

Ατομική Διπλωματική Εργασία

ΕΞΩΜΟΙΩΣΗ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΠΛΥΘΗΣΜΟΥ - iNICOSIA

Μάριος Δημητρίου

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2025

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΞΩΜΟΙΩΣΗ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΠΛΥΘΙΣΜΟΥ - iNICOSIA

Μάριος Δημητρίου

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

Θα ήθελα κατ' αρχάς να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αριστείδου Ανδρέα, για την αδιάκοπη καθοδήγηση, τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις και την αμέριστη υποστήριξή του σε κάθε στάδιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χωρίς την εμπιστοσύνη και τις πολύτιμες συμβουλές του, το εγχείρημα αυτό δεν θα είχε λάβει την παρούσα του μορφή.

Ευχαριστώ θερμά το CYENS – Centre of Excellence για την παραχώρηση του *digital twin* της εντός των τειχών Λευκωσίας (iNicosia), το οποίο αποτέλεσε τη θεμέλια υποδομή της προσομοίωσης και έδωσε ρεαλισμό και ακρίβεια στα πειράματά μου.

Τέλος, εκφράζω την εκτίμησή μου προς την Πολιτική Άμυνα Κύπρου για τις λεπτομερείς πληροφορίες που διέθεσε σχετικά με τη χωροθέτηση και τη χωρητικότητα των καταφυγίων στο ιστορικό κέντρο, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην αξιοπιστία των σεναρίων εκκένωσης που αναπτύχθηκαν. Σε όλους όσοι συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα, αφιερώνω το παρόν έργο με ευγνωμοσύνη.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσει μια ρεαλιστική προσομοίωση μαζικής εκκένωσης για την εντός των τειχών παλιά πόλη της Λευκωσίας, αξιοποιώντας το ψηφιακό δίδυμο *iNicosia* (CYENS, 2023) και τη μηχανή πραγματικού χρόνου Unity. Το κίνητρο που ώθησε για αυτό το θέμα είναι αφενός η ασφάλεια των πολιτών και η αφετέρου η αποτελεσματική διαχείριση ενδεχόμενων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης όπου αποτελούν διαχρονικές προκλήσεις για κάθε πόλη. Παρά τον μεγάλο αριθμό μελετών που εξετάζουν εκκενώσεις κτιρίων ή ευρύτερων αστικών περιοχών, δεν είχε έως σήμερα προσομοιωθεί συστηματικά η ιδιόμορφη, περιτειχισμένη δομή του ιστορικού κέντρου της Λευκωσίας.

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε βασίζεται σε αυτόνομους πράκτορες τύπου «Ηγέτη-Ακολούθου», οι οποίοι κινούνται πάνω σε πλέγμα πλοήγησης του πραγματικού οδικού δικτύου. Προσομοιώθηκαν 3000 εικονικοί κάτοικοι και εξετάστηκαν δύο ερευνητικές υποθέσεις: (α) η επάρκεια του οδικού δικτύου για ταχεία εκκένωση σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης και (β) η επάρκεια αλλά και η λειτουργικότητα των διαθέσιμων καταφυγίων σε αντίστοιχα σενάρια.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις αρχικές υποθέσεις και υπογραμμίζουν την ανάγκη να παραμένουν προσβάσιμες όλες οι βασικές έξοδοι καθώς και η βαρύτητα του να παρέχεται, σαφής ενημέρωση στον πληθυσμό για τη θέση, τη χωρητικότητα και την προτεραιότητα χρήσης των καταφυγίων, ώστε οι πολίτες να γνωρίζουν πού να κατευθυνθούν σε περίπτωση ανάγκης. Παράλληλα, η μελέτη προσφέρει ένα επεκτάσιμο εργαλείο στον Δήμο και την Πολιτική Άμυνα για τη βελτιστοποίηση των σχεδίων έκτακτης ανάγκης.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	1
Εισαγωγή	1
1.1 Θέμα.....	1
1.2 Κίνητρο	1
1.3 Συνεισφορά	2
1.4 Υλοποίηση	2
Κεφάλαιο 2	4
Θεωρητικό Πλαίσιο	4
2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο	4
2.1.1 AI Navigation	4
2.1.2 Navmesh Agents	4
2.1.3 Unity’s Navmesh	5
2.1.4 Navmesh Baking.....	5
2.1.5 Unity’s AI Navigation	6
2.2 Έννοιες.....	7
2.3 Άλλες Μελέτες.....	7
2.3.1 Μελέτη στο περιοδικό Sustainability (MDPI).....	7
2.3.2 Μελέτη Pedestrian Flow and Crowd Simulation - Center for Computational Fluid Dynamics.....	8
Κεφάλαιο 3	10
Μεθοδολογία.....	10
3.1 Υλοποίηση	10
3.1.1 Agent Animation.....	10
3.1.2 Πιλοτική Σκηνή	11
3.1.2.1 Σκοπός της Πιλοτικής Σκηνής	11

3.1.2.2 NavMesh Baking και Δημιουργία Πρακτόρων	12
3.1.2.3 Χαρακτηριστικά Πρακτόρων.....	12
3.1.2.4 Συμπεριφορά «Ηγέτη-Ακολούθου».....	12
3.1.2.5 Αξιολόγηση του Πακέτου AI Navigation.....	13
3.1.3 Κύρια Σκηνή	13
3.1.3.1 Δημιουργία Περιβάλλοντος.....	13
3.1.3.2 Τοποθέτηση Εξόδων και Καταφυγίων	14
3.1.3.3 Ρυθμίσεις Δημιουργίας και Κίνησης Πρακτόρων	15
3.1.3.4 Περιβάλλον Ρυθμίσεων και Ρύθμιση Παραμέτρων Προσομοίωσης.	18
3.2 Συγκέντρωση Δεδομένων	18
3.2.1 Συλλογή πληροφοριών για κάθε Προσομοίωση.....	18
3.2.1.1 Λειτουργία του Metrics Manager	18
3.2.1.2 Υπολογισμός Πραγματικής Απόστασης Μετακίνησης των Πρακτόρων	19
3.2.2 Δομή Αποτελεσμάτων και Πλάνο Εκτελέσεων της Προσομοίωσης.....	19
3.2.3 Συνάντηση με την Πολιτική Άμυνα Κύπρου.....	20
3.2.4 Τεχνικές Προδιαγραφές Υπολογιστή και Εργαλεία Ανάλυσης Δεδομένων	21
Κεφάλαιο 4	22
Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων	22
4.1 Υποθέσεις και Σενάρια	22
4.1.1 Χάρτης Εξόδων και Καταφυγίων	23
4.1.2 Υπόθεση 1.....	23
4.1.2.1 Πιλοτικό Σενάριο	23
4.1.2.2 Σενάριο περιορισμένων εξόδων.....	24
4.1.3 Υπόθεση 2.....	24
4.1.3.1 Πιλοτικό Σενάριο με Καταφύγια	24

4.1.3.2 Σενάριο με περισσότερα Καταφύγια	25
4.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	25
4.2.1 Ποσοστά και πλήθος πρακτόρων.....	25
4.2.2 Κατανομή Ταχυτήτων.....	26
4.2.3 Χρονικό πλαίσιο προσομοίωσης	27
4.2.4 Χάρτης Πυκνότητας Θέσεων Εμφάνισης (Heatmap).....	27
4.2.5 Ανάλυση Υπόθεσης 1	28
4.2.5.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Πιλοτικού Σεναρίου	28
4.2.5.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου περιορισμένων εξόδων.....	37
4.2.6 Ανάλυση Υπόθεσης 2	45
4.2.6.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Πιλοτικού Σεναρίου με Καταφύγια ...	45
4.2.6.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου με περισσότερα Καταφύγια	54
Κεφάλαιο 5	64
Συζήτηση	64
5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων Υπόθεσης 1	64
5.1.1 Σύγκριση Χρονολογικής Εξέλιξης ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης	64
5.1.1.1 Ποσοστά επιτυχίας καθολικής διάρκειας προσομοίωσης.....	64
5.1.1.2 Σωρευτική Εξέλιξη Επιτυχημένου Ποσοστού Πρακτόρων.....	66
5.1.1.3 Θέση εμφάνισης και χρόνος επιτυχούς αποχώρησης	70
5.1.2 Σύγκριση Συνολικού χρόνου και Απόστασης Μετακίνησης.....	71
5.1.2.1 Απόσταση Μετακίνησης Πρακτόρων.....	71
5.1.2.2 Χρόνος Μετακίνησης Πρακτόρων	73
5.1.3 Σύγκριση Χρήσης Εξόδων.....	74
5.2 Σύνοψη Υπόθεσης 1	76
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων Υπόθεσης 2	77
5.3.1 Σύγκριση Χρονολογικής Εξέλιξης ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης	77
5.3.1.1 Ποσοστά επιτυχίας καθολικής διάρκειας προσομοίωσης.....	77

5.3.1.2 Σωρευτική Εξέλιξη Επιτυχημένου Ποσοστού Πρακτόρων.....	79
5.3.1.3 Θέση εμφάνισης και χρόνος επιτυχούς αποχώρησης	83
5.3.2 Σύγκριση Συνολικού χρόνου και Απόστασης Μετακίνησης.....	85
5.3.2.1 Απόσταση Μετακίνησης Πρακτόρων.....	85
5.3.2.2 Χρόνος Μετακίνησης Πρακτόρων	86
5.3.3 Σύγκριση Χρήσης Εξόδων και Καταφυγίων	88
5.4 Σύνοψη Υπόθεσης 2	90
Κεφάλαιο 6	93
Συμπεράσματα	93
6.1 Συμπεράσματα	93
6.2 Περιορισμοί	93
6.3 Μελλοντική δουλειά	94
Βιβλιογραφία	96

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Θέμα

Στόχος αυτής της έρευνας είναι η προσομοίωση της εκκένωσης ενός πλήθους ανθρώπων από την παλιά πόλη της Λευκωσίας σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, καθώς και η εξαγωγή στατιστικών στοιχείων σε σχέση με τα ποσοστά πληθυσμού που έχουν επιτυχώς διαφύγει. Παράλληλα, θέλουμε να διερευνήσουμε πιθανές απειλές και αδυναμίες στο οδικό και αστικό δίκτυο κατά την διαδικασία της εκκένωσης. Βασισμένο σε ένα ήδη υπάρχων έργο του ερευνητικού κέντρου CYENS Centre Of Excellence, το iNicosia Project [10] δημοσιεύθηκε το 2023. Πρόκειται για ένα digital twin της πόλης της Λευκωσίας το οποίο αποτελείται από ένα ακριβές 3D μοντέλο της πόλης, με αναπαραστάσεις από πραγματικά κτίρια και μνημεία. Το έργο αυτό θα μας προσφέρει τα κατάλληλα δεδομένα και υποδομές έτσι ώστε να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε ένα δυναμικό περιβάλλον στο οποίο εικονικοί πράκτορες θα αλληλοεπιδρούν με δίκτυο, προσομοιάζοντας ρεαλιστικές συνθήκες εκκένωσης. Στο επίκεντρο είναι η προώθηση μιας ολοκληρωμένης έρευνας όπου αξιολογεί την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η παλιά πόλη της Λευκωσίας όσον αφορά την ασφάλεια των πολιτών σε περίπτωση κινδύνου, καθώς και τη γνωστοποίηση των προβλημάτων της πόλης που σχετίζονται με τη μετακίνηση των κατοίκων προς τα σημεία εξόδου ή καταφυγίων.

1.2 Κίνητρο

Η ασφάλεια των πολιτών και η αποτελεσματική διαχείριση ενδεχόμενων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης αποτελούν διαχρονικές προκλήσεις για κάθε πόλη. Ειδικότερα στην παλιά πόλη της Λευκωσίας, η ιδιαιτερότητα του πολεοδομικού σχεδιασμού εγείρουν ερωτήματα σχετικά με την ικανότητα του οδικού ιστού να υποστηρίξει ασφαλείς και ταχείες εκκενώσεις πληθυσμού. Με αυτή την έρευνα επιδιώκεται αφενός η ενίσχυση της ευαισθητοποίησης των πολιτών γύρω από θέματα ασφάλειας, εξόδων διαφυγής και σημείων καταφυγίου και αφετέρου η διευκόλυνση της δημοτικής αρχής στη λήψη αποφάσεων για βελτιστοποίηση του οδικού δικτύου και του αστικού σχεδιασμού. Η δημιουργία ρεαλιστικών προσομοιώσεων, μέσω της ψηφιακής αναπαράστασης της πόλης (digital twin), δύναται να αποκαλύψει τρωτά σημεία, πιθανές συμφορήσεις ή

ακόμη και παράγοντες που σήμερα δεν είναι εμφανείς. Με τον τρόπο αυτό, προσφέρεται μία τεκμηριωμένη και επιστημονικά αξιόπιστη βάση για παρεμβάσεις που μπορούν να αναβαθμίσουν την πολιτική προστασία και να κατοχυρώσουν την ασφάλεια των κατοίκων. Εν τέλει, η εργασία αυτή φιλοδοξεί να συμβάλει ουσιαστικά στη δημιουργία ενός ασφαλέστερου αστικού περιβάλλοντος στη Λευκωσία, αξιοποιώντας τη σύγχρονη τεχνολογία για να αποτυπώσει ρεαλιστικές συνθήκες εκκένωσης. Με αυτόν τον τρόπο, θα αναδειχθούν προτάσεις που μπορούν να υλοποιηθούν άμεσα ή να σχεδιαστούν για το μέλλον, εναρμονίζοντας την ιστορική ταυτότητα της πόλης με τις ζωτικής σημασίας ανάγκες προστασίας του πληθυσμού.

1.3 Συνεισφορά

Η εργασία αυτή επιφέρει μια σημαντική συμβολή τόσο σε πρακτικό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο. Καταρχάς, προσφέρει ένα επαρκώς ρεαλιστικό μοντέλο προσομοίωσης για την εκκένωση της Παλιάς Πόλης της Λευκωσίας, επιτρέποντας τη διερεύνηση κρίσιμων σεναρίων ασφαλείας και τον εντοπισμό πιθανών σημείων συμφόρησης. Παράλληλα, τα δεδομένα που συλλέγονται από την προσομοίωση μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για περαιτέρω αναλύσεις και βελτιστοποιήσεις, είτε σε ακαδημαϊκά πλαίσια (π.χ. μελέτες στον χώρο των συστημάτων πολλών πρακτόρων και της ανθρώπινης συμπεριφοράς), είτε σε πρακτικά, για τη βελτίωση των σχεδίων εκκένωσης και υποδομών της παλιάς πόλης της Λευκωσίας. Με τον τρόπο αυτό, η συγκεκριμένη προσέγγιση συμβάλλει στη σύζευξη της τεχνολογίας με το αστικό περιβάλλον, ενισχύοντας την ασφάλεια και την ανθεκτικότητα των αστικών κέντρων.

1.4 Υλοποίηση

Για την ανάπτυξη της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε η μηχανή αναπαράστασης παιχνιδιών πραγματικού χρόνου Unity. Αρχικά, εισάγαμε στο Unity το τρισδιάστατο μοντέλο (FBX) της Λευκωσίας, όπως αυτό παρέχεται από το iNicosia Project. Το μοντέλο αυτό αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία χτίστηκαν οι υπόλοιπες λειτουργίες του περιβάλλοντος. Για τη διαμόρφωση και την τοποθέτηση του οδικού δικτύου πάνω από το υπάρχον μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το πακέτο EasyRoads. Με αυτό το εργαλείο ήταν δυνατή η εύκολη και ακριβής σχεδίαση δρόμων και μονοπατιών, προσαρμοσμένων στην πραγματική γεωμετρία της πόλης. Επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία του Navigation Mesh μέσω του Unity AI Navigation package. Το Navigation Mesh επιτρέπει στους εικονικούς πράκτορες (agents) να αναγνωρίζουν πού μπορούν να κινηθούν και να

υπολογίζουν δυναμικά τις διαδρομές που θα ακολουθήσουν. Το ίδιο πακέτο αναλαμβάνει και τον υπολογισμό των διαδρομών (path calculation) των πρακτόρων, ενώ φροντίζει για την αυτόματη αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ τους. Έτσι, επιτυγχάνεται ρεαλιστική προσομοίωση της ροής κίνησης των κατοίκων σε ένα ενδεχόμενο σενάριο εκκένωσης. Για την περαιτέρω ρύθμιση της συμπεριφοράς και της δημιουργίας των πρακτόρων , την υλοποίηση των διάφορων σεναρίων που θα μας βοηθήσουν να αξιολογήσουμε το πόσο ρεαλιστική είναι η προσομοίωσης, και τον μηχανισμό των καταφυγίων δημιουργήθηκαν προσαρμοσμένα scripts στη γλώσσα προγραμματισμού C#.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Πλαίσιο

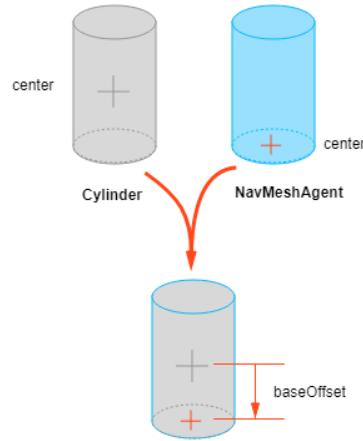
2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1.1 AI Navigation

Η πλοήγηση τεχνητής νοημοσύνης (AI Navigation) αναφέρεται στις μεθόδους και τις τεχνικές που επιτρέπουν σε εικονικούς πράκτορες (agents) να κινούνται αποτελεσματικά μέσα σε ένα περιβάλλον, αποφεύγοντας εμπόδια και βρίσκοντας διαδρομές από ένα σημείο εκκίνησης σε έναν καθορισμένο προορισμό. Σε γενικές γραμμές, η πλοήγηση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης βασίζεται σε αλγορίθμους αναζήτησης και βελτιστοποίησης, όπως ο A^* , που επιτρέπουν την εύρεση της βέλτιστης ή μιας κατάλληλης διαδρομής με βάση κριτήρια όπως η απόσταση ή ο χρόνος. Επιπλέον, συνδυάζει τεχνικές ανίχνευσης συγκρούσεων και αποφυγής εμποδίων, ώστε οι πράκτορες να μπορούν να ανταποκρίνονται δυναμικά στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Η αποτελεσματική πλοήγηση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης είναι ζωτικής σημασίας σε προσομοιώσεις πλήθους, σε βιντεοπαιχνίδια, σε συστήματα ρομποτικής, αλλά και σε εφαρμογές όπου η ρεαλιστική και έξυπνη μετακίνηση πολλών χαρακτήρων παίζει καθοριστικό ρόλο, όπως σε μια προσομοίωση μαζικής εκκένωσης ενός αστικού χώρου.

2.1.2 Navmesh Agents

Οι πράκτορες (Agents) στο Unity αντιπροσωπεύουν τα αυτόνομα αντικείμενα (π.χ. χαρακτήρες, άνθρωποι ή ζώα, οχήματα, κ.α.) που αλληλοεπιδρούν με το NavMesh για να εκτελούν μετακινήσεις και αποφάσεις πλοήγησης. Για να λειτουργήσουν ως πράκτορες, τα GameObjects χρειάζεται να διαθέτουν το component NavMesh Agent, το οποίο περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η ταχύτητα κίνησης, η επιτάχυνση, η γωνιακή ταχύτητα (angular speed), η ακτίνα και το ύψος του πράκτορα. Επιπλέον, φέρουν μια Area Mask, που ορίζει σε ποιες περιοχές μπορούν να μετακινηθούν, ενώ ρυθμίσεις όπως το Auto Braking και η απόσταση επιβράδυνσης επιτρέπουν πιο ρεαλιστική προσομοίωση της κίνησης. Με αυτά τα δεδομένα, κάθε πράκτορας μπορεί να αναζητά μια διαδρομή πάνω στο NavMesh και να προσαρμόζει τη συμπεριφορά του δυναμικά, ανάλογα με το περιβάλλον ή τους στόχους που του έχουν τεθεί.



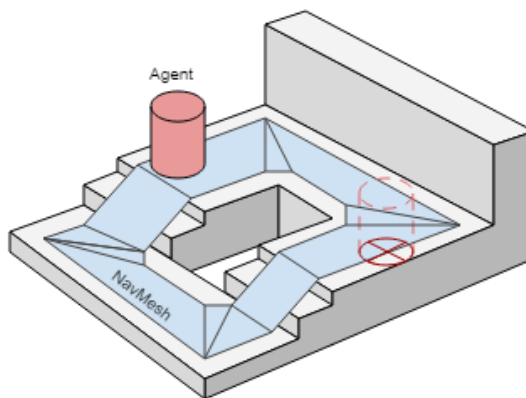
Σχήμα 2.1: Agent prefab with a NavMeshAgent component.

2.1.3 Unity's Navmesh

Το NavMesh (Navigation Mesh) είναι ουσιαστικά ένα «πλέγμα» πολυγώνων που ορίζει τις περιοχές όπου μπορούν να κινούνται οι πράκτορες μέσα σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον. Σε αντίθεση με παλαιότερες μεθόδους που βασίζονταν σε «πλέγματα κελιών» (grid-based Navigation), το NavMesh αξιοποιεί την πραγματική γεωμετρία του χώρου, δημιουργώντας πιο ακριβείς και ευέλικτες διαδρομές. Ο τρισδιάστατος χώρος μετατρέπεται σε πολύγωνα στα οποία οι agents μπορούν να κινηθούν. Όλα αυτά τα πολύγωνα σε συνδυασμό, απαρτίζουν το NavMesh.

2.1.4 Navmesh Baking

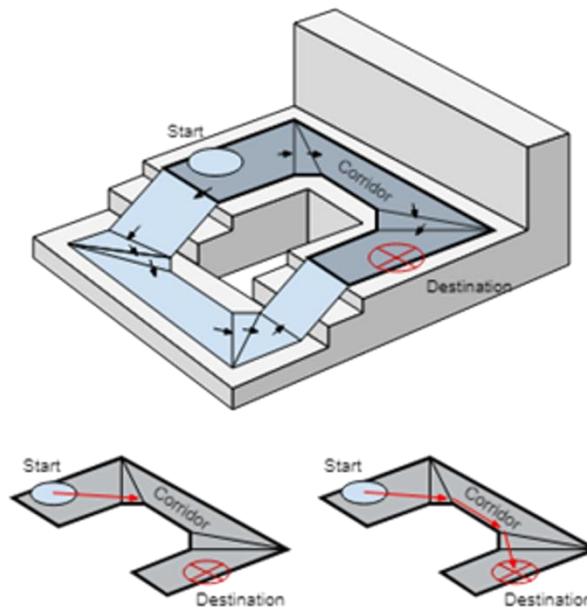
Η διαδικασία Baking είναι η φάση κατά την οποία σαρώνετε η σκηνή (scene) για την δημιουργία των πολυγώνων και «ψήνετε» ένα τελικό NavMesh πάνω στην τρέχουσα γεωμετρία του χώρου. Αυτό αντικατοπτρίζει την περιοχή στην οποία μπορούν να κινηθούν οι agents.



Σχήμα 2.2: Example of a baked NavMesh (light blue) over level geometry.

2.1.5 Unity's AI Navigation

Το ενσωματωμένο σύστημα AI Navigation του Unity (NavMesh) προσφέρει μια δομή πολυγώνων (mesh) πάνω στην οποία οι πράκτορες μπορούν να ανιχνεύουν και να ακολουθούν διαδρομές.. Κατά τη διαδικασία “baking” του NavMesh, μπορούμε να ορίσουμε διαφορετικές περιοχές (Navigation Areas) με συγκεκριμένο κόστος (Cost), καθορίζοντας έτσι πόσο “δύσκολη” ή χρονοβόρα είναι η μετακίνηση σε κάθε περιοχή. Για παράδειγμα, μια υδάτινη περιοχή μπορεί να λάβει υψηλότερο κόστος, υποδεικνύοντας ότι η κίνηση εκεί είναι πιο αργή, ενώ μια περιοχή-πόρτα (Door) μπορεί να είναι προσβάσιμη μόνο σε ορισμένους τύπους χαρακτήρων. Παράλληλα, το Unity χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο A* για την εύρεση της πιο βέλτιστης διαδρομής, συνυπολογίζοντας το συνολικό κόστος μετακίνησης ($\text{distance} * \text{cost}$) ανάμεσα σε “κόμβους” (nodes) που τοποθετούνται αυτόματα πάνω στα πολύγωνα του NavMesh.



Σχήμα 2.3: Result of NavMesh baking over static geometry.

Σε αυτό το πλαίσιο, το Unity διαθέτει τρεις προεπιλεγμένους τύπους περιοχών:

- Walkable, που επιτρέπει τη διέλευση,
- Not Walkable, που την απαγορεύει, και
- Jump, που αντιστοιχίζεται σε αυτόματα παραγόμενα NavMesh Links.

Υπάρχουν επιπλέον 29 προσαρμόσιμοι τύποι, στους οποίους μπορούμε να αποδώσουμε διαφορετικά κόστη ή να τους χρησιμοποιήσουμε για την υλοποίηση συγκεκριμένων σεναρίων (π.χ. πρόσβαση μόνο σε ανθρώπινους χαρακτήρες).

Επιπλέον, κάθε πράκτορας φέρει μια “Area Mask”, ένα bitmask που υποδεικνύει σε ποιες περιοχές επιτρέπεται να μετακινηθεί. Αυτό επιτρέπει πιο σύνθετα σενάρια, όπως το να μπλοκάρουμε εντελώς την πρόσβαση σε συγκεκριμένες περιοχές για ορισμένους παράγοντες (π.χ. ζόμπι που αδυνατούν να περάσουν από πόρτες). Μέσω αυτών των εργαλείων –περιοχές, κόστος και μάσκες– μπορούμε να ρυθμίσουμε με ακρίβεια τη συμπεριφορά της τεχνητής νοημοσύνης, εξασφαλίζοντας ότι η πλοήγηση ανταποκρίνεται ρεαλιστικά στις ανάγκες της προσομοίωσης πλήθους και μαζικής εκκένωσης.

2.2 Έννοιες

GameObject

Το βασικό αντικείμενο μέσα σε μια σκηνή (scene), όπου μπορεί να αναπαριστά χαρακτήρες, props, κάμερες, τοπία, σημεία διαδρομής, κ.α.

Mesh

Το Mesh αποτελεί το κύριο γραφικό «δομικό στοιχείο» του Unity. Τα Mesh συνθέτουν σημαντικό τμήμα των τρισδιάστατων κόσμων που δημιουργείται. Η Unity υποστηρίζει πολυγωνικά Meshes που αποτελούνται από τρίγωνα ή τετράγωνα (triangulation ή quadrangulation).

NavMesh

Ένα πλέγμα πολυγώνων που ορίζει της περιοχές όπου μπορούν να κινηθούν οι agents μέσα στο περιβάλλον. Χρησιμοποιείται για εύρεση μονοπατιών για πλοήγηση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης.

Scene

Μια σκηνή (scene) περιέχει το περιβάλλον και τα menu. Μέσα σε κάθε σκηνή τοποθετούμε τα εμπόδια, τις διακοσμήσεις και γενικότερα σχεδιάζουμε και δημιουργούμε το παιχνίδι ή simulation σε κομμάτια.

Scripts

Κομμάτια κώδικα τα οποία μας επιτρέπουν να φτιάξουμε τα δικά μας components, να ενεργοποιήσουμε γεγονότα μέσα στο simulation, να τροποποιήσουμε τα properties κάποιου component ή να διαχειριστούμε το user input.

2.3 Άλλες Μελέτες

2.3.1 Μελέτη στο περιοδικό Sustainability (MDPI)

Η μελέτη αυτή επικεντρώνεται σε οικιστικές κοινότητες και στις ενέργειες βελτιστοποίησης που μπορούν να εφαρμοστούν σε διαχείριση έκτακτης ανάγκης. Παρ' ότι ασχολείται με εκκένωση σε αστικό περιβάλλον, η έμφαση δίνεται κυρίως σε μικρότερες κλίμακες (π.χ. συγκροτήματα κατοικιών), όπου οι διαδρομές και οι πόροι είναι πιο περιορισμένοι και η αλληλεπίδραση έχει συχνά οικογενειακή/γειτονική διάσταση. Σε αντίθεση, η παρούσα εργασία εστιάζει σε μια ολόκληρη παλιά πόλη με πολυσύνθετο οδικό δίκτυο και ανοιχτές διαδρομές. Έτσι, ενώ αμφότερες οι προσομοιώσεις βασίζονται σε κοινές αρχές (π.χ. σημασία συστημάτων πλοήγησης, εντοπισμός συμφόρησης), διαφέρουν ως προς την κλίμακα, τα δεδομένα εισόδου (από γεωμετρία κτιρίων έως ολόκληρη χαρτογράφηση οδικού δικτύου) και την εστίαση σε εσωτερική έναντι ευρύτερης αστικής εκκένωσης.

2.3.2 Μελέτη Pedestrian Flow and Crowd Simulation - Center for Computational Fluid Dynamics

Οι προσομοιώσεις που περιγράφονται στο πλαίσιο αυτό αφορούν κυρίως κλειστούς ή ημι-κλειστούς χώρους (στάδια, σταθμοί μετρό, θέατρα κ.λπ.). Οι διαδρομές διαφυγής είναι προκαθορισμένες ή περιορισμένες (συγκεκριμένα κλιμακοστάσια, διάδρομοι, έξοδοι κινδύνου). Στόχος είναι η αξιολόγηση του σχεδιασμού των εγκαταστάσεων και η εξασφάλιση ασφαλούς και έγκαιρης εκκένωσης.

Σε σύγκριση με την προσομοίωση μιας ιστορικής πόλης, εδώ οι ροές είναι πιο «καθοδηγούμενες» από τις δομές του κτιρίου ή του σταδίου, με λιγότερες εναλλακτικές διαδρομές. Στην περίπτωση μας, αντιθέτως, οι κάτοικοι διαθέτουν μεγαλύτερη ελευθερία κίνησης σε έναν πολύπλοκο αστικό ιστό (π.χ. πυκνό οδικό δίκτυο, πολλαπλές γειτονίες και έξοδοι). Αυτή η διαφορά μεταφράζεται σε περαιτέρω προκλήσεις, αφού οι αποφάσεις των πρακτόρων δεν καθορίζονται από έναν αυστηρά καθορισμένο «διάδρομο διαφυγής», αλλά διαμορφώνονται βάσει της θέσης τους στον λαβυρινθώδη χάρτη της πόλης.

Συνοψίζοντας, οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις έχουν κοινή στόχευση, δηλαδή τη βελτίωση της ασφάλειας μέσω προσομοιώσεων εκκένωσης, αλλά εφαρμόζονται σε διαφορετικές κλίμακες και διαφορετικά είδη περιβάλλοντος: από τα μικρά συγκροτήματα κατοικιών έως στάδια και σταθμούς μετρό, και, αντιστοίχως, στην περίπτωση αυτής της διπλωματικής, μια ολοκληρωμένη αστική περιοχή. Παρά τις αποκλίσεις στα εργαλεία,

τις μεθοδολογίες και τα μοντέλα συμπεριφοράς, προκύπτουν πολύτιμες ιδέες που μπορούν να μεταφερθούν από το ένα πλαίσιο στο άλλο, ιδίως όσον αφορά τον εντοπισμό σημείων συμφόρησης, τη σημασία της γρήγορης κατεύθυνσης του πλήθους και την ανάγκη για επαρκή χωρητικότητα των εξόδων.

Επιπλέον, η πλειονότητα των μελετών που εντοπίσαμε αφορά κλειστούς χώρους ή σχετικά στενές αστικές δομές, και δεν καλύπτει την εκκένωση ενός διευρυμένου αστικού δικτύου με πολλαπλές εξόδους και διαδρομές. Για τον λόγο αυτό, επιλέξαμε να εστιάσουμε στη μεγαλύτερη κλίμακα μιας ιστορικής πόλης, διερευνώντας πώς η πολυπλοκότητα του οδικού δικτύου και η ανοικτή αρχιτεκτονική των διαδρομών επηρεάζουν τον συνολικό χρόνο και την αποδοτικότητα της εκκένωσης.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία

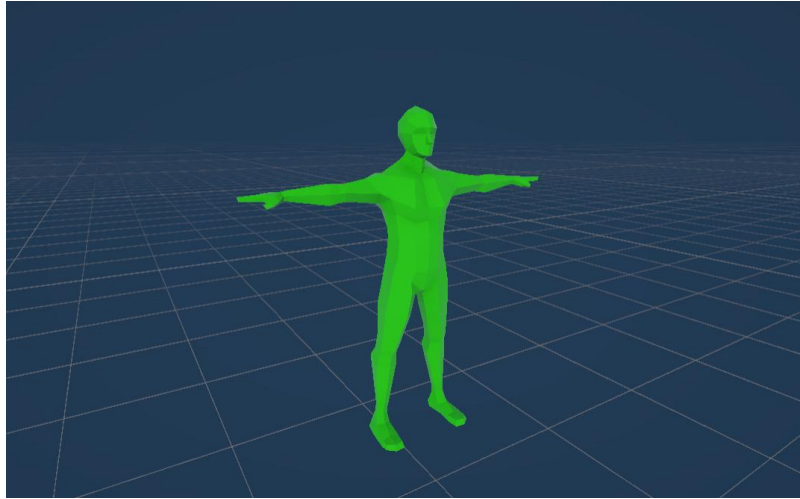
3.1 Υλοποίηση

Η προσομοίωση που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο υλοποιήθηκε κυρίως στην πλατφόρμα ανάπτυξης παιχνιδιών και διαδραστικών εφαρμογών Unity[1]. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον (game engine) που παρέχει ενσωματωμένα εργαλεία για γραφικά 2D και 3D, φυσική προσομοίωση, συστήματα πλοήγησης και πολλά άλλα. Επιπλέον, για την κάλυψη συγκεκριμένων αναγκών της προσομοίωσης, αξιοποιήθηκαν διάφορα πρόσθετα (add-Ons) και πακέτα, είτε ενσωματωμένα στη Unity είτε από το Asset Store, τα οποία επέκτειναν τη λειτουργικότητα της μηχανής σε τομείς όπως η δημιουργία του οδικού δικτύου και η διαχείριση των πρακτόρων.

- Unity: Unity 6 Preview (έκδοση: 6000.0.19f1 με DX11)
- EasyRoads3D Free v3 Package: (έκδοση: 3.2.4f3) [74]
- Unity AI Navigation Package: (έκδοση: 2.0.4) [1]
- Προσαρμοσμένα Scripts: Για τη διαχείριση της κίνησης των agent, τη συλλογή μετρικών κ.α.

3.1.1 Agent Animation

Για τις κινήσεις (animations) των πρακτόρων, αξιοποίησα μια έτοιμη λύση που προέκυψε από εκπαιδευτικά βίντεο (tutorials) του «Brackeys» [6][7][8][9]. Μέσω αυτών των βίντεο, απέκτησα ένα prefab πρακτόρων μαζί με τον αντίστοιχο Animator και script, εξοικονομώντας χρόνο και προσφέροντας μια ρεαλιστική βάση για την κίνηση των χαρακτήρων. Παρόλα αυτά, χρειάστηκαν ορισμένες μικρές προσαρμογές στον Animator, ώστε να ταιριάζει καλύτερα στο περιβάλλον και στις απαιτήσεις της δικής μου προσομοίωσης.

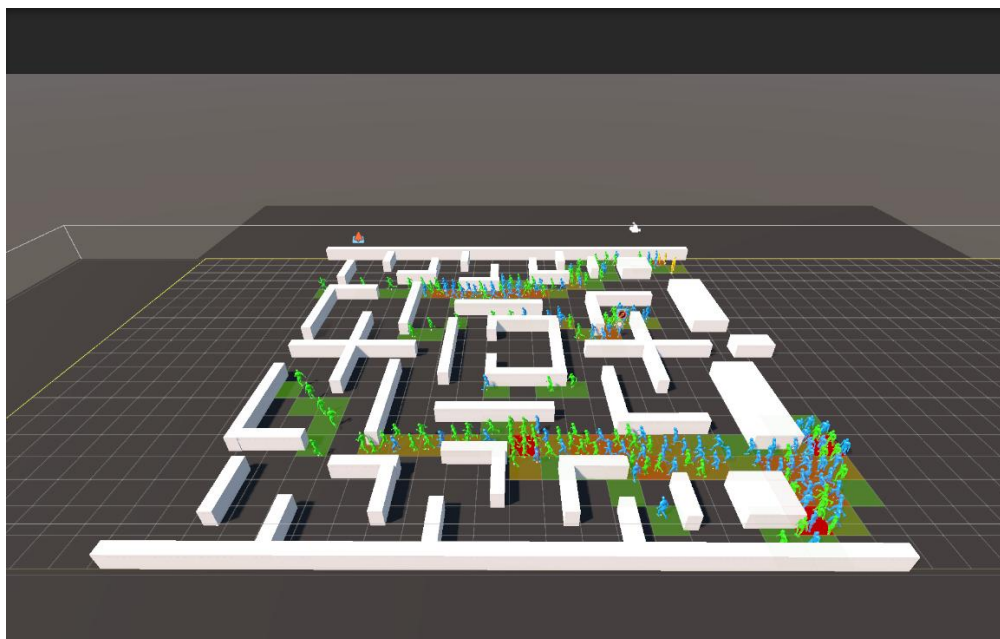


Σχήμα 3.1: Representation of prefab agent model used in the simulation.

3.1.2 Πιλοτική Σκηνή

3.1.2.1 Σκοπός της Πιλοτικής Σκηνής

Ξεκινώντας με την υλοποίηση της προσομοίωσης, ασχολήθηκα πρώτα με μια πιλοτική σκηνή καθώς στόχος αρχικά ήταν η εξοικείωση με της δυνατότητες το AI navigation package και να διαπιστώσω αν εάν αυτές μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες της εργασίας. Για το σκοπό αυτό, δημιούργησα ένα περιβάλλον που προσομοιώνει τους δρόμους της Παλιάς Πόλης της Λευκωσίας όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερα. Συγκεκριμένα, προσπάθησα να ενσωματώσω διάφορα χαρακτηριστικά όπως οι στενοί δρόμοι και οι λιγιστές διαδρομές και μονοπάτια προς τις εξόδους, ώστε το περιβάλλον να θυμίζει λαβύρινθο και να αντανακλά την πραγματικότητα της περιοχής. Για αυτό το περιβάλλον χρησιμοποίησα την ίδια μηχανή του Unity η οποία ήταν επαρκής για την δημιουργία της συγκεκριμένης σκηνής.



Σχήμα 3.2: Pilot scene designed to resemble the road network of Nicosia's Old City.

3.1.2.2 NavMesh Baking και Δημιουργία Πρακτόρων

Ακολουθώντας, εφάρμοσα τη διαδικασία «NavMesh Baking», ώστε να οριστεί η περιοχή όπου οι πράκτορες (agents) μπορούν να κινούνται με την χρήση του AI navigation package. Παράλληλα, υλοποιήθηκαν ορισμένα scripts που επιτρέπουν τη δημιουργία και κίνηση των πρακτόρων· σε αυτό το αρχικό στάδιο, οι πράκτορες τοποθετούνται σε προκαθορισμένες θέσεις, ενώ η αναζήτηση διαδρομής γίνεται μέσω των ενσωματωμένων βιβλιοθηκών της Unity, όπως η “UnityEngine.AI”.

3.1.2.3 Χαρακτηριστικά Πρακτόρων

Επιπλέον, οι πράκτορες διαθέτουν μια σειρά από προκαθορισμένα χαρακτηριστικά (π.χ. ταχύτητα, επιτάχυνση, απόσταση φρεναρίσματος), τα οποία μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης, παραμένοντας όμως ενιαία για όλους. Για την κίνηση των πρακτόρων, χρησιμοποίησα μια σειρά εκπαιδευτικών βίντεο, που βοήθησαν στην ενσωμάτωσή τους στο περιβάλλον και στην αρχική προσομοίωση της κίνησής τους ως κύλινδροι. Στη συνέχεια, αντικατέστησα τους κυλίνδρους με ανθρώπινες φιγούρες, προσθέτοντας τα ανάλογα animation στην κίνησή τους.

3.1.2.4 Συμπεριφορά «Ηγέτη-Ακολουθού»

Μετά από αυτό το ορόσημο, θέλησα να δημιουργήσω διαφορετικούς τύπους πρακτόρων, οπότε υλοποίησα μια συμπεριφορά «ηγέτη-ακολουθού». Κάποιοι πράκτορες λειτουργούν ως ηγέτες: γνωρίζουν δηλαδή τον προορισμό τους και απλώς προσπαθούν

να φτάσουν σε αυτόν. Αντίθετα, οι ακόλουθοι (followers) δεν έχουν ορισμένο προορισμό, αλλά ακολουθούν τον ηγέτη που τους έχει αντιστοιχιστεί. Σε περίπτωση που ο ηγέτης απομακρυνθεί υπερβολικά, οι ακόλουθοι «χάνονται» και σταματούν. Ο καθορισμός της κατηγορίας για κάθε πράκτορα γίνεται μέσα από το script δημιουργίας πρακτόρων (agent spawner), όπου δηλώνονται επίσης οι πιθανοί προορισμοί, ο αριθμός των πρακτόρων και ο τύπος τους. Παράλληλα, αυτή η λειτουργία μας βοηθά να υλοποιήσουμε ότι κάποιοι άνθρωποι μετακινούνται σαν ομάδες και όχι ο καθένας από μόνος του (π.χ. μια οικογένεια).

3.1.2.5 Αξιολόγηση του Πακέτου AI Navigation

Μετά τη δημιουργία της πιλοτικής σκηνής, προχωρήσαμε στην αξιολόγηση του πακέτου AI Navigation της Unity. Αποφασίσαμε να βασιστούμε στις δυνατότητές του, δεδομένου ότι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος πλοήγησης από την αρχή θα ήταν ιδιαίτερα απαιτητική, ενώ μπορούμε να ενσωματώσουμε τα δικά μας scripts εντός του συγκεκριμένου πακέτου. Επιπλέον, ο βασικός στόχος μας δεν είναι η ανάπτυξη ή η αξιολόγηση νέων αλγορίθμων κίνησης πρακτόρων, αλλά η εκτίμηση της ασφάλειας της Παλιάς Πόλης της Λευκωσίας και ο εντοπισμός πιθανών σημείων συμφόρησης ή βελτίωσης. Για αυτόν τον λόγο, επιλέξαμε μια λύση που λειτουργεί επαρκώς και είναι αρκετά απλή στην υλοποίησή της. Συγκεκριμένα, ο μηχανισμός που επιτρέπει στους πράκτορες να φτάνουν στον προορισμό τους λειτούργησε ικανοποιητικά, γι' αυτό και τον αξιοποιήσαμε και στην κύρια σκηνή της προσομοίωσης. Αντιθέτως, ο μηχανισμός “ηγέτης-ακόλουθος” δεν απέδωσε το ίδιο καλά, και χρειάστηκε να τροποποιηθεί και να βελτιωθεί περαιτέρω σε επόμενο στάδιο.

