



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού
Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός (MSc)

Διπλωματική Εργασία

«Ανάπτυξη και Διερευνητική Εφαρμογή Μοντέλου Μικροσκοπικής
Προσομοίωσης Πεζών σε Τμήμα του Σταθμού Deák Ferenc tér του
Μετρό της Βουδαπέστης με το PTV Viswalk»

Ευστρατία Χατζηλία

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Ναλμπάντης

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

«Ανάπτυξη και Διερευνητική Εφαρμογή Μοντέλου Μικροσκοπικής
Προσομοίωσης Πεζών σε Τμήμα του Σταθμού Deák Ferenc tér του
Μετρό της Βουδαπέστης με το PTV Viswalk»

Ευστρατία Χατζηλία

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Ναλμπάντης

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός –

Συγκοινωνιολόγος ΑΠΘ

Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό ΑΠΘ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Φωτεινή Κεχαγιά

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός –

Οδοποιός ΑΠΘ

Καθηγήτρια ΑΠΘ

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και την πολύτιμη υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τον σύντροφό μου για την αμέριστη συμπαράσταση και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ιδιαίτερα αφιερώνω την παρούσα εργασία στη μνήμη του πατέρα μου, τον οποίο έχασα κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Η αγάπη, οι αξίες και η στήριξή του αποτέλεσαν για μένα πηγή δύναμης και έμπνευσης σε κάθε στάδιο της ζωής μου. Παρότι δεν βρίσκεται σήμερα δίπλα μου, η παρουσία του με συνόδευσε σε όλη τη διαδρομή μέχρι την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στη μνήμη του.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την ανάπτυξη και διερευνητική εφαρμογή απλοποιημένου μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών σε επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér του μετρό της Βουδαπέστης με το λογισμικό PTV Viswalk. Η γεωμετρία βασίστηκε σε διαθέσιμο οπτικό υλικό και περιλαμβάνει την αποβάθρα, έναν διάδρομο σύνδεσης και έξι κυλιόμενες κλίμακες, χωρίς να αποτελεί πλήρη ψηφιακή ανακατασκευή του σταθμού. Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν ένα Pedestrian Input, ένας Destination και μία Static Pedestrian Route. Εξετάστηκαν τέσσερις υποθετικοί ρυθμοί εισαγωγής, ίσοι με 100, 300, 1.200 και 3.000 πεζούς/ώρα, με μία στοχαστική εκτέλεση διάρκειας 3.600 s ανά σενάριο και με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους του λογισμικού. Η αξιολόγηση βασίστηκε στον μέσο και στον μέγιστο αριθμό πεζών σε επιλεγμένη περιοχή μέτρησης και στην οπτική παρατήρηση της χωρικής κατανομής τους. Οι τιμές NumPedsAvg και NumPedsMax αυξήθηκαν από 1,71 και 7, αντίστοιχα, στο σενάριο των 100 πεζών/ώρα σε 38,09 και 54 στο σενάριο των 3.000 πεζών/ώρα. Η οπτική παρατήρηση έδειξε μεγαλύτερη συγκέντρωση πεζών στις περιοχές μετάβασης και στις κυλιόμενες κλίμακες όσο αυξανόταν ο ρυθμός εισαγωγής. Δεν χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα πεδίου και δεν πραγματοποιήθηκαν εμπειρική βαθμονόμηση και επικύρωση. Επομένως, τα αποτελέσματα αποτυπώνουν τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου διερευνητικού μοντέλου και δεν αποτελούν πρόβλεψη της πραγματικής λειτουργίας του σταθμού.

Λέξεις – Κλειδιά

Μικροσκοπική προσομοίωση, Κυκλοφορία πεζών, PTV Viswalk, Σταθμός μετρό, Επιβατική ζήτηση, Βουδαπέστη.

“Development and Exploratory Application of a Pedestrian
Microsimulation Model for a Section of Deák Ferenc tér Metro
Station in Budapest Using PTV Viswalk”

Chatzilia Efstratia

Abstract

This thesis presents the development and exploratory application of a simplified pedestrian microsimulation model for a selected section of Deák Ferenc tér metro station in Budapest using PTV Viswalk. The model geometry was based on available visual material and includes a platform, a connecting corridor, and six escalators; it does not constitute a complete digital reconstruction of the station. One Pedestrian Input, one Destination, and one Static Pedestrian Route were used. Four hypothetical pedestrian input rates—100, 300, 1,200, and 3,000 pedestrians per hour—were examined through one stochastic 3,600-s simulation run per scenario, using the software’s default pedestrian parameters. The evaluation was based on the average and maximum numbers of pedestrians recorded within a selected measurement area and on visual observation of their spatial distribution. NumPedsAvg and NumPedsMax increased from 1.71 and 7, respectively, under the 100-pedestrian/h scenario to 38.09 and 54 under the 3,000-pedestrian/h scenario. Visual observation indicated increasing pedestrian concentrations in transition areas and near the escalators as the input rate increased. No field data were used, and the model was not empirically calibrated or validated. Therefore, the findings describe the behavior of the specific exploratory model and should not be interpreted as a prediction of the actual operation of the station.

Keywords

Pedestrian microsimulation, Pedestrian flow, PTV Viswalk, Metro station, Passenger demand, Budapest.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xii
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xiii
Highlights	xiv
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Το πλαίσιο της αστικής κινητικότητας και η σημασία των σταθμών μετρό	1
1.2 Το ερευνητικό πρόβλημα	1
1.3 Σκοπός και στόχοι της εργασίας	2
1.4 Μεθοδολογική προσέγγιση	3
1.5 Συμβολή της έρευνας	3
1.6 Δομή της εργασίας	4
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο και Μεθοδολογικό Πλαίσιο.....	5
2.1 Εισαγωγή στη μικροσκοπική κυκλοφοριακή προσομοίωση	5
2.2 Θεμελιώδεις έννοιες ροής πεζών	6
2.2.1 Πυκνότητα (Density).....	7
2.2.2 Ροή (Flow).....	8
2.2.3 Ταχύτητα (Speed).....	10
2.2.4 Σχέση πυκνότητας, ταχύτητας και ροής.....	10
2.2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την κυκλοφορία των πεζών	12
2.3 Θεμελιώδη Διαγράμματα Ροής (Fundamental Diagrams)	13
2.3.1 Κατηγορίες μοντέλων κυκλοφοριακής προσομοίωσης	14
2.3.2 Πλεονεκτήματα της μικροσκοπικής προσομοίωσης.....	16
2.4 Μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών	17
2.4.1 Social Force Model	18
2.4.2 Μοντέλα Κυψελωτών Αυτομάτων (CA)	21
2.4.3 Μοντέλα Πρακτόρων (Agent-Based Models)	22
2.4.4 Συγκριτική αξιολόγηση μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης	23
2.5 Λογισμικό προσομοίωσης και πλατφόρμα ανάπτυξης	24
2.5.1 Περιβάλλον εργασίας του PTV Viswalk	25
2.5.2 Βασικά αντικείμενα του μοντέλου.....	26
2.5.3 Παράμετροι συμπεριφοράς των πεζών	27
2.5.4 Δυνατότητες ανάλυσης και εξαγωγής αποτελεσμάτων στο PTV Viswalk.....	28
2.5.5 Βαθμονόμηση, επαλήθευση και επικύρωση μοντέλων προσομοίωσης.....	29
2.5.6 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί του PTV Viswalk	30
2.6 Επίπεδο Εξυπηρέτησης πεζών (LoS)	31
2.6.1 Κατηγορίες επιπέδου εξυπηρέτησης.....	31
2.6.2 Εφαρμογή του LoS στους σταθμούς μετρό	33
2.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση εφαρμογών μικροσκοπικής προσομοίωσης σε σταθμούς μετρό.....	33
2.7.1 Εφαρμογές του Social Force Model.....	34
2.7.2 Έρευνες σε σταθμούς μετρό.....	34
2.7.3 Σύγχρονες εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης.....	35
2.7.4 Συσχέτιση της βιβλιογραφίας με την παρούσα εργασία	35

2.8	Σύνοψη κεφαλαίου	36
3	Το Σύστημα Μετρό της Βουδαπέστης και ο Σταθμός Μελέτης	39
3.1	Εισαγωγή	39
3.2	Το μετρό της Βουδαπέστης: γενικά χαρακτηριστικά	40
3.2.1	Οι γραμμές του μετρό	41
3.3	Λειτουργικός ρόλος του σταθμού Deák Ferenc tér	43
3.3.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σταθμού	44
3.3.2	Κυκλοφορία των επιβατών	45
3.3.3	Λειτουργικός ρόλος του σταθμού	45
3.3.4	Επιλογή του σταθμού ως αντικείμενο έρευνας	46
3.4	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου προσομοίωσης	47
3.4.1	Βασικά στοιχεία του μοντέλου	47
3.4.2	Παραδοχές της μοντελοποίησης	48
3.5	Επιβατική ζήτηση και εκτίμηση ροών	49
3.5.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την επιβατική ζήτηση	50
3.5.2	Εκτίμηση ροών για τις ανάγκες της προσομοίωσης	51
3.5.3	Δημιουργία σεναρίων επιβατικής ζήτησης	52
3.5.4	Χρήση των σεναρίων στην αξιολόγηση του μοντέλου	52
3.5.5	Περιορισμοί της εκτίμησης των ροών	53
3.6	Πιθανά σημεία συμφόρησης	54
3.6.1	Έννοια της συμφόρησης στους σταθμούς μετρό	54
3.6.2	Παράγοντες που οδηγούν σε συμφόρηση	55
3.7	Λειτουργικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την προσομοίωση	56
3.7.1	Συχνότητα δρομολογίων	56
3.7.2	Χρόνος παραμονής συρμού στην αποβάθρα (Dwell Time)	57
3.7.3	Ρυθμός επιβίβασης και αποβίβασης επιβατών	57
3.7.4	Κατανομή των επιβατών στον χώρο	58
3.7.5	Συμπεριφορά επιβατών υπό συνθήκες αυξημένης ζήτησης	58
3.8	Τεκμηρίωση επιλογής σταθμού για μικροσκοπική ανάλυση	59
3.9	Σύνοψη κεφαλαίου	61
4	Ανάπτυξη του Μικροσκοπικού Μοντέλου στο PTV Viswalk	63
4.1	Εισαγωγή	63
4.2	Επιλογή λογισμικού προσομοίωσης	64
4.2.1	Σύγκριση του PTV Viswalk με άλλα λογισμικά προσομοίωσης	65
4.3	Δημιουργία γεωμετρίας σταθμού	66
4.3.1	Σχεδίαση της αποβάθρας	67
4.3.2	Δημιουργία του διαδρόμου σύνδεσης	67
4.3.3	Μοντελοποίηση κυλιόμενων κλιμάκων	68
4.3.4	Έλεγχος και επαλήθευση της γεωμετρίας	69
4.4	Παραμετροποίηση του μοντέλου	70
4.4.1	Δημιουργία περιοχών εισόδου (Pedestrian Inputs)	71
4.4.2	Καθορισμός περιοχών προορισμού (Destinations)	72
4.4.3	Δημιουργία των σεναρίων προσομοίωσης	72
4.5	Παράμετροι προσομοίωσης	73
4.5.1	Παραδοχές της μοντελοποίησης	74
4.6	Εκτέλεση των σεναρίων προσομοίωσης	75
4.6.1	Εκτέλεση του σεναρίου χαμηλής επιβατικής ζήτησης	75
4.6.2	Εκτέλεση του σεναρίου μέτριας επιβατικής ζήτησης	75
4.6.3	Εκτέλεση του σεναρίου υψηλής επιβατικής ζήτησης	76

4.6.4	Εκτέλεση του σεναρίου πολύ υψηλής επιβατικής ζήτησης	76
4.6.5	Συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων.....	76
4.7	Περιοχές μέτρησης και συλλογή δεδομένων	77
4.7.1	Δείκτες που αξιολογήθηκαν.....	78
4.7.2	Διαδικασία συλλογής των αποτελεσμάτων.....	78
4.7.3	Αξιοπιστία των αποτελεσμάτων	79
4.8	Περιορισμοί της μοντελοποίησης	79
4.9	Σύνοψη	80
5	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης.....	81
5.1	Εισαγωγή.....	81
5.2	Περιγραφή σεναρίων προσομοίωσης.....	81
5.3	Ανάλυση του αριθμού πεζών στην περιοχή μέτρησης.....	82
5.4	Ανάλυση λειτουργίας κυλιόμενων κλιμάκων	82
5.5	Ποιοτική αξιολόγηση της κίνησης των πεζών	83
5.6	Ποιοτική συζήτηση σε σχέση με την έννοια του LoS	83
5.7	Συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων.....	84
5.8	Συζήτηση αποτελεσμάτων	85
5.9	Σύνοψη κεφαλαίου.....	86
6	Συμπεράσματα και Προτάσεις	87
6.1	Συμπεράσματα	87
6.2	Αξιολόγηση των ερευνητικών στόχων.....	87
6.3	Επιστημονική συμβολή της εργασίας	88
6.4	Πρακτικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων	88
6.5	Περιορισμοί της έρευνας.....	89
6.6	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	90
6.7	Επίλογος.....	92
	Βιβλιογραφία.....	93

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3-1: Χάρτης Μετρό Βουδαπέστης (BKK, n.d.).....	41
Σχήμα 3-2: Σταθμός Deák Ferenc tér (Paragram,n.d.).....	43
Σχήμα 4-1: Προσομοίωση κυλιόμενων κλιμάκων με το PTV Viswalk.....	69
Σχήμα 5-1: Σύγκριση της κατανομής των πεζών για διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης. (α) 1.200 πεζοί/ώρα.	84
Σχήμα 5-2: Σύγκριση της κατανομής των πεζών για διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης. (β) 3.000 πεζοί/ώρα.....	85

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Σύγκριση κατηγοριών κυκλοφοριακής προσομοίωσης (Barceló, 2010).	16
Πίνακας 2-2: Συγκριτική αξιολόγηση μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης (PTV Group, 2025).	23
Πίνακας 2-3: Πλεονεκτήματα και περιορισμοί του PTV Viswalk.	30
Πίνακας 2-4: Κατηγορίες Επιπέδου Εξυπηρέτησης (LoS).	32
Πίνακας 2-5: Σύνοψη βασικών βιβλιογραφικών πηγών για τη μικροσκοπική προσομοίωση πεζών.	36
Πίνακας 3-1: Βασικά χαρακτηριστικά των γραμμών του μετρό της Βουδαπέστης (BKK, n.d.).	42
Πίνακας 3-2: Βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη μικροσκοπική προσομοίωση.	59
Πίνακας 3-3: Κριτήρια επιλογής του σταθμού Deák Ferenc tér.	61
Πίνακας 4-1: Σενάρια προσομοίωσης που εφαρμόστηκαν.	73
Πίνακας 5-1: Μέσος και μέγιστος αριθμός πεζών στην Area Measurement 1 ("Árovathra") ανά σενάριο.	82

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ABM	Agent-Based Model
BIM	Building Information Modeling
BKK	Budapesti Közlekedési Központ
CA	Cellular Automata
LoS	Level of Service
PTV	Planung Transport Verkehr
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Highlights

- Ανάπτυξη μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών.
- Χρήση λογισμικού PTV Viswalk.
- Διερευνητική εφαρμογή σε επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér.
- Αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων ζήτησης.
- Ανάλυση του μέσου και του μέγιστου αριθμού πεζών και ποιοτική αξιολόγηση της χωρικής κατανομής τους.

1 Εισαγωγή

1.1 Το πλαίσιο της αστικής κινητικότητας και η σημασία των σταθμών μετρό

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού των αστικών κέντρων και η αυξανόμενη χρήση των δημόσιων συγκοινωνιών έχουν οδηγήσει στην ανάγκη αποτελεσματικότερης διαχείρισης των επιβατικών ροών σε σταθμούς μετρό και άλλες συγκοινωνιακές υποδομές. Η ασφαλής και αποδοτική μετακίνηση των επιβατών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων αστικών μεταφορών (Ceder, 2007).

Τα τελευταία χρόνια, η μικροσκοπική προσομοίωση πεζών έχει εξελιχθεί σε ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς των χρηστών σε σύνθετα συγκοινωνιακά περιβάλλοντα. Μέσω της χρήσης εξειδικευμένων λογισμικών είναι δυνατή η αναπαράσταση της κίνησης των πεζών, η εκτίμηση των επιπέδων εξυπηρέτησης και η διερεύνηση πιθανών σημείων συμφόρησης πριν από την υλοποίηση παρεμβάσεων στον πραγματικό χώρο (Helbing & Molnár, 1995; Planung Transport Verkehr [PTV] Group, 2025).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αναπτύσσεται απλοποιημένο μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης πεζών για επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér του μετρό της Βουδαπέστης με τη χρήση του λογισμικού PTV Viswalk.

1.2 Το ερευνητικό πρόβλημα

Η αυξημένη ζήτηση μετακινήσεων στις σύγχρονες πόλεις έχει αναδείξει την ανάγκη για εργαλεία που μπορούν να προβλέπουν και να αξιολογούν τη λειτουργική συμπεριφορά συγκοινωνιακών υποδομών πριν από την υλοποίηση παρεμβάσεων. Παραδοσιακές μέθοδοι ανάλυσης, οι οποίες βασίζονται σε μακροσκοπικούς δείκτες μέσης ροής, συχνά αδυνατούν να αποτυπώσουν τη λεπτομερή δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ μεμονωμένων χρηστών.

Στους σταθμούς μετρό, η κίνηση των επιβατών χαρακτηρίζεται από στοχαστικότητα, αλληλεπίδραση μεταξύ ατόμων, προσαρμοστική συμπεριφορά και μεταβαλλόμενες συνθήκες πυκνότητας. Η αδυναμία κατανόησης αυτών των μικροσκοπικών μηχανισμών μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση φαινομένων συμφόρησης και σε ανεπαρκή σχεδιασμό χώρων.

Το βασικό ερευνητικό ερώτημα της παρούσας εργασίας διατυπώνεται ως εξής:

Κατά πόσο ένα απλοποιημένο μικροσκοπικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκριτική διερεύνηση της συμπεριφοράς εικονικών πεζών σε επιλεγμένο τμήμα σταθμού μετρό υπό διαφορετικούς υποθετικούς ρυθμούς εισαγωγής;

1.3 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και διερευνητική εφαρμογή ενός εκπαιδευτικού μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών σε επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér, με στόχο την εξοικείωση με τη διαδικασία μοντελοποίησης στο PTV Viswalk και τη συγκριτική εξέταση της συμπεριφοράς του μοντέλου υπό διαφορετικά υποθετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης.

Οι επιμέρους στόχοι της εργασίας είναι:

1. η μελέτη των βασικών αρχών της μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών,
2. η ανάπτυξη απλοποιημένης γεωμετρικής αναπαράστασης επιλεγμένου τμήματος του σταθμού,
3. η παραμετροποίηση των περιοχών εισόδου, των προορισμών, των διαδρομών και των κυλιόμενων κλιμάκων,
4. η διαμόρφωση και εκτέλεση τεσσάρων υποθετικών σεναρίων ρυθμού εισαγωγής πεζών,
5. η συγκριτική αξιολόγηση του μέσου και του μέγιστου αριθμού πεζών σε επιλεγμένη περιοχή μέτρησης,
6. η ποιοτική παρατήρηση της χωρικής κατανομής των εικονικών πεζών,
7. η αναγνώριση των δυνατοτήτων και των περιορισμών της εφαρμογής.

1.4 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η εργασία βασίστηκε στην ανάπτυξη απλοποιημένου μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης με το PTV Viswalk. Η μεθοδολογία περιλάμβανε τα εξής:

1. βιβλιογραφική ανασκόπηση της μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών,
2. δημιουργία προσεγγιστικής γεωμετρίας επιλεγμένου τμήματος του σταθμού με βάση διαθέσιμο οπτικό υλικό,
3. ορισμό ενός Pedestrian Input, ενός Destination και μίας Static Pedestrian Route,
4. χρήση έξι κυλιόμενων κλιμάκων και των προεπιλεγμένων παραμέτρων πεζών του λογισμικού,
5. εφαρμογή τεσσάρων υποθετικών ρυθμών εισαγωγής, ίσων με 100, 300, 1.200 και 3.000 πεζούς/ώρα,
6. εκτέλεση μίας στοχαστικής προσομοίωσης διάρκειας 3.600 s ανά σενάριο και
7. συγκριτική αξιολόγηση του μέσου και του μέγιστου αριθμού πεζών σε επιλεγμένη περιοχή μέτρησης, σε συνδυασμό με οπτική παρατήρηση της χωρικής κατανομής τους.

Δεν χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα πεδίου και δεν πραγματοποιήθηκαν εμπειρική βαθμονόμηση και επικύρωση του μοντέλου.

1.5 Συμβολή της έρευνας

Η συμβολή της εργασίας είναι κυρίως εκπαιδευτική και μεθοδολογική. Παρουσιάζει τα βασικά στάδια δημιουργίας και ελέγχου ενός απλοποιημένου μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών στο PTV Viswalk και διερευνά συγκριτικά την απόκρισή του σε τέσσερις υποθετικούς ρυθμούς εισαγωγής. Λόγω της προσεγγιστικής γεωμετρίας και της απουσίας πραγματικών δεδομένων, βαθμονόμησης και επικύρωσης, τα αποτελέσματα δεν προορίζονται για επιχειρησιακή αξιολόγηση ή λήψη αποφάσεων σχετικά με τον πραγματικό σταθμό.

1.6 Δομή της εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια, τα εξής:

1. Το Κεφάλαιο 1 παρουσιάζει το πλαίσιο, το ερευνητικό πρόβλημα και τους στόχους.
2. Το Κεφάλαιο 2 αναλύει το θεωρητικό υπόβαθρο της μικροσκοπικής προσομοίωσης και της συμπεριφοράς πεζών.
3. Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει τη μελέτη περίπτωσης και τα χαρακτηριστικά του σταθμού.
4. Το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τη μεθοδολογία μοντελοποίησης.
5. Το Κεφάλαιο 5 αναλύει τα αποτελέσματα των σεναρίων προσομοίωσης.
6. Το Κεφάλαιο 6 συνοψίζει τα συμπεράσματα και προτείνει κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο και Μεθοδολογικό Πλαίσιο

2.1 Εισαγωγή στη μικροσκοπική κυκλοφοριακή προσομοίωση

Η μετακίνηση των πεζών αποτελεί θεμελιώδη συνιστώσα της λειτουργίας των σύγχρονων συστημάτων μεταφορών, καθώς σχεδόν κάθε μετακίνηση ξεκινά ή ολοκληρώνεται με πεζή πρόσβαση. Ειδικότερα, σε αστικά δίκτυα υψηλής ζήτησης, όπως οι σταθμοί μετρό, οι τερματικοί σταθμοί λεωφορείων και οι σιδηροδρομικοί σταθμοί, η αποτελεσματική διαχείριση των πεζών είναι καθοριστικής σημασίας τόσο για την ομαλή λειτουργία των εγκαταστάσεων όσο και για την ασφάλεια και την άνεση των χρηστών. Η αυξανόμενη αστικοποίηση και η συνεχής ενίσχυση της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς έχουν καταστήσει απαραίτητη τη συστηματική μελέτη της συμπεριφοράς των πεζών και των παραγόντων που επηρεάζουν τη μετακίνησή τους (Fruin, 1971).

Η κυκλοφορία των πεζών διαφέρει ουσιαστικά από την κυκλοφορία των οχημάτων, καθώς χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας κινήσεων και αυξημένη προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος. Οι πεζοί έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν αυθόρμητα κατεύθυνση, να τροποποιούν την ταχύτητα κίνησής τους, να επιλέγουν διαφορετικές διαδρομές ή να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους ανάλογα με την παρουσία άλλων ατόμων ή φυσικών εμποδίων. Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά δυσκολότερη τη μοντελοποίηση της ανθρώπινης κίνησης σε σχέση με την αντίστοιχη των οχημάτων (Weidmann, 1992).

Η συμπεριφορά των πεζών επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων που σχετίζονται τόσο με τα ατομικά χαρακτηριστικά όσο και με το περιβάλλον κίνησης. Η ηλικία, η φυσική κατάσταση, ο σκοπός της μετακίνησης, η εξοικείωση με τον χώρο και η ψυχολογική κατάσταση αποτελούν μεταβλητές που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την επιλεγόμενη ταχύτητα και τη διαδρομή. Παράλληλα, χαρακτηριστικά όπως το διαθέσιμο πλάτος των διαδρόμων, η ύπαρξη κυλιόμενων κλιμάκων ή ανελκυστήρων, η ορατότητα, η σήμανση και ο βαθμός συμφόρησης διαμορφώνουν τις συνθήκες μέσα στις οποίες λαμβάνονται οι αποφάσεις κίνησης από τους επιβάτες (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η λειτουργία των σταθμών μετρό, καθώς πρόκειται για χώρους στους οποίους παρατηρούνται ταυτόχρονες κινήσεις μεγάλου αριθμού χρηστών με διαφορετικούς προορισμούς. Οι επιβάτες εισέρχονται, εξέρχονται και πραγματοποιούν μετεπιβιβάσεις σε περιορισμένους χώρους, δημιουργώντας σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ροών κίνησης. Η αποτελεσματική διαχείριση των συγκεκριμένων ροών αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση υψηλού επιπέδου εξυπηρέτησης και την αποφυγή φαινομένων συμφόρησης, ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής (International Association of Public Transport, 2022).

Η ανάπτυξη κατάλληλων εργαλείων ανάλυσης έχει επιτρέψει την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των πεζών σε πολύπλοκα συγκοινωνιακά περιβάλλοντα. Τα τελευταία χρόνια η μικροσκοπική προσομοίωση έχει αναδειχθεί ως μία από τις πλέον αξιόπιστες μεθόδους αξιολόγησης της λειτουργίας των σταθμών μεταφορών, καθώς παρέχει τη δυνατότητα αναπαράστασης της κίνησης κάθε πεζού ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χρηστών και του περιβάλλοντος. Μέσω της προσομοίωσης μπορούν να διερευνηθούν διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, να εντοπιστούν πιθανά σημεία συμφόρησης και να αξιολογηθούν εναλλακτικές σχεδιαστικές παρεμβάσεις πριν από την εφαρμογή τους στην πραγματικότητα (Barceló, 2010).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η μελέτη της κυκλοφορίας των πεζών επικεντρώνεται στον σταθμό Deák Ferenc tér του μετρό της Βουδαπέστης, έναν από τους σημαντικότερους κόμβους του δικτύου, όπου η συνύπαρξη πολλαπλών γραμμών μετρό και η αυξημένη επιβατική κίνηση δημιουργούν ένα ιδιαίτερα σύνθετο περιβάλλον μετακίνησης. Η κατανόηση των χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας των πεζών αποτελεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη του μικροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης που παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια.

2.2 Θεμελιώδεις έννοιες ροής πεζών

Η ανάλυση της κυκλοφορίας των πεζών βασίζεται σε ορισμένα θεμελιώδη μεγέθη, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ποσοτική περιγραφή της συμπεριφοράς των χρηστών και την αξιολόγηση της λειτουργίας των συγκοινωνιακών υποδομών.

Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η πυκνότητα, η ταχύτητα και η ροή των πεζών. Οι τρεις αυτές παράμετροι συνδέονται μεταξύ τους και αποτελούν τη βάση τόσο της θεωρητικής ανάλυσης όσο και της ανάπτυξης μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης. Η κατανόηση της μεταξύ τους σχέσης επιτρέπει την εκτίμηση της λειτουργικής απόδοσης ενός χώρου, τον εντοπισμό πιθανών σημείων συμφόρησης και τη λήψη αποφάσεων για τη βελτίωση του σχεδιασμού των εγκαταστάσεων (Fruin, 1971; Weidmann, 1992).

Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται εκτενώς σε πρότυπα και τεχνικούς οδηγούς, όπως το Highway Capacity Manual, για την αξιολόγηση του επιπέδου εξυπηρέτησης (Level of Service [LoS]) των πεζών σε δημόσιους χώρους και συγκοινωνιακές εγκαταστάσεις (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Η συστηματική μελέτη της κυκλοφορίας πεζών ξεκίνησε ήδη από τη δεκαετία του 1970, με το έργο των Predtechenskii και Milinskii (1978), το οποίο αποτέλεσε μία από τις πρώτες ολοκληρωμένες προσεγγίσεις για την ανάλυση και τον σχεδιασμό της κίνησης πεζών σε κτίρια και συγκοινωνιακές εγκαταστάσεις.

2.2.1 Πυκνότητα (Density)

Η πυκνότητα των πεζών εκφράζει τον αριθμό των ατόμων που βρίσκονται σε μία συγκεκριμένη επιφάνεια κατά τη διάρκεια μιας χρονικής στιγμής και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες αξιολόγησης της λειτουργίας ενός χώρου. Συνήθως εκφράζεται σε άτομα ανά τετραγωνικό μέτρο (άτομα/m²) και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του βαθμού συμφόρησης που επικρατεί σε διαδρόμους, αποβάθρες, κλιμακοστάσια και άλλους χώρους μετακίνησης πεζών (Weidmann, 1992).

Η πυκνότητα υπολογίζεται ως ο λόγος του αριθμού των πεζών προς την επιφάνεια που αυτοί καταλαμβάνουν (Εξίσωση 1):

$$D=N/A \quad (1)$$

όπου:

D = πυκνότητα πεζών (άτομα/m²),

N = αριθμός πεζών και

A = επιφάνεια της περιοχής (m²).

Η αύξηση της πυκνότητας έχει άμεση επίδραση στην άνεση και στην ασφάλεια της μετακίνησης. Σε χαμηλές πυκνότητες οι πεζοί κινούνται σχεδόν ανεξάρτητα, επιλέγοντας ελεύθερα την επιθυμητή πορεία και ταχύτητα. Αντίθετα, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ατόμων ανά μονάδα επιφάνειας, περιορίζεται η ελευθερία κινήσεων, αυξάνονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χρηστών και μειώνεται η δυνατότητα επιλογής της επιθυμητής διαδρομής (Fruin, 1971).

Σε πολύ υψηλές τιμές πυκνότητας ενδέχεται να δημιουργηθούν συνθήκες έντονης συμφόρησης, όπου οι μετακινήσεις πραγματοποιούνται με εξαιρετικά χαμηλές ταχύτητες και η ασφάλεια των χρηστών μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά. Για τον λόγο αυτό, η πυκνότητα αποτελεί βασικό δείκτη αξιολόγησης κατά τον σχεδιασμό σταθμών μετρό και λοιπών συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Στο λογισμικό PTV Viswalk, η πυκνότητα υπολογίζεται δυναμικά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μέσω ειδικών περιοχών μέτρησης (Area Measurements), επιτρέποντας την παρακολούθηση της χωρικής κατανομής των πεζών και τον εντοπισμό περιοχών όπου εμφανίζονται αυξημένες συγκεντρώσεις επιβατών (PTV Group, 2025).

2.2.2 Ροή (Flow)

Η ροή των πεζών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες αξιολόγησης της λειτουργικής απόδοσης ενός χώρου μετακίνησης, καθώς εκφράζει τον αριθμό των ατόμων που διέρχονται από μία συγκεκριμένη διατομή κατά τη διάρκεια ορισμένου χρονικού διαστήματος. Συνήθως εκφράζεται σε άτομα ανά δευτερόλεπτο (ped/s) ή άτομα ανά λεπτό (ped/min) και χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της λειτουργίας σταθμών μετρό, αεροδρομίων, εμπορικών κέντρων και λοιπών εγκαταστάσεων με αυξημένη συγκέντρωση χρηστών (Fruin, 1971).

Η ροή αποτελεί ουσιαστικά μέτρο της ικανότητας ενός χώρου να εξυπηρετεί τη μετακίνηση των πεζών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ροή που μπορεί να εξυπηρετηθεί χωρίς σημαντική μείωση της ταχύτητας ή δημιουργία συμφόρησης, τόσο μεγαλύτερη θεωρείται η λειτουργική ικανότητα της συγκεκριμένης υποδομής. Για τον λόγο αυτό, ο δείκτης χρησιμοποιείται κατά τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση διαδρόμων, αποβαθρών, κλιμάκων και σημείων μετεπιβίβασης (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τη ροή είναι η ακόλουθη (Εξίσωση 2):

$$Q=N/t \quad (2)$$

όπου:

Q = ροή πεζών (ped/s),

N = αριθμός πεζών που διέρχονται από συγκεκριμένη διατομή και

t = χρονικό διάστημα παρατήρησης (s).

Η ροή δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός σταθμού, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με την ώρα της ημέρας, τη συχνότητα άφιξης των συρμών, τον αριθμό των επιβατών που αποβιβάζονται ή επιβιβάζονται και τις συνθήκες που επικρατούν στον χώρο. Στις ώρες αιχμής παρατηρούνται σημαντικά υψηλότερες τιμές ροής, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες πυκνότητες και περιορισμό της ταχύτητας κίνησης των πεζών (Weidmann, 1992).

Στο πλαίσιο της μικροσκοπικής προσομοίωσης, η ροή αποτελεί βασικό δείκτη αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της απόδοσης των διαδρόμων κυκλοφορίας και των σημείων μετεπιβίβασης. Η ανάλυση των τιμών της βοηθά στον εντοπισμό περιοχών όπου παρατηρείται υπερφόρτωση και συμβάλλει στη διαμόρφωση προτάσεων για τη βελτίωση της λειτουργικότητας των συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων (PTV Group, 2025).

2.2.3 Ταχύτητα (Speed)

Η ταχύτητα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες περιγραφής της συμπεριφοράς των πεζών, καθώς εκφράζει την απόσταση που διανύει ένας πεζός σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Συνήθως μετράται σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s) και επηρεάζεται τόσο από τα ατομικά χαρακτηριστικά των χρηστών όσο και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η μετακίνηση (Weidmann, 1992).

Υπό συνθήκες ελεύθερης κίνησης, οι περισσότεροι ενήλικες κινούνται με επιθυμητή ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 1,2 και 1,5 m/s, χωρίς σημαντικούς περιορισμούς από άλλους πεζούς ή φυσικά εμπόδια. Ωστόσο, η πραγματική ταχύτητα μεταβάλλεται ανάλογα με την ηλικία, τη φυσική κατάσταση, τη μεταφορά αποσκευών, τον σκοπό της μετακίνησης, την εξοικείωση με τον χώρο και τον βαθμό συμφόρησης (Fruin, 1971).

