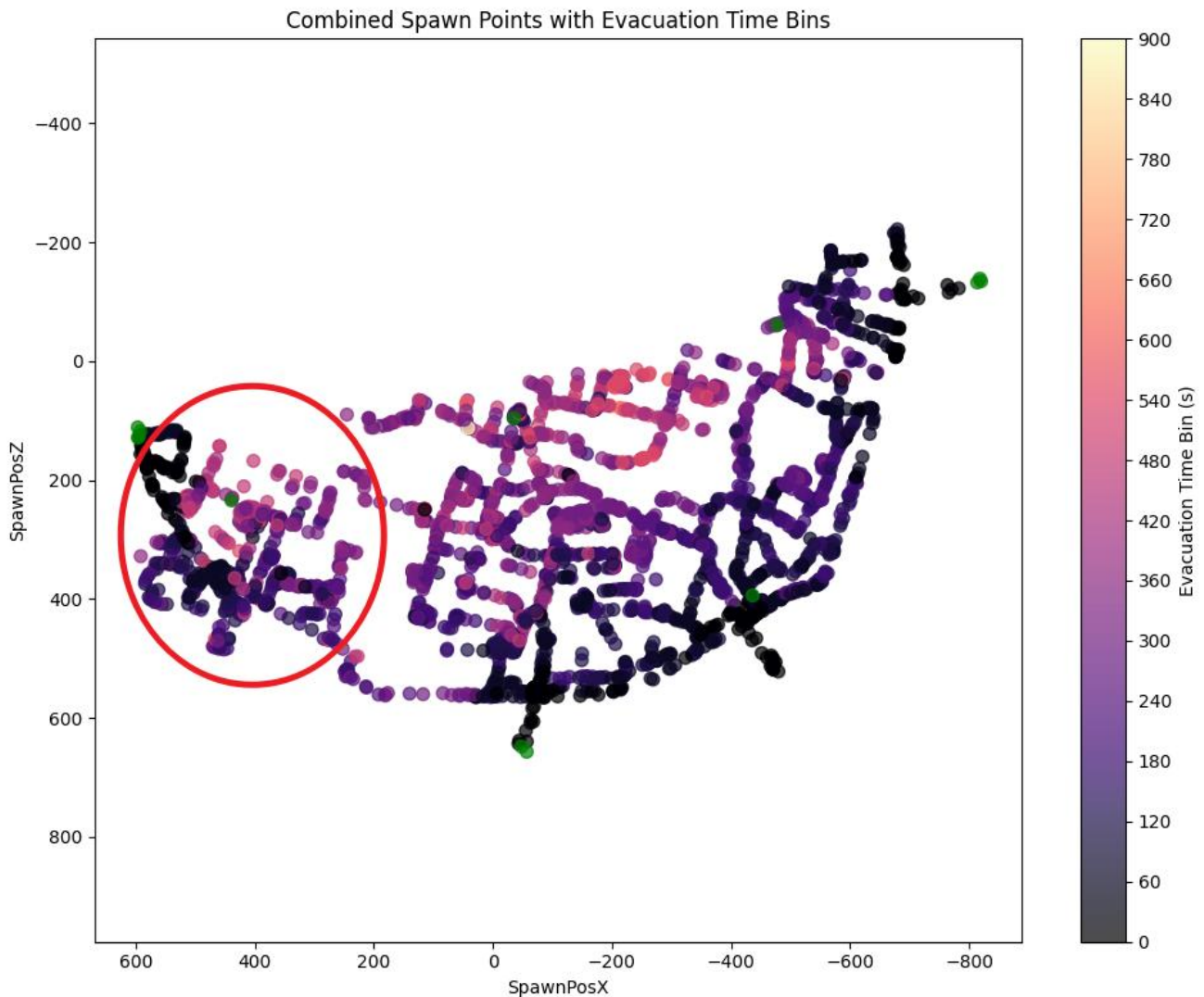
Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε ότι, η πλειονότητα των οχημάτων ολοκληρώνει την εκκένωση με το ποσοστό 100% εντός 15 λεπτών (13,5 λεπτά συγκεκριμένα). Αυτό υποδηλώνει ότι παρά το κλείσιμο της εξόδου, τα οχήματα καταφεύγουν στην επόμενη κοντινότερη έξοδο της οδού Πάφου, με μια πολύ μικρή καθυστέρηση, καταφέροντας να εκκενώσουν στον διαθέσιμο χρόνο. Έτσι, το 80% καταφέρνει να εκκενώσει στα 381,9 δευτερόλεπτα (6,4 λεπτά), το 90% στα 458,9 (7.7 λεπτά) και το 95% στα 517,8 (8.6 λεπτά). Παρατηρείται μεγαλύτερη καθυστέρηση μετά το 89% (στα 7.5 λεπτά) καθώς το υπόλοιπο 11% των αυτοκινήτων βρίσκεται σε κυκλοφοριακή συμφόρηση με αποτέλεσμα να χρειάζεται περισσότερος χρόνος για αυτά τα αυτοκίνητα για να διαφύγουν από τα τοίχοι.



Σχήμα 4.25 Average Evacuation Percentage Over Time Across Simulations Solomou Square Closed

4.2.2.4.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης

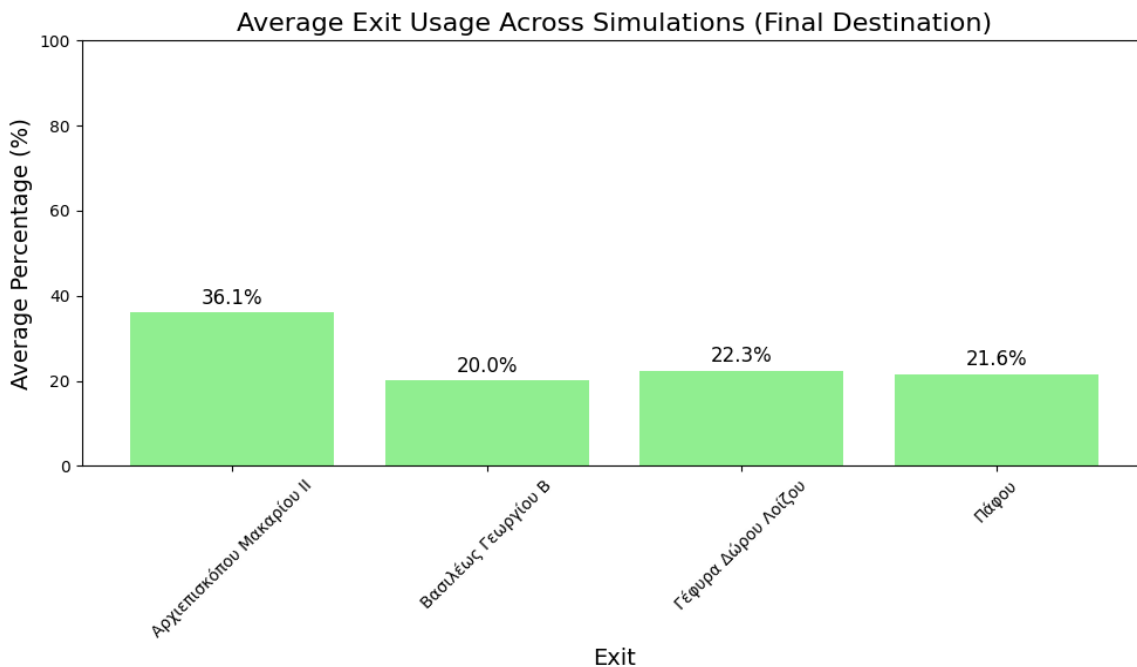
Στο παρακάτω διάγραμμα, κάθε σημείο αντιστοιχεί στη θέση εκκίνησης (spawn point) ενός πράκτορα και ο χρωματικός κώδικας υποδεικνύει τον χρόνο εκκένωσης του (σε δευτερόλεπτα), με πράσινο χρώμα αφορά αυτοκίνητα που είτε ξεκίνησαν πολύ κοντά σε έξοδο είτε δεν μπόρεσαν να υπολογίσουν κάποιο μονοπάτι προς κάποια έξοδο. Όπως διακρίνεται, οι πράκτορες που ξεκίνησαν από πιο απομακρυσμένα σημεία (ιδιαίτερα προς τα πίσω τμήματα του χάρτη), αλλά κυρίως στα αριστερά όπως φαίνεται στον κόκκινο κύκλο χρειάστηκαν λίγο περισσότερο χρόνο για να εκκενώσουν. Αυτό οφείλεται στο κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου, γεγονός που περιορίσε τις διαθέσιμες επιλογές σε μόνο μια, αυτήν στην οδό Πάφου, λόγω των μονόδρομων στο δίκτυο.



Σχήμα 4.26 Combined Spawn Points with Evacuation Time Bins Solomou Square Closed

4.2.2.4.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων

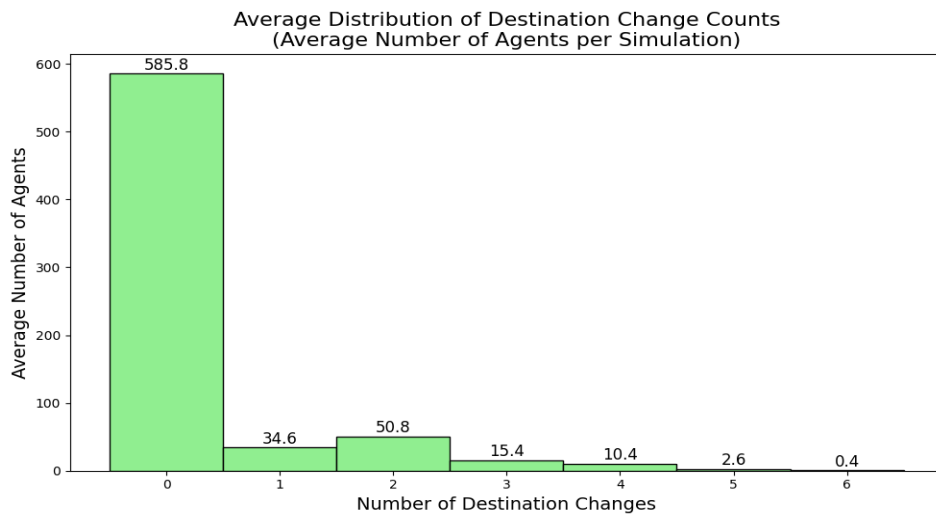
Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η κατανομή των πρακτόρων ανά έξοδο, μετά το κλείσιμο της εξόδου στην Πλατεία Σολωμού. Όπως διαπιστώνεται, η ροή κυκλοφορίας κατευθύνθηκε μόνο στην έξοδο Πάφου, η οποία αποτελούσε την μοναδική διαθέσιμη έξοδο. Αυτό γιατί λόγω των μονόδρομων που υπάρχουν στο οδικό δίκτυο δεν είναι δυνατή η επιλογή μιας άλλης εξόδου.



Σχήμα 4.27 Average Exit Usage Across Simulations (Final Destination) Solomou Square Closed

4.2.2.4.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου

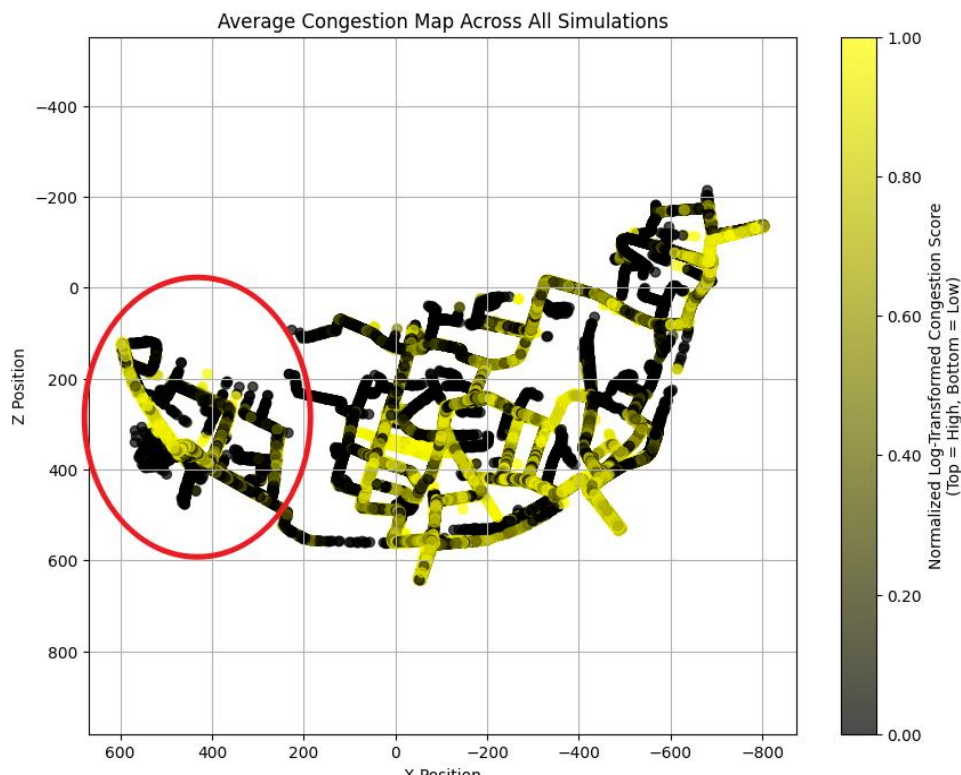
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο αριθμός των αλλαγών προορισμού (destination changes) ανά όχημα. Όπως διακρίνεται, αρκετά από τα οχήματα παρέμειναν στην αρχική τους επιλογή όπως αναμενόταν, καθώς το κλείσιμο της εξόδου που βρισκόταν σε μη-κεντρικό σημείο δεν επηρέασε ιδιαίτερα τους οδηγούς στις επιλογές τους. Παρόλα αυτά, είναι περισσότεροι οι οδηγοί που άλλαξαν την επιλογή τους σε σχέση με τις προηγούμενες φορές, κάτι που θυμίζει το πιλοτικό σενάριο.



Σχήμα 4.28 Average Distribution Of Destination Change Counts Solomou Square Closed

4.2.2.4.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο

Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται η μέση κατανομή συμφόρησης σε όλα τα σημεία του οδικού δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως διακρίνεται, η κλειστή έξοδος δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη συμφόρηση (καθώς δεν ήταν προσβάσιμη), ενώ οι περιοχές με εντονότερο χρωματισμό υποδεικνύουν υψηλότερη συμφόρηση, η οποία επικεντρώνεται στις κοντινές εναλλακτικές εξόδους. Με άλλα λόγια, το κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου είχε ως αποτέλεσμα τη μεταφορά όλου του όγκου κυκλοφορίας, που σχετίζεται με την έξοδο, προς την οδό Πάφου, οδηγώντας σε αυξημένη συμφόρηση στα αντίστοιχα οδικά τμήματα.



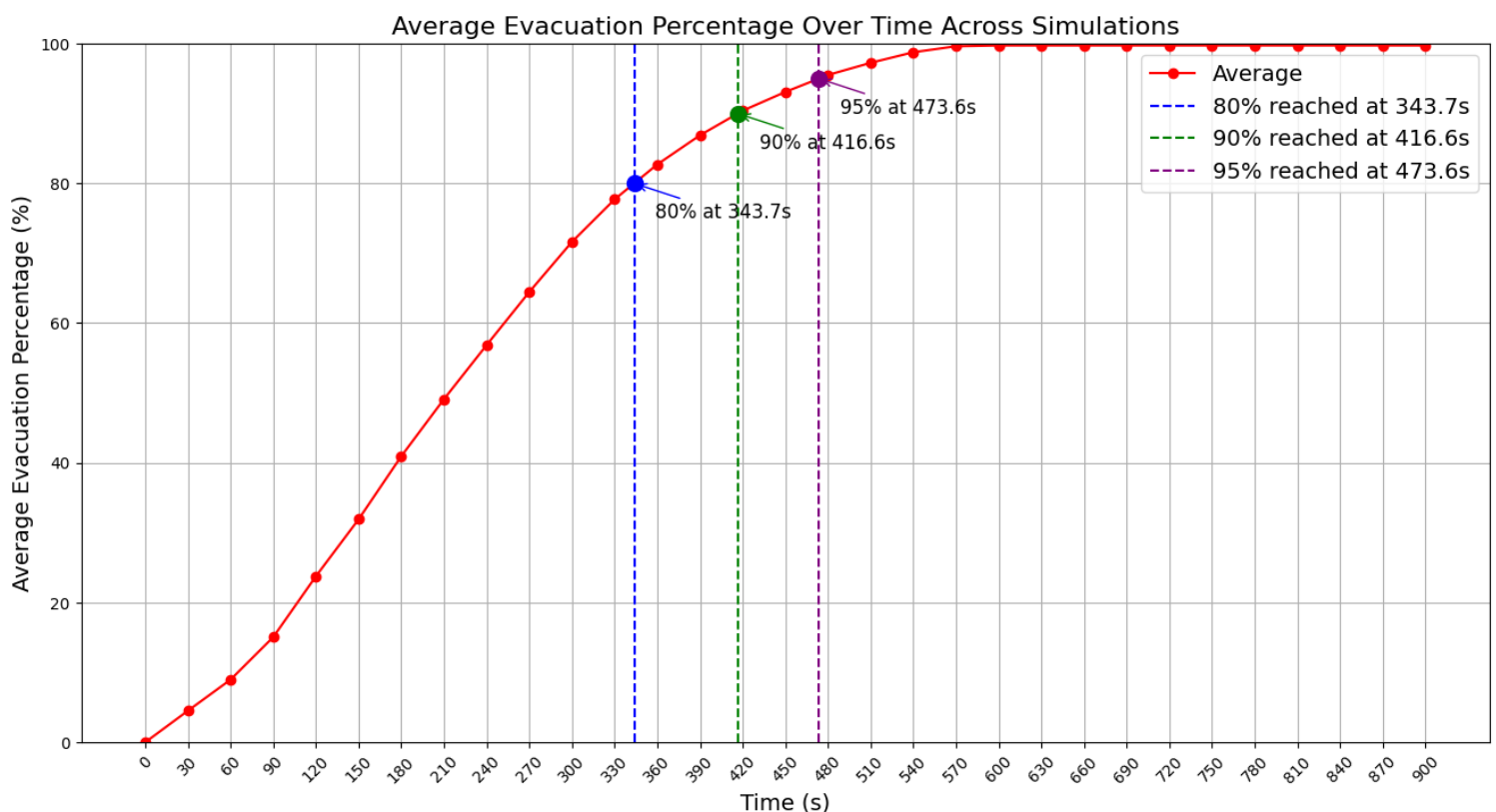
Σχήμα 4.29 Average Congestion Map Across All Simulations Solomou Square Closed

4.2.2.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου

Σε αυτό το σημείο, προσομοιώνεται η επίδραση του κλεισίματος της εξόδου στην οδό "Πάφου" στην εκκένωση των οχημάτων. Ο στόχος της ανάλυσης είναι ο εντοπισμός του βαθμού συμφόρησης και η εκτίμηση του πώς η απώλεια μιας κρίσιμης κεντρικής εξόδου επιδρά στον συνολικό χρόνο εκκένωσης, καθώς και το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης.

4.2.2.5.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο

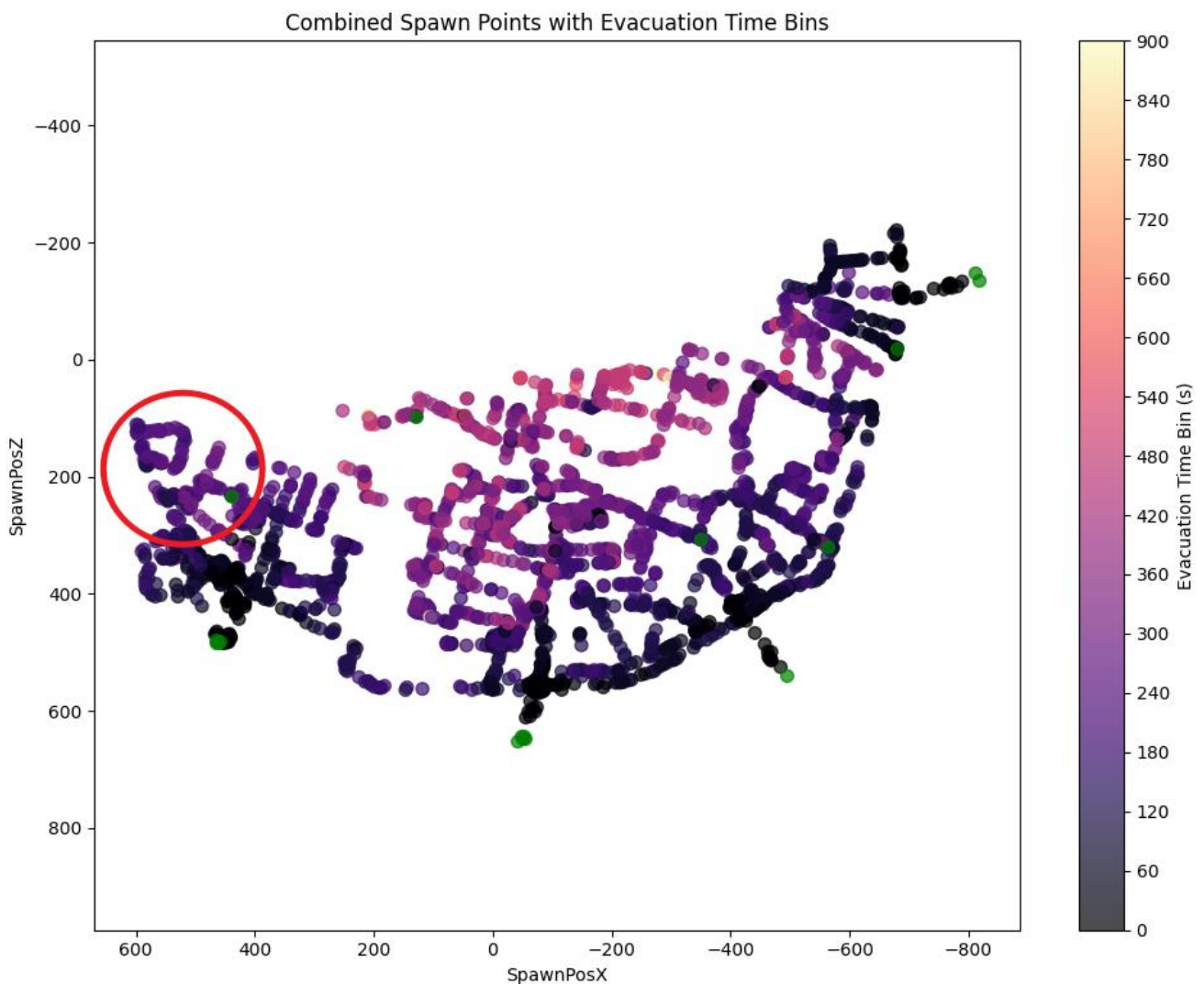
Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε ότι, η πλειονότητα των οχημάτων ολοκληρώνει την εκκένωση με το ποσοστό 100% εντός 15 λεπτών (9,5 λεπτά συγκεκριμένα). Αυτό υποδηλώνει ότι παρά το κλείσιμο της εξόδου, τα οχήματα καταφεύγουν στην επόμενη κοντινότερη έξοδο της Πλατείας Σολωμού, χωρίς ιδιαίτερη καθυστέρηση, καταφέροντας να εκκενώσουν αρκετά κάτω από τον διαθέσιμο χρόνο. Έτσι, το 80% καταφέρνει να εκκενώσει στα 343,7 δευτερόλεπτα (5,7 λεπτά), το 90% στα 416,6 (6.9 λεπτά) και το 95% στα 473,6 (7.9 λεπτά).



