



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Μελέτη της Διάδοσης Ασθενειών με τη Χρήση
Πρακτορικού Μοντελισμού»

Του φοιτητή
Κατσεησβίλη Βασίλη
Αρ. Μητρώου: 2019066

Επιβλέπων
Κασδερίδης Στάθης
Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

Ημερομηνία 31/5/2026

Τίτλος Δ.Ε. Μελέτη της Διάδοσης Ασθενειών με τη Χρήση Πρακτορικού Μοντελισμού

Κωδικός Δ.Ε. 22199

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Κατσεησβίλη Βασίλης

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Κασδερίδης Στάθης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 31/03/2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 31/05/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Κατσεησβίλη Βασίλη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στον εαυτό μου, για την αυταπάρνηση και την υπομονή»

Πρόλογος

Η θέληση για νέα γνώση και εξέλιξη με οδήγησε στην επιλογή του αντικειμένου της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το ερευνητικό υπόβαθρο ήταν αυτό που με προσέλκυσε εξ αρχής. Ένα θέμα που σε ωθεί να δοκιμάσεις, να αποτύχεις και να προσπαθήσεις ξανά. Η ενασχόληση μου με το συγκεκριμένο αντικείμενο αποτέλεσε μια απαιτητική αλλά ταυτόχρονα δημιουργική διαδικασία. Μέσα από αυτήν, ήρθα αντιμέτωπος με προκλήσεις που με ανάγκασαν να εμβαθύνω και να πειραματιστώ. Παράλληλα, διαπίστωσα το μεγάλο ενδιαφέρον που παρουσιάζουν τα πρακτορικά μοντέλα και τις δυνατότητες που προσφέρουν για την ανάλυση και προσομοίωση πολύπλοκων συστημάτων. Το όφελος από την εκπόνηση της εργασίας είναι πολύπλευρο. Με βοήθησε να αναπτύξω έναν πιο σύνθετο τρόπο σκέψης, ενώ παράλληλα μου έδωσε την ικανοποίηση της δημιουργίας ενός εργαλείου που μπορεί να αναπαράγει φαινόμενα του πραγματικού κόσμου.

Περίληψη

Στον σύγχρονο κόσμο, η ικανότητα πρόβλεψης σύνθετων φαινομένων, και ειδικότερα των επιδημιολογικών, κρίνεται ιδιαίτερα κρίσιμη. Σκοπός της εργασίας είναι η δημιουργία ενός εργαλείου, το οποίο, με την χρήση πρακτορικών μοντέλων (Agent-Based Models), θα είναι σε θέση να μελετήσει και να αναλύσει την δυναμική της διάδοσης ασθενειών, ένα σύνθετο κοινωνικό φαινόμενο. Η εργασία εξελίχθηκε σε δύο βασικά στάδια. Αρχικά, υλοποιήθηκε το μοντέλο «Sugarscape», το οποίο προσομοιώνει τη συμπεριφορά αυτόνομων οντοτήτων (πρακτόρων) σε ένα περιβάλλον δισδιάστατου πλέγματος (2D Grid), καθώς και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Στο δεύτερο στάδιο, οι αποκτηθείσες γνώσεις και τεχνικές εφαρμόστηκαν στον τομέα της επιδημιολογίας. Αναπτύχθηκε ένα SEIR (Susceptible-Exposed-Infectious-Recovered) μοντέλο, μέσα από το οποίο μελετήθηκαν παράμετροι όπως η πιθανότητα μόλυνσης, η πυκνότητα πληθυσμού, η κινητικότητα των πρακτόρων κ.ά. Η ανάπτυξη του προγράμματος έγινε με την χρήση της γλώσσας Java στο προγραμματιστικό περιβάλλον του NetBeans. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ενθαρρυντικά, καθώς τα διαγράμματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις, ακολουθούν τη χαρακτηριστική μορφή των επιδημικών καμπυλών, όπως αυτές παρατηρούνται σε πραγματικά δεδομένα.

«Study of Disease Transmission Using Agent-Based Modeling»

«Vasilis Katseisvili»

Abstract

In the modern world, the ability to predict complex phenomena, and particularly epidemiological ones, is considered highly important. The aim of this thesis is to develop a tool that, using Agent-Based Models, can study and analyze the dynamics of disease transmission, a complex social phenomenon. The work was carried out in two main stages. First, the «Sugarscape», model was implemented, simulating the behavior of autonomous agents within a two-dimensional grid environment, as well as their interactions with one another. In the second stage, the knowledge and techniques acquired were applied to the field of epidemiology. An SEIR (Susceptible–Exposed–Infectious–Recovered) model was developed, allowing the study of parameters such as the probability of infection, population density, agent mobility, and more. The program was developed using the Java programming language within the NetBeans environment. The results obtained are encouraging, as the simulation outputs produce diagrams that follow the characteristic shape of epidemic curves, similar to those observed in real-world data.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας, καθώς και τον επιβλέπων καθηγητή, κ. Κασδερίδη, για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε και την καθοδήγηση του κατά την εκπόνησή της διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Συντομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Ιστορικό Υπόβαθρο.....	1
1.2 Στόχος Διπλωματικής.....	2
1.3 Δομή Διπλωματικής	2
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Πρακτορικά μοντέλα (Agent-Based Models).....	3
2.2.1 Ορισμός και Βασικές Έννοιες.....	3
2.2.2 Ιστορική Αναδρομή.....	3
2.2.3 Χαρακτηριστικά	4
2.2.4 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των ABMs.....	5
2.2.5 Εφαρμογές Πρακτορικών Μοντέλων	6
2.3 Το μοντέλο Sugarscape	6
2.3.1 Περιγραφή του Μοντέλου	7
2.3.2 Δομή Περιβάλλοντος (Grid).....	7
2.3.3 Συμπεριφορά Πρακτόρων	8
2.3.4 Σημασία του Μοντέλου στη Μελέτη Σύνθετων Συστημάτων	13
2.4 Επιδημιολογικά Μοντέλα.....	14
2.4.1 Βασικές Έννοιες Επιδημιολογίας.....	14
2.4.2 Μαθηματικά Επιδημιολογικά Μοντέλα	14
2.4.3 Πρακτορικές Προσεγγίσεις στη Μοντελοποίηση Ασθενειών	15
2.4.4 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των Μαθηματικών Επιδημιολογικών Μοντέλων	15
2.4.5 Το Μοντέλο SEIR	16
2.5 Συνδυασμός Πρακτορικών και Επιδημιολογικών Μοντέλων	17

2.6	Διακριτές Προσομοιώσεις (Discrete Event Simulation)	18
Κεφάλαιο 3ο: Σχεδιασμός και Υλοποίηση Συστήματος		19
3.1	Εισαγωγή.....	19
3.2	Περιγραφή του Συστήματος Προσομοίωσης	19
3.2.1	Αρχιτεκτονική του Συστήματος	19
3.2.2	Περιβάλλον Ανάπτυξης και Εργαλεία.....	21
3.3	Σχεδιασμός του Πρακτορικού Μοντέλου.....	21
3.3.1	Αναπαράσταση του Περιβάλλοντος.....	21
3.3.2	Δομή και Χαρακτηριστικά Πρακτόρων	23
3.3.3	Ενσωμάτωση του Μοντέλου SEIR.....	24
3.4	Μηχανισμοί Λειτουργίας της Προσομοίωσης.....	26
3.4.1	Κίνηση Πρακτόρων	26
3.4.2	Μετάδοση Ασθένειας.....	26
3.4.3	Μετάβαση Μεταξύ Επιδημιολογικών Καταστάσεων	26
3.4.4	Εκτέλεση Χρονικών Βημάτων της Προσομοίωσης	27
3.5	Υλοποίηση σε Java.....	27
3.5.1	Βασικές Κλάσεις του Συστήματος	27
3.5.2	Διαχείριση Πληθυσμού	28
3.5.3	Λειτουργία προσομοίωσης	29
Κεφάλαιο 4ο: Πειραματική Μελέτη και Αποτελέσματα.....		30
4.1	Εισαγωγή.....	30
4.2	Ρυθμίσεις Προσομοίωσης	30
4.2.1	Παράμετροι Μοντέλου	30
4.2.2	Αρχικές Συνθήκες.....	32
4.3	Εκτέλεση Προσομοιώσεων	32
4.4	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	33
4.4.1	Διαγράμματα Εξέλιξης της Επιδημίας	33
4.4.2	Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	38
4.4.3	Σύγκριση με Πραγματικά Δεδομένα	43
4.5	Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	44
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα.....		46
5.1	Συμπεράσματα.....	46
5.2	Παραδοχές και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	46
5.2.1	Παραδοχές του Μοντέλου	46
5.2.2	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	47

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	49
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΛΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	52

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Διάγραμμα ροής SIR και SEIR.....	1
Σχήμα 2.1: Conway's Game of Life	4
Σχήμα 2.2: Οι κορυφές ζάχαρης του Sugarscape	8
Σχήμα 2.3: Η σταδιακή συγκέντρωση των πρακτόρων στις κορυφές ζάχαρης	9
Σχήμα 2.4: Εξέλιξη του συνολικού πληθυσμού στο σενάριο αναπαραγωγής	10
Σχήμα 2.5: Η εξέλιξη του μέσου μεταβολισμού και της μέσης όρασης	11
Σχήμα 2.6: Η μέση τιμή του εμπορίου με την πάροδο του χρόνου.....	12
Σχήμα 2.7: Η σταδιακή αποβολή μιας ασθένειας από την τεχνητή κοινωνία του Sugarscape	13
Σχήμα 2.8: Τυπικές καμπύλες του μοντέλου SEIR.....	17
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα κλάσεων (UML class diagram) - Κύριες κλάσεις και οι σχέσεις τους	21
Σχήμα 3.2: Στιγμιότυπο του κόσμου της προσομοίωσης. Οπτικοποίηση του δισδιάστατου πλέγματος. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό είδος κελιού — κόκκινο: κατοικία (residential), ροζ: σχολείο (school), μπλε: γραφείο (office), κίτρινο: αγορά (market), πράσινο: αναψυχή (leisure), μωβ: άλλο (other), λευκό: δρόμος (road)	22
Σχήμα 4.1: Καμπύλες SEIR - Σενάριο Βάσης	33
Σχήμα 4.2: Εβδομαδιαία Κρούσματα- Σενάριο Βάσης	34
Σχήμα 4.3: Καμπύλες SEIR - Μειωμένος Πληθυσμός (N=12.000)	35
Σχήμα 4.4: Καμπύλες SEIR - Αυξημένος Πληθυσμός (N=18.000).....	36
Σχήμα 4.5: Καμπύλες SEIR - Μειωμένη Μεταδοτικότητα (p=0,10)	37
Σχήμα 4.6: Καμπύλες SEIR - Αυξημένη Μεταδοτικότητα (p=0,14)	38
Σχήμα 4.7: Σύγκριση καμπυλών I - Σενάριο Πληθυσμού	39
Σχήμα 4.8: Σύγκριση καμπυλών I - Σενάριο Μεταδοτικότητας	40
Σχήμα 4.9: Ημέρα Κορύφωσης της Επιδημίας ανά Σενάριο	41
Σχήμα 4.10: Τελικό Μέγεθος Επιδημίας ανά Σενάριο	41
Σχήμα 4.11: Ποσοστό Μόλυνσης ανά Ηλικιακή Κατηγορία - Σενάριο Βάσης.....	43
Σχήμα 4.12: Σύγκριση Προσομοίωσης με Πραγματικά Δεδομένα - Σενάριο Βάσης (κανονικοποιημένες καμπύλες min-max).....	44

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Εφαρμογές των ABMs.....	6
Πίνακας 3.1: Βασικές παράμετροι του πράκτορα ανά ηλικιακή κατηγορία	24
Πίνακας 4.1: Παράμετροι του σεναρίου βάσης.....	30
Πίνακας 4.2: Τιμές παραμέτρων ανά σενάριο και παραλλαγή	31
Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά σενάριο	42

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
ABM	Agent-Based Modeling / Model
SEIR	Susceptible-Exposed-Infectious-Recovered
SIR	Susceptible-Infectious-Recovered

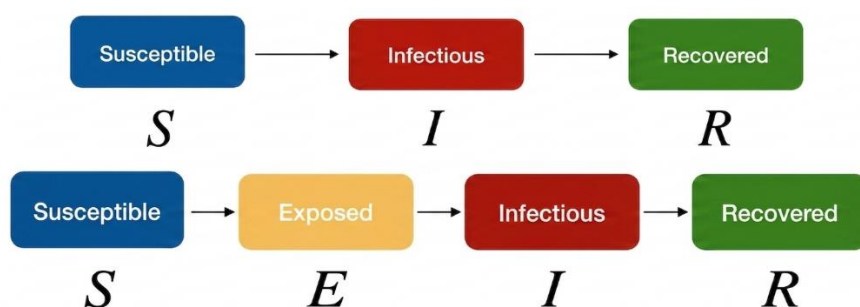
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό Υπόβαθρο

Η ενίσχυση της δημόσιας υγείας αποτελεί ένα σημαντικό κοινωνικοοικονομικό ζήτημα, καθώς επηρεάζει άμεσα την ποιότητα ζωής του κόσμου αλλά και τη λειτουργία των κοινωνιών. Ένας από τους βασικούς παράγοντες που συμβάλουν σε αυτό είναι η μείωση της νοσηρότητας, η οποία προϋποθέτει την κατανόηση της διάδοσης των ασθενειών. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται ιδιαίτερα κρίσιμη η μελέτη της δυναμικής της εξάπλωσης μιας ασθένειας και η ικανότητα πρόβλεψής της.

Η ανθρωπότητα έχει υποφέρει διαχρονικά μέσα από μεγάλες πανδημίες, όπως η πανώλη, η ισπανική γρίπη και πιο πρόσφατες όπως ο COVID-19. Τα γεγονότα αυτά οδήγησαν στην ανάπτυξη της επιστήμης της επιδημιολογίας, που έχει ως στόχο την κατανόηση και την ανάλυση των καθοριστικών παραγόντων και των καταστάσεων που σχετίζονται με την υγεία σε έναν καθορισμένο πληθυσμό [24].

Κλασικά μοντέλα διάδοσης ασθενειών χωρίζουν τον πληθυσμό σε διακριτά επιδημιολογικά διαμερίσματα (compartments) και περιγράφουν τη ροή μεταξύ τους μέσω συστημάτων διαφορικών εξισώσεων. Το μοντέλο SIR είναι το πιο διαδεδομένο και πήρε το όνομά του από τα αρχικά των λέξεων Susceptible (Ευπαθείς), Infected (Μολυσμένοι) και Recovered (Αναρρώσαντες), καθώς κάθε άτομο του πληθυσμού ανήκει σε μία από αυτές τις τρεις κατηγορίες. Μια σημαντική επέκτασή του αποτελεί το μοντέλο **SEIR**, το οποίο εισάγει επιπλέον την κατηγορία Exposed (Εκτεθειμένοι, E): άτομα που έχουν εκτεθεί στον παθογόνο παράγοντα αλλά βρίσκονται ακόμα στη περίοδο επώασης και δεν είναι ακόμα μολυσματικά. Το SEIR καθίσταται έτσι κατάλληλο για ασθένειες με εμφανή περίοδο επώασης, όπως η κοινή γρίπη, ο COVID-19 ή η ιλαρά [13], [16]. Η σχηματική αναπαράσταση και των δύο μοντέλων δίνεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα ροής SIR και SEIR

Παρά τη διαδεδομένη χρήση τους, τα μαθηματικά αυτά μοντέλα παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς: βασίζονται στην υπόθεση ομοιογένειας του πληθυσμού και δεν λαμβάνουν υπόψη την ατομική συμπεριφορά, τις ετερογενείς αλληλεπιδράσεις μεταξύ ατόμων και τους κοινωνικούς παράγοντες [6], [28].

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, εμφανίστηκαν πιο σύνθετες προσεγγίσεις, τα **Πρακτορικά Μοντέλα** (Agent-Based Models – ABMs). Το βασικό στοιχείο των μοντέλων αυτών είναι η αυτόνομη οντότητα, ο λεγόμενος πράκτορας. Κάθε πράκτορας διαθέτει μοναδικά χαρακτηριστικά, αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του και λειτουργεί βάσει των δικών του κανόνων και στόχων. Οι πράκτορες

αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και με το περιβάλλον, παράγοντας σύνθετα φαινόμενα που αναδύονται από κάτω προς τα πάνω (bottom-up) και δεν μπορούν να αποτυπωθούν εύκολα με κλασικές μαθηματικές μεθόδους [1], [6]. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της πραγματικότητας, λαμβάνοντας υπόψη και την ατομική ετερογένεια του πληθυσμού [1], [18], [30].

1.2 Στόχος Διπλωματικής

Ο κύριος στόχος, σε αυτήν την εργασία, είναι η δημιουργία ενός προγράμματος για τη μελέτη της διάδοσης των ασθενειών. Η προσέγγιση που επιλέγεται είναι ο συνδυασμός των πρακτορικών μοντέλων με το επιδημιολογικό μοντέλο SEIR. Με την επιλογή αυτή, επιδιώκεται η ανάλυση της δυναμικής της διασποράς μιας ασθένειας σε έναν καθορισμένο πληθυσμό, καθώς και των παραγόντων που μπορεί να σχετίζονται με διάφορες πτυχές της ασθένειας, της ατομικής συμπεριφοράς των πρακτόρων, των σχέσεών τους και του περιβάλλοντος.

1.3 Δομή Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε επιμέρους κεφάλαια. Το 1^ο κεφάλαιο αποτελεί το εισαγωγικό μέρος της εργασίας, όπου παρουσιάζεται το ιστορικό υπόβαθρο και ο σκοπός της. Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική και θεωρητική ανασκόπηση. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα πρακτορικά μοντέλα, το μοντέλο προσομοίωσης «Sugarscape» και τα επιδημιολογικά μοντέλα, όπως το SEIR. Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται η υλοποίηση του προγράμματος και των βασικών μηχανισμών προσομοίωσης. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και η ανάλυσή τους μέσω διαγραμμάτων. Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν καθώς και προτάσεις για βελτίωση.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή

Η μελέτη της διάδοσης ασθενειών αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα. Παραδοσιακά, η ανάλυση τέτοιων φαινομένων βασίζεται σε μαθηματικά μοντέλα, όπως τα κλασικά επιδημιολογικά μοντέλα. Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε παραδοχές όπως η ομοιογένεια του πληθυσμού, γεγονός που περιορίζει την ικανότητά τους να αποτυπώσουν ρεαλιστικά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων [24], [28].

Στην πραγματικότητα, η διάδοση μιας ασθένειας επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων τους οποίους τα κλασικά μαθηματικά μοντέλα αδυνατούν να λάβουν υπόψη. Ενδεικτικά, η ηλικία και η κατάσταση υγείας κάθε ατόμου καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ευπάθειά του στη νόσο [13], [21]. Το κοινωνικό δίκτυο, δηλαδή οι κύκλοι μέσα στους οποίους αλληλεπιδρά κάθε άτομο (οικογένεια, εργασία, σχολείο), καθώς και η ατομική συμπεριφορά (π.χ. χρήση μάσκας, αποφυγή συγχρωτισμού) επηρεάζουν ουσιαστικά την εξέλιξη μιας επιδημίας. Τέλος, χωρικοί παράγοντες όπως η πληθυσμιακή πυκνότητα και η κινητικότητα των ατόμων μπορούν να επιταχύνουν ή να περιορίσουν την εξάπλωση [30].

Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, τα πρακτορικά μοντέλα έχουν αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο, επιτρέποντας την αναπαράσταση της συμπεριφοράς των αυτόνομων οντοτήτων και των αλληλεπιδράσεών τους σε ένα δυναμικό περιβάλλον. Η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου προγράμματος για τη μελέτη της δυναμικής των ασθενειών απαιτεί, εκ φύσεως, μια διεπιστημονική προσέγγιση. Η παρούσα διπλωματική εργασία γεφυρώνει δύο επιστημονικά πεδία: αυτό της Πληροφορικής και της Επιδημιολογίας.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Αρχικά, γίνεται αναφορά στα πρακτορικά μοντέλα και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, ενώ στη συνέχεια αναλύεται το μοντέλο Sugarscape, μέσα από το οποίο παρουσιάζεται πιο πρακτικά η λειτουργία ενός πρακτορικού μοντέλου. Έπειτα, παρουσιάζονται τα βασικά επιδημιολογικά μοντέλα με έμφαση στο μοντέλο SEIR, και τέλος εξετάζεται ο συνδυασμός των παραπάνω προσεγγίσεων.

2.2 Πρακτορικά μοντέλα (Agent-Based Models)

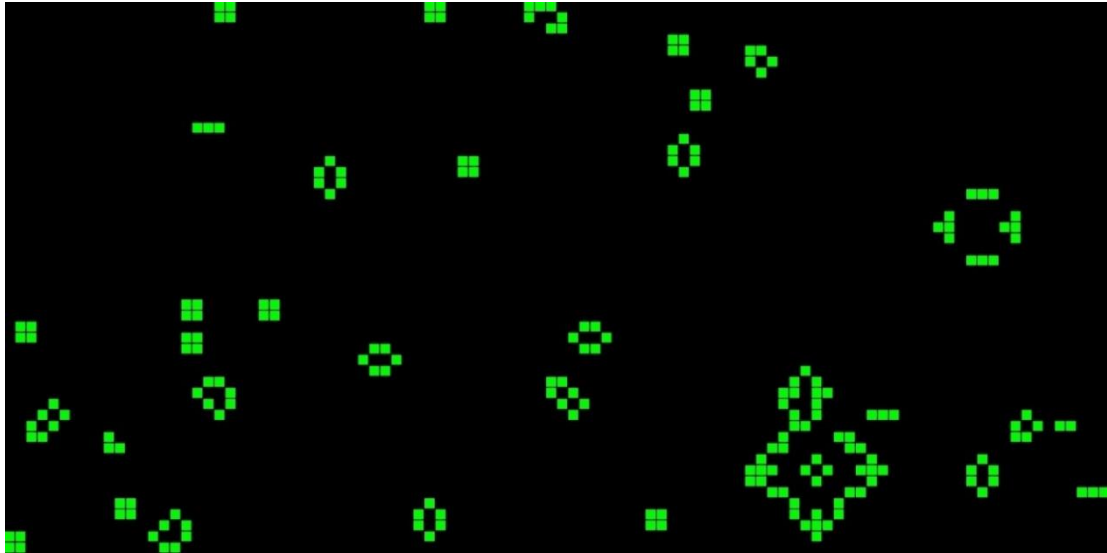
2.2.1 Ορισμός και Βασικές Έννοιες

Τα πρακτορικά μοντέλα είναι λογικά και υπολογιστικά μοντέλα που προσομοιώνουν τη συμπεριφορά αυτόνομων πρακτόρων. Κάθε πράκτορας είναι μια ανεξάρτητη οντότητα, η οποία μπορεί να αντιπροσωπεύει έναν άνθρωπο, ένα ζώο, ένα κύτταρο, ένα όχημα, μια επιχείρηση ή οποιοδήποτε άλλο στοιχείο του συστήματος. Ο όρος αυτονομία σημαίνει ότι κάθε πράκτορας λαμβάνει τις δικές του αποφάσεις χωρίς την παρέμβαση κάποιας κεντρικής αρχής, με βάση τους κανόνες και τους στόχους που τον διέπουν. Παράλληλα, ο πράκτορας είναι σε θέση να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον γύρω του και να προσαρμόζει τη συμπεριφορά του ανάλογα με τις πληροφορίες που λαμβάνει. Κάθε πράκτορας αλληλεπιδρά τόσο με άλλους πράκτορες όσο και με το ίδιο το περιβάλλον, και από τις αλληλεπιδράσεις αυτές προκύπτουν μοτίβα σε επίπεδο συστήματος που δίνουν τη δυνατότητα να κατανοήσουμε τη συνολική συμπεριφορά του και τους παράγοντες που καθορίζουν τα αποτελέσματά του [1], [2], [10].

2.2.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ανάπτυξη των πρακτορικών μοντέλων ξεκίνησε σταδιακά από τα μέσα του 20ού αιώνα, παράλληλα με την εξέλιξη της υπολογιστικής επιστήμης και της μελέτης πολύπλοκων συστημάτων. Πρώιμες ιδέες

εμφανίστηκαν μέσα από το έργο των John von Neumann και Stanislaw Ulam σχετικά με τα cellular automata, ενώ σημαντική επιρροή είχε και το Conway's Game of Life (Σχήμα 2.1) του John Conway, το οποίο ανέδειξε πώς πολύπλοκες συμπεριφορές μπορούν να προκύψουν από απλούς κανόνες [3], [11].



Σχήμα 2.1: Conway's Game of Life

Κατά τις δεκαετίες του 1970 και 1980, ερευνητές όπως ο Thomas Schelling και ο Robert Axelrod αξιοποίησαν παρόμοιες προσεγγίσεις για τη μελέτη κοινωνικών και πολιτικών φαινομένων [2], [4], [5]. Η ευρύτερη εξάπλωση των ABMs πραγματοποιήθηκε κυρίως τη δεκαετία του 1990, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το μοντέλο Sugarscape των Joshua M. Epstein και Robert Axtell [1], το οποίο συνέβαλε σημαντικά στη διάδοση των πρακτορικών μοντέλων σε επιστημονικά πεδία όπως η κοινωνική προσομοίωση, η βιολογία και η επιδημιολογία [1].

2.2.3 Χαρακτηριστικά

Για την καλύτερη κατανόηση, τα χαρακτηριστικά των πρακτορικών μοντέλων αναλύονται σε τρεις κατηγορίες: τα χαρακτηριστικά των ίδιων των πρακτόρων, τα δομικά χαρακτηριστικά του συστήματος και τα μεθοδολογικά πλεονεκτήματα της προσέγγισης.

Χαρακτηριστικά πρακτόρων

- Αυτονομία: Οι πράκτορες λειτουργούν χωρίς άμεση παρέμβαση από άλλα συστήματα, διατηρώντας τον έλεγχο της κατάστασής τους και των ενεργειών τους. Δεν ακολουθούν καθολικές εντολές, αλλά λαμβάνουν τις δικές τους αποφάσεις ανεξάρτητα [18].
- Ετερογένεια: Οι πράκτορες συνήθως διαφέρουν μεταξύ τους, έχοντας διαφορετικά ατομικά χαρακτηριστικά (π.χ. ηλικία, πλούτο, τοποθεσία, ανοσοποιητικό σύστημα). Δεν αντιμετωπίζονται από το μοντέλο ως ενιαίες ομοιόμορφες μονάδες, γεγονός που αποτελεί ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα έναντι των κλασικών μαθηματικών προσεγγίσεων [1], [18].
- Συμπεριφορά: Οι πράκτορες μπορεί να λειτουργούν είτε με βάση ένα σύνολο απλών κανόνων είτε μέσω πολύ σύνθετων μοντέλων λήψεων αποφάσεων. Τέτοια μοντέλα μπορεί να προκύπτουν είτε εξελικτικά, μέσα από διαδοχικές γενιές πρακτόρων, είτε να διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια της «ζωής» του πράκτορα μέσω δια βίου μάθησης. [5], [18].

- Προληπτικοί ή αντιδραστικοί: Οι πράκτορες μπορούν να είναι αντιδραστικοί, δηλαδή να ανταποκρίνονται σε αλλαγές του περιβάλλοντος, ή προληπτικοί, δρώντας σκόπιμα για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων. Σε πολλές περιπτώσεις είναι και τα δύο, ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν [18].
- Προσαρμοστικότητα: Οι πράκτορες μπορούν να μάθουν από τις αλληλεπιδράσεις και τις εμπειρίες τους και να προσαρμόζουν ανάλογα τη συμπεριφορά τους με την πάροδο του χρόνου μέσω μάθησης ή εξέλιξης [1], [5].