Ιδιαίτερα στους σταθμούς μετρό, η ταχύτητα των πεζών επηρεάζεται έντονα από τη διάταξη των διαδρόμων, την ύπαρξη κυλιόμενων κλιμάκων και ανελκυστήρων, τη σήμανση, καθώς και από τη συνύπαρξη επιβατών με διαφορετικούς προορισμούς. Κατά τις ώρες αιχμής, η αυξημένη πυκνότητα οδηγεί σε σημαντική μείωση της μέσης ταχύτητας, καθώς οι πεζοί αναγκάζονται να προσαρμόζουν συνεχώς την κίνησή τους ώστε να αποφεύγουν συγκρούσεις με τους υπόλοιπους χρήστες (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Στα μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης, κάθε πεζός διαθέτει μία επιθυμητή ταχύτητα, η οποία μπορεί να διαφοροποιείται μεταξύ των χρηστών σύμφωνα με συγκεκριμένες στατιστικές κατανομές. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ακριβέστερη αναπαράσταση της πραγματικής ανθρώπινης συμπεριφοράς, καθώς δεν θεωρείται ότι όλοι οι πεζοί κινούνται με την ίδια ταχύτητα (PTV Group, 2025).

2.2.4 Σχέση πυκνότητας, ταχύτητας και ροής

Η κυκλοφορία των πεζών περιγράφεται μέσω της αλληλεπίδρασης τριών βασικών μεγεθών: της πυκνότητας, της ταχύτητας και της ροής. Η μεταξύ τους σχέση αποτελεί τη βάση των λεγόμενων θεμελιωδών διαγραμμάτων (Fundamental Diagrams), τα οποία χρησιμοποιούνται εκτενώς τόσο στη θεωρία της κυκλοφορίας όσο και στα μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης (Weidmann, 1992).

Τα θεμελιώδη διαγράμματα παρουσιάζουν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα των πεζών καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του πλήθους, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η συνολική ροή. Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων και χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό υποδομών υψηλής επιβατικής ζήτησης, όπως σταθμοί μετρό και αεροδρόμια (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Σε συνθήκες χαμηλής πυκνότητας οι πεζοί κινούνται με την επιθυμητή ταχύτητά τους, καθώς δεν υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί από την παρουσία άλλων χρηστών. Καθώς όμως αυξάνεται ο αριθμός των ατόμων ανά μονάδα επιφάνειας, η διαθέσιμη ελεύθερη περιοχή μειώνεται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πεζών και να περιορίζεται η δυνατότητα ελεύθερης κίνησης. Η εξέλιξη αυτή οδηγεί σε σταδιακή μείωση της μέσης ταχύτητας (Fruin, 1971). Αρχικά, η αύξηση της πυκνότητας συνοδεύεται από αύξηση της συνολικής ροής, καθώς περισσότεροι πεζοί διέρχονται από την ίδια διατομή. Ωστόσο, μετά από ένα κρίσιμο επίπεδο πυκνότητας, η μείωση της ταχύτητας γίνεται τόσο σημαντική ώστε η συνολική ροή αρχίζει να μειώνεται. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή χωρητικότητα του χώρου και αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος για τον σχεδιασμό συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων (Weidmann, 1992). Σε ακόμη μεγαλύτερες πυκνότητες δημιουργούνται συνθήκες έντονης συμφόρησης. Οι πεζοί δυσκολεύονται να κινηθούν, οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις αυξάνονται σημαντικά και η κίνηση πραγματοποιείται με πολύ χαμηλές ταχύτητες. Σε ακραίες περιπτώσεις, οι μετακινήσεις μπορεί να διακοπούν προσωρινά, δημιουργώντας ουρές αναμονής και αυξημένους χρόνους εξυπηρέτησης. Τέτοιες καταστάσεις παρατηρούνται συχνά σε αποβάθρες σταθμών μετρό κατά τις ώρες αιχμής ή σε περιπτώσεις μαζικών εκδηλώσεων (Helbing & Molnár, 1995).

Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ πυκνότητας, ταχύτητας και ροής αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης. Το λογισμικό PTV Viswalk αξιοποιεί τις αρχές αυτές κατά την προσομοίωση της κίνησης των πεζών, επιτρέποντας την εκτίμηση της λειτουργικής κατάστασης ενός χώρου και την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων λειτουργίας (PTV Group, 2025).

2.2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την κυκλοφορία των πεζών

Η συμπεριφορά των πεζών δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωμετρία του χώρου ή από τον αριθμό των ατόμων που κινούνται σε αυτόν. Αντίθετα, αποτελεί αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ενός μεγάλου αριθμού παραγόντων, οι οποίοι σχετίζονται τόσο με τα χαρακτηριστικά των χρηστών όσο και με τις συνθήκες λειτουργίας της υποδομής.

Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες βασικές κατηγορίες:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά: Η διάταξη του χώρου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση των πεζών. Το πλάτος των διαδρόμων, η ύπαρξη στενώσεων, οι γωνίες αλλαγής κατεύθυνσης, η θέση των εισόδων και εξόδων, καθώς και η διάταξη των κυλιόμενων κλιμάκων καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις διαδρομές που επιλέγουν οι χρήστες (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).
- Ανθρώπινοι παράγοντες: Η ηλικία, η φυσική κατάσταση, η μεταφορά αποσκευών, η εξοικείωση με τον χώρο και ο σκοπός της μετακίνησης επηρεάζουν σημαντικά την επιθυμητή ταχύτητα και τον τρόπο κίνησης κάθε πεζού. Για παράδειγμα, οι καθημερινοί χρήστες ενός σταθμού επιλέγουν συνήθως συντομότερες διαδρομές σε σχέση με περιστασιακούς επισκέπτες, οι οποίοι κινούνται πιο αργά και αφιερώνουν περισσότερο χρόνο στον προσανατολισμό τους (Weidmann, 1992).
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες: Ο φωτισμός, η θερμοκρασία, η σήμανση, η ορατότητα, η ύπαρξη εμποδίων και οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν επίσης τη συμπεριφορά των πεζών. Η κατάλληλη διαμόρφωση του περιβάλλοντος μπορεί να διευκολύνει τη ροή των επιβατών και να μειώσει τις πιθανότητες εμφάνισης συμφόρησης (International Association of Public Transport, 2022).
- Λειτουργικοί παράγοντες: Η συχνότητα των δρομολογίων, οι χρόνοι άφιξης των συρμών, οι μετεπιβιβάσεις και η ταυτόχρονη άφιξη μεγάλου αριθμού επιβατών δημιουργούν έντονες διακυμάνσεις στις ροές των πεζών. Οι παράγοντες αυτοί είναι ιδιαίτερα σημαντικοί στους υπόγειους σταθμούς μετρό, όπου η κυκλοφορία μεταβάλλεται σημαντικά μέσα σε σύντομα χρονικά διαστήματα (Vuchic, 2005).

- Λοιποί παράγοντες: Επιπλέον, η επιλογή διαδρομής των πεζών δεν εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του χώρου, αλλά και από παράγοντες όπως ο αναμενόμενος χρόνος μετακίνησης, η πυκνότητα του πλήθους, η αντιλαμβανόμενη άνεση και ο σκοπός της μετακίνησης, στοιχεία που επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων κατά την κίνηση μέσα στις συγκοινωνιακές υποδομές (Hoogendoorn & Bovy, 2004).

2.3 Θεμελιώδη Διαγράμματα Ροής (Fundamental Diagrams)

Η προσομοίωση της κυκλοφορίας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σήμερα στον σχεδιασμό, την ανάλυση και την αξιολόγηση των συγκοινωνιακών συστημάτων. Μέσω της προσομοίωσης είναι δυνατή η αναπαράσταση της πραγματικής λειτουργίας ενός συστήματος μεταφορών σε εικονικό περιβάλλον, επιτρέποντας την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας χωρίς την ανάγκη παρεμβάσεων στις πραγματικές υποδομές. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις όπου η πραγματοποίηση πειραματικών δοκιμών είναι δύσκολη, δαπανηρή ή ενδέχεται να επηρεάσει την ομαλή λειτουργία μιας συγκοινωνιακής εγκατάστασης (Barceló, 2010). Η ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων και η συνεχής αύξηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος επέτρεψαν την εξέλιξη των μοντέλων προσομοίωσης από απλές μαθηματικές προσεγγίσεις σε πολύπλοκα υπολογιστικά μοντέλα, ικανά να αναπαραστήσουν με μεγάλη ακρίβεια τη συμπεριφορά μεμονωμένων χρηστών. Στο πλαίσιο αυτό, η μικροσκοπική προσομοίωση πεζών έχει καθιερωθεί ως μία από τις πλέον αξιόπιστες μεθόδους ανάλυσης της ανθρώπινης κίνησης σε χώρους με υψηλή συγκέντρωση επιβατών, όπως οι σταθμοί μετρό, οι αερολιμένες, οι σιδηροδρομικοί σταθμοί και τα μεγάλα δημόσια κτίρια (PTV Group, 2025).

Σε αντίθεση με τις συμβατικές αναλυτικές μεθόδους, τα μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης επιτρέπουν την παρακολούθηση κάθε πεζού ως ανεξάρτητης οντότητας, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τις προτιμήσεις και τις αλληλεπιδράσεις του με το περιβάλλον και τους υπόλοιπους χρήστες. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η αναπαράσταση σύνθετων φαινομένων, όπως η δημιουργία ουρών αναμονής, η αλλαγή διαδρομών, η αποφυγή συγκρούσεων και η εμφάνιση συμφόρησης σε περιορισμένους χώρους (Helbing & Molnár, 1995).

Η χρήση της μικροσκοπικής προσομοίωσης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον σχεδιασμό σταθμών μετρό, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση διαφορετικών γεωμετρικών διαμορφώσεων, την εκτίμηση της επίδρασης της αυξημένης επιβατικής ζήτησης και τη διερεύνηση πιθανών προβλημάτων λειτουργίας πριν ακόμη υλοποιηθούν τεχνικές παρεμβάσεις. Επιπλέον, αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας μέτρων που αφορούν την ανακατανομή των ροών των επιβατών, τη χωροθέτηση κυλιόμενων κλιμάκων, την εγκατάσταση ανελκυστήρων και τη βελτίωση της σήμανσης των χώρων (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Τα τελευταία χρόνια η μικροσκοπική προσομοίωση χρησιμοποιείται επίσης για την υποστήριξη διαδικασιών εκκένωσης μεγάλων εγκαταστάσεων σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, για τη μελέτη της συμπεριφοράς μεγάλων συγκεντρώσεων ανθρώπων σε αθλητικές εγκαταστάσεις και χώρους εκδηλώσεων, καθώς και για την αξιολόγηση της λειτουργίας νέων συγκοινωνιακών έργων πριν από την έναρξη της λειτουργίας τους. Η δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών σεναρίων συμβάλλει στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων από τους μηχανικούς και τους φορείς διαχείρισης των υποδομών (Schadschneider et al., 2009).

Οι πειραματικές μελέτες έχουν επιβεβαιώσει ότι η σχέση μεταξύ πυκνότητας, ταχύτητας και ροής αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για τη μοντελοποίηση της κίνησης των πεζών. Καθώς η πυκνότητα αυξάνεται, η μέση ταχύτητα των πεζών μειώνεται, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η συνολική ικανότητα εξυπηρέτησης του χώρου. Η κατανόηση της σχέσης αυτής είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη και βαθμονόμηση μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης (Seyfried et al., 2006).

2.3.1 Κατηγορίες μοντέλων κυκλοφοριακής προσομοίωσης

Τα μοντέλα κυκλοφοριακής προσομοίωσης διακρίνονται συνήθως σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας με το οποίο περιγράφουν την κυκλοφορία: τη μακροσκοπική, τη μεσοσκοπική και τη μικροσκοπική προσομοίωση. Κάθε προσέγγιση παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά και εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς κατά την ανάλυση των συγκοινωνιακών συστημάτων (Πίνακας 2-1) (Barceló, 2010).

- **Μακροσκοπική προσομοίωση:** Η μακροσκοπική προσομοίωση προσεγγίζει την κυκλοφορία ως μία συνεχή ροή, αντίστοιχη με τη ροή ενός ρευστού. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε συνολικό επίπεδο και βασίζεται σε μεγέθη όπως η μέση ταχύτητα, η συνολική ροή και η πυκνότητα της κυκλοφορίας, χωρίς να εξετάζεται η συμπεριφορά των επιμέρους χρηστών. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τον στρατηγικό σχεδιασμό συγκοινωνιακών δικτύων μεγάλης κλίμακας, όπου απαιτείται η εκτίμηση της συνολικής λειτουργίας ενός συστήματος και όχι της συμπεριφοράς μεμονωμένων χρηστών. Παρότι παρουσιάζει χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, δεν μπορεί να αποδώσει με ικανοποιητική ακρίβεια σύνθετα φαινόμενα, όπως η αλληλεπίδραση μεταξύ των πεζών ή η δημιουργία τοπικών σημείων συμφόρησης (Vuchic, 2005).
- **Μεσοσκοπική προσομοίωση:** Η μεσοσκοπική προσομοίωση αποτελεί ενδιάμεση προσέγγιση μεταξύ της μακροσκοπικής και της μικροσκοπικής ανάλυσης. Οι χρήστες αναπαρίστανται ως διακριτές οντότητες, ωστόσο οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις προσεγγίζονται με απλουστευμένο τρόπο, προκειμένου να περιοριστεί ο υπολογιστικός φόρτος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές όπου απαιτείται ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής αποδοτικότητας και ακρίβειας, όπως σε μεγάλα αστικά δίκτυα ή σε μελέτες επιχειρησιακού σχεδιασμού. Παρά τα πλεονεκτήματά της, δεν μπορεί να αποδώσει με επάρκεια πολύπλοκες κινήσεις πεζών σε περιορισμένους χώρους, όπως αποβάθρες ή σταθμούς μετρό (Barceló, 2010).

- Μικροσκοπική προσομοίωση: Η μικροσκοπική προσομοίωση αποτελεί την πλέον λεπτομερή μορφή κυκλοφοριακής ανάλυσης. Σε αυτήν κάθε πεζός προσομοιώνεται ως αυτόνομη οντότητα, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως επιθυμητή ταχύτητα, κατεύθυνση κίνησης, προσωπικό χώρο και δυνατότητα λήψης αποφάσεων κατά τη διάρκεια της μετακίνησης. Η συμπεριφορά κάθε χρήστη επηρεάζεται δυναμικά από τις αλληλεπιδράσεις με τους υπόλοιπους πεζούς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αναπαρασταθούν πολύπλοκα φαινόμενα, όπως η δημιουργία ουρών αναμονής, οι αλλαγές διαδρομής, η αποφυγή συγκρούσεων και οι συνθήκες συμφόρησης. Για τον λόγο αυτό, η μικροσκοπική προσομοίωση χρησιμοποιείται ευρέως στη μελέτη σταθμών μετρό, αεροδρομίων και λοιπών εγκαταστάσεων υψηλής επιβατικής ζήτησης (PTV Group, 2025).

Χαρακτηριστικό	Μακροσκοπική	Μεσοσκοπική	Μικροσκοπική
Μονάδα ανάλυσης	Ροή κυκλοφορίας	Ομάδες χρηστών	Μεμονωμένος πεζός
Επίπεδο λεπτομέρειας	Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλό
Υπολογιστικές απαιτήσεις	Χαμηλές	Μέτριες	Υψηλές
Αναπαράσταση αλληλεπιδράσεων	Όχι	Περιορισμένη	Πλήρης
Καταλληλότητα για σταθμούς μετρό	Χαμηλή	Μέτρια	Πολύ υψηλή

Πίνακας 2-1: Σύγκριση κατηγοριών κυκλοφοριακής προσομοίωσης (Barceló, 2010).

2.3.2 Πλεονεκτήματα της μικροσκοπικής προσομοίωσης

Η μικροσκοπική προσομοίωση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες μοντέλων, γεγονός που εξηγεί την ευρεία εφαρμογή της στη σύγχρονη συγκοινωνιακή μηχανική. Η δυνατότητα αναπαράστασης κάθε πεζού ως αυτόνομης μονάδας επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση της πραγματικής ανθρώπινης συμπεριφοράς και των αλληλεπιδράσεων που αναπτύσσονται κατά τη μετακίνηση σε περιορισμένους χώρους.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα αξιολόγησης διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας πριν από την υλοποίηση οποιασδήποτε παρέμβασης. Ο μελετητής μπορεί να εξετάσει την επίδραση διαφορετικών επιπέδων επιβατικής ζήτησης, τη μεταβολή της γεωμετρίας ενός χώρου, την προσθήκη νέων κυλιόμενων κλιμάκων ή ανελκυστήρων, καθώς και την αλλαγή της διάταξης των διαδρόμων κυκλοφορίας, χωρίς να απαιτούνται πραγματικές κατασκευαστικές παρεμβάσεις (PTV Group, 2025).

Επιπλέον, η μικροσκοπική προσομοίωση παρέχει τη δυνατότητα λεπτομερούς καταγραφής δεικτών, όπως η πυκνότητα των πεζών, οι χρόνοι αναμονής, οι ροές, οι περιοχές συμφόρησης και το επίπεδο εξυπηρέτησης. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον σχεδιασμό και τη διαχείριση συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας των χώρων (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

2.4 Μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών

Η ανάπτυξη της μικροσκοπικής προσομοίωσης συνοδεύτηκε από τη δημιουργία διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων που επιχειρούν να περιγράψουν τη συμπεριφορά των πεζών σε σύνθετα περιβάλλοντα. Κάθε μοντέλο βασίζεται σε διαφορετικές θεωρητικές παραδοχές σχετικά με τον τρόπο λήψης αποφάσεων των χρηστών, την αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον και τη μεταξύ τους συνεργασία ή αποφυγή συγκρούσεων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις, από απλά διακριτά μοντέλα μέχρι πολύπλοκες συνεχείς μαθηματικές περιγραφές. Οι σημαντικότερες κατηγορίες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι το Social Force Model, τα Cellular Automata (CA), τα Agent-Based Models, καθώς και υβριδικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν χαρακτηριστικά περισσότερων του ενός μοντέλων (Helbing & Molnár, 1995; Bonabeau, 2002).

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται από το αντικείμενο της μελέτης, τη διαθεσιμότητα δεδομένων, το απαιτούμενο επίπεδο λεπτομέρειας και τον διαθέσιμο υπολογιστικό χρόνο. Για εφαρμογές σε σταθμούς μετρό, όπου απαιτείται λεπτομερής αναπαράσταση της ανθρώπινης συμπεριφοράς, προτιμώνται κυρίως μοντέλα που περιγράφουν κάθε πεζό ως ανεξάρτητη οντότητα και προσομοιώνουν δυναμικά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χρηστών (PTV Group, 2025).

2.4.1 Social Force Model

Το Social Force Model αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα και πλέον διαδεδομένα μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών. Αυτό αναπτύχθηκε από τους Helbing και Molnár (1995) και βασίζεται στην παραδοχή ότι η ανθρώπινη κίνηση μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός συνόλου «κοινωνικών δυνάμεων», οι οποίες επηρεάζουν συνεχώς την πορεία και την ταχύτητα κάθε πεζού (Helbing & Molnár, 1995).

Παρότι ο όρος «δύναμη» παραπέμπει στη φυσική, στην πραγματικότητα δεν πρόκειται για πραγματικές μηχανικές δυνάμεις, αλλά για μαθηματικές συναρτήσεις που αναπαριστούν τις αποφάσεις και τις αντιδράσεις των ανθρώπων κατά τη διάρκεια της μετακίνησης. Το μοντέλο επιχειρεί να περιγράψει τον τρόπο με τον οποίο κάθε άτομο προσαρμόζει συνεχώς την πορεία του ώστε να φτάσει στον προορισμό του, αποφεύγοντας παράλληλα συγκρούσεις με άλλους πεζούς και σταθερά εμπόδια.

Η βασική φιλοσοφία του μοντέλου είναι ότι κάθε πεζός επιδιώκει να κινηθεί με μια επιθυμητή ταχύτητα προς έναν συγκεκριμένο προορισμό. Κατά τη διάρκεια της κίνησης, όμως, η πορεία αυτή επηρεάζεται από την παρουσία άλλων ατόμων, από το γεωμετρικό περιβάλλον και από διάφορους περιορισμούς που προκύπτουν στον χώρο. Ως αποτέλεσμα, η τελική διαδρομή αποτελεί προϊόν συνεχούς προσαρμογής και όχι προκαθορισμένης κίνησης.

Η μαθηματική περιγραφή του μοντέλου βασίζεται στη συνισταμένη τριών βασικών συνιστωσών:

- της δύναμης που οδηγεί τον πεζό προς τον επιθυμητό προορισμό,
- των δυνάμεων αποφυγής συγκρούσεων με άλλους πεζούς και

- των δυνάμεων αποφυγής σταθερών εμποδίων, όπως τοίχοι, κιγκλιδώματα και κολώνες.

Η αλληλεπίδραση των παραπάνω συνιστωσών επιτρέπει στο μοντέλο να αναπαράγει με ρεαλιστικό τρόπο φαινόμενα που παρατηρούνται στην πραγματικότητα, όπως η αυθόρμητη δημιουργία λωρίδων κυκλοφορίας σε αντίθετες κατευθύνσεις, η ανάπτυξη ουρών αναμονής μπροστά από στενά περάσματα, η αποφυγή συγκρούσεων και η συγκέντρωση μεγάλου αριθμού ατόμων σε συγκεκριμένα σημεία ενός σταθμού (Helbing et al., 2000).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι ότι δεν απαιτεί την ύπαρξη προκαθορισμένων κανόνων για κάθε πιθανή συμπεριφορά. Αντίθετα, πολύπλοκα φαινόμενα αναδύονται φυσικά μέσα από τις αλληλεπιδράσεις των πεζών. Η ιδιότητα αυτή καθιστά το Social Force Model ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές σε χώρους όπου η ανθρώπινη συμπεριφορά μεταβάλλεται συνεχώς, όπως οι σταθμοί μετρό κατά τις ώρες αιχμής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το λογισμικό PTV Viswalk αξιοποιεί το Social Force Model για την προσομοίωση της κίνησης των επιβατών στον σταθμό Deák Ferenc tér. Μέσω του συγκεκριμένου μοντέλου, κάθε επιβάτης αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητη μονάδα, η οποία αλληλεπιδρά δυναμικά τόσο με τους υπόλοιπους χρήστες όσο και με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σταθμού, επιτρέποντας την αναπαράσταση ρεαλιστικών συνθηκών κυκλοφορίας (PTV Group, 2025).

Μεταγενέστερες έρευνες επέκτειναν το Social Force Model, αναδεικνύοντας ότι η συλλογική κίνηση των πεζών μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα αυτοοργάνωσης, όπως ο αυθόρμητος σχηματισμός λωρίδων κίνησης σε αντίθετες ροές και η δυναμική ανακατανομή των επιβατών σε χώρους υψηλής πυκνότητας. Τα φαινόμενα αυτά αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του πλήθους και λαμβάνονται υπόψη στη σύγχρονη μικροσκοπική προσομοίωση πεζών (Helbing et al., 2005).

Η λειτουργία του Social Force Model βασίζεται στην ταυτόχρονη δράση τριών κύριων κατηγοριών δυνάμεων, οι οποίες διαμορφώνουν την τελική κίνηση κάθε πεζού:

- Δύναμη επιθυμητής κατεύθυνσης: Η πρώτη συνιστώσα εκφράζει την επιθυμία του πεζού να κινηθεί προς τον τελικό προορισμό του ακολουθώντας την επιθυμητή ταχύτητα. Η δύναμη αυτή ωθεί συνεχώς τον χρήστη προς την κατεύθυνση που έχει επιλέξει, ενώ ταυτόχρονα προσαρμόζει την πραγματική του ταχύτητα όταν αυτή αποκλίνει από την επιθυμητή. Στην πράξη, η συγκεκριμένη συνιστώσα περιγράφει τη φυσιολογική συμπεριφορά ενός επιβάτη που επιδιώκει να προσεγγίσει μια αποβάθρα, μια κυλιόμενη κλίμακα ή μία έξοδο με όσο το δυνατόν μικρότερη καθυστέρηση.
- Δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ πεζών: Η δεύτερη κατηγορία αφορά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χρηστών. Όταν δύο πεζοί πλησιάζουν μεταξύ τους, δημιουργείται μία μαθηματική δύναμη απώθησης που οδηγεί σε μικρές αλλαγές πορείας ή ταχύτητας, ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση. Οι δυνάμεις αυτές αυξάνονται όσο μειώνεται η μεταξύ τους απόσταση και αποτελούν τον βασικό μηχανισμό μέσω του οποίου δημιουργούνται φαινόμενα όπως η αυτοοργάνωση των ροών ή η ανάπτυξη ουρών αναμονής.
- Δυνάμεις αλληλεπίδρασης με εμπόδια: Η τρίτη συνιστώσα αφορά την αλληλεπίδραση με τα σταθερά στοιχεία του περιβάλλοντος, όπως οι τοίχοι, οι κολώνες, τα κιγκλιδώματα, οι κυλιόμενες κλίμακες και κάθε άλλο φυσικό εμπόδιο. Όσο ο πεζός προσεγγίζει κάποιο εμπόδιο, δημιουργείται δύναμη απώθησης που τον οδηγεί σε ομαλή αλλαγή της πορείας του, αποφεύγοντας την επαφή με αυτό. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει με ρεαλισμό την κίνηση σε περιορισμένους χώρους, χωρίς να απαιτείται η εισαγωγή πολύπλοκων κανόνων.

Η ευρεία χρήση του Social Force Model οφείλεται στην ικανότητά του να αναπαριστά με ρεαλιστικό τρόπο την ανθρώπινη συμπεριφορά σε χώρους υψηλής συγκέντρωσης πεζών. Το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει δυναμικά πολύπλοκα φαινόμενα, όπως η δημιουργία λωρίδων κυκλοφορίας, η συμφόρηση σε στενά περάσματα, η ανάπτυξη ουρών αναμονής και η αλληλεπίδραση μεγάλου αριθμού χρηστών χωρίς να απαιτείται ο καθορισμός αυστηρών κανόνων για κάθε πιθανό σενάριο (Helbing et al., 2000).

Παρά τα σημαντικά του πλεονεκτήματα, το μοντέλο παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή βαθμονόμηση των παραμέτρων, ενώ η συμπεριφορά των πεζών επηρεάζεται και από ψυχολογικούς ή κοινωνικούς παράγοντες που δεν μπορούν πάντοτε να αποδοθούν πλήρως μέσω μαθηματικών σχέσεων. Επιπλέον, η προσομοίωση πολύ μεγάλων πληθυσμών απαιτεί αυξημένη υπολογιστική ισχύ και κατάλληλη παραμετροποίηση, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (Schadschneider et al., 2009).

2.4.2 Μοντέλα Κυψελωτών Αυτομάτων (CA)

Τα μοντέλα κυψελωτών αυτομάτων (CA) αποτελούν μία από τις πρώτες προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας πεζών. Η βασική αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στη διαίρεση του χώρου σε ένα πλέγμα μικρών κελιών ίσων διαστάσεων, μέσα στα οποία μπορεί να βρίσκεται είτε ένας πεζός είτε να είναι κενά. Η κίνηση των πεζών πραγματοποιείται από κελί σε κελί σύμφωνα με προκαθορισμένους κανόνες μετάβασης, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τη θέση των γειτονικών κελιών και τη διαθεσιμότητα του χώρου (Blue & Adler, 2001).

Σε αντίθεση με το Social Force Model, όπου η κίνηση περιγράφεται σε συνεχή χώρο μέσω μαθηματικών εξισώσεων, τα CA λειτουργούν σε διακριτό περιβάλλον. Ο χρόνος εξελίσσεται σε διαδοχικά χρονικά βήματα και σε κάθε βήμα όλοι οι πεζοί αξιολογούν τα διαθέσιμα γειτονικά κελιά ώστε να επιλέξουν την επόμενη θέση τους. Η απλότητα αυτής της διαδικασίας επιτρέπει την προσομοίωση μεγάλου αριθμού χρηστών με σχετικά χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις (Schadschneider et al., 2009).

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων βασίζεται συνήθως σε κανόνες προτεραιότητας, σύμφωνα με τους οποίους ο πεζός επιλέγει το γειτονικό κελί που τον φέρνει πιο κοντά στον προορισμό του, εφόσον αυτό είναι ελεύθερο. Σε περιπτώσεις όπου περισσότερα από ένα κελιά θεωρούνται κατάλληλα, εφαρμόζονται πρόσθετοι κανόνες επιλογής ή πιθανοτικές μέθοδοι, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία μη ρεαλιστικών μοτίβων κίνησης.

Παρά την απλότητά τους, τα CA έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην προσομοίωση φαινομένων όπως η δημιουργία ουρών αναμονής, η συμφόρηση σε στενά περάσματα και η εκκένωση κτιρίων. Ωστόσο, η διακριτή φύση του χώρου περιορίζει τη δυνατότητα αναπαράστασης ομαλών μεταβολών της ταχύτητας και της κατεύθυνσης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερο φυσική απεικόνιση της ανθρώπινης κίνησης σε σύγκριση με τα συνεχή μοντέλα (Blue & Adler, 2001).

Για τον λόγο αυτό, τα CA χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή υπολογιστική αποδοτικότητα ή σε περιπτώσεις μαζικών εκκενώσεων μεγάλων χώρων, ενώ σε εφαρμογές που απαιτούν ιδιαίτερα ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των πεζών προτιμώνται συχνότερα τα μοντέλα κοινωνικών δυνάμεων.

2.4.3 Μοντέλα Πρακτόρων (Agent-Based Models)

Τα μοντέλα πρακτόρων (Agent-Based Models [ABMs]) αποτελούν μία από τις πλέον σύγχρονες προσεγγίσεις μικροσκοπικής προσομοίωσης. Βασίζονται στην παραδοχή ότι κάθε πεζός λειτουργεί ως αυτόνομος «πράκτορας», ο οποίος διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, στόχους και δυνατότητα λήψης αποφάσεων κατά τη διάρκεια της μετακίνησής του (Bonabeau, 2002).

Σε αντίθεση με τα μοντέλα που βασίζονται αποκλειστικά σε μαθηματικές εξισώσεις, τα ABMs επιτρέπουν την αναπαράσταση πιο σύνθετων μορφών συμπεριφοράς. Κάθε πράκτορας μπορεί να προσαρμόζει δυναμικά τη διαδρομή του, να μεταβάλλει την ταχύτητά του, να αντιδρά σε απρόβλεπτα γεγονότα ή ακόμη και να λαμβάνει αποφάσεις με βάση προηγούμενες εμπειρίες ή πληροφορίες που λαμβάνει από το περιβάλλον.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μοντέλων αυτών είναι η δυνατότητα εισαγωγής ετερογένειας στον πληθυσμό των πεζών. Διαφορετικοί χρήστες μπορούν να διαθέτουν διαφορετική ηλικία, κινητικότητα, επιθυμητή ταχύτητα, βαθμό εξοικείωσης με τον χώρο ή ακόμη και διαφορετικό επίπεδο αντίδρασης σε συνθήκες συμφόρησης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία περισσότερο ρεαλιστική αναπαράσταση της πραγματικής λειτουργίας ενός συγκοινωνιακού συστήματος (Crooks et al., 2008).

Η αυξημένη ευελιξία των ABMs συνοδεύεται από μεγαλύτερες απαιτήσεις ως προς τον σχεδιασμό του μοντέλου και την υπολογιστική ισχύ. Η ανάπτυξη πολύπλοκων κανόνων συμπεριφοράς απαιτεί σημαντική παραμετροποίηση και επαρκή δεδομένα βαθμονόμησης, γεγονός που μπορεί να δυσκολεύει την εφαρμογή τους σε περιπτώσεις όπου τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα.

Παρά τις δυσκολίες αυτές, τα ABMs χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε εφαρμογές έξυπνων πόλεων, στη διαχείριση μεγάλων εκδηλώσεων, στον σχεδιασμό συγκοινωνιακών κόμβων και στη μελέτη διαδικασιών εκκένωσης εγκαταστάσεων υψηλής επικινδυνότητας, καθώς επιτρέπουν την προσομοίωση σύνθετων κοινωνικών αλληλεπιδράσεων που δύσκολα αναπαρίστανται με άλλες μεθόδους (Bonabeau, 2002).

2.4.4 Συγκριτική αξιολόγηση μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης εξαρτάται από τον σκοπό της μελέτης, το απαιτούμενο επίπεδο λεπτομέρειας και τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων δεδομένων. Κάθε προσέγγιση παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συγκριτική αξιολόγησή τους πριν από την ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης (Πίνακας 2-2).

Χαρακτηριστικό	Social Force Model	CA	Agent-Based Models
Αναπαράσταση χώρου	Συνεχής	Διακριτή	Συνεχής
Ρεαλισμός κίνησης	Πολύ υψηλός	Μέτριος	Πολύ υψηλός
Υπολογιστικές απαιτήσεις	Μέτριες	Χαμηλές	Υψηλές
Ευκολία παραμετροποίησης	Μέτρια	Υψηλή	Χαμηλή
Αναπαράσταση αλληλεπιδράσεων	Πολύ καλή	Ικανοποιητική	Αριστη
Καταλληλότητα για σταθμούς μετρό	Πολύ υψηλή	Μέτρια	Υψηλή

Πίνακας 2-2: Συγκριτική αξιολόγηση μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης (PTV Group, 2025).

Τα CA χαρακτηρίζονται από απλή δομή και χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ή για την προσομοίωση διαδικασιών εκκένωσης. Ωστόσο, η διακριτή αναπαράσταση του χώρου περιορίζει την ακρίβεια με την οποία μπορούν να αποδοθούν οι συνεχείς μεταβολές της ανθρώπινης κίνησης. Αντίθετα, τα ABMs προσφέρουν ιδιαίτερα μεγάλη ευελιξία ως προς την περιγραφή της συμπεριφοράς των χρηστών, επιτρέποντας την εισαγωγή πολύπλοκων κανόνων λήψης αποφάσεων. Η αυξημένη αυτή ευελιξία συνοδεύεται όμως από μεγαλύτερες απαιτήσεις παραμετροποίησης και υπολογιστικής ισχύος. Το Social Force Model επιτυγχάνει μια ισορροπία μεταξύ ρεαλιστικής αναπαράστασης και υπολογιστικής αποδοτικότητας. Μέσω της προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πεζών και του περιβάλλοντος μπορεί να αναπαράγει με υψηλή αξιοπιστία φαινόμενα συμφόρησης, δημιουργίας ουρών και αυτοοργάνωσης ροών, για αυτό και έχει υιοθετηθεί από σύγχρονα λογισμικά μικροσκοπικής προσομοίωσης, όπως το PTV Viswalk (PTV Group, 2025).

