



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ – ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Ψηφιακός Πολιτισμός, Έξυπνες Πόλεις, ΙοΤ και Προηγμένες Ψηφιακές Τεχνολογίες»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	SafeEvac Προσβάσιμη Εκκένωση ΑμεΑ σε Δημόσια Κτήρια SafeEvac Accessible Evacuation for People with Disabilities in Public Buildings
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Πλευριάς Παναγιώτης
Πατρώνυμο	Χρήστος
Αριθμός Μητρώου	ΨΠΟΛ/ 2323
Επιβλέπων	Δημήτριος Δ. Βέργαδος, καθηγητής

Ημερομηνία Παράδοσης

Μάιος 2026

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

**Δημήτριος Δ.
Βέργαδος
Καθηγητής**

**Παναγιώτης
Τσάκωνας
Ε.ΔΙ.Π.**

**Δημήτριος Ι.
Βέργαδος
Διδάσκων ΠΜΣ**

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κλείνει ένας κύκλος γεμάτος προσπάθεια, αμφιβολίες, επιμονή και προσωπική εξέλιξη. Η διαδρομή αυτή δεν ήταν πάντα εύκολη. Υπήρξαν στιγμές πίεσης, κόπωσης και αναζήτησης λύσεων, αλλά και στιγμές ικανοποίησης, μάθησης και δημιουργίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δημήτριο Βέργαδο, για την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και τον χρόνο που μου αφιέρωσε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας. Οι παρατηρήσεις και οι συμβουλές του/της συνέβαλαν ουσιαστικά στη διαμόρφωση της τελικής μορφής της διπλωματικής και με βοήθησαν να προσεγγίσω το θέμα με μεγαλύτερη ωριμότητα και συνέπεια.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω το Πανεπιστήμιο και το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών, που μου έδωσαν το πλαίσιο, τα ερεθίσματα και τα εργαλεία για να αναπτύξω τις γνώσεις και τις δεξιότητές μου. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει στη Γραμματεία του Μεταπτυχιακού, για την άμεση ανταπόκριση, την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών. Η συμβολή της ήταν σημαντική, ειδικά σε πρακτικά ζητήματα που συχνά καθορίζουν την ομαλή πορεία ενός φοιτητή.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου, που στάθηκε δίπλα μου σε κάθε βήμα. Για την υπομονή, τη στήριξη και την πίστη τους σε εμένα, ακόμα και στις στιγμές που εγώ ο ίδιος δυσκολευόμουν να τη δω καθαρά. Η παρουσία τους υπήρξε σταθερό σημείο αναφοράς σε όλη αυτή τη διαδρομή.

Η εργασία αυτή αποτελεί για μένα κάτι περισσότερο από μια ακαδημαϊκή υποχρέωση. Είναι το αποτέλεσμα μιας πορείας που με δοκίμασε, με έμαθε να επιμένω και μου θύμιζε πόσο σημαντικό είναι να προχωράς, ακόμα και όταν η διαδρομή μοιάζει δύσκολη. Σε όλους όσοι στάθηκαν δίπλα μου, με οποιονδήποτε τρόπο, ένα ειλικρινές ευχαριστώ.

Περίληψη

Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης η εκκένωση δημόσιων κτηρίων είναι μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις αστικής ασφάλειας, ιδίως για άτομα με κινητικά προβλήματα (ΑμεΑ), τα οποία αδυνατούν να ακολουθήσουν τα συμβατικά πρωτόκολλα εκκένωσης που σχεδιάστηκαν για τον γενικό πληθυσμό. Η παρούσα διατριβή παρουσιάζει το SafeEvac, ένα πρωτότυπο mobile σύστημα που αντιμετωπίζει αυτό ακριβώς το κενό, εντάσσοντας την ασφαλή εκκένωση ΑμεΑ στο πλαίσιο των Έξυπνων Πόλεων.

Το σύστημα αξιοποιεί τέσσερις βασικές τεχνολογίες: BIM μοντελοποίηση του κτηρίου σε μορφή IFC 2x3 (ISO 16739), εντοπισμό θέσης μέσω QR codes (με αρχιτεκτονική πρόταση για BLE beacons σε production υλοποίηση), αλγόριθμο Dijkstra για προσβάσιμη δρομολόγηση που αποκλείει αυτόματα τα κλιμακοστάσια, και προσομοίωση real time επικοινωνίας εντός του web prototype (με αρχιτεκτονική πρόταση για Firebase σε production υλοποίηση). Παράλληλα, αναπτύχθηκε custom STEP/EXPRESS parser που εξάγει αυτόματα τον γράφο εκκένωσης από το IFC αρχείο χωρίς εξωτερικές βιβλιοθήκες.

Το σύστημα αξιολογήθηκε μέσω ευριστικής αξιολόγησης βάσει των αρχών Nielsen, σεναρίων χρήσης και συγκριτικού benchmark του αλγορίθμου Dijkstra έναντι του A*. Τα αποτελέσματα του benchmark επιβεβαίωσαν την επιλογή του Dijkstra ως καταλληλότερου για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής. Επιπλέον, η εργασία προτείνει επέκταση σε αστικό επίπεδο μέσω crowdsourced δικτύου παραλαβής ΑμεΑ.

Abstract

The emergency evacuation of public buildings remains a critical urban safety challenge, particularly for individuals with mobility impairments who are unable to follow conventional evacuation protocols designed for the general population. This thesis presents SafeEvac, a prototype mobile system that addresses this gap by positioning the safe evacuation of people with disabilities (PwD) within the smart city paradigm.

The system leverages four core technologies: Building Information Modeling (BIM) of the facility in IFC 2x3 format (ISO 16739), indoor positioning QR codes (with BLE beacons proposed for full deployment), a Dijkstra algorithm for accessible routing that automatically excludes staircases, and simulated real time communication within the web prototype (Firebase proposed for production implementation), a custom STEP/EXPRESS parser was developed to automatically extract the evacuation graph from the IFC file without relying on external libraries.

The system was evaluated through heuristic evaluation based on Nielsen's principles, use-case scenarios, and a comparative benchmark of Dijkstra against A*. The benchmark results confirmed Dijkstra as the most suitable algorithm for this application domain. The thesis further proposes an extension to the urban scale through a crowdsourced PwD pickup network.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη (ελληνικά).....	4
Abstract (αγγλικά).....	4
Πίνακας Περιεχομένων.....	5
Κατάλογος Συντομογραφιών.....	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	9
1.1 Το πρόβλημα της προσβασιμότητας στις Έξυπνες Πόλεις.....	9
1.2 Ερευνητικό κενό.....	10
1.3 Σκοπός και αντικείμενο.....	10
1.4 Μεθοδολογική προσέγγιση.....	10
1.5 Ερευνητικά ερωτήματα.....	11
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο & Νομοθεσία.....	12
2.1 Cyber-Physical Systems ως υποδομές αστικής ανθεκτικότητας.....	12
2.2 Έξυπνη πόλη και ψηφιακές υπηρεσίες ασφάλειας.....	12
2.3 Βιώσιμη αστική κινητικότητα και μικρο-δρομολόγηση.....	12
2.4 Ανάγκες ΑμεΑ κατά την εκκένωση.....	13
2.5 Τεχνολογίες IoT και συστήματα εσωτερικού εντοπισμού.....	13
2.6 BIM, Digital Twins και σημασιολογική μοντελοποίηση χώρου.....	14
2.7 Νομοθετικό πλαίσιο και προστασία δεδομένων.....	14
Κεφάλαιο 3: Σχετικές Εργασίες.....	16
3.1 Ψηφιακά συστήματα εκκένωσης κτηρίων.....	16
3.2 Αλγόριθμοι δρομολόγησης για ΑμεΑ.....	16
3.3 Σύνοψη και τοποθέτηση της παρούσας εργασίας.....	16
Κεφάλαιο 4: Σχεδιασμός Εφαρμογής & Συστήματος.....	17
4.1 Λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις.....	17
4.2 Σενάρια χρήσης (Use Cases).....	17
4.3 Αρχιτεκτονική συστήματος.....	18
4.4 Ρόλοι χρηστών και ροές χρήσης.....	19
4.5 Σχεδιασμός διεπαφής χρήστη.....	19
Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση Prototype.....	21
5.1 Επιλογή τεχνολογιών.....	21
5.2 Αλγόριθμος δρομολόγησης.....	21
5.3 Module SOS και real-time επικοινωνία.....	23
5.4 Δυναμική αναδρομολόγηση σε πραγματικό χρόνο.....	24
5.5 BIM μοντελοποίηση και Dijkstra από IFC.....	25
5.6 Web Prototype (safeevac_app.html).....	25
Κεφάλαιο 6: Πειραματική Αξιολόγηση Αλγορίθμου.....	27

6.1 Σκοπός και μεθοδολογία.....	27
6.2 Αποτελέσματα στο SafeEvac μοντέλο.....	27
6.3 Scalability Test.....	27
6.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	28
6.5 Συμπέρασμα	28
Κεφάλαιο 7: Αξιολόγηση	29
7.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης.....	29
7.2 Σενάρια προσομοίωσης.....	29
7.3 Μετρικές αξιολόγησης.....	29
7.4 Ευριστική αξιολόγηση (Nielsen)	30
7.5 Αξιολόγηση προσβασιμότητας (WCAG 2.1).....	30
7.6 Συμπέρασμα Αξιολόγησης.....	30
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα	31
8.1 Σύνοψη και συνεισφορά	31
8.2 Κοινωνικός αντίκτυπος	31
8.3 Περιορισμοί.....	31
8.4 Μελλοντική έρευνα (V2X, multi-building).....	32
Κεφάλαιο 9: Επέκταση — Αστική Εκκένωση ΑμεΑ.....	33
9.1 Από το κτήριο στην πόλη.....	33
9.2 Αρχιτεκτονική αστικής εκκένωσης	33
9.3 Σύνδεση με την έξυπνη πόλη	33
Κεφάλαιο 10: Συμπέρασμα — Περίληψη	34
10.1 Σύνοψη της εργασίας.....	34
10.2 Κεντρικά ευρήματα	34
10.3 Θεωρητική και πρακτική συνεισφορά	34
10.4 Περιορισμοί και αυτοκριτική.....	35
10.5 Κλείσιμο	35
Βιβλιογραφία.....	36

Κατάλογος Συντομογραφιών

Συντομογραφία	Πλήρης ονομασία
ΑμεΑ	Άτομα με Αναπηρία
Π.Δ.*	Προεδρικό Διάταγμα
ΠΜΣ	Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
BIM	Building Information Modeling
BLE	Bluetooth Low Energy
CPS*	Cyber-Physical Systems
CRPD	Convention on the Rights of Persons with Disabilities
FCM	Firebase Cloud Messaging
GDPR	General Data Protection Regulation
GNM*	Geometry Network Model
GPS*	Global Positioning System
IFC	Industry Foundation Classes
IoT	Internet of Things (Διαδίκτυο των Πραγμάτων)
ISO	International Organization for Standardization
LPWAN*	Low-Power Wide-Area Network
QR	Quick Response (code)
REST	Representational State Transfer

Συντομογραφία	Πλήρης ονομασία
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SOS	Σήμα κινδύνου / Αίτημα άμεσης βοήθειας
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
SUS	System Usability Scale
UUID	Universally Unique Identifier
UX	User Experience
V2X	Vehicle-to-Everything
WCAG	Web Content Accessibility Guidelines

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Το πρόβλημα της προσβασιμότητας στις Έξυπνες Πόλεις

Τα τελευταία χρόνια, η Έξυπνη Πόλη έχει γίνει συνώνυμη με αισθητήρες που αφορούν την ποιότητα αέρα, αλγορίθμους κυκλοφορίας και πλατφόρμες real-time δεδομένων. Στον δημόσιο λόγο, η τεχνολογική πρόοδος παρουσιάζεται ως αυτονόητο βήμα προς μια πιο αποδοτική στις πόλεις. Η εικόνα όμως γίνεται λιγότερο θριαμβευτική όταν η συζήτηση φύγει από τη βελτιστοποίηση συστημάτων και μεταφερθεί στη διασφάλιση ανθρώπινης ζωής σε ευάλωτη θέση.

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, περισσότερο από το 16% του παγκόσμιου πληθυσμού δηλαδή περίπου 1,3 δισεκατομμύρια άνθρωποι οι οποίοι βιώνουν κάποια μορφή αναπηρία [1]. Το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο σε κοινωνίες με γηραίο πληθυσμό, όπως οι ευρωπαϊκές, όπου η αναπηρία συνδέεται συχνά με τη φυσική φθορά, τα χρόνια νοσήματα και τις πολυπαραγοντικές ευαλωτότητες. Οι αριθμοί αυτοί δεν είναι απλώς στατιστική αλλά σημαίνουν ότι κάθε «έξυπνη» πόλη που αγνοεί την προσβασιμότητα αφήνει εκτός εκατοντάδες χιλιάδες ανθρώπους.

Στην Ελλάδα το πρόβλημα έχει συγκεκριμένο μέγεθος. Σύμφωνα με την Eurostat [24], περίπου ένας στους τέσσερις πολίτες της ΕΕ άνω των 16 ετών δηλώνει κάποια μορφή μακροχρόνιας αναπηρίας ενώ στην Ελλάδα το ποσοστό αγγίζει το 24%. Η Ελληνική Στατιστική Αρχή [23] καταγράφει επιπλέον ότι το 5,3% των νοικοκυριών έχουν τουλάχιστον ένα μέλος με αναπηρία άνω του 67%, ποσοστό που αντιστοιχεί σε εκατοντάδες χιλιάδες οικογένειες [21].

Η αντίφαση γίνεται πιο οξεία σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Τα περισσότερα σύγχρονα δημόσια κτίρια διαθέτουν συστήματα πυρασφάλειας, αισθητήρες καπνού και αυτοματοποιημένους συναγερμούς. Ψηφιακά υποστηριζόμενες διαδικασίες εκκένωσης που να λαμβάνουν υπόψη τις ανάγκες ατόμων με κινητική, οπτική ή ακουστική αναπηρία είναι σπάνιες [2]. Η ύπαρξη ράμπας ή ανελκυστήρα δεν εγγυάται ασφαλή διαφυγή σε συνθήκες πανικού, καπνού ή διακοπής ρεύματος. Το τεχνικό σύστημα σχεδιάζεται συνήθως με βάση έναν «μέσο χρήστη» ο οποίος είναι αρτιμελής, με πλήρη αισθητηριακή ικανότητα και ταχεία κινητικότητα. Αυτή η παραδοχή, αν και αθέατη, ενσωματώνεται στον αλγοριθμικό σχεδιασμό και στις προδιαγραφές των Cyber-Physical Systems.

Η προσβασιμότητα, υπό αυτό το πρίσμα, δεν μπορεί να αντιμετωπίζεται ως πρόσθετο χαρακτηριστικό ενός ήδη διαμορφωμένου συστήματος. Αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο αρχιτεκτονικής. Ένα δίκτυο αισθητήρων που παρέχει ειδοποίηση μόνο μέσω ηχητικού σήματος αποκλείει αυτόματα άτομα με ακουστική αναπηρία. Μια εφαρμογή πλοήγησης που αγνοεί το πλάτος διαδρόμων ή την κλίση ράμπας αποτυγχάνει να προσφέρει αξιόπιστη καθοδήγηση σε χρήστη με κινητική δυσκολία. Η πόλη γίνεται «έξυπνη» ως προς τα δεδομένα, όχι απαραίτητα ως προς την ηθική της ανταπόκριση.

