



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΗΘΙΚΩΝ ΝΟΡΜΩΝ
ΣΕ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Διπλωματική Εργασία

Βλάχας Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα: Δασκαλοπούλου Ασπασία

Ιούνιος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

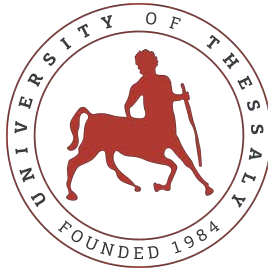
**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΗΘΙΚΩΝ ΝΟΡΜΩΝ
ΣΕ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Διπλωματική Εργασία

Βλάχας Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα: Δασκαλοπούλου Ασπασία

Ιούνιος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

THE EFFECTS OF SOCIOETHICAL NORMS ON MULTIAGENT SYSTEMS

Diploma Thesis

Vlachas Konstantinos

Supervisor: Daskalopulu Aspasia

Juny 2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπουσα **Δασκαλοπούλου Ασπασία**

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Σταμούλης Γεώργιος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπο-
λογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Τσομπανοπούλου Παναγιώτα**

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια κ. Δασκαλοπούλου Ασπασία που με την κατανόηση και την υπομονή που επέδειξε με βοήθησε να περατώσω τις σπουδές μου στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας και να ολοκληρώσω με επιτυχή τρόπο την διπλωματική μου εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης την οικογένεια μου για την στήριξη και βοήθεια που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

«Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής».

Ο/Η Δηλών/ούσα

Βλάχας Κωνσταντίνος

Διπλωματική Εργασία

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΗΘΙΚΩΝ ΝΟΡΜΩΝ ΣΕ ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Βλάχας Κωνσταντίνος

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία διερευνά την περίπλοκη δυναμική των πολυπρακτορικών συστημάτων σε συνδυασμό με την αλληλεπίδρασή τους με κοινωνικές ή ηθικές νόρμες. Συγκεκριμένα για την εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιούνται προσομοιώσεις αλληλεπιδράσεων μεταξύ πρακτόρων, που βασίζονται στο πρόβλημα της διαπραγμάτευσης του John F. Nash. Οι πράκτορες βρίσκονται εντός ενός πλέγματος τοπολογίας von Neumann και εκτός από τις συγκεκριμένες προκαθορισμένες παραμέτρους αρχικοποιούνται και με μια νέα παράμετρο ασυμμετρίας η οποία χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση μιας νόρμας. Αποδεικνύεται βάση των αποτελεσμάτων πως όταν αυτή η νόρμα ενσωματώνεται στο σύστημα, διαμορφώνει τις συμπεριφορές των πρακτόρων και κατά συνέπεια τις στρατηγικές τους. Επεκτείνεται έτσι η πρόωπη αλλά και η υπάρχουσα έρευνα για τους κατανεμημένους υπολογιστές και τα πολυπρακτορικά συστήματα συνδυαστικά με τις νόρμες, προκειμένου να συμπεριληφθούν οι σύνθετες αυτές αλληλεπιδράσεις καθώς και οι αναδυόμενες συμπεριφορές με στόχο την ενίσχυση της συνεργασίας και του σχηματισμού δικαιότερων κοινοτήτων.

Λέξεις-κλειδιά:

Νόρμες, Πράκτορες, Συνεργασία, Προσομοιώσεις, Διαπραγμάτευση

Diploma Thesis

THE EFFECTS OF SOCIOETHICAL NORMS ON MULTIAGENT SYSTEMS

Vlachas Konstantinos

Abstract

This thesis explores the complex dynamics of multi-agent systems in combination with their interaction with social or moral norms. Specifically, simulations of interactions between agents, based on John F. Nash's negotiation problem, are used to draw conclusions. The agents are located within a von Neumann topology grid and in addition to the specific pre-defined parameters, they are also initialized with a new asymmetry parameter used to model a norm. Based on the results it is proven that when this norm is integrated in the model, it shapes the behaviour of agents and consequently their strategies. The early and existing research on distributed computing and multi-agent systems in combination with norms is thus extended, to include these complex interactions as well as emergent behaviors aimed at enhancing cooperation and forming equitable communities.

Keywords:

Norms, Agents, Cooperation, Simulations, Bargaining

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	ix
Περίληψη	xii
Abstract	xiii
Πίνακας περιεχομένων	xv
Κατάλογος σχημάτων	xix
Κατάλογος πινάκων	xxiii
Συντομογραφίες	xxv
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	2
1.1.1 Συνεισφορά	3
1.2 Οργάνωση του τόμου	3
2 Πράκτορες, Μοντέλα Πρακτόρων και Πολυπρακτορικά Συστήματα	5
2.1 Ορισμός του όρου πράκτορα	5
2.2 Μοντέλα Πρακτόρων	7
2.3 Πολυπρακτορικά Συστήματα	11
3 Κοινωνικές και ηθικές νόρμες, θεωρία παιγνίων, πολυπρακτορικά συστήματα και τοπολογία δικτύων	15
3.1 Ορισμός νορμών και συσχετισμός με θεωρία παιγνίων	15
3.1.1 Εισαγωγή στις νόρμες	15

3.1.2	Θεωρία παιγνίων στα πολυπρακτορικά συστήματα	16
3.1.3	Αλληλεπίδραση νορμών και θεωρίας παιγνίων	17
3.2	Νόρμες και πολυπρακτορικά συστήματα	19
3.2.1	Σύνθεση και ανάδυση νορμών σε πολυπρακτορικά συστήματα . . .	19
3.2.2	Νόρμες και συμπεριφορά πρακτόρων	20
3.2.3	Κύκλος ζωής νορμών σε πολυπρακτορικά συστήματα	21
3.2.4	Τοπολογία πολυπρακτορικών συστημάτων και νόρμες	21
3.2.5	Μηχανισμοί διάδοσης νορμών	23
4	Το πρόβλημα της διαπραγματεύσεως και σύνδεση με κοινωνικές νόρμες	25
4.1	Το διαπραγματευτικό πρόβλημα	25
4.1.1	Η λύση του Nash	25
4.2	Διαπραγματευτικό πρόβλημα και πολυπρακτορικά συστήματα	27
4.3	Διαπραγματευτικό πρόβλημα και νόρμες	28
5	Μεθοδολογία	31
6	Συμπεράσματα	33
6.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	33
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	35
	Βιβλιογραφία	37
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	43
A.3	Αποτελέσματα προσομοιώσεων χωρίς τον συντελεστή ασυμμετρίας A . . .	44
A.3.1	Αποτελέσματα για $\beta=0.3$, $\lambda=0.2$ και για κάθε $J=(J0L, J0M, J0H)$. .	44
A.3.2	Αποτελέσματα για $\beta=1$, $\lambda=0.2$ και $J = [4,1,1], [1,1,4]$	47
A.3.3	Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$ και $J = [4,1,1]$	50
A.3.4	Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$ και $J = [1,4,1]$	53
A.3.5	Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$ και $J = [1,1,4]$	56
B.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων μετά την εισαγωγή του συντελεστή ασυμμετρίας	59
B.4.1	Αποτελέσματα για $\beta=0.3$, $\lambda=0.2$ ή $\lambda=0.4$, για κάθε $J=(J0L, J0M, J0H)$ και A	59

B.4.2	Αποτελέσματα για $\beta=1$, $\lambda=0.2$ ή $\lambda=0.4$, για κάθε $J=(J0L, J0M, J0H)$ και A	62
B.4.3	Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$, $J=[4,1,1]$, και για κάθε A	65
B.4.4	Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$, $J=[1,4,1]$ και για $A=1$ και $A=10$. .	67
B.4.5	Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$, $J=[1,1,4]$ και για $A=5$ και $A=100$. .	69
B.4.6	Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.4$, $J=[4,1,1]$, και για κάθε A	71
B.4.7	Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.4$, $J=[1,4,1]$, και για κάθε A	73
B.4.8	Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.4$, $J=[1,1,4]$, και για κάθε A	76

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Αλληλεπίδραση πράκτορα με περιβάλλον	5
3.1	Το δίλημμα του φυλακισμένου με ή χωρίς συνεργασία	18
3.2	Γειτονιά von Neumann σε τετράγωνο lattice	22
A.1		44
A.2		44
A.3		45
A.4		45
A.5		46
A.6		47
A.7		47
A.8		48
A.9		48
A.10		49
A.11		50
A.12		50
A.13		51
A.14		51
A.15		52
A.16		53
A.17		53
A.18		54
A.19		54
A.20		55
A.21		56

A.22	.....	56
A.23	.....	57
A.24	.....	57
A.25	.....	58
B.26	.....	59
B.27	.....	59
B.28	.....	60
B.29	.....	60
B.30	.....	61
B.31	.....	62
B.32	.....	62
B.33	.....	63
B.34	.....	63
B.35	.....	64
B.36	.....	65
B.37	.....	65
B.38	.....	66
B.39	.....	66
B.40	.....	67
B.41	.....	67
B.42	.....	68
B.43	.....	68
B.44	.....	69
B.45	.....	69
B.46	.....	69
B.47	.....	70
B.48	.....	71
B.49	.....	71
B.50	.....	72
B.51	.....	72
B.52	.....	73
B.53	.....	73

B.54		74
B.55		74
B.56		75
B.57		76
B.58		76
B.59		77
B.60		77

Κατάλογος πινάκων

6.1	Πίνακας κερδών πρακτόρων με βάση τη διεκδίκηση (ενέργεια) τους	33
6.2	Πίνακας κερδών πρακτόρων με βάση τη διεκδίκηση (ενέργεια) τους μετά την εισαγωγή της παραμέτρου A	34

Συντομογραφίες

MAS	Πολυπρακτορικό σύστημα
ABM	Μοντέλα βασισμένα σε πράκτορες
nMAS	Πολυπρακτορικό σύστημα νορμών
UAV	Μη επανδρωμένα οχήματα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στο δυναμικό πεδίο της τεχνολογικής προόδου, τα πολυπρακτορικά συστήματα (MAS) αποτελούν τις τελευταίες δεκαετίες αντικείμενο διαφόρων ερευνών και ολοένα αυξανόμενου ενδιαφέροντος, καθώς χρησιμοποιούνται και κατά συνέπεια επηρεάζουν, πληθώρα πεδίων όπως η οικολογία, η οικονομία, ο υγειονομικός τομέας και πολλών άλλων. Τα παιδιά αυτά στελεχώνονται από άτομα, που αποτελούν με τη σειρά τους κομμάτι ενός ευρύτερου κοινωνικού συνόλου που διέπεται από διάφορους άτυπους κανόνες συμπεριφοράς βασισμένους σε διάφορες κοινωνικές, ηθικές και άλλων ειδών συμβάσεις. Οι άτυποι αυτοί κανόνες είναι γνωστοί και ως νόρμες. Οι νόρμες αποτελούν σημαντικό στοιχείο στην διαμόρφωση των ανθρωπίνων σχέσεων καθώς καθορίζουν πολλές φορές, αν θα μπορέσει να επιτευχθεί μια ομαλή συνύπαρξη και συνεργασία με σκοπό κάποιο βέλτιστο αποτέλεσμα ή αν θα εμφανιστεί το φαινόμενο του ανταγωνισμού και δημιουργηθεί κατά συνέπεια ένα ανισόροπο περιβάλλον. Η παρούσα εργασία εμβαθύνει στη σύνθετη δυναμική των MAS και συγκεκριμένα στον συνδυασμό τους με τις κοινωνικές ή ηθικές νόρμες, καθώς και στην επίδραση που μπορεί να έχουν οι νόρμες όταν εισάγονται στα MAS διαμορφώνοντας αναλόγως, σε πρώτο χρόνο τις συμπεριφορές των πρακτόρων, και σε δεύτερο χρόνο τις στρατηγικές που αυτοί αναπτύσσουν. Για παράδειγμα οι Woodgate και Ajmeri(2022) [1] τονίζουν την ανάγκη κοινωνικοτεχνικών συστημάτων να διέπονται από μακροηθική προκειμένου να μπορεί να επιτευχθεί σε αυτά μια θεμιτή δικαιοσύνη. Τέλος, η έρευνα των Morris-Martin, De Vos και Padget(2019) [2] παρέχει μια ολοκληρωμένη και λεπτομερή οπτική σχετικά με την εμφάνιση των νορμών σε MAS δίνοντας έμφαση και στον δυναμικό τρόπο με τον οποίον επηρεάζεται η συμπεριφορά των πρακτόρων και τα αποτελέσματα του συστήματος.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Η διερεύνηση των MAS συνδιαστικά με τους άτυπους αυτούς κανόνες αποτελεί την συνήχεια κάποιων πρώιμων ερευνών σχετικά με την κατανομημένη υπολογιστική και την τεχνητή νοημοσύνη, όπως αυτές των Warren McCulloch and Walter Pitts (1943) [3] ή του Alan Turing (1950) [4] στα μέσα του 20ου αιώνα. Αρχικά η έρευνα ήταν επικεντρωμένη στις δυνατότητες μεμονωμένων πρακτόρων, όμως με την πάροδο του χρόνου αυτό το πρώιμο σκεπτικό εξελίχθηκε, προκειμένου να μπορέσουν να συμπεριληφθούν οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις και αναδυόμενες συμπεριφορές που προέκυπταν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της εξέλιξης αποτελεί η εμφάνιση ερευνών με σκοπό την ανάδειξη συνεργατικών πλαισίων μεταξύ των πρακτόρων, και μάλιστα με έμφαση σε μια συνεργασία ηθελημένη και όχι καταναγκαστικής φύσης, όπως αυτές των Smith & Davis (1981) [5], του Robert Axelrod (1984) [6] και άλλων. Έτσι αντανακλώντας πρακτικά αυτή την θεωρητική μετατόπιση από τη λειτουργικότητα του απομονωμένου παράγοντα στη δυναμική του ολοκληρωμένου συστήματος, εισάγονταν σταδιακά ολοένα και πιο σύνθετα ζητήματα που αφορούσαν της κοινωνίες που μοντελοποιούνταν. Ένα από αυτά ήταν και η ενσωμάτωση κοινωνικών ή και ηθικών κανόνων στη δυναμική τους.

Σε σύγκριση με προηγούμενα μοντέλα που εξερευνούν τις αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων και τα μοτίβα που εμφανίζονται με βάση τη δομή του δικτύου ([7], [8]), ή την ντετερμινιστική ύπαρξη της ανισότητας και της απληστίας ([9], [10]), αυτή η έρευνα επιδιώκει να συμβάλει στη συζήτηση γύρω από την επίδραση ηθικών και κοινωνικών νορμών στα MAS με στόχο την συνεργασία και την δημιουργία κοινοτήτων που βασίζονται στη δικαιοσύνη. Για την εξαγωγή των απαραίτητων συμπερασμάτων πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν αλληλεπιδράσεις πρακτόρων εντός ενός πλέγματος. Οι πράκτορες παίζουν ένα παιχνίδι με τους γείτονές τους έχοντας συγκεκριμένες προτιμήσεις και στρατηγικές (Low, Medium ή High). Η διαφοροποίηση της έρευνας βρίσκεται στην εισαγωγή μιας παραμέτρου ασυμμετρίας 'Α' η οποία αποτελεί και μοντελοποίηση μιας νόρμας. Η διαδικασία είναι επαναληπτική επιτρέποντας έτσι την παρατήρηση των αλλαγών που συντελούνται, λόγω της επίδρασης της νόρμας, στις προτιμήσεις και κατ' επέκταση στις στρατηγικές που αναπτύσσουν οι πράκτορες με την πάροδο του χρόνου.

1.1.1 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της διπλωματικής συνοψίζεται ως εξής:

1. Μελετήθηκαν συστήματα πρακτόρων τοποθετημένων σε ένα πλέγμα με τοπολογία γειτονιάς von Neumann
2. Υλοποιήθηκαν προσομοιώσεις με διαφορετικές αρχικές παραμέτρους
3. Αξιολογήθηκε η ανάπτυξη συγκεκριμένων μοτίβων
4. Ενσωματώθηκε παράμετρος ασυμμετρίας ως μοντελοποίηση μιας νόρμας
5. Υλοποιήθηκαν εκ νέου προσομοιώσεις δίνοντας διαφορετικές τιμές στην παράμετρο
6. Αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως προς την διαφοροποίηση των μοτίβων

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η εργασία διαρθρώνεται μέσα από έξι κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή και παρουσιάζεται το πλαίσιο της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται και καθιερώνονται θεμελιώδεις γνώσεις για τους πράκτορες, τα μοντέλα πρακτόρων και τα πολυπρακτορικά συστήματα (MAS).