Με βάση τα παραπάνω, για την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η χρήση του PTV Viswalk, καθώς το λογισμικό αξιοποιεί το Social Force Model και παρέχει τη δυνατότητα λεπτομερούς προσομοίωσης της κίνησης των επιβατών στον σταθμό Deák Ferenc tér, επιτρέποντας την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων επιβατικής ζήτησης με υψηλό βαθμό ρεαλισμού.

2.5 Λογισμικό προσομοίωσης και πλατφόρμα ανάπτυξης

Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών προσομοίωσης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εξειδικευμένων λογισμικών που επιτρέπουν την αναλυτική μελέτη της συμπεριφοράς των πεζών σε σύνθετα συγκοινωνιακά περιβάλλοντα. Μεταξύ αυτών, το PTV Viswalk αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία μικροσκοπικής προσομοίωσης, καθώς συνδυάζει υψηλή ακρίβεια στην αναπαράσταση της ανθρώπινης κίνησης με εκτεταμένες δυνατότητες ανάλυσης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Το λογισμικό αναπτύχθηκε από την εταιρεία PTV Group και χρησιμοποιείται διεθνώς τόσο στην ακαδημαϊκή έρευνα όσο και σε πραγματικές συγκοινωνιακές μελέτες για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση σταθμών μετρό, αεροδρομίων, σιδηροδρομικών σταθμών, εμπορικών κέντρων και λοιπών δημόσιων χώρων υψηλής επισκεψιμότητας (PTV Group, 2025).

Σε αντίθεση με συμβατικά λογισμικά κυκλοφοριακής προσομοίωσης, το PTV Viswalk επικεντρώνεται αποκλειστικά στην αναπαράσταση της κίνησης των πεζών. Η λειτουργία του βασίζεται στο Social Force Model, επιτρέποντας την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των χρηστών και του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο. Κάθε πεζός αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητη οντότητα, η οποία διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως επιθυμητή ταχύτητα, προορισμό, προσωπικό χώρο και δυνατότητα προσαρμογής της διαδρομής ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του λογισμικού είναι η δυνατότητα αναπαράστασης πολύπλοκων γεωμετρικών διαμορφώσεων χωρίς σημαντικούς περιορισμούς. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει αποβάθρες, διαδρόμους, κυλιόμενες κλίμακες, ανελκυστήρες, κλίμακες, εισόδους, εξόδους και λοιπά στοιχεία των συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων με μεγάλη ακρίβεια.

Παράλληλα, είναι δυνατή η εισαγωγή πραγματικών διαστάσεων και η ανάπτυξη μοντέλων που προσεγγίζουν με ρεαλισμό τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός σταθμού.

Η ευελιξία αυτή καθιστά το PTV Viswalk ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας. Ο μελετητής μπορεί να μεταβάλλει τον αριθμό των επιβατών, τη διάταξη των διαδρόμων, τη θέση των κυλιόμενων κλιμάκων ή ακόμη και τον τρόπο κατανομής των ροών, εξετάζοντας την επίδραση κάθε αλλαγής στη συνολική λειτουργία της υποδομής πριν από την υλοποίηση πραγματικών παρεμβάσεων (Barceló, 2010).

2.5.1 Περιβάλλον εργασίας του PTV Viswalk

Το περιβάλλον εργασίας του PTV Viswalk έχει σχεδιαστεί ώστε να υποστηρίζει όλα τα στάδια ανάπτυξης ενός μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης, από τη δημιουργία της γεωμετρίας μέχρι την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η διεπαφή του λογισμικού επιτρέπει στον χρήστη να οργανώνει τα δεδομένα του έργου σε διαφορετικά επίπεδα, διευκολύνοντας την επεξεργασία σύνθετων συγκοινωνιακών μοντέλων.

Το βασικό παράθυρο εργασίας περιλαμβάνει την περιοχή σχεδίασης, στην οποία αναπτύσσεται η γεωμετρία του μοντέλου, καθώς και εργαλεία διαχείρισης των αντικειμένων προσομοίωσης. Μέσω των αντίστοιχων λειτουργιών είναι δυνατή η δημιουργία περιοχών κίνησης, η εισαγωγή σημείων προέλευσης και προορισμού, η τοποθέτηση κυλιόμενων κλιμάκων και η σύνδεση των επιμέρους τμημάτων του μοντέλου.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η δυνατότητα οπτικής παρακολούθησης της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο. Ο χρήστης μπορεί να παρατηρεί τη συμπεριφορά των πεζών, να εντοπίζει περιοχές συμφόρησης και να αξιολογεί τη λειτουργία της υποδομής μέσω δυναμικών απεικονίσεων. Η δυνατότητα αυτή διευκολύνει σημαντικά τον έλεγχο του μοντέλου και την αναγνώριση πιθανών σφαλμάτων κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

2.5.2 Βασικά αντικείμενα του μοντέλου

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου στο PTV Viswalk βασίζεται στη χρήση συγκεκριμένων αντικειμένων, τα οποία περιγράφουν τόσο τη γεωμετρία του χώρου όσο και τη συμπεριφορά των πεζών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

- Περιοχές κυκλοφορίας (Walking Areas): Οι περιοχές κυκλοφορίας αποτελούν τις βασικές επιφάνειες μέσα στις οποίες επιτρέπεται η κίνηση των πεζών. Μέσω αυτών ορίζονται οι αποβάθρες, οι διάδρομοι, οι χώροι αναμονής και κάθε άλλο τμήμα της υποδομής όπου πραγματοποιείται μετακίνηση επιβατών. Η γεωμετρία των περιοχών αυτών μπορεί να προσαρμοστεί με μεγάλη ακρίβεια στις πραγματικές διαστάσεις της εγκατάστασης.
- Περιοχές εισόδου (Pedestrian Inputs): Οι περιοχές εισόδου χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των πεζών που συμμετέχουν στην προσομοίωση. Για κάθε περιοχή εισόδου ορίζεται ο αριθμός των επιβατών, ο χρόνος εισαγωγής τους στο σύστημα και τα βασικά χαρακτηριστικά του πληθυσμού. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η δημιουργία διαφορετικών σεναρίων επιβατικής ζήτησης.
- Περιοχές εξόδου (Destinations): Οι περιοχές εξόδου αντιπροσωπεύουν τους τελικούς προορισμούς των πεζών. Κάθε επιβάτης κινείται προς μία συγκεκριμένη περιοχή εξόδου, επιλέγοντας δυναμικά τη διαδρομή που θεωρεί καταλληλότερη σύμφωνα με το υποκείμενο μοντέλο συμπεριφοράς.

- Κυλιόμενες κλίμακες και σκάλες: Το PTV Viswalk παρέχει ειδικά αντικείμενα για την αναπαράσταση κυλιόμενων κλιμάκων, σταθερών κλιμάκων και ανελκυστήρων. Μέσω των αντίστοιχων παραμέτρων μπορούν να καθοριστούν το μήκος, η υψομετρική διαφορά, η κατεύθυνση λειτουργίας και η ταχύτητα μετακίνησης των χρηστών. Στην παρούσα εργασία οι κυλιόμενες κλίμακες χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση της αποβάθρας με το ανώτερο επίπεδο του σταθμού, σύμφωνα με τη γεωμετρία του Deák Ferenc tér.

2.5.3 Παράμετροι συμπεριφοράς των πεζών

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του PTV Viswalk είναι η δυνατότητα λεπτομερούς παραμετροποίησης της συμπεριφοράς των πεζών. Οι βασικές παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν περιλαμβάνουν:

- την επιθυμητή ταχύτητα κίνησης,
- την επιτάχυνση και επιβράδυνση,
- τον χρόνο αντίδρασης,
- την ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των πεζών,
- τον βαθμό αποφυγής συγκρούσεων,
- την επιλογή διαδρομής και
- την τυχαία μεταβολή της συμπεριφοράς.

Η δυνατότητα διαφοροποίησης των παραμέτρων αυτών επιτρέπει την αναπαράσταση διαφορετικών κατηγοριών χρηστών, όπως ηλικιωμένοι, άτομα με μειωμένη κινητικότητα, επιβάτες με αποσκευές ή χρήστες που κινούνται με αυξημένη ταχύτητα λόγω περιορισμένου διαθέσιμου χρόνου.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες παράμετροι του λογισμικού, καθώς αυτές βασίζονται σε εκτεταμένη διαδικασία βαθμονόμησης και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης (PTV Group, 2025).

2.5.4 Δυνατότητες ανάλυσης και εξαγωγής αποτελεσμάτων στο PTV Viswalk

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του PTV Viswalk είναι η δυνατότητα συλλογής, επεξεργασίας και ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων που προκύπτουν κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στον μελετητή να αξιολογήσει αντικειμενικά τη λειτουργία μιας συγκοινωνιακής εγκατάστασης, να εντοπίσει πιθανά προβλήματα συμφόρησης και να συγκρίνει διαφορετικά σενάρια λειτουργίας με βάση ποσοτικούς δείκτες απόδοσης (PTV Group, 2025).

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, το λογισμικό καταγράφει συνεχώς την κίνηση κάθε πεζού και αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με τη θέση, την ταχύτητα, την κατεύθυνση, τον χρόνο παραμονής και τις αλληλεπιδράσεις του με το περιβάλλον. Η συλλογή αυτών των δεδομένων πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που επιτρέπει την παρακολούθηση της εξέλιξης της κυκλοφορίας και την εξαγωγή στατιστικών στοιχείων για ολόκληρη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν είτε σε αριθμητική μορφή μέσω πινάκων είτε σε γραφική μορφή μέσω διαγραμμάτων και χαρτών πυκνότητας. Η δυνατότητα αυτή διευκολύνει σημαντικά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καθώς επιτρέπει την άμεση αναγνώριση περιοχών με αυξημένη συγκέντρωση πεζών ή μειωμένη λειτουργική απόδοση.

Στο πλαίσιο συγκοινωνιακών μελετών, οι σημαντικότεροι δείκτες που μπορούν να εξαχθούν από το PTV Viswalk περιλαμβάνουν την πυκνότητα των πεζών, τη μέση ταχύτητα κίνησης, τη ροή, τους χρόνους παραμονής, τον αριθμό των επιβατών που εξυπηρετούνται, καθώς και το επίπεδο εξυπηρέτησης (Level of Service). Οι δείκτες αυτοί αποτελούν τη βάση για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας ενός σταθμού και χρησιμοποιούνται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Στην παρούσα εργασία η αξιολόγηση περιορίστηκε στον μέσο και στον μέγιστο αριθμό πεζών σε επιλεγμένη περιοχή μέτρησης και στην οπτική παρατήρηση της χωρικής κατανομής τους. Δεν υπολογίστηκαν πραγματική πυκνότητα, ταχύτητα, καθυστέρηση ή βαθμίδα επιπέδου εξυπηρέτησης. Επομένως, τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη διερευνητική σύγκριση των τεσσάρων εκτελέσεων του συγκεκριμένου μοντέλου.

2.5.5 Βαθμονόμηση, επαλήθευση και επικύρωση μοντέλων προσομοίωσης

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης δεν ολοκληρώνεται με τη δημιουργία της γεωμετρίας και την εισαγωγή των δεδομένων. Προκειμένου τα αποτελέσματα να θεωρηθούν αξιόπιστα, απαιτείται η διαδικασία της βαθμονόμησης (calibration) και της επαλήθευσης (validation), μέσω των οποίων αξιολογείται κατά πόσο το μοντέλο προσεγγίζει ρεαλιστικά την πραγματική συμπεριφορά των χρηστών (Barceló, 2010).

Η βαθμονόμηση αναφέρεται στη διαδικασία προσαρμογής των παραμέτρων του μοντέλου, ώστε η προσομοιωμένη συμπεριφορά να συμφωνεί όσο το δυνατόν περισσότερο με πραγματικές μετρήσεις ή παρατηρήσεις. Παραδείγματα παραμέτρων που συνήθως βαθμονομούνται είναι η επιθυμητή ταχύτητα των πεζών, ο χρόνος αντίδρασης, οι αποστάσεις ασφαλείας και οι παράμετροι αποφυγής συγκρούσεων.

Η επαλήθευση (verification) αφορά τον έλεγχο ότι το μοντέλο έχει κατασκευαστεί και λειτουργεί τεχνικά σύμφωνα με τον σχεδιασμό του, χωρίς σφάλματα στη γεωμετρία, στις συνδέσεις ή στη δρομολόγηση. Η βαθμονόμηση (calibration) αφορά την προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου, ώστε τα αποτελέσματά του να προσεγγίζουν πραγματικές μετρήσεις. Η επικύρωση (validation) αφορά τον έλεγχο του βαθμονομημένου μοντέλου μέσω σύγκρισης με ανεξάρτητα πραγματικά δεδομένα.

Στην πράξη, η πλήρης βαθμονόμηση απαιτεί την ύπαρξη πραγματικών δεδομένων πεδίου, όπως μετρήσεις επιβατικής κίνησης, ταχύτητας και πυκνότητας. Ωστόσο, σε αρκετές ερευνητικές εφαρμογές, ιδιαίτερα όταν δεν είναι διαθέσιμα αντίστοιχα δεδομένα, χρησιμοποιούνται οι προτεινόμενες παράμετροι του λογισμικού, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί βάσει προηγούμενων ερευνών και θεωρούνται κατάλληλες για γενικές εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης (PTV Group, 2025).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες παράμετροι του PTV Viswalk. Δεν χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές μετρήσεις επιβατικών ροών, ταχυτήτων ή πυκνοτήτων και, συνεπώς, δεν πραγματοποιήθηκαν εμπειρική βαθμονόμηση και επικύρωση. Πραγματοποιήθηκε μόνο εσωτερικός έλεγχος της τεχνικής λειτουργίας του μοντέλου, της σύνδεσης των επιφανειών κίνησης και της δυνατότητας μετακίνησης των εικονικών πεζών προς τον προορισμό.

2.5.6 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί του PTV Viswalk

Η ευρεία χρήση του PTV Viswalk στη διεθνή πρακτική οφείλεται κυρίως στην ικανότητά του να αναπαριστά με υψηλό βαθμό ρεαλισμού τη συμπεριφορά των πεζών σε πολύπλοκες συγκοινωνιακές εγκαταστάσεις. Η δυνατότητα ανάπτυξης λεπτομερών γεωμετρικών μοντέλων, η υποστήριξη πολλαπλών σεναρίων λειτουργίας και η συνεχής καταγραφή μεγάλου αριθμού δεικτών αποτελούν βασικά πλεονεκτήματα του λογισμικού.

Επιπλέον, το PTV Viswalk παρέχει ιδιαίτερα εξελιγμένες δυνατότητες οπτικοποίησης της προσομοίωσης, επιτρέποντας στον μελετητή να παρακολουθεί δυναμικά την κίνηση των πεζών και να εντοπίζει άμεσα περιοχές αυξημένης συμφόρησης ή ανεπιθύμητων αλληλεπιδράσεων. Η δυνατότητα αυτή διευκολύνει σημαντικά τόσο τη διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου όσο και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε τεχνικές εκθέσεις και επιστημονικές εργασίες.

Παρά τα σημαντικά του πλεονεκτήματα, το λογισμικό παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου, τη σωστή παραμετροποίηση του μοντέλου και την ύπαρξη αξιόπιστων στοιχείων για τη βαθμονόμησή του. Επιπλέον, ιδιαίτερα πολύπλοκες προσομοιώσεις με μεγάλο αριθμό χρηστών μπορεί να απαιτούν σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και αυξημένο χρόνο εκτέλεσης. Παρά τους περιορισμούς αυτούς, το PTV Viswalk εξακολουθεί να αποτελεί ένα από τα πιο αξιόπιστα λογισμικά μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών και χρησιμοποιείται ευρέως από ερευνητικούς οργανισμούς, πανεπιστήμια, μελετητικές εταιρείες και φορείς διαχείρισης μεταφορών σε ολόκληρο τον κόσμο (Πίνακας 2-3) (PTV Group, 2025).

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Υψηλός βαθμός ρεαλισμού της προσομοίωσης	Απαιτεί σωστή παραμετροποίηση
Αναπαράσταση σύνθετων γεωμετριών	Ανάγκη για αξιόπιστα δεδομένα εισόδου
Υποστήριξη πολλαπλών σεναρίων	Υψηλές απαιτήσεις σε πολύ μεγάλα μοντέλα
Εξαγωγή μεγάλου αριθμού δεικτών	Χρόνος ανάπτυξης σύνθετων μοντέλων
Δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης	Απαιτεί εξοικείωση του χρήστη με το λογισμικό

Πίνακας 2-3: Πλεονεκτήματα και περιορισμοί του PTV Viswalk.

2.6 Επίπεδο Εξυπηρέτησης πεζών (LoS)

Η αξιολόγηση της ποιότητας εξυπηρέτησης των πεζών αποτελεί βασικό στοιχείο κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία συγκοινωνιακών υποδομών. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται διεθνώς η έννοια του Επιπέδου Εξυπηρέτησης (LoS), η οποία εκφράζει τον βαθμό άνεσης, ασφάλειας και λειτουργικότητας που βιώνουν οι χρήστες κατά τη μετακίνησή τους σε έναν συγκεκριμένο χώρο. Η έννοια του LoS αναπτύχθηκε αρχικά για την αξιολόγηση της κυκλοφορίας οχημάτων και στη συνέχεια προσαρμόστηκε στην ανάλυση της κυκλοφορίας πεζών, αποτελώντας σήμερα βασικό εργαλείο των συγκοινωνιακών μελετών (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Το επίπεδο εξυπηρέτησης δεν αξιολογεί αποκλειστικά τη χωρητικότητα μιας εγκατάστασης, αλλά εξετάζει συνολικά τις συνθήκες μετακίνησης των πεζών. Παράγοντες όπως η διαθέσιμη επιφάνεια ανά άτομο, η δυνατότητα ελεύθερης επιλογής πορείας, η ταχύτητα κίνησης, η πιθανότητα αλληλεπιδράσεων με άλλους χρήστες και η εμφάνιση συνθηκών συμφόρησης συνυπολογίζονται κατά τον προσδιορισμό του επιπέδου εξυπηρέτησης.

Στους σταθμούς μετρό, η αξιολόγηση του LoS αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς μεγάλος αριθμός επιβατών κινείται ταυτόχρονα σε περιορισμένους χώρους. Η διατήρηση ικανοποιητικού επιπέδου εξυπηρέτησης συμβάλλει όχι μόνο στην άνεση των χρηστών αλλά και στη συνολική ασφάλεια της εγκατάστασης, περιορίζοντας την πιθανότητα δημιουργίας επικίνδυνων συνθηκών συμφόρησης.

2.6.1 Κατηγορίες επιπέδου εξυπηρέτησης

Σύμφωνα με το Highway Capacity Manual (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022), το επίπεδο εξυπηρέτησης ταξινομείται σε έξι κατηγορίες, από το LoS A έως το LoS F, ανάλογα με τον διαθέσιμο χώρο ανά πεζό και τις επικρατούσες συνθήκες κυκλοφορίας (Πίνακας 2-4):

- LoS A: Το επίπεδο LoS A αντιστοιχεί στις καλύτερες δυνατές συνθήκες λειτουργίας. Οι πεζοί διαθέτουν μεγάλο ελεύθερο χώρο, κινούνται ανεμπόδιστα και μπορούν να επιλέξουν ελεύθερα τόσο την πορεία όσο και την ταχύτητά τους, χωρίς ουσιαστικές αλληλεπιδράσεις με άλλους χρήστες.
- LoS B: Στο επίπεδο LoS B παρατηρείται μικρή αύξηση της πυκνότητας, χωρίς όμως να επηρεάζεται ουσιαστικά η ελευθερία κίνησης. Οι πεζοί εξακολουθούν να κινούνται άνετα, ενώ οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους παραμένουν περιορισμένες.
- LoS C: Το LoS C χαρακτηρίζεται από μέτρια πυκνότητα. Οι πεζοί αρχίζουν να προσαρμόζουν συχνότερα την πορεία ή την ταχύτητά τους ώστε να αποφεύγουν συγκρούσεις με άλλους χρήστες, χωρίς ωστόσο να δημιουργούνται σημαντικές καθυστερήσεις.
- LoS D: Στο επίπεδο LoS D οι συνθήκες κυκλοφορίας γίνονται αισθητά δυσμενέστερες. Η διαθέσιμη επιφάνεια ανά πεζό μειώνεται, οι αλληλεπιδράσεις αυξάνονται και οι χρήστες δυσκολεύονται να διατηρήσουν την επιθυμητή ταχύτητα.
- LoS E: Το LoS E αντιστοιχεί σε ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητα. Οι περισσότεροι πεζοί κινούνται με χαμηλή ταχύτητα, ενώ οι δυνατότητες αλλαγής πορείας είναι εξαιρετικά περιορισμένες. Σε τέτοιες συνθήκες εμφανίζονται συχνά ουρές αναμονής και έντονα φαινόμενα συμφόρησης.
- LoS F: Το επίπεδο LoS F αντιπροσωπεύει την πλέον δυσμενή κατάσταση λειτουργίας. Η κυκλοφορία πραγματοποιείται με πολύ χαμηλές ταχύτητες ή ακόμη και με προσωρινή ακινητοποίηση των πεζών. Οι συνθήκες αυτές θεωρούνται ανεπιθύμητες, καθώς αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο ατυχημάτων και δυσχεραίνουν τη λειτουργία της εγκατάστασης.

Επίπεδο	Περιγραφή λειτουργίας
LoS A	Ελεύθερη και ανεμπόδιστη κίνηση
LoS B	Πολύ καλή λειτουργία με περιορισμένες αλληλεπιδράσεις
LoS C	Μέτρια πυκνότητα και μικρές προσαρμογές πορείας
LoS D	Αυξημένη συμφόρηση και περιορισμός της ταχύτητας
LoS E	Πολύ υψηλή πυκνότητα και σημαντικές καθυστερήσεις
LoS F	Έντονη συμφόρηση και εξαιρετικά χαμηλή κινητικότητα

Πίνακας 2-4: Κατηγορίες Επιπέδου Εξυπηρέτησης (LoS).

2.6.2 Εφαρμογή του LoS στους σταθμούς μετρό

Η αξιολόγηση του επιπέδου εξυπηρέτησης χρησιμοποιείται εκτενώς στον σχεδιασμό και τη λειτουργία σταθμών μετρό, καθώς επιτρέπει την αντικειμενική εκτίμηση της λειτουργικής κατάστασης των επιμέρους χώρων. Μέσω της ανάλυσης του LoS είναι δυνατό να εντοπιστούν περιοχές όπου η διαθέσιμη επιφάνεια δεν επαρκεί για την εξυπηρέτηση του αναμενόμενου αριθμού επιβατών, καθώς και να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα διαφορετικών σχεδιαστικών λύσεων.

Στην παρούσα εργασία δεν υπολογίστηκε αριθμητικά η πυκνότητα σε πεζούς ανά τετραγωνικό μέτρο και δεν εφαρμόστηκαν τα αριθμητικά όρια του Highway Capacity Manual. Επομένως, δεν υπολογίστηκε ούτε αποδόθηκε συγκεκριμένη βαθμίδα LoS στις περιοχές του μοντέλου. Η έννοια του επιπέδου εξυπηρέτησης χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως θεωρητικό πλαίσιο για την ποιοτική συζήτηση των μεταβολών που παρατηρήθηκαν.

2.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση εφαρμογών μικροσκοπικής προσομοίωσης σε σταθμούς μετρό

Η μικροσκοπική προσομοίωση πεζών έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης επιστημονικής έρευνας κατά τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς η συνεχής αύξηση της επιβατικής κίνησης στους αστικούς συγκοινωνιακούς κόμβους δημιουργεί ολοένα και μεγαλύτερες απαιτήσεις ως προς τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των υποδομών. Πλήθος ερευνητικών εργασιών έχουν αξιοποιήσει τεχνικές μικροσκοπικής προσομοίωσης για την αξιολόγηση της κυκλοφορίας των πεζών σε σταθμούς μετρό, αεροδρόμια, σιδηροδρομικούς σταθμούς και λοιπές εγκαταστάσεις υψηλής επισκεψιμότητας.

Η ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας επιτρέπει την κατανόηση των σύγχρονων ερευνητικών προσεγγίσεων, των μοντέλων που χρησιμοποιούνται συχνότερα καθώς και των βασικών δεικτών αξιολόγησης της λειτουργικότητας των συγκοινωνιακών υποδομών.

2.7.1 Εφαρμογές του Social Force Model

Η εργασία των Helbing και Molnár (1995) αποτέλεσε σημείο αναφοράς για την εξέλιξη της μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών. Οι συγγραφείς ανέπτυξαν το Social Force Model, αποδεικνύοντας ότι σύνθετα φαινόμενα της ανθρώπινης κίνησης μπορούν να περιγραφούν μέσω της αλληλεπίδρασης απλών μαθηματικών δυνάμεων. Το μοντέλο κατάφερε να αναπαράγει με επιτυχία τη δημιουργία λωρίδων κυκλοφορίας, τη συμφόρηση σε στενούς διαδρόμους και τη δυναμική συμπεριφορά μεγάλων ομάδων πεζών.

Λίγα χρόνια αργότερα, οι Helbing et al. (2000) αξιοποίησαν το ίδιο μοντέλο για τη μελέτη διαδικασιών εκκένωσης κτιρίων. Τα αποτελέσματα της έρευνας ανέδειξαν ότι η υπερβολική βιασύνη των ατόμων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής απόδοσης της εκκένωσης, φαινόμενο γνωστό ως Faster-is-Slower Effect. Η συγκεκριμένη έρευνα αποτελεί μέχρι σήμερα μία από τις πλέον αναγνωρισμένες εφαρμογές της θεωρίας των κοινωνικών δυνάμεων.

Οι παραπάνω εργασίες επηρέασαν σημαντικά την ανάπτυξη σύγχρονων λογισμικών προσομοίωσης, όπως το PTV Viswalk, το οποίο βασίζεται στις ίδιες θεωρητικές αρχές για την αναπαράσταση της συμπεριφοράς των πεζών.

2.7.2 Έρευνες σε σταθμούς μετρό

Η εφαρμογή της μικροσκοπικής προσομοίωσης σε σταθμούς μετρό έχει αποτελέσει αντικείμενο πολυάριθμων ερευνών, καθώς οι συγκεκριμένες εγκαταστάσεις χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις επιβατών και σύνθετες ροές μετακίνησης.

Οι Daamen και Hoogendoorn (2003) πραγματοποίησαν πειραματικές μετρήσεις της συμπεριφοράς πεζών σε συγκοινωνιακούς σταθμούς, αναλύοντας τη σχέση μεταξύ πυκνότητας, ταχύτητας και ροής. Τα αποτελέσματά τους συνέβαλαν σημαντικά στη βαθμονόμηση μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης και χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα ως σημείο αναφοράς στη σχετική βιβλιογραφία.

Τα συμπεράσματα των παραπάνω μελετών επιβεβαιώνουν ότι η μικροσκοπική προσομοίωση αποτελεί ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο για την αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων πριν από την υλοποίησή τους.

2.7.3 Σύγχρονες εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης

Τα τελευταία χρόνια η χρήση της μικροσκοπικής προσομοίωσης έχει επεκταθεί σημαντικά, ακολουθώντας τις εξελίξεις στους τομείς της υπολογιστικής ισχύος και της τεχνητής νοημοσύνης. Σύγχρονες εφαρμογές αξιοποιούν δεδομένα από αισθητήρες, κάμερες και συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τη συνεχή ενημέρωση των μοντέλων και τη δυναμική προσαρμογή τους στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Schadschneider et al., 2009).

Παράλληλα, η έννοια των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins) αποκτά ολοένα μεγαλύτερη σημασία στη διαχείριση συγκοινωνιακών υποδομών. Ένα ψηφιακό δίδυμο αποτελεί μία ψηφιακή αναπαράσταση μιας πραγματικής εγκατάστασης, η οποία ενημερώνεται διαρκώς μέσω πραγματικών δεδομένων λειτουργίας. Η σύνδεση των μικροσκοπικών μοντέλων με τεχνολογίες ψηφιακών διδύμων επιτρέπει τη συνεχή αξιολόγηση της λειτουργίας ενός σταθμού και τη λήψη άμεσων αποφάσεων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας των επιβατών στο πλαίσιο της σύγχρονης διαχείρισης συγκοινωνιακών υποδομών.

Επιπλέον, οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης χρησιμοποιούνται πλέον για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων των μοντέλων προσομοίωσης, την πρόβλεψη της επιβατικής ζήτησης και την αυτόματη ανίχνευση περιοχών συμφόρησης. Η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό των μελλοντικών «έξυπνων» συγκοινωνιακών συστημάτων.

2.7.4 Συσχέτιση της βιβλιογραφίας με την παρούσα εργασία

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση καταδεικνύει ότι η μικροσκοπική προσομοίωση αποτελεί πλέον καθιερωμένο εργαλείο ανάλυσης της κυκλοφορίας πεζών σε συγκοινωνιακές υποδομές. Οι περισσότερες σύγχρονες μελέτες βασίζονται σε μοντέλα που περιγράφουν κάθε πεζό ως ανεξάρτητη οντότητα και αξιολογούν τη λειτουργία των εγκαταστάσεων μέσω δεικτών όπως η πυκνότητα, η ροή, η ταχύτητα και το επίπεδο εξυπηρέτησης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αξιοποιεί το PTV Viswalk για την ανάπτυξη απλοποιημένου μοντέλου επιλεγμένου τμήματος του σταθμού Deák Ferenc tér. Μέσω τεσσάρων υποθετικών ρυθμών εισαγωγής διερευνάται συγκριτικά η απόκριση του συγκεκριμένου μοντέλου, χωρίς να επιχειρείται αξιολόγηση της πραγματικής λειτουργίας ή της χωρητικότητας του σταθμού.

Η επιλογή του συγκεκριμένου λογισμικού και της μεθοδολογίας βασίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία (Πίνακας 2-5) και ευθυγραμμίζεται με τις σύγχρονες πρακτικές της συγκοινωνιακής μηχανικής.

Συγγραφείς	Έτος	Αντικείμενο	Κύριο συμπέρασμα
Helbing & Molnár	1995	Social Force Model	Περιγραφή της συμπεριφοράς των πεζών μέσω κοινωνικών δυνάμεων
Helbing et al.	2000	Εκκένωση κτιρίων	Ανάδειξη του φαινομένου Faster-is-Slower
Daamen & Hoogendoorn	2003	Συμπεριφορά πεζών	Ανάλυση σχέσης πυκνότητας, ταχύτητας και ροής
Schadschneider et al.	2009	Προσομοίωση πλήθους	Σύγχρονες τεχνικές μικροσκοπικής προσομοίωσης
PTV Group	2025	PTV Viswalk	Δυνατότητες και εφαρμογές του λογισμικού

Πίνακας 2-5: Σύνοψη βασικών βιβλιογραφικών πηγών για τη μικροσκοπική προσομοίωση πεζών.

2.8 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο που υποστηρίζει τη μελέτη της κυκλοφορίας πεζών και την ανάπτυξη μικροσκοπικών μοντέλων προσομοίωσης σε συγκοινωνιακές υποδομές. Αρχικά αναλύθηκαν οι βασικές αρχές της κυκλοφορίας πεζών, δίνοντας έμφαση στα θεμελιώδη μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της ανθρώπινης κίνησης, όπως η πυκνότητα, η ταχύτητα και η ροή. Παράλληλα, εξετάστηκε η αλληλεπίδραση των μεγεθών αυτών και παρουσιάστηκε η σημασία τους για την αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης σταθμών μετρό και λοιπών συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν οι βασικές κατηγορίες κυκλοφοριακής προσομοίωσης, με ιδιαίτερη έμφαση στη μικροσκοπική προσομοίωση, η οποία επιτρέπει την αναπαράσταση κάθε πεζού ως ανεξάρτητης οντότητας με δυνατότητα λήψης αποφάσεων και συνεχούς αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον και τους υπόλοιπους χρήστες. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για τη μελέτη χώρων υψηλής επιβατικής ζήτησης, όπου η ανθρώπινη συμπεριφορά παρουσιάζει σημαντική πολυπλοκότητα και μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες.

Ιδιαίτερη αναφορά πραγματοποιήθηκε στα κυριότερα μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης, όπως το Social Force Model, τα CA και τα Agent-Based Models. Η συγκριτική αξιολόγηση των προσεγγίσεων αυτών ανέδειξε τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς κάθε μοντέλου, τεκμηριώνοντας την επιλογή του Social Force Model ως της καταλληλότερης θεωρητικής βάσης για την παρούσα έρευνα. Η επιλογή αυτή συνδέεται άμεσα με το γεγονός ότι το λογισμικό PTV Viswalk βασίζεται στις αρχές του συγκεκριμένου μοντέλου, προσφέροντας υψηλό επίπεδο ρεαλισμού κατά την προσομοίωση της κίνησης των πεζών.

Στο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν επίσης οι βασικές δυνατότητες του λογισμικού PTV Viswalk, οι αρχές λειτουργίας του, τα σημαντικότερα αντικείμενα μοντελοποίησης, οι παράμετροι συμπεριφοράς των πεζών, καθώς και οι δυνατότητες ανάλυσης και εξαγωγής αποτελεσμάτων. Παράλληλα, έγινε αναφορά στις διαδικασίες βαθμονόμησης και επαλήθευσης των μοντέλων προσομοίωσης, οι οποίες αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων και την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, αναλύθηκε η έννοια του Επιπέδου Εξυπηρέτησης (LoS), το οποίο χρησιμοποιείται διεθνώς ως βασικός δείκτης αξιολόγησης της λειτουργικότητας των συγκοινωνιακών υποδομών. Η παρουσίαση των διαφορετικών επιπέδων εξυπηρέτησης κατέδειξε τη στενή σχέση μεταξύ της πυκνότητας των πεζών, της ελευθερίας κίνησης και της συνολικής ποιότητας εξυπηρέτησης που παρέχεται στους χρήστες μιας εγκατάστασης.

Τέλος, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης παρουσιάστηκαν χαρακτηριστικές εφαρμογές της μικροσκοπικής προσομοίωσης σε σταθμούς μετρό και άλλες εγκαταστάσεις υψηλής επισκεψιμότητας, επιβεβαιώνοντας ότι η χρήση εξειδικευμένων εργαλείων προσομοίωσης αποτελεί πλέον καθιερωμένη πρακτική τόσο στην επιστημονική έρευνα όσο και στον συγκοινωνιακό σχεδιασμό. Η ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας ανέδειξε τη σημασία της προσομοίωσης ως εργαλείου υποστήριξης της λήψης αποφάσεων, της αξιολόγησης εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων και της βελτίωσης της λειτουργικής απόδοσης των συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων.