Σχήμα 4.30 Average Evacuation Percentage Over Time Across Simulations Pafou Closed

4.2.2.5.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης

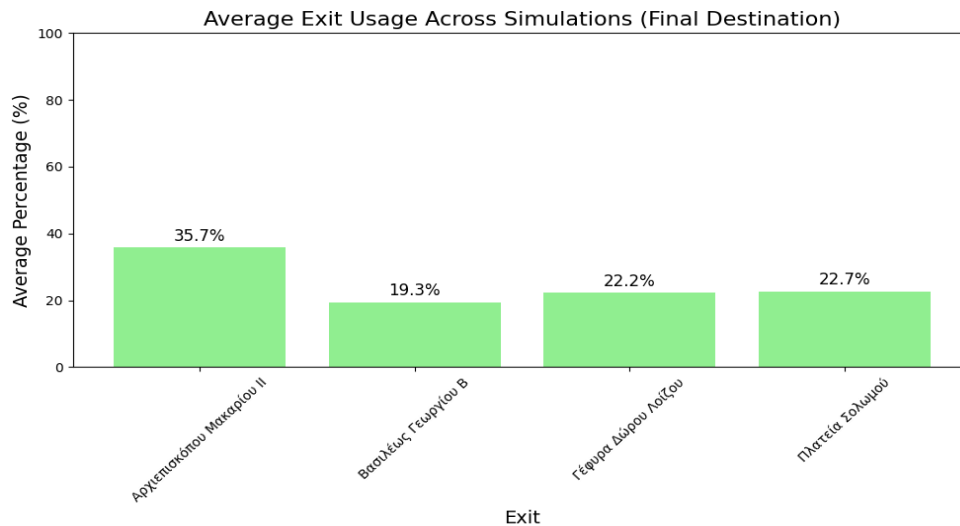
Στο παρακάτω διάγραμμα, κάθε σημείο αντιστοιχεί στη θέση εκκίνησης (spawn point) ενός πράκτορα και ο χρωματικός κώδικας υποδεικνύει τον χρόνο εκκένωσης του (σε δευτερόλεπτα), με πράσινο χρώμα αφορά αυτοκίνητα που είτε ξεκίνησαν πολύ κοντά σε έξοδο είτε δεν μπόρεσαν να υπολογίσουν κάποιο μονοπάτι προς κάποια έξοδο. Όπως διακρίνεται, οι πράκτορες που ξεκίνησαν από πιο απομακρυσμένα σημεία (ιδιαίτερα προς τα πίσω τμήματα του χάρτη) χρειάστηκαν περισσότερο χρόνο για να εκκενώσουν. Όπως φαίνεται στον κόκκινο κύκλο, ένα μικρό ποσοστό οχημάτων χρειάστηκε λίγο περισσότερο χρόνο, κάτι που οφείλεται στο κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου, γεγονός που περιόρισε τις διαθέσιμες επιλογές σε μόνο μια, αυτήν στην Πλατεία Σολωμού, λόγω των μονόδρομων στο δίκτυο.



Σχήμα 4.31 Combined Spawn Points with Evacuation Time Bins Pafou Closed

4.2.2.5.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων

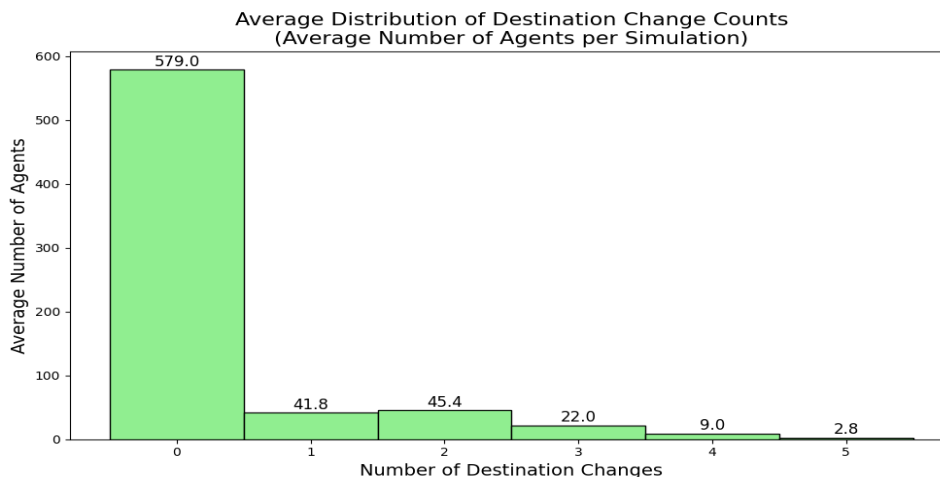
Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η κατανομή των πρακτόρων ανά έξοδο, μετά το κλείσιμο της εξόδου στην οδό Πάφου. Όπως διαπιστώνεται, η ροή κυκλοφορίας κατευθύνθηκε μόνο στην έξοδο που βρίσκεται στην Πλατεία Σολωμού, η οποία αποτελούσε την μοναδική διαθέσιμη έξοδο. Αυτό γιατί λόγω των μονόδρομων που υπάρχουν στο οδικό δίκτυο δεν είναι δυνατή η επιλογή μιας άλλης εξόδου.



Σχήμα 4.32 Average Exit Usage Across Simulations (Final Destination) Pafou Closed

4.2.2.5.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου

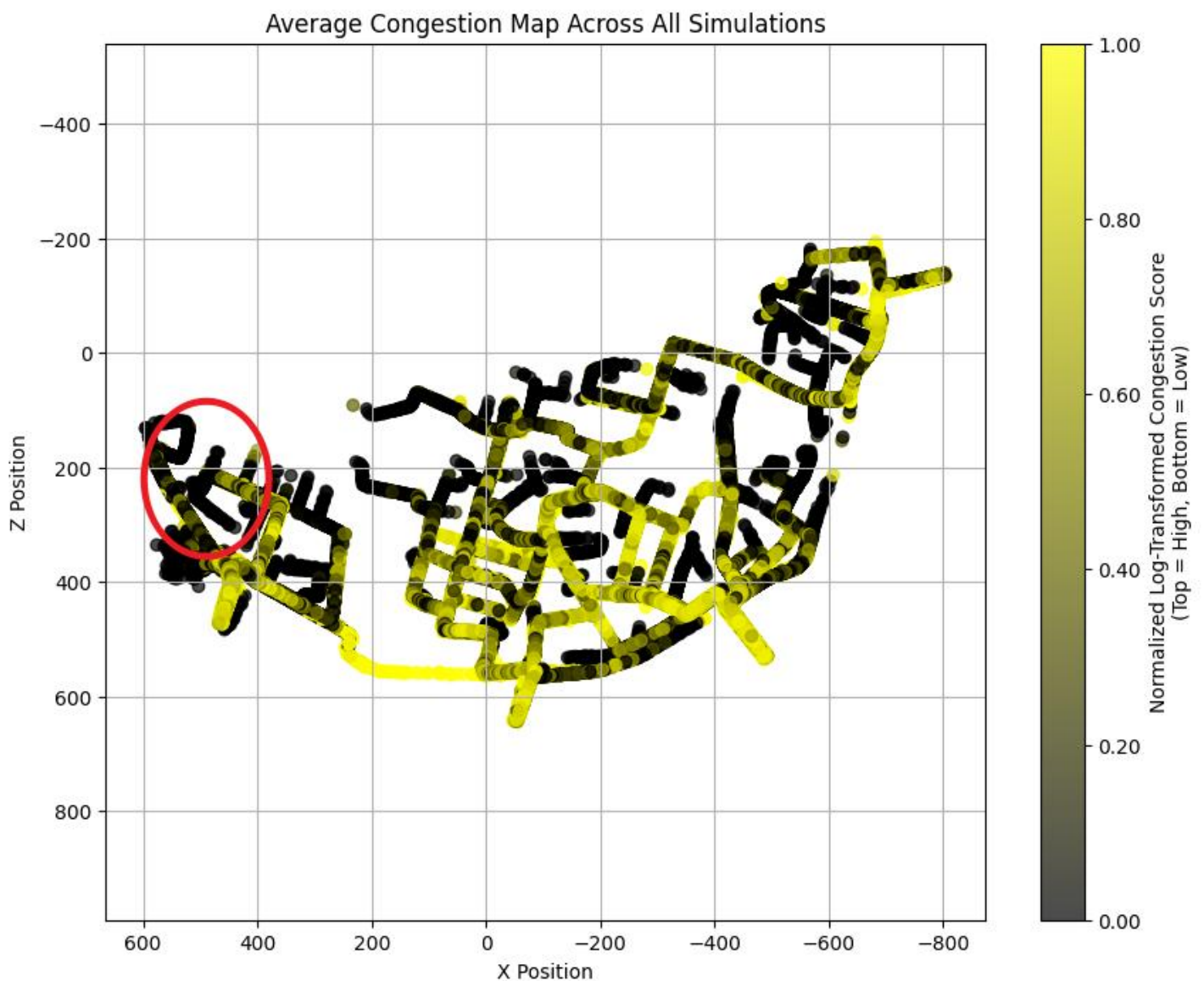
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο αριθμός των αλλαγών προορισμού (destination changes) ανά όχημα. Όπως διακρίνεται, αρκετά από τα οχήματα παρέμειναν στην αρχική τους επιλογή όπως αναμενόταν, καθώς το κλείσιμο της εξόδου που βρισκόταν σε μη-κεντρικό σημείο δεν επηρέασε ιδιαίτερα τους οδηγούς στις επιλογές τους. Παρόλα αυτά, είναι περισσότεροι οι οδηγοί που άλλαξαν την επιλογή τους σε σχέση με τις προηγούμενες φορές κάτι που θυμίζει το πιλοτικό σενάριο.



Σχήμα 4.33 Average Distribution Of Destination Change Counts Pafou Closed

4.2.2.5.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο

Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται η μέση κατανομή συμφόρησης σε όλα τα σημεία του οδικού δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως διακρίνεται, η κλειστή έξοδος δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη συμφόρηση (καθώς δεν ήταν προσβάσιμη), ενώ οι περιοχές με εντονότερο χρωματισμό υποδεικνύουν υψηλότερη συμφόρηση, η οποία επικεντρώνεται στις κοντινές εναλλακτικές εξόδους. Με άλλα λόγια, το κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου είχε ως αποτέλεσμα τη μεταφορά όλου του όγκου κυκλοφορίας, που σχετίζεται με την έξοδο, προς αυτήν στην Πλατεία Σολωμού, οδηγώντας σε αυξημένη συμφόρηση στα αντίστοιχα οδικά τμήματα.



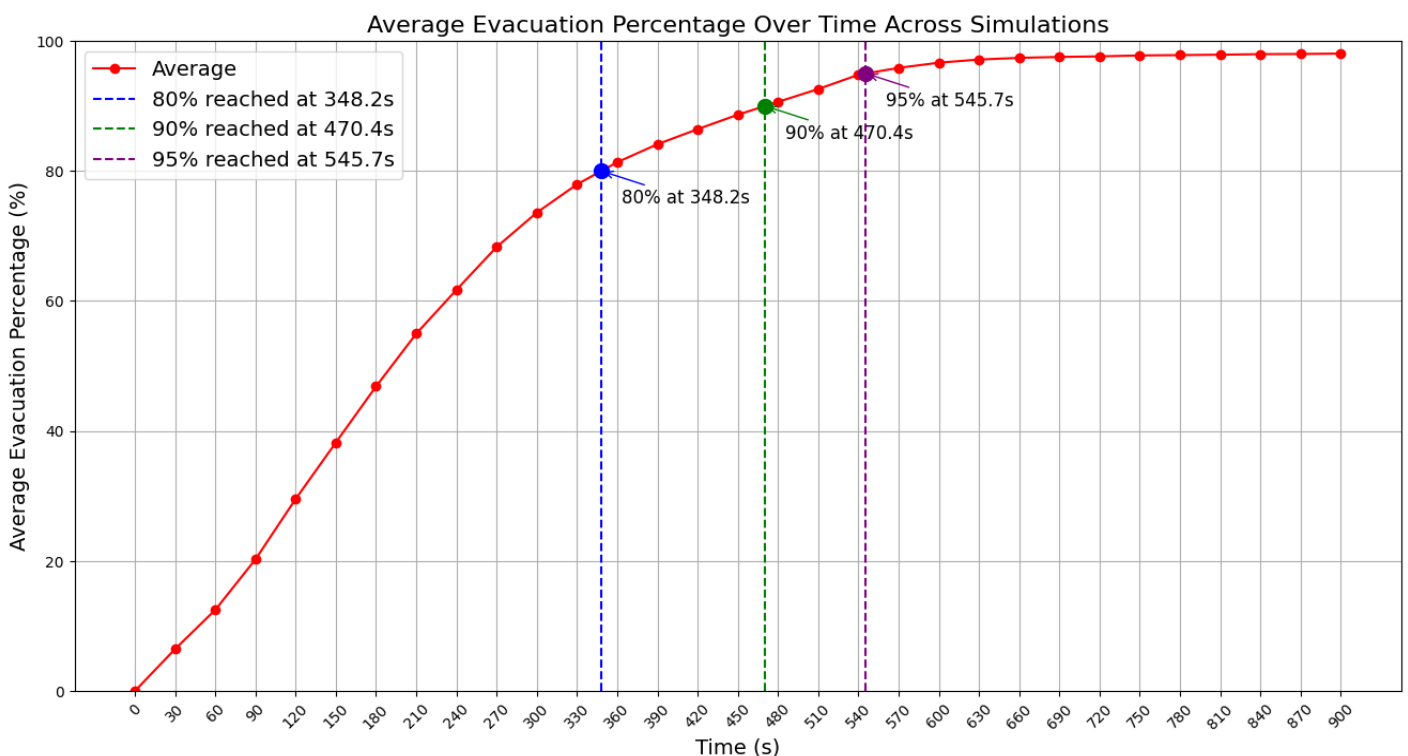
Σχήμα 4.34 Average Congestion Map Across All Simulations Pafou Closed

4.2.2.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως

Σε αυτό το σημείο, προσομοιώνεται η επίδραση του κλεισίματος του δρόμου στο ύψος της οδού "Άρεως" στην εκκένωση των οχημάτων. Ο συγκεκριμένος δρόμος καθίσταται μια κεντρική αρτηρία της πόλης καθώς όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα σενάρια αλλά και από την πιλοτική δοκιμή, μεγάλος αριθμός οχημάτων επιλέγει αυτή την οδό για την διακίνηση τους προς κάποια έξοδο. Ο στόχος της ανάλυσης είναι ο εντοπισμός του βαθμού συμφόρησης και η εκτίμηση του πώς η απώλεια μιας κρίσιμης κεντρικής αρτηρίας επιδρά στον συνολικό χρόνο εκκένωσης, καθώς και το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης. [Εδώ](#) παρουσιάζεται το σημείο που έχει κλείσει η οδός με μπλε χρώμα.

4.2.2.6.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο

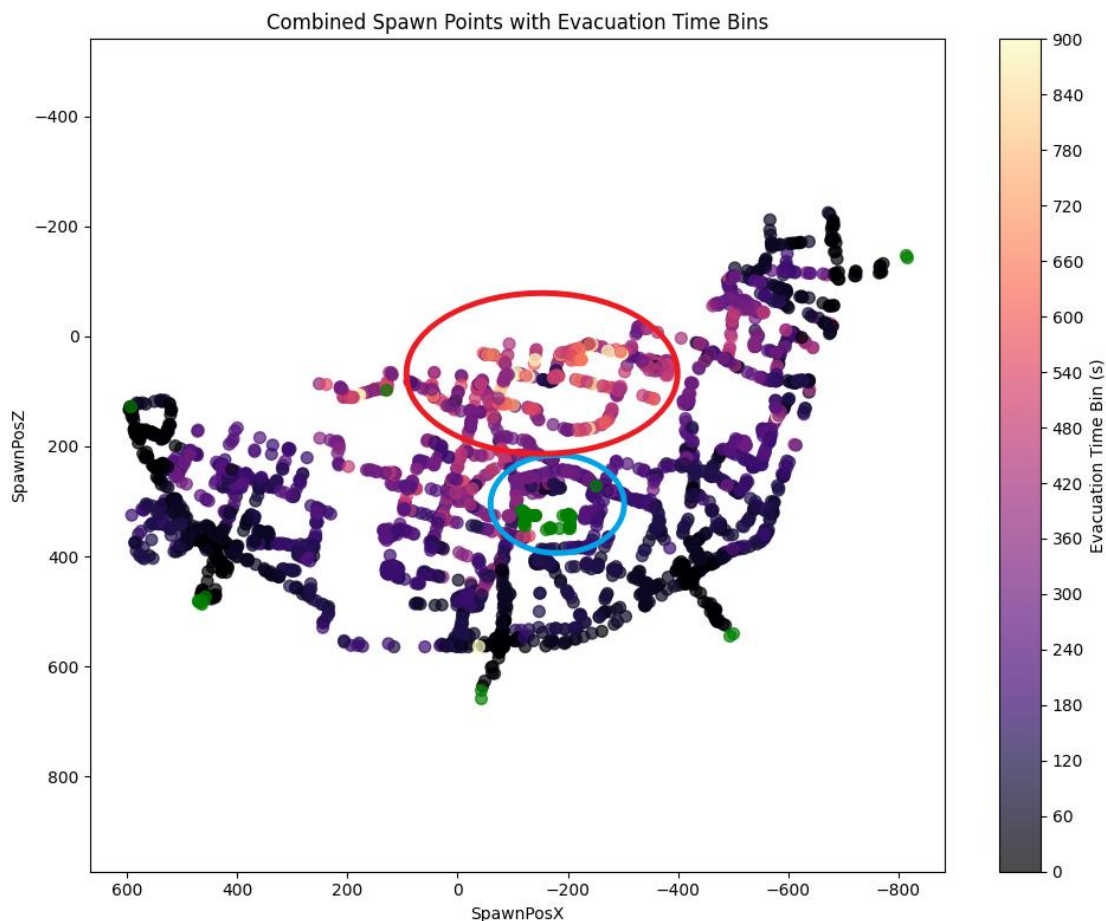
Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε ότι, η πλειονότητα των οχημάτων ολοκληρώνει την εκκένωση με το ποσοστό 98% εντός 15 λεπτών (12,5 λεπτά συγκεκριμένα). Αυτό υποδηλώνει ότι παρά το κλείσιμο της συγκεκριμένης οδού, τα οχήματα καταφέρνουν να κινηθούν στο δίκτυο χρησιμοποιώντας άλλους δρόμους, χωρίς ιδιαίτερη καθυστέρηση, καταφέροντας να εκκενώσουν κάτω από τον διαθέσιμο χρόνο. Έτσι, το 80% καταφέρει να εκκενώσει στα 348,2 δευτερόλεπτα (5,8 λεπτά), το 90% στα 470,4 (7,8 λεπτά) και το 95% στα 545,7 (9 λεπτά). Επιπρόσθετα, παρατηρείται ένα με δύο τις εκατό το οποίο δεν καταφέρει να εκκενώσει την πόλη.