Παρά την πρόοδο στη νομοθεσία, ιδίως μετά την Ευρωπαϊκή Πράξη Προσβασιμότητας (Οδηγία 2019/882/ΕΕ) [3] και την Εθνική Στρατηγική για τα Δικαιώματα των ΑμεΑ 2024-2030 [22], η εφαρμογή ολοκληρωμένων ψηφιακών λύσεων για την εκκένωση ΑμεΑ από δημόσια κτίρια παραμένει ελλιπής. Οι περισσότερες λύσεις αντιμετωπίζουν είτε τη γενική εκκένωση [4] είτε την προσβασιμότητα ΑμεΑ [5], σπάνια και τα δύο μαζί. Σε επίπεδο συστημικής ανάλυσης, η απουσία συμπεριληπτικού σχεδιασμού δεν είναι μόνο κοινωνικό πρόβλημα αλλά επηρεάζει την ίδια τη λειτουργικότητα των Cyber-Physical Systems. Το ζήτημα έχει και διάσταση δικαιοσύνης. Το Άρθρο 11 της Σύμβασης του ΟΗΕ για τα Δικαιώματα των Ατόμων με Αναπηρία [9] θέτει ρητή υποχρέωση προστασίας ΑμεΑ σε καταστάσεις κινδύνου. Η μεταφορά αυτής της υποχρέωσης στον σχεδιασμό ψηφιακών αστικών συστημάτων παραμένει αποσπασματική.

1.2 Ερευνητικό κενό

Σύμφωνα με την ανασκόπηση [2], η εσωτερική εκκένωση ατόμων με λειτουργικούς περιορισμούς αποτελεί ακόμα αναδυόμενο ερευνητικό πεδίο. Κανένα από τα υπάρχοντα συστήματα δεν συνδυάζει real-time εντοπισμό θέσης ούτε και εξατομικευμένη δρομολόγηση βάσει προσβασιμότητας και ταυτόχρονη ενημέρωση του υπεύθυνου εκκένωσης. Αυτό το τριπλό κενό είναι ακριβώς αυτό που η παρούσα εργασία καλείται να καλύψει. Σε τεχνικό επίπεδο, η ενσωμάτωση IoT, Digital Twins και αλγορίθμων πλοήγησης σε ένα ενιαίο σύστημα εκκένωσης ΑμεΑ παραμένει ανοιχτό ερευνητικό ζήτημα [4]. Η πλειονότητα αυτών των διαθέσιμων λύσεων αντιμετωπίζει τη γεωμετρική μοντελοποίηση του χώρου ή τον αλγόριθμο δρομολόγησης ως μεμονωμένα τεχνικά προβλήματα, χωρίς να εξετάζει τη συνέργειά τους υπό το πρίσμα της προσβασιμότητας. Επιπλέον, η τεχνική ανάπτυξη σπάνια συνδυάζεται με σαφές κανονιστικό πλαίσιο το οποίο να λαμβάνει υπόψη τον GDPR και τις αρχές του Privacy by Design.

1.3 Σκοπός και αντικείμενο

Αφετηρία της παρούσας διατριβής είναι ότι παραδέχεται το ότι η αστική ανθεκτικότητα δεν μπορεί να θεωρείται ολοκληρωμένη αν δεν περιλαμβάνει μηχανισμούς εξατομικευμένης προστασίας για τα ΑμεΑ σε καταστάσεις κρίσης. Με βάση αυτή τη διαπίστωση, σκοπός της εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός prototype mobile εφαρμογής, του SafeEvac, ικανής να υποστηρίξει την ασφαλή και προσαρμοσμένη εκκένωση ΑμεΑ από δημόσια κτίρια σε περιβάλλον Έξυπνης Πόλης.

Η επιδίωξη δεν περιορίζεται σε θεωρητικό μοντέλο. Επιχειρείται η σύνθεση ενός λειτουργικού πρωτοτύπου που ενσωματώνει BIM/IFC μοντελοποίηση, εντοπισμό θέσης μέσω QR codes (με αρχιτεκτονική πρόβλεψη για BLE beacons σε production), αλγόριθμο Dijkstra για προσβάσιμη δρομολόγηση που αποκλείει αυτόματα τα κλιμακοστάσια, και προσομοίωση real time επικοινωνίας, με Firebase ως προτεινόμενη τεχνολογία για την production υλοποίηση. Η εργασία προτείνει επίσης επέκταση σε αστικό επίπεδο με crowdsourced δίκτυο παραλαβής ΑμεΑ που εμπλέκει λεωφορεία δήμου, εθελοντές και πολίτες. Στον πυρήνα του αντικειμένου βρίσκεται η εξατομίκευση. Η διαδρομή που προτείνεται σε άτομο με αμαξίδιο δεν μπορεί να είναι ίδια με εκείνη ενός αρτιμελούς χρήστη. Η ύπαρξη κλιμακοστασίων, στενών διαδρόμων ή θυρών περιορισμένου πλάτους μετατρέπεται σε κρίσιμη παράμετρο του αλγορίθμου. Η μοντελοποίηση του φυσικού χώρου μέσω BIM λειτουργεί έτσι όχι ως απλή τρισδιάστατη απεικόνιση, αλλά ως σημασιολογικά εμπλουτισμένο γράφημα όπου κάθε κόμβος και ακμή φέρει πληροφορία σχετική με την προσβασιμότητα.

1.4 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί μεθοδολογική ευελιξία. Για τον λόγο αυτό, η εργασία υιοθετεί την Agile φιλοσοφία ανάπτυξης λογισμικού, οργανώνοντας τη διαδικασία σε διαδοχικά sprints μικρής διάρκειας. Κάθε κύκλος περιλαμβάνει καθορισμό στόχων, υλοποίηση, δοκιμή και αναστοχασμό. Σε ένα έργο που αφορά την ασφάλεια ευάλωτων ομάδων, η σταδιακή επαλήθευση υποθέσεων δεν είναι απλώς μεθοδολογική επιλογή, είναι αναγκαιότητα.

Παράλληλα, υιοθετούνται αρχές Design Thinking ώστε η ανάπτυξη να παραμένει ανθρωποκεντρική. Η διαδικασία ξεκινά με ενσυναίσθηση, δηλαδή κατανόηση των πραγματικών δυσκολιών που αντιμετωπίζουν τα ΑμεΑ σε καταστάσεις εκκένωσης. Ακολουθεί ο ορισμός του προβλήματος βάσει συγκεκριμένων σεναρίων χρήσης, η ιδεοπαραγωγή, η κατασκευή πρωτοτύπου και η δοκιμή, πριν ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος.

1.5 Ερευνητικά ερωτήματα

Τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας δεν αποτελούν τυπική ακαδημαϊκή υποχρέωση, είναι ο μηχανισμός που προσανατολίζει ολόκληρη την ερευνητική πορεία.

Πρώτο ερώτημα: κατά πόσο ένα δυναμικό BIM μοντέλο μπορεί να βελτιώσει μετρήσιμα τον χρόνο και την ασφάλεια εκκένωσης ΑμεΑ σε σύγκριση με στατικές, προκαθορισμένες διαδρομές; Η παραδοσιακή σήμανση εξόδων κινδύνου βασίζεται σε γενικές παραδοχές για τη ροή πλήθους. Ένα ψηφιακό μοντέλο συνδεδεμένο με αισθητήρες πραγματικού χρόνου μπορεί να αναπροσαρμόζει τις διαδρομές βάσει εμποδίων, καπνού ή συμφόρησης. Δεύτερο ερώτημα: ποιοι αλγοριθμικοί μηχανισμοί φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης μπορούν να περιορίσουν το σφάλμα εντοπισμού BLE beacons σε αποδεκτά όρια για ασφαλή πλοήγηση ΑμεΑ; Η αστάθεια RSSI, οι ανακλάσεις σε μεταλλικές επιφάνειες και η επίδραση της ανθρώπινης παρουσίας είναι γνωστές προκλήσεις [10, 11] που χρειάζονται αλγοριθμική αντιμετώπιση. Τρίτο ερώτημα: πώς η ενσωμάτωση αρχών Universal Design επηρεάζει την αποδοτικότητα ενός Cyber-Physical System; Η συνήθης αντίληψη είναι ότι η προσβασιμότητα επιβαρύνει το σύστημα. Η παρούσα εργασία ερευνά την αντίθετη υπόθεση: ο συμπεριληπτικός σχεδιασμός ενδέχεται να βελτιώνει τη συνολική λειτουργικότητα, οδηγώντας σε σαφέστερη πληροφόρηση, καλύτερη δομή δεδομένων και πιο ευέλικτους αλγορίθμους. Τέταρτο ερώτημα: κατά πόσο η μεταφορά μέρους της επεξεργασίας σε τοπικό επίπεδο, Edge Computing, μειώνει την εξάρτηση από κεντρικές υποδομές και ενισχύει την ανθεκτικότητα σε συνθήκες κρίσης; Η επιλογή αυτή έχει άμεσες επιπτώσεις στην ενεργειακή κατανάλωση, στην καθυστέρηση απόκρισης και τελικά στην εμπειρία ασφάλειας του χρήστη.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο και Νομοθεσία

2.1 Cyber-Physical Systems ως υποδομές αστικής ανθεκτικότητας

Οι Έξυπνες Πόλεις συνήθως εστιάζουν σε εφαρμογές και υπηρεσίες, παραβλέποντας το αρχιτεκτονικό υπόστρωμα που τις καθιστά εφικτές. Στη βάση τους βρίσκονται τα Cyber-Physical Systems τα οποία είναι αυτά που συνδέουν αισθητήρες, δίκτυα και αλγορίθμους με τον φυσικό κόσμο [4]. Δεν πρόκειται απλώς για διασύνδεση συσκευών όμως αφορά τη συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ ψηφιακής αναπαράστασης και υλικής πραγματικότητας.

Σε αστικά περιβάλλοντα, αυτή η σύγκλιση μετασχηματίζει τον τρόπο άσκησης διοίκησης. Με βάση την «παράδοση», η διαχείριση της πόλης βασιζόταν σε υποδομές η οποίες είναι στατικές και σε αναφορές δεδομένων που είναι καθυστερημένες. Με τα CPS, η πληροφορία συλλέγεται, μετά επεξεργάζεται και έπειτα αξιοποιείται σε πραγματικό χρόνο. Η κυκλοφορία ρυθμίζεται δυναμικά, μόλις η κατανάλωση ενέργειας προσαρμόσθει στις ανάγκες, τότε τα δημόσια κτίρια αποκτούν «συνείδηση» της κατάστασής τους. Τότε το αντιδραστικό μοντέλο της διοίκησης γίνεται αντιδραστικό.

Σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης αυτό που έχει πρακτική σημασία είναι το γεγονός ότι το κτίριο μπορεί να γνωρίζει πού βρίσκονται οι άνθρωποι, τι συμβαίνει και πώς να τους κατευθύνει, όλα σε πραγματικό χρόνο.

Παράλληλα όμως ανακύπτει και το ζήτημα της ανθεκτικότητας. Μια πόλη υπολογίζεται ως ανθεκτική όταν διατηρεί τις κρίσιμες λειτουργίες της ακόμα και όταν της ασκείται πίεση, δηλαδή είτε σε σεφυσική καταστροφή, είτε σε τεχνολογική αστοχία είτε σε μαζική διακοπή επικοινωνιών. Αν η λήψη αποφάσεων εξαρτάται αποκλειστικά από κεντρικούς διακομιστές, η αστοχία ενός κόμβου μπορεί να αποσταθεροποιήσει ολόκληρο το σύστημα. Εδώ ακριβώς αναδεικνύεται η σημασία του Edge Computing: με τη μεταφορά μέρους της επεξεργασίας στην «άκρη» του δικτύου, μειώνεται η καθυστέρηση απόκρισης και περιορίζεται η εξάρτηση από κεντρικές υποδομές.

2.2 Έξυπνη πόλη και ψηφιακές υπηρεσίες ασφάλειας

Συνήθως μια έξυπνη πόλη αξιοποιεί τις τεχνολογίες που αφορούν και βασίζονται στην πληροφορία και επικοινωνία με σκοπό να βελτιώσει την ποιότητα ζωής των πολιτών και να καταστήσει τις δημόσιες υπηρεσίες πιο αποδοτικές [6]. Η δημόσια ασφάλεια, τα συστήματα που βασίζονται σε IoT έχουν επιδείξει αξιοσημείωτες δυνατότητες. Επίσης μια πρόσφατη μελέτη [7], που αφορά ένα πρωτότυπο σύστημα έξυπνης πόλης κατάφερε να πετύχει μια μέση καθυστέρηση ειδοποίησης μικρότερη των 450ms σε τέσσερα διαφορετικά σενάρια έκτακτης ανάγκης, επιβεβαιώνοντας ότι η ενσωμάτωση IoT σε αστικές υπηρεσίες ασφάλειας είναι τεχνικά ώριμη.

2.3 Βιώσιμη αστική κινητικότητα και μικρο-δρομολόγηση

Στην «ιστορία» έχει μείνει ότι η Βιώσιμη Αστική Κινητικότητα έχει συνδεθεί με τη μείωση της χρήσης ιδιωτικών οχημάτων και την ενίσχυση των μέσων μαζικής μεταφοράς. Μια τέτοια οπτική όμως παραμένει ελλιπής αν δεν συμπεριλάβει τη μικροκλίμακα της κίνησης: τον πεζό, το άτομο με αμαξίδιο, τον πολίτη με περιορισμένη όραση που διασχίζει έναν δημόσιο χώρο.

Στο πλαίσιο όμως των Έξυπνων Πόλεων, η κινητικότητα αποκτά έναν χαρακτήρα πολλών επιπέδων. Σε μακρο-επίπεδο συχνά αναλύονται πολλές ροές πληθυσμού μεταξύ περιοχών ενώ σε μικρο-επίπεδο εξετάζεται η διαδρομή η οποία γίνεται μέσα σε ένα κτίριο ή σταθμό μετρό. Εκεί

αναδύεται η έννοια της μικρο-δρομολόγησης που αφορά την βελτιστοποίηση της κίνησης σε περιορισμένο, σύνθετο και συχνά δυναμικό περιβάλλον.

Η εκκένωση ενός δημόσιου κτιρίου είναι, από μαθηματική άποψη, πρόβλημα δρομολόγησης υπό περιορισμούς. Η βασική μορφή δηλαδή η εύρεση συντομότερης διαδρομής σε γράφημα είναι γνωστή. Όταν όμως γίνει εισαγωγή παραμέτρων σαν το πλάτος διαδρόμων, την κλίση ραμπών, τα προσωρινά εμπόδια ή την συμφόρηση, το πρόβλημα μετασχηματίζεται σε βελτιστοποίηση πολλών κριτηρίων. Η διαδρομή που είναι πιο σύντομη ενδέχεται να μην είναι και η πιο ασφαλής, και η πιο «ασφαλέστερη» δεν είναι απαραίτητα αυτή που είναι προσβάσιμη.

Για έναν χρήστη με αμαξίδιο, η κλίση ράμπας πάνω από συγκεκριμένο όριο καθιστά τη διαδρομή πρακτικά αδύνατη. Για άτομο με οπτική αναπηρία, η έλλειψη απτικών οδηγιών ή η ύπαρξη αιφνίδιων εμποδίων μετατρέπει έναν διάδρομο σε επικίνδυνο πεδίο. Οι φυσικές ιδιότητες του χώρου λειτουργούν ως αυστηροί περιορισμοί στο γράφημα πλοήγησης, και ο αλγόριθμος οφείλει να τις ενσωματώνει ως θεμελιώδεις μεταβλητές και όχι ως δευτερεύουσες παραμέτρους.