Το θεωρητικό υπόβαθρο που αναπτύχθηκε στο παρόν κεφάλαιο αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας που ακολουθεί. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο σταθμός Deák Ferenc tér του μετρό της Βουδαπέστης, τα βασικά λειτουργικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, καθώς και οι λόγοι επιλογής του ως αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Η ανάλυση αυτή αποτελεί το απαραίτητο στάδιο πριν από την ανάπτυξη του μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης που παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια.

3 Το Σύστημα Μετρό της Βουδαπέστης και ο Σταθμός Μελέτης

3.1 Εισαγωγή

Η επιλογή της κατάλληλης περιοχής μελέτης αποτελεί καθοριστικό στάδιο στην ανάπτυξη ενός μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης, καθώς τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά του μοντέλου και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του. Οι σταθμοί μετρό παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μελέτη της κυκλοφορίας πεζών, καθώς συγκεντρώνουν μεγάλο αριθμό χρηστών με διαφορετικούς προορισμούς, οι οποίοι κινούνται ταυτόχρονα σε περιορισμένους χώρους και αλληλεπιδρούν συνεχώς μεταξύ τους.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης ο σταθμός Deák Ferenc tér του μετρό της Βουδαπέστης. Ο συγκεκριμένος σταθμός αποτελεί τον σημαντικότερο συγκοινωνιακό κόμβο του υπόγειου σιδηροδρομικού δικτύου της πόλης, καθώς εξυπηρετεί τη διασύνδεση τριών βασικών γραμμών μετρό και συγκεντρώνει καθημερινά μεγάλο αριθμό επιβατών. Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του, οι έντονες ροές μετακίνησης και οι συνεχείς μετεπιβιβάσεις δημιουργούν ένα ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον για τη μελέτη της συμπεριφοράς των πεζών μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά συνοπτικά το μετρό της Βουδαπέστης και η ιστορική του εξέλιξη, ακολουθεί η περιγραφή του σταθμού Deák Ferenc tér και των βασικών λειτουργικών του χαρακτηριστικών, ενώ στη συνέχεια τεκμηριώνεται η επιλογή του ως αντικείμενο της παρούσας έρευνας.

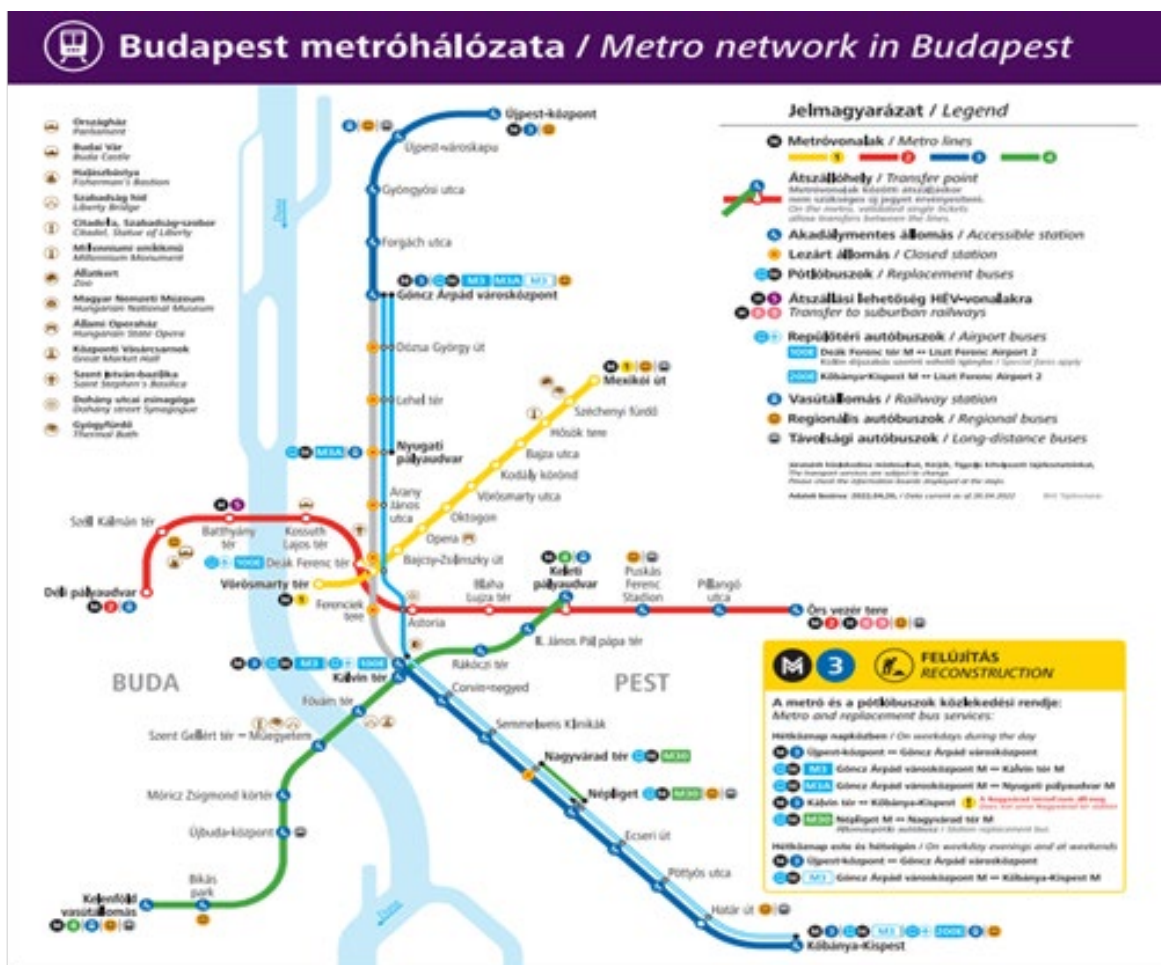
3.2 Το μετρό της Βουδαπέστης: γενικά χαρακτηριστικά

Το μετρό της Βουδαπέστης αποτελεί το σημαντικότερο μέσο σταθερής τροχιάς της ουγγρικής πρωτεύουσας και εξυπηρετεί καθημερινά εκατοντάδες χιλιάδες επιβάτες. Η λειτουργία του συμβάλλει καθοριστικά στην κάλυψη των αναγκών μετακίνησης των κατοίκων και των επισκεπτών της πόλης, ενώ παράλληλα περιορίζει τη χρήση ιδιωτικών οχημάτων, συμβάλλοντας στη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μεταφορών (Budapesti Közlekedési Központ [BKK], n.d.).

Η ανάπτυξη του μετρό ξεκίνησε στα τέλη του 19ου αιώνα, όταν η Βουδαπέστη γνώριζε έντονη αστική ανάπτυξη. Το 1896 τέθηκε σε λειτουργία η πρώτη υπόγεια γραμμή, γνωστή σήμερα ως M1, η οποία αποτελεί το παλαιότερο ηλεκτροκίνητο υπόγειο σιδηροδρομικό σύστημα της ηπειρωτικής Ευρώπης. Η κατασκευή της πραγματοποιήθηκε με αφορμή τον εορτασμό της χιλιετηρίδας του ουγγρικού κράτους και αποτέλεσε σημαντικό τεχνολογικό επίτευγμα για την εποχή της.

Κατά τις επόμενες δεκαετίες, η συνεχιζόμενη πληθυσμιακή αύξηση και η επέκταση της πόλης οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων γραμμών μετρό. Σήμερα το δίκτυο αποτελείται από τέσσερις βασικές γραμμές (M1, M2, M3 και M4), οι οποίες εξυπηρετούν μεγάλο μέρος του πολεοδομικού συγκροτήματος και συνδέονται με λεωφορειακές και τραμ γραμμές, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα δημόσιων μεταφορών.

Η λειτουργία του δικτύου βασίζεται σε συχνά δρομολόγια, ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής, ώστε να εξασφαλίζεται η γρήγορη μετακίνηση των επιβατών. Παράλληλα, πραγματοποιούνται συνεχώς έργα εκσυγχρονισμού των υποδομών, με στόχο τη βελτίωση της ασφάλειας, της προσβασιμότητας και της ενεργειακής απόδοσης των εγκαταστάσεων (BKK, n.d.).



Σχήμα 3-1: Χάρτης Μετρό Βουδαπέστης (BKK, n.d.).

3.2.1 Οι γραμμές του μετρό

Το υπόγειο σιδηροδρομικό δίκτυο της Βουδαπέστης αποτελείται από τέσσερις κύριες γραμμές, οι οποίες διαφέρουν ως προς τη χρονολογία κατασκευής, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις περιοχές που εξυπηρετούν (Σχήμα 3-1 και Πίνακας 3-1).

Η γραμμή M1 (Millennium Underground Railway) αποτελεί τη μοναδική ιστορική γραμμή του δικτύου και έχει αναγνωριστεί ως Μνημείο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς της United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Διαθέτει μικρό μήκος και εξυπηρετεί κυρίως το ιστορικό κέντρο της πόλης και σημαντικά τουριστικά αξιοθέατα.

Η γραμμή M2 συνδέει τις ανατολικές και δυτικές περιοχές της Βουδαπέστης, διασχίζοντας τον ποταμό Δούναβη μέσω υπόγειας διάβασης. Αποτελεί μία από τις σημαντικότερες γραμμές του δικτύου λόγω της υψηλής επιβατικής ζήτησης και των πολλών σημείων μετεπιβίβασης.

Η γραμμή M3 είναι η μεγαλύτερη σε μήκος γραμμή του συστήματος και εξυπηρετεί κυρίως τη σύνδεση των βόρειων και νότιων περιοχών της πόλης. Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί εκτεταμένα έργα ανακαίνισης των σταθμών και του εξοπλισμού της, με στόχο τη βελτίωση της λειτουργικότητας και της προσβασιμότητας.

Η γραμμή M4 αποτελεί τη νεότερη προσθήκη στο δίκτυο και χαρακτηρίζεται από σύγχρονες τεχνολογικές υποδομές, υψηλό επίπεδο αυτοματοποίησης και ιδιαίτερη αρχιτεκτονική σχεδίαση των σταθμών. Η λειτουργία της συνέβαλε σημαντικά στη βελτίωση της συνδεσιμότητας του δικτύου και στη μείωση των χρόνων μετακίνησης μεταξύ βασικών περιοχών της πόλης.

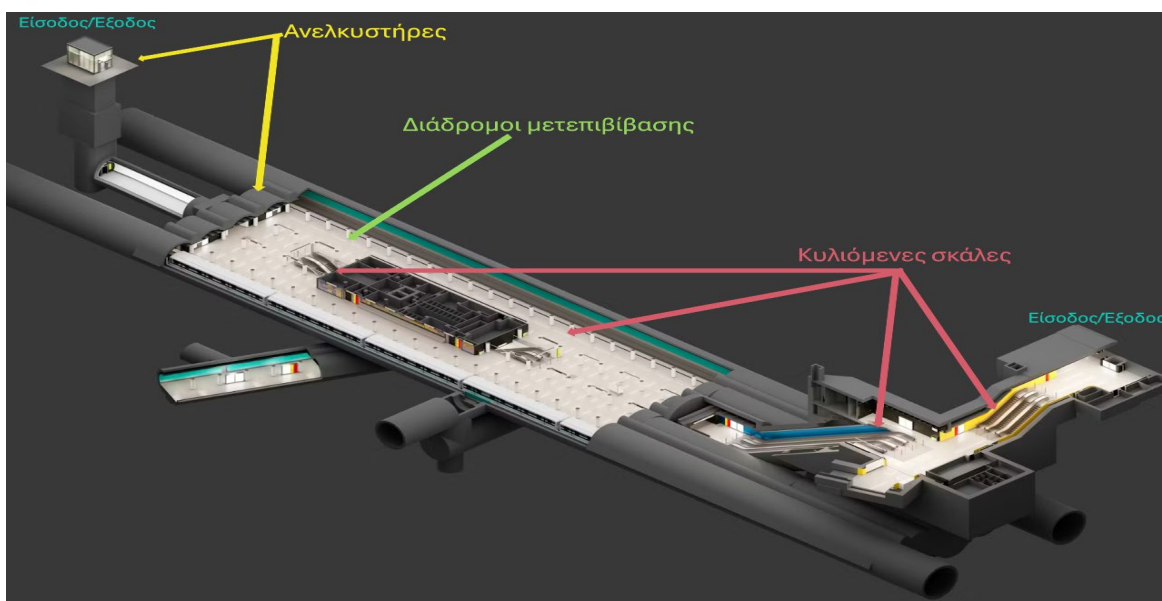
Η διασύνδεση των τεσσάρων γραμμών πραγματοποιείται σε συγκεκριμένους σταθμούς μετεπιβίβασης, σημαντικότερος από τους οποίους είναι ο Deák Ferenc tér, ο οποίος αποτελεί τον κεντρικό συγκοινωνιακό κόμβο του συστήματος.

Γραμμή	Έτος λειτουργίας	Βασικά χαρακτηριστικά
M1	1896	Πρώτη υπόγεια γραμμή στην ηπειρωτική Ευρώπη, ιστορικός χαρακτήρας
M2	1970	Ανατολική-δυτική σύνδεση της πόλης
M3	1976	Μεγαλύτερη γραμμή του δικτύου
M4	2014	Σύγχρονη αυτοματοποιημένη γραμμή με νέες υποδομές

Πίνακας 3-1: Βασικά χαρακτηριστικά των γραμμών του μετρό της Βουδαπέστης (BKK, n.d.).

3.3 Λειτουργικός ρόλος του σταθμού Deák Ferenc tér

Ο σταθμός Deák Ferenc tér αποτελεί τον σημαντικότερο κόμβο του δικτύου μετρό της Βουδαπέστης και έναν από τους πλέον πολυσύχναστους σταθμούς δημόσιων μεταφορών στην Ουγγαρία. Βρίσκεται στο ιστορικό και εμπορικό κέντρο της πόλης, στην πλατεία Deák Ferenc, από την οποία πήρε και το όνομά του. Η στρατηγική του θέση τον καθιστά βασικό σημείο σύνδεσης μεταξύ διαφορετικών μέσων μεταφοράς, εξυπηρετώντας καθημερινά μεγάλο αριθμό επιβατών που πραγματοποιούν μετακινήσεις τόσο εντός του κέντρου όσο και προς τις περιφερειακές περιοχές της πόλης (Σχήμα 3-2).



Σχήμα 3-2: Σταθμός Deák Ferenc tér (Paragram,n.d.).

Η σημασία του σταθμού δεν περιορίζεται μόνο στη γεωγραφική του θέση, αλλά σχετίζεται κυρίως με τον ρόλο του ως βασικού σταθμού μετεπιβίβασης μεταξύ των γραμμών M1, M2 και M3 του μετρό. Παράλληλα, στην επιφάνεια εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό γραμμών λεωφορείων, τραμ και τρόλεϊ, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο δίκτυο αστικών μεταφορών. Η συγκέντρωση διαφορετικών μέσων μεταφοράς στο ίδιο σημείο έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία έντονων ροών πεζών καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, γεγονός που καθιστά τον σταθμό ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης.

Η συνεχής εναλλαγή επιβατών, οι πολλαπλές διαδρομές μετεπιβίβασης και η παρουσία διαφορετικών επιπέδων κυκλοφορίας δημιουργούν ένα ιδιαίτερα σύνθετο περιβάλλον μετακίνησης. Οι συνθήκες αυτές προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες διερεύνησης της

συμπεριφοράς των πεζών, καθώς στον ίδιο χώρο συνυπάρχουν επιβάτες που εισέρχονται στον σταθμό, επιβάτες που αποβιβάζονται από τους συρμούς, χρήστες που πραγματοποιούν μετεπιβίβαση μεταξύ διαφορετικών γραμμών και επισκέπτες που κινούνται προς τις εξόδους του σταθμού.

Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά τον Deák Ferenc tér χαρακτηριστικό παράδειγμα σύγχρονου συγκοινωνιακού κόμβου, στον οποίο η αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας των πεζών είναι καθοριστικής σημασίας τόσο για τη λειτουργικότητα όσο και για την ασφάλεια των χρηστών (BKK, n.d.).

3.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σταθμού

Ο σταθμός αποτελείται από πολλαπλά υπόγεια επίπεδα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω κυλιόμενων κλιμάκων, σταθερών κλιμάκων και ανελκυστήρων. Η διαμόρφωση αυτή επιτρέπει τη διαχείριση μεγάλου αριθμού επιβατών, ενώ παράλληλα διευκολύνει τις μετεπιβιβάσεις μεταξύ των διαφορετικών γραμμών του δικτύου.

Οι αποβάθρες χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλο μήκος, ώστε να εξυπηρετούν συρμούς πολλών βαγονιών, ενώ το πλάτος τους επαρκεί για την ασφαλή αναμονή και κυκλοφορία των επιβατών ακόμη και κατά τις περιόδους αυξημένης ζήτησης. Παράλληλα, οι διάδρομοι σύνδεσης έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτρέπουν την ταυτόχρονη κίνηση πεζών προς αντίθετες κατευθύνσεις, περιορίζοντας την πιθανότητα δημιουργίας έντονων σημείων συμφόρησης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διάταξη των κυλιόμενων κλιμάκων, οι οποίες αποτελούν τον βασικό τρόπο κατακόρυφης μετακίνησης των επιβατών μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων του σταθμού. Η χωροθέτησή τους επηρεάζει άμεσα τις διαδρομές που επιλέγουν οι χρήστες και συνεπώς διαμορφώνει τα πρότυπα κυκλοφορίας που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του σταθμού.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η γεωμετρία του μοντέλου αναπτύχθηκε με βάση τα βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά του σταθμού, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην αποβάθρα, στις κυλιόμενες κλίμακες και στον διάδρομο που συνδέει τα επιμέρους επίπεδα.

3.3.2 Κυκλοφορία των επιβατών

Η κυκλοφορία των επιβατών στον σταθμό παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, ακολουθώντας τη μεταβολή της επιβατικής ζήτησης στο σύνολο του δικτύου. Κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες αιχμής παρατηρείται σημαντική αύξηση των ροών, καθώς μεγάλος αριθμός χρηστών μετακινείται προς και από τους χώρους εργασίας, τα εκπαιδευτικά ιδρύματα και τις εμπορικές περιοχές του κέντρου της πόλης.

Η λειτουργία του σταθμού χαρακτηρίζεται από την ταυτόχρονη ανάπτυξη διαφορετικών ροών κίνησης. Ένα μέρος των επιβατών εισέρχεται στον σταθμό από τις επιφανειακές εισόδους με προορισμό τις αποβάθρες, ενώ άλλοι αποβιβάζονται από τους συρμούς και κατευθύνονται προς τις εξόδους ή πραγματοποιούν μετεπιβίβαση σε άλλη γραμμή μετρό. Η συνύπαρξη αυτών των διαφορετικών κατευθύνσεων δημιουργεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο περιβάλλον κυκλοφορίας, στο οποίο οι πεζοί αλληλεπιδρούν συνεχώς μεταξύ τους.

Κατά τις περιόδους αυξημένης επιβατικής ζήτησης, οι κυλιόμενες κλίμακες και οι διάδρομοι σύνδεσης αποτελούν τα πλέον κρίσιμα σημεία του σταθμού, καθώς συγκεντρώνουν μεγάλο μέρος των μετακινήσεων. Η λειτουργική τους απόδοση επηρεάζει άμεσα τη συνολική εικόνα της κυκλοφορίας και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση των μετεπιβιβάσεων.

3.3.3 Λειτουργικός ρόλος του σταθμού

Ο Deák Ferenc tér δεν λειτουργεί απλώς ως σημείο επιβίβασης και αποβίβασης επιβατών, αλλά ως ο σημαντικότερος κόμβος ανταλλαγής ροών στο σύνολο του δικτύου μετρό της Βουδαπέστης. Η συγκέντρωση τριών γραμμών μετρό στο ίδιο σημείο δημιουργεί έντονες απαιτήσεις ως προς την οργάνωση της κυκλοφορίας των πεζών και καθιστά αναγκαία τη διατήρηση υψηλού επιπέδου λειτουργικότητας των υποδομών.

Η αποτελεσματική διαχείριση των επιβατικών ροών συμβάλλει στη μείωση των καθυστερήσεων, στη βελτίωση της άνεσης των χρηστών και στην αύξηση της συνολικής χωρητικότητας του σταθμού. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της λειτουργίας του μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς επιτρέπει την αναγνώριση πιθανών σημείων συμφόρησης και την εκτίμηση της επίδρασης διαφορετικών επιπέδων επιβατικής ζήτησης.

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς των πεζών στον συγκεκριμένο σταθμό μπορεί να συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας αντίστοιχων συγκοινωνιακών κόμβων και να υποστηρίξει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τον σχεδιασμό και τη διαχείριση των υποδομών αστικών μεταφορών.

3.3.4 Επιλογή του σταθμού ως αντικείμενο έρευνας

Η επιλογή του σταθμού Deák Ferenc tér ως αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε έπειτα από αξιολόγηση των λειτουργικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, καθώς και της σημασίας του στο σύστημα αστικών μεταφορών της Βουδαπέστης. Ο συγκεκριμένος σταθμός παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς αποτελεί τον σημαντικότερο κόμβο μετεπιβίβασης του δικτύου μετρό, συγκεντρώνοντας καθημερινά μεγάλο αριθμό επιβατών με διαφορετικά πρότυπα μετακίνησης.

Ένα από τα βασικά κριτήρια επιλογής ήταν η έντονη πολυπλοκότητα της κυκλοφορίας των πεζών. Η συνύπαρξη επιβατών που εισέρχονται στον σταθμό, αποβιβάζονται από τους συρμούς ή πραγματοποιούν μετεπιβίβαση μεταξύ διαφορετικών γραμμών δημιουργεί ένα δυναμικό περιβάλλον, στο οποίο αναπτύσσονται πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις. Η προσομοίωση τέτοιων συνθηκών επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των συγκοινωνιακών κόμβων και την αξιολόγηση της απόδοσής τους υπό διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης.

Επιπλέον, ο σταθμός διαθέτει χαρακτηριστικά που διευκολύνουν την ανάπτυξη ενός μικροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης. Η σαφής διάκριση των επιπέδων, η ύπαρξη αποβαθρών, διαδρόμων και κυλιόμενων κλιμάκων, καθώς και οι καθορισμένες διαδρομές των επιβατών επιτρέπουν την αναπαράσταση της λειτουργίας του μέσω εξειδικευμένων λογισμικών όπως το PTV Viswalk.

Η επιλογή του σταθμού παρουσιάζει ενδιαφέρον και από επιστημονική άποψη, καθώς οι μεγάλοι σταθμοί μετεπιβίβασης αποτελούν συχνά αντικείμενο ερευνών σχετικά με την ασφάλεια, την επιχειρησιακή λειτουργία και τη διαχείριση της κυκλοφορίας των πεζών. Συνεπώς, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να συμβάλουν στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των χρηστών σε αντίστοιχες συγκοινωνιακές υποδομές.

3.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου προσομοίωσης

Για την ανάπτυξη του μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης επιλέχθηκε να αναπαρασταθεί το βασικό λειτουργικό τμήμα του σταθμού που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς την κυκλοφορία των πεζών. Η γεωμετρία του μοντέλου σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του PTV Viswalk.

Το μοντέλο αναπαριστά απλοποιημένα επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér. Η γενική διάταξη της αποβάθρας, του διαδρόμου σύνδεσης και του συστήματος κυλιόμενων κλιμάκων βασίστηκε σε διαθέσιμο οπτικό υλικό. Επειδή δεν ήταν διαθέσιμα αναλυτικά αρχιτεκτονικά σχέδια ή ακριβείς διαστάσεις, οι επιμέρους διαστάσεις και ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσεγγίστηκαν κατά τη δημιουργία του μοντέλου.

Το εξεταζόμενο τμήμα περιλαμβάνει την αποβάθρα, τον διάδρομο σύνδεσης και δύο διαδοχικές ομάδες έξι κυλιόμενων κλιμάκων που οδηγούν προς ανώτερο επίπεδο. Δεν μοντελοποιήθηκαν οι υπόλοιπες αποβάθρες, οι εξοδοί προς την επιφάνεια, οι εμπορικοί και βοηθητικοί χώροι και τα υπόλοιπα επίπεδα του σταθμού. Συνεπώς, η γεωμετρία δεν αποτελεί πλήρη ψηφιακή ανακατασκευή και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της πραγματικής χωρητικότητας του σταθμού.

Η απλοποίηση ορισμένων δευτερευόντων χαρακτηριστικών του σταθμού κρίθηκε απαραίτητη, προκειμένου να περιοριστεί η πολυπλοκότητα του μοντέλου και να δοθεί έμφαση στα στοιχεία που επηρεάζουν ουσιαστικά την κυκλοφορία των πεζών. Η προσέγγιση αυτή ακολουθείται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς επιτρέπει την ανάπτυξη λειτουργικών μοντέλων χωρίς να μειώνεται η αξιοπιστία της ανάλυσης (Barceló, 2010).

3.4.1 Βασικά στοιχεία του μοντέλου

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο PTV Viswalk αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά στοιχεία:

- περιοχή αποβάθρας, όπου δημιουργούνται οι πεζοί,
- κεντρικό διάδρομο κυκλοφορίας,
- έξι κυλιόμενες κλίμακες,
- μία περιοχή εισαγωγής πεζών (ένα Pedestrian Input),

- μία περιοχή προορισμού (ένας Destination),
- μία στατική διαδρομή πεζών (Static Pedestrian Route),
- δεκατρείς περιοχές μέτρησης (Area Measurements) και
- συνδέσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων.

Κάθε ένα από τα παραπάνω αντικείμενα επιτελεί διαφορετικό λειτουργικό ρόλο στο μοντέλο και συμβάλλει στην αναπαράσταση της πραγματικής λειτουργίας του σταθμού.

Οι περιοχές εισόδου χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των επιβατών στα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, ενώ οι περιοχές προορισμού καθόριζαν την τελική κατεύθυνση κίνησης κάθε χρήστη. Οι περιοχές μέτρησης αξιοποιήθηκαν για την καταγραφή στοιχείων σχετικά με την πυκνότητα, τον αριθμό των πεζών και τη λειτουργική κατάσταση του σταθμού κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

3.4.2 Παραδοχές της μοντελοποίησης

Η ανάπτυξη κάθε μοντέλου προσομοίωσης βασίζεται σε ένα σύνολο παραδοχών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την απλοποίηση της πραγματικότητας και τη δημιουργία ενός λειτουργικού υπολογιστικού μοντέλου. Στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκαν συγκεκριμένες παραδοχές σχετικά με τη συμπεριφορά των πεζών και τη λειτουργία του σταθμού, προκειμένου να διασφαλιστεί η ομαλή εκτέλεση των προσομοιώσεων.

Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι όλοι οι πεζοί κινούνται σύμφωνα με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους συμπεριφοράς του PTV Viswalk, χωρίς διαφοροποίηση ως προς την ηλικία, τη φυσική κατάσταση ή τη μεταφορά αποσκευών. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι οι κυλιόμενες κλίμακες λειτουργούν κανονικά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και ότι δεν υπάρχουν έκτακτα περιστατικά ή τεχνικές βλάβες που να επηρεάζουν τη λειτουργία του σταθμού.

Ακόμη, η ανάλυση επικεντρώνεται αποκλειστικά στην κυκλοφορία των πεζών εντός του εξεταζόμενου τμήματος του σταθμού και δεν λαμβάνει υπόψη εξωτερικούς παράγοντες, όπως καθυστερήσεις δρομολογίων, μεταβολές στη συχνότητα των συρμών ή απρόβλεπτες μεταβολές της επιβατικής ζήτησης.

Οι παραδοχές αυτές επιτρέπουν την ανάπτυξη ενός συνεπούς μοντέλου, κατάλληλου για τη συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών σεναρίων επιβατικής ζήτησης που εξετάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

Το μοντέλο αναπτύχθηκε για εκπαιδευτικούς και διερευνητικούς σκοπούς. Δεν αποτελεί πλήρη ψηφιακή ανακατασκευή του σταθμού Deák Ferenc tér ούτε βαθμονομημένη αναπαράσταση της πραγματικής επιβατικής του λειτουργίας. Η γεωμετρία αποδίδει απλοποιημένα επιλεγμένο τμήμα του σταθμού, με έμφαση στις βασικές περιοχές κίνησης και στις κυλιόμενες κλίμακες. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή χρησιμοποιείται για την κατανόηση της διαδικασίας μοντελοποίησης και τη συγκριτική εξέταση υποθετικών σεναρίων και όχι για την πρόβλεψη των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας του σταθμού.

3.5 Επιβατική ζήτηση και εκτίμηση ροών

Η επιβατική ζήτηση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των συστημάτων αστικών συγκοινωνιών και ειδικότερα των σταθμών μετρό. Ο όρος αναφέρεται στον αριθμό των επιβατών που χρησιμοποιούν μία συγκοινωνιακή υποδομή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου και εκφράζει την ένταση με την οποία αξιοποιείται το διαθέσιμο δίκτυο μεταφορών. Η κατανόηση της επιβατικής ζήτησης είναι απαραίτητη τόσο για τον σχεδιασμό νέων υποδομών όσο και για την αξιολόγηση της λειτουργικής επάρκειας των υφιστάμενων εγκαταστάσεων (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Στους σταθμούς μετρό, η επιβατική ζήτηση δεν εκφράζεται μόνο μέσω του συνολικού αριθμού επιβατών, αλλά και μέσω της χρονικής και χωρικής κατανομής των μετακινήσεων. Η ένταση της κυκλοφορίας μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ παράλληλα επηρεάζεται από το είδος των μετακινήσεων, τη θέση του σταθμού στο δίκτυο, τις δυνατότητες μετεπιβίβασης και τη λειτουργία των υπόλοιπων μέσων δημόσιας μεταφοράς που εξυπηρετούν την περιοχή.

Στην περίπτωση του σταθμού Deák Ferenc tér, η επιβατική ζήτηση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς πρόκειται για τον σημαντικότερο κόμβο μετεπιβίβασης του δικτύου μετρό της Βουδαπέστης. Η συνάντηση τριών γραμμών μετρό στον ίδιο σταθμό δημιουργεί σύνθετες ροές πεζών, οι οποίες περιλαμβάνουν επιβάτες που εισέρχονται στο σύστημα, επιβάτες που αποβιβάζονται από τους συρμούς, χρήστες που πραγματοποιούν μετεπιβίβαση μεταξύ διαφορετικών γραμμών, καθώς και άτομα που κατευθύνονται προς τις εξόδους του σταθμού ή προς άλλα μέσα μεταφοράς. Η ταυτόχρονη παρουσία αυτών των διαφορετικών κατηγοριών χρηστών αυξάνει την πολυπλοκότητα της κυκλοφορίας και καθιστά τον σταθμό ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογή μικροσκοπικής προσομοίωσης.

Η σωστή εκτίμηση της επιβατικής ζήτησης είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης, καθώς επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ο αριθμός των χρηστών που εισέρχονται στο μοντέλο καθορίζει τον βαθμό φόρτισης των υποδομών και επιτρέπει τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, στις εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης χρησιμοποιούνται συνήθως διαφορετικά σενάρια επιβατικής ζήτησης, τα οποία επιτρέπουν την αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης τόσο σε κανονικές όσο και σε συνθήκες αυξημένης επιβατικής κίνησης.

3.5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιβατική ζήτηση

Η επιβατική ζήτηση σε έναν σταθμό μετρό δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται διαρκώς υπό την επίδραση διαφόρων παραγόντων. Η θέση του σταθμού μέσα στο αστικό δίκτυο, οι χρήσεις γης της ευρύτερης περιοχής, οι δυνατότητες μετεπιβίβασης και η συχνότητα των δρομολογίων αποτελούν βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τον αριθμό των επιβατών που χρησιμοποιούν μία συγκοινωνιακή εγκατάσταση.

Σημαντική επίδραση ασκεί επίσης η χρονική περίοδος κατά την οποία πραγματοποιούνται οι μετακινήσεις. Κατά τις εργάσιμες ημέρες παρατηρούνται συνήθως δύο περίοδοι αυξημένης ζήτησης, η πρωινή και η απογευματινή αιχμή, οι οποίες σχετίζονται με τις μετακινήσεις προς και από τους χώρους εργασίας και εκπαίδευσης. Αντίθετα, κατά τις μεσημβρινές ώρες ή τα Σαββατοκύριακα οι επιβατικές ροές είναι συνήθως μικρότερες και παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Στην περίπτωση του Deák Ferenc tér, η επιβατική ζήτηση επηρεάζεται επιπλέον από τον ρόλο του σταθμού ως κεντρικού σημείου μετεπιβίβασης. Μεγάλο ποσοστό των επιβατών δεν έχει ως τελικό προορισμό τον ίδιο τον σταθμό, αλλά τον χρησιμοποιεί για τη μετάβαση από μία γραμμή μετρό σε άλλη. Το γεγονός αυτό δημιουργεί έντονες και ταυτόχρονες ροές πεζών σε διαφορετικές κατευθύνσεις, αυξάνοντας τις απαιτήσεις ως προς τη χωρητικότητα των διαδρόμων, των αποβαθρών και των κυλιόμενων κλιμάκων (BKK, n.d.).

3.5.2 Εκτίμηση ροών για τις ανάγκες της προσομοίωσης

Για την ανάπτυξη του μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης δεν ήταν απαραίτητη η ακριβής αναπαραγωγή της πραγματικής ημερήσιας επιβατικής κίνησης του σταθμού. Αντίθετα, επιλέχθηκε η δημιουργία υποθετικών σεναρίων με διαφορετικά επίπεδα φόρτισης, ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου υπό συνθήκες χαμηλής, μέσης και υψηλής επιβατικής ζήτησης.

Με βάση τα παραπάνω διαμορφώθηκαν τέσσερα υποθετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης τα οποία παρουσιάζονται στην αντίστοιχη ενότητα.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του σταθμού χωρίς να περιορίζεται σε μία μόνο κατάσταση λειτουργίας. Παράλληλα, διευκολύνει τον εντοπισμό των σημείων στα οποία εμφανίζονται οι πρώτες ενδείξεις συμφόρησης, καθώς και την αξιολόγηση της ικανότητας του συστήματος να εξυπηρετεί αυξημένο αριθμό επιβατών.

Για το εξεταζόμενο τμήμα του σταθμού δεν ήταν διαθέσιμα αναλυτικά δεδομένα πεδίου σχετικά με τις πραγματικές επιβατικές ροές, την κατανομή των μετακινήσεων μεταξύ των επιμέρους διαδρομών ή τη χρονική συγκέντρωση των αφίξεων. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές ζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν δεν προέκυψαν από διαδικασία εκτίμησης ή βαθμονόμησης πραγματικών ροών, αλλά επιλέχθηκαν ως διαδοχικά υποθετικά επίπεδα φόρτισης για την εκπαιδευτική και συγκριτική αξιολόγηση του μοντέλου.