Σχήμα 4.35 Average Evacuation Percentage Over Time Across Simulations Areos Closed

4.2.2.6.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης

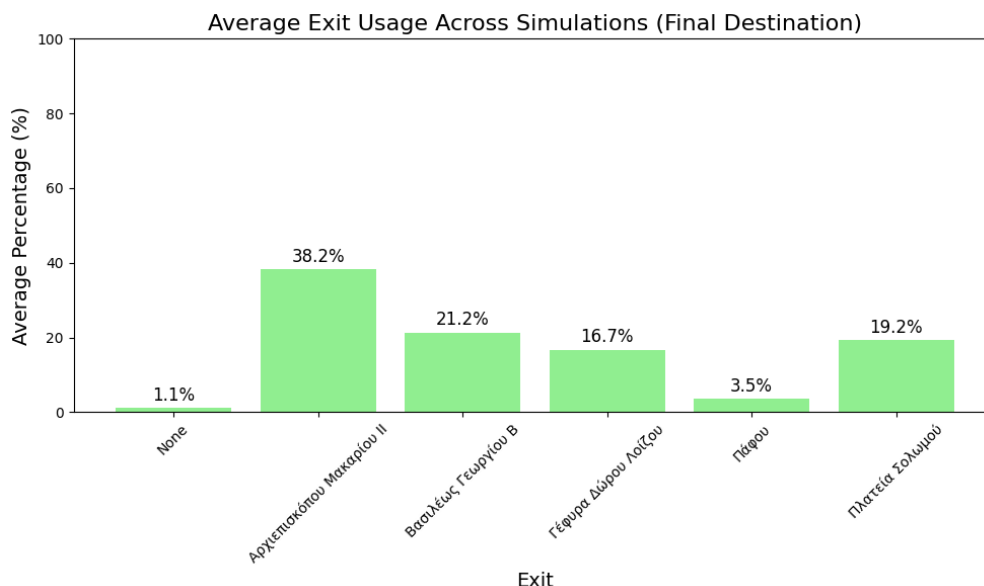
Στο παρακάτω διάγραμμα, κάθε σημείο αντιστοιχεί στη θέση εκκίνησης (spawn point) ενός πράκτορα και ο χρωματικός κώδικας υποδεικνύει τον χρόνο εκκένωσης του (σε δευτερόλεπτα), με πράσινο χρώμα αφορά αυτοκίνητα που είτε ξεκίνησαν πολύ κοντά σε έξοδο είτε δεν μπόρεσαν να υπολογίσουν κάποιο μονοπάτι προς κάποια έξοδο. Όπως διακρίνεται, οι πράκτορες που ξεκίνησαν από πιο απομακρυσμένα σημεία (ιδιαίτερα προς τα πίσω τμήματα του χάρτη, όπως φαίνεται στον κόκκινο κύκλο) χρειάστηκαν περισσότερο χρόνο για να εκκενώσουν. Όπως φαίνεται στον μπλε κύκλο, ένα μικρό ποσοστό οχημάτων δεν μπόρεσε να υπολογίσει κάποιο μονοπάτι προς κάποια έξοδο λόγω των μονόδρομων στο δίκτυο, κάτι που οφείλεται στο κλείσιμο της συγκεκριμένης οδού.



Σχήμα 4.36 Combined Spawn Points with Evacuation Time Bins Areas Closed

4.2.2.6.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων

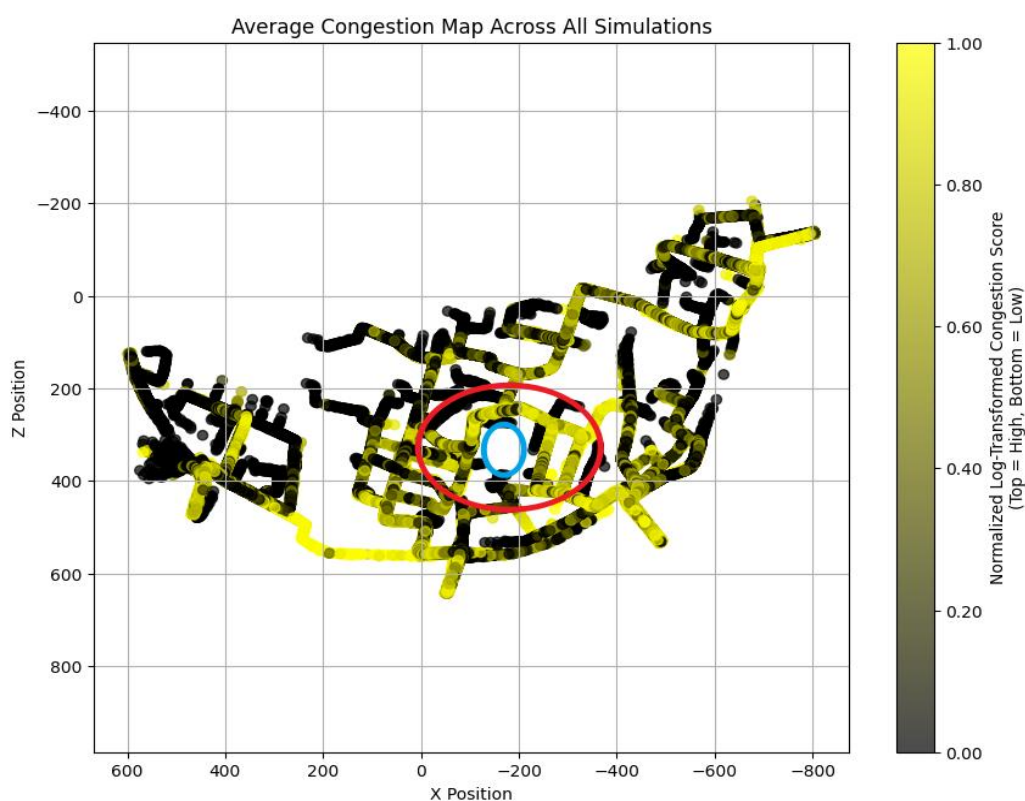
Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η κατανομή των πρακτόρων ανά έξοδο, μετά το κλείσιμο της οδού Άρεως. Όπως διαπιστώνεται, η ροή κυκλοφορίας κατευθύνθηκε κανονικά στις εξόδους πέρα από περίπου 1% που δεν τα κατάφερε.



Σχήμα 4.37 Average Exit Usage Across Simulations (Final Destination) Areos Closed

4.2.2.6.4 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο

Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται η μέση κατανομή συμφόρησης σε όλα τα σημεία του οδικού δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως διακρίνεται, η κλειστή οδός δεν παρουσιάζεται στον χάρτη καθώς δεν ήταν προσβάσιμη (με μπλε κύκλο), ενώ οι περιοχές με εντονότερο χρωματισμό υποδεικνύουν υψηλότερη συμφόρηση, η οποία επικεντρώνεται στις κοντινές εναλλακτικές διαδρομές όπως φαίνεται μέσα στον κόκκινο κύκλο.



Σχήμα 4.38 Average Congestion Map Across All Simulations Areos Closed

Κεφάλαιο 5

Συζήτηση

Στο Κεφάλαιο 5, θα διεξαχθεί μια εις βάθος συζήτηση σχετικά με τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων προσομοίωσης, συγκρίνοντάς τα με την πιλοτική δοκιμή που αποτελεί το σημείο αναφοράς (baseline). Η ανάλυση αυτή αποσκοπεί στην ανάδειξη των επιπτώσεων που επιφέρει κάθε σενάριο στην απόδοση της διαδικασίας εκκένωσης, με έμφαση στα ποσοστά εκκένωσης και τα μοτίβα κίνησης των οχημάτων στο οδικό δίκτυο. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν γενικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα αποτελέσματα, με σκοπό την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του υπάρχοντος συστήματος και την πρόταση βελτιώσεων για μελλοντικές εφαρμογές σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

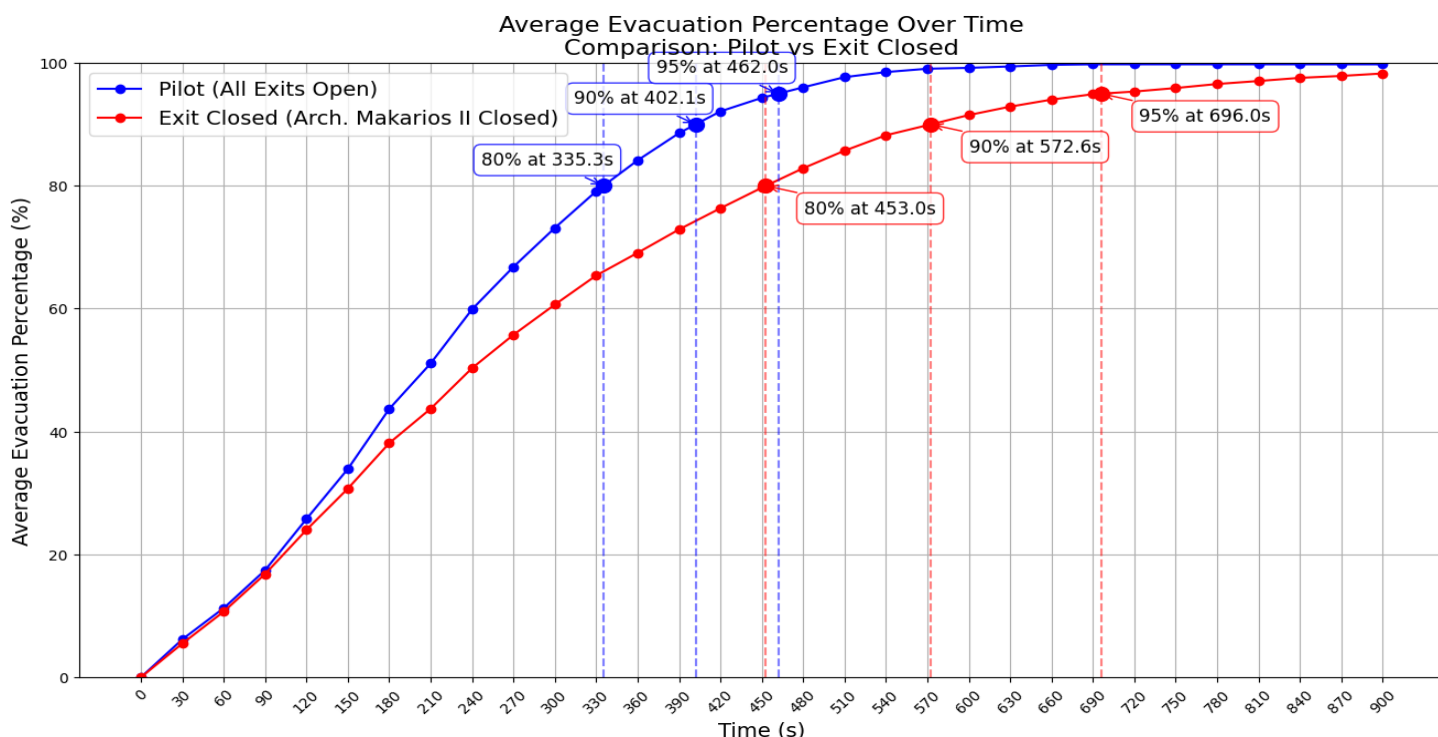
5.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίων με Πιλοτική Δοκιμή

Η ενότητα αυτή εστιάζει στη σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης με την πιλοτική δοκιμή, η οποία χρησίμευσε ως σημείο αναφοράς για την ανάλυση. Σε αυτό το πλαίσιο, εξετάζονται οι κύριες μετρικές που αξιολογούν την απόδοση της διαδικασίας εκκένωσης (όπως ο μέσος χρόνος εκκένωσης, το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης, οι αλλαγές προορισμού και η κατανομή των οχημάτων σε σχέση με τις εξόδους), συγκρίνοντας τις τιμές που προκύπτουν από την πιλοτική δοκιμή με αυτές που παρατηρήθηκαν στα διαδοχικά σενάρια όπου εφαρμόστηκαν διαφορετικές προσαρμογές (π.χ. κλείσιμο εξόδων). Μέσα από αυτή τη σύγκριση, αποδεικνύονται οι επιπτώσεις που έχουν οι μεταβολές στο οδικό δίκτυο και η απώλεια μιας εξόδου στους συνολικούς χρόνους απόκρισης και στα ποσοστά εκκένωσης, προσφέροντας μια σαφή εικόνα για τα δυνατά σημεία, τις αδυναμίες και τις πιθανές βελτιώσεις στο υπάρχον σύστημα.

5.1.1 Ποσοστό εκκένωσης σε σχέση με τον χρόνο

Εδώ θα παραθέσουμε τις διαφορές στο μέσο χρόνο εκκένωσης και στη καμπύλη που ακολουθεί το ποσοστό εκκένωσης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από την πιλοτική δοκιμή με τα αποτελέσματα από το κλείσιμο της εκάστοτε εξόδου.

5.1.1.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II



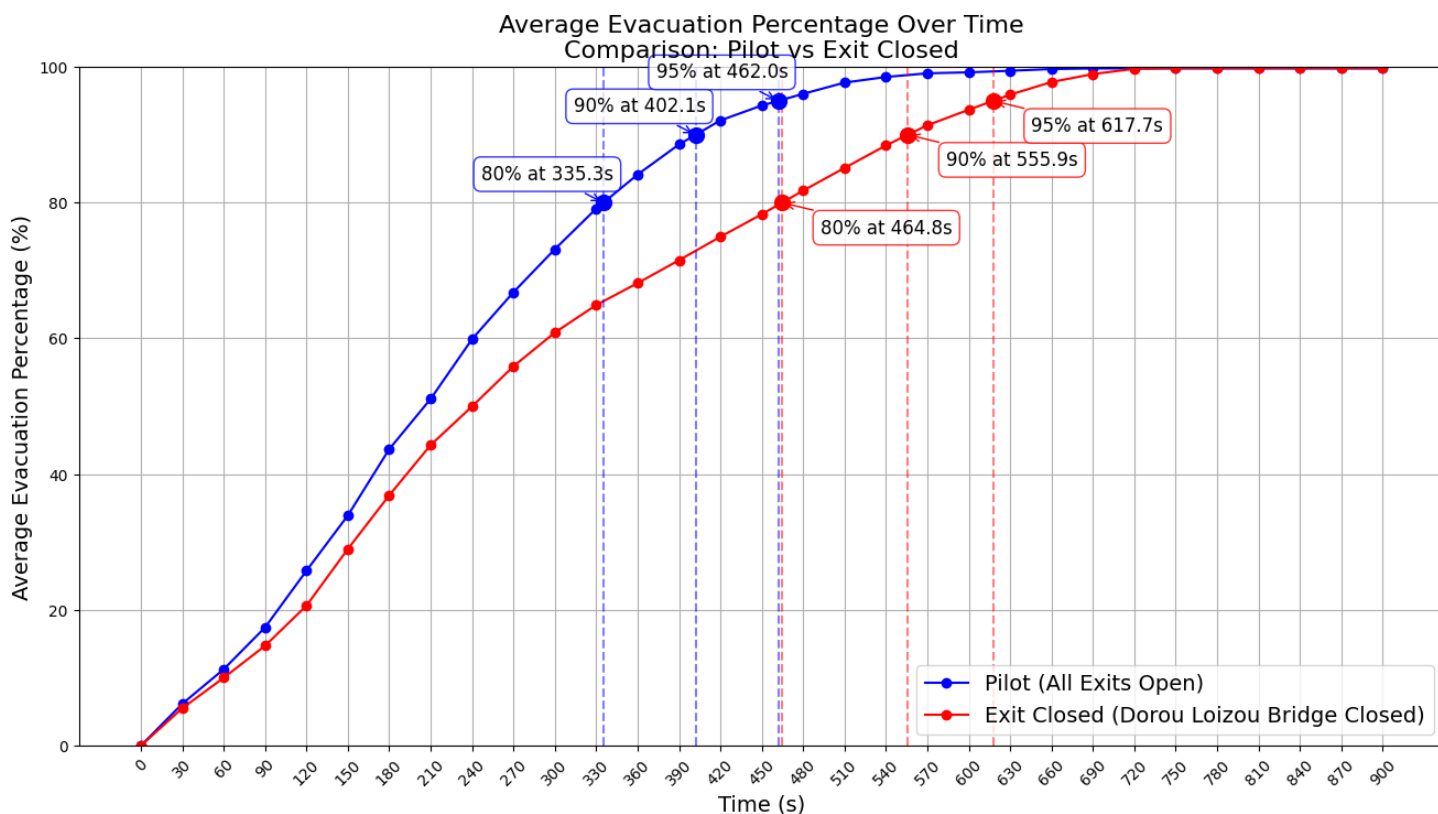
Σχήμα 5.1 Average Evacuation Percentage Over Time Comparison: Pilot vs Makariou Closed

Όπως διακρίνεται στο παραπάνω γράφημα, το κλείσιμο της Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II επιφέρει σημαντική καθυστέρηση στην ολοκλήρωση της εκκένωσης σε σύγκριση με την πιλοτική δοκιμή, όπου όλες οι εξοδοί ήταν διαθέσιμες. Συγκεκριμένα, για τα βασικά ποσοστά εκκένωσης παρατηρούμε τα εξής:

- Για το 80% της εκκένωσης, ο χρόνος αυξήθηκε από περίπου 335 δευτερόλεπτα (πιλοτική δοκιμή) σε 453 δευτερόλεπτα στο σενάριο του κλεισίματος, δηλαδή μια διαφορά περίπου 118 δευτερολέπτων.
- Για το 90% της εκκένωσης, η διαφορά είναι 170 δευτερόλεπτα (402 vs. 572).
- Τέλος, για το 95% της εκκένωσης, η χρονική απόκλιση αγγίζει τα 234 δευτερόλεπτα (462 vs. 696).

Υπολογίζοντας τον μέσο όρο αυτών των διαφορών, προκύπτει ότι, κατά μέσο όρο, απαιτούνται επιπλέον περίπου 174 δευτερόλεπτα (3 περίπου λεπτά) για την ολοκλήρωση της εκκένωσης όταν η Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II είναι κλειστή. Αυτή η αύξηση στον χρόνο εκκένωσης αποδεικνύει το σημαντικό αντίκτυπο που έχει το κλείσιμο της εν λόγω κεντρικής εξόδου καθώς οι οδηγοί αναγκάζονται να στραφούν σε άλλες, πιο απόμακρες εξόδους, δημιουργώντας εντονότερη συμφόρηση σε αυτές και δυσχεραίνοντας το έργο της εκκένωσης.

5.1.1.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου



Σχήμα 5.2 Average Evacuation Percentage Over Time Comparison: Pilot vs D. Loizou Bridge Closed

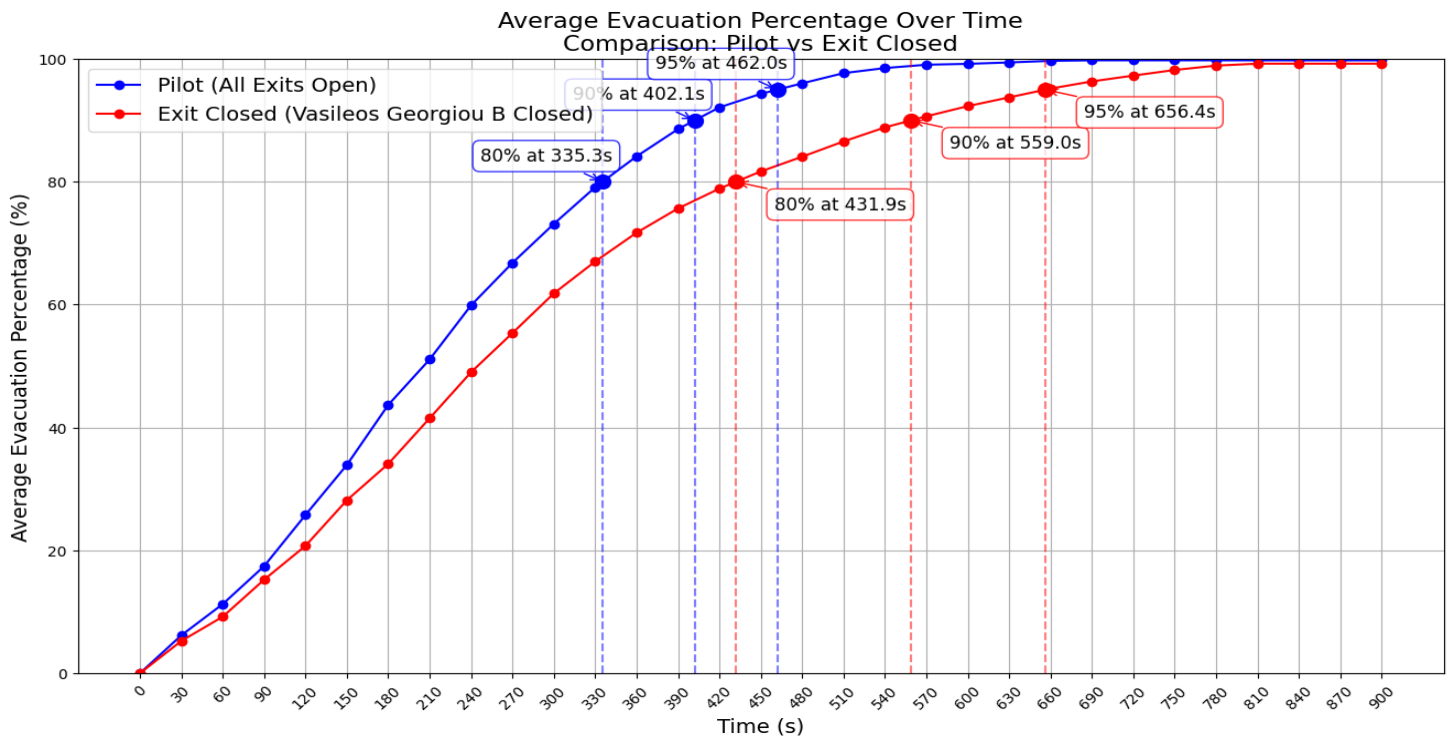
Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, το κλείσιμο της Γέφυρας Δώρου Λοΐζου επιφέρει επίσης αισθητή αύξηση στους χρόνους εκκένωσης σε σύγκριση με την πιλοτική δοκιμή (όλες οι εξοδοί ανοιχτές). Συγκεκριμένα:

- Για το 80% της εκκένωσης, ο χρόνος αυξήθηκε από περίπου 335,3 δευτερόλεπτα (πιλοτική δοκιμή) σε 464,8 δευτερόλεπτα στο σενάριο του κλεισίματος, δηλαδή μια διαφορά περίπου 129,5 δευτερολέπτων.
- Για το 90% της εκκένωσης, η διαφορά είναι περίπου 153,8 δευτερόλεπτα (402,1 vs. 555,9).
- Τέλος, για το 95% της εκκένωσης, η χρονική απόκλιση αγγίζει τα 155,7 δευτερόλεπτα (462,0 vs. 617,7).