Στο τρίτο κεφάλαιο ορίζονται οι κοινωνικές/ηθικές νορμές και αναφέρεται η σύνδεση τους με την θεωρία παιγνίων και τα πολυπρακτορικά συστήματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο πρόβλημα της διαπραγμάτευσης του John Nash ως πυρήνα των αλληλεπιδράσεων που μελετούνται.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφεται λεπτομερώς η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή συμπερασμάτων από τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων των πρακτόρων και των μοτίβων που εμφανίζονται.

Τέλος το έκτο κεφάλαιο συνθέτει και συνοψίζει τα ευρήματα/συμπεράσματα που προέκυψαν εξετάζοντάς τα κριτικά. Επίσης αναφέρεται και η συνεισφορά της έρευνας στο αντικείμενο ενώ παράλληλα σκιαγραφούνται και πιθανές οδοί για περαιτέρω εξερεύνηση του εν λόγω θέματος.

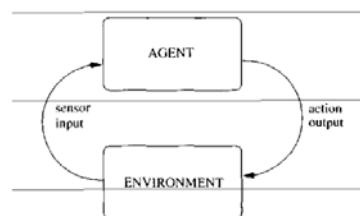
Κεφάλαιο 2

Πράκτορες, Μοντέλα Πρακτόρων και Πολυπρακτορικά Συστήματα

2.1 Ορισμός του όρου πράκτορα

Θέλοντας να ορίσουμε τα πολυπρακτορικά συστήματα οφείλουμε προκειμένου να τεθεί η σωστή βάση να ορίσουμε αρχικά το επίκεντρό τους, τους λεγόμενους πράκτορες. Παρότι ο όρος αυτός έχει βρει διάφορες ερμηνείες ανά τα χρόνια και θα μπορούσε να αποτελέσει από μόνος του θέμα συζήτησης, παραθέτουμε εδώ έναν σχετικά συγκεντρωτικό ορισμό με στόχο να αποτελέσει απλώς μια βάση.

Ένας πράκτορας ορίζεται ως ένα υπολογιστικό σύστημα το οποίο βρίσκεται μέσα σε κάποιο περιβάλλον και ταυτόχρονα είναι ικανό να ενεργεί αυτόνομα σε αυτό το περιβάλλον προκειμένου να επιτύχει τους σχεδιαστικούς του στόχους [11].



Σχήμα 2.1: Αλληλεπίδραση πράκτορα με περιβάλλον

(Ο πράκτορας δέχεται μια εισροή από το περιβάλλον και παράγει με τη σειρά του μια εκροή που αντίστοιχα το επηρεάζει)

Οι Russell and Norvig (2003) παραθέτουν ορισμένες ιδιότητες τις οποίες οφείλει να έχει ένα περιβάλλον.

- **Προσβάσιμο/Δυσπρόσιτο :** Προσβάσιμο χαρακτηρίζεται ένα περιβάλλον για το οποίο ο πράκτορας μπορεί να λάβει πλήρεις, ακριβείς και ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με την κατάστασή του.
- **Ντετερμινιστικό/Μη ντετερμινιστικό :** Σε ένα ντετερμινιστικό περιβάλλον οποιαδήποτε ενέργεια έχει ένα μόνο εγγυημένο αποτέλεσμα και δεν υπάρχει κάποια αβεβαιότητα σχετικά με την κατάσταση που θα προκύψει.
- **Στατικό/Δυναμικό :** Ως στατικό χαρακτηρίζεται ένα περιβάλλον που παραμένει αναλλοίωτο με εξαίρεση τις επιπτώσεις των ενεργειών ενός ή περισσότερων πρακτόρων. Το δυναμικό περιβάλλον από την άλλη αναδιαμορφώνεται λόγω διεργασιών που συντελούνται, ανεξαρτήτως από τις δράσεις των πρακτόρων.
- **Διακριτό/Συνεχές :** Διακριτό ορίζεται το περιβάλλον στο οποίο ο αριθμός ενεργειών και αντιλήψεων είναι πεπερασμένος.

Το περιβάλλον αυτό μπορεί να αποτελείται τόσο από τον φυσικό κόσμο όσο και από τον διαδικτυακό ενώ οι τρόποι που το “διστάθνεται” και δρα σε αυτό ο πράκτορας μπορούν να διαφέρουν. Για παράδειγμα ένας υλικός πράκτορας μπορεί να διαθέτει κάμερες, αισθητήρες και ρόδες για αυτούς τους σκοπούς ενώ ένας πράκτορας λογισμικού μπορεί να λαμβάνει αρχεία διαμέσου διαδικτύου ή ενός ενιαίου σειριακού δίαυλου προκειμένου να “διστάθανθεί” το περιβάλλον του και να δρα σε αυτό στέλνοντας αρχεία ή εμφανίζοντας μηνύματα σε κάποια οθόνη. Η αυτονομία στα πλαίσια των πρακτόρων χρησιμοποιείται για να αποσαφηνιστεί πως ένας πράκτορας οφείλει να μπορεί να δράσει και ταυτοχρόνως να έχει τον έλεγχο των δράσεων του χωρίς κάποια εξωτερική παρέμβαση. Τέλος το πιο ενδιαφέρον ενδεχομένως χαρακτηριστικό των πρακτόρων το οποίο επέτρεψε και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων/συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας είναι η επιδίωξη μιας ατομικής ατζέντας που ανάλογα με τις συνθήκες μπορεί να διευρυνθεί για να συμπεριλάβει άλλους πράκτορες και να γίνει έτσι συλλογική. Το χαρακτηριστικό λοιπόν που καθιστά κάτι τέτοιο δυνατό είναι ο ορθολογισμός. Ένας ορθολογικός ή ευφυής πράκτορας λοιπόν διαφοροποιείται από ένας οποιοδήποτε πράκτορα και ορίζεται ως εξής.

Ορθολογικός πράκτορας είναι εκείνος που για κάθε πιθανή ακολουθία αντιληπτικών εισροών, διαλέγει μια δράση/κίνηση που αναμένεται να μεγιστοποιήσει τον δείκτη απόδοσής

του, δεδομένων των στοιχείων που λαμβάνει από την ακολουθία και οποιασδήποτε ενσωματωμένης γνώσης ήδη διαθέτει. [12]

Προσφέροντας μια επιπλέον διάσταση στον παραπάνω ορισμό οι Wooldridge and Jennings (1995) παρέθεσαν τις εξής ιδιότητες/δυνατότητες που οφείλει να πληρεί ένας τέτοιος ευφυής πράκτορας.

- **Αντιδραση** : Οι ευφυείς πράκτορες είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους και να ανταποκρίνονται έγκαιρα στις αλλαγές που συμβαίνουν σε αυτό προκειμένου να ικανοποιήσουν τους σχεδιαστικούς τους στόχους.
- **Πρόληψη** : Οι ευφυείς πράκτορες είναι σε θέση να επιδεικνύουν στοχευμένη συμπεριφορά αναλαμβάνοντας την πρωτοβουλία προκειμένου να ικανοποιήσουν τους σχεδιαστικούς τους στόχους.
- **Κοινωνική ικανότητα** : Οι ευφυείς πράκτορες είναι ικανοί να αλληλεπιδρούν με άλλους πράκτορες (και πιθανώς με ανθρώπους) προκειμένου να ικανοποιήσουν τους σχεδιαστικούς τους στόχους.

2.2 Μοντέλα Πρακτόρων

Τα συστήματα μοντελοποίησης με βάση τους πράκτορες (ABM) αποτελούν ένα καθιερωμένο υπολογιστικό παράδειγμα για την προσομοίωση πολύπλοκων συστημάτων, όσον αφορά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεμονωμένων οντοτήτων που αποτελούν τον πληθυσμό του συστήματος[13]. Αυτές οι οντότητες είναι οι αυτόνομοι πράκτορες που ορίσαμε νωρίτερα. Σε ένα ABM λοιπόν, οι πράκτορες συνήθως αλληλεπιδρούν εντός ενός περιβάλλοντος με τη μορφή πλέγματος (όπως στη μελέτη μας) ή εντός ενός πολυδιάστατου χώρου. Παρόλο που οι συμπεριφορές των πρακτόρων και οι κανόνες του συστήματος είναι απλοί, τα ABMs είναι ικανά να δημιουργήσουν πολλά σύνθετα παγκόσμια μοτίβα συμπεριφορών ως συνέπεια των χαρακτηριστικών μοντελοποίησης που παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων. Με τον όρο παγκόσμια μοτίβα συμπεριφορών αναφερόμαστε σε συνεπείς μικροσκοπικές κανονικότητες, όπως συνεκτικές χρονικές, χωρικές και συμπεριφορικές δομές ή αναγνωρίσιμες κατανομές[14]. Παράλληλα, η ποσοτική αξιολόγηση καθώς και η αναπαραγωγή της κατάστασής του συστήματος μέσα από μια σειρά διακριτών χρονικών βημάτων αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο προσομοίωσης, επιτρέποντας τον υπολογισμό διαφό-

ρων παρατηρήσιμων στοιχείων και την ανάλυση των ιδιοτήτων του συστήματος [13]. Ένα πρώιμο και σημαντικό παράδειγμα της χρήσης τους είναι το μοντέλο τεχνητών "boids" του Craig Reynolds το 1987, το οποίο προσομοίωσε τη συλλογική συμπεριφορά των σμηνών πουλιών χρησιμοποιώντας απλούς κανόνες. [15]

Ένα ABM ακολουθεί μια προσέγγιση «από κάτω προς τα πάνω» που αποτρέπει τις κοινές δυσκολίες άλλων προσεγγίσεων μοντελοποίησης, επιτρέποντας σε κάποιον να δημιουργήσει σχετικά εύκολα ένα σύνολο καλά καθορισμένων «κανόνων» που θα εφαρμοστούν στις μεμονωμένες οντότητες του συστήματος. Οι κανόνες αυτοί διατυπώνονται για να περιγράψουν τις διακριτές, καθορισμένες και μεμονωμένες συμπεριφορές που μπορεί να πραγματοποιήσει ένας μεμονωμένος πράκτορας ανά δεδομένο χρονικό βήμα ανάλογα με (και πιθανώς ως απόκριση) τη δική του κατάσταση αλλά και τη κατάσταση του τοπικού του περιβάλλοντος. Είναι πιθανολογικοί ή ντετερμινιστικοί ενώ μπορούν να λάβουν υπόψη τις καταστάσεις των προηγούμενων πρακτόρων, τον χρόνο προσομοίωσης και άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με το σύστημα [13]. Το γεγονός αυτό καθιστά αυτά τα μοντέλα ιδιαίτερα χρήσιμα σε καταστάσεις όπου μεμονωμένες ενέργειες και αλληλεπιδράσεις μπορούν να αποδειχθούν κρίσιμες για τη δυναμική του συστήματος.

Η ευελιξία και οι δυνατότητες των μοντέλων που βασίζονται σε πράκτορες (ABM) έχει οδηγήσει στην εφαρμογή τους σε διάφορους τομείς αφού μέσα από τις προσομοιώσεις μιας μοντελοποιημένης κοινότητας προκύπτουν δεδομένα για πιθανές επιπτώσεις παρεμβάσεων ή αντιμετώπισης διαφόρων ζητημάτων.

Στον τομέα των κοινωνικών επιστημών τα ABM μέσω ποικίλων μεθοδολογικών προσεγγίσεων εξερευνούν τη σύνθετη κοινωνική δυναμική που προκύπτει τόσο από μεμονωμένες συμπεριφορές ή από κοινωνικές αλληλεπιδράσεις. Παράλληλα ενοποιώντας ένα ABM με ένα σύστημα ανάλυσης κοινωνικών δικτύων (SNA) παρέχεται ένα πλαίσιο για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι κοινωνικές δομές επηρεάζουν τις ατομικές συμπεριφορές και το αντίστροφο. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για τη μελέτη της συνεξέλιξης κοινωνικών δικτύων και πρακτόρων καθώς και της μοντελοποίησης της μη γραμμικής και απρόβλεπτης κοινωνικής συμπεριφοράς [16].

Η εφαρμογή της βασισμένης σε πράκτορες μοντελοποίησης στις οικονομικές έρευνες, αντιπροσωπεύει μια σημαντική αλλαγή προς την κατεύθυνση της θεώρησης της οικονομίας ως ενός οργανικού, εξελισσόμενου συστήματος που χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις και προσαρμοστικές συμπεριφορές. Δίνοντας έμφαση στην ετερογένεια μεταξύ

των πρακτόρων, περιλαμβάνοντας διαφορές στη στρατηγική, τις πληροφορίες και τις προτιμήσεις δίνεται η δυνατότητα παρατήρησης και αξιολόγησης της προσαρμογής των πρακτόρων με βάση τα αποτελέσματα των αλληλεπιδράσεών τους. Η προσέγγιση αυτή παρέχει έτσι ισχυρά εργαλεία, για την κατανόηση του βάθους και του εύρους της οικονομικής δυναμικής ξεπερνώντας τα παραδοσιακά μοντέλα και ανοίγοντας νέους δρόμους για έρευνα, αξιολόγηση πολιτικής και εξερεύνηση οικονομικών φαινομένων [17].

Τα ABM αποτελούν επίσης ένα σημαντικό εργαλείο και για τον τομέα της διαχείρισης καταστροφών και της αξιολόγησης κινδύνου, λόγω της απλούστευσης, μέσω της μοντελοποίησης, περίπλοκων αλληλεπιδράσεων και συμπεριφορών ατόμων και ομάδων κατά τη διάρκεια κρίσεων όπως σεισμοί και πλημμύρες. Αντλώντας από διεπιστημονικά δεδομένα -που εκτείνονται σε γεωγραφία, κοινωνιολογία, ψυχολογία και μηχανική- το ABM ενισχύει την κατανόησή μας τόσο για τις άμεσες όσο και για τις αλυσιδωτές επιπτώσεις των καταστροφών. Επίσης μέσω της διερεύνησης διαφόρων υποθετικών σεναρίων, δύναται να παραχθούν στρατηγικές διαχείρισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και να επικαιροποιούνται αποφάσεις πολιτικής με βάση τις ανάγκες κάθε περίπτωσης και όχι βάση κάποιου πρωτόκολλου. Συμπερασματικά βελτιώνεται έτσι η ετοιμότητα, η επιτυχία των προσπαθειών αντίδρασης και κατά συνέπεια η ανθεκτικότητα της κοινότητας σε φυσικές καταστροφές συνολικότερα [18], [19].

Τέλος τα ABMs έχουν αποκτήσει επίσης κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της κατανόησης και διαχείρισης της μετάδοσης μολυσματικών ασθενειών καθώς και ευρύτερων βιοϊατρικών εφαρμογών.

Στην έρευνά του ο E. Cuevas (2020) εστιάζει στην εφαρμογή ενός ABM προκειμένου να προληφθεί και έτσι να ελαχιστοποιηθεί η μετάδοση του COVID-19 εντός διαφόρων εγκαταστάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις ατομικές συνθήκες υγείας και τα κοινωνικά χαρακτηριστικά. Μοντελοποιώντας τα χωρικά πλαίσια στα οποία κινούνται οι “ασθενείς” και τις συνθήκες εξάπλωσης της ασθένειας εξάγονται απαραίτητα δεδομένα η ανάλυση των οποίων μπορεί να επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα [14].

Οι Kerr, C. C., Stuart, R. M. et al. (2021) παρουσιάζουν έναν βασισμένο σε πράκτορες προσομοιωτή του covid-19. Ο Covasim συμπεριλαμβάνοντας ένα μεγάλο εύρος πληροφοριών, από δημογραφικές πληροφορίες μέχρι δίκτυα μετάδοσης, παρουσιάζει παρεμβάσεις (φαρμακευτικές και μη) και τις ανάγκες τους σε πόρους καθώς και τα αποτελέσματά τους. Έχοντας ήδη χρησιμοποιηθεί σε πολλές χώρες όπως η Ινδία και η Αμερική, αποδεικνύει έμ-

πρακτα την αξία των μοντέλων που βασίζονται σε πράκτορες στον ιατρικό τομέα [20].

Σε αυτά τα άρθρα τα βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων που βασίζονται σε πράκτορες -όπως η μοντελοποίηση της ατομικής ετερογένειας σε προσομοιώσεις, η αποτύπωση αναδυόμενων φαινομένων με απλούς κανόνες και η δυνατότητα εξερεύνησης πολλαπλών υποθετικών σεναρίων- προσφέρουν πληροφορίες που τα παραδοσιακά επιδημιολογικά μοντέλα αδυνατούν να προβλέψουν. Καθιστούν έτσι την χρήση ABM στη δημόσια υγεία επιτακτική, τόσο αναφορικά με την αντιμετώπιση έκτακτων συνθηκών, όσο και για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πόρων υγειονομικής περίθαλψης.