3.5.3 Δημιουργία σεναρίων επιβατικής ζήτησης

Η ανάπτυξη διαφορετικών σεναρίων επιβατικής ζήτησης αποτελεί βασική πρακτική στις μελέτες μικροσκοπικής προσομοίωσης, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς μιας εγκατάστασης υπό διαφορετικά επίπεδα φόρτισης. Αντί να εξετάζεται αποκλειστικά μία κατάσταση λειτουργίας, η χρήση πολλαπλών σεναρίων παρέχει τη δυνατότητα διερεύνησης της απόδοσης του συστήματος σε συνθήκες που κυμαίνονται από την ομαλή λειτουργία έως την εμφάνιση αυξημένης συμφόρησης.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν τέσσερα διακριτά σενάρια προσομοίωσης, στα οποία μεταβλήθηκε αποκλειστικά ο ωριαίος ρυθμός εισαγωγής πεζών στο μοντέλο, ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίστηκε ότι οι διαφορές στα αποτελέσματα οφείλονταν αποκλειστικά στη μεταβολή της επιβατικής ζήτησης και όχι σε αλλαγές της γεωμετρίας ή των χαρακτηριστικών του μοντέλου.

Η σταδιακή αύξηση του αριθμού των πεζών επέτρεψε την παρατήρηση της λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων της υποδομής υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη συμπεριφορά των επιβατών κατά τη χρήση των κυλιόμενων κλιμάκων, στην κατανομή τους στον διαθέσιμο χώρο και στην πιθανή εμφάνιση περιοχών με αυξημένη συγκέντρωση χρηστών.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας ακολουθεί διεθνείς πρακτικές στον τομέα της μικροσκοπικής προσομοίωσης, σύμφωνα με τις οποίες η αξιολόγηση διαφορετικών επιπέδων ζήτησης συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των συγκοινωνιακών υποδομών και επιτρέπει την αναγνώριση των ορίων λειτουργικής τους επάρκειας (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022; Barceló, 2010).

3.5.4 Χρήση των σεναρίων στην αξιολόγηση του μοντέλου

Η εφαρμογή των τεσσάρων σεναρίων δεν είχε ως στόχο την αναπαράσταση μιας συγκεκριμένης ημέρας λειτουργίας του σταθμού, αλλά τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του μοντέλου υπό διαφορετικές συνθήκες επιβατικής φόρτισης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης της υποδομής σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών και διευκολύνει την εξαγωγή συγκριτικών παρατηρήσεων σχετικά με τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου μοντέλου.

Για κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητη εκτέλεση της προσομοίωσης και καταγράφηκαν οι αντίστοιχοι δείκτες λειτουργικής απόδοσης. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους, ώστε να εντοπιστούν πιθανές μεταβολές στη συμπεριφορά των πεζών καθώς αυξανόταν η επιβατική ζήτηση.

Η συγκριτική ανάλυση επέτρεψε την αξιολόγηση της λειτουργίας των κυλιόμενων κλιμάκων, των διαδρόμων και των περιοχών κυκλοφορίας, καθώς και τον εντοπισμό των σημείων στα οποία η αυξημένη συγκέντρωση πεζών οδηγεί σε μείωση της λειτουργικής απόδοσης. Παράλληλα, η χρήση διαφορετικών επιπέδων φόρτισης παρείχε τη δυνατότητα διερεύνησης της ευαισθησίας του μοντέλου στις μεταβολές της επιβατικής ζήτησης και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5, όπου πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και αναλύεται η επίδραση της αύξησης της επιβατικής ζήτησης στη λειτουργία του σταθμού.

Οι χαρακτηρισμοί «χαμηλή», «μέτρια», «υψηλή» και «πολύ υψηλή» ζήτηση χρησιμοποιούνται μόνο για τη σχετική διάκριση των τεσσάρων εξεταζόμενων σεναρίων. Δεν αντιστοιχούν σε επίσημα όρια, καταγεγραμμένες περιόδους λειτουργίας ή πραγματικές συνθήκες χαμηλής και υψηλής ζήτησης του σταθμού Deák Ferenc tér.

3.5.5 Περιορισμοί της εκτίμησης των ροών

Η εκτίμηση των επιβατικών ροών βασίστηκε στη δημιουργία αντιπροσωπευτικών σεναρίων προσομοίωσης και όχι σε πραγματικές μετρήσεις κυκλοφορίας από τον σταθμό Deák Ferenc tér. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας δημόσια προσβάσιμων δεδομένων υψηλής ανάλυσης σχετικά με την κατανομή των επιβατών εντός του σταθμού.

Ως εκ τούτου, τα σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία δεν αποσκοπούν στην ακριβή αναπαραγωγή των πραγματικών επιβατικών ροών, αλλά στην αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του μοντέλου υπό διαφορετικά επίπεδα φόρτισης. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία, ιδιαίτερα όταν ο κύριος στόχος της προσομοίωσης είναι η συγκριτική ανάλυση εναλλακτικών συνθηκών λειτουργίας και όχι η επιχειρησιακή πρόβλεψη της πραγματικής κυκλοφορίας.

Παρά τον περιορισμό αυτό, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε επιτρέπει τη διατύπωση συγκριτικών παρατηρήσεων σχετικά με τη συμπεριφορά των εικονικών πεζών και τη λειτουργία του συγκεκριμένου μοντέλου υπό διαφορετικούς υποθετικούς ρυθμούς εισαγωγής.

Η απουσία πραγματικών δεδομένων επιβατικής ζήτησης περιορίζει τη δυνατότητα αντιστοίχισης των σεναρίων με συγκεκριμένες χρονικές περιόδους λειτουργίας του σταθμού. Επομένως, τα εξεταζόμενα επίπεδα ζήτησης δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως αναπαράσταση κανονικής λειτουργίας, ώρας αιχμής ή ακραίας κατάστασης του πραγματικού σταθμού. Χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη συγκριτική παρατήρηση της απόκρισης του εκπαιδευτικού μοντέλου σε διαδοχικά αυξανόμενους αριθμούς πεζών.

3.6 Πιθανά σημεία συμφόρησης

3.6.1 Έννοια της συμφόρησης στους σταθμούς μετρό

Η συμφόρηση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα που παρατηρούνται σε συγκοινωνιακές εγκαταστάσεις υψηλής επιβατικής ζήτησης. Εμφανίζεται όταν ο αριθμός των χρηστών που κινούνται σε έναν συγκεκριμένο χώρο προσεγγίζει ή υπερβαίνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ελευθερία κίνησης, να μειώνεται η μέση ταχύτητα των πεζών και να αυξάνονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Η εμφάνιση συνθηκών συμφόρησης επηρεάζει τόσο την άνεση των επιβατών όσο και τη συνολική λειτουργική απόδοση του σταθμού (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Στους υπόγειους σταθμούς μετρό η συμφόρηση εκδηλώνεται συχνότερα σε περιοχές όπου συγκλίνουν διαφορετικές ροές επιβατών ή όπου η γεωμετρία του χώρου περιορίζει τη δυνατότητα ταυτόχρονης διέλευσης μεγάλου αριθμού χρηστών. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν οι αποβάθρες, οι διάδρομοι σύνδεσης, οι κυλιόμενες κλίμακες, οι σταθερές σκάλες, οι πύλες εισόδου και εξόδου, καθώς και τα σημεία μετεπιβίβασης μεταξύ διαφορετικών γραμμών.

Η ανάλυση της συμφόρησης παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων, καθώς επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών που ενδέχεται να απαιτούν επεμβάσεις βελτίωσης, όπως αύξηση του διαθέσιμου χώρου, αναδιάταξη των διαδρομών ή τροποποίηση της οργάνωσης της κυκλοφορίας των πεζών.

3.6.2 Παράγοντες που οδηγούν σε συμφόρηση

Η δημιουργία συνθηκών συμφόρησης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον συνολικό αριθμό των επιβατών, αλλά από τον συνδυασμό πολλών παραγόντων που επηρεάζουν τη λειτουργία της υποδομής.

Αρχικά, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η γεωμετρία του σταθμού. Στενοί διάδρομοι, περιορισμένο πλάτος αποβάθρας και σημεία αλλαγής κατεύθυνσης μπορούν να μειώσουν την ικανότητα εξυπηρέτησης της εγκατάστασης και να οδηγήσουν σε τοπική αύξηση της πυκνότητας των πεζών.

Εξίσου σημαντική είναι η ύπαρξη στοιχείων που λειτουργούν ως σημεία συγκέντρωσης των επιβατών, όπως οι κυλιόμενες κλίμακες και οι ανελκυστήρες. Οι υποδομές αυτές διαθέτουν συγκεκριμένη δυναμικότητα εξυπηρέτησης και, όταν ο ρυθμός άφιξης των επιβατών υπερβαίνει τη δυνατότητα απορρόφησής τους, είναι πιθανό να δημιουργηθούν ουρές αναμονής και συνθήκες αυξημένης συμφόρησης.

Παράλληλα, η συμπεριφορά των ίδιων των πεζών επηρεάζει σημαντικά τη διαμόρφωση των επιβατικών ροών. Η επιλογή συγκεκριμένων διαδρομών, η προτίμηση ορισμένων κυλιόμενων κλιμάκων έναντι άλλων ή η τάση των χρηστών να ακολουθούν τη συμπεριφορά του πλήθους μπορεί να οδηγήσει σε άνιση κατανομή των επιβατών στον διαθέσιμο χώρο.

3.7 Λειτουργικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την προσομοίωση

Η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης προϋποθέτει την κατανόηση των βασικών λειτουργικών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την κίνηση των επιβατών εντός ενός σταθμού μετρό. Η συμπεριφορά των πεζών δεν καθορίζεται αποκλειστικά από τη γεωμετρία του χώρου, αλλά αποτελεί αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της διαθέσιμης υποδομής, της λειτουργίας του συγκοινωνιακού συστήματος και των χαρακτηριστικών της επιβατικής ζήτησης. Για τον λόγο αυτό, κατά την ανάπτυξη του μοντέλου απαιτείται να ληφθούν υπόψη παράγοντες που επηρεάζουν τόσο την παραγωγή όσο και την εξέλιξη των επιβατικών ροών (Πίνακας 3-2) (Fruin, 1971; Weidmann, 1992).

Οι παράγοντες που παρουσιάζονται στις ακόλουθες υποενότητες αποτελούν θεωρητικούς παράγοντες λειτουργίας των σταθμών μετρό. Η συχνότητα των δρομολογίων, ο χρόνος παραμονής των συρμών και οι διαδικασίες επιβίβασης και αποβίβασης δεν ενσωματώθηκαν ως μεταβλητές στο συγκεκριμένο μοντέλο.

Η κατανόηση των παραγόντων αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς συμβάλλει στη δημιουργία ενός μοντέλου που προσεγγίζει ρεαλιστικά τις συνθήκες λειτουργίας του σταθμού και επιτρέπει την αξιόπιστη αξιολόγηση διαφορετικών επιπέδων επιβατικής ζήτησης. Οι σημαντικότεροι παράγοντες παρουσιάζονται στις ακόλουθες υποενότητες.

3.7.1 Συχνότητα δρομολογίων

Η συχνότητα διέλευσης των συρμών αποτελεί βασικό λειτουργικό χαρακτηριστικό κάθε συστήματος μετρό και επηρεάζει άμεσα την κυκλοφορία των επιβατών. Όσο μικρότερο είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών συρμών, τόσο συχνότερα πραγματοποιούνται επιβιβάσεις και αποβιβάσεις, γεγονός που οδηγεί σε συχνές μεταβολές της πυκνότητας των πεζών στις αποβάθρες και στους διαδρόμους.

Σε σταθμούς με υψηλή επιβατική ζήτηση, όπως ο Deák Ferenc tér, η αυξημένη συχνότητα δρομολογίων συμβάλλει στη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, καθώς μειώνει τον αριθμό των επιβατών που συσσωρεύονται στις αποβάθρες. Παράλληλα, δημιουργεί πιο δυναμικές συνθήκες κυκλοφορίας, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης (PTV Group, 2025).

3.7.2 Χρόνος παραμονής συρμού στην αποβάθρα (Dwell Time)

Ο χρόνος παραμονής του συρμού στην αποβάθρα, γνωστός διεθνώς ως dwell time, αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι θύρες του συρμού παραμένουν ανοικτές για την αποβίβαση και επιβίβαση των επιβατών. Η διάρκειά του επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του σταθμού, καθώς καθορίζει τον ρυθμό με τον οποίο οι επιβάτες εισέρχονται και εξέρχονται από τον συρμό.

Μεγαλύτερος χρόνος παραμονής διευκολύνει την ομαλή ανταλλαγή επιβατών, αλλά ενδέχεται να επηρεάσει τη συνολική λειτουργία του δικτύου, ιδιαίτερα σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Αντίθετα, μικρότερος χρόνος παραμονής μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη συγκέντρωση πεζών στις αποβάθρες και να δημιουργήσει εντονότερες ροές προς τις κυλιόμενες κλίμακες αμέσως μετά την αναχώρηση του συρμού. Για τον λόγο αυτό, ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται συχνά στις μελέτες προσομοίωσης ως μία από τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας των σταθμών (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

3.7.3 Ρυθμός επιβίβασης και αποβίβασης επιβατών

Η διαδικασία επιβίβασης και αποβίβασης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές δημιουργίας επιβατικών ροών μέσα σε έναν σταθμό μετρό. Ο αριθμός των επιβατών που αποβιβάζονται από έναν συρμό και η ταχύτητα με την οποία διαχέονται στον διαθέσιμο χώρο επηρεάζουν άμεσα την κατανομή της πυκνότητας στις αποβάθρες και στους διαδρόμους σύνδεσης.

Κατά τις ώρες αιχμής, μεγάλος αριθμός επιβατών μπορεί να αποβιβαστεί σχεδόν ταυτόχρονα, δημιουργώντας έντονες ροές προς τις εξόδους ή προς τις κυλιόμενες κλίμακες. Η δυναμική αυτή αποτελεί βασικό αντικείμενο μελέτης στις μικροσκοπικές προσομοιώσεις, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της επάρκειας των υποδομών και την αναγνώριση πιθανών σημείων συμφόρησης.

3.7.4 Κατανομή των επιβατών στον χώρο

Η χωρική κατανομή των επιβατών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη λειτουργική απόδοση ενός σταθμού. Οι χρήστες δεν κατανέμονται πάντοτε ομοιόμορφα στον διαθέσιμο χώρο, αλλά τείνουν να επιλέγουν συγκεκριμένες διαδρομές ή σημεία που θεωρούν ευκολότερα ή ταχύτερα.

Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη αξιοποίηση των υποδομών, ακόμη και όταν υπάρχουν διαθέσιμες εναλλακτικές διαδρομές. Ως αποτέλεσμα, ορισμένες περιοχές του σταθμού ενδέχεται να παρουσιάζουν αυξημένη πυκνότητα, ενώ άλλες να παραμένουν σχετικά ανεκμετάλλευτες. Η κατανόηση της χωρικής κατανομής των επιβατών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης και για την αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς της εγκατάστασης.

3.7.5 Συμπεριφορά επιβατών υπό συνθήκες αυξημένης ζήτησης

Η συμπεριφορά των πεζών μεταβάλλεται σημαντικά όταν αυξάνεται η επιβατική ζήτηση. Σε συνθήκες χαμηλής πυκνότητας οι επιβάτες κινούνται με σχετικά σταθερή ταχύτητα και έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν ελεύθερα τη διαδρομή τους. Αντίθετα, όταν η πυκνότητα αυξάνεται, οι κινήσεις επηρεάζονται περισσότερο από την παρουσία των υπόλοιπων χρηστών, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ταχύτητα, να αυξάνονται οι αλληλεπιδράσεις και να εμφανίζονται τοπικές καθυστερήσεις.

Η μεταβολή αυτή αποτελεί βασικό αντικείμενο των μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης, τα οποία επιχειρούν να αναπαραστήσουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πεζών και να εκτιμήσουν την επίδρασή τους στη συνολική λειτουργία της υποδομής. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η απόκριση του μοντέλου σε τέσσερις διαφορετικούς υποθετικούς ρυθμούς εισαγωγής πεζών, υπό προοδευτικά αυξανόμενα επίπεδα φόρτισης (PTV Group, 2025)

Παράγοντας	Επίδραση στην προσομοίωση
Συχνότητα δρομολογίων	Επηρεάζει τη συχνότητα δημιουργίας επιβατικών ροών
Χρόνος παραμονής συρμού	Καθορίζει τον ρυθμό επιβίβασης και αποβίβασης
Ρυθμός επιβατών	Επηρεάζει την πυκνότητα στις αποβάθρες και στους διαδρόμους
Κατανομή επιβατών	Διαμορφώνει τη χρήση των διαθέσιμων διαδρομών
Συμπεριφορά πεζών	Επηρεάζει την ταχύτητα, την πυκνότητα και την εμφάνιση συμφόρησης

Πίνακας 3-2: Βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη μικροσκοπική προσομοίωση.

3.8 Τεκμηρίωση επιλογής σταθμού για μικροσκοπική ανάλυση

Η επιλογή της περιοχής μελέτης αποτελεί κρίσιμο στάδιο κατά την ανάπτυξη μιας εφαρμογής μικροσκοπικής προσομοίωσης, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο τη μεθοδολογία όσο και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει ότι οι σταθμοί μετεπιβίβασης παρουσιάζουν ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, λόγω της πολυπλοκότητας των επιβατικών ροών και των αυξημένων απαιτήσεων ως προς τη λειτουργική τους απόδοση (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022· Barceló, 2010).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ο σταθμός Deák Ferenc tér του μετρό της Βουδαπέστης, ο οποίος αποτελεί τον σημαντικότερο κόμβο του υπόγειου σιδηροδρομικού δικτύου της πόλης. Η επιλογή του βασίστηκε σε ένα σύνολο λειτουργικών, γεωμετρικών και ερευνητικών χαρακτηριστικών που τον καθιστούν κατάλληλο για την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών.

Ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια ήταν ο ρόλος του σταθμού ως βασικού σημείου μετεπιβίβασης μεταξύ των γραμμών M1, M2 και M3. Η καθημερινή συνύπαρξη μεγάλου αριθμού επιβατών που κινούνται προς διαφορετικές κατευθύνσεις δημιουργεί σύνθετες ροές, οι οποίες αποτελούν ιδανικό αντικείμενο ανάλυσης μέσω μικροσκοπικών μοντέλων προσομοίωσης. Η δυνατότητα παρακολούθησης αυτών των αλληλεπιδράσεων επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των πεζών και της λειτουργίας των επιμέρους υποδομών του σταθμού.

Εξίσου σημαντικό κριτήριο αποτέλεσε η γεωμετρική διαμόρφωση του σταθμού. Η ύπαρξη πολλαπλών επιπέδων, κυλιόμενων κλιμάκων, διαδρόμων σύνδεσης και χώρων μετεπιβίβασης δημιουργεί ένα σύνθετο περιβάλλον κυκλοφορίας, στο οποίο αναπτύσσονται διαφορετικοί τύποι επιβατικών ροών. Η γεωμετρική αυτή πολυπλοκότητα προσφέρει τη δυνατότητα διερεύνησης της επίδρασης της διαμόρφωσης του χώρου στη συμπεριφορά των πεζών και στην εμφάνιση πιθανών σημείων συμφόρησης.

Παράλληλα, ο συγκεκριμένος σταθμός παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της λειτουργικής του σημασίας για το συγκοινωνιακό σύστημα της Βουδαπέστης. Εκτός από τη σύνδεση των τριών γραμμών μετρό, εξυπηρετεί σημαντικό αριθμό λεωφορειακών, τροχιόδρομων (τραμ) και άλλων αστικών γραμμών, λειτουργώντας ως κεντρικός κόμβος του συστήματος δημόσιων μεταφορών. Η συνεχής εναλλαγή επιβατών καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας δημιουργεί συνθήκες που προσεγγίζουν τις πραγματικές απαιτήσεις λειτουργίας ενός μεγάλου αστικού συγκοινωνιακού κόμβου. Επιπλέον, ο σταθμός προσφέρεται για την ανάπτυξη σεναρίων προσομοίωσης με διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης. Η μεταβολή του ρυθμού εισαγωγής χωρίς αλλαγή των υπόλοιπων ρυθμίσεων επιτρέπει τη συγκριτική διερεύνηση της απόκρισης του συγκεκριμένου μοντέλου υπό διαφορετικά επίπεδα φόρτισης.

Τέλος, η επιλογή του Deák Ferenc tér συνάδει με τις σύγχρονες ερευνητικές κατευθύνσεις στον τομέα της συγκοινωνιακής μηχανικής, όπου οι σταθμοί υψηλής επιβατικής κίνησης χρησιμοποιούνται ως αντιπροσωπευτικά παραδείγματα για την ανάπτυξη και αξιολόγηση μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή μπορεί να αποτελέσει μεθοδολογικό παράδειγμα για πληρέστερες μελλοντικές προσομοιώσεις αντίστοιχων εγκαταστάσεων (Πίνακας 3-3).

Κριτήριο	Αιτιολόγηση
Κόμβος μετεπιβίβασης	Σύνδεση των γραμμών M1, M2 και M3
Υψηλή λειτουργική σημασία	Κεντρικός σταθμός του δικτύου μετρό
Πολύπλοκη γεωμετρία	Πολλαπλά επίπεδα, διάδρομοι και κυλιόμενες κλίμακες
Σύνθετες επιβατικές ροές	Επιβίβαση, αποβίβαση και μετεπιβιβάσεις
Καταλληλότητα για προσομοίωση	Δυνατότητα ανάπτυξης διαφορετικών σεναρίων φόρτισης
Ερευνητικό ενδιαφέρον	Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μεγάλου αστικού σταθμού

Πίνακας 3-3: Κριτήρια επιλογής του σταθμού Deák Ferenc tér.

3.9 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με έμφαση στα χαρακτηριστικά του σταθμού Deák Ferenc tér του μετρό της Βουδαπέστης. Αρχικά έγινε αναφορά στο δίκτυο μετρό της πόλης, στην ιστορική του εξέλιξη και στη σημασία του ως βασικού μέσου αστικών μεταφορών, αναδεικνύοντας τον ρόλο που διαδραματίζει στην εξυπηρέτηση των καθημερινών μετακινήσεων και στη διασύνδεση των επιμέρους περιοχών του πολεοδομικού συγκροτήματος.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε ο λειτουργικός ρόλος του σταθμού Deák Ferenc tér ως του σημαντικότερου κόμβου μετεπιβίβασης του δικτύου. Αναλύθηκαν η γεωμετρική διάταξη, η οργάνωση των χώρων κυκλοφορίας, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την κίνηση των επιβατών. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ύπαρξη πολλαπλών επιπέδων, διαδρόμων σύνδεσης και κυλιόμενων κλιμάκων, στοιχεία τα οποία διαμορφώνουν τη συνολική λειτουργία του σταθμού και επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά των πεζών.

Ακολούθως εξετάστηκαν η επιβατική ζήτηση και οι επιβατικές ροές που αναπτύσσονται στον σταθμό, καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση και την κατανομή τους στον χώρο. Παρουσιάστηκε η λογική ανάπτυξης των τεσσάρων σεναρίων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, τα οποία επιτρέπουν τη διερεύνηση της λειτουργίας του σταθμού υπό διαφορετικά επίπεδα επιβατικής φόρτισης. Παράλληλα, αναλύθηκαν οι βασικοί περιορισμοί της εκτίμησης των ροών και τεκμηριώθηκε η χρήση αντιπροσωπευτικών σεναρίων αντί πραγματικών μετρήσεων, με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του μοντέλου.

Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τα κυριότερα σημεία στα οποία είναι πιθανό να εμφανιστούν φαινόμενα συμφόρησης, καθώς και τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πεζών και τη συνολική απόδοση του σταθμού. Αναδείχθηκε η σημασία παραμέτρων όπως η συχνότητα των δρομολογίων, ο χρόνος παραμονής των συρμών στις αποβάθρες, η κατανομή των επιβατών στον χώρο και η δυναμική των επιβατικών ροών, οι οποίες αποτελούν κρίσιμες μεταβλητές κατά την ανάπτυξη ενός μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης.

Τέλος, τεκμηριώθηκε η επιλογή του σταθμού Deák Ferenc tér ως περιοχής μελέτης, παρουσιάζοντας τα λειτουργικά, γεωμετρικά και ερευνητικά χαρακτηριστικά που τον καθιστούν κατάλληλο για την εφαρμογή μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στον ρόλο του ως κεντρικού συγκοινωνιακού κόμβου, στη σύνθετη γεωμετρία του και στις αυξημένες επιβατικές ροές που αναπτύσσονται καθημερινά, στοιχεία που δημιουργούν ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον περιβάλλον για την ανάλυση της κυκλοφορίας των πεζών.

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ του θεωρητικού υποβάθρου που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και της εφαρμογής της προσομοίωσης που ακολουθεί. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία ανάπτυξης του μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης στο PTV Viswalk, περιγράφοντας τη διαδικασία δημιουργίας της γεωμετρίας, την παραμετροποίηση του μοντέλου, τον σχεδιασμό των σεναρίων και τη διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

4 Ανάπτυξη του Μικροσκοπικού Μοντέλου στο PTV Viswalk

4.1 Εισαγωγή

Μετά τη θεωρητική ανάλυση που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, ακολουθεί η ανάπτυξη του μικροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό PTV Viswalk. Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει αναλυτικά όλα τα στάδια της διαδικασίας μοντελοποίησης, από την αναπαράσταση της γεωμετρίας του σταθμού έως τον ορισμό των παραμέτρων λειτουργίας και των σεναρίων προσομοίωσης. Για την ανάπτυξη και την εκτέλεση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η έκδοση PTV Vissim/Viswalk 2026.00-07.

Η ανάπτυξη του μοντέλου επικεντρώθηκε στην τεχνικά λειτουργική σύνδεση της αποβάθρας, του διαδρόμου και των κυλιόμενων κλιμάκων. Η γεωμετρία είναι προσεγγιστική και δεν αποσκοπεί στην ακριβή αναπαράσταση της πραγματικής εγκατάστασης.

Επιπλέον, καθορίστηκαν διαφορετικά σενάρια επιβατικής ζήτησης με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης του σταθμού υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης. Για κάθε σενάριο ορίστηκαν συγκεκριμένες παράμετροι προσομοίωσης, ενώ δημιουργήθηκαν περιοχές μέτρησης (measurement areas) για τη συλλογή στοιχείων σχετικά με τον μέσο και τον μέγιστο αριθμό πεζών και για την οπτική παρατήρηση της χωρικής κατανομής τους.

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ της θεωρητικής προσέγγισης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων που ακολουθεί. Η τεκμηριωμένη ανάπτυξη του μοντέλου είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και την ορθή ερμηνεία της συμπεριφοράς των πεζών κατά τη λειτουργία του σταθμού.(PTV Group, 2025; Helbing & Molnár, 1995; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

4.2 Επιλογή λογισμικού προσομοίωσης

Η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού αποτελεί καθοριστικό στάδιο στην ανάπτυξη ενός μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο τη διαδικασία της μοντελοποίησης όσο και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές εξειδικευμένες πλατφόρμες προσομοίωσης πεζών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της λειτουργίας σταθμών μετρό, αεροδρομίων, σιδηροδρομικών σταθμών, εμπορικών κέντρων και εγκαταστάσεων μαζικής συγκέντρωσης κοινού. Κάθε λογισμικό διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των πεζών, τις δυνατότητες οπτικοποίησης, τη συλλογή δεδομένων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων (Barceló, 2010).

Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε το PTV Viswalk, το οποίο αποτελεί εξειδικευμένο εργαλείο μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών και ενσωματώνεται στο περιβάλλον του PTV Vissim. Το λογισμικό χρησιμοποιείται ευρέως σε ερευνητικές και επαγγελματικές εφαρμογές συγκοινωνιακής μηχανικής, καθώς επιτρέπει την αναπαράσταση πολύπλοκων επιβατικών ροών και την αξιολόγηση της λειτουργίας συγκοινωνιακών υποδομών υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (PTV Group, 2025).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του PTV Viswalk είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης της κίνησης των πεζών σε συνεχή χώρο, χωρίς την ανάγκη προκαθορισμένων διαδρομών ή πλεγμάτων κίνησης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στους εικονικούς πεζούς να προσαρμόζουν δυναμικά την πορεία τους, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία άλλων χρηστών, τα φυσικά εμπόδια και τη γεωμετρία του χώρου. Ως αποτέλεσμα, η προσομοίωση αποδίδει με μεγαλύτερο ρεαλισμό τις συνθήκες που επικρατούν σε σταθμούς υψηλής επιβατικής κίνησης.

Το PTV Viswalk βασίζεται στο Social Force Model, το οποίο αναπτύχθηκε από τους Helbing και Molnár (1995). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η κίνηση κάθε πεζού περιγράφεται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της επιθυμητής κατεύθυνσης κίνησης, της αποφυγής συγκρούσεων με άλλους πεζούς και της αποφυγής φυσικών εμποδίων. Η μαθηματική αυτή προσέγγιση επιτρέπει την προσομοίωση της συλλογικής συμπεριφοράς μεγάλου αριθμού χρηστών και χρησιμοποιείται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία.

Σημαντικό πλεονέκτημα του λογισμικού αποτελεί επίσης η δυνατότητα δημιουργίας περιοχών εισόδου (Pedestrian Inputs), περιοχών προορισμού (Destinations), περιοχών μέτρησης (Measurement Areas) και σημείων συλλογής δεδομένων, μέσω των οποίων είναι δυνατή η καταγραφή πλήθους λειτουργικών δεικτών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η πυκνότητα των πεζών, η ταχύτητα κίνησης, η ένταση των ροών και η αξιοποίηση των διαθέσιμων υποδομών. Η δυνατότητα αυτή καθιστά το PTV Viswalk ιδιαίτερα κατάλληλο για τη διερεύνηση της λειτουργικής απόδοσης σταθμών μετρό και άλλων συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων.

Επιπλέον, το λογισμικό παρέχει προηγμένες δυνατότητες τρισδιάστατης απεικόνισης της προσομοίωσης, επιτρέποντας την οπτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των πεζών και τη διευκόλυνση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Παράλληλα, η εξαγωγή των δεδομένων σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων διευκολύνει τη συγκριτική ανάλυση μεταξύ διαφορετικών σεναρίων προσομοίωσης.

Για τους λόγους αυτούς, το PTV Viswalk επιλέχθηκε ως το καταλληλότερο λογισμικό για την παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς παρέχει ευελιξία στη μοντελοποίηση και δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων κατάλληλων για τη διερευνητική σύγκριση των εξεταζόμενων σεναρίων.

4.2.1 Σύγκριση του PTV Viswalk με άλλα λογισμικά προσομοίωσης

Η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού δεν βασίζεται μόνο στις τεχνικές του δυνατότητες, αλλά και στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διάφορα λογισμικά για τη μοντελοποίηση της κίνησης των πεζών, όπως τα MassMotion, LEGION, Pathfinder και AnyLogic. Κάθε ένα από αυτά διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά και απευθύνεται σε διαφορετικού τύπου εφαρμογές.

Το MassMotion χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση μεγάλων συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων και πολύπλοκων κτιρίων, προσφέροντας ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια στην αναπαράσταση της συμπεριφοράς των πεζών.

Το LEGION εφαρμόζεται συχνά σε αεροδρόμια και μεγάλους σιδηροδρομικούς σταθμούς, ενώ το Pathfinder χρησιμοποιείται κυρίως για αναλύσεις εκκένωσης κτιρίων και μελέτες πυρασφάλειας.

Αντίστοιχα, το AnyLogic αποτελεί μια πολυπαραδειγματική πλατφόρμα προσομοίωσης, η οποία συνδυάζει διαφορετικές μεθοδολογίες μοντελοποίησης και εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων.

Παρότι όλα τα παραπάνω λογισμικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της κίνησης των πεζών, το PTV Viswalk παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα για εφαρμογές συγκοινωνιακής μηχανικής. Η άμεση ενσωμάτωσή του στο περιβάλλον του PTV Vissim, η εφαρμογή του Social Force Model και οι δυνατότητες ανάλυσης των επιβατικών ροών σε σταθμούς μετρό αποτέλεσαν τους βασικούς λόγους για την επιλογή του στην παρούσα εργασία.

4.3 Δημιουργία γεωμετρίας σταθμού

Η δημιουργία της γεωμετρίας αποτέλεσε το πρώτο και σημαντικότερο στάδιο της ανάπτυξης του μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης στο λογισμικό PTV Viswalk. Η ακρίβεια με την οποία αποτυπώνεται ο χώρος επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία της προσομοίωσης, καθώς η συμπεριφορά των πεζών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφολογία του περιβάλλοντος, τις διαθέσιμες διαδρομές και τη χωρική οργάνωση των υποδομών (PTV Group, 2025).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας δεν επιδιώχθηκε η πλήρης αναπαράσταση του συνόλου του σταθμού Deák Ferenc tér, αλλά η δημιουργία ενός λειτουργικού μοντέλου που να περιλαμβάνει τα βασικά στοιχεία τα οποία επηρεάζουν την κυκλοφορία των επιβατών. Η προσέγγιση αυτή είναι σύμφωνη με τη διεθνή πρακτική στις εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης, όπου η έμφαση δίνεται στα κρίσιμα τμήματα της υποδομής και όχι στην πλήρη αρχιτεκτονική αποτύπωση του χώρου (Barceló, 2010).

Η γεωμετρία του μοντέλου σχεδιάστηκε εξ ολοκλήρου στο περιβάλλον του PTV Viswalk, με τη δημιουργία επιφανειών κίνησης που αντιστοιχούν στους χώρους κυκλοφορίας των πεζών. Κατά τον σχεδιασμό δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή σύνδεση όλων των επιμέρους στοιχείων, ώστε να διασφαλιστεί η συνεχής και ομαλή μετακίνηση των χρηστών χωρίς ασυνέχειες ή τεχνητά εμπόδια.

Η ανάπτυξη του μοντέλου πραγματοποιήθηκε σταδιακά. Αρχικά σχεδιάστηκε η αποβάθρα, στη συνέχεια δημιουργήθηκε ο διάδρομος που οδηγεί προς τις κυλιόμενες κλίμακες και τέλος προστέθηκαν τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου, όπως οι περιοχές εισόδου, οι περιοχές προορισμού και οι περιοχές μέτρησης. Η σταδιακή αυτή διαδικασία επέτρεψε τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας κάθε τμήματος πριν από την ολοκλήρωση του συνολικού μοντέλου.