2.4 Ανάγκες ΑμεΑ κατά την εκκένωση

Στο σημείο αυτό να πούμε ότι τα άτομα με κινητικά προβλήματα αντιμετωπίζουν συνδυασμό εμποδίων η οποία καθιστά την εκκένωση ιδιαίτερα δύσκολη. Η πιο κρίσιμη δυσκολία είναι η αδυναμία χρήσης κλιμακωστών το γεγονός που αφορά όλους τους χρήστες αναπηρικού αμαξιδίου. Επιπροσθέτως η μειωμένη ταχύτητα μετακίνησης δημιουργεί συγκρούσεις με τις ροές εκκένωσης του γενικού πληθυσμού, ενώ η έλλειψη εξειδικευμένης πληροφόρησης για τις προσβάσιμες διαδρομές και τις Ζώνες Αναμονής Διάσωσης επιδεινώνει το πρόβλημα [2].

Έρευνα με πραγματικά πειράματα εκκένωσης [8] κατέδειξε ότι τα άτομα που βιώνουν συναγερμό πυρκαγιάς συχνά αισθάνονται σύγχυση και θέλουν απλώς κάτι που να τους δείχνει πού να πάνε και τι συμβαίνει. Αυτό το εύρημα βρίσκεται στον πυρήνα της λογικής σχεδιασμού του SafeEvac.

2.5 Τεχνολογίες IoT και συστήματα εσωτερικού εντοπισμού

Εν συνεχεία, η ακρίβεια του εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για οποιοδήποτε σύστημα μικρο-δρομολόγησης σε δημόσια κτίρια. Σε αντίθεση με το εξωτερικό περιβάλλον, όπου τα δορυφορικά συστήματα παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια, το εσωτερικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από την απώλεια του σήματος, τις ανακλάσεις και τα δομικά εμπόδια [10]. Τα Bluetooth Low Energy beacons αναδεικνύονται ως ελκυστική λύση και πρόκειται για μικρές συσκευές που εκπέμπουν περιοδικά σήματα χαμηλής ισχύος, τα οποία είναι ανιχνεύσιμα από κινητά. Η λειτουργία τους βασίζεται στη μέτρηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (RSSI), από την οποία εκτιμάται η απόσταση μεταξύ χρήστη και beacon [11]. Με κατάλληλη τοποθέτηση πολλαπλών πομπών, η ακρίβεια εντοπισμού είναι ικανή να φτάσει τα 0,43–2 μέτρα.

Επίσης τα πλεονεκτήματα δεν είναι μόνο τεχνικά. Ας πούμε, η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση επιτρέπει την πολυετή λειτουργία με μία μπαταρία και έτσι μειώνει δραστικά το κόστος της συντήρησης. Επιπροσθέτως η εγκατάσταση είναι απλή και δεν απαιτεί εκτεταμένες καλωδιώσεις, και αυτός είναι καθοριστικός παράγοντας για δημόσια κτίρια με περιορισμένους πόρους.

Η πρακτική εφαρμογή όμως αποκαλύπτει και σημαντικές προκλήσεις. Το φαινόμενο multipath fading δηλαδή ότι οι πολλαπλές ανακλάσεις του σήματος σε τοίχους και μεταλλικές επιφάνειες οδηγούν σε διακυμάνσεις οι οποίες δεν αντιστοιχούν γραμμικά στην απόσταση. Παρεμβολές από Wi-Fi και κινητές συσκευές επιβαρύνουν το φάσμα, προκαλώντας αστάθεια στις μετρήσεις RSSI. Όμως η αλγοριθμική επεξεργασία καλείται να εξομαλύνει τον θόρυβο μέσω φίλτρων όπως Kalman filters ή moving averages.

Εδώ να προσθέσω ότι έρευνα εστιασμένη ειδικά σε χρήστες με αναπηρία [8] επιβεβαίωσε ότι δίκτυο BLE beacons σε συνδυασμό με mobile εφαρμογή αποτελεί πρακτικά εφαρμόσιμη λύση σε πολυόροφα κτίρια. Ο συνδυασμός BLE με Pedestrian Dead Reckoning μέσω των ενσωματωμένων αισθητήρων του smartphone αποτελεί ανερχόμενη προσέγγιση που επιτυγχάνει αξιόπιστη πλοήγηση ανεξάρτητα από εξωτερική υποδομή.

2.6 BIM, Digital Twins και σημασιολογική μοντελοποίηση χώρου

Συνήθως υπάρχει παρερμηνεία σχετικά με το Digital Twin και το θεωρούμε ως συνώνυμο ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Όμως στην ουσία του, είναι μια δυναμική ψηφιακή οντότητα που συγχρονίζεται διαρκώς με τη φυσική της αναφορά, αντανακλώντας μεταβολές και ροές δεδομένων σε πραγματικό χρόνο [13]. Δεν αναπαριστά απλώς τον χώρο αλλά αποτελεί υπολογιστικό ισοδύναμο του.

Σε περιβάλλον Έξυπνης Πόλης, ένα δημόσιο κτίριο εφοδιασμένο με αισθητήρες IoT παράγει συνεχώς δεδομένα: θερμοκρασία, καπνό, πυκνότητα πληθυσμού, κατάσταση εξόδων. Το Digital Twin ενοποιεί αυτές τις ροές, μετατρέποντας αποσπασματικά σήματα σε συνεκτική εικόνα. Αυτό επιτρέπει όχι μόνο παρακολούθηση, αλλά και προσομοίωση σεναρίων.

Το κρίσιμο στοιχείο για την παρούσα εργασία δεν είναι η γεωμετρία του μοντέλου, αλλά η σημασιολογική του διάσταση. Δεν αρκεί μια γραμμή να αποτυπώνει ένα αρχιτεκτονικό στοιχείο αλλά το σύστημα οφείλει να «κατανοεί» αν πρόκειται για σκάλα, ράμπα ΑμεΑ, έξοδο κινδύνου ή απλό διάδρομο [12]. Η διάκριση αυτή επιτρέπει στον αλγόριθμο πλοήγησης να ενσωματώνει περιορισμούς και προτιμήσεις.

Η σημασιολογική πληροφορία μετασχηματίζει το μοντέλο από γεωμετρικό σχήμα σε δομημένο γράφημα με ιδιότητες. Κάθε κόμβος και κάθε ακμή φέρει μεταδεδομένα: πλάτος, κλίση, επιτρεπόμενη χρήση, προσβασιμότητα. Έτσι, μια ράμπα μπορεί να χαρακτηριστεί ως κατάλληλη για χρήστες με κινητική αναπηρία, ενώ μια σκάλα αποκλείεται αυτόματα από τη διαδρομή που προτείνεται σε άτομο με αμαξίδιο.

Η διασύνδεση με το BIM ενισχύει αυτή τη δυνατότητα. Το BIM παρέχει λεπτομερή πληροφορία για τα δομικά στοιχεία, τα υλικά και τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός κτιρίου σε ψηφιακή μορφή. Όταν το BIM μοντέλο ιδίως μέσω της ανοιχτής μορφής IFC (ISO 16739) [20] ενσωματώνεται σε ένα ευρύτερο Digital Twin, η γεωμετρική ακρίβεια συναντά τη λειτουργική ευφυΐα.

Στην παρούσα έρευνα, το Digital Twin λειτουργεί ως το στρώμα γνώσης του Cyber-Physical συστήματος. Οι BLE αισθητήρες παρέχουν δεδομένα θέσης και η σημασιολογική μοντελοποίηση μετατρέπει αυτά τα δεδομένα σε ουσιαστικές διαδρομές. Η γεφύρωση αυτή αποτελεί τον πυρήνα της τεχνολογικής πρότασης.

2.7 Νομοθετικό πλαίσιο και προστασία δεδομένων

Στο νομοθετικό πλαίσιο που αφορά την προσβασιμότητα και ασφάλεια ΑμεΑ είναι πολυεπίπεδο. Σε διεθνές όμως επίπεδο, το Άρθρο 11 της Σύμβασης του ΟΗΕ για τα Δικαιώματα των Ατόμων με Αναπηρία (CRPD, 2006) [9] θεσπίζει την ρητή υποχρέωση των κρατών να διασφαλίζουν την προστασία ΑμεΑ σε καταστάσεις κινδύνου. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο τώρα, η Ευρωπαϊκή Πράξη Προσβασιμότητας (2019/882/ΕΕ) [3], που τέθηκε σε πλήρη εφαρμογή τον Ιούνιο του 2025, επεκτείνει τις απαιτήσεις προσβασιμότητας στις ψηφιακές υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων των mobile εφαρμογών.

Στην Ελλάδα, το νομοθετικό πλαίσιο είναι σε πολλά πεδία. Ας πούμε το Π.Δ. 71/1988 που αφορά τον Κανονισμό Πυροπροστασίας [26], θέτει τις βασικές τεχνικές απαιτήσεις για εξόδους κινδύνου, διαδρόμους εκκένωσης και σημάσεις σε δημόσια κτήρια, αποτελώντας το θεμελιώδες πλαίσιο εντός του οποίου λειτουργεί κάθε σύστημα εκκένωσης. Ο Ν. 4067/2012 εξειδικεύει τις

τεχνικές προδιαγραφές για ράμπες και προσβάσιμες εξόδους, ενώ ο Ν. 4488/2017 ενισχύει τις εγγυήσεις για τα δικαιώματα των ατόμων με αναπηρία. Ο Ν. 4727/2020 για την Ψηφιακή Διακυβέρνηση [27] ενσωματώνει στην ελληνική έννομη τάξη την Οδηγία 2016/2102/ΕΕ, θεσπίζοντας υποχρεώσεις προσβασιμότητας για ψηφιακές υπηρεσίες δημόσιων φορέων — κατηγορία στην οποία εντάσσεται και μια εφαρμογή εκκένωσης δημόσιου κτηρίου. Η Εθνική Στρατηγική για τα Δικαιώματα των ΑμεΑ 2024-2030 [22] περιλαμβάνει ρητά τη ψηφιακή διακυβέρνηση και τη συλλογή δεδομένων προσβασιμότητας στους πυλώνες της.

Στο διεθνές πλαίσιο, αξίζει να σημειωθεί ότι η CRPD δεν περιορίζεται στο Άρθρο 11 που αφορά καταστάσεις κινδύνου. Το Άρθρο 9 [28] θεσπίζει υποχρέωση των κρατών να διασφαλίζουν την προσβασιμότητα στο φυσικό περιβάλλον, τις μεταφορές, και τις τεχνολογίες πληροφορίας και επικοινωνίας. Υπό αυτό το πρίσμα, μια εφαρμογή εκκένωσης που δεν είναι προσβάσιμη στον ίδιο τον χρήστη ΑμεΑ παραβιάζει όχι μόνο τεχνικά πρότυπα αλλά και διεθνείς δεσμεύσεις. Αυτή η διπλή απαίτηση, προσβάσιμη λειτουργία και προσβάσιμη διεπαφή, αποτέλεσε κριτήριο σχεδιασμού του SafeEvac και εξηγεί γιατί η συμμόρφωση με WCAG 2.1 δεν είναι επιλογή αλλά νομική υποχρέωση.

Η λειτουργία ενός συστήματος μικρο-δρομολόγησης βασίζεται σε επεξεργασία δεδομένων τοποθεσίας. Η συλλογή και ανάλυση δεδομένων θέσης εντός κτιρίου, ιδίως όταν συνδυάζεται με πληροφορίες για αναπηρία, εγείρει ζητήματα προστασίας προσωπικών δεδομένων. Ο GDPR θέτει αυστηρές προϋποθέσεις για τη νόμιμη επεξεργασία τέτοιων πληροφοριών.

Τα δεδομένα τοποθεσίας θεωρούνται δυνητικά ευαίσθητα, καθώς μπορούν να αποκαλύψουν πρότυπα συμπεριφοράς ή στοιχεία υγείας. Η πρόκληση είναι σαφής: πώς αξιοποιείται η πληροφορία σε πραγματικό χρόνο για την προστασία της ζωής, χωρίς να διακυβεύεται η ιδιωτικότητα; Η αρχή της ελαχιστοποίησης δεδομένων επιβάλλει τη συλλογή μόνο των απολύτως αναγκαίων πληροφοριών. Η ισορροπία επιτυγχάνεται μέσω τεχνικών ανωνυμοποίησης, ψευδωνυμοποίησης και τοπικής επεξεργασίας, ώστε τα δεδομένα να μην μεταφέρονται σε κεντρικά συστήματα πέραν του αναγκαίου. Η αρχή Privacy by Design, που ενσωματώνεται στον σχεδιασμό του SafeEvac, προϋποθέτει ότι οι μηχανισμοί προστασίας αποτελούν δομικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής και δεν αφορούν μιας μορφής προσθήκη εκ των υστέρων. Η συμμόρφωση με τις κατευθυντήριες οδηγίες WCAG 2.1 [15] επιπέδου AA εξασφαλίζει την προσβασιμότητα της ίδιας της εφαρμογής.

Κεφάλαιο 3: Σχετικές Εργασίες

3.1 Ψηφιακά συστήματα εκκένωσης κτηρίων

Η χρήση ψηφιακών τεχνολογιών για την υποστήριξη εκκένωσης κτηρίων έχει μελετηθεί από πολλές οπτικές γωνίες. Μια κατηγορία προσεγγίσεων επικεντρώνεται στην αξιοποίηση BIM μοντέλων για την αυτόματη δημιουργία γραφών εκκένωσης. Οι Deng et al. [12] παρουσίασαν ένα πλαίσιο που χρησιμοποιεί αρχεία IFC για την κατασκευή Geometry Network Model (GNM), το οποίο αξιοποιείται για δρομολόγηση σε συνθήκες πυρκαγιάς με ενσωματωμένο νευρωνικό δίκτυο για δυναμική αναπροσαρμογή της διαδρομής ανάλογα με την εξέλιξη της φωτιάς. Επίσης η εργασία αυτή, παρά την καινοτομία της, δεν εξετάζει σενάρια εκκένωσης ΑμεΑ ούτε παρέχει mobile διεπαφή χρήστη.

Σε πιο πρόσφατη εργασία, οι Valizadeh et al. [13] ενσωμάτωσαν BIM, GIS και Augmented Reality για την πλοήγηση εκκένωσης σε πολυόροφα κτίρια, αξιοποιώντας το IFC ως ενδιάμεση μορφή δεδομένων δηλαδή μια αρχιτεκτονική που αποτέλεσε σημείο αναφοράς για τον σχεδιασμό του SafeEvac. Η εργασία επιβεβαιώνει την τεχνική βιωσιμότητα της αλυσίδας IFC που οδηγεί σε γράφο και μετέπειτα σε δρομολόγηση, αναδεικνύει όμως ταυτόχρονα την ανάγκη για εξειδικευμένη αντιμετώπιση χρηστών με λειτουργικούς περιορισμούς το οποίο είναι κάτι που απουσιάζει από την εν λόγω εργασία.

3.2 Αλγόριθμοι δρομολόγησης για ΑμεΑ

Η εφαρμογή αλγορίθμων βέλτιστης διαδρομής σε σενάρια κινητικής αναπηρίας έχει διερευνηθεί κυρίως σε αστικά, εξωτερικά περιβάλλοντα. Σύμφωνα με το άρθρο [5], έγινε ανάπτυξη mobile εφαρμογής Android που αξιοποιεί τον αλγόριθμο Dijkstra με βάρη τα οποία αντιστοιχούν στο επίπεδο προσβασιμότητας κάθε τμήματος της διαδρομής έτσι επιτρέπει σε χρήστες αναπηρικού αμαξιδίου να επιλέξουν τη λιγότερο επίπονη και όχι απαραίτητα τη συντομότερη διαδρομή. Η ίδια λογική μεταφέρεται από το SafeEvac σε εσωτερικό χώρο, όπου τα βάρη των ακμών αντικατοπτρίζουν την προσβασιμότητα των συνδέσεων για παράδειγμα ράμπα, ανελκυστήρας, σκάλα.