3.1.3 Κύρια Σκηνή

3.1.3.1 Δημιουργία Περιβάλλοντος

Για τη συνέχιση της εργασίας και την επίτευξη των τελικών στόχων, ήταν πλέον απαραίτητη η μετάβαση από την πιλοτική σκηνή στη βασική σκηνή της προσομοίωσης. Σε αυτή τη νέα σκηνή, τα ζητούμενα εστιάζουν περισσότερο στη ρεαλιστική αναπαράσταση του περιβάλλοντος και την ανάλυση των συμπεριφορών των πρακτόρων σε συνθήκες μαζικής εκκένωσης, αξιοποιώντας τα συμπεράσματα και τις βελτιώσεις που προέκυψαν από το αρχικό στάδιο. Στη βασική σκηνή της προσομοίωσης, αξιοποιήσαμε το τρισδιάστατο μοντέλο FBX που μας παραχωρήθηκε από το Ερευνητικό Κέντρο

CYENS, στο πλαίσιο του προγράμματος iNicosia. Το iNicosia project αποτελεί ένα ψηφιακό δίδυμο (digital twin) της εντός των τειχών παλιάς πόλης της Λευκωσίας. Εντάξαμε το μοντέλο στο Unity και το χρησιμοποιήσαμε ως βάση για την υλοποίηση της προσομοίωσης, ώστε να επιτύχουμε μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση του περιβάλλοντος. Για τη δημιουργία του οδικού δικτύου στο οποίο θα κινούνται οι πράκτορες, χρησιμοποιήθηκε το πακέτο EasyRoads. Η δωρεάν έκδοσή του παρείχε ακριβώς τα βασικά εργαλεία που χρειαζόμασταν. Ωστόσο, χρειάστηκε να επεξεργαστούμε χειροκίνητα ολόκληρο το FBX μοντέλο της πόλης και να τοποθετήσουμε δρόμο-δρόμο με την βοήθεια του Google maps [1] για συγκεκριμένα σημεία, κάτι που αποδείχθηκε εξαιρετικά χρονοβόρο αλλά κρίνεται αναγκαίο για την ορθή υλοποίηση της προσομοίωσης. Στην συνέχεια χρησιμοποιήσαμε το οδικό δίκτυο για να κάνουμε bake το navmesh στο οποίο μπορούν να κινούνται οι agents κατά το simulation.



Σχήμα 3.3: Main scene that represents the old city of Nicosia in unity game engine.

3.1.3.2 Τοποθέτηση Εξόδων και Καταφυγίων

Μετά τη δημιουργία του περιβάλλοντος της προσομοίωσης (που περιλαμβάνει την πόλη και το οδικό δίκτυο), χρειάστηκε να ορίσουμε όλες τις πιθανές τοποθεσίες καταφυγίων μαζί με τις χωρητικότητές τους, καθώς και όλες τις πιθανές εξόδους της παλιάς πόλης. Επειδή η πόλη περιβάλλεται από τείχη, υπάρχουν περιορισμένες εξοδοί, συγκεκριμένα έξι, οι οποίες είναι:

1. Αρχιεπισκόπου Μακαρίου II
2. Γέφυρα Δώρου Λοίζου
3. Πλατεία Ελευθερίας (μόνο πεζοί)
4. Πλατεία Σολωμού
5. Βασιλέως Γεωργίου Β
6. Πάφου

Η διαμόρφωση τόσο των καταφυγίων όσο και των σημείων εξόδου ήταν απαραίτητη, ώστε η προσομοίωση να αναπαριστά με ακρίβεια τις ρεαλιστικές συνθήκες εκκένωσης και να παρέχει τη δυνατότητα μελέτης των πιθανών σημείων συμφόρησης.

3.1.3.3 Ρυθμίσεις Δημιουργίας και Κίνησης Πρακτόρων

Δημιουργία και ανάθεση προορισμών

Αφού ολοκληρώθηκε η διαμόρφωση του περιβάλλοντος, προχωρήσαμε στη δημιουργία ενός νέου script που έχει ως κύρια αρμοδιότητα τη γέννηση (spawn) των πρακτόρων και την ανάθεση των προορισμών τους. Το ίδιο script υπολογίζει επίσης τις διαδρομές τους (paths) και ορίζει παραμέτρους, όπως η ταχύτητα κίνησης, έτσι ώστε κάθε πράκτορας να ενσωματώνεται πλήρως στην προσομοίωση. Επιπλέον, σε κάθε πράκτορα αντιστοιχίζεται η πιο κοντινή έξοδος (closest exit), ώστε να κατευθυνθεί σε αυτήν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Μη δυναμικός υπολογισμός διαδρομών

Το πακέτο AI Navigation της Unity δεν προσφέρει δυναμικό (real-time) υπολογισμό των διαδρομών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αντίθετα, η διαδρομή κάθε πράκτορα υπολογίζεται πριν την εκκίνηση και αντιστοιχίζεται στον πράκτορα, ο οποίος την ακολουθεί σε πραγματικό χρόνο. Αν και αυτό μπορεί να θεωρηθεί περιορισμός, επιλέξαμε να το αποδεχτούμε, καθώς ο πληθυσμός στο εσωτερικό της πόλης εκτιμάται σε 2-3 χιλιάδες άτομα, ενώ οι εξοδοί είναι συγκεκριμένες. Σε αυτό το πλαίσιο, η προκαθορισμένη διαδρομή κρίνεται επαρκής για τους στόχους της προσομοίωσης.

Κατανομή ταχυτήτων

Οι πράκτορες διαθέτουν τιμές ταχύτητας που ακολουθούν κανονική κατανομή (normal distribution), με βασική τιμή (mean) και τυπική απόκλιση (standard deviation) ίση με 0.5. Με απλά λόγια, αυτό σημαίνει ότι οι περισσότεροι πράκτορες θα κινούνται κοντά στη μέση ταχύτητα, ενώ ένα μικρότερο ποσοστό θα κινείται αισθητά πιο αργά ή πιο γρήγορα. Η κανονική κατανομή είναι ένα μαθηματικό μοντέλο σύμφωνα με το οποίο τα δεδομένα τείνουν να συγκεντρώνονται γύρω από έναν κεντρικό μέσο όρο, σχηματίζοντας την κλασική «καμπάνα» (bell curve). Με αυτή την προσέγγιση, επιτυγχάνεται μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση, καθώς δεν κινούνται όλοι οι άνθρωποι με την ίδια ταχύτητα.

Τριγωνοποίηση για Εισαγωγή Πρακτόρων

Στο αρχικό στάδιο της προσομοίωσης, οι πράκτορες τοποθετούνταν σε προκαθορισμένες θέσεις πάνω στο NavMesh, όμως αυτό αποδείχθηκε μη πρακτικό για χιλιάδες άτομα. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα, καταφύγαμε στη μέθοδο της «Τριγωνοποίηση» (triangulation), μέσω της οποίας το NavMesh διαιρείται σε ένα σύνολο από μη επικαλυπτόμενα τρίγωνα. Στην Unity, η κλάση NavMesh Triangulation παρέχει πρόσβαση στους κόμβους (vertices) που σχηματίζουν τις γωνίες των τριγώνων, καθώς και στους δείκτες (indices) που καθορίζουν τον τρόπο σύνδεσής τους. Έτσι, κάθε τρίγωνο περιγράφει μια επιμέρους περιοχή της επιφάνειας πλοήγησης. Αξιοποιώντας αυτήν την τριγωνική δομή, μπορούμε να παραγάγουμε τυχαία σημεία εντός των τριγώνων, διασφαλίζοντας ότι οι πράκτορες τοποθετούνται μόνο σε έγκυρα σημεία του NavMesh. Για την επιλογή των σημείων σε κάθε τρίγωνο χρησιμοποιούνται βαρυμετρικές συντεταγμένες, οι οποίες επιτρέπουν μαθηματικά ορθό υπολογισμό τυχαίων θέσεων στο εσωτερικό του τριγώνου. Με αυτό τον τρόπο, οι πράκτορες διασπείρονται τυχαία σε ολόκληρο το NavMesh, προσομοιώνοντας πιο ρεαλιστικές συμπεριφορές, ιδίως όταν ο αριθμός τους είναι πολύ μεγάλος.

Leader and Follower Behaviours

Ανάθεση Συμπεριφορών στους Πράκτορες

Κατά τη γέννηση των πρακτόρων (spawning), είναι απαραίτητο να καθορίσουμε τη συμπεριφορά τους. Στο πλαίσιο αυτό, έχουμε δύο κατηγορίες: ηγέτης (leader) και ακόλουθος (follower). Ο ηγέτης γνωρίζει όλες τις πιθανές εξόδους και καταφύγια της παλιάς πόλης (χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη τη χωρητικότητά τους σε πραγματικό χρόνο). Για κάθε ηγέτη υπολογίζεται η πλησιέστερη έξοδος ή καταφύγιο, και όταν ξεκινά η προσομοίωση, ο πράκτορας απλώς ακολουθεί τη διαδρομή που του έχει ανατεθεί, προσπαθώντας να αποφύγει τους υπόλοιπους πράκτορες κινούμενος γύρω τους, χωρίς όμως να παρεκκλίνει ουσιαστικά από την αρχικά καθορισμένη διαδρομή (λόγω των περιορισμών του πακέτου που χρησιμοποιείται).

Συμπεριφορά Ακολούθων

Οι ακόλουθοι (followers) δεν διαθέτουν προορισμό. Αντίθετα, τους αντιστοιχίζεται ένας ηγέτης και ακολουθούν τις κινήσεις του μέχρι να φτάσει στον προορισμό του. Μόλις ο ηγέτης φτάσει στην αντίστοιχη έξοδο, ο αλγόριθμος ελέγχει εάν ο ακόλουθος βρίσκεται κοντά σε αυτή. Αν ναι, του ανατίθεται το συγκεκριμένο σημείο-έξοδος, ενώ εάν είναι πολύ μακριά (ουσιαστικά «χάνεται»), ο ακόλουθος αφαιρείται από την προσομοίωση, θεωρούμενος ως «θύμα» που δεν κατάφερε να εκκενώσει εγκαίρως. Με αυτόν τον τρόπο, προσομοιώνουμε το σενάριο όπου μερικοί κάτοικοι γνωρίζουν πώς να βγουν από την πόλη, ενώ άλλοι εξαρτώνται από τη γνώση των υπολοίπων.

Περιορισμοί και Απλότητα Υλοποίησης

Πιθανές βελτιώσεις που δεν υλοποιήθηκαν αφορούν:

Τυχαία κίνηση για τους ακόλουθους σε περίπτωση που χάσουν τον ηγέτη τους.

Μηχανισμό περιπλάνησης των «χαμένων» ακόλουθων, ώστε να αναζητούν μόνοι τους κάποια έξοδο ή άλλον ηγέτη.

Τα παραπάνω θα μπορούσαν να βελτιώσουν σημαντικά το ρεαλισμό της προσομοίωσης. Ωστόσο, λόγω των χρονικών περιορισμών που θέτει μια πανεπιστημιακή διπλωματική εργασία, επιλέχθηκε να δοθεί προτεραιότητα στις βασικές λειτουργίες, αφήνοντας τις βελτιώσεις αυτές για πιθανή μελλοντική επέκταση.

Player Controller

Το συγκεκριμένο script χειρίζεται τη συμπεριφορά κίνησης και προορισμού των πρακτόρων (agents) στην προσομοίωση, αξιοποιώντας την NavMeshAgent κλάση και

τον ThirdPersonCharacter για την κίνηση και το animation. Ανάλογα με το αν ένας πράκτορας είναι ηγέτης (leader) ή ακόλουθος (follower), το script ορίζει διαφορετική λογική όπως επεξηγήθηκε πιο πάνω. Επιπλέον, το script διαχειρίζεται τη χωρητικότητα των καταφυγίων, ελέγχει αν ένας πράκτορας φτάνει στην έξοδο ή στο καταφύγιο και, αν αυτό έχει χώρο, τον «εισάγει», αλλιώς τον ανακατευθύνει ή τον αφαιρεί από την προσομοίωση. Τέλος, φροντίζει για την ενημέρωση του Metrics Manager ώστε να καταγράφονται στατιστικά σχετικά με τον αριθμό των πρακτόρων που ολοκληρώνουν ή εγκαταλείπουν την προσομοίωση.

3.1.3.4 Περιβάλλον Ρυθμίσεων και Ρύθμιση Παραμέτρων Προσομοίωσης

Έχουμε επίσης δημιουργήσει μια Setup Scene, η οποία μας επιτρέπει να ορίσουμε ή να τροποποιήσουμε διάφορες παραμέτρους της προσομοίωσης πριν από την εκκίνηση. Σε αυτή τη σκηνή, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον αριθμό των πρακτόρων (population), ποιες εξόδους ή καταφύγια θα είναι διαθέσιμα, τη βασική ταχύτητα των πρακτόρων και την τυπική απόκλιση, καθώς και το χρονικό όριο της προσομοίωσης. Επιπλέον, υλοποιήθηκε ένα script για τη διαχείριση των καμερών, επιτρέποντάς μας να έχουμε ευρεία οπτική όλου του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Μόλις ο χρήστης πατήσει το κουμπί “Start”, υπολογίζονται όλες οι διαδρομές (paths) των πρακτόρων και, όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία, ξεκινά η προσομοίωση εμφανίζοντας το αντίστοιχο μήνυμα ετοιμότητας. Όταν το χρονικό όριο τελειώσει κατευθυνόμαστε πίσω στο περιβάλλον ρυθμίσεων και βλέπουμε τα αποτελέσματα μας σε ένα csv αρχείο στην επιφάνεια εργασίας του υπολογιστή.

3.2 Συγκέντρωση Δεδομένων

3.2.1 Συλλογή πληροφοριών για κάθε Προσομοίωση

3.2.1.1 Λειτουργία του Metrics Manager

Για την παρούσα προσομοίωση, χρειαζόμασταν έναν τρόπο να συλλέγουμε και να οργανώνουμε όλα τα δεδομένα σχετικά με την πορεία και την έκβαση της εκκένωσης, ώστε να μπορέσουμε στη συνέχεια να τα επεξεργαστούμε και να αντλήσουμε συμπεράσματα. Το Metrics Manager script επιτελεί ακριβώς αυτόν τον ρόλο: παρακολουθεί καίριες πληροφορίες για κάθε πράκτορα, όπως ο χρόνος εμφάνισής του (spawn time), ο χρόνος αποχώρησής του (despawn time), η ταχύτητά του, το σύνολο των προορισμών που του ανατέθηκαν και το κατά πόσο έφτασε επιτυχώς στον προορισμό

του. Επιπλέον, καταγράφει και το συνολικό μήκος που διάνυσε ο πράκτορας (travel distance), προσφέροντας έτσι μια πλήρη εικόνα της διαδρομής που ακολούθησε. Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, είτε λόγω χρονικού ορίου είτε λόγω αποχώρησης όλων των πρακτόρων, το script παράγει αναφορές (reports) τόσο στην κονσόλα (μόνο αν τρέχουμε το simulation από το unity) όσο και σε αρχείο CSV, επιτρέποντας την αναλυτική μελέτη των αποτελεσμάτων και την πιθανή βελτίωση του μοντέλου εκκένωσης.

3.2.1.2 Υπολογισμός Πραγματικής Απόστασης Μετακίνησης των Πρακτόρων

Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο της προσομοίωσης ήταν ο υπολογισμός της απόστασης που διανύει κάθε πράκτορας μέχρι να φτάσει στον προορισμό του. Επειδή οι πράκτορες ακολουθούν αποκλειστικά το οδικό δίκτυο (NavMesh), δεν αρκούσε η απλή ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του σημείου εκκίνησης και του τελικού προορισμού. Αντιθέτως, έπρεπε να συνυπολογιστεί η πραγματική διαδρομή που διατρέχει ο πράκτορας, η οποία αποτελείται από μια ακολουθία σημείων ή «γωνιών» (corners) που παράγει ο αλγόριθμος πλοήγησης. Για κάθε πράκτορα, συλλέγουμε τη λίστα με τα σημεία της διαδρομής του και υπολογίζουμε την απόσταση ανάμεσα σε κάθε διαδοχικό ζεύγος σημείων. Το άθροισμα αυτών των αποστάσεων αποτυπώνει τη συνολική απόσταση κίνησης (travel distance), παρέχοντας μια ακριβή μέτρηση του πόσο δρόμο διάνυσε ο πράκτορας πάνω στο οδικό δίκτυο. Επιπλέον, αν ένας πράκτορας φτάσει σε κάποιο καταφύγιο και διαπιστωθεί ότι είναι πλήρες, τότε ανακατευθύνεται σε άλλη τοποθεσία και η επιπλέον απόσταση που διανύει υπολογίζεται και προστίθεται στο τελικό του travel distance.

3.2.2 Δομή Αποτελεσμάτων και Πλάνο Εκτελέσεων της Προσομοίωσης

Η δομή αποτελεσμάτων και πλάνο εκτελέσεων της προσομοίωσης μετά από κάθε εκτέλεση της προσομοίωσης, παράγεται ένα αρχείο CSV που περιλαμβάνει σημαντικές πληροφορίες για κάθε πράκτορα, όπως:

- Το χρόνο εμφάνισης (spawn time) και αποχώρησης (despawn time).
- Το αν έφτασε σε προορισμό (reached destination) ή όχι.
- Τις διαδρομές που του ανατέθηκαν (assigned destinations).
- Τη συνολική απόσταση (travel distance) που διένυσε.
- Την ταχύτητα κίνησης (speed) και τυχόν λοιπές αρχικές παραμέτρους.

Παράλληλα, το σύνολο αυτών των στοιχείων προσφέρει μία συνολική εικόνα για το πόσοι πράκτορες ολοκλήρωσαν επιτυχώς την εκκένωση, πόσοι δεν τα κατάφεραν, τη μέση απόσταση που διένυσαν και τον χρόνο που χρειάστηκε για να επιτύχουν τον στόχο τους. Με βάση αυτά τα δεδομένα, μπορούμε να εντοπίσουμε πιθανά σημεία συμφόρησης ή σενάρια στα οποία οι πράκτορες αδυνατούν να φτάσουν σε καταφύγια ή εξόδους. Για κάθε υπόθεση που εξετάζουμε, σχεδιάζουμε να τρέξουμε πολλαπλά σενάρια όπου θα αλλάζουμε διάφορες μεταβλητές, όπως το κλείσιμο εξόδων ή διαδρομών προς συγκεκριμένες εξόδους, καθώς και οι αναλογίες μεταξύ ηγετών και ακολούθων. Με αυτόν τον τρόπο, όχι μόνο θα μπορέσουμε να εξομαλύνουμε τις τυχόν αποκλίσεις που προκύπτουν από τυχαίες μεταβλητές (όπως η κατανομή ταχυτήτων ή η τυχαία τοποθέτηση των πρακτόρων), αλλά επίσης θα αξιολογήσουμε επακριβώς την απόδοση της προσομοίωσης και θα διαπιστώσουμε αν οι αρχικές μας υποθέσεις είναι έγκυρες ή όχι.

3.2.3 Συνάντηση με την Πολιτική Άμυνα Κύπρου

Για την ορθότητα και την ακρίβεια της προσομοίωσης, ήταν ζωτικής σημασίας να έχουμε αληθινές πληροφορίες σχετικά με τις τοποθεσίες των καταφυγίων (shelters) εντός της παλιάς πόλης της Λευκωσίας. Επειδή ο γενικός πληθυσμός συνήθως δεν διαθέτει πρόσβαση σε τέτοια δεδομένα, πραγματοποιήθηκε συνάντηση με την Πολιτική Άμυνα Κύπρου, η οποία είναι η αρμόδια αρχή για τη διαχείριση και γνωστοποίηση των θέσεων καταφυγίων και των αντίστοιχων χωρητικότητων τους. Κατά τη διάρκεια αυτής της συνάντησης, μας παρείχαν συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με τα καταφύγια που βρίσκονται εντός των τειχών, συμπεριλαμβανομένων των δυνατοτήτων τους. Συγκεκριμένα, η Πολιτική Άμυνα επιβεβαίωσε ότι υπάρχουν δύο καταφύγια εντός του τείχους:

1. Καταφύγιο 1 (Παλαιών Πατρών Γερμανός) με χωρητικότητα 200 άτομα.
2. Καταφύγιο 2 (Ριγένης) με χωρητικότητα 180 άτομα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και άλλα καταφύγια που προορίζονται να ενταχθούν στο δυναμικό της Πολιτικής Άμυνας. Ωστόσο, λόγω της έλλειψης κρίσιμων πληροφοριών (όπως η ακριβής χωρητικότητά τους) και του γεγονότος ότι δεν είναι ακόμη διαθέσιμα στον πληθυσμό σε περίπτωση ανάγκης, επιλέξαμε να μην τα συμπεριλάβουμε στην προσομοίωση μας.

3.2.4 Τεχνικές Προδιαγραφές Υπολογιστή και Εργαλεία Ανάλυσης Δεδομένων

Για την εκτέλεση της προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε ένας σύγχρονος υπολογιστής με επεξεργαστή πολλαπλών πυρήνων και επαρκή μνήμη RAM ώστε να ανταποκρίνεται στο φόρτο των χιλιάδων πρακτόρων που προσομοιώνονται ταυτόχρονα. Επιπλέον, η κάρτα γραφικών (GPU) συνεισέφερε στην επιτάχυνση των γραφικών διαδικασιών και της πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο. Όσον αφορά την ανάλυση των δεδομένων, το Metrics Manager εξήγαγε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες (όπως χρόνους εκκένωσης, αριθμό πρακτόρων που έφτασαν με επιτυχία, κ.ά.) σε μορφή CSV, επιτρέποντάς μας να χρησιμοποιήσουμε ποικίλα εργαλεία ανάλυσης. Ενδεικτικά, αξιοποιήθηκαν λογισμικά υπολογιστικών φύλλων όπως Excel και γλώσσες προγραμματισμού για επιστημονικούς υπολογισμούς συγκεκριμένα Python για την εξαγωγή στατιστικών, τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων (histograms, scatterplots κ.α.) και τη διερεύνηση πιθανών σημείων συμφόρησης ή βελτιώσεων.

- Λειτουργικό Σύστημα: Windows 10 Pro
- 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

Κεφάλαιο 4

Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

4.1 Υποθέσεις και Σενάρια

Σε αυτό το σημείο θα περιγράψουμε τις υποθέσεις που θέσαμε, καθώς και τα σενάρια τα οποία θα μας βοηθήσουν να διαψεύσουμε ή να επιβεβαιώσουμε τις υποθέσεις μας. Παράλληλα, θα μας επιτρέψουν να αξιολογήσουμε την υλοποίηση μας και να ανακαλύψουμε τυχόν λάθη ή περιορισμούς.

Πριν περιγράψουμε αναλυτικά τις επιμέρους υποθέσεις, αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι προσομοιώσεις διεξάγονται με βασική ταχύτητα 1.5 μονάδων (περίπου 8 km/h), η οποία θεωρείται ρεαλιστική για έναν μέσο ενήλικα υπό συνθήκες εκκένωσης. Επιπρόσθετα, εφαρμόζεται μια τυπική απόκλιση της τάξης του 0.5 στην κατανομή των ταχυτήτων, ώστε να προσομοιωθεί πιο ρεαλιστικά η ποικιλία ταχύτητας μεταξύ των πρακτόρων. Δηλαδή, οι περισσότεροι πράκτορες (agents) έχουν ταχύτητα κοντά στην βασική τιμή και εφόσον η τυπική απόκλιση είναι 0.5 τότε οι περισσότερες ταχύτητες θα βρίσκονται μεταξύ 1 (~5.3km/h) και 2 (~10.6km/h). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια πιο ρεαλιστική αποτύπωση της ανθρώπινης κινητικότητας, καθώς δεν κινούνται όλοι με τον ίδιο ρυθμό σε πραγματικές συνθήκες.

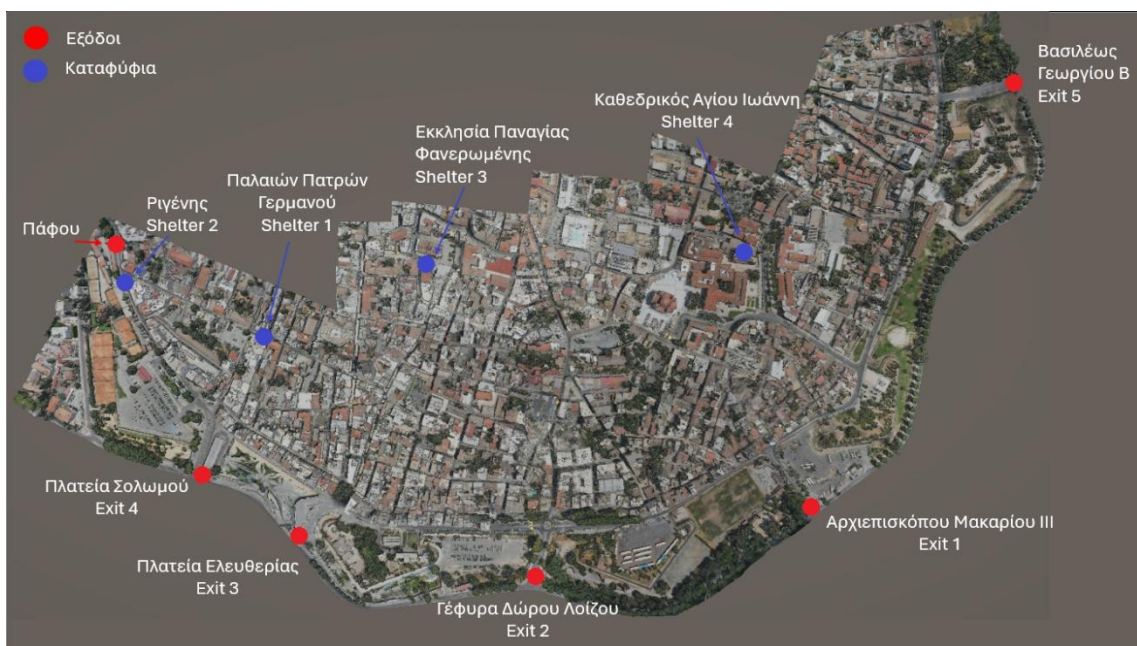
Επιπρόσθετα, σε κάθε προσομοίωση θα χρησιμοποιηθούν 3000 πράκτορες (agents), με διαφορετικές αναλογίες ηγετών και ακολούθων. Ο αριθμός αυτός θεωρείται αντιπροσωπευτικός, καθώς περιλαμβάνει τόσο τους μόνιμους κατοίκους όσο και τα άτομα που εργάζονται ή επισκέπτονται την εντός των τειχών πόλη. Οι διαφορετικές αναλογίες θα μας βοηθήσουν να προσομοιώσουμε διάφορα σενάρια όπου οι άνθρωποι γνωρίζουν πως να διαφύγουν από την πόλη και να κατευθυνθούν προς τις διαθέσιμες εξόδους ή δεν γνωρίζουν και απλά ακολουθούν τον πράκτορα ηγέτη που τους ανατέθηκε. Για κάθε υπόθεση θα διεξαχθούν μια σειρά από διαφορετικά σενάρια καθώς και κάποια πιλοτικά σενάρια τα οποία θα μας επιτρέψουν να αναλύσουμε σε βάθος και να επαληθεύσουμε κατά πόσο οι αρχικές εκτιμήσεις μας ευσταθούν, καθώς και να αξιολογήσουμε αν οι προσομοίωση μας είναι ρεαλιστική και αξιόπιστη. Μέσω αυτών των σεναρίων, θα μπορέσουμε να εκτιμήσουμε την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών εκκένωσης, την επίδραση των διαφορετικών παραμέτρων (όπως η αναλογία ηγετών-ακολούθων) στον χρόνο εκκένωσης και τη συνολική ασφάλεια των πολιτών.

Παράλληλα, θα αξιολογήσουμε αν η ύπαρξη καταφυγίων, καθώς και άλλες πιθανές παρεμβάσεις, μπορούν να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης σε κρίσιμες καταστάσεις.

Σημειώνεται ότι σε όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι πράκτορες θεωρούνται έτοιμοι να ξεκινήσουν την εκκένωση ταυτόχρονα επάνω στο οδικό δίκτυο της παλιάς πόλης της Λευκωσίας. Κατά συνέπεια, ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης δεν λαμβάνει υπόψη τον χρόνο που απαιτείται προκειμένου οι πολίτες να ενημερωθούν ότι πραγματοποιείται εκκένωση, ούτε τον χρόνο που χρειάζεται για να εξέλθουν από τα κτίρια στα οποία βρίσκονται.

4.1.1 Χάρτης Εξόδων και Καταφυγίων

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας χάρτης της παλιάς πόλης της Λευκωσίας (μέσα από τα τείχη) με σημειωμένες όλες τις εξόδους καθώς και τα καταφύγια τα οποία χρησιμοποιούμε στα στις προσομοιώσεις μας.



Σχήμα 4.1: Top-down map of the old city of Nicosia showing the road network

4.1.2 Υπόθεση 1

“Η πλειονότητα των πολιτών δεν θα καταφέρει να εγκαταλείψει την πόλη εντός του απαραίτητου χρονικού πλαισίου κατά τη διάρκεια μιας κρίσιμης κατάστασης.”

4.1.2.1 Πιλοτικό Σενάριο

Στην πιλοτική εκτέλεση αυτού του σεναρίου, εξετάζεται ο χρόνος που απαιτείται για την εκκένωση γενικότερα. Συγκεκριμένα, θα τρέξουμε πολλαπλές φορές την προσομοίωση με διαφορετικούς συνδυασμούς πρακτόρων ηγέτη και ακολούθου (50%-50%, 60%-40%, 70%-30%, 80%-20% και 20%-80%). Σκοπός είναι να μελετηθεί το ποσοστό των πρακτόρων που καταφέρνουν να βρουν ασφαλή έξοδο από την πόλη, καθώς και πώς εξελίσσεται αυτό το ποσοστό ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. κάθε 1 λεπτό).

Με αυτόν τον τρόπο, θα αποκτήσουμε μια πρώτη εικόνα του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρονται οι πράκτορες, όταν το οδικό δίκτυο είναι ανοιχτό και όλες οι εξοδοί είναι διαθέσιμες και προσβάσιμες, πριν προχωρήσουμε σε πιο σύνθετα ή περιοριστικά σενάρια. Δεν θα χρησιμοποιήσουμε τα καταφύγια για αυτή την υπόθεση καθώς θέλουμε να συγκρίνουμε το πιλοτικό μας σενάριο με το σενάριο περιορισμένων εξόδων. εκκένωσης.

4.1.2.2 Σενάριο περιορισμένων εξόδων

"Λόγω ενός μιας κρίσιμης κατάστασης, οι πολίτες πρέπει να εκκενώσουν την πόλη μέσα σε περιορισμένο χρονικό διάστημα. Εκτιμούμε ότι το υπάρχον οδικό δίκτυο και η διαθεσιμότητα των εξόδων δεν επαρκούν για να επιτρέψουν στην πλειονότητα του πληθυσμού να αποχωρήσει εγκαίρως."

Θα επιχειρήσουμε να προσομοιώσουμε τις συνέπειες αυτού του σεναρίου κλείνοντας την πιο σημαντική και δημοφιλή έξοδο της πόλης ή τον κύριο οδικό άξονα που εξυπηρετεί τον μεγαλύτερο όγκο κίνησης. Με αυτόν τον τρόπο, θα αξιολογήσουμε πώς διαφοροποιούνται ο χρόνος εκκένωσης, η απόσταση που διανύουν οι πράκτορες (travel distance) και το ποσοστό εκείνων που καταφέρνουν να εγκαταλείψουν την πόλη. Αυτή η ανάλυση θα μας επιτρέψει να κατανοήσουμε καλύτερα τις επιπτώσεις ενδεχόμενων αποκλεισμών σε βασικά σημεία της πόλης κατά τη διάρκεια μιας κρίσιμης κατάστασης.

4.1.3 Υπόθεση 2

"Δεν υπάρχουν αρκετά καταφύγια εντός των τειχών της Λευκωσίας και απαιτείται πάρα πολύς χρόνος για να είναι μέχρι και ο τελευταίος πολίτης ασφαλής."

4.1.3.1 Πιλοτικό Σενάριο με Καταφύγια

Στην πιλοτική εκτέλεση αυτής της υπόθεσης, εξετάζεται ο χρόνος που απαιτείται για την εκκένωση γενικότερα με την χρήση των λειτουργικών καταφυγίων εντός των τειχών της

πόλης καθώς και με όλες τις διαθέσιμες εξόδους. Συγκεκριμένα, θα τρέξουμε πολλαπλές φορές την προσομοίωση με διαφορετικούς συνδυασμούς πρακτόρων ηγέτη και ακολούθου (20%-80%, 50%-50%, 60%-40%, 70%-30%, 80%-20%) ομοίως με το προηγούμενο πιλοτικό σενάριο. Σκοπός είναι να μελετηθεί το ποσοστό των πρακτόρων που καταφέρνουν να βρουν ασφαλή έξοδο από την πόλη ή κάποιο καταφύγιο στο οποίο μπορούν να προστατευθούν, καθώς και πώς εξελίσσεται αυτό το ποσοστό ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. κάθε 1 λεπτό). Επιπλέον, θα εξεταστεί το κατά πόσο η ύπαρξη και η χρήση καταφυγίων επιδρά στον συνολικό χρόνο εκκένωσης.

4.1.3.2 Σενάριο με περισσότερα Καταφύγια

Στο επόμενο σενάριο, μελετάται ο χρόνος που απαιτείται για την εκκένωση αξιοποιώντας όλες τις διαθέσιμες εξόδους της πόλης, καθώς και τα ήδη λειτουργικά καταφύγια. Επιπλέον, προστέθηκαν δύο νέα καταφύγια στον Καθεδρικό Ναό Αγίου Ιωάννη και στην Εκκλησία Παναγίας Φανερωμένης, με χωρητικότητα 180 ατόμων το καθένα. Η επιλογή αυτών των σημείων έγινε σε συνεργασία με την Πολιτική Άμυνα, καθώς προορίζονται να συμπεριληφθούν στον επίσημο σχεδιασμό για χρήση ως καταφύγια. Δεν υπήρχε λόγος να οριστούν τυχαίες τοποθεσίες, χωρίς να διασφαλιστεί ότι η παλιά πόλη διαθέτει την κατάλληλη υποδομή, γι' αυτό επιλέχθηκαν αποκλειστικά αυτά τα δύο καταφύγια, ώστε να μελετηθούν τα σχετικά αποτελέσματα. Όπως και στο προηγούμενο πιλοτικό σενάριο, θα πραγματοποιηθούν πολλαπλές εκτελέσεις της προσομοίωσης με διαφορετικούς συνδυασμούς (20%-80%, 50%-50%, 60%-40%, 70%-30%, 80%-20%) πρακτόρων ηγέτη και ακολούθου. Στόχος είναι να διερευνηθεί το ποσοστό των πρακτόρων που καταφέρνουν να φτάσουν σε ασφαλή έξοδο ή να βρουν καταφύγιο, καθώς και η χρονική εξέλιξη του ποσοστού αυτού, εξετάζοντας ταυτόχρονα την επίδραση των επιπλέον καταφυγίων στον συνολικό χρόνο εκκένωσης.

4.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

4.2.1 Ποσοστά και πλήθος πρακτόρων

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας σύντομος πίνακας που απεικονίζει τον αριθμό πρακτόρων (agents) σε σχέση με τα διάφορα ποσοστά ηγετών-ακολούθων που επιλέξαμε για τις προσομοιώσεις. Για συνολικό πληθυσμό 3000 πρακτόρων, οι αναλογίες ηγέτη-ακολούθου διαμορφώνονται ως εξής:

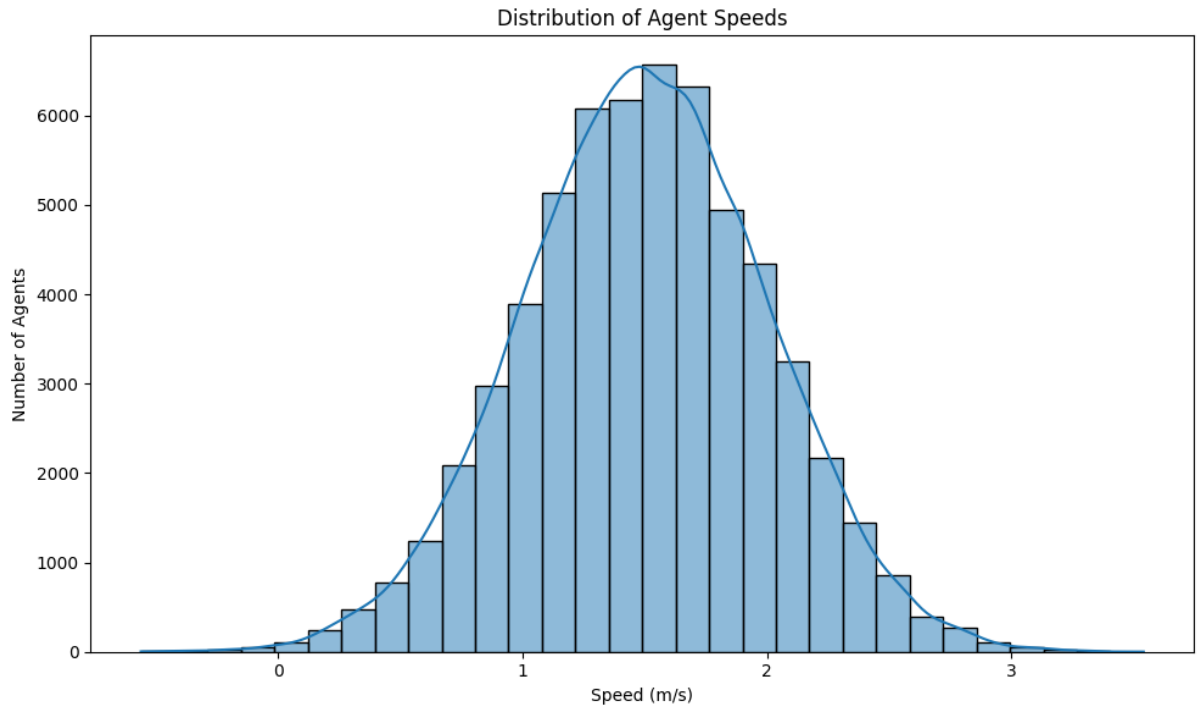
Ποσοστό από Ηγέτες	Ποσοστό από Ακόλουθους	Αριθμός από Ηγέτες	Αριθμός από Ακόλουθους
80%	20%	2400	600
70%	30%	2100	900
60%	40%	1800	1200
50%	50%	1500	1500
20%	80%	600	2400

Πίνακας 4.1: Leader–follower ratios and the corresponding number of agents used in the simulation.

Με αυτόν τον τρόπο, είναι εύκολο να ανατρέξουμε στα αντίστοιχα σενάρια και να επισημάνουμε πώς επηρεάζουν τα αποτελέσματα οι διαφορετικές ισορροπίες μεταξύ ηγετών και ακολούθων.

4.2.2 Κατανομή Ταχυτήτων

Για όλους τους πράκτορες (ηγέτες και ακολούθους) καθώς και για κάθε προσομοίωση συντάχθηκε ένα διάγραμμα κατανομής της ταχύτητας, απ' όπου φαίνεται πως η πλειονότητα των πρακτόρων κινείται κοντά στη μέση ταχύτητα (1.5 μονάδες $\sim$ 8 km/h), με μια τυπική απόκλιση 0.5, όπως ορίστηκε στο αρχικό πλάνο. Αυτή η κατανομή αντικατοπτρίζει ρεαλιστικότερα τις διαφορές στην κίνηση των ατόμων, αντί να είναι όλοι οι πράκτορες στην ίδια ακριβώς ταχύτητα.



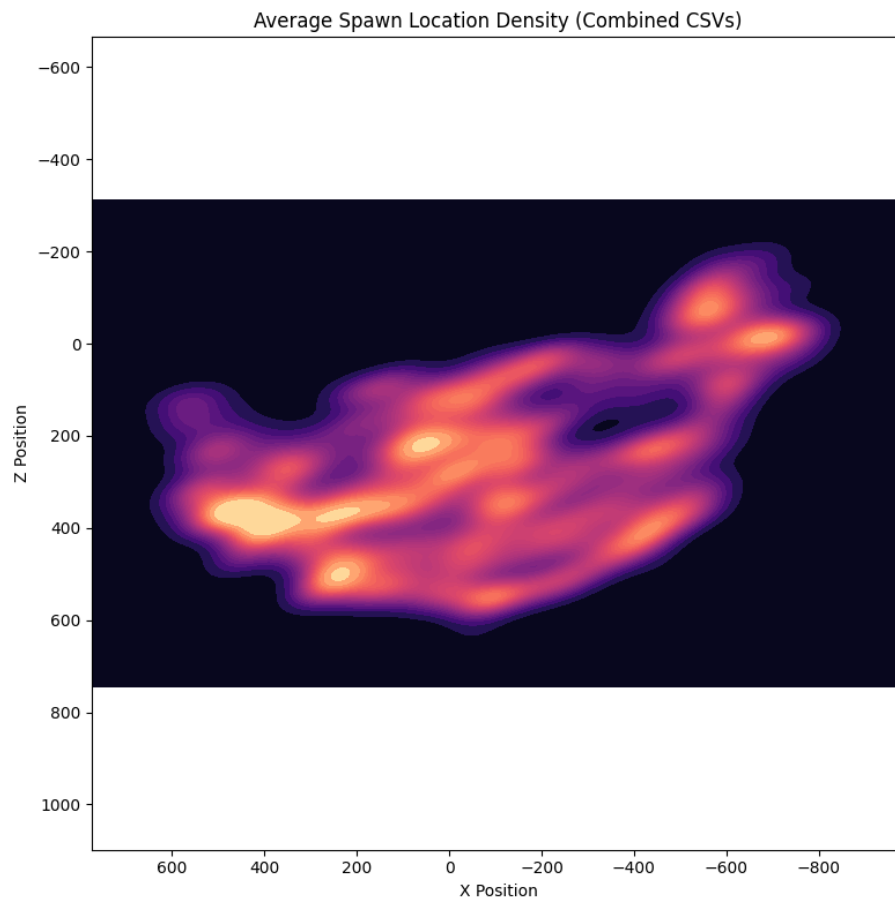
Σχήμα 4.2: Distribution of agent walking speeds in the evacuation simulation.

