



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**
University of the Peloponnese

Π.Μ.Σ. στην Επιστήμη Υπολογιστών

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Χρήση της Προσομοίωσης Διακριτών Συστημάτων
στην Επιστήμη Δεδομένων: Τεχνικές και Προκλήσεις**

Μπουρτσουκλής Διονύσιος

ΑΜ: 2022202202011

Επιβλέπων:

Βασιλάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής

Τρίπολη, Οκτώβριος 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Βασιλάκη Κωνσταντίνο, για την καθοδήγηση, την πολύτιμη επιστημονική του υποστήριξη και τη διαρκή ενθάρρυνση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, την ηθική στήριξη και την υπομονή που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη Δελή Παρασκευή για τη συνεχή υποστήριξη και την ενθάρρυνση της.

Η παρουσία όλων των παραπάνω αποτέλεσε σταθερό σημείο αναφοράς και πηγή δύναμης σε κάθε στάδιο της ακαδημαϊκής μου πορείας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογική προσέγγιση στην επιστήμη των δεδομένων, καθώς επιτρέπει την ανάλυση πολύπλοκων και δυναμικών φαινομένων σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από στοχαστικότητα και αβεβαιότητα. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη θεωρητική θεμελίωση, στις τεχνικές υλοποίησης και στις πρακτικές εφαρμογές αυτής της μεθόδου, με στόχο να αναδείξει τη χρησιμότητά της ως εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων και βελτιστοποίησης συστημάτων. Αρχικά, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της προσομοίωσης, οι τύποι που εφαρμόζονται στην πράξη —όπως η βασισμένη σε γεγονότα (events) ή πράκτορες (agents)— καθώς και η σημασία της επαλήθευσης και επικύρωσης μοντέλων.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι σημαντικότερες εφαρμογές στην επιστήμη των δεδομένων, όπως η πρόβλεψη τάσεων, η βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας, η προσομοίωση κυκλοφοριακών και χρηματοοικονομικών ροών, καθώς και η σύγκριση της προσομοίωσης με άλλες τεχνικές ανάλυσης, όπως η στατιστική και η μηχανική μάθηση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον συνδυασμό της προσομοίωσης με τις τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και μεγάλων δεδομένων (big data), που επιτρέπουν την αύξηση της ακρίβειας, της ταχύτητας και της προσαρμοστικότητας των μοντέλων. Τέλος, συζητούνται οι προκλήσεις και οι περιορισμοί της μεθόδου, όπως οι υπολογιστικές απαιτήσεις, η εξάρτηση από την ποιότητα των εισόδων και η ανάγκη συνεχούς επικαιροποίησης των μοντέλων. Η εργασία καταλήγει με προτάσεις για μελλοντική έρευνα και περαιτέρω αξιοποίηση της προσομοίωσης στην επιστήμη των δεδομένων.

Λέξεις Κλειδιά: Ανάλυση δεδομένων, Διακριτά συστήματα, Λήψη αποφάσεων, Προσομοίωση, Τεχνητή νοημοσύνη

ABSTRACT

Discrete event simulation is a widely adopted methodological approach in data science, offering robust means to analyze complex and dynamic systems characterized by uncertainty, stochastic behavior, and interdependent components. This thesis focuses on the theoretical foundations, technical implementation, and practical applications of discrete event simulation, emphasizing its role as a decision-support tool and a mechanism for optimizing system performance. The study first introduces the key principles of simulation, including common paradigms such as event-driven and agent-based models, and outlines essential steps for model verification and validation to ensure reliability and real-world relevance.

Subsequently, the thesis investigates critical applications in data science, including trend forecasting, supply chain optimization, traffic and financial flow modeling, and the comparison between simulation and other analytic approaches such as statistics and machine learning. Special attention is given to the integration of simulation with artificial intelligence and big data technologies, which significantly enhance the scalability, adaptability, and predictive accuracy of simulation models. The work also addresses key challenges and limitations—such as computational demands, dependency on input quality, and the need for continuous model updates—while proposing future research directions for expanding simulation's utility in increasingly data-driven environments.

Keywords: Artificial intelligence, Data analysis, Decision-making, Discrete systems, Simulation

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	3
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	4
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	8
2.1 Ορισμός και Βασικές Έννοιες Προσομοίωσης	8
2.2 Είδη Προσομοίωσης και Σύγκριση Μεταξύ τους	9
2.3 Το Μοντέλο Προσομοίωσης Διακριτών Συστημάτων	10
2.4 Αρχές Σχεδιασμού και Υλοποίησης Μοντέλων Προσομοίωσης	12
3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	14
3.1 Προσομοίωση Βασισμένη σε Γεγονότα (Event-Driven Simulation)	14
3.2 Προσομοίωση Βασισμένη σε Πράκτορες (Agent-Based Simulation)	15
3.3 Στοχαστικά Μοντέλα και Μέθοδοι Προσομοίωσης	16
3.4 Υπολογιστικές Τεχνικές και Εργαλεία Προσομοίωσης	18
4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	20
4.1 Ανάλυση Και Πρόβλεψη Τάσεων Δεδομένων	20
4.2 Βελτιστοποίηση Επιχειρησιακών Διαδικασιών	21
4.3 Προσομοίωση Κυκλοφοριακών και Εφοδιαστικών Ροών	22
4.4 Εφαρμογή στη Χρηματοοικονομική Ανάλυση	23
5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	25
5.1 Σχέση Προσομοίωσης Με Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων	25
5.2 Σύγκριση με Τεχνικής Μηχανικής Μάθησης	26

5.3	Συνδυασμός Προσομοίωσης με Big Data Analytics	28
5.4	Πλεονεκτήματα Και Περιορισμοί της Προσομοίωσης Έναντι Εναλλακτικών Προσεγγίσεων	29
6	ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	32
6.1	Ζητήματα Ακριβείας και Επικύρωσης Μοντέλων Προσομοίωσης	32
6.2	Υπολογιστικές Απαιτήσεις και Ανάγκη για Βελτισποίηση Αλγορίθμων	33
6.3	Προοπτικές Ενσωμάτωσης Τεχνητής Νοημοσύνης στην Προσομοίωση	35
7	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	37
7.1	Συμπεράσματα	37
7.2	Δυνατότητες Μελλοντικής Επέκτασης	37
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	39

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία αύξηση της πολυπλοκότητας των συστημάτων που μελετώνται στην επιστήμη δεδομένων καθιστά αναγκαία τη χρήση προηγμένων εργαλείων ανάλυσης και πρόβλεψης. Σε αυτό το πλαίσιο, η προσομοίωση διακριτών συστημάτων (Discrete Event Simulation – DES) αναδεικνύεται ως μια ισχυρή μεθοδολογική προσέγγιση, ικανή να αναπαραστήσει με ακρίβεια τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ οντοτήτων σε περιβάλλοντα υψηλής αβεβαιότητας και στοχαστικής συμπεριφοράς. Η προσομοίωση επιτρέπει την εξερεύνηση σεναρίων που των οποίων η μελέτη δεν μπορεί να γίνει ευχερώς μέσω παραδοσιακών στατιστικών ή αναλυτικών τεχνικών, και προσφέρει τη δυνατότητα πειραματισμού χωρίς τον κίνδυνο ή το κόστος που θα συνεπαγόταν η παρέμβαση στον πραγματικό κόσμο.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη θεωρητική τεκμηρίωση και την πρακτική εφαρμογή της προσομοίωσης διακριτών συστημάτων στο πεδίο της επιστήμης των δεδομένων. Παρουσιάζονται οι βασικές τεχνικές προσομοίωσης, οι μέθοδοι σχεδιασμού και επικύρωσης μοντέλων προσομοίωσης, καθώς και η σύνδεση της προσομοίωσης με σύγχρονες τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη και τα big data analytics. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις εφαρμογές της προσομοίωσης σε πεδία όπως η εφοδιαστική αλυσίδα, η κυκλοφοριακή ανάλυση, η χρηματοοικονομική μοντελοποίηση και η βελτιστοποίηση επιχειρησιακών διαδικασιών.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να καταδείξει τον τρόπο με τον οποίο η προσομοίωση διακριτών συστημάτων μπορεί να ενισχύσει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, να προσφέρει βαθύτερη κατανόηση περίπλοκων συστημάτων και φαινομένων και να συμβάλει στην ανάπτυξη ευφών και προσαρμοστικών συστημάτων ανάλυσης δεδομένων. Παράλληλα, αναδεικνύονται οι τεχνικές και επιστημονικές προκλήσεις που συνοδεύουν την εφαρμογή της, ανοίγοντας τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση της μεθοδολογίας.

Η παρούσα εργασία δομείται ως ακολούθως: στο κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται μία εισαγωγή στην προσομοίωση διακριτών συστημάτων, παρατίθενται ορισμοί και εξηγούνται οι βασικές έννοιες της προσομοίωσης, περιγράφονται τα διαφορετικά είδη προσομοίωσης με έμφαση στην προσομοίωση διακριτών συστημάτων και παρατίθενται οι αρχές σχεδιασμού και υλοποίησης μοντέλων προσομοίωσης. Στο

κεφάλαιο 3 αναλύονται οι τεχνικές και οι μεθοδολογίες προσομοίωσης διακριτών συστημάτων, εστιάζοντας στην Βασισμένη Σε Γεγονότα Προσομοίωση (Event-Driven Simulation) και την Βασισμένη Σε Πράκτορες Προσομοίωση (Agent-Based Simulation), ενώ παράλληλα εξετάζεται και η χρήση στοχαστικών μοντέλων και μοντέλων προσομοίωσης στο πλαίσιο της προσομοίωσης συστημάτων που χαρακτηρίζονται από τυχαιότητα. Τέλος, εξετάζονται σχετικές υπολογιστικές τεχνικές και εργαλεία προσομοίωσης.

Στο κεφάλαιο 4 εξετάζονται σημαντικές εφαρμογές της προσομοίωσης διακριτών συστημάτων στην επιστήμη των δεδομένων, συμπεριλαμβάνοντας την ανάλυση και πρόβλεψη τάσεων δεδομένων, τη βελτιστοποίηση των επιχειρησιακών διαδικασιών, την προσομοίωση κυκλοφοριακών και εφοδιαστικών ροών και τη χρηματοοικονομική ανάλυση.

Στο κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται σύγκριση της προσομοίωσης διακριτών συστημάτων με άλλες μεθόδους ανάλυσης δεδομένων, ιδιαίτερα με (α) τη στατιστική ανάλυση δεδομένων, (β) τη μηχανική μάθηση και (γ) analytics μεγάλων δεδομένων, και εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της προσομοίωσης έναντι των άλλων προσεγγίσεων.

Στο κεφάλαιο 6 αναλύονται οι προκλήσεις και οι μελλοντικές προοπτικές για την προσομοίωση διακριτών συστημάτων. Ειδικότερα εξετάζονται ζητήματα ακρίβειας και επικύρωσης μοντέλων προσομοίωσης, οι υπολογιστικές απαιτήσεις των αλγορίθμων και οι ανάγκες για τη βελτιστοποίηση των αλγορίθμων, καθώς και οι προοπτικές ενσωμάτωσης της τεχνητής νοημοσύνης στην προσομοίωση.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 παρέχεται μία σύνοψη της εργασίας, εξάγονται συμπεράσματα και σκιαγραφούνται κατευθύνσεις μελλοντικής επέκτασης.

2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1 Ορισμός και Βασικές Έννοιες Προσομοίωσης

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων αποτελεί μια μεθοδολογία ανάλυσης και μελέτης συστημάτων, τα οποία εξελίσσονται με διακριτό τρόπο στον χρόνο. Πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία δημιουργείται ένα υπολογιστικό μοντέλο που αναπαριστά τη λειτουργία ενός πραγματικού συστήματος και επιτρέπει την πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς του (Goldsman & Goldsman, 2015).