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η πρόσφατη εργασία [14], η οποία παρουσίασε παραλλαγή Dijkstra με δυναμική προσαρμογή βαρών βάσει δεδομένων αισθητήρων δηλαδή πυκνότητα καπνού, ένταση φλόγας, συνωστισμός διαδρόμου και επιτρέποντας επαναπρογραμματισμό της διαδρομής σε πραγματικό χρόνο. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί φυσική μελλοντική επέκταση του SafeEvac, το οποίο στην παρούσα φάση χρησιμοποιεί μόνο στατικά βάρη.

Η σύνδεση εσωτερικής πλοήγησης με QR codes και αλγόριθμο Dijkstra έχει επίσης δοκιμαστεί σε πραγματικό περιβάλλον με αποτελέσματα τα οποία υποστηρίζουν την πρακτική βιωσιμότητα της προσέγγισης [20]. Το σκανάρισμα QR code στην είσοδο κάθε χώρου αποτελεί αξιόπιστη και χαμηλού κόστους μέθοδο για τον αρχικό εντοπισμό θέσης, ακριβώς όπως υλοποιείται στο SafeEvac.

3.3 Σύνοψη και τοποθέτηση της παρούσας εργασίας

Η ανωτέρω ανασκόπηση αναδεικνύει ότι, ενώ υπάρχουν σημαντικές εργασίες σε συγγενή πεδία BIM για εκκένωση και Dijkstra για ΑμεΑ και IoT για ειδοποίηση έκτακτης ανάγκης δεν εντοπίστηκε στη βιβλιογραφία κάποια εργασία που να συνδυάζει εξειδικευμένη υποστήριξη εκκένωσης κινητικά ΑμεΑ, αυτόματη εξαγωγή γραφού από IFC αρχείο, real-time εντοπισμό θέσης και διπλό ρόλο χρήστη (ΑμεΑ / Fire Warden) σε ένα ενιαίο σύστημα. Η παρούσα εργασία, λοιπόν, φιλοδοξεί να καλύψει αυτό το κενό, αξιοποιώντας τις θεωρητικές βάσεις των Cyber-Physical Systems και την πρακτική εμπειρία υλοποίησης που έχει συσσωρευτεί στο πεδίο.

Κεφάλαιο 4: Σχεδιασμός Εφαρμογής & Συστήματος

4.1 Λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις

Το θεωρητικό πλαίσιο για να φτάσει να γίνει υλοποίηση απαιτεί τον σαφή ορισμό των απαιτήσεων που θα καθοδηγήσουν τον σχεδιασμό. Στην περίπτωση του SafeEvac, οι απαιτήσεις προέκυψαν από τον συνδυασμό τριών πηγών, τη βιβλιογραφία για τις ανάγκες ΑμεΑ κατά την εκκένωση [2], τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας [3], και τη λογική λειτουργίας ανάλογων συστημάτων [12, 13].

Στη βιβλιογραφία των πληροφοριακών συστημάτων γίνεται διάκριση μεταξύ λειτουργικών και μη λειτουργικών απαιτήσεων. Οι πρώτες περιγράφουν τις βασικές λειτουργίες που πρέπει να επιτελεί το σύστημα, ενώ οι δεύτερες καθορίζουν τις ποιοτικές ιδιότητες υπό τις οποίες αυτές θα εκτελούνται. Η διάκριση αυτή, λοιπόν, επιτρέπει τη συστηματική αποτύπωση τόσο της επιχειρησιακής λογικής όσο και των τεχνικών περιορισμών ενός Cyber-Physical System.

Οι λειτουργικές απαιτήσεις διαμορφώθηκαν ως εξής. Το σύστημα αυτό πρέπει να επιτρέπει στον χρήστη να εγγραφεί και να επιλέξει τον ρόλο ο οποίος είναι είτε ΑμεΑ είτε Fire Warden. Κατά τη διάρκεια της εκκένωσης, ο χρήστης ΑμεΑ πρέπει να μπορεί να δηλώσει τη θέση του μέσω QR code ή αυτόματα μέσω BLE beacons, και επομένως να λάβει βήμα-βήμα οδηγίες που αποφεύγουν σκάλες και κατευθύνουν αποκλειστικά μέσω ραμπών, ανελκυστήρων και προσβάσιμων διαδρόμων. Η δυνατότητα αποστολής SOS είναι κρίσιμη και πρέπει να ειδοποιεί αμέσως τον Fire Warden με την ακριβή θέση του χρήστη.

Ο εντοπισμός θέσης αποτελεί πρωταρχική προϋπόθεση. Η λειτουργία αυτή βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ της κινητής συσκευής του χρήστη και του δικτύου BLE beacons. Μέσω επεξεργασίας των μετρήσεων RSSI, το σύστημα εκτιμά τη σχετική θέση και τη συσχετίζει με τον ψηφιακό χάρτη του κτιρίου. Η διαδικασία αυτή δεν είναι απλή γεωμετρική αντιστοίχιση αλλά προϋποθέτει συνεχή ενημέρωση του ψηφιακού μοντέλου.

Από την πλευρά του, ο Fire Warden χρειάζεται πρόσβαση σε real-time χάρτη που να εμφανίζει τις θέσεις όλων των εγγεγραμμένων χρηστών ΑμεΑ, με σαφή διάκριση μεταξύ εκείνων που αναμένουν βοήθεια και εκείνων που έχουν ήδη φτάσει σε ασφαλές σημείο. Αν ένας διάδρομος λοιπόν καταστεί μη προσπελάσιμος λόγω καπνού ή συμφόρησης, η πληροφορία πρέπει να μεταφέρεται στο μοντέλο και να επηρεάζει άμεσα τις προτεινόμενες διαδρομές.

Επίσης σε επίπεδο μη λειτουργικών απαιτήσεων, το σύστημα πρέπει να ανταποκρίνεται σε λιγότερο από δύο δευτερόλεπτα σε κρίσιμες λειτουργίες, να λειτουργεί σε offline λειτουργία για τις βασικές οδηγίες εκκένωσης σε περίπτωση απώλειας σύνδεσης, και να συμμορφώνεται με τις κατευθυντήριες οδηγίες WCAG 2.1 [15] επιπέδου AA. Η προστασία δεδομένων σύμφωνα με τον GDPR αποτελεί επίσης αναπόσπαστη απαίτηση, ιδίως ως προς τα δεδομένα θέσης. Ως στόχος τίθεται επίπεδο διαθεσιμότητας που προσεγγίζει το 99,9%, με μηχανισμούς ανοχής σφαλμάτων και δυνατότητα λειτουργίας ακόμα και σε συνθήκες μερικής απώλειας συνδεσιμότητας. Η αξιοποίηση αρχιτεκτονικών Edge Computing συμβάλλει καθοριστικά προς αυτή την κατεύθυνση.

4.2 Σενάρια χρήσης (Use Cases)

Η ανάλυση σεναρίων χρήσης μεταφράζει τις αφηρημένες απαιτήσεις σε συγκεκριμένες αλληλεπιδράσεις μεταξύ χρηστών και τεχνολογικής υποδομής. Επιπροσθέτως σε ένα Cyber-Physical σύστημα που συνδυάζει αισθητήρες IoT, BIM μοντέλο και mobile εφαρμογή, τα σενάρια χρήσης αποτυπώνουν τη δυναμική σχέση μεταξύ φυσικού χώρου, ψηφιακής αναπαράστασης και ανθρώπινης συμπεριφοράς.

Στο πρώτο σενάριο εξετάζεται η αρχική επαφή του χρήστη με το σύστημα κατά την είσοδό του στο κτίριο. Η κινητή συσκευή ανιχνεύει τα σήματα των BLE beacons και υπολογίζει την κατά

προσέγγιση θέση. Αμέσως μετά, η εφαρμογή ζητά από τον χρήστη να ορίσει ή να επιβεβαιώσει το προφίλ προσβασιμότητας το οποίο είναι κρίσιμο βήμα που επιτρέπει στο σύστημα να κατανοήσει τους περιορισμούς κινητικότητας που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Το δεύτερο σενάριο αφορά την ενεργοποίηση του μηχανισμού εκκένωσης. Όταν το σύστημα πυρασφάλειας ενεργοποιήσει συναγερμό, οι αισθητήρες ανιχνεύουν το συμβάν και η πληροφορία μεταφέρεται στο BIM μοντέλο. Αποστέλλεται ειδοποίηση στις κινητές συσκευές των χρηστών εντός του κτιρίου και η εφαρμογή μεταβαίνει αυτόματα σε λειτουργία εκκένωσης. Με βάση τη θέση του χρήστη και το αποθηκευμένο προφίλ προσβασιμότητας, ενεργοποιείται ο αλγόριθμος πλοήγησης. Για χρήστη με αμαξίδιο, η διαδρομή περιλαμβάνει ράμπες και αποκλείει κλιμακοστάσια, ακόμα και αν αυτά βρίσκονται πιο κοντά.

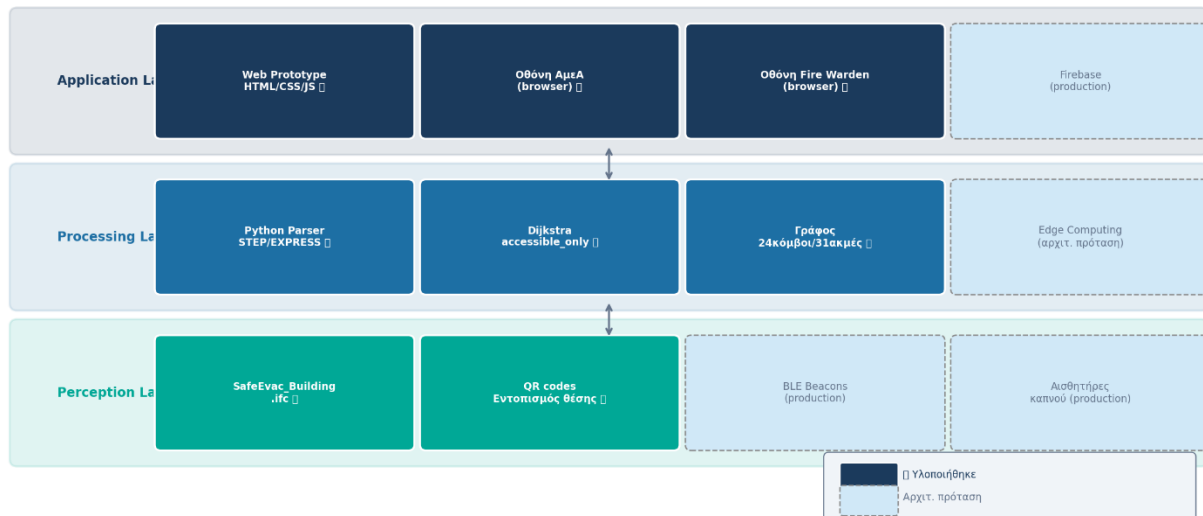
Το τρίτο σενάριο περιγράφει πιο σύνθετη κατάσταση: η αρχικά προτεινόμενη διαδρομή καθίσταται μη ασφαλής λόγω απρόβλεπτων μεταβολών. Ένας αισθητήρας εντοπίζει αυξημένη συγκέντρωση καπνού σε συγκεκριμένο διάδρομο. Η πληροφορία αποστέλλεται στο μοντέλο, που ενημερώνει το σύστημα να αποκλείσει τη διαδρομή. Η εφαρμογή λαμβάνει την ενημέρωση και επανυπολογίζει τη βέλτιστη διαδρομή.

4.3 Αρχιτεκτονική συστήματος

Η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής ενός Cyber-Physical συστήματος για αστικό περιβάλλον απαιτεί σαφή διαχωρισμό επιπέδων λειτουργίας. Στην παρούσα εργασία υιοθετείται μοντέλο τριών επιπέδων (3-tier architecture), που επιτρέπει τη διακριτή διαχείριση αισθητήρων, υπολογιστικής επεξεργασίας και διεπαφής χρήστη.

Επίσης στο χαμηλότερο επίπεδο βρίσκεται το Perception Layer, που περιλαμβάνει τις συσκευές συλλογής δεδομένων: τα BLE beacons σε κομβικά σημεία του κτιρίου και πιθανοί περιβαλλοντικοί αισθητήρες καπνού ή θερμοκρασίας. Κάθε beacon εκπέμπει περιοδικά πακέτα Bluetooth χαμηλής ισχύος με μοναδικό αναγνωριστικό κωδικό (UUID). Η κατεύθυνση της πληροφορίας είναι μονόδρομη και η συσκευή εκπέμπει και το περιβάλλον αποφασίζει πώς θα το αξιοποιήσει. Αυτό μειώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις και περιορίζει τους κινδύνους παραβίασης ιδιωτικότητας. Πάνω από το αισθητηριακό επίπεδο βρίσκεται το Processing Layer, όπου εκτελούνται οι αλγόριθμοι εντοπισμού θέσης, οι μηχανισμοί πλοήγησης και η διαχείριση του BIM μοντέλου. Το σήμα beacon φτάνει στην εφαρμογή, η οποία στέλνει τον αναγνωριστικό κωδικό στον διακομιστή. Εκεί γίνεται αντιστοίχιση με συγκεκριμένες συντεταγμένες στον χάρτη και η πληροφορία επιστρέφει στην εφαρμογή ως χωρική θέση. Σε συνθήκες κρίσης, η επεξεργασία μπορεί να μεταφερθεί σε κόμβους Edge Computing εντός του κτιρίου, διασφαλίζοντας τη λειτουργία ακόμα και χωρίς σύνδεση με απομακρυσμένα data centers. Στο ανώτερο επίπεδο βρίσκεται το Application Layer δηλαδή η mobile εφαρμογή μέσω της οποίας ο χρήστης αλληλεπιδρά με το σύστημα. Όμως εδώ μεταφράζεται η τεχνική πολυπλοκότητα σε κατανοητή εμπειρία χρήσης. Η εφαρμογή εμφανίζει τον χάρτη του κτιρίου, προβάλλει τη διαδρομή εκκένωσης και παρέχει οδηγίες πλοήγησης. Σε περίπτωση συναγερμού, μεταβαίνει αυτόματα σε λειτουργία εκκένωσης με σαφείς οδηγίες απομάκρυνσης.

Το SafeEvac υλοποιεί αυτή την αρχιτεκτονική με συγκεκριμένες τεχνικές επιλογές. Το επίπεδο παρουσίασης αποτελείται από τη mobile εφαρμογή με δύο διαφορετικές διεπαφές για ΑμεΑ και Fire Warden. Το επίπεδο λογικής περιλαμβάνει το backend που διαχειρίζεται την κατάσταση εκκένωσης, τη δρομολόγηση και τις ειδοποιήσεις. Στην προτεινόμενη production αρχιτεκτονική, το επίπεδο δεδομένων υλοποιείται με Firebase Realtime Database για αποθήκευση των θέσεων χρηστών και ιστορικού εκκένωσης, με επικοινωνία μέσω WebSocket για real time δεδομένα και REST API για στατικές πληροφορίες. Στο παρόν web prototype, η επικοινωνία αυτή προσομοιώνεται εντός της εφαρμογής, επιτρέποντας την επαλήθευση της λογικής δρομολόγησης χωρίς φυσική υποδομή. Η επιλογή της Firebase δικαιολογείται από την αποδεδειγμένη αξιοπιστία της σε συστήματα έκτακτης ανάγκης με χαμηλή καθυστέρηση ειδοποίησης [7].