4.2.3 Χρονικό πλαίσιο προσομοίωσης

Κάθε προσομοίωση διεξήχθη με ανώτατο χρονικό όριο 10 λεπτών. Ο αριθμός αυτός δεν αντανακλά υποχρεωτικά τον πραγματικό χρόνο που απαιτείται για την εκκένωση της Παλιάς Πόλης της Λευκωσίας, αλλά επιλέχθηκε ώστε να επιτρέπει μια ρεαλιστική αποτίμηση του χρόνου που χρειάζονται οι πράκτορες για να βρεθούν σε ασφαλή σημεία. Με αυτόν τον τρόπο, αποκτούμε μια γενική εικόνα των χρονικών απαιτήσεων κάθε σεναρίου, αφήνοντας στις αρμόδιες αρχές και τους ειδικούς την τελική αξιολόγηση του κατά πόσο ο χρόνος αυτός θεωρείται επαρκής για πραγματικές συνθήκες εκκένωσης.

4.2.4 Χάρτης Πυκνότητας Θέσεων Εμφάνισης (Heatmap)

Το γράφημα αυτό παρουσιάζει τον μέσο όρο από όλα τα σεναρία τα οποία προσομοιώσαμε στην πυκνότητα των σημείων εμφάνισης (spawn locations) των πρακτόρων σε μορφή heatmap. Οι φωτεινότερες περιοχές υποδεικνύουν σημεία με υψηλή συγκέντρωση πρακτόρων κατά την έναρξη της προσομοίωσης, ενώ οι πιο σκοτεινές περιοχές υποδηλώνουν χαμηλότερη πυκνότητα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να εντοπίσουμε τα «επίκεντρα» πληθυσμού μέσα στην πόλη και να κατανοήσουμε καλύτερα πώς κατανέμονται οι πράκτορες χωρικά, κάτι που στη συνέχεια μπορεί να συμβάλει στην ερμηνεία του χρόνου εκκένωσης, της κίνησης προς τις εξόδους και άλλων σχετικών δεικτών.



Σχήμα 4.3: Kernel-density estimate of average agent spawn locations (combined runs) over the study area, with warmer colors indicating higher spawn frequencies.

4.2.5 Ανάλυση Υπόθεσης 1

4.2.5.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Πιλοτικού Σεναρίου

Ποσοστά Επιτυχίας Πρακτόρων

Αρχικά μπορούμε να δούμε κάποια γενικά στοιχεία τα οποία εξάγουμε από τα αποτελέσματα μας. Συγκεκριμένα Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας που απεικονίζει τα ποσοστά επιτυχίας και αποτυχίας για ηγέτες και ακολούθους (με βάση την αναλογία ηγέτης-ακόλουθος σε κάθε σενάριο):

- Χαμένοι Ακόλουθοι (%): Το ποσοστό των ακολούθων που «χάθηκε» κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (δεν ακολούθησε επιτυχώς κάποιον ηγέτη και αφαιρέθηκε από την προσομοίωση).
- Επιτυχημένοι Ακόλουθοι (%): Το ποσοστό των ακολούθων που κατάφερε να φτάσει με επιτυχία στην έξοδο/καταφύγιο.

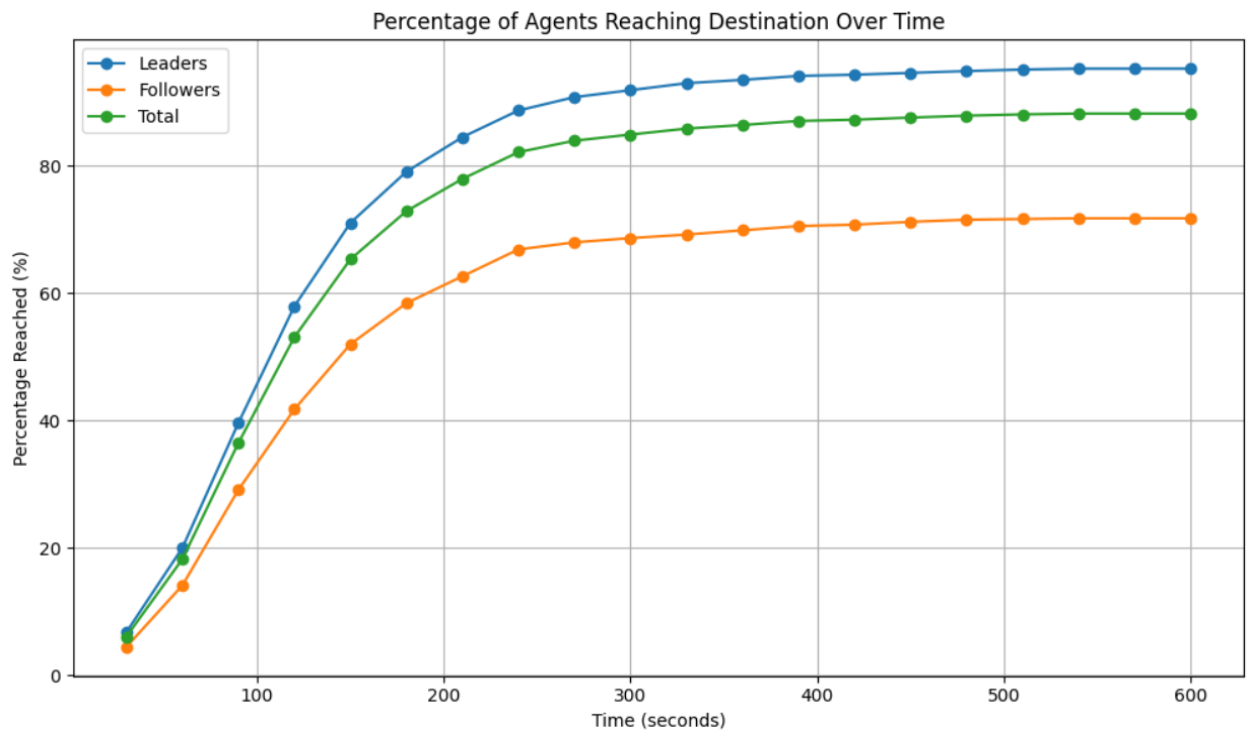
- Περιπλανώμενοι Ακόλουθοι (%): Το ποσοστό των ακολούθων που δεν κατάφερε να φτάσει στον προορισμό του αλλά δεν έχασε τον ηγέτη του.
- Επιτυχία Ηγετών (%): Το ποσοστό των ηγετών που έφτασε στον τελικό προορισμό (έξοδο/καταφύγιο).
- Περιπλανώμενοι Ηγέτες (%): Το ποσοστό των ηγετών που παρέμεινε ενεργό ή περιπλανώμενο, χωρίς να καταφέρει να τερματίσει επιτυχώς έως την λήξη της προσομοίωσης

Παράλληλα θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα παρακάτω αποτελέσματα είναι από μια εκτέλεση της προσομοίωσης και όχι ο μέσος όρος από πολλαπλές εκτελέσεις.

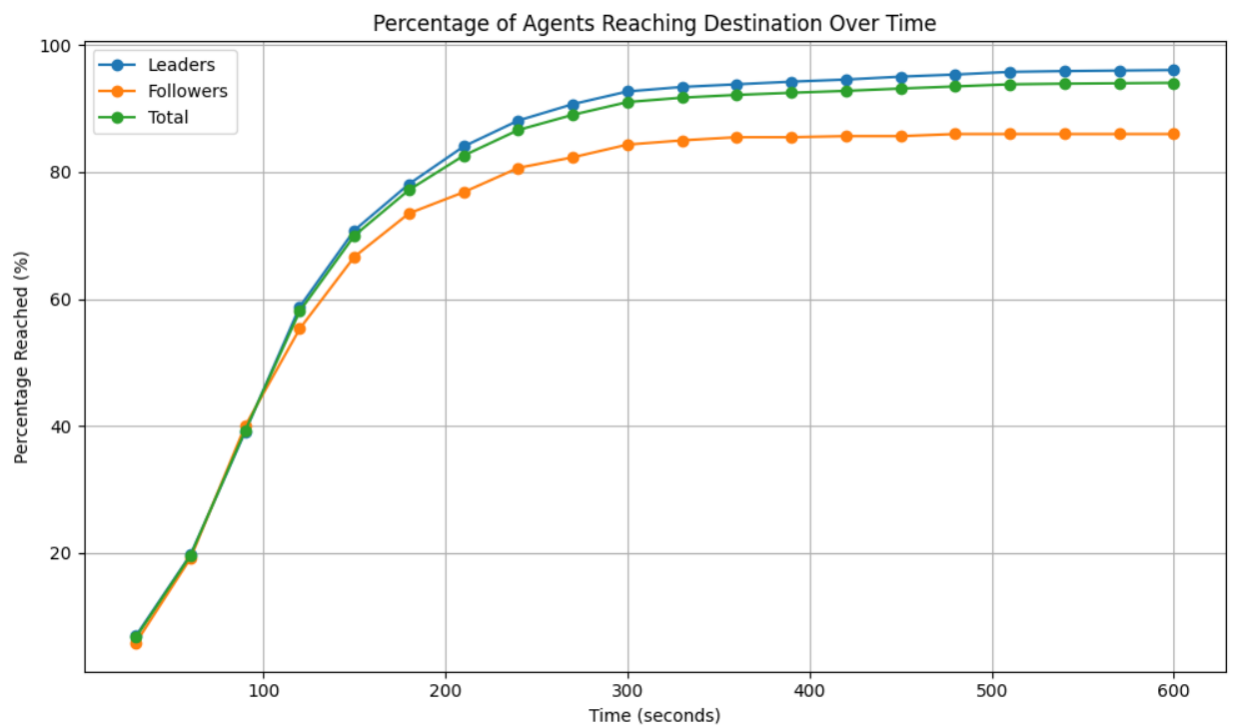
Αναλογία (Ηγέτες– Ακόλουθοι)	Χαμένοι Ακόλουθοι (%)	Επιτυχημένοι Ακόλουθοι (%)	Περιπλανώμενοι Ακόλουθοι (%)	Επιτυχία Ηγετών (%)	Περιπλανώμενοι Ηγέτες (%)
80-20	9.6667	86.0000	4.3333	96.0833	3.9167
70-30	24.1111	71.7778	4.1111	95.3857	4.7143
60-40	85.9167	9.5833	4.5000	95.6667	4.3333
50-50	92.2667	3.8000	3.9333	96.0667	3.933
20-80	94.3333	1.1667	4.5000	95.5000	4.5000

Χρονολογική εξέλιξη του ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης

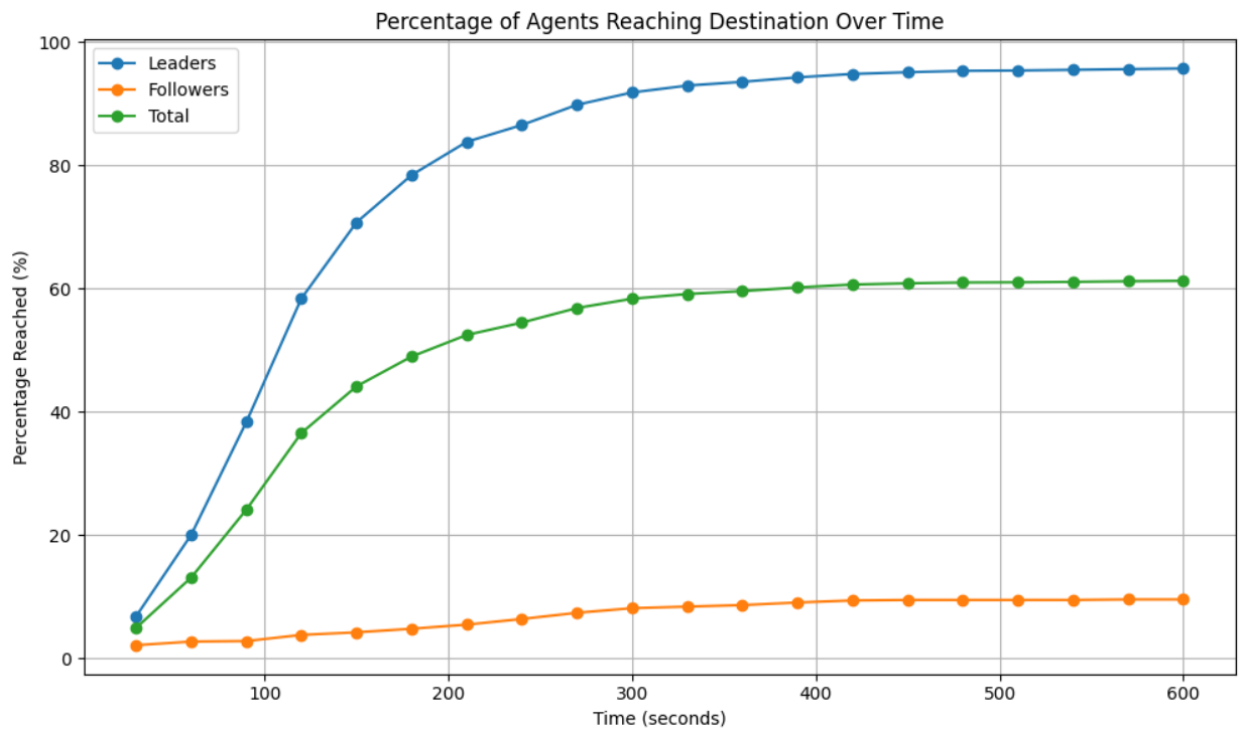
Στον άξονα X (οριζόντιο), παρουσιάζεται ο χρόνος σε δευτερόλεπτα. Στον άξονα Y (κάθετο), το ποσοστό (επί τοις εκατό) των πρακτόρων που έφτασαν με επιτυχία στον προορισμό (έξοδος/καταφύγιο). Οι καμπύλες απεικονίζουν τους ηγέτες, τους ακολούθους και το σύνολο των πρακτόρων, αντίστοιχα.



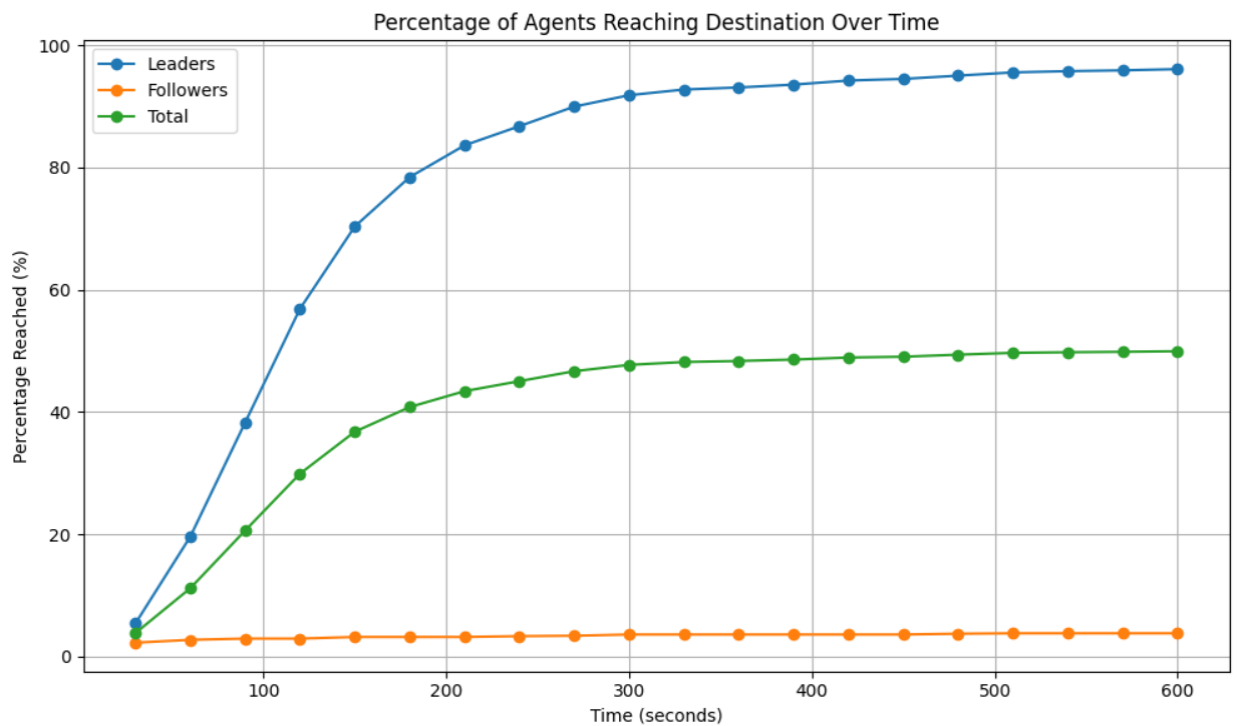
Σχήμα 4.4: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (80%-20%)



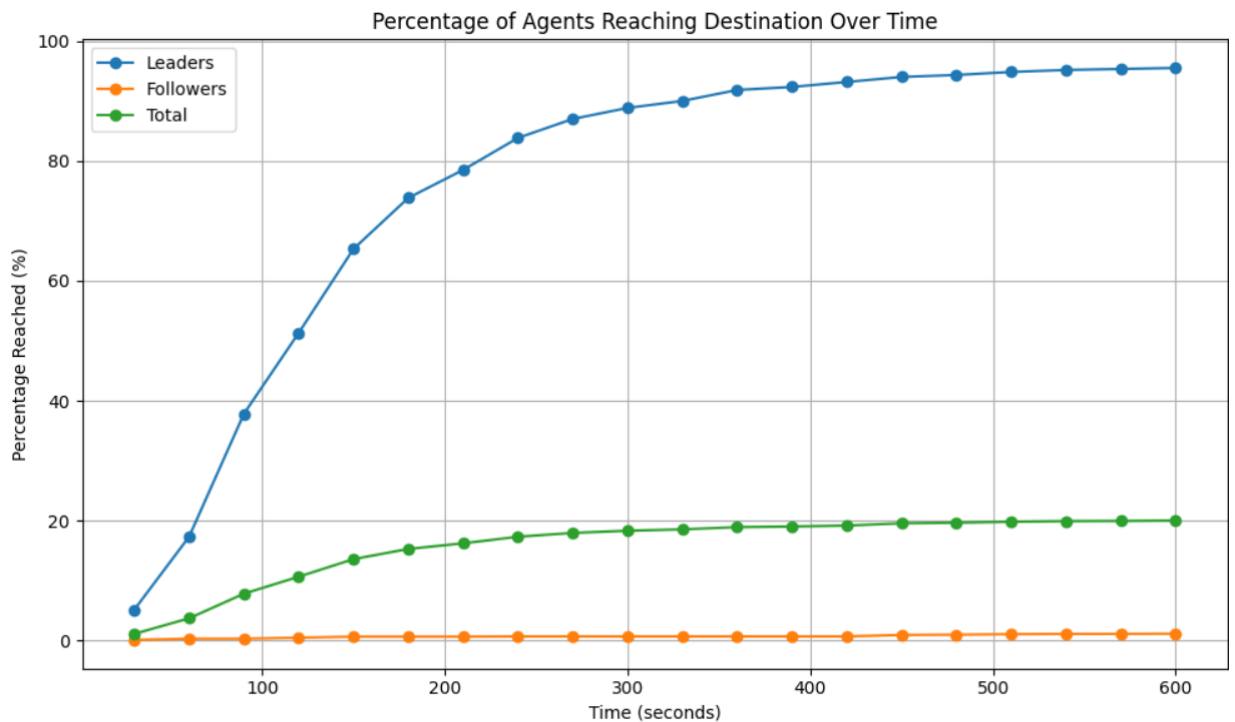
Σχήμα 4.5: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (70%-30%)



Σχήμα 4.6: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (60%-40%)



Σχήμα 4.7: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (50%-50%)



Σχήμα 4.8: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (20%-80%)

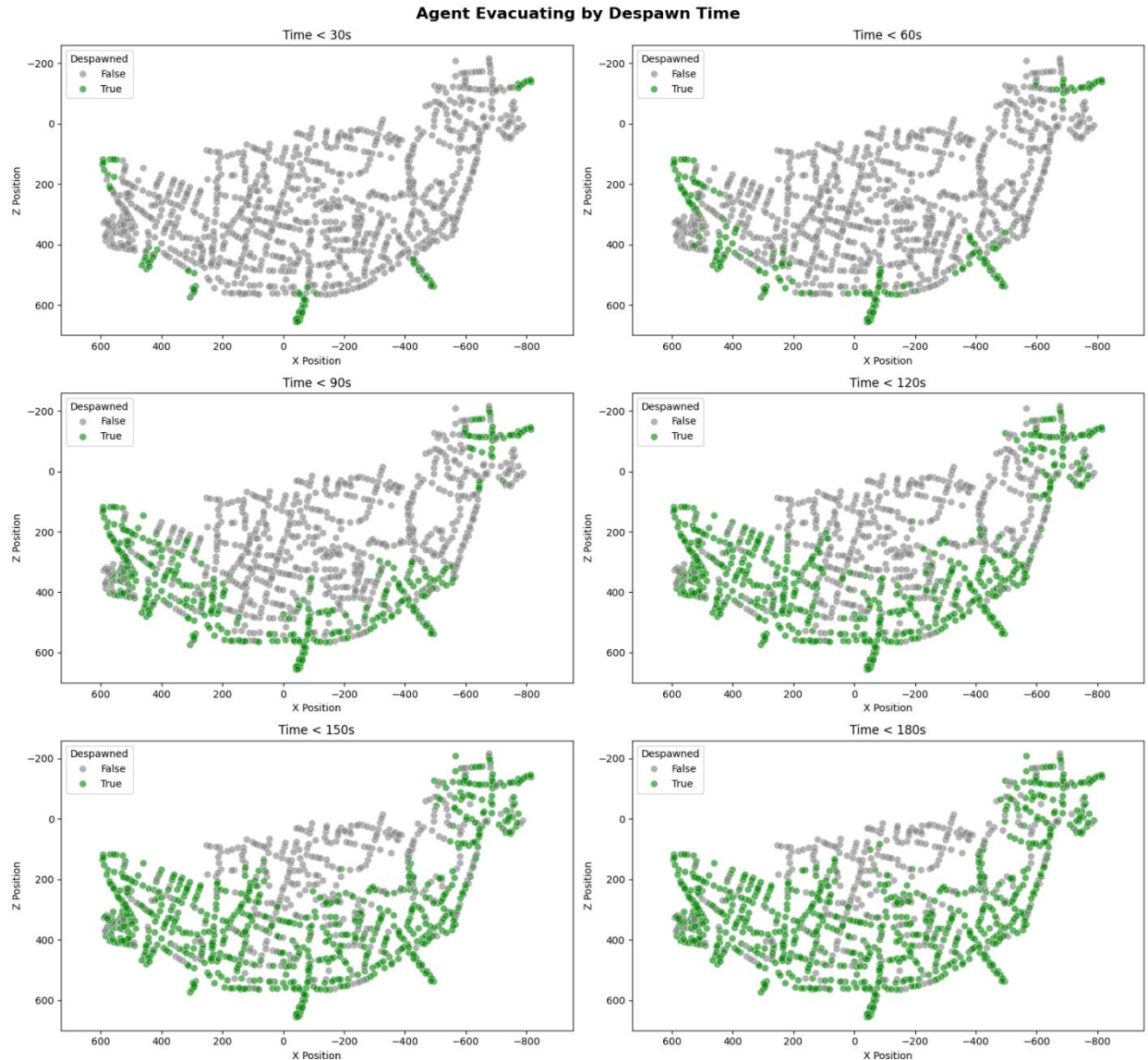
Από τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στις διαφορετικές αναλογίες ηγετών-ακολουθών μπορούμε να διακρίνουμε πώς μεταβάλλεται το ποσοστό των πρακτόρων που φτάνουν σε ασφαλές σημείο (π.χ. έξοδο ή καταφύγιο) με την πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε ότι, όσο αυξάνεται το ποσοστό των ηγετών, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα εκκένωσης συνολικά, καθώς οι ακόλουθοι έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να καθοδηγηθούν επιτυχώς. Αντίθετα, στις περιπτώσεις όπου οι ηγέτες είναι σχετικά λίγοι, το ποσοστό επιτυχίας των ακολούθων ανεβαίνει πιο αργά (ή παραμένει αρκετά χαμηλό), αντανακλώντας τις δυσκολίες τους να βρουν βιώσιμη διαδρομή. Συνολικά, τα γραφήματα επιβεβαιώνουν τη θετική επίδραση ενός υψηλότερου αριθμού ηγετών στη βελτίωση των ρυθμών εκκένωσης, ενώ παράλληλα δείχνουν ότι η διαφορά μεταξύ ηγετών και ακολούθων γίνεται πιο εμφανής όσο πιο δυσμενές είναι το σενάριο.

Παρατηρείται επίσης ότι, όταν ο αριθμός των ακολούθων είναι ίσος ή μικρότερος από τον αριθμό των ηγετών (π.χ. 20-80, 50-50), το τελικό ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης για τους ακολούθους πέφτει αισθητά. Σε ορισμένες περιπτώσεις, πολλά από αυτά τα άτομα δυσκολεύονται να εντοπίσουν τη σωστή διαδρομή, με αποτέλεσμα να «χάνονται» και να απομακρύνονται από την προσομοίωση (despawn) αρκετά νωρίς. Η σύγκριση με τα σενάρια όπου κυριαρχούν οι ηγέτες (70-30 και 80-20) καταδεικνύει τη σημασία της ύπαρξης επαρκών οδηγών (leader) για μια επιτυχημένη και γρήγορη εκκένωση.

Οπτικοποίηση Θέσεων Εμφάνισης και Χρόνου Αποχώρησης Πρακτόρων

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, απεικονίζονται οι αρχικές θέσεις (spawn locations) όλων των πρακτόρων επάνω στο οδικό δίκτυο της παλιάς πόλης, σε συνδυασμό με το χρονικό σημείο (σε δευτερόλεπτα) κατά το οποίο αποχώρησαν (despawn) από την προσομοίωση, λόγο του ότι έφτασαν με επιτυχία σε κάποια έξοδο. Κάθε εικόνα φιλτράρει τους πράκτορες που έχουν αποχωρήσει έως έναν συγκεκριμένο χρόνο, επισημαίνοντάς τους με πράσινο χρώμα, ενώ οι υπόλοιποι εμφανίζονται σε γκρι. Με αυτόν τον τρόπο, διακρίνεται καθαρά ότι οι πράκτορες που ξεκινούν πιο κοντά στις εξόδους συχνά προλαβαίνουν να εκκενώσουν πρώτοι, επιβεβαιώνοντας τη λογική ότι η εγγύτητα σε μια έξοδο μειώνει σημαντικά τον απαραίτητο χρόνο εκκένωσης. Επιπλέον, η διάταξη των σημείων αποκαλύπτει το τυπικό «δίκτυο» της πόλης, παρέχοντας έναν οπτικό συσχετισμό ανάμεσα στην τοποθεσία των πρακτόρων και την ταχύτητα/ευκολία διαφυγής τους.

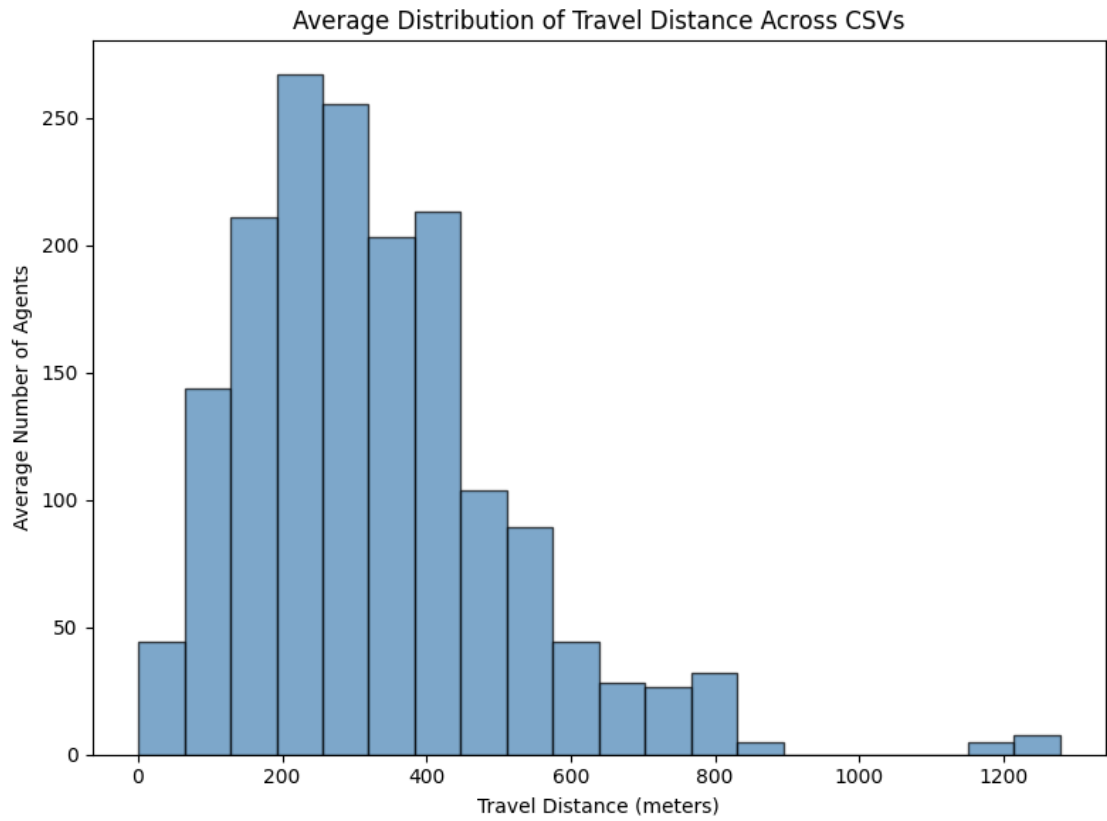
Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο DBSCAN για την ομαδοποίηση των σημείων εκκίνησης των πρακτόρων. Ο DBSCAN βασίζεται στην πυκνότητα των δεδομένων, συνδυάζοντας σημεία που βρίσκονται εντός μιας συγκεκριμένης απόστασης και απαιτώντας έναν ελάχιστο αριθμό γειτόνων για τη δημιουργία μιας έγκυρης ομάδας. Σε περιπτώσεις όπου τα σημεία απέχουν περισσότερο από το ορισμένο όριο, αυτά θεωρούνται θόρυβος και διατηρούνται ως μεμονωμένα, εξασφαλίζοντας έτσι την ακρίβεια στην απεικόνιση των αρχικών θέσεων. Δεν επιλέξαμε τον αλγόριθμο K Mean, διότι αυτός κατατάσσει όλα τα σημεία σε ομάδες με βάση έναν προσδιορισμένο αριθμό κέντρων, χωρίς να λαμβάνει υπόψη απομονωμένα σημεία που δεν πληρούν το κριτήριο εγγύτητας, γεγονός που θα μπορούσε να παραμορφώσει την αναπαράσταση των σημείων εκκίνησης.



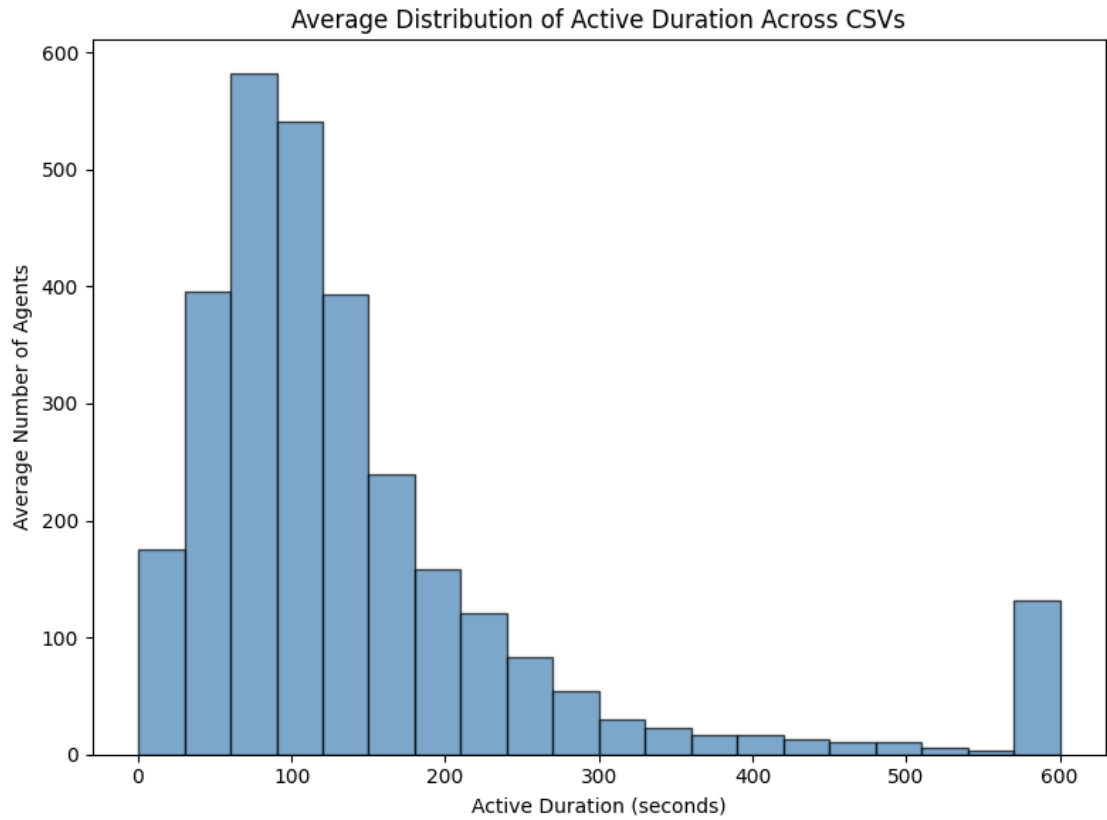
Σχήμα 4.9: Evacuation progress over time for pilot scenario.

Διάρκεια Ενεργής Κίνησης και Συνολική Απόσταση Μετακίνησης

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέση κατανομή της απόστασης κίνησης (Travel Distance) και τη μέση χρονική διάρκεια ενεργού μετακίνησης (Active Duration) των πρακτόρων, συγκεντρωτικά για όλα τα σενάρια και τις εκτελέσεις της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό της μέσης τιμής από όλα τα αρχεία αποτελεσμάτων. Στο πρώτο γράφημα βλέπουμε πόσα μέτρα διανύσαν κατά μέσο όρο οι πράκτορες, ενώ στο δεύτερο αποτυπώνεται ο χρόνος (σε δευτερόλεπτα) που παρέμειναν ενεργοί προτού φτάσουν σε ασφαλές σημείο ή απομακρυνθούν από την προσομοίωση.



Σχήμα 4.10: Histogram of agents' average travel distances across all simulation runs.

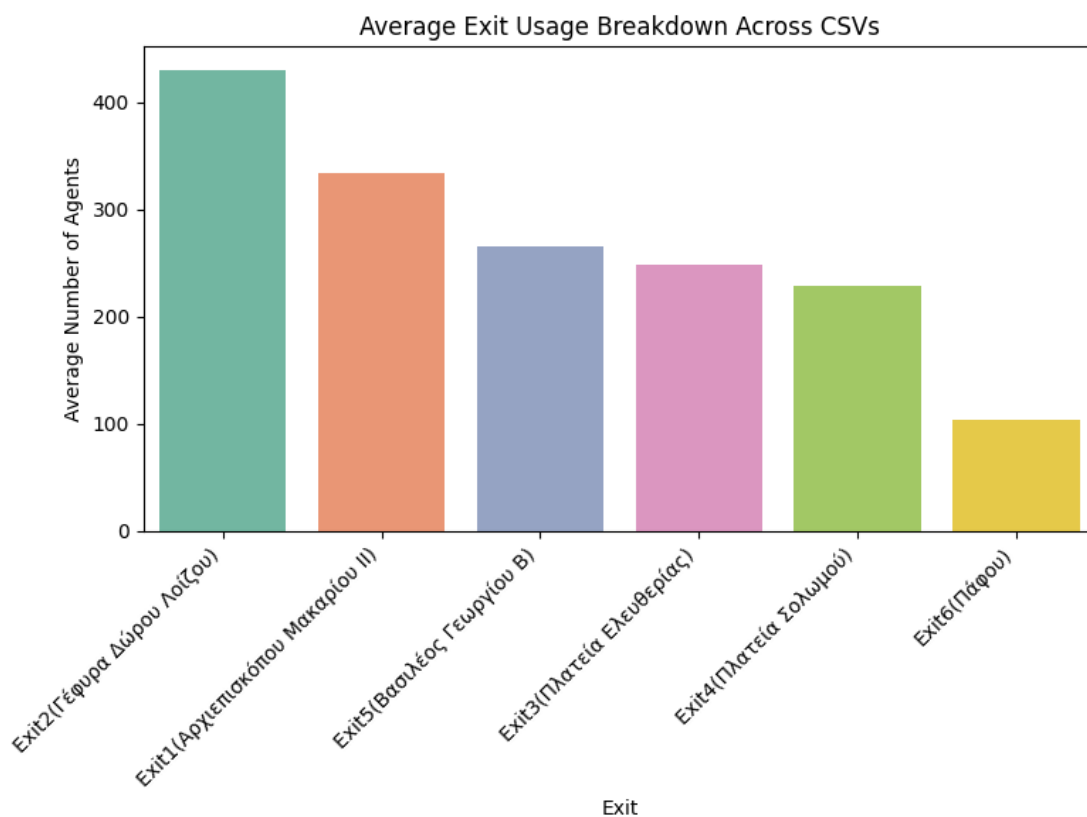


Σχήμα 4.11: Histogram of agents' average active durations across all simulation runs.

Όπως προκύπτει, η πλειονότητα των τιμών συγκεντρώνεται σε σχετικά χαμηλά έως μεσαία επίπεδα (π.χ. 100–400 μέτρα απόστασης, 100–200 δευτερόλεπτα ενεργού κίνησης), κάτι που συμφωνεί με τη βασική ταχύτητα κίνησης (1.5 μονάδες ~ 8 km/h) και την τυπική απόκλιση 0.5 που ορίστηκε από την αρχή. Η ύπαρξη κάποιων ακραίων τιμών στις ουρές των κατανομών (π.χ. αποστάσεις άνω των 800 μέτρων ή χρόνοι ενεργού μετακίνησης κοντά στα 600 δευτερόλεπτα) υποδηλώνει περιπτώσεις πρακτόρων που έτυχε είτε να βρίσκονται πολύ μακριά από τις εξόδους είτε να περιπλανήθηκαν περισσότερο λόγω κλειστών οδών ή έλλειψης ηγετών (leader). Συνολικά, τα ευρήματα επιβεβαιώνουν την αναμενόμενη θετική συσχέτιση μεταξύ απόστασης κίνησης και χρόνου μετακίνησης, ενώ παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα για την κατανομή της προσπάθειας που απαιτείται ώστε οι πράκτορες να βρεθούν σε ασφαλές σημείο.

Στατιστική Κατανομή Χρήσης των Εξόδων

Στο παρακάτω γράφημα εμφανίζεται η μέση κατανομή χρήσης των διαθέσιμων εξόδων, όπως προκύπτει από όλες τις εκτελέσεις της προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι ορισμένες εξοδοί προτιμώνται αισθητά περισσότερο, γεγονός που αντικατοπτρίζει είτε την εγγύτητά τους σε πυκνοκατοικημένες περιοχές είτε το πώς οι πράκτορες επιλέγουν (ή ακολουθούν ηγέτες) προς συγκεκριμένες διαδρομές. Αυτή η κατανομή θα μας βοηθήσει να επιλέξουμε τον τρόπο με τον οποίο θα συνεχίσουμε στο κύριο σενάριο που αμφισβητεί την υπόθεσή μας: εάν, δηλαδή, το μοντέλο μπορεί πραγματικά να επιβεβαιώσει ή να διαψεύσει την αρχική εκτίμηση περί ανεπαρκούς χρόνου εκκένωσης. Με λίγα λόγια, η σύγκριση των αποτελεσμάτων με την υπόθεση είναι καθοριστική για να διαπιστώσουμε κατά πόσο η προσομοίωση λειτουργεί επαρκώς και αν τα σενάρια που εξετάζουμε αποτυπώνουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα.



Σχήμα 4.12: Breakdown of average exit usage by agents.

4.2.5.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου περιορισμένων εξόδων

Όπως προαναφέρθηκε, θα προχωρήσουμε με το σενάριο περιορισμένων εξόδων κλείνοντας την πιο δημοφιλή έξοδο από την πιλοτική εκτέλεση. Δεδομένου ότι η Έξοδος 2 (Γέφυρα Δώρου Λοΐζου) ήταν η πιο δημοφιλής, αποφασίσαμε να προσομοιώσουμε το σενάριο κλείνοντας αυτήν την έξοδο. Αυτό σημαίνει ότι οι πράκτορες δεν μπορούν να εκκενώσουν την πόλη από αυτή την έξοδο, και οι ίδιοι δεν γνωρίζουν ότι είναι κλειστή, και έτσι αναγκάζονται να επισκεφθούν την Έξοδο 2 για να διαπιστώσουν ότι είναι κλειστή. Από εκεί και πέρα, οι πράκτορες αλλάζουν τον προορισμό τους και κατευθύνονται προς την πλησιέστερη διαθέσιμη έξοδο. Αυτή η προσέγγιση αποτέλεσε την καλύτερη λύση για την προσομοίωση του γεγονότος ότι οι πράκτορες δεν γνωρίζουν εκ των προτέρων ότι η έξοδος είναι κλειστή, καθώς το πακέτο που χρησιμοποιούμε δεν προσφέρει αληθινή πλοήγηση τεχνητής νοημοσύνης (όπως reinforcement learning ή ζωντανό επανυπολογισμό διαδρομών στο απαιτούμενο επίπεδο). Για τον λόγο αυτό, αποφασίσαμε να προσομοιώσουμε το σενάριο με τον τρόπο αυτό.