Δομικά χαρακτηριστικά συστήματος

- Ανάδυση (emergence): Η έννοια της ανάδυσης αποτελεί κεντρικό στοιχείο των πρακτορικών μοντέλων, καθώς περιγράφει τη διαδικασία κατά την οποία πολύπλοκες και μη γραμμικές συμπεριφορές προκύπτουν από απλούς τοπικούς κανόνες των πρακτόρων, χωρίς την ύπαρξη κεντρικού ελέγχου [1].
- Bottom-up προσέγγιση: Τα πρακτορικά μοντέλα χτίζουν το σύστημα από το ατομικό επίπεδο προς τα πάνω, ώστε να κατανοηθεί η συνολική συμπεριφορά του συστήματος μέσω της δράσης των επιμέρους πρακτόρων [1], [18].
- Δυναμικά και στοχαστικά: Τα μοντέλα είναι δυναμικά με την πάροδο του χρόνου και συχνά χρησιμοποιούν τυχαιότητα (στοχαστικότητα) στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων ή αλληλεπίδρασης, επιτρέποντας την αναπαράσταση της φυσικής αβεβαιότητας των συστημάτων του πραγματικού κόσμου [29].

Μεθοδολογικά χαρακτηριστικά

- Ευελιξία: Τα ABMs επιτρέπουν εύκολες προσαρμογές στην πολυπλοκότητα των πρακτόρων, τον αριθμό τους και τους κανόνες αλληλεπίδρασης, καθιστώντας τα κατάλληλα για ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων [18].
- Χειρισμός μη γραμμικότητας: Τα ABMs είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά για τη μοντελοποίηση συστημάτων με πολύπλοκους βρόχους ανάδρασης και μη γραμμική συμπεριφορά, την οποία τα κλασικά μαθηματικά μοντέλα δυσκολεύονται να αποτυπώσουν [28].

2.2.4 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των ABMs

Πλεονεκτήματα

- Αποτύπωση της πολυπλοκότητας: Τα πρακτορικά μοντέλα αποτυπώνουν την πολυπλοκότητα επιτρέποντας την ανάδυση μη γραμμικών φαινομένων μέσα από τις αλληλεπιδράσεις διακριτών πρακτόρων, οι οποίοι προσαρμόζονται σε σύνθετα συστήματα που δεν ακολουθούν προκαθορισμένες πορείες [1], [18].
- Ευελιξία: Οι προσομοιώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε πληθώρα συστημάτων, σε χωρικά και μη χωρικά, υποστηρίζοντας τη ροή σε διακριτά βήματα ή σε συνεχή χρόνο, γεγονός που καθιστά τα πρακτορικά μοντέλα κατάλληλα για ένα ευρύ φάσμα πεδίων και προβλημάτων [18].
- Δοκιμή σεναρίων: Τα ABMs επιτρέπουν την εκτέλεση σεναρίων τύπου «τι θα γινόταν αν», τα οποία δίνουν τη δυνατότητα σε ερευνητές και επιχειρήσεις να δοκιμάζουν αποφάσεις σε ένα εικονικό περιβάλλον πριν από την εφαρμογή τους στον πραγματικό κόσμο, εξοικονομώντας χρόνο, χρήμα και μειώνοντας το ρίσκο [17].

Περιορισμοί

- Ευαισθησία στον σχεδιασμό (design sensitivity): Ακόμη και μικρές αλλαγές στις παραμέτρους μπορούν να επηρεάσουν δραστικά τα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό, οποιεσδήποτε αλλαγές πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά, καθώς μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα [28].

- Απαιτήσεις δεδομένων: Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι η ανάγκη για λεπτομερή και ακριβή δεδομένα σχετικά με τη συμπεριφορά των μεμονωμένων πρακτόρων, καθώς τα μοντέλα λειτουργούν καλύτερα όταν προσομοιώνουν ρεαλιστικά τον τρόπο με τον οποίο δρουν οι άνθρωποι, οι μηχανές, οι οργανισμοί ή άλλες οντότητες [18].
- Αυξημένη πολυπλοκότητα: Σε σχέση με τις άλλες μεθόδους μοντελοποίησης, τα πρακτορικά μοντέλα παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη πολυπλοκότητα τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων τους, καθώς απαιτείται η σύνθεση και ο προγραμματισμός πλήθους διαφορετικών πρακτόρων, κανόνων και αλληλεπιδράσεων [24].
- Υπολογιστικό κόστος: Όσο αυξάνεται ο αριθμός των πρακτόρων και των αλληλεπιδράσεών τους, τα πρακτορικά μοντέλα γίνονται υπολογιστικά απαιτητικά. Το σύστημα πρέπει να παρακολουθεί πολλές μεταβλητές ταυτόχρονα και να εκτελεί πολλούς υπολογισμούς, γεγονός που απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και μπορεί να αυξήσει τον χρόνο εκτέλεσης των προσομοιώσεων [23].
- Επαλήθευση: Η επαλήθευση και η εμπειρική επικύρωση των ABMs είναι ιδιαίτερα δύσκολες, καθώς η ανάδυση σύνθετων συμπεριφορών καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της ορθότητας των κανόνων και τη σύγκριση με πραγματικά δεδομένα. Συχνά, η αξιολόγηση βασίζεται περισσότερο στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων παρά σε αυστηρές αναλυτικές αποδείξεις, ενώ η αδυναμία τους να παρέχουν ακριβείς προβλέψεις δυσκολεύει την παραδοσιακή επιστημονική τεκμηρίωση [18].

2.2.5 Εφαρμογές Πρακτορικών Μοντέλων

Τα ABMs έχουν εφαρμοσθεί σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων στον πραγματικό κόσμο. Παρακάτω, στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα [16], [17].

Πίνακας 2.1: Εφαρμογές των ABMs

Εφαρμογή	Περιγραφή
Covasim	SEIR ABM γραμμένο σε Python που μελετάει την δυναμική του COVID-19 και τις παρεμβάσεις / μέτρα.
EpiCast	ABM που προσομοιώνει την εξάπλωση μιας νόσου μέσα από τον πληθυσμό των ΗΠΑ.
Carcraft	Πολυπρακτορικό περιβάλλον της Waymo για testing αλγόριθμων για self-driving cars.
Τεχνητές Χρηματοπιστωτικές Αγορές	Μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των επενδυτών (π.χ. τάσεις πανικού ή μμητισμού) για τη μελέτη πολύπλοκων και ασταθών οικονομικών συστημάτων.
MATSim	Σύστημα προσομοίωσης μεταφορών που αναπαριστά εκατομμύρια “πράκτορες” για ανάλυση κυκλοφοριακής συμφόρησης και αστικών μετακινήσεων.

2.3 Το μοντέλο Sugarscape

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η πρώτη φάση βασίστηκε στην μελέτη του βιβλίου των Epstein και Axtell [1] και στην ολοκληρωτική υλοποίηση του Sugarscape μοντέλου τους. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να αποκτηθεί μια βαθιά και πρακτική κατανόηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν

τα πρακτορικά μοντέλα, μέσα από την υλοποίηση ενός θεμελιώδους έργου του πεδίου. Οι γνώσεις και η εμπειρία που αποκτήθηκαν αποτέλεσαν την βάση και τα θεμέλια του τελικού μοντέλου της εργασίας.

Στις επόμενες ενότητες περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο Sugarscape, η δομή του περιβάλλοντος, η συμπεριφορά των πρακτόρων και η σημασία του στη μελέτη σύνθετων συστημάτων.

2.3.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το Sugarscape είναι ένα πρακτορικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε από τους Joshua M. Epstein και Robert Axtell στο βιβλίο τους *Growing Artificial Societies* το 1996 [1]. Πρόκειται για μια σημαντική generative bottom-up προσέγγιση στις κοινωνικοοικονομικές επιστήμες.

Οι Epstein και Axtell κατασκεύασαν ένα μοντέλο όπου ένας ετερογενής πληθυσμός αυτόνομων πρακτόρων ανταγωνίζεται για ανανεώσιμους πόρους (στη συγκεκριμένη περίπτωση για ζάχαρη, εξού και το όνομα Sugarscape), οι οποίοι είναι άνισα κατανεμημένοι σε ένα δισδιάστατο περιβάλλον, δημιουργώντας μια τεχνητή κοινωνία. Οι πράκτορες στο μοντέλο είναι αυτόνομοι, καθώς δεν ελέγχονται από κάποια κεντρική δύναμη, και ετερογενείς, καθώς διαφέρουν ως προς τα γενετικά χαρακτηριστικά τους και τις αρχικές περιβαλλοντικές τους συνθήκες.

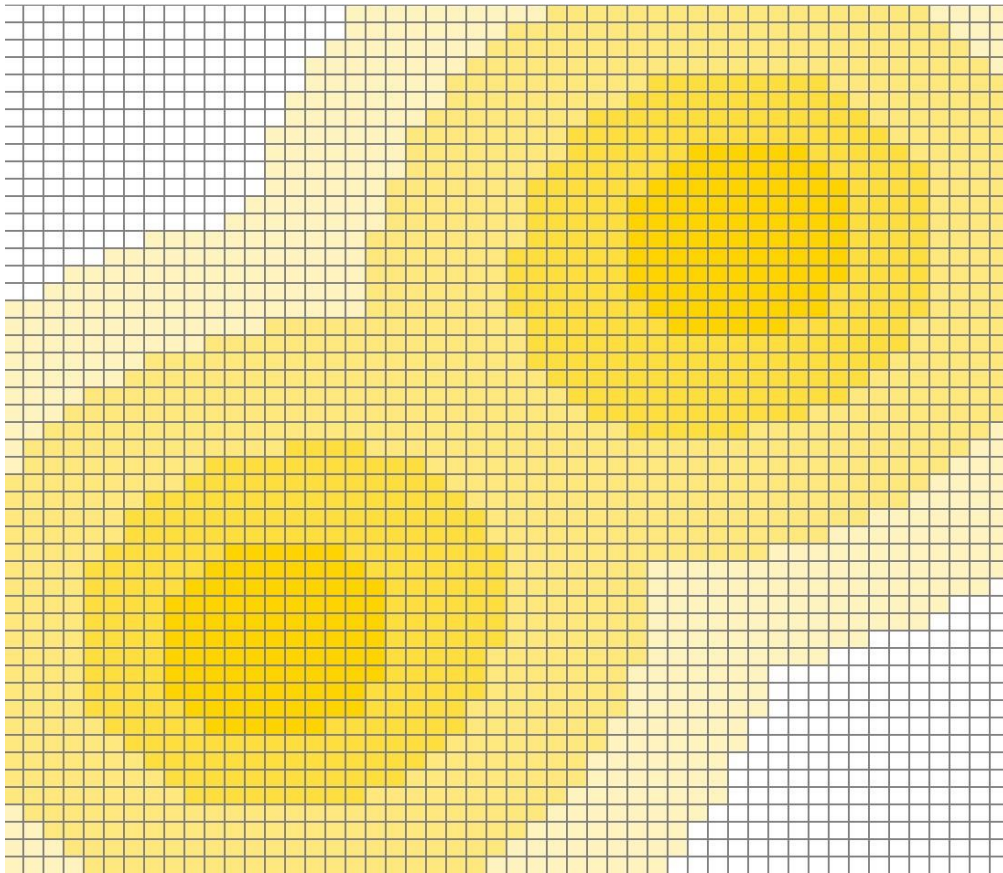
Η generative προσέγγιση του Sugarscape βασίζεται στην ιδέα ότι πολύπλοκα κοινωνικά φαινόμενα μπορούν να παραχθούν μέσα από απλές τοπικές αλληλεπιδράσεις πρακτόρων, χωρίς να έχουν προκαθοριστεί σε επίπεδο συστήματος.

Το μοντέλο γίνεται ολοένα και πιο πολύπλοκο από κεφάλαιο σε κεφάλαιο, καθώς οι πράκτορες εξοπλίζονται με νέες ικανότητες και συμμετέχουν σε καινούργιες δραστηριότητες. Με αυτόν τον τρόπο μελετώνται διάφορα κοινωνικά φαινόμενα, όπως το εμπόριο, η μετανάστευση, ο σχηματισμός ομάδων, οι μάχες, η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, η μετάδοση πολιτισμού, η μετάδοση ασθενειών και η δυναμική του πληθυσμού.

2.3.2 Δομή Περιβάλλοντος (Grid)

Το περιβάλλον είναι ένα πλέγμα κελιών 50x50. Κάθε κελί διαθέτει επίπεδο ζάχαρης και χωρητικότητα ζάχαρης. Το επίπεδο ζάχαρης αντιστοιχεί στις μονάδες ζάχαρης που υπάρχουν στο κελί τη χρονική στιγμή t , ενώ η χωρητικότητα ζάχαρης είναι η μέγιστη ποσότητα ζάχαρης που μπορεί να περιέχει το κελί.

Η χωρητικότητα ζάχαρης κάθε κελιού παίρνει τιμές από 0 έως 4. Επιλέγεται κατά την αρχικοποίηση του κόσμου και παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η αρχική κατανομή των χωρητικότητας μπορεί να γίνει με τυχαίο τρόπο ή να ακολουθεί μια συγκεκριμένη μορφή. Στο αρχικό μοντέλο Sugarscape, για παράδειγμα, η χωρική κατανομή απεικονίζει μια τοπογραφία που αποτελείται από δύο κορυφές πλούσιες σε ζάχαρη (με χωρητικότητα ίση με 4), οι οποίες χωρίζονται από μια κοιλάδα και περιβάλλονται από μια έρημο με κελιά χωρίς ή με ελάχιστη ποσότητα ζάχαρης, όπως φαίνεται Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.2: Οι κορυφές ζάχαρης του Sugarscape

Όταν η ζάχαρη καταναλώνεται, η αναγέννησή της ακολουθεί έναν απλό κανόνα: σε κάθε κελί, η ζάχαρη αναπληρώνεται με ρυθμό α μονάδων ανά χρονικό βήμα, έως ότου φτάσει τη μέγιστη χωρητικότητα ζάχαρης του κελιού. Ο ρυθμός αναγέννησης α είναι σταθερός και επιλέγεται τυχαία κατά την αρχικοποίηση του κόσμου.

2.3.3 Συμπεριφορά Πρακτόρων

Κάθε πράκτορας γεννιέται στην τεχνητή κοινωνία του Sugarscape με ατομικά γενετικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την επιβίωσή του. Τα βασικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

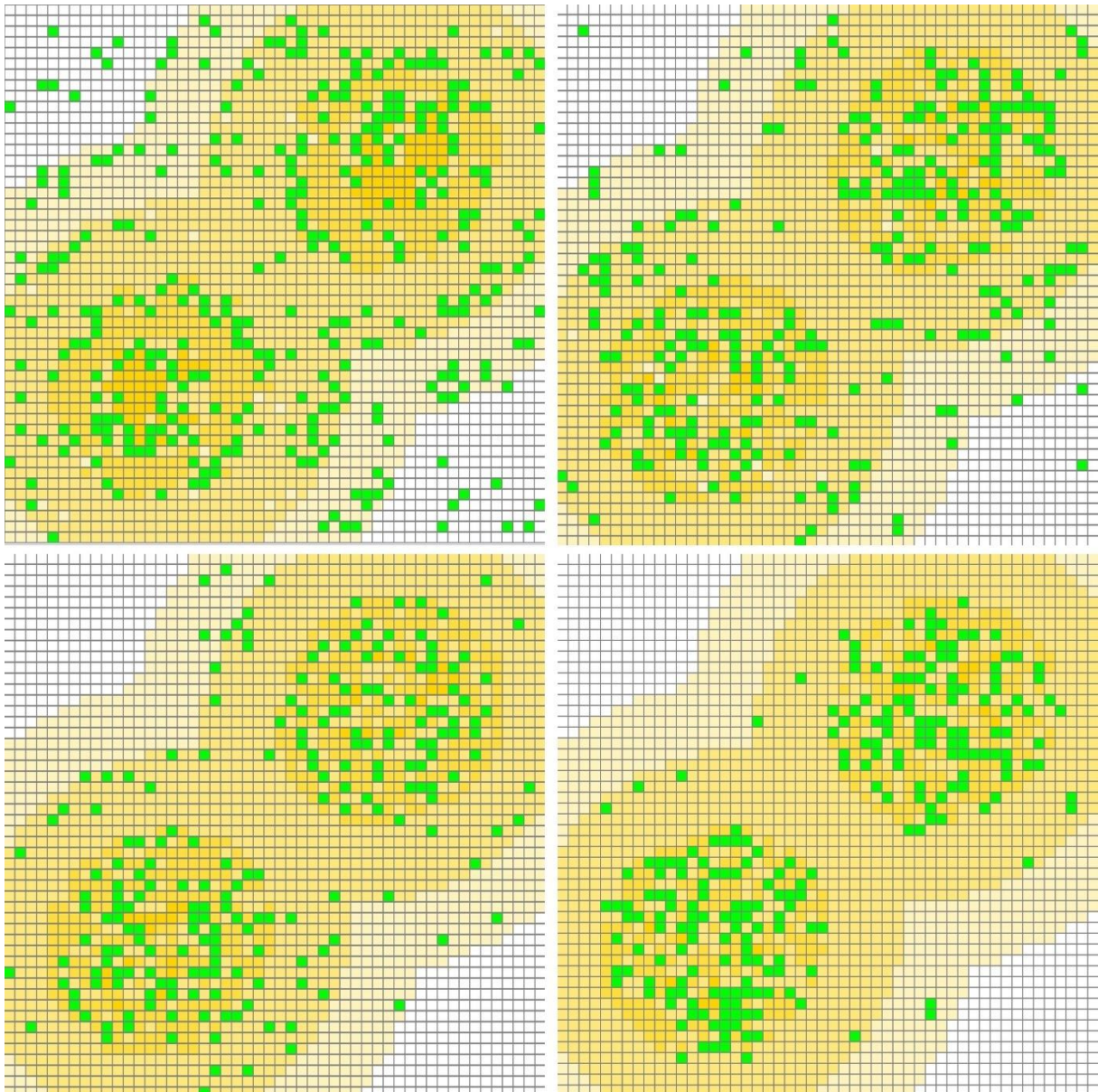
- Η όραση v , η οποία αντιστοιχεί στον μέγιστο αριθμό θέσεων που μπορεί να δει ο πράκτορας σε καθεμία από τις τέσσερις κύριες κατευθύνσεις του πλέγματος: βόρεια, νότια, ανατολικά και δυτικά.
- Ο μεταβολικός ρυθμός m , ο οποίος αντιπροσωπεύει τις μονάδες ζάχαρης που καταναλώνει ο πράκτορας ανά χρονικό βήμα.
- Η μέγιστη ηλικία, η οποία είναι ανάλογη του μέγιστου αριθμού χρονικών βημάτων μέχρι τον οποίο μπορεί να επιβιώσει ο πράκτορας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πλούτος ζάχαρης που μπορεί να αποκτήσει ο πράκτορας δεν έχει κανέναν περιορισμό. Από αυτή την «ελευθερία» αναδύονται φαινόμενα οικονομικής ανισότητας μέσα στην τεχνητή κοινωνία. Καθώς το μοντέλο εξελίσσεται, εισάγονται επιπλέον χαρακτηριστικά και κανόνες συμπεριφοράς, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της τεχνητής κοινωνίας.

Κίνηση και κατανάλωση

Ο βασικότερος κανόνας συμπεριφοράς είναι ο κανόνας της κίνησης. Ο πράκτορας αντιλαμβάνεται τον χώρο, δηλαδή το σύνολο των κενών κελιών που βρίσκονται μέσα στο οπτικό του πεδίο. Στη συνέχεια εντοπίζει το κελί με τη μεγαλύτερη ποσότητα ζάχαρης. Αν υπάρχουν πολλά κελιά με την ίδια ποσότητα, επιλέγει το κοντινότερο, μετακινείται σε αυτό και συλλέγει τη ζάχαρη. Σε κάθε χρονικό βήμα, ο πλούτος ζάχαρης του πράκτορα αυξάνεται με τη συλλογή και ταυτόχρονα μειώνεται σύμφωνα με τον μεταβολικό του ρυθμό.

Μέσα από αυτόν τον απλό κανόνα κίνησης αναδύεται ένα ενδιαφέρον χωρικό φαινόμενο: οι πράκτορες σταδιακά συγκεντρώνονται γύρω από τις δύο κορυφές ζάχαρης του κόσμου, όπου βρίσκονται τα πλουσιότερα κελιά. Η συγκέντρωση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Η σταδιακή συγκέντρωση των πρακτόρων στις κορυφές ζάχαρης

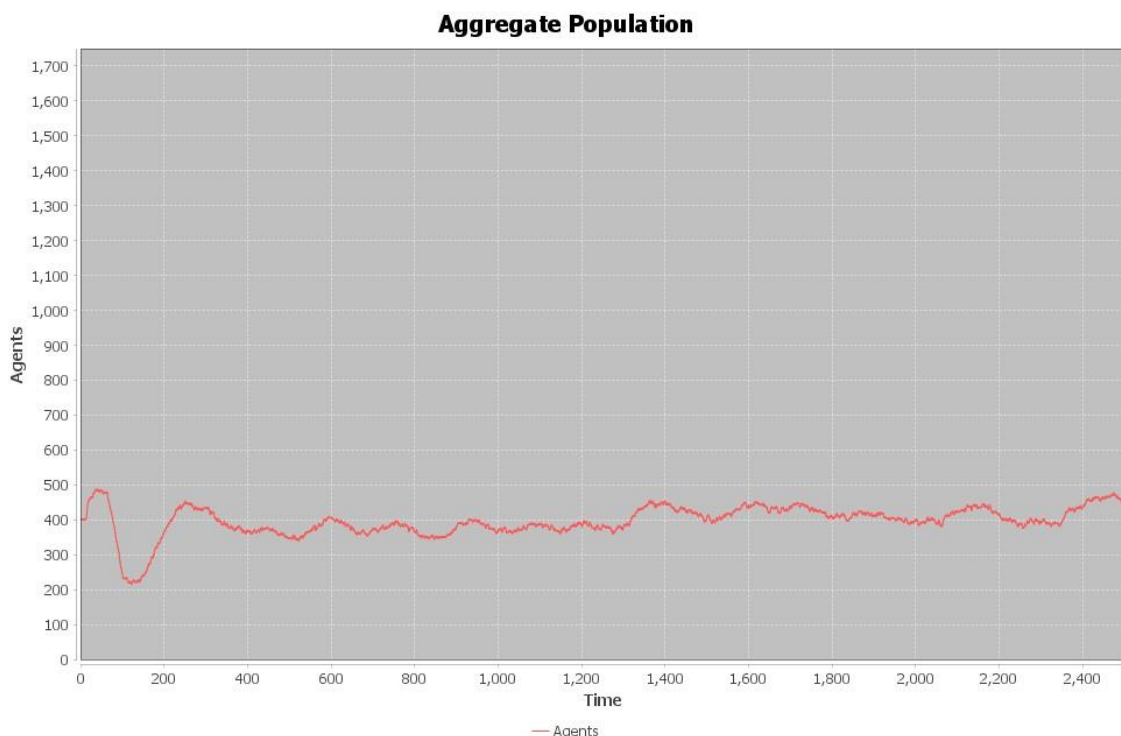
Θάνατος

Στο μοντέλο, ένας πράκτορας μπορεί να πεθάνει από δύο αιτίες. Η πρώτη είναι η έλλειψη πόρων: εάν στο τέλος του χρονικού βήματος ο πλούτος ζάχαρης δεν είναι μεγαλύτερος από το μηδέν, ο πράκτορας πεθαίνει από πείνα. Η δεύτερη είναι το γήρας: εάν η ηλικία του πράκτορα ξεπεράσει τη μέγιστη ηλικία που του έχει αντιστοιχηθεί κατά τη γέννηση, ο πράκτορας πεθαίνει από φυσικά αίτια.

Αναπαραγωγή

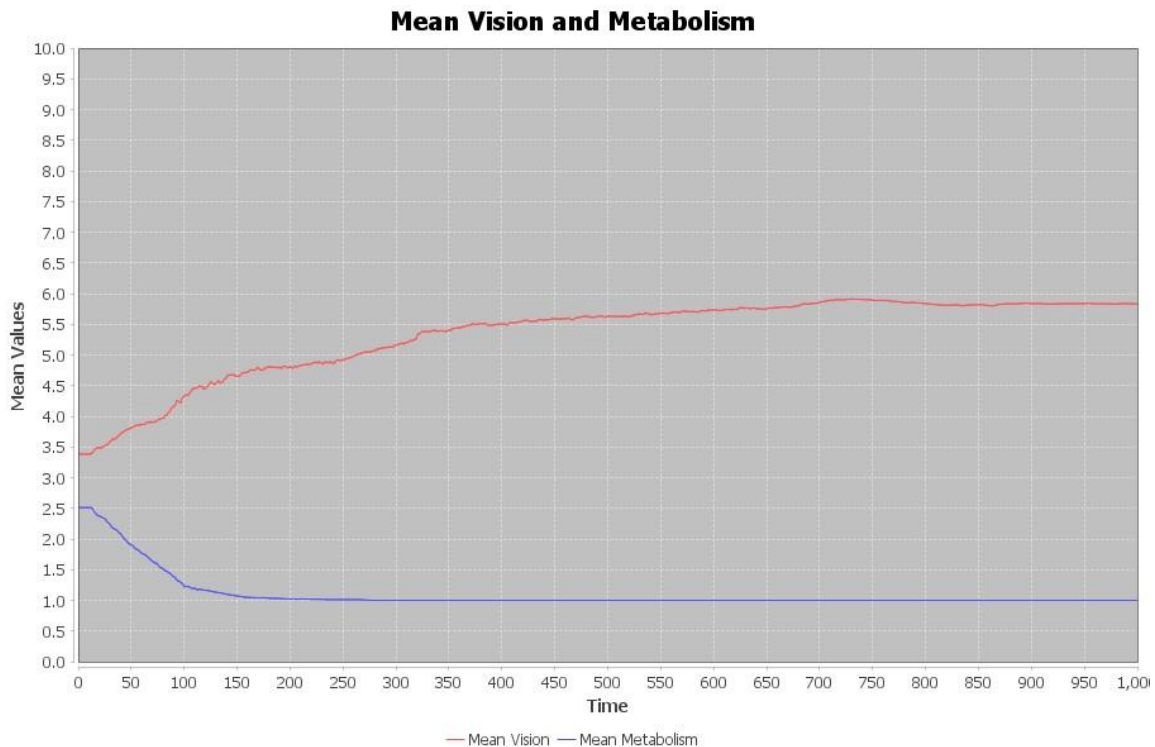
Σε εκτεταμένες εκδοχές του μοντέλου, οι πράκτορες αποκτούν τη δυνατότητα αναπαραγωγής. Για να συμβεί αυτό πρέπει να πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις: δύο πράκτορες αντίθετου φύλου να βρίσκονται σε γειτονικά κελιά, να είναι και οι δύο μέσα στην περίοδο γονιμότητάς τους, που είναι ένα συγκεκριμένο ηλικιακό διάστημα, και να διαθέτουν επαρκές απόθεμα ζάχαρης. Όταν πραγματοποιείται η αναπαραγωγή, γεννιέται ένας νέος πράκτορας που κληρονομεί γενετικά χαρακτηριστικά και πλούτο από τους γονείς του και τοποθετείται σε ένα γειτονικό κενό κελί.