Ωστόσο τα συστήματα αυτά θέτουν και ορισμένες προκλήσεις, ιδιαίτερα όσον αφορά την εγκυρότητα του μοντέλου και τις υπολογιστικές του απαιτήσεις. Η πολυπλοκότητα ενός μοντέλου μπορεί να καταστήσει δύσκολο τον προσδιορισμό του αλλά και την αποτελεσματικότητά του, κυρίως σε περιπτώσεις όπου μέσω αυτού επιχειρείται να προσωμειωθούν με μεγάλη ακρίβεια πραγματικά συστήματα. [21]

Οι αρχές των μοντέλων που βασίζονται σε πράκτορες ευθυγραμμίζονται στενά με την έννοια των πολυπρακτορικών συστημάτων. Ενώ όμως τα ABM επικεντρώνονται στην πτυχή της μοντελοποίησης, τα MAS είναι προσανατολισμένα περισσότερο στην εφαρμογή πρακτόρων σε ρεαλιστικές καταστάσεις, οι οποίες συχνά δύναται να περιλαμβάνουν κατανεμημένους υπολογιστές. [21] Έχοντας ως κοινή βάση λοιπόν την έννοια των πρακτόρων που αλληλεπιδρούν σε ένα καθορισμένο περιβάλλον, η τομή των αρχών ενός ABM και ενός MAS έχει δημιουργήσει έναν σημαντικό τομέα, επιτρέποντας την εφαρμογή των θεωρητικών γνώσεων που έχουν προκύψει από τα ABM σε πραγματικά σενάρια που καλείται να αντιμετωπίσει ένα MAS.

Στο άρθρο των Sivakumar et al. (2022) παραθέτονται κάποιες μεθόδους συνέργειας ABMs και MAS με σκοπό την δημιουργία πιο εξελιγμένων και ακριβέστερων μοντέλων.

- **Εκμάθηση κανόνων ABM μέσω ML:** Μέσω της ενισχυμένης ή της εποπτευόμενης μάθησης μπορούν να βελτιστοποιηθούν οι κανόνες του κάθε πράκτορα.
- **Προσαρμογή παραμέτρων και υποκατάστατα μοντέλα ABM:** Για της παραμέτρους ενός ABM μπορούν να χρησιμοποιηθούν προσεγγίσεις στοχαστικής βελτιστοποίησης ενώ αλγόριθμοι εποπτευόμενης μάθησης μπορούν να εκπαιδευτούν για τη δημιουργία υποκατάστατων μοντέλων, το οποίο βοηθά επίσης στον μετριασμό του υπολογιστικού κόστους.

- **Εξερεύνηση ABM μέσω ML:** Οι μέθοδοι ML μπορούν να βοηθήσουν στην εξερεύνηση του πολύπλοκου, πολλαπλών διαστάσεων χώρου παραμέτρων ενός ABM, όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησίας, την ανθεκτικότητα του μοντέλου κ.λπ.

2.3 Πολυπρακτορικά Συστήματα

Έχοντας λοιπόν τα παραπάνω ως βάση, όταν μιλάμε για ένα πολυπρακτορικό σύστημα (MAS) εννοούμε ένα σύνολο πρακτόρων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Τα πολυπρακτορικά συστήματα, αποτελούν ιδανική επιλογή για την μοντελοποίηση σεναρίων στα οποία εμπλέκονται πολλές μέθοδοι επίλυσης, διαφορετικές οπτικές και διάφοροι φορείς που προσπαθούν να επιλύσουν το ζητούμενο πρόβλημα. Σε τέτοιες περιπτώσεις προσφέρουν πέρα από τα συμβατικά οφέλη της κατανεμημένης και ταυτόχρονης επίλυσης προβλημάτων, το πρόσθετο πλεονέκτημα περίπλοκων μοτίβων αλληλεπίδρασης. [21]

Κάποια βασικά χαρακτηριστικά των πολυπρακτορικών συστημάτων σύμφωνα με τον Νικόλαο Βλάχση (2007) είναι τα εξής: [22]

- **Σχεδιασμός:** Ο σχεδιασμός ενός πράκτορα επηρεάζει κάθε λειτουργία του από το πως θα εκλάβει μια πληροφορία μέχρι το πως θα δράσει λόγω αυτής. Βάση του σχεδιασμού τους οι πράκτορες ενός πολυπρακτορικού συστήματος μπορούν να διακριθούν σε ετερογενείς ή ομογενείς.
- **Περιβάλλον:** Το περιβάλλον σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα μπορεί να είναι στατικό ή δυναμικό. Στα δυναμικά περιβάλλοντα κυρίως οι πράκτορες πιθανών να δυσκολεύονται να αποκτήσουν μια σταθερή συμπεριφορά κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει και σε αδυναμία εξαγωγής συμπερασμάτων.
- **Αντίληψη:** Η αντίληψη κάθε πράκτορα βασίζεται στις πληροφορίες που φτάνουν σε αυτόν. Αυτό συνήθως συμβαίνει κατανεμημένα καθώς ανά τον πράκτορα η πληροφορία πιθανότατα διαφέρει χρονικά, χωρικά και σημαντικά. Αυτό το γεγονός μπορεί να οδηγήσει σε πολλά ζητήματα καθώς επηρεάζει τον τρόπο που οι πράκτορες λαμβάνουν κάποια απόφαση.
- **Έλεγχος:** Στα πολυπρακτορικά συστήματα ο έλεγχος είναι συνήθως αποκεντρωμένος για λόγους ευρωστίας και ανθεκτικότητας σε λάθη. Έτσι ο κάθε πράκτορας είναι κατά

κύριο λόγο αυτόνομος ως προς το ποια απόφαση θα λάβει και κατ' επέκταση ποια θα είναι η δράση του με βάση αυτή .

- **Γνώση:** Σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων (MAS), μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στα επίπεδα γνώσης που διαθέτει κάθε πράκτορας σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση δύο παρόμοιων πρακτόρων, κάθε πράκτορας μπορεί να γνωρίζει το διαθέσιμο σύνολο ενεργειών του άλλου. Παράλληλα οι πράκτορες μπορεί να έχουν τη δυνατότητα να μοιράζονται τις τρέχουσες αντιλήψεις τους μέσω της επικοινωνίας ή να αντιλαμβάνονται ο ένας τις προθέσεις του άλλου με βάση κάποια κοινή γνώση που έχουν αποκομίσει από προηγούμενες αλληλεπιδράσεις. Αντίθετα, ένας πράκτορας που αντιμετωπίζει μια αντίπαλη ομάδα πρακτόρων είναι πιθανό να αγνοεί το φάσμα των ενεργειών τους και τις άμεσες αντιλήψεις τους ενώ μπορεί να δυσκολεύεται να μαντέψει και τις στρατηγικές τους. Συνολικά, σε ένα MAS, είναι σημαντικό για κάθε πράκτορα να συνυπολογίζει τη γνώση που κατέχει κάθε άλλος πράκτορας όταν λαμβάνει αποφάσεις.
- **Επικοινωνία:** Η επικοινωνία σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα συνδέεται συνήθως με την αλληλεπίδραση, καθώς θεωρείται μια αμφίδρομη διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι πράκτορες έχουν τη δυνατότητα να μεταδίδουν και να λαμβάνουν μηνύματα. Η χρήση της επικοινωνίας ποικίλλει. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως μέσω αυτής καθίσταται εφικτός ο συντονισμός μεταξύ συνεργαζόμενων πρακτόρων καθώς και η δυνατότητα διαπραγμάτευσης μεταξύ πρακτόρων που προσπαθούν να ικανοποιήσουν τα ατομικά τους συμφέροντα.

Στα MAS, οι πράκτορες χρειάζεται συχνά να συνεργαστούν για την επίτευξη κοινών στόχων ή την επίλυση συγκρούσεων όταν τα συμφέροντα τους είναι ανταγωνιστικά. Οι Wooldridge και Jennings (1995) [23] παρέχουν μια εις βάθος ανάλυση των μηχανισμών μέσω των οποίων οι πράκτορες σε ένα MAS διαπραγματεύονται, μοιράζονται τις εργασίες που πρέπει να υλοποιηθούν και επιλύουν συγκρούσεις που προκύπτουν. Σε περιβάλλοντα όπου οι πόροι είναι περιορισμένοι ή οι στόχοι είναι αντικρουόμενοι, αυτές οι στρατηγικές συνεργασίας και επίλυσης συγκρούσεων είναι ζωτικής σημασίας. Περιγράφουν πώς πρωτόκολλα όπως το Contract Net Protocol επιτρέπουν την αποτελεσματική διανομή εργασιών και πώς οι στρατηγικές διαπραγμάτευσης μπορούν να μοντελοποιηθούν και να βελτιστοποιηθούν μέσα σε ένα πλαίσιο MAS.

Μια ακόμα κρίσιμη ικανότητα των πρακτόρων ενός MAS αποτελεί η δυνατότητα της μάθησης και της προσαρμογής, ειδικά σε δυναμικά περιβάλλοντα. Οι Stone και Veloso (2000) [24] διερευνούν πώς οι πράκτορες χρησιμοποιούν τεχνικές μηχανικής μάθησης για να βελτιώσουν την απόδοσή τους και να προσαρμοστούν σε νέες καταστάσεις με την πάροδο του χρόνου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται τόσο η ενισχυτική μάθηση, όπου οι πράκτορες μαθαίνουν βέλτιστες συμπεριφορές μέσω δοκιμής και λάθους, όσο και η εποπτευόμενη μάθηση, μέσω της οποίας οι πράκτορες μαθαίνουν από ένα σύνολο δεδομένων. Η προσαρμογή των παραγόντων αποτελεί κλειδί για τη διατήρηση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα.

Με βάση τα παραπάνω λοιπόν γίνεται αντιληπτό πως ένα MAS πρέπει να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την επεκτασιμότητα και την αποδοτικότητά του, ιδιαίτερα σε συστήματα στα οποία ο αριθμός πρακτόρων είναι πολύ μεγάλος. Ο Durfee (1999) [25] εξέτασε τον τρόπο με τον οποίο ένα πολυπρακτορικό σύστημα χειρίζεται αυτές τις προκλήσεις μέσω αποκεντρωμένων μηχανισμών λήψης αποφάσεων και συντονισμού με σκοπό να αποφευχθούν ζητήματα όπως τα μεγάλα κόστη επικοινωνίας και οι συγκρούσεις αποφάσεων. Μέσα από το έργο του παρέχονται πληροφορίες για αλγόριθμους και στρατηγικές που ενισχύουν την επεκτασιμότητα και την αποτελεσματικότητα του MAS, όπως ο ιεραρχικός σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση κατανεμημένων περιορισμών.

Τέλος, είναι σημαντικό να εξεταστούν και οι πρακτικές εφαρμογές ενός MAS. Μια σχετική ολοκληρωμένη καταγραφή πραγματικών σεναρίων στα οποία ένα πολυπρακτορικό σύστημα έχει εφαρμοστεί με επιτυχία, προσφέρει ο Weiss με το έργο του “Πολυπρακτορικά συστήματα” που δημοσιεύθηκε το 2013. [26] Τα εν λόγω σενάρια περιλαμβάνουν την εισαγωγή ενός MAS στη ρομποτική όπου συντονίζει τις ενέργειες πολλών ρομπότ, στη διαχείριση μιας εφοδιαστικής αλυσίδας, όπου με την χρήση του επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση καθώς και η απογραφή της, ενώ μια ακόμα περίπτωση αποτελούν τα έξυπνα δίκτυα, όπου η εφαρμογή ενός MAS επιτρέπει την βέλτιστη διαχείριση, διανομή και κατανάλωση ενέργειας. Άλλες ενδεικτικές εφαρμογές αποτελούν:

- Διαχείριση και έλεγχος κυκλοφορίας [27]
- Υγειονομική περίθαλψη και Τηλεϊατρική [28]
- Διαχείριση και επίβλεψη περιβάλλοντος [29]
- Αντιμετώπιση και διαχείριση καταστροφών [30]

- Χρηματοοικονομικές Αγορές και Συναλλαγές [31]

Αυτές οι χαρακτηριστικές εφαρμογές μεταξύ πολλών άλλων, καταδεικνύουν την ευελιξία αλλά και την αποτελεσματικότητα των πολυπρακτορικών συστημάτων σε πραγματικές και πολύπλοκες συνθήκες.

Κεφάλαιο 3

Κοινωνικές και ηθικές νόρμες, θεωρία παιγνίων, πολυπρακτορικά συστήματα και τοπολογία δικτύων

3.1 Ορισμός νορμών και συσχετισμός με θεωρία παιγνίων

3.1.1 Εισαγωγή στις νόρμες

Οι νόρμες ορίζονται ως οι άτυποι κανόνες που καθορίζουν τη συμπεριφορά ομάδων και ολόκληρων κοινωνιών. Ως τέτοιοι εντοπίζονται γενικότερα στις κοινωνικές μας αλληλεπιδράσεις και ακόμα πιο συγκεκριμένα, στην διαδικασία λήψης αποφάσεων προκειμένου να επιλεγεί κάποια ενέργεια. Οι Shoham and Tennenholtz [32] έδωσαν έναν αρκετά απλό ορισμό για τη νόρμα, χρησιμοποιώντας τον όρο “κοινωνικός νόμος” και ορίζοντάς την ως “τον περιορισμό σε ένα σετ δράσεων το οποίο είναι διαθέσιμο σε πράκτορες...”. Εξαιτίας της φύσης τους οι νόρμες, παίζουν σημαντικό ρόλο σε ζητήματα όπως τα ιδιοκτησιακά δικαιώματα, οι διαπραγματεύσεις, η δικαιοσύνη και άλλα. Συνεπώς μπορούν όπως γίνεται αντιληπτό απ’ τις εφαρμογές τους, να αποκτήσουν και καταλυτικό ρόλο στη διατήρηση της κοινωνικής ευημερίας προωθώντας την συνεργασία.

Για τους παραπάνω λόγους, μεταξύ άλλων, προσέλκυσαν από νωρίς το ενδιαφέρον κοινωνιολόγων, ανθρωπολόγων αλλά και οικονομολόγων. Οι πρώτοι τις μελέτησαν προκειμένου να κατανοήσουν τη λειτουργία τους ανά πολιτισμούς [33], οι δεύτεροι επικεντρώθηκαν στο πως μπορούν να αποτελέσουν κίνητρο για ατομική δράση ([34], [35]) ενώ οι τελευταίοι

τις εξέτασαν υπό το πρίσμα τις οικονομίας και κατ' επέκταση της αγοράς. [36]

Μέσα απ' τους διαφορετικούς ορισμούς και τις οπτικές απ' τις οποίες έχουν μελετηθεί ανά διαστήματα οι κοινωνικές νόρμες έχουν προκύψει όπως είναι φυσικό και διάφορες κατηγοριοποιήσεις. Μια απ αυτές είναι η κατηγοριοποίηση των Moamin A. Mahmoud et al. [37]

- Βάση των κοινωνικών θεωριών, οι νόρμες αποτελούν τους κανόνες ή τους περιορισμούς της συμπεριφοράς που επιβάλλονται κοινωνικά και θεωρούνται έγκυρες απ' την πλειοψηφία μιας κοινωνικής ομάδας.
- Βάση της δεοντολογίας, οι νόρμες παρουσιάζονται ως ατομικές υποχρεώσεις ή “ελευθερίες” απέναντι σε ένα ευρύτερο κοινωνικό σύστημα. Στην περίπτωση που μια υποχρέωση εμφανιστεί με αντίθετη μορφή ορίζεται ως απαγόρευση.
- Βάση της νομικής θεωρίας, νόρμα είναι κάθε κανόνας συμπεριφοράς που επιβάλλεται από μια εξουσία και ενισχύεται μέσα απ' την εφαρμογή κυρώσεων.
- Στις θεωρίες αποφάσεων και παιγνίων αλλά και σε κάθε άλλη θεωρία η οποία βασίζεται σε λογικούς πράκτορες που χειρίζονται νόρμες με παρόμοιο τρόπο, ως νόρμα ορίζεται κάθε συμπεριφορά που έχει υιοθετηθεί απ' την πλειοψηφία του κοινωνικού συνόλου.