Ποσοστά Επιτυχίας Πρακτόρων

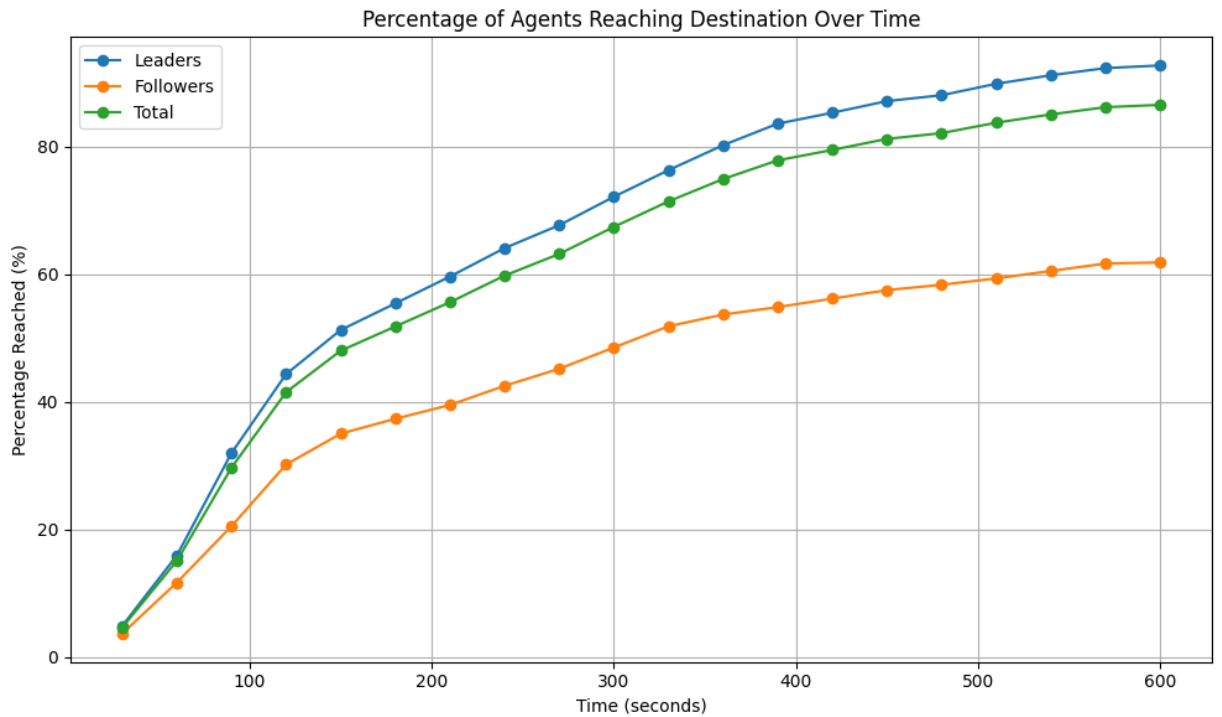
Ακολουθούν τα ποσοστά επιτυχίας και αποτυχίας για κάθε σενάριο με διαφορετικούς συνδυασμούς ηγετών και ακολούθων.

Αναλογία (Ηγέτες– Ακόλουθοι)	Χαμένοι Ακόλουθοι (%)	Επιτυχημένοι Ακόλουθοι (%)	Περιπλανώμενοι Ακόλουθοι (%)	Επιτυχία Ηγετών (%)	Περιπλανώμενοι Ηγέτες (%)
80-20	28.8333	61.8333	9.3333	92.7083	7.2917
70-30	78.0000	14.1111	7.8889	91.5238	8.4762
60-40	80.5833	6.0833	13.3333	88.0000	12.0000
50-50	82.4667	6.3333	11.2000	88.8667	11.1333
20-80	84.4583	4.8750	10.6667	89.3333	10.6667

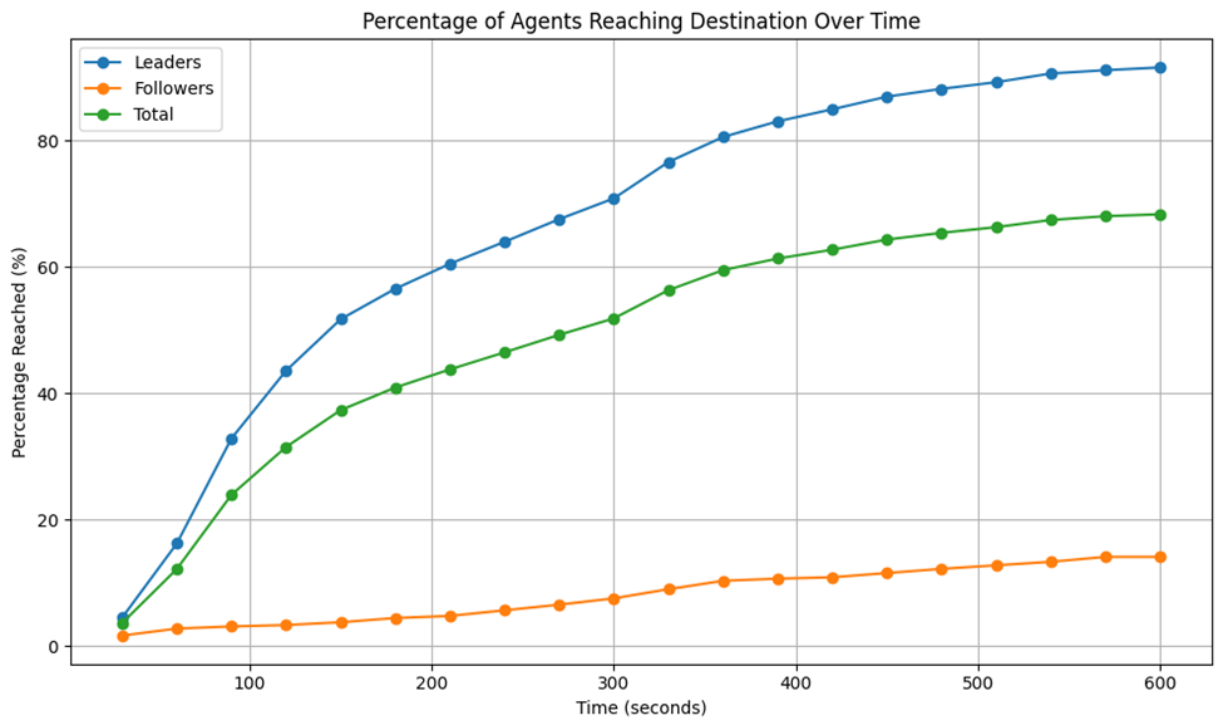
Πίνακας 4.2: Percentages of multiple categories of agent's rates across different leader–follower ratios in the simulation.

Στο σενάριο περιορισμένων εξόδων, παρατηρούμε ότι τα ποσοστά επιτυχίας των ακολούθων εμφανίζονται ελαφρώς χαμηλότερα, και τα ποσοστά των ηγετών που ολοκληρώνουν την εκκένωση είναι επίσης ελαφρώς μειωμένα σε κάποιες περιπτώσεις σε σχέση με το πιλοτικό σενάριο. Αυτό υποδηλώνει ότι ο αποκλεισμός εξόδων επηρεάζει αρνητικά τις πιθανότητες επιτυχούς εκκένωσης. Υπενθυμίζω, ότι τα παραπάνω αποτελέσματα είναι για όλη την διάρκεια του simulation (10 λεπτά), αλλά ακόμη και σε αυτό το μεγάλο χρονικό διάστημα παρατηρείται μείωση της γενικότερης επιτυχίας σε σύγκριση με το πιλοτικό σενάριο. Επιπρόσθετα, ομοίως με τα πιλοτικά αποτελέσματα Στα σενάρια όπου έχουμε υψηλότερο ποσοστό ηγετών σε σχέση με τους ακολούθους (π.χ. 80-20, 70-30), η επιτυχία των ακολούθων είναι εμφανώς μεγαλύτερη και το ποσοστό όσων «χάνονται» είναι χαμηλότερο. Αντίθετα, όταν το ποσοστό των ακολούθων είναι μεγαλύτερο (π.χ. 20-80, 50-50), οι πιθανότητες επιτυχημένης εκκένωσης για τους ακολούθους μειώνονται σημαντικά. Παράλληλα θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα παρακάτω αποτελέσματα είναι από μια εκτέλεση της προσομοίωσης και όχι ο μέσος όρος από πολλαπλές εκτελέσεις.

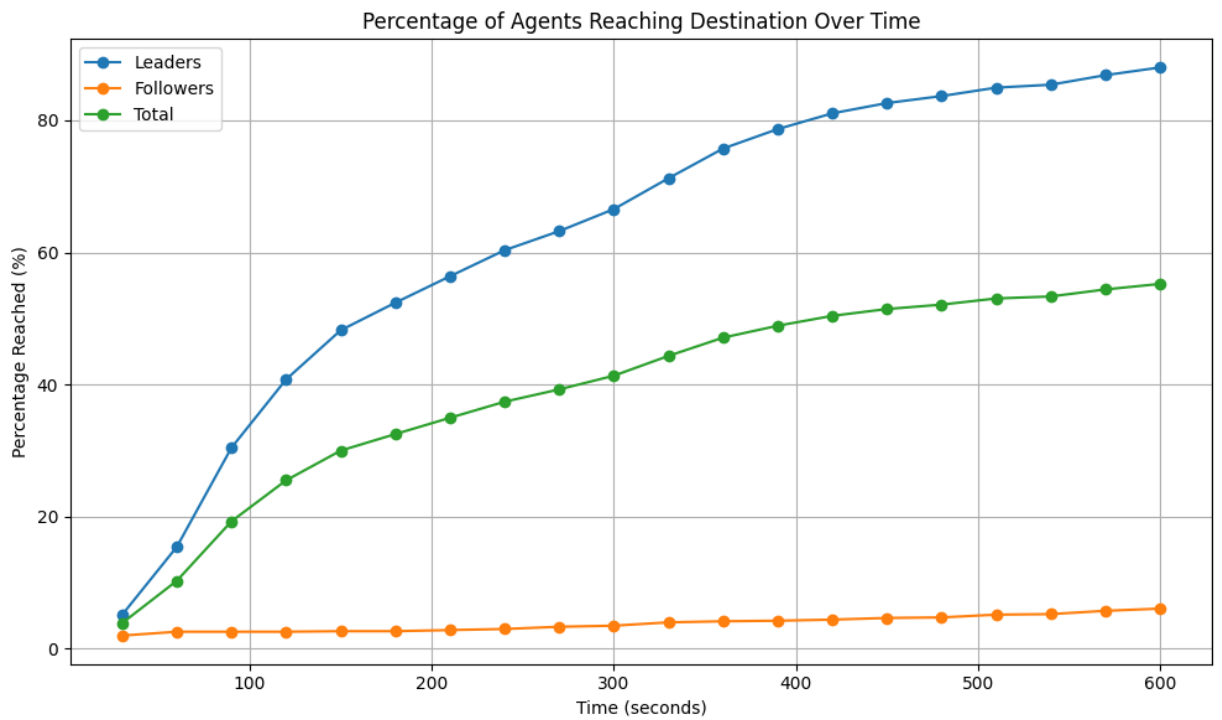
Χρονολογική εξέλιξη του ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης



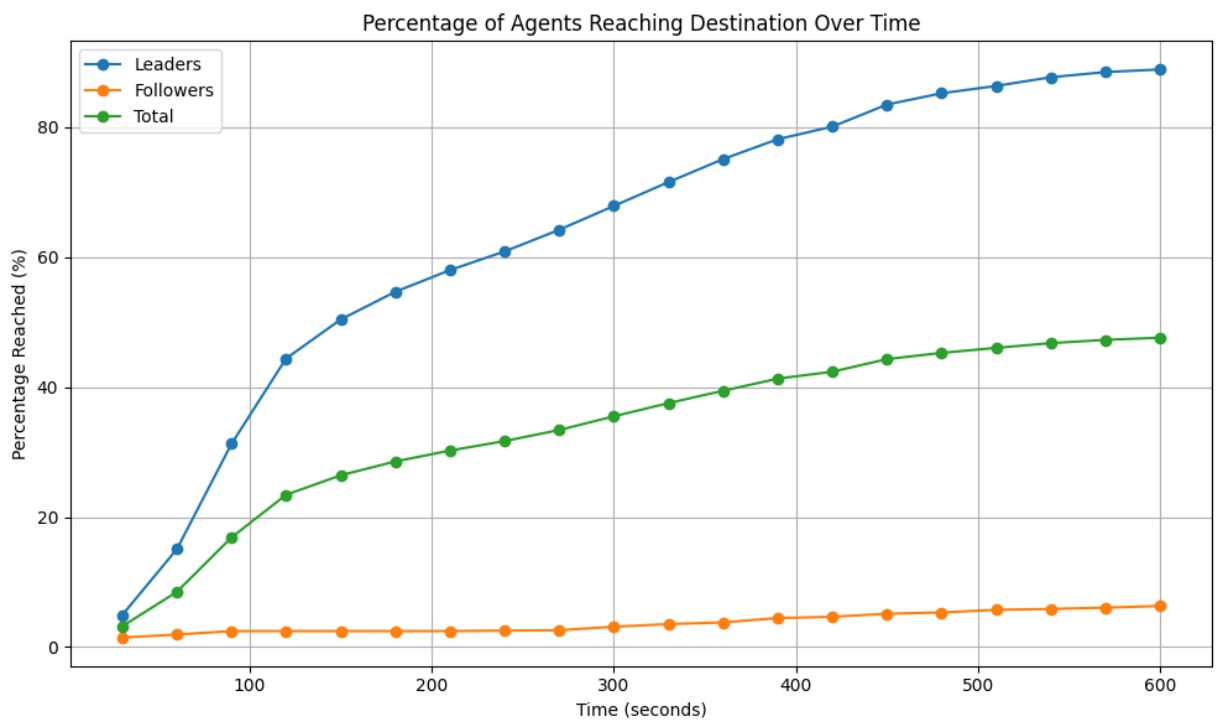
Σχήμα 4.13: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (80%-20%)



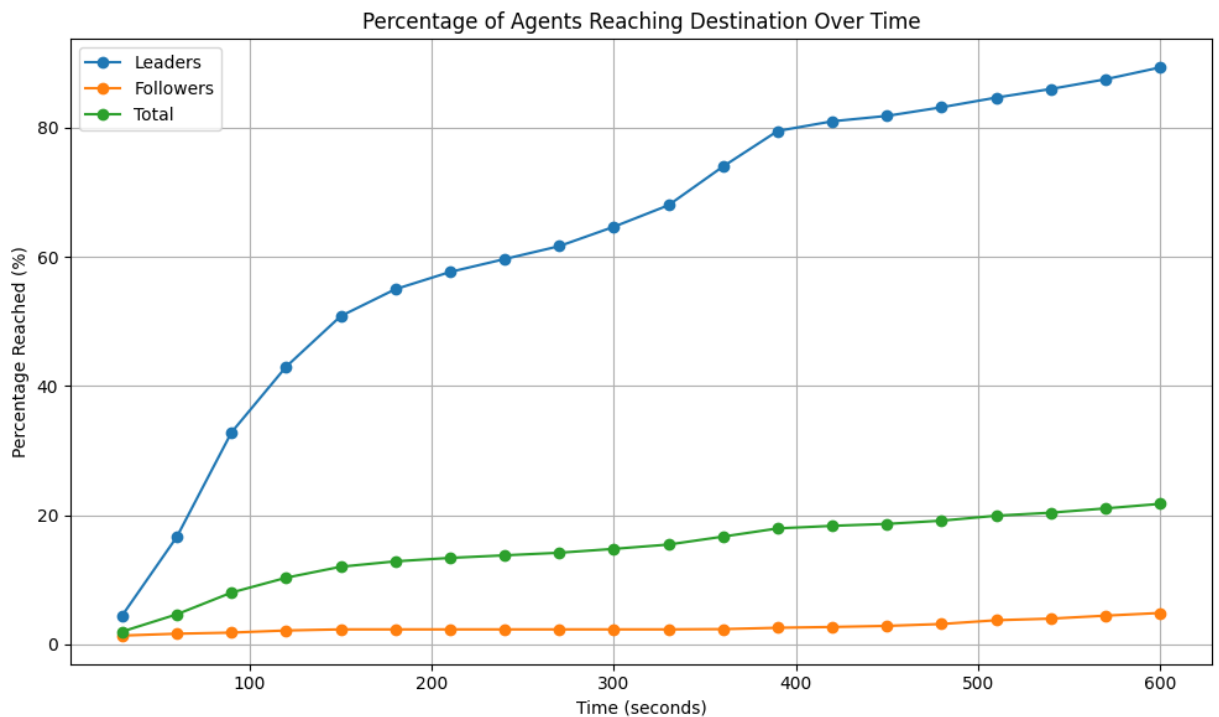
Σχήμα 4.14: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (70%-30%)



Σχήμα 4.15: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (60%-40%)



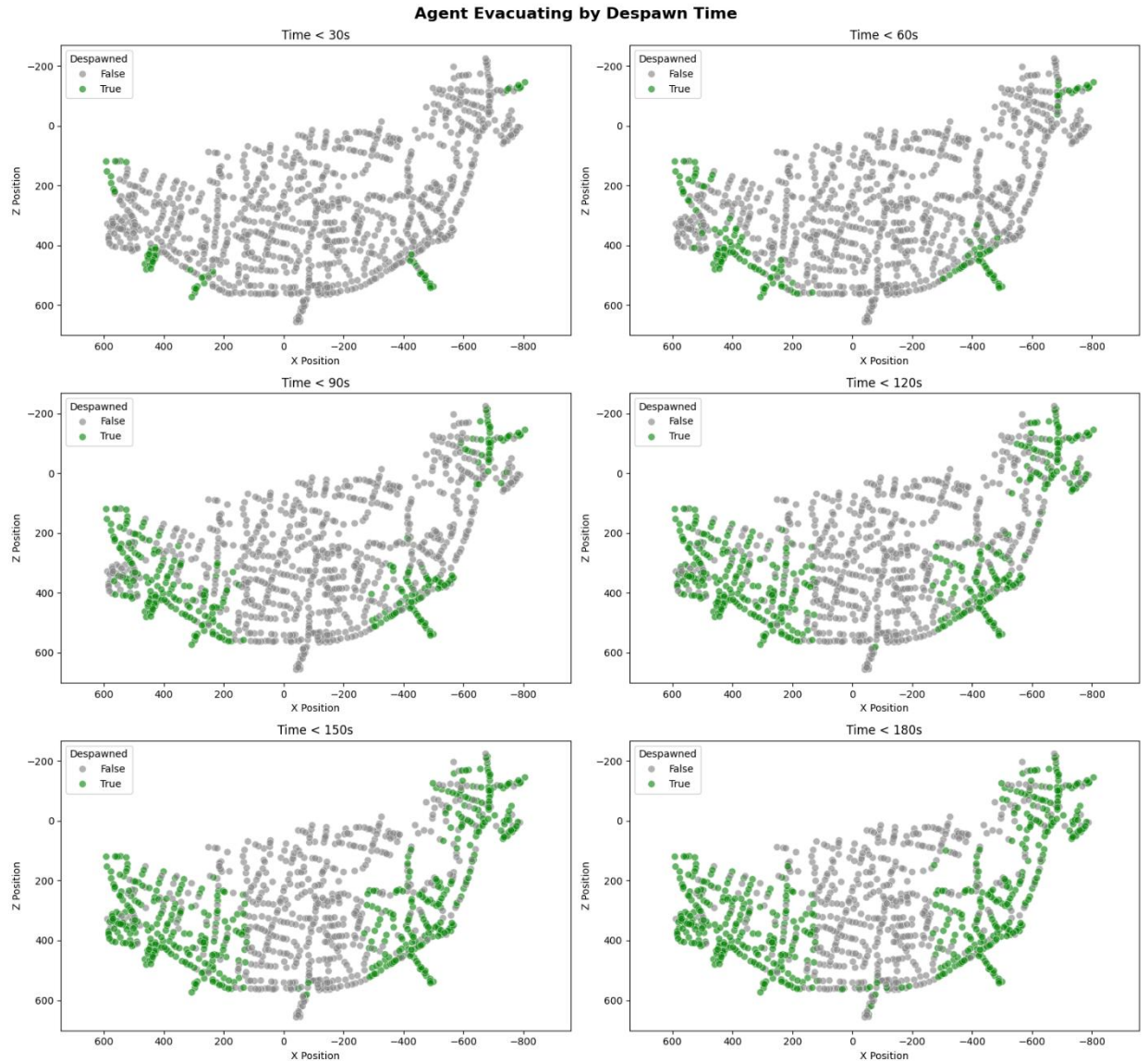
Σχήμα 4.16: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (50%-50%)



Σχήμα 4.17: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (20%-80%)

Οπτικοποίηση Θέσεων Εμφάνισης και Χρόνου Αποχώρησης Πρακτόρων

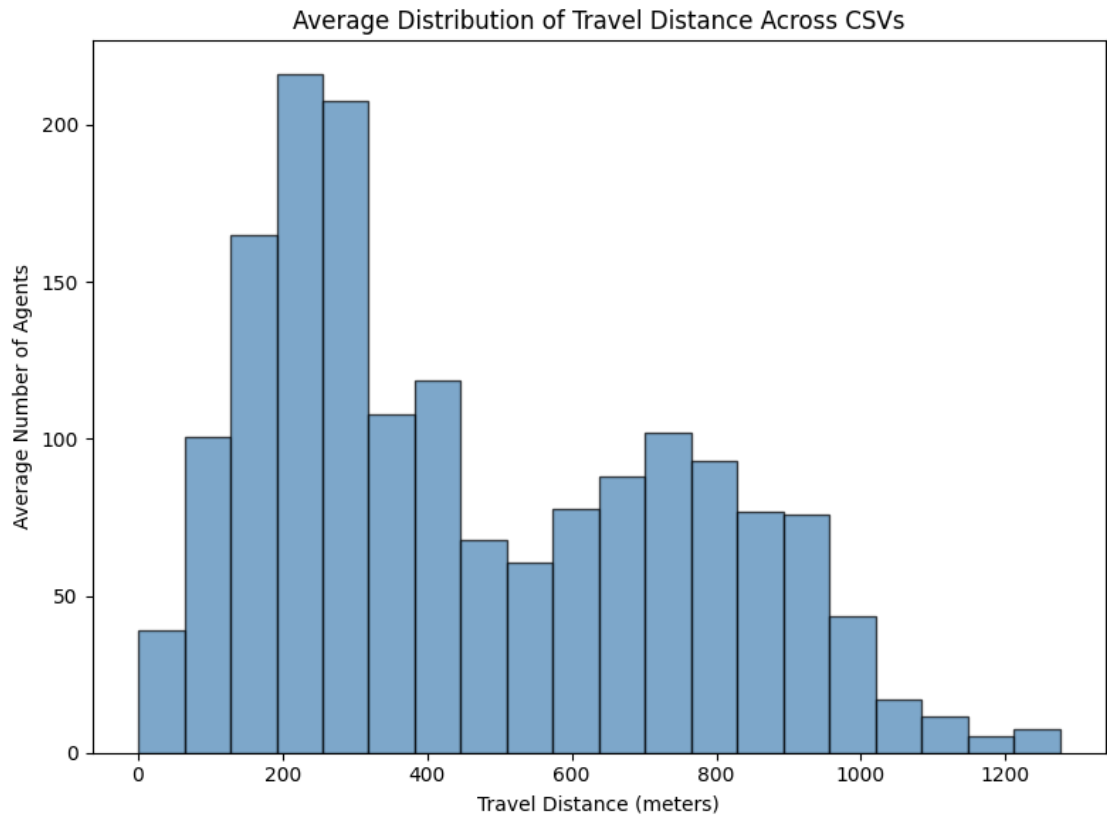
Στο διάγραμμα που ακολουθεί, απεικονίζονται οι αρχικές θέσεις (spawn locations) όλων των πρακτόρων επάνω στο οδικό δίκτυο της παλιάς πόλης, σε συνδυασμό με το χρονικό σημείο (σε δευτερόλεπτα) κατά το οποίο αποχώρησαν (despawn) από την προσομοίωση, λόγω του ότι έφτασαν με επιτυχία σε κάποια έξοδο.



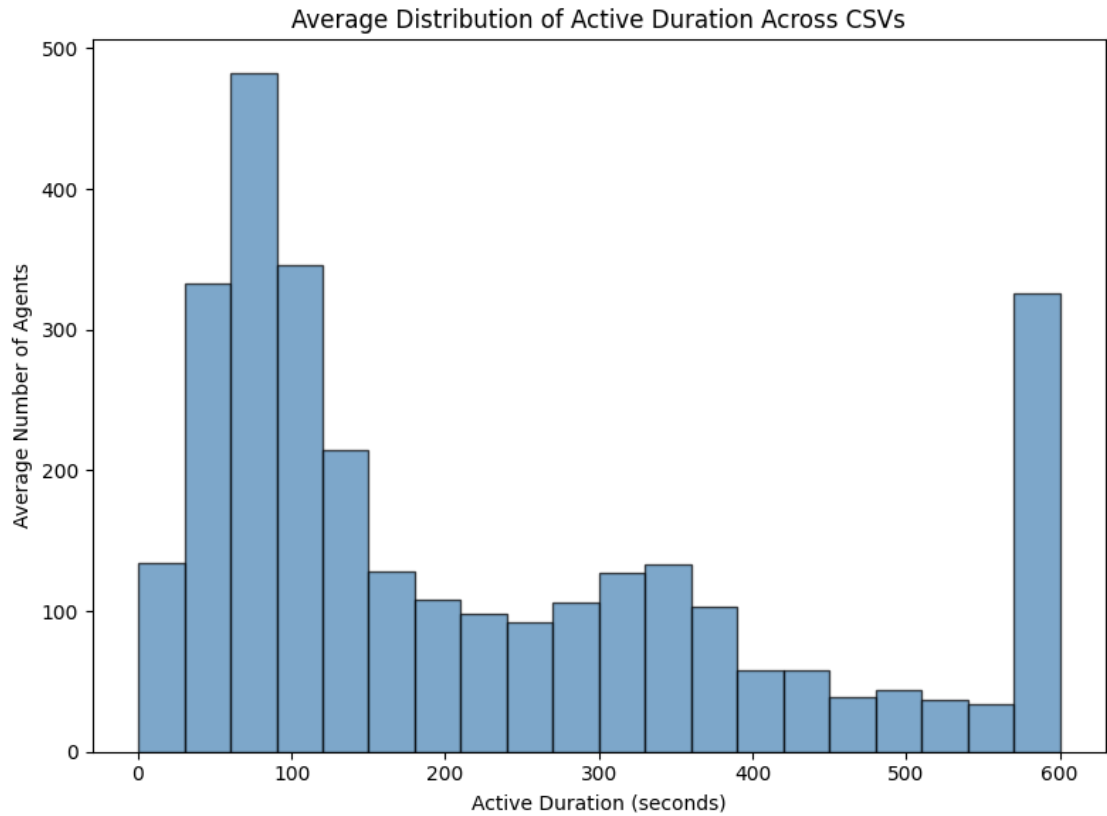
Σχήμα 4.18: Evacuation progress over time for exit 2 closed scenario.

Διάρκεια Ενεργής Κίνησης και Συνολική Απόσταση Μετακίνησης

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέση κατανομή της απόστασης κίνησης (Travel Distance) και τη μέση χρονική διάρκεια ενεργού μετακίνησης (Active Duration) των πρακτόρων, συγκεντρωτικά για όλα τα σενάρια και τις εκτελέσεις της εν λόγω προσομοίωσης. Στο πρώτο γράφημα βλέπουμε πόσα μέτρα διανύσαν κατά μέσο όρο οι πράκτορες, ενώ στο δεύτερο αποτυπώνεται ο χρόνος (σε δευτερόλεπτα) που παρέμειναν ενεργοί προτού φτάσουν σε ασφαλές σημείο ή απομακρυνθούν από την προσομοίωση.



Σχήμα 4.19: Histogram of agents' average travel distances across all simulation runs.



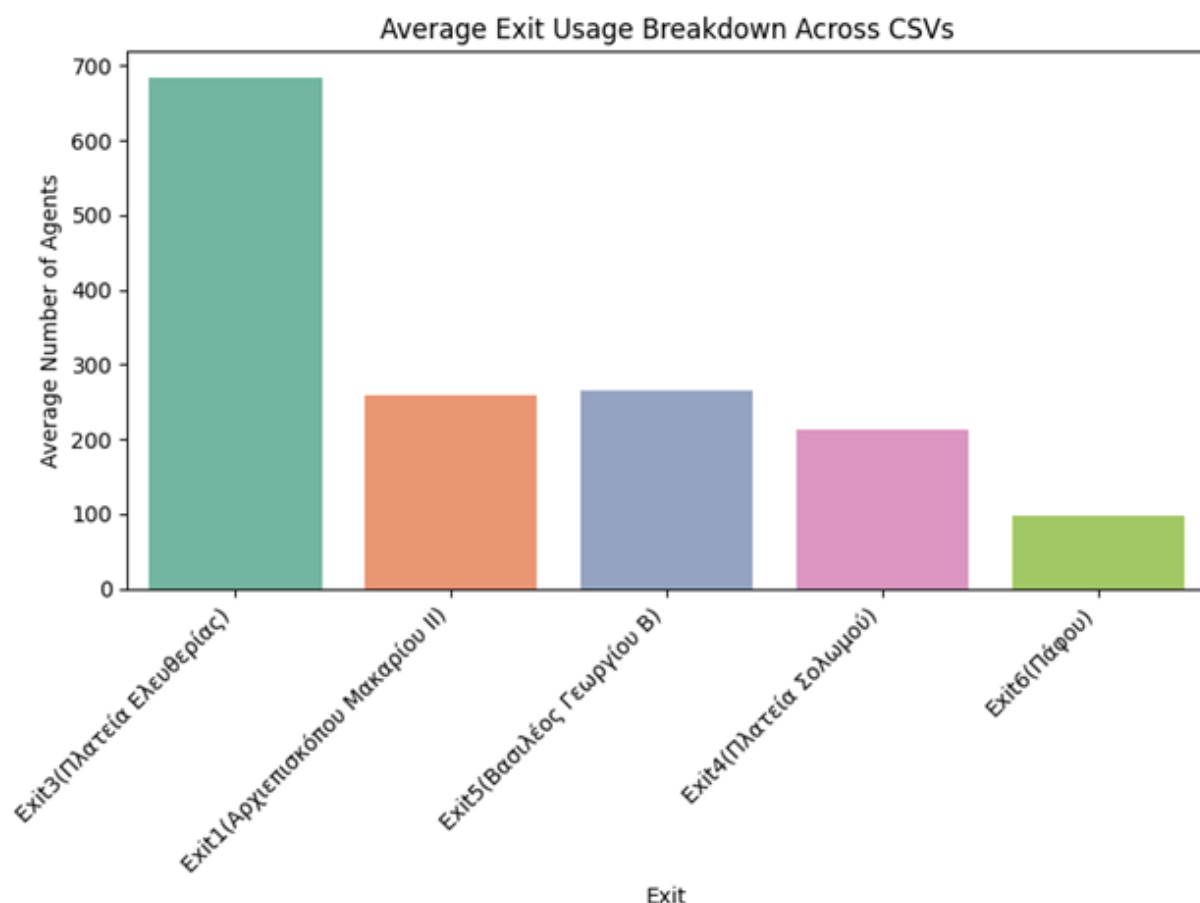
Σχήμα 4.20: Histogram of agents' average active durations across all simulation runs.

Όπως βλέπουμε, υπάρχει μια εμφανής διαφορά στις τιμές μεταξύ των δύο σεναρίων. Στο πιλοτικό σενάριο, ένα μεγαλύτερο ποσοστό των πρακτόρων έχει μικρότερη ενεργή διάρκεια, συνήθως κυμαινόμενη από 0 έως 100 δευτερόλεπτα. Αντίθετα, στο σενάριο περιορισμένων εξόδων παρατηρείται μια ευρύτερη γκάμα ενεργών διαρκειών, με μεγαλύτερο αριθμό πρακτόρων να έχουν μεγαλύτερη ενεργή διάρκεια, ιδιαίτερα κοντά στα 600 δευτερόλεπτα.

Αυτή η διαφορά μπορεί να αποδοθεί στη διαμόρφωση της προσομοίωσης για το σενάριο περιορισμένων εξόδων, όπου κλείσαμε την πιο δημοφιλή έξοδο (Έξοδος 2) για να προσομοιώσουμε μια πιο ρεαλιστική κατάσταση εκκένωσης κατά τη διάρκεια μιας κρίσιμης κατάστασης. Ωστόσο, οι πράκτορες δεν γνωρίζουν εκ των προτέρων ότι η Έξοδος 2 είναι κλειστή. Πρέπει πρώτα να προσπαθήσουν να φτάσουν σε αυτήν την έξοδο και μόνο όταν πλησιάσουν την έξοδο αντιλαμβάνονται ότι είναι μπλοκαρισμένη. Αυτό τους αναγκάζει να στραφούν σε εναλλακτικές εξόδους, κάτι που αυξάνει το χρόνο που χρειάζονται για να φτάσουν στον προορισμό τους. Ως αποτέλεσμα, πολλοί πράκτορες έχουν μεγαλύτερες ενεργές διάρκειες και αποστάσεις κίνησης στο σενάριο περιορισμένων εξόδων, καθώς περνούν περισσότερο χρόνο κινούμενοι μέσα στην πόλη για να βρουν μια νέα έξοδο ή καταφύγιο. Αντίθετα, στο πιλοτικό σενάριο, όπου όλες οι εξοδοί ήταν προσβάσιμες, οι πράκτορες κατάφεραν να φτάσουν πιο γρήγορα στον προορισμό τους.

Στατιστική Κατανομή Χρήσης των Εξόδων

Στο παρακάτω γράφημα εμφανίζεται η μέση κατανομή χρήσης των διαθέσιμων εξόδων, όπως προκύπτει από όλες τις εκτελέσεις της προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι η έξοδος 2 (Γέφυρα Δώρου Λοίζου) ορθά δεν υπάρχει στο γράφημα καθώς λόγω του σεναρίου δεν μπορεί κανένας να διαφύγει από αυτή.



Σχήμα 4.21: Breakdown of average exit usage by agents.

4.2.6 Ανάλυση Υπόθεσης 2

4.2.6.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Πιλοτικού Σεναρίου με Καταφύγια

Σκοπός αυτού του σεναρίου είναι για να έχουμε ένα πιλοτικό σενάριο με την χρήση των καταφυγίων σε αντίθεση με το πρώτο πιλοτικό σενάριο στο οποίο χρησιμοποιούμε μόνο της εξόδους. εντός των τειχών ούτως ώστε να μπορούμε να μελετήσουμε κατά πόσο ο αριθμός των καταφυγίων είναι επαρκής καθώς και αν τα καταφύγια μειώνουν τον χρόνο που χρειάζεται για εκκενωθεί η εντός των τειχών πόλη της Λευκωσίας.

Ποσοστά Επιτυχίας Πρακτόρων

Ακολουθούν τα ποσοστά επιτυχίας και αποτυχίας για κάθε σενάριο με διαφορετικούς συνδυασμούς ηγετών και ακολούθων για το πιλοτικό σενάριο με χρήση καταφυγίων.

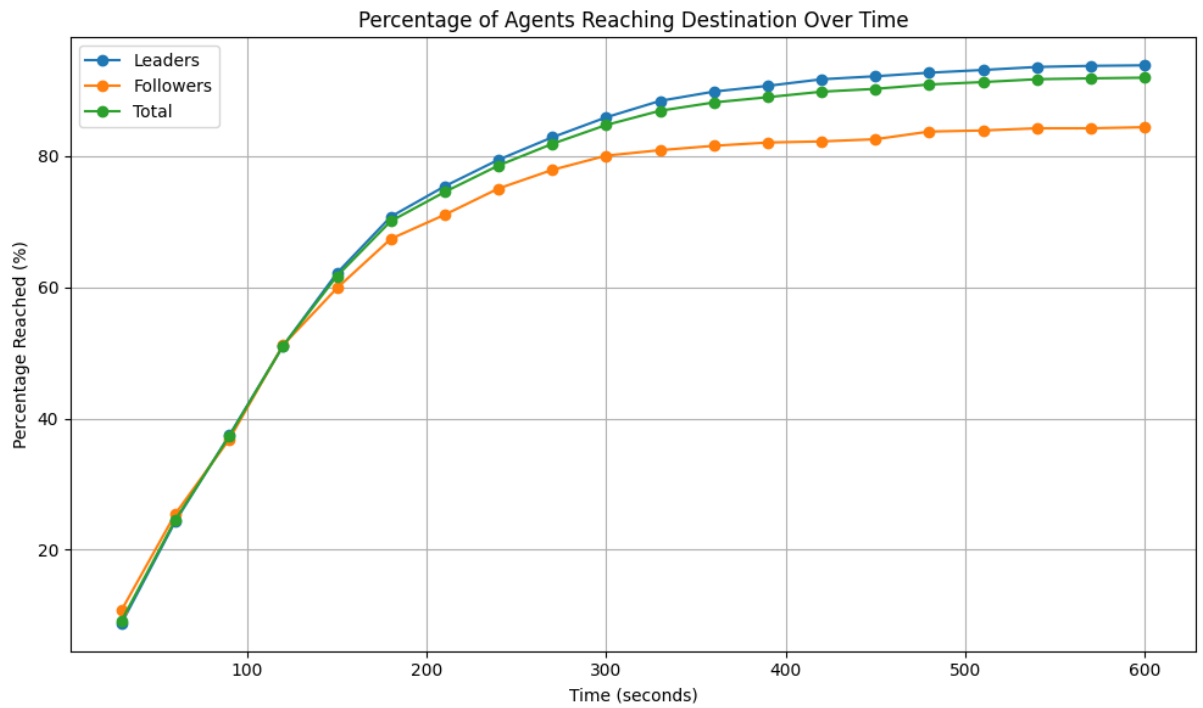
Αναλογία (Ηγέτες– Ακόλουθοι)	Χαμένοι Ακόλουθοι (%)	Επιτυχημένοι Ακόλουθοι (%)	Περιπλανώμενοι Ακόλουθοι (%)	Επιτυχία Ηγετών (%)	Περιπλανώμενοι Ηγέτες (%)
80-20	9.8333	84.3333	5.8333	93.7500	6.2500
70-30	8.8889	82.8889	8.2222	92.7143	7.2857
60-40	11.3333	81.1667	7.5000	92.6667	7.3333
50-50	83.2000	11.1333	5.6667	94.3333	5.6667
20-80	90.5000	4.6667	4.8333	95.1667	4.8333

Πίνακας 4.3: Percentages of multiple categories of agent's rates across different leader–follower ratios in the simulation

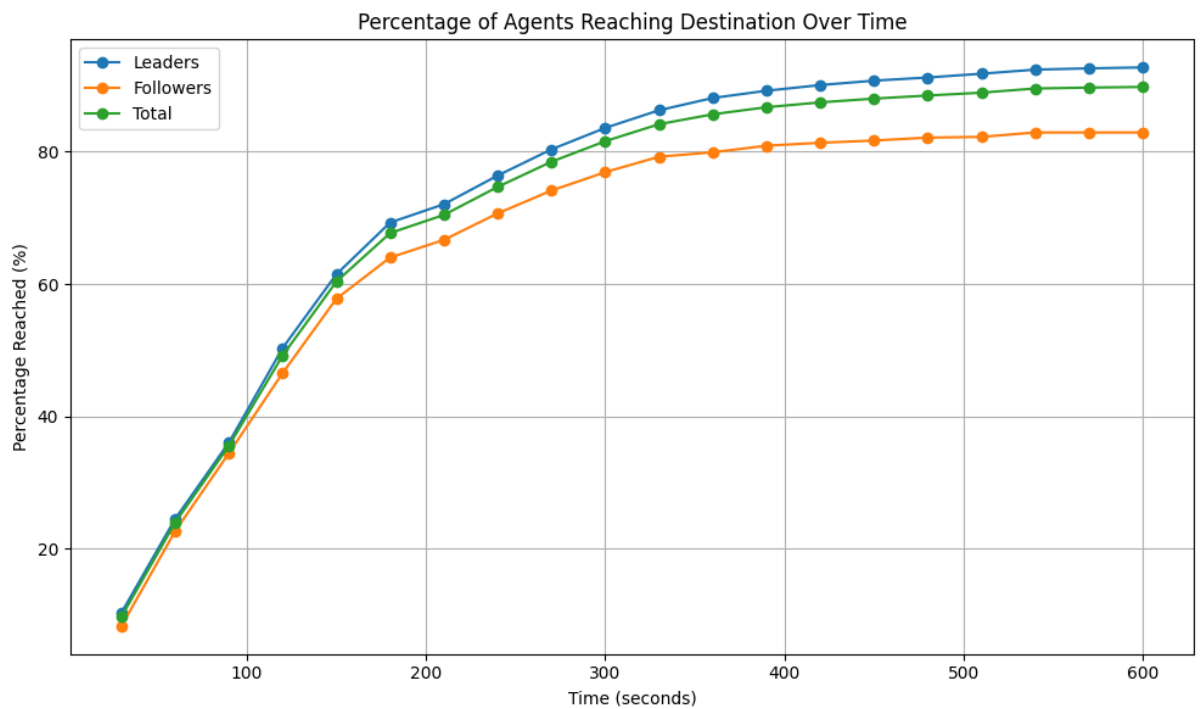
Τα αποτελέσματα που παρατηρούμε είναι παρόμοια με εκείνα του πρώτου πιλοτικού σεναρίου, όπου χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά οι έξοδοι. Συγκεκριμένα, για τους πράκτορες ηγέτες τα αποτελέσματα είναι σχεδόν τα ίδια, με πολύ υψηλό ποσοστό επιτυχίας και στα δύο σενάρια. Όσον αφορά τους ακολούθους, φαίνεται ότι η χρήση καταφυγίων έχει οδηγήσει σε ελαφρές βελτιώσεις, καθώς στα σενάρια όπου ο αριθμός των ακολούθων υπερβαίνει τον αριθμό των ηγετών, το ποσοστό επιτυχίας τους είναι ελαφρώς υψηλότερο σε σύγκριση με το πρώτο πιλοτικό σενάριο, ενώ το ποσοστό των ακολούθων που «χάνουν» τον ηγέτη τους μειώνεται αναλόγως. Παράλληλα θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα παρακάτω αποτελέσματα είναι από μια εκτέλεση της προσομοίωσης και όχι ο μέσος όρος από πολλαπλές εκτελέσεις.