Σχήμα.1. Αρχιτεκτονική 3-tier συστήματος SafeEvac

4.4 Ρόλοι χρηστών και ροές χρήσης

Η οργάνωση του συστήματος γίνεται γύρω από δύο βασικούς ρόλους. Ο χρήστης ΑμεΑ είναι το κεντρικό υποκείμενο της εφαρμογής και λαμβάνει εξατομικευμένες οδηγίες εκκένωσης, αποστέλλει SOS και ενημερώνεται για τον εκτιμώμενο χρόνο άφιξης βοήθειας. Ο Fire Warden έχει εποπτικό ρόλο δηλαδή βλέπει το σύνολο των χρηστών στον χάρτη και λαμβάνει ειδοποιήσεις SOS και συντονίζει τη διαδικασία.

Η ροή της εκκένωσης για τον χρήστη ΑμεΑ ξεκινά από τη λήψη ειδοποίησης, συνεχίζει με τη δήλωση θέσης, τη λήψη οδηγιών και την κατεύθυνση προς την Ζώνη Αναμονής ή την έξοδο, και ολοκληρώνεται είτε με την επιβεβαίωση ασφαλούς άφιξης είτε με την αποστολή SOS. Παράλληλα, ο Fire Warden παρακολουθεί τον χάρτη, λαμβάνει τις SOS ειδοποιήσεις κατά προτεραιότητα και κατευθύνεται προς τους χρήστες που χρειάζονται βοήθεια.

4.5 Σχεδιασμός διεπαφής χρήστη

Ο σχεδιασμός της διεπαφής ακολουθεί τις αρχές της καθολικής σχεδίασης, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ίδιοι οι χρήστες ενδέχεται να αντιμετωπίζουν κινητικά ή άλλα λειτουργικά προβλήματα. Όλα τα αλληλεπιδραστικά στοιχεία έχουν ελάχιστη επιφάνεια αφής δηλαδή 44x44 pixels σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του WCAG 2.1 [15]. Επίσης η χρωματική αντίθεση διατηρείται πάνω από 4.5:1 σε όλες τις οθόνες, ενώ κρίσιμες ειδοποιήσεις συνοδεύονται από ηχητικό σήμα και δόνηση. Επίσης το κουμπί SOS έχει σχεδιαστεί ιδιαίτερα μεγάλο και εμφανές, ώστε να μπορεί να ενεργοποιηθεί ακόμα και σε συνθήκες πανικού ή μειωμένης κινητικότητας.

Η εμπειρία του χρήστη δεν ξεκινά μέσα στο κτίριο αλλά ξεκινά έξω από αυτό. Στον αστικό χώρο η πλοήγηση βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στο GPS και σε υπηρεσίες χαρτογράφησης. Αυτό το μοντέλο καταρρέει μόλις ο χρήστης περάσει την είσοδο ενός δημόσιου κτιρίου τότε το GPS εξασθενεί, τα σήματα ανακλώνται στους τοίχους και η ακρίβεια πέφτει. Εδώ παρεμβαίνει το SafeEvac μέσω του μηχανισμού Indoor-Outdoor Handover. Καθώς ο χρήστης πλησιάζει την είσοδο, το κινητό αρχίζει να ανιχνεύει τα πρώτα σήματα από τα BLE beacons του εσωτερικού, ενώ ταυτόχρονα η

ακρίβεια GPS μειώνεται. Η εφαρμογή συγκρίνει αυτά τα δεδομένα, αναγνωρίζει ότι ο χρήστης βρίσκεται στην είσοδο και πραγματοποιεί τη μετάβαση αυτόματα και χωρίς να χρειαστεί να πατήσει τίποτα.

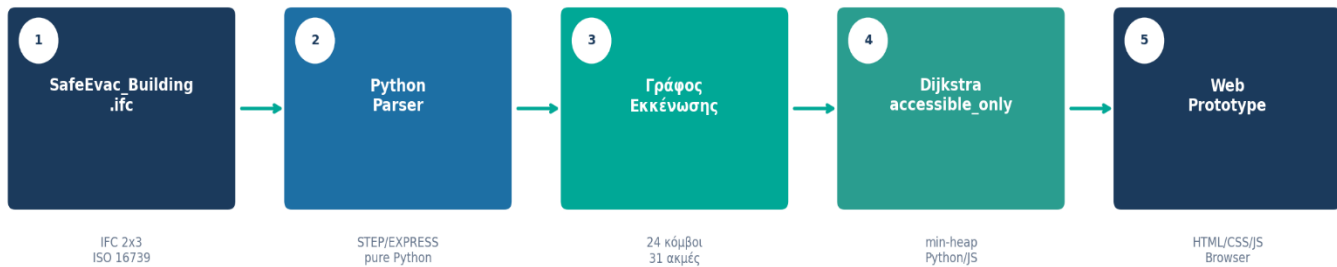
Το κρίσιμο σημείο είναι η στιγμή του handover: η εφαρμογή εγκαταλείπει την εξωτερική χαρτογράφηση και περνά στο εσωτερικό μοντέλο. Ο χρήστης βλέπει ξαφνικά την κάτοψη του ορόφου αντί του χάρτη της πόλης. Η μετάβαση αυτή δεν είναι απλώς αισθητική αλλά είναι γνωστική. Ο χρήστης περνά από τη λογική της μακρο-πλοήγησης στη λογική της μικρο-καθοδήγησης, κάτι που είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για τα άτομα με αναπηρία, καθώς η ανάγκη για βήμα-βήμα καθοδήγηση είναι ασύγκριτα μεγαλύτερη από εκείνη ενός αρτιμελούς χρήστη.

Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση Prototype

5.1 Επιλογή τεχνολογιών

Η επιλογή του τεχνολογικού stack βασίστηκε σε τρία κριτήρια τα οποία αφορούν την ταχύτητα ανάπτυξης, την cross-platform υποστήριξη και την αποδεδειγμένη αξιοπιστία σε ανάλογες εφαρμογές. Για την υλοποίηση του web prototype επιλέχθηκαν η Python και η HTML/CSS/Javascript αντίστοιχα. Για την production mobile εφαρμογή προτείνεται όμως η React Native, που επιτρέπει την ανάπτυξη μίας βάσης κώδικα για iOS και Android. Για το backend προτείνεται η Firebase [25], που προσφέρει real-time database, authentication και push notifications χωρίς να απαιτεί διαχείριση dedicated server μια επιλογή που δικαιολογείται και από τη χρήση της σε ανάλογα συστήματα έκτακτης ανάγκης [7]. Στο παρόν πρωτότυπο για τον εντοπισμό θέσης υλοποιήθηκε μέσω QR Code simulation ενώ σε production προτείνεται δύο-επίπεδο σχήμα, δηλαδή QR code σε κάθε χώρο και BLE beacons.

Για την ανάπτυξη του αλγορίθμου δρομολόγησης και των πρωτοτύπων προσομοίωσης επιλέχθηκε η Python. Όμως η επιλογή αυτή δεν είναι ουδέτερη, η Python προτιμάται για την ευελιξία της και τη βιβλιοθήκη εργαλείων που διαθέτει, όπως το networkx για επεξεργασία γραφημάτων, αλλά και για την παιδαγωγική της αξία: επιτρέπει διαφάνεια στον κώδικα και επεκτασιμότητα σε μελλοντικές βελτιώσεις. Η ίδια γλώσσα χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του custom STEP/EXPRESS parser που διαβάζει το IFC αρχείο.



Σχήμα.2. Αρχιτεκτονική pipeline υλοποίησης SafeEvac

5.2 Αλγόριθμος δρομολόγησης

Ο αλγόριθμος Dijkstra υλοποιήθηκε με priority queue (min-heap) για υπολογίσουμε την αποδοτικότητα. Η βασική καινοτομία σε σχέση με την κλασική εφαρμογή είναι ότι η λειτουργία accessible_only, όταν ενεργοποιείται, όπως συμβαίνει πάντα στη ροή εκκένωσης ΑμεΑ, αποκλείονται αυτόματα από τον γράφο όλες οι ακμές που αντιστοιχούν σε κλιμακοστάσια, ανεξαρτήτως βάρους. Έτσι εξασφαλίζεται ότι η διαδρομή που προτείνεται στον χρήστη αναπηρικού αμαξιδίου δεν περιλαμβάνει ποτέ σκάλες, ακόμα και αν αυτές θα ήταν η συντομότερη επιλογή. Η ίδια λογική έχει εφαρμοστεί και σε άλλες εργασίες προσβάσιμης δρομολόγησης [5, 14].

Η επιλογή του Dijkstra έναντι άλλων αλγορίθμων, όπως ο A*, τεκμηριώθηκε με συστηματικό πειραματικό benchmark που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6. Ο αλγόριθμος εγγυάται την εύρεση της συντομότερης διαδρομής σε γράφους οι οποίοι δεν αφορούν αρνητικά βάρη, πράγμα που είναι προϋπόθεση που ικανοποιείται πάντα στο πρόβλημά μας, καθώς κάθε διαδρομή εντός του κτιρίου έχει κόστος που εκφράζει απόσταση, δυσκολία, προσβασιμότητα ή κίνδυνο. Στο prototype δεν επιδιώχθηκε πολύπλοκος αλγόριθμος, αλλά μια λύση καθαρή, προβλέψιμη και εύκολη στην ερμηνεία.

Η σημασιολογική φύση του γραφήματος είναι αυτή που καθιστά τον αλγόριθμο πραγματικά ευέλικτο. Για έναν αρτιμελή χρήστη, μια σκάλα έχει μικρό κόστος επειδή κάνει πιο γρήγορη την μετάβαση μεταξύ ορόφων. Για χρήστη αμαξιδίου, η ίδια ακμή αλλάζει κατηγορία: το βάρος γίνεται άπειρο και η σκάλα παύει να υπάρχει στο γράφημα. Ο αλγόριθμος αναζητά αυτόματα εναλλακτική διαδρομή δηλαδή τη ράμπα, που παίρνει το μικρότερο βάρος. Έτσι λειτουργεί η προσβασιμότητα: όχι ως φίλτρο μετά τον υπολογισμό, αλλά μέσα στον ίδιο τον υπολογισμό. Όταν ενεργοποιηθεί συναγερμός, η ίδια λογική εφαρμόζεται για δυναμική αναπροσαρμογή. Το BIM μοντέλο ενημερώνεται αμέσως και οι αισθητήρες καπνού αλλάζουν το βάρος των ακμών. Ο αλγόριθμος επανυπολογίζει διαδρομή σε κλάσματα δευτερολέπτου. Η πράσινη γραμμή στην οθόνη του χρήστη αλλάζει κατεύθυνση και το σύστημα τον οδηγεί προς την επόμενη ασφαλή έξοδο. Παρακάτω παρουσιάζεται απλοποιημένο παράδειγμα της λογικής σε Python:

```
pythonimport networkx as nx
```

```
G = nx.Graph()
```

```
edges_wheelchair = [
```

```
    ("Είσοδος", "Διάδρομος_A", 1),
```

```
    ("Διάδρομος_A", "Σκάλες", float("inf")), # αποκλεισμός σκάλας
```

```
    ("Διάδρομος_A", "Ράμπα", 1),
```

```
    ("Ράμπα", "Εξοδος", 1),
```

```
]
```

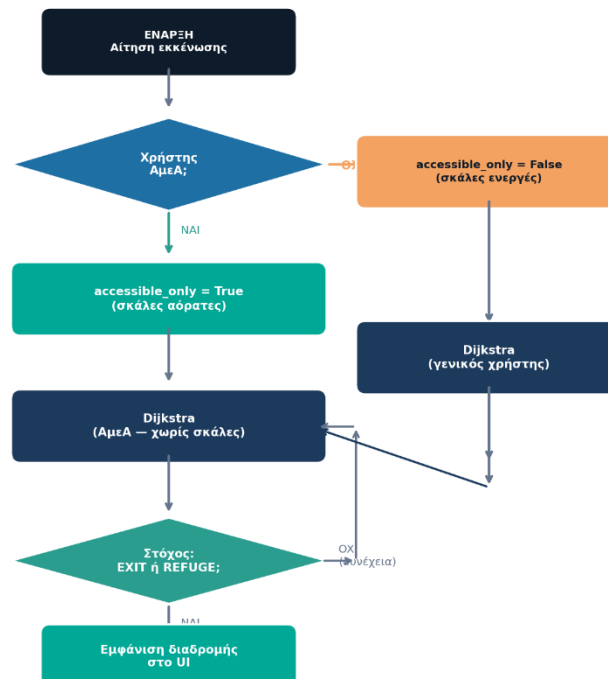
```
for u, v, w in edges_wheelchair:
```

```
    G.add_edge(u, v, weight=w)
```

```
path = nx.dijkstra_path(G, "Είσοδος", "Εξοδος", weight="weight")
```

```
cost = nx.dijkstra_path_length(G, "Είσοδος", "Εξοδος", weight="weight")
```

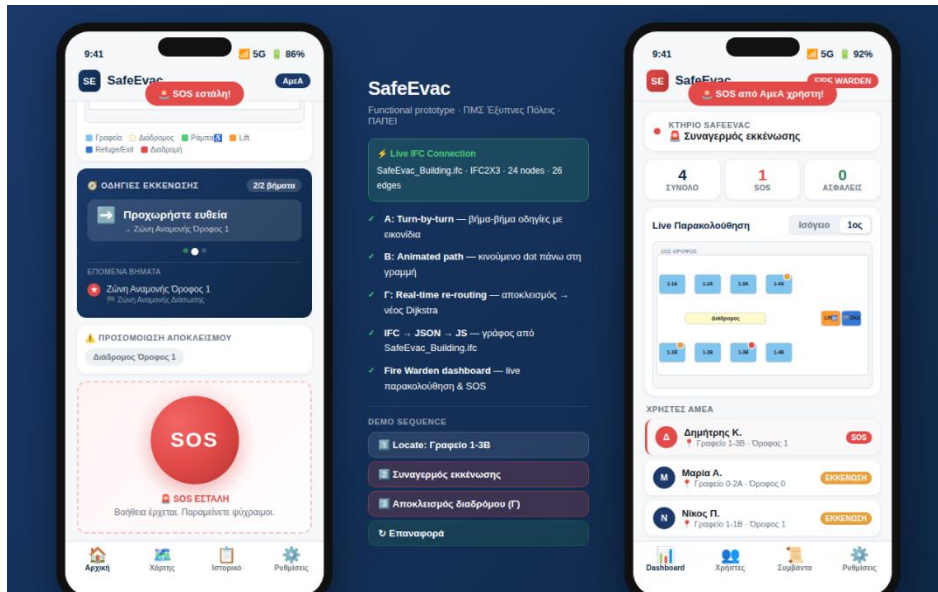
Η λογική είναι η ευθεία. Ο γράφος περιγράφει ένα κτίριο όπου ο χρήστης μπορεί να κινηθεί είτε προς τις σκάλες είτε προς τη ράμπα. Όταν το προφίλ είναι «αμαξίδιο», οι ακμές των σκαλών παίρνουν τιμή float("inf"). Δεν χρειάζεται να πούμε ρητά «μην περάσεις από τις σκάλες» αλλά ο Dijkstra το καταλαβαίνει από τα βάρη και στρέφεται μόνος του στη ράμπα. Δεν γράφεται ξεχωριστός αλγόριθμος για κάθε κατηγορία χρήστη αλλάζουν μόνο τα βάρη του γράφου. Το σύστημα παραμένει απλό, επεκτάσιμο και ευέλικτο.