3.1.2 Θεωρία παιγνίων στα πολυπρακτορικά συστήματα

Στα πολυπρακτορικά συστήματα, η θεωρία παιγνίων χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που προκύπτουν λόγω των ποικίλων χαρακτηριστικών των πρακτόρων, της πολυπλοκότητας των περιβάλλοντων και των διαφορετικών στόχων. Μέσω αυτής οι συνεργατικές ή ανταγωνιστικές ενέργειες των πρακτόρων για την επίτευξη ατομικής ή συλλογικής βελτιστοποίησης μοντελοποιούνται και κατ' επέκταση γίνονται πιο εύκολα διαχειρίσιμες. Τα παιχνίδια κατηγοριοποιούνται σε συνεργατικά και μη συνεργατικά τύπους με βάση το αν οι πράκτορες συνεργάζονται για να επιτύχουν τους στόχους τους ή δρουν αποκλειστικά ατομικιστικά. Μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ως στατικά ή δυναμικά ανάλογα με τη σειρά που εκτελούνται οι ενέργειες των πρακτόρων. [38]

Στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε κατά κύριο λόγο με τα συνεργατικά παιχνίδια τα οποία επικεντρώνονται στην προώθηση της συνεργατικής συμπεριφοράς στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης συλλογικού κόστους. Συγκεκριμένα στα στατικά συνεργατικά παιχνίδια, οι πράκτορες προσπαθούν για τη βέλτιστη Pareto σαφής ορισμός της οποία δίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.1.3 Αλληλεπίδραση νορμών και θεωρίας παιγνίων

Μέσω της θεωρίας παιγνίων παρέχονται μαθηματικές μεθόδους για την ανάλυση καταστάσεων στις οποίες δυο ή περισσότεροι παίκτες παίρνουν αποφάσεις που επηρεάζουν την ευημερία του άλλου [39]. Οι νόρμες συνήθως παρουσιάζονται ως σημεία ισορροπίας (equilibria) και κάποιες φορές επιτυγχάνονται με την συνεργασία. Πολλές απ' αυτές τις νόρμες όπως η ειλικρίνεια, η αμοιβαιότητα και η εμπιστοσύνη εντοπίζονται πιο εύκολα σε ομάδες ανθρώπων με στενούς δεσμούς όπως στα small – world networks όπου οι πράκτορες αλληλεπιδρούν διαρκώς μεταξύ τους. [8]

Σε αυτές τις περιπτώσεις λοιπόν, η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την βαθύτερη κατανόηση των μοτίβων που σχηματίζονται μέσω των συνεχών αλληλεπιδράσεων ενώ παράλληλα κάνει εφικτή την σύνδεση μεταξύ επιστημονικών θεωριών και επιστημών όπως η κοινωνιολογία, η οικονομία, η πολιτική και άλλες.

Η σύνδεση των νορμών με την θεωρία παιγνίων γίνεται ιδιαίτερα εμφανή κυρίως σε συστήματα στα οποία οι πράκτορες λαμβάνουν κάποια μορφή ανταμοιβών, που αντιπροσωπεύουν το αποτέλεσμα μιας προηγούμενης αλληλεπίδρασης. Μια θετική ανταμοιβή θεωρείται επιβράβευση ενώ μια αρνητική τιμωρία. Έτσι οι πράκτορες επιλέγουν συνήθως να συμβαδίζουν με τις νόρμες προκειμένου να αυξήσουν τη (θετική) απόδοσή τους. Σε αυτό το πλαίσιο λειτουργίας μια νόρμα αναφέρεται ως προτιμώμενη ενέργεια. [40]

Με την θεωρία παιγνίων, προσεγγίζονται κυρίως νόρμες που βασίζονται στο συντονισμό και τη συνεργασία και συνήθως διακρίνονται σε “ultimatum games”, “stag hunt games”, ή “prisoner’s dilemmas”.

Το ultimatum game αφορά μια απλή διαπραγμάτευση στην οποία δύο άτομα (ή πράκτορες) επιλέγονται τυχαία και παίζουν το παιχνίδι μια μόνο φορά. Το μοντέλο αυτό περιγράφηκε πρώτη φορά απ' τον John Harsanyi το 1961 [41]. Σε αυτό ένα άτομο προτείνει παραδείγματος χάριν το μείρασμα μιας πίτας, με έναν συγκεκριμένο τρόπο που στην περίπτωση που γίνει δεκτός τότε και τα δύο άτομα παίρνουν ότι συμφώνησαν, διαφορετικά δεν παίρνει κανείς τίποτα. Οι συνέπειες των επιλογών είναι γνωστές εκ των προτέρων.

Το stag hunt game (ή “assurance game”, “coordination game”, “trust dilemma”) περιγράφει τη σύγκρουση μεταξύ ασφάλειας και κοινωνικής συνεργασίας. Ο Jean-Jacques Rousseau περιέγραψε αυτή την κατάσταση με το εξής σενάριο: δύο άτομα που βγαίνουν να κυνηγήσουν αντιμετωπίζουν δύο επιλογές. Κάθε άτομο μπορεί να επιλέξει να κυνηγήσει ένα ελάφι ή έναν λαγό χωρίς να γνωρίζει την επιλογή του άλλου. Το ελάφι μπορούν να το πιάσουν μόνο

αν συνεργαστούν ενώ ο λαγός μπορεί να πιαστεί και ατομικά, κοστίζει όμως λιγότερο. Με αυτό το παράδειγμα επιτυγχάνεται μια αναλογία με τον τρόπο που λειτουργεί η έννοια της συνεργασίας κοινωνικά. [42]

Τέλος στο prisoner's dilemma έχουμε δύο υπόπτους που ανακρίνονται ξεχωριστά με διαθέσιμες τις επιλογές της ομολογίας και της σιωπής. Όποια και αν είναι όμως η επιλογή του X, τον Y τον συμφέρει να ομολογήσει. Στην περίπτωση όμως που κανείς απ' τους δύο δεν μιλήσει βγαίνουν και πάλι κερδισμένοι. Έχουμε λοιπόν μια κατάσταση όπου ατομικά οι ύποπτοι έχουν "κέρδος" αν δράσουν με έναν τρόπο που συλλογικά δεν τους συμφέρει. Μια συλλογική συμπεριφορά όμως μπορεί να παρατηρηθεί αν το παιχνίδι επαναληφθεί πολλές φορές. Τότε οι ύποπτοι μπορούν να ακολουθήσουν κάποιες τακτικές που θα επιβραβεύουν την συνεργασία.

Θα παρουσιάσουμε τώρα ένα παράδειγμα για την επίδραση που μπορεί να έχει μια κοινωνική νόρμα. Σε μια κατάσταση όπως αυτή που τίθεται στο prisoner's dilemma το σημείο ισορροπίας Nash εκφράζει ένα αποτέλεσμα που δεν είναι βέλτιστο. Η ύπαρξη μιας νόρμας συνεργασίας, στην κοινωνία που λαμβάνει χώρα το παράδειγμα, μπορεί να μεταβάλλει τα αποτελέσματα που φέρνουν οι επιλογές των υπόπτων ως εξής

		Other	
		C	D
Self	C	S, S	W, B
	D	B, W	T, T
		PD Game	

➡

		Other	
		C	D
Self	C	B, B	W, T
	D	T, W	S, S
		Coordination Game	

Σχήμα 3.1: Το δίλημμα του φυλακισμένου με ή χωρίς συνεργασία

(όπου B = Best, S = Second, T = Third και W = Worst τα αποτελέσματα
και οι διαθέσιμες επιλογές C = Cooperate και D = Defect)

Πλέον όπως βλέπουμε και στο σχήμα το βέλτιστο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται αν οι παίκτες επιλέξουν να συνεργαστούν όπως άλλωστε “επιτάσσεται” και απ’ την νόρμα που προαναφέραμε. Αντιθέτως αν επιλέξουν να ομολογήσουν θα φτάσουν σε ένα σημείο ισορροπίας που δεν θα είναι το βέλτιστο. Επίσης η ύπαρξη της νόρμας τροποποιεί και τα αποτελέσματα που έχουμε αν οι επιλογές παρεκκλίνουν. [43]

Όπως αναφέρει η Bicchieri (2018) [43] μια νόρμα μπορεί να οριστεί και ως ένα σημείο ισορροπίας μιας ή περισσότερων αλληλεπιδράσεων. Έτσι ταυτίζεται πολλές φορές στην θεωρία παιγνίων, με τα σημεία ισορροπίας του Nash. Τα σημεία ισορροπίας, αποτελούν έναν συνδυασμό στρατηγικών (μια ανά πράκτορα) που ως στόχο έχουν η στρατηγική που θα ακολουθήσει κάθε πράκτορας μεμονωμένα να είναι αποτελεσματικότερη συγκριτικά με τις στρατηγικές των άλλων.

3.2 Νόρμες και πολυπρακτορικά συστήματα

3.2.1 Σύνθεση και ανάδυση νορμών σε πολυπρακτορικά συστήματα

Στα πολυπρακτορικά συστήματα (όπως και στη πραγματικότητα) οι νόρμες χρησιμοποιούνται με σκοπό την επιβολή ή την απαγόρευση ορισμένων ενεργειών των πρακτόρων. Όταν εντοπίζεται κάποια παράβασή τους επιφέρουν κυρώσεις [44].

Σύμφωνα με την Morris-Martin et al. (2019) [40] οι νόρμες μπορούν να σχεδιαστούν εξ’ αρχής στους πράκτορες, να τους επιβληθούν αργότερα ή και να προκύψουν απ’ τους ίδιους. Διακρίνονται ως δεοντολογικές έννοιες ή συμπεριφορές προτίμησης. Από δεοντολογική σκοπιά, αντιπροσωπεύουν άδειες, απαγορεύσεις ή δεσμεύσεις, ενώ η άλλη οπτική τις αντιμετωπίζει είτε ως προκαθορισμένες είτε ως υπολογισμένες προτιμήσεις που επιλέγονται από μια σειρά πιθανών συμπεριφορών.

Οι κύριες προσεγγίσεις για την σύνθεση των νορμών σε πολυπρακτορικά συστήματα διακρίνονται σε: σχεδιασμό εκτός σύνδεσης και διαδικτυακό σχεδιασμό. Η πρώτη μέθοδος ενδείκνυται για περιπτώσεις στις οποίες η δομή του συστήματος είναι γνωστή πριν την ανάπτυξή του. Οι νόρμες καθιερώνονται ως περιορισμοί που περιορίζουν τις πιθανές ενέργειες υπό ορισμένες συνθήκες, ενώ εξακολουθούν να παρέχουν στους πράκτορες την απαιτούμενη ευελιξία για την επίτευξη των στόχων τους. Από την άλλη πλευρά, η διαδικτυακή σύνθεση χρησιμοποιείται σε ανοιχτά συστήματα όπου η είσοδος και η έξοδος των πρακτόρων είναι απρόβλεπτες. Αυτή η μέθοδος λοιπόν τροποποιεί τις νόρμες δυναμικά, προσαρμόζοντάς τις

στις εκάστοτε συνθήκες του συστήματος [44].

Επειδή όμως το φαινόμενο της σύνθεσης των νορμών στην αρχικοποίηση και η διατήρησή τους κατά τη λειτουργία των συστημάτων είναι συχνό έχει βρεθεί μια ακόμα λύση για τις περιπτώσεις όπου το σύστημα είναι δυναμικό. Η λύση αυτή είναι η γέννηση των νορμών από τους ίδιους του πράκτορες ή η ανάδυση τους μέσω αυτών. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η ανάδυση μιας νόρμας παρατηρείται όταν ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού την υιοθετεί ή επιλέγει την ίδια δράση. [40]

3.2.2 Νόρμες και συμπεριφορά πρακτόρων

Όσον αφορά την συμπεριφορά των πρακτόρων οι νόρμες στοχεύουν στην διατήρηση μοτίβων συμπεριφορών τα οποία είναι αποδεκτά απ' την πλειοψηφία του πληθυσμού [40]. Μια ακόμα χρησιμότητα των νορμών ως ρυθμιστικός μηχανισμός της συμπεριφοράς των πρακτόρων εντοπίζεται σύμφωνα με τον Michael Luck et al. (2013) [45] στις περιπτώσεις στις οποίες οι πράκτορες πρέπει να συνεργάζονται με άλλους πράκτορες με τους οποίους μπορεί να μην έχουν τους ίδιους στόχους. Χωρίς την κατάλληλη εισαγωγή νορμών οι πράκτορες μπορεί να επιδιώξουν την προσωπική τους ατζέντα λειτουργώντας ιδιοτελώς εις βάρος των υπολοίπων.

Κάποιες χαρακτηριστικά παραδείγματα των προαναφερθέντων συμπεριφορών αποτελούν τα εξής:

- **Συντονισμός και Συνεργασία:** Οι νόρμες διευκολύνουν τον καλύτερο συντονισμό και συνεργασία μεταξύ πρακτόρων, ειδικά σε περιπτώσεις πολύπλοκων καθηκόντων ή περιβάλλοντων όπου καθίσταται επιτακτικό για τους πράκτορες να συνεργαστούν προκειμένου να επιτευχθούν κοινοί στόχοι.
- **Επίλυση συγκρούσεων:** Με τη θέσπιση σαφών “κανόνων”, οι συγκρούσεις μεταξύ των πρακτόρων μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή να επιλυθούν αποτελεσματικότερα, διασφαλίζοντας έτσι ομαλότερες αλληλεπιδράσεις.
- **Προβλεψιμότητα και εμπιστοσύνη:** Η ύπαρξη νορμών κάνει τη συμπεριφορά των πρακτόρων πιο προβλέψιμη, κάτι που είναι απαραίτητο προκειμένου να υπάρχει εμπιστοσύνη μεταξύ των πρακτόρων. Η εμπιστοσύνη μπορεί να φανεί χρήσιμη σε σενάρια στα οποία οι πράκτορες αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς ενδιαφερόμενους φορείς ή οντότητες.

Τέλος οι νόρμες μπορούν να καταλαμβάνουν κεντρικό ρόλο και στον σχεδιασμό των MAS διαμορφώνοντας οργανισμούς και δομώντας τις σχέσεις μεταξύ των πρακτόρων (Boella & van der Torre, 2018) [46]. Κάποιοι ουσιαστικοί κανόνες, για παράδειγμα, εκχωρούν εξουσίες σε πράκτορες, επιτρέποντας την έκδοση εντολών, επίσημες επικοινωνίες και οργανωτική αναδιάρθρωση. Αυτές οι νόρμες λοιπόν όχι μόνο καθορίζουν το πλαίσιο για την αλληλεπίδραση των πρακτόρων, αλλά διαμορφώνουν την ίδια την οργανωτική δομή.

3.2.3 Κύκλος ζωής νορμών σε πολυπρακτορικά συστήματα

Ο κύκλος ζωής των νορμών στα πολυπρακτορικά συστήματα περιλαμβάνει κάποια βασικά στάδια, τα οποία είναι θεμελιώδη για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο εξελίσσονται οι κανόνες μέσα σε αυτά τα συστήματα. Οι Savarimuthu και Cranefield [47] προτείνουν ένα μοντέλο πέντε σταδίων που περιλαμβάνει τη δημιουργία, την ταυτοποίηση (όπου οι πράκτορες αντιλαμβάνονται την νόρμα), τη διάδοση, την επιβολή (χρησιμοποιώντας κυρώσεις για να αποτρέψουν τους παραβάτες) και την ανάδυση, περιγράφοντας έτσι διεξοδικά τις διαδικασίες που σχετίζονται με τον κύκλο ζωής του κανόνα. Αρχικά, η δημιουργία τους αφορά την επιλογή μιας συγκεκριμένης στρατηγικής για ενέργειες, οι οποίες θα μπορούσαν να είναι προκαθορισμένες, τυχαίες ή βασισμένες σε συγκεκριμένες πιθανότητες. Στα στάδια κατά τα οποία μαθαίνονται και διαδίδονται, οι πράκτορες μπορεί να μην συνειδητοποιούν ότι οι συμπεριφορές τους παρατηρούνται και αναπαράγονται, ενώ σε άλλες μπορεί να μοιράζονται ενεργά τη συμπεριφορά τους. Τέλος στο στάδιο της ανάδυσης ένα μεγάλο ποσοστό των πρακτόρων υιοθετεί την νόρμα. [40]

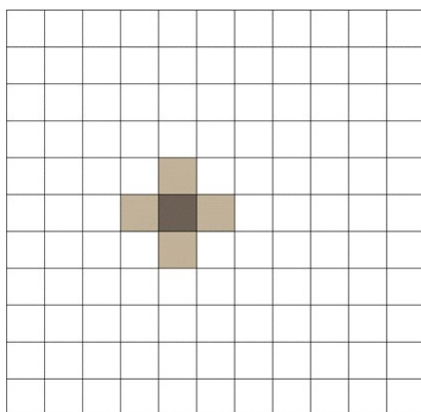
3.2.4 Τοπολογία πολυπρακτορικών συστημάτων καινόρμες

Παρότι τα μοντέλα προσομοίωσης που σχεδιάζονται προκειμένου να ερευνηθεί η ανάδυση των νορμών ποικίλλουν, παρατηρούνται ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά που είτε αφορούν το σύστημα εξ' ολοκλήρου ή τους πράκτορες εντός του. Κάποια απ' τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να διευκολύνουν ή να επιταχύνουν την εμφάνιση των νορμών, ενώ άλλα μπορεί να την καθυστερήσουν ή ακόμα και να την εμποδίσουν. Τα κοινά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ύπαρξη των νορμών εντός ενός πολυπρακτορικού συστήματος διακρίνονται σε: (i) τοπολογία δικτύου, (ii) γνωστικές ικανότητες ή μηχανισμοί λήψης αποφάσεων των πρακτόρων, (iii) μηχανισμοί διάδοσης, (iv) υιοθέτηση από τους παράγοντες αλγόριθμοι

εκμάθησης, (v) δυνατότητες παρατήρησης, (vi) χρήση μεθόδων εκτός σύνδεσης ή διαδικτυακών [40].