Χρονολογική εξέλιξη του ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης

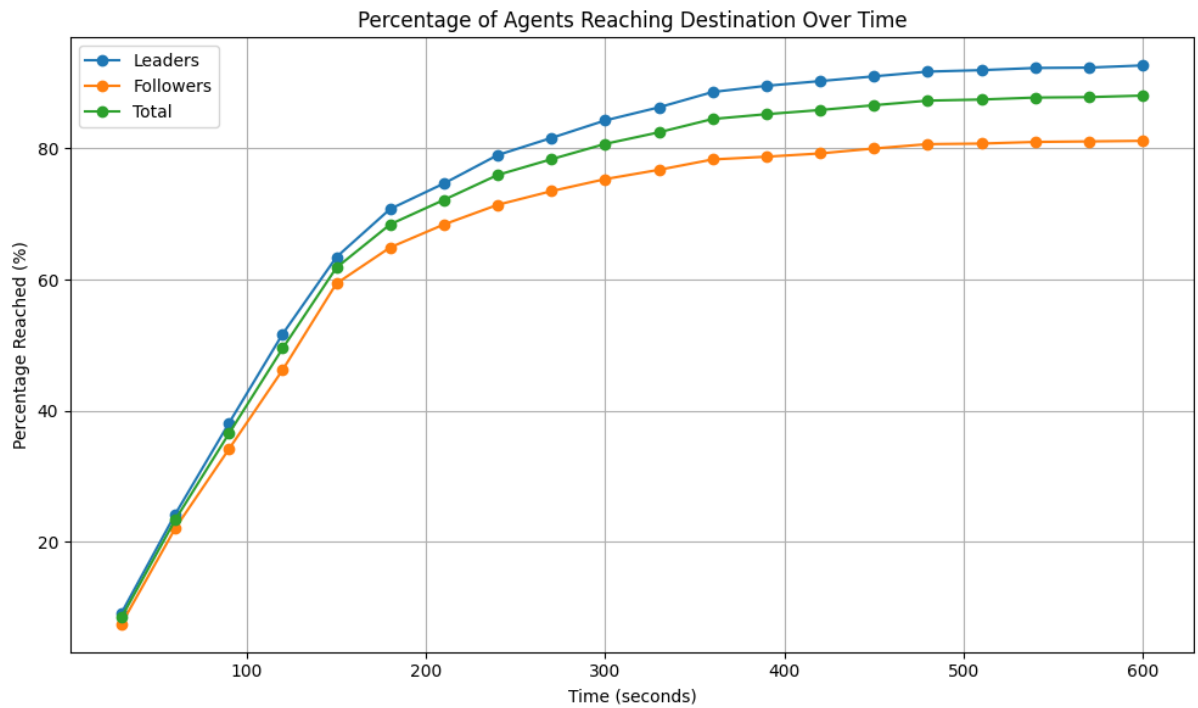
Στον άξονα X (οριζόντιο), παρουσιάζεται ο χρόνος σε δευτερόλεπτα. Στον άξονα Y (κάθετο), το ποσοστό (επί τοις εκατό) των πρακτόρων που έφτασαν με επιτυχία στον προορισμό (έξοδος/καταφύγιο). Οι καμπύλες απεικονίζουν τους ηγέτες, τους ακολούθους και το σύνολο των πρακτόρων, αντίστοιχα.



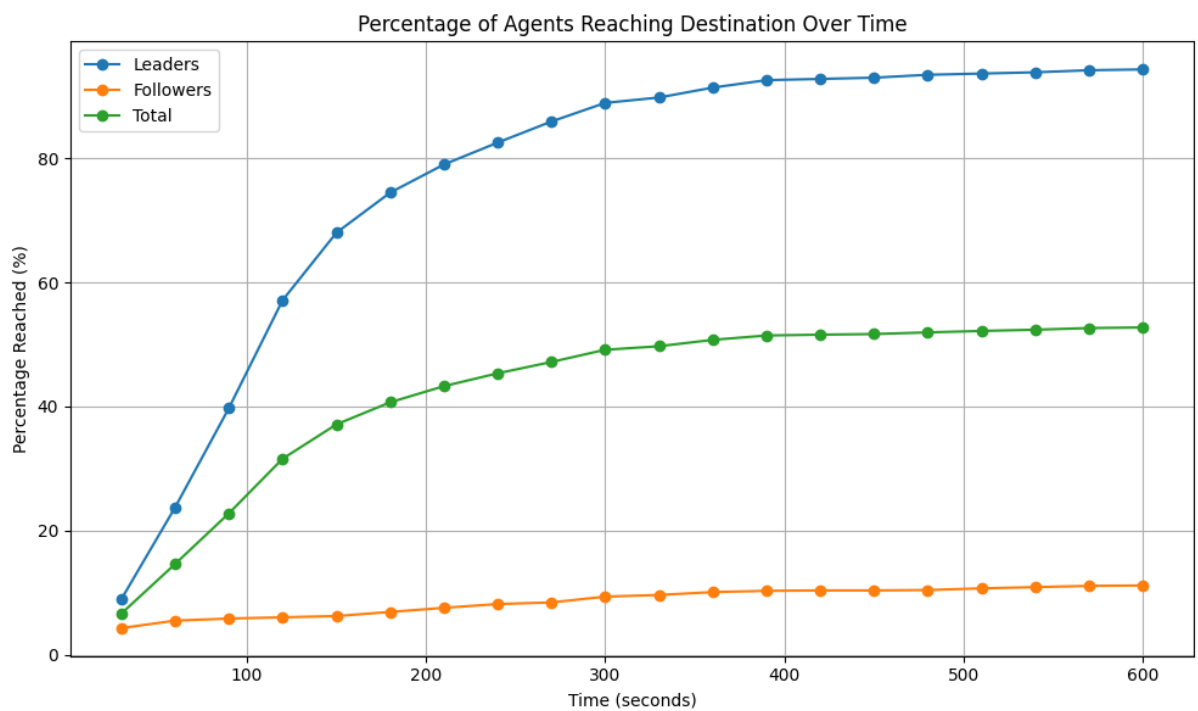
Σχήμα 4.22: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (80%-20%)



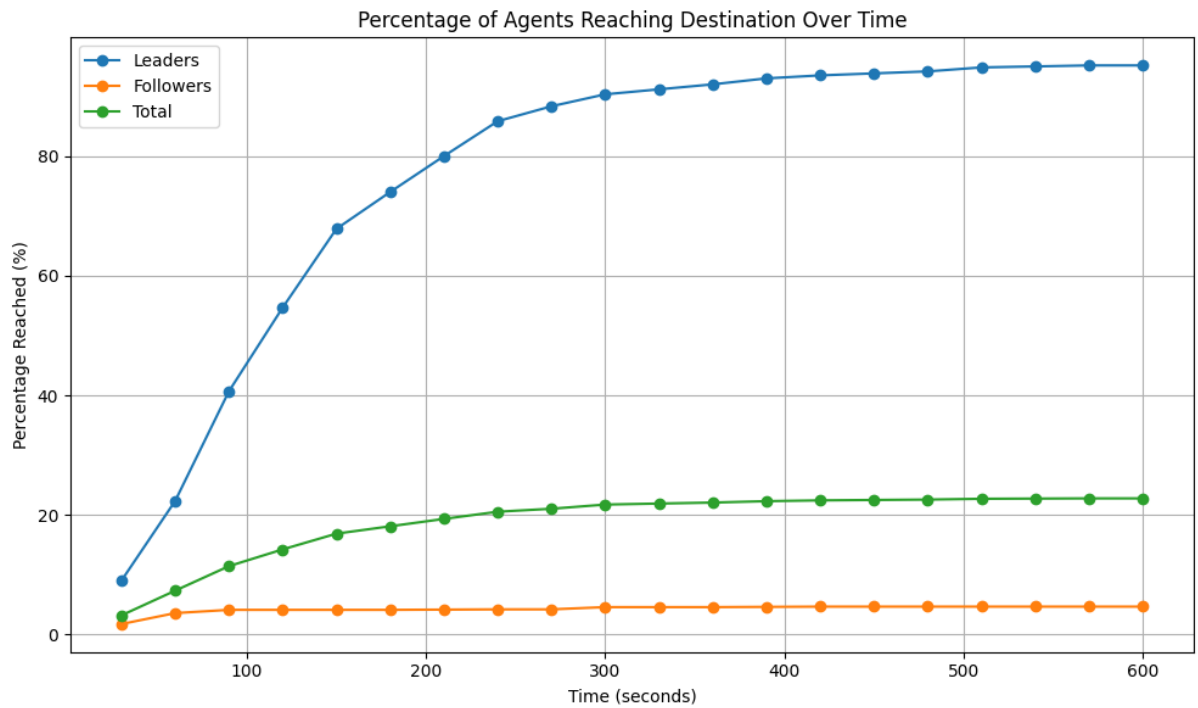
Σχήμα 4.23: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (70%-30%)



Σχήμα 4.24: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (60%-40%)



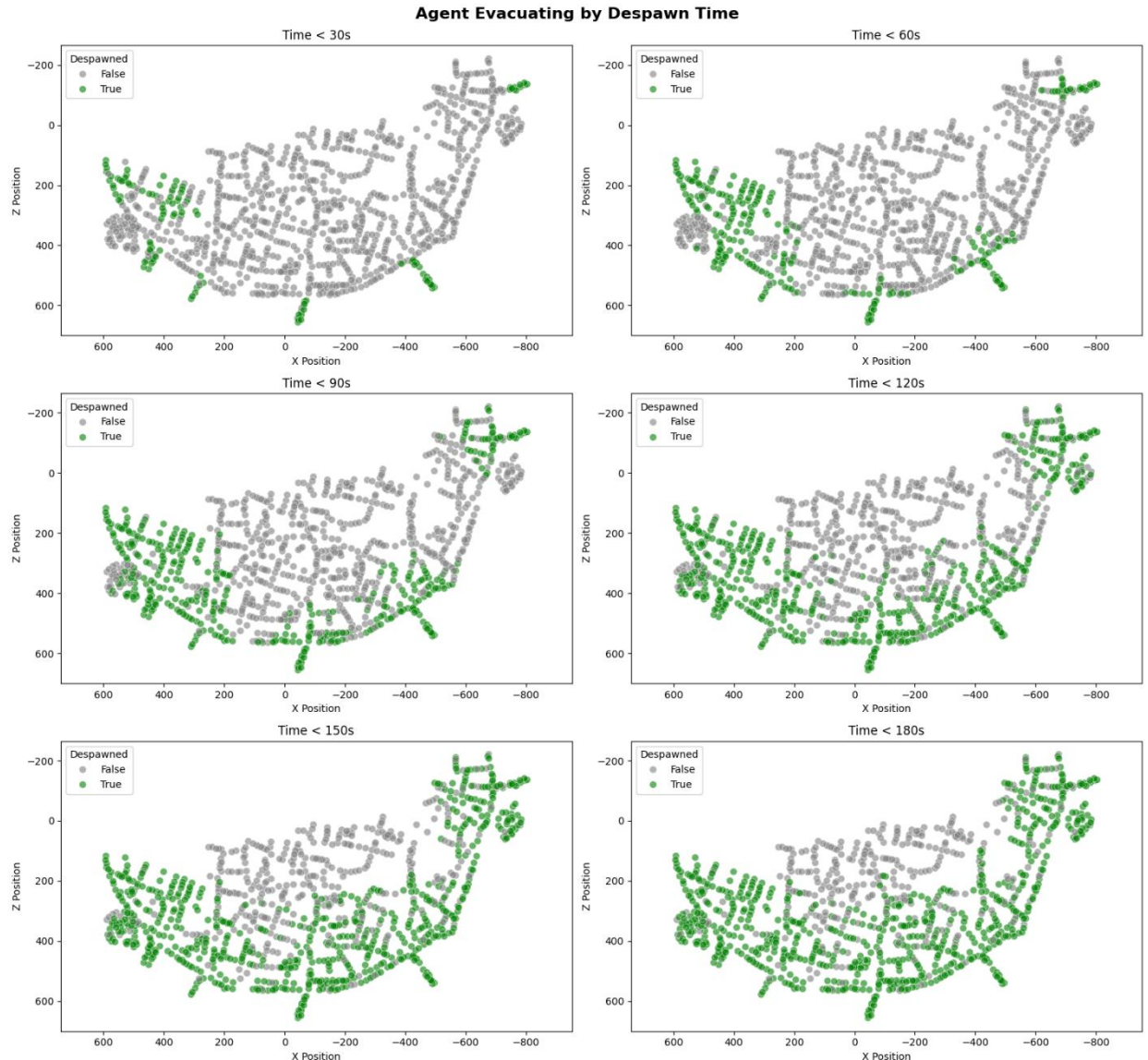
Σχήμα 4.25: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (50%-50%)



Σχήμα 4.26: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (20%-80%)

Οπτικοποίηση Θέσεων Εμφάνισης και Χρόνου Αποχώρησης Πρακτόρων

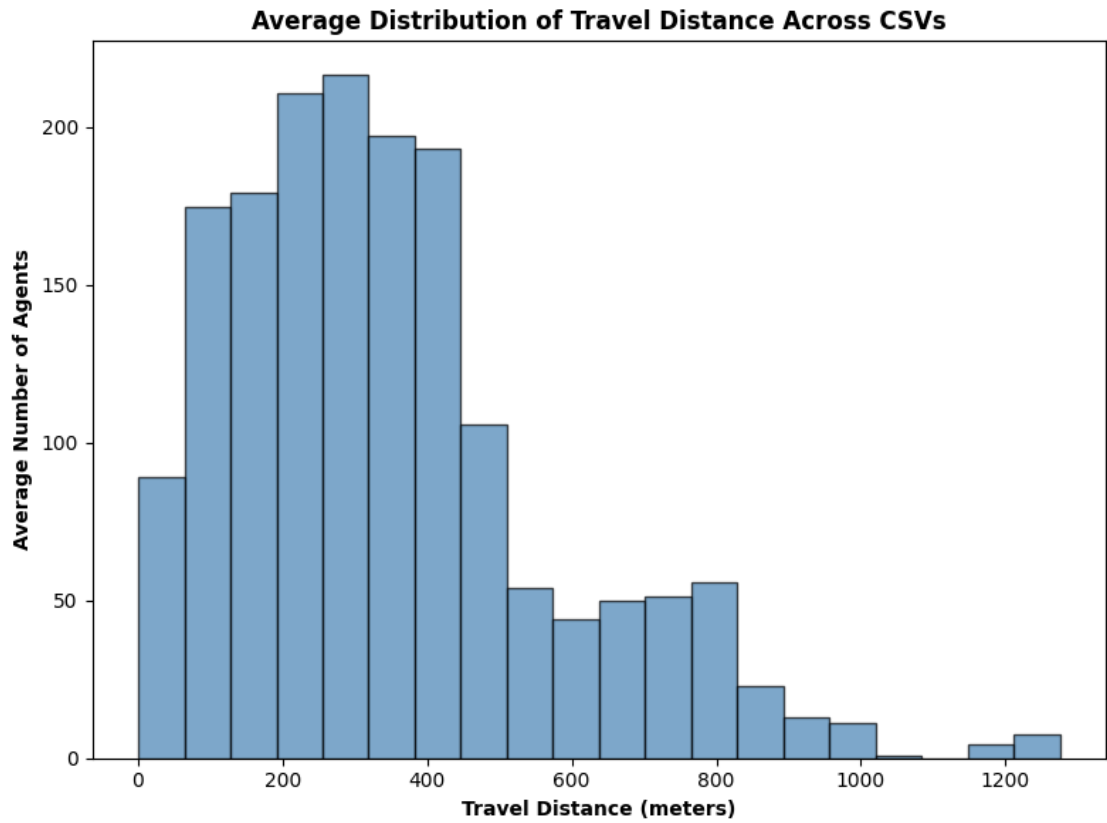
Στο διάγραμμα που ακολουθεί, απεικονίζονται οι αρχικές θέσεις (spawn locations) των πρακτόρων επάνω στο οδικό δίκτυο της παλιάς πόλης για όλα τα σενάρια και τις εκτελέσεις, σε συνδυασμό με το χρονικό σημείο (σε δευτερόλεπτα) κατά το οποίο αποχώρησαν (despawn) από την προσομοίωση, λόγω του ότι έφτασαν με επιτυχία σε κάποια έξοδο ή καταφύγιο.



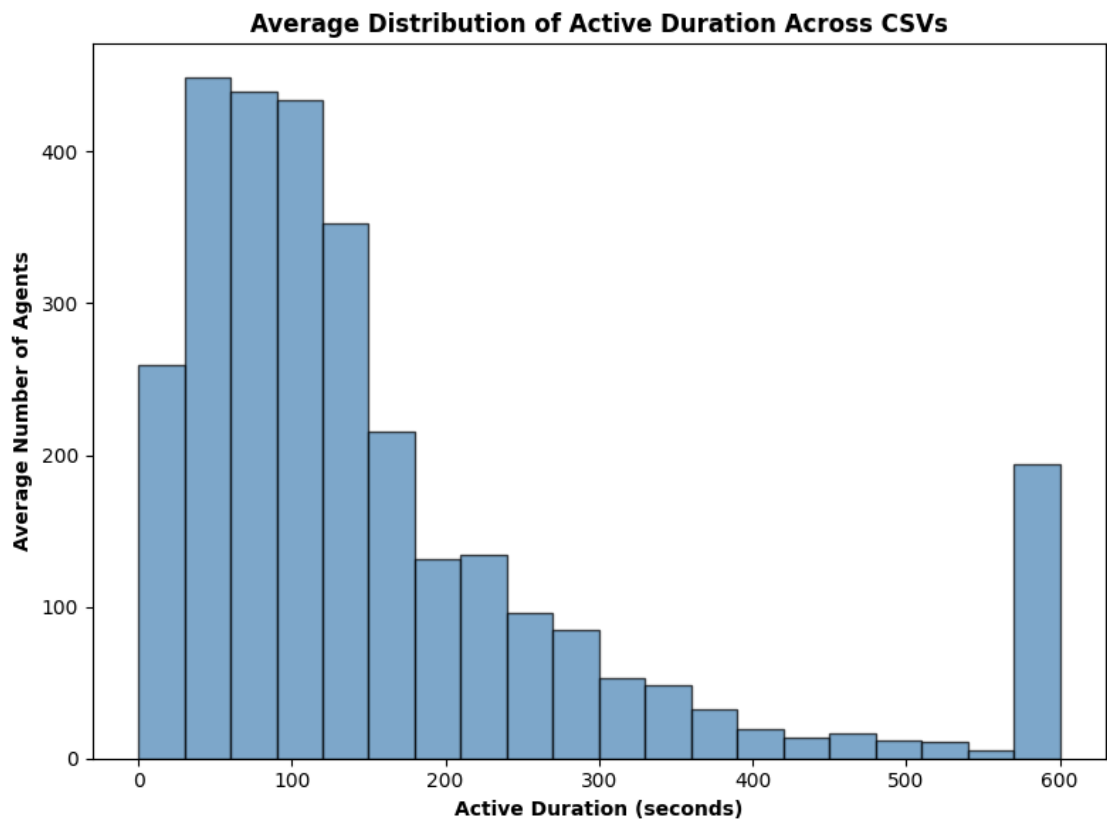
Σχήμα 4.27: Evacuation progress over time for pilot scenario with shelters.

Διάρκεια Ενεργής Κίνησης και Συνολική Απόσταση Μετακίνησης

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέση κατανομή της απόστασης κίνησης (Travel Distance) και τη μέση χρονική διάρκεια ενεργού μετακίνησης (Active Duration) των πρακτόρων, συγκεντρωτικά για όλα τα σενάρια και τις εκτελέσεις της εν λόγω προσομοίωσης. Στο πρώτο γράφημα βλέπουμε πόσα μέτρα διανύσαν κατά μέσο όρο οι πράκτορες, ενώ στο δεύτερο αποτυπώνεται ο χρόνος (σε δευτερόλεπτα) που παρέμειναν ενεργοί προτού φτάσουν σε ασφαλές σημείο ή απομακρυνθούν από την προσομοίωση.



Σχήμα 4.28: Histogram of agents' average travel distances across all simulation runs.

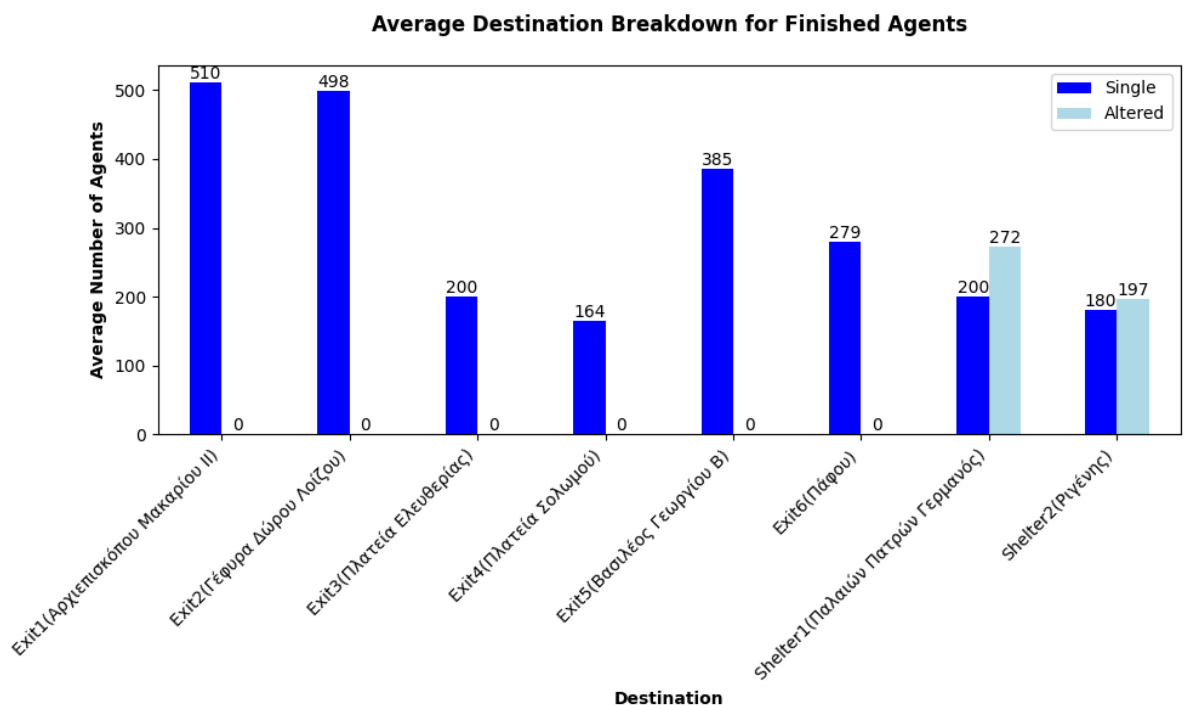


Σχήμα 4.29: Histogram of agents' average active durations across all simulation runs.

Στατιστική Κατανομή Χρήσης των Εξόδων και Καταφυγίων

Στο παρακάτω γράφημα εμφανίζεται η μέση κατανομή χρήσης των διαθέσιμων εξόδων και καταφυγίων, όπως προκύπτει από τις εκτελέσεις της προσομοίωσης. Στον άξονα Χ (οριζόντιο), παρουσιάζονται οι προορισμοί στους οποίους μπορούν να διαφύγουν οι agents. Στον άξονα Υ (κάθετο), ο αριθμός των πρακτόρων που έφτασαν με επιτυχία στον αντίστοιχο προορισμό (έξοδος ή καταφύγιο). Οι μπάρες με σκούρο μπλε χρώμα απεικονίζουν τους πράκτορες οι οποίοι κατέφυγαν στην έξοδο/καταφύγιο επιτυχώς. Οι μπάρες με ανοιχτό μπλε χρώμα απεικονίζουν τον αριθμό των πρακτόρων οι οποίοι προσπάθησαν να πάνε στο αντίστοιχο καταφύγιο αλλά λόγω περιορισμένης χωρητικότητας χρειάστηκε να αλλάξουν προορισμό.

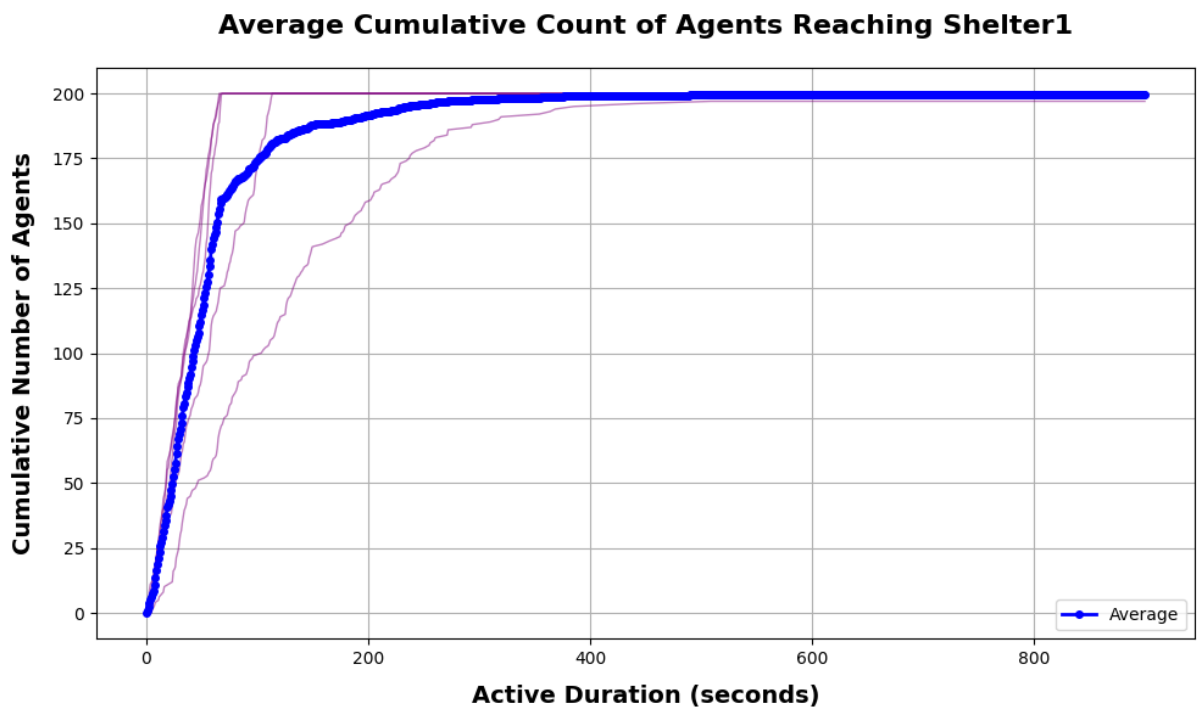
Υποσημείωση: Τα αποτελέσματα του σεναρίου, στο οποίο το ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου ορίστηκε στο 20%-80%, δεν συμπεριλήφθηκαν, καθώς πολλοί πράκτορες έχασαν τον ηγέτη τους πολύ νωρίς κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με αποτέλεσμα τα καταφύγια να μην γεμίσουν. Για να αποφευχθεί η αλλοίωση των συνολικών αποτελεσμάτων λόγω αυτού του περιορισμού, επιλέχθηκε να αποκλειστούν τα συγκεκριμένα δεδομένα.



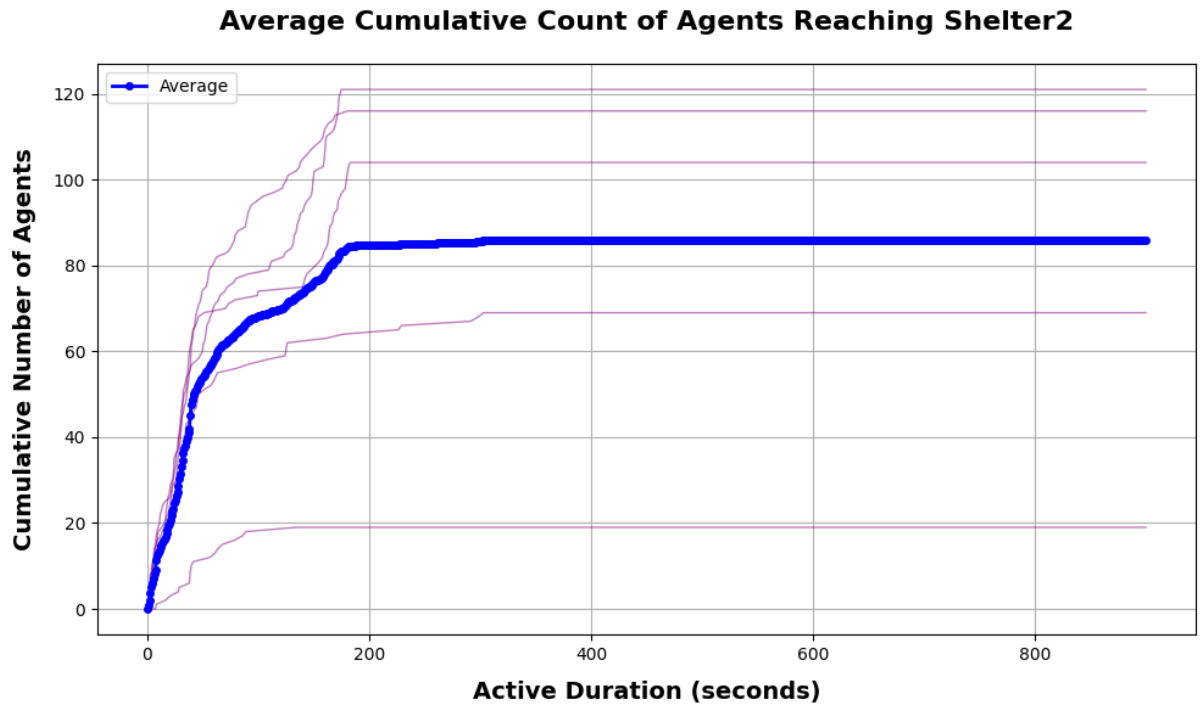
Σχήμα 4.30: Breakdown of average exit and shelters usage by agents.

Σωρευτική Κατανομή Χρήσης Καταφυγίων

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η σωρευτική κατανομή χρήσης των διαθέσιμων καταφυγίων, όπως προκύπτει από τις εκτελέσεις της προσομοίωσης. Ο οριζόντιος άξονας (X) αντιστοιχεί στον χρόνο σε δευτερόλεπτα, ενώ ο κατακόρυφος άξονας (Y) δείχνει τον αριθμό των πρακτόρων που έφτασαν επιτυχώς στο εκάστοτε καταφύγιο. Η καμπύλη με μπλε χρώμα απεικονίζει τον μέσο όρο χρήσης του καταφυγίου, ενώ οι μωβ καμπύλες αντιστοιχούν σε κάθε μεμονωμένο σενάριο που εξετάστηκε, λειτουργώντας ως σημείο αναφοράς.



Σχήμα 4.31: Σωρευτική κατανομή χρήσης καταφυγίου 1 επί της οδού «Παλαιών Πατρών Γερμανός».



Σχήμα 4.32: Σωρευτική κατανομή χρήσης καταφυγίου 2 επί της οδού «Ριγένης».

4.2.6.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου με περισσότερα Καταφύγια

Σε αντίθεση με το πρώτο πιλοτικό σενάριο, όπου υπήρχαν μόνο δύο καταφύγια, σε αυτό το νέο σενάριο προστέθηκαν δύο ακόμα, αυξάνοντας τον συνολικό αριθμό σε τέσσερα. Σκοπός είναι να διερευνηθεί εάν η επιπλέον διαθεσιμότητα καταφυγίων συντομεύει περαιτέρω τον χρόνο εκκένωσης και κατά πόσο ο νέος, αυξημένος αριθμός καταφυγίων καθώς και αν η τοποθεσία τους ανταποκρίνεται επαρκώς στις ανάγκες της παλιάς πόλης της Λευκωσίας.

Ποσοστά Επιτυχίας Πρακτόρων

Ακολουθούν τα ποσοστά επιτυχίας και αποτυχίας για κάθε σενάριο με διαφορετικούς συνδυασμούς ηγετών και ακολούθων για το σενάριο με χρήση περισσότερων καταφυγίων.

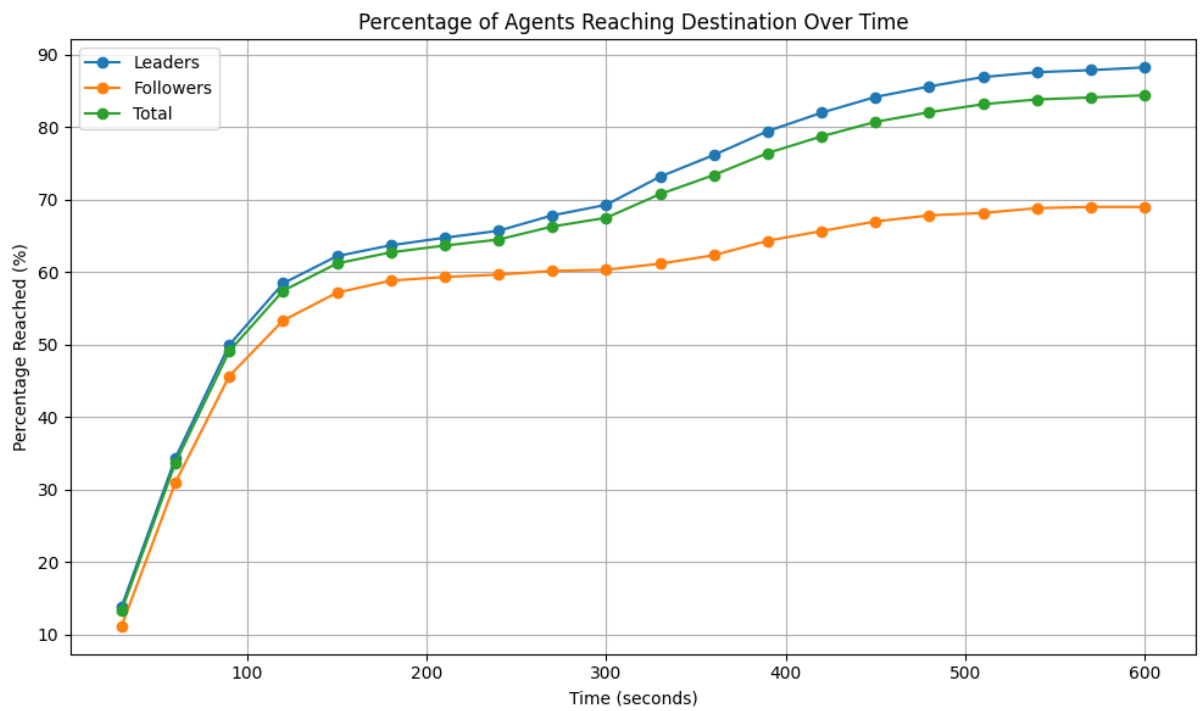
Αναλογία (Ηγέτες– Ακόλουθοι)	Χαμένοι Ακόλουθοι (%)	Επιτυχημένοι Ακόλουθοι (%)	Περιπλανώμενοι Ακόλουθοι (%)	Επιτυχία Ηγετών (%)	Περιπλανώμενοι Ηγέτες (%)
80-20	20.3333	69.0000	10.6667	88.2500	11.7500
70-30	27.0000	62.8889	10.1111	90.1429	9.8571
60-40	58.0000	31.2500	10.7500	88.5556	11.4444
50-50	75.3667	14.7333	10.0000	90.0000	10.0000
20-80	85.5833	7.0833	7.3333	92.6667	7.3333

Table 4.1: Percentages of multiple categories of agent's rates across different leader–follower ratios in the simulation.

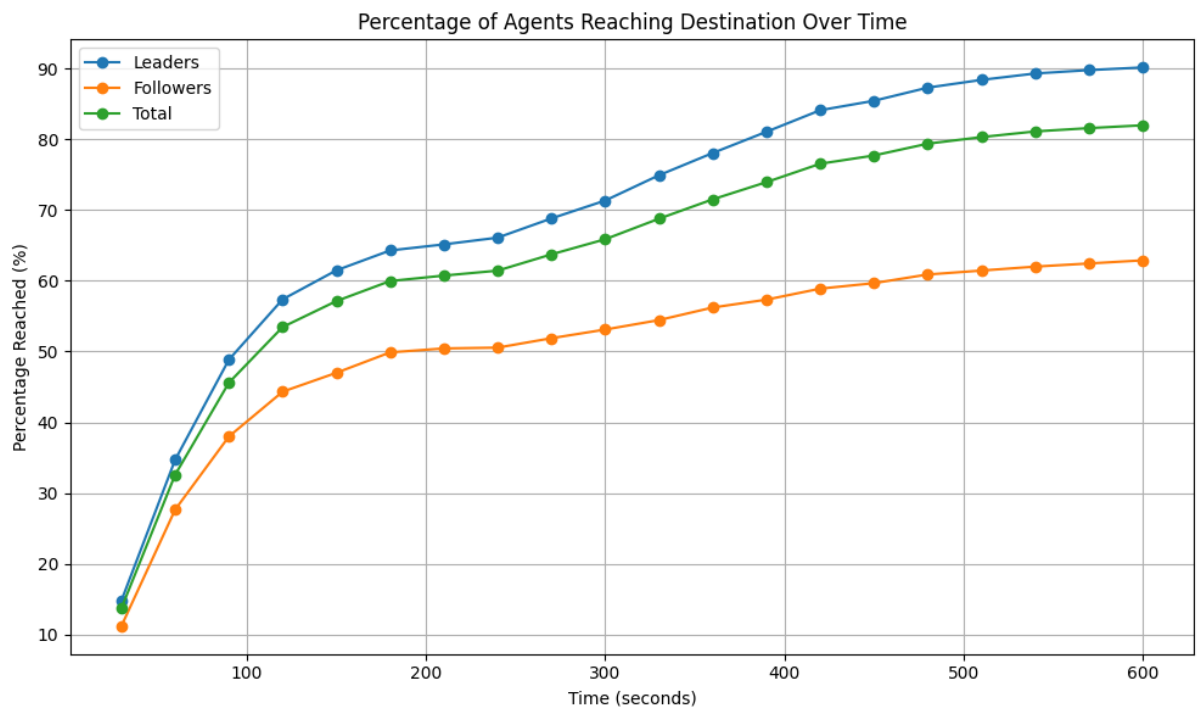
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πιλοτικού σεναρίου με δύο καταφύγια και εκείνου με τέσσερα, παρατηρείται ότι το αρχικό σενάριο εμφανίζει καλύτερα ποσοστά επιτυχημένης εκκένωσης. Παρότι θα ήταν λογικό να αναμένεται το αντίθετο, η προσθήκη επιπλέον καταφυγίων δεν βελτίωσε τα αποτελέσματα. Ένας πιθανός λόγος είναι ότι, βάσει της λογικής που εφαρμόζεται στην προσομοίωση, οι πράκτορες που βρίσκονται κοντά σε ένα καταφύγιο το επιλέγουν υποχρεωτικά, ακόμη και αν υπάρχει ήδη μεγάλος αριθμός ατόμων να το χρησιμοποιεί. Σε περιπτώσεις που η χωρητικότητα εξαντλείται, οι πράκτορες αναγκάζονται να αναζητήσουν άλλον προορισμό (π.χ. διαφορετικό καταφύγιο ή έξοδο), σπαταλώντας επιπλέον χρόνο και δυσχεραίνοντας τη συνολική εκκένωση. Παράλληλα θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα παρακάτω αποτελέσματα είναι από μια εκτέλεση της προσομοίωσης και όχι ο μέσος όρος από πολλαπλές εκτελέσεις.

Χρονολογική εξέλιξη του ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης

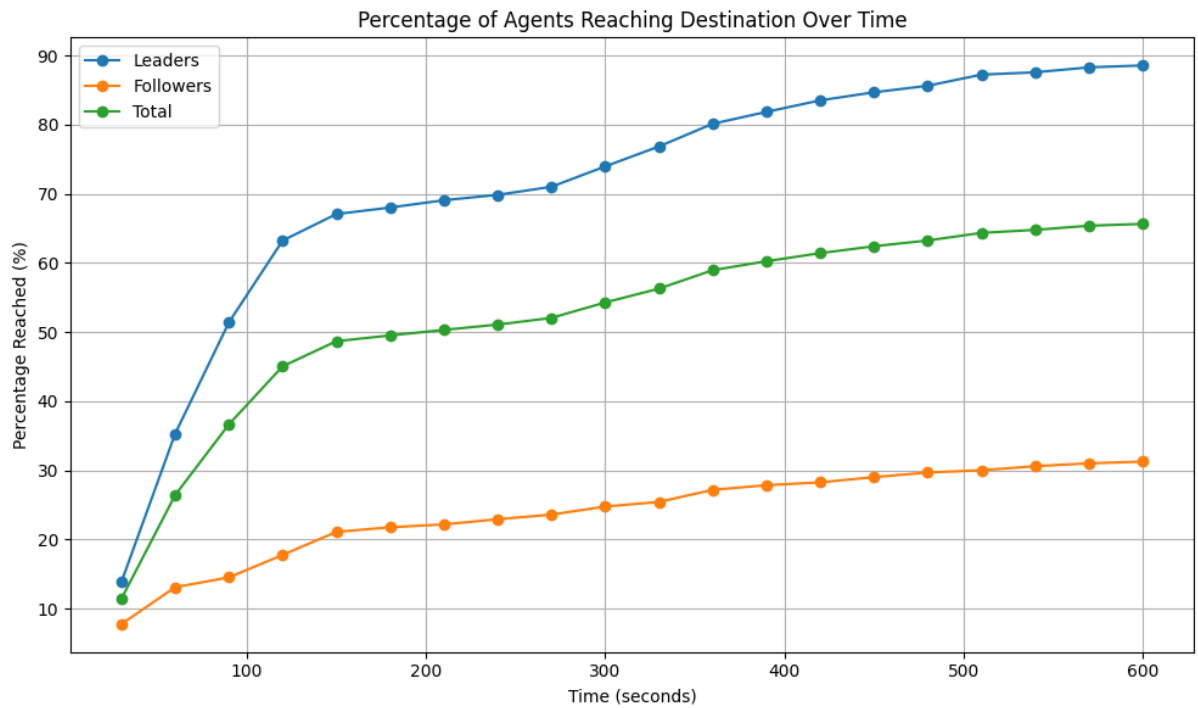
Στον άξονα X (οριζόντιο), παρουσιάζεται ο χρόνος σε δευτερόλεπτα. Στον άξονα Y (κάθετο), το ποσοστό (επί τοις εκατό) των πρακτόρων που έφτασαν με επιτυχία στον προορισμό (έξοδος/καταφύγιο). Οι καμπύλες απεικονίζουν τους ηγέτες, τους ακολούθους και το σύνολο των πρακτόρων, αντίστοιχα.