Σχήμα.3. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Dijkstra με `accessible_only`

5.3 Module SOS και real-time επικοινωνία

Η λειτουργία SOS αποτελεί τον πιο κρίσιμο μηχανισμό του συστήματος από πλευράς ασφάλειας. Στην προτεινόμενη production υλοποίηση όταν ο χρήστης πατά το κουμπί SOS, εκτελούνται ταυτόχρονα τρεις ενέργειες, ενημερώνεται το Firebase Realtime Database με flag SOS στο προφίλ του χρήστη, αποστέλλεται push notification στον Fire Warden μέσω Firebase Cloud Messaging (FCM), και ενεργοποιείται ηχητικό σήμα στη συσκευή του χρήστη. Όμως στο web prototype η λογική αυτή προσομοιώνεται εντός της Javascript εφαρμογής. Το SOS flag ενημερώνει την κατάσταση της εφαρμογής και η οθόνη Fire Warden ανανεώνεται αμέσως, αποδεικνύοντας την λειτουργική ορθότητα του μηχανισμού. Η ταυτόχρονη εκτέλεση και των τριών ενεργειών εξασφαλίζει ότι η ειδοποίηση φτάνει στον Fire Warden ανεξαρτήτως της κατάστασης της εφαρμογής στη συσκευή του. Η προσέγγιση αυτή συμβαδίζει με βέλτιστες πρακτικές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για συστήματα ειδοποίησης έκτακτης ανάγκης [7].



Σχήμα.4 Αποστολή SOS

5.4 Δυναμική αναδρομολόγηση σε πραγματικό χρόνο

Σε μια εκκένωση, ο χάρτης δεν είναι στατικός και ούτε πρέπει να είναι. Μια διαδρομή που πριν από δύο δευτερόλεπτα ήταν ασφαλής μπορεί ξαφνικά να γίνει αδιέξοδο να υπάρξει δηλαδή καπνός σε έναν διάδρομο, φωτιά κοντά σε μια έξοδο, μπλοκαρισμένη πρόσβαση. Αν το σύστημα συνεχίσει να δείχνει την αρχική πορεία, αποτυγχάνει ακριβώς τη στιγμή που χρειάζεται περισσότερο. Στο SafeEvac η λογική είναι απλή. Ο χρήστης ξεκινά προς την Έξοδο Α. Ο αλγόριθμος έχει ήδη υπολογίσει τη βέλτιστη διαδρομή με βάση τα τρέχοντα βάρη. Ξαφνικά ενεργοποιείται ο αισθητήρας καπνού στον Διάδρομο 1. Το ψηφιακό μοντέλο μεταφράζει το συμβάν σε αλλαγή στο γράφημα: η ακμή που αντιστοιχεί σε αυτό το πέρασμα παίρνει βάρος float("inf"). Ο Dijkstra δεν χρειάζεται άλλη οδηγία και βλέπει το απαγορευτικό κόστος και ψάχνει αμέσως άλλη διαδρομή. Η αναδρομολόγηση δεν γίνεται με νέο κανόνα, αλλά με νέα δεδομένα:

python`def trigger_emergency(graph, blocked_edge, source, target):`

u, v = blocked_edge

if graph.has_edge(u, v):

graph[u][v]["weight"] = float("inf")

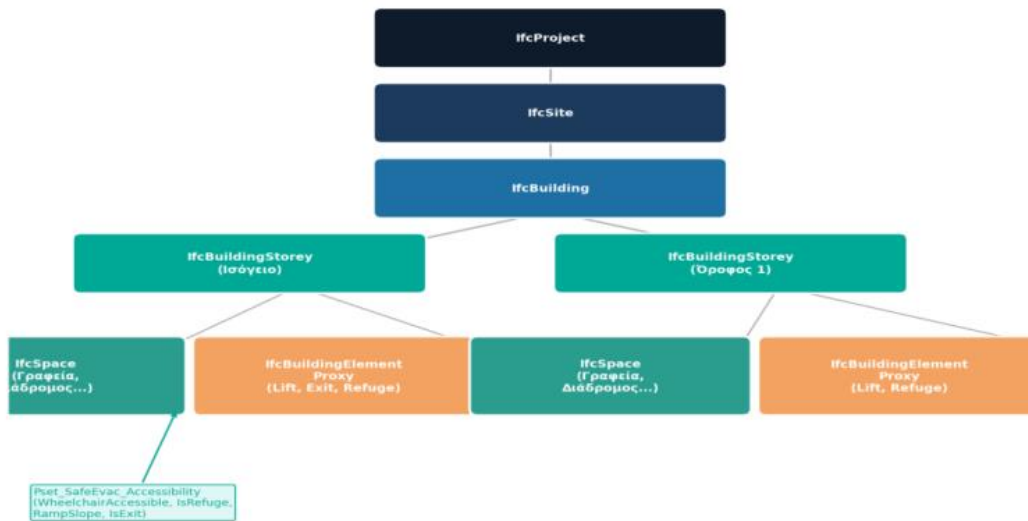
print(f"[ALERT] Η ακμή ({u} -> {v}) αποκλείστηκε λόγω κινδύνου.")

new_path = nx.dijkstra_path(graph, source, target, weight="weight")

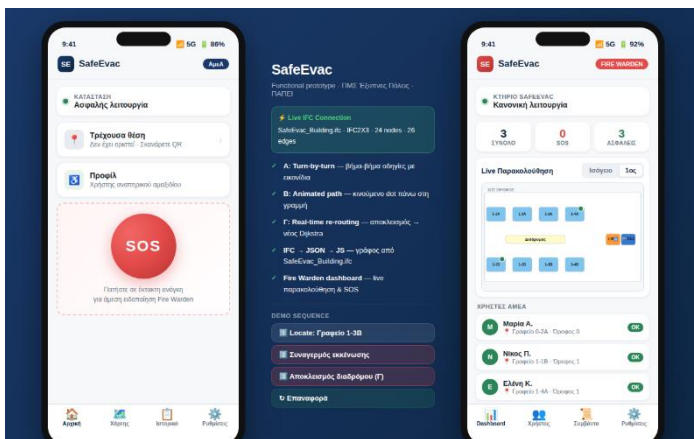
new_cost = nx.dijkstra_path_length(graph, source, target, weight="weight")

return new_path, new_cost

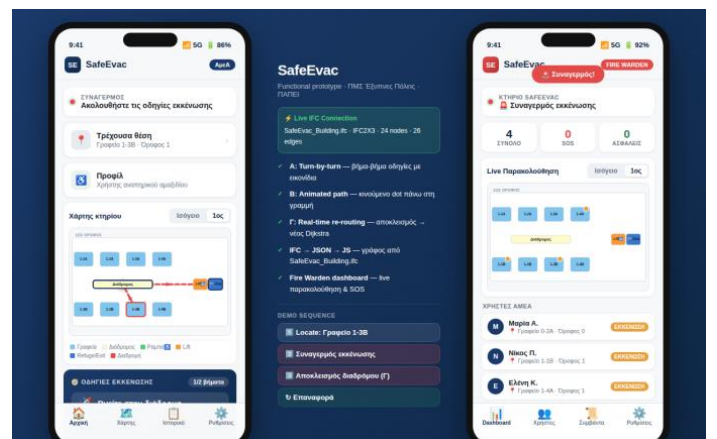
Συμβαίνει ένα γεγονός, το ψηφιακό μοντέλο ενημερώνει το γράφημα, ο αλγόριθμος επανυπολογίζει και η εφαρμογή αλλάζει οδηγίες. Όλη αυτή η ακολουθία εκτελείται σε κλάσματα δευτερολέπτου, ειδικά όταν η επεξεργασία τρέχει σε edge node μέσα στο ίδιο το κτίριο. Η πληροφορία δεν χρειάζεται να ταξιδέψει μακριά — το σύστημα αποφασίζει κοντά στο συμβάν.



Σχήμα 6. Ιεραρχία IFC μοντέλου SafeEvac_Building.ifc



Σχήμα.7 Αρχική οθόνη



Σχήμα.8 Συναγερμός + διαδρομή 1

Κεφάλαιο 6: Πειραματική Αξιολόγηση Αλγορίθμου

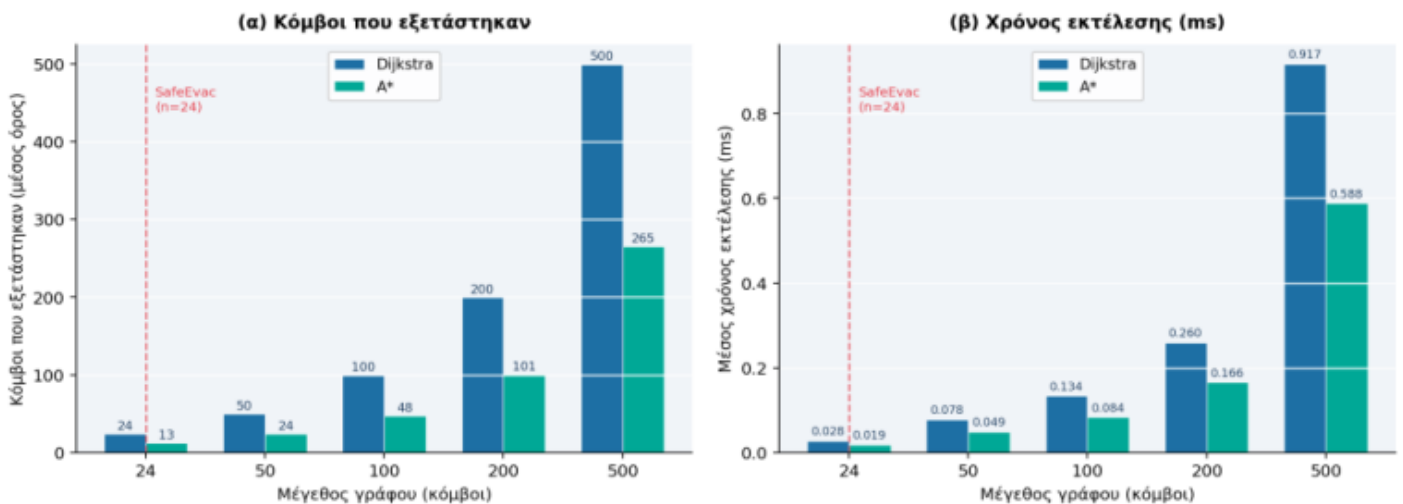
6.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Η επιλογή αλγορίθμου δρομολόγησης σε ένα σύστημα εκκένωσης δεν είναι απόφαση η οποία λαμβάνεται αυθαίρετα. Χρειάζεται κάποια τεκμηρίωση και αυτός είναι ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου, δηλαδή η συστηματική σύγκριση του Dijkstra με τον A* σε συνθήκες που αντιστοιχούν στο πραγματικό πρόβλημα του SafeEvac δηλαδή γράφος κτιρίου με προσβάσιμες και μη προσβάσιμες ακμές, στατικά και δυναμικά βάρη, και διαφορετικά μεγέθη δικτύου.

6.2 Αποτελέσματα στο SafeEvac μοντέλο

Στο γράφο του SafeEvac, που αποτελείται από 24 κόμβους και 31 ακμές, ο Dijkstra και ο A* παρήγαγαν πανομοιότυπες βέλτιστες διαδρομές. Η διαφορά εντοπίστηκε στον αριθμό των κόμβων που εξετάστηκαν δηλαδή ο Dijkstra εξέτασε 12 κόμβους, ο A* 9. Σε απόλυτους χρόνους εκτέλεσης, η διαφορά ήταν αμελητέα, της τάξεως των microseconds, χωρίς πρακτική σημασία για γράφο αυτού του μεγέθους.

Benchmark: Dijkstra vs A* — Scalability Test (360 runs × 5 μεγέθη = 1.800 runs)



Σχήμα.9 Benchmark Dijkstra vs A* — Scalability Test (1.800 runs)

6.3 Scalability Test

Για να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των αλγορίθμων σε μεγαλύτερα δίκτυα, δημιουργήθηκαν τυχαίοι γράφοι 50, 100, 200 και 500 κόμβων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο A* διατηρεί πλεονέκτημα σε μεγάλα δίκτυα όπου η ευρετική συνάρτηση είναι αξιόπιστη. Σε μικρά έως μεσαία δίκτυα τα οποία αντιστοιχούν στα περισσότερα δημόσια κτίρια, οι δύο αλγόριθμοι είναι ουσιαστικά ισοδύναμοι.

6.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Το κρίσιμο εύρημα δεν είναι η ταχύτητα, αλλά η προβλεψιμότητα. Ο Dijkstra εγγυάται βέλτιστη διαδρομή χωρίς να εξαρτάται από την ευρετική συνάρτηση, γεγονός που τον καθιστά πιο αξιόπιστο σε περιβάλλοντα όπου τα βάρη αλλάζουν δυναμικά. Ο A* βασίζεται σε εκτίμηση της απόστασης προς τον στόχο, αν αυτή η εκτίμηση αποκλίνει από την πραγματικότητα για παράδειγμα λόγω αποκλεισμού διαδρόμων τότε η απόδοσή του μπορεί να υποβαθμιστεί. Σε σενάριο εκκένωσης όπου οι συνθήκες αλλάζουν απότομα, αυτή η σταθερότητα έχει πρακτική αξία.

6.5 Συμπέρασμα

Τα αποτελέσματα του benchmark επιβεβαιώνουν την επιλογή του Dijkstra ως καταλληλότερου αλγορίθμου για το SafeEvac. Όχι επειδή είναι ταχύτερος, δεν είναι πάντα, αλλά επειδή είναι προβλέψιμος, απλός στην υλοποίηση και ανθεκτικός σε δυναμικές μεταβολές του γράφου. Σε ένα σύστημα που αφορά την ασφάλεια ανθρώπων, η προβλεψιμότητα έχει μεγαλύτερη αξία από την οριακή βελτίωση απόδοσης.

Κεφάλαιο 7: Αξιολόγηση

7.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης

Η αξιολόγηση του prototype πραγματοποιήθηκε μέσω τριών συμπληρωματικών μεθόδων, της ευριστικής αξιολόγησης βάσει των 10 αρχών του Nielsen [16], αξιολόγησης μέσω σεναρίων χρήσης, και πειραματικού benchmark του αλγορίθμου Dijkstra έναντι του A* που παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6. Η επιλογή αυτών των μεθόδων υπαγορεύτηκε από τον χαρακτήρα του prototype, που δεν επιτρέπει δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες εκκένωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αξιολόγηση βάσει σεναρίων είναι ευρέως αποδεκτή στην ακαδημαϊκή βιβλιογραφία για συστήματα έκτακτης ανάγκης, όπου η διεξαγωγή πραγματικών πειραμάτων εκκένωσης είναι ιδιαίτερα δύσκολη [2].

7.2 Σενάρια προσομοίωσης

Ένας αλγόριθμος αξιολογείται από τις δοκιμές του. Το ερώτημα δεν ήταν απλώς αν λειτουργεί ο κώδικας, αλλά πώς συμπεριφέρεται όταν οι συνθήκες αλλάζουν και πόσο γρήγορα αντιδρά όταν ένα κτίριο μετατρέπεται ξαφνικά σε περιβάλλον κρίσης. Για να απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα σχεδιάστηκαν τρία βασικά σενάρια προσομοίωσης.

Το πρώτο σενάριο λειτουργεί ως σημείο αναφοράς. Ο χρήστης βρίσκεται μέσα στο κτίριο και λαμβάνει ειδοποίηση εκκένωσης. Δεν υπάρχει φωτιά, δεν υπάρχουν μπλοκαρισμένες διαδρομές, το γράφημα παραμένει σταθερό. Για έναν αρτιμελή χρήστη, οι σκάλες έχουν μικρό κόστος και ο αλγόριθμος τις προτιμά. Για χρήστη αμαξιδίου, οι ίδιες ακμές έχουν άπειρο βάρος και αποκλείονται. Η διαδρομή περνά από τη ράμπα και οδηγεί στην έξοδο του ισογείου. Ο αλγόριθμος δεν αλλάζει, όμως αλλάζουν μόνο τα βάρη.