Με αυτόν τον μηχανισμό, η τεχνητή κοινωνία αποκτά δυναμική πληθυσμού: ο συνολικός πληθυσμός μεταβάλλεται με τον χρόνο μέσα από γεννήσεις και θανάτους, ενώ τα γενετικά χαρακτηριστικά εξελίσσονται από γενιά σε γενιά. Η εξέλιξη του πληθυσμού με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Εξέλιξη του συνολικού πληθυσμού στο σενάριο αναπαραγωγής

Επιπλέον παρατηρείται και ένα άλλο ενδιαφέρον φαινόμενο: η **επιβίωση του δυνατότερου**. Οι πράκτορες με την μεγαλύτερη όραση και τον μικρότερο μεταβολικό ρυθμό υπερισχύουν των αδύναμων πρακτόρων και επιβιώνουν μεταδίδοντας τα ανώτερα γενετικά τους χαρακτηριστικά στους απογόνους τους. Το φαινόμενο αυτό οπτικοποιείται με το διάγραμμα του Σχήματος 2.5, όπου φαίνεται η εξέλιξη των γενετικών χαρακτηριστικών των πρακτόρων μέσα στον χρόνο.



Σχήμα 2.5: Η εξέλιξη του μέσου μεταβολισμού και της μέσης όρασης

Εμπόριο

Σε πιο εξελιγμένη εκδοχή του μοντέλου εισάγεται ένας δεύτερος ανανεώσιμος πόρος, η πιπεριά (spice). Από αυτό το σημείο και μετά, κάθε πράκτορας διαθέτει δύο μεταβολικούς ρυθμούς, έναν για κάθε πόρο, και χρειάζεται και τους δύο για να επιβιώσει.

Για να μπορεί ο κάθε πράκτορας να αξιολογεί τη σχετική αξία των δύο πόρων ως προς τις δικές του ανάγκες, εισάγεται μια συνάρτηση ευημερίας (welfare function), η οποία στο Sugarscape έχει τη μορφή Cobb-Douglas. Από αυτήν τη συνάρτηση προκύπτει για κάθε πράκτορα ο οριακός λόγος υποκατάστασης (Marginal Rate of Substitution, MRS), ο οποίος εκφράζει πόσες μονάδες πιπεριάς θεωρεί ισάξιες με μία μονάδα ζάχαρης.¹

Όταν δύο πράκτορες βρίσκονται σε γειτονικά κελιά, ο καθένας υπολογίζει τον δικό του MRS. Εάν οι δύο τιμές διαφέρουν, υπάρχει δυνατότητα αμοιβαία επωφελούς ανταλλαγής. Ο πράκτορας με τον μεγαλύτερο MRS θεωρεί τη ζάχαρη πιο πολύτιμη, οπότε γίνεται αγοραστής ζάχαρης και πωλητής πιπεριάς, ενώ ο άλλος αντιστρέφεται. Η τιμή της ανταλλαγής υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος των δύο MRS και η συναλλαγή πραγματοποιείται μόνο εφόσον αυξάνει την ευημερία και των δύο πρακτόρων.

Το ιδιαίτερα ενδιαφέρον στοιχείο αυτής της διαδικασίας είναι ότι από τις ατομικές, τοπικές αυτές ανταλλαγές αναδύεται φυσικά μια τιμή αγοράς, χωρίς ποτέ να έχει οριστεί από κάποια κεντρική αρχή. Όταν η ζάχαρη και η πιπεριά είναι συμμετρικά κατανεμημένες στον κόσμο και οι μεταβολικοί ρυθμοί

¹ Η συνάρτηση Cobb-Douglas είναι αύξουσα ως προς κάθε πόρο, παρουσιάζει όμως φθίνουσα οριακή χρησιμότητα: κάθε επιπλέον μονάδα ενός πόρου προσθέτει ολοένα και μικρότερη ευημερία. Έτσι, ένας πράκτορας αποδίδει μεγαλύτερη σχετική αξία στον πόρο που έχει σε έλλειψη, και αυτό ακριβώς εκφράζει ο οριακός λόγος υποκατάστασης (MRS).

των πρακτόρων είναι επίσης συμμετρικοί, η τιμή ισορροπίας της αγοράς τείνει στη μονάδα, αντικατοπτρίζοντας την ισότιμη αξία των δύο πόρων.

Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μέσης τιμής ανταλλαγής με την πάροδο του χρόνου. Ενώ στα πρώτα χρονικά βήματα παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις, η τιμή σταθεροποιείται γρήγορα γύρω από τη μονάδα, δείχνοντας ότι η αγορά συγκλίνει σε μια κατάσταση ισορροπίας μέσα από καθαρά τοπικές αλληλεπιδράσεις.



Σχήμα 2.6: Η μέση τιμή του εμπορίου με την πάροδο του χρόνου

Πόλεμος

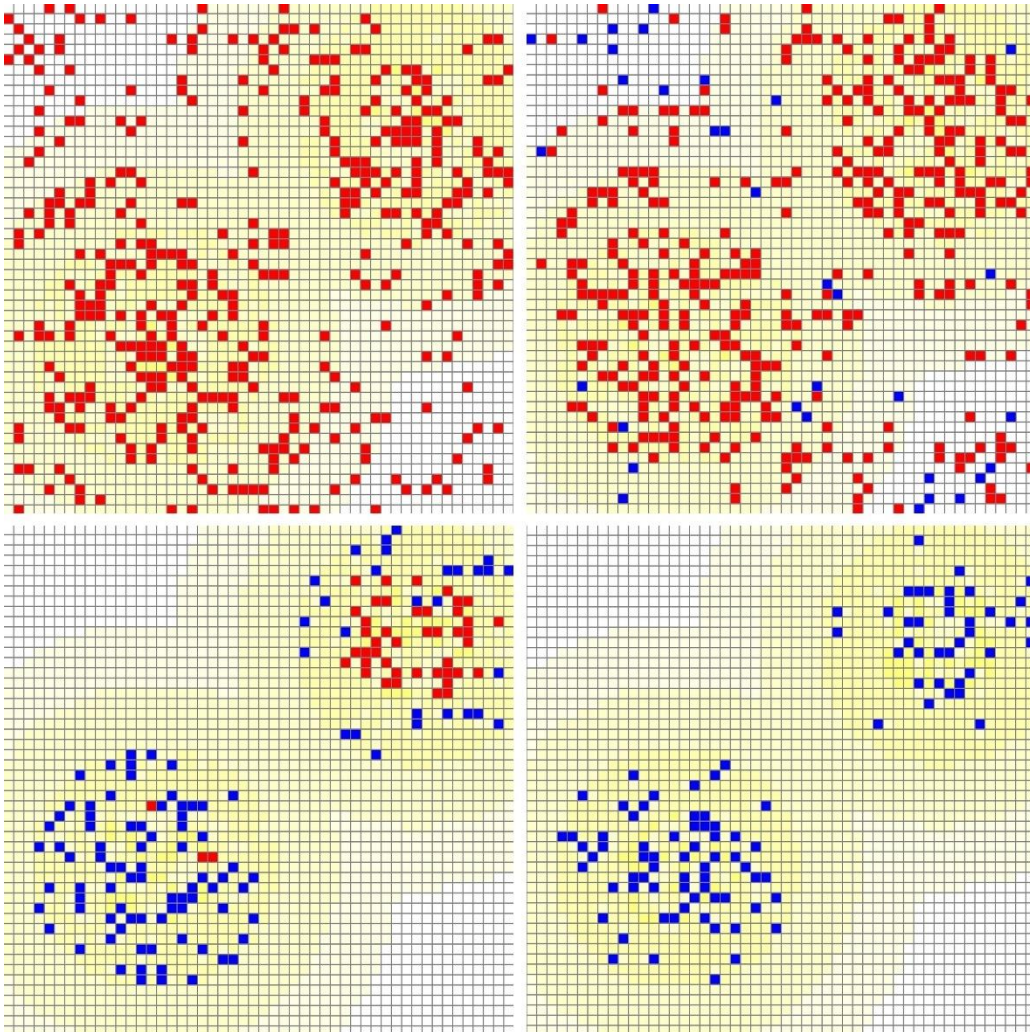
Σε άλλη εκδοχή του μοντέλου εισάγεται ο κανόνας του πολέμου. Οι πράκτορες ανήκουν σε ομάδες, διαχωρισμένες με βάση κάποιο χαρακτηριστικό όπως μια πολιτιστική ετικέτα, και πράκτορες διαφορετικών ομάδων που βρίσκονται σε γειτονικά κελιά μπορούν να συγκρουστούν. Ο νικητής σκοτώνει τον αντίπαλο, καταλαμβάνει το κελί του και αποκτά τον πλούτο του.

Η εισαγωγή του πολέμου επηρεάζει δραστικά τη δυναμική του πληθυσμού, καθώς ομάδες μπορούν να εξαπλωθούν εις βάρος άλλων ή και να εξαφανιστούν εντελώς.

Μετάδοση ασθενειών

Μία ακόμη σημαντική επέκταση του Sugarscape είναι ο κανόνας μετάδοσης ασθενειών, ο οποίος αποτελεί και τη βασική έμπνευση για την παρούσα διπλωματική εργασία. Στο επεκταμένο αυτό μοντέλο, οι πράκτορες μπορούν να μολυνθούν από γειτονικούς ασθενείς πράκτορες και να μεταδώσουν με τη σειρά τους τη νόσο. Παράλληλα, διαθέτουν ένα ανοσοποιητικό σύστημα που μπορεί σταδιακά να καταπολεμήσει την ασθένεια και να οδηγήσει τον πράκτορα στην ανάρρωση.

Μέσω αυτού του μηχανισμού, μπορεί κανείς να παρατηρήσει την εξέλιξη μιας επιδημίας μέσα στην τεχνητή κοινωνία. Σε ένα χαρακτηριστικό σενάριο, ξεκινώντας από μια κοινωνία στην οποία όλοι οι πράκτορες νοσούν, παρατηρείται η σταδιακή ανάρρωσή τους χάρη στο ανοσοποιητικό τους σύστημα, μέχρι η κοινωνία να απαλλαγεί πλήρως από τη νόσο. Η εξέλιξη αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Η σταδιακή αποβολή μιας ασθένειας από την τεχνητή κοινωνία του Sugarscape. Οι μολυσμένοι πράκτορες απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα και οι αναρρώσαντες με μπλε. Αρχικά όλη η κοινωνία είναι κόκκινη και σταδιακά γίνεται μπλε, καθώς οι πράκτορες αναρρώνουν.

Αυτή η δυνατότητα του Sugarscape να αναπαριστά διαδικασίες μετάδοσης ασθενειών στην ατομική κλίμακα αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ της πρακτορικής προσέγγισης και των επιδημιολογικών μοντέλων, που αναπτύσσονται στις επόμενες ενότητες.

2.3.4 Σημασία του Μοντέλου στη Μελέτη Σύνθετων Συστημάτων

Παραπάνω αναλύθηκε συνοπτικά το μοντέλο Sugarscape. Μπορεί κανείς να αντιληφθεί την απλότητα της φύσης των πρακτόρων, του περιβάλλοντος και των κανόνων που το διέπουν. Μέσα από αυτή την απλότητα αναδύεται μια τεχνητή κοινωνία. Από ατομικές τοπικές συμπεριφορές χαμηλού επιπέδου, οι

οποίες δεν ελέγχονται από κάποιο κεντρικό σύστημα, παρατηρούνται κοινωνικά φαινόμενα υψηλού επιπέδου.

Το Sugarscape απέδειξε ότι ακόμη και απλοί τοπικοί κανόνες μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση πολύπλοκων κοινωνικών φαινομένων, αναπαριστώντας πτυχές του πραγματικού κόσμου μέσα από προσομοιώσεις. Για τον λόγο αυτό αποτέλεσε σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη πολλών επιστημονικών πεδίων και συνέβαλε ουσιαστικά στην εξέλιξη των πρακτορικών μοντέλων και της μελέτης σύνθετων συστημάτων.

Πάνω στο Sugarscape βασίζεται και η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

2.4 Επιδημιολογικά Μοντέλα

2.4.1 Βασικές Έννοιες Επιδημιολογίας

Το κοινωνικό φαινόμενο που επιλέχθηκε να εξεταστεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η εξάπλωση των ασθενειών. Το φαινόμενο αυτό μελετάται από την επιστήμη της επιδημιολογίας. Πιο συγκεκριμένα, η επιδημιολογία εξετάζει την κατανομή και την εξέλιξη διαφόρων νοσημάτων στον ανθρώπινο πληθυσμό, καθώς και τους παράγοντες που τα διαμορφώνουν ή μπορούν να τα επηρεάσουν.

2.4.2 Μαθηματικά Επιδημιολογικά Μοντέλα

Τα μαθηματικά επιδημιολογικά μοντέλα αποτελούν ένα εργαλείο το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί πολύ πριν από τα πρακτορικά μοντέλα για τη μελέτη της διάδοσης των ασθενειών, την πρόβλεψη επιδημιών και την αξιολόγηση στρατηγικών αντιμετώπισής τους [24].

Ανάλογα με τον τρόπο που χειρίζονται την τυχαιότητα και τις μεταβλητές τους, τα μοντέλα αυτά χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- **Ντετερμινιστικά (Deterministic):** Βασίζονται σε διαφορικές εξισώσεις και υποθέτουν ότι οι παράμετροι είναι σταθερές. Σε αυτά, οι ίδιες αρχικές συνθήκες οδηγούν πάντα στο ίδιο αποτέλεσμα, προσφέροντας μια σαφή εικόνα για τη μέση συμπεριφορά ενός μεγάλου πληθυσμού [24].
- **Στοχαστικά (Stochastic):** Ενσωματώνουν την τυχαιότητα και τις πιθανότητες. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν ο πληθυσμός είναι μικρός ή όταν θέλουμε να μελετήσουμε την αβεβαιότητα και τις διακυμάνσεις στην εξέλιξη μιας νόσου [24].

Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση στα μαθηματικά μοντέλα είναι τα διαμερισματικά μοντέλα, όπου ο πληθυσμός χωρίζεται σε ομάδες ανάλογα με την κατάσταση υγείας του [8]. Τα πιο βασικά είναι:

- **SIS (Susceptible-Infected-Susceptible) [8]:** Κατάλληλο για ασθένειες που δεν αφήνουν μόνιμη ανοσία (π.χ. κοινό κρυολόγημα), όπου τα άτομα μετά τη νόσηση γίνονται ξανά ευάλωτα.
- **SIR (Susceptible-Infected-Recovered) [8]:** Το κλασικό μοντέλο για ασθένειες που προσφέρουν ανοσία μετά την νόσηση.
- **SEIR (Susceptible-Exposed-Infected-Recovered) [8]:** Μια επέκταση του SIR που περιλαμβάνει το στάδιο της έκθεσης. Σε αυτό το στάδιο, το άτομο έχει μολυνθεί αλλά δεν είναι ακόμα μεταδοτικό (περίοδος επώασης).

2.4.3 Πρακτορικές Προσεγγίσεις στη Μοντελοποίηση Ασθενειών

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις πρακτορικής μοντελοποίησης για τη μελέτη της διάδοσης ασθενειών, οι οποίες διαφέρουν τόσο στο επίπεδο λεπτομέρειας όσο και στους στόχους τους.

Οι Arduin et al. [21] παρουσιάζουν ένα ABM επικεντρωμένο στις αλληλεπιδράσεις της γρίπης σε επίπεδο ξενιστή, διερευνώντας τον τρόπο με τον οποίο η γρίπη επηρεάζει την επιβάρυνση από πνευμονιοκοκκικές λοιμώξεις. Πρόκειται για μια προσέγγιση σχετικά υψηλού επιπέδου, όπου κάθε πράκτορας αναπαριστά έναν ξενιστή και η εστίαση δίνεται στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών παθογόνων. Στο μοντέλο αυτό, κίνηση στον χώρο και οι ατομικές ρουτίνες των πρακτόρων δεν παίζουν σημαντικό ρόλο.

Αντίστοιχα, οι Chumachenko et al. [19] παρουσιάζουν μια πρακτορική προσέγγιση για την προσομοίωση της γρίπης και των οξέων αναπνευστικών ιογενών λοιμώξεων. Και εδώ η μοντελοποίηση γίνεται σε αρκετά αφηρημένο επίπεδο, με έμφαση στους μηχανισμούς μετάδοσης και στην εξέλιξη της επιδημίας σε επίπεδο πληθυσμού, χωρίς αναλυτική αναπαράσταση του χώρου ή των ατομικών συνηθειών των πρακτόρων.

Η προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική εργασία διαφέρει σημαντικά από τις παραπάνω, καθώς πρόκειται για μια μοντελοποίηση χαμηλού επιπέδου. Η μετάδοση της νόσου δεν προκαλείται από αφηρημένες πιθανότητες σε επίπεδο πληθυσμού, αλλά από τοπικές συμπεριφορές και συναντήσεις των πρακτόρων στον χώρο του δισδιάστατου χώρου. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία τοποθετείται στο φάσμα των πρακτορικών μοντέλων που δίνουν μεγαλύτερη βαρύτητα στις λεπτομερείς ατομικές και χωρικές αλληλεπιδράσεις, σε αντίθεση με τις πιο αφηρημένες προσεγγίσεις των Arduin et al. [21] και Chumachenko et al. [19].

2.4.4 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί των Μαθηματικών Επιδημιολογικών Μοντέλων

Πλεονεκτήματα

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μαθηματικών επιδημιολογικών μοντέλων είναι η απλότητα και η ευκολία κατανόησής τους. Ο διαχωρισμός του πληθυσμού σε κατηγορίες, όπως ευπαθείς, μολυσμένοι και αναρρώσαντες, επιτρέπει τη μελέτη της εξάπλωσης μιας ασθένειας με οργανωμένο τρόπο. Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά έχουν σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος και μπορούν να εφαρμοστούν γρήγορα ακόμη και σε μεγάλους πληθυσμούς [8], [24].

Παράλληλα, δίνουν τη δυνατότητα εκτέλεσης διαφορετικών σεναρίων και μελέτης της επίδρασης παραγόντων όπως ο ρυθμός μετάδοσης ή η διάρκεια της νόσησης. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να βοηθήσουν στην κατανόηση της πορείας μιας επιδημίας και στην αξιολόγηση πιθανών μέτρων αντιμετώπισης [25].

Περιορισμοί

Ωστόσο, τα μαθηματικά επιδημιολογικά μοντέλα βασίζονται σε ορισμένες παραδοχές που συχνά δεν ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικότητα. Μία από τις πιο συνηθισμένες παραδοχές είναι η ομοιογενής ανάμειξη του πληθυσμού, δηλαδή ότι όλα τα άτομα αλληλεπιδρούν τυχαία και με τον ίδιο τρόπο μεταξύ τους [28]. Στην πραγματικότητα όμως, οι άνθρωποι παρουσιάζουν περίπλοκες συμπεριφορές και συνήθως αλληλεπιδρούν περισσότερο με μικρότερες κοινωνικές ομάδες, όπως η οικογένεια, οι φίλοι ή οι συνάδελφοι στην δουλειά.

Επιπρόσθετα, τα μοντέλα αυτά συχνά αντιμετωπίζουν τον πληθυσμό ως ένα ενιαίο σύνολο [28], χωρίς να λαμβάνουν υπόψη διαφορές όπως η ηλικία, η κινητικότητα, η κοινωνική συμπεριφορά ή η θέση των

ατόμων στον χώρο. Για τον λόγο αυτό δυσκολεύονται να αποτυπώσουν πιο σύνθετες κοινωνικές και χωρικές αλληλεπιδράσεις.

Τέλος, η αξιοπιστία ενός μαθηματικού μοντέλου εξαρτάται άμεσα από τις παραδοχές και τις παραμέτρους πάνω στις οποίες βασίζεται [24]. Ακόμη και αν το μαθηματικό μέρος του μοντέλου είναι σωστό, λανθασμένες ή υπερβολικά απλουστευμένες παραδοχές μπορούν να οδηγήσουν σε αποτελέσματα που αποκλίνουν από την πραγματικότητα.

2.4.5 Το Μοντέλο SEIR

Το μοντέλο SEIR είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα και βασικά διαμερισματικά επιδημιολογικά μοντέλα. Περιλαμβάνει τις ομάδες ευάλωτων, εκτεθειμένων, μολυσμένων και αναρρώσαντων ατόμων. Χρησιμοποιείται συνήθως όταν η νόσος που εξετάζεται παρουσιάζει ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο τα άτομα έχουν μολυνθεί αλλά δεν είναι ακόμη μεταδοτικά. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου το άτομο βρίσκεται στην κατηγορία E (Exposed – εκτεθειμένοι).

Η εξέλιξη του μοντέλου καθορίζεται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τον ρυθμό με τον οποίο τα άτομα μετακινούνται από τη μία κατηγορία στην άλλη και δίνονται από τις σχέσεις (2.1) έως (2.4):

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{SI}{N} \quad (2.1)$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - \sigma E \quad (2.2)$$

$$\frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I \quad (2.3)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (2.4)$$

Όπου:

- **S:** Ευπαθή άτομα (Susceptible)
- **E:** Εκτεθειμένα άτομα (Exposed)
- **I:** Μολυσμένα άτομα (Infected)
- **R:** Αναρρώσαντα άτομα (Recovered)
- **N:** Συνολικός πληθυσμός

Οι βασικές παράμετροι του μοντέλου είναι οι εξής:

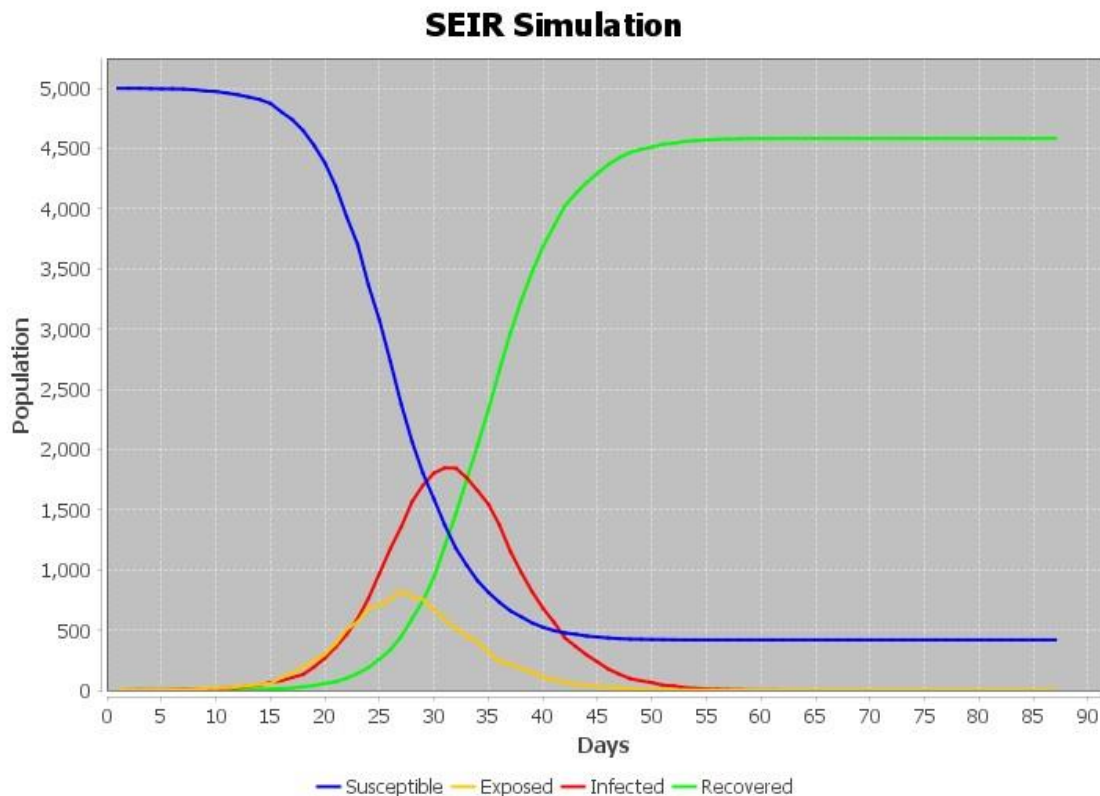
- **β (ρυθμός μετάδοσης):** Καθορίζει πόσο γρήγορα εκτίθενται τα ευπαθή άτομα μέσω επαφής με μολυσματικά άτομα.
- **σ (ρυθμός εξέλιξης):** Καθορίζει πόσο γρήγορα τα εκτεθειμένα άτομα γίνονται μολυσματικά.
- **γ (ρυθμός ανάρρωσης):** Καθορίζει πόσο γρήγορα τα μολυσματικά άτομα μεταβαίνουν στη φάση ανάρρωσης.

Σε κάθε χρονική στιγμή, ισχύει η σχέση διατήρησης του πληθυσμού:

$$S + E + I + R = N \quad (2.5)$$

όπου N είναι ο συνολικός πληθυσμός του μοντέλου. Στην απλή μορφή του SEIR μοντέλου θεωρείται ότι ο συνολικός πληθυσμός παραμένει σταθερός, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη γεννήσεις ή φυσικοί θάνατοι.

Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζεται μια τυπική εξέλιξη των τεσσάρων καμπυλών του μοντέλου SEIR με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 2.8: Τυπικές καμπύλες του μοντέλου SEIR

2.5 Συνδυασμός Πρακτορικών και Επιδημιολογικών Μοντέλων

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια παρουσιάστηκαν τα πρακτορικά μοντέλα και τα μαθηματικά επιδημιολογικά μοντέλα, καθώς και τα βασικά πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί τους. Τα μαθηματικά μοντέλα προσφέρουν μια απλή και οργανωμένη προσέγγιση για τη μελέτη της εξάπλωσης ασθενειών σε επίπεδο πληθυσμού, ενώ τα πρακτορικά μοντέλα δίνουν τη δυνατότητα προσομοίωσης της ατομικής συμπεριφοράς και των τοπικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πρακτόρων.

Ο συνδυασμός των δύο προσεγγίσεων επιτρέπει τη δημιουργία πιο ρεαλιστικών και ευέλικτων μοντέλων προσομοίωσης. Μέσα από την ενσωμάτωση επιδημιολογικών μοντέλων, όπως το SEIR, σε πρακτορικά περιβάλλοντα όπως το Sugarscape, καθίσταται δυνατή η μελέτη της διάδοσης ασθενειών όχι μόνο σε συνολικό επίπεδο πληθυσμού, αλλά και σε επίπεδο ατόμων και κοινωνικών αλληλεπιδράσεων.

Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να μελετηθούν πιο αποτελεσματικά σύνθετα κοινωνικά φαινόμενα, όπως η εξάπλωση επιδημιών, η επίδραση της κινητικότητας των ατόμων, οι χωρικές αλληλεπιδράσεις και η δυναμική του πληθυσμού. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί τη βάση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στην οποία συνδυάζονται τα πρακτορικά μοντέλα με το επιδημιολογικό μοντέλο SEIR για τη μελέτη της διάδοσης ασθενειών σε ένα τεχνητό περιβάλλον προσομοίωσης.

2.6 Διακριτές Προσομοιώσεις (Discrete Event Simulation)

Πέρα από τις προσομοιώσεις που βασίζονται σε σταθερά χρονικά βήματα, μια άλλη ευρέως διαδεδομένη μεθοδολογία είναι η προσομοίωση διακριτών γεγονότων (Discrete Event Simulation, DES). Στην προσέγγιση αυτή, η κατάσταση του συστήματος μεταβάλλεται μόνο σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία, στα οποία λαμβάνει χώρα ένα γεγονός. Μεταξύ διαδοχικών γεγονότων το σύστημα παραμένει αμετάβλητο [18].

Σε ένα μοντέλο DES, τα γεγονότα αποθηκεύονται σε μια χρονικά ταξινομημένη ουρά και επεξεργάζονται με τη σειρά εμφάνισής τους. Κάθε γεγονός μπορεί με τη σειρά του να προκαλέσει νέα γεγονότα στο μέλλον. Με αυτόν τον τρόπο, η προσομοίωση προχωράει από γεγονός σε γεγονός, αντί να εξελίσσεται σε σταθερά χρονικά διαστήματα [18].

Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη όταν τα γεγονότα συμβαίνουν σπάνια ή σε ακανόνιστα χρονικά διαστήματα, καθώς αποφεύγεται ο περιττός υπολογισμός σε χρονικές στιγμές που δεν συμβαίνει τίποτα στο σύστημα. Παραδείγματα εφαρμογών αποτελούν τα συστήματα αναμονής (queueing systems), τα δίκτυα επικοινωνιών αλλά και ορισμένες επιδημιολογικές προσομοιώσεις, στις οποίες τα γεγονότα όπως μολύνσεις, αναρρώσεις ή θάνατοι λαμβάνουν χώρα σε διακριτές χρονικές στιγμές [23].

Τα πρακτορικά μοντέλα μπορούν να υλοποιηθούν είτε με προσέγγιση σταθερού χρονικού βήματος (time-step) είτε με προσέγγιση διακριτών γεγονότων (event-driven). Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η προσέγγιση σταθερού χρονικού βήματος, καθώς ταιριάζει καλύτερα στη φύση του μοντέλου, όπου σε κάθε χρονική στιγμή απαιτείται η ταυτόχρονη επικαιροποίηση της κατάστασης όλων των πρακτόρων (κίνηση, μεταβολισμός, αλληλεπιδράσεις).

Κεφάλαιο 3ο: Σχεδιασμός και Υλοποίηση Συστήματος

3.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του προγράμματος και των μηχανισμών προσομοίωσης. Το σύστημα βασίζεται στο περιβάλλον του Sugarscape ενσωματώνοντας το επιδημιολογικό μοντέλο SEIR. Ο προγραμματισμός γίνεται σε Java. Στόχος είναι η δημιουργία ενός υπολογιστικού εργαλείου που θα μελετά την δυναμική της διάδοσης των ασθενειών και των παραμέτρων που την διέπουν.

3.2 Περιγραφή του Συστήματος Προσομοίωσης

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται το σύστημα προσομοίωσης σε υψηλό επίπεδο. Αναλύεται η συνολική αρχιτεκτονική του και περιγράφονται το περιβάλλον ανάπτυξης και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίησή του. Η προσομοίωση αφορά τη δημιουργία μιας περιοχής πόλης, μέσα στην οποία οι πράκτορες εκτελούν τις καθημερινές τους ρουτίνες, όπως η μετάβαση στην εργασία, στο σχολείο ή σε χώρους διασκέδασης. Μέσα από την προσομοίωση αυτής της καθημερινότητας μελετάται η διάδοση της ασθένειας και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται από τις καθημερινές συνήθειες των πρακτόρων.

3.2.1 Αρχιτεκτονική του Συστήματος

Το πρόγραμμα αποτελείται από ορισμένα βασικά μέρη τα οποία συνεργάζονται για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Το περιβάλλον της προσομοίωσης αναπαρίσταται ως ένα δισδιάστατο πλέγμα (grid), όπου κάθε θέση (x,y) αντιστοιχεί σε ένα κελί του χώρου. Οι πράκτορες κινούνται και αλληλεπιδρούν μέσα σε αυτό το περιβάλλον, ακολουθώντας συγκεκριμένους κανόνες συμπεριφοράς.

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρακτόρων μπορούν να οδηγήσουν στη μετάδοση της ασθένειας, σύμφωνα με τους κανόνες του μοντέλου SEIR και τις παραμέτρους της προσομοίωσης. Η εκτέλεση της προσομοίωσης πραγματοποιείται σε διακριτά χρονικά βήματα (ticks), τα οποία καθορίζονται κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης.

Η παρακολούθηση και ο έλεγχος της προσομοίωσης πραγματοποιούνται μέσω του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (GUI), το οποίο επιτρέπει την εκκίνηση, την παύση και την οπτικοποίηση της προσομοίωσης.

Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης συλλέγονται δεδομένα και στατιστικά στοιχεία σχετικά με την εξέλιξη της νόσου και του πληθυσμού. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται και παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων, επιτρέποντας την παρατήρηση μεταβολών στις κατηγορίες των πρακτόρων, της εξέλιξης της επιδημίας και άλλων χαρακτηριστικών του συστήματος.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος ακολουθεί το πρότυπο Model-View-Controller (MVC), με διαχωρισμό ανάμεσα στη λογική της προσομοίωσης, στη γραφική αναπαράσταση και στον έλεγχο της ροής εκτέλεσης. Το Model περιλαμβάνει τις κλάσεις που αναπαριστούν την κατάσταση και τη συμπεριφορά του συστήματος, το View αποτελείται από το γραφικό περιβάλλον χρήστη και τα διαγράμματα, ενώ η ροή εκτέλεσης ελέγχεται από το γραφικό περιβάλλον μέσω αντίστοιχων χειριστών συμβάντων.

Μια σημαντική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση είναι το διπλό buffering του χωρικού πλέγματος. Σε κάθε χρονικό βήμα διατηρούνται δύο αντίγραφα του πλέγματος, το τρέχον και το

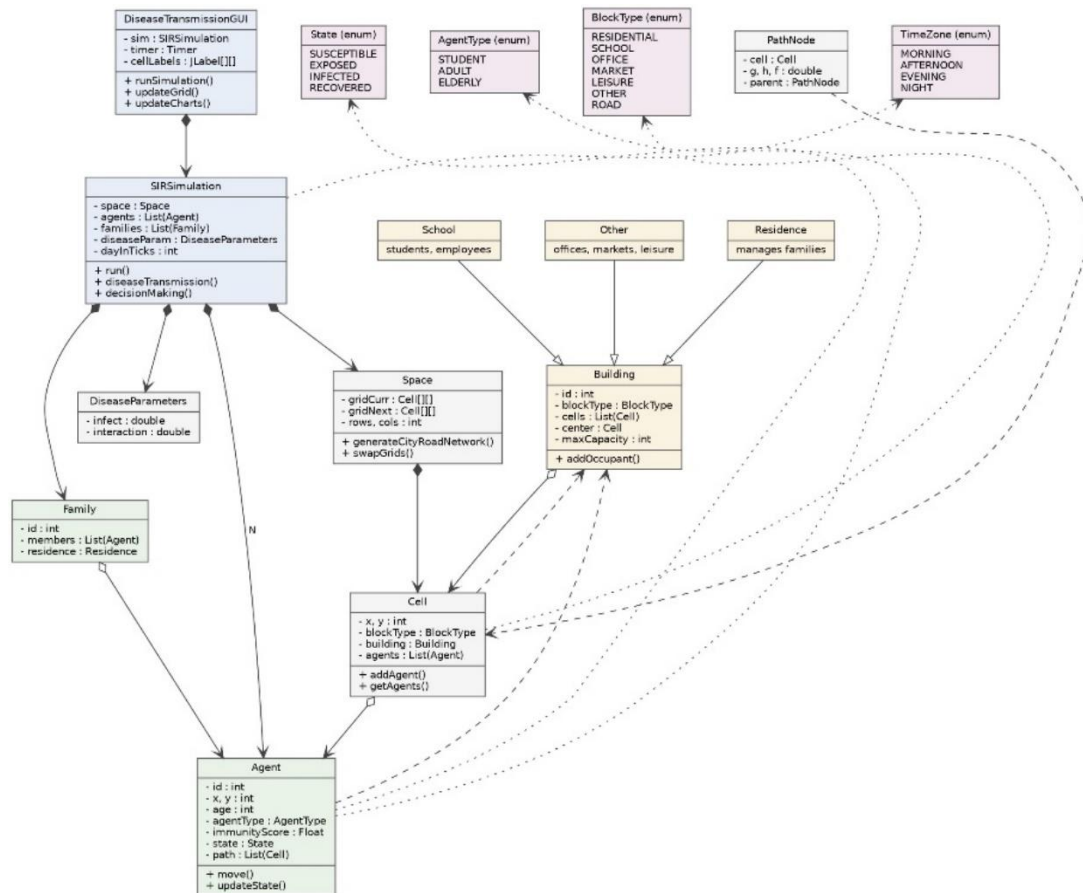
επόμενο. Η κατάσταση του συστήματος διαβάζεται από το τρέχον πλέγμα και η νέα κατάσταση γράφεται στο επόμενο, ενώ στο τέλος του βήματος τα δύο πλέγματα ανταλλάσσονται. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η σύγχρονη ενημέρωση όλων των πρακτόρων, χωρίς να επηρεάζει η σειρά επεξεργασίας τους τα αποτελέσματα, παρέχοντας ρεαλιστικότητα στο σύστημα.

Για την οργάνωση των κτιρίων εφαρμόστηκε κληρονομικότητα. Η κλάση **Building** αποτελεί τη βάση από την οποία κληρονομούν οι ειδικότερες κλάσεις **Residence**, **School** και **Other**, η καθεμία με τα δικά της χαρακτηριστικά και τη δική της συμπεριφορά. Επιπλέον, για την επιλογή προορισμών των πρακτόρων εφαρμόζεται μια στρατηγική σταθμισμένης πιθανοτικής επιλογής (**SoftMax**), η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.5.2, ενώ για την εύρεση διαδρομών μεταξύ προορισμών χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος **A***.

Το σύστημα αποτελείται από δεκαεννέα κλάσεις, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι οι εξής:

- **Space**: αναπαριστά το δισδιάστατο περιβάλλον της προσομοίωσης. Διαχειρίζεται το πλέγμα κελιών, τη δημιουργία του οδικού δικτύου και την κατανομή των κτιρίων στον χώρο.
- **Cell**: αντιπροσωπεύει ένα κελί του πλέγματος. Περιέχει πληροφορίες όπως τις συντεταγμένες του, τον τύπο του και τους πράκτορες που βρίσκονται σε αυτό.
- **Building**: αναπαριστά ένα κτίριο, το οποίο καταλαμβάνει ένα ακριβώς κελί. Από αυτή την κλάση κληρονομούν οι **Residence**, **School** και **Other**.
- **Agent**: αναπαριστά έναν πράκτορα του πληθυσμού. Περιέχει ατομικά χαρακτηριστικά όπως ηλικία, ανοσοποιητικό σύστημα, κατάσταση υγείας, οικογένεια, κατοικία, εργασία, στόχο και διαδρομή κίνησης.
- **Family**: ομαδοποιεί πράκτορες που μένουν στην ίδια κατοικία.
- **DiseaseParameters**: συγκεντρώνει τις παραμέτρους της ασθένειας, όπως τις πιθανότητες μόλυνσης και αλληλεπίδρασης.
- **SIRSimulation**: η κεντρική κλάση που συντονίζει την προσομοίωση. Διαχειρίζεται τους πράκτορες, τα κτίρια, τις οικογένειες, τη μετάδοση της ασθένειας και τη χρονική εξέλιξη του συστήματος.
- **DiseaseTransmissionGUI**: το γραφικό περιβάλλον χρήστη, υλοποιημένο με **Swing**. Επιτρέπει την εκκίνηση, την παύση και τον τερματισμό της προσομοίωσης, και οπτικοποιεί τον κόσμο και τα στατιστικά της επιδημίας.

Συμπληρωματικά, υπάρχουν αρκετές **enum** κλάσεις (**AgentType**, **BlockType**, **State**, **TimeZone**) που χρησιμοποιούνται ως **type-safe** σταθερές. Οι λεπτομέρειες υλοποίησης των βασικών κλάσεων και οι τιμές των **enum** κλάσεων παρατίθενται στο Παράρτημα της εργασίας. Οι σχέσεις μεταξύ των κύριων κλάσεων του συστήματος αποτυπώνονται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα κλάσεων (UML class diagram) – Κύριες κλάσεις και οι σχέσεις τους

3.2.2 Περιβάλλον Ανάπτυξης και Εργαλεία

Το πρόγραμμα υλοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Η ανάπτυξη του λογισμικού πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Apache NetBeans IDE, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη σύνταξη, μεταγλώττιση και αποσφαλμάτωση (debugging) του κώδικα.

Για την αναπαράσταση των στατιστικών δεδομένων και τη δημιουργία διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη JFreeChart. Επιπλέον, τα δεδομένα κάθε προσομοίωσης αποθηκεύονται σε αρχεία μορφής CSV, ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυσή τους.

3.3 Σχεδιασμός του Πρακτορικού Μοντέλου

3.3.1 Αναπαράσταση του Περιβάλλοντος

Το περιβάλλον, όπως αναφέρθηκε, είναι ένα διδιάστατο grid. Το μέγεθος του περιβάλλοντος εξαρτάται από τον αριθμό των στηλών και των γραμμών που καθορίζονται στην αρχή της προσομοίωσης.

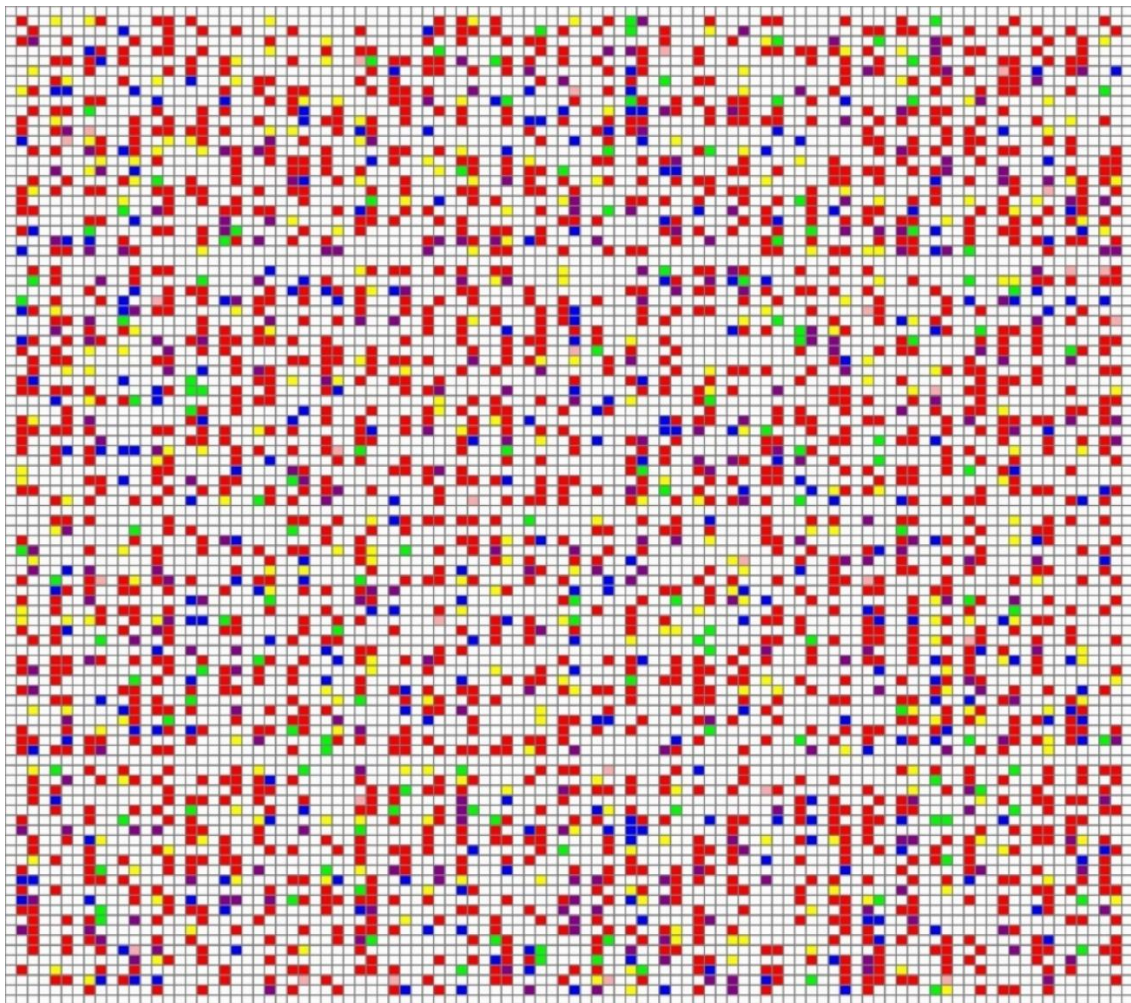
Κάθε θέση στο grid αποτελεί ένα κελί. Κάθε κελί έχει συντεταγμένες x και y. Επίσης, ένα κελί μπορεί να είναι τύπου δρόμου είτε τύπου κτηρίου (κατοικία, σχολείο, γραφείο, αγορά, αναψυχή, άλλο). Στην περίπτωση που το κελί είναι τύπου κτηρίου, τότε έχει ένα αντίστοιχο κτήριο. Πάνω στο κελί μπορεί να υπάρχει ένας ή πολλοί πράκτορες. Ο αριθμός των πρακτόρων εξαρτάται από το είδος του κελιού και

τον μέγιστο αριθμό πρακτόρων που μπορεί να φιλοξενήσει.

Όσον αφορά την αναπαράσταση των κτηρίων, η υλοποίηση υποστηρίζει κτήρια που καταλαμβάνουν ένα ή περισσότερα γειτονικά κελιά του πλέγματος. Για τον λόγο αυτό, κάθε κτήριο διατηρεί τη λίστα των κελιών που το αποτελούν, καθώς και ένα κεντρικό κελί (center), το οποίο υπολογίζεται ως το πλησιέστερο κελί στο γεωμετρικό κέντρο του κτηρίου και χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς απόστασης και κίνησης των πρακτόρων προς το κτήριο. Στην παρούσα εργασία, ωστόσο, επιλέχθηκε κάθε κτήριο να καταλαμβάνει ένα μόνο κελί, οπότε η λίστα κελιών κάθε κτηρίου περιέχει ένα στοιχείο και το κεντρικό κελί ταυτίζεται με αυτό.

Η γειτονιά ενός κελιού μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους. Πρώτον, σύμφωνα με τη σύμβαση Von Neumann, δηλαδή τα κελιά που έχουν άμεση επαφή με το κεντρικό κελί (πάνω, κάτω, αριστερά, δεξιά). Δεύτερον, σύμφωνα με τη σύμβαση Moore, περιλαμβάνοντας τα κελιά του είδους Von Neumann συν τα κελιά στις διαγωνίους (στο σύνολο οχτώ). Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε η γειτονιά Moore λόγω της ρεαλιστικότερης προσέγγισής της.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο του κόσμου της προσομοίωσης, όπου διακρίνονται τα διαφορετικά είδη κελιών.



Σχήμα 3.2: Στιγμιότυπο του κόσμου της προσομοίωσης. Οπτικοποίηση του δισδιάστατου πλέγματος. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό είδος κελιού — κόκκινο: κατοικία (residential), ροζ: σχολείο (school), μπλε: γραφείο (office), κίτρινο: αγορά (market), πράσινο: αναψυχή (leisure), μωβ: άλλο (other), λευκό: δρόμος (road)

3.3.2 Δομή και Χαρακτηριστικά Πρακτόρων

Οι πράκτορες του ABM της διπλωματικής εργασίας διαχωρίζονται από το μοναδικό και ξεχωριστό id τους. Σε κάθε χρονικό tick της προσομοίωσης αποθηκεύουν τις συντεταγμένες x και y στις οποίες βρίσκονται.

Κάθε πράκτορας έχει ηλικία και, σύμφωνα με αυτήν, κατατάσσεται σε ειδική κατηγορία πρακτόρων (μαθητών/παιδιών, ενηλίκων και ηλικιωμένων). Επιπλέον, ανήκει σε μια οικογένεια πρακτόρων που διαφέρει σε αριθμό μελών (από ένα έως πολυάριθμα), με τον περιορισμό πως ένας πράκτορας τύπου «μαθητή» δεν μπορεί να αποτελεί οικογένεια από μόνος του. Ανάλογα με τον τύπο στον οποίο ανήκει, ο πράκτορας έχει και το αντίστοιχο ανοσοποιητικό σύστημα (αδύναμο στους ηλικιωμένους, δυνατότερο στους νεότερους).

Ακόμη, ένα σημαντικό πεδίο του πράκτορα αποτελεί η κατάσταση υγείας στην οποία βρίσκεται, η χρονική διάρκεια που βρίσκεται στην κάθε κατάσταση υγείας και οι αντίστοιχες περίοδοι επώασης και μόλυνσης, που είναι διαφορετικές από πράκτορα σε πράκτορα.

Κάθε πράκτορας έχει συγκεκριμένα σταθερά κτήρια στα οποία απασχολείται (δουλειά, σχολείο, κατοικία) και εναλλασσόμενα κτήρια που επιλέγονται πιθανοτικά (αγορά, αναψυχή, άλλα). Τα σταθερά κτήρια αποθηκεύονται μόνιμα στη μνήμη του πράκτορα. Ανά μερικά χρονικά ticks, ο πράκτορας αλλάζει στόχο (μέρος του περιβάλλοντος όπου πρέπει να μεταφερθεί). Ο στόχος μπορεί να είναι κάποιο κτήριο ή η περιφορά στον δρόμο (βόλτα έξω). Ο στόχος επιλέγεται πιθανοτικά, σύμφωνα με τη χρονική περίοδο της ημέρας (πρωί, μεσημέρι, απόγευμα, βράδυ) και τη ρουτίνα που ακολουθεί ο πράκτορας. Τέλος, ο στόχος έχει και συγκεκριμένη διάρκεια, διαφορετική για κάθε πράκτορα. Επιπλέον, αποθηκεύεται και το μονοπάτι που θα ακολουθήσει ο πράκτορας από το σημείο που βρίσκεται έως το κελί-στόχο.

Οι πράκτορες, για λόγους διευκόλυνσης και εξυπηρέτησης του σεναρίου μελέτης διάδοσης ασθενειών, μπορούν να προβούν σε δύο συγκεκριμένες ενέργειες: την κίνηση στο περιβάλλον και την πιθανή μόλυνση μέσω συνάντησης πολλαπλών πρακτόρων στο ίδιο κελί. Δεν πεθαίνουν ούτε γεννιούνται καινούργιοι πράκτορες.

Όσον αφορά την αναπαράσταση των ιδιοτήτων κάθε πράκτορα στον κώδικα, χρησιμοποιούνται οι εξής τύποι δεδομένων. Το αναγνωριστικό (id), η ηλικία και οι συντεταγμένες (x, y) αναπαρίστανται ως ακέραιοι αριθμοί (int). Ο τύπος του πράκτορα αναπαρίσταται μέσω της απαρίθμησης AgentType, η οποία λαμβάνει τις τιμές STUDENT, ADULT ή ELDERLY, ενώ η κατάσταση υγείας μέσω της απαρίθμησης State, με τιμές SUSCEPTIBLE, EXPOSED, INFECTED ή RECOVERED. Το ανοσοποιητικό σύστημα δεν αναπαρίσταται ως δυαδική ακολουθία, αλλά ως ένας πραγματικός αριθμός (Float), ο οποίος ονομάζεται immunityScore και λαμβάνει τιμές περίπου από 0.20 έως 0.75. Η τιμή αυτή λειτουργεί ως συντελεστής που μειώνει την πιθανότητα μόλυνσης του πράκτορα: όσο μεγαλύτερη η τιμή, τόσο ισχυρότερο το ανοσοποιητικό και τόσο μικρότερη η πιθανότητα να νοσήσει. Οι περίοδοι επώασης και νόσησης αποθηκεύονται ως ακέραιοι αριθμοί ημερών. Τέλος, το μονοπάτι κίνησης του πράκτορα αποθηκεύεται ως μια λίστα κελιών (List, υλοποιημένη ως ArrayList), η οποία περιέχει με τη σειρά τα κελιά από τα οποία θα διέλθει ο πράκτορας έως τον προορισμό του, ενώ οι ημερήσιες επαφές του αποθηκεύονται σε ένα σύνολο ακεραίων (Set) που περιέχει τα αναγνωριστικά των πρακτόρων με τους οποίους ήρθε σε επαφή.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι βασικές παράμετροι του πράκτορα μαζί με

ενδεικτικές τιμές για κάθε ηλικιακή κατηγορία.

Πίνακας 3.1: Βασικές παράμετροι του πράκτορα ανά ηλικιακή κατηγορία

Παράμετρος	Μαθητές (STUDENT)	Ενήλικες (ADULT)	Ηλικιωμένοι (ELDERLY)
Ποσοστό πληθυσμού [14]	20%	65%	15%
Μέση τιμή ανοσίας (immunityScore) [13]	0.45	0.55	0.35
Εύρος τιμών ανοσίας [13]	0.25 – 0.65	0.35 – 0.75	0.20 – 0.50
Περίοδος επώασης [13]	1 – 4 ημέρες	1 – 4 ημέρες	1 – 4 ημέρες
Περίοδος νόσησης [13]	4 – 12 ημέρες	3 – 7 ημέρες	4 – 12 ημέρες

Σημείωση: Οι τιμές της ανοσίας παράγονται με χρήση κανονικής (Gaussian) κατανομής γύρω από τη μέση τιμή, περιορισμένες στο αντίστοιχο εύρος. Οι περίοδοι επώασης και νόσησης επιλέγονται τυχαία εντός των παραπάνω διαστημάτων, ώστε να διαφέρουν από πράκτορα σε πράκτορα.

3.3.3 Ενσωμάτωση του Μοντέλου SEIR

Στο κλασικό μοντέλο SEIR, η παράμετρος β εκφράζει τον συνολικό ρυθμό μετάδοσης της νόσου, σύμφωνα με την σχέση (2.1):

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{SI}{N} \quad (2.1)$$

Η παράμετρος αυτή δεν αποτελεί απλή πιθανότητα μόλυνσης, αλλά έναν συγκεντρωτικό ρυθμό που ενσωματώνει τη συχνότητα επαφών μεταξύ ατόμων, την πιθανότητα μετάδοσης ανά επαφή και την παραδοχή ότι όλα τα άτομα μπορούν να αλληλεπιδράσουν ισότιμα μεταξύ τους [24].

Στο παρόν ABM, η μετάδοση της νόσου δεν υλοποιείται μέσω ενός καθολικού ρυθμού. Ένας ευπαθής πράκτορας μπορεί να μολυνθεί μόνο όταν έρθει σε επαφή με μολυσματικό πράκτορα στο ίδιο κελί. Η μετάδοση καθορίζεται από μια πιθανότητα μόλυνσης p ανά επαφή, σύμφωνα με την σχέση (3.1):

$$P(\text{infection}|\text{contact}) = p \quad (3.1)$$

Κατά συνέπεια, η επιδημιολογική δυναμική προκύπτει αναδυόμενα από την κίνηση των πρακτόρων,

την τοπική πυκνότητα του πληθυσμού, τη συχνότητα χωρικών επαφών και την πιθανότητα μετάδοσης ανά επαφή.

Η σχέση μεταξύ της κλασικής παραμέτρου β και της υλοποίησης στο ABM μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την σχέση (3.2):

$$\beta = c * p \quad (3.2)$$

όπου c είναι ο μέσος αριθμός επαφών ανά χρονική μονάδα και p η πιθανότητα μετάδοσης ανά επαφή. Στο ABM, η παράμετρος c δεν ορίζεται ρητά, αλλά προκύπτει δυναμικά από την κίνηση και τις χωρικές αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων.