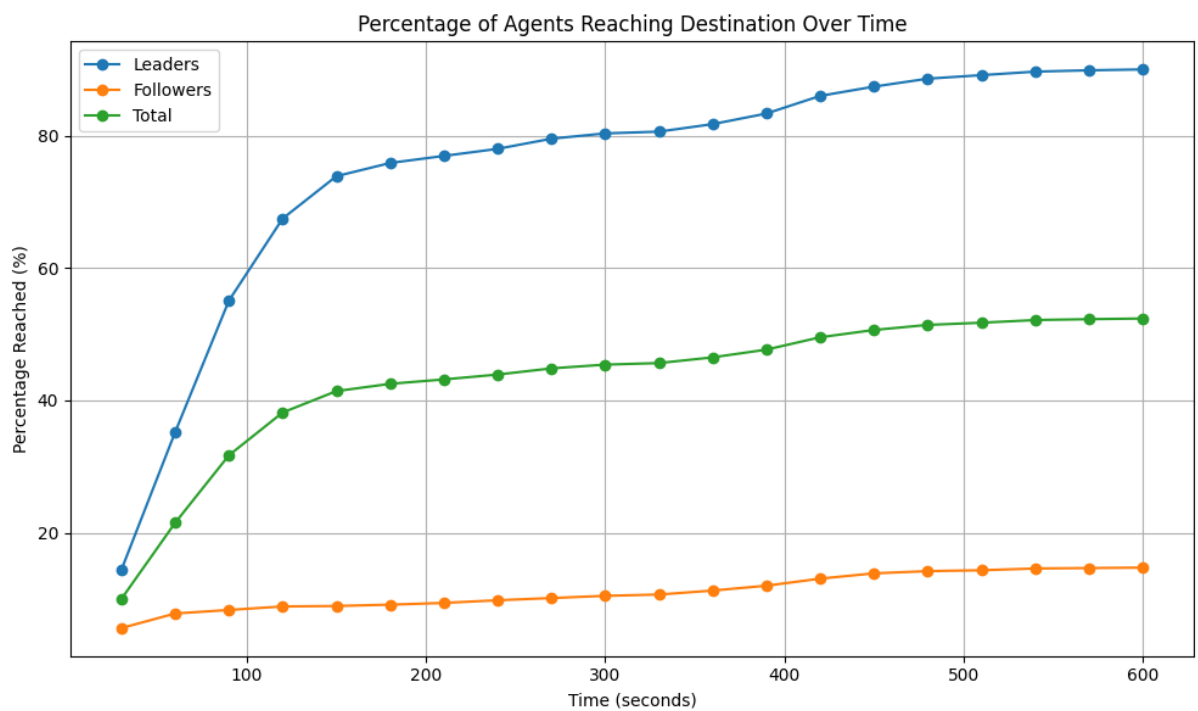
Σχήμα 4.33: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (80%-20%)



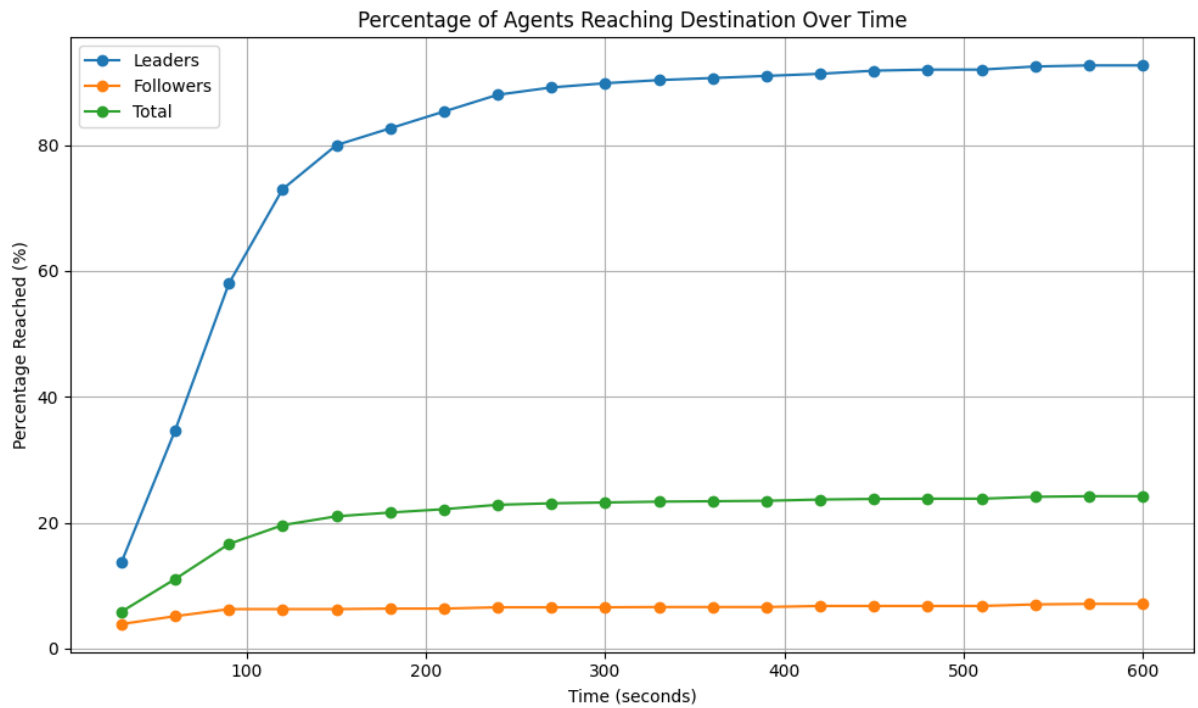
Σχήμα 4.34: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (70%-30%)



Σχήμα 4.35: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (60%-40%)



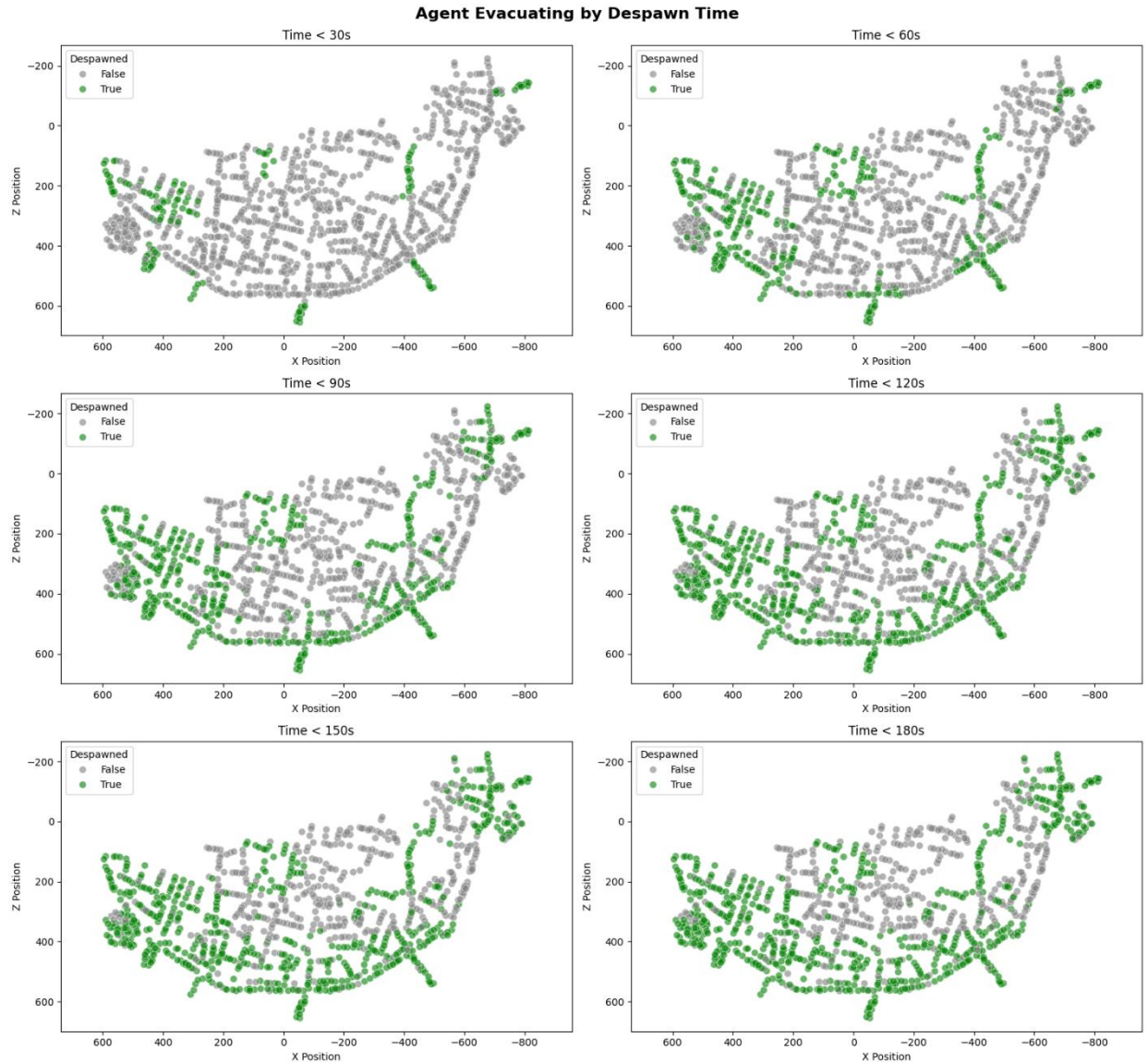
Σχήμα 4.36: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (50%-50%)



Σχήμα 4.37: Σωρευτική κατανομή επιτυχίας για Ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου (20%-80%)

Οπτικοποίηση Θέσεων Εμφάνισης και Χρόνου Αποχώρησης Πρακτόρων

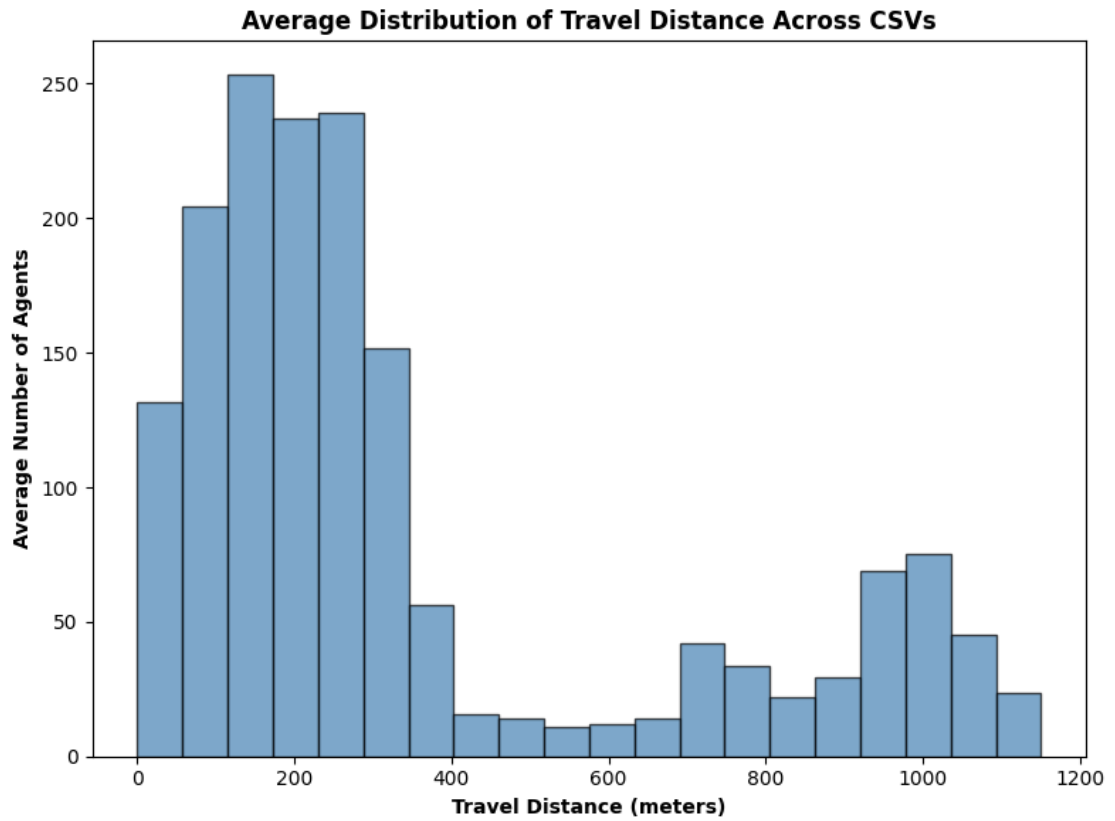
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, απεικονίζονται οι αρχικές θέσεις (spawn locations) των πρακτόρων επάνω στο οδικό δίκτυο της παλιάς πόλης για όλα τα σενάρια και τις εκτελέσεις, σε συνδυασμό με το χρονικό σημείο (σε δευτερόλεπτα) κατά το οποίο αποχώρησαν (despawn) από την προσομοίωση, λόγο του ότι έφτασαν με επιτυχία σε κάποια έξοδο ή καταφύγιο.



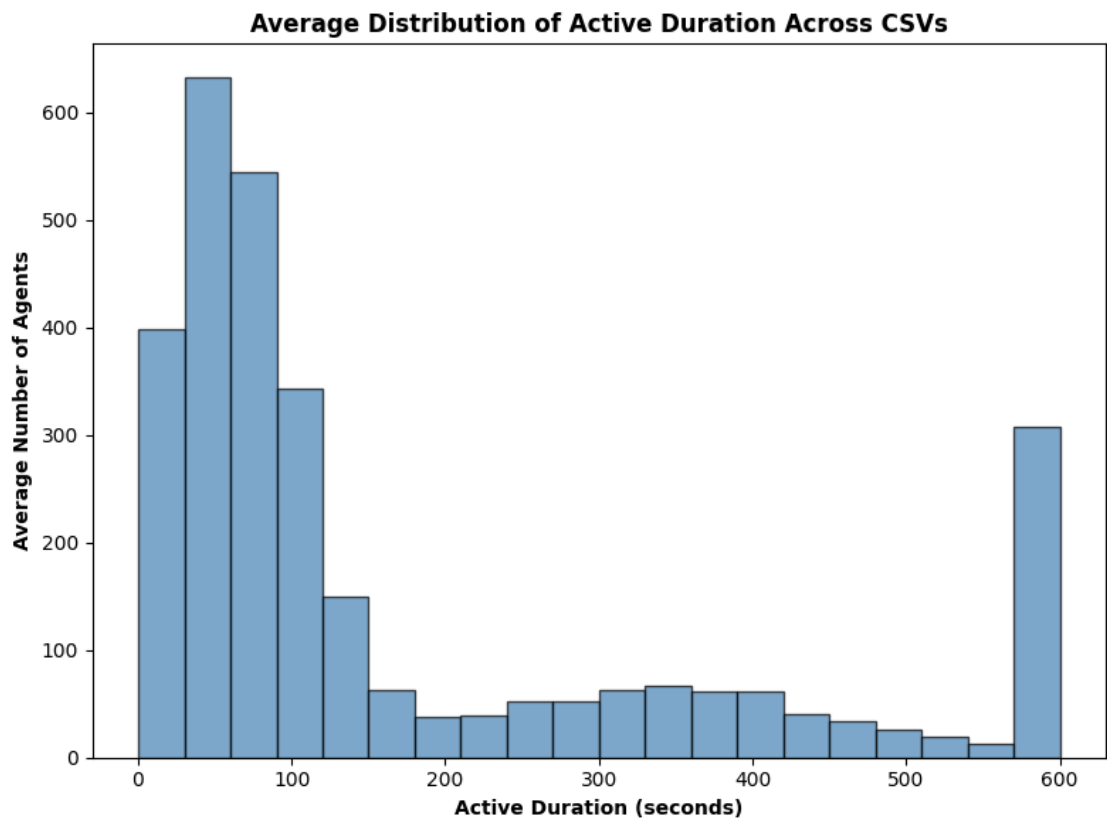
Σχήμα 4.38: Evacuation progress over time for scenario with extra shelters.

Διάρκεια Ενεργής Κίνησης και Συνολική Απόσταση Μετακίνησης

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέση κατανομή της απόστασης κίνησης (Travel Distance) και τη μέση χρονική διάρκεια ενεργού μετακίνησης (Active Duration) των πρακτόρων, συγκεντρωτικά για όλα τα σενάρια και τις εκτελέσεις της εν λόγω προσομοίωσης.



Σχήμα 4.39: Histogram of agents' average travel distances across all simulation runs.

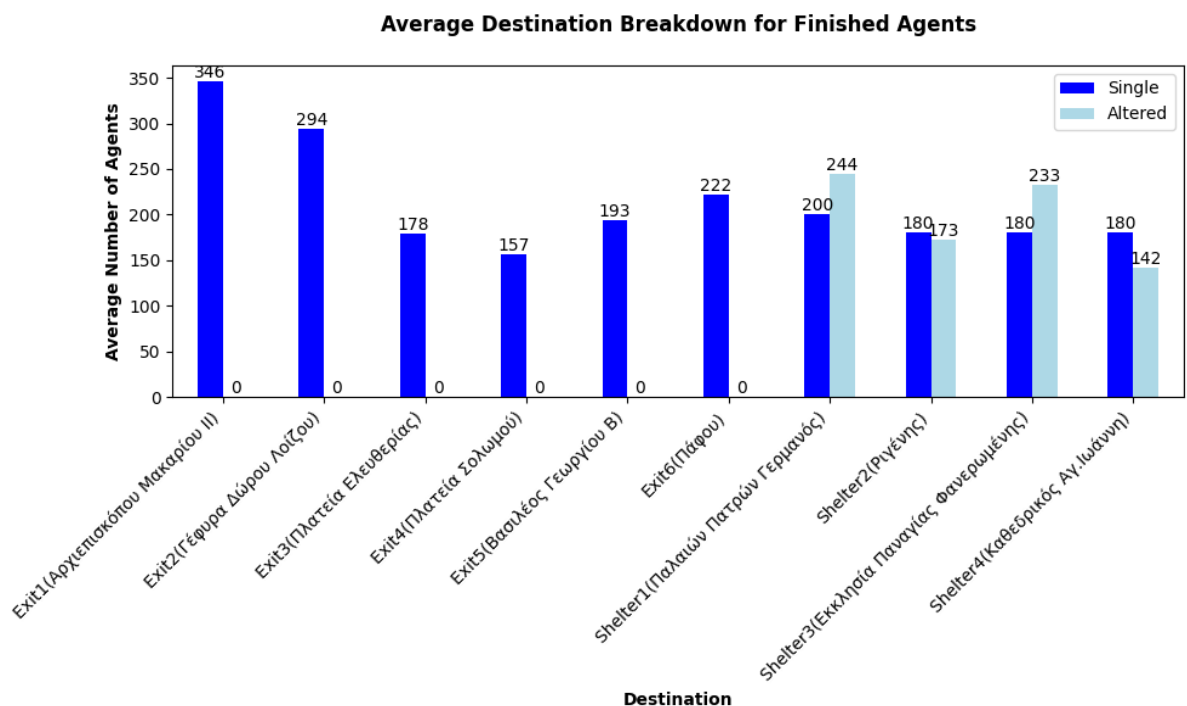


Σχήμα 4.40: Histogram of agents' average active durations across all simulation runs.

Στατιστική Κατανομή Χρήσης των Εξόδων και Καταφυγίων

Στο παρακάτω γράφημα εμφανίζεται η μέση κατανομή χρήσης των διαθέσιμων εξόδων και καταφυγίων, όπως προκύπτει από τις εκτελέσεις της προσομοίωσης. Στον άξονα Χ (οριζόντιο), παρουσιάζονται οι προορισμοί στους οποίους μπορούν να διαφύγουν οι agents. Στον άξονα Υ (κάθετο), ο αριθμός των πρακτόρων που έφτασαν με επιτυχία στον αντίστοιχο προορισμό (έξοδος ή καταφύγιο). Οι μπάρες με σκούρο μπλε χρώμα απεικονίζουν τους πράκτορες οι οποίοι κατέφυγαν στην έξοδο/καταφύγιο επιτυχώς. Οι μπάρες με ανοιχτό μπλε χρώμα απεικονίζουν τον αριθμό των πρακτόρων οι οποίοι προσπάθησαν να πάνε στο αντίστοιχο καταφύγιο αλλά λόγω περιορισμένης χωρητικότητας χρειάστηκε να αλλάξουν προορισμό.

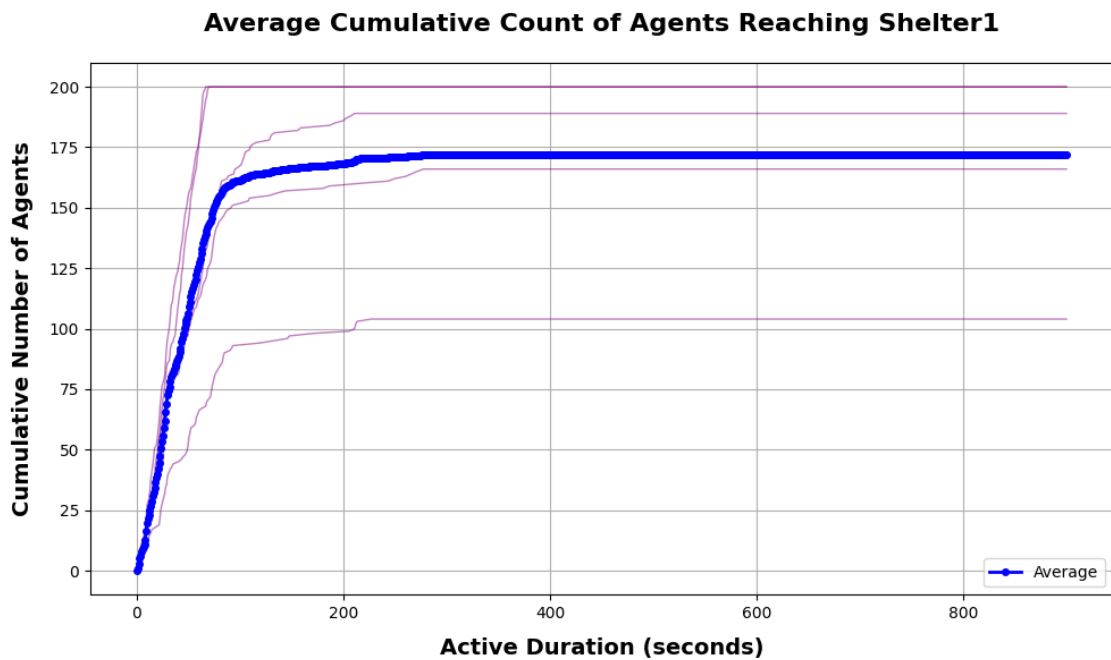
Υποσημείωση: Τα αποτελέσματα του σεναρίου, στο οποίο το ποσοστό Ηγέτη-Ακόλουθου ορίστηκε στο 20%-80%, δεν συμπεριλήφθηκαν, καθώς πολλοί πράκτορες έχασαν τον ηγέτη τους πολύ νωρίς κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με αποτέλεσμα τα καταφύγια να μην γεμίσουν. Για να αποφευχθεί η αλλοίωση των συνολικών αποτελεσμάτων λόγω αυτού του περιορισμού, επιλέχθηκε να αποκλειστούν τα συγκεκριμένα δεδομένα.



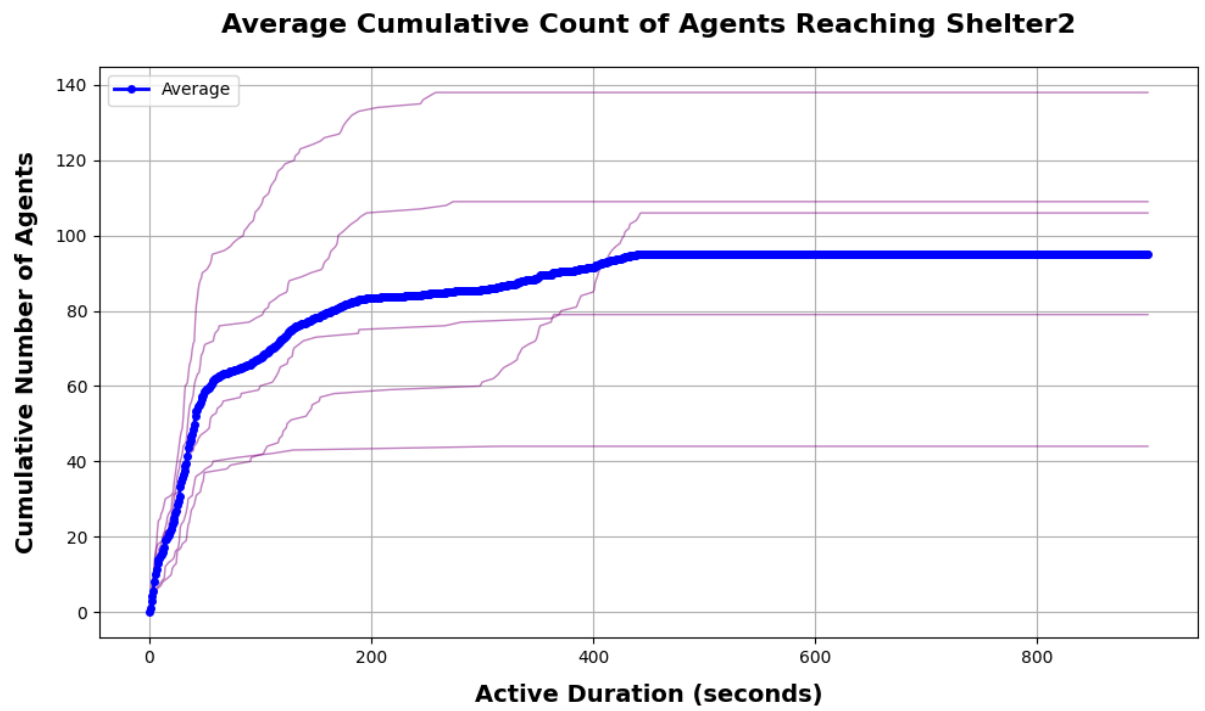
Σχήμα 4.41: Destination breakdown for agents that finish evacuation.

Σωρευτική Κατανομή Χρήσης Καταφυγίων

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η σωρευτική κατανομή χρήσης των διαθέσιμων καταφυγίων, όπως προκύπτει από τις εκτελέσεις της προσομοίωσης. Ο οριζόντιος άξονας (X) αντιστοιχεί στον χρόνο σε δευτερόλεπτα, ενώ ο κατακόρυφος άξονας (Y) δείχνει τον αριθμό των πρακτόρων που έφτασαν επιτυχώς στο εκάστοτε καταφύγιο. Η καμπύλη με μπλε χρώμα απεικονίζει τον μέσο όρο χρήσης του καταφυγίου, ενώ οι μωβ καμπύλες αντιστοιχούν σε κάθε μεμονωμένο σενάριο που εξετάστηκε, λειτουργώντας ως σημείο αναφοράς.



Σχήμα 4.42: Σωρευτική κατανομή χρήσης καταφυγίου 1 επί της οδού «Ριγένης»



Σχήμα 4.43: Σωρευτική κατανομή χρήσης καταφυγίου 2 επί της οδού «Παλαιών Πατρών Γερμανός»

Κεφάλαιο 5

Συζήτηση

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η συνολική συζήτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν. Αρχικά, θα πραγματοποιηθούν συγκρίσεις μεταξύ των επιμέρους σεναρίων για κάθε διατύπωση της υπόθεσης, με τη βοήθεια επιπρόσθετων γραφημάτων που θα αναδείξουν τις διαφορές και τις ομοιότητες των δεδομένων. Αφού ολοκληρωθεί η σύγκριση, θα αξιολογηθεί σε ποιο βαθμό η προσομοίωση είναι ικανή να αναπαραστήσει ρεαλιστικά τη διαδικασία εκκένωσης της παλιάς πόλης της Λευκωσίας, καθώς και αν τα αποτελέσματα επαληθεύουν ή διαψεύδουν την αρχική μας υπόθεση.

5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων Υπόθεσης 1

Σε αυτό το σημείο, θα εξεταστεί η πρώτη υπόθεση συγκρίνοντας το πιλοτικό σενάριο, όπου χρησιμοποιούνται αποκλειστικά οι εξοδοί της πόλης, με το σενάριο περιορισμένων εξόδων, στο οποίο έχει αποκλειστεί η πιο δημοφιλής έξοδος (Έξοδος 2: Γέφυρα Δώρου Λοΐζου). Η ανάλυση εστιάζεται σε τρία κυρίως μέρη: (α) τη χρονολογική εξέλιξη του ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης, (β) τον συνολικό χρόνο και τη διάρκεια μετακίνησης των πρακτόρων, και (γ) τη χρήση των διαθέσιμων εξόδων. Επιπρόσθετα, θα παρουσιαστούν παρατηρήσεις αναφορικά με το συνολικό ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης στις δύο αυτές περιπτώσεις, ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την αξιολόγηση της υπόθεσης.

5.1.1 Σύγκριση Χρονολογικής Εξέλιξης ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης

5.1.1.1 Ποσοστά επιτυχίας καθολικής διάρκειας προσομοίωσης

Αρχικά συγκρίνοντας τα ποσοστά επιτυχίας για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης με βάση τον πίνακα (Table A) και τον πίνακα (Table B) όπου παρουσιάζονται τα ποσοστά για το πιλοτικό και το σενάριο περιορισμένων εξόδων αντίστοιχα, παρατηρούμε την ίδια τάση:

- Όσο μειώνεται το ποσοστό Ηγετών (από 80-20 σε 20-80) τόσο μειώνεται το ποσοστό «Επιτυχημένων Ακολούθων» και αυξάνεται το ποσοστό «Χαμένων Ακολούθων».
- Τα ποσοστά επιτυχίας των Ηγετών παραμένουν γενικά υψηλά και στα δύο σενάρια (> 88 %), γεγονός που δείχνει ότι οι ίδιοι οι Ηγέτες καταφέρνουν να ολοκληρώσουν την εκκένωση ανεξάρτητα από τις συνθήκες.
- Η κατηγορία «Περιπλανώμενοι Ηγέτες» παραμένει σχετικά μικρή σε όλα τα ποσοστά ($\leq 12\%$), υποδηλώνοντας ότι οι Ηγέτες σπανίως εγκλωβίζονται σε κατάσταση αβεβαιότητας.
- Συνεχίζοντας με βάση τον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε ευδιάκριτα τις διαφορές των δύο σεναρίων για τα ποσοστά επιτυχίας των ακόλουθων.
- Καλύτερη επίδοση του πιλοτικού για υψηλά ποσοστά Ηγετών (80-20, 70-30). Με ανοιχτές όλες τις εξόδους, οι «Χαμένοι Ακόλουθοι» είναι έως και 54% λιγότεροι και οι «Επιτυχημένοι Ακόλουθοι» έως 58%. περισσότεροι σε σχέση με το σενάριο περιορισμένων εξόδων.
- Επιδείνωση στο σενάριο περιορισμένων εξόδων λόγω της κλειστής εξόδου. Η αύξηση τόσο των «Χαμένων» όσο και των «Περιπλανώμενων» υποδηλώνει συμφόρηση και καθυστερήσεις, ιδίως όταν υπάρχει επάρκεια Ηγετών που κατευθύνουν μεγάλο πλήθος προς την αρχικά δημοφιλή, αλλά πλέον μη διαθέσιμη έξοδο.

Αναλογία (Ηγέτες– Ακόλουθοι)	Πιλοτικό Χαμένοι Ακόλουθοι (%)	Περιορισμένες έξοδοι Χαμένοι Ακόλουθοι (%)	Διαφορά	Πιλοτικό Επιτυχία Ακόλουθων (%)	Περιορισμένες έξοδοι Επιτυχία Ακόλουθων (%)	Διαφορά
80-20	9.6667	28.8333	+19.2	86.0000	61.8333	-24.2
70-30	24.1111	78.0000	+53.9	71.7778	14.1111	-57,7

60-40	85.9167	80.5833	-5.3	9.5833	6.0833	-3.5
50-50	92.2667	82.4667	-9.8	3.8000	6.3333	+2.5
20-80	94.3333	84.4583	-9.9	1.1667	4.8750	+3.7

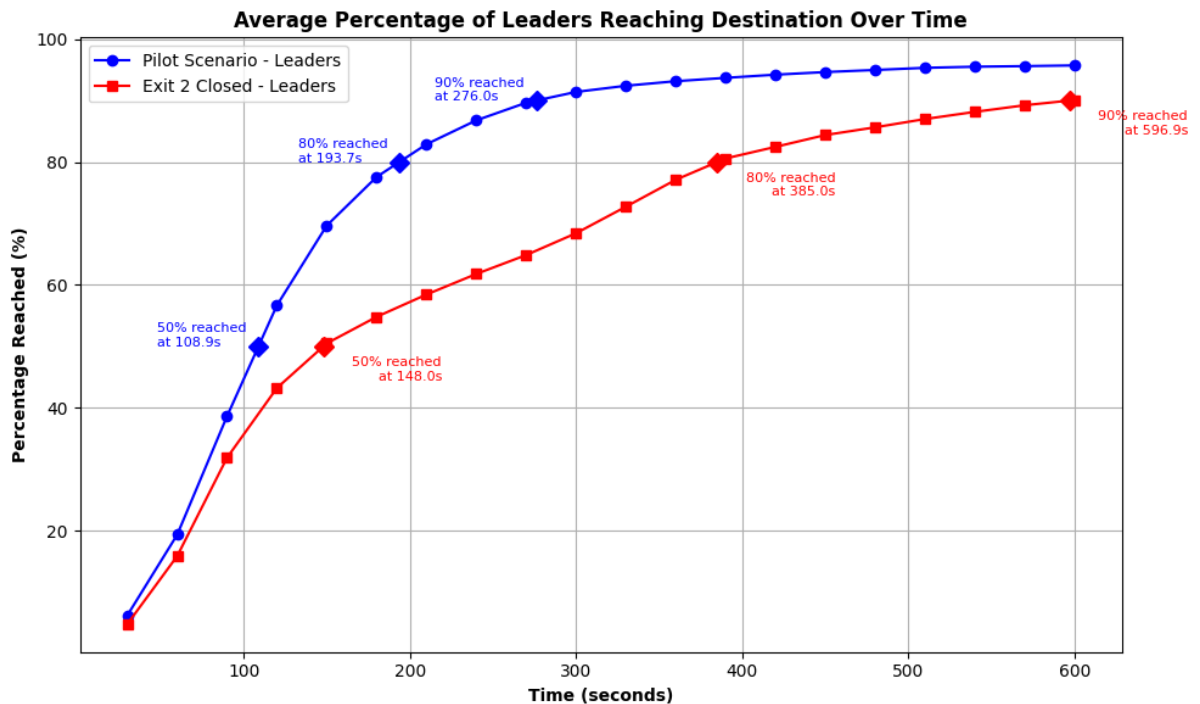
Πίνακας 5.1: Percentages of multiple categories of agent's rates across different leader-follower ratios in the simulation.

Συμπερασματικά η απενεργοποίηση της πιο δημοφιλούς εξόδου (Γέφυρα Δώρου Λοίζου) επιδεινώνει θεαματικά τα αποτελέσματα όταν υπάρχει υψηλό ποσοστό Ηγετών, προκαλώντας συνωστισμό, καθυστερήσεις και μεγαλύτερο ποσοστό αποτυχίας στους Ακόλουθους. Αντίθετα, όταν οι Ηγέτες είναι λίγοι, το κλείσιμο μιας εξόδου δεν μεταβάλλει δραματικά τις ροές, με αποτέλεσμα οι διαφορές να περιορίζονται. Συνολικά, το πιλοτικό σενάριο παρέχει πιο ομαλή εκκένωση στις περισσότερες συνθήκες, αναδεικνύοντας τη σημασία της διαθεσιμότητας όλων των εξόδων της παλιάς πόλης.

5.1.1.2 Σωρευτική Εξέλιξη Επιτυχημένου Ποσοστού Πρακτόρων

Ηγέτες

Το παρακάτω γράφημα απεικονίζει τη σωρευτική εξέλιξη του μέσου ποσοστού ηγετών που φτάνουν στον προορισμό τους μέσα στα 600 δευτ. (10 λεπτά). Τα δεδομένα προκύπτουν από τον μέσο όρο όλων των επαναλήψεων κάθε σεναρίου για τις διαφορετικές αναλογίες Ηγετών–Ακολούθων (80-20, 70-30, 60-40, 50-50, 20-80): η μπλε γραμμή αφορά το πιλοτικό σενάριο (όλες οι εξοδοί ανοιχτές) και η κόκκινη το σενάριο περιορισμένων εξόδων με κλειστή την Exit 2 (Γέφυρα Δώρου Λοίζου).



Σχήμα 5.1: Leaders' cumulative reach percentages over time for the Pilot scenario (blue) versus Exit 2 Closed (red).

Τα κοινά στοιχεία που παρατηρούμε μεταξύ των δύο καμπυλών, όπου αντιπροσωπεύουν το ποσοστό των Ηγετών που φτάνουν στον τελικό προορισμό τους σε συνάρτηση με τον χρόνο για τα δύο σενάρια, Πιλοτικό (μπλε καμπύλη) και περιορισμένων εξόδων (Κόκκινη Καμπύλη) είναι:

- Και οι δύο καμπύλες είναι μονοτονικά αύξουσες: καθώς περνά ο χρόνος, όλο και περισσότεροι Ηγέτες ολοκληρώνουν την εκκένωση.
- Στο τέλος των 600 s και τα δύο σενάρια αγγίζουν υψηλά ποσοστά επιτυχίας (≥ 90 %), υποδηλώνοντας ότι οι περισσότεροι Ηγέτες τελικά βρίσκουν διέξοδο.
- Η πορεία είναι ομαλή χωρίς απότομες πτώσεις, κάτι που σημαίνει ότι δεν εμφανίζονται μπλοκαρίσματα που να αντιστρέφουν την πρόοδο.

Οι διαφορές μεταξύ των δύο καμπυλών βρίσκονται στα ορόσημα τα οποία θέσαμε, δηλαδή τα ποσοστά επιτυχημένων ακόλουθων 50%, 80% και 90%. Με βάση τον παρακάτω πίνακα όπου παρουσιάζεται η διαφορά στον χρόνο για τα ορόσημα που θέσαμε παρατηρούμε τα εξής ευρήματα:

- Ταχύτητα εκκένωσης: Η μπλε καμπύλη ανηφορίζει πολύ πιο απότομα. Οι Ηγέτες στο πιλοτικό σενάριο φτάνουν τα ορόσημα 50 %, 80 % και 90 % σχεδόν στο μισό χρόνο σε σχέση με το σενάριο περιορισμένων εξόδων.

- Υψηλότερο οροπέδιο: Μετά τα ~400 s, το πιλοτικό σταθεροποιείται γύρω στο 95-96 %, ενώ το σενάριο περιορισμένων εξόδων συνεχίζει αργά έως το 90 % στο τέλος, δείχνοντας μια σταθερή υστέρηση περίπου 5-6 ποσοστιαίων μονάδων.
- Επίδραση κλειστής εξόδου: Η καθυστέρηση οφείλεται στη συμφόρηση που προκαλεί το κλείσιμο της Exit 2, αναγκάζοντας τους Ηγέτες να αναζητήσουν εναλλακτικές διαδρομές και αυξάνοντας τον χρόνο μετάβασης.

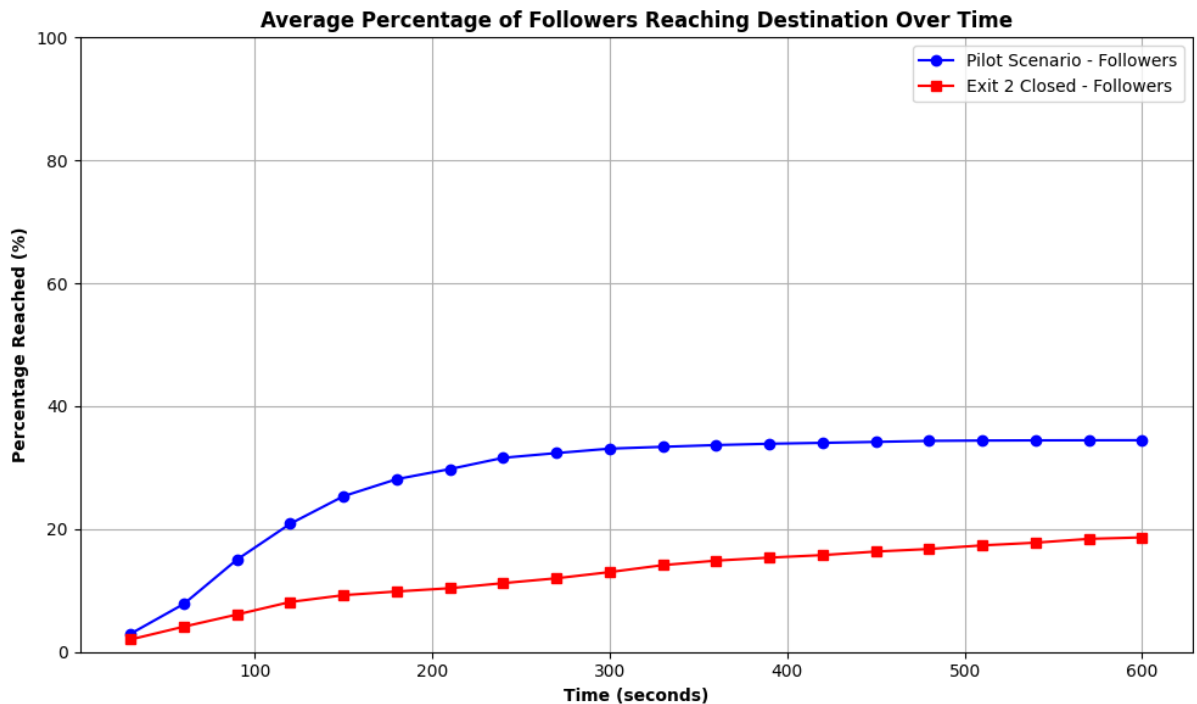
Ορόσημο	Πιλοτικό (μπλε)	Έξοδος 2 Κλειστή (κόκκινη)	Καθυστέρηση
50% Ηγετών	≈ 109s	≈148s	~39s
80% Ηγετών	≈194s	≈385s	~191s
90% Ηγετών	≈276s	≈579s	~321s

Πίνακας 5.2: Leader milestone times in the Pilot (blue) and Exit 2 Closed (red) scenarios.