Η προσομοίωση χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους τομείς, όπως η βιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη, η πληροφορική, η αεροναυπηγική και η διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας (Sweetser, 1999). Στηρίζεται στη δημιουργία μαθηματικών και λογικών μοντέλων που περιγράφουν τις λειτουργίες του υπό εξέταση συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις εισόδους, τις εξόδους και τις εσωτερικές του διεργασίες.

Βασικές έννοιες που σχετίζονται με την προσομοίωση περιλαμβάνουν το σύστημα που είναι το αντικείμενο μελέτης και αποτελείται από σύνολα στοιχείων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το μοντέλο προσομοίωσης είναι μια αφαιρετική αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος, η οποία μπορεί να είναι συνεχής ή διακριτή, ανάλογα με τον τρόπο που εξελίσσονται οι καταστάσεις του συστήματος, και συνακόλουθα του μοντέλου. Στα διακριτά συστήματα, η αλλαγή κατάστασης πραγματοποιείται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, οι οποίες προκαλούνται από γεγονότα (Goldsman & Goldsman, 2015).

Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο είναι ο χρόνος προσομοίωσης, ο οποίος μπορεί να εξελίσσεται με βήματα (discrete time simulation) ή μέσω μιας προσέγγισης συμβάντων (event-driven simulation), όπου ο χρόνος προχωρά μόνο όταν λαμβάνουν χώρα γεγονότα (Goldsman & Goldsman, 2015). Επιπλέον, η τυχαιότητα διαδραματίζει συχνά ρόλο, καθώς πολλά πραγματικά συστήματα επηρεάζονται από τυχαίους παράγοντες, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση γεννητριών τυχαίων αριθμών στην προσομοίωση.

Η ανάλυση της προσομοίωσης περιλαμβάνει την επαλήθευση και την επικύρωση του μοντέλου, ώστε να διασφαλιστεί ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται με ακρίβεια στο

πραγματικό σύστημα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των συμπερασμάτων που προκύπτουν.

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο λήψης αποφάσεων, καθώς επιτρέπει τη δοκιμή διαφορετικών σεναρίων και την εκτίμηση της απόδοσης ενός συστήματος πριν από την εφαρμογή αλλαγών στον πραγματικό κόσμο.

2.2 Είδη Προσομοίωσης και Σύγκριση Μεταξύ τους

Η προσομοίωση μπορεί να ταξινομηθεί σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο αναπαράστασης και διαχείρισης του χρόνου, καθώς και τη φύση του μοντέλου. Μία βασική διάκριση αφορά την προσομοίωση διακριτών έναντι της προσομοίωσης συνεχών συστημάτων. Στην προσομοίωση διακριτών συστημάτων, οι αλλαγές καταστάσεων συμβαίνουν σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, που συνδέονται με την εμφάνιση γεγονότων. Αντίθετα, στην προσομοίωση συνεχών συστημάτων, η κατάσταση μεταβάλλεται συνεχώς με τον χρόνο και συχνά περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις (Sweetser, 1999).

Μια άλλη κατηγοριοποίηση βασίζεται στον τρόπο που εξελίσσεται ο χρόνος. Η προσομοίωση βασισμένη σε διακριτό χρόνο εξετάζει το σύστημα σε σταθερά χρονικά διαστήματα, ενώ η προσομοίωση βασισμένη σε γεγονότα προχωρά στον χρόνο μόνο όταν λαμβάνει χώρα κάποιο σημαντικό γεγονός. Η δεύτερη προσέγγιση είναι συνήθως πιο αποδοτική, καθώς αποφεύγεται η ανάλυση χρονικών στιγμών όπου δεν συμβαίνει καμία αλλαγή (Sweetser, 1999).

Η προσομοίωση μπορεί επίσης να είναι αιτιοκρατική (ντετερμινιστική - deterministic) ή στοχαστική (stochastic). Στην αιτιοκρατική προσομοίωση, το μοντέλο παράγει πάντα τα ίδια αποτελέσματα για τις ίδιες αρχικές συνθήκες, καθώς δεν εμπεριέχει τυχαίους παράγοντες. Αντίθετα, η στοχαστική προσομοίωση περιλαμβάνει τυχειότητα και μπορεί να παράγει διαφορετικά αποτελέσματα κάθε φορά που εκτελείται, καθιστώντας απαραίτητη τη στατιστική ανάλυση και ερμηνεία των εξαγόμενων δεδομένων (Collins κ.ά., 2023).

Μια ακόμη διάκριση αφορά την προσομοίωση αναλογικών και ψηφιακών μοντέλων. Η αναλογική προσομοίωση χρησιμοποιεί φυσικά ή ηλεκτρονικά κυκλώματα για την

αναπαράσταση ενός συστήματος, ενώ η ψηφιακή προσομοίωση υλοποιείται μέσω προγραμματιστικών αλγορίθμων σε υπολογιστές. Η ψηφιακή προσομοίωση είναι πιο ευέλικτη και ευρέως χρησιμοποιούμενη, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία εναλλακτικών ή/και κατάλληλα προσαρμοσμένων μοντέλων, προκειμένου για τη δοκιμή σύνθετων συστημάτων (Goldsman & Goldsman, 2015).

Η κατάλληλότητα των διαφορετικών κατηγοριών προσομοίωσης για τη μελέτη ενός συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος και τις απαιτήσεις της εκάστοτε μελέτης. Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για μοντελοποίηση διαδικασιών που περιλαμβάνουν ουρές, όπως η διαχείριση πελατών σε ένα κατάστημα ή η λειτουργία δικτύων υπολογιστών (Bossel, 2018). Αντίθετα, η προσομοίωση συνεχών συστημάτων είναι πιο χρήσιμη σε εφαρμογές φυσικών επιστημών και μηχανικής, όπως η αεροναυπηγική και η μελέτη δυναμικών συστημάτων (Sweetser, 1999). Η επιλογή μεταξύ προσομοίωσης βασισμένης σε γεγονότα ή διακριτό χρόνο εξαρτάται από την ανάγκη αποδοτικότητας και ακρίβειας, αλλά και τα χαρακτηριστικά του προσομοιωμένου συστήματος. Για παράδειγμα, για συστήματα όπου υπάρχουν μεγάλα διαστήματα όπου δεν λαμβάνουν χώρα γεγονότα και για τα διαστήματα αυτά η κατάσταση του συστήματος παραμένει σταθερή, η βασισμένη σε γεγονότα προσομοίωση είναι συνήθως προτιμότερη. Αν ωστόσο η κατάσταση του συστήματος μεταβάλλεται μεταξύ των γεγονότων ή εάν τα γεγονότα είναι πολυάριθμα και πυκνά, η προσομοίωση διακριτού χρόνου είναι πιο δόκιμη επιλογή. Η διάκριση μεταξύ αιτιοκρατικής και στοχαστικής προσομοίωσης είναι κρίσιμη όταν το σύστημα επηρεάζεται από αβεβαιότητα και τυχαίες μεταβλητές.

Η κατανόηση αυτών των κατηγοριών είναι απαραίτητη για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη φύση και τα χαρακτηριστικά του συστήματος, τους στόχους της ανάλυσης, την υπολογιστική πολυπλοκότητα και την ανάγκη για ακρίβεια στα αποτελέσματα.

2.3 Το Μοντέλο Προσομοίωσης Διακριτών Συστημάτων

Το μοντέλο προσομοίωσης διακριτών συστημάτων αποτελεί μια μαθηματική και υπολογιστική αναπαράσταση ενός πραγματικού συστήματος, στο οποίο οι αλλαγές καταστάσεων συμβαίνουν σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, που προκαλούνται από

διακριτά γεγονότα. Βασίζεται στη λογική των γεγονότων και της ακολουθίας τους, επιτρέποντας την ανάλυση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός συστήματος χωρίς την ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης του χρόνου (Karnon & Haji Ali Afzali, 2014).

Η δομή ενός τέτοιου μοντέλου περιλαμβάνει βασικά στοιχεία, όπως το σύστημα που προσομοιώνεται, τις οντότητες που το συνθέτουν, τις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί, τα γεγονότα που προκαλούν αλλαγές στην κατάστασή του, τους πόρους που χρησιμοποιούνται και τους κανόνες που διέπουν τη δυναμική του. Ο χρόνος στην προσομοίωση διακριτών συστημάτων εξελίσσεται είτε με σταθερά χρονικά διαστήματα είτε μέσω προώθησης από γεγονός σε γεγονός, ανάλογα με την επιλεγμένη μεθοδολογία.

Στην προσομοίωση γεγονότων, τα συμβάντα διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο, καθώς καθορίζουν τις στιγμές που το σύστημα αλλάζει κατάσταση. Κάθε γεγονός περιλαμβάνει μια χρονική σήμανση και ένα σύνολο από ενέργειες που εκτελούνται όταν το γεγονός λάβει χώρα (Waller & Fawcett, 2013). Το ημερολόγιο γεγονότων (event queue) είναι ένας μηχανισμός που οργανώνει και διαχειρίζεται την ακολουθία των γεγονότων, εξασφαλίζοντας ότι αυτά υλοποιούνται με τη σωστή σειρά στον χρόνο.

Η διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου προσομοίωσης διακριτών συστημάτων περιλαμβάνει τη διαμόρφωση του συστήματος, τον καθορισμό των μεταβλητών και των σχέσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του, την ανάπτυξη αλγορίθμων που προσομοιώνουν τη ροή των γεγονότων και την επιλογή κατάλληλων μεθόδων για τη συλλογή και ανάλυση των αποτελεσμάτων (Goldsman & Goldsman, 2015). Για την αξιοπιστία του μοντέλου, απαιτείται επαλήθευση, που διασφαλίζει τη σωστή υλοποίηση του προγράμματος, και επικύρωση, που επιβεβαιώνει ότι το μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά ρεαλιστικά τη λειτουργία του πραγματικού συστήματος.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει στατιστική επεξεργασία των δεδομένων που παράγονται από τις προσομοιώσεις, με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες. Μέσω της προσομοίωσης διακριτών συστημάτων, είναι δυνατή η αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών και τρόπων λειτουργίας, η αναγνώριση πιθανών προβλημάτων και η λήψη βελτιστοποιημένων αποφάσεων για την αποτελεσματική διαχείριση πολύπλοκων διαδικασιών.

2.4 Αρχές Σχεδιασμού και Υλοποίησης Μοντέλων Προσομοίωσης

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μοντέλων προσομοίωσης ακολουθεί συγκεκριμένες αρχές που εξασφαλίζουν την ακρίβεια, την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία της προσομοίωσης. Αρχικά, απαιτείται ο σαφής ορισμός του προβλήματος που πρόκειται να προσομοιωθεί, καθορίζοντας τον σκοπό της προσομοίωσης, τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος και τις παραμέτρους που θα επηρεάσουν τη συμπεριφορά του (Müller, 2005). Η ανάλυση του πραγματικού συστήματος είναι απαραίτητη για τη διαμόρφωση του μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη τις οντότητες, τις μεταβλητές, τις καταστάσεις και τις σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του συστήματος.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας προσομοίωσης βασίζεται στη φύση του συστήματος και στους στόχους της μελέτης. Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων απαιτεί τη διαχείριση γεγονότων και την οργάνωση της ροής του χρόνου, ενώ η προσομοίωση συνεχών συστημάτων επικεντρώνεται στη χρήση διαφορικών εξισώσεων για την περιγραφή των μεταβολών του συστήματος (Sweetser, 1999). Επιπλέον, η δομή του προσομοιωμένου μοντέλου πρέπει να είναι σαφώς καθορισμένη, ώστε να επιτρέπει την εύκολη τροποποίηση και προσαρμογή του σε διαφορετικά σενάρια.