Στο δεύτερο σενάριο η κατάσταση αλλάζει δραστικά. Ο χρήστης ξεκινά να κινείται προς την Έξοδο Α μέσω του κεντρικού διαδρόμου. Στη μέση της διαδρομής ενεργοποιείται αισθητήρας καπνού. Το ψηφιακό μοντέλο λαμβάνει το συμβάν, η αντίστοιχη ακμή αποκτά άπειρο βάρος και ο Dijkstra εκτελείται ξανά. Η διαδικασία δεν απαιτεί επανεκκίνηση του συστήματος. Ο ίδιος γράφος χρησιμοποιείται με ενημερωμένα βάρη. Ο αλγόριθμος εντοπίζει νέα διαδρομή προς την Έξοδο Β, παρακάμπτοντας τον επικίνδυνο διάδρομο.

Το τρίτο σενάριο έλεγξε τη συμπεριφορά του συστήματος σε συνθήκες απώλειας σύνδεσης δικτύου. Η εφαρμογή ενεργοποίησε offline λειτουργία, διατήρησε ορατές τις τελευταίες οδηγίες εκκένωσης και απέστειλε αυτόματα το SOS μόλις αποκαταστάθηκε η σύνδεση.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο σενάριο εξετάστηκε χρήστης αναπηρικού αμαξιδίου στον 2ο όροφο κατά τη διάρκεια συναγερμού πυρκαγιάς. Η εφαρμογή εμφάνισε αυτόματα οδηγίες εκκένωσης μέσω ράμπας και κατεύθυνε τον χρήστη στη Ζώνη Αναμονής Διάσωσης σε 3 βήματα, με συνολικό κόστος διαδρομής 4.0 μονάδες. Το δεύτερο σενάριο αφορούσε τρεις ταυτόχρονους χρήστες ΑμεΑ σε διαφορετικούς ορόφους. Το σύστημα τους εξυπηρέτησε παράλληλα χωρίς προβλήματα, ενώ ο Fire Warden μπόρεσε να ιεραρχήσει τις ανάγκες βάσει των SOS ειδοποιήσεων.

7.3 Μετρικές αξιολόγησης

Η αξιολόγηση βασίστηκε σε δύο μετρικές. Η πρώτη είναι η ορθότητα της διαδρομής δηλαδή για κάθε σενάριο ελέγχθηκε αν η διαδρομή που προτείνει ο αλγόριθμος είναι προσβάσιμη και ασφαλής για τον συγκεκριμένο χρήστη, συγκρίνοντας την με την αναμενόμενη βέλτιστη πορεία στο γράφημα. Η δεύτερη είναι ο χρόνος επανυπολογισμού, μετρήθηκε το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να ενημερωθεί το γράφημα μετά από ένα συμβάν και να υπολογιστεί νέα διαδρομή. Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά και ο χρόνος επανυπολογισμού παρέμεινε στην κλίμακα των

milliseconds, που σημαίνει ότι η αλλαγή πορείας εμφανίζεται στον χρήστη σχεδόν αμέσως μετά την ανίχνευση κινδύνου.

7.4 Ευριστική αξιολόγηση (Nielsen)

Από τις 10 ευριστικές αρχές του Nielsen [16], το σύστημα πέρασε πλήρως τις 7. Σε τρεις αρχές εντοπίστηκαν σημεία βελτίωσης. Πρώτον, η ευελιξία για έμπειρους χρήστες, δεν υπάρχουν shortcuts. Δεύτερον, η διαχείριση σφαλμάτων τα μηνύματα σφάλματος θα μπορούσαν να είναι πιο περιγραφικά. Τρίτον, η ενσωματωμένη τεκμηρίωση δηλαδή δεν υπάρχει οδηγός χρήσης εντός εφαρμογής. Αυτά τα σημεία καταγράφονται ως προτεραιότητες βελτίωσης για μελλοντική έκδοση.

7.5 Αξιολόγηση προσβασιμότητας (WCAG 2.1)

Η εφαρμογή ελέγχθηκε ως προς τη συμμόρφωσή της με τα κριτήρια WCAG 2.1 επιπέδου AA [15]. Από τα 13 κριτήρια που εξετάστηκαν, τα 12 πληρούνται πλήρως. Το μοναδικό σημείο που χρειάζεται βελτίωση αφορά την υποστήριξη screen reader σε ορισμένες οθόνες του Fire Warden, κυρίως στον χάρτη real-time εντοπισμού. Αυτό αναμένεται να αντιμετωπιστεί σε επόμενη έκδοση με την προσθήκη εναλλακτικής κειμενικής λίστας χρηστών ΑμεΑ.

7.6 Συμπέρασμα αξιολόγησης

Οι δοκιμές έδειξαν ότι η προσέγγιση λειτουργεί. Σε όλα τα σενάρια, ο αλγόριθμος εντόπισε επιτυχώς την κατάλληλη διαδρομή εκκένωσης. Ακόμα και όταν αποκλείστηκαν βασικοί διάδρομοι, το σύστημα βρήκε εναλλακτική πορεία χωρίς να δημιουργήσει αδιέξοδο. Το ποσοστό επιτυχίας στην εύρεση εναλλακτικής διαδρομής ήταν 100% στα δοκιμαστικά σενάρια.

Το σημαντικότερο όμως δεν είναι αυτό το ποσοστό. Είναι η ταχύτητα αντίδρασης. Σε ένα περιβάλλον όπου οι συνθήκες αλλάζουν μέσα σε δευτερόλεπτα, η δυνατότητα επανυπολογισμού σε milliseconds σημαίνει ότι ο χρήστης δεν θα οδηγηθεί ποτέ προς επικίνδυνη κατεύθυνση.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα

8.1 Σύνοψη και συνεισφορά

Μια πόλη αποκαλύπτει τον πραγματικό της χαρακτήρα τη στιγμή της κρίσης. Τότε φαίνεται αν οι υποδομές της προστατεύουν όλους τους πολίτες ή μόνο εκείνους που μπορούν να κινηθούν γρήγορα. Η παρούσα εργασία ξεκίνησε από αυτή την παρατήρηση. Οι περισσότερες λύσεις έξυπνης πόλης επενδύουν στην αποδοτικότητα των συστημάτων, όχι απαραίτητα στην ασφάλεια των πιο ευάλωτων χρηστών. Το SafeEvac επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό.

Η κεντρική συνεισφορά της εργασίας είναι ο συνδυασμός, για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία, τεσσάρων στοιχείων σε ένα ενιαίο σύστημα: εξειδικευμένης υποστήριξης εκκένωσης ΑμεΑ, αυτόματης εξαγωγής γράφου από IFC αρχείο BIM, real-time εντοπισμού θέσης, και διπλού ρόλου χρήστη ΑμεΑ/Fire Warden. Κανένα από τα συστήματα που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 δεν συνδυάζει και τα τέσσερα αυτά στοιχεία. Το prototype συνδέει τρεις διαφορετικούς κόσμους: τον φυσικό χώρο του κτιρίου, το ψηφιακό του μοντέλο και την εμπειρία του χρήστη. Οι αισθητήρες IoT και τα BLE beacons λειτουργούν ως το αισθητηριακό σύστημα του κτιρίου. Το BIM μοντέλο μεταφράζει αυτά τα δεδομένα σε δυναμικό μοντέλο χώρου. Ο αλγόριθμος πλοήγησης, υλοποιημένος σε Python, επεξεργάζεται το γράφημα και υπολογίζει την ασφαλέστερη διαδρομή εκκένωσης. Στην επιφάνεια όμως ο χρήστης δεν βλέπει αυτή την πολυπλοκότητα αλλά βλέπει μια απλή γραμμή στην οθόνη του κινητού του που του δείχνει πού να κινηθεί, ποια στροφή να πάρει, ποια ράμπα να χρησιμοποιήσει.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν ότι το σύστημα ανταποκρίνεται στις βασικές απαιτήσεις: παρέχει προσβάσιμες διαδρομές χωρίς σκάλες, επικοινωνεί σε πραγματικό χρόνο με τον Fire Warden, λειτουργεί και σε offline λειτουργία, και συμμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό με τα κριτήρια WCAG 2.1 [15]. Αυτό ήταν το βασικό ζητούμενο, να μετατραπεί η έννοια της προσβασιμότητας από θεωρητική αρχή σε υπολογιστική λογική.

8.2 Κοινωνικός αντίκτυπος

Η τεχνολογία των Έξυπνων Πόλεων παρουσιάζεται συνήθως ως μέσο βελτιστοποίησης της κυκλοφορίας ή της ενεργειακής κατανάλωσης. Αυτά είναι σημαντικά αλλά δεν είναι το πιο ουσιαστικό. Η πραγματική αξία μιας έξυπνης πόλης φαίνεται όταν προστατεύει τους ανθρώπους που έχουν τη μεγαλύτερη ανάγκη.

Τα ΑμεΑ αντιμετωπίζουν συστηματικά δυσκολίες σε καταστάσεις εκκένωσης. Η έλλειψη κατάλληλης πληροφόρησης, η απουσία προσβάσιμων διαδρομών και η σύγχυση που επικρατεί σε μια κρίση δημιουργούν σοβαρούς κινδύνους. Η εφαρμογή που προτείνεται εδώ δεν ζητά από τον χρήστη να προσαρμοστεί στο κτίριο, αντίθετα ζητά από το κτίριο να προσαρμοστεί στον χρήστη. Αυτή η αρχή συνδέεται με ένα ευρύτερο αξιακό πλαίσιο: σε μια σύγχρονη κοινωνία, η ασφάλεια δεν μπορεί να είναι προνόμιο, πρέπει να σχεδιάζεται για όλους.

8.3 Περιορισμοί

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Πρώτον, η αξιολόγηση βασίστηκε σε σενάρια προσομοίωσης και όχι σε πραγματικές δοκιμές με χρήστες ΑμεΑ, περιορισμός που επισημαίνεται και σε άλλες εργασίες του πεδίου [2]. Δεύτερον, το BIM μοντέλο αφορά γενικό δημόσιο κτίριο και ενδέχεται να απαιτεί προσαρμογή για κτίρια με ιδιαίτερα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά. Τρίτον, ο αλγόριθμος Dijkstra χρησιμοποιεί στατικά βάρη στην παρούσα υλοποίηση, χωρίς να λαμβάνει υπόψη δυναμικές συνθήκες όπως η εξάπλωση φωτιάς ή ο συνωστισμός διαδρόμου σε πραγματικό χρόνο. Επίσης τεχνολογίες όπως Firebase, BLE beacons, REST API, WebSocket και React Native αποτελούν αρχιτεκτονικές προτάσεις για την production

υλοποίηση και δεν έχουν ενσωματωθεί στο παρόν web prototype, η επιλογή τους βασίζεται σε τεκμηριωμένα κριτήρια αξιοπιστίας, ιδίως για την Firebase (7, 25) και διαλειτουργικότητας αλλά η πλήρης υλοποίηση τους αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

8.4 Μελλοντική έρευνα

Οι πιο ενδιαφέρουσες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα αφορούν τρία επίπεδα.

Σε τεχνικό επίπεδο, η ενσωμάτωση δυναμικής αναπροσαρμογής των βαρών βάσει δεδομένων αισθητήρων, όπως έχει προταθεί στο άρθρο [14], θα βελτίωνε σημαντικά την ασφάλεια σε σενάρια πυρκαγιάς. Η προσθήκη μηχανισμών Pedestrian Dead Reckoning για συνεχή εντοπισμό θέσης ανεξάρτητα από την κάλυψη beacons αποτελεί επίσης προτεραιότητα.

Σε επίπεδο χρηστών, η διεξαγωγή πραγματικών δοκιμών με χρήστες αναπηρικού αμαξιδίου θα παρείχε δεδομένα αξιολόγησης πολύ υψηλότερης εγκυρότητας. Η συμμετοχή πραγματικών χρηστών στον σχεδιασμό, όχι μόνο στην αξιολόγηση, θα ενίσχυε περαιτέρω τον συμπεριληπτικό χαρακτήρα του συστήματος.

Σε επίπεδο εμβέλειας, η επέκταση σε αστικό επίπεδο που αναλύεται στο Κεφάλαιο 8 αποτελεί τη φιλοδοξότερη κατεύθυνση, καθώς μετασχηματίζει το SafeEvac από εργαλείο κτιρίου σε πλατφόρμα έξυπνης πόλης.

Μία από τις πιο ενδιαφέρουσες προοπτικές αφορά τη σύνδεση με τεχνολογίες V2X (Vehicle-to-Everything). Όταν ένας χρήστης ΑμεΑ ολοκληρώνει την εκκένωση κτιρίου, η εφαρμογή θα μπορεί να στέλνει το στίγμα του σε δημοτικά οχήματα εξοπλισμένα με V2X. Το όχημα θα γνωρίζει ακριβώς πού βρίσκεται ο χρήστης και θα μπορεί να τον προσεγγίσει για ασφαλή μεταφορά. Η εκκένωση δεν σταματά στην πόρτα του κτιρίου, συνεχίζεται στον αστικό χώρο.

Μια δεύτερη επέκταση αφορά τη διασύνδεση πολλών κτιρίων. Αν κάθε δημόσιο κτίριο διαθέτει το δικό του BIM μοντέλο και σύστημα πλοήγησης, αυτά τα συστήματα μπορούν να επικοινωνούν. Ένα συμβάν σε ένα κτίριο ενημερώνει τα γειτονικά και τις δημοτικές υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο. Ένα οικοδομικό τετράγωνο μετατρέπεται σε ενιαίο σύστημα αστικής ανθεκτικότητας.

Κεφάλαιο 9: Επέκταση — Αστική Εκκένωση ΑμεΑ

9.1 Από το κτήριο στην πόλη

Σε μεγάλης κλίμακας καταστροφές, σεισμοί, πλημμύρες, εκτεταμένες πυρκαγιές, η εκκένωση δεν αφορά ένα μεμονωμένο κτίριο αλλά ολόκληρες γειτονιές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα άτομα με κινητικά προβλήματα βρίσκονται σε δυσανάλογα μεγαλύτερο κίνδυνο και οι αποστάσεις μεγαλώνουν, ο συντονισμός γίνεται δυσκολότερος και η πολυπλοκότητα του αστικού χώρου αυξάνει εκθετικά τις δυσκολίες. Η κατηγορία των ατόμων με λειτουργικούς περιορισμούς είναι επίσης μεγαλύτερη σε αστικό επίπεδο επειδή περιλαμβάνει ηλικιωμένους, εγκύους και άτομα με προσωρινή αναπηρία.

Επίσης το IoT έχει ήδη αποδείξει τη χρησιμότητά του σε αστική διαχείριση εκτάκτων αναγκών. Συστήματα βασισμένα σε δίκτυα αισθητήρων μπορούν να παρέχουν έγκαιρες προειδοποιήσεις και να συντονίζουν επιχειρήσεις διάσωσης σε πραγματικό χρόνο [17]. Η ειδοποίηση ΑμεΑ μέσω κινητής εφαρμογής και δικτύων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (LPWAN) έχει δοκιμαστεί σε περιβάλλον έξυπνου campus [18], με αποτελέσματα που υποστηρίζουν την επεκτασιμότητα της προσέγγισης σε αστικό επίπεδο.

9.2 Αρχιτεκτονική αστικής εκκένωσης

Η επέκταση εισάγει τρεις νέους ρόλους στο σύστημα. Ο Συντονιστής Δήμου έχει εποπτεία ολόκληρης της περιοχής εκκένωσης και ενεργοποιεί τον συναγερμό. Ο Οδηγός λεωφορείου ή οχήματος λαμβάνει GPS πλοήγηση προς τα πλησιέστερα ΑμεΑ που χρειάζονται παραλαβή. Ο Εθελοντής πολίτης είναι ο πιο καινοτόμος από τους τρεις ρόλους και μπορεί να ενεργοποιηθεί από τον οποιοδήποτε και να αναλάβει την παραλαβή ενός ΑμεΑ από τη γειτονιά του.