Υπολογίζοντας τον μέσο όρο αυτών των διαφορών, προκύπτει ότι απαιτούνται επιπλέον περίπου 146 δευτερόλεπτα (2.4 λεπτά) για την ολοκλήρωση της εκκένωσης, όταν η Γέφυρα Δώρου Λοΐζου παραμένει κλειστή, παρομοίως με την έξοδο [Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II](#) αφού βρίσκονται σε σχετικά κοντινές αποστάσεις και είναι αναμενόμενο. Αυτό αναδεικνύει

την επίπτωση που έχει το συγκεκριμένο κλείσιμο στη διαχείριση της κυκλοφορίας, καθώς οι οδηγοί αναγκάζονται να αναζητήσουν πιο απομακρυσμένες ή λιγότερο βολικές εξόδους, παρατείνοντας σημαντικά τον συνολικό χρόνο εκκένωσης.

5.1.1.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β



Σχήμα 5.3 Average Evacuation Percentage Over Time Comparison: Pilot vs V. Georgiou B Closed

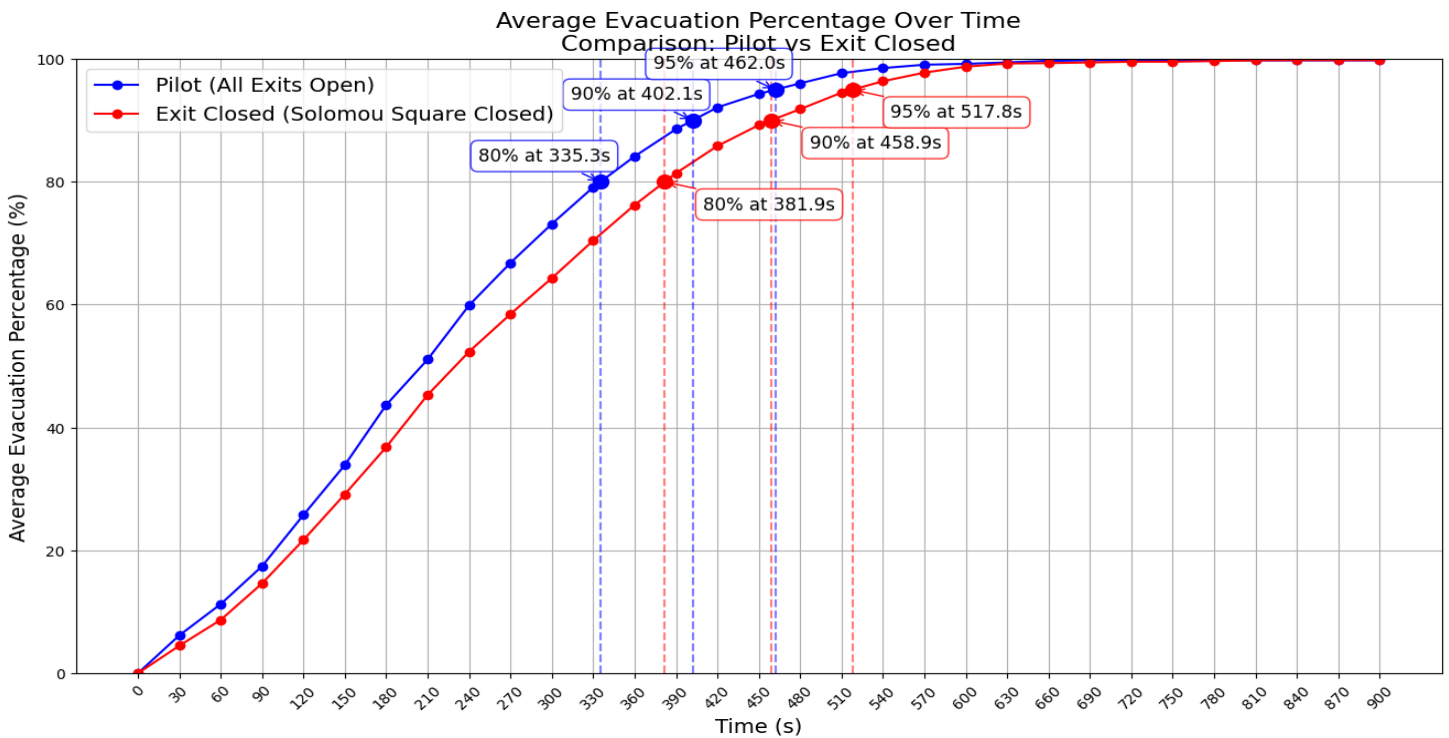
Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα, το κλείσιμο της εξόδου στην οδό Βασιλέως Γεωργίου Β προκαλεί επίσης επιβάρυνση στον χρόνο εκκένωσης σε σχέση με το σενάριο-βάση (όλες οι εξοδοί ανοιχτές). Συγκεκριμένα:

- Για το 80% της εκκένωσης, παρατηρείται αύξηση περίπου 96,6 δευτερολέπτων.
- Για το 90% της εκκένωσης, αύξηση περίπου 156.9 δευτερόλεπτα (402.1 έναντι 559).
- Για το 95% της εκκένωσης, αύξηση περίπου 194.4 δευτερόλεπτα (462 έναντι 656.4).

Ο μέσος όρος των παραπάνω διαφορών αντιστοιχεί σε περίπου 149.3 επιπλέον δευτερόλεπτα (2.5 λεπτά), που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της εκκένωσης όταν η έξοδος στην οδό Βασιλέως Γεωργίου Β είναι κλειστή. Αυτό αναδεικνύει μια αρκετά σημαντική χρονική επιβάρυνση αλλά και πως το κλείσιμο αυτής της εξόδου δεν έχει τόσο

μεγάλο αντίκτυπο όσο έχουν οι προηγούμενες 2 εξοδοί που βρίσκονταν σε πιο κεντρικό σημείο της πόλης.

5.1.1.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού



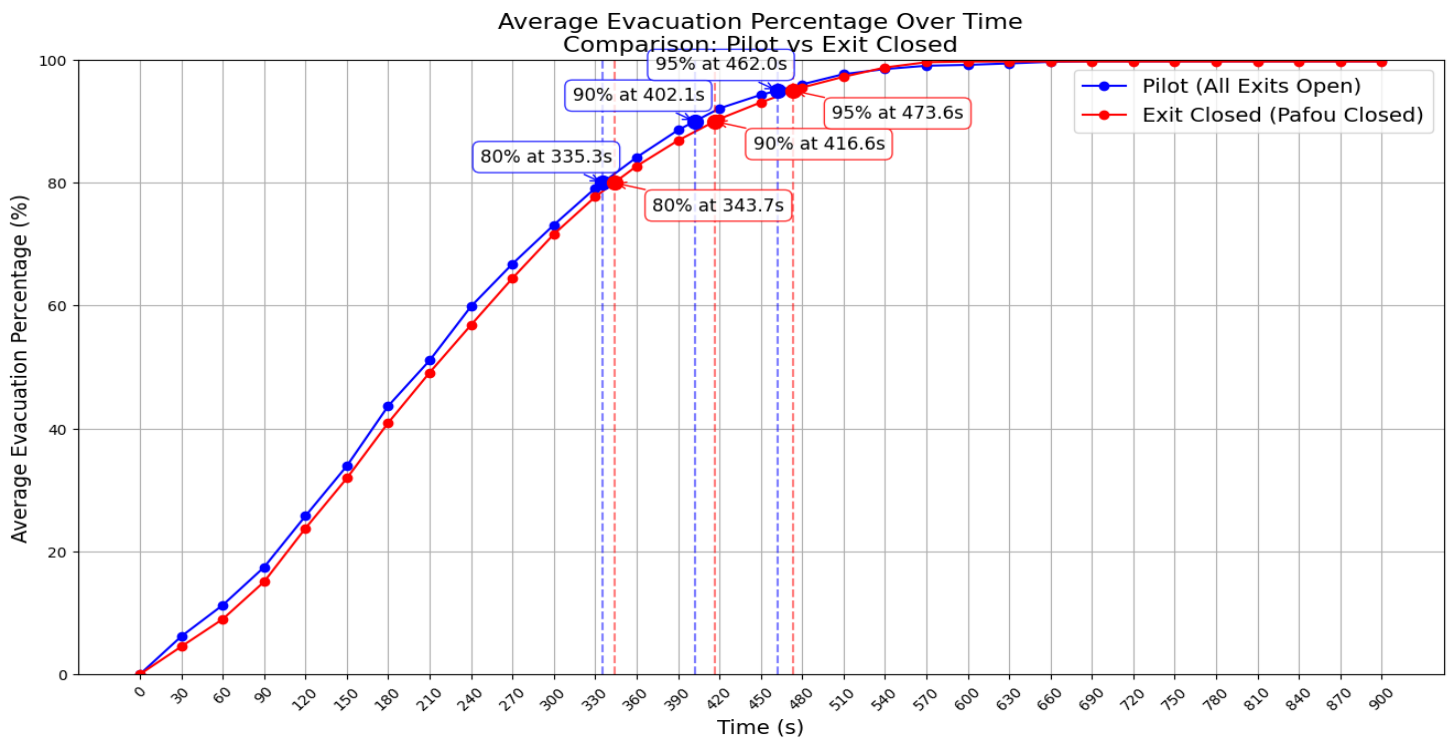
Σχήμα 5.4 Average Evacuation Percentage Over Time Comparison: Pilot vs Solomou Square Closed

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα, το κλείσιμο της εξόδου στην Πλατεία Σολωμού προκαλεί μικρή επιβάρυνση στον χρόνο εκκένωσης σε σχέση με το σενάριο-βάση (όλες οι εξοδοί ανοιχτές). Συγκεκριμένα:

- Για το 80% της εκκένωσης, παρατηρείται αύξηση περίπου 46,6 δευτερολέπτων.
- Για το 90% της εκκένωσης, αύξηση περίπου 56.8 δευτερόλεπτα (402.1 έναντι 458,9).
- Για το 95% της εκκένωσης, αύξηση περίπου 55,8 δευτερόλεπτα (462 έναντι 517,8).

Ο μέσος όρος των παραπάνω διαφορών αντιστοιχεί σε περίπου 53 επιπλέον δευτερόλεπτα (σχεδόν 1 λεπτό), που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της εκκένωσης όταν η έξοδος στην Πλατεία Σολωμού είναι κλειστή. Αυτό αναδεικνύει μια μικρή χρονική επιβάρυνση αλλά και πως το κλείσιμο αυτής της εξόδου δεν έχει μεγάλο αντίκτυπο σε σχέση με το αντίκτυπο που έχουν οι προηγούμενες εξοδοί που βρίσκονταν σε πιο κεντρικά σημεία της πόλης.

5.1.1.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου



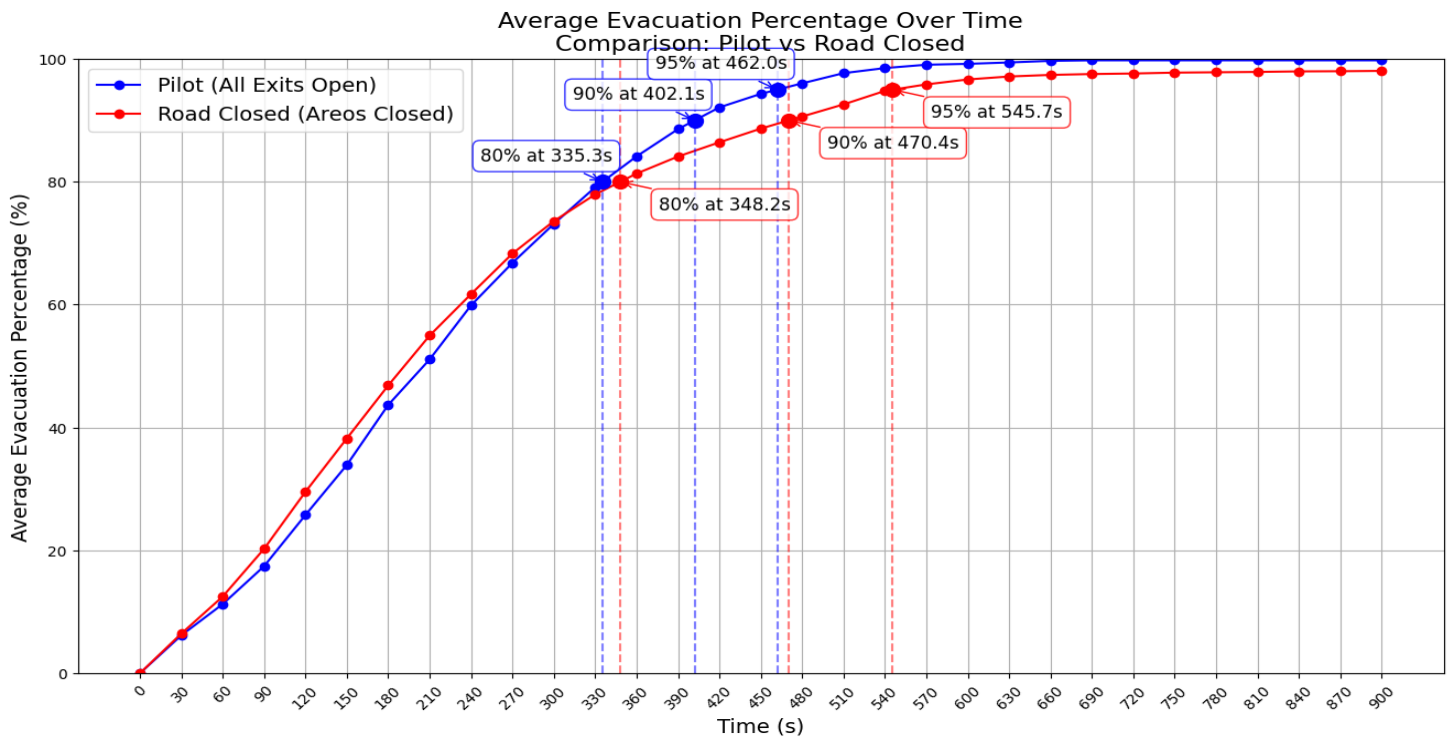
Σχήμα 5.5 Average Evacuation Percentage Over Time Comparison: Pilot vs Pafou Closed

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα, το κλείσιμο της εξόδου στην οδό Πάφου προκαλεί ακόμη μικρότερη επιβάρυνση στον χρόνο εκκένωσης σε σχέση με το σενάριο-βάση (όλες οι εξοδοί ανοιχτές). Συγκεκριμένα:

- Για το 80% της εκκένωσης, παρατηρείται αύξηση περίπου 8,4 δευτερολέπτων.
- Για το 90% της εκκένωσης, αύξηση περίπου 14,5 δευτερόλεπτα (402.1 έναντι 416,6).
- Για το 95% της εκκένωσης, αύξηση περίπου 11,6 δευτερόλεπτα (462 έναντι 473,6).

Ο μέσος όρος των παραπάνω διαφορών αντιστοιχεί σε περίπου 11 επιπλέον δευτερόλεπτα, που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της εκκένωσης όταν η έξοδος στην οδό Πάφου είναι κλειστή. Αυτό αναδεικνύει μια πολύ μικρή χρονική επιβάρυνση αλλά και πως το κλείσιμο αυτής της εξόδου δεν έχει σχεδόν καθόλου αντίκτυπο στο χρόνο εκκένωσης σε σχέση με άλλες πιο κεντρικές εξοδοί, όπως οι εξοδοί στην [Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II](#) και στη [Γέφυρα Δώρου Λοΐζου](#).

5.1.1.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως



Σχήμα 5.6 Average Evacuation Percentage Over Time Comparison: Pilot vs Areos Closed

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα, το κλείσιμο της οδού Άρεως προκαλεί πολύ μικρή επιβάρυνση στον χρόνο εκκένωσης σε σχέση με το σενάριο-βάση (όλες οι έξοδοι ανοιχτές). Συγκεκριμένα:

- Για το 80% της εκκένωσης, παρατηρείται αύξηση περίπου 12,9 δευτερολέπτων.
- Για το 90% της εκκένωσης, αύξηση περίπου 68,3 δευτερόλεπτα (402.1 έναντι 470,4).
- Για το 95% της εκκένωσης, αύξηση περίπου 83,7 δευτερόλεπτα (462 έναντι 545,7).

Ο μέσος όρος των παραπάνω διαφορών αντιστοιχεί σε περίπου 55 επιπλέον δευτερόλεπτα, που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της εκκένωσης όταν η οδός Άρεως είναι κλειστή. Αυτό αναδεικνύει μια αρκετά μικρή χρονική επιβάρυνση αλλά και πως το κλείσιμο αυτής της οδού δεν έχει καθοριστικό αντίκτυπο τόσο στον χρόνο εκκένωσης της πόλης όσο στο ότι πιθανόν να υπάρξουν εγκλωβισμένα οχήματα λόγω της εφαρμογής μονόδρομων ρυθμίσεων στο οδικό δίκτυο.

5.1.2 Σημεία Έναρξης σε σχέση με τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης

Εδώ θα παραθέσουμε τις διαφορές στον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης σε σχέση με την θέση εκκίνησης του κάθε αυτοκινήτου, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από την [πilotική δοκιμή](#) με τα αποτελέσματα από το κλείσιμο της εκάστοτε εξόδου.

5.1.2.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II

Σε αυτό το κομμάτι συγκρίνεται ο χρόνος εκκένωσης των πρακτόρων σε σχέση με την αρχική τους θέση (spawn point) για την [πilotική δοκιμή](#) και το σενάριο με κλειστή την [Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II](#). Στην pilotική δοκιμή, οι πράκτορες που βρίσκονται στο “βάθος” της πόλης διατηρούν μια σχετικά ομαλή πρόσβαση στις διαθέσιμες εξόδους, με αποτέλεσμα ο χρόνος εκκένωσης τους να παραμένει εντός λογικών ορίων. Αντίθετα, στο σενάριο όπου κλείνει η Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II, διακρίνεται σημαντική αύξηση στον χρόνο εκκένωσης, ιδιαίτερα για τα οχήματα που ξεκινούν στο βάθος της παλιάς πόλης. Καθώς η ροή της κυκλοφορίας αναγκάζεται να ανακατευθυνθεί προς τις υπόλοιπες διαθέσιμες εξόδους (όπως η Γέφυρα Δώρου Λοΐζου), η συμφόρηση στα εν λόγω σημεία αυξάνεται αισθητά. Αυτό έχει ως συνέπεια ορισμένοι πράκτορες να διανύουν μεγαλύτερη απόσταση ή να περιμένουν σε κυκλοφοριακές ουρές, αυξάνοντας τον συνολικό χρόνο εκκένωσης τους σε σχέση με την pilotική δοκιμή. Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι η μη διαθεσιμότητα της εξόδου στην οδό Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II οδηγεί σε μια άνιση κατανομή του φόρτου κυκλοφορίας, με τους πιο απομακρυσμένους πράκτορες να πλήττονται περισσότερο. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την κρισιμότητα κάθε εξόδου για τη διασφάλιση ομαλής εκκένωσης και αναδεικνύει την ανάγκη για εναλλακτικές διαδρομές ή επιπρόσθετα μέτρα που θα διευκολύνουν τη ροή της κυκλοφορίας όταν μια βασική έξοδος μένει εκτός λειτουργίας.

5.1.2.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου

Στο παρόν τμήμα συγκρίνεται ο χρόνος εκκένωσης σε σχέση με το σημείο έναρξης κάθε οχήματος, για την [πilotική δοκιμή](#) και το σενάριο όπου η [Γέφυρα Δώρου Λοΐζου](#) είναι κλειστή. Όπως παρατηρείται, η έλλειψη αυτής της καθοριστικής εξόδου οδηγεί σε αισθητή αύξηση του χρόνου εκκένωσης, κυρίως για τα οχήματα που βρίσκονται πιο βαθιά στην πόλη ή κοντά στο κέντρο, δεδομένου ότι πρέπει πλέον να καταφύγουν σε άλλες εξόδους που συχνά απέχουν περισσότερο από την αρχική τους θέση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανακατεύθυνση σημαντικού αριθμού οδηγών προς τις υπόλοιπες εξόδους, προκαλώντας μεγαλύτερη συμφόρηση και καθυστερήσεις στις διαδρομές. Σε σύγκριση με την pilotική

δοκιμή, όπου οι ροές ήταν πιο ομαλές και τα οχήματα μπορούσαν να επιλέξουν την πιο κοντινή έξοδο, το κλείσιμο της Γέφυρας Δώρου Λοΐζου δυσχεραίνει σημαντικά την εκκένωση για εκείνους που βρίσκονται σε λιγότερο προνομιακές θέσεις στο δίκτυο και πρέπει να καταφύγουν είτε στην Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II είτε στην Πλατεία Σολωμού, οι οποίες είναι οι επόμενες πιο κοντινές.

5.1.2.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β

Συνεχίζοντας, συγκρίνω τον χρόνο εκκένωσης για την [πilotική δοκιμή](#) και για το σενάριο με κλειστή την έξοδο στη [Βασιλέως Γεωργίου Β](#). Εδώ διακρίνεται μια σημαντική αύξηση στους χρόνους εκκένωσης για τα οχήματα που βρίσκονται δεξιά στον χάρτη, καθώς αναγκάζονται να αναζητήσουν εναλλακτικές διαδρομές, κυρίως μέσω της Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II. Ωστόσο, η διαδρομή αυτή ήδη επιβαρύνεται από επιπλέον κίνηση, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερες καθυστερήσεις και συμφόρηση σε σχέση με την pilotική δοκιμή, όπου η πρόσβαση στη Βασιλέως Γεωργίου Β ήταν ελεύθερη και οι ροές κυκλοφορίας ήταν πιο ισορροπημένες.