Η διαδικασία ανάπτυξης του προσομοιωμένου μοντέλου περιλαμβάνει τον καθορισμό αλγορίθμων και τη χρήση προγραμματιστικών τεχνικών για την υλοποίηση της προσομοίωσης. Η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού ή του λογισμικού προσομοίωσης επηρεάζει την απόδοση και την ευκολία υλοποίησης, ενώ η χρήση κατάλληλων δομών δεδομένων συμβάλλει στη διαχείριση των στοιχείων του μοντέλου (Müller, 2005). Η αποδοτική διαχείριση της μνήμης και των υπολογιστικών πόρων είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της ταχύτητας εκτέλεσης, αλλά και τη δυνατότητα εκτέλεσης του μοντέλου σε συστήματα με συγκεκριμένους πόρους, και την αντιμετώπιση προβλημάτων μεγάλης κλίμακας (Müller, 2005).

Η επικύρωση και η επαλήθευση του μοντέλου είναι σημαντικά στάδια στον σχεδιασμό, καθώς εξασφαλίζουν την ορθότητα της προσομοίωσης και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η επαλήθευση εστιάζει στη σωστή υλοποίηση του αλγορίθμου και στην αποφυγή και την εξάλειψη σφαλμάτων προγραμματισμού, ενώ η επικύρωση

συγκρίνει την έξοδο του προσομοιωμένου μοντέλου με πραγματικά δεδομένα ή θεωρητικές προβλέψεις (Lorig & Timm, 2020). Η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται μέσω στατιστικών μεθόδων και τεχνικών οπτικοποίησης δεδομένων, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και να αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος.

Η αξιοποίηση της προσομοίωσης για λήψη αποφάσεων απαιτεί τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων και τη δοκιμή διαφορετικών παραμέτρων, ώστε να εντοπιστούν κατάλληλες λύσεις για τη βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος. Η συνεχής ανατροφοδότηση και προσαρμογή του μοντέλου με βάση νέα δεδομένα ή διαφορετικές απαιτήσεις εξασφαλίζει τη διαχρονική αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης (Giunta κ.ά., 2012). Με αυτόν τον τρόπο, η προσομοίωση καθίσταται ένα ισχυρό εργαλείο ανάλυσης και υποστήριξης αποφάσεων σε ποικίλους τομείς, όπως η βιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη, τα οικονομικά και η μηχανική.

3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.1 Προσομοίωση Βασισμένη σε Γεγονότα (Event-Driven Simulation)

Η προσομοίωση βασισμένη σε γεγονότα (Event-Driven Simulation) είναι μια τεχνική προσομοίωσης διακριτών συστημάτων στην οποία οι αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος συμβαίνουν σε διακριτές χρονικές στιγμές, που καθορίζονται από γεγονότα. Σε αντίθεση με τις συνεχείς προσομοιώσεις, όπου ο χρόνος εξελίσσεται με σταθερό ρυθμό, στη βασισμένη σε γεγονότα προσομοίωση ο χρόνος προωθείται από το χρονικό σημείο εμφάνισης ενός γεγονότος στο χρονικό σημείο εμφάνισης του επόμενου, καθιστώντας τη διαδικασία πιο αποδοτική και λιγότερο απαιτητική σε υπολογιστικούς πόρους (Lubachevsky, 1989).

Η βασική δομή αυτής της μεθόδου περιλαμβάνει ένα ημερολόγιο γεγονότων (event queue), το οποίο αποθηκεύει και διαχειρίζεται τα προγραμματισμένα γεγονότα με τη σειρά που πρέπει να εκτελεστούν. Κάθε γεγονός αποτελείται από μια χρονική σήμανση και ένα σύνολο από ενέργειες που εκτελούνται όταν το γεγονός λαμβάνει χώρα. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ο πυρήνας της διαδικασίας επιλέγει το επόμενο γεγονός από το ημερολόγιο, ενημερώνει την κατάσταση του συστήματος σύμφωνα με τους κανόνες του μοντέλου και προγραμματίζει νέα γεγονότα που απορρέουν από την εξέλιξη του συστήματος (Lubachevsky, 1989).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της βασισμένης σε γεγονότα προσομοίωσης είναι η αποδοτική χρήση του χρόνου και των υπολογιστικών πόρων, αφού η προσομοίωση εξελίσσεται και καταναλώνει πόρους μόνο όταν συμβαίνουν πραγματικές αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος. Αυτό επιτρέπει τη μοντελοποίηση πολύπλοκων διαδικασιών με μεγάλο αριθμό γεγονότων, χωρίς περιττή κατανάλωση υπολογιστικής ισχύος (Mattia & Giudice, 2000). Επίσης, παρέχει ακρίβεια στην καταγραφή της χρονικής εξέλιξης των συστημάτων, καθώς οι αλλαγές λαμβάνουν χώρα σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (δηλ. τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες λαμβάνουν χώρα τα συμβάντα) και όχι σε προκαθορισμένα διαστήματα (Lubachevsky, 1989).

Η υλοποίηση μιας βασισμένης σε γεγονότα προσομοίωσης απαιτεί τον σαφή ορισμό των στοιχείων του μοντέλου, όπως οι τύποι γεγονότων, οι μεταβλητές κατάστασης, οι κανόνες μετάβασης και οι σχέσεις μεταξύ των οντοτήτων του συστήματος. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται αποδοτικοί αλγόριθμοι για τη διαχείριση του ημερολογίου γεγονότων, όπως ουρές προτεραιότητας ή δυαδικά δέντρα αναζήτησης, ώστε να εξασφαλιστεί η ταχεία ανάκτηση και εκτέλεση των γεγονότων (Lubachevsky, 1989).

Η βασισμένη σε γεγονότα προσομοίωση βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα τομέων, όπως τα δίκτυα υπολογιστών, η διαχείριση συστημάτων μεταφορών, η υγειονομική περίθαλψη, τα χρηματοοικονομικά και η εφοδιαστική αλυσίδα. Έχοντας αυξημένη ικανότητά να αναπαριστά συστήματα όπου τα γεγονότα καθορίζουν τη ροή λειτουργίας, αποτελεί μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές προσομοίωσης διακριτών συστημάτων, προσφέροντας χρήσιμα εργαλεία για τη βελτιστοποίηση διαδικασιών και τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων.

3.2 Προσομοίωση Βασισμένη σε Πράκτορες (Agent-Based Simulation)

Η βασισμένη σε πράκτορες προσομοίωση (Agent-Based Simulation) είναι μια τεχνική προσομοίωσης διακριτών συστημάτων που εστιάζει στη μοντελοποίηση των συμπεριφορών και των αλληλεπιδράσεων αυτόνομων οντοτήτων, τα οποία είναι γνωστά ως *πράκτορες* (agents), μέσα σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον (Keller & Hu, 2019). Οι πράκτορες μπορούν να είναι άτομα, οργανισμοί, μηχανές ή οποιαδήποτε άλλη οντότητα που έχει την ικανότητα να λαμβάνει αποφάσεις και να προσαρμόζει τη συμπεριφορά της με βάση τους κανόνες που διέπουν το σύστημα.

Η βασική αρχή της προσέγγισης αυτής είναι η αναπαράσταση της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πρακτόρων και του περιβάλλοντός τους, επιτρέποντας την ανάδυση πολύπλοκων συμπεριφορών από απλούς κανόνες. Κάθε πράκτορας έχει ένα σύνολο χαρακτηριστικών και καταστάσεων, ενώ μπορεί να ακολουθεί στρατηγικές, να προσαρμόζεται σε νέα δεδομένα και να επηρεάζει άλλους πράκτορες (Keller & Hu, 2019). Οι αλληλεπιδράσεις αυτές μπορούν να είναι άμεσες, μέσω επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων, ή έμμεσες, μέσω αλλαγών στο περιβάλλον που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των άλλων πρακτόρων.

Η προσομοίωση βασισμένη σε πράκτορες χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων, καθώς επιτρέπει την αναπαράσταση αποκεντρωμένων διαδικασιών και την εξέλιξη συστημάτων σε βάθος χρόνου (Mattia & Giudice, 2000). Σε αντίθεση με άλλες τεχνικές προσομοίωσης που εστιάζουν σε συστηματικούς κανόνες και κεντρικό έλεγχο, η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ανάπτυξη συστημάτων όπου η συνολική συμπεριφορά προκύπτει από τις ατομικές δράσεις των πρακτόρων, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας κεντρικής αρχής ελέγχου (Mattia & Giudice, 2000).

Η υλοποίηση μιας προσομοίωσης βασισμένης σε πράκτορες απαιτεί την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων για τον ορισμό των χαρακτηριστικών, των κανόνων συμπεριφοράς και των μηχανισμών λήψης αποφάσεων των πρακτόρων. Συχνά χρησιμοποιούνται γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και ειδικές πλατφόρμες προσομοίωσης, όπως NetLogo, Repast και AnyLogic, που διευκολύνουν την ανάπτυξη και τη διαχείριση τέτοιων μοντέλων (Hocaoğlu, 2018).

Η βασισμένη σε πράκτορες προσομοίωση εφαρμόζεται σε πολλούς τομείς, όπως η μελέτη της κοινωνικής δυναμικής στο πλαίσιο της κοινωνικής επιστήμης, η οικονομία, η επιδημιολογία, η ανάλυση μεταφορών και η διαχείριση πολύπλοκων συστημάτων. Στην κοινωνική επιστήμη, χρησιμοποιείται για την κατανόηση της εξάπλωσης ιδεών ή κοινωνικών φαινομένων, ενώ στην επιδημιολογία επιτρέπει τη μελέτη της εξάπλωσης μολυσματικών ασθενειών μέσω της αλληλεπίδρασης των πρακτόρων. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει μεγάλη ευελιξία και επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων σεναρίων, προσφέροντας χρήσιμα εργαλεία για την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση συστημάτων πραγματικού κόσμου.

3.3 Στοχαστικά Μοντέλα και Μέθοδοι Προσομοίωσης

Τα στοχαστικά μοντέλα και οι μέθοδοι προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση συστημάτων που επηρεάζονται από αβεβαιότητα και τυχαιότητα. Σε αντίθεση με τα ντετερμινιστικά μοντέλα, στα οποία η ίδια είσοδος οδηγεί πάντα στο ίδιο αποτέλεσμα, τα στοχαστικά μοντέλα ενσωματώνουν τυχαίους παράγοντες, επιτρέποντας την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων και την εκτίμηση της πιθανής κατανομής των αποτελεσμάτων.

Η βασική αρχή των στοχαστικών μοντέλων βασίζεται στη χρήση τυχαίων μεταβλητών για την αναπαράσταση απρόβλεπτων γεγονότων και τη μοντελοποίηση καταστάσεων όπου οι παράγοντες του συστήματος δεν είναι πλήρως γνωστοί ή ελέγξιμοι. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες, καθώς και την ανάλυση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων (Αγγελίδου, 2018).