Παράμετρος επώασης

Στο κλασικό SEIR, η παράμετρος σ εκφράζει τον ρυθμό μετάβασης από την κατάσταση «εκτεθειμένος» στην κατάσταση «μολυσματικός», όπως φαίνεται στην σχέση (2.3):

$$\frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I \quad (2.3)$$

και ορίζεται ως ο αντίστροφος του μέσου χρόνου επώασης, σύμφωνα με την σχέση (3.3):

$$\sigma = \frac{1}{T_{incubation}} \quad (3.3)$$

Στο ABM, η παράμετρος δεν εφαρμόζεται ως ρυθμός, αλλά ως ατομικός χρόνος επώασης για κάθε πράκτορα. Κάθε εκτεθειμένος πράκτορας παραμένει στην κατάσταση αυτή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, πιθανώς στοχαστικά παραγόμενο, πριν μεταβεί στη μολυσματική κατάσταση. Έτσι, η μετάβαση υλοποιείται μέσω χρονομέτρου (timer) και όχι μέσω ποσοστού πληθυσμού.

Παράμετρος ανάρρωσης

Στο SEIR, η παράμετρος γ εκφράζει τον ρυθμό μετάβασης από την κατάσταση «μολυσματικός» στην κατάσταση «αναρρώσας» και εμφανίζεται επίσης στη σχέση (2.3). Ορίζεται ως ο αντίστροφος του μέσου χρόνου νόσησης, σύμφωνα με τη σχέση (3.4):

$$\gamma = \frac{1}{T_{infectious}} \quad (3.4)$$

Στο ABM, κάθε πράκτορας παραμένει μολυσματικός για προκαθορισμένη διάρκεια και στη συνέχεια μεταβαίνει στην κατάσταση «αναρρώσας». Άρα η γ δεν χρησιμοποιείται ως συνεχής ρυθμός, αλλά ως ατομική διάρκεια νόσησης που καθορίζει τη στιγμή ανάρρωσης κάθε πράκτορα.

3.4 Μηχανισμοί Λειτουργίας της Προσομοίωσης

3.4.1 Κίνηση Πρακτόρων

Τα πεδία του πράκτορα που αφορούν τον στόχο του ενημερώνονται σε κάθε χρονικό tick. Εάν ολοκληρωθεί η διάρκεια του τωρινού στόχου, επιλέγεται ο επόμενος. Η διαδικασία επιλογής νέου στόχου είναι πιθανοτική. Ανάλογα με τη χρονική περίοδο της ημέρας, κάποια είδη στόχων έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγθούν. Για παράδειγμα, το πρωί οι μαθητές είναι πιο πιθανό να μετακινηθούν προς το σχολείο, ενώ οι ενήλικες προς την εργασία τους. Αντίστοιχα, κατά τις βραδινές ώρες οι πράκτορες έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να παραμείνουν στην κατοικία τους.

Σε περιπτώσεις όπου ο στόχος αφορά εναλλασσόμενα κτήρια, επιλέγεται πιθανοτικά και το συγκεκριμένο κτήριο που θα επισκεφθεί ο πράκτορας. Για παράδειγμα, στις δραστηριότητες αναψυχής υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα επιλογής πιο απομακρυσμένων προορισμών, ενώ για δραστηριότητες όπως οι αγορές προτιμώνται συνήθως κοντινότερες τοποθεσίες. Η παρουσία πολλών πρακτόρων σε ένα κελί δεν επηρεάζει την πιθανότητα επιλογής του ως στόχου.

Μόλις επιλεγθεί ο νέος στόχος του πράκτορα, υπολογίζεται το μονοπάτι που θα ακολουθήσει. Το μονοπάτι ξεκινά από το κελί στο οποίο βρίσκεται ο πράκτορας και καταλήγει στο κελί-στόχο. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος A^* (A-star), ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για την εύρεση σύντομων και αποδοτικών διαδρομών σε περιβάλλοντα πλέγματος.

3.4.2 Μετάδοση Ασθένειας

Η μετάδοση της ασθένειας πραγματοποιείται μεταξύ πρακτόρων που βρίσκονται στο ίδιο κελί. Για τον λόγο αυτό, σε κάθε χρονικό tick πραγματοποιούνται έλεγχοι σε όλα τα κελιά του δισδιάστατου πλέγματος και υπολογίζονται πιθανότητες μετάδοσης της νόσου.

Στην περίπτωση κελιών που ανήκουν στην κατηγορία «κατοικία», η μετάδοση πραγματοποιείται σε επίπεδο οικογένειας. Ένα κελί κατοικίας μπορεί να περιλαμβάνει μία ή περισσότερες οικογένειες, προσομοιώνοντας πρακτικά μία πολυκατοικία. Για τον λόγο αυτό, η πιθανότητα μόλυνσης περιορίζεται στα μέλη της ίδιας οικογένειας.

Αντίθετα, σε κελιά άλλων κατηγοριών, όπως χώροι εργασίας, σχολεία ή χώροι αναψυχής, η μετάδοση μπορεί να συμβεί μεταξύ όλων των πρακτόρων που βρίσκονται στο ίδιο κελί.

Για να υπάρξει πιθανότητα μετάδοσης απαιτείται η παρουσία τουλάχιστον ενός μολυσματικού πράκτορα και ενός ευάλωτου πράκτορα. Η πιθανότητα μόλυνσης εξαρτάται από παράγοντες όπως ο αριθμός των μολυσματικών πρακτόρων και ο συνολικός αριθμός των πρακτόρων που βρίσκονται στο κελί.

3.4.3 Μετάβαση Μεταξύ Επιδημιολογικών Καταστάσεων

Οι μεταβάσεις μεταξύ των επιδημιολογικών καταστάσεων πραγματοποιούνται σύμφωνα με τη λογική του μοντέλου SEIR. Κατά την αρχικοποίηση της προσομοίωσης, ο αριθμός των αρχικά εκτεθειμένων και μολυσμένων πρακτόρων καθορίζεται από παραμέτρους εισόδου, ενώ το υπόλοιπο πλήθος των πρακτόρων αρχικοποιείται στην κατάσταση «ευπαθής». Έτσι, η πλειοψηφία των πρακτόρων (~99.999%) στην αρχή της προσομοίωσης βρίσκεται στην κατάσταση «ευπαθής».

Όταν ένας μολυσματικός πράκτορας βρεθεί στο ίδιο κελί με έναν ευπαθή και πραγματοποιηθεί επιτυχής μετάδοση, ο ευπαθής πράκτορας μεταβαίνει στην κατάσταση «εκτεθειμένος». Σε αυτό το στάδιο έχει μολυνθεί αλλά δεν μπορεί ακόμη να μεταδώσει την ασθένεια.

Μετά την ολοκλήρωση της περιόδου επώασης, ο πράκτορας μεταβαίνει στην κατάσταση «μολυσμένος», όπου πλέον μπορεί να μεταδώσει τη νόσο σε άλλους πράκτορες. Όταν ολοκληρωθεί και η περίοδος νόσησης, μεταβαίνει στην κατάσταση «αναρρώσας». Στην κατάσταση αυτή ο πράκτορας δεν μπορεί πλέον να μεταδώσει την ασθένεια ούτε να μολυνθεί ξανά.

3.4.4 Εκτέλεση Χρονικών Βημάτων της Προσομοίωσης

Η προσομοίωση εκτελείται σε διακριτά χρονικά βήματα, τα οποία επαναλαμβάνονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του συστήματος. Σε κάθε χρονικό βήμα πραγματοποιούνται οι εξής διαδικασίες, με την ακόλουθη σειρά:

1. Αυξάνεται ο μετρητής χρονικών ticks και ενημερώνεται η χρονική περίοδος της ημέρας.
2. Ενημερώνονται οι στόχοι των πρακτόρων.
3. Επιλέγονται νέοι στόχοι για τους πράκτορες των οποίων ολοκληρώθηκε η προηγούμενη δραστηριότητα.
4. Υπολογίζονται νέα μονοπάτια κίνησης.
5. Οι πράκτορες μετακινούνται στο περιβάλλον.
6. Πραγματοποιούνται οι έλεγχοι μετάδοσης της ασθένειας.
7. Ενημερώνονται οι επιδημιολογικές καταστάσεις των πρακτόρων.

Στο τέλος κάθε ημέρας συλλέγονται στατιστικά δεδομένα σχετικά με την εξέλιξη της προσομοίωσης και πραγματοποιείται η οπτικοποίησή τους μέσω διαγραμμάτων.

3.5 Υλοποίηση σε Java

3.5.1 Βασικές Κλάσεις του Συστήματος

Το πρόγραμμα υλοποιήθηκε σε Java και οργανώνεται σε επιμέρους κλάσεις. Η κλάση Agent αναπαριστά έναν πράκτορα της προσομοίωσης. Κάθε πράκτορας διαθέτει μοναδικό αναγνωριστικό (id), συντεταγμένες θέσης (x, y) στο πλέγμα, ηλικιακό τύπο (AgentType: STUDENT, ADULT, ELDERLY), οικογένεια (Family), δυναμικότητα ανοσοποιητικού συστήματος (immunityScore) και επιδημιολογική κατάσταση (State). Επιπλέον, αποθηκεύονται η περίοδος επώασης (incubationPeriod) και η περίοδος νόσησης (infectiousPeriod), οι οποίες, όταν παράγονται κατά τη δημιουργία του πράκτορα, έχουν έναν βαθμό τυχειότητας και διαφέρουν από άτομο σε άτομο. Ακόμη, αποθηκεύονται και οι ημερήσιες επαφές (contacts) του πράκτορα με άλλους πράκτορες. Η κλάση διαχειρίζεται επίσης τον τρέχοντα στόχο του πράκτορα, το μονοπάτι κίνησης και έναν μετρητή χρόνου παραμονής στον στόχο.

Η κλάση Cell αναπαριστά ένα κελί του πλέγματος με συντεταγμένες x και y. Κάθε κελί φέρει τύπο (BlockType) και διατηρεί λίστα με τους πράκτορες που βρίσκονται σε αυτό εκείνη τη στιγμή. Η κλάση Space είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία και τη διαχείριση του διδιάστατου πλέγματος. Διατηρεί δύο πλέγματα παράλληλα: το gridCurr (τρέχουσα κατάσταση) και το gridNext (επόμενη κατάσταση). Σε κάθε χρονικό βήμα, οι ενημερώσεις γράφονται στο gridNext και στο τέλος τα δύο πλέγματα εναλλάσσονται μέσω της μεθόδου swapGrids(). Η προσέγγιση αυτή επιλέχθηκε λόγω της ρεαλιστικότητάς της, καθώς οι πράκτορες με αυτόν τον τρόπο αποφασίζουν ταυτόχρονα και όχι

σειριακά. Η κλάση αναλαμβάνει επίσης τη δημιουργία του χάρτη της πόλης μέσω της μεθόδου `generateCityRoadNetwork()`, η οποία τοποθετεί δρόμους και κτήρια διαφόρων τύπων στο πλέγμα.

Η κλάση `Building` αποτελεί τη βασική κλάση για όλα τα κτήρια. Κάθε κτήριο διαθέτει μοναδικό αναγνωριστικό (`id`), το είδος του κτηρίου (`BlockType`), λίστα κελιών που καταλαμβάνει, κεντρικό κελί (`center`) για τους υπολογισμούς μετακίνησης, μέγιστη χωρητικότητα και λίστα τρεχόντων ενοίκων. Αυτήν κληρονομούν τρεις υποκλάσεις: η `Residence`, που διαχειρίζεται οικογένειες αντί για μεμονωμένους πράκτορες, η `School`, η οποία διακρίνει μεταξύ μαθητών και υπαλλήλων, και η `Other`, που χρησιμοποιείται για γραφεία, αγορές, χώρους αναψυχής και λοιπά κτήρια.

Η κλάση `Family` αναπαριστά μια οικογένεια πρακτόρων. Κάθε οικογένεια έχει μοναδικό αναγνωριστικό (`id`), λίστα μελών και το κτήριο κατοικίας. Η οικογένεια παίζει ρόλο στην προσομοίωση της πολυκατοικίας και της ενδοοικιακής μετάδοσης: στα κελιά τύπου κατοικίας η μόλυνση περιορίζεται μεταξύ των μελών της ίδιας οικογένειας.

Η κλάση `DiseaseParameters` συγκεντρώνει τις παραμέτρους της ασθένειας. Συγκεκριμένα, ορίζει την πιθανότητα μόλυνσης ανά επαφή (`infect`) και την πιθανότητα αλληλεπίδρασης μεταξύ πρακτόρων στο ίδιο κελί (`interaction`).

Η κλάση `Node` χρησιμοποιείται αποκλειστικά από τον αλγόριθμο εύρεσης μονοπατιού A^* . Κάθε κόμβος αντιστοιχεί σε ένα κελί και αποθηκεύει το κόστος από την αρχή (g), την ευρετική εκτίμηση προς τον στόχο (h) και το συνολικό κόστος ($f = g + h$), καθώς και αναφορά στον κόμβο-γονέα για την ανακατασκευή του μονοπατιού.

Τέλος, οι κλάσεις τύπου `enum` `State`, `AgentType`, `BlockType` και `TimeZone` χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της επιδημιολογικής κατάστασης, του τύπου πράκτορα, του τύπου κελιού και της χρονικής περιόδου της ημέρας αντίστοιχα.

Ο κώδικας των βασικών κλάσεων και οι τιμές των `enum` κλάσεων παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα Α της εργασίας.

3.5.2 Διαχείριση Πληθυσμού

Η αρχικοποίηση του πληθυσμού πραγματοποιείται στην κλάση `SIRSimulation`. Κατά την εκκίνηση, δημιουργούνται N πράκτορες και τοποθετούνται τυχαία στο πλέγμα. Ο αρχικός αριθμός εκτεθειμένων (`EXPOSED`) και μολυσμένων (`INFECTED`) πρακτόρων καθορίζεται από παραμέτρους εισόδου, ενώ το υπόλοιπο πλήθος αρχικοποιείται στην κατάσταση `SUSCEPTIBLE`.

Στη συνέχεια, οι πράκτορες κατανέμονται σε οικογένειες μέσω της μεθόδου `createFamilies()`. Η διαδικασία διαχωρίζει τους πράκτορες σε ανηλίκους (`STUDENT`) και ενήλικους (`ADULT` ή `ELDERLY`). Σε κάθε οικογένεια ανατίθεται τυχαίος αριθμός ανηλίκων και ενήλικων, με τον περιορισμό ότι μια οικογένεια δεν μπορεί να αποτελείται αποκλειστικά από ανηλίκους.

Μετά τη δημιουργία των οικογενειών, εκτελείται η μέθοδος `setResidenceOccupation()`, η οποία αναθέτει σε κάθε οικογένεια ένα κτήριο κατοικίας με διαθέσιμο χώρο. Παράλληλα, για κάθε μέλος της οικογένειας καλείται η μέθοδος `setOccupation()`, η οποία αναθέτει σε κάθε μαθητή ένα σχολείο και σε κάθε ενήλικα έναν χώρο εργασίας.

Η επιλογή των κτηρίων βασίζεται στον αλγόριθμο `SoftMax` με παράμετρο απόστασης β , ώστε να ευνοούνται κοντινότερες τοποθεσίες [15]. Συγκεκριμένα, για κάθε υποψήφιο κτήριο υπολογίζεται ένα βάρος ανάλογο της σχέσης (3.5):

$$e^{-\beta d} \quad (3.5)$$

όπου d είναι η απόσταση του πράκτορα από το κτήριο, και στη συνέχεια η επιλογή γίνεται πιθανοτικά με βάση τα βάρη αυτά. Με τον τρόπο αυτό, τα κοντινότερα κτήρια έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν, χωρίς όμως να αποκλείονται εντελώς τα πιο απομακρυσμένα. Ο αλγόριθμος SoftMax αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη συνάρτηση για τη μετατροπή τιμών σε πιθανότητες [15].

Κάθε πράκτορας αποθηκεύει μόνιμα αναφορές στην κατοικία, το σχολείο ή την εργασία του, για να τις χρησιμοποιεί κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

3.5.3 Λειτουργία προσομοίωσης

Η εκτέλεση της προσομοίωσης ελέγχεται από την κλάση DiseaseTransmissionGUI, η οποία παρέχει γραφικό περιβάλλον με κουμπιά εκκίνησης, παύσης και τερματισμού της προσομοίωσης. Η επανάληψη των χρονικών βημάτων υλοποιείται μέσω `javax.swing.Timer` με διάστημα 100ms ανά βήμα.

Σε κάθε χρονικό βήμα εκτελείται η μέθοδος `run()` της `SIRSimulation`, η οποία ακολουθεί την εξής σειρά: ενημερώνεται η χρονική ζώνη της ημέρας (`updateTimeZone()`), εκτελείται η μετάδοση ασθένειας (`diseaseTransmission()`), ενημερώνονται οι στόχοι και τα μονοπάτια κάθε πράκτορα, μετακινούνται οι πράκτορες και ενημερώνονται οι επιδημιολογικές καταστάσεις τους. Στο τέλος τα δύο πλέγματα εναλλάσσονται.

Κάθε προσομοιωμένη ημέρα αντιστοιχεί σε `dayInTicks = 288` χρονικά βήματα. Ο αριθμός αυτός προκύπτει από την επιλογή κάθε tick να αντιστοιχεί σε 5 πραγματικά λεπτά: καθώς μία ημέρα έχει 24 ώρες, δηλαδή 1440 λεπτά, και κάθε tick καλύπτει 5 λεπτά, προκύπτουν $1440 / 5 = 288$ ticks ανά ημέρα. Η επιλογή αυτή προσφέρει επαρκή χρονική ανάλυση ώστε να αποτυπώνονται ρεαλιστικά οι καθημερινές μετακινήσεις και αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων, χωρίς υπερβολικό υπολογιστικό κόστος.

Στο τέλος κάθε ημέρας ενημερώνονται τα τρία διαγράμματα: η κλάση `SIRCurves` εμφανίζει τις καμπύλες S, E, I, R, η `SIRDeltaCurves` εμφανίζει τις ημερήσιες μεταβολές $\Delta(S)$, $\Delta(E)$, $\Delta(I)$, $\Delta(R)$, και η `dailyInfections` εμφανίζει εβδομαδιαίο ραβδόγραμμα νέων μολύνσεων κανονικοποιημένο ως προς τον πληθυσμό. Όλα τα διαγράμματα, του περιβάλλοντος Apache NetBeans IDE, υλοποιούνται με τη βιβλιοθήκη JFreeChart.

Κεφάλαιο 4ο: Πειραματική Μελέτη και Αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική μελέτη που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του συστήματος προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στόχος των πειραμάτων είναι η μελέτη της δυναμικής διάδοσης μιας ασθένειας μέσα στον τεχνητό πληθυσμό, καθώς και η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο διαφορετικές παράμετροι επηρεάζουν την εξέλιξη της επιδημίας.

Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν τρία σενάρια. Το πρώτο αποτελεί το σενάριο βάσης, στο οποίο χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες, σταθερές τιμές για όλες τις παραμέτρους και λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για τα υπόλοιπα. Το δεύτερο σενάριο εξετάζει την επίδραση του μεγέθους του πληθυσμού, μεταβάλλοντας μόνο τον αριθμό των πρακτόρων σε σχέση με το σενάριο βάσης και διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές. Το τρίτο σενάριο εξετάζει την επίδραση της μεταδοτικότητας, μεταβάλλοντας μόνο την πιθανότητα μόλυνσης ανά επαφή.

Κάθε σενάριο μελετήθηκε μέσα από πολλαπλές εκτελέσεις της προσομοίωσης, ώστε να μειωθεί η επίδραση της τυχαιότητας που είναι εγγενής στα πρακτορικά μοντέλα. Τα αποτελέσματα των επιμέρους εκτελέσεων στη συνέχεια συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν με τη χρήση μέσων όρων.

Η ασθένεια που επιλέχθηκε ως αντικείμενο μελέτης είναι η εποχική γρίπη, καθώς πρόκειται για μια ασθένεια με σαφή περίοδο επώασης και μετάδοσης, η οποία περιγράφεται κατάλληλα από το μοντέλο SEIR.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται αρχικά οι ρυθμίσεις και οι παράμετροι των προσομοιώσεων, έπειτα ο τρόπος εκτέλεσής τους, και τέλος τα αποτελέσματα μέσα από διαγράμματα και η ανάλυσή τους. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη συζήτηση των αποτελεσμάτων.

4.2 Ρυθμίσεις Προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι παράμετροι του μοντέλου και οι αρχικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις. Αρχικά περιγράφεται το σενάριο βάσης, το οποίο αποτελεί το σημείο αναφοράς, και στη συνέχεια οι μεταβολές που εφαρμόστηκαν στα υπόλοιπα σενάρια.

4.2.1 Παράμετροι Μοντέλου

Το σενάριο βάσης χρησιμοποιεί ένα σύνολο σταθερών παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Ο πληθυσμός αποτελείται από 15.000 πράκτορες που κινούνται σε ένα πλέγμα διαστάσεων 100×100 . Κάθε χρονικό βήμα (tick) αντιστοιχεί σε 5 πραγματικά λεπτά, οπότε κάθε προσομοιωμένη ημέρα αποτελείται από 288 ticks. Η συνολική διάρκεια κάθε προσομοίωσης είναι περίπου 180 ημέρες, ώστε να καλύπτεται πλήρως η εξέλιξη μιας εποχικής επιδημίας γρίπης.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι του σεναρίου βάσης

Παράμετρος	Τιμή
Πληθυσμός (N)	15.000

Διαστάσεις πλέγματος	100 × 100
Διάρκεια ενός tick	5 λεπτά
Ticks ανά ημέρα	288
Διάρκεια προσομοίωσης	~180 ημέρες
Πιθανότητα μόλυνσης ανά επαφή (p)	0,12
Πιθανότητα αλληλεπίδρασης	0,15
Ποσοστό αρχικά εκτεθειμένων	0,05%

Η πιθανότητα μόλυνσης ανά επαφή εκφράζει την πιθανότητα να μεταδοθεί η νόσος από έναν μολυσματικό σε έναν ευάλωτο πράκτορα κατά τη διάρκεια μιας επαφής, ενώ η πιθανότητα αλληλεπίδρασης εκφράζει την πιθανότητα δύο πράκτορες που βρίσκονται στο ίδιο κελί να έρθουν πράγματι σε επαφή. Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.4.2, η τελική πιθανότητα μετάδοσης σε κάθε κελί εξαρτάται επιπλέον από τον αριθμό των μολυσματικών και των συνολικών πρακτόρων στο κελί, καθώς και από την ατομική ανοσία κάθε ευάλωτου πράκτορα. Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης το 0,05% των πρακτόρων είναι εκτεθειμένοι.

Με βάση το σενάριο αυτό, σχεδιάστηκαν δύο επιπλέον σενάρια, καθένα από τα οποία μεταβάλλει μία μόνο παράμετρο, διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες σταθερές. Στο σενάριο πληθυσμού μεταβάλλεται μόνο ο αριθμός των πρακτόρων, ενώ στο σενάριο μεταδοτικότητας μεταβάλλεται μόνο η πιθανότητα μόλυνσης ανά επαφή. Οι ακριβείς τιμές κάθε σεναρίου και των παραλλαγών του παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Τιμές παραμέτρων ανά σενάριο και παραλλαγή

Σενάριο	Παραλλαγή	Πληθυσμός (N)	Πιθανότητα μόλυνσης (p)
Βάσης	-	15.000	0,12
Πληθυσμού	Μειωμένος	12.000	0,12
Πληθυσμού	Αυξημένος	18.000	0,12
Μεταδοτικότητας	Μειωμένη	15.000	0,10
Μεταδοτικότητας	Αυξημένη	15.000	0,14

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2, σε κάθε παραλλαγή μεταβάλλεται αποκλειστικά μία παράμετρος σε σχέση με το σενάριο βάσης. Με τον τρόπο αυτό, οποιαδήποτε διαφορά στα αποτελέσματα μπορεί να αποδοθεί άμεσα στη συγκεκριμένη παράμετρο που άλλαξε.

4.2.2 Αρχικές Συνθήκες

Κατά την έναρξη κάθε προσομοίωσης, οι πράκτορες τοποθετούνται τυχαία στο πλέγμα και κατανέμονται σε ηλικιακές κατηγορίες, σε οικογένειες, κατοικίες και χώρους εργασίας ή εκπαίδευσης, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.5.2. Η ηλικιακή σύνθεση του πληθυσμού παραμένει σταθερή σε όλα τα σενάρια, με περίπου 20% μαθητές, 65% ενήλικες και 15% ηλικιωμένους.

Όσον αφορά την αρχική επιδημιολογική κατάσταση, η συντριπτική πλειοψηφία των πρακτόρων ξεκινά στην κατάσταση «ευάλωτος» (Susceptible). Ένα πολύ μικρό ποσοστό του πληθυσμού, περίπου 0,05%, αρχικοποιείται στην κατάσταση «εκτεθειμένος» (Exposed), ώστε να αποτελέσει την αρχική εστία της επιδημίας, ενώ κανένας πράκτορας δεν βρίσκεται αρχικά στην κατάσταση «μολυσμένος» ή «αναρρώσας». Με αυτόν τον τρόπο, η επιδημία ξεκινά από έναν πολύ μικρό αριθμό φορέων και εξελίσσεται φυσικά μέσα από τις αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων.

Επιπλέον, σε κάθε χρονικό βήμα υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα ένας ευάλωτος πράκτορας να μολυνθεί από εξωτερική πηγή, ανεξάρτητα από τις επαφές του εντός του πληθυσμού. Ο μηχανισμός αυτός προσομοιώνει την εισαγωγή της νόσου από το εξωτερικό περιβάλλον και διασφαλίζει ότι η επιδημία μπορεί να ξεκινήσει ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η αρχική εστία αποσβεστεί.

4.3 Εκτέλεση Προσομοιώσεων

Για κάθε παραλλαγή των σεναρίων πραγματοποιήθηκαν τρεις ανεξάρτητες εκτελέσεις της προσομοίωσης. Η επιλογή αυτή έγινε επειδή τα πρακτορικά μοντέλα περιλαμβάνουν σημαντικό βαθμό τυχαιότητας: η αρχική τοποθέτηση των πρακτόρων, η επιλογή στόχων, οι διαδρομές κίνησης και η μετάδοση της νόσου καθορίζονται εν μέρει στοχαστικά. Συνεπώς, δύο εκτελέσεις με τις ίδιες ακριβώς παραμέτρους δεν δίνουν ποτέ πανομοιότυπα αποτελέσματα. Με τη χρήση πολλαπλών εκτελέσεων και τον υπολογισμό μέσων όρων, μειώνεται η επίδραση αυτής της τυχαιότητας και προκύπτει μια πιο αντιπροσωπευτική εικόνα της εξέλιξης της επιδημίας.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δεκαπέντε εκτελέσεις: τρεις για το σενάριο βάσης, έξι για το σενάριο πληθυσμού (τρεις για κάθε μία από τις δύο παραλλαγές) και έξι για το σενάριο μεταδοτικότητας (τρεις για κάθε παραλλαγή).

Κατά τη διάρκεια κάθε εκτέλεσης, στο τέλος κάθε προσομοιωμένης ημέρας καταγράφονται σε αρχείο μορφής CSV η ημέρα, ο αριθμός των ευάλωτων (S), εκτεθειμένων (E), μολυσμένων (I) και αναρρωσάντων (R) πρακτόρων, καθώς και ο αριθμός των νέων ημερήσιων κρουσμάτων. Επιπλέον, στο τέλος κάθε εκτέλεσης υπολογίζεται και αποθηκεύεται ο δείκτης προσβολής (attack rate) ανά ηλικιακή κατηγορία, δηλαδή το ποσοστό των πρακτόρων κάθε κατηγορίας που νόσησαν κατά τη διάρκεια της επιδημίας.