Η τοπολογία κοινωνικής δικτύωσης περιγράφει τις συνδέσεις μεταξύ των πρακτόρων μέσα σε μια κοινωνία και κατά συνέπεια τις αλληλεπιδράσεις τους. Το γεγονός πως οι πράκτορες αλληλεπιδρούν με αυτούς με τους οποίους συνδέονται επηρεάζει την εμφάνιση των νορμών, ιδιαίτερα όταν αυτές μαθαίνονται μέσω αλληλεπιδράσεων, με τους πράκτορες να υιοθετούν συχνά τις στρατηγικές των γειτόνων τους.

Στην έρευνα τους οι D. d. Q. Macedo & J. S. Sichman (2010) [48] πραγματεύονται το πως μέσα από τη χρήση μιας συγκεκριμένης τοπολογίας, αυτή της γειτονιάς von Neumann, που χρησιμοποιείται για να καθορίσει το ποιοί πράκτορες αλληλεπιδρούν με ποιούς επιλύεται το πρόβλημα της πολύ υψηλής ανάγκης για υπολογιστική δύναμη. Τα ευρήματα τους αποδεικνύουν ότι οι καλύτερες επιλογές ομάδων πρακτόρων, βάση της τοπολογίας της γειτονιάς von Neumann, μπορούν να οδηγήσουν σε αποτελεσματικότερες προσομοιώσεις διανεμόντας με βέλτιστο τρόπο τα δεδομένα και ελαχιστοποιώντας παράλληλα την απαιτούμενη επεξεργασία.



Σχήμα 3.2: Γειτονιά von Neumann σε τετράγωνο lattice

(Παράδειγμα γειτονιάς von Neumann 1ου βαθμού, σε δισδιάστατο τετράγωνο πλέγμα. Στο σχήμα, κάθε κελί αντιπροσωπεύει έναν πράκτορα. Ο πιο σκούρος πράκτορας αλληλεπιδρά μόνο με τους τέσσερις που τον περιβάλλουν. [48])

Στο έργο τους οι Santos, Poza et al.(2012) [8] διερευνούν πώς η δομή των δικτύων, από σφιχτά συνδεδεμένα έως διασκορπισμένα, επηρεάζει την καθιέρωση και τη διάδοση νορμών “ισότητας” μέσω προσομοιώσεων και μοντελοποιώντας τις αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων χρησιμοποιώντας το πρόβλημα της διαπραγμάτευσης. Αποδεικνύουν ότι τα στενά

συνδεδεμένα δίκτυα (όπως αυτό της γειτονιάς von Neumann), εξαιτίας της ομαδοποίησης που παρατηρείται αλλά και των μικρών μηκών διαδρομής μεταξύ των πρακτόρων, ευνοούν την ανάδειξη δίκαιων νορμών, ενώ τα δίκτυα με πιο τυχαία δομή τείνουν να ενθαρρύνουν φαινόμενα ανισότητας.

Τέλος οι Mahmoud, S., Griffiths, N. et al.(2017) [49] βασιζόμενοι στο έργο του Axelrod R.(1986) [50] μελέτησαν τη δυναμική της καθιέρωσης νορμών και μετα-νορμών σε διαφορετικές τοπολογίες δικτύου, εξετάζοντας πώς η δομή των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πρακτόρων επηρεάζει τη συλλογική συμπεριφορά. Διερεύνησαν συγκεκριμένα την αποτελεσματικότητα των μηχανισμών επιβολής νορμών σε πλέγματα, small worlds και δίκτυα χωρίς κλίμακα, αποδεικνύοντας ότι η τοπολογία του δικτύου επηρεάζει σημαντικά την εξάπλωση αλλά και τη σταθεροποίηση των συνεταιριστικών νορμών. Στην έρευνα που πραγματοποιήσαν δίνεται επίσης έμφαση στις προκλήσεις που εμφανίζονται σε τοπολογίες χωρίς κλίμακα. Σε αυτά τα δίκτυα το πρόβλημα της επιβολής νορμών παρουσιάζεται κυρίως λόγω της άνισης κατανομής των συνδέσεων, καθώς οι κόμβοι που βρίσκονται στο επίκεντρο πολλαπλών συνδέσεων αποκτούν δυσανάλογη επιρροή σε σχέση με αυτούς που βρίσκονται στο περιθώριο. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο, οι συγγραφείς προτείνουν έναν δυναμικό μηχανισμό προσαρμογής πολιτικής που επιτρέπει στους πράκτορες να προσαρμόζουν την εκμάθησή τους με βάση την απόδοσή τους διαμορφώνοντας έτσι τις συμπεριφορές που αυτοί αναπτύσσουν. Με αυτό τον τρόπο ξεπερνούν τις προκλήσεις που παρουσιάζονται σε σύνθετες τοπολογίες διευκολύνοντας την εμφάνιση και επικράτηση των νορμών.

3.2.5 Μηχανισμοί διάδοσης νορμών

Σαν μηχανισμός διάδοσης αναφέρεται η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ενημέρωση των μελών μιας κοινωνίας σχετικά με την ύπαρξη μιας νόρμας. Κάποιοι απ' τους μηχανισμούς αυτούς είναι: (i) σύμβουλος νορμών, (ii) πρότυπο, (iii) μάθηση μέσω αλληλεπιδράσεων και (iv) επιβολή ή τιμωρία [40]. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τον τρίτο μηχανισμό μάθησης δηλαδή την μάθηση μέσω αλληλεπιδράσεων, που ονομάζεται και οριζόντια μετάδοση. Σε αυτή την διαδικασία οι πράκτορες χρησιμοποιούν κάποιον μηχανισμό μάθησης που τους επιτρέπει να τροποποιούν τις στρατηγικές τους σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προηγούμενων αλληλεπιδράσεων, των ενεργειών των άλλων πρακτόρων ή και σύμφωνα με γνώσεις που μπορεί να αποκομίσουν για την επιτυχία άλλων στρατηγικών. Γίνεται εύκολα αντιληπτή λοιπόν η σημαντικότητα της τοπολογίας του δικτύου στην

συγκεκριμένη μέθοδο σε σχέση με την ανάδυση των νορμών.

Κεφάλαιο 4

Το πρόβλημα της διαπραγματεύσεως και σύνδεση με κοινωνικές νόρμες

4.1 Το διαπραγματευτικό πρόβλημα

Το «The Bargaining Problem» του John F. Nash Jr. είναι ένα οικονομικό πρόβλημα που εμφανίζεται με πολλές μορφές, όπως αυτή των διαπραγματεύσεων, του διμερούς μονοπωλίου (μονοπώλιο απ' τη μεριά της προσφοράς και μονοψώνιο απ' τη μεριά της ζήτησης) και άλλες. Μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως παιχνίδι δύο ατόμων χωρίς μηδενικό άθροισμα (ένα παιχνίδι δηλαδή στο οποίο η νίκη του ενός δεν συνεπάγεται απαραίτητα την ήττα του άλλου, ή και αντίστροφα) [51]. Το άρθρο του περιγράφει μια κατάσταση διαπραγμάτευσης όπου δύο άτομα έχουν την ευκαιρία για αμοιβαίο όφελος, αλλά καμία ενέργεια που λαμβάνεται από το ένα από τα άτομα (χωρίς συγκατάθεση) δεν μπορεί να επηρεάσει μονομερώς την ευημερία του άλλου [39]. Παράλληλα μέσα απ' το έργο του ο John F. Nash Jr. παρουσιάζει και ένα πλαίσιο μέσα απ' το οποίο παρέχεται ως βέλτιστη λύση μια μοναδική εξέλιξη ενός δεδομένου διαπραγματευτικού προβλήματος [52].

4.1.1 Η λύση του Nash

Στην απλούστερη εκδοχή του προβλήματος παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο για δύο άτομα που προσπαθούν να μοιραστούν έναν πεπερασμένο αριθμό πόρων. Παρότι την έννοια του παιχνιδιού μηδενικού αθροίσματος εισήγαγαν οι Von Neumann και Morgenstern ο John F. Nash Jr. επέκτεινε την έρευνά τους δημιουργώντας τις προϋποθέσεις για ένα παιχνίδι μη μηδενικού αθροίσματος δύο ατόμων, το οποίο λειτουργεί με βάση «ορισμένες εξιδανικεύ-

σεις» [53]. Διατυπώνονται έτσι μια σειρά αξιωμάτων που πρέπει να ικανοποιεί μια βέλτιστη λύση και μέσω αυτών καθιερώνεται παράλληλα η ύπαρξη καθώς και η μοναδικότητα της. Η λύση αυτή ονομάζεται λύση Nash και αποτελεί μια συνάρτηση που επιλέγει το αποτέλεσμα που μεγιστοποιεί τον γεωμετρικό μέσο όρο των κερδών που κερδίζονται από τους παίκτες όταν καταλήγουν σε συμφωνία [52]. Τα αξιώματα που πρέπει να ικανοποιούνται από κάθε λύση Nash είναι:

- **Να είναι αμετάβλητη σε σχέση με την κλίμακα ωφέλειας.**

Το να είναι αμετάβλητη σε σχέση με την κλίμακα ωφέλειας σημαίνει πως η λύση του διαπραγματευτικού προβλήματος δεν εξαρτάται από κανένα γραμμικό ή συγγενικό μετασχηματισμό των τιμών ωφέλειας.

- **Να είναι συμμετρική.**

Η συμμετρικότητα καθορίζεται από την δυνατότητα των παικτών να αντικαθιστούν ο ένας τον άλλον στον ρόλο του στο διαπραγματευτικό πρόβλημα.

- **Να υπάρχει ανεξαρτησία ασχέτων εναλλακτικών.**

Η ανεξαρτησία από άσχετες εναλλακτικές προϋποθέτει το αποτέλεσμα της διαπραγμάτευσης να εξαρτάται μόνο από το σημείο διαφωνίας και όχι από άλλες εναλλακτικές λύσεις.

- **Να είναι “βέλτιστη κατά Pareto λύση”.**

Το να είναι μια λύση βέλτιστη κατά Pareto σημαίνει πως με βάση την κατανομή των κερδών δεν γίνεται να υπάρξει βελτίωση της λύσης για τον ένα παίκτη δίχως να ζημιωθεί ο άλλος.

Αποδεικνύεται λοιπόν με βάση αυτά τα αξιώματα, ότι υπάρχει πάντα μια “διαπραγματευτική λύση” που είναι δίκαιη και αποδοτική, δηλαδή εντός του εύρους διαπραγμάτευσης και των δύο ατόμων και προσφέροντας τον μέγιστο συνολικό αριθμό των πόρων που εκχωρούνται. Η λύση αυτή μπορεί να υπολογιστεί με βάση τα εύρη διαπραγμάτευσης των δύο ατόμων.

4.2 Διαπραγματευτικό πρόβλημα και πολυπρακτορικά συστήματα

Το διαπραγματευτικό πρόβλημα του Nash αποτελεί επίσης ένα από τα πρώτα και πιο σημαντικά έργα της συνεργατικής θεωρίας παιγνίων. Είναι όπως προείπαμε ένα σχετικά απλό παιχνίδι δύο παικτών, κατά το οποίο οι “λογικοί” πράκτορες/παίκτες έχουν στη διάθεσή τους ένα σύνολο εφικτών κατανομών και καλούνται να διαλέξουν μόνο μια. Η ευρηματική ιδέα του Nash εντοπίζεται στον ορισμό ενός συνεργατικού μετασχηματισμού που μεταμορφώνει ένα παιχνίδι στρατηγικής μορφής, παρέχοντάς του έναν εκτεταμένο χώρο επιλογών για κάθε παίκτη. Το εκτεταμένο αυτό σύνολο διέθεται πλέον όλες τις στρατηγικές του αρχικού παιχνιδιού συν τις επιπλέον στρατηγικές που αποτυπώνουν τη διαπραγμάτευση με τους άλλους παίκτες προκειμένου να σχεδιαστούν από κοινού οι στρατηγικές συνεργασίας. [54]. Ο Michael Wooldridge [11] ενισχύει αυτή την θέση αναφερόμενος πιο συγκεκριμένα στα σημεία ισορροπίας του Nash ως μια από τις σημαντικότερες έννοιες της θεωρίας παιγνίων γενικότερα αλλά και τις ανάλυσης πολυπρακτορικών συστημάτων. Δίνοντας ένα γενικό παράδειγμα για την κατανόηση του όρου αναφέρει: *“Δύο στρατηγικές $S1$ και $S2$ βρίσκονται σε ισορροπία Nash εάν: (1) με την υπόθεση ότι ο πράκτορας i παίζει το $S1$, ο πράκτορας j δεν μπορεί να κάνει κάτι καλύτερο από το να παίζει το $S2$. και (2) με την υπόθεση ότι ο πράκτορας j παίζει το $S2$, ο πράκτορας i δεν μπορεί να κάνει καλύτερα από το να παίζει το $S1$. Η αμοιβαία μορφή μιας ισορροπίας είναι σημαντική γιατί «κλειδώνει τους πράκτορες» σε ένα ζευγάρι στρατηγικών. Κανένας πράκτορας δεν έχει κάποιο κίνητρο να αποκλίνει από μια ισορροπία Nash.”*

Οι εφαρμογές του προβλήματος διαπραγμάτευσης είναι πολλές και στα πολυπρακτορικά συστήματα αφού μέσω αυτού μπορούν να μοντελοποιηθούν με σχετικά μεγάλη ακρίβεια πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης που συναντιούνται και στη πραγματική ζωή. Στην έρευνά τους οι Kyrill Schmid, Lenz Belzner et al. (2020) αναδεικνύουν τη χρήση του προβλήματος και τη δυναμική του υπό το πλαίσιο δύο μεθόδων ενισχυτικής μάθησης σε πολυπρακτορικά συστήματα. Με τη μοντελοποίηση πρακτόρων χρησιμοποιώντας διάφορους βαθμούς αποτροπής κινδύνου και την εισαγωγή σεναρίων με ασύμμετρες πληροφορίες, η μελέτη καταδεικνύει το πώς οι εν λόγω παράγοντες επηρεάζουν την ικανότητα των πρακτόρων να επιτύχουν βέλτιστες διαπραγματευτικές λύσεις. Υπογραμμίζει παράλληλα τις δυνατότητες του πολυπρακτορικού συστήματος ενισχυτικής μάθησης σε σύνθετα σενάρια διαπραγμάτευσης,

συμβάλλοντας στη βαθύτερη κατανόηση της δυναμικής των διαπραγματεύσεων σε συστήματα πολλαπλών πρακτόρων. [55]

Μια χρήση της μεθόδου διαπραγματεύσεως και της λύσης Nash εντοπίζεται για παράδειγμα στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός πολυπρακτορικού συστήματος που έχει ως σκοπό τον διαμοιρασμό ενέργειας μέσω ηλεκτρισμού-θερμότητας-υδρογόνου εντός ενός ενσωματωμένου ενεργειακού συστήματος. Η μέθοδος διαπραγματεύσεως χρησιμοποιείται για την επίτευξη του συντονισμού των ενεργών καταναλωτών προκειμένου να μπορέσουν να καθορίσουν με δίκαιο τρόπο το ποσό και την τιμή της συναλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και υδρογόνου μεταξύ τους. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιεί την διαπραγματευτική λύση Nash για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κατανομής λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες ενέργειας στο δίκτυο. [56]

Ακόμα ένα παράδειγμα χρήσης στρατηγικών ισορροπίας και της λύσης Nash αποτελεί η χρήση τους για την επίλυση προβλημάτων τα οποία σχετίζονται με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV). Συγκεκριμένα στην έρευνα των Bardhan και Ghose (2018) [57] προτείνεται ένας αλγόριθμος που βασίζεται στη λύση Nash για την επίλυση του προβλήματος, της συνάντησης μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) σε πεπερασμένο χρόνο. Οι συγγραφείς Bardhan & Ghose, εστιάζοντας σε σενάρια χωρίς επικεφαλή ή προκαθορισμένη τροχιά αναφοράς, προτείνουν τη χρήση συνεργατικών στρατηγικών θεωρίας παιγνίων οι οποίες αξιοποιώντας την επικοινωνία μεταξύ των UAV καταλήγουν σε μια βέλτιστη κατά Pareto λύση ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος. Η ζητούμενη λύση επιτυγχάνεται μέσω του αλγόριθμου που βρίσκει τον βέλτιστο κυρτό συνδυασμό βαρών, εξασφαλίζοντας έτσι χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με τις μη συνεργατικές στρατηγικές ισορροπίας Nash. Οι προϋποθέσεις για τις συναρτήσεις κόστους που επιτρέπουν τη σύγκλιση, αντιμετωπίζουν παράλληλα τη δυναμική φύση των στρατηγικών UAV καθώς και την ανάγκη για επαναδιαπραγμάτευση προκειμένου να προληφθεί και η μη συνεργατική συμπεριφορά. Καταδεικνύεται τέλος μέσω προσομοιώσεων ότι η προτεινόμενη προσέγγιση διευκολύνει την αποτελεσματική και συνεργατική συμπεριφορά μεταξύ των UAV, ενισχύοντας την επιτυχία της αποστολής.