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται σε στοχαστικά μοντέλα περιλαμβάνουν τη μέθοδο Monte Carlo, τη στοχαστική δυναμική (stochastic dynamics) και τις αλυσίδες Markov. Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιεί τυχαία δείγματα για την προσεγγιστική επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, τα οποία μπορεί να είναι δύσκολο να επιλυθούν με αναλυτικό τρόπο (Αγγελίδου, 2018). Χρησιμοποιείται ευρέως στη φυσική, τη χρηματοοικονομική μοντελοποίηση και τη διαχείριση κινδύνων. Η στοχαστική δυναμική είναι η μελέτη δυναμικών διεργασιών που συμβαίνουν σε αρκετά μεγάλες χρονικές κλίμακες, έτσι ώστε οι ταχείς βαθμοί ελευθερίας που εμφανίζονται σε μικροκλίμακα να μπορούν ουσιαστικά να περιγραφούν ως στοχαστικός θόρυβος. Ένα σύνθηρες παράδειγμα προβλήματος που μοντελοποιείται με στοχαστική δυναμική είναι η διάχυση ενός σωματιδίου Μπράουν σε ένα ρευστό. Οι αλυσίδες Markov περιγράφουν συστήματα που μεταβαίνουν από μια κατάσταση σε άλλη με πιθανότητες που εξαρτώνται μόνο από την τρέχουσα κατάσταση και όχι από το ιστορικό τους, επιτρέποντας τη μοντελοποίηση διαδικασιών όπως η εξάπλωση μολυσματικών ασθενειών και η ανάλυση συστημάτων αναμονής (Κάτρης, 2017).

Η χρήση στοχαστικών μοντέλων στη διαδικασία της προσομοίωσης επιτρέπει τη διερεύνηση της συμπεριφοράς συστημάτων που λειτουργούν υπό αβεβαιότητα, την εκτίμηση της πιθανής απόδοσης ενός συστήματος και τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων με βάση την πιθανή κατανομή των αποτελεσμάτων. Αυτές οι μέθοδοι βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων, όπως η μηχανική, η οικονομία, η επιδημιολογία, η διοικητική επιστήμη και η ανάλυση ρίσκου, προσφέροντας ένα ισχυρό εργαλείο για την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση πολύπλοκων προβλημάτων.

3.4 Υπολογιστικές Τεχνικές και Εργαλεία Προσομοίωσης

Οι υπολογιστικές τεχνικές και τα εργαλεία προσομοίωσης αποτελούν βασικά στοιχεία για την ανάπτυξη, την ανάλυση και την υλοποίηση μοντέλων προσομοίωσης διακριτών συστημάτων. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν αλγορίθμους και μεθοδολογίες που επιτρέπουν την αποδοτική διαχείριση δεδομένων, την επεξεργασία γεγονότων και τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των συστημάτων μέσω προγραμματιστικών εργαλείων και εξειδικευμένων λογισμικών.

Μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές είναι η βασισμένη σε γεγονότα προσομοίωση (event-driven simulation), η οποία χρησιμοποιείται για τη διαχείριση συστημάτων όπου γεγονότα ενεργοποιούν αλλαγές στην κατάσταση του μοντέλου. Αυτή η τεχνική, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, απαιτεί μηχανισμούς χρονισμού και ουρές προτεραιότητας για την αποδοτική εκτέλεση των προσομοιώσεων. Επίσης, χρησιμοποιούνται αριθμητικές και στατιστικές τεχνικές για τη μοντελοποίηση αβεβαιοτήτων και τυχαίων διεργασιών, όπως η μέθοδος Monte Carlo, οι αλυσίδες Markov και οι στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις.

Τα εργαλεία προσομοίωσης περιλαμβάνουν λογισμικά και προγραμματιστικά περιβάλλοντα που επιτρέπουν τη δημιουργία και την εκτέλεση μοντέλων. Λογισμικά όπως το AnyLogic, το Arena και το Simul8 χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων, επιτρέποντας την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση διαδικασιών (Byrne κ.ά., 2010). Για την προσομοίωση βασισμένη σε πράκτορες, εργαλεία όπως το NetLogo, το Repast και το Mason παρέχουν εξειδικευμένες βιβλιοθήκες για τη δημιουργία και τη διαχείριση πρακτόρων και των αλληλεπιδράσεών τους (Abar κ.ά., 2017). Επιπλέον, γλώσσες προγραμματισμού όπως η Python και η R προσφέρουν ισχυρές βιβλιοθήκες για την ανάλυση δεδομένων και την ανάπτυξη προσομοιωμένων μοντέλων, με τη χρήση πακέτων όπως το SimPy και το deSolve (Abar κ.ά., 2017).

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής και του κατάλληλου εργαλείου εξαρτάται από τη φύση του υπό μελέτη συστήματος, την πολυπλοκότητα του μοντέλου και τους στόχους της προσομοίωσης. Οι σύγχρονες εξελίξεις στην υπολογιστική ισχύ και την τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπουν τη βελτίωση της ακρίβειας και της αποδοτικότητας των

προσομοιώσεων, καθιστώντας τες απαραίτητο εργαλείο για την κατανόηση και τη λήψη αποφάσεων σε πολύπλοκα συστήματα.

4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Ανάλυση Και Πρόβλεψη Τάσεων Δεδομένων

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην επιστήμη των δεδομένων, ιδιαίτερα στον τομέα της ανάλυσης και της πρόβλεψης τάσεων δεδομένων. Η προσομοίωση επιτρέπει τη δημιουργία μοντέλων που αναπαριστούν δυναμικά και πολύπλοκα συστήματα, βοηθώντας στην κατανόηση της εξέλιξης των δεδομένων και στη λήψη αποφάσεων βασισμένων σε μελλοντικές προβλέψεις (Kesaraju & and Ciarallo, 2012).

Η ανάλυση τάσεων δεδομένων περιλαμβάνει τη μελέτη ιστορικών δεδομένων για τον εντοπισμό προτύπων και επαναλαμβανόμενων συμπεριφορών. Τα μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για την ανάλυση αυτών των δεδομένων, εφαρμόζοντας στατιστικές και μηχανικές τεχνικές μάθησης για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Η στοχαστική προσομοίωση, με τεχνικές που αναφέρθηκαν και πιο πάνω, όπως οι αλυσίδες Markov και η μέθοδος Monte Carlo, συμβάλλει στην εκτίμηση της πιθανής εξέλιξης τάσεων με βάση πιθανότητες και αβεβαιότητα.

Η πρόβλεψη τάσεων δεδομένων βασίζεται σε αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και τεχνικές προσομοίωσης, όπως η προσομοίωση βασισμένη σε γεγονότα ή η προσομοίωση βασισμένη σε πράκτορες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη μπορεί να περιλαμβάνουν οικονομικές μεταβλητές, κοινωνικές τάσεις, μοτίβα κατανάλωσης ή ακόμα και καιρικά δεδομένα (Provost & Fawcett, 2013). Μέσα από την ανάλυση και τη μοντελοποίηση της εξέλιξης αυτών των δεδομένων, οι επιχειρήσεις και οι οργανισμοί μπορούν να προσαρμόσουν τις στρατηγικές τους και να λάβουν αποφάσεις με μειωμένο ρίσκο.

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων προσφέρει ένα δυναμικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει την επιστήμη των δεδομένων. Επιτρέπει τη δοκιμή διαφορετικών σεναρίων και την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεών τους, βελτιώνοντας την ακρίβεια των αναλύσεων

και των προβλέψεων. Με την πρόοδο των υπολογιστικών τεχνικών και τη διαθεσιμότητα μεγάλων όγκων δεδομένων, τα μοντέλα προσομοίωσης για την ανάλυση και την πρόβλεψη τάσεων αποκτούν ολοένα και πιο κεντρικό ρόλο για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών και τη λήψη αποτελεσματικών αποφάσεων.

4.2 Βελτιστοποίηση Επιχειρησιακών Διαδικασιών

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση επιχειρησιακών διαδικασιών, επιτρέποντας στις επιχειρήσεις να αναλύουν, να προβλέπουν και να βελτιώνουν τις λειτουργίες τους με τρόπο δυναμικό και αποδοτικό. Η προσομοίωση επιτρέπει τη δημιουργία εικονικών αναπαραστάσεων διαδικασιών, διευκολύνοντας τη δοκιμή εναλλακτικών σεναρίων και τη λήψη αποφάσεων χωρίς την ανάγκη άμεσης εφαρμογής τους στον πραγματικό κόσμο, η οποία συνεπάγεται κόστος ή/και διακινδυνεύσεις.

Ένας βασικός τομέας εφαρμογής είναι η διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας, όπου η προσομοίωση επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της διακίνησης αγαθών, τη μείωση των καθυστερήσεων και την εξοικονόμηση πόρων. Η ανάλυση της ροής εργασιών μέσω προσομοιωμένων μοντέλων βοηθά στην αναγνώριση σημείων συμφόρησης και στην αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων, όπως η προσαρμογή των αποθεμάτων ή η βελτίωση των διαδρομών μεταφοράς (Ramirez, 1997).

Στον τομέα της παραγωγής και των βιομηχανικών διαδικασιών, η προσομοίωση χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση των γραμμών παραγωγής, την πρόβλεψη της ζήτησης και τη μείωση των αποβλήτων. Τα προσομοιωμένα μοντέλα επιτρέπουν την αξιολόγηση διαφορετικών διαμορφώσεων του εξοπλισμού και των ροών εργασίας, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα (Wang & Zhai, 2016).

Επιπλέον, η προσομοίωση διακριτών συστημάτων εφαρμόζεται στη βελτιστοποίηση διαδικασιών εξυπηρέτησης πελατών και στη διαχείριση ανθρώπινων πόρων. Στον κλάδο των υπηρεσιών, η προσομοίωση επιτρέπει την πρόβλεψη των αναγκών σε προσωπικό, τη μείωση των χρόνων αναμονής και τη βελτίωση της συνολικής εμπειρίας των πελατών (Giunta κ.ά., 2012).

Η δυνατότητα προσομοίωσης και ανάλυσης διαφορετικών σεναρίων πριν από την υλοποίηση οποιασδήποτε αλλαγής μειώνει το ρίσκο και εξασφαλίζει την

αποτελεσματικότητα των αποφάσεων. Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων αποτελεί πολύτιμο εργαλείο στη στρατηγική λήψης αποφάσεων, προσφέροντας τη δυνατότητα συνεχούς βελτίωσης και προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς.

4.3 Προσομοίωση Κυκλοφοριακών και Εφοδιαστικών Ροών

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για τη μελέτη, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση κυκλοφοριακών και εφοδιαστικών ροών, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα αναπαράστασης πολύπλοκων δικτύων και αλληλεπιδράσεων μεταξύ οχημάτων, ανθρώπων και υποδομών. Μέσω της προσομοίωσης, οι μηχανικοί, οι πολεοδόμοι και οι διαχειριστές της εφοδιαστικής αλυσίδας (logistics) μπορούν να προβλέψουν τη συμπεριφορά συστημάτων μεταφορών και να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις διαφορετικών σεναρίων και πολιτικών πριν την υλοποίησή τους στην πράξη (Καρεκλάς, 2020).

Στον τομέα της κυκλοφορίας, η προσομοίωση χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση δρόμων, διασταυρώσεων, σηματοδότησης, χώρων στάθμευσης και συμπεριφοράς οδηγών. Μέσα από αυτή τη διαδικασία μπορούν να εντοπιστούν προβλήματα όπως συμφόρηση, καθυστερήσεις ή επικίνδυνες συνθήκες, και να αναπτυχθούν λύσεις όπως ανασχεδιασμός κόμβων, προτεραιότητες κυκλοφορίας ή μέτρα ελέγχου κυκλοφορίας. Εξειδικευμένα εργαλεία όπως το VISSIM, SUMO και AIMSUN χρησιμοποιούνται ευρέως για την υλοποίηση ρεαλιστικών μοντέλων κυκλοφοριακής ροής, τα οποία ενσωματώνουν στοιχεία όπως μεταβλητή ζήτηση, αλληλεπίδραση μεταξύ οδηγών και αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες (Καρεκλάς, 2020).