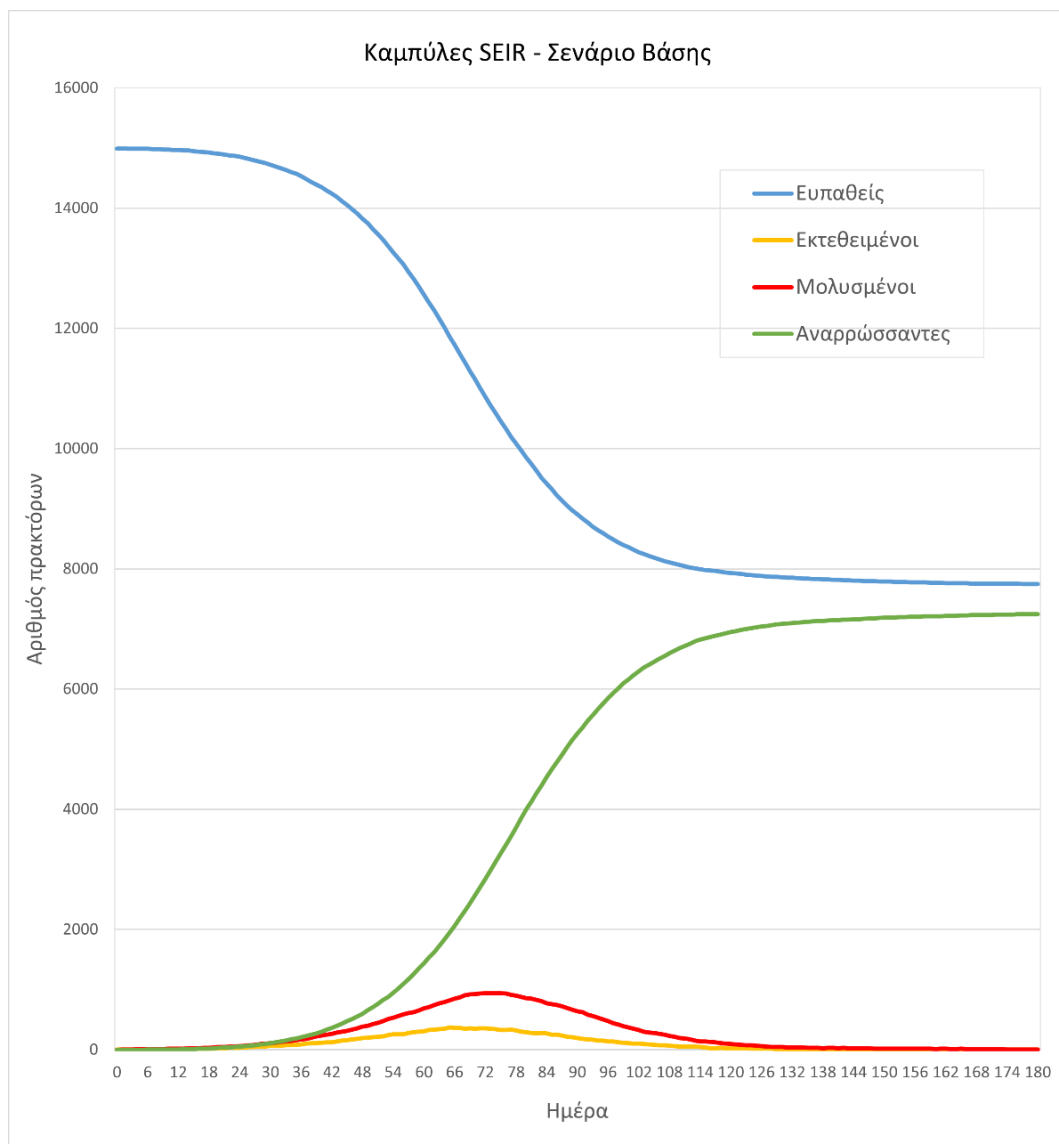
Μετά την ολοκλήρωση των τριών εκτελέσεων κάθε παραλλαγής, τα αντίστοιχα αρχεία συνδυάζονται με τον υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών για κάθε ημέρα. Έτσι, για κάθε παραλλαγή προκύπτει ένα τελικό, μέσο σύνολο δεδομένων, το οποίο περιγράφει τη μέση εξέλιξη των μεγεθών S, E, I, R, των ημερήσιων κρουσμάτων και του δείκτη προσβολής. Τα σύνολα αυτά αποτελούν τη βάση για την παρουσίαση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων που ακολουθούν στις επόμενες ενότητες.

4.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

4.4.1 Διαγράμματα Εξέλιξης της Επιδημίας

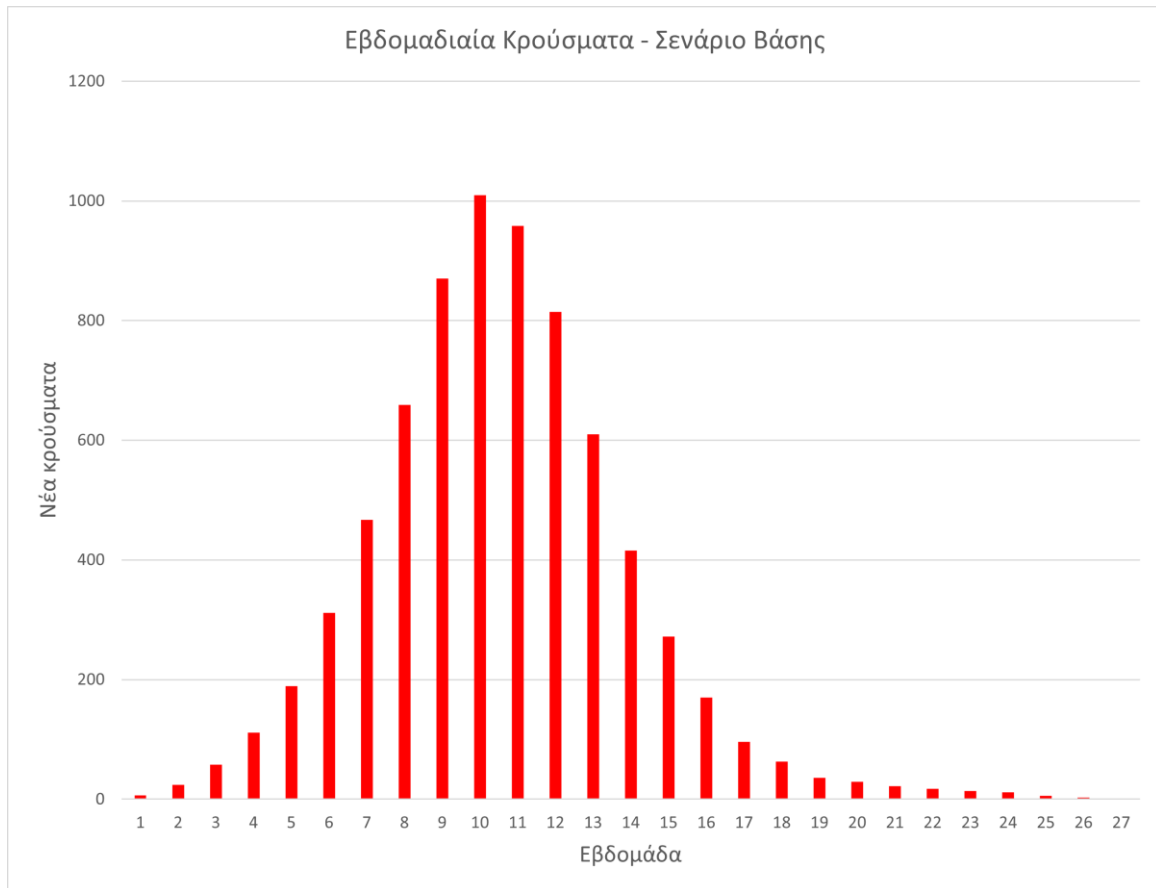
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της επιδημίας για κάθε σενάριο, μέσα από τις καμπύλες SEIR και τα εβδομαδιαία κρούσματα.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες SEIR του σεναρίου βάσης. Παρατηρείται η χαρακτηριστική μορφή μιας επιδημίας: ο αριθμός των ευάλωτων (S) μειώνεται σταδιακά καθώς η νόσος εξαπλώνεται, ο αριθμός των μολυσμένων (I) αυξάνεται μέχρι να φτάσει σε μια κορύφωση και στη συνέχεια υποχωρεί, ενώ ο αριθμός των αναρρώσαντων (R) αυξάνεται μονότονα μέχρι να σταθεροποιηθεί. Η καμπύλη των εκτεθειμένων (E) προηγείται πάντα ελαφρώς της καμπύλης των μολυσμένων, αντικατοπτρίζοντας την περίοδο επώασης. Στο σενάριο βάσης, η επιδημία κορυφώνεται περίπου την 72η ημέρα, με μέγιστο αριθμό ταυτόχρονα μολυσμένων 944 πρακτόρων.



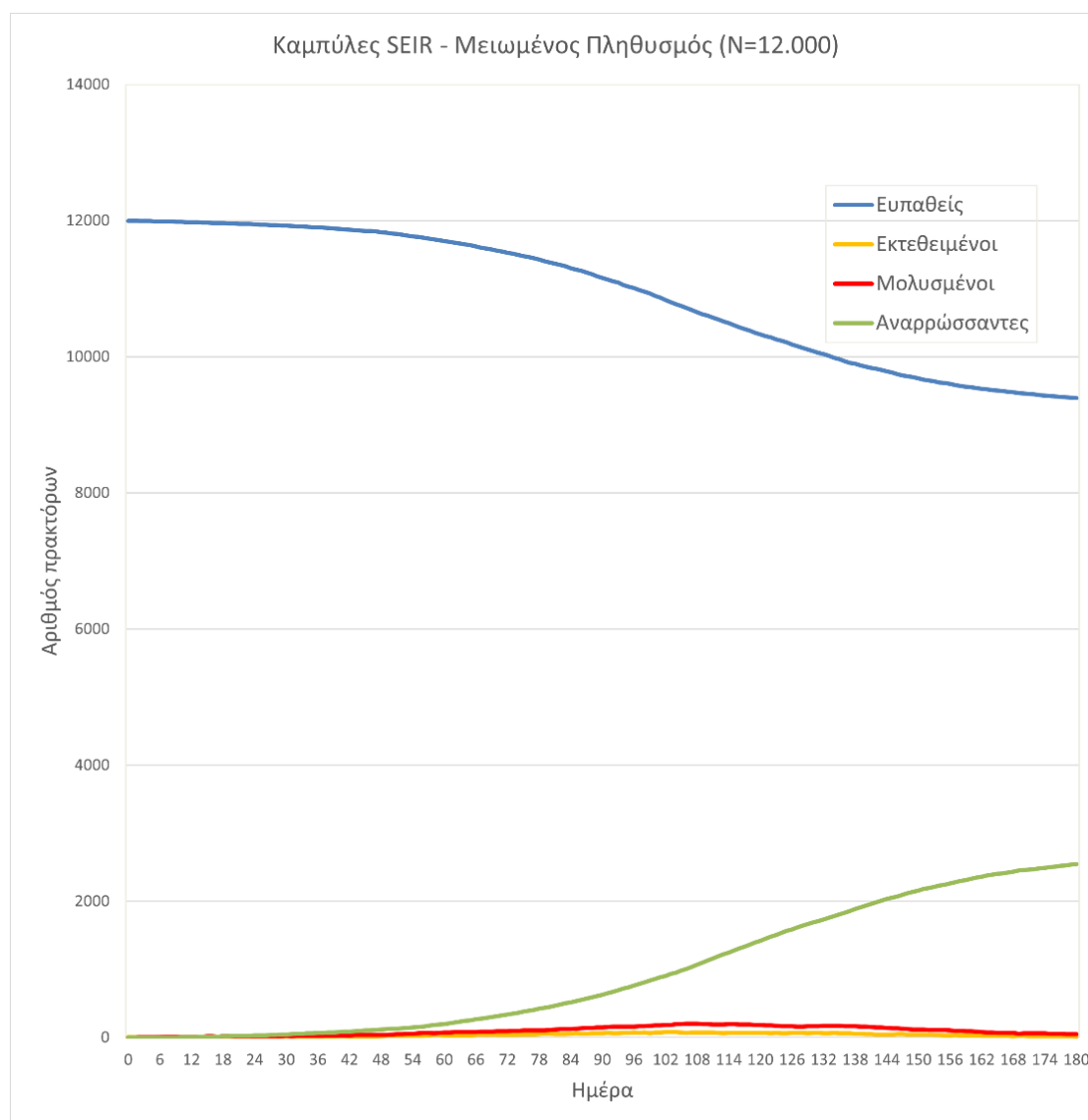
Σχήμα 4.1: Καμπύλες SEIR – Σενάριο Βάσης

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τα εβδομαδιαία κρούσματα του σεναρίου βάσης. Το ραβδόγραμμα αυτό αποτυπώνει τον αριθμό των νέων μολύνσεων ανά εβδομάδα και αναδεικνύει το «κύμα» της επιδημίας: μια αρχική φάση προοδευτικής αύξησης, την σταδιακή κορύφωση (την 10^η βδομάδα) και έπειτα μια αντίστοιχη αποκλιμάκωση.

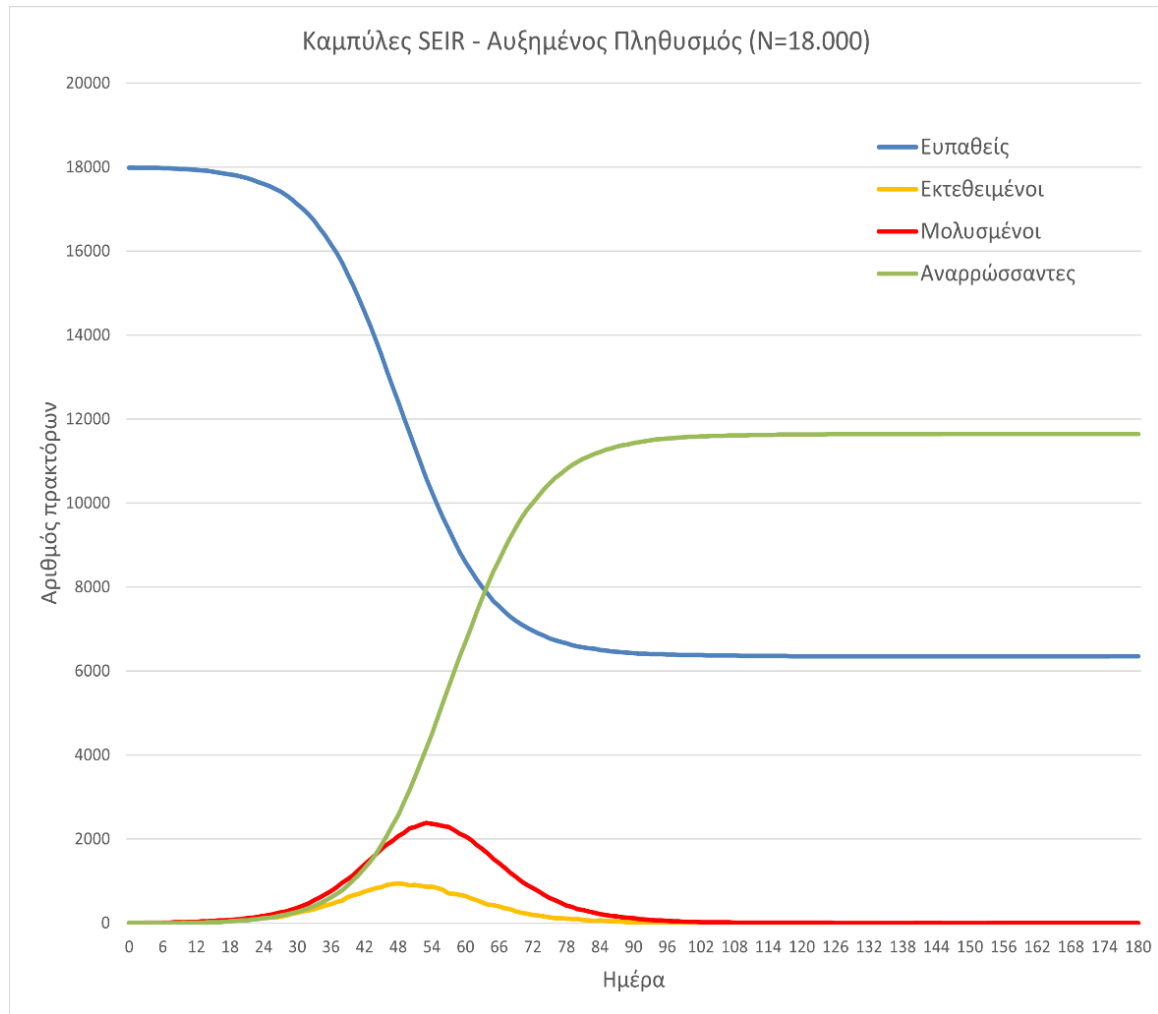


Σχήμα 4.2: Εβδομαδιαία Κρούσματα – Σενάριο Βάσης

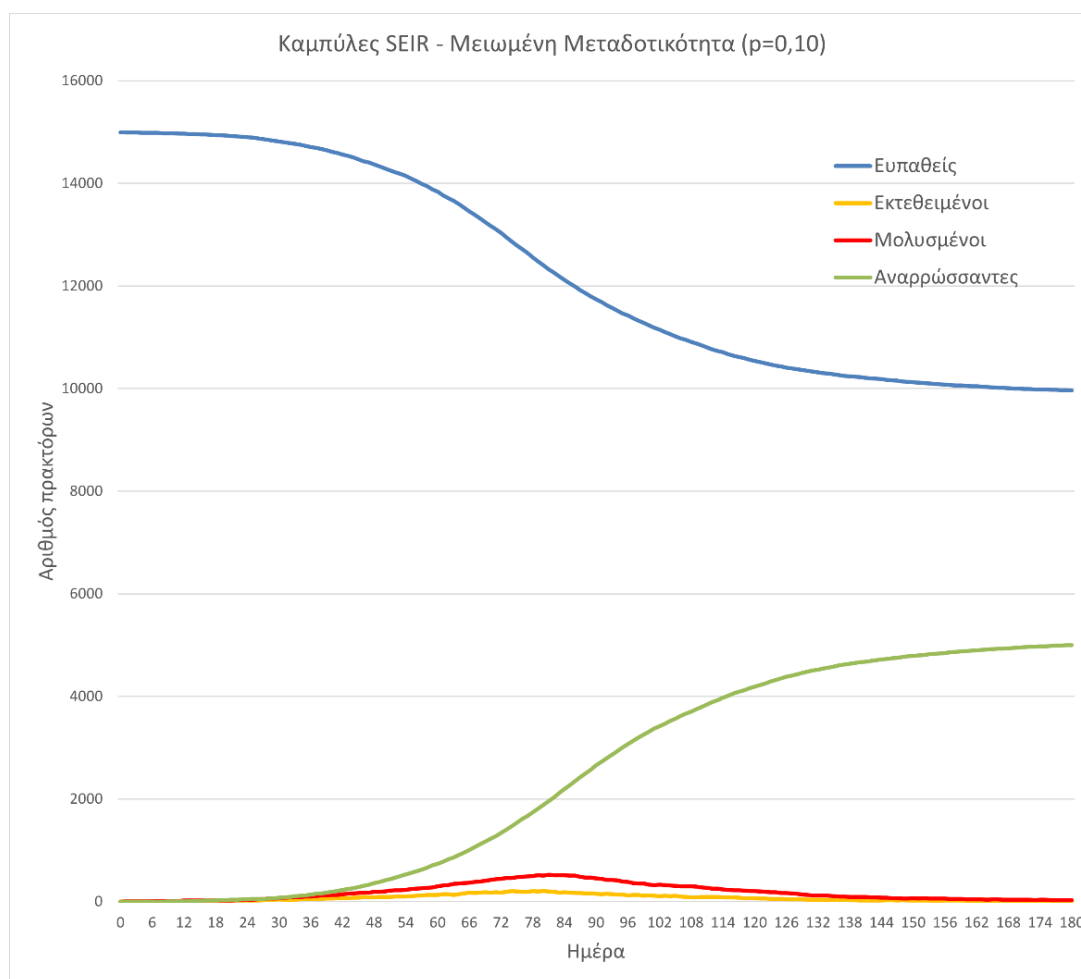
Αντίστοιχα διαγράμματα προέκυψαν και για τις παραλλαγές των δύο άλλων σεναρίων. Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες SEIR για τον μειωμένο (12.000) και τον αυξημένο (18.000) πληθυσμό αντίστοιχα, ενώ στα Σχήματα 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες SEIR για τη μειωμένη ($p=0,10$) και την αυξημένη ($p=0,14$) πιθανότητα μόλυνσης. Σε όλες τις περιπτώσεις διατηρείται η χαρακτηριστική μορφή της επιδημικής καμπύλης, αλλάζει όμως σημαντικά το ύψος και η χρονική στιγμή της κορύφωσης, στοιχεία που αναλύονται διεξοδικά στην επόμενη ενότητα.



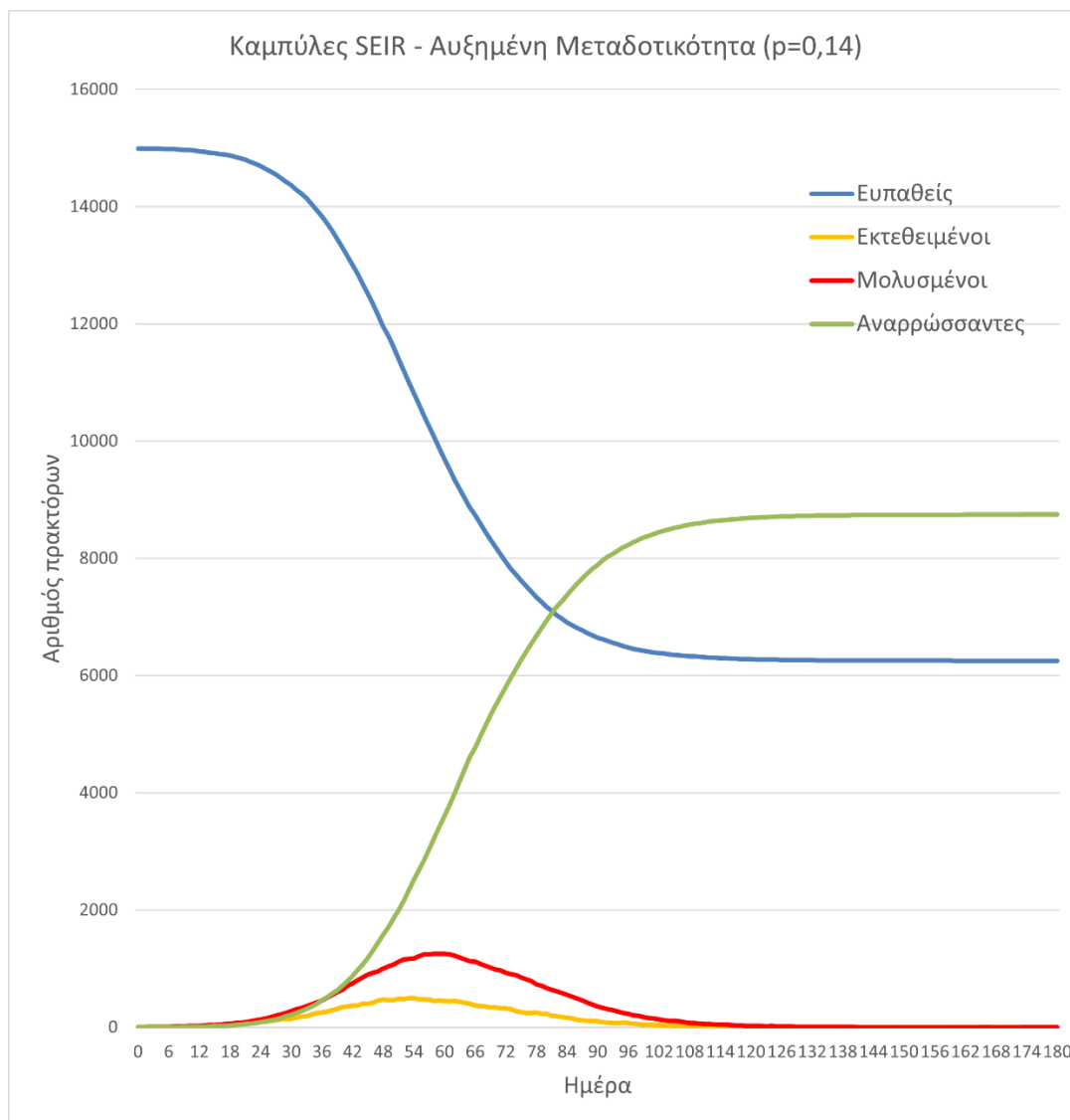
Σχήμα 4.3: Καμπύλες SEIR – Μειωμένος Πληθυσμός (N=12.000)



Σχήμα 4.4: Καμπύλες SEIR – Αυξημένος Πληθυσμός N=18.000



Σχήμα 4.5: Καμπύλες SEIR – Μειωμένη Μεταδοτικότητα ($p=0,10$)

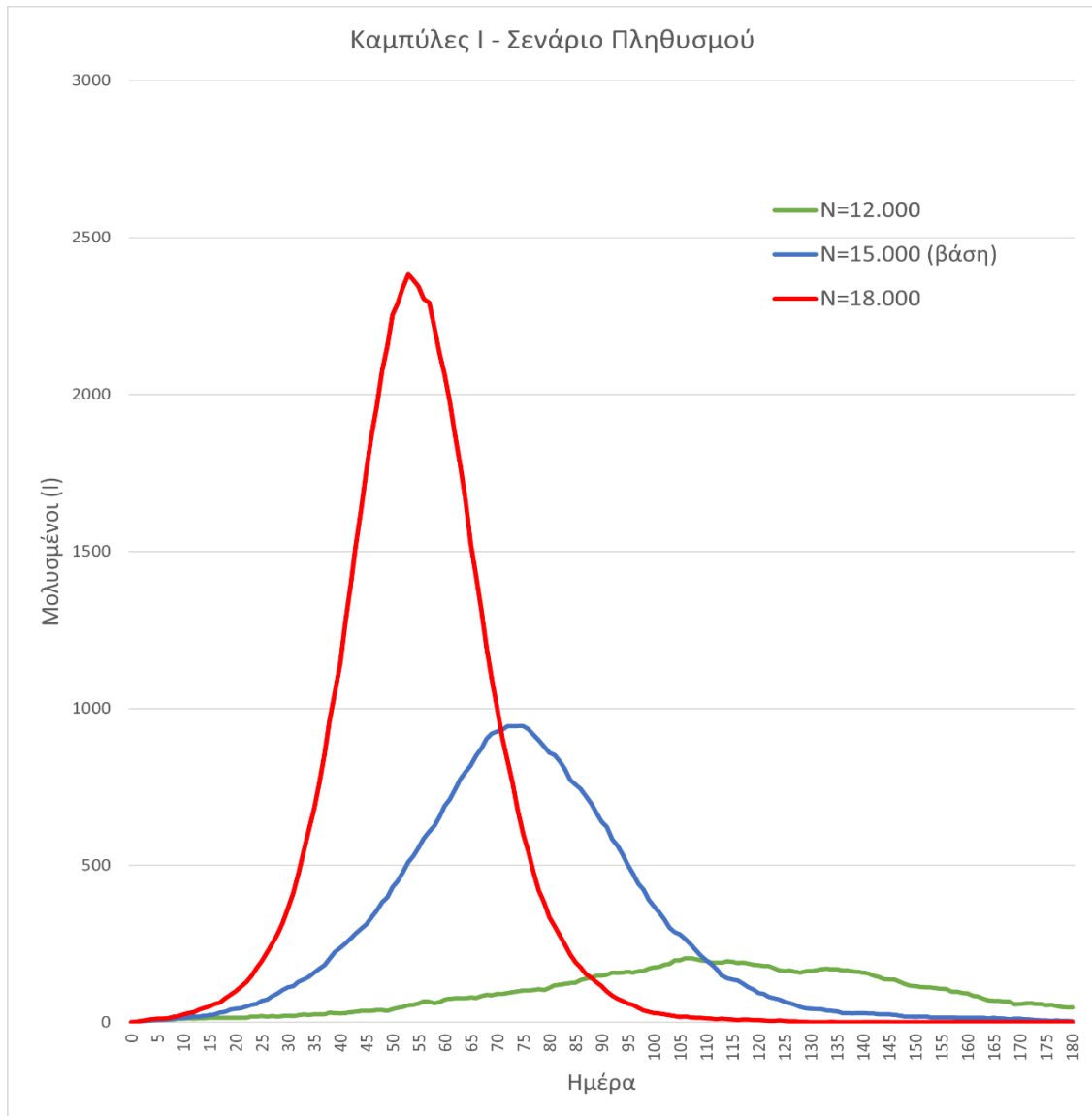


Σχήμα 4.6: Καμπύλες SEIR – Αυξημένη Μεταδοτικότητα ($p=0,14$)