5.1.2.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού

Συγκρίνοντας τη [πilotική δοκιμή](#) με το σενάριο στο οποίο κλείνει η έξοδος στην [Πλατεία Σολωμού](#), όπως διαπιστώνεται, οι χρόνοι εκκένωσης στα σημεία που βρίσκονται στα αριστερά του χάρτη παρουσιάζουν μόνο μια πολύ ελαφρά αύξηση σε σχέση με την pilotική δοκιμή, καθώς υπάρχει κοντινή έξοδος που μπορεί να καλύψει τις ανάγκες αυτών των πρακτόρων. Στην προκειμένη περίπτωση, η έξοδος της Πάφου αναλαμβάνει μεγάλο ποσοστό του φόρτου που υπό κανονικές συνθήκες θα κάλυπτε η Πλατεία Σολωμού, χωρίς να προκαλέσει έντονη συμφόρηση όπως παρατηρήθηκε σε προηγούμενα σενάρια. Ως εκ τούτου, το κλείσιμο της Πλατείας Σολωμού δεν ασκεί τόσο δραματική επίδραση στον συνολικό χρόνο εκκένωσης, σε σύγκριση με άλλες, περισσότερο κρίσιμες εξόδους.

5.1.2.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου

Συνεχίζοντας την σύγκριση ανάμεσα στην [πilotική δοκιμή](#) (με όλες τις εξόδους ανοιχτές) και το σενάριο στο οποίο κλείνει η έξοδος στην οδό [Πάφου](#). Όπως παρατηρείται, η διαφορά στους χρόνους εκκένωσης είναι αμελητέα, ιδιαίτερα στην αριστερή πλευρά του χάρτη, όπου βρίσκεται η έξοδος που έκλεισε. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η έξοδος στην οδό Πάφου εξυπηρετούσε συγκριτικά λίγους πράκτορες, οι οποίοι, σε περίπτωση μη διαθεσιμότητάς της, στρέφονται εύκολα προς την Πλατεία Σολωμού. Κατά συνέπεια, δεν δημιουργείται

σημαντική ανακατανομή κυκλοφορίας ή έντονη συμφόρηση, σε αντίθεση με τα σενάρια όπου η διακοπή αφορούσε πιο κεντρικές και πολυσύχναστες εξόδους.

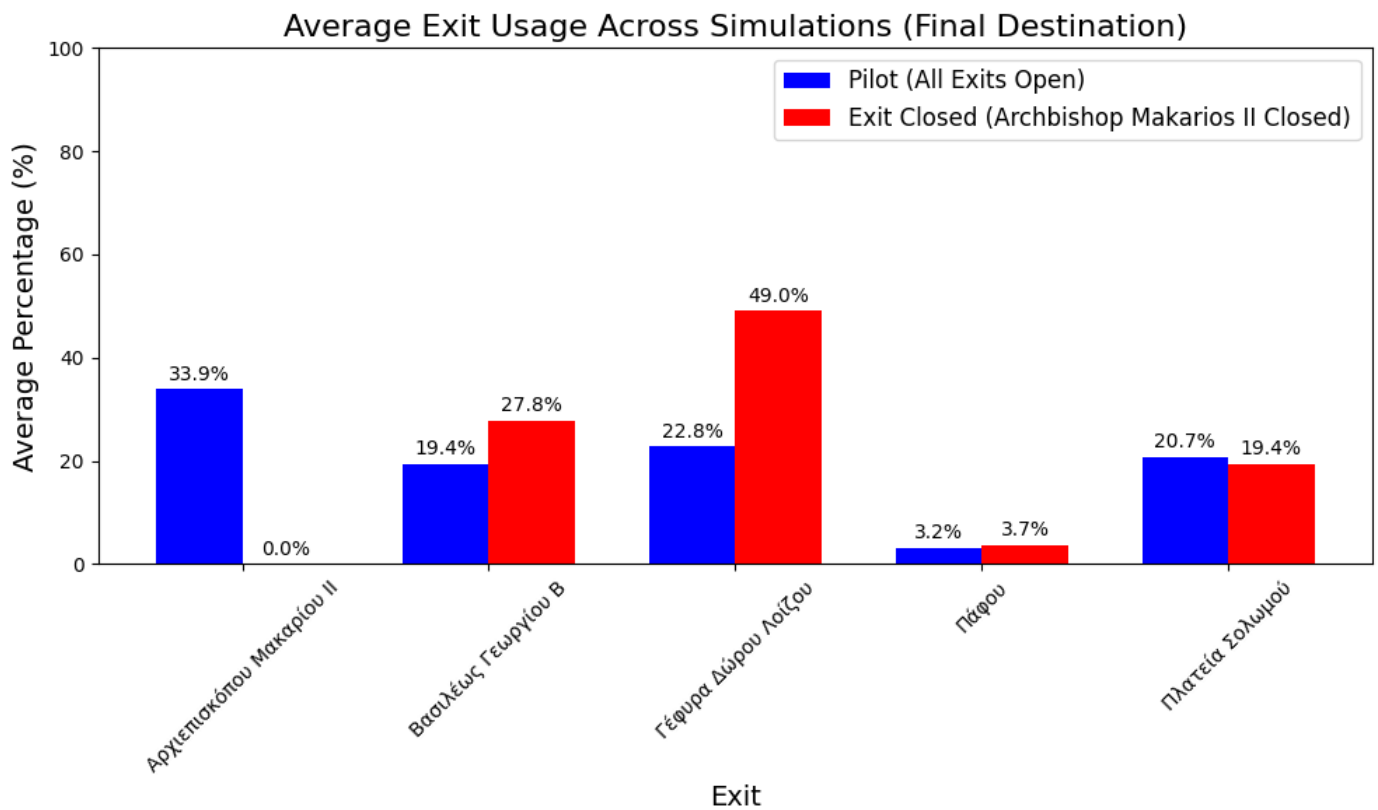
5.1.2.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως

Συγκρίνοντας τώρα πως επηρεάζεται, ο χρόνος εκκένωσης των πρακτόρων σε σχέση με την αρχική τους θέση (spawn point) για την [πilotική δοκιμή](#) και το σενάριο με κλειστή την [οδό Άρεως](#). Στην pilotική δοκιμή, οι πράκτορες που βρίσκονται στο βάθος της πόλης διατηρούν μια σχετικά ομαλή πρόσβαση στις διαθέσιμες εξόδους όπως έχω προαναφέρει, με αποτέλεσμα ο χρόνος εκκένωσης τους να παραμένει εντός λογικών ορίων. Αντίθετος, στο σενάριο όπου κλείνει η Άρεως, διακρίνεται σημαντική αύξηση στον χρόνο εκκένωσης, ιδιαίτερα για τα οχήματα που ξεκινούν στο βάθος της παλιάς πόλης, όπου ήταν ήδη περισσότερο επηρεασμένα, καθώς η ροή της κυκλοφορίας αναγκάζεται να ανακατευθυνθεί προς τις εξόδους χρησιμοποιώντας άλλους δρόμους που ενδεχομένως να μην είναι βέλτιστοι. Αυτό έχει ως συνέπεια ορισμένοι πράκτορες να διανύουν μεγαλύτερη απόσταση ή να περιμένουν σε κυκλοφοριακές ουρές, αυξάνοντας τον συνολικό χρόνο εκκένωσης τους σε σχέση με την pilotική δοκιμή. Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι η μη διαθεσιμότητα της συγκεκριμένης οδού οδηγεί σε μια αύξηση του φόρτου κυκλοφορίας, με τους πιο απομακρυσμένους πράκτορες να πλήττονται περισσότερο. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την κρισιμότητα κάθε δρόμου για τη διασφάλιση ομαλής εκκένωσης και αναδεικνύει την ανάγκη για εναλλακτικές διαδρομές ή επιπρόσθετα μέτρα που θα διευκολύνουν τη ροή της κυκλοφορίας όταν μια βασική αρτηρία δεν είναι προσπελάσιμη.

5.1.3 Ποσοστά Χρήσης Εξόδων

Εδώ θα παραθέσουμε τις διαφορές στα ποσοστά χρήσης της κάθε εξόδου συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από την pilotική δοκιμή με τα αποτελέσματα από το κλείσιμο της εκάστοτε εξόδου.

5.1.3.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II

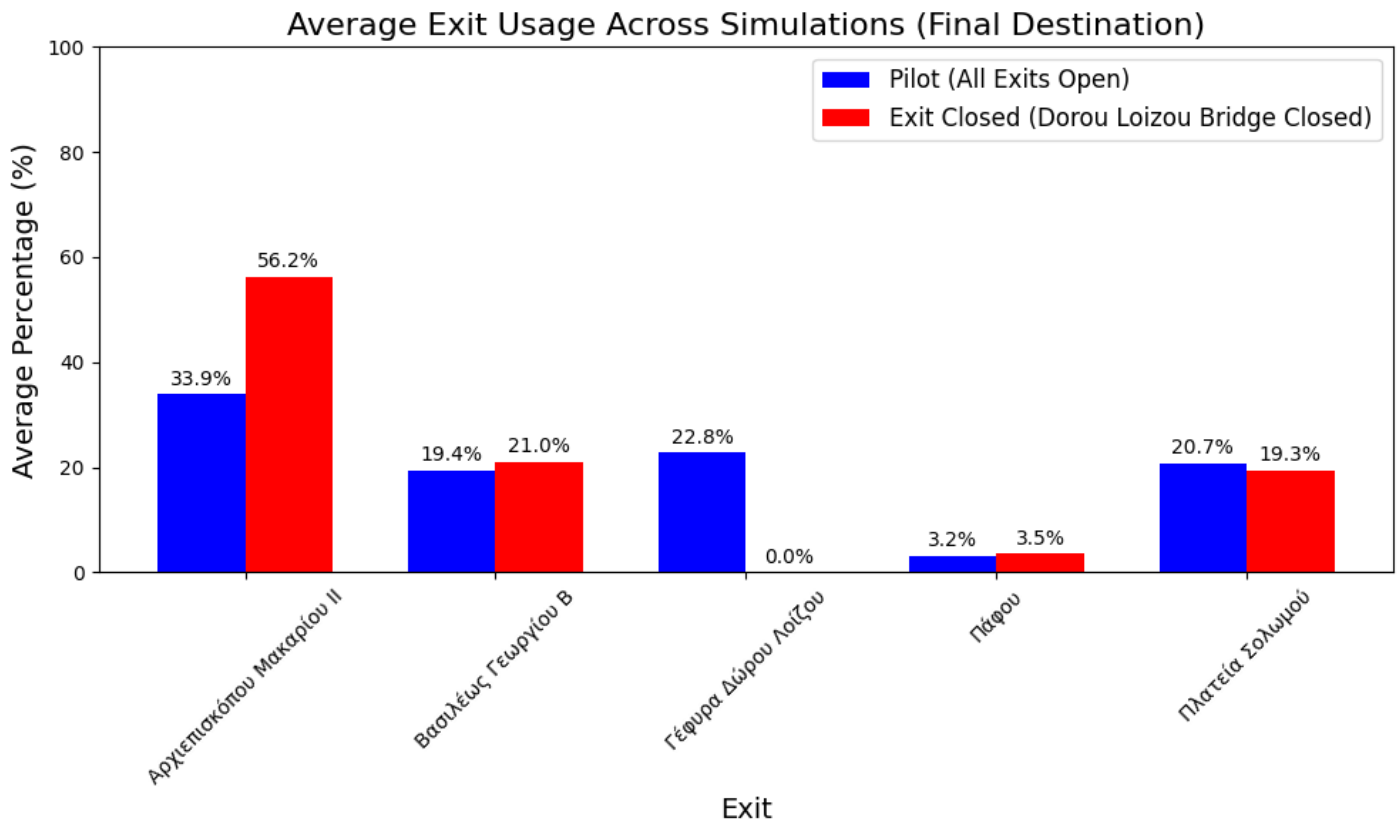


Σχήμα 5.7 Average Exit Usage Across Simulations Pilot vs Makariou Closed

Στο παραπάνω γράφημα, αποτυπώνεται η αλλαγή στην κατανομή χρήσης των εξόδων συγκρίνοντας την πιλοτική δοκιμή (μπλε στήλες) με το σενάριο όπου η Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II είναι κλειστή (κόκκινες στήλες). Όπως παρατηρείται, με το κλείσιμο της συγκεκριμένης εξόδου, ένα μεγάλο ποσοστό οχημάτων μετακινείται προς τη Γέφυρα Δώρου Λοΐζου, ενώ αρκετά στρέφονται επίσης προς τη Λεωφόρο Βασιλέως Γεωργίου Β.

Αντίθετα, όταν η Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II είναι ανοιχτή (πιλοτική δοκιμή), οι οδηγοί τη χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό, με αποτέλεσμα οι υπόλοιπες εξοδοί να μοιράζονται πιο ισορροπημένα τον κυκλοφοριακό φόρτο. Με το κλείσιμο της, ωστόσο, το δίκτυο επαναπροσδιορίζει τις ροές, ενισχύοντας τη συμφόρηση στις άλλες προσιτές εξόδους και οδηγώντας σε αυξημένη χρήση της Γέφυρας Δώρου Λοΐζου, η οποία γίνεται ο κυριότερος προορισμός για την έξοδο από την πόλη.

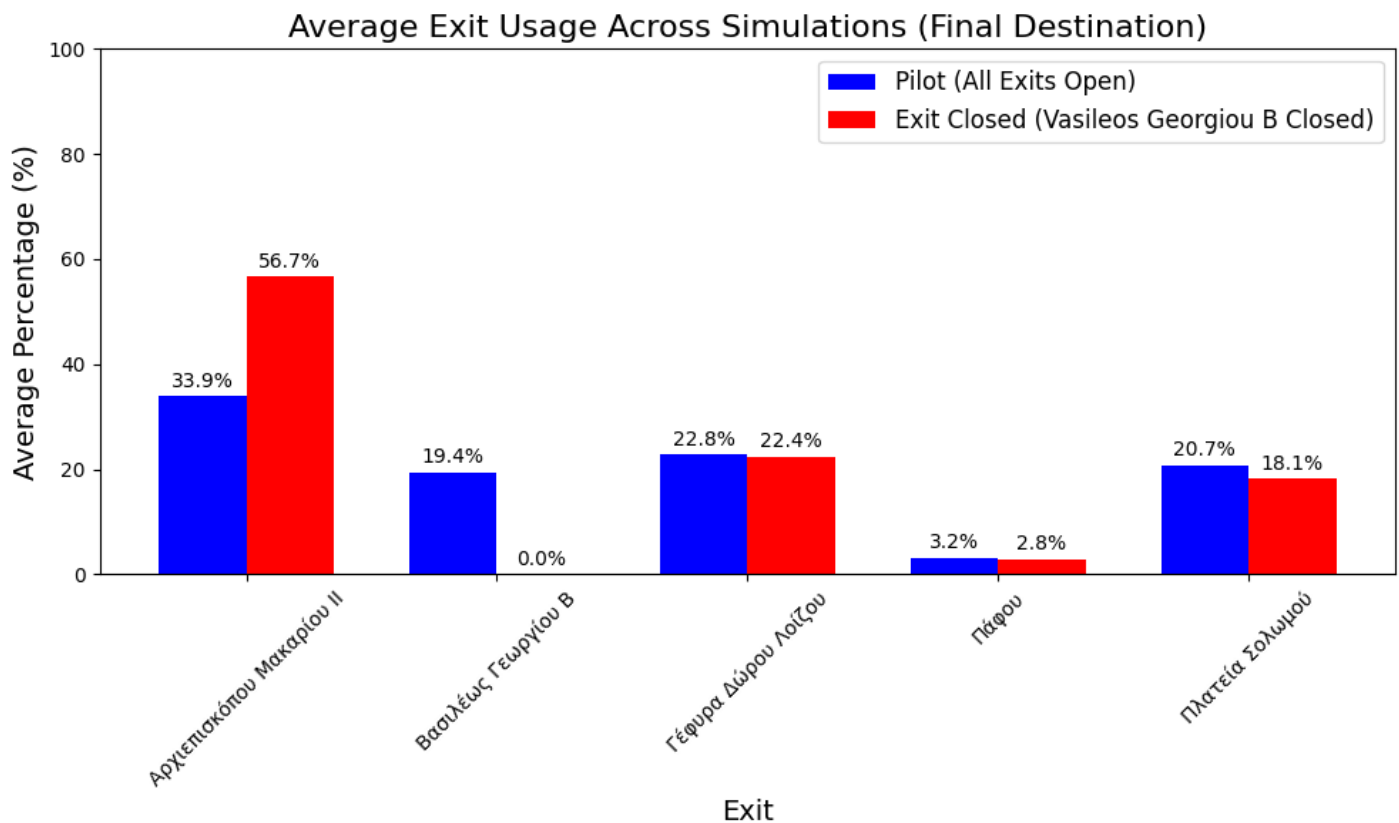
5.1.3.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου



Σχήμα 5.8 Average Exit Usage Across Simulations Pilot vs D. Loizou Bridge Closed

Στο παραπάνω γράφημα συγκρίνονται τα ποσοστά χρήσης των εξόδων μεταξύ της πιλοτικής δοκιμής (μπλε στήλες) και του σεναρίου όπου η Γέφυρα Δώρου Λοΐζου είναι κλειστή (κόκκινες στήλες). Όπως διαπιστώνεται, όταν η συγκεκριμένη έξοδος δεν είναι διαθέσιμη, η πλειονότητα των πρακτόρων κατευθύνεται πλέον προς την Αρχιεπισκόπου Μακαρίου ΙΙ, η οποία παρουσιάζει μεγάλη αύξηση στη χρήση (από περίπου 34% σε 56%). Παράλληλα, τα ποσοστά στις υπόλοιπες εξόδους δεν μεταβάλλονται τόσο δραματικά, καθώς είναι πιο μακριά. Συνεπώς, το κλείσιμο της Γέφυρας Δώρου Λοΐζου προκαλεί κυρίως τη στροφή ενός μεγάλου μέρους του κυκλοφοριακού φόρτου προς την Αρχιεπισκόπου Μακαρίου ΙΙ, επιβαρύνοντας έντονα τη συγκεκριμένη έξοδο. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως, παρόλο που η έξοδος της Γέφυρας Δώρου Λοΐζου βρίσκεται ανάμεσα στη Αρχιεπισκόπου Μακαρίου και την Πλατεία Σολωμού οι οδηγοί επιλέγουν μόνο αυτή της Αρχιεπισκόπου Μακαρίου γιατί ίσως είναι πιο εύκολη η πρόσβαση.

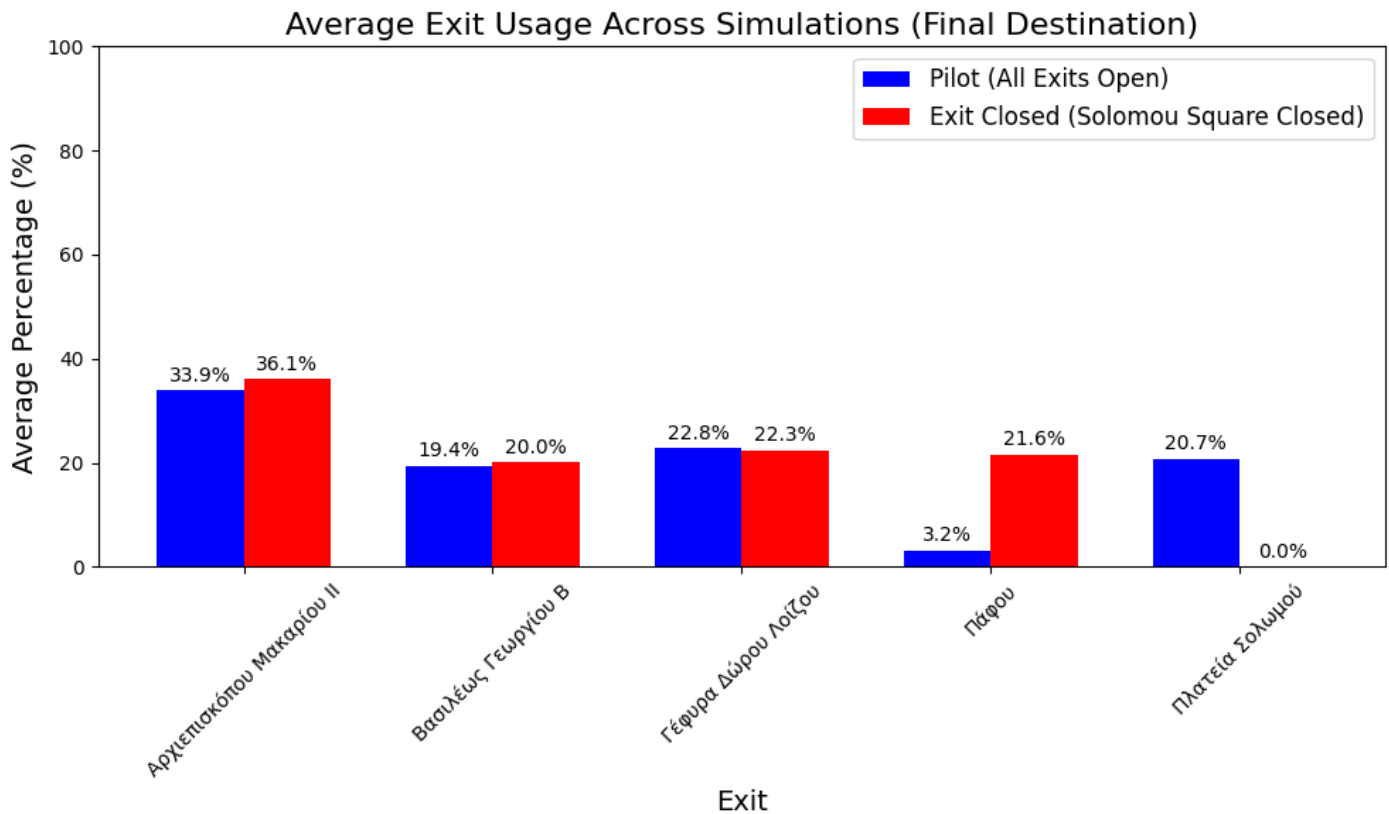
5.1.3.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β



Σχήμα 5.9 Average Exit Usage Across Simulations Pilot vs V. Georgiou B Closed

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρείται η μεταβολή των ποσοστών χρήσης των εξόδων, συγκρίνοντας την πιλοτική δοκιμή (μπλε στήλες) με το σενάριο όπου κλείνει η Λεωφόρος Βασιλέως Γεωργίου Β (κόκκινες στήλες). Η Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II παρουσιάζει σημαντική αύξηση στη χρήση (από 33,9% σε 56,7%), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι περισσότεροι οδηγοί που θα κατευθύνονταν προς τη Βασιλέως Γεωργίου Β ανακατευθύνονται τώρα προς τη Μακαρίου II ως επόμενη προτιμώμενη έξοδος. Οι υπόλοιπες εξοδοί δεν εμφανίζουν εξίσου δραστικές αυξομειώσεις, διατηρώντας ποσοστά σχετικά κοντά με αυτά της πιλοτικής δοκιμής. Συνολικά, το κλείσιμο της Βασιλέως Γεωργίου Β επιφέρει σημαντική συγκέντρωση του κυκλοφοριακού φόρτου στην Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II, αυξάνοντας έτσι τον συνολικό χρόνο εκκένωσης.