Στον τομέα των εφοδιαστικών ροών, η προσομοίωση επιτρέπει την ανάλυση και τον σχεδιασμό δικτύων αποθήκευσης, διανομής και μεταφοράς αγαθών. Τα μοντέλα προσομοίωσης βοηθούν στην εκτίμηση της αποδοτικότητας των αποθηκών, στον υπολογισμό του χρόνου παράδοσης, στην κατανομή φορτίων και στην επιλογή διαδρομών, με στόχο τη μείωση του κόστους, τη βελτίωση της εξυπηρέτησης πελατών και την αύξηση της ευελιξίας του συστήματος (Καρεκλάς, 2020). Η στοχαστική φύση των μοντέλων επιτρέπει την ενσωμάτωση παραγόντων όπως η αβεβαιότητα στη

ζήτηση, οι καθυστερήσεις στις μεταφορές και οι διακυμάνσεις στην τιμή των καυσίμων (Waller & Fawcett, 2013).

Η προσομοίωση προσφέρει επίσης τη δυνατότητα διερεύνησης σεναρίων στρατηγικής ανάπτυξης, όπως η εισαγωγή αυτόνομων οχημάτων, η δημιουργία έξυπνων συστημάτων μεταφορών ή η ανάπτυξη πράσινης εφοδιαστικής αλυσίδας. Ειδικά σε περιβάλλοντα πόλεων, όπου οι ροές κυκλοφορίας και εφοδιασμού συναντώνται, η προσομοίωση συμβάλλει στη δημιουργία βιώσιμων λύσεων με βάση την πραγματική λειτουργία του συστήματος, σε αντιδιαστολή με προσεγγίσεις όπου η μελέτη βασίζεται αποκλειστικά σε θεωρητικά μοντέλα (Καρεκλάς, 2020).

Η ενσωμάτωση της επιστήμης των δεδομένων και της τεχνητής νοημοσύνης ενισχύει ακόμα περισσότερο την αξία της προσομοίωσης, επιτρέποντας την αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων, την προσαρμογή των μοντέλων σε πραγματικό χρόνο και την ανάπτυξη προβλεπτικών μηχανισμών που καθιστούν τα κυκλοφοριακά και εφοδιαστικά δίκτυα πιο έξυπνα, αποδοτικά και ανθεκτικά.

4.4 Εφαρμογή στη Χρηματοοικονομική Ανάλυση

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων βρίσκει σημαντική εφαρμογή στη χρηματοοικονομική ανάλυση, καθώς επιτρέπει τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς πολύπλοκων χρηματοοικονομικών συστημάτων υπό συνθήκες αβεβαιότητας και μεταβλητότητας. Μέσω προσομοιωμένων σεναρίων, οι αναλυτές μπορούν να εξετάσουν τις επιπτώσεις οικονομικών αποφάσεων, να αξιολογήσουν κινδύνους και να βελτιστοποιήσουν επενδυτικές στρατηγικές χωρίς να χρειάζεται να τις εφαρμόσουν στην πράξη (Karnon & Haji Ali Afzali, 2014).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo για την πρόβλεψη αποδόσεων επενδύσεων. Με αυτή την τεχνική δημιουργούνται πολυάριθμα σενάρια με διαφορετικές τιμές μεταβλητών όπως επιτόκια, αποδόσεις μετοχών ή τιμές εμπορευμάτων, προκειμένου να εκτιμηθεί η κατανομή των πιθανών αποτελεσμάτων και να υπολογιστεί η πιθανότητα επίτευξης ενός συγκεκριμένου στόχου ή η πιθανότητα ζημίας (Karnon & Haji Ali Afzali, 2014).

Ένα άλλο παράδειγμα είναι η προσομοίωση της ρευστότητας μιας επιχείρησης ή ενός χρηματοοικονομικού ιδρύματος, όπου μοντελοποιείται η εισροή και εκροή κεφαλαίων

με σκοπό την πρόβλεψη ταμειακών ροών και την αποφυγή κρίσεων ρευστότητας (Karnon & Haji Ali Afzali, 2014). Το εργαλείο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιβάλλοντα με αβέβαιη ζήτηση ή μεταβαλλόμενες τιμές κόστους δανεισμού.

Στη διαχείριση κινδύνου, η προσομοίωση χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντοχής ενός χαρτοφυλακίου σε ακραίες συνθήκες της αγοράς. Μέσω stress testing, μπορούν να εκτιμηθούν οι συνέπειες ενός χρηματοοικονομικού σοκ, όπως μια απότομη πτώση στις τιμές των μετοχών ή η αύξηση των επιτοκίων (Karnon & Haji Ali Afzali, 2014). Οι τράπεζες και οι ρυθμιστικές αρχές χρησιμοποιούν αυτά τα μοντέλα για να διασφαλίσουν την κεφαλαιακή επάρκεια και τη σταθερότητα του χρηματοπιστωτικού συστήματος.

Η προσομοίωση χρησιμοποιείται επίσης στην ανάλυση αποδοτικότητας και στρατηγικής τιμολόγησης προϊόντων, όπως συμβόλαια ασφάλισης ή χρηματοοικονομικά παράγωγα. Μέσω της αναπαράστασης διαφορετικών σεναρίων αγοράς και πελατειακής συμπεριφοράς, οι επιχειρήσεις μπορούν να προσαρμόσουν τις στρατηγικές τους ώστε να επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ανταγωνιστικότητα και κερδοφορία (Karnon & Haji Ali Afzali, 2014).

Τέλος, η ανάλυση επενδύσεων σε μεγάλης κλίμακας έργα, όπως έργα υποδομής ή ενεργειακά projects, επωφελείται από την προσομοίωση για την εκτίμηση του χρόνου απόσβεσης, των οικονομικών ρίσκων και της πιθανότητας επιτυχίας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως μεταβολές στην αγορά, καθυστερήσεις στην υλοποίηση και διακυμάνσεις στο κόστος (Winsberg, 2010). Η προσομοίωση, μέσα από την ευελιξία και τη δυναμική ανάλυση που προσφέρει, ενισχύει σημαντικά την ακρίβεια και τη τεκμηρίωση στον στρατηγικό σχεδιασμό της χρηματοοικονομικής ανάλυσης.

5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Σχέση Προσομοίωσης Με Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων και η στατιστική ανάλυση δεδομένων αποτελούν δύο ισχυρές αλλά διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στην κατανόηση και την ανάλυση πολύπλοκων φαινομένων. Παρ' ότι έχουν διαφορετική φιλοσοφία και εφαρμογές, συχνά λειτουργούν συμπληρωματικά, ενισχύοντας η μία την αποτελεσματικότητα της άλλης (Zeigler κ.ά., 2000).

Η στατιστική ανάλυση επικεντρώνεται κυρίως στη μελέτη υπαρκτών δεδομένων, τα οποία έχουν συλλεγεί στο πεδίο, με στόχο την περιγραφή, τη σύγκριση και την πρόβλεψη μέσω μαθηματικών εργαλείων όπως η παλινδρόμηση, η ανάλυση διακύμανσης, οι συσχετίσεις και οι δοκιμές υποθέσεων (Lorig & Timm, 2020). Βασίζεται σε δείγματα από πληθυσμούς και χρησιμοποιείται για την εξαγωγή γενικεύσιμων συμπερασμάτων και την εκτίμηση της σημασίας παρατηρούμενων φαινομένων. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν υπάρχει επαρκής ποσότητα ιστορικών δεδομένων και οι υποθέσεις για την κατανομή των μεταβλητών είναι αξιόπιστες (Lorig & Timm, 2020).

Αντίθετα, η προσομοίωση διακριτών συστημάτων δημιουργεί δυναμικά μοντέλα που αναπαριστούν τη λειτουργία ενός συστήματος σε επίπεδο γεγονότων ή οντοτήτων και επιτρέπει τη μελέτη της συμπεριφοράς του μέσα από την αναπαραγωγή διαφόρων σεναρίων, ακόμη και όταν τα δεδομένα είναι περιορισμένα ή δύσκολο να συλλεχθούν στην πράξη (Deist κ.ά., 2019). Εστιάζει στην αλληλεπίδραση των στοιχείων ενός συστήματος στον χρόνο και στην κατανόηση της αιτιώδους σχέσης μεταξύ των γεγονότων.

Η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η στατιστική ανάλυση επεξεργάζεται ό,τι έχει ήδη συμβεί, ενώ η προσομοίωση επιτρέπει την εξερεύνηση του τι θα μπορούσε να συμβεί υπό διαφορετικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η στατιστική μπορεί να αναδείξει

τη σχέση μεταξύ χρόνου αναμονής και αριθμού πελατών σε ένα κέντρο εξυπηρέτησης, ενώ η προσομοίωση μπορεί να προβλέψει τον αντίκτυπο μιας νέας διάταξης λειτουργίας ή της πρόσληψης επιπλέον προσωπικού στην απόδοση του συστήματος.

Παράλληλα, οι δύο προσεγγίσεις μπορούν να συνδυαστούν. Η στατιστική ανάλυση χρησιμοποιείται συχνά για την παραμετροποίηση μοντέλων προσομοίωσης, δηλαδή για τον καθορισμό των τιμών εισόδου με βάση πραγματικά δεδομένα. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να υποβληθούν σε στατιστική ανάλυση για να εντοπιστούν πρότυπα, ευαισθησίες ή διαφορές μεταξύ εναλλακτικών σεναρίων. Έτσι, η προσομοίωση προσφέρει την απαραίτητη δυναμική και ευελιξία, ενώ η στατιστική προσδίδει επιστημονική ακρίβεια και αξιοπιστία στις αναλύσεις (Provost & Fawcett, 2013).

Συνολικά, η προσομοίωσης και η στατιστική ανάλυση είναι αλληλοσυμπληρούμενες ως προς τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές τους, με κάθε μέθοδο να καλύπτει διαφορετικές ανάγκες και στάδια της ανάλυσης δεδομένων. Η κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών κάθε προσέγγισης επιτρέπει την καλύτερη επιλογή ή συνδυασμό τους, ανάλογα με τον σκοπό της μελέτης και τη φύση του υπό εξέταση συστήματος.

5.2 Σύγκριση με Τεχνικής Μηχανικής Μάθησης

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων και η τεχνική της μηχανικής μάθησης αποτελούν δύο διαφορετικές αλλά ισχυρές προσεγγίσεις για την κατανόηση, πρόβλεψη και βελτιστοποίηση συστημάτων και διαδικασιών. Παρά το γεγονός ότι και οι δύο προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται στην επιστήμη των δεδομένων και στην ανάλυση σύνθετων προβλημάτων, διαφέρουν ουσιαστικά στον τρόπο με τον οποίο μαθαίνουν, μοντελοποιούν και επεξεργάζονται την πληροφορία. Σημειώνεται εδώ ότι η μηχανική μάθηση διαφέρει σε σχέση με τη στατιστική ανάλυση που αναλύθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, κατά το ότι η στατιστική ανάλυση εξάγει συμπεράσματα για έναν πληθυσμό από ένα δείγμα, ενώ η μηχανική μάθηση εντοπίζει προγνωστικά μοτίβα τα οποία δύνανται να γενικευθούν (Bzdok κ.ά., 2018). Η προσομοίωση βασίζεται στη δημιουργία ενός ρητά καθορισμένου μοντέλου, το οποίο περιγράφει τη λειτουργία ενός συστήματος βάσει προκαθορισμένων κανόνων, λογικής και αιτιακών σχέσεων. Ο αναλυτής σχεδιάζει το μοντέλο με βάση την κατανόησή του για το σύστημα και

καθορίζει τις παραμέτρους και τους μηχανισμούς που διέπουν τη συμπεριφορά του (Winsberg, 2010). Η προσομοίωση εστιάζει στη διερεύνηση της δυναμικής του συστήματος στον χρόνο, αναπαριστώντας την αλληλουχία γεγονότων και επιτρέποντας την ανάλυση υποθετικών σεναρίων με βάση ποσοτικές και λογικές σχέσεις.