Συμπερασματικά οι Ηγέτες παραμένουν γενικά αποτελεσματικοί και στα δύο σενάρια, όμως το κλείσιμο της κύριας εξόδου επιβραδύνει σημαντικά την επίτευξη υψηλών ποσοστών εκκένωσης. Το πιλοτικό σενάριο προσφέρει ταχύτερη απομάκρυνση των Ηγετών σε σχέση με το σενάριο περιορισμένων εξόδων.

Ακόλουθοι

Συνεχίζοντας το παρακάτω γράφημα απεικονίζει τη σωρευτική εξέλιξη του μέσου ποσοστού ακολούθων που φτάνουν στον προορισμό τους μέσα στα 600 δευτ. (10 λεπτά). Τα δεδομένα προκύπτουν από τον μέσο όρο όλων των επαναλήψεων κάθε σεναρίου για τις διαφορετικές αναλογίες Ηγετών–Ακολούθων (80-20, 70-30, 60-40, 50-50, 20-80): η μπλε γραμμή αφορά το πιλοτικό σενάριο (όλες οι εξοδοί ανοιχτές) και η κόκκινη το σενάριο περιορισμένων εξόδων με κλειστή την Exit 2.



Σχήμα 5.2: Followers cumulative reach percentages over time for the Pilot scenario (blue) versus Exit 2 Closed (red).

Τα κοινά στοιχεία που παρατηρούμε μεταξύ των δύο καμπυλών, όπου αντιπροσωπεύουν το ποσοστό των Ακόλουθων που φτάνουν στον τελικό προορισμό τους σε συνάρτηση με τον χρόνο για τα δύο σενάρια είναι:

- Και οι δύο καμπύλες είναι μονοτονικά αυξανόμενες: καθώς περνά ο χρόνος, ολοένα και περισσότεροι Ακόλουθοι ολοκληρώνουν την εκκένωση ομοίως με το γράφημα των Ηγετών.
- Η αύξηση παρουσιάζει φθίνουσα κλίση μετά τα ~300 s, δηλαδή το σύστημα τείνει σε κορεσμό και οι νέες αφίξεις μειώνονται. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι πολλοί ακόλουθοι χάνουν τον ηγέτη τους και απομακρύνονται από την προσομοίωση.
- Με βάση τον παρακάτω πίνακα το κλείσιμο της εξόδου 2 (Γέφυρα Δώρου Λοίζου) σχεδόν υποδιπλασιάζει το τελικό ποσοστό επιτυχίας των Ακολούθων και επιβραδύνει αισθητά τον ρυθμό με τον οποίο φτάνουν σε ασφαλές σημείο. Η διακοπή της πιο δημοφιλούς εξόδου δημιουργεί συμφόρηση και παραπλάνηση: οι Ακόλουθοι, εξαρτημένοι από προκαθορισμένες διαδρομές ή από Ηγέτες που αλλάζουν πορεία, δυσκολεύονται να ανακατευθυνθούν σε άλλες εξόδους, με αποτέλεσμα χαμηλότερη συνολική απόδοση πιθανόν λόγω απομάκρυνσης τους από την προσομοίωση εφόσον έχουν χάσει τον ηγέτη τους.

Χαρακτηριστικό	Πιλοτικό (μπλε)	Περιορισμένων εξόδων (κόκκινη)
Ρυθμός αρχικής ανόδου	~25 % έως τα 160 s	~10% έως τα 180s
Τελικό ποσοστό (600s)	~34%-35%	~18%-19%
Χρόνος κορεσμού	Σταθεροποίηση γύρω στα 330s	Συνεχίζει να αυξάνετε μέχρι τέλους με μικρή κλίση

Πίνακας 5.3: Follower milestone times in the Pilot (blue) and Exit 2 Closed (red) scenarios.

5.1.1.3 Θέση εμφάνισης και χρόνος επιτυχούς αποχώρησης

- Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι κύριες διαφορές μεταξύ του γραφήματος (scenario. Σχήμα) και του γραφήματος (Σχήμα 4.18: Evacuation progress over time for exit 2 closed scenario.) όπου φαίνονται οι αρχικές θέσης όλων των πρακτόρων καθώς και ο χρόνος αποχώρησης τους εφόσον έχουν φτάσει σε κάποιο προορισμό.

Στάδιο Χρόνου	Πιλοτικό Σενάριο	Σενάριο περιορισμένων εξόδων
< 60 s	Εκτεταμένα πράσινα τμήματα στο νοτιοανατολικό και βορειοανατολικό άκρο καθώς και στο νότιο σημείο, υποδηλώνοντας ότι μεγάλο μέρος ήδη εκκενώνεται.	Μικρότερα συστάδες πράσινου· οι ίδιοι τομείς παραμένουν κυρίως γκρι, ιδίως κοντά στην κλειστή Exit 2.
< 120 s	Πράσινο καλύπτει σχεδόν όλο το νότιο τόξο και μεγάλο τμήμα της ανατολικής πλευράς.	Το μοτίβο πράσινου είναι αισθητά πιο αραιό, εμφανής «ουρά» γκρι πρακτόρων που συνωστίζονται γύρω από την κλειστή έξοδο πριν να ανακατευθυνθούν.

< 180 s	Η πλειονότητα των κουκίδων έχει γίνει πράσινη· απομένουν κυρίως μεμονωμένες κεντρικές θέσεις.	Μεγάλο ποσοστό ακόμη γκρι, ειδικά στο ανατολικό-βορειοανατολικό τμήμα, αποτυπώνεται καθυστέρηση σε σχέση με το πιλοτικό.
---------	---	--

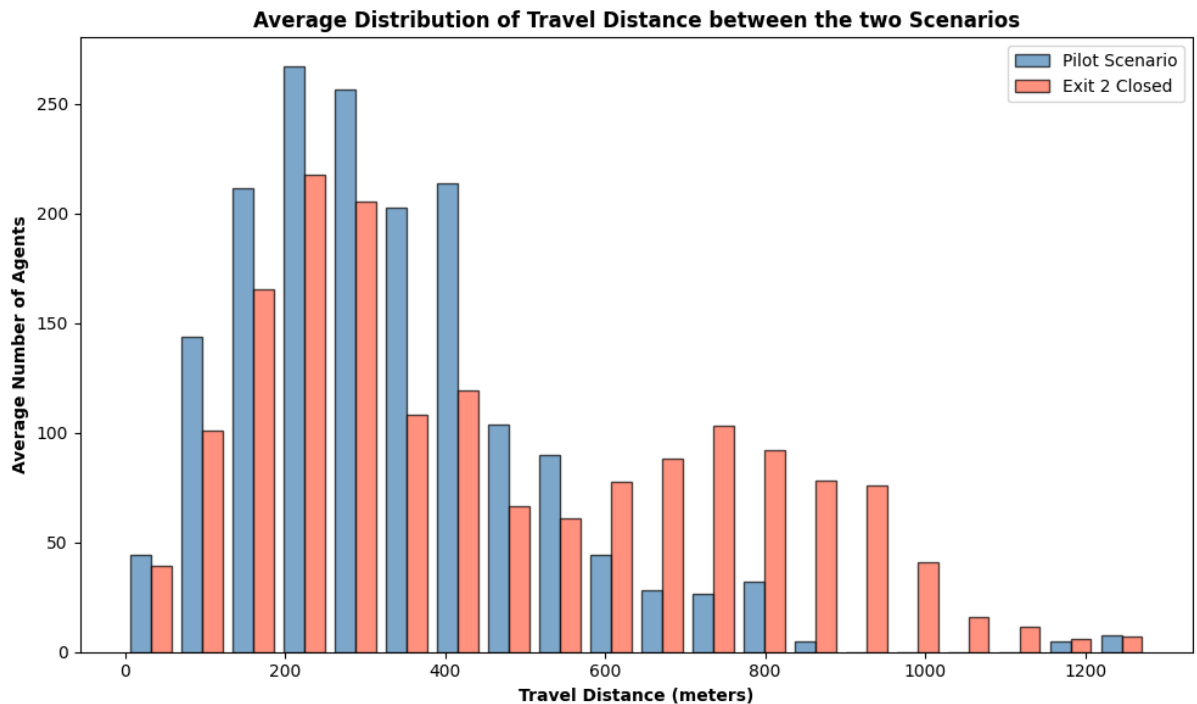
Πίνακας 5.4: Qualitative comparison of evacuation progress at three time checkpoints between the Pilot Scenario and the Earthquake Scenario.

Το μπλοκάρισμα της Εξόδου 2 αφαιρεί μια βασική δίοδο στο κέντρο του τόξου. Οι πράκτορες που αρχικά βρίσκονται κοντά της πρέπει να κατευθυνθούν προς εναλλακτικές εξόδους, δημιουργώντας συμφόρηση και επιμηκύνοντας τον χρόνο διαφυγής. Ως αποτέλεσμα, στο σενάριο περιορισμένων εξόδων οι πράσινες κουκίδες εμφανίζονται αργότερα και με πιο αραιή κατανομή, ενώ παραμένει μεγαλύτερος «πυρήνας» γκρι κουκίδων έως το καρέ των 180 s.

5.1.2 Σύγκριση Συνολικού χρόνου και Απόστασης Μετακίνησης

5.1.2.1 Απόσταση Μετακίνησης Πρακτόρων

Το παρακάτω γράφημα απεικονίζει την κατανομή συνολικών αποστάσεων που διένυσαν οι πράκτορες στα δύο σενάρια. Στον άξονα X βρίσκεται η απόσταση μετακίνησης (m) σε διαστήματα ~50 m, ενώ στον άξονα Y ο μέσος αριθμός πρακτόρων ανά διάστημα, υπολογισμένος από όλες τις επαναλήψεις της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.3: Average travel-distance distribution for the Pilot scenario (blue) versus Exit 2 Closed (red).

Τα κύρια σημεία που παρατηρούμε από το παραπάνω γράφημα είναι τα εξής:

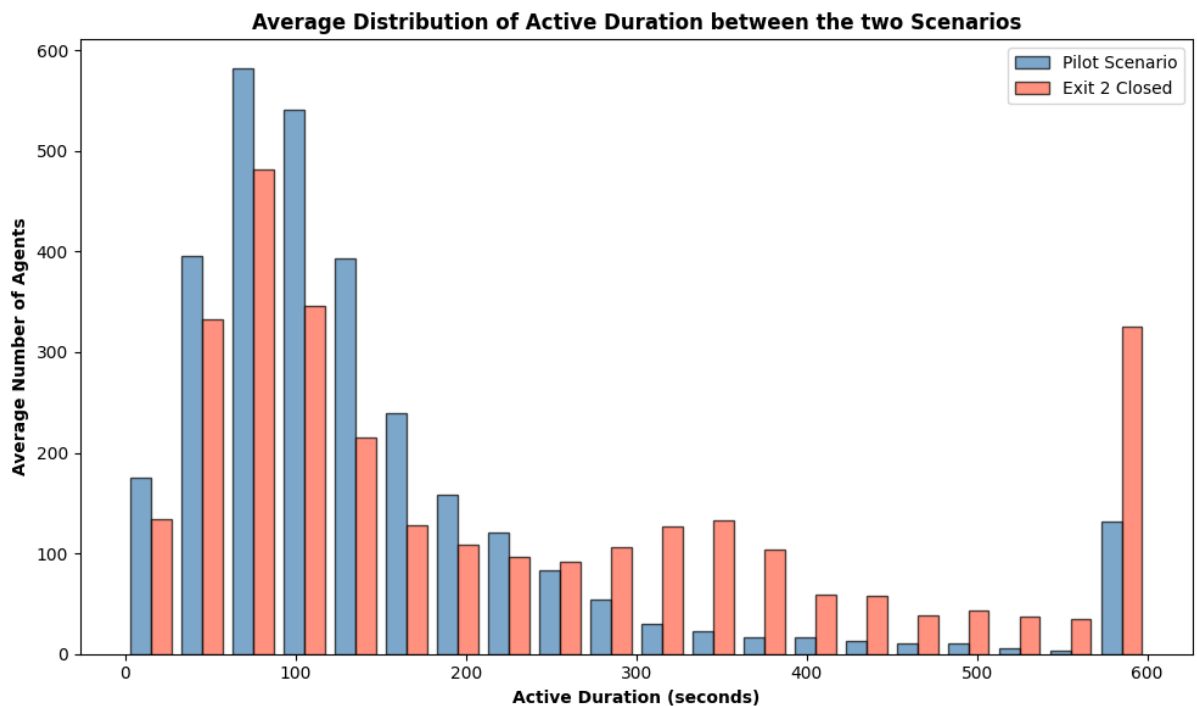
- Και στις δύο περιπτώσεις η κατανομή είναι μονοκόρυφη (single-peaked) με το κύριο σώμα εντός 150-400 m, γεγονός που δείχνει ότι η πλειονότητα των πρακτόρων ξεκινά σχετικά κοντά σε κάποια έξοδο.
- Η μορφή «καμπάνας» (bell-shaped) επιβεβαιώνει ότι οι αποστάσεις ακολουθούν φυσιολογική διασπορά γύρω από το αρχικό τοπολογικό κέντρο της πόλης.
- Η κορύφωση στην συνολική απόσταση που διένυσαν οι πράκτορες στο πιλοτικό σενάριο (μπλε) βρίσκεται στα 200-300m με περίπου ~270 agents. Αντίστοιχα για το σενάριο περιορισμένων εξόδων (κόκκινο) παρατηρούμε μικρότερο μέγιστο 250-350m με περίπου ~215 πράκτορες.
- Η κατανομή των τιμών για το πιλοτικό σενάριο (μπλε) είναι πυκνή για τιμές κάτω από 500 m καθώς πάνω από το 70% των agents έχουν διανύσει απόσταση < 500 m. Αντίθετα, στο σενάριο περιορισμένων εξόδων (κόκκινο) δεν έχουμε τόσο πυκνή κατανομή σε αντίστοιχες αποστάσεις.
- Η ουρά της κατανομής στο πιλοτικό σενάριο (μπλε) είναι πολύ περιορισμένη καθώς ελάχιστοι πράκτορες έχουν τιμές μεγαλύτερες των 800 m, κάτι το οποίο έρχεται σε αντίθεση με το σενάριο περιορισμένων εξόδων (κόκκινο) καθώς

παρατηρείται ισχυρή ουρά καθώς εκατοντάδες πράκτορες διανύουν 700-1000 m και κάποιοι > 1200 m.

- Συμπερασματικά το γράφημα επιβεβαιώνει ποσοτικά ότι η απενεργοποίηση της Εξόδου 2 (Γέφυρα Δώρου Λοίζου) μετατοπίζει την κατανομή αποστάσεων προς υψηλότερες τιμές και δημιουργεί μακριά ουρά· φαινόμενο που συνδέεται άμεσα με τη μεγαλύτερη διάρκεια εκκένωσης και το χαμηλότερο ποσοστό επιτυχίας, ιδιαίτερα για τους Ακολούθους.

5.1.2.2 Χρόνος Μετακίνησης Πρακτόρων

Το γράφημα παρουσιάζει την κατανομή του χρόνου ενεργής κίνησης (active duration) των πρακτόρων μέχρι να καταφύγουν σε κάποια έξοδο, συγκρίνοντας το πιλοτικό σενάριο (μπλε) με το σενάριο περιορισμένων εξόδων όπου η Έξοδος 2 (Γέφυρα Δώρου Λοίζου) είναι κλειστή (κόκκινο).



Σχήμα 5.4: Average active-duration distribution for the Pilot scenario (blue) versus Exit 2 Closed (red)

Τα κύρια σημεία που παρατηρούμε από το παραπάνω γράφημα είναι τα εξής:

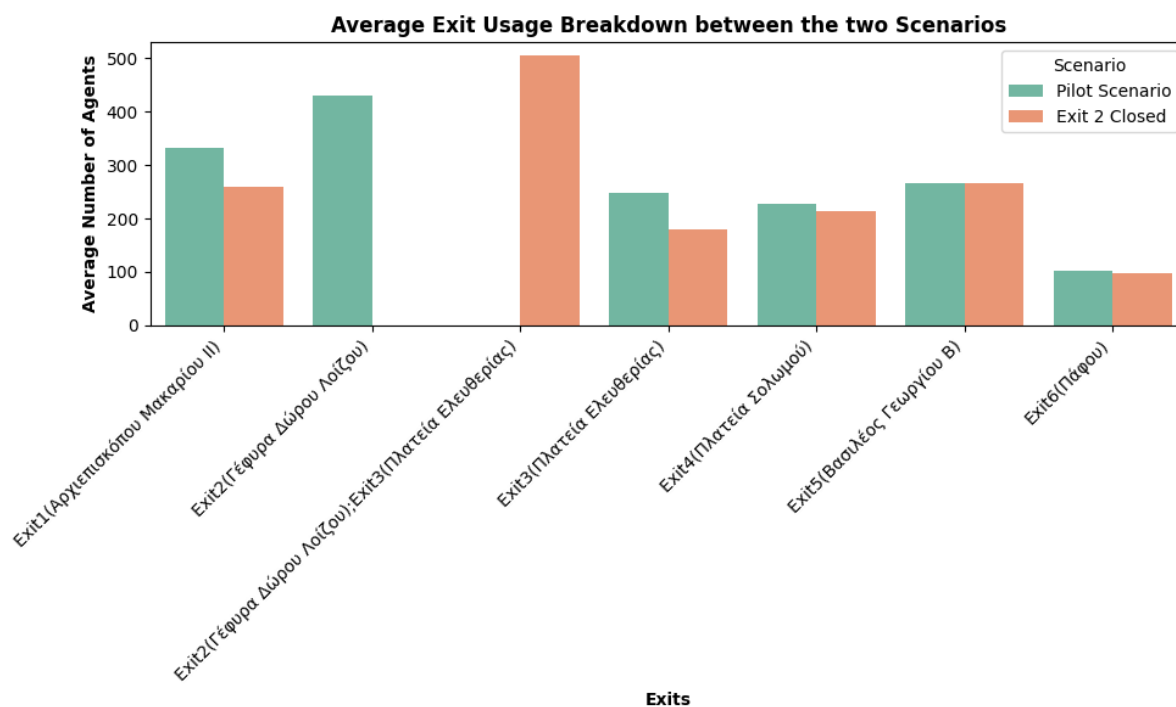
- Ομοίως με παραπάνω και οι δύο κατανομές έχουν μια κορυφή, η πλειονότητα των πρακτόρων ολοκληρώνει τη διαδρομή τους σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, καθώς και το κύριο σώμα δεδομένων βρίσκεται εντός των 0–200 s, γεγονός που δείχνει ότι ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού ξεκινά σε μικρή απόσταση από κάποια έξοδο.

- Η κορύφωση στον χρόνο μετακίνησης των πρακτόρων στο πιλοτικό σενάριο (μπλε) βρίσκεται στα 60-100s με περίπου ~580 agents. Αντίστοιχα για το σενάριο περιορισμένων εξόδων (κόκκινο) παρατηρούμε μικρότερο μέγιστο στα 60-120s με περίπου ~480 πράκτορες.
- Η μέση τιμή στο πιλοτικό σενάριο (μπλε) βρίσκεται στα 80-140s. Στο σενάριο περιορισμένων εξόδων παρατηρούμε μια μετατόπιση της τάξεως του ~+60s ($\approx$ 140-200 s).
- Παρατηρείται περισσότερη συσσώρευση πρακτόρων στο τέλος της προσομοίωσης (600s) καθώς ~130 πράκτορες παραμένουν ενεργοί μέχρι το τέλος για το πιλοτικό σενάριο (μπλε) αλλά περισσότεροι από 320 για το σενάριο περιορισμένων εξόδων (κόκκινο).
- Η ουρά της κατανομής στο πιλοτικό σενάριο (μπλε) είναι φθίνουσα σχετικά απότομα καθώς ελάχιστοι agents έχουν τιμή μεγαλύτερη των 300s, κάτι το οποίο έρχεται σε αντίθεση με το σενάριο περιορισμένων εξόδων (κόκκινο) αφού παρατηρείται πλατιά ουρά καθώς εκατοντάδες πράκτορες έχουν τιμές μεταξύ 300s και 500s.

Συμπερασματικά ο αποκλεισμός της Εξόδου 2 (Γέφυρα Δώρου Λοίζου) επιμηκύνει σημαντικά τον χρόνο που παραμένουν ενεργοί οι πράκτορες, αυξάνοντας τόσο τον μέσο-διάμεσο χρόνο εκκένωσης όσο και τον αριθμό όσων δεν προλαβαίνουν να αποχωρήσουν εντός των 600 s. Το εύρημα εναρμονίζεται με τις προηγούμενες αναλύσεις μετακίνησης-απόστασης και επιβεβαιώνει ότι η λειτουργία όλων των βασικών εξόδων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για γρήγορη και αποτελεσματική εκκένωση.

5.1.3 Σύγκριση Χρήσης Εξόδων

Το διάγραμμα συγκρίνει τον μέσο αριθμό πρακτόρων που χρησιμοποίησαν καθεμία από τις έξι διαθέσιμες εξόδους στα δύο σενάρια. Υποσημείωση: οι τιμές στον άξονα Y που έχουν πάνω από μία έξοδο αντιπροσωπεύουν πράκτορες οι οποίοι πέρασαν από την πρώτη και λόγω μη δυνατής χρήσης αναγκάστηκαν να αλλάξουν τον προορισμό τους.



Σχήμα 5.5: Average exit usage per exit in the Pilot (green) vs Exit 2 Closed (red) scenarios.

Αυτό που παρατηρούμε από το παραπάνω γράφημα είναι ότι:

- Οι εξοδοί 1, 4, 5 και 6 διατηρούν σχετικά παρόμοια ποσοστά χρήσης μεταξύ των σεναρίων· η γενική κατάταξη δημοτικότητας δεν αλλάζει δραστικά εκτός από τις Exit 2-3.
- Η μετατόπιση φορτίου. Η απενεργοποίηση της Εξόδου 2 (Γέφυρα Δώρου Λοίζου) μηδενίζει τη ροή προς αυτήν και προκαλεί υπερδιπλασιασμό των χρηστών της Εξόδου 3, διαμορφώνοντας νέο σημείο συμφόρησης στην Πλατεία Ελευθερίας.
- Συνεχίζοντας παρατηρούμε μερική αποσυμπίεση της Εξόδου 1 (Αρχιεπισκόπου Μακαρίου ΙΙ) όπου καταγράφει πτώση ~70 πρακτόρων, στοιχείο που δείχνει ότι ένα τμήμα πρακτόρων από τη βόρεια-ανατολική ζώνη ακολουθεί εναλλακτικές διαδρομές προς τη νέα «κυρία» έξοδο (Εξόδος 3) παρά να κινηθεί ανατολικά προς την Έξοδο 1.
- Παράλληλα υπάρχει σχετική αδράνεια των Εξόδων 4-5. Η χρήση τους αλλάζει ελάχιστα, πιθανών η γεωγραφική/οδική απόσταση τους δεν επαρκεί για να απορροφήσουν μεγάλο μέρος της ανακατευθυνόμενης κίνησης.
- Ως αποτέλεσμα το γράφημα επιβεβαιώνει ότι η έξοδο 2(Γέφυρα Δώρου Λοίζου) ήταν κομβικής σημασίας στο πιλοτικό σενάριο. Όταν κλείνει, το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας μεταπηδά σχεδόν αποκλειστικά στην έξοδο 3 (Πλατεία

Ελευθερίας), δημιουργώντας νέα συμφόρηση και αφήνοντας τις υπόλοιπες εξόδους σχεδόν ανεπηρέαστες. Αυτό εξηγεί τη μεγαλύτερη συνολική διάρκεια εκκένωσης και τον χαμηλότερο βαθμό επιτυχίας που παρατηρήθηκαν στα άλλα γραφήματα του σεναρίου περιορισμένων εξόδων.

5.2 Σύνοψη Υπόθεσης 1

Η σύγκριση του πιλοτικού σεναρίου (όλες οι εξοδοί ανοιχτές) με το σενάριο περιορισμένων εξόδων (Exit 2 κλειστή) τεκμηριώνει ξεκάθαρα ότι ο αποκλεισμός μιας και μάλιστα της δημοφιλέστερης εξόδου υποβαθμίζει δραστικά την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης.

Ποσοστό Επιτυχίας

Αρχίζοντας, το ποσοστό επιτυχίας των ηγετών αν και παραμένει σε υψηλά επίπεδα στον χρόνο της προσομοίωσης, χρειάζονται έως και 5 λεπτά περισσότερο για να εκκενώσουν την παλιά πόλη της Λευκωσίας. Οι Ακόλουθοι αν και με πολύ χαμηλότερο ποσοστό επιτυχίας και στα δύο σενάρια, πιθανών κάποιου περιορισμού στην προσομοίωση και πάλι δείχνουν την διαφορά καθώς περιορίζονται σχεδόν στο μισό ποσοστό επιτυχίας μεταξύ των δύο σεναρίων ($\approx 18\%$ έναντι $\approx 35\%$) μέσα στο ίδιο χρονικό παράθυρο, επιβεβαιώνοντας ότι εξαρτώνται περισσότερο από ομαλές ροές και επαρκή χωρητικότητα.

Χρόνος και Απόσταση

Η μέση απόσταση διαδρομής μετατοπίζεται κατά 150-200 m προς τα πάνω, με «ουρά» που φτάνει $> 1,2$ km· αυτό μεταφράζεται σε σημαντική αύξηση της ενεργού διάρκειας κίνησης και σε εντονότερη συμφόρηση. Παράλληλα, οι κατανεμημένοι χρόνοι ενεργής πορείας δείχνουν τριπλάσιο αριθμό πρακτόρων που παραμένουν στο δίκτυο στο όριο των 600 s (10 λεπτά).

Χωρική κατανομή

Τα στιγμιότυπα αποκαλύπτουν συμπύκνωση γκρι (μη εκκενωμένων) πρακτόρων γύρω από την κλειστή έξοδο και βραδεία αποσυμφόρηση του ανατολικού και βόρειο-ανατολικού τομέα, ενώ στο πιλοτικό η «απογύμνωση» του οδικού δικτύου είναι ομοιόμορφη ήδη από τα 120 s.

Χρήση εξόδων

Η Exit 3 απορροφά σχεδόν εξ ολοκλήρου τη ροή της Exit 2, διπλασιάζοντας το φορτίο της και δημιουργώντας νέο σημείο συμφόρησης. Οι υπόλοιπες έξοδοι μένουν σχεδόν ανέγγιχτες, αναδεικνύοντας έλλειψη δυναμικής ανακατεύθυνσης.

Τελική κρίση

Τα αποτελέσματα επαληθεύουν πλήρως την Υπόθεση 1: η απώλεια μιας βασικής εξόδου μειώνει τον ρυθμό και το ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης τόσο για τους Ηγέτες όσο κυρίως για τους Ακολούθους. Πρέπει μάλιστα να ληφθεί υπόψη ότι η προσομοίωση υποθέτει όλους τους πολίτες ήδη έτοιμους στο οδικό δίκτυο, σε πραγματικές συνθήκες, ο χρόνος ενημέρωσης και η έξοδος από κτίρια θα επιμηκύνουν περαιτέρω τη διαδικασία. Επιπρόσθετα, η προσομοίωση αποδίδει ρεαλιστικά το φαινόμενο, αναδεικνύοντας:

- Την κρίσιμη σημασία της διατήρησης όλων των κύριων εξόδων ανοικτών ή της ύπαρξης αξιόπιστων εναλλακτικών.
- Την ανάγκη για δυναμικούς μηχανισμούς ανακατεύθυνσης, ώστε το φορτίο να κατανέμεται ισορροπημένα και να αποφεύγονται νέες εστίες συμφόρησης.

5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων Υπόθεσης 2

Σε αυτό το σημείο, θα εξεταστεί η δεύτερη υπόθεση συγκρίνοντας το πιλοτικό σενάριο, όπου χρησιμοποιούνται οι έξοδοι της πόλης καθώς και τα δύο λειτουργικά καταφύγια χωρητικότητας 200 και 180 ατόμων, με το αντίστοιχο σενάριο χρήσης περισσότερων καταφυγίων, στο οποίο έχουμε προσθέσει δύο επιπλέον καταφύγια χωρητικότητας 180 ατόμων το κάθε ένα. Η ανάλυση εστιάζεται σε τέσσερα κυρίως μέρη: (α) τη χρονολογική εξέλιξη του ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης, (β) τον συνολικό χρόνο και τη διάρκεια μετακίνησης των πρακτόρων, και (γ) τη χρήση των διαθέσιμων εξόδων, καθώς και στην (δ) χρήση των καταφυγίων. Επιπρόσθετα, θα παρουσιαστούν παρατηρήσεις αναφορικά με το συνολικό ποσοστό επιτυχούς εκκένωσης στις δύο αυτές περιπτώσεις, ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την αξιολόγηση της υπόθεσης.

5.3.1 Σύγκριση Χρονολογικής Εξέλιξης ποσοστού επιτυχούς εκκένωσης

5.3.1.1 Ποσοστά επιτυχίας καθολικής διάρκειας προσομοίωσης

Αρχικά συγκρίνοντας τα ποσοστά επιτυχίας για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης με βάση τον πίνακα (Table A) και τον πίνακα (Table B) όπου παρουσιάζονται τα ποσοστά για το πιλοτικό και το σενάριο με περισσότερα καταφύγια αντίστοιχα, παρατηρούμε κάποιες ομοιότητες :

- Και στα δύο σενάρια, όσο περισσότερους Ηγέτες έχουμε (80-20, 60-40) τόσο αυξάνεται η επιτυχία των Ακολούθων και μειώνονται οι «Χαμένοι». Αντίστροφα, όταν οι Ηγέτες υποχωρούν στο 50-50 και 20-80, τα ποσοστά των «Χαμένων Ακολούθων» εκτινάσσονται.
- Οι Ηγέτες διατηρούν γενικά υψηλά ποσοστά επιτυχίας (> 88 %) σε όλες τις αναλογίες, επιβεβαιώνοντας ότι επηρεάζονται λιγότερο από χωρητικούς περιορισμούς των καταφυγίων.
- Το ποσοστό των “περιπλανώμενων” ηγετών και ακόλουθων παραμένει αρκετά χαμηλό και στα δύο σενάρια. Αν και το φαινόμενο είναι υπαρκτό δεν κυριαρχεί.

Συνεχίζοντας με βάση τον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε ευδιάκριτα τις διαφορές των δύο σεναρίων για τα ποσοστά επιτυχίας των ακόλουθων.

Αναλογία (Ηγέτες– Ακόλουθοι)	Πιλοτικό Σενάριο Χαμένοι Ακόλουθοι	Πιλοτικό Σενάριο Επιτυχείς Ακόλουθοι	Σενάριο 2 Χαμένοι Ακόλουθοι	Σενάριο 2 Επιτυχείς Ακόλουθοι	Διαφορά
80-20	9.8	84.3	20.3	69.0	+10% Χαμένοι -15% Επιτυχείς
70-30	8.9	82.9	27.0	62.9	+18% Χαμένοι -20% Επιτυχείς
60-40	11.3	81.2	58.0	31.3	+47% Χαμένοι -50% Επιτυχείς
50-50	83.2	11.1	75.3	14.7	-8% Χαμένοι +3% Επιτυχείς
20-80	90.5	4.7	85.6	7.1	-5% Χαμένοι +2% Επιτυχείς

Πίνακας 5.5: Percentages of multiple categories of agent's rates across different leader–follower ratios in the simulation.

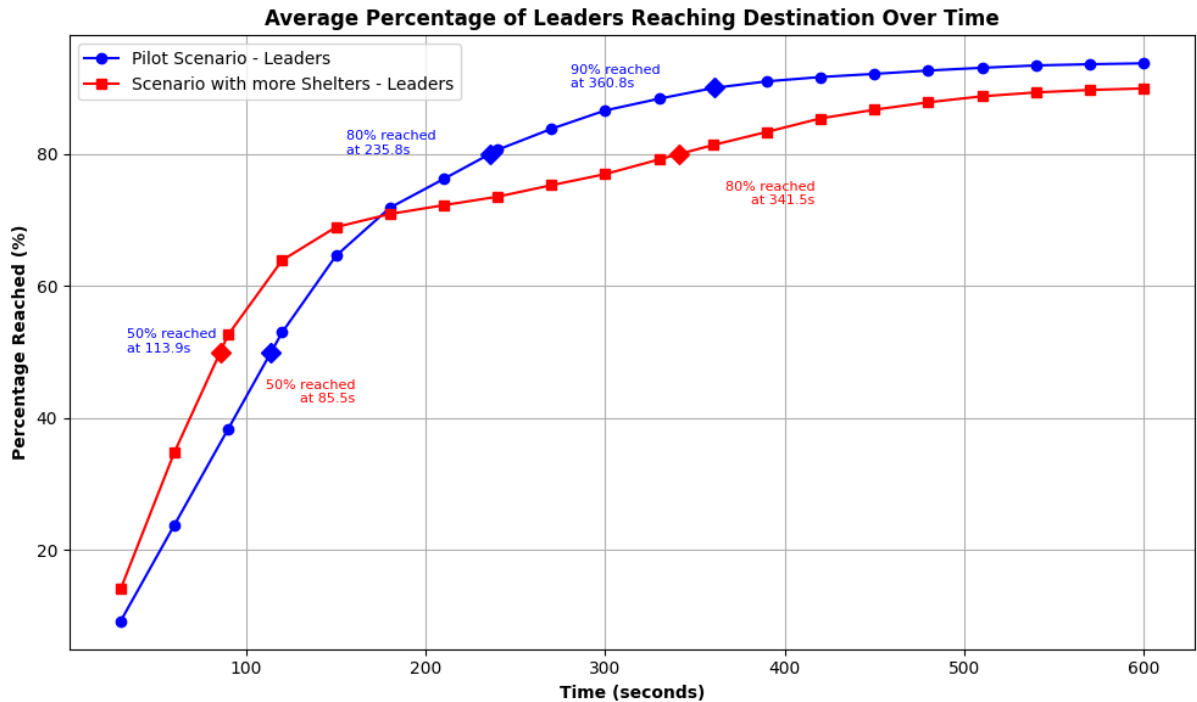
- Υπάρχει σημαντική επιδείνωση για τα σενάρια με υψηλά ποσοστά ηγετών (80-20, 70-30, 60-40). επιτυχία των Ακολούθων μειώνεται έως και 50%, ενώ οι «Χαμένοι» σχεδόν εξαπλασιάζονται στην αναλογία 60-40.
- Παρατηρούμε οριακή βελτίωση όταν οι ηγέτες είναι πιο λίγοι (50-50, 20-80). Η προσθήκη καταφυγίων αφαιρεί ένα μικρό μέρος πίεσης, αλλά τα ποσοστά παραμένουν πολύ χαμηλά και γενικότερα δεν αντιστρέφεται η γενική εικόνα.
- Παράλληλα, η επιτυχία των Ηγετών πέφτει 3-7 %. σε όλες τις αναλογίες, παρά την υψηλή χωρητικότητα, ο επιπλέον χρόνος αναζήτησης εναλλακτικού χώρου επηρεάζει και αυτούς.
- Το ποσοστό “Περιπλανώμενων” πρακτόρων σχεδόν διπλασιάζεται τόσο για τους ακόλουθους αλλά και για τους ηγέτες.

Αυτό που αντλούμε από το πρώτο βήμα της σύγκρισης μεταξύ των δύο σεναρίων είναι πως οι δύο νέες δομές δεν λύνουν το πρόβλημα χωρητικότητας: αντιθέτως, δημιουργούν νέες εστίες συμφόρησης. Πιθανών, αυτό να οφείλεται στο ότι οι πράκτορες κατευθύνονται πρώτα στο κοντινότερο καταφύγιο, ακόμη κι αν είναι ήδη κορεσμένο κάτι που μεγεθύνει τον συνωστισμό. Ως εκ τούτου, όταν το καταφύγιο γεμίσει, ο πράκτορας πρέπει να αναζητήσει νέα επιλογή ή έξοδο, χάνοντας κρίσιμα δευτερόλεπτα.

5.3.1.2 Σωρευτική Εξέλιξη Επιτυχημένου Ποσοστού Πρακτόρων

Ηγέτες

Το παρακάτω γράφημα απεικονίζει τη σωρευτική εξέλιξη του μέσου ποσοστού ηγετών που φτάνουν στον προορισμό τους μέσα στα 600 δευτ. (10 λεπτά). Τα δεδομένα προκύπτουν από τον μέσο όρο όλων των επαναλήψεων κάθε σεναρίου για τις διαφορετικές αναλογίες Ηγετών–Ακολούθων (80-20, 70-30, 60-40, 50-50, 20-80): η μπλε γραμμή αφορά το πιλοτικό σενάριο (μόνο δύο λειτουργικά καταφύγια + έξοδοι) και η κόκκινη το δεύτερο σενάριο (τέσσερα λειτουργικά καταφύγια + έξοδοι).



Σχήμα 5.6: Leaders' cumulative reach percentages over time for the Pilot scenario with shelters (blue) vs scenario with extra shelters (red).

Οι ομοιότητες που παρατηρούμε από τις δύο καμπύλες είναι όμοιες με την πρώτη την ανάλυση της πρώτης υπόθεσης.

- Υπάρχει μονοτονική αύξηση. Και οι δύο καμπύλες ανεβαίνουν συνεχώς: όσο περνά ο χρόνος, περισσότεροι ηγέτες φτάνουν στον προορισμό.
- Γενικά υψηλή τελική επιτυχία. Στο τέλος των 600 s (10 λεπτά) και τα δύο σενάρια ξεπερνούν το 85 % (μπλε ≈ 91 %, κόκκινο ≈ 88 %).
- Το σχήμα των καμπυλών είναι λογαριθμικό. Δηλαδή ταχύς ρυθμός στην αρχή, και επιβράδυνση μετά τα ~ 350 s καθώς πλησιάζουν σε ευθεία. Προχωρώντας όμως με βάση τον παρακάτω πίνακα διακρίνουμε ότι οι διαφορές των δύο σεναρίων έγκειται στα ορόσημα τα οποία θέσαμε.

Ορόσημο	Σενάριο με 4 καταφύγια (κόκκινο)	Σενάριο με 2 καταφύγια (μπλε)	Πλεονέκτημα/Καθυστέρηση
50%	85.5s	113.9s	Επιτυγχάνεται 28s πιο γρήγορα
80%	341.5s	235.8s	Επιτυγχάνεται 106s πιο αργά
90%	Δεν επιτυγχάνεται	360.8s	Δεν επιτυγχάνεται

Πίνακας 5.6: Leader milestone times in the Pilot (blue) and extra shelters (red) scenarios

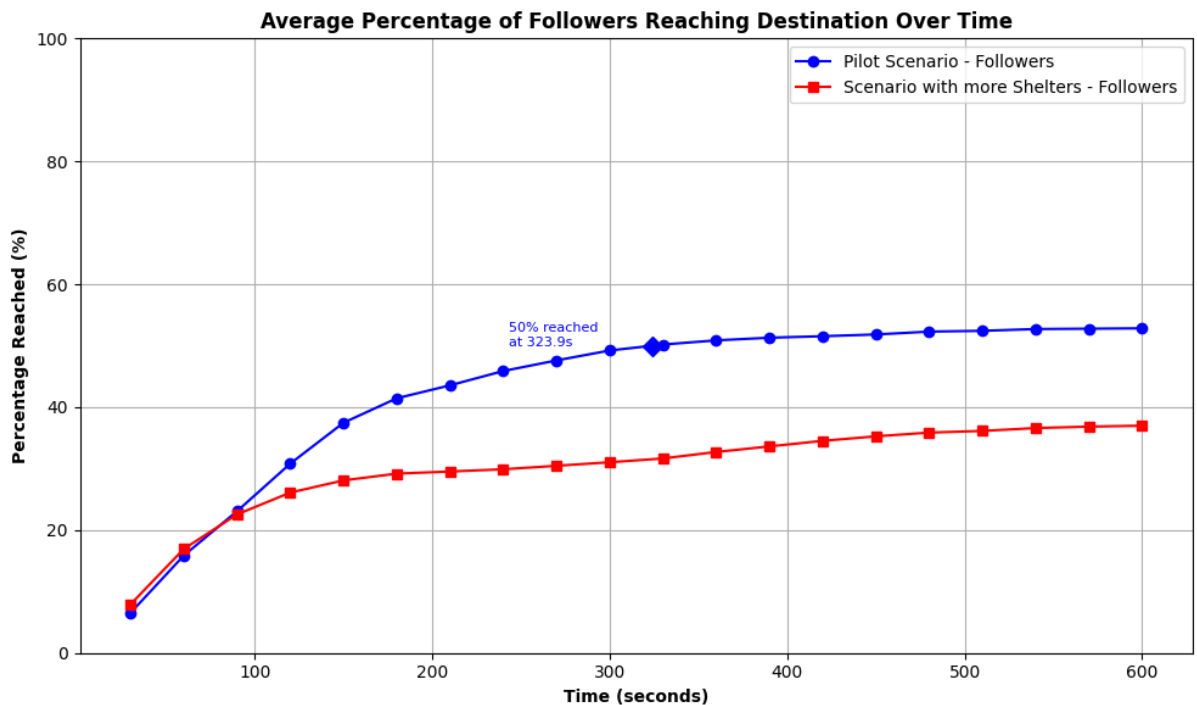
- Αρχικό πλεονέκτημα ταχύτητας. Τα δύο πρόσθετα καταφύγια ευνοούν ηγέτες που βρίσκονται πολύ κοντά τους: γι' αυτό το σενάριο 4 καταφυγίων φτάνει νωρίτερα το 50 %.
- Μεσοπρόθεσμη επιβράδυνση. Μετά τα ~170-200 s οι καμπύλες τέμνονται: το πιλοτικό προσπερνά. Ο λόγος είναι ότι τα καταφύγια κορεσμένα πλέον δημιουργούν καθυστέρηση και οι ηγέτες που είχαν ως προορισμό αυτά τα καταφύγια αναγκάζονται να αναζητήσουν δεύτερη επιλογή ή κάποια έξοδο.
- Τελικό ποσοστό. Το πιλοτικό καταφέρνει να υπερβεί το 90 %, ενώ το σενάριο με 4 καταφύγια σταθεροποιείται λίγο κάτω από 90 %, δείχνοντας συνολικά ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση.