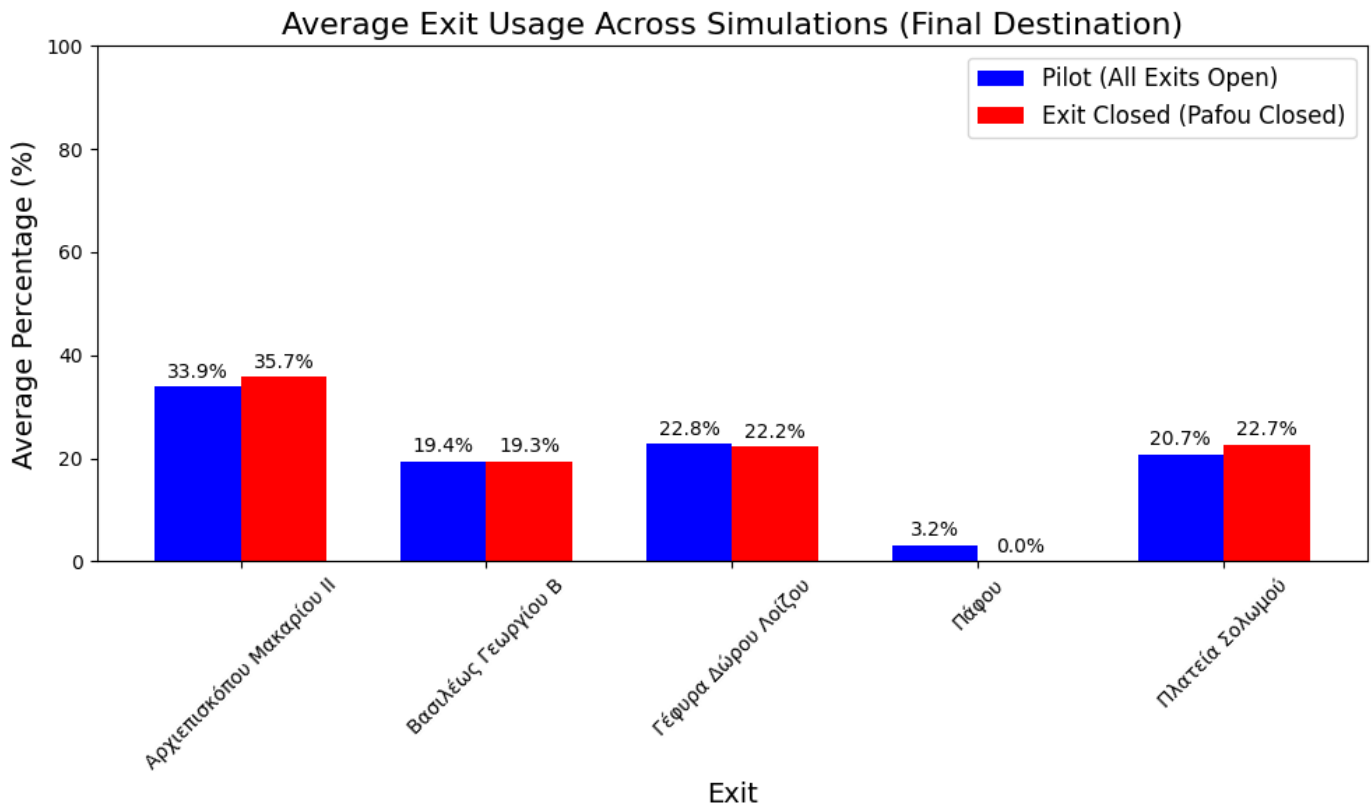
5.1.3.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού



Σχήμα 5.10 Average Exit Usage Across Simulations Pilot vs Solomou Square Closed

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως, όταν κλείνει η Πλατεία Σολωμού, το ποσοστό των οδηγών που θα την επέλεγαν (στην πιλοτική δοκιμή) μετακινείται ως επί το πλείστον προς την έξοδο της οδού Πάφου. Αυτό οφείλεται στη διαμόρφωση των μονόδρομων η οποία καθιστά την έξοδο στην οδό Πάφου ως τη μόνη διαθέσιμη εναλλακτική για τους οδηγούς που προηγουμένως θα κατευθύνονταν στην Πλατεία Σολωμού. Συνεπώς, διατηρούνται συγκριτικά σταθερά τα ποσοστά στις άλλες εξόδους, ενώ η έξοδος Πάφου απορροφά εξ ολοκλήρου τη ροή που χάνεται από την κλειστή Πλατεία Σολωμού.

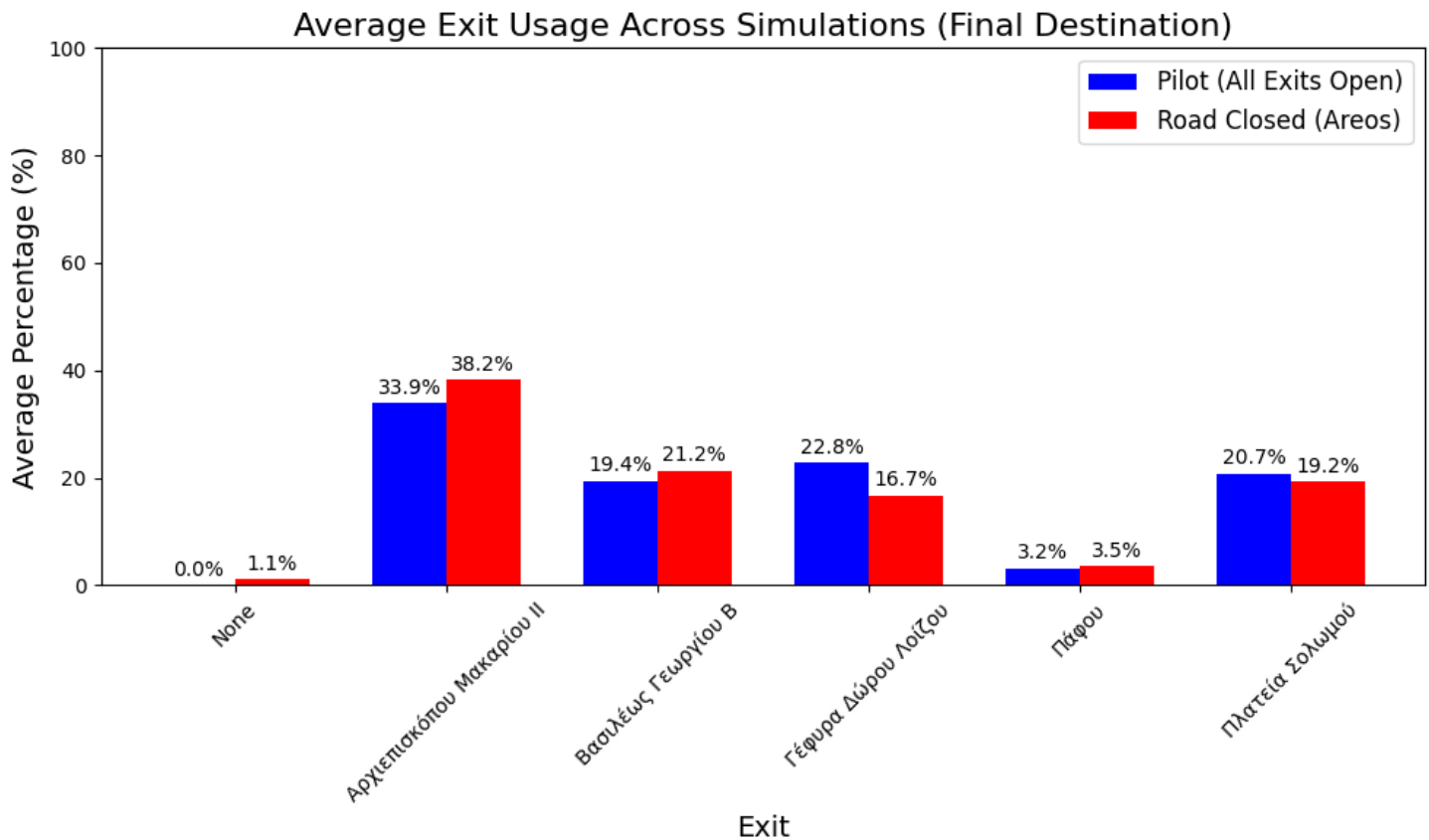
5.1.3.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου



Σχήμα 5.11 Average Exit Usage Across Simulations Pilot vs Pafou Closed

Στο παραπάνω γράφημα, συγκρίνονται τα ποσοστά χρήσης των εξόδων ανάμεσα στην πιλοτική δοκιμή (μπλε στήλες) και το σενάριο όπου η έξοδος στην οδό Πάφου παραμένει κλειστή (κόκκινες στήλες). Παρατηρείται ότι, αφού αυτή η έξοδος εξυπηρετούσε σχετικά μικρό αριθμό οδηγών, η ανακατεύθυνση τους προς την Πλατεία Σολωμού πραγματοποιείται εύκολα και δεν δημιουργεί κάποια αξιόλογη διαφορά στη γενικότερη κατανομή των εξόδων. Κατά συνέπεια, η συνολική κυκλοφοριακή συμφόρηση και οι χρόνοι εκκένωσης δεν επηρεάζονται αισθητά, σε αντίθεση με σενάρια που κλείνουν πιο “δημοφιλείς” εξοδοί όπως αυτές της Αρχιεπισκόπου Μακαρίου και Γέφυρας Δώρου Λοΐζου.

5.1.3.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως



Σχήμα 5.12 Average Exit Usage Across Simulations Pilot vs Areos Closed

Στο παραπάνω γράφημα, συγκρίνονται τα ποσοστά χρήσης των εξόδων ανάμεσα στην πιλοτική δοκιμή (μπλε στήλες) και το σενάριο όπου η οδός Άρεως παραμένει κλειστή (κόκκινες στήλες). Παρατηρείται ότι, αφού αυτή η έξοδος εξυπηρετούσε σχετικά μικρό αριθμό οδηγών, η ανακατεύθυνση τους προς την Πλατεία Σολωμού πραγματοποιείται εύκολα και δεν δημιουργεί κάποια αξιόλογη διαφορά στη γενικότερη κατανομή των εξόδων. Κατά συνέπεια, η συνολική κυκλοφοριακή συμφόρηση και οι χρόνοι εκκένωσης δεν επηρεάζονται αισθητά, σε αντίθεση με σενάρια που κλείνουν πιο “δημοφιλείς” εξοδοί όπως αυτές της Αρχιεπισκόπου Μακαρίου και Γέφυρας Δώρου Λοΐζου.

5.1.4 Αριθμός αλλαγών στην επιλογή εξόδου

Εδώ θα παραθέσουμε τις διαφορές στον μέσο αριθμό αυτοκινήτων που άλλαξαν προορισμό συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από την πιλοτική δοκιμή με τα αποτελέσματα από το κλείσιμο της εκάστοτε εξόδου σε ένα κεντρικό πίνακα που συνοψίζει τα αποτελέσματα.

Average Distribution of Destination Change Counts							
Closed Exit	Number of Destination Changes						
	0	1	2	3	4	5	6
Πιλοτική Δοκιμή	576.4	33.0	56.4	23.2	8.8	2.2	0.0
Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II	667.4	14.2	15.6	2.6	0.2	0.0	0.0
Γέφυρα Δώρου Λοΐζου	679.4	13.2	5.8	1.2	0.2	0.2	0.0
Βασιλέως Γεωργίου Β	591.6	34.6	39.4	25.2	7.8	1.4	0.0
Πλατεία Σολωμού	585.8	34.6	50.8	15.4	10.4	2.6	0.4
Πάφου	579.0	41.8	45.4	22.0	9.0	2.8	0.0
Οδός Άρεως	591.8	58.4	29.2	16.8	3.2	0.6	0.0

Πίνακας 5.1 Average Distribution of Destination Change Counts

Συνοψίζοντας τα κύρια ευρήματα της ανάλυσης των παραπάνω αποτελεσμάτων, διαμορφώνονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- **Επικράτηση σταθερότητας:** Για όλες τις εξόδους, ποσοστό 82 %–97 % των οχημάτων δεν αλλάζει καθόλου προορισμό, γεγονός που επιβεβαιώνει τη συνολική ανθεκτικότητα του δικτύου, αλλά επιβεβαιώνει και την αναμενόμενη συμπεριφορά των οδηγών καθώς ένα αρκετά μικρό ποσοστό γνωρίζει εναλλακτικές διαδρομές για να διακινηθεί προς κάποια έξοδο.
- **Επίδραση αυξημένης προτίμησης εξόδου:** Το κλείσιμο ιδιαίτερα δημοφιλών εξόδων όπως η Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II και η Γέφυρα Δώρου Λοΐζου, συνεπάγεται ελάχιστες αλλαγές προορισμού, καθώς οι διαθέσιμες εναλλακτικές

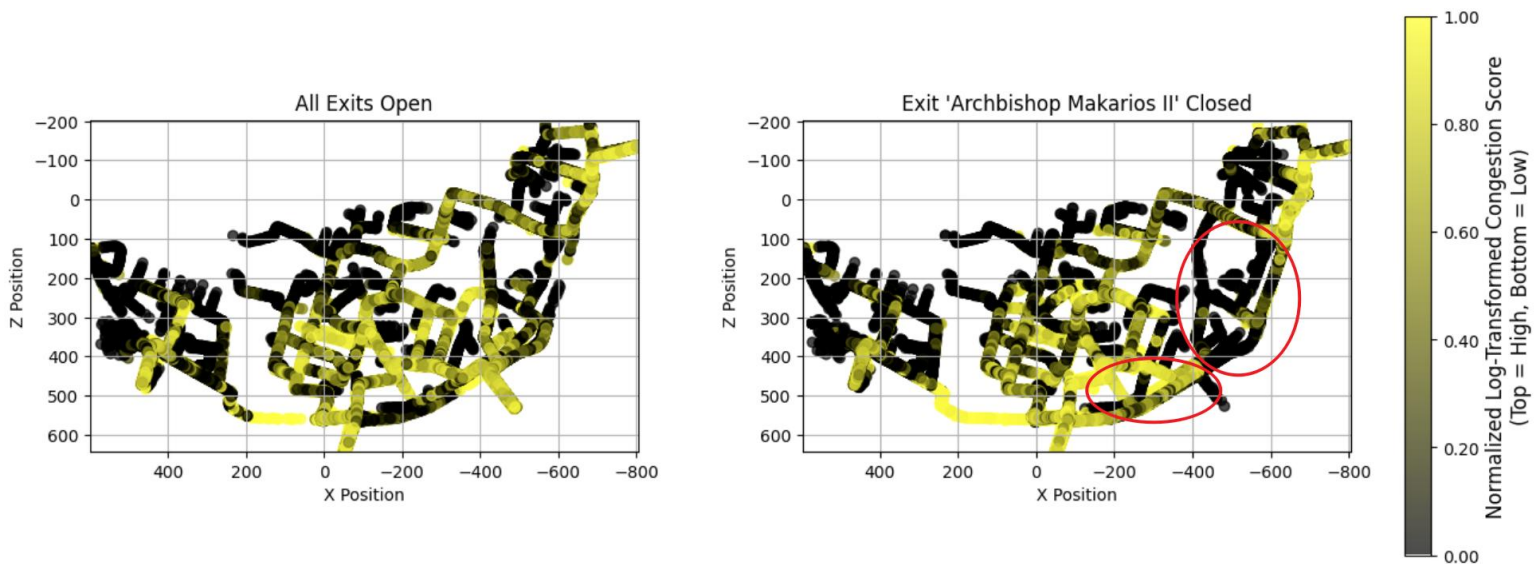
είναι χωρικά απομακρυσμένες και το “κέρδος” από αλλαγή προορισμού δεν αξίζει τον κόπο.

- **Συγκέντρωση πολλαπλών αλλαγών:** Οι λιγότερο πολυσύχναστες εξοδοί όπως στην Πλατεία Σολωμού και στην οδό Πάφου, παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά διπλών και τριπλών αλλαγών, υποδεικνύοντας μια κοντινότερη εικόνα στην πιλοτική δοκιμή καθώς αφορούν ένα μικρότερο τμήμα της πόλης. Παρομοίως και το κλείσιμο της Οδού Άρεως έχει παρόμοια αποτελέσματα με μια πολύ μικρή τάση για επιμονή στην αρχική ή το πολύ μια αλλαγή προορισμού.

5.1.5 Σημεία Εμφάνισης της Συμφόρησης στο οδικό δίκτυο

Εδώ θα παραθέσουμε τις διαφορές στα σημεία συμφόρησης που παρατηρούνται στο οδικό δίκτυο συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από την πιλοτική δοκιμή με τα αποτελέσματα από το κλείσιμο της εκάστοτε εξόδου.