4.3 Διαπραγματευτικό πρόβλημα και νόρμες

Στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με το πως χρησιμοποιώντας το διαπραγματευτικό πρόβλημα για την μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων των πρακτόρων, σε συνδυασμό με

τη μοντελοποίηση μιας κοινωνικής ή ηθικής νόρμας μπορούμε να φτάσουμε σε μια "ιδανική" κατάσταση στην οποία κάθε κομμάτι της κοινωνίας που προσωμοιώνεται θα είναι ικανοποιημένο. Κάτι τέτοιο γίνεται δυνατό καθώς η λύση Nash ικανοποιεί το αξίωμα της απόδοσης Pareto, πράγμα που σημαίνει ότι η λύση όχι μόνο είναι αποτελεσματική αλλά και πως καμία άλλη λύση δεν μπορεί να ικανοποιεί περισσότερο και τα δύο εμπλεκόμενα μέρη [54].

Ένα παράδειγμα αποτελούν εργασίες που διερευνούν την επίδραση των δομών του δικτύου, όσον αφορά την εμφάνιση μιας νόρμας που προωθεί την ισότητα μεταξύ των "παικτών". Στη μελέτη αυτή εξετάζεται ένας σταθερός και πεπερασμένος πληθυσμός πρακτόρων που παίζουν επανειλημμένα το διαπραγματευτικό παιχνίδι Nash. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα συμμετρικά δίκτυα προάγουν την εμφάνιση της νόρμας ισότητας, ενώ τα λιγότερο δομημένα δίκτυα καθιστούν δυνατή την εμφάνιση διττών καθεστώτων [8].

Οι διερευνούν μέσω μιας υπολογιστικής μοντελοποίησης, το πώς μπορούν να προκύψουν κοινωνικές νόρμες και τάξεις από αποκεντρωμένες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρακτόρων μέσα σε ένα διαπραγματευτικό πλαίσιο εμπνευσμένο από το διαπραγματευτικό πρόβλημα του Nash. Αποδεικνύει ότι μέσω των επαναληπτικών αλληλεπιδράσεων, οι κοινωνικές προσδοκίες εξελίσσονται σε σταθερούς κανόνες, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε μια δίκαιη κατανομή των πόρων χωρίς "άδικες" διακρίσεις, σε μια μεροληπτική διανομή με βάση ορισμένες διαφοροποιήσεις που οδηγούν σε σχηματισμό τάξης ή τέλος σε μια κατάσταση συνεχούς σύγκρουσης λόγω έλλειψης καθιερωμένων νορμών. Τα ευρήματα της δείχνουν ότι φαινομενικά τυχαία χαρακτηριστικά μπορούν να γίνουν η βάση για διάκριση και ταξική διαίρεση εντός της κοινότητας των πρακτόρων αναδεικνύοντας έτσι την περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των ατομικών ενεργειών και της κοινωνικής δομής, διευρύνοντας έτσι το υπάρχον γνωσιακό επίπεδο για την εμφάνιση αλλά και την επιμονή ορισμένων νορμών. [10].

Κεφάλαιο 5

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικά με τις επιπτώσεις κοινωνικοηθικών νορμών σε MAS περιλαμβάνει την ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στην έρευνα του G. Weisbuch [9].

Κάποιες βασικές διαφορές του σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα που αναπτύχθηκαν, όπως για παράδειγμα αυτό του Axtell et al. (2001) [10], αποτελούν ο τρόπος με τον οποίο οι πράκτορες "θυμούνται" τις προηγούμενες αλληλεπιδράσεις τους, καθώς και στο πως αποφασίζουν για τις επόμενες.

- **Αρχικές προτιμήσεις και επιλογές στρατηγικής:** Οι πράκτορες αρχικοποιούνται εντός ενός πλέγματος και αλληλεπιδρούν με βάση την τοπολογία von Neumann. Παράλληλα διαθέτουν συγκεκριμένους συντελεστές προτίμησης (J0L, J0M, J0H) για κάθε κίνηση (L, M, H), η επιλογή της οποίας γίνεται με βάση την κατανομή Boltzmann και την εξίσωση:

$$P_j = \frac{\exp(\beta * J_j)}{\sum_j \exp(\beta * J_j)}, \forall j \quad (5.1)$$

- **Δυναμική παιχνιδιού:** Για την μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία το παιχνίδι διαρκεί πολλές επαναλήψεις (Epochs), στις οποίες επιλέγονται τυχαία ζευγάρια πρακτόρων (μεταξύ των 4 γειτόνων τους) που παίζουν το "παιχνίδι" της διαπραγμάτευσης, με αποτέλεσμα ποικίλα αποτελέσματα με βάση τον συνδυασμό των επιλογών. Μετά από κάθε παιχνίδι οι πράκτορες ανανεώνουν τις προτιμήσεις τους με βάση την εξίσωση:

$$J_j(t + \tau) = (1 - \gamma) * J_j(t) + \pi_j(t), \forall j \quad (5.2)$$

- **Επιρροή παραμέτρων:** Η μελέτη διερευνά τον αντίκτυπο βασικών παραμέτρων στον τρόπο που διαμορφώνονται οι στρατηγικές (επιλογές) των παικτών.
 - **β (συντελεστής εκμετάλλευσης):** Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι πράκτορες χρησιμοποιούν προηγούμενες πληροφορίες για μελλοντικές ενέργειες.
 - **λ (συντελεστής ανταμοιβής/πέναλτι):** Καθορίζει τα πιθανά κέρδη από την H ή L επιλογή σε σύγκριση με την M.
 - **γ (παράμετρος μνήμης):** Αντιπροσωπεύει την ικανότητα του πράκτορα να ανακαλεί προηγούμενες αλληλεπιδράσεις και τα κέρδη που αυτές του απέφεραν και έτσι να διαμορφώνει και ως ένα βαθμό και τη στρατηγική του.
 - **A (παράμετρος ασυμμετρίας):** Μοντελοποίηση μιας κοινωνικής/ηθικής νόρμας εντός του παιχνιδιού.
- **Συλλογή δεδομένων:** Τα αποτελέσματα κάθε επανάληψης καταγράφονται, εστιάζοντας στις επιλογές στρατηγικής των πρακτόρων, τους ρυθμούς αλλαγής προτιμήσεων καθώς και την επιμονή-φανατισμό που επιδεικνύουν.
- **Στατιστική ανάλυση:** Τα δεδομένα αναλύονται για την κατανόηση των μοτίβων που σχηματίζονται, συμπεριλαμβανομένης της σύγκλισης στρατηγικής, της εμφάνισης κατηγοριών πρακτόρων και των επιπτώσεων της παραμέτρου ασυμμετρίας.

Αποτυπώνεται έτσι αποτελεσματικά η δυναμική συμπεριφορά των πρακτόρων εντός ενός απλοποιημένου, δυνητικού, κοινωνικού πλαισίου. Μεταβάλλοντας τις βασικές παραμέτρους που προαναφέρονται, αποκτούνται και οι ανάλογες πληροφορίες για την πολύπλοκη αλληλεπίδραση των πρακτόρων, των ατομικών τους προτιμήσεων, της στρατηγικής που αναπτύσσουν για την λήψη αποφάσεων και τέλος της επίδρασης μιας μοντελοποιημένης κοινωνικής και ηθικής νόρμας.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συνοψίσουμε τα αποτελέσματα για τις διαφορετικές τιμές των παραμέτρων β και λ και για τις διαφορετικές αρχικοποιήσεις των συντελεστών προτίμησης J . Επίσης θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων πριν και μετά την εισαγωγή της νόρμας και θα συζητήσουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επίδραση της νόρμας στους πράκτορες.

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αρχικό στάδιο έχουμε τον πίνακα που απεικονίζει τα κέρδη ανά διεκδίκηση με λ τον συντελεστή ανταμοιβής/τιμωρίας χωρίς την εισαγωγή της παραμέτρου A :

	L	M	H
L	$0.5 - \lambda = 0.2$	$0.5 - \lambda = 0.2$	$0.5 - \lambda = 0.2$
M	0.5	0.5	0.0
H	$0.5 + \lambda = 0.8$	0.0	0.0

Πίνακας 6.1: Πίνακας κερδών πρακτόρων με βάση τη διεκδίκηση (ενέργεια) τους

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις είναι τα ακόλουθα:

- Οι πράκτορες για $\beta < 0.7$ και ανεξαρτήτως αρχικών προτιμήσεων δεν εμμένουν σε κάποια στρατηγική αλλά συνεχώς εξερευνούν τις δυνατότητές τους για περισσότερο κέρδος. Κατά συνέπεια στο γράφημα που απεικονίζει το πλέγμα δεν διακρίνεται κά-

ποιος χρωματισμός, στα γραφήματα που δείχνουν πόσοι παίκτες πιθανότατα θα παίξουν μια συγκεκριμένη κίνηση είναι κενά ενώ τέλος στα γραφήματα των διανυσμάτων προτίμησης δεν παρατηρούμε συσπείρωση στις κορυφές αλλά στο κέντρο.

- Για $0.7 < \beta < 1.3$, $\lambda = 0.2$ και με αρχικούς συντελεστές προτίμησης που ενθαρρύνουν τις κινήσεις L ή H, οι πράκτορες συνεχίζουν να εξερευνούν τις πιθανότητες για περισσότερα κέρδη. Παρόλα αυτά, παρατηρείται μια σύγκλιση στο M ως βέλτιστη στρατηγική που αποφέρει περισσότερα κέρδη. Επιπλέον ένα αρκετά ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει είναι η εμφάνιση "φανατισμένων παικτών" οι οποίοι, έχοντας λάβει περισσότερα κέρδη παίζοντας H έναντι παικτών που επέλεξαν L, εμμένουν σε αυτή την επιλογή.
- Τέλος για $\beta > 1.3$ και $\lambda = 0.2$ παρατηρούμε πως οι παίκτες εμμένουν στις κινήσεις με τον μεγαλύτερο συντελεστή προτίμησης εκτός από την περίπτωση που η κίνηση αυτή είναι το H. Τότε οι περισσότεροι παίκτες βάσει των αλληλεπιδράσεών τους καταλήγουν να παίζουν L καθώς το ρίσκο του να μην κερδίσουν κάτι παίζοντας H είναι μεγάλο.

Εισάγωντας την παράμετρο ασυμμετρίας (νόρμα) A, ο πίνακας των πιθανών κερδών με βάση της ενέργειες τροποποιείται αναλόγως.

	L	M	H
L	$0.5 - \lambda$	$0.5 - \lambda$	$0.5 - \lambda$
M	0.5	0.5	0.0
H	$0.5 + \lambda / A$	0.0	0.0

Πίνακας 6.2: Πίνακας κερδών πρακτόρων με βάση τη διεκδίκηση (ενέργεια) τους μετά την εισαγωγή της παραμέτρου A

Πλεον παρατηρούμε πως αναπτύσσονται διαφορετικές συμπεριφορές στους πράκτορες και εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Όπως και πριν την εισαγωγή της νόρμας A οι πράκτορες για $\beta < 0.5$ και ανεξαρτήτως αρχικών προτιμήσεων εξερευνούν συνεχώς τις δυνατότητές τους για περισσότερο κέρδος. Με την εισαγωγή της νόρμας όμως το όριο του συντελεστή εκμετάλλευσης

β μικραίνει διευρύνοντας το πεδίο στο οποίο οι πράκτορες επιλέγουν συγκεκριμένη κίνηση.

- Για $0.5 < \beta < 1.3$, $\lambda = 0.2$ ή $\lambda = 0.4$ οι παίκτες σταματούν να εξερευνούν την προοπτική των περισσότερων κερδών. Επίσης χάρη στην συμβολή της νόρμας παρατηρείται η εμφάνιση της ισότητας (equity norm) αφού πλέον όλοι οι παίκτες ζητάνε M επιτρέποντας έτσι στο σύστημα να φτάσει στη βέλτιστη ισορροπία Nash (equilibrium).
- Για $\beta > 1.3$ και $\lambda = 0.2$ οι παίκτες εμμένουν στις κινήσεις με τον μεγαλύτερο συντελεστή προτίμησης εκτός από την περίπτωση που η κίνηση αυτή είναι το H οπότε και επιλέγουν την ασφάλεια έναντι του μέγιστου (αλλά αβέβαιου) κέρδους. Στις περιπτώσεις αυτές γίνεται ακόμα πιο εμφανής και η επίδραση της νόρμας A . Με την εισαγωγή της μειώνονται οι παίκτες που επιδιώκουν μέγιστο κέρδος εις βάρος των υπολοίπων και αυξάνονται οι παίκτες που επιζητούν μια "δίκαιη" κατανομή. Το γεγονός αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό στα γραφήματα που παρουσιάζουν τον αριθμό των παικτών με συγκεκριμένη πιθανότητα κίνησης. Στα γραφήματα αυτά παρατηρούμε πως όταν αυξάνουμε την τιμή της νόρμας οι παίκτες που επέλεξαν H μειώνονται ραγδαία.
- Τέλος για $\beta > 1.3$ και $\lambda = 0.4$ έχουμε και πάλι την εμφάνιση της ισορροπίας με βάση την ισότητα. Αυτή τη φορά η εμφάνιση της νόρμας συντελεί απλώς στην πιο γρήγορη επικράτησή των παικτών που επιζητούν την αντίστοιχη κατανομή και αντίστοιχα στην υποχώρηση των "άπληστων παικτών".

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Προς μια μελλοντική κατεύθυνση η έρευνα στο συγκεκριμένο πεδίο θα μπορούσε να εξερευνήσει τη συμπεριφορά των πρακτόρων όταν εισάγονται πολλαπλές και αλληλοσυγκρουόμενες νόρμες. Επίσης μια νέα διάσταση μπορεί να δοθεί εξετάζοντας τα διαφορετικά πλέγματα και τις τοπολογίες προσπαθώντας να αποδοθούν σε αυτά όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές συνθήκες αλληλεπίδρασης οι οποίες όπως και στην πραγματικότητα καθορίζονται μεταξύ άλλων και από επιβαλλόμενες νόρμες. Χτίζοντας πάνω στις έρευνες των Han(2022) [58] και Murukannaiah et al. (2020) [59] η μελλοντική έρευνα μπορεί να προωθήσει περισσότερο την κατανόηση και εφαρμογή των κοινωνικών και ηθικών νορμών προς την κατεύθυνση των δίκαιων πολυπρακτορικών συστημάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] Jessica Woodgate and Nirav Ajmeri. Macro ethics for governing equitable sociotechnical systems. In *Proceedings of the 21st International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, AAMAS '22, page 1824–1828, Richland, SC, 2022. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [2] Andreea Morris-Martin, Marina De Vos, and Julian Padget. Norm emergence in multiagent systems: A viewpoint paper. In *Proceedings of the 19th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, AAMAS '20, page 2152–2154, Richland, SC, 2020. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [3] W.S. McCulloch and W. Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115–133, 1943.
- [4] Alan M. Turing. Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(October):433–460, 1950.
- [5] R. G. Smith and R. Davis. Frameworks for cooperation in distributed problem solving. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 11(1):61–70, Jan 1981.
- [6] R. Axelrod and R.M. Axelrod. *The Evolution of Cooperation*. Basic books. Basic Books, 1984.
- [7] D. J. Poza, J. I. Santos, J. M. Galán, and A. López-Paredes. Mesoscopic effects in an agent-based bargaining model in regular lattices. *PLoS ONE*, 6(3):e17661, 2011.
- [8] Jose I. Santos, David J. Poza, Jose M. Galán, and Adolfo Lopez-Paredes. Evolution of equity norms in small-world networks. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, page Article ID 482481, 2012.