Αντίθετα, η μηχανική μάθηση δεν βασίζεται απαραίτητα στην πλήρη κατανόηση των εσωτερικών λειτουργιών ενός συστήματος, αλλά μαθαίνει απευθείας από τα δεδομένα. Μέσω αλγορίθμων, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, τα δέντρα αποφάσεων ή οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης, εντοπίζει πρότυπα, τάσεις και συσχετίσεις που μπορεί να είναι δύσκολο να γίνουν αντιληπτές με παραδοσιακά μέσα (Khondoker κ.ά., 2016). Η μηχανική μάθηση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε προβλήματα πρόβλεψης, ταξινόμησης και ομαδοποίησης, ακόμη και όταν οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών είναι μη γραμμικές ή το πλήθος των διαστάσεων του χώρου αναζήτησης (Khondoker κ.ά., 2016).

Η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η προσομοίωση είναι μοντελοκεντρική και απαιτεί γνώση του συστήματος εκ των προτέρων, ενώ η μηχανική μάθηση είναι δεδομενοκεντρική και βασίζεται σε μεγάλα σύνολα παρατηρήσεων για να δημιουργήσει προβλεπτικά μοντέλα. Η προσομοίωση δίνει τη δυνατότητα ελέγχου και ερμηνείας των εσωτερικών λειτουργιών του μοντέλου, ενώ η μηχανική μάθηση συχνά λειτουργεί ως «μαύρο κουτί», έχοντας την ικανότητα να παρέχει υψηλή ακρίβεια, χωρίς απαραίτητα να παρέχει επαρκείς ερμηνείες για τις προβλέψεις (Khondoker κ.ά., 2016).

Παρά τις διαφορές τους, οι δύο τεχνικές μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά. Για παράδειγμα, η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία τεχνητών δεδομένων εκπαίδευσης για αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, ιδίως όταν τα πραγματικά δεδομένα είναι σπάνια ή δύσκολο να αποκτηθούν. Επίσης, η μηχανική μάθηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση ή την αυτόματη παραμετροποίηση ενός μοντέλου προσομοίωσης, αναγνωρίζοντας σχέσεις που δεν έχουν προβλεφθεί από τον σχεδιαστή του μοντέλου.

Συνολικά, η επιλογή ανάμεσα στην προσομοίωση και τη μηχανική μάθηση εξαρτάται από τον στόχο της ανάλυσης, τη διαθεσιμότητα δεδομένων, το επίπεδο ερμηνευσιμότητας που απαιτείται και τη φύση του προβλήματος. Και οι δύο τεχνικές

συμβάλλουν σημαντικά στη λήψη αποφάσεων και στον σχεδιασμό πολύπλοκων συστημάτων, ιδίως όταν συνδυάζονται με τρόπο που αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα και των δύο.

5.3 Συνδυασμός Προσομοίωσης με Big Data Analytics

Ο συνδυασμός της προσομοίωσης διακριτών συστημάτων με τις τεχνικές ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (Big Data Analytics) δημιουργεί ένα ιδιαίτερα ισχυρό πλαίσιο για την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση πολύπλοκων συστημάτων σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η ενσωμάτωση αυτών των δύο τεχνολογιών αξιοποιεί την προβλεπτική ισχύ και τη δυναμική ανάλυση της προσομοίωσης μαζί με την ικανότητα των Big Data να αποκαλύπτουν δυσδιάκριτες τάσεις, πρότυπα και ασυνήθιστες συμπεριφορές μέσα σε μεγάλες ποσότητες πληροφορίας (Greasley & and Edwards, 2021).

Η προσομοίωση, όταν εφαρμόζεται αυτοδύναμα, επιτρέπει τη μοντελοποίηση διαδικασιών, την αξιολόγηση σεναρίων και την παρακολούθηση του τρόπου με τον οποίο οι μεταβολές σε παραμέτρους επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος. Όταν η προσομοίωση εμπλουτίζεται με δεδομένα που προέρχονται από συστήματα Μεγάλων Δεδομένων – όπως αισθητήρες, πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης, ροές δεδομένων σε πραγματικό χρόνο ή ψηφιακά ίχνη χρηστών – τότε τα μοντέλα αποκτούν μεγαλύτερη ακρίβεια, ρεαλισμό και προσαρμοστικότητα (Greasley & and Edwards, 2021).

Για παράδειγμα, σε ένα αστικό κυκλοφοριακό δίκτυο, η προσομοίωση μπορεί να μοντελοποιεί τη ροή των οχημάτων, αλλά μέσω της ενσωμάτωσης δεδομένων από GPS, κινητές εφαρμογές και κάμερες παρακολούθησης, το μοντέλο μπορεί να προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο στις κυκλοφοριακές συνθήκες και να προβλέπει συμφόρηση ή ατυχήματα. Παρομοίως, σε ένα εργοστάσιο παραγωγής, η ανάλυση δεδομένων που συλλέγονται από αισθητήρες σε συνδυασμό με την προσομοίωση ροών εργασίας, επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, την προληπτική συντήρηση και την αύξηση της αποδοτικότητας.

Τα Μεγάλα Δεδομένα προσφέρουν επίσης τη δυνατότητα εκπαίδευσης και επικύρωσης των μοντέλων προσομοίωσης, διασφαλίζοντας ότι οι παραδοχές του μοντέλου ευθυγραμμίζονται με την πραγματική λειτουργία του συστήματος (Bowman & Miller, 2016). Επιπλέον, μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, οι προσομοιώσεις μπορούν να «μάθουν» από τα δεδομένα, να αυτοβελτιώνονται και να προβλέπουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την απόδοση υπό συνθήκες που δεν έχουν προηγουμένως μοντελοποιηθεί (Bowman & Miller, 2016).

Η σύνδεση προσομοίωσης και Μεγάλων Δεδομένων υποστηρίζεται επίσης από υποδομές cloud και edge computing, οι οποίες επιτρέπουν την ταχεία επεξεργασία και ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων, κάνοντας τις προσομοιώσεις περισσότερο διαδραστικές, επεκτάσιμες και προσβάσιμες (Greasley & and Edwards, 2021).

Συνολικά, ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών προσφέρει στρατηγικά πλεονεκτήματα σε τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, η εφοδιαστική αλυσίδα, η χρηματοοικονομική ανάλυση, η βιομηχανική παραγωγή και οι έξυπνες πόλεις, ενισχύοντας τη δυνατότητα λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων βασισμένων τόσο σε ιστορικά όσο και σε δυναμικά δεδομένα. Αυτός ο συνδυασμός δημιουργεί το απαραίτητο υπόβαθρο για προσομοιώσεις που δεν είναι απλώς εργαλεία σχεδιασμού, αλλά ζωντανά, εξελισσόμενα συστήματα που ανταποκρίνονται στις αλλαγές του πραγματικού κόσμου με ταχύτητα και ακρίβεια.

5.4 Πλεονεκτήματα Και Περιορισμοί της Προσομοίωσης Έναντι Εναλλακτικών Προσεγγίσεων

Η προσομοίωση διακριτών συστημάτων αποτελεί μία ευέλικτη και ισχυρή μεθοδολογία για την ανάλυση σύνθετων συστημάτων και διαδικασιών, ωστόσο, όπως κάθε προσέγγιση, συνοδεύεται από πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ανάλυσης όπως η στατιστική, η μηχανική μάθηση ή η αναλυτική μοντελοποίηση.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της προσομοίωσης είναι η ικανότητά της να αναπαριστά και να εξερευνά τη δυναμική και την πολυπλοκότητα ενός συστήματος σε βάθος, ακόμη και όταν αυτό παρουσιάζει στοχαστική συμπεριφορά ή αλληλεπιδράσεις

μεταξύ πολλών ετερογενών στοιχείων. Επιτρέπει τη μελέτη σεναρίων που δεν έχουν ακόμη συμβεί ή που είναι επικίνδυνα, δαπανηρά ή αδύνατο να εφαρμοστούν στην πράξη (Zeigler κ.ά., 2000). Μέσω της προσομοίωσης, ο αναλυτής μπορεί να εξετάσει τις επιπτώσεις αποφάσεων χωρίς να διακινδυνεύσει πραγματικούς πόρους, προσφέροντας έναν ασφαλή και ευέλικτο χώρο πειραματισμού.

Η προσομοίωση είναι επίσης ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιβάλλοντα όπου τα συστήματα μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου ή παρουσιάζουν ουρές αναμονής, διακοπές στη λειτουργία τους και δυναμικές αλληλεπιδράσεις, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην εφοδιαστική, στην υγειονομική περίθαλψη ή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα οπτικοποίησης των λειτουργιών ενός συστήματος, καθιστώντας την κατανόηση πιο άμεση και τη λήψη αποφάσεων πιο τεκμηριωμένη (Zeigler κ.ά., 2000).

Ωστόσο, η προσομοίωση παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Καταρχάς, η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου προσομοιωτικού μοντέλου μπορεί να απαιτεί σημαντικό χρόνο, κόπο και τεχνογνωσία, ιδίως όταν το σύστημα είναι πολύπλοκο ή δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα ή το σύστημα δεν έχει κατανοηθεί επαρκώς. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα των εισόδων και των παραδοχών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα, αν αυτές είναι ανακριβείς ή μη ρεαλιστικές.

Σε αντίθεση με τη στατιστική ανάλυση ή τη μηχανική μάθηση, η προσομοίωση δεν παράγει γενικεύσιμα μοντέλα πρόβλεψης, αλλά εστιάζει σε συγκεκριμένα σενάρια. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να παρέχει μία πληρέστερη αντίληψη για το τι μπορεί να συμβεί σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο, αλλά όχι απαραίτητα για το τι θα συμβεί υπό οποιαδήποτε συνθήκη (Zeigler κ.ά., 2000). Επιπλέον, η προσομοίωση δεν προσφέρει πάντοτε άμεσα και γενικεύσιμα μαθηματικά ή αναλυτικά συμπεράσματα, καθιστώντας την λιγότερο χρήσιμη για καθολικές αποδείξεις ή θεωρητική διερεύνηση.

Τέλος, το υψηλό υπολογιστικό κόστος, ιδιαίτερα σε προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας ή πολλαπλών σεναρίων, μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο, αν και η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και η πρόοδος στα παράλληλα υπολογιστικά περιβάλλοντα έχει -σε μεγάλο βαθμό- μειώσει αυτόν τον περιορισμό.

Συμπερασματικά, η προσομοίωση υπερέχει στην εμβάθυνση, στην ευελιξία και στην κατανόηση της λειτουργίας των συστημάτων, αλλά δεν αντικαθιστά πλήρως άλλες μεθοδολογίες. Οι αναλυτές θα πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζουν πότε και πώς είναι σκόπιμο να συνδυαστεί η προσομοίωση με άλλες τεχνικές, ώστε να επιτευχθεί η πληρέστερη και πιο αξιόπιστη προσέγγιση του προβλήματος.

6 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 Ζητήματα Ακρίβειας και Επικύρωσης Μοντέλων Προσομοίωσης

Η ακρίβεια και η επικύρωση των μοντέλων προσομοίωσης αποτελούν δύο από τις σημαντικότερες προκλήσεις στην επιστήμη της προσομοίωσης διακριτών συστημάτων, καθώς καθορίζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και τη χρησιμότητα των μοντέλων στη λήψη αποφάσεων. Ένα μοντέλο προσομοίωσης που δεν αντανακλά με ρεαλισμό τη συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα και εσφαλμένες επιλογές, που μπορεί να αποδειχθούν και επιζήμιες, καθιστώντας την αυστηρή διαδικασία επαλήθευσης και επικύρωσης απαραίτητο βήμα πριν από κάθε χρήση (Shephard κ.ά., 2004).