4.3.1 Σχεδίαση της αποβάθρας

Η αποβάθρα αποτελεί το βασικό σημείο συγκέντρωσης των επιβατών κατά την άφιξη και αναχώρηση των συρμών και, συνεπώς, ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία της γεωμετρίας του μοντέλου. Για τον λόγο αυτό, η σχεδίασή της πραγματοποιήθηκε κατά προτεραιότητα, ώστε να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη όλων των υπόλοιπων στοιχείων της προσομοίωσης.

Η αποβάθρα δημιουργήθηκε ως επιφάνεια κίνησης στο PTV Viswalk. Οι εικονικοί πεζοί μπορούσαν να κινούνται ελεύθερα εντός της επιφάνειας, αλλά η συνολική πορεία τους από την αποβάθρα προς τον τελικό προορισμό καθοριζόταν από μία Static Pedestrian Route. Οι διαστάσεις της αποβάθρας αποτελούν προσεγγίσεις βάσει του διαθέσιμου οπτικού υλικού και όχι ακριβή αποτύπωση αρχιτεκτονικών σχεδίων

4.3.2 Δημιουργία του διαδρόμου σύνδεσης

Μετά την ολοκλήρωση της αποβάθρας δημιουργήθηκε ο διάδρομος σύνδεσης, ο οποίος αποτελεί τον κύριο άξονα μετακίνησης των επιβατών προς το ανώτερο επίπεδο του σταθμού. Ο διάδρομος λειτουργεί ως μεταβατικός χώρος μεταξύ της αποβάθρας και των κυλιόμενων κλιμάκων και συγκεντρώνει μεγάλο μέρος των επιβατικών ροών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Η γεωμετρία του διαδρόμου σχεδιάστηκε με τρόπο ώστε να επιτρέπει την ταυτόχρονη κίνηση μεγάλου αριθμού πεζών χωρίς απότομες αλλαγές κατεύθυνσης ή γεωμετρικές ασυνέχειες. Η ομαλή σύνδεσή του με την αποβάθρα και τις κυλιόμενες κλίμακες ήταν ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τυχόν σφάλματα στη γεωμετρία θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μη ρεαλιστική συμπεριφορά των πεζών κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενοι έλεγχοι της γεωμετρίας, προκειμένου να διαπιστωθεί ότι οι πεζοί κινούνται ομαλά σε όλο το μήκος του διαδρόμου και δεν εμφανίζονται ανεπιθύμητες συγκεντρώσεις ή εμπλοκές που να οφείλονται αποκλειστικά στη σχεδίαση του μοντέλου.

4.3.3 Μοντελοποίηση κυλιόμενων κλιμάκων

Οι κυλιόμενες κλίμακες αποτελούν βασικό στοιχείο της λειτουργίας του σταθμού Deák Ferenc tér, καθώς εξυπηρετούν την κατακόρυφη μετακίνηση των επιβατών μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων του σταθμού. Η λειτουργία τους επηρεάζει άμεσα τη χωρητικότητα της εγκατάστασης, τον χρόνο μετακίνησης των χρηστών και τη διαμόρφωση των επιβατικών ροών, ιδιαίτερα κατά τις περιόδους αυξημένης ζήτησης. Για τον λόγο αυτό, η ορθή αναπαράστασή τους στο μοντέλο αποτέλεσε βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη μιας αξιόπιστης προσομοίωσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκαν συνολικά έξι κυλιόμενες κλίμακες, σύμφωνα με τη βασική διάταξη του εξεταζόμενου τμήματος του σταθμού. Η τοποθέτησή τους πραγματοποιήθηκε με τρόπο ώστε να διατηρείται η ίδια χωρική σχέση με την αποβάθρα και τον διάδρομο σύνδεσης, επιτρέποντας στους πεζούς να ακολουθούν φυσικές διαδρομές κατά τη μετακίνησή τους προς το ανώτερο επίπεδο. Και οι έξι κυλιόμενες κλίμακες ορίστηκαν με ανοδική κατεύθυνση. Το πλάτος κάθε κλίμακας ορίστηκε σε 1,50 m και η ταχύτητα λειτουργίας σε 0,50 m/s. Για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές του λογισμικού.

Για κάθε κυλιόμενη κλίμακα καθορίστηκαν τα απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως η θέση, ο προσανατολισμός και η σύνδεση με τις γειτονικές επιφάνειες κυκλοφορίας. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη σωστή ευθυγράμμιση των στοιχείων αυτών, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή μετάβαση των πεζών από τον διάδρομο προς τις κυλιόμενες κλίμακες χωρίς την εμφάνιση τεχνητών εμποδίων ή ασυνεχειών στη γεωμετρία.

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενοι έλεγχοι λειτουργίας, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι οι πεζοί είχαν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν τις διαθέσιμες διαδρομές και ότι οι συνδέσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων λειτουργούσαν σωστά. Η διαδικασία αυτή συνέβαλε στον εντοπισμό και τη διόρθωση γεωμετρικών αστοχιών πριν από την εκτέλεση των τελικών προσομοιώσεων (Σχήμα 4-1).



Σχήμα 4-1: Προσομοίωση κυλιόμενων κλιμάκων με το PTV Viswalk.

4.3.4 Έλεγχος και επαλήθευση της γεωμετρίας

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης της γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε έλεγχος της λειτουργικότητας του μοντέλου μέσω δοκιμαστικών εκτελέσεων της προσομοίωσης. Στόχος του ελέγχου ήταν να διαπιστωθεί ότι όλα τα στοιχεία του μοντέλου είχαν συνδεθεί σωστά και ότι οι πεζοί μπορούσαν να κινηθούν χωρίς προβλήματα σε ολόκληρο τον διαθέσιμο χώρο.

Κατά τις δοκιμαστικές εκτελέσεις εξετάστηκαν η συνέχεια των διαδρομών, η σύνδεση μεταξύ αποβάθρας, διαδρόμου και κυλιόμενων κλιμάκων, καθώς και η ορθή λειτουργία των περιοχών εισόδου και προορισμού. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος της κίνησης των πεζών, προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν περιοχές στις οποίες παρατηρούνταν μη ρεαλιστική συμπεριφορά ή ανεπιθύμητες συγκεντρώσεις που θα μπορούσαν να οφείλονται στη γεωμετρία του μοντέλου.

Η διαδικασία επαλήθευσης αποτελεί βασικό στάδιο σε κάθε εφαρμογή μικροσκοπικής προσομοίωσης, καθώς επιτρέπει την αναγνώριση πιθανών σφαλμάτων πριν από την εκτέλεση των τελικών σεναρίων. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αντανακλούν τη συμπεριφορά του συστήματος και δεν επηρεάζονται από κατασκευαστικές αστοχίες του μοντέλου (PTV Group, 2025).

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε εσωτερικός έλεγχος του μοντέλου, προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι οι επιφάνειες κίνησης ήταν συνδεδεμένες, οι κυλιόμενες κλίμακες συνέδεαν ορθά τα διαφορετικά επίπεδα και οι εικονικοί πεζοί μπορούσαν να μετακινηθούν από τις περιοχές εισόδου προς τους προκαθορισμένους προορισμούς χωρίς τεχνικά σφάλματα. Ο έλεγχος αυτός αφορά την ορθή λειτουργία της κατασκευής του μοντέλου και δεν αποτελεί εμπειρική επικύρωση της πραγματικής συμπεριφοράς των επιβατών.

4.4 Παραμετροποίηση του μοντέλου

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας ακολούθησε η διαδικασία παραμετροποίησης του μοντέλου, κατά την οποία καθορίστηκαν όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για την προσομοίωση της κίνησης των πεζών. Η παραμετροποίηση περιλάμβανε τον ορισμό των περιοχών εισόδου, των περιοχών προορισμού, των χαρακτηριστικών των πεζών και των σεναρίων επιβατικής ζήτησης.

Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται οι πεζοί, τις διαδρομές που ακολουθούν και τις αλληλεπιδράσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ακόμη και σε μοντέλα με σωστή γεωμετρία, λανθασμένες ρυθμίσεις παραμέτρων μπορούν να οδηγήσουν σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα ή σε λανθασμένη εκτίμηση της λειτουργικής απόδοσης της εγκατάστασης.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να διατηρηθούν σταθερές όλες οι βασικές παράμετροι του μοντέλου, μεταβάλλοντας αποκλειστικά τον αριθμό των πεζών που εισέρχονταν στην προσομοίωση. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η απομόνωση της επίδρασης της επιβατικής ζήτησης στα αποτελέσματα και η συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών σεναρίων.

4.4.1 Δημιουργία περιοχών εισόδου (Pedestrian Inputs)

Οι περιοχές εισόδου αποτελούν το σημείο από το οποίο δημιουργούνται οι πεζοί κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Μέσω των αντικειμένων αυτών καθορίζεται ο αριθμός των χρηστών που εισέρχονται στο μοντέλο, καθώς και ο χρονικός ρυθμός δημιουργίας τους. Η σωστή παραμετροποίηση των περιοχών εισόδου είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς επηρεάζει άμεσα την ένταση των επιβατικών ροών και τη λειτουργική κατάσταση της εγκατάστασης.

Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ένα Pedestrian Input, τοποθετημένο στην περιοχή της αποβάθρας με την ονομασία «1: Apovathra». Το Pedestrian Input ήταν ενεργό από την έναρξη έως το τέλος της προσομοίωσης, δηλαδή κατά το χρονικό διάστημα 0–3.600 s. Η εισαγωγή ήταν στοχαστική και πραγματοποιούνταν σύμφωνα με τον καθορισμένο μέσο ωριαίο ρυθμό.

Στα τέσσερα σενάρια η τιμή Volume ορίστηκε διαδοχικά σε 100, 300, 1.200 και 3.000 πεζούς/ώρα. Επειδή χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο Pedestrian Input, η τιμή του Volume αντιστοιχούσε ταυτόχρονα στον ρυθμό του συγκεκριμένου input και στη συνολική εισαγόμενη ροή του σεναρίου.

4.4.2 Καθορισμός περιοχών προορισμού (Destinations)

Μετά τη δημιουργία των περιοχών εισόδου πραγματοποιήθηκε ο καθορισμός των περιοχών προορισμού (Destinations), οι οποίες χρησιμοποιούνται στο PTV Viswalk για τον προσδιορισμό της τελικής κατεύθυνσης των πεζών. Οι περιοχές αυτές αποτελούν βασικό στοιχείο της μικροσκοπικής προσομοίωσης, καθώς καθορίζουν τον προορισμό κάθε πεζού μετά την είσοδό του στο μοντέλο και επιτρέπουν τη δημιουργία ρεαλιστικών διαδρομών κίνησης.

Στο μοντέλο δημιουργήθηκε ένας Destination, τοποθετημένος μετά τις κυλιόμενες κλίμακες, στο τέλος του μοντελοποιημένου τμήματος. Η δρομολόγηση πραγματοποιήθηκε με μία Static Pedestrian Route, η οποία συνέδεε το Pedestrian Input της αποβάθρας με τον Destination.

Όλοι οι πεζοί ακολουθούσαν την ίδια προκαθορισμένη διαδρομή. Δεν υπήρχαν εναλλακτικές Static Pedestrian Routes, ποσοστά επιλογής διαδρομής ή δυνατότητα επιλογής μεταξύ διαφορετικών προκαθορισμένων κυλιόμενων κλιμάκων. Συνεπώς, η κατανομή των πεζών δεν μπορεί να ερμηνευτεί ως έκφραση προτίμησης των χρηστών.

4.4.3 Δημιουργία των σεναρίων προσομοίωσης

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας και της παραμετροποίησης των περιοχών εισόδου και προορισμού, ακολούθησε η ανάπτυξη των σεναρίων προσομοίωσης. Η δημιουργία πολλαπλών σεναρίων αποτελεί καθιερωμένη πρακτική στις εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν τέσσερα σενάρια, στα οποία μεταβαλλόταν αποκλειστικά ο αριθμός των πεζών που εισέρχονταν στο μοντέλο ανά ώρα στο Pedestrian Input. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν σενάρια με 100, 300, 1.200 και 3.000 πεζούς/ώρα, διατηρώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η συγκριτική παρατήρηση της επίδρασης του ρυθμού εισαγωγής στη συμπεριφορά του μοντέλου.

Η επιλογή διαφορετικών επιπέδων φόρτισης επέτρεψε την παρατήρηση της συμπεριφοράς των πεζών από συνθήκες χαμηλής κυκλοφορίας έως συνθήκες ιδιαίτερα αυξημένης επιβατικής συγκέντρωσης. Παράλληλα, κατέστη δυνατή η παρατήρηση της μεταβολής της συγκέντρωσης των εικονικών πεζών στις περιοχές των διαδρόμων και των κυλιόμενων κλιμάκων.

Σενάριο	Ρυθμός εισαγωγής πεζών (πεζοί/ώρα)	Στόχος αξιολόγησης
1	100	Έλεγχος λειτουργίας του μοντέλου υπό χαμηλή επιβατική ζήτηση
2	300	Αξιολόγηση μέτριας επιβατικής φόρτισης
3	1.200	Διερεύνηση υψηλής επιβατικής ζήτησης
4	3.000	Εξέταση της λειτουργίας του μοντέλου υπό πολύ υψηλή φόρτιση

Πίνακας 4-1: Σενάρια προσομοίωσης που εφαρμόστηκαν.

4.5 Παράμετροι προσομοίωσης

Η αξιοπιστία ενός μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη σωστή επιλογή των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τη δημιουργία των πεζών, την κίνησή τους μέσα στον χώρο και τη διαδικασία συλλογής των αποτελεσμάτων.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να διατηρηθούν σταθερές όλες οι βασικές παράμετροι του μοντέλου, ώστε η μοναδική μεταβλητή μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων να είναι ο αριθμός των πεζών. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων και τη διερεύνηση της επίδρασης της επιβατικής ζήτησης στη λειτουργία της εγκατάστασης.

Για την τελική συγκριτική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε μία επιλεγμένη εκτέλεση ανά σενάριο, διάρκειας 3.600 s και με random seed 42. Η εισαγωγή των πεζών και η καταγραφή των αποτελεσμάτων πραγματοποιούνταν από 0 έως 3.600 s. Δεν χρησιμοποιήθηκε χωριστή περίοδος προθέρμανσης. Χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος πεζού και όλες οι παράμετροι συμπεριφοράς και του Social Force Model διατηρήθηκαν στις προεπιλεγμένες τιμές του λογισμικού.

Οι βασικές παράμετροι που παρέμειναν σταθερές περιλαμβάνουν τη γεωμετρία του μοντέλου, τη θέση των περιοχών εισόδου και προορισμού, τη διάταξη των κυλιόμενων κλιμάκων και τη διάρκεια της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίστηκε ότι οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν στα αποτελέσματα οφείλονταν αποκλειστικά στην αλλαγή του αριθμού των πεζών (PTV Group, 2025).

4.5.1 Παραδοχές της μοντελοποίησης

Όπως σε κάθε εφαρμογή μικροσκοπικής προσομοίωσης, έτσι και στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκαν συγκεκριμένες παραδοχές προκειμένου να καταστεί δυνατή η ανάπτυξη ενός λειτουργικού και υπολογιστικά διαχειρίσιμου μοντέλου.

Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι όλοι οι πεζοί ακολουθούν τις βασικές αρχές συμπεριφοράς που εφαρμόζει το PTV Viswalk μέσω του Social Force Model και ότι διαθέτουν ίδιες γενικές δυνατότητες κίνησης. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι οι κυλιόμενες κλίμακες λειτουργούν κανονικά σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και ότι δεν υπάρχουν έκτακτα γεγονότα, όπως τεχνικές βλάβες ή προσωρινές διακοπές λειτουργίας.

Ακόμη, η ανάλυση περιορίστηκε στο εξεταζόμενο τμήμα του σταθμού, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη εξωτερικοί παράγοντες, όπως μεταβολές στα δρομολόγια των συρμών ή αλλαγές στη λειτουργία των υπόλοιπων μέσων μεταφοράς. Οι παραδοχές αυτές κρίθηκαν απαραίτητες για την ανάπτυξη ενός μοντέλου που να επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών σεναρίων με συνέπεια και επαναληψιμότητα.

4.6 Εκτέλεση των σεναρίων προσομοίωσης

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας και της παραμετροποίησης του μοντέλου πραγματοποιήθηκε η εκτέλεση των σεναρίων προσομοίωσης στο περιβάλλον του PTV Viswalk. Η διαδικασία αυτή είχε ως στόχο την αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του σταθμού υπό διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης και τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για τη συγκριτική ανάλυση που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Η εκτέλεση των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε διατηρώντας σταθερά όλα τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Η μοναδική μεταβλητή μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων ήταν ο αριθμός των πεζών που δημιουργούνταν μέσω των περιοχών εισόδου (Pedestrian Inputs). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε ότι οι διαφορές που παρατηρήθηκαν στα αποτελέσματα οφείλονταν αποκλειστικά στη μεταβολή της επιβατικής ζήτησης και όχι σε αλλαγές της γεωμετρίας ή άλλων παραμέτρων.

Η προσομοίωση κάθε σεναρίου εκτελέστηκε ανεξάρτητα, επιτρέποντας την παρακολούθηση της κίνησης των πεζών σε πραγματικό χρόνο και την καταγραφή των αντίστοιχων δεικτών λειτουργικής απόδοσης. Κατά τη διάρκεια κάθε εκτέλεσης πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος της συμπεριφοράς των πεζών, ώστε να διαπιστωθεί ότι οι διαδρομές που ακολουθούνται είναι συμβατές με τη λογική λειτουργίας του σταθμού και ότι δεν εμφανίζονται προβλήματα που σχετίζονται με τη δομή του μοντέλου.

4.6.1 Εκτέλεση του σεναρίου χαμηλής επιβατικής ζήτησης

Στο πρώτο σενάριο ο ρυθμός εισαγωγής ορίστηκε σε 100 πεζούς/ώρα. Το σενάριο εκτελέστηκε με τις κοινές παραμέτρους του μοντέλου και χρησιμοποιήθηκε ως το χαμηλότερο επίπεδο αναφοράς για τη σύγκριση των τεσσάρων εκτελέσεων

4.6.2 Εκτέλεση του σεναρίου μέτριας επιβατικής ζήτησης

Στο δεύτερο σενάριο ο ρυθμός εισαγωγής ορίστηκε σε 300 πεζούς/ώρα, ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές. Το σενάριο χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της απόκρισης του μοντέλου σε αυξημένο ρυθμό εισαγωγής σε σχέση με το πρώτο σενάριο.

4.6.3 Εκτέλεση του σεναρίου υψηλής επιβατικής ζήτησης

Στο τρίτο σενάριο ο ρυθμός εισαγωγής ορίστηκε σε 1.200 πεζούς/ώρα. Η εκτέλεση πραγματοποιήθηκε με την ίδια γεωμετρία, δρομολόγηση και διάρκεια προσομοίωσης με τα προηγούμενα σενάρια.

4.6.4 Εκτέλεση του σεναρίου πολύ υψηλής επιβατικής ζήτησης

Στο τέταρτο σενάριο ο ρυθμός εισαγωγής ορίστηκε σε 3.000 πεζούς/ώρα. Η τιμή αυτή δεν αντιστοιχεί στην ταυτόχρονη παρουσία 3.000 πεζών στο μοντέλο, αλλά στον μέσο ωριαίο ρυθμό στοχαστικής εισαγωγής τους.

4.6.5 Συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων

Η εκτέλεση των τεσσάρων σεναρίων επέτρεψε τη συστηματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μοντέλου υπό διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης. Η διατήρηση σταθερής γεωμετρίας και κοινών παραμέτρων σε όλες τις προσομοιώσεις επέτρεψε να αποδοθούν οι παρατηρούμενες διαφορές κυρίως στη μεταβολή του ρυθμού εισαγωγής πεζών.

Η συγκριτική προσέγγιση διευκόλυνε την αξιολόγηση της λειτουργικής επάρκειας των κυλιόμενων κλιμάκων, των διαδρόμων και των περιοχών κυκλοφορίας, καθώς και την αναγνώριση μεταβολών στη συμπεριφορά των πεζών όσο αυξανόταν η επιβατική φόρτιση. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τις προσομοιώσεις αποτέλεσαν τη βάση για την ανάλυση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.7 Περιοχές μέτρησης και συλλογή δεδομένων

Η συλλογή αξιόπιστων δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς ενός μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης. Για τον λόγο αυτό, μετά την ολοκλήρωση της παραμετροποίησης και πριν από την εκτέλεση των τελικών σεναρίων, δημιουργήθηκαν στο PTV Viswalk κατάλληλες περιοχές μέτρησης (Measurement Areas), μέσω των οποίων καταγράφηκαν τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κίνηση των πεζών.

Συνολικά δημιουργήθηκαν 13 Area Measurements. Ορισμένες από αυτές χρησιμοποιούσαν την ίδια γεωμετρική περιοχή για διαφορετικές καταγραφές. Οι περιοχές 1 και 5 αντιστοιχούσαν στην αποβάθρα, επιφάνειας περίπου 989,20 m². Οι 2 και 6 στον άνω χώρο εξόδου, επιφάνειας 98,30 m². Οι 3 και 7 στην περιοχή μετά τις κυλιόμενες κλίμακες, επιφάνειας 400,19 m². Οι 9, 10 και 11 στον διάδρομο πριν από τις κυλιόμενες κλίμακες, επιφάνειας 27,94 m². Και οι 4, 8, 12 και 13 σε στενή περιοχή κοντά στις κυλιόμενες κλίμακες, επιφάνειας 26,53 m².

Για τη συγκριτική ποσοτική αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων χρησιμοποιήθηκε η Area Measurement 1, η οποία αντιστοιχεί στην περιοχή της αποβάθρας με την ονομασία “Arovathra”. Η Area Measurement 5 αναφερόταν στην ίδια γεωμετρική περιοχή και παρήγαγε ταυτόσημα αποτελέσματα. επομένως, δεν αντιμετωπίστηκε ως ανεξάρτητη περιοχή μέτρησης.

Οι περιοχές μέτρησης τοποθετήθηκαν σε θέσεις ιδιαίτερου λειτουργικού ενδιαφέροντος, όπου αναμενόταν να εμφανιστούν οι μεγαλύτερες μεταβολές των επιβατικών ροών. Η επιλογή των σημείων αυτών βασίστηκε στη γεωμετρία του σταθμού και στη διάταξη των βασικών υποδομών, όπως οι διάδρομοι σύνδεσης και οι κυλιόμενες κλίμακες. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς των πεζών σε κρίσιμα τμήματα της διαδρομής τους.

Η χρήση των Measurement Areas επέτρεψε την αυτόματη καταγραφή των αποτελεσμάτων κατά την εκτέλεση κάθε προσομοίωσης, χωρίς να απαιτείται χειροκίνητη επεξεργασία των δεδομένων. Όλα τα στοιχεία συλλέχθηκαν με ενιαία διαδικασία και χρησιμοποιήθηκαν στη συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.7.1 Δείκτες που αξιολογήθηκαν

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δείκτες που περιγράφουν τη συμπεριφορά των πεζών και την απόδοση της υποδομής. Οι δείκτες αυτοί αποτελούν καθιερωμένα μεγέθη στις εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης και επιτρέπουν την αντικειμενική σύγκριση διαφορετικών επιπέδων επιβατικής ζήτησης (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Στην παρούσα εργασία δόθηκε έμφαση κυρίως:

- στον μέσο αριθμό πεζών στην επιλεγμένη περιοχή μέτρησης (NumPedsAvg),
- στον μέγιστο αριθμό πεζών στην ίδια περιοχή (NumPedsMax) και
- στην οπτική παρατήρηση της χωρικής κατανομής των εικονικών πεζών.

Η επιλογή των συγκεκριμένων δεικτών κρίθηκε επαρκής για την αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου τμήματος του σταθμού και επέτρεψε τη συστηματική σύγκριση των τεσσάρων σεναρίων.

4.7.2 Διαδικασία συλλογής των αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση κάθε προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων που παρείχε το PTV Viswalk. Τα δεδομένα οργανώθηκαν ανά σενάριο, ώστε να διευκολυνθεί η συγκριτική ανάλυση της επίδρασης της επιβατικής ζήτησης στη λειτουργία του μοντέλου.

Παράλληλα με τα αριθμητικά δεδομένα πραγματοποιήθηκε και οπτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των πεζών μέσω της τρισδιάστατης απεικόνισης του λογισμικού. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε την αναγνώριση περιοχών αυξημένης συγκέντρωσης πεζών και τη γενικότερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο εξελίσσονται οι επιβατικές ροές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Η συνδυασμένη αξιοποίηση ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων συνέβαλε στην πληρέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και ενίσχυσε την αξιοπιστία της αξιολόγησης των διαφορετικών σεναρίων.

4.7.3 Αξιοπιστία των αποτελεσμάτων

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ορθή ανάπτυξη της γεωμετρίας, την κατάλληλη παραμετροποίηση του μοντέλου και τη συνεπή εφαρμογή της ίδιας διαδικασίας σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Στην παρούσα εργασία όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με την ίδια γεωμετρία και τις ίδιες βασικές ρυθμίσεις, διαφοροποιώντας αποκλειστικά τον αριθμό των πεζών που εισέρχονταν στο μοντέλο.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, καθώς περιορίζει την επίδραση εξωτερικών παραγόντων και καθιστά δυνατή την απομόνωση της επίδρασης της επιβατικής ζήτησης στη λειτουργική συμπεριφορά του σταθμού. Η εφαρμογή παρέχει συγκρίσιμα αποτελέσματα για τη διερευνητική σύγκριση των τεσσάρων εκτελέσεων, εντός των συγκεκριμένων παραδοχών του μοντέλου. Επειδή αναλύθηκε μία επιλεγμένη εκτέλεση ανά σενάριο, τα αποτελέσματα ενδέχεται να επηρεάζονται από τον τυχαίο σπόρο και δεν επιτρέπουν στατιστική γενίκευση.

4.8 Περιορισμοί της μοντελοποίησης

Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου υιοθετήθηκαν ορισμένες παραδοχές και περιορισμοί, οι οποίοι κρίθηκαν αναγκαίοι για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης και την επίτευξη συγκρίσιμων αποτελεσμάτων. Οι περιορισμοί αυτοί περιορίζουν το πεδίο εφαρμογής και τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία τους.

Αρχικά, το μοντέλο περιορίστηκε στην προσομοίωση συγκεκριμένου τμήματος του σταθμού και δεν περιέλαβε το σύνολο των επιπέδων και των εγκαταστάσεων του Deák Ferenc tér. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε ώστε να επικεντρωθεί η ανάλυση στις βασικές περιοχές κυκλοφορίας των πεζών και να διατηρηθεί το μοντέλο υπολογιστικά διαχειρίσιμο.

Επιπλέον, η ανάπτυξη των σεναρίων βασίστηκε σε αντιπροσωπευτικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης και όχι σε πραγματικά δεδομένα καταμέτρησης επιβατών. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του μοντέλου, χωρίς όμως να αποσκοπεί στην ακριβή πρόβλεψη της πραγματικής λειτουργίας του σταθμού.

Τέλος, η ανάλυση επικεντρώθηκε στη συμπεριφορά των πεζών και δεν εξετάστηκαν παράγοντες όπως πιθανές μεταβολές στα δρομολόγια των συρμών, έκτακτες διακοπές λειτουργίας ή συμβάντα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη λειτουργία του σταθμού υπό πραγματικές συνθήκες. Οι παράγοντες αυτοί θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

4.9 Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η μεθοδολογία ανάπτυξης του μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Περιγράφηκαν τα βασικά στάδια της μοντελοποίησης, ξεκινώντας από τη δημιουργία της γεωμετρίας του εξεταζόμενου τμήματος του σταθμού και συνεχίζοντας με την παραμετροποίηση των περιοχών εισόδου, των περιοχών προορισμού και των σεναρίων επιβατικής ζήτησης.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η διαδικασία εκτέλεσης των προσομοιώσεων, η οργάνωση των διαφορετικών σεναρίων και η δημιουργία των περιοχών μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των αποτελεσμάτων. Παράλληλα, αναφέρθηκαν οι βασικές παραδοχές και οι περιορισμοί της μοντελοποίησης, οι οποίοι είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Η ολοκλήρωση της διαδικασίας μοντελοποίησης κατέστησε δυνατή τη δημιουργία ενός λειτουργικού μοντέλου, μέσω του οποίου αξιολογήθηκε η συμπεριφορά των πεζών υπό διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων και αναλύεται η επίδραση της αύξησης της επιβατικής φόρτισης στη λειτουργική συμπεριφορά του σταθμού.

5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών στον σταθμό Deák Ferenc tér του μετρό της Βουδαπέστης. Η αξιολόγηση βασίζεται στα τέσσερα σενάρια επιβατικής ζήτησης που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και εξετάζει την επίδραση της αύξησης του αριθμού των πεζών στη λειτουργία του σταθμού.

Η ανάλυση πραγματοποιείται με βάση τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το PTV Viswalk μέσω των περιοχών μέτρησης (Area Measurements). Οι ποσοτικοί δείκτες που αξιολογούνται είναι ο μέσος αριθμός πεζών (NumPedsAvg) και ο μέγιστος αριθμός πεζών (NumPedsMax) στην επιλεγμένη περιοχή μέτρησης. Συμπληρωματικά πραγματοποιείται οπτική παρατήρηση της χωρικής κατανομής των πεζών. Δεν παρουσιάζονται ποσοτικές μετρήσεις ταχύτητας, καθυστέρησης, ουράς ή πραγματικής πυκνότητας σε πεζούς/m².

Στόχος του κεφαλαίου είναι η συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων σεναρίων και η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η αύξηση της επιβατικής ζήτησης επηρεάζει τη λειτουργική συμπεριφορά του σταθμού. Τα αποτελέσματα συνδέονται με τις αρχές της μικροσκοπικής προσομοίωσης και ερμηνεύονται υπό το πρίσμα της σχετικής βιβλιογραφίας (Helbing & Molnár, 1995; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

5.2 Περιγραφή σεναρίων προσομοίωσης

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας του μοντέλου αναπτύχθηκαν τέσσερα σενάρια προσομοίωσης, στα οποία μεταβλήθηκε αποκλειστικά ο ωριαίος ρυθμός εισαγωγής πεζών στο μοντέλο. Η γεωμετρία, οι περιοχές εισόδου και προορισμού, καθώς και όλες οι βασικές παράμετροι της προσομοίωσης παρέμειναν σταθερές, ώστε οι διαφορές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα να οφείλονται αποκλειστικά στη μεταβολή της επιβατικής ζήτησης.

5.3 Ανάλυση του αριθμού πεζών στην περιοχή μέτρησης

Για την ποσοτική σύγκριση των σεναρίων χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες NumPedsAvg και NumPedsMax. Ο πρώτος εκφράζει τον μέσο αριθμό πεζών που καταγράφηκαν στην επιλεγμένη περιοχή μέτρησης κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης και ο δεύτερος τον αντίστοιχο μέγιστο αριθμό. Οι δείκτες αυτοί εκφράζουν αριθμό πεζών και όχι πυκνότητα σε πεζούς ανά τετραγωνικό μέτρο.

Στο σενάριο των 100 πεζών/ώρα καταγράφηκαν NumPedsAvg = 1,71 και NumPedsMax = 7. Στο σενάριο των 300 πεζών/ώρα οι αντίστοιχες τιμές ήταν 4,14 και 9, ενώ στο σενάριο των 1.200 πεζών/ώρα ήταν 16,27 και 27. Για το σενάριο των 3.000 πεζών/ώρα οι διορθωμένες τιμές ήταν 38,09 και 54 (Πίνακας 5-1).

Η αύξηση των δύο δεικτών δείχνει ότι όσο αυξανόταν ο ρυθμός εισαγωγής, αυξανόταν και ο αριθμός των πεζών που βρίσκονταν ταυτόχρονα στην εξεταζόμενη περιοχή. Το αποτέλεσμα αφορά αποκλειστικά τη συγκεκριμένη περιοχή μέτρησης και δεν αποτελεί μέτρηση της συνολικής πληρότητας ή χωρητικότητας του σταθμού.

Ρυθμός εισαγωγής πεζών (πεζοί/ώρα)	NumPedsAvg	NumPedsMax
100	1,71	7
300	4,14	9
1.200	16,27	27
3.000	38,09	54

Πίνακας 5-1: Μέσος και μέγιστος αριθμός πεζών στην Area Measurement 1 (“Αποvathra”) ανά σενάριο.

5.4 Ανάλυση λειτουργίας κυλιόμενων κλιμάκων

Η οπτική παρατήρηση των προσομοιώσεων έδειξε ότι όσο αυξανόταν ο ρυθμός εισαγωγής, αυξανόταν η παρουσία πεζών στις περιοχές προσέγγισης και χρήσης των κυλιόμενων κλιμάκων. Η παρατήρηση αυτή είναι συμβατή με την αύξηση των τιμών NumPedsAvg και NumPedsMax.

Στο μοντέλο είχε οριστεί μία μόνο Static Pedestrian Route και δεν υπήρχαν εναλλακτικές προκαθορισμένες διαδρομές ή ποσοστά επιλογής. Επομένως, η εντονότερη χρήση συγκεκριμένης κυλιόμενης κλίμακας δεν ερμηνεύεται ως προτίμηση των πεζών, αλλά ως αποτέλεσμα της γεωμετρίας και της μοναδικής δρομολόγησης που είχε οριστεί. Δεν εξήχθησαν ποσοτικοί δείκτες χρόνου αναμονής, καθυστέρησης ή μήκους ουράς.

5.5 Ποιοτική αξιολόγηση της κίνησης των πεζών

Η οπτική σύγκριση των εκτελέσεων χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά προς τους δύο ποσοτικούς δείκτες. Στα σενάρια των 100 και 300 πεζών/ώρα παρατηρήθηκε μικρότερη παρουσία πεζών στις περιοχές κίνησης. Στα σενάρια των 1.200 και 3.000 πεζών/ώρα παρατηρήθηκε μεγαλύτερη συγκέντρωση στις περιοχές μετάβασης και κοντά στις κυλιόμενες κλίμακες.

Επειδή δεν εξήχθησαν ποσοτικές τιμές ταχύτητας, χρόνου διαδρομής, καθυστέρησης ή ουράς, η οπτική παρατήρηση δεν χρησιμοποιείται για τη διατύπωση αριθμητικών συμπερασμάτων σχετικά με τους δείκτες αυτούς.