5.1.5.1 Έξοδος Κλειστή - Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II

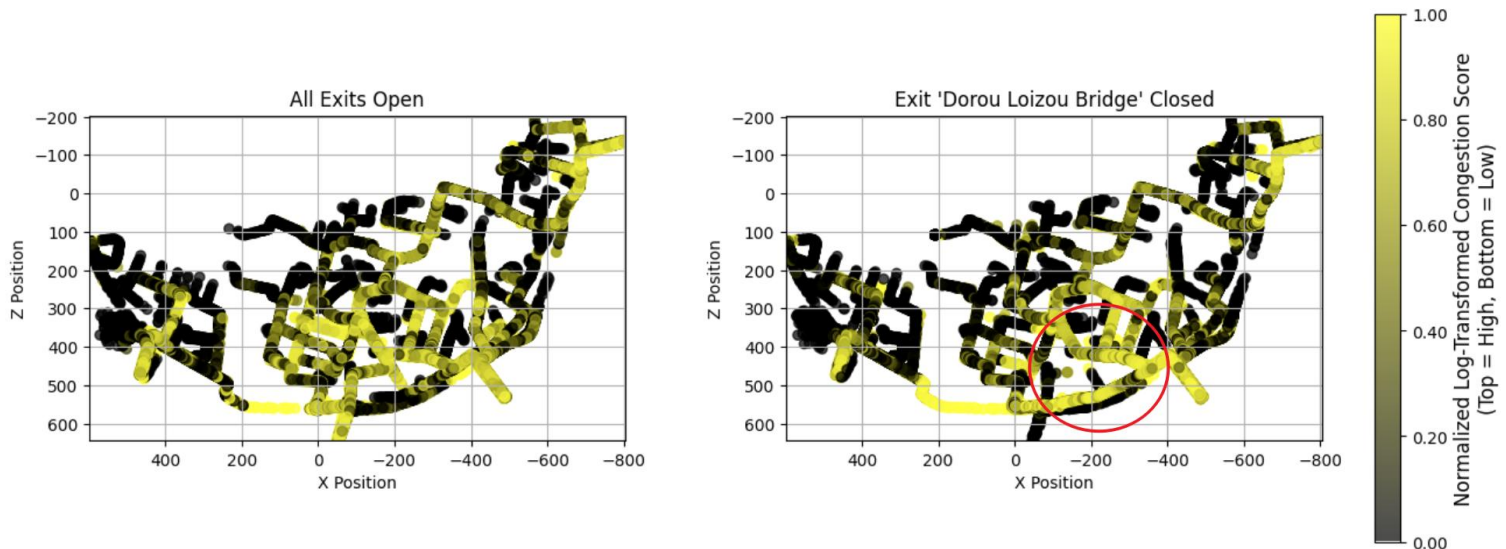


Σχήμα 5.13 Average Congestion Map Pilot vs Makariou Closed

Στο παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα, διακρίνεται μια σαφής μείωση της συμφόρησης κοντά στην Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II, η οποία σημειώνει μεγάλη αύξηση και εκτείνεται προς τις κοντινές εξόδους, δηλαδή τη Γέφυρα Δώρου Λοΐζου και την έξοδο Βασιλέως Γεωργίου. Επιπλέον, παρατηρείται σημαντική συμφόρηση στον περιφερειακό δρόμο που συνδέει τις εξόδους μεταξύ τους αλλά και μείωση σε άλλα σημεία της πόλης, καθώς πολλά οχήματα κατευθύνονται προς τις εναπομείναντες ανοιχτές εξόδους για να ολοκληρώσουν την εκκένωση. Αυτή η μετατόπιση της κυκλοφορίας επιβεβαιώνει τον ρόλο της

Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II ως βασικού κόμβου διανομής και υπογραμμίζει τη σημασία διατήρησης ικανού αριθμού εναλλακτικών διαδρομών σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

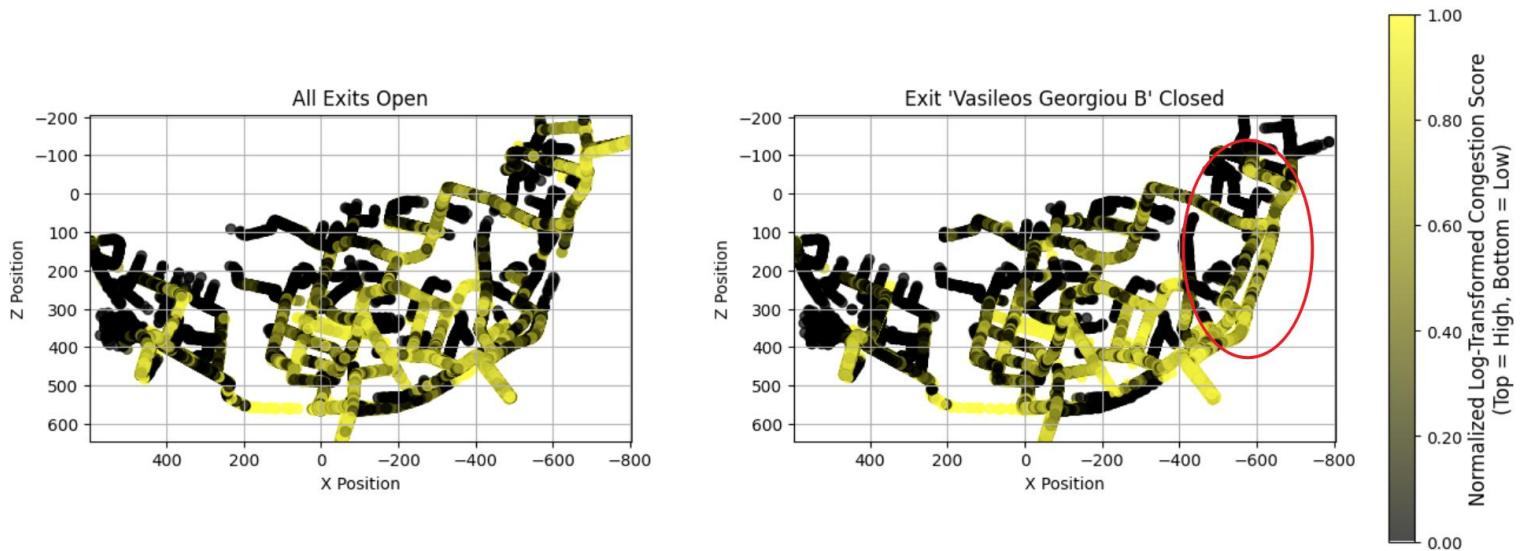
5.1.5.2 Έξοδος Κλειστή - Γέφυρα Δώρου Λοΐζου



Σχήμα 5.14 Average Congestion Map Pilot vs D. Loizou Bridge Closed

Στο παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα φαίνεται ότι, όταν κλείνει η Γέφυρα Δώρου Λοΐζου, η ροή της κυκλοφορίας μετατοπίζεται έντονα προς την Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II, καθώς πρόκειται για την επόμενη πιο κοντινή διαθέσιμη έξοδο. Αυτό συνεπάγεται αισθητή συμφόρηση σε όλους τους δρόμους που οδηγούν στη Μακαρίου, επιβραδύνοντας ουσιαστικά τη συνολική διαδικασία εκκένωσης. Σε αντίθεση με το σενάριο όπου όλες οι exits είναι ανοιχτές, η συμφόρηση παρατηρείται πιο έντονη σε συγκεκριμένες αρτηρίες, ενώ επιπρόσθετα παρατηρείται πυκνή συγκέντρωση οχημάτων γύρω από το κλειστό τμήμα (Γέφυρα Δώρου Λοΐζου) και κυρίως κατά μήκος των διαδρομών προς την Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II. Αυτό γιατί αρκετά οχήματα περνούν μπροστά από την έξοδο για να οδηγηθούν προς την Μακαρίου κατά μήκος του περιφερειακού δρόμου.

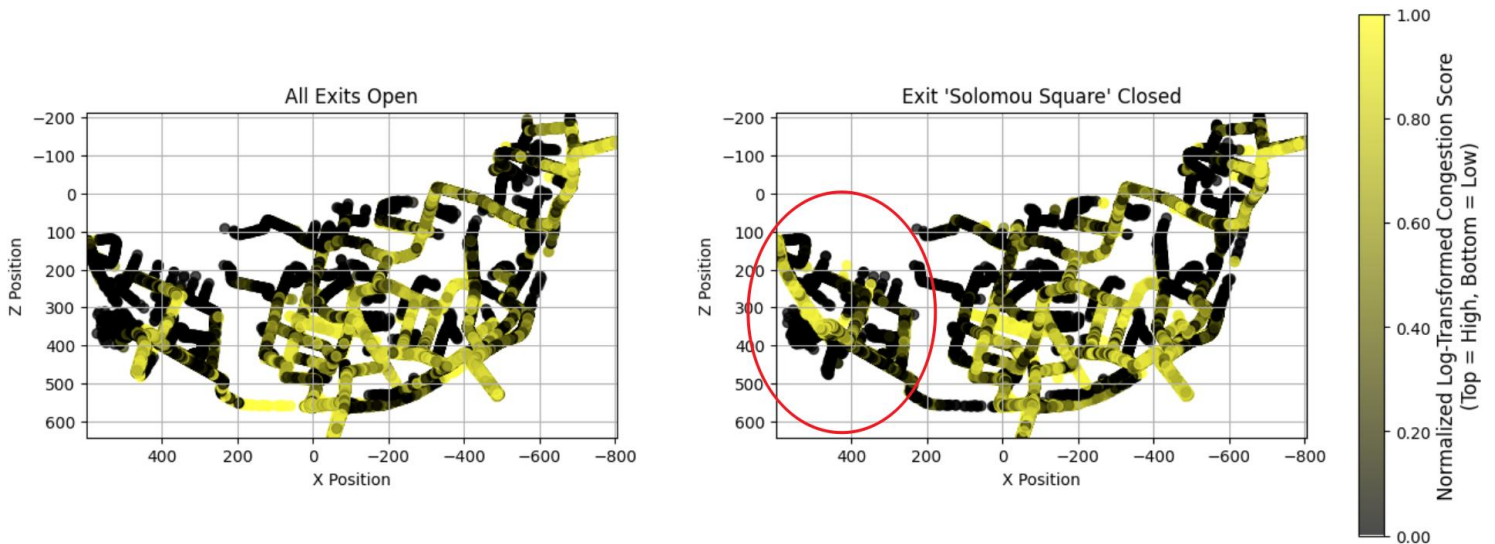
5.1.5.3 Έξοδος Κλειστή - Βασιλέως Γεωργίου Β



Σχήμα 5.15 Average Congestion Map Pilot vs V. Georgiou B Closed

Στο παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα, όπου η έξοδος της Βασιλέως Γεωργίου Β παραμένει κλειστή, παρατηρείται έντονη ανακατεύθυνση της κυκλοφορίας προς την Αρχιεπισκόπου Μακαρίου ΙΙ, η οποία αποτελεί την κοντινότερη διαθέσιμη έξοδο. Οι οδηγοί αξιοποιούν τον περιφερειακό δρόμο για να φτάσουν στη Μακαρίου, γεγονός που προκαλεί αισθητή συμφόρηση σε αυτά τα σημεία. Σε αντίθεση με την κατάσταση στην πιλοτική δοκιμή (όλες οι εξοδοι ανοιχτές), όπου οι ροές κατανέμονται πιο ομοιόμορφα, το κλείσιμο της Βασιλέως Γεωργίου Β οδηγεί στη συσσώρευση μεγάλου φόρτου κυκλοφορίας στις διαδρομές που οδηγούν στην Αρχιεπισκόπου Μακαρίου ΙΙ.

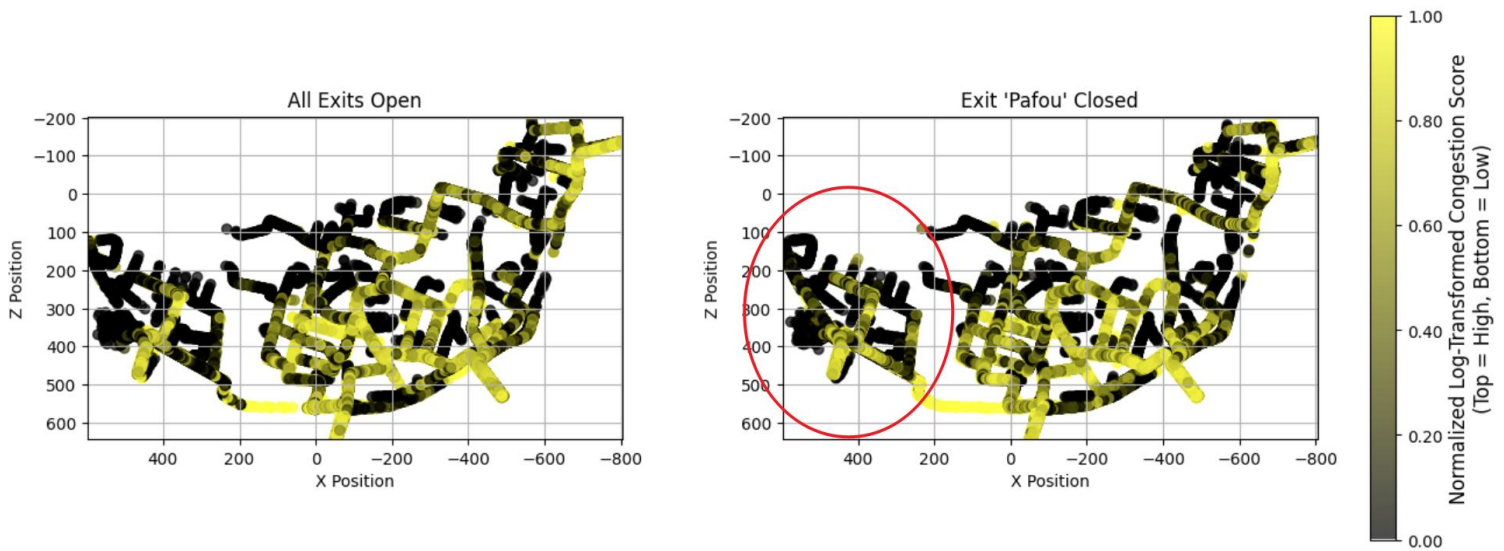
5.1.5.4 Έξοδος Κλειστή - Πλατεία Σολωμού



Σχήμα 5.16 Average Congestion Map Pilot vs Solomou Square Closed

Στο παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα, η διακοπή πρόσβασης στην Πλατεία Σολωμού (αριστερά στον χάρτη) οδηγεί τους οδηγούς να ανακατευθυνθούν προς την έξοδο της οδού Πάφου. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται αυξημένη συμφόρηση στην διαδρομή που καταλήγει στην Πάφου, ενώ η πίεση κυκλοφορίας από την πλευρά της Πλατείας Σολωμού μειώνεται σε δρόμους που καταλήγουν σε αυτή, σε σύγκριση με τη πιλοτική δοκιμή. Αυτή η μεταβολή επιβεβαιώνει πως όταν κλείνει μια έξοδος που δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλής και βρίσκεται αρκετά κοντά σε κάποια άλλη έξοδο, τότε η ανοιχτή έξοδος απορροφά με επιτυχία την κυκλοφορία, χωρίς μεγάλο αντίκτυπο στο χρόνο εκκένωσης.

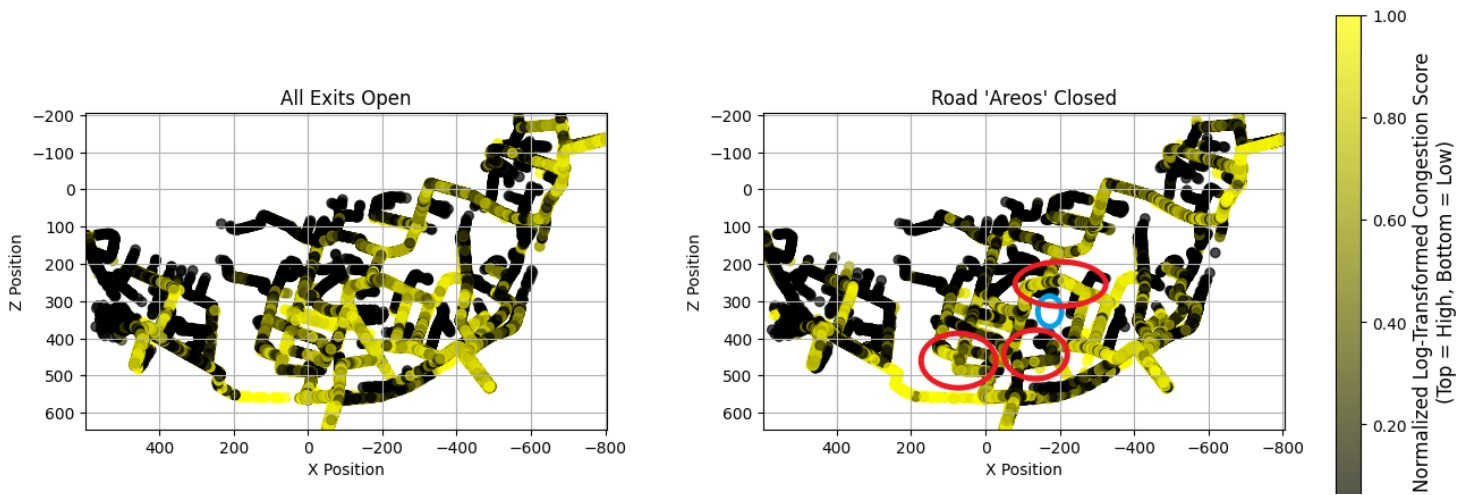
5.1.5.5 Έξοδος Κλειστή - Πάφου



Σχήμα 5.17 Average Congestion Map Pilot vs Pafou Closed

Στο παραπάνω διάγραμμα, το κλείσιμο της εξόδου στην οδό Πάφου μετατοπίζει το σχετικό μικρό φορτίο κυκλοφορίας που εξυπηρετούσε προς την έξοδο στην Πλατεία Σολωμού, η οποία βρίσκεται σε κοντινή απόσταση. Ωστόσο, λόγω του σχετικά μικρού ποσοστού οδηγών που χρησιμοποιούσαν αρχικά την έξοδο στην οδό Πάφου, η επιβάρυνση που προκύπτει δεν είναι ιδιαίτερα αισθητή. Έτσι, ούτε οι χρόνοι εκκένωσης ούτε το επίπεδο συμφόρησης διαφοροποιούνται ουσιαστικά από την πιλοτική δοκιμή, επιβεβαιώνοντας ότι αυτή η έξοδος διαδραματίζει δευτερεύοντα ρόλο στο συνολικό σύστημα εκκένωσης.

5.1.5.6 Δρόμος Κλειστός - Οδός Άρεως



Σχήμα 5.18 Average Congestion Map Pilot vs Areos Closed

Στο παραπάνω διάγραμμα, το κλείσιμο της οδού Άρεως (με μπλε χρώμα) μετατοπίζει το σχετικό φορτίο κυκλοφορίας που εξυπηρετούσε προς άλλους δρόμους όπως φαίνονται στους κόκκινους κύκλους. Σε κάποιους από αυτούς η συμφόρηση αυξάνεται (πάνω και αριστερά κύκλος) και σε κάποιους άλλους μειώνεται λόγω περιορισμένης προσβασιμότητας (κάτω κεντρικός κύκλος). Συμπερασματικά, βλέπουμε μια μικρή διαφοροποίηση στην συμφόρηση της πόλης κατά το κλείσιμο της οδού Άρεως κάτι που αναδεικνύει το ότι υπάρχουν εναλλακτικές διαδρομές διαφυγής προς κάποια έξοδο και πως το δίκτυο αντέχει να χάσει μια κεντρική αρτηρία χωρίς μεγάλες επιπλοκές στην κυκλοφορία.

5.2 Κύρια ποιοτικά ευρήματα

Σενάριο	Μέση πρόσθετη καθυστέρηση εκκένωσης*	Κύριες επιπτώσεις
Έξοδος Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II κλειστή	$\approx 174 \text{ s } (\approx 3 \text{ min})$	Η πιο σοβαρή επιβάρυνση. Μετατόπιση μεγάλου φόρτου στη Γέφυρα Δώρου Λοΐζου και στη Βασιλέως Γεωργίου Β με εκτεταμένη συμφόρηση στον περιφερειακό.
Βασιλέως Γεωργίου Β κλειστή	$\approx 149 \text{ s } (\approx 2.5 \text{ min})$	Δεύτερη σε σοβαρότητα. 56 % των οχημάτων κατευθύνεται πλέον στη Αρχιεπισκόπου Μακαρίου, αυξάνοντας δραστικά τη συμφόρηση εκεί.
Γέφυρα Δώρου Λοΐζου κλειστή	$\approx 146 \text{ s } (\approx 2.3 \text{ min})$	Παρόμοια εικόνα με Βασιλέως Γεωργίου. Η Αρχιεπισκόπου Μακαρίου δέχεται ξανά το μεγαλύτερο μέρος της ροής.
Πλατεία Σολωμού κλειστή	$\approx 53 \text{ s } (\approx 1 \text{ min})$	Μικρή επίπτωση. Η έξοδος Πάφου απορροφά σχεδόν όλη τη χαμένη ροή χωρίς φαινόμενα κορεσμού.
Πάφου κλειστή	$\approx 11 \text{ s}$	Αμελητέα αλλαγή. Χαμηλός αρχικός φόρτος, εύκολη μετατόπιση προς έξοδο Πλατείας Σολωμού.
Οδός Άρεως κλειστή (δρόμος, όχι έξοδος)	$\approx 55 \text{ s}$	Περιορισμένη αύξηση χρόνου. Στο δίκτυο υπάρχουν εναλλακτικές, αλλά εμφανίζεται τοπική συμφόρηση σε κάθετες οδούς.

Πίνακας 5.2 Exit-Closure Scenario Impact Matrix

*Μέσος όρος διαφορών, στα ορόσημα 80 %-90 %-95 % εκκένωσης σε σχέση με την πιλοτική δοκιμή.

Η ανάλυση των σεναρίων επιβεβαιώνει ότι το οδικό δίκτυο της παλιάς Λευκωσίας περιλαμβάνει δύο-τρία αισθητά bottlenecks, την έξοδο Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II, τη Γέφυρα Δώρου Λοΐζου κεντρικά και την έξοδο στην Βασιλέως Γεωργίου Β. Όταν οποιαδήποτε από τις τρεις αυτές εξόδους τεθεί εκτός λειτουργίας, ο χρόνος που απαιτείται

για να εκκενωθεί με ασφάλεια το 90 % των οχημάτων σχεδόν διπλασιάζεται και η κυκλοφορία χρησιμοποιεί έντονα τον περιφερειακό δακτύλιο, πρόκειται επομένως για συγκεκριμένα κρίσιμα σημεία χωρίς ικανοποιητική εναλλακτική. Αντιθέτως, το δίκτυο αποδεικνύεται αξιοσημείωτα ανθεκτικό απέναντι σε απώλειες δευτερευουσών εξόδων ή ακόμη και μιας κεντρικής αρτηρίας, όπου η καθυστέρηση παραμένει κάτω από ένα λεπτό και η κυκλοφορία ανακατανέμεται ομαλά προς τις πλησιέστερες διαθέσιμες εξόδους χωρίς αλυσιδωτές συνέπειες. Παρά τις μεταβολές στο δίκτυο, η συντριπτική πλειονότητα των οδηγών (82 %–97 %) δεν αλλάζει ποτέ τον αρχικά επιλεγμένο προορισμό, γεγονός που δείχνει περιορισμένη επίγνωση εναλλακτικών διαδρομών, έτσι η αποτελεσματικότητα της εκκένωσης εξαρτάται κυρίως από την ίδια την υποδομή αλλά ταυτόχρονα κύριο ρόλο έχει και η οδική συμπεριφορά για το πόσο υπομονετικοί και συγκεντρωμένοι στην επίτευξη της εκκένωσης.

Σημειώνοντας αυτά αξίζει να αναφερθεί πως η [Υπόθεση](#) μας δεν είναι απολύτως αληθής αλλά ούτε και ψευδής. Ναι, το δίκτυο διαθέτει κρίσιμα bottlenecks των οποίων η απώλεια απαιτεί ουσιαστικές αλλαγές στην κυκλοφορία για να αποφευχθούν μεγάλες καθυστερήσεις, ωστόσο η υπόλοιπη υποδομή λειτουργεί επαρκώς όταν οι βασικές εξοδοί παραμένουν ανοιχτές, άρα το πρόβλημα δεν είναι γενικευμένο αλλά εντοπισμένο. Οι απαραίτητες παρεμβάσεις πρέπει να είναι στοχευμένες και θα μπορούσαν να αφορούν:

- Προληπτικό έλεγχο στις υποδομές των κύριων αυτών εξόδων και την διατήρηση τους σε άρτια κατάσταση.
- Ταχεία αποκατάσταση των δημοφιλών εξόδων σε περιπτώσεις απώλειας.
- Ταχύτατη και έγκαιρη ενημέρωση των οδηγών για τυχόν αλλαγές στο δίκτυο και την διαθεσιμότητα των εξόδων.
- Εκπαίδευση και ενημέρωση οδηγών ώστε να αυξηθεί η προθυμία αλλαγής αλλά και γνώσης εναλλακτικών διαδρομών.