Η πρόκληση της ακρίβειας σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα των εισροών του μοντέλου, δηλαδή των παραμέτρων, των αρχικών συνθηκών, των κανόνων συμπεριφοράς και των στοχαστικών μεταβλητών που καθορίζουν τη λειτουργία του. Η ύπαρξη ελλειπών, μη αντιπροσωπευτικών ή παρωχημένων δεδομένων μπορεί να υπονομεύσει την ακρίβεια της προσομοίωσης (Kind κ.ά., 1998). Παράλληλα, οι ίδιες οι υποθέσεις που υιοθετεί ο σχεδιαστής του μοντέλου ενδέχεται να εισάγουν συστηματικές αποκλίσεις, είτε επειδή απλουστεύουν υπερβολικά την πραγματικότητα είτε επειδή ενσωματώνουν υποκειμενικά κριτήρια.

Η διαδικασία της επαλήθευσης (verification) αποσκοπεί στο να διασφαλίσει ότι το προσομοιωτικό μοντέλο έχει υλοποιηθεί σωστά, δηλαδή ότι «το μοντέλο κάνει αυτό που του λέμε» (Kleijnen, 1995). Η επικύρωση (validation), αντίθετα, αφορά το αν «το μοντέλο κάνει αυτό που πρέπει να κάνει», δηλαδή αν προσομοιώνει με επάρκεια την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος που αναπαριστά (Kleijnen, 1995). Η επικύρωση μπορεί να περιλαμβάνει την αντιπαραβολή και σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα λειτουργίας, την αξιολόγηση από ειδικούς του τομέα, ή τη χρήση στατιστικών μεθόδων για την ποσοτικοποίηση της απόκλισης.

Στο μέλλον, οι προοπτικές ενίσχυσης της ακρίβειας και της επικύρωσης περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, που θα επιτρέπουν την προσαρμογή του μοντέλου στις συνθήκες της στιγμής. Επίσης, η αξιοποίηση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης μπορεί να συνδράμει στον αυτόματο εντοπισμό σφαλμάτων ή στην ενίσχυση της ικανότητας του μοντέλου να αναπαριστά πολύπλοκες και μη γραμμικές συμπεριφορές (Widman κ.ά., 1989). Επιπλέον, η αυξανόμενη υπολογιστική ισχύς και οι τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης επιτρέπουν πλέον τη διεξαγωγή εκτενών πειραμάτων επικύρωσης με χρήση μεγάλου αριθμού σεναρίων και παραμετρικών ευαισθησιών (Dai & Ke, 2022).

Παρόλα αυτά, παραμένει κρίσιμο να αναγνωρίζεται ο ρόλος της ανθρώπινης κρίσης στη διαδικασία επικύρωσης. Η πλήρης ακρίβεια στην προσομοίωση είναι σπάνια εφικτή, και ως εκ τούτου η χρήση της προσομοίωσης θα πρέπει να συνοδεύεται από ερμηνευτική ικανότητα, τεκμηρίωση των παραδοχών και συνδυασμό με άλλες μεθοδολογίες. Η συνεχής ενίσχυση των εργαλείων και των τεχνικών επικύρωσης αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την εδραίωση της προσομοίωσης ως αξιόπιστου και επιστημονικά έγκυρου εργαλείου στην ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων.

6.2 Υπολογιστικές Απαιτήσεις και Ανάγκη για Βελτισποίηση Αλγορίθμων

Οι υπολογιστικές απαιτήσεις στην προσομοίωση διακριτών συστημάτων αποτελούν μία από τις κυριότερες προκλήσεις, ειδικά όταν τα συστήματα που προσομοιώνονται είναι μεγάλης κλίμακας, παρουσιάζουν υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας ή απαιτούν χρονοβόρες επαναλήψεις για τη διερεύνηση σεναρίων και την εκτίμηση αβεβαιοτήτων. Καθώς η προσομοίωση απαιτεί συχνά λεπτομερή παρακολούθηση της δυναμικής κατάστασης ενός συστήματος ανά χρονική στιγμή, ο υπολογιστικός φόρτος μπορεί να αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των μεταβλητών, των γεγονότων ή των πρακτόρων που εμπλέκονται στο μοντέλο.

Οι χρονικές απαιτήσεις προκύπτουν τόσο από την ανάγκη υψηλής ανάλυσης (σε επίπεδο χρονικής διακριτότητας ή βαθμό λεπτομέρειας στην αναπαράσταση των εσωτερικών λειτουργιών) στην προσωρινή απεικόνιση της εξέλιξης του συστήματος, όσο και από την ανάγκη για μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (replications) ώστε να προκύψουν στατιστικά αξιόπιστα αποτελέσματα (Shiflet & Shiflet, 2014). Ιδιαίτερα σε

στοχαστικά μοντέλα, η ανάγκη για σύγκριση πολλών τρεξιμάτων καθιστά τις υπολογιστικές βελτιστοποιήσεις κρίσιμες. Η παράλληλη επεξεργασία και η χρήση υπολογιστικών clusters ή cloud-based συστημάτων αποτελούν λύσεις για τη διαχείριση αυτών των απαιτήσεων, ωστόσο και αυτές έχουν κόστος και απαιτούν εξειδικευμένη τεχνογνωσία (Shiflet & Shiflet, 2014).

Η ανάγκη για βελτιστοποίηση αλγορίθμων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της επεκτασιμότητας της προσομοίωσης. Οι κλασικοί αλγόριθμοι διαχείρισης γεγονότων, όπως η χρήση ουρών προτεραιότητας ή δυαδικού σωρού (binary heap) για την επιλογή του επόμενου γεγονότος, βελτιώνουν τη χρονική αποδοτικότητα, όμως δεν επαρκούν σε πολύπλοκα συστήματα με συνεχείς ροές ή πλήθος αλληλεπιδρουσών οντοτήτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτούνται πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι, όπως προσαρμοστικού χρονικού βήματος (adaptive time-stepping), ιεραρχικού χρονοπρογραμματισμού γεγονότων (hierarchical event scheduling), ή τεχνικών αποφυγής συμβάντων χωρίς ουσιαστική επίδραση (Shiflet & Shiflet, 2014).

Η ενσωμάτωση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης μπορεί επίσης να συμβάλει στη βελτιστοποίηση της προσομοίωσης, τόσο με τη μορφή έξυπνης αναζήτησης παραμέτρων (όπως μέσω γενετικών αλγορίθμων ή Bayesian optimization) όσο και με την πρόβλεψη συμπεριφοράς τμημάτων του συστήματος, ώστε να αποφεύγονται περιττοί υπολογισμοί (Dai & Ke, 2022). Επίσης, η ανάπτυξη μεταμοντέλων (metamodels) ή υποκατάστατων μοντέλων (surrogate models)¹ μπορεί να προσφέρει πιο ελαφριές εκδοχές της προσομοίωσης για χρήση σε επαναλαμβανόμενες διαδικασίες όπως η βελτιστοποίηση ή η ανάλυση ευαισθησίας (Dai & Ke, 2022).

Τέλος, η ανάγκη για αλγοριθμική αποδοτικότητα γίνεται ακόμη πιο επιτακτική στην περίπτωση πραγματικού χρόνου προσομοιώσεων, όπως σε συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, ψηφιακά δίδυμα ή προσομοίωση κρίσιμων υποδομών. Εκεί, κάθε καθυστέρηση στην επεξεργασία μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία και τη λειτουργικότητα της εφαρμογής. Συνεπώς, η εξέλιξη και η προσαρμογή των

¹ Ένα υποκατάστατο μοντέλο είναι μια απλοποιημένη, υπολογιστικά φθηνότερη προσέγγιση ενός πιο σύνθετου μοντέλου ή συστήματος. Χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τη συμπεριφορά του αρχικού μοντέλου, ειδικά όταν το αρχικό μοντέλο είναι υπολογιστικά δαπανηρό στην εκτέλεση/αξιολόγηση ή η εσωτερική του λειτουργία δεν είναι καλά κατανοητή.

αλγορίθμων προσομοίωσης αποτελεί ένα κρίσιμο πεδίο έρευνας και τεχνολογικής καινοτομίας, θεμελιώδες για την αξιοποίηση της προσομοίωσης σε σύγχρονες απαιτητικές εφαρμογές.

6.3 Προοπτικές Ενσωμάτωσης Τεχνητής Νοημοσύνης στην Προσομοίωση

Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης στην προσομοίωση διακριτών συστημάτων αναδεικνύεται ως μία υποσχόμενη προοπτική για το μέλλον της ανάλυσης πολύπλοκων και δυναμικών συστημάτων. Ο συνδυασμός των δύο πεδίων επιτρέπει την ενίσχυση τόσο της ευφυΐας όσο και της αποδοτικότητας των προσομοιωτικών μοντέλων, ενώ μπορεί να αποτελέσει το υπόβαθρο για καινοτόμες εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, αυτόνομες διαδικασίες βελτιστοποίησης και συστήματα λήψης αποφάσεων υψηλής ακρίβειας.

Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να συμβάλει στην αυτόματη κατασκευή και βαθμονόμηση μοντέλων προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η μηχανική μάθηση για την εξαγωγή μοτίβων από ιστορικά δεδομένα και την ενσωμάτωσή τους σε μοντέλα συμπεριφοράς (Widman κ.ά., 1989, 1989). Με αυτόν τον τρόπο, η δημιουργία πολύπλοκων προσομοιώσεων μπορεί να γίνει πιο αποδοτική, λιγότερο εξαρτώμενη από την ανθρώπινη εμπειρία και περισσότερο βασισμένη σε δεδομένα. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να αξιοποιηθούν για την επικύρωση και τον συνεχή εμπλουτισμό των μοντέλων, εντοπίζοντας αποκλίσεις από την πραγματικότητα και προτείνοντας διορθώσεις.

Ένα άλλο κρίσιμο πεδίο είναι η χρήση τεχνητής νοημοσύνης για την ενίσχυση της απόδοσης της προσομοίωσης. Μέσω της εκμάθησης υποκατάστατων μοντέλων, δηλαδή μαθηματικών προσεγγίσεων που μιμούνται τη συμπεριφορά του μοντέλου προσομοίωσης ενέχοντας ωστόσο σημαντικά μικρότερο υπολογιστικό κόστος, μπορεί να επιτευχθεί δραστική επιτάχυνση της ανάλυσης, ειδικά όταν απαιτούνται πολλαπλές εκτελέσεις για σκοπούς βελτιστοποίησης ή ανάλυσης σεναρίων (Lal κ.ά., 2020). Παράλληλα, τεχνικές ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) προσφέρουν τη δυνατότητα σε πράκτορες προσομοίωσης να μαθαίνουν δυναμικά βέλτιστες στρατηγικές μέσα από την αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον του μοντέλου (Lal κ.ά., 2020).

Η τεχνητή νοημοσύνη ενδυναμώνει επίσης την ικανότητα των συστημάτων προσομοίωσης να λειτουργούν σε περιβάλλοντα αβεβαιότητας και ταχείας μεταβολής, παρέχοντας προσαρμοστικότητα και αυτόνομη λήψη αποφάσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπως τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins), τα οποία απαιτούν συνεχή προσαρμογή στα δεδομένα του πραγματικού συστήματος σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (near-real time) (Dai & Ke, 2022). Επιπλέον, η χρήση φυσικής γλώσσας και επεξεργασίας κειμένου από μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να διευκολύνει την αλληλεπίδραση με τα συστήματα προσομοίωσης, καθιστώντας τα πιο προσβάσιμα σε χρήστες με μικρότερο βαθμό τεχνικής εξειδίκευσης.