4.4.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

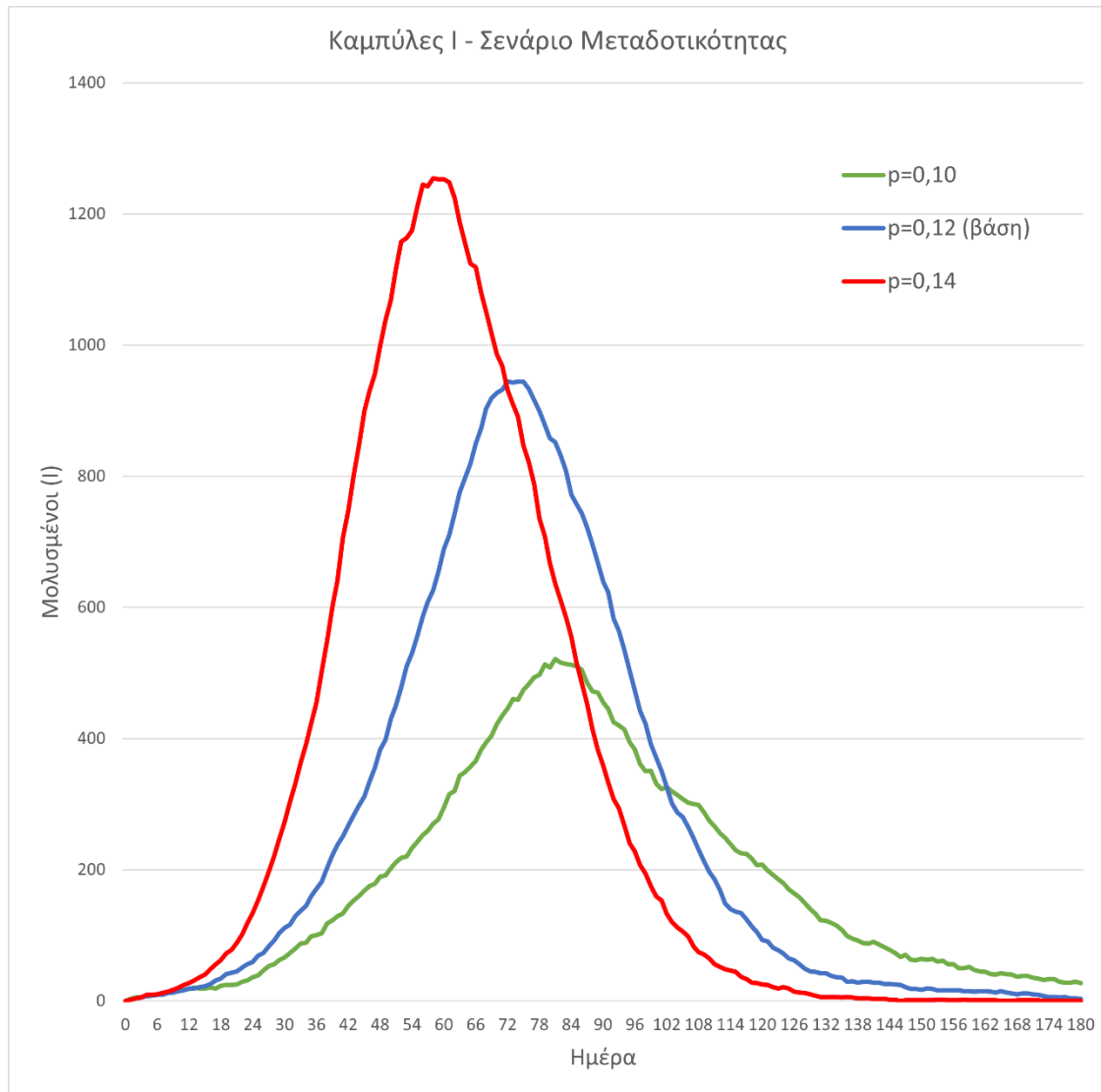
Για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης κάθε παραμέτρου, οι καμπύλες των μολυσμένων (I) των διαφορετικών παραλλαγών παρουσιάζονται συγκριτικά στο ίδιο διάγραμμα.

Στο Σχήμα 4.7 συγκρίνονται οι καμπύλες I για τις τρεις τιμές πληθυσμού. Παρατηρείται μια έντονη επίδραση του μεγέθους του πληθυσμού: όσο μεγαλύτερος είναι ο πληθυσμός, τόσο νωρίτερα και τόσο υψηλότερα κορυφώνεται η επιδημία. Στον μειωμένο πληθυσμό η κορύφωση είναι χαμηλή και καθυστερημένη, ενώ στον αυξημένο πληθυσμό η κορύφωση είναι πολύ υψηλότερη και εμφανίζεται νωρίτερα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι, καθώς το μέγεθος του πλέγματος παραμένει σταθερό (100×100), η αύξηση του πληθυσμού οδηγεί σε μεγαλύτερη πυκνότητα και συνεπώς σε συχνότερες επαφές μεταξύ των πρακτόρων. Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό αναδυόμενο φαινόμενο των πρακτορικών μοντέλων, το οποίο δεν αποτυπώνεται άμεσα στα κλασικά μαθηματικά μοντέλα.



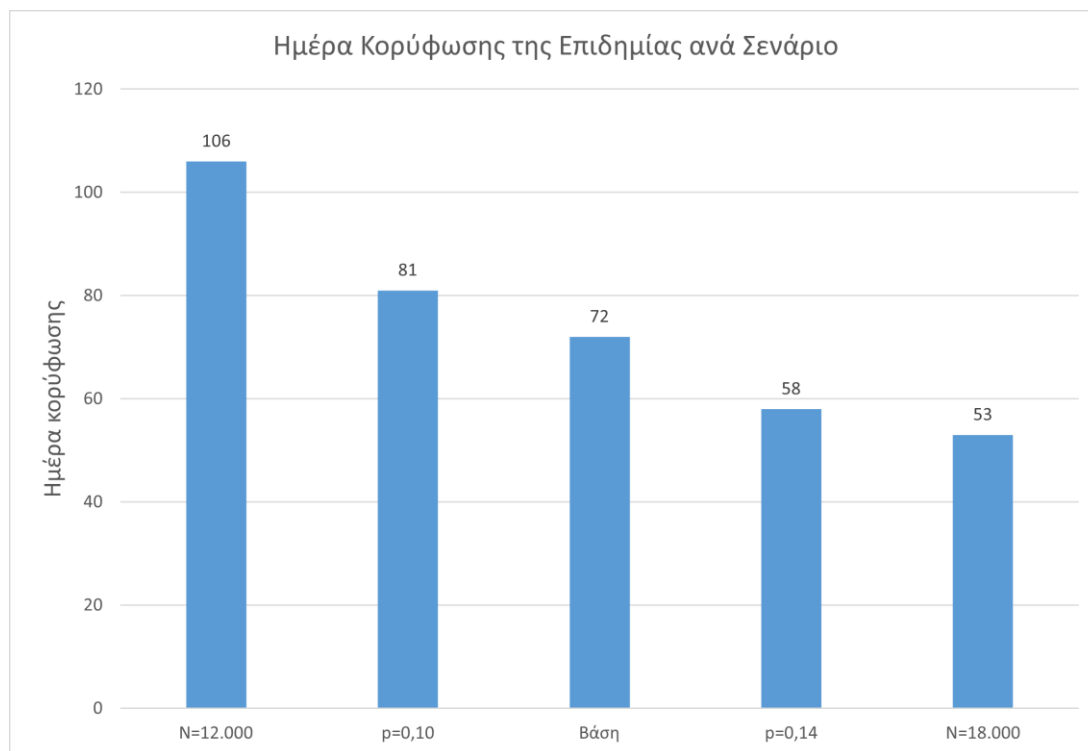
Σχήμα 4.7: Σύγκριση καμπυλών I – Σενάριο Πληθυσμού

Στο Σχήμα 4.8 συγκρίνονται οι καμπύλες I για τις τρεις τιμές της πιθανότητας μόλυνσης. Και εδώ παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά: η αύξηση της πιθανότητας μόλυνσης οδηγεί σε ταχύτερη και εντονότερη επιδημία, ενώ η μείωσή της επιβραδύνει και περιορίζει την εξάπλωση. Η επίδραση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η πιθανότητα μόλυνσης ανά επαφή σχετίζεται άμεσα με την παράμετρο μετάδοσης β του κλασικού μοντέλου SEIR.

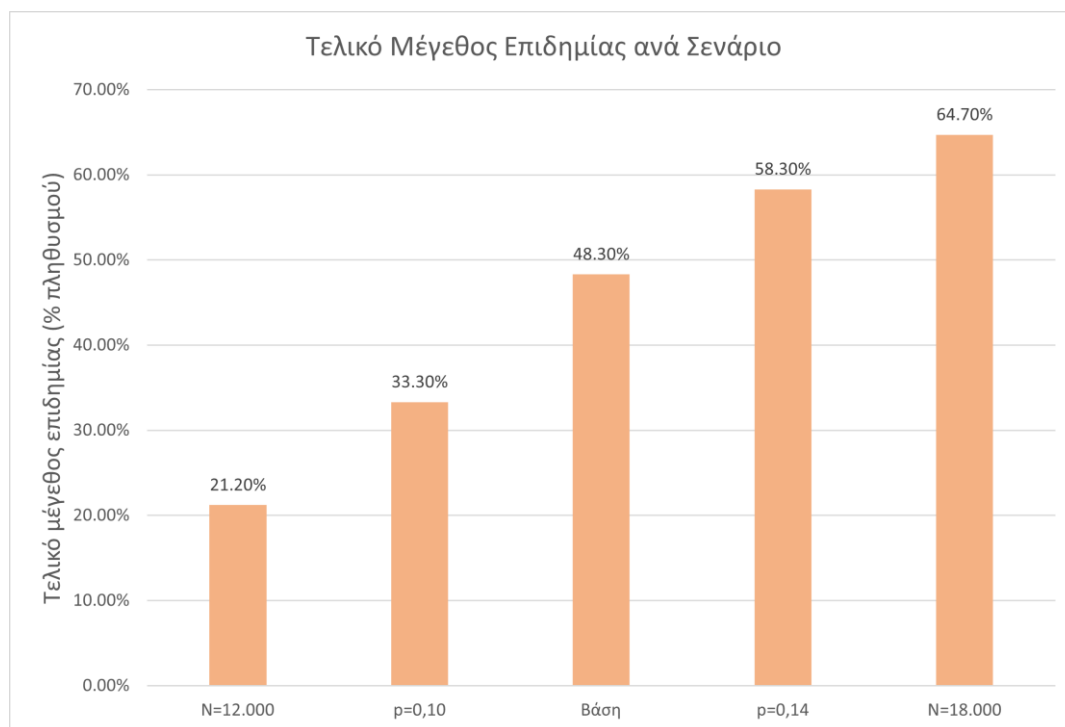


Σχήμα 4.8: Σύγκριση καμπυλών I – Σενάριο Μεταδοτικότητας

Τα παραπάνω συνοψίζονται ποσοτικά στα Σχήματα 4.9 και 4.10, τα οποία παρουσιάζουν την ημέρα κορύφωσης και το τελικό μέγεθος της επιδημίας αντίστοιχα, για όλα τα σενάρια. Παρατηρείται μια συστηματική σχέση: τόσο η αύξηση του πληθυσμού όσο και η αύξηση της μεταδοτικότητας μετατοπίζουν την κορύφωση νωρίτερα και αυξάνουν το συνολικό ποσοστό του πληθυσμού που νοσεί.



Σχήμα 4.9: Ημέρα Κορύφωσης της Επιδημίας ανά Σενάριο



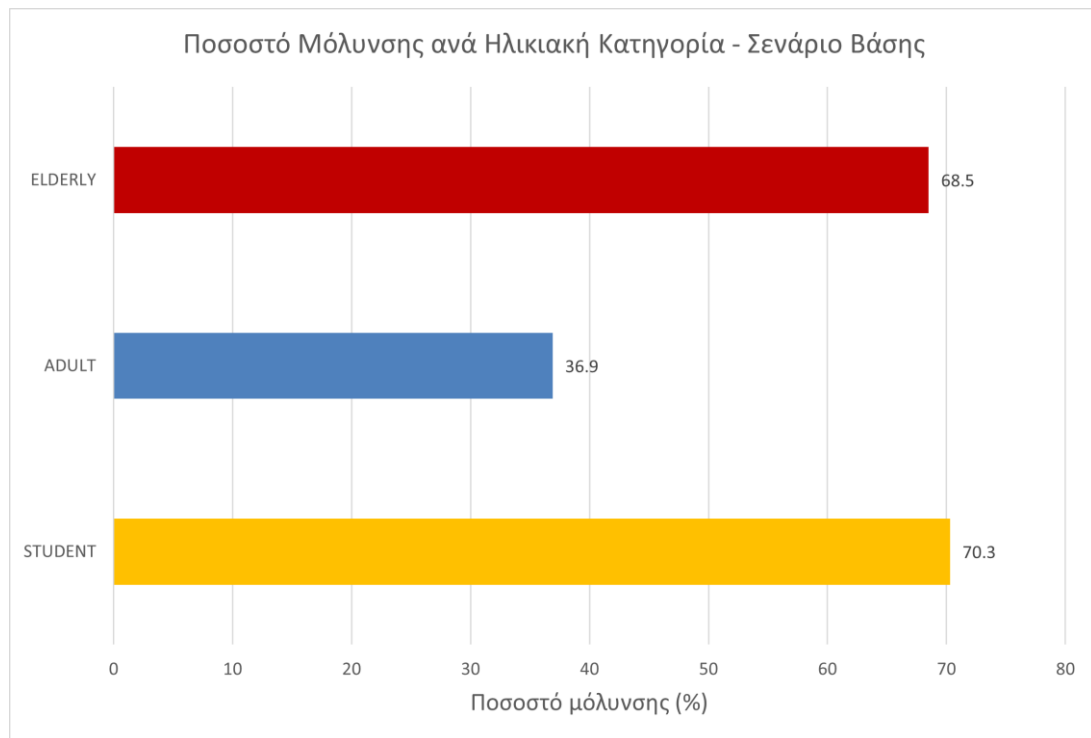
Σχήμα 4.10: Τελικό Μέγεθος Επιδημίας ανά Σενάριο

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των σεναρίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3

Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά σενάριο

Σενάριο	Ημέρα κορύφωσης	Μέγιστος αριθμός μολυσμένων (I)	Τελικό μέγεθος επιδημίας
Μειωμένος πληθυσμός (N=12.000)	106	205	21.2%
Μειωμένη μετάδοση (p=0,10)	81	521	33.3%
Σενάριο βάσης	72	944	48.3%
Αυξημένη μετάδοση (p=0,14)	58	1.254	58.3%
Αυξημένος πληθυσμός (N=18.000)	53	2.382	64,7%

Τέλος, στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται το ποσοστό μόλυνσης ανά ηλικιακή κατηγορία για το σενάριο βάσης. Παρατηρείται ότι οι μαθητές και οι ηλικιωμένοι εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερο ποσοστό (περίπου 70% και 68% αντίστοιχα) σε σχέση με τους ενήλικες (περίπου 37%). Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον και ερμηνεύεται από τα χαρακτηριστικά του μοντέλου: οι μαθητές συγκεντρώνονται καθημερινά σε σχολικά περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα επαφών, ενώ οι ηλικιωμένοι διαθέτουν ασθενέστερο ανοσοποιητικό σύστημα. Αντίθετα, οι ενήλικες συνδυάζουν ισχυρότερη ανοσία με πιο διασκορπισμένους χώρους εργασίας, γεγονός που μειώνει την έκθεσή τους.



Σχήμα 4.11: Ποσοστό Μόλυνσης ανά Ηλικιακή Κατηγορία – Σενάριο Βάσης

4.4.3 Σύγκριση με Πραγματικά Δεδομένα

Για την αξιολόγηση της ρεαλιστικότητας του μοντέλου, η εξέλιξη της επιδημίας στο σενάριο βάσης συγκρίθηκε με πραγματικά επιδημιολογικά δεδομένα εποχικής γρίπης, τα οποία αντλήθηκαν από δημόσια διαθέσιμες πηγές επιδημιολογικής επιτήρησης [12]. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο εβδομαδιαίας επίπτωσης, δηλαδή του αριθμού των νέων κρουσμάτων ανά εβδομάδα.

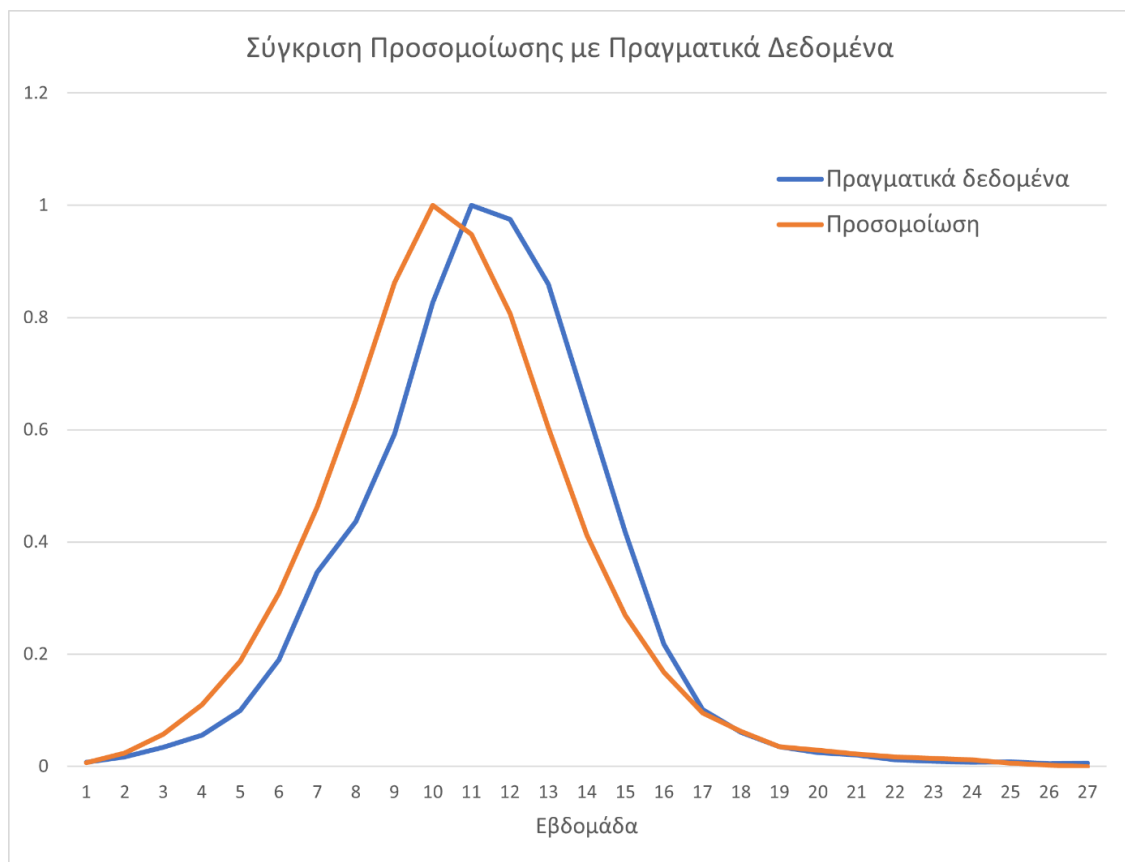
Ένα βασικό ζήτημα σε μια τέτοια σύγκριση είναι ότι τα δεδομένα της προσομοίωσης και τα πραγματικά δεδομένα βρίσκονται σε εντελώς διαφορετικές κλίμακες. Η προσομοίωση αφορά έναν τεχνητό πληθυσμό 15.000 πρακτόρων, ενώ τα πραγματικά δεδομένα προέρχονται από συστήματα επιτήρησης που καλύπτουν πολύ μεγαλύτερους πληθυσμούς και εκφράζονται με διαφορετικές μονάδες μέτρησης. Συνεπώς, μια άμεση σύγκριση των απόλυτων τιμών δεν θα είχε νόημα. Αντίθετα, αυτό που έχει σημασία είναι η σύγκριση της μορφής και της χρονικής εξέλιξης των δύο καμπυλών, δηλαδή το πότε ξεκινά η άνοδος, πότε εμφανίζεται η κορύφωση και πώς εξελίσσεται η αποκλιμάκωση.

Για τον λόγο αυτό, και οι δύο χρονοσειρές υποβλήθηκαν σε κανονικοποίηση ελαχίστου-μεγίστου (min-max normalization), η οποία μετασχηματίζει τις τιμές κάθε σειράς ώστε να βρίσκονται στο διάστημα [0, 1]. Η κανονικοποίηση αυτή ορίζεται σύμφωνα με την σχέση (4.1):

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4.1)$$

όπου x είναι η αρχική τιμή, $x_{\min}$ και $x_{\max}$ είναι αντίστοιχα η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της χρονοσειράς, και x_{norm} η κανονικοποιημένη τιμή. Μετά τον μετασχηματισμό, κάθε καμπύλη λαμβάνει την τιμή 0 στο σημείο ελαχίστου της και την τιμή 1 στο σημείο της κορύφωσής της. Με τον τρόπο αυτό, οι δύο καμπύλες γίνονται άμεσα συγκρίσιμες ως προς τη μορφή τους, ανεξάρτητα από τις διαφορές στην κλίμακα και στις μονάδες μέτρησης.

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η σύγκριση των κανονικοποιημένων καμπυλών της προσομοίωσης και των πραγματικών δεδομένων. Παρατηρείται ότι το μοντέλο αναπαράγει ικανοποιητικά τη γενική μορφή μιας εποχικής επιδημίας γρίπης, με μια σταδιακή άνοδο, μια σαφή κορύφωση και μια ομαλή αποκλιμάκωση.



Σχήμα 4.12: Σύγκριση Προσομοίωσης με Πραγματικά Δεδομένα – Σενάριο Βάσης (κανονικοποιημένες καμπύλες min-max)

4.5 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Από τα τρία σενάρια που εκτελέστηκαν προκύπτουν αρκετά συμπεράσματα, τόσο για τη συμπεριφορά του ίδιου του μοντέλου όσο και για τους παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση μιας ασθένειας.

Το βασικότερο είναι ότι το μοντέλο, παρότι δεν περιλαμβάνει καμία εξίσωση που να περιγράφει την επιδημία σε επίπεδο πληθυσμού, παράγει από μόνο του την αναμενόμενη επιδημική καμπύλη. Η νόσος ξεκινά από ελάχιστους εκτεθειμένους πράκτορες και, μέσα από τις καθημερινές μετακινήσεις και τις τοπικές επαφές, εξαπλώνεται, κορυφώνεται και τελικά υποχωρεί. Το ότι η συμπεριφορά αυτή προκύπτει

από απλούς τοπικούς κανόνες, και όχι από κάποιον προκαθορισμένο μηχανισμό, είναι ακριβώς το ζητούμενο ενός πρακτορικού μοντέλου και συμφωνεί με όσα περιγράφηκαν στο θεωρητικό μέρος της εργασίας.

Η μεγαλύτερη ίσως έκπληξη ήταν η ένταση με την οποία το μέγεθος του πληθυσμού επηρέασε τα αποτελέσματα. Περνώντας από τους 12.000 στους 18.000 πράκτορες, το τελικό μέγεθος της επιδημίας περίπου τριπλασιάστηκε, από 21% σε σχεδόν 65% του πληθυσμού, ενώ η κορύφωση ήρθε πάνω από πενήντα ημέρες νωρίτερα. Αυτό οφείλεται στο ότι το πλέγμα παρέμεινε σταθερό στα 100×100 σε όλα τα σενάρια, οπότε περισσότεροι πράκτορες μεταφράζονται σε μεγαλύτερη πυκνότητα και σαφώς συχνότερες επαφές. Σε ένα κλασικό μαθηματικό μοντέλο, όπου ο πληθυσμός θεωρείται ομοιόμορφα αναμειγμένος, μια τέτοια επίδραση της χωρικής πυκνότητας δεν θα μπορούσε καν να εμφανιστεί.

Η μεταβολή της πιθανότητας μόλυνσης έδωσε πιο προβλέψιμα αποτελέσματα. Όσο μεγαλύτερη η πιθανότητα, τόσο ταχύτερη και εντονότερη η επιδημία, κάτι αναμενόμενο αφού η παράμετρος αυτή συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό μετάδοσης β του μοντέλου SEIR. Η συμφωνία αυτή λειτουργεί έμμεσα και ως επαλήθευση ότι η υλοποίηση της μετάδοσης σε ατομικό επίπεδο δεν αποκλίνει από τη θεωρία.

Ξεχωριστή αναφορά αξίζει ο δείκτης προσβολής ανά ηλικιακή ομάδα. Οι μαθητές και οι ηλικιωμένοι νόσησαν σε ποσοστά γύρω στο 70%, ενώ οι ενήλικες μόλις στο 37%. Η διαφορά αυτή δεν ορίστηκε πουθενά ρητά στον κώδικα. Προέκυψε από τον συνδυασμό δύο στοιχείων που δώσαμε στους πράκτορες: της ρουτίνας τους, αφού οι μαθητές περνούν πολλές ώρες μαζί στο ίδιο σχολείο, και του ανοσοποιητικού τους, που είναι ασθενέστερο στους ηλικιωμένους. Είναι ένα καλό παράδειγμα του τι μπορεί να προσφέρει η ετερογένεια των πρακτόρων, κάτι που ένα ομοιογενές μοντέλο απλώς δεν θα μπορούσε να δείξει.

Όσον αφορά τη σύγκριση με πραγματικά δεδομένα, το μοντέλο αναπαρήγαγε σε ικανοποιητικό βαθμό τη γενική μορφή μιας εποχικής γρίπης. Άλλωστε στόχος της εργασίας δεν ήταν η ακριβής πρόβλεψη μιας συγκεκριμένης επιδημίας, αλλά η μελέτη της δυναμικής της και του πώς αυτή μεταβάλλεται όταν αλλάζουν βασικές παράμετροι. Υπό αυτό το πρίσμα, οι αποκλίσεις από τα πραγματικά δεδομένα είναι αναμενόμενες και δεν μειώνουν την αξία του εργαλείου που αναπτύχθηκε.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη μελέτη της διάδοσης ασθενειών μέσα από τον συνδυασμό ενός πρακτορικού μοντέλου με το επιδημιολογικό μοντέλο SEIR. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε από την αρχή ένα σύστημα προσομοίωσης σε γλώσσα Java, το οποίο βασίστηκε στη λογική του μοντέλου Sugarscape και επεκτάθηκε ώστε να ενσωματώσει τις τέσσερις επιδημιολογικές καταστάσεις και τη μετάδοση της νόσου σε επίπεδο ατόμου.