- [9] G. Weisbuch. Lattice dynamics of inequity. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 21, 2018.
- [10] Robert Axtell, J.M. Epstein, and H.P. Young. The emergence of classes in a multi-agent bargaining model. *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*, 02 2000.
- [11] Michael Wooldridge. *An Introduction to MultiAgent Systems*. Wiley Publishing, 2nd edition, 2009.
- [12] Stuart J. Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd Edition)*. Prentice Hall, December 2003.
- [13] Nikita Sivakumar, Cameron Mura, and Shayn M. Peirce. Innovations in integrating machine learning and agent-based modeling of biomedical systems. *Frontiers in Systems Biology*, 2, 2022.
- [14] Erik Cuevas. An agent-based model to evaluate the covid-19 transmission risks in facilities. *Computers in Biology and Medicine*, 121:103827, 2020.
- [15] C. W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In *SIG-GRAPH '87: Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 25–34, 1987.
- [16] Meike Will, Jürgen Groeneveld, Karin Frank, and Birgit Müller. Combining social network analysis and agent-based modelling to explore dynamics of human interaction: A review. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 2:16325, 2020.
- [17] W. Brian Arthur. Foundations of complexity economics. *Nature Reviews Physics*, 3:136–145, 2021.
- [18] Rouba Iskandar, Julie Dugdale, Elise Beck, and Cécile Cornou. Peers: An integrated agent-based framework for simulating pedestrians' earthquake evacuation. In *ISCRAM 2021-18th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management*, pages 86–93. Blacksburg Virginia, United States, 2021.
- [19] Toon Haer, Trond G. Husby, W.J. Wouter Botzen, and Jeroen C.J.H. Aerts. The safe development paradox: An agent-based model for flood risk under climate change in the european union. *Global Environmental Change*, 60:102009, 2020.

- [20] Cliff C. Kerr, Robyn M. Stuart, Dina Mistry, Romesh G. Abeysuriya, Katherine Rosenfeld, Gregory R. Hart, Rafael C. Nunez, Jamie A. Cohen, Prashanth Selvaraj, Brittany Hagedorn, Lauren George, Michał Jastrzębski, Amanda S. Izzo, Greer Fowler, Anna Palmer, Dominic Delport, Nick Scott, Sherrie L. Kelly, Caroline S. Bennette, Bradley G. Wagner, Stewart T. Chang, Assaf P. Oron, Edward A. Wenger, Jasmina Panovska-Griffiths, Michael Famulare, and Daniel J. Klein. Covasim: An agent-based model of covid-19 dynamics and interventions. *PLoS Computational Biology*, 17(7):e1009149, 2021.
- [21] Nicholas Jennings, Katia Sycara, and Michael Wooldridge. A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1998.
- [22] N. Vlassis. *A Concise Introduction to Multiagent Systems and Distributed Artificial Intelligence*. Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning. Morgan & Claypool Publishers, 2007.
- [23] M. Wooldridge and N. R. Jennings. Intelligent agents: Theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2):115–152, 1995.
- [24] P. Stone and M. Veloso. Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective. *Autonomous Robots*, 8(3):345–383, 2000.
- [25] E. H. Durfee. Distributed problem solving and planning. In *Multiagent Systems*, pages 121–164. MIT Press, 1999.
- [26] G. Weiss, editor. *Multiagent Systems*. MIT Press, 2nd edition, 2013.
- [27] A. L. C. Bazzan and F. Klügl. A review on agent-based technology for traffic and transportation. *The Knowledge Engineering Review*, 29(3):375–403, 2013.
- [28] D. Isern and A. Moreno. A systematic literature review of agents applied in healthcare. *Journal of Medical Systems*, 40(2):43, 2016.
- [29] S. E. Jørgensen and G. Bendoricchio. *Fundamentals of Ecological Modelling: Applications in Environmental Management and Research*. Elsevier, 4th edition, 2001.
- [30] S. D. Ramchurn, T. D. Huynh, and N. R. Jennings. Trust in multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*, 31(1):3–25, 2016.

- [31] B. LeBaron. A builder's guide to agent-based financial markets. *Quantitative Finance*, 1(2):254–261, 2001.
- [32] Yoav Shoham and Moshe Tennenholtz. On the emergence of social conventions: modeling, analysis, and simulations. *Artificial Intelligence*, 94(1-2):139–166, 1997.
- [33] Clifford Geertz. *The Interpretation of Cultures: Selected Essays*. Basic Books, New York, 1973.
- [34] E.M. Durkheim. *Rules of Sociological Method*. Simon & Schuster, 1964.
- [35] J. S. Coleman. *Foundations of Social Theory*. Harvard University Press, Cambridge, 1990.
- [36] H. Young. Social norms and economic welfare. *European Economic Review*, 42(3-5):821–830, 1998.
- [37] M. A. Mahmoud, M. S. Ahmad, M. Z. M. Yusoff, and A. Mustapha. A review of norms and normative multiagent systems. *The Scientific World Journal*, 2014:Article ID 684587, 2014.
- [38] Jianrui Wang, Yitian Hong, Jiapeng Xu, Yang Tang, Qing-Long Han, and Jurgen Kurths. Cooperative and competitive multi-agent systems: From optimization to games. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9:763–783, 05 2022.
- [39] J. Veisdal. Nash's bargaining problem (1950), December 3 2021.
- [40] Andreea Morris-Martin, Marina De Vos, and Julian Padget. Norm emergence in multiagent systems: a viewpoint paper. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 33:706–749, 2019.
- [41] J. C. Harsanyi. On the rationality postulates underlying the theory of cooperative games. *Journal of Conflict Resolution*, 5(2):179–196, 1961.
- [42] B. Skyrms. The stag hunt. *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association*, 75(2):31–41, 2001.
- [43] Cristina Bicchieri, Ryan Muldoon, and Alessandro Sontuoso. Social norms. https://www.researchgate.net/publication/324517526_Social_Norms, 2018.

- [44] Nieves Montes and Carles Sierra. Value-guided synthesis of parametric normative systems. In *Proceedings of the 20th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, AAMAS '21, page 907–915, Richland, SC, 2021. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [45] Mark d’Inverno and Michael Luck. *Normative Agents*, pages 183–199. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [46] Guido Boella and Leendert van der Torre. A game-theoretic approach to normative multi-agent systems. In *Normative Multi-agent Systems*, 2007.
- [47] Bastin Tony Roy Savarimuthu and Stephen Cranefield. Norm creation, spreading and emergence: A survey of simulation models of norms in multi-agent systems. *Multiagent and Grid Systems*, 7:21–54, 05 2011.
- [48] Diego de Queiroz Macedo and Jaime Simao Sichman. Analysis of von neumann neighborhoods in parallel multi-agent simulations. In *2010 Second Brazilian Workshop on Social Simulation*, pages 27–32, 2010.
- [49] Samhar Mahmoud, Nathan Griffiths, Jeroen Keppens, and Michael Luck. Establishing norms with metanorms over interaction topologies. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 31(6):1344–1376, 2017.
- [50] Robert Axelrod. An evolutionary approach to norms. *American Political Science Review*, 80(4):1095–1111, 1986.
- [51] J. F. Nash. The bargaining problem. *Econometrica*, 18(2):155–162, 1950.
- [52] Ana Berta Vegas Segura. The bargaining problem: Nash and other solutions, June 2020.
- [53] J. Gulson. Bitcoin as an implementation of john forbes nash jr.’s axiomatic bargaining “idealizations”, February 16 2022.
- [54] Y. Narahari. Game theory: Lecture notes. Technical report, Indian Institute of Science, Bangalore, India, October 2012. Lecture notes for the Department of Computer Science and Automation.
- [55] Kyrill Schmid, Lenz Belzner, Thomy Phan, Thomas Gabor, and Claudia Linnhoff-Popien. Multi-agent reinforcement learning for bargaining under risk and asymmetric

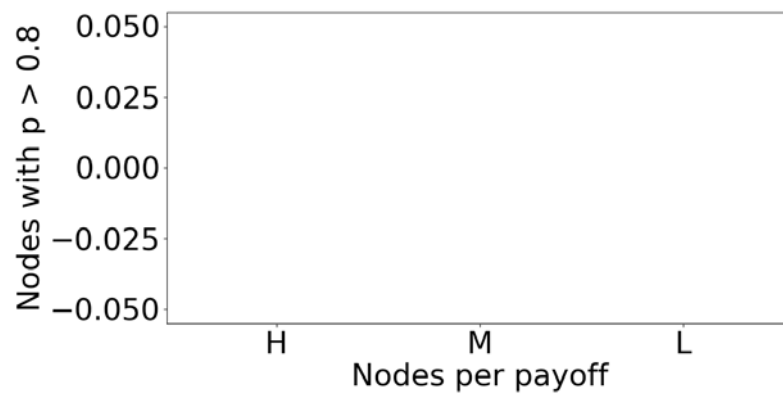
information. *Icaart: Proceedings of the 12Th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Vol 1*, pages 144–151, 2020.

- [56] Jianyong Ding, Ciwei Gao, Meng Song, Xingyu Yan, and Tao Chen. Optimal operation of multi-agent electricity-heat-hydrogen sharing in integrated energy system based on nash bargaining. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148:108930, 2023.
- [57] R. Bardhan and D. Ghose. Nash bargaining solution based rendezvous guidance of unmanned aerial vehicles. *Journal of the Franklin Institute*, 355(16):8106–8140, 2018.
- [58] The Anh Han, Stefano V. Albrecht, and Michael Woolridge. Emergent behaviours in multi-agent systems with evolutionary game theory. *AI Commun.*, 35(4):327–337, jan 2022.
- [59] Pradeep K. Murukannaiah, Nirav Ajmeri, Catholijn M. Jonker, and Munindar P. Singh. New foundations of ethical multiagent systems. In *Proceedings of the 19th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, AAMAS '20, page 1706–1710, Richland, SC, 2020. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [60] <https://github.com/konvlachas95/Diploma.thesis.git>

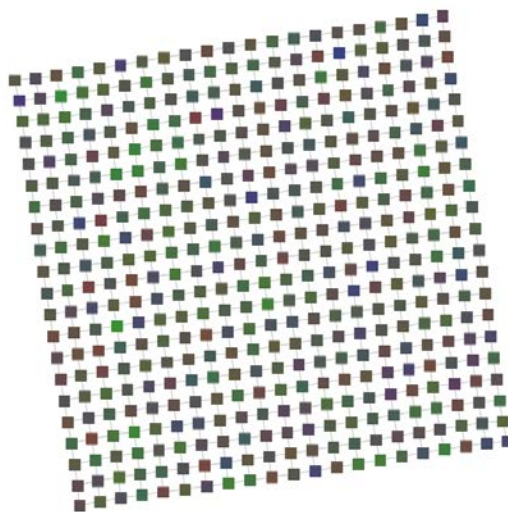
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων χωρίς τον συντελεστή ασυμμετρίας A

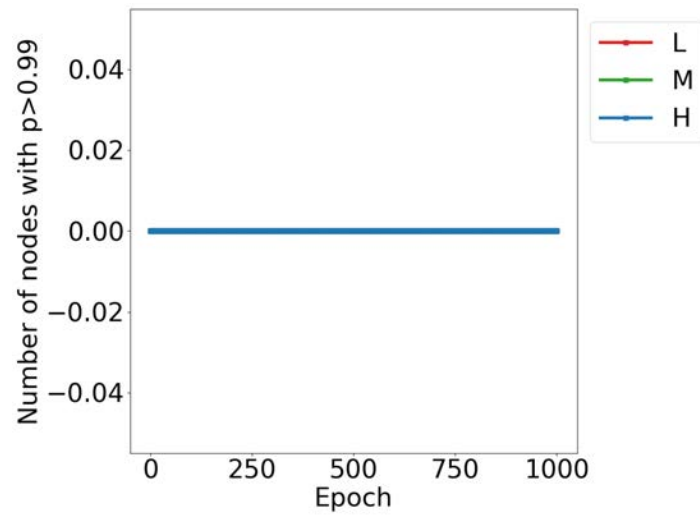
A.3.1 Αποτελέσματα για $\beta=0.3$, $\lambda=0.2$ και για κάθε $J=(J0L, J0M, J0H)$