Ο αλγόριθμος αντιστοίχισης που αναθέτει κάθε ΑμεΑ στον πλησιέστερο διαθέσιμο βοηθό λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο μέσω του Firebase [25]. Η λογική είναι απλή, κάθε ΑμεΑ που ενεργοποιεί αίτηση παραλαβής εμφανίζεται στον χάρτη ως διαθέσιμος στόχος. Εθελοντές και οδηγοί βλέπουν τα κοντινότερα ΑμεΑ και αναλαμβάνουν έναν. Μόλις ο βοηθός επιβεβαιώσει ανάληψη, ο στόχος αφαιρείται από τον χάρτη για να αποφευχθεί διπλή ανάθεση.

9.3 Σύνδεση με την έξυπνη πόλη

Η αστική επέκταση του SafeEvac υλοποιεί στην πράξη τρεις από τις βασικές αρχές της έξυπνης πόλης.

Πρώτον, η συμμετοχή πολιτών, η εφαρμογή μετατρέπει κάθε πολίτη με smartphone σε δυναμικό βοηθό, δημιουργώντας ένα crowdsourced δίκτυο διάσωσης. Αυτό ανταποκρίνεται στο μοντέλο της κοινωνικής έξυπνης πόλης, στο οποίο οι πολίτες δεν είναι απλώς αποδέκτες υπηρεσιών [6].

Δεύτερον, η real-time διακυβέρνηση, ο Συντονιστής Δήμου αποκτά για πρώτη φορά εργαλείο που του δίνει πλήρη εικόνα της κατάστασης ΑμεΑ στην περιοχή εκκένωσης.

Τρίτον, η ανθρωποκεντρική τεχνολογία, το σύστημα τοποθετεί τις πιο ευάλωτες ομάδες στο επίκεντρο της αστικής ψηφιακής υπηρεσίας, υλοποιώντας στην πράξη τις αρχές της Σύμβασης CRPD [9].

Η εφαρμογή Smart Safe City, όπως μπορεί να ονομαστεί η αστική επέκταση, δεν φιλοδοξεί να λύσει μόνη της το πρόβλημα της αστικής ασφάλειας. Δείχνει όμως μια κατεύθυνση, πώς το IoT, τα Digital Twins και οι αλγόριθμοι πλοήγησης μπορούν να συνεργαστούν για να δημιουργήσουν ένα περιβάλλον που προστατεύει πραγματικά τον πολίτη. Η προσβασιμότητα δεν είναι μόνο θέμα

αρχιτεκτονικής αλλά είναι θέμα υπολογιστικής σκέψης. Η πόλη του μέλλοντος δεν αρκεί να είναι έξυπνη. Πρέπει να είναι ανθεκτική.

Κεφάλαιο 10: Συμπέρασμα — Περίληψη

10.1 Σύνοψη της εργασίας

Η παρούσα διατριβή ξεκίνησε από μια απλή αλλά κρίσιμη διαπίστωση, ότι τα συστήματα εκκένωσης που σχεδιάζουμε για δημόσια κτήρια δεν σχεδιάζονται για όλους. Ο «μέσος χρήστης» που υποθέτει ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός είναι αρτιμελής, κινείται γρήγορα και μπορεί να χρησιμοποιήσει σκάλες. Για τον χρήστη αναπηρικού αμαξιδίου, η πιο κοντινή έξοδος μπορεί να είναι η πιο επικίνδυνη επιλογή.

Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε το SafeEvac, ένα λειτουργικό prototype συστήματος εκκένωσης που τοποθετεί τον χρήστη ΑμεΑ στο επίκεντρο του αλγοριθμικού σχεδιασμού. Το σύστημα αξιοποιεί BIM/IFC μοντελοποίηση επίσης τον αλγόριθμο Dijkstra με παράμετρο `accessible_only`, και web prototype με διπλό ρόλο χρήστη ΑμεΑ και Fire Warden. Παράλληλα αναπτύχθηκε custom Python parser που εξάγει αυτόματα τον γράφο εκκένωσης από το IFC αρχείο χωρίς εξωτερικές βιβλιοθήκες.

10.2 Κεντρικά ευρήματα

Τα ευρήματα της εργασίας οργανώνονται σε τέσσερις άξονες.

Πρώτον, αποδείχθηκε ότι η αλυσίδα BIM/IFC σε Python parser σε γράφος σε Dijkstra λειτουργεί. Ένα αρχείο IFC μπορεί να μετατραπεί αυτόματα σε γράφο εκκένωσης χωρίς εξωτερικές βιβλιοθήκες, αξιοποιώντας τη σημασιολογική πληροφορία που φέρουν τα IFC entities. Αυτό είναι τεκμηριωμένο εύρημα και όχι απλή υπόθεση.

Δεύτερον, η προσβασιμότητα μπορεί να ενσωματωθεί ως αλγοριθμική παράμετρος, όχι ως φίλτρο εκ των υστέρων. Η παράμετρος `accessible_only` εξασφαλίζει ότι η διαδρομή που προτείνεται σε χρήση αμαξιδίου δεν περιλαμβάνει ποτέ κλιμακοστάσια. Αυτό είναι εγγύηση by design, όχι εμπειρική παρατήρηση.

Τρίτον, το benchmark 1.800 runs Dijkstra vs A* επιβεβαίωσε την επιλογή του Dijkstra ως καταλληλότερου αλγορίθμου για το συγκεκριμένο πεδίο. Η προβλεψιμότητα και η ανθεκτικότητα σε δυναμικές μεταβολές βαρών έχουν μεγαλύτερη αξία από την οριακή ταχύτητα του A* σε συστήματα ασφάλειας ανθρώπων.

Τέταρτον, η αξιολόγηση έδειξε ότι το σύστημα πληροί τις βασικές απαιτήσεις: 7/10 ευριστικές αρχές Nielsen πλήρως, 12/13 κριτήρια WCAG 2.1, και 100% επιτυχία στα σενάρια εκκένωσης που δοκιμάστηκαν.

10.3 Θεωρητική και πρακτική συνεισφορά

Σε θεωρητικό επίπεδο, η εργασία τεκμηριώνει ότι ο συνδυασμός CPS, Digital Twins και αλγορίθμου πλοήγησης μπορεί να δημιουργήσει ένα σύστημα εκκένωσης που ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες των ΑμεΑ. Η σημασιολογική μοντελοποίηση του χώρου μέσω IFC δεν είναι απλώς τεχνική επιλογή, είναι αρχιτεκτονική αρχή που καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση της προσβασιμότητας στον πυρήνα του αλγορίθμου.

Σε πρακτικό επίπεδο, το νομοθετικό πλαίσιο που αναλύθηκε στο §2.7, CRPD Άρθρα 9 και 11 [9, 28], Ευρωπαϊκή Πράξη Προσβασιμότητας 2019/882/EE [3], Ν. 4727/2020 [27] και Π.Δ. 71/1988

[26] — θέτει σαφείς υποχρεώσεις για τους δημόσιους φορείς. Το SafeEvac δεν είναι μόνο τεχνολογικά εφικτό αλλά είναι και νομοθετικά αναγκαίο.

Η κεντρική συνεισφορά παραμένει ο συνδυασμός, για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία, τεσσάρων στοιχείων σε ένα ενιαίο σύστημα, εξειδικευμένης εκκένωσης ΑμεΑ, αυτόματης εξαγωγής γράφου από IFC, προσομοίωσης real-time επικοινωνίας, και διπλού ρόλου ΑμεΑ/Fire Warden. Κανένα από τα συστήματα που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 δεν συνδυάζει και τα τέσσερα [2, 12, 13].

10.4 Περιορισμοί και αυτοκριτική

Η εργασία δεν ισχυρίζεται ότι παρουσιάζει ένα production-ready σύστημα. Τεχνολογίες όπως Firebase, BLE beacons, REST API και React Native αποτελούν αρχιτεκτονικές προτάσεις για μελλοντική υλοποίηση και όχι υλοποιημένα στοιχεία του prototype, περιορισμός που αναφέρεται ρητά στο §8.3.

Επιπλέον, η αναδρομολόγηση στο σύστημα προϋποθέτει ότι ο χρήστης βρίσκεται σε κόμβο με εναλλακτικές διαδρομές. Σε γραφείο με μία μόνο έξοδο προς τον διάδρομο, ο αποκλεισμός του διαδρόμου δεν αφήνει εναλλακτική, αυτό αντικατοπτρίζει αρχιτεκτονικό περιορισμό του κτηρίου και όχι αδυναμία του αλγορίθμου.

Τέλος, η αξιολόγηση βασίστηκε σε σενάρια προσομοίωσης και όχι σε δοκιμές με πραγματικούς χρήστες αμαξιδίου. Αυτό αποτελεί τον πιο σημαντικό περιορισμό ως προς την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

10.5 Κλείσιμο

Το SafeEvac δεν επιχειρεί να λύσει ένα τεχνικό πρόβλημα. Επιχειρεί να αναδείξει ότι ένα κοινωνικό πρόβλημα που είναι η ανισότητα στην ασφάλεια κρίσεων, έχει τεχνική λύση που είναι εφικτή, τεκμηριωμένη και νομοθετικά υποχρεωτική.

Μια πόλη που επενδύει σε αισθητήρες κυκλοφορίας και αλγορίθμους ενέργειας αλλά αφήνει έναν χρήστη αμαξιδίου να αδυνατεί να εκκενώσει ένα δημόσιο κτήριο, δεν είναι έξυπνη αλλά είναι επιλεκτικά έξυπνη.

Η εγγύηση by design που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος `accessible_only` δεν είναι τεχνολογικό επίτευγμα όμως είναι απόδειξη ότι η προσβασιμότητα μπορεί να σταματήσει να είναι εκ των υστέρων σκέψη και να γίνει θεμελιώδης παράμετρος αρχιτεκτονικής, αλγοριθμικής, συστημικής και αστικής.

«Η πόλη του μέλλοντος δεν αρκεί να είναι έξυπνη. Πρέπει να είναι δίκαιη.»

Βιβλιογραφία

- [1] World Health Organization. (2023). Disability. WHO Fact Sheets <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>
- [2] Al Bochi, A., Roberts, B.W.R. et al. (2023). Evacuation solutions for individuals with functional limitations in the indoor built environment: A scoping review. *Buildings*, 13(11), 2779. <https://doi.org/10.3390/buildings13112779>
- [3] European Parliament. (2019). Directive (EU) 2019/882 — European Accessibility Act. *Official Journal of the European Union*, L 151, 70–115.
- [4] Zheng, H., Zhang, S., Zhu, J., Zhu, Z., & Fang, X. (2022). Evacuation in buildings based on BIM: Taking a fire in a university library as an example. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16254. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316254>
- [5] Arellano, L., Del Castillo, D., Guerrero, G., & Tapia, F. (2019). Springer. Mobile Application Based on Dijkstra's Algorithm, to Improve the Inclusion of People with Motor Disabilities Within Urban Areas https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-16184-2_22
- [6] European Commission. (2021). Smart cities and communities. Digital Single Market Strategy.
- [7] Zhang, H., Zhang, R., & Sun, J. (2025). Developing real-time IoT-based public safety alert and emergency response systems. *Scientific Reports*, 15, 29056. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13465-7>
- [8] Giannoumis, G. A., Gjørseter, T., Radianti, J., & Paupini, C. (2019). Universally designed beacon-assisted indoor navigation for emergency evacuations. In Y. Murayama, D. Velez, & P. Zlateva (Eds.), *Information Technology in Disaster Risk Reduction (IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 550)*, pp. 120–129. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32169-7_9
- [9] United Nations. (2006). Convention on the Rights of Persons with Disabilities (CRPD), Article 11. <https://www.un.org/development/desa/disabilities/convention-on-the-rights-of-persons-with-disabilities.html>
- [10] Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568–2599. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>
- [11] AL-Madani, B., Orujov, F., Maskeliūnas, R., Damaševičius, R., & Venčkauskas, A. (2019). Fuzzy logic type-2 based wireless indoor localization system for navigation of visually impaired people in buildings. *Sensors*, 19(9), 2114. <https://doi.org/10.3390/s19092114>
- [12] Deng, H., Ou, Z., Zhang, G., Deng, Y., & Tian, M. (2021). BIM and computer vision-based framework for fire emergency evacuation considering local safety performance. *Sensors*, 21(11), 3851. <https://doi.org/10.3390/s21113851>
- [13] Valizadeh, M., Ranjgar, B., Niccolai, A., Hosseini, H., Rezaee, S., & Hakimpour, F. (2024). Indoor augmented reality (AR) pedestrian navigation for emergency evacuation based on BIM and GIS. *Heliyon*, 10(12), e32852. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32852>
- [14] Mocanu, A., Avram, C., Radu, D., Sita, I.V., & Astilean, A. (2026). *Sensors*, 26(5), 1572. <https://doi.org/10.3390/s26051572>
- [15] World Wide Web Consortium. (2018). Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. <https://www.w3.org/TR/WCAG21/>
- [16] Nielsen, J. (1994). Usability engineering. Morgan Kaufmann Publishers.
- [17] Leong, W. Y. (2025). Internet of Things for enhancing public safety, disaster response, and emergency management. *Engineering Proceedings*, 92(1), 61. <https://doi.org/10.3390/engproc2025092061>

- [18] Safi, H., Jehangiri, A. I., Ahmad, Z., Ala'anzy, M. A., Alramli, O. I., & Algarni, A. (2024). Design and evaluation of a low-power wide-area network (LPWAN)-based emergency response system for individuals with special needs in smart buildings. *Sensors*, 24(11), 3433. <https://doi.org/10.3390/s24113433>
- [19] buildingSMART International. (2020). IFC overview summary. <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc>
- [20] International Organization for Standardization. (2018). ISO 16739-1:2018 Industry Foundation Classes. <https://www.iso.org/standard/70303.html>
- [21] ΕΣΑμεΑ Παρατηρητήριο Θεμάτων Αναπηρίας. (2025). 2ο Δελτίο Στατιστικής Πληροφόρησης 2025: Το τετράπτυχο της περιθωριοποίησης των ατόμων με αναπηρία στην Ελλάδα. <https://www.esamea.gr>
- [22] Υπουργείο Επικρατείας. (2024). Εθνική Στρατηγική για τα Δικαιώματα των Ατόμων με Αναπηρία 2024-2030: Μια Ελλάδα με όλους, για όλους. <https://amea.gov.gr>
- [23] Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). (2023). Στατιστικά στοιχεία πληθυσμού και κοινωνικών συνθηκών. <https://www.statistics.gr>
- [24] Eurostat. (2023). Statistics on disability and accessibility in EU member states. <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [25] Google LLC. (2024). Firebase Realtime Database documentation. <https://firebase.google.com/docs/database>
- [26] Ελληνική Δημοκρατία. (1988). Π.Δ. 71/1988 — Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων. Φ.Ε.Κ. 32/Α/17.02.1988. <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/pd-711988-fek-32a-1721988>
- [27] Ελληνική Δημοκρατία. (2020). Ν. 4727/2020 — Ψηφιακή Διακυβέρνηση. Φ.Ε.Κ. 184/Α/23.09.2020. <https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/640620/nomos-4727-2020>
- [28] United Nations. (2006). Convention on the Rights of Persons with Disabilities (CRPD), Article 9 — Accessibility. <https://www.un.org/development/desa/disabilities/convention-on-the-rights-of-persons-with-disabilities/article-9-accessibility.html>