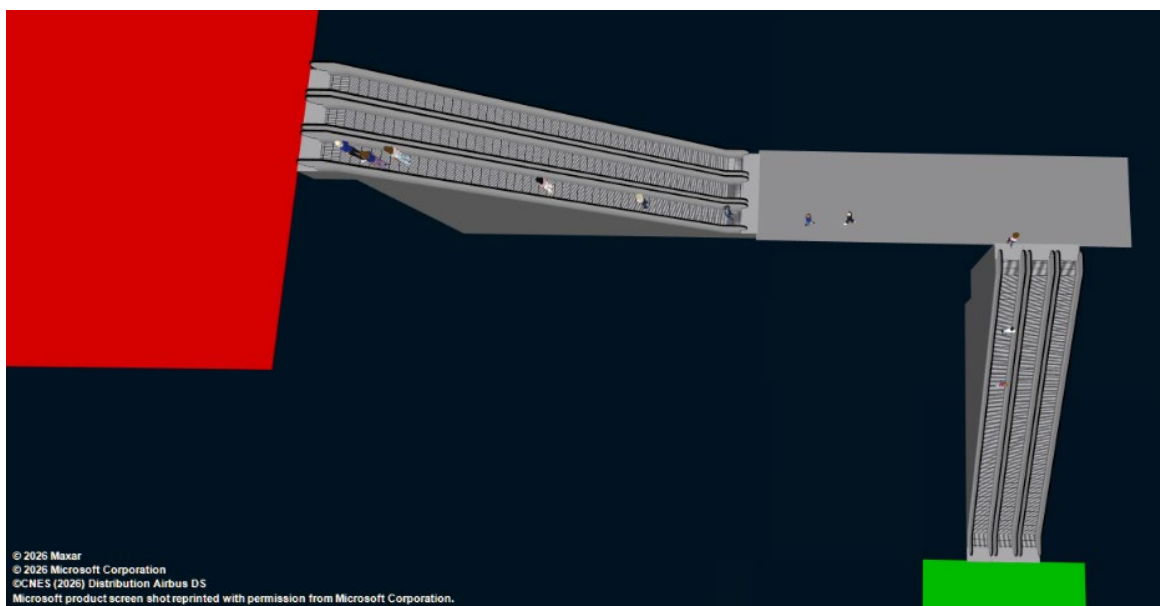
5.6 Ποιοτική συζήτηση σε σχέση με την έννοια του LoS

Το επίπεδο εξυπηρέτησης αποτελεί χρήσιμο θεωρητικό πλαίσιο για την αξιολόγηση της κίνησης πεζών. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία δεν υπολογίστηκε πραγματική πυκνότητα σε πεζούς/m² και δεν εφαρμόστηκαν τα αριθμητικά όρια του Highway Capacity Manual. Επομένως, δεν είναι δυνατή η αντιστοίχιση των τεσσάρων σεναρίων σε βαθμίδες LoS A–F. Τα αποτελέσματα επιτρέπουν μόνο τη σχετική παρατήρηση ότι η αύξηση του ρυθμού εισαγωγής συνοδεύτηκε από μεγαλύτερο αριθμό και μεγαλύτερη οπτική συγκέντρωση πεζών στην εξεταζόμενη περιοχή.

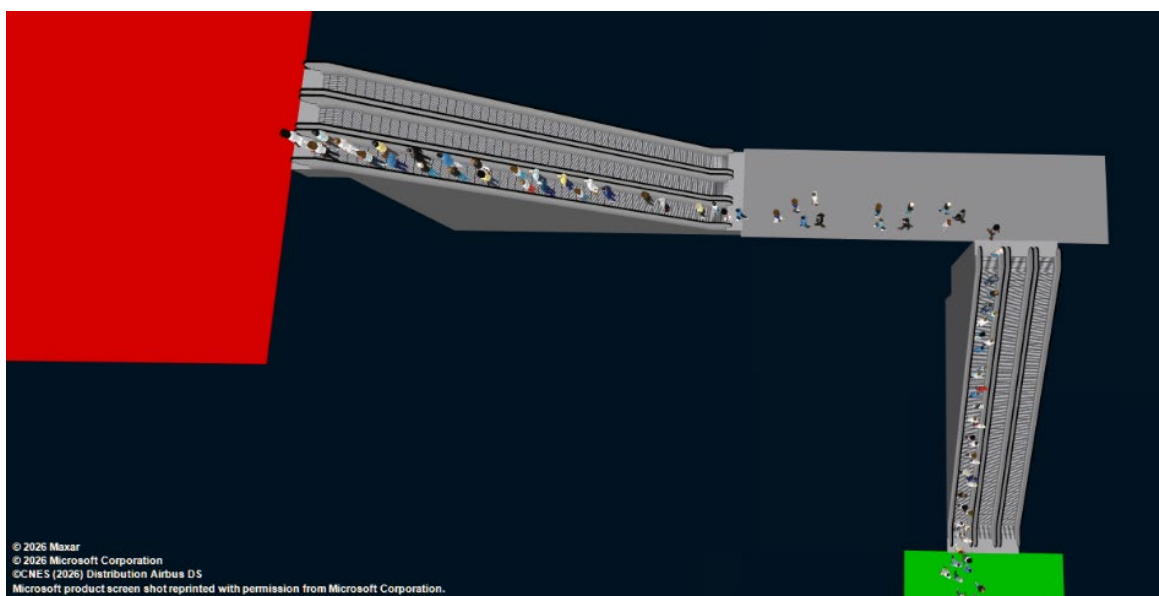
5.7 Συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων

Η συγκριτική αξιολόγηση δείχνει προοδευτική αύξηση των τιμών NumPedsAvg και NumPedsMax όσο αυξάνεται ο ρυθμός εισαγωγής. Η μεγαλύτερη διαφορά καταγράφηκε μεταξύ των σεναρίων των 1.200 και 3.000 πεζών/ώρα, όπου ο μέσος αριθμός αυξήθηκε από 16,27 σε 38,09 και ο μέγιστος από 27 σε 54.

Η αύξηση αυτή υποδεικνύει μεγαλύτερη φόρτιση της συγκεκριμένης περιοχής του μοντέλου, αλλά δεν επαρκεί για να αποδειχθεί η χωρητικότητα ή η λειτουργική επάρκεια της πραγματικής γεωμετρίας του σταθμού. Επιπλέον, επειδή αναλύθηκε μία επιλεγμένη εκτέλεση ανά σενάριο, τα αποτελέσματα αποτελούν διερευνητικές συγκριτικές ενδείξεις (Σχήμα 5-1 και Σχήμα 5-2) (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).



Σχήμα 5-1: Σύγκριση της κατανομής των πεζών για διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης. (α) 1.200 πεζοί/ώρα.



Σχήμα 5-2: Σύγκριση της κατανομής των πεζών για διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης. (β) 3.000 πεζοί/ώρα.

Η οπτική σύγκριση δείχνει μεγαλύτερη παρουσία και συγκέντρωση εικονικών πεζών στο σενάριο των 3.000 πεζών/ώρα σε σχέση με το σενάριο των 1.200 πεζών/ώρα, ιδιαίτερα στις περιοχές μετάβασης και κοντά στις κυλιόμενες κλίμακες. Η παρατήρηση είναι ποιοτική και δεν επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την πραγματική χωρητικότητα, την καθυστέρηση ή την ομαλότητα των ροών.

5.8 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα αποτυπώνουν την απόκριση του συγκεκριμένου απλοποιημένου μοντέλου σε τέσσερις υποθετικούς ρυθμούς εισαγωγής. Η αύξηση του ρυθμού εισαγωγής συνοδεύτηκε από αύξηση του μέσου και του μέγιστου αριθμού πεζών στην επιλεγμένη περιοχή μέτρησης και από εντονότερη οπτική συγκέντρωση στις περιοχές μετάβασης.

Τα αποτελέσματα δεν τεκμηριώνουν την πραγματική χωρητικότητα του σταθμού ή την επάρκεια της γεωμετρίας του, επειδή το μοντέλο δεν βασίστηκε σε ακριβή σχέδια ή πραγματικά δεδομένα και δεν βαθμονομήθηκε ή επικυρώθηκε. Επίσης, η κατανομή στις κυλιόμενες κλίμακες επηρεάστηκε από τη μοναδική Static Pedestrian Route και δεν εκφράζει ελεύθερη επιλογή διαδρομής.

5.9 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των τεσσάρων διερευνητικών σεναρίων. Οι τιμές NumPedsAvg και NumPedsMax αυξήθηκαν όσο αυξανόταν ο ρυθμός εισαγωγής, ενώ η οπτική παρατήρηση έδειξε εντονότερη συγκέντρωση πεζών στις περιοχές μετάβασης και στις κυλιόμενες κλίμακες.

Τα αποτελέσματα αφορούν τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου μοντέλου και δεν συνιστούν αξιολόγηση της πραγματικής λειτουργικής επάρκειας του σταθμού. Η ερμηνεία τους πρέπει να λαμβάνει υπόψη την προσεγγιστική γεωμετρία, τη μοναδική στατική διαδρομή, την απουσία βαθμονόμησης και επικύρωσης και αναλύθηκε μία επιλεγμένη εκτέλεση ανά σενάριο.

6 Συμπεράσματα και Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ανέπτυξε και εφάρμοσε διερευνητικά ένα απλοποιημένο μοντέλο μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών σε επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér με το PTV Viswalk. Το μοντέλο περιλάμβανε μία περιοχή εισαγωγής, έναν προορισμό, μία Static Pedestrian Route και έξι κυλιόμενες κλίμακες.

Εξετάστηκαν τέσσερις υποθετικοί ρυθμοί εισαγωγής, ίσοι με 100, 300, 1.200 και 3.000 πεζούς/ώρα. Οι τιμές NumPedsAvg και NumPedsMax στην επιλεγμένη περιοχή μέτρησης αυξήθηκαν από 1,71 και 7 στο πρώτο σενάριο σε 38,09 και 54 στο τέταρτο. Η οπτική παρατήρηση έδειξε επίσης μεγαλύτερη συγκέντρωση πεζών στις περιοχές μετάβασης και κοντά στις κυλιόμενες κλίμακες.

Η προσομοίωση ολοκληρώθηκε χωρίς τεχνική αδυναμία μετακίνησης των εικονικών πεζών προς τον προορισμό. Το γεγονός αυτό δεν αποδεικνύει την επάρκεια της πραγματικής υποδομής ή τη δυνατότητα εξυπηρέτησης των αντίστοιχων πραγματικών ροών.

Λόγω της προσεγγιστικής γεωμετρίας, της απουσίας πραγματικών δεδομένων, της χρήσης μίας μόνο διαδρομής και της πραγματοποίησης μίας μόνο εκτέλεσης ανά σενάριο, τα αποτελέσματα πρέπει να θεωρούνται διερευνητικά. Η κύρια χρησιμότητα της εφαρμογής είναι η παρουσίαση της διαδικασίας ανάπτυξης ενός μοντέλου στο PTV Viswalk και η συγκριτική παρατήρηση της απόκρισής του σε διαφορετικούς ρυθμούς εισαγωγής.

6.2 Αξιολόγηση των ερευνητικών στόχων

Κατά την έναρξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας τέθηκαν συγκεκριμένοι ερευνητικοί στόχοι, οι οποίοι αφορούσαν την ανάπτυξη ενός λειτουργικού μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης, την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των πεζών υπό διαφορετικά επίπεδα επιβατικής ζήτησης και τη διερεύνηση της χρησιμότητας του PTV Viswalk ως εργαλείου ανάλυσης της κυκλοφορίας πεζών.

Ο στόχος της ανάπτυξης λειτουργικού διερευνητικού μοντέλου επιτεύχθηκε μέσω της δημιουργίας προσεγγιστικής γεωμετρίας και της τεχνικής σύνδεσης των βασικών αντικειμένων του PTV Viswalk. Δεν αναπτύχθηκε ούτε επικυρώθηκε ρεαλιστικό επιχειρησιακό μοντέλο του πραγματικού σταθμού.

Ο στόχος της συγκριτικής εξέτασης διαφορετικών ρυθμών εισαγωγής επιτεύχθηκε, καθώς εκτελέστηκαν τέσσερα σενάρια και συγκρίθηκαν οι τιμές NumPedsAvg και NumPedsMax και η οπτική κατανομή των πεζών.

Ο στόχος της εξοικείωσης με το PTV Viswalk επιτεύχθηκε μέσω της δημιουργίας της γεωμετρίας, του Pedestrian Input, του Destination, της Static Pedestrian Route, των κυλιόμενων κλιμάκων και των Area Measurements.

6.3 Επιστημονική συμβολή της εργασίας

Η συμβολή της εργασίας είναι κυρίως εκπαιδευτική και μεθοδολογική. Παρουσιάζει τα βασικά στάδια δημιουργίας ενός απλοποιημένου μοντέλου πεζών στο PTV Viswalk, τον ορισμό των κύριων αντικειμένων του και τη συγκριτική εξέταση τεσσάρων υποθετικών ρυθμών εισαγωγής.

Η εργασία δεν εισάγει βαθμονομημένο μοντέλο ούτε παράγει νέα εμπειρική γνώση για την πραγματική λειτουργία του σταθμού Deák Ferenc tér. Παρέχει, ωστόσο, παράδειγμα εφαρμογής που μπορεί να αποτελέσει αφετηρία για πληρέστερη μελέτη με ακριβή γεωμετρία, πραγματικά δεδομένα και πολλαπλές εκτελέσεις

6.4 Πρακτικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων

Η γενική μεθοδολογική διαδικασία που εφαρμόστηκε μπορεί να αξιοποιηθεί ως βάση για πληρέστερες εφαρμογές μικροσκοπικής προσομοίωσης. Τα συγκεκριμένα αριθμητικά αποτελέσματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σχεδιαστικές ή λειτουργικές αποφάσεις σχετικά με τον πραγματικό σταθμό.

Στον σχεδιασμό νέων σταθμών μετρό, η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου πλάτους διαδρόμων, της θέσης και του αριθμού των κυλιόμενων κλιμάκων, καθώς και για την εκτίμηση της χωρητικότητας των χώρων αναμονής. Παράλληλα, μπορεί να συμβάλει στην αξιολόγηση της επάρκειας των εξόδων κινδύνου και των διαδρομών εκκένωσης σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Για τέτοιες εφαρμογές απαιτούνται ακριβής γεωμετρική αποτύπωση, πραγματικά δεδομένα πεδίου, βαθμονόμηση, επικύρωση και πολλαπλές επαναλήψεις των στοχαστικών προσομοιώσεων.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν από φορείς διαχείρισης αστικών συγκοινωνιών για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας υφιστάμενων σταθμών. Μέσω της προσομοίωσης είναι δυνατή η αξιολόγηση της επίδρασης αυξημένης επιβατικής ζήτησης κατά τις ώρες αιχμής, καθώς και η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας πιθανών παρεμβάσεων χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στην πραγματική λειτουργία του σταθμού.

Αντίστοιχες εφαρμογές συναντώνται και σε άλλες εγκαταστάσεις υψηλής συγκέντρωσης κοινού, όπως αεροδρόμια, σιδηροδρομικοί σταθμοί, λιμένες, αθλητικές εγκαταστάσεις, εκθεσιακά κέντρα και μεγάλοι εμπορικοί χώροι. Σε όλες τις περιπτώσεις, η μικροσκοπική προσομοίωση μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ασφάλειας, της άνεσης και της συνολικής ποιότητας εξυπηρέτησης των χρηστών.

Η αξιοποίηση τέτοιων εργαλείων αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία στο πλαίσιο των σύγχρονων «έξυπνων πόλεων» (Smart Cities), όπου η λήψη αποφάσεων βασίζεται ολοένα και περισσότερο στην ανάλυση δεδομένων και στην προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας των αστικών υποδομών.

6.5 Περιορισμοί της έρευνας

Οι βασικοί περιορισμοί της έρευνας είναι οι ακόλουθοι:

- η γεωμετρία βασίστηκε σε οπτικό υλικό και προσεγγιστικές διαστάσεις και δεν αποτελεί πλήρη ψηφιακή ανακατασκευή του σταθμού,
- μοντελοποιήθηκε μόνο επιλεγμένο τμήμα του σταθμού,
- οι τιμές 100, 300, 1.200 και 3.000 πεζοί/ώρα είναι υποθετικοί ρυθμοί εισαγωγής και δεν προέκυψαν από πραγματικές μετρήσεις,

- χρησιμοποιήθηκαν ένα Pedestrian Input, ένας Destination και μία Static Pedestrian Route, χωρίς εναλλακτικές επιλογές διαδρομής,
- χρησιμοποιήθηκαν ένας τύπος πεζού και οι προεπιλεγμένες παράμετροι του λογισμικού,
- δεν πραγματοποιήθηκαν εμπειρική βαθμονόμηση και επικύρωση,
- πραγματοποιήθηκε μία μόνο στοχαστική εκτέλεση με random seed 42 ανά σενάριο,
- δεν χρησιμοποιήθηκε χωριστή περίοδος προθέρμανσης,
- η ποσοτική ανάλυση περιορίστηκε στους δείκτες NumPedsAvg και NumPedsMax σε επιλεγμένη περιοχή μέτρησης και
- δεν μετρήθηκαν ταχύτητα, χρόνος διαδρομής, καθυστέρηση, μήκος ουράς ή βαθμίδα LoS.

Οι περιορισμοί αυτοί σημαίνουν ότι τα αποτελέσματα επιτρέπουν μόνο τη διερευνητική σύγκριση των τεσσάρων εκτελέσεων και δεν πρέπει να γενικεύονται στην πραγματική λειτουργία του σταθμού.

6.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μικροσκοπική προσομοίωση πεζών αποτελεί ένα διαρκώς εξελισσόμενο ερευνητικό πεδίο, το οποίο προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για τη βελτίωση του σχεδιασμού και της λειτουργίας συγκοινωνιακών υποδομών. Η παρούσα εργασία παρουσίασε μια πρώτη διερευνητική εφαρμογή απλοποιημένου μοντέλου για επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér, ωστόσο υπάρχουν αρκετές δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης και επέκτασης της έρευνας.

Μία πρώτη κατεύθυνση αφορά την ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων επιβατικής κίνησης από τον σταθμό, όπως μετρήσεις κατά τις ώρες αιχμής ή στοιχεία από συστήματα αυτόματης καταμέτρησης επιβατών. Η βαθμονόμηση (calibration) και η επικύρωση (validation) του μοντέλου με πραγματικά δεδομένα θα μπορούσαν να αυξήσουν σημαντικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και να επιτρέψουν την εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικές συγκοινωνιακές μελέτες. Η διαδικασία αυτή αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη μοντέλων που μπορούν να υποστηρίξουν αποφάσεις σχεδιασμού και διαχείρισης κυκλοφορίας (Barceló, 2010).

Μία δεύτερη κατεύθυνση αφορά την εξέταση εναλλακτικών διαμορφώσεων του σταθμού. Θα μπορούσαν να αξιολογηθούν διαφορετικές θέσεις ή αριθμοί κυλιόμενων κλιμάκων, αλλαγές στη γεωμετρία των διαδρόμων ή διαφοροποιήσεις στις περιοχές εισόδου και εξόδου των επιβατών. Μέσω της προσομοίωσης θα ήταν δυνατό να εκτιμηθεί ποια διαμόρφωση οδηγεί στη βέλτιστη κατανομή των επιβατικών ροών και στη μείωση των σημείων συμφόρησης.

Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσομοίωση διαφορετικών κατηγοριών χρηστών, όπως άτομα μειωμένης κινητικότητας, επιβάτες με αποσκευές, ηλικιωμένοι ή οικογένειες με μικρά παιδιά. Η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών κίνησης μεταξύ των ομάδων αυτών θα μπορούσε να οδηγήσει σε πληρέστερη κατανόηση της λειτουργίας του σταθμού και να συμβάλει στον σχεδιασμό πιο προσβάσιμων και ασφαλών υποδομών.

Μια ακόμη προοπτική είναι η διερεύνηση σεναρίων έκτακτης ανάγκης και εκκένωσης. Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των πεζών σε περιπτώσεις πυρκαγιάς, τεχνικών βλαβών ή άλλων έκτακτων περιστατικών θα μπορούσε να προσφέρει πολύτιμα συμπεράσματα για τη βελτίωση των σχεδίων εκκένωσης και της συνολικής ασφάλειας των σταθμών μετρό.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύνδεση των μοντέλων μικροσκοπικής προσομοίωσης με τεχνολογίες Building Information Modeling (BIM) και Digital Twins. Η ενσωμάτωση δεδομένων πραγματικού χρόνου από αισθητήρες και συστήματα παρακολούθησης θα επέτρεπε τη δημιουργία δυναμικών μοντέλων λειτουργίας των σταθμών, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή παρακολούθηση, πρόβλεψη κυκλοφοριακών συνθηκών και υποστήριξη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Η κατεύθυνση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη έξυπνων συγκοινωνιακών συστημάτων και έξυπνων πόλεων.

6.7 Επίλογος

Η μικροσκοπική προσομοίωση πεζών αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία ανάλυσης και αξιολόγησης της λειτουργίας σύνθετων συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων. Μέσω της δυνατότητας αναπαράστασης της ατομικής συμπεριφοράς των χρηστών και της αλληλεπίδρασής τους με το δομημένο περιβάλλον, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες που δεν μπορούν να προκύψουν αποκλειστικά από θεωρητικούς υπολογισμούς ή στατικές μεθόδους ανάλυσης.

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τις βασικές δυνατότητες του PTV Viswalk για τη δημιουργία και τη διερευνητική αξιολόγηση μικροσκοπικού μοντέλου πεζών. Μέσω των τεσσάρων εκτελέσεων κατέστη δυνατή η συγκριτική παρατήρηση της μεταβολής του αριθμού και της χωρικής συγκέντρωσης των εικονικών πεζών όσο αυξανόταν ο ρυθμός εισαγωγής.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η μικροσκοπική προσομοίωση μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο διερευνητικό εργαλείο, υπό την προϋπόθεση ότι οι παραδοχές και οι περιορισμοί της εφαρμογής δηλώνονται σαφώς. Για αξιοποίηση σε πραγματικό σχεδιασμό απαιτούνται ακριβέστερη γεωμετρία, πραγματικά δεδομένα, βαθμονόμηση, επικύρωση και επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις. Η παρούσα εφαρμογή αποτελεί παράδειγμα εκπαιδευτικής και διερευνητικής χρήσης της μεθόδου και όχι επιχειρησιακή αξιολόγηση του σταθμού

Βιβλιογραφία

- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of traffic simulation*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>
- Blue, V. J., & Adler, J. L. (2001). Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(3), 293–312. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(99\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00052-1)
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(Suppl. 3), 7280–7287.
<https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Budapesti Közlekedési Központ. (n.d.). *Metro, suburban railway, and tram network in Budapest*. <https://bkk.hu/downloads/map/178/>
- Ceder, A. (2007). *Public transit planning and operation*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b12853>
- Crooks, A. T., Castle, C., & Batty, M. (2008). Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6), 417–430.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.004>
- Daamen, W., & Hoogendoorn, S. P. (2003). Controlled experiments to derive walking behaviour. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 3(1), 39–59.
<https://doi.org/10.18757/ejtir.2003.3.1.4235>
- Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian planning and design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.
- Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5), 4282–4286. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282>
- Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., & Werner, T. (2005). Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation Science*, 39(1), 1–24. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0108>
- Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487–490. <https://doi.org/10.1038/35035023>

- Hoogendoorn, S. P., & Bovy, P. H. L. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(2), 169–190. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(03\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(03)00007-9)
- International Association of Public Transport. (2022). *Improving passenger flow and crowd management through technology and innovation*. International Association of Public Transport. <https://www.uitp.org/publications/improving-passenger-flow-and-crowd-management-through-technology-and-innovation/>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). *Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26432>
- Paragram. (n.d.). *M3 Deák tér*. <https://www.paragram.hu/projektek/m3-deak-ter>
- Predtechenskii, V. M., & Milinskii, A. I. (1978). *Planning for foot traffic flow in buildings*. Amerind Publishing.
- PTV Group. (2025). *PTV Vissim 2025 and PTV Viswalk 2025 help*. https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISSIM_2025_ENG/index.htm
- Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C., & Seyfried, A. (2009). Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 3142–3176). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_187
- Seyfried, A., Steffen, B., & Lippert, T. (2006). Basics of modeling the pedestrian flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 368(1), 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.11.052>
- Vuchic, V. R. (2005). *Urban transit: operations, planning and economics*. John Wiley & Sons.
- Weidmann, U. (1992). *Transporttechnik der Fußgänger*. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-000687810>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΕΖΩΝ ΣΕ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ DEÁK FERENC TER ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ ΤΗΣ ΒΟΥΔΑΠΕΣΤΗΣ ΜΕ ΤΟ PTV VISWALK

Ευστρατία Χατζηλία¹, Δημήτριος Ναλμπάντης^{1,2}

¹Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο,
Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα

²Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, ΤΘ
452, 541 24 Θεσσαλονίκη

email: std162578@ac.eap.gr, dnalba@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη και διερευνητική εφαρμογή απλοποιημένου μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών σε επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér της Βουδαπέστης με το PTV Viswalk. Η προσεγγιστική γεωμετρία περιλαμβάνει αποβάθρα, διάδρομο σύνδεσης και έξι κυλιόμενες κλίμακες. Ορίστηκαν ένα Pedestrian Input, ένας Destination και μία Static Pedestrian Route. Εξετάστηκαν τέσσερις υποθετικοί ρυθμοί εισαγωγής, 100, 300, 1.200 και 3.000 πεζοί/ώρα, μέσω στοχαστικών εκτελέσεων διάρκειας 3.600 s με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους του λογισμικού. Η αξιολόγηση βασίστηκε στους δείκτες NumPedsAvg και NumPedsMax της Area Measurement 1 και σε οπτική παρατήρηση. Οι δείκτες αυξήθηκαν από 1,71 και 7 στο σενάριο των 100 πεζών/ώρα σε 38,09 και 54 στο σενάριο των 3.000 πεζών/ώρα, ενώ παρατηρήθηκε μεγαλύτερη συγκέντρωση στις περιοχές μετάβασης. Τα αποτελέσματα αφορούν τη συμπεριφορά του διερευνητικού μοντέλου και όχι την πραγματική λειτουργία του σταθμού.

Λέξεις κλειδιά: Μικροσκοπική προσομοίωση πεζών, PTV Viswalk, Σταθμός μετρό, Επιβατική ζήτηση

ABSTRACT

This paper presents the exploratory application of a simplified pedestrian microsimulation model for a selected section of Deák Ferenc tér metro station in Budapest using PTV Viswalk. The approximate geometry includes a platform, a connecting corridor, and six escalators. One Pedestrian Input, one Destination, and one Static Pedestrian Route were defined. Four hypothetical input rates, 100, 300, 1,200, and 3,000 pedestrians/hour, were examined through stochastic 3,600-s runs using default pedestrian parameters. Evaluation relied on NumPedsAvg and NumPedsMax for Area Measurement 1 and on visual observation. The indicators increased from 1.71 and 7 in the 100-pedestrian/h scenario to 38.09 and 54 in the 3,000-pedestrian/h scenario, while greater pedestrian concentrations were observed in transition areas. The findings describe the behavior of the exploratory model rather than the actual operation of the station.

Keywords: Pedestrian microsimulation, PTV Viswalk, Metro station, Passenger demand

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σταθμοί μετρό αποτελούν σύνθετα περιβάλλοντα κίνησης, στα οποία συγκλίνουν ροές επιβατών με διαφορετικές κατευθύνσεις και σκοπούς μετακίνησης. Η γεωμετρία των διαδρόμων, οι μεταβάσεις μεταξύ επιπέδων και η θέση των κλιμάκων ή κυλιόμενων κλιμάκων επηρεάζουν τη διαθέσιμη ελευθερία κίνησης και τη χωρική κατανομή των χρηστών. Η συστηματική έρευνα της κίνησης πεζών είναι, συνεπώς, κρίσιμη για τον σχεδιασμό και τη διαχείριση συγκοινωνιακών εγκαταστάσεων (Fruin, 1971; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Οι συμβατικές αναλυτικές προσεγγίσεις βασίζονται κυρίως σε συγκεντρωτικούς δείκτες, όπως η ροή, η ταχύτητα και η πυκνότητα. Οι δείκτες αυτοί είναι απαραίτητοι, αλλά δεν περιγράφουν πάντοτε τις τοπικές αλληλεπιδράσεις ή τις μεταβολές που εμφανίζονται σε στενώσεις και περιοχές μετάβασης. Η μικροσκοπική προσομοίωση αντιμετωπίζει κάθε πεζό ως διακριτή οντότητα και επιτρέπει τη δυναμική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασής του με άλλους χρήστες και με το δομημένο περιβάλλον (Barceló, 2010).

Ιδιαίτερα διαδεδομένη θεωρητική βάση αποτελεί το Social Force Model, στο οποίο η επιθυμητή κίνηση προς έναν προορισμό συνδυάζεται με μαθηματικές δυνάμεις αποφυγής άλλων πεζών και εμποδίων (Helbing & Molnár, 1995). Πειραματικές και θεωρητικές έρευνες έχουν δείξει ότι η συμπεριφορά των ροών εξαρτάται από τη σχέση πυκνότητας, ταχύτητας και ροής, καθώς και από τη διαμόρφωση του χώρου και τη δρομολόγηση των χρηστών (Daamen & Hoogendoorn, 2003; Seyfried et al., 2006).

Παράλληλα, η επιλογή διαδρομής αποτελεί διακριτό επίπεδο της συμπεριφοράς των πεζών και απαιτεί κατάλληλη παραμετροποίηση όταν υπάρχουν περισσότερες εναλλακτικές (Hoogendoorn & Bovy, 2004). Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική για την ερμηνεία μοντέλων στα οποία η διαδρομή έχει προκαθοριστεί: η κατανομή των εικονικών πεζών σε τέτοιες περιπτώσεις δεν πρέπει να εκλαμβάνεται αυτομάτως ως αποτέλεσμα ελεύθερης προτίμησης.

Η παρούσα εργασία αφορά την ανάπτυξη απλοποιημένου μοντέλου στο PTV Viswalk για επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér.

Η εφαρμογή δεν αποτελεί πλήρη ψηφιακή ανακατασκευή ούτε επιχειρησιακό μοντέλο του πραγματικού σταθμού. Στόχος είναι η διερευνητική και συγκριτική εξέταση της απόκρισης του ίδιου μοντέλου σε τέσσερις υποθετικούς ρυθμούς εισαγωγής πεζών.

Η συμβολή της εργασίας είναι κυρίως μεθοδολογική: παρουσιάζονται τα βασικά αντικείμενα και οι ρυθμίσεις του μοντέλου, οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν και οι περιορισμοί που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Η διάκριση ανάμεσα στη συμπεριφορά του μοντέλου και στην πραγματική λειτουργία της εγκατάστασης αποτελεί κεντρική αρχή της ανάλυσης.

1.1 Θεωρητικό πλαίσιο μικροσκοπικής προσομοίωσης

Τα μοντέλα πεζών διακρίνονται σε συνεχείς, διακριτές και πρακτοροκεντρικές προσεγγίσεις. Στα συνεχή μοντέλα η θέση και η ταχύτητα μεταβάλλονται σε συνεχή χώρο, ενώ στα μοντέλα κυψελωτών αυτομάτων ο χώρος αναπαρίσταται ως πλέγμα διακριτών κελιών. Τα δεύτερα παρουσιάζουν χαμηλότερες υπολογιστικές απαιτήσεις και έχουν χρησιμοποιηθεί για αμφίδρομες ροές και εκκενώσεις, αλλά η διακριτή αναπαράσταση περιορίζει την ομαλή απόδοση της κίνησης (Blue & Adler, 2001). Τα μοντέλα πρακτόρων επιτρέπουν πλουσιότερους κανόνες λήψης αποφάσεων και ετερογένεια χρηστών, με αντάλλαγμα αυξημένες απαιτήσεις δεδομένων και παραμετροποίησης (Bonabeau, 2002).

Το Social Force Model ανήκει στις συνεχείς προσεγγίσεις και περιγράφει την κίνηση μέσω της συνισταμένης της επιθυμητής κατεύθυνσης και των αλληλεπιδράσεων αποφυγής. Η βασική του συνεισφορά είναι ότι συλλογικά φαινόμενα μπορούν να προκύψουν από τοπικές αλληλεπιδράσεις χωρίς να επιβάλλονται λεπτομερείς κανόνες για κάθε συμπεριφορά (Helbing & Molnár, 1995). Μεταγενέστερες εφαρμογές ανέδειξαν τη δυνατότητα αναπαράστασης φαινομένων συμφόρησης και εκκένωσης, αλλά και την ευαισθησία των αποτελεσμάτων στις παραμέτρους και στις συνθήκες εισόδου (Helbing et al., 2000; Schadschneider et al., 2009).

Η επιλογή μοντέλου δεν εξασφαλίζει από μόνη της αξιόπιστη πρόβλεψη. Απαιτούνται επαλήθευση της τεχνικής λειτουργίας, βαθμονόμηση των παραμέτρων με πραγματικές μετρήσεις και επικύρωση με ανεξάρτητα δεδομένα (Bargeló, 2010). Επιπλέον, οι στοχαστικές εφαρμογές πρέπει να επαναλαμβάνονται με διαφορετικούς τυχαίους σπόρους, ώστε να εκτιμάται η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων. Όταν τα στάδια αυτά δεν πραγματοποιούνται, η κατάλληλη χρήση του μοντέλου περιορίζεται σε διερευνητικές συγκρίσεις και δεν επεκτείνεται σε επιχειρησιακές προβλέψεις.

Η επιλογή δεικτών είναι εξίσου κρίσιμη. Ο αριθμός πεζών σε μία περιοχή μέτρησης είναι διαφορετικό μέγεθος από την πυκνότητα, η οποία απαιτεί διαίρεση με το εμβαδόν της περιοχής. Αντίστοιχα, η αξιολόγηση επιπέδου εξυπηρέτησης προϋποθέτει εφαρμογή συγκεκριμένων ορίων και κατάλληλων μεγεθών, όπως ο διαθέσιμος χώρος ανά πεζό ή η ροή (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022). Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εφαρμογή περιορίζεται στους δείκτες που εξήχθησαν άμεσα και αποφεύγει συμπεράσματα για πυκνότητα, καθυστέρηση ή LoS.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Η μεθοδολογία περιλάμβανε τη δημιουργία προσεγγιστικής γεωμετρίας, τον ορισμό των βασικών αντικειμένων προσομοίωσης, την εφαρμογή τεσσάρων σεναρίων ρυθμού εισαγωγής και τη συγκριτική αξιολόγηση επιλεγμένων αποτελεσμάτων. Δεν συλλέχθηκαν πραγματικά δεδομένα πεδίου και δεν πραγματοποιήθηκαν εμπειρική βαθμονόμηση και επικύρωση.