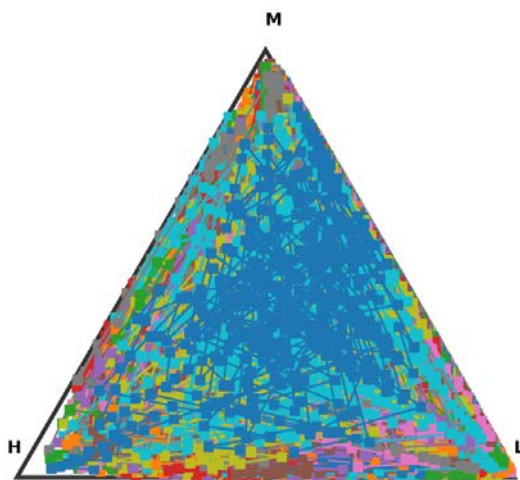
Σχήμα A.1



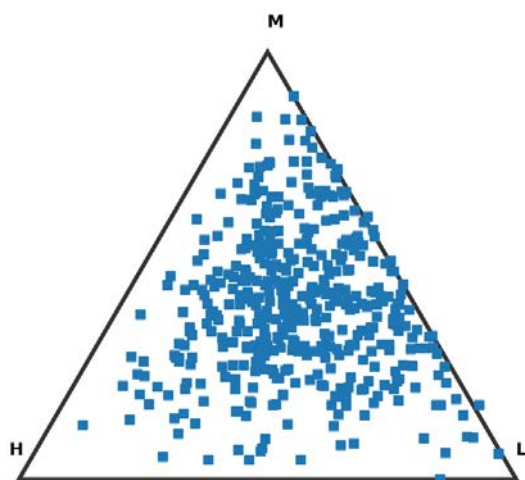
Σχήμα A.2



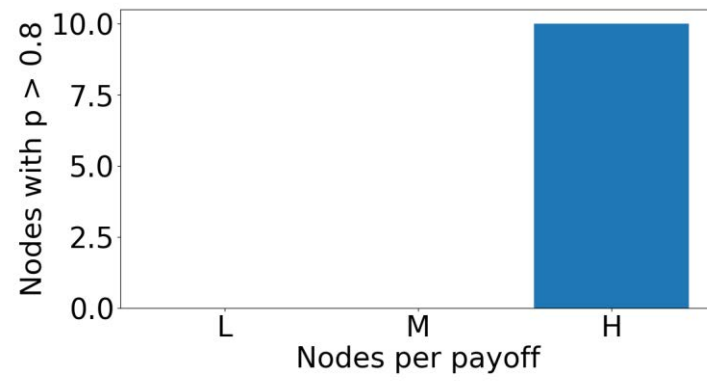
Σχήμα A.3



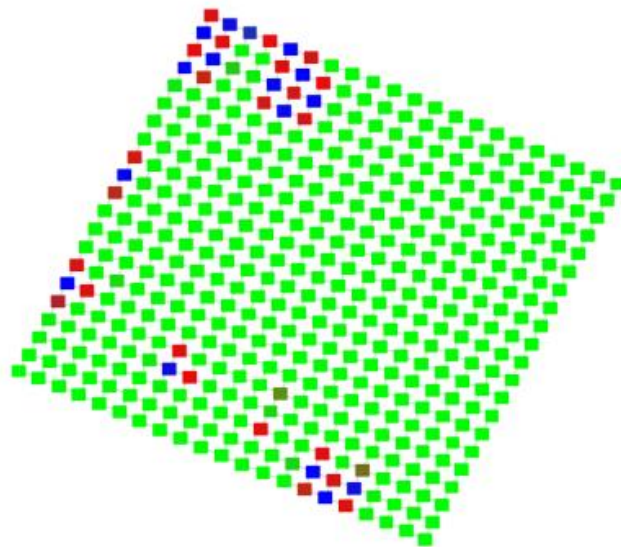
Σχήμα A.4



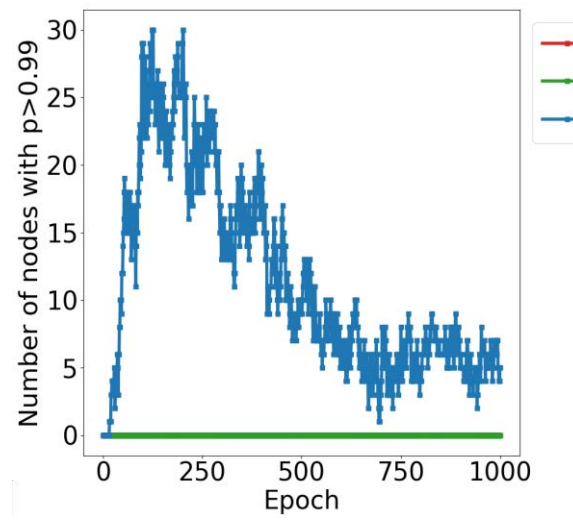
Σχήμα Α.5

A.3.2 Αποτελέσματα για $\beta=1$, $\lambda=0.2$ και $J = [4,1,1], [1,1,4]$ 

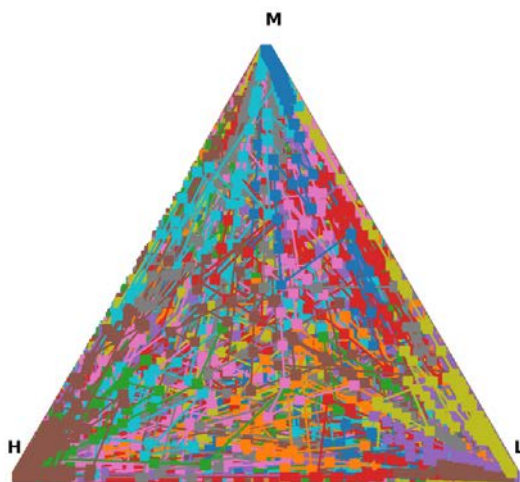
Σχήμα A.6



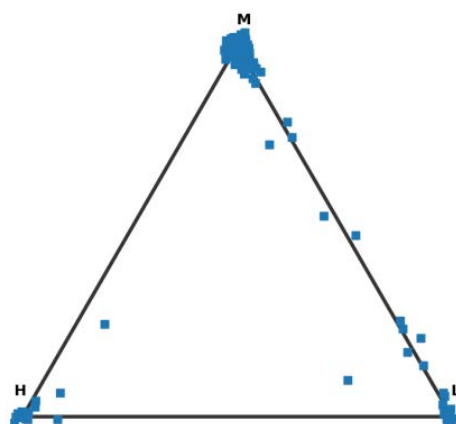
Σχήμα A.7



Σχήμα Α.8

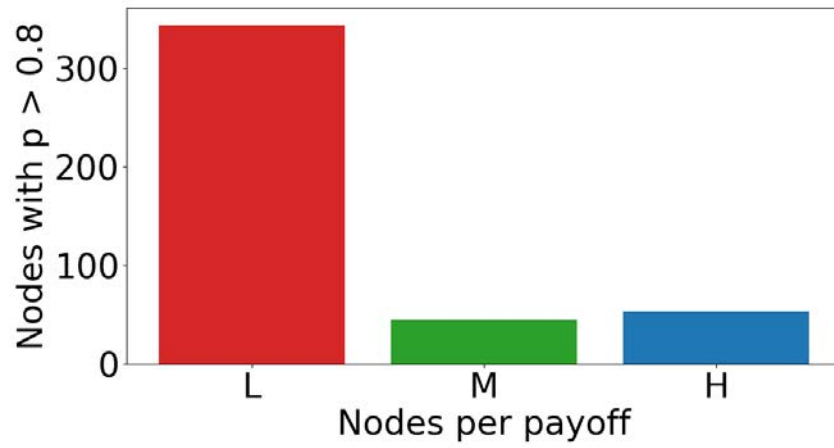


Σχήμα Α.9

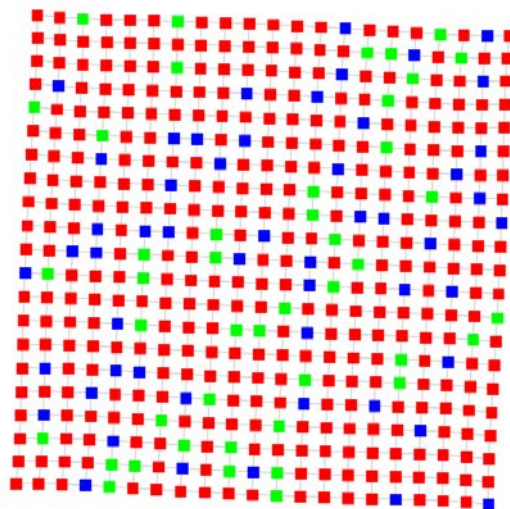


Σχήμα A.10

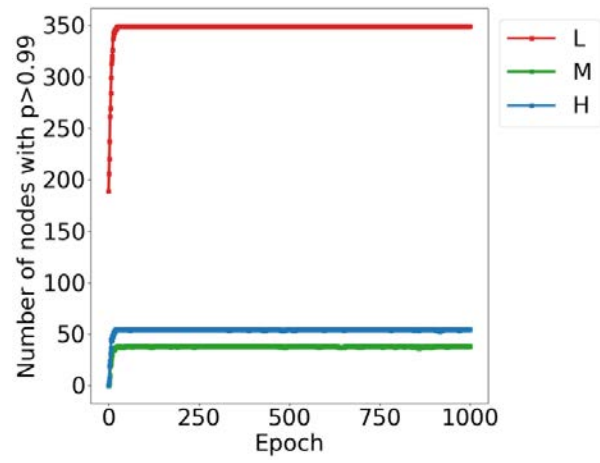
A.3.3 Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$ και $J = [4,1,1]$



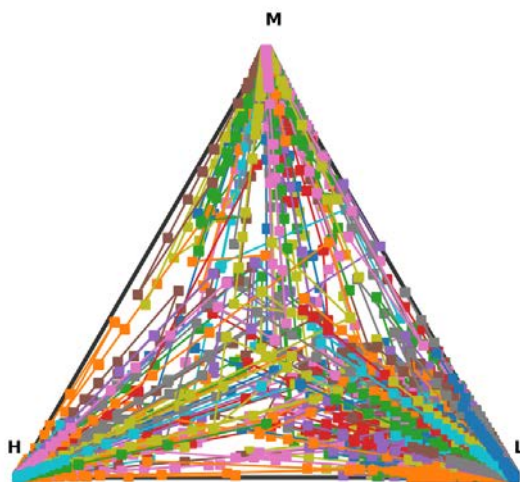
Σχήμα A.11



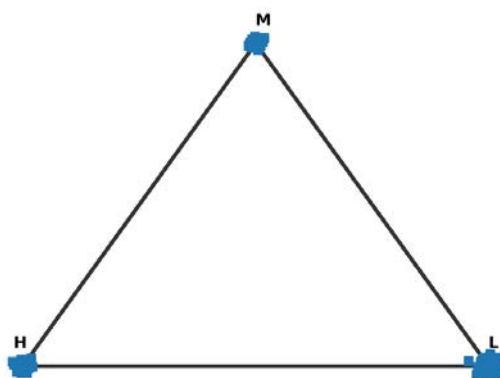
Σχήμα A.12



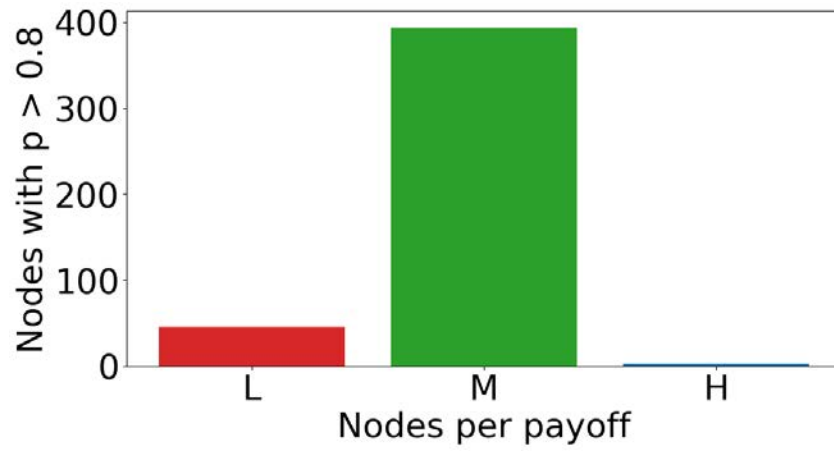
Σχήμα A.13



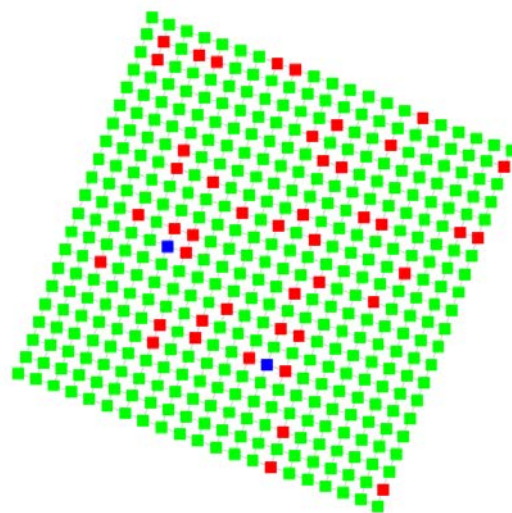
Σχήμα A.14



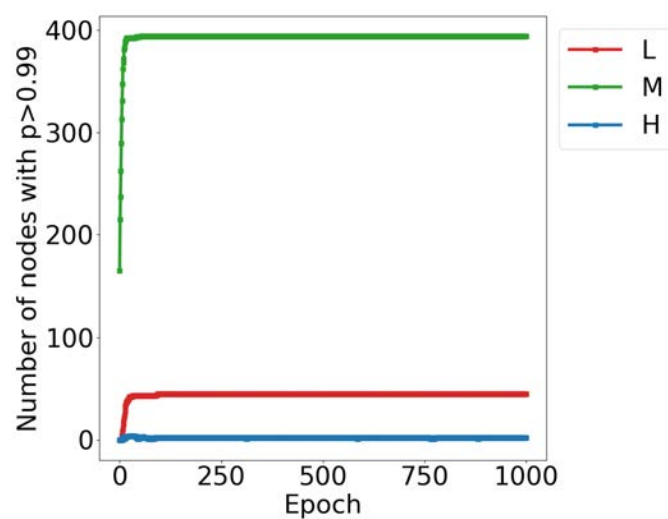
Σχήμα Α.15

A.3.4 Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$ και $J = [1,4,1]$ 

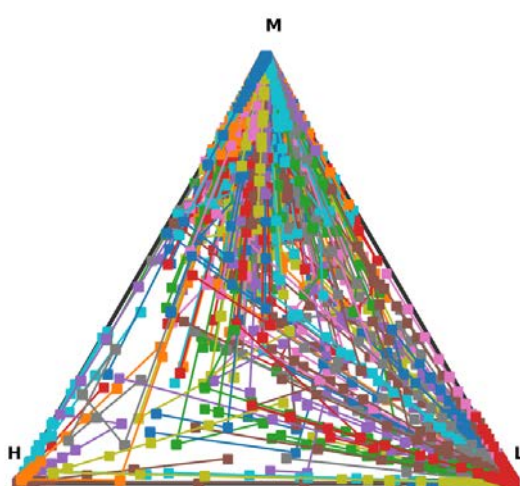
Σχήμα A.16



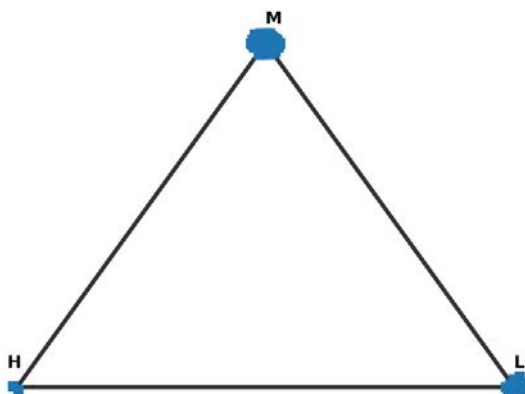
Σχήμα A.17



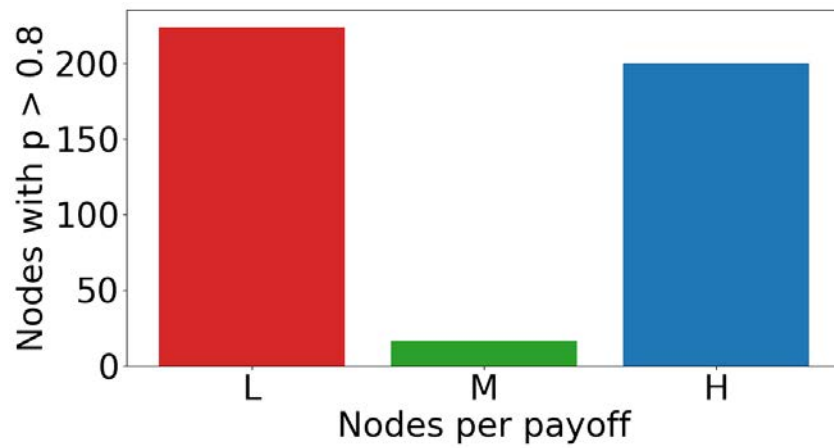
Σχήμα A.18



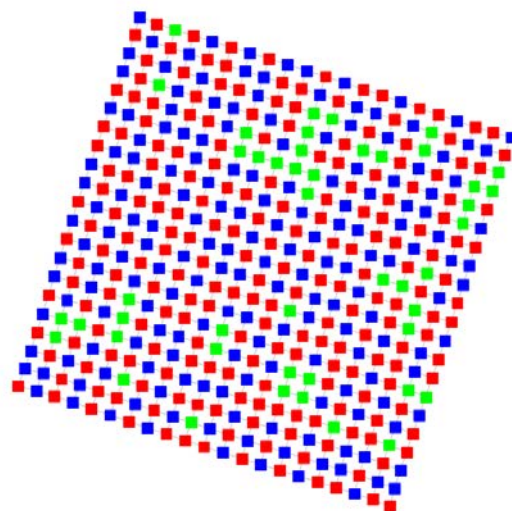
Σχήμα A.19



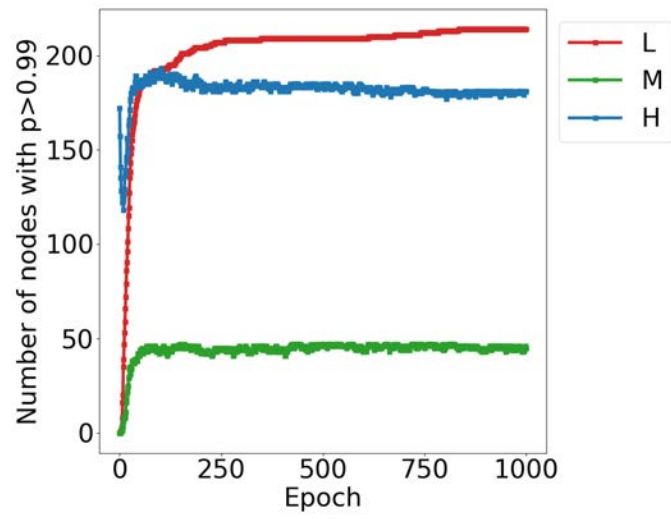
Σχήμα A.20

A.3.5 Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$ και $J = [1,1,4]$ 

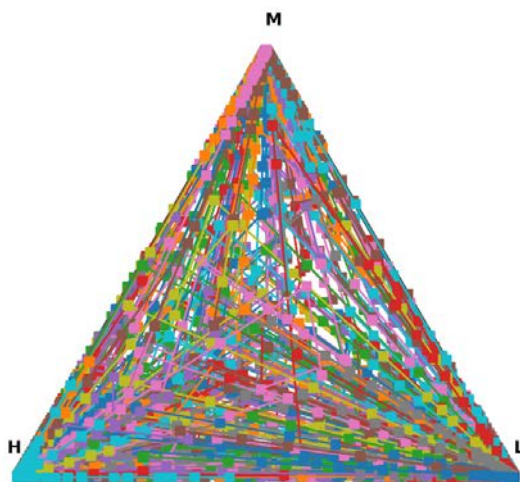
Σχήμα A.21