Συμπερασματικά, τα νέα καταφύγια “απορροφούν” γρήγορα τους κοντινούς ηγέτες, δίνουν ιδιαιτέρως γρήγορη αρχική άνοδο, αλλά γεμίζουν αρκετά νωρίς και από εκεί και πέρα επιβραδύνουν την ροή, με αποτέλεσμα από το μεσαίο στάδιο και μετά, οι συμφόρηση και ο επιπλέον χρόνος ανακατεύθυνσης κάνουν το αρχικό πλεονέκτημα να «εξατμίζεται», αφήνοντας το πιλοτικό σενάριο να επιτύχει υψηλότερα και ταχύτερα ποσοστά επιτυχίας για τους ηγέτες.

Ακόλουθοι

Συνεχίζοντας το παρακάτω γράφημα απεικονίζει τη σωρευτική εξέλιξη του μέσου ποσοστού ακολούθων που φτάνουν στον προορισμό τους μέσα στα 600 δευτ. (10 λεπτά). Τα δεδομένα προκύπτουν από τον μέσο όρο όλων των επαναλήψεων κάθε σεναρίου για τις διαφορετικές αναλογίες Ηγετών–Ακολούθων (80-20, 70-30, 60-40, 50-50, 20-80): η

μπλε γραμμή αφορά το πιλοτικό σενάριο και η κόκκινη το σενάριο με περισσότερα καταφύγια.



Σχήμα 5.7: Follower 's cumulative reach percentages over time for the Pilot scenario with shelters (blue) vs scenario with extra shelters (red).

Αρχικά ομοίως με το γράφημα των ηγετών πιο πάνω, υπάρχει μονοτονική αύξηση. Επιπρόσθετα υπάρχει μια ταχεία αρχική φάση μέχρι τα ~100s και για τις δύο καμπύλες πιθανών λόγω των πρακτόρων που βρίσκονται πολύ κοντά στα καταφύγια. Παρόλα αυτά, μετά τα ~300s παρατηρούμε μια επιβράδυνση το «σώμα» των καμπυλών αρχίζει να επιπεδώνεται καθώς οι πιο απομακρυσμένοι πράκτορες χρειάζονται περισσότερο χρόνο.

Στην συνέχεια θα μελετήσουμε κάποια στοιχεία τα οποία αντλούμε από τις γραφικές.

- Η εκκίνηση, δηλαδή <100s το σενάριο με τα περισσότερα καταφύγια (κόκκινο) έχει ελαφρώς προβάδισμα καθώς τα νέα καταφύγια δίνουν σε κάποιους ακόλουθους γρηγορότερη πρόσβαση.
- Έπειτα βρισκόμαστε σε ένα μεταβατικό σημείο (~110-120s) όπου η κόκκινη καμπύλη εξομαλύνεται ενώ η μπλε την προσπερνά και παίρνει διαρκές προβάδισμα.
- Το ορόσημο του 50% δεν επιτυγχάνεται για το σενάριο με περισσότερα καταφύγια καθώς κορυφώνεται στο 37%, ενώ για το πιλοτικό επιτυγχάνετε στα 323.9s με τελική τιμή το 52%. Μία διαφορά της τάξεως του 15%.

- Παρατηρούμε χαμηλή κλίση μετά τα 200s και για τα δύο σενάρια.

Συμπερασματικά, τα δύο επιπλέον καταφύγια ωφελούν μόνο τη γρήγορη φάση (≤ 100 s) των ακολούθων και μέσο-μακροπρόθεσμα δημιουργούν συμφόρηση, με αποτέλεσμα να έχουμε χαμηλότερο συνολικό ποσοστό εκκένωσης κάτι το οποίο υποδεικνύει πως για τους ακόλουθους η ποιοτική κατανομή ροής και η αποφυγή κορεσμού είναι σημαντικότερες από την απλή αύξηση του αριθμού καταφυγίων.

5.3.1.3 Θέση εμφάνισης και χρόνος επιτυχούς αποχώρησης

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι κύριες διαφορές μεταξύ του γραφήματος (Σχήμα 4.27: Evacuation progress over time for pilot scenario with shelters.) και του γραφήματος (Σχήμα 4.38: Evacuation progress over time for scenario with extra shelters.) όπου φαίνονται οι αρχικές θέσης όλων των πρακτόρων καθώς και ο χρόνος αποχώρησης τους εφόσον έχουν φτάσει σε κάποιο προορισμό. Αρχικά παρατηρούμε ότι και στα δύο γραφήματα οι πρώτες πράσινες κουκίδες ($< 30\text{--}60$ s) εμφανίζονται κατά μήκος του τόξου καθώς και στο νοτιοδυτικό μέρος, όπου οι έξοδοι απέχουν λίγα μέτρα από τα σημεία δημιουργίας των πρακτόρων, και παράλληλα τα δύο λειτουργικά καταφύγια αυτού του σεναρίου βρίσκονται στο ανατολικό μέρος τις παλιάς πόλης. Επιπρόσθετα, ο εσωτερικός «πυκνός» οδικός ιστός παραμένει κυρίως γκρι ως ≥ 120 s, καταδεικνύοντας ότι οι πράκτορες αυτοί χρειάζονται μεγαλύτερη απόσταση/χρόνο.

Φάση	Πιλοτικό Σενάριο (δύο καταφύγια)	Σενάριο με τέσσερα καταφύγια	Ερμηνεία
< 30s	Πράσινες συστάδες κυρίως στη νοτιοδυτική ζώνη (κοντά στα δύο καταφύγια)	Επιπλέον κάθετη «λωρίδα» πράσινου στον βορειοανατολικό τομέα, δηλώνει ταχεία είσοδο στους δύο νέους χώρους (Αγ. Ιωάννης / Φανερωμένη).	Η προσθήκη καταφυγίων παρέχει «αστραπιαία» λύση σε γύρω πράκτορες.
< 60s- 90s	Το πράσινο απλώνεται ομοιόμορφα γύρω από το εξωτερικό δαχτυλίδι.	Σχηματίζεται κεντρικό «πράσινο-μονοπάτι» που συγκλίνει προς τα νέα καταφύγια, αλλά ήδη διακρίνεται πυκνός γκρι πυρήνας γύρω τους.	Πρώτα σημάδια συμφόρησης: τα καταφύγια γεμίζουν γρήγορα.
< 120s	Ολόκληρο το νότιο τόξο + τμήμα του ανατολικού έχει πρασινίσει, ελάχιστα γκρι στο περιθώριο.	Σημαντικό γκρι «σύμπλεγμα» παραμένει στο κέντρο-ανατολικά, οι πράκτορες καθυστερούν να ανακατευθυνθούν σε έξοδο.	Χάσιμο χρόνου για να βρεθεί εναλλακτικός προορισμός μετά τον κορεσμό.
< 150s- 180s	Εικόνα σχεδόν πλήρως πράσινη· λίγες γκρι κουκκίδες στον απόλυτο πυρήνα.	Παραμένει διάσπαρτο γκρι σε ολόκληρο το κέντρο και κατά μήκος της «πράσινης λωρίδας», η εκκένωση είναι εμφανώς πιο αργή.	Η αρχική ωφέλεια αντιστρέφεται· το πρόσθετο φορτίο παγώνει τη ροή.

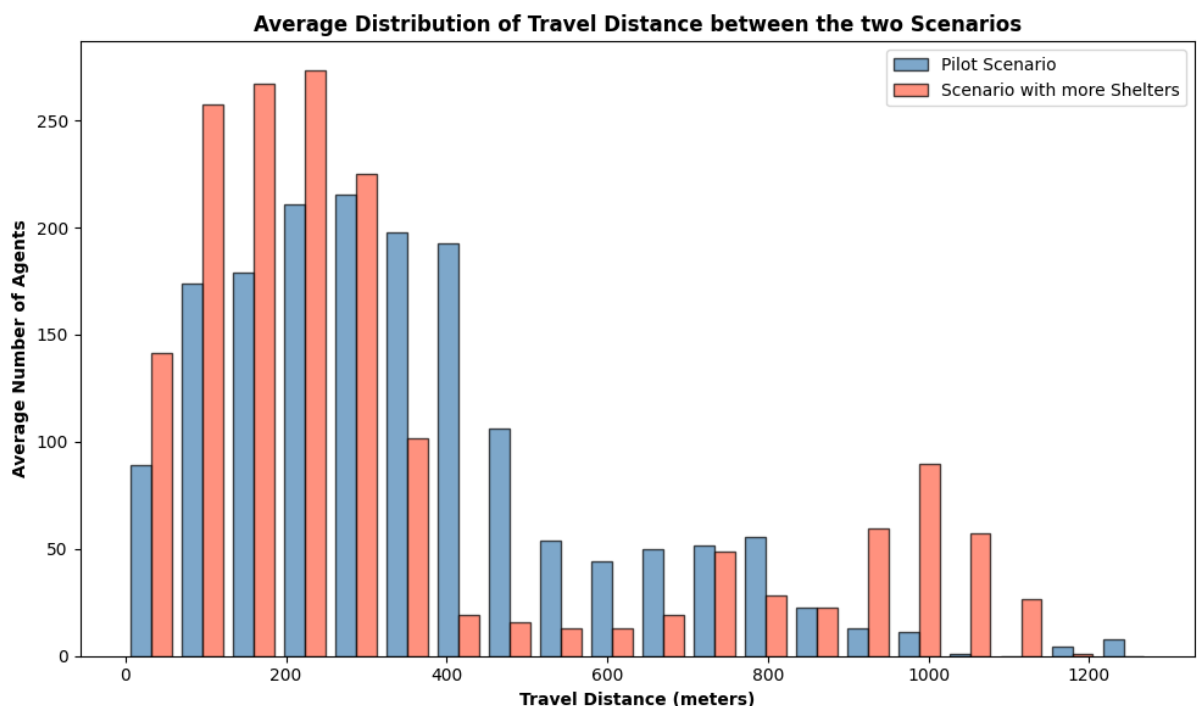
Table 5.1: Qualitative comparison of evacuation progress at three time checkpoints between the Pilot Scenario and the extra shelters Scenario.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται κάποιες σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο σεναρίων οι οποίες παρατίθενται στον πιο κάτω πίνακα. Συνοψίζοντας, τα νέα καταφύγια δίνουν “εκρηκτικό” πλεονέκτημα στα πρώτα 60s-120s σε όσους βρίσκονται πολύ κοντά, εμφανίζοντας περισσότερες πράσινες κουκίδες. Ωστόσο γεμίζουν γρήγορα, δημιουργώντας, πρόβλημα στον κεντρικό-ανατολικό άξονα με αποτέλεσμα την αναζήτηση εναλλακτικής κατεύθυνσης η οποία μετατρέπει μεγάλο όγκο πρακτόρων σε γκρι στίγματα για περισσότερη ώρα. Ως αποτέλεσμα, στο σενάριο των δύο καταφυγίων η ροή είναι πιο ομοιογενής και ισορροπημένη.

5.3.2 Σύγκριση Συνολικού χρόνου και Απόστασης Μετακίνησης

5.3.2.1 Απόσταση Μετακίνησης Πρακτόρων

Το παρακάτω γράφημα απεικονίζει την κατανομή συνολικών αποστάσεων που διένυσαν οι πράκτορες στα δύο σενάρια. Στον άξονα X βρίσκεται η απόσταση μετακίνησης (m), ενώ στον άξονα Y ο μέσος αριθμός πρακτόρων ανά διάστημα, υπολογισμένος από όλες τις επαναλήψεις της προσομοίωσης για τα διαφορετικά ποσοστά ηγετών-ακόλουθων.



Σχήμα 5.8: Average travel-distance distribution for the Pilot scenario (blue) vs extra shelters scenario (red).

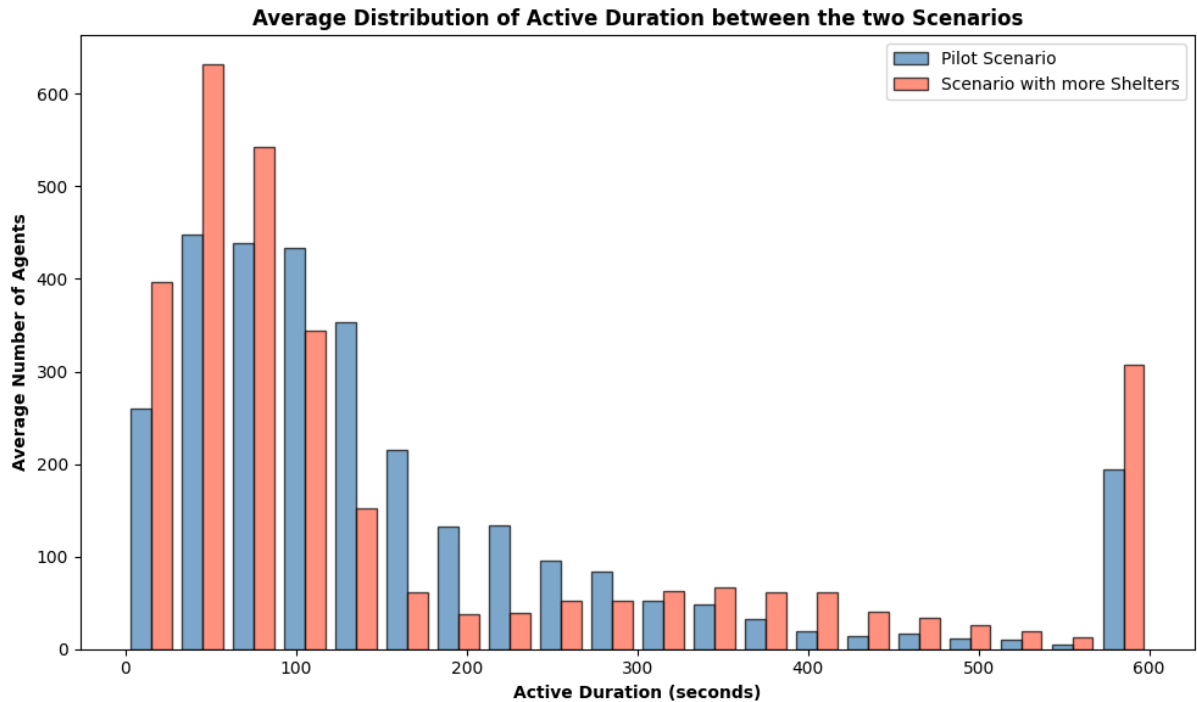
Τα κύρια σημεία που παρατηρούμε από το παραπάνω γράφημα είναι τα εξής:

- Και στις δύο περιπτώσεις η κατανομή έχει μία κορυφή και γενικότερα οι περισσότεροι πράκτορες διανύουν σχετικά μικρές αποστάσεις κάτω των 500m. Συγκεκριμένα τα $\frac{2}{3}$ του πληθυσμού και στα δύο σενάρια χρειάζεται να διανύσει περίπου μισό χιλιόμετρο.
- Για αποστάσεις μεταξύ 0-150m το πιλοτικό σενάριο (μπλε) έχει σαφώς λιγότερους πράκτορες (~90-180) αντίθετα το σενάριο με περισσότερα καταφύγια (κόκκινο) έχει περισσότερους (~140-260).
- Η κορυφή της κατανομής για το σενάριο με τα περισσότερα καταφύγια (κόκκινο) βρίσκεται στα 200-250m με ~270-280 πράκτορες, ενώ στο πιλοτικό σενάριο (μπλε) μετατοπίζεται στα 300-350m με ~210-250 πράκτορες.
- Για αποστάσεις 350-600m κυριαρχεί το πιλοτικό σενάριο (μπλε) ενώ το σενάριο με τα τέσσερα καταφύγια πέφτει απότομα. Άρα δεν υπάρχουν πολλοί πράκτορες σε μεσαίας τάξης αποστάσεις.
- Σε αποστάσεις 600-900m υπάρχει μια αύξηση στην κόκκινη καμπύλη, δηλαδή κάποιοι που πιθανών να μην προλάβουν κάποιο μη κορεσμένο καταφύγιο αναγκάζονται να βρουν εναλλακτικές λύσεις.
- Για αποστάσεις πέραν των 900m παρατηρούμε πολύ λεπτή ουρά (~60-90 πράκτορες) για το πιλοτικό (μπλε) σε αντίθεση στο σενάριο με τέσσερα καταφύγια το οποίο έχει εντονότερη ουρά (~60-90 πράκτορες).

Η συνολική εικόνα είναι ότι τα δύο επιπλέον καταφύγια μειώνουν δραστικά την απόσταση για αρκετές εκατοντάδες πράκτορες που βρίσκονται γύρω τους. Ταυτόχρονα όμως όταν τα νέα καταφύγια φτάνουν σε σημείο κορεσμού, πράκτορες που συνεχίζουν να ρέουν από τις ίδιες γειτονιές εκτρέπονται σε πολύ μακρύτερες διαδρομές (> 700 m), σχηματίζοντας τη δεύτερη «κόκκινη καμπούρα» και φουσκωμένη ουρά. Ως αποτέλεσμα, η αύξηση της υποδομής καταφυγίων οδηγεί σε «διπολική» κατανομή: περισσότεροι πολύ κοντινοί και ταυτόχρονα περισσότεροι πολύ μακρινοί.

5.3.2.2 Χρόνος Μετακίνησης Πρακτόρων

Το γράφημα παρουσιάζει την κατανομή του χρόνου ενεργής κίνησης (active duration) των πρακτόρων μέχρι να καταφύγουν σε κάποια έξοδο ή καταφύγιο, συγκρίνοντας το πιλοτικό σενάριο (μπλε) με το σενάριο με τέσσερα καταφύγια (κόκκινο).



Σχήμα 5.9: Average active-duration distribution for the Pilot scenario (blue) vs extra shelters scenario (red)

Οι κύριες ομοιότητες από το παραπάνω γράφημα είναι τα εξής:

- Και στα δύο σενάρια υπάρχει ένας αρχικός “θόλος” από 0-180s, όπου οι περισσότεροι πράκτορες ολοκληρώνουν την πορεία τους σε ≤ 3 λεπτά.
- Συνεχίζοντας, διακρίνουμε μια φθίνουσα συχνότητα μετά τα 300s όπου ο αριθμός των πρακτόρων μειώνεται προοδευτικά και στα δύο σετ.
- Ακόμη παρατηρούμε ενεργούς πράκτορες μέχρι το τέλος (600s) της προσομοίωσης και για τα δύο σενάρια.

Οι διαφορές από το γράφημα είναι οι εξής:

- Το πιλοτικό σενάριο η κορύφωση της κατανομής βρίσκεται στα 60-90s με ~450 πράκτορες, ενώ στο άλλο σενάριο είναι στα 60s με περισσότερους πράκτορες (~630).
- Παρατηρούμε ότι η μπλε καμπύλη διατηρεί μεγαλύτερη “πλάτη” σε μεσαίο εύρος (90-150s).
- Στο εύρος των 180-300s υπερτερεί η μπλε καμπύλη κάτι που υποδεικνύει για το σενάριο με τέσσερα καταφύγια ότι πολλοί πράκτορες είτε είχαν τελειώσει νωρίτερα είτε καθυστέρησαν έντονα μετά τον κορεσμό των νέων καταφυγίων.

Κάτι το παρατηρούμε στο εύρος των 300-480s όπου υπερτερεί η κόκκινη καμπύλη.

- Υπάρχει μία αύξηση της τάξεως του +60% στο σενάριο με τέσσερα καταφύγια στο χρόνο των 10 λεπτών αφού η μπλε καμπύλη βρίσκεται στους ~190 πράκτορες ενώ η κόκκινη στους ~300.

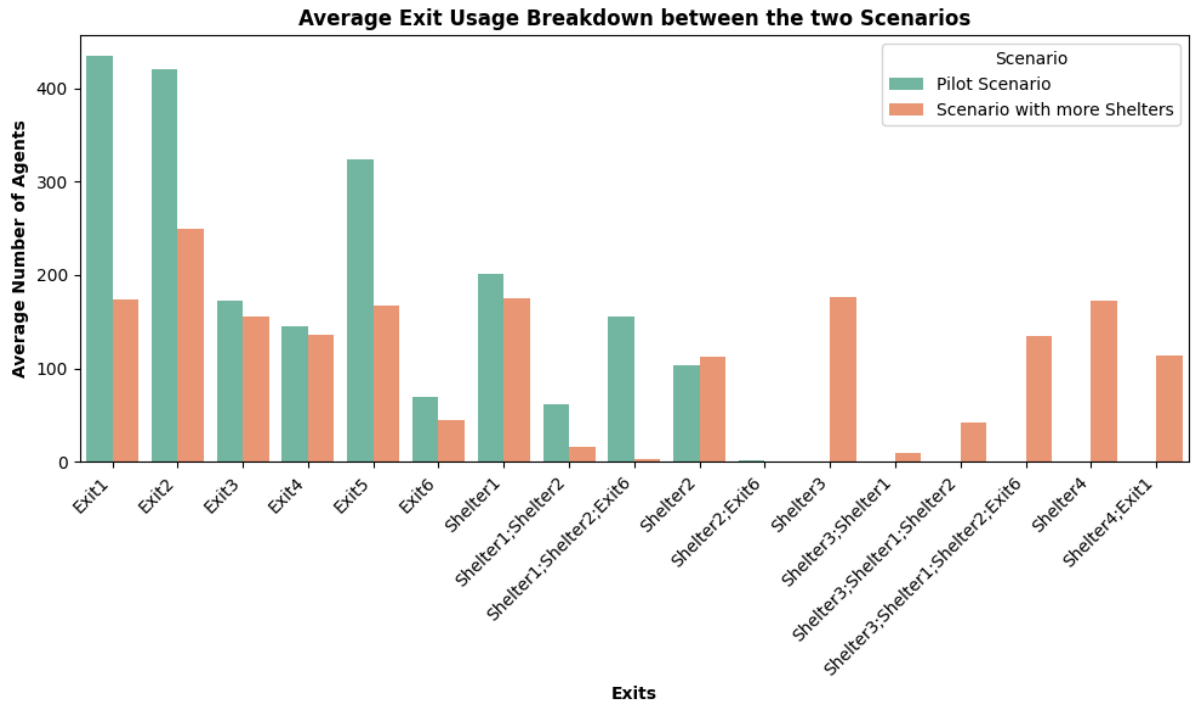
Συνοπτικά, όσοι ξεκινούν πολύ κοντά στα νέα καταφύγια πετυχαίνουν ακραία μικρούς χρόνους (0-90s). Μετά τον κορεσμό (300-480s) όμως οι επόμενοι πράκτορες αναζητούν εναλλακτική έξοδο ή ελεύθερο καταφύγιο, ξοδεύοντας πολύ χρόνο. Ως εκ τούτου, η αύξηση του αριθμού των καταφυγίων βελτιώνει όσους βρίσκονται πολύ κοντά αλλά δημιουργεί νέο «θάλαμο αντήχησης» με μεγάλο αριθμό πρακτόρων που κολλάνε για ≥ 5 λεπτά, αυξάνοντας τον μέσο και τον μέγιστο ενεργό χρόνο.

5.3.3 Σύγκριση Χρήσης Εξόδων και Καταφυγίων

Το διάγραμμα συγκρίνει τον μέσο αριθμό πρακτόρων που χρησιμοποίησαν καθεμία από τις έξι διαθέσιμες εξόδους διαθέσιμα καταφύγια του κάθε σεναρίου.

Υποσημείωση: οι τιμές στον άξονα Y που έχουν πάνω από μία έξοδο/καταφύγιο αντιπροσωπεύουν πράκτορες οι οποίοι πέρασαν από τον πρώτο προορισμό και λόγω μη δυνατής χρήσης αναγκάστηκαν να αλλάξουν τον προορισμό τους.

Exit1=Αρχιεπισκόπου Μακαρίου III	Shelter 1 = Παλαιών Πατρών Γερμανός
Exit2= Γέφυρα Δώρου Λοίζου	Shelter 2 = Ριγένης
Exit3= Πλατεία ελευθερίας	Shelter 3 = Καθεδρικός Αγίου Ιωάννη
Exit4= Πλατεία Σολωμού	Shelter 4 = Εκκλησία Παναγίας Φανερωμένης
Exit5= Βασιλέως Γεωργίου Β	
Exit6 = Πάφου	



Σχήμα 5.10: Average exit usage per exit/shelter in the Pilot (green) vs. extra shelters (red) scenarios.

Θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω πίνακα για να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα του γραφήματος πιο ευδιάκριτα.

Κατηγορία	Πιλοτικό Σενάριο (δύο καταφύγια)	Σενάριο τεσσάρων καταφυγίων
Κύριες εξοδοί	Exit 1 $\approx$ 440, Exit 2 $\approx$ 420, Exit 5 $\approx$ 330	Σημαντική πτώση: Exit 1 $\approx$ 170, Exit 2 $\approx$ 250, Exit 5 $\approx$ 170
Δευτερεύουσες εξοδοί	Exit 3 $\approx$ 170, Exit 4 $\approx$ 150, Exit 6 $\approx$ 70	Παραμένουν παρόμοιες ή ελαφρώς χαμηλότερες.
Αρχικά καταφύγια	Shelter 1 $\approx$ 200, Shelter 2 $\approx$ 100	Παρόμοια απόλυτα νούμερα, αλλά μικρότερο ποσοστό επί του συνόλου
Νέα καταφύγια	-	Shelter 3 $\approx$ 170, Shelter 4 $\approx$ 170
Ροές με αλλαγή πορείας	Λίγες: Shelter1-Shelter2 $\approx$ 60, Shelter2-Exit6 $\approx$ 110	Πολλές και ποικίλες: Shelter3-Shelter1 $\approx$ 20, Shelter3-Shelter2 $\approx$ 40, Shelter4-Exit1 $\approx$ 110 κ.ά.

Table 5.2: Quick comparison of exit usage, shelter allocations, and rerouting patterns between the Pilot scenario (with two shelters) and the Four-Shelter scenario.

Η ομοιότητα οι οποία παρατηρούμε είναι ότι οι δύο πρώτες έξοδοι (Exit1 & Exit2) παραμένουν οι πιο δημοφιλείς και στα δύο σενάρια, παρότι η απόλυτη ζήτηση διαφοροποιείται. Η διαφορά είναι ότι υπάρχει μετατόπιση φόρτου από εξόδους σε καταφύγια. Στο σενάριο 4 καταφυγίων η χρήση των Exit 1, 2 και 5 μειώνεται 35-60 %, γιατί σημαντικό κομμάτι πρακτόρων καταλήγει στα δύο νέα καταφύγια (Shelter 3, 4). Κάτι το οποίο αξίζει να σημειωθεί είναι πως με τα δύο επιπλέον καταφύγια πολλοί πράκτορες ακολουθούν αλυσιδωτές διαδρομές – εγκαταλείπουν ένα γεμάτο καταφύγιο, δοκιμάζουν δεύτερο, μερικοί ακόμη και τρίτο, πριν τελικά φτάσουν σε έξοδο. Συγκεκριμένα, ο μέσος αριθμός πρακτόρων για κάθε αλληλουχία προορισμός παρατίθεται παρακάτω.

- Shelter1 σε Shelter2 ≈ 60 πράκτορες
- Shelter2 σε Exit2 ≈ 110 πράκτορες
- Shelter3 σε Shelter1 ≈ 20 πράκτορες
- Shelter3 σε Shelter2 ≈ 40 πράκτορες
- Shelter1 σε Shelter2 σε Exit6 ≈ 15 πράκτορες
- Shelter4 σε Exit1 ≈ 110 πράκτορες

Συμπερασματικά, η εισαγωγή δύο ακόμη καταφυγίων δεν έλυσε το πρόβλημα χωρητικότητας· αντιθέτως, αύξησε την πολυπλοκότητα των διαδρομών. Ένα σημαντικό ποσοστό πρακτόρων χρειάζεται δύο ή και τρεις διαδοχικές επιλογές μέχρι να εξασφαλίσει καταφύγιο/έξοδο, επιβαρύνοντας τόσο τον χρόνο όσο και το μήκος πορείας της εκκένωσης.

5.4 Σύνοψη Υπόθεσης 2

Ποσοστό Επιτυχίας

Στο σενάριο των δύο καταφυγίων επιτυγχάνεται σταθερά υψηλότερο ποσοστό – ιδίως στους Ακόλουθους (≈ 52 % έναντι ≈ 37 % στους 4 χώρους), ενώ η επιτυχία των Ηγετών ξεπερνά γρηγορότερα το 90 %. Η προσθήκη δύο επιπλέον δομών βελτιώνει μόνο την πολύ πρώιμη φάση (0-100 s)· από τα 120-150 s και μετά το πλεονέκτημα ανατρέπεται λόγω κορεσμού και επαναδρομολόγησης.

Χρόνος και Απόσταση

Με 4 καταφύγια εμφανίζεται διπολική κατανομή: περισσότεροι πράκτορες διανύουν πολύ μικρές διαδρομές (< 250 m), αλλά αυξάνεται δραματικά και ο αριθμός όσων αναγκάζονται σε πολύ μεγάλες (> 700 m). Η ενεργός διάρκεια ακολουθεί το ίδιο μοτίβο, ένα πρώτο «κύμα» τερματίζει νωρίς, όμως η ουρά > 300 s διογκώνεται (+60 % περισσότεροι πράκτορες στο όριο των 600 s).

Χωρική κατανομή

Τα νέα καταφύγια (Αγ. Ιωάννη & Φανερωμένης) γεμίζουν σε $< 60-90$ s όταν βρίσκονται σε σημεία με πολύ πληθυσμό. Ταυτόχρονα όμως τοπικός κορεσμός δημιουργεί καταρράκτες επαναδρομολόγησης (μέχρι και τριπλό άλμα Shelter3→Shelter2→Exit 6), επιβαρύνοντας το κέντρο του δικτύου.

Χρήση εξόδων

Η ροή προς τις κύριες εξόδους (Exit 1, 2, 5) πέφτει 35-60 % με τα 4 καταφύγια, χωρίς οι δευτερεύουσες εξοδοί να απορροφήσουν το πλεονάζον φορτίο. Προκύπτουν περισσότεροι «μικτοί» προορισμοί (Shelter-Shelter ή Shelter-Exit), ένδειξη αυξημένης πολυπλοκότητας και καθυστερήσεων.

Τελική κρίση

Τα ευρήματα της σύγκρισης επιβεβαιώνουν την υπόθεση: ακόμη και μετά την προσθήκη δύο νέων καταφυγίων, ο συνολικός χρόνος εκκένωσης παραμένει υψηλός και σημαντικό ποσοστό πρακτόρων καθυστερεί ή αποτυγχάνει να βρει ασφαλές καταφύγιο. Ο λόγος είναι ότι η απλή χωροθέτηση επιπλέον δομών, χωρίς ταυτόχρονη πληροφόρηση για τη χωρητικότητά τους και μηχανισμό δυναμικής καθοδήγησης, δεν επαρκεί. Αντιθέτως, παρατηρήθηκαν:

- Μεγαλύτερη μεταβλητότητα μεταξύ εκτελέσεων: σε ορισμένα runs τα νέα καταφύγια γεμίζουν αστραπιαία, σε άλλα μένουν μισό-κενά.
- Εκρηκτικές ουρές χρόνου και απόστασης για όσους βρέθηκαν σε γεμάτο καταφύγιο και χρειάστηκε να αναζητήσουν δεύτερο ή τρίτο προορισμό.
- Μείωση του συνολικού ποσοστού επιτυχίας, κυρίως στους ευάλωτους Ακολουθούς, οι οποίοι εξαρτώνται από σαφείς οδηγίες ροής.

Συνεπώς, παρότι ο αριθμός καταφυγίων όντως αποδεικνύεται ανεπαρκής, η τυφλή προσθήκη νέων χωρίς σύστημα ενημέρωσης και εξισορρόπησης φορτίου όχι μόνο δεν λύνει το πρόβλημα αλλά το επιτείνει. Το αρχικό σενάριο των δύο, χωροταξικά σωστά τοποθετημένων, καταφυγίων σε συνδυασμό με πλήρη αξιοποίηση των εξόδων αποδείχθηκε τελικά πιο ισορροπημένο και προβλέψιμο. Για να ανατραπεί η υπόθεση απαιτούνται όχι απλώς περισσότερα καταφύγια, αλλά έξυπνη κατανομή ροής, έγκαιρη πληροφόρηση πληρότητας και προσαρμοστική καθοδήγηση πολιτών.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή απέδειξε ότι ένα ψηφιακό δίδυμο της εντός των τειχών Λευκωσίας μπορεί να λειτουργήσει ως ισχυρό αναλυτικό εργαλείο για σενάρια μαζικής εκκένωσης. Με αφετηρία το ρεαλιστικό 3D μοντέλο του iNicosia και αξιοποιώντας το Unity AI Navigation, υλοποιήθηκαν δύο πειραματικές υποθέσεις: (α) η επάρκεια του οδικού δικτύου όταν μια από την πιο δημοφιλή εξόδους τίθεται εκτός λειτουργίας και (β) η πληρότητα και κατανομή των υπαρχόντων καταφυγίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ακόμη και υπό την αισιόδοξη παραδοχή πως όλοι οι πολίτες βρίσκονται ήδη στον δρόμο, η πλειονότητα δεν προλαβαίνει να διαφύγει μέσα στα πρώτα 10 λεπτά, ενώ το κλείσιμο της δημοφιλέστερης εξόδου επιβραδύνει δραστικά την εκκένωση και σχεδόν υποδιπλασιάζει την επιτυχία των ακολούθων. Παράλληλα, η απλή προσθήκη δύο νέων καταφυγίων χωρίς μηχανισμό δυναμικής καθοδήγησης δημιούργησε τοπικούς κορεσμούς και αύξησε την ποικιλία αλλά και το μήκος των διαδρομών, επιβεβαιώνοντας ότι η χωρητικότητα παραμένει οριακή και ότι η ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο είναι κρίσιμη. Συνολικά, η μεθοδολογία ανέδειξε αφενός τα τρωτά σημεία του ιστορικού κέντρου (περιορισμένες δίοδοι, ανισοκατανομή ροής, έλλειψη εναλλακτικών), και αφετέρου τη χρησιμότητα των προσομοιώσεων ως βάση τεκμηριωμένων παρεμβάσεων, όπως το άνοιγμα/θωράκιση επιπλέον εξόδων, έξυπνη σήμανση πληρότητας καταφυγίων και στρατηγικό σχεδιασμό εκκενωτικών διαδρομών.

6.2 Περιορισμοί

Αν και το μοντέλο προσφέρει χρήσιμες ενδείξεις, ενσωματώνει μια σειρά από παραδοχές που περιορίζουν το πόσο ρεαλιστικό είναι. (α) Το σχήμα «Ηγέτης-Ακόλουθος» είναι υπεραπλουστευμένο: όταν ένας ακόλουθος χάσει οπτική επαφή με τον ηγέτη του απλώς εξαφανίζεται από την προσομοίωση, αντί να περιπλανηθεί, να αναζητήσει άλλον οδηγό ή να ακολουθήσει το πλήθος· στα σενάρια με λίγους ηγέτες αυτό οδήγησε σε πολύ μεγάλο ποσοστό πρόωρων αποχωρήσεων. (β) Όλοι οι πράκτορες θεωρούνται ήδη έτοιμοι επάνω στο οδικό δίκτυο και λαμβάνουν ταυτόχρονα το σήμα εκκένωσης, δεν μοντελοποιείται ο χρόνος ενημέρωσης ούτε η καθυστέρηση εξόδου από κτίρια, πράγμα

που στην πράξη θα επιμήκυνε αισθητά τη διαδικασία. (γ) Οι ηγέτες γνωρίζουν εξ αρχής την πλησιέστερη έξοδο/καταφύγιο και το ταχύτερο μονοπάτι, κάτι που υπερεκτιμά τον πραγματικό βαθμό εξοικείωσης των κατοίκων με το λαβυρινθώδες δίκτυο της παλιάς πόλης. (δ) Τα μονοπάτια υπολογίζονται στατικά πριν από την έναρξη, όταν μια έξοδος φράζει ή ένα καταφύγιο κορεστεί, ο πράκτορας απλώς αλλάζει στόχο αφού φτάσει στο αδιέξοδο, χωρίς δυναμικό επανυπολογισμό διαδρομής, γεγονός που διογκώνει τεχνητά τις ουρές και τις αποστάσεις. (ε) Το σενάριο περιορισμένων εξόδων περιορίζεται στο κλείσιμο μίας εξόδου, δεν προσομοιώνονται φθορές οδοστρώματος ή άλλους κλειστούς δρόμους που θα περιόριζαν επιπλέον την κυκλοφορία. (ζ) Τέλος, η χωρική τοποθέτηση πρακτόρων είναι τυχαία βάσει NavMesh-triangulation και όχι βάσει πραγματικών προτύπων κατοίκησης ή ώρας αιχμής.

6.3 Μελλοντική δουλειά

Για να αρθούν οι παραπάνω περιορισμοί και να προσεγγίσουμε πιο ρεαλιστικά την ανθρώπινη συμπεριφορά, προτείνονται οι ακόλουθες επεκτάσεις:

- **Ευφυέστεροι Ακόλουθοι.** Να αντικατασταθεί ο μηχανισμός «despawn» με μια ιεραρχία δράσεων: τυχαία περιπλάνηση με αποφυγή αδιεξόδων, αναζήτηση οπτικής επαφής με νέον ηγέτη, ή δυναμικό follow-the-crowd βασισμένο στην τοπική πυκνότητα. Έτσι μειώνεται το τεχνητό ποσοστό «χαμένων» πρακτόρων.
- **Στάδιο κινητοποίησης.** Οι πράκτορες να ξεκινούν μετά από τυχαίο «χρόνο αντίδρασης» π.χ. εκθετική κατανομή 0-120 s και να επηρεάζονται από το οπτικό ερέθισμα γειτόνων. Αυτό αντικατοπτρίζει τον χρόνο ενημέρωσης και την έξοδο από κτήρια.
- **Ετερογενής γνώση διαφυγής.** Να αποδοθεί σε κάθε πράκτορα ένα εξατομικευμένο «knowledge profile» (π.χ. 10 % γνωρίζει μόνο το Shelter 1, 40 % τις κοντινές εξόδους, 5 % καμία)· η επιλογή προορισμού να βελτιστοποιείται στη διάρκεια του σεναρίου με κάποιου είδους reinforcement learning, ώστε οι διαδρομές να διαφέρουν ουσιαστικά.
- **Δυναμικός έλεγχος πληρότητας.** Κάθε καταφύγιο να εκπέμπει σήμα χωρητικότητας, όταν ο πράκτορας φτάνει και διαπιστώνει κορεσμό, να

ανακατευθύνεται αυτόματα προς το πλησιέστερο διαθέσιμο καταφύγιο ή έξοδο, χωρίς να χρειάζεται να εισέλθει πρώτα.

- **Επανυπολογισμός διαδρομής σε πραγματικό χρόνο.** Με χρήση κάποιου αλγόριθμου, θα μπορούσαν οι πράκτορες να προσαρμόζουν το μονοπάτι τους κάθε λίγα δευτερόλεπτα ή όταν εντοπιστεί εμπόδιο/συμφόρηση.
- **Επέκταση πληθυσμιακών προφίλ.** Προσθήκη ταχυτήτων για ηλικιωμένους, και παιδιά, μεταβλητές αντοχής, πανικού και συμμόρφωσης, ώστε να μελετηθεί η επίδραση ευάλωτων ομάδων.

Η υλοποίηση των παραπάνω, ιδίως ο συνδυασμός δυναμικής πλοήγησης, τοπικής πληροφόρησης πληρότητας και ρεαλιστικού χρόνου αντίδρασης, θα καταστήσει την προσομοίωση όχι μόνο ακριβέστερη, αλλά και κατάλληλο επιχειρησιακό εργαλείο για σενάρια εκκένωσης που απαιτούν γρήγορες και αξιόπιστες αποφάσεις από την Πολιτική Άμυνα και τον Δήμο Λευκωσίας.

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] 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>.
- [3] 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/>.
- [4] EasyRoads3D, "Easy Roads 3D Free v3," *Unity Asset Store*, [Online]. Available:
<https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/easyroads3d-free-v3-987>.
- [5] Google, "Google Maps," *Google Maps*, [Online]. Available:
<https://www.google.com/maps>.
- [6] F. P. Tutorials, "Unity NavMesh Tutorial - Basics," *YouTube*, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=CHV1ymlw-P8&t=2s>.
- [7] F. P. Tutorials, "Unity NavMesh Tutorial - Making it Dynamic," *YouTube*, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=FkJ45Pt-mY>.
- [8] F. P. Tutorials, "Unity NavMesh Tutorial - Animated Character," *YouTube*, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=blPgIabGueM>.
- [9] F. P. Tutorials, "Unity NavMesh Tutorial - Part 4," *YouTube*, 2022. [Online]. Available:
<https://www.youtube.com/watch?v=G9Otw12OUvE&list=PLuCMMinOltbtStbv0h7UNslwi0UhPLCNC&index=4>.
- [10] CYENS Centre of Excellence, "iNicosia Digital Twin," *CYENS Dev Portal*, [Online]. Available: <https://dev.cyens.org.cy/portfolios/inicosia-digital-twin/>