Τέλος, οι προοπτικές ενσωμάτωσης τεχνητής νοημοσύνης στην προσομοίωση δεν περιορίζονται μόνο στη βελτιστοποίηση και αυτοματοποίηση, αλλά και στη δυνατότητα εξαγωγής ερμηνεύσιμων γνώσεων. Η σύζευξη με τεχνικές επεξηγήσιμης τεχνητής νοημοσύνης (explainable AI) επιτρέπει την κατανόηση των αιτιωδών σχέσεων που αναδεικνύονται μέσα από την προσομοίωση, ενισχύοντας τη διαφάνεια και τη λογοδοσία των αποφάσεων που βασίζονται σε αυτά τα μοντέλα (Lal κ.ά., 2020).

Συνολικά, η σύγκλιση της τεχνητής νοημοσύνης με την προσομοίωση διακριτών συστημάτων διαμορφώνει ένα νέο, ευφυές και ευέλικτο πλαίσιο μοντελοποίησης και ανάλυσης, το οποίο αναμένεται να αποτελέσει υπόβαθρο για πολλές επιστημονικές, τεχνολογικές και επιχειρηματικές καινοτομίες τα επόμενα χρόνια.

7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία διερεύνησε τη χρησιμότητα της προσομοίωσης διακριτών συστημάτων ως εργαλείο αιχμής στην επιστήμη των δεδομένων. Μέσα από την ανάλυση θεωρητικών εννοιών, την περιγραφή τεχνικών υλοποίησης και την εξέταση πραγματικών εφαρμογών, τεκμηριώθηκε ότι η προσομοίωση αποτελεί έναν ευέλικτο και ισχυρό μηχανισμό για την κατανόηση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση σύνθετων συστημάτων. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η υπάρχει αβεβαιότητα, δυναμική αλληλεπίδραση των στοιχείων και αυξημένη πολυπλοκότητα, η προσομοίωση επιτρέπει τη δοκιμή σεναρίων και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που ενισχύουν την ακρίβεια των αναλύσεων και την ποιότητα των αποφάσεων. Επιπλέον, καταγράφηκαν οι βασικές προκλήσεις της μεθοδολογίας, όπως η ανάγκη για ακριβή επικύρωση μοντέλων και η διαχείριση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, χωρίς ωστόσο αυτές να ακυρώνουν τη σημαντική συμβολή της προσέγγισης στην ανάλυση δεδομένων. Η μελέτη αυτή επιβεβαιώνει ότι η ενσωμάτωση της προσομοίωσης διακριτών συστημάτων σε σύγχρονα αναλυτικά περιβάλλοντα μπορεί να προσδώσει σημαντική προστιθέμενη αξία σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

7.2 Δυνατότητες Μελλοντικής Επέκτασης

Υπάρχουν πολλαπλές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή της προσομοίωσης διακριτών συστημάτων στην επιστήμη δεδομένων. Πρώτον, η σύνδεση της προσομοίωσης με τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αυτονομία και την προγνωστική ικανότητα των μοντέλων. Επίσης, η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων που συνδυάζουν προσεγγίσεις που βασίζονται στην προσομοίωση με στοχαστικά ή αναλυτικά μοντέλα αποτελεί ένα υποσχόμενο πεδίο έρευνας. Επιπλέον, η επέκταση της χρήσης της προσομοίωσης σε τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, τα έξυπνα δίκτυα και η περιβαλλοντική μοντελοποίηση μπορεί να αποφέρει πολλαπλά οφέλη, καθώς αυτοί οι τομείς χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολυπλοκότητα και ανάγκη για αξιόπιστες προβλέψεις. Τέλος, η ευρύτερη αξιοποίηση εργαλείων ανοικτού κώδικα και η ενσωμάτωση των μοντέλων σε πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους (cloud computing) δύναται να

διευκολύνει σημαντικά την υιοθέτηση και επαναχρησιμοποίηση συστημάτων προσομοίωσης από την επιστημονική και επιχειρησιακή κοινότητα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αγγελίδου, Σ. (2018). *Μέθοδοι πρόβλεψης της μεταβλητότητας σε στοχαστικά μοντέλα με χρηματοοικονομικές εφαρμογές* [Master Thesis, Πανεπιστήμιο Πειραιώς].
<https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/11093>
- Καρεκλάς, Α. Κ. (2020). Εφοδιαστική Αλυσίδα και Ψηφιακός Μετασχηματισμός. *Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*.
https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/52537/%CE%9A%CE%B1%CF%81%CE%B5%CE%BA%CE%BB%CE%AC%CF%82_%CE%91%CE%BB%CE%AD%CE%BE%CE%B9%CE%BF%CF%82_%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%95%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1.pdf?sequence=1
- Κάτσης, Χ. (2017). *Στοχαστικά μοντέλα για την ανάλυση δεδομένων στο διαδίκτυο* [Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών. Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών].
<http://hdl.handle.net/10442/hedi/42020>
- Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P., & O'Hare, G. M. P. (2017). Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, 24, 13–33.
<https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>
- Bossel, H. (2018). *Modeling and Simulation*. A K Peters/CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781315275574>
- Bowman, C. N., & Miller, J. A. (2016). Modeling traffic flow using simulation and Big Data analytics. *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1206–1217.
<https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822177>

- Byrne, J., Heavey, C., & Byrne, P. J. (2010). A review of Web-based simulation and supporting tools. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(3), 253–276.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.09.013>
- Bzdok, D., Altman, N., & Krzywinski, M. (2018). Statistics versus machine learning. *Nature Methods*, 15(4), 233–234. <https://doi.org/10.1038/nmeth.4642>
- Collins, A. J., Sabz Ali Pour, F., & Jordan, C. A. (2023). Past challenges and the future of discrete event simulation. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 20(3), 351–369. <https://doi.org/10.1177/15485129211067175>
- Dai, C.-P., & Ke, F. (2022). Educational applications of artificial intelligence in simulation-based learning: A systematic mapping review. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 3, 100087.
<https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100087>
- Deist, T. M., Patti, A., Wang, Z., Krane, D., Sorenson, T., & Craft, D. (2019). Simulation-assisted machine learning. *Bioinformatics*, 35(20), 4072–4080.
<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz199>
- Giunta, A., Wojtkiewicz, S., & Eldred, M. (2012). Overview of Modern Design of Experiments Methods for Computational Simulations (Invited). Στο 41st *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2003-649>
- Goldsman, D., & Goldsman, P. (2015). Discrete-Event Simulation. Στο M. L. Loper (Επιμ.), *Modeling and Simulation in the Systems Engineering Life Cycle: Core Concepts and Accompanying Lectures* (σελ. 103–109). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5634-5_10

- Greasley, A., & Edwards, J. S. (2021). Enhancing discrete-event simulation with big data analytics: A review. *Journal of the Operational Research Society*, 72(2), 247–267. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1678406>
- Hocaoğlu, M. F. (2018). AdSiF: Agent driven simulation framework paradigm and ontological view. *Science of Computer Programming*, 167, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.scico.2018.07.004>
- Karnon, J., & Haji Ali Afzali, H. (2014). When to Use Discrete Event Simulation (DES) for the Economic Evaluation of Health Technologies? A Review and Critique of the Costs and Benefits of DES. *Pharmacoeconomics*, 32(6), 547–558. <https://doi.org/10.1007/s40273-014-0147-9>
- Keller, N., & Hu, X. (2019). Towards Data-Driven Simulation Modeling for Mobile Agent-Based Systems. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, 29(1), 1:1-1:26. <https://doi.org/10.1145/3289229>
- Kesaraju, V. S., & Ciarallo, F. W. (2012). Integrated simulation combining process-driven and event-driven models. *Journal of Simulation*, 6(1), 9–20. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.27>
- Khondoker, M., Dobson, R., Skirrow, C., Simmons, A., & Stahl, D. (2016). A comparison of machine learning methods for classification using simulation with multiple real data examples from mental health studies. *Statistical Methods in Medical Research*, 25(5), 1804–1823. <https://doi.org/10.1177/0962280213502437>
- Kind, R. J., Potapczuk, M. G., Feo, A., Golia, C., & Shah, A. D. (1998). Experimental and computational simulation of in-flight icing phenomena. *Progress in Aerospace Sciences*, 34(5), 257–345. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(98\)80001-8](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(98)80001-8)

- Kleijnen, J. P. C. (1995). Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 82(1), 145–162.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00016-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00016-6)
- Lal, A., Pinevich, Y., Gajic, O., Herasevich, V., & Pickering, B. (2020). Artificial intelligence and computer simulation models in critical illness. *World Journal of Critical Care Medicine*, 9(2), 13–19. <https://doi.org/10.5492/wjccm.v9.i2.13>
- Lorig, F., & Timm, I. J. (2020). Simulation-Based Data Acquisition. Στο H. R. Arabnia, K. Daimi, R. Stahlbock, C. Soviany, L. Heilig, & K. Brüssau (Επιμ.), *Principles of Data Science* (σελ. 1–15). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-43981-1_1
- Lubachevsky, B. D. (1989). Efficient distributed event-driven simulations of multiple-loop networks. *Commun. ACM*, 32(1), 111–123.
<https://doi.org/10.1145/63238.63247>
- Mattia, M., & Giudice, P. D. (2000). Efficient Event-Driven Simulation of Large Networks of Spiking Neurons and Dynamical Synapses. *Neural Computation*, 12(10), 2305–2329. <https://doi.org/10.1162/089976600300014953>
- Müller, P. (2005). Simulation Based Optimal Design. Στο D. K. Dey & C. R. Rao (Επιμ.), *Handbook of Statistics* (τ. 25, σελ. 509–518). Elsevier.
[https://doi.org/10.1016/S0169-7161\(05\)25017-4](https://doi.org/10.1016/S0169-7161(05)25017-4)
- Provost, F., & Fawcett, T. (2013). Data Science and its Relationship to Big Data and Data-Driven Decision Making. *Big Data*, 1(1), 51–59.
<https://doi.org/10.1089/big.2013.1508>
- Ramirez, W. F. (1997). *Computational Methods for Process Simulation*. Butterworth-Heinemann.

- Shephard, M. S., Beall, M. W., O'Bara, R. M., & Webster, B. E. (2004). Toward simulation-based design. *Finite Elements in Analysis and Design*, 40(12), 1575–1598. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2003.11.004>
- Shiflet, A. B., & Shiflet, G. W. (2014). *Introduction to Computational Science: Modeling and Simulation for the Sciences - Second Edition*. Princeton University Press.
- Sweetser, A. (1999). *A Comparison of System Dynamics (SD) and Discrete Event Simulation (DES)*.
- Waller, M. A., & Fawcett, S. E. (2013). Data Science, Predictive Analytics, and Big Data: A Revolution That Will Transform Supply Chain Design and Management. *Journal of Business Logistics*, 34(2), 77–84. <https://doi.org/10.1111/jbl.12010>
- Wang, H., & Zhai, Z. (John). (2016). Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014. *Energy and Buildings*, 128, 319–335. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.080>
- Widman, L. E., Loparo, K. A., & Nielsen, N. R. (Επιμ.). (1989). *Artificial intelligence, simulation & modeling*. John Wiley & Sons, Inc.
- Winsberg, E. (2010). *Science in the Age of Computer Simulation*. University of Chicago Press. <https://doi.org/10.7208/9780226902050>
- Zeigler, B. P., Praehofer, H., & Kim, T. G. (2000). *Theory of Modeling and Simulation*. Academic Press.