Συμπερασματικά, η πόλη εμφανίζει ικανοποιητική συνολική ικανότητα εκκένωσης, ωστόσο η εξάρτηση από δύο με τρεις δημοφιλείς εξόδους δημιουργεί σοβαρό λειτουργικό ρίσκο κατά την απώλεια τους. Ο στοχευμένος έλεγχος υποδομών (και η διατήρησή των εξόδων σε καλή κατάσταση), η έγκαιρη πληροφόρηση των οδηγών και το κλίμα συνεργασίας που πρέπει να επικρατεί σε τέτοιες κρίσιμες περιπτώσεις, αποτελούν τα πιο αποδοτικά βήματα για τη μείωση των καθυστερήσεων σε μελλοντικά σενάρια έκτακτης ανάγκης.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα

Η προσομοίωση έδειξε ότι, υπό κανονικές συνθήκες, με όλες τις εξόδους ανοιχτές τα 700 οχήματα μπορούν να εγκαταλείψουν τα τείχη της παλιάς Λευκωσίας μέσα σε περίπου έντεκα με δώδεκα λεπτά, το 80 % διαφεύγει ήδη στα πρώτα 5-6 λεπτά, οπότε η πόλη διαθέτει εγγενώς αρκετή ικανότητα εκκένωσης.

Ωστόσο η ανθεκτικότητα αυτή εξαρτάται από τρεις “κρίσιμους πυλώνες”: τις εξόδους **Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II, Γέφυρα Δώρου Λοΐζου και Βασιλέως Γεωργίου Β**. Το κλείσιμο καθεμιάς σχεδόν διπλασιάζει τον χρόνο που χρειάζεται για να απομακρυνθεί το 90-95 % των οχημάτων (πρόσθετη καθυστέρηση 2-3 λεπτών), ενώ διοχετεύει τον κυκλοφοριακό φόρτο στις γειτονικές αρτηρίες προκαλώντας αλυσιδωτή συμφόρηση.

Αντίθετα, το κλείσιμο περιφερειακών εξόδων όπως στη Πλατεία Σολωμού και στην οδό Πάφου, επιβαρύνει τον συνολικό χρόνο μόλις κατά ένα λεπτό ή και λιγότερο. Ακόμη και η κατάργηση της βασικής αρτηρίας όπως της οδού Άρεως αυξάνει τον μέσο χρόνο εκκένωσης λιγότερο από ένα λεπτό και επηρεάζει κυρίως οδηγούς εγκλωβισμένους στον εσωτερικό δακτύλιο, όχι όμως το γενικό ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης, καθώς υπάρχουν αρκετές εναλλακτικές διαδρομές.

Η χαρτογράφηση της συμφόρησης που προκύπτει στο οδικό δίκτυο κατά την εκκένωση αποκάλυψε ότι, ανεξάρτητα από το σενάριο, εμφανίζονται bottlenecks επαναληπτικά στις οδούς Άρεως, Αχιλλέως, Ονήσιλου, Αθηνών, Χατζηγεωργάκη Κορνέσιου και Πατριάρχου Γρηγορίου: κόμβοι που διανέμουν την κυκλοφορία προς τις κεντρικές εξόδους.

Το μοντέλο συμπεριφοράς οδήγησης δείχνει ότι **πάνω από 80 %** των οδηγών δεν αλλάζουν ποτέ την έξοδο που έχουν προαποφασίσει, ακόμη και στο σενάριο σεισμού, λιγότερο από 5 % επιχειρεί περισσότερες από μία αλλαγές πορείας. Αυτό επιβεβαιώνει την περιορισμένη επίγνωση εναλλακτικών διαδρομών και υποδεικνύει ότι η έγκαιρη, στοχευμένη πληροφόρηση είναι κρίσιμη.

Συνολικά, το οδικό δίκτυο αντέχει την απώλεια δευτερευόντων εξόδων ή μιας κύριας αρτηρίας χωρίς να καταρρεύσει. Η προληπτική συντήρηση των εξόδων Αρχιεπισκόπου

Μακαρίου II και Γέφυρας Δώρου Λοΐζου, η ενίσχυση εναλλακτικών διαδρομών γύρω τους και τα ψηφιακά συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης αποτελούν τις αποδοτικότερες κινήσεις για να διατηρηθεί ο συνολικός χρόνος εκκένωσης κάτω από τα κρίσιμα δώδεκα λεπτά σε μελλοντικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

6.2 Περιορισμοί - Limitations

Παρά τη χρησιμότητα των αποτελεσμάτων, η υλοποίηση φέρει ορισμένους εγγενείς περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν ερμηνεύονται τα συμπεράσματα:

- **Κλειστό σύστημα χωρίς εισερχόμενη κυκλοφορία**

Για λόγους απλότητας υποθέτουμε ότι, μόλις δοθεί η εντολή εκκένωσης, κανένα καινούργιο όχημα δεν εισέρχεται εντός των τειχών. Αυτό αποφεύγει την επιπλέον συμφόρηση στις εξόδους αλλά υποτιμά τυχόν αντίρροπες ροές (οχήματα κατοίκων, υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης) που θα περιέπλεκαν τη ρεαλιστική κυκλοφοριακή εικόνα.

- **Ελλιπής χωρική κάλυψη του μοντέλου**

Το δικτυακό υπόβαθρο προέρχεται αποκλειστικά από το fbx του iNicosia Project. Δρόμοι κοντά στην πράσινη γραμμή, ή άλλες λεπτομερείς λωρίδες, ενδέχεται να απουσιάζουν πλήρως. Επομένως, το δίκτυο που βλέπουν οι πράκτορες μπορεί να διαφέρει σε πολύ μικρό βαθμό από το πραγματικό.

- **Ιδανική ετοιμότητα οδηγών**

Υποθέτουμε ότι όλοι οι οδηγοί βρίσκονται ήδη μέσα στα οχήματά τους και ξεκινούν άμεσα. Δεν προσομοιώνεται ο χρόνος λήψης της εντολής, η μετάβαση μέχρι το όχημα ή άλλες καθυστερήσεις από ανθρώπινη συμπεριφορά.

- **Απενεργοποίηση φαναριών και μικρό-ατυχημάτων**

Η προσομοίωση δεν περιλαμβάνει φωτεινή σηματοδότηση, σήμανση προτεραιότητας ή πιθανές συγκρούσεις/ακινητοποιήσεις μεταξύ οχημάτων. Αυτό απλουστεύει το σενάριο αλλά υποεκτιμά τα μικρά διαλείμματα ροής που θα προκαλούσαν οι πραγματικές συνθήκες.

- **Τέλεια ενημέρωση για κλειστές εξόδους/δρόμους**

Σε περίπτωση σεισμού ή άλλης βλάβης θεωρούμε ότι οι πράκτορες γνωρίζουν εξ αρχής ποιοι δρόμοι/έξοδοι είναι εκτός λειτουργίας, δεν χρειάζεται να προσεγγίσουν το σημείο για να διαπιστώσουν το κλείσιμο. Οι διαδρομές υπολογίζονται εκ των

προτέρων ως βέλτιστες (Manhattan distance) προς την πλησιέστερη διαθέσιμη έξοδο.

- **Κινηματικά ελαττώματα**

- Σε συνθήκες υψηλής πυκνότητας παρατηρείται “τρέμουλο” (jitter) των οχημάτων: μικρές αριστερό-δεξιές μετατοπίσεις που διατηρούν το σύστημα σε κίνηση και αποτρέπουν το απόλυτο “στοπ”.
- Ένα απειροελάχιστο ποσοστό πρακτόρων “βυθίζεται” κάτω από το πλέγμα του δρόμου και διασχίζει το υπόστρωμα μέχρι να φτάσει στην περιοχή της εξόδου. Το φαινόμενο δεν αλλοιώνει μετρήσεις χρόνου (ο πράκτορας παραμένει μετρήσιμος), όμως νοθεύει τη ρεαλιστική απεικόνιση και ένα μικρό ποσοστό στις μετρήσεις γενικότερα όπου παρουσιάζονται να εκκενώνουν γρήγορα τέτοια οχήματα.

- **Περιορισμοί εργαλείων και χρόνου**

Πολλές από τις παραπάνω απλοποιήσεις απορρέουν από τους περιορισμούς των διαθέσιμων assets και του χρονοδιαγράμματος της πτυχιακής εργασίας. Η προσθήκη πιο σύνθετων μοντέλων συμπεριφοράς (π.χ. προσομοίωση φωτεινών σηματοδοτών, δυναμική πληροφόρηση οδηγών) θα απαιτούσε εξ ολοκλήρου νέα ανάπτυξη.

Εν κατακλείδι, οι παραδοχές αυτές επέτρεψαν τη συγκέντρωση καθαρών, συγκρίσιμων μετρικών, αλλά περιορίζουν τον βαθμό ρεαλισμού της προσομοίωσης. Τα ευρήματα πρέπει επομένως να ιδωθούν ως **ενδεικτικές τάσεις** και όχι ως ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς σε πραγματικές συνθήκες εκκένωσης.

6.3 Μελλοντική Δουλειά

Η παρούσα εργασία θέτει ένα πρώτο, συγκροτημένο πλαίσιο ανάλυσης της εκκένωσης της παλιάς Λευκωσίας, ωστόσο ο ρεαλισμός και η προγνωστική ισχύς της προσομοίωσης μπορούν να ενισχυθούν σημαντικά μέσα από τα ακόλουθα πιθανά επόμενα βήματα.

1. Ρεαλιστικό στάδιο “ενημέρωσης και κινητοποίησης”

Στο σημερινό μοντέλο οι οδηγοί εμφανίζονται έτοιμοι, βρίσκονται ήδη στα οχήματά τους και ξεκινούν αμέσως. Ένα φυσικό επόμενο στάδιο θα ήταν η προσθήκη μιας φάσης αφύπνισης, όπου:

- οι πράκτορες λαμβάνουν την εντολή εκκένωσης με χρονική υστέρηση (π.χ. τυχαία κατανομή δευτερολέπτων ή λεπτών),

- χρειάζονται χρόνο για να φτάσουν στο αυτοκίνητό τους,
- συναντούν μικρό-εμπόδια (πεζούς, αμάξια που βγαίνουν από θέσεις στάθμευσης) πριν εισέλθουν στο βασικό οδικό δίκτυο.

Αυτό θα επιτρέψει τη μελέτη “κύματος” εκκίνησης και την επίδρασή του στις έξοδοι όταν οι ροές δεν εκδηλώνονται ταυτόχρονα.

2. Μοντέλα “γνωστικής ελλιπούς πληροφόρησης” και μεταφοράς γνώσης

- **Προσωποκεντρικές διαδρομές:** Αντί για απόλυτα βέλτιστες (Manhattan) πορείες, κάθε πράκτορας θα διαθέτει ένα ιδιωτικό, ατελές γράφημα δρόμων (home-based knowledge). Έτσι, κάποιοι θα κατευθύνονται διαισθητικά, ακολουθώντας την “καθημερινή” διαδρομή τους.
- **Συλλογική μάθηση:** Οι πράκτορες μπορούν να “αντιγράφουν” πληροφορία από γειτονικά οχήματα (π.χ. αν ένα αυτοκίνητο στρίψει βιαστικά ή επιστρέψει λόγω μπλόκου, οι πίσω οδηγοί αποκτούν πιθανότητα να αλλάξουν γνώμη). Μία απλή υλοποίηση είναι η διάδοση μηνύματος με πεπερασμένη εμβέλεια.
- **Δυναμική ενημέρωση κλειστών δρόμων:** Με τον μηχανισμό γειτονικής μάθησης περιορίζεται η ανάγκη “ανίχνευσης διά της αποτυχίας” λιγότεροι πράκτορες θα σπαταλούν χρόνο για να φτάσουν σε μια κλειστή έξοδο.

3. Σύνθετα σενάρια πολλαπλών βλαβών

Η μελέτη έδειξε πόσο κρίσιμες είναι δύο έξοδοι όταν κλείνουν μεμονωμένα. Ένα επόμενο βήμα είναι να εξετασθούν ταυτόχρονες βλάβες π.χ. σεισμός που μπλοκάρει δύο κεντρικές εξόδους αλλά και ορισμένους εσωτερικούς δρόμους, ή σεισμός που αδρανοποιεί διακεκριμένα τμήματα του δικτύου. Αυτό θα αναδείξει φαινόμενα συμφόρησης δεύτερης τάξης (περιοχές “παγίδες” όπου οι εναπομείνουσες πορείες γίνονται υπερβολικά μεγάλες).

4. Προσομοίωση δυναμικών απειλών - σενάρια εξάπλωσης πυρκαγιάς

Ένα ιδιαίτερα ρεαλιστικό σενάριο για τείχη-περιβάλλον πόλης είναι η προοδευτική εξάπλωση φωτιάς από μία πλευρά προς το εσωτερικό:

- Η φωτιά κλείνει δρόμους και εξόδους με ρυθμό που καθορίζεται από τη ροή αέρα, τη χωροθέτηση κτιρίων κ.λπ.
- Οι πράκτορες αναπροσαρμόζουν συνεχώς τις διαδρομές τους· η διαθεσιμότητα του χρόνου γίνεται κρίσιμη παράμετρος.

- Μπορεί να συνδυαστεί με το προηγούμενο πλαίσιο γειτονικής πληροφόρησης (όσοι βλέπουν καπνό ή αυτοκίνητα που γυρίζουν πίσω, επαναπρογραμματίζουν άμεσα την πορεία τους).

5. Λεπτομερέστερη μικροκινηματική και σήματα ελέγχου

- **Συστήματα φωτεινής σηματοδότησης** με προγράμματα έκτακτης ανάγκης (πράσινο κύμα προς τις εξόδους).
- **Μοντελοποίηση μικρό-ατυχημάτων** και ρεαλιστικών περιορισμών (ελάχιστη απόσταση ασφαλείας) για να εξαλειφθεί το τεχνητό “jitter” που αποτρέπει τα πλήρη stop.
- **Συμπερίληψη οχημάτων πρώτης απόκρισης** (αστυνομία, πυροσβεστική, ασθενοφόρα) ώστε να εξεταστούν προτεραιότητες λωρίδων.

6. Επέκταση χωρικής ακρίβειας

Τελικός στόχος θα μπορούσε να είναι ένα γεωαναφερόμενο δίκτυο πλήρους λεπτομέρειας, με όλους τους δρόμους έως την πράσινη γραμμή, θέσεις στάθμευσης, πεζοδρόμους και κυρίως την ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων κυκλοφορίας για βαθμονόμηση του μοντέλου.

7. Διασταύρωση με ανθρώπινη συμπεριφορά

Ένα υβριδικό σχήμα agent-based + κοινωνιοδημογραφικό θα επέτρεπε τη σύνδεση ηλικίας, εμπειρίας, ακόμη και κινήτρων με την ταχύτητα αντίδρασης ή την προθυμία αλλαγής πορείας.

8. Ενσωμάτωση πλατφόρμας SUMO (Simulation of Urban Mobility) [\[19\]](#)

Η μετάπτωση της υλοποίησης σε ένα καθιερωμένο και ανοικτού κώδικα προσομοιωτή όπως το SUMO μπορεί να προσφέρει πολλαπλά οφέλη:

- **Απόλυτος έλεγχος αλγορίθμου:** Η ανοικτή αρχιτεκτονική του SUMO επιτρέπει την επιθεώρηση και τροποποίηση των εσωτερικών μοντέλων (car-following, lane-changing κ.λπ.), διατηρώντας την ερευνητική “ορατότητα” που προσέφερε η χειροποίητη υλοποίηση.
- **Παραμετροποίηση σε βάθος:** Κάθε στοιχείο (όρια ταχύτητας, gap acceptance, προγράμματα σηματοδότησης) είναι ρυθμίσσιμο, διευκολύνοντας έτσι πειράματα ευαισθησίας αλλά και την υλοποίηση στοχευμένων σεναρίων.

- **Κλιμάκωση σε πλήρες σύστημα προσομοίωσης οχήματος:** Το SUMO διαθέτει έτοιμες διεπαφές για σύνδεση με εξωτερικά agent-based ή MAS πλαίσια (π.χ. TraCI), επιτρέποντας τη σταδιακή εξέλιξη της παρούσας εργασίας σε ολοκληρωμένη πλατφόρμα οχημάτων με high-fidelity φυσική.
- **Δικαιολόγηση της αρχικής custom λύσης:** Η αρχική μας υλοποίηση κρίθηκε απαραίτητη προκειμένου να ελέγξουμε πλήρως τον πειραματικό χώρο, να επιβεβαιώσουμε τη θεωρητική προσέγγιση και να αποφύγουμε black-box εξαρτήσεις. Με την ωρίμανση του μοντέλου, η μετάβαση σε SUMO καθίσταται πλέον ρεαλιστική χωρίς να χαθεί η δυνατότητα δημιουργικής παρέμβασης.

Συνοψίζοντας

Η μελλοντική δουλειά μπορεί να κινηθεί σε τέσσερις άξονες: **πλουσιότερη συμπεριφορική μοντελοποίηση** (καθυστερήσεις, μάθηση, ατελής γνώση), **δυναμικές φυσικές καταστροφές και πολλαπλές βλάβες** (κλείσιμο κόμβων σε πραγματικό χρόνο), **λεπτομερές δίκτυο με ρεαλιστική κινηματική συμπεριφορά**, και **υιοθέτηση μιας επεκτάσιμης πλατφόρμας προσομοίωσης όπως το SUMO** (ανοικτός κώδικας, πλήρης παραμετροποίηση, διασύνδεση με εξωτερικούς πράκτορες) [19]. Ο συνδυασμός τους θα παράσχει ένα εργαλείο ικανό όχι μόνο να επιβεβαιώσει τη σημερινή εικόνα αλλά και να αξιολογήσει πολιτικές και σχέδια πολιτικής προστασίας πριν χρειαστεί να τεθούν σε εφαρμογή σε πραγματικές κρίσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] Unity Technologies, "AI Navigation package," *Unity Documentation*, [Online]. Available: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.ai.navigation%401.1/manual/index.html>.
- [2] Unity Technologies, "Physics Raycast," *Unity Scripting API*, [Online]. Available: <https://docs.unity3d.com/6000.0/Documentation/ScriptReference/Physics.Raycast.html>.
- [3] Unity Technologies, "Rigidbody," *Unity Scripting API*, [Online]. Available: <https://docs.unity3d.com/6000.0/Documentation/ScriptReference/Rigidbody.html>.
- [4] Unity Asset Store, "Easy Roads 3D Free v3," *Unity Asset Store*, [Online]. Available: <https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/easyroads3d-free-v3-987>.
- [5] Unity Asset Store, "Low Poly Vehicle1 - Free," *Unity Asset Store*, [Online]. Available: <https://assetstore.unity.com/packages/3d/vehicles/land/low-poly-vehicle1-free-208280>.
- [6] CYENS Centre of Excellence, "iNicosia Digital Twin," *CYENS Dev Portal*, [Online]. Available: <https://dev.cyens.org.cy/portfolios/inicosia-digital-twin/>.
- [7] J. Fang, H. Zhuang, L. Zhang, and C. Wang, "MAS-Based Evacuation Simulation of an Urban Community during an Urban Rainstorm Disaster in China," *Sustainability*, vol. 12, no. 2, p. 546, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/2/546>.
- [8] Computational Fluid Dynamics Lab, "Pedestrian Flow and Crowd Simulation," *George Mason University*, [Online]. Available: <https://cfd.science.gmu.edu/research/projects/pedestrian-flow-and-crowd-simulation/>.
- [9] Visit Nicosia, "Nicosia Old Town map board with One-way Road network," *Visit Nicosia*, [Online]. Available: <https://www.visitnicosia.com.cy/nic-tourism-maps/>.
- [10] Google, "Google Maps," *Google Maps*, [Online]. Available: <https://www.google.com/maps>.
- [11] F. P. Tutorials, "Unity NavMesh Tutorial - Basics," *YouTube*, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=CHV1ymlw-P8&t=2s>.
- [12] F. P. Tutorials, "Unity NavMesh Tutorial - Making it Dynamic," *YouTube*, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=FkJ45Pt-mY>.

- [13] F. P. Tutorials, "Unity NavMesh Tutorial - Animated Character," *YouTube*, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=blPgIabGueM>.
- [14] F. P. Tutorials, "Unity NavMesh Tutorial - Part 4," *YouTube*, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=G9Otw12OUvE&list=PLuCMMinOltbtStbv0h7UNslwi0UhPLCNC&index=4>.
- [15] Python Software Foundation, "Python 3.13.3 Release," *Python.org*, [Online]. Available: <https://www.python.org/downloads/release/python-3133/>.
- [16] The Pandas Development Team, "User Guide," *pandas Documentation*, [Online]. Available: https://pandas.pydata.org/docs/user_guide/index.html.
- [17] J. D. Hunter et al., "Matplotlib: Visualization with Python," *Matplotlib Documentation*, [Online]. Available: <https://matplotlib.org>.
- [18] C. R. Harris et al., "Array programming with NumPy," *NumPy Documentation*, [Online]. Available: <https://numpy.org/doc/stable/>.
- [19] Eclipse Foundation, "SUMO Documentation," *Simulation of Urban MObility (SUMO)*, [Online]. Available: <https://sumo.dlr.de/docs/index.html>.