2.1 Περιοχή μελέτης και γεωμετρία

Ως περιοχή εφαρμογής επιλέχθηκε τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér, ενός κεντρικού κόμβου μετεπιβίβασης του μετρό της Βουδαπέστης. Η μοντελοποίηση περιορίστηκε σε μία αποβάθρα, έναν διάδρομο σύνδεσης και δύο διαδοχικές ομάδες τριών κυλιόμενων κλιμάκων. Δεν περιλήφθηκαν οι υπόλοιπες αποβάθρες, οι έξοδοι προς την επιφάνεια και τα λοιπά επίπεδα ή βοηθητικά τμήματα του σταθμού.

Η γεωμετρία διαμορφώθηκε με βάση διαθέσιμο οπτικό υλικό και προσεγγιστικές διαστάσεις.

Επομένως, αποδίδει τη βασική αλληλουχία των επιφανειών κίνησης και των κατακόρυφων συνδέσεων, αλλά δεν αναπαριστά με ακρίβεια την πραγματική εγκατάσταση. Η επιλογή αυτή είναι συμβατή με τον διερευνητικό χαρακτήρα της εφαρμογής, όχι όμως με επιχειρησιακή αξιολόγηση χωρητικότητας.

Η απλοποιημένη τρισδιάστατη διάταξη του εξεταζόμενου τμήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Η αποβάθρα συνδέεται με ενδιάμεσο επίπεδο και στη συνέχεια με την περιοχή εξόδου μέσω των έξι κυλιόμενων κλιμάκων.

2.2 Δομή και παράμετροι του μοντέλου

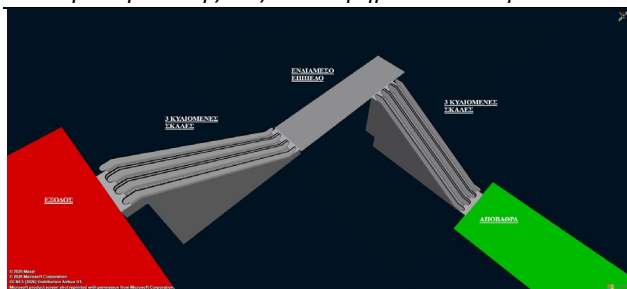
Για την ανάπτυξη και εκτέλεση χρησιμοποιήθηκε η έκδοση PTV Vissim/Viswalk 2026.00-07. Το PTV Viswalk βασίζεται σε Social Force Model και παρέχει αντικείμενα για επιφάνειες κίνησης, εισόδους, προορισμούς, διαδρομές και κατακόρυφες συνδέσεις (PTV Group, 2025). Στο μοντέλο ορίστηκαν ένα Pedestrian Input στην αποβάθρα, ένας Destination μετά τις κυλιόμενες κλίμακες και μία Static Pedestrian Route που συνέδεε τα δύο αντικείμενα.

Όλοι οι εικονικοί πεζοί ακολουθούσαν την ίδια προκαθορισμένη διαδρομή. Δεν χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικές Static Pedestrian Routes ή ποσοστά επιλογής διαδρομής. Συνεπώς, η εντονότερη παρουσία σε συγκεκριμένο τμήμα ή κυλιόμενη κλίμακα δεν ερμηνεύεται ως προτίμηση των χρηστών, αλλά ως αποτέλεσμα της γεωμετρίας και της δρομολόγησης που ορίστηκαν.

Οι έξι κυλιόμενες κλίμακες ορίστηκαν με ανοδική κατεύθυνση, πλάτος 1,50 m και ταχύτητα 0,50 m/s. Χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος πεζού και οι προεπιλεγμένες παράμετροι συμπεριφοράς του λογισμικού. Κάθε εκτέλεση είχε διάρκεια 3.600 s, η εισαγωγή ήταν στοχαστική σε όλο το διάστημα 0-3.600 s και χρησιμοποιήθηκε random seed 42, χωρίς χωριστή περίοδο προθέρμανσης.

Πραγματοποιήθηκε εσωτερικός τεχνικός έλεγχος της σύνδεσης των επιφανειών, της λειτουργίας των αντικειμένων και της δυνατότητας μετακίνησης των πεζών προς τον προορισμό.

Η διαδικασία αυτή συνιστά επαλήθευση της τεχνικής λειτουργίας και δεν ισοδυναμεί με βαθμονόμηση ή επικύρωση έναντι πραγματικών μετρήσεων (Bargeló, 2010), αλλά έχει εκπαιδευτικό χαρακτήρα.



Σχήμα 1. Απλοποιημένη τρισδιάστατη διάταξη του εξεταζόμενου τμήματος στο PTV Viswalk

Οι βασικές παράμετροι της τελικής εφαρμογής συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Η συγκεντρωτική παρουσίασή τους είναι απαραίτητη, καθώς ορισμένες από αυτές, όπως η διάρκεια της εκτέλεσης, ο τυχαίος σπόρος, η μοναδική στατική διαδρομή και η επιλογή μίας εκτέλεσης ανά σενάριο, επηρεάζουν άμεσα το πεδίο ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Παράμετρος	Τιμή
Λογισμικό	PTV Vissim/Viswalk 2026.00-07
Διάρκεια εκτέλεσης	3.600 s
Περίοδος εισαγωγής	0–3.600 s
Random seed	42
Pedestrian Inputs	1
Destinations	1
Static Pedestrian Routes	1
Κυλιόμενες κλίμακες	6
Πλάτος κυλιόμενων κλιμάκων	1,50 m
Ταχύτητα κυλιόμενων κλιμάκων	0,50 m/s
Area Measurements	13
Περιοχή ποσοτικής ανάλυσης	Area Measurement 1 – “Aponathra”
Επαναλήψεις που αναλύθηκαν	1 εκτέλεση ανά σενάριο
Βαθμονόμηση/επικύρωση	Δεν πραγματοποιήθηκαν

Πίνακας 1. Βασικά χαρακτηριστικά και παράμετροι του μοντέλου

2.3 Σενάρια ρυθμού εισαγωγής

Η μοναδική μεταβλητή μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων ήταν η τιμή Volume του Pedestrian Input. Οι τιμές 100, 300, 1.200 και 3.000 εκφράζουν μέσους ωριαίους ρυθμούς στοχαστικής εισαγωγής και όχι συνολικό αριθμό ατόμων που βρίσκονταν ταυτόχρονα στο μοντέλο. Η γεωμετρία, η δρομολόγηση, η διάρκεια και οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές.

Τα σενάρια συνοψίζονται στον Πίνακα 2. Η σχετική κλιμάκωση των τιμών επιτρέπει την παρατήρηση της απόκρισης του μοντέλου από τον χαμηλότερο ρυθμό αναφοράς έως τιμή τριάντα φορές μεγαλύτερη. Οι τιμές είναι υποθετικές και δεν προέκυψαν από μετρήσεις επιβατικής ζήτησης στον πραγματικό σταθμό.

Σενάριο	Ρυθμός εισαγωγής πεζών (πεζοί/ώρα)	Σχετική τιμή
1	100	Ρυθμός αναφοράς
2	300	3× του Σεναρίου 1
3	1.200	12× του Σεναρίου 1
4	3.000	30× του Σεναρίου 1

Πίνακας 2. Εξεταζόμενα σενάρια ρυθμού εισαγωγής πεζών

Η διατήρηση των υπόλοιπων ρυθμίσεων σταθερών υποστηρίζει τη συγκριτική ανάγνωση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, επειδή η προσομοίωση είναι στοχαστική και αναλύθηκε μία εκτέλεση ανά σενάριο, οι διαφορές δεν συνοδεύονται από εκτίμηση διακύμανσης ή στατιστικής αβεβαιότητας.

2.4 Περιοχές μέτρησης και διαδικασία αξιολόγησης

Στο μοντέλο είχαν οριστεί 13 Area Measurements. Για τη συγκριτική ποσοτική παρουσίαση χρησιμοποιήθηκε η Area Measurement 1, η οποία αντιστοιχεί στην περιοχή της αποβάθρας με την ονομασία “Aponathra”. Οι δείκτες NumPedsAvg και NumPedsMax εκφράζουν, αντίστοιχα, τον μέσο και τον μέγιστο αριθμό πεζών που καταγράφηκαν στη συγκεκριμένη περιοχή κατά την εκτέλεση.

Οι 13 Area Measurements δεν αντιστοιχούσαν όλες σε δεκατρείς διαφορετικές γεωμετρικές επιφάνειες. Ορισμένες μετρήσεις είχαν οριστεί επάνω στην ίδια περιοχή για διαφορετικούς σκοπούς καταγραφής. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε η Area Measurement 1, επειδή αντιστοιχούσε στην περιοχή της αποβάθρας "Aronathra" και παρείχε κοινό σημείο αναφοράς για τα τέσσερα σενάρια. Η Area Measurement 5 αφορούσε την ίδια γεωμετρική περιοχή και παρήγαγε ταυτόσημες τιμές· για τον λόγο αυτό δεν αντιμετωπίστηκε ως ανεξάρτητη μέτρηση.

Η επιλογή μίας μόνο περιοχής εξασφαλίζει συνέπεια στη μεταξύ των σεναρίων σύγκριση, αλλά περιορίζει τη χωρική κάλυψη της ποσοτικής αξιολόγησης. Οι μεταβολές σε άλλους χώρους, όπως στον διάδρομο σύνδεσης ή στις περιοχές προσέγγισης των κυλιόμενων κλιμάκων, εξετάστηκαν μόνο οπτικά. Σε επόμενη εφαρμογή θα ήταν σκόπιμη η παράλληλη παρουσίαση αποτελεσμάτων από περισσότερες μη επικαλυπτόμενες περιοχές μέτρησης.

Οι δείκτες αυτοί δεν αποτελούν πυκνότητα σε πεζούς ανά τετραγωνικό μέτρο. Επίσης, δεν εξήχθησαν ή δεν αναλύθηκαν ποσοτικές τιμές ταχύτητας, χρόνου διαδρομής, καθυστέρησης, μήκους ουράς ή βαθμίδας επιπέδου εξυπηρέτησης.

Η αριθμητική σύγκριση συμπληρώθηκε με οπτική παρατήρηση της χωρικής κατανομής των εικονικών πεζών. Η συνδυαστική ανάγνωση αριθμητικών και οπτικών αποτελεσμάτων επιτρέπει την αναγνώριση διαφορών μεταξύ των εκτελέσεων, χωρίς να μετατρέπει την ποιοτική παρατήρηση σε μετρημένο δείκτη.

Η χρήση μίας ενιαίας και σχετικά εκτεταμένης περιοχής μέτρησης διευκολύνει τη σύγκριση του συνολικού αριθμού πεζών στην αποβάθρα, αλλά μπορεί να εξομαλύνει τοπικές αιχμές που εμφανίζονται σε επιμέρους σημεία. Για την αναλυτικότερη διερεύνηση της χωρικής κατανομής θα απαιτούνταν μικρότερες, μη επικαλυπτόμενες περιοχές μέτρησης στον διάδρομο και στις προσβάσεις των κυλιόμενων κλιμάκων, καθώς και παράλληλη εξέταση ταχύτητας, χρόνου παραμονής και πυκνότητας. Η επέκταση αυτή θα επέτρεπε ακριβέστερη διάκριση μεταξύ γενικής αύξησης της παρουσίας πεζών και τοπικής λειτουργικής επιβάρυνσης.

Επιπλέον, επειδή για κάθε σενάριο αναλύθηκε μία επιλεγμένη στοχαστική εκτέλεση, δεν υπολογίστηκε η διακύμανση των αποτελεσμάτων που θα μπορούσε να προκύψει από διαφορετικούς τυχαίους σπόρους.

Συνεπώς, οι τιμές του Πίνακα 2 αντιστοιχούν στις συγκεκριμένες εκτελέσεις και δεν αποτελούν στατιστικές εκτιμήσεις της μέσης αναμενόμενης απόκρισης του μοντέλου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αρχικά μέσω των δύο δεικτών της Area Measurement 1 και στη συνέχεια μέσω οπτικής σύγκρισης των σεναρίων υψηλότερου ρυθμού εισαγωγής. Η ερμηνεία περιορίζεται στη συμπεριφορά του συγκεκριμένου μοντέλου.

3.1 Ποσοτικά αποτελέσματα

Οι τιμές NumPedsAvg και NumPedsMax ανά σενάριο παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Και οι δύο δείκτες αυξάνονται μονοτονικά με τον ρυθμό εισαγωγής. Στο σενάριο των 100 πεζών/ώρα καταγράφηκαν 1,71 και 7, ενώ στο σενάριο των 300 πεζών/ώρα οι αντίστοιχες τιμές ήταν 4,14 και 9.

Στο σενάριο των 1.200 πεζών/ώρα οι τιμές αυξήθηκαν σε 16,27 και 27. Η υψηλότερη εκτέλεση, των 3.000 πεζών/ώρα, έδωσε NumPedsAvg ίσο με 38,09 και NumPedsMax ίσο με 54. Συγκριτικά με το σενάριο αναφοράς, ο μέσος αριθμός στην επιλεγμένη περιοχή ήταν περίπου 22 φορές μεγαλύτερος και ο μέγιστος περίπου 7,7 φορές μεγαλύτερος.

Η αύξηση των δεικτών δείχνει ότι περισσότεροι εικονικοί πεζοί βρίσκονταν ταυτόχρονα στην Area Measurement 1 όσο αυξανόταν ο ρυθμός εισαγωγής. Δεν τεκμηριώνει, όμως, την πυκνότητα, τον βαθμό κορεσμού ή τη χωρητικότητα της αποβάθρας, επειδή οι δείκτες είναι απόλυτοι αριθμοί και η γεωμετρία δεν έχει επικυρωθεί.

Μεταξύ των σεναρίων των 1.200 και 3.000 πεζών/ώρα, το NumPedsAvg αυξήθηκε κατά περίπου 134%, ενώ το NumPedsMax διπλασιάστηκε.

Η μεταβολή αυτή αποτελεί ένδειξη μεγαλύτερης φόρτισης της επιλεγμένης περιοχής στο πλαίσιο του μοντέλου, όχι πρόβλεψη της λειτουργίας του πραγματικού σταθμού.

3.2 Οπτική αξιολόγηση

Η οπτική σύγκριση χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά προς τον Πίνακα 3. Τα στιγμιότυπα των σεναρίων των 1.200 και 3.000 πεζών/ώρα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2 και δείχνουν σαφώς μεγαλύτερη παρουσία εικονικών πεζών στη δεύτερη εκτέλεση, ιδιαίτερα στις περιοχές μετάβασης και στις κυλιόμενες κλίμακες.

Ρυθμός εισαγωγής πεζών (πεζοί/ώρα)	NumPedsAvg	NumPedsMax
100	1,71	7
300	4,14	9
1.200	16,27	27
3.000	38,09	54

Πίνακας 3. Μέσος και μέγιστος αριθμός πεζών στην Area Measurement 1 ("Αποvathra") ανά σενάριο

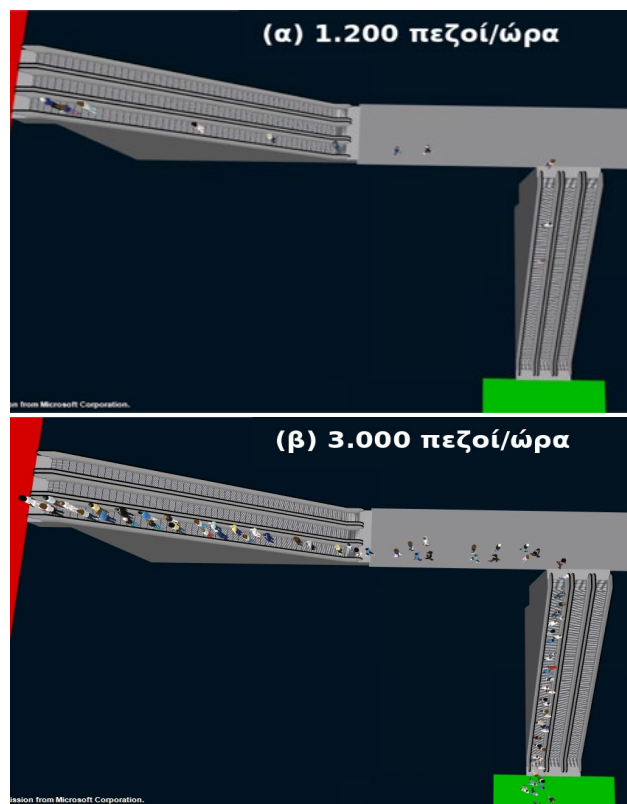
Στα χαμηλότερα σενάρια η οπτική παρουσία πεζών ήταν περιορισμένη, ενώ στα υψηλότερα σενάρια παρατηρήθηκε εντονότερη συγκέντρωση κατά μήκος της προκαθορισμένης διαδρομής. Η παρατήρηση αυτή είναι συνεπής με τη γενική βιβλιογραφική διαπίστωση ότι η αύξηση της ζήτησης και οι γεωμετρικές μεταβάσεις επηρεάζουν τη χωρική κατανομή της πεζής κίνησης (Daamen & Hoogendoorn, 2003; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022).

Η ολοκλήρωση των εκτελέσεων χωρίς τεχνική αδυναμία κίνησης προς τον προορισμό αποτελεί μόνο έλεγχο λειτουργίας του μοντέλου. Δεν αποδεικνύει ότι η πραγματική υποδομή μπορεί να εξυπηρετήσει τους αντίστοιχους ρυθμούς ούτε ότι δεν εμφανίζονται καθυστερήσεις ή ουρές.

3.3 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη σημασία της σαφούς διάκρισης μεταξύ παραμέτρου εισόδου και πραγματικού φόρτου. Ο ρυθμός 3.000 πεζών/ώρα δεν σημαίνει παρουσία 3.000 πεζών στο ίδιο χρονικό σημείο, αλλά στοχαστική παραγωγή με συγκεκριμένο μέσο ωριαίο ρυθμό. Αντίστοιχα, οι τιμές της περιοχής μέτρησης αφορούν μόνο το επιλεγμένο τμήμα. Η μοναδική Static Pedestrian Route περιορίζει επίσης την ερμηνεία. Η κατανομή μεταξύ των κυλιόμενων κλιμάκων επηρεάζεται από τη γεωμετρία και τη συγκεκριμένη δρομολόγηση και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συμπεράσματα περί προτίμησης ή επιλογής διαδρομής.

Για τη διερεύνηση τέτοιων ζητημάτων θα απαιτούνταν εναλλακτικές διαδρομές και τεκμηριωμένοι κανόνες επιλογής (Hoogendoorn & Bovy, 2004).



Σχήμα 2. Στιγμιότυπα της κατανομής των εικονικών πεζών στα σενάρια των (α) 1.200 και (β) 3.000 πεζών/ώρα

Παρά τους περιορισμούς, η εφαρμογή δείχνει πώς ένα απλοποιημένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συστηματική σύγκριση υποθετικών συνθηκών, εφόσον οι παράμετροι και τα όρια της ανάλυσης δηλώνονται ρητά. Η χρησιμότητά του είναι πρωτίστως εκπαιδευτική και μεθοδολογική.

Το Σχήμα 2 δεν χρησιμοποιείται για εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων σχετικά με ταχύτητα, καθυστέρηση ή μήκος ουράς. Αποτελεί οπτική τεκμηρίωση της διαφοροποίησης της χωρικής παρουσίας μεταξύ των δύο εκτελέσεων και ερμηνεύεται σε συνδυασμό με τους δείκτες του Πίνακα 3.

3.4 Συσχέτιση με τη βιβλιογραφία

Η μονοτονική αύξηση των NumPedsAvg και NumPedsMax είναι συμβατή με τη γενική θεωρητική σχέση μεταξύ αυξανόμενης ζήτησης και μεγαλύτερης παρουσίας πεζών σε έναν χώρο.

Ωστόσο, οι συγκεκριμένοι δείκτες δεν είναι άμεσα συγκρίσιμοι με τις θεμελιώδεις σχέσεις πυκνότητας–ταχύτητας–ροής, επειδή δεν κανονικοποιούνται ως προς την επιφάνεια της περιοχής μέτρησης και δεν συνοδεύονται από μετρήσεις ταχύτητας ή ροής. Οι Daamen και Hoogendoorn (2003) και οι Seyfried et al. (2006) ανέδειξαν πειραματικά τη σημασία της ταυτόχρονης εξέτασης των μεγεθών αυτών για την ερμηνεία της κίνησης των πεζών.

Αντίστοιχα, το Social Force Model επιτρέπει την αναπαράσταση τοπικών αλληλεπιδράσεων και την εμφάνιση συλλογικών μορφών κίνησης, αλλά η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την κατάλληλη παραμετροποίηση και τη σύγκριση με εμπειρικά δεδομένα (Helbing & Molnár, 1995; Helbing et al., 2000). Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες παράμετροι του PTV Viswalk, χωρίς προσαρμογή σε πραγματικές συνθήκες του συγκεκριμένου σταθμού. Επομένως, η συμφωνία με γενικές θεωρητικές προσδοκίες δεν πρέπει να εκλαμβάνεται ως εμπειρική επιβεβαίωση της λειτουργίας του Deák Ferenc tér.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η διαδικασία δρομολόγησης. Οι Hoogendoorn και Bovy (2004) διακρίνουν την επιλογή διαδρομής από την τοπική προσαρμογή της κίνησης. Επειδή στο εξεταζόμενο μοντέλο είχε οριστεί μία μόνο Static Pedestrian Route, οι πεζοί μπορούσαν να προσαρμόζουν τοπικά την πορεία τους μέσα στις επιφάνειες κίνησης, αλλά δεν επέλεγαν μεταξύ διαφορετικών συνολικών διαδρομών. Η διάκριση αυτή αποτρέπει την εσφαλμένη απόδοση της παρατηρούμενης κατανομής σε συμπεριφορική προτίμηση.

Τέλος, η πραγματοποίηση μίας μόνο αναλυόμενης στοχαστικής εκτέλεσης ανά σενάριο δεν επιτρέπει την εκτίμηση της μεταβλητότητας που οφείλεται στον τυχαίο σπόρο. Σε πληρέστερη εφαρμογή θα απαιτούνταν πολλαπλές επαναλήψεις, υπολογισμός μέσων τιμών και διαστημάτων διακύμανσης και έλεγχος της σταθερότητας των συμπερασμάτων.

Η σημερινή ανάλυση πρέπει, συνεπώς, να θεωρείται σύγκριση τεσσάρων συγκεκριμένων εκτελέσεων και όχι στατιστική εκτίμηση της αναμενόμενης απόκρισης του μοντέλου, όπως αυτό αναπτύχθηκε.

3.5 Περιορισμοί και μελλοντική ανάπτυξη

Οι βασικοί περιορισμοί είναι η προσεγγιστική γεωμετρία, η απουσία πραγματικών δεδομένων, η χρήση προεπιλεγμένων παραμέτρων, ενός τύπου πεζού και μίας μόνο διαδρομής, καθώς και η ανάλυση μίας στοχαστικής εκτέλεσης ανά σενάριο. Μελλοντική έρευνα μπορεί να περιλαμβάνει ακριβή γεωμετρική αποτύπωση, μετρήσεις πεδίου, βαθμονόμηση και ανεξάρτητη επικύρωση, πολλαπλούς τυχαίους σπόρους, ανάλυση ευαισθησίας και πρόσθετους δείκτες. Η εξέταση εναλλακτικών διαδρομών, διαφορετικών ομάδων χρηστών και σχεδιαστικών παρεμβάσεων θα μπορούσε να ακολουθήσει μόνο μετά την ολοκλήρωση αυτών των σταδίων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναπτύχθηκε απλοποιημένο μοντέλο μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών για επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér με το PTV Viswalk. Το μοντέλο περιλάμβανε μία αποβάθρα, έναν διάδρομο, έξι κυλιόμενες κλίμακες, ένα Pedestrian Input, έναν Destination και μία Static Pedestrian Route.

Η εξέταση τεσσάρων υποθετικών ρυθμών εισαγωγής έδειξε συνεχή αύξηση των NumPedsAvg και NumPedsMax στην Area Measurement 1. Οι τιμές μεταβλήθηκαν από 1,71 και 7 στο σενάριο των 100 πεζών/ώρα σε 38,09 και 54 στο σενάριο των 3.000 πεζών/ώρα, ενώ η οπτική παρατήρηση έδειξε μεγαλύτερη συγκέντρωση στις περιοχές μετάβασης.

Τα ευρήματα περιγράφουν τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου διερευνητικού μοντέλου. Δεν τεκμηριώνουν την πραγματική χωρητικότητα του σταθμού, επίπεδο εξυπηρέτησης, καθυστερήσεις ή επιλογή διαδρομής. Η ερμηνεία αυτή είναι απαραίτητη λόγω της προσεγγιστικής γεωμετρίας, της προκαθορισμένης δρομολόγησης και της απουσίας βαθμονόμησης και επικύρωσης.

Η εφαρμογή παρέχει, ωστόσο, ένα συνεκτικό παράδειγμα της διαδικασίας ανάπτυξης, τεχνικού ελέγχου και συγκριτικής αξιολόγησης ενός μοντέλου PTV Viswalk. Μπορεί να αποτελέσει βάση για πληρέστερη μελλοντική έρευνα, εφόσον ενσωματωθούν πραγματικά δεδομένα.

Για επιχειρησιακή χρήση απαιτείται επιπλέον η εξέταση της συνολικής γεωμετρίας του σταθμού και των πραγματικών προτύπων προέλευσης-προορισμού, καθώς και η διερεύνηση εναλλακτικών διαδρομών και ομάδων χρηστών.

Από μεθοδολογική άποψη, η εργασία καταδεικνύει ότι ακόμη και σε μία απλοποιημένη εφαρμογή είναι αναγκαίο να διακρίνονται σαφώς ο ρυθμός εισαγωγής, ο στιγμιαίος αριθμός πεζών, η πυκνότητα και η πραγματική χωρητικότητα. Η ορθή χρήση των όρων αυτών αποτρέπει την υπερερμηνεία των αποτελεσμάτων και επιτρέπει την ακριβέστερη σύνδεση των παραμέτρων του μοντέλου με τα εξαγόμενα μεγέθη. Επίσης, προκύπτει ότι η οπτική απεικόνιση είναι χρήσιμη για τον τεχνικό έλεγχο και την υποστήριξη της ερμηνείας, αλλά δεν υποκαθιστά τους ποσοτικούς δείκτες. Η αναγνώριση μιας συγκέντρωσης σε στιγμιότυπο δεν αρκεί για να τεκμηριώσει καθυστέρηση ή συμφόρηση.

Επιπλέον, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της πλήρους τεκμηρίωσης των ρυθμίσεων ενός μοντέλου. Η καταγραφή της έκδοσης του λογισμικού, της διάρκειας εκτέλεσης, του τυχαίου σπόρου, της δρομολόγησης και της περιοχής μέτρησης διευκολύνει την αναπαραγωγή της διαδικασίας και καθιστά σαφές σε ποια ακριβώς παραμετροποίηση αναφέρονται τα αποτελέσματα.

Το βασικό αποτέλεσμα της εφαρμογής είναι, επομένως, μια διαφανής και επεκτάσιμη διαδικασία μοντελοποίησης και όχι μια πρόβλεψη της πραγματικής λειτουργίας του σταθμού. Η μελλοντική ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων, πολλαπλών εκτελέσεων και περισσότερων ποσοτικών δεικτών θα μπορούσε να μετατρέψει το διερευνητικό μοντέλο σε πληρέστερο εργαλείο αξιολόγησης..

Συνολικά, η μικροσκοπική προσομοίωση μπορεί να λειτουργήσει ως χρήσιμο διερευνητικό εργαλείο, υπό την προϋπόθεση ότι οι παραδοχές, οι δείκτες και η περιοχή εγκυρότητας των συμπερασμάτων δηλώνονται με ακρίβεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barceló, J. (2010). *Fundamentals of traffic simulation*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>

- Blue, V. J., & Adler, J. L. (2001). Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(3), 293–312.
[https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(99\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00052-1)
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(Suppl. 3), 7280–7287.
<https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Daamen, W., & Hoogendoorn, S. P. (2003). Controlled experiments to derive walking behaviour. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 3(1), 39–59.
<https://doi.org/10.18757/ejtir.2003.3.1.4235>
- Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian planning and design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.
- Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5), 4282–4286.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282>
- Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487–490.
<https://doi.org/10.1038/35035023>
- Hoogendoorn, S. P., & Bovy, P. H. L. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(2), 169–190.
[https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(03\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(03)00007-9)
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). *Highway Capacity Manual 7th Edition: A guide for multimodal mobility analysis*. The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/26432>
- PTV Group. (2025). *PTV Vissim 2025 and PTV Viswalk 2025 help*. https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISSIM_2025_ENG/index.htm
- Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C., & Seyfried, A. (2009). Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 3142–3176). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_187
- Seyfried, A., Steffen, B., & Lippert, T. (2006). Basics of modeling the pedestrian flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 368(1), 232–238.
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.11.052>

ΣΚΟΠΟΣ

Στόχος της εργασίας ήταν η ανάπτυξη και διερευνητική εφαρμογή απλοποιημένου μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης πεζών σε επιλεγμένο τμήμα του σταθμού Deák Ferenc tér, με χρήση του PTV Viswalk.

Η εφαρμογή εξετάζει συγκριτικά την απόκριση του μοντέλου σε διαφορετικούς υποθετικούς ρυθμούς εισαγωγής πεζών.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Δημιουργήθηκε 3D μοντέλο του σταθμού στο PTV Viswalk, όπου ορίστηκαν οι περιοχές κίνησης, οι κυλιόμενες κλίμακες, οι διαδρομές και οι προορισμοί των επιβατών. Πραγματοποιήθηκαν τέσσερα σενάρια προσομοίωσης (100, 300, 1.200 και 3.000 πεζοί/ώρα) και αναλύθηκαν οι ροές και οι συγκεντρώσεις πεζών.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι τιμές NumPedsAvg/NumPedsMax αυξήθηκαν από 1,71/7 στους 100 πεζούς/ώρα σε 38,09/54 στους 3.000 πεζούς/ώρα. Η οπτική παρατήρηση έδειξε μεγαλύτερη συγκέντρωση στις περιοχές μετάβασης και στις κυλιόμενες κλίμακες. Προτείνεται η εισαγωγή δεδομένων μετά από ακριβείς μετρήσεις και η ακριβής αποτύπωση της γεωμετρίας.

Budapest Metro Network.



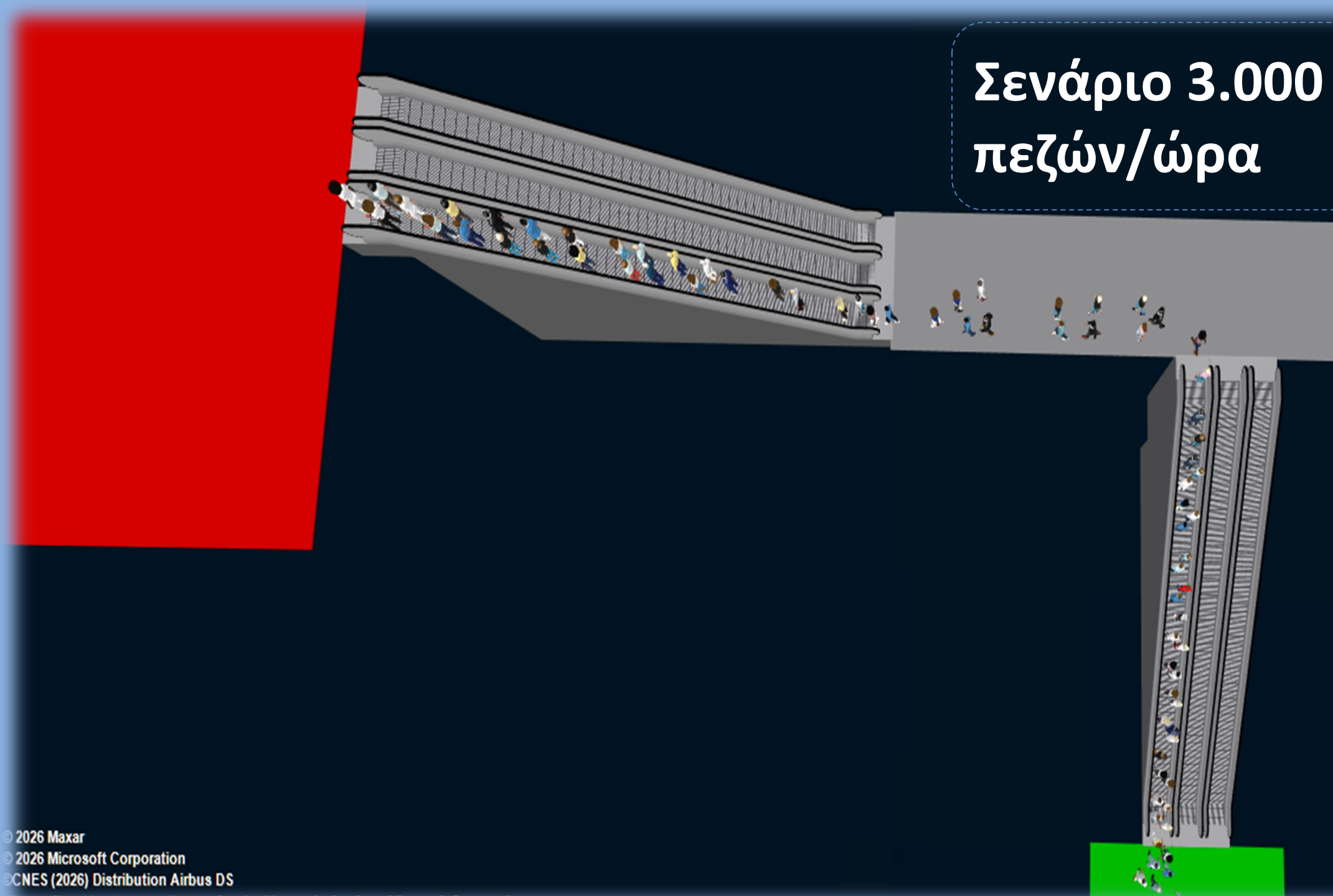
Deák Ferenc tér Station.



Σενάριο 1.200 πεζών/ώρα



Σενάριο 3.000 πεζών/ώρα



Viswalk simulation model.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ✓ Το μοντέλο αποτελεί διερευνητική και μη βαθμονομημένη εφαρμογή (δεν προβλέπει την πραγματική λειτουργία του σταθμού).
- ✓ Οι κυλιόμενες κλίμακες και οι περιοχές μετάβασης αποτελούν τα πιο κρίσιμα σημεία του σταθμού.
- ✓ Η μικροσκοπική προσομοίωση αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση συγκοινωνιακών υποδομών.
- ✓ Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλους σταθμούς μετρό.

Βιβλιογραφία

- Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics.
- Hoogendoorn, S., & Bovy, P. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory.
- Transportation Research Board. (2022). Highway Capacity Manual.
- PTV Group. (2024). PTV Viswalk User Manual.