Στο πλαίσιο της υλοποίησης δημιουργήθηκε ένα τεχνητό περιβάλλον πόλης, με δρόμους και κτήρια διαφόρων τύπων, μέσα στο οποίο κινούνται πράκτορες με ατομικά χαρακτηριστικά. Κάθε πράκτορας ανήκει σε μια ηλικιακή ομάδα, διαθέτει το δικό του ανοσοποιητικό σύστημα, ακολουθεί μια καθημερινή ρουτίνα ανάλογα με την ώρα της ημέρας και μετακινείται προς σταθερούς ή εναλλασσόμενους προορισμούς. Η μετάδοση της νόσου συμβαίνει αποκλειστικά μέσα από τις τοπικές επαφές των πρακτόρων στο ίδιο κελί, χωρίς κανέναν καθολικό κανόνα που να την επιβάλλει σε επίπεδο πληθυσμού.

Μέσα από την πειραματική μελέτη εξετάστηκε η επίδραση δύο βασικών παραγόντων, του μεγέθους του πληθυσμού και της πιθανότητας μόλυνσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο αναπαράγει τη χαρακτηριστική μορφή μιας επιδημικής καμπύλης και αντιδρά με τρόπο συνεπή προς τη θεωρία όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι αυτές. Παράλληλα, ανέδειξε και φαινόμενα που τα κλασικά μαθηματικά μοντέλα δυσκολεύονται να αποτυπώσουν, όπως η επίδραση της χωρικής πυκνότητας στην ταχύτητα και την έκταση της επιδημίας, αλλά και οι διαφορές στον δείκτη προσβολής ανάμεσα στις ηλικιακές ομάδες.

Συνολικά, η εργασία έδειξε ότι η πρακτορική προσέγγιση αποτελεί ένα ευέλικτο και ουσιαστικό εργαλείο για τη μελέτη της διάδοσης ασθενειών. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπει την παρατήρηση φαινομένων που προκύπτουν φυσικά από τη συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις των μεμονωμένων ατόμων, προσφέροντας μια πιο λεπτομερή και ρεαλιστική εικόνα από εκείνη των αμιγώς μαθηματικών μοντέλων.

5.2 Παραδοχές και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

5.2.1 Παραδοχές του Μοντέλου

Όπως κάθε μοντέλο, έτσι και το σύστημα που αναπτύχθηκε στηρίζεται σε μια σειρά παραδοχών και απλοποιήσεων. Οι παραδοχές αυτές ήταν απαραίτητες ώστε το πρόβλημα να παραμείνει διαχειρίσιμο στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας, αλλά είναι σημαντικό να καταγραφούν, καθώς ορίζουν και τα όρια των αποτελεσμάτων.

Καταρχάς, ο πληθυσμός θεωρείται κλειστός. Δεν υπάρχουν γεννήσεις ούτε θάνατοι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, οπότε ο συνολικός αριθμός των πρακτόρων παραμένει σταθερός. Η παραδοχή αυτή είναι λογική για μια εποχική γρίπη που εξελίσσεται σε διάστημα λίγων μηνών, αλλά περιορίζει τη δυνατότητα μελέτης ασθενειών με υψηλή θνητότητα.

Δεύτερον, η ανάρρωση θεωρείται ότι προσφέρει μόνιμη ανοσία. Μόλις ένας πράκτορας περάσει στην κατάσταση «αναρρώσας», δεν μπορεί να νοσήσει ξανά. Στην πραγματικότητα, για πολλές ασθένειες η ανοσία εξασθενεί με τον χρόνο και η επαναμόλυνση είναι εφικτή.

Επιπλέον, οι παράμετροι της ασθένειας, όπως η πιθανότητα μόλυνσης και οι περίοδοι επώασης και νόσησης, θεωρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Δεν λαμβάνονται υπόψη εποχικές διακυμάνσεις ή τυχόν μεταλλάξεις του παθογόνου. Το ανοσοποιητικό σύστημα κάθε

πράκτορα, επίσης, αναπαρίσταται με έναν μοναδικό αριθμητικό δείκτη, μια απλοποίηση ενός εξαιρετικά πολύπλοκου βιολογικού μηχανισμού.

Σε επίπεδο επαφών, εντός κάθε κελιού θεωρείται ότι οι πράκτορες αναμειγνύονται ομοιόμορφα, ενώ στις κατοικίες η μετάδοση περιορίζεται στα μέλη της ίδιας οικογένειας. Οι καθημερινές ρουτίνες των πρακτόρων, αν και βασίζονται σε ρεαλιστικά μοτίβα, παραμένουν απλοποιημένες σε σχέση με την πραγματική πολυπλοκότητα της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Τέλος, το περιβάλλον της προσομοίωσης είναι ένα πλέγμα σταθερών διαστάσεων, γεγονός που, όπως φάνηκε και στα πειράματα, συνδέει άμεσα το μέγεθος του πληθυσμού με την πυκνότητά του.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στο υπολογιστικό κόστος. Η προσομοίωση ενός πληθυσμού δεκαπέντε χιλιάδων πρακτόρων, που ο καθένας κινείται και αλληλεπιδρά σε κάθε χρονικό βήμα για περίπου 180 ημέρες, απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και χρόνο εκτέλεσης. Η περαιτέρω αύξηση του μεγέθους του συστήματος, είτε μέσω μεγαλύτερου πληθυσμού είτε μέσω εκτενέστερου πλέγματος, αποδείχθηκε απαγορευτική στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας, τόσο λόγω του χρόνου εκτέλεσης όσο και λόγω των διαθέσιμων υπολογιστικών μέσων. Ο περιορισμός αυτός καθόρισε σε μεγάλο βαθμό την κλίμακα των πειραμάτων που ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν.

5.2.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Οι παραπάνω παραδοχές ανοίγουν φυσικά τον δρόμο για μελλοντικές επεκτάσεις του μοντέλου. Μια σειρά από κατευθύνσεις θα μπορούσαν να το καταστήσουν πιο ρεαλιστικό και να διευρύνουν το φάσμα των φαινομένων που μπορεί να μελετήσει.

Μια άμεση επέκταση θα ήταν η προσθήκη της κατάστασης του θανάτου, δηλαδή η μετάβαση από το μοντέλο SEIR σε ένα μοντέλο τύπου SEIRD, ώστε να μπορεί να μελετηθεί η θνητότητα μιας ασθένειας. Σε συνδυασμό με γεννήσεις, αυτό θα επέτρεπε και τη μελέτη επιδημιών σε βάθος χρόνου, σε έναν πληθυσμό που ανανεώνεται.

Μια άλλη σημαντική κατεύθυνση αφορά τον εμπλουτισμό των κοινωνικών επαφών. Στο τρέχον μοντέλο, οι πράκτορες αλληλεπιδρούν με βάση τη γεωγραφική τους θέση και την οικογένειά τους. Η προσθήκη ενός ευρύτερου κοινωνικού κύκλου, δηλαδή ενός δικτύου φίλων, συναδέλφων ή γνωστών με τους οποίους ο πράκτορας έρχεται συχνότερα σε επαφή, θα προσέγγιζε πολύ πιο πιστά τον τρόπο με τον οποίο διαδίδονται στην πραγματικότητα οι ασθένειες.

Ενδιαφέρον θα είχε επίσης η ενσωμάτωση μέτρων δημόσιας υγείας. Θα μπορούσαν να μοντελοποιηθούν παρεμβάσεις όπως ο εμβολιασμός μέρους του πληθυσμού, η κοινωνική αποστασιοποίηση, η χρήση μάσκας ή τα μέτρα περιορισμού (lockdown), και να μελετηθεί η επίδρασή τους στην εξέλιξη της επιδημίας. Μια τέτοια δυνατότητα θα μετέτρεπε το μοντέλο σε εργαλείο αξιολόγησης στρατηγικών αντιμετώπισης.

Στο ίδιο πνεύμα, η εισαγωγή της εξασθένησης της ανοσίας με τον χρόνο και της πιθανότητας επαναμόλυνσης θα επέτρεπε τη μετάβαση σε ένα μοντέλο τύπου SEIRS και τη μελέτη ασθενειών που επανεμφανίζονται κυκλικά. Θα μπορούσε ακόμη να εξεταστεί η ταυτόχρονη κυκλοφορία περισσότερων του ενός παθογόνων, καθώς και η ύπαρξη ασυμπτωματικών φορέων που μεταδίδουν τη νόσο χωρίς να εμφανίζουν συμπτώματα.

Τέλος, σε τεχνικό επίπεδο, η βελτιστοποίηση του κώδικα και η αξιοποίηση παράλληλου ή κατανεμημένου υπολογισμού θα μπορούσαν να ξεπεράσουν τον περιορισμό του υπολογιστικού κόστους και να επιτρέψουν προσομοιώσεις πολύ μεγαλύτερης κλίμακας. Σε συνδυασμό με τη χρήση πραγματικών γεωγραφικών και δημογραφικών δεδομένων για τη δημιουργία του περιβάλλοντος, το

μοντέλο θα μπορούσε να προσεγγίσει συγκεκριμένες πόλεις ή περιοχές και να αποκτήσει μεγαλύτερη προγνωστική αξία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- [1] J. M. Epstein and R. L. Axtell, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
- [2] T. C. Schelling, *Micromotives and Macrobehavior*. New York, NY: W. W. Norton & Company, 1978.
- [3] A. Ilachinski, *Cellular Automata: A Discrete Universe*. River Edge, NJ: World Scientific, 2001.
- [4] R. Axelrod, *The Evolution of Cooperation*. New York, NY: Basic Books, 1984.
- [5] R. Axelrod, *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1997.

Internet Site

- [6] Columbia University Mailman School of Public Health, “Agent-Based Modeling,” Population Health Methods, 2026. [Online]. Available: <https://www.publichealth.columbia.edu/research/population-health-methods/agent-based-modeling>.
- [7] A. Kaddouri, “Agent-Based Modeling Techniques: A Guide to Simulating Complex Systems,” SmythOS, 2026. [Online]. Available: <https://smythos.com/developers/agent-development/agent-based-modeling-techniques/>.
- [8] GIDEON Informatics, “Compartmental Models in Epidemiology,” GIDEON Blog, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://www.gideononline.com/blogs/compartmental-models-in-epidemiology/>.
- [9] Encyclopedia MDPI, “Agent-Based Modeling and Simulation in Epidemiology,” Scholarly Community Encyclopedia, Nov. 2022. [Online]. Available: <https://encyclopedia.pub/entry/37822>.
- [10] LABSS (Laboratory of Agent Based Social Simulation), “Agent-Based Modelling,” Institute of Cognitive Sciences and Technologies (ISTC-CNR). [Online]. Available: <https://labss.istc.cnr.it/topics/agent-based-modelling>.
- [11] A. Hamze, “Cellular Automata,” Medium, 2023. [Online]. Available: https://medium.com/@Ahmad_Hamze/cellular-automata-d7b0b3151f17.
- [12] Our World in Data, “Global Influenza Surveillance Data,” Our World in Data, 2024. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/explorers/influenza>.
- [13] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), “Influenza,” CDC Yellow Book 2026: Health Information for International Travel, 2026. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/yellow-book/hcp/travel-associated-infections-diseases/influenza.html>.
- [14] Our World in Data, “Population by age group,” Our World in Data, 2026. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/grapher/population-by-age-group>.
- [15] R. Kumar, “Softmax Activation Function in Python: Multiclass Classification,” DataCamp, 2023. [Online]. Available: <https://www.datacamp.com/tutorial/softmax-activation-function-in-python>.

- [16] S. Y. Del Valle *et al.*, “EpiCast: Simulating Epidemics with Extreme Detail,” Los Alamos National Laboratory, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2172/1783478>.
- [17] A. C. Madrigal, “Inside Waymo’s Secret World for Training Self-Driving Cars,” The Atlantic, 2017. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20200814130030/https://www.theatlantic.com/technology/archive/2017/08/inside-waymos-secret-world-for-training-self-driving-cars/537433/>.

Paper in Conference Proceedings

- [18] C. M. Macal and M. J. North, “Agent-based modeling and simulation,” in *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin, and R. G. Ingalls, Eds. Piscataway, NJ: IEEE, 2009, pp. 86-98.
- [19] D. Chumachenko, V. Dobriak, M. Mazorchuk, I. Menailov, and K. Bazilevych, “On agent-based approach to influenza and acute respiratory virus infection simulation,” In Proc. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) ’18, 2018, pp. 192-195.
- [20] H. Arduin and L. Opatowski, “SimFI: A Transmission Agent-Based Model of Two Interacting Pathogens,” In Proc. International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, 2018, pp. 72-83.

Journal Articles

- [21] H. Arduin, M. Domenech de Cellès, D. Guillemot, L. Watier, and L. Opatowski, “An agent-based model simulation of influenza interactions at the host level: insight into the influenza-related burden of pneumococcal infections,” *BMC Infectious Diseases*, vol. 17, art. no. 382, June 2017.
- [22] T. C. Schelling, “Dynamic models of segregation,” *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 1, no. 2, pp. 143-186, Jul. 1971.
- [23] L. Willem, S. Stijven, E. Tijskens, P. Beutels, N. Hens, and J. Broeckhove, “Optimizing agent-based transmission models for infectious diseases,” *BMC Bioinformatics*, vol. 16, art. no. 183, June 2015.
- [24] M. T. Sofonea, S. Cauchemez, and P. Y. Boëlle, “Epidemic models: why and how to use them,” *Anaesthesia Critical Care & Pain Medicine*, vol. 41, no. 2, art. no. 101048, Apr. 2022.
- [25] J. Wallinga, P. Teunis, and M. Kretzschmar, “Mathematical Modeling of Infectious Diseases,” in *Handbook of Infectious Disease Data Analysis*, J. Wallinga, P. Teunis, and M. Kretzschmar, Eds. Berlin, Germany: Springer, 2008, pp. 21-44.
- [26] I. M. Longini Jr., A. Halloran, M. Nizam, and Y. Yang, “Containing Pandemic Influenza with Antiviral Agents,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 101, no. 14, pp. 5174-5179, Apr. 2004.
- [27] M. M. Espino, R. R. Benitez, A. L. González, A. E. Baldarraín, Y. V. Rey, and Y. H. Fernández, “Agent-based simulation and SEIR models for predicting the spread of a pandemic in Cuba,” *Procedia Computer Science*, vol. 237, pp. 659-666, May 2024.

- [28] E. Hunter and J. D. Kelleher, “Understanding the assumptions of an SEIR compartmental model using agentization and a complexity hierarchy,” *Journal of Computational Mathematics and Data Science*, vol. 4, art. no. 100056, Jul. 2022.
- [29] E. Hunter, B. Mac Namee, and J. Kelleher, “An open-data-driven agent-based model to simulate infectious disease outbreaks,” *PLoS ONE*, vol. 13, no. 12, art. no. e0208775, Dec. 2018.
- [30] L. Perez and S. Dragicevic, “An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread,” *International Journal of Health Geographics*, vol. 8, art. no. 50, Aug. 2009.

Δηλώσεις Κλάσεων (Class Declaration)

Κλάση Agent

```
public class Agent {  
  
    public Agent(int x, int y, State initialState, int ticks); // Constructor  
  
    // Getters  
    public int getId();  
    public int getX();  
    public int getY();  
    public int getAge();  
    public AgentType getAgentType();  
    public State getState();  
    public int getDaysInState();  
    public Building getGoal();  
    public List<Cell> getPath();  
    public Building getJob();  
    public Residence getResidence();  
    public Building getSchool();  
    public Float getImmunityScore();  
    public int getContacts();  
    public Set<Integer> getContactsToday();  
    public int getIncubationPeriod();  
    public int getInfectiousPeriod();  
    public int getTicksInState();  
    public boolean isGoalChanged();  
    public int getGoalDuration();  
    public int getGoalDurationCounter();  
    public Family getFamily();  
  
    // Setters  
    public void setX(int x);  
    public void setY(int y);  
    public void setAge(int g);  
    public void setAgentType(AgentType type);  
    public void setState(State newState);  
    public void setGoal(Building gl);  
    public void setPath(List<Cell> pth);  
    public void setJob(Building jb);  
    public void setResidence(Residence rsd);  
    public void setSchool(Building sc);  
    public void setImmunityScore(Float immunityScore);  
    public void setContacts(int c);  
    public void setIncubationPeriod(int incubationPeriod);  
    public void setInfectiousPeriod(int infectiousPeriod);  
    public void setFamily(Family family);  
  
    // Behaviour  
    public void setAgentsBasicFields(int i, int N); //Setting agent type, immunity score and infection period  
    public void move(int rows, int cols, Cell[][] gridCurr, Cell[][] gridNext); //move to a cell, decision based on agent's goal  
    public void randomMovement(Random rng, int rows, int cols, Cell[][] gridCurr, Cell[][] gridNext); //Moving randomly outside  
    public List<Cell> getNeighbors(Agent a, Cell[][] gridCurr, int rows, int cols);  
    public void incrementDaysInState();  
    public void updateState();  
    public boolean isContagious();  
    public void addCellToPath(Cell cell);  
    public void addContact(int contact);  
    public void clearContacts();  
    public void updateGoal();  
}
```

Κλάση Cell

```
public class Cell {  
  
    public Cell(int x, int y); // Constructor  
  
    public void addAgent(Agent a); // Add agent to the cell  
    public void removeAgent(Agent a); // Remove agent from the cell  
    public ArrayList<Agent> getAgents(); // Get all the agents in the cell  
  
    public int getX();  
    public int getY();  
    public BlockType getBlockType();  
    public void setBlockType(BlockType bt);  
}
```

Κλάση Space

```
public class Space {  
  
    public Space(int rows, int cols); // Constructor  
  
    public int getRows();  
    public int getCols();  
    public Cell[][] getGridCurr();  
    public Cell[][] getGridNext();  
    public void setGridCurr(Cell[][] newGrid);  
    public void setGridNext(Cell[][] newGrid);  
    public Cell getCell(int x, int y);  
  
    public Cell[][] createGridNext();  
    public void clearGridNext();  
    public void swapGrids();  
    public void generateCityRoadNetwork(); // Method of generating the city  
  
    public List<Building> getBuildings(BlockType type);  
    public List<Building> getAllBuildings();  
    public List<Residence> getResidences();  
    public List<School> getSchools();  
    public List<Other> getMarkets();  
    public List<Other> getOffices();  
    public List<Other> getLeisures();  
    public List<Other> getOthers();  
}
```

Κλάση Building

```
public class Building {  
  
    public Building(List<Cell> cells); // Constructor  
    public Building(Cell cell);       // Constructor (single cell)  
  
    public boolean hasSpace();  
    public boolean addOccupant(Agent a);  
    public boolean removeOccupant(Agent a);  
    public void increaseCurrOccupancy();  
  
    public int getId();  
    public List<Cell> getCells();  
    public Cell getCenter();  
    public BlockType getBlockType();  
    public int getMaxCapacity();  
    public void setMaxCapacity(int maxCapacity);  
    public int getCurrentOccupancy();  
    public boolean containsCell(Cell cell);  
    public List<Agent> getOccupants();  
}
```

Κλάση Residence

```
public class Residence extends Building {  
  
    public Residence(Cell cell); // Constructor  
  
    public boolean hasSpace(); // Residence capacity = number of families  
    public boolean addFamily(Family family);  
    public boolean addOccupant(Agent a);  
    public List<Family> getFamilies();  
    public void setFamilies(List<Family> families);  
}
```

Κλάση School

```
public class School extends Building {  
  
    public School(Cell cell); // Constructor  
  
    public boolean hasSpaceEmployees();  
    public boolean hasSpaceStudents();  
    public boolean addEmployee(Agent a);  
    public boolean addStudent(Agent a);  
  
    public int getMaxEmployees();  
    public void setMaxEmployees(int maxEmployees);  
    public int getMaxStudents();  
    public void setMaxStudents(int maxStudents);  
    public List<Agent> getEmployees();  
    public List<Agent> getStudents();  
}
```

Κλάση Other

```
public class Other extends Building {  
  
    public Other(Cell cell); // Constructor  
  
    public boolean hasSpace();  
    public boolean hasSpaceEmployees();  
    public boolean addEmployee(Agent a);  
  
    public int getMaxEmployees();  
    public void setMaxEmployees(int maxEmployees);  
    public List<Agent> getEmployees();  
}
```

Κλάση Family

```
public class Family {  
  
    public Family(); // Constructor  
  
    public int getId();  
    public List<Agent> getMembers();  
    public void setId(int id);  
    public void setMembers(List<Agent> members);  
    public void addMember(Agent a);  
    public void removeMember(Agent a);  
    public Building getResidence();  
    public void setResidence(Building residence);  
}
```

Κλάση DiseaseParameters

```
public class DiseaseParameters {  
  
    public float infect = 0.12f; //  $\beta$ : per-contact infection probability  
    public double interaction = 0.15; // interaction probability per agents in a cell  
}
```

Κλάση Node

```
public class Node {  
  
    public Cell cell;  
    public Node parent;  
    public double g; // cost from start  
    public double h; // heuristic to goal  
    public double f; // total cost = g + h  
  
    public Node(Cell cell); // Constructor  
  
    public boolean equals(Object o);  
    public int hashCode();  
}
```

Κλάση SEIRSimulation

```
public class SEIRSimulation {

    public SEIRSimulation(int rows, int cols, int N,
        double initialInfected, double initialExposed); // Constructor

    public void run();
    public void diseaseTransmission(Cell[][] grid);
    public void residenceDiseaseTransmission(List<Agent> agentsHere);
    public long countByState(State state);
    public void incrementTick();
    public void decisionMaking(Agent a);
    public void updateTimeZone();
    public void setOccupation(Agent a);
    public void setBuildingsCapacity();
    public void createFamilies();
    public void setResidenceOccupation();

    public Building chooseBuildingSoftmax(List<Building> buildings, Agent a, double beta);
    public Building chooseBuildingSoftmax(List<Building> buildings, int x, int y, double beta);
    public void randomInfection(Agent a);

    public List<Cell> AStarPathFinder(Agent a, Cell[][] grid, Cell goalCell);

    // CSV output
    public void initCSV(String filename) throws IOException;
    public void writeCSVRow(int day);
    public void writeAttackRateCSV(String filename);
    public void closeCSV();

    // Getters
    public List<Agent> getAgents();
    public Space getSpace();
    public int getCurrentTick();
    public int getDailyInfections();
    public int getDayInTicks();
    public int getPopulation();
}
```

Κλάση DiseaseTransmissionGUI

```
public class DiseaseTransmissionGUI extends javax.swing.JFrame {

    public DiseaseTransmissionGUI(); // Constructor

    public static void main(String args[]);
    public void initializeGrid();
    public void runSimulation();
}
```

Κώδικας Εκτέλεσης της Προσομοίωσης

Έναρξη του Προγράμματος (DiseaseTransmissionGUI.java)

```
// Σταθερές της προσομοίωσης
private SIRSimulation sim;
private Timer timer;
private int t = 1;
private static final int MAX_TIME = 52000; // συνολικά χρονικά βήματα (~180 ημέρες)
private static final int rows = 100;
private static final int cols = 100;
private static final int N = 15000; // πληθυσμός

// --- Αρχικοποίηση: δημιουργείται η προσομοίωση και ο κόσμος ---
public DiseaseTransmissionGUI() {
    initComponents();
    setLocationRelativeTo(null);

    sim = new SIRSimulation(rows, cols, N, 0, 0.0005); // 0.05% αρχικά εκτεθειμένοι
    sim.initCSV("simulation_results.csv");
    dayInTicks = sim.getDayInTicks();

    initializeGrid();
    // (αρχικοποίηση των τριών διαγραμμάτων)
}

// --- Έναρξη του βρόχου χρόνου με Timer (πατώντας "Start simulation") ---
private void startSimBtnActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
    updateGrid();
    updateCharts();

    timer = new Timer(100, new ActionListener() { // ο Timer παίζει τον ρόλο του time loop
        public void actionPerformed(ActionEvent evt) {
            runSimulation();
            if (t >= MAX_TIME) { // συνθήκη τερματισμού
                timer.stop();
                sim.closeCSV();
                sim.writeAttackRateCSV("attackrate_scenario1.csv");
            }
        }
    });
    timer.setRepeats(true);
    timer.start();
}

// --- Κάθε tick καλείται η run() ---
public void runSimulation() {
    sim.run(); // εκτέλεση ενός βήματος της προσομοίωσης
    updateGrid();

    t++;
    sim.incrementTick();

    // Στο τέλος κάθε ημέρας (288 ticks) ενημερώνονται τα διαγράμματα
    if (sim.getCurrentTick() % dayInTicks == 0) {
        updateCharts();
    }
}
```

Ο Παρήνας ενός Χρονικού Βήματος | στόχος – κίνηση- μόλυνση (SEIRSimulation.java)

```
public void run() {
    Cell[][] grid = space.getGridCurr(); // τρέχουσα κατάσταση κόσμου
    space.clearGridNext();
    Cell[][] gridNext = space.getGridNext(); // εδώ γράφεται η νέα κατάσταση

    updateTimeZone(); // ενημέρωση ζώνης ώρας (πρωί/μεσημέρι/...)

    diseaseTransmission(grid); // υπολογισμός μεταδόσεων στο τρέχον βήμα

    for (Agent a : agents) {
        a.updateGoal(); // έλεγχος αν ολοκληρώθηκε ο τρέχων στόχος
        if (a.isGoalChanged()) {
            decisionMaking(a); // επιλογή νέου στόχου + μονοπατιού (A*)
        }
        a.move(space.getRows(), space.getCols(), grid, gridNext); // κίνηση -> gridNext
        a.updateState(); // μετάβαση S->E->I->R όπου χρειάζεται
    }

    space.swapGrids(); // gridNext γίνεται το νέο gridCurr
}

public void diseaseTransmission(Cell[][] grid) {
    for (Cell[] row : grid) {
        for (Cell c : row) {
            List<Agent> agentsHere = c.getAgents();
            int agents = agentsHere.size();

            if (agents <= 1) continue;

            // Στις κατοικίες, μετάδοση μόνο εντός οικογένειας
            if (c.getBlockType().equals(BlockType.RESIDENTIAL)) {
                residenceDiseaseTransmission(agentsHere);
                continue;
            }

            // Πλήθος μολυσματικών στο κελί
            int infectiousCount = 0;
            for (Agent a : agentsHere) {
                if (a.isContagious()) infectiousCount++;
            }
            boolean contagiousPresent = infectiousCount > 0;

            if (contagiousPresent) {
                for (Agent a : agentsHere) {
                    if (a.getState() == State.SUSCEPTIBLE) {
                        // πιθανότητα τουλάχιστον μίας επαφής με κάποιον από τους υπόλοιπους
                        double interaction = 1 - Math.pow(1 - diseaseParam.interaction, agents - 1);
                        // πιθανότητα μετάδοσης από τους μολυσματικούς
                        double infect = 1 - Math.pow(1 - diseaseParam.infect, infectiousCount);
                        // μείωση λόγω ατομικής ανοσίας
                        infect = infect - infect * a.getImmunityScore();

                        if (rng.nextDouble() < infect * interaction) {
                            a.setState(State.EXPOSED); // S -> E
                            dailyInfections++;
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

Μετάβαση Μεταξύ των Επιδημιολογικών Καταστάσεων (Agent.java)

```
public void updateState() {
    if (!stateChangedThisTick) {
        ticksInState++;
    }
    stateChangedThisTick = false;

    if (state == State.EXPOSED) {
        if (ticksInState >= incubationPeriod * dayTicks) {
            setState(State.INFECTED);    // E -> I μετά την περίοδο επώασης
        }
    } else if (state == State.INFECTED) {
        if (ticksInState >= infectiousPeriod * dayTicks) {
            setState(State.RECOVERED);    // I -> R μετά την περίοδο νόσησης
        }
    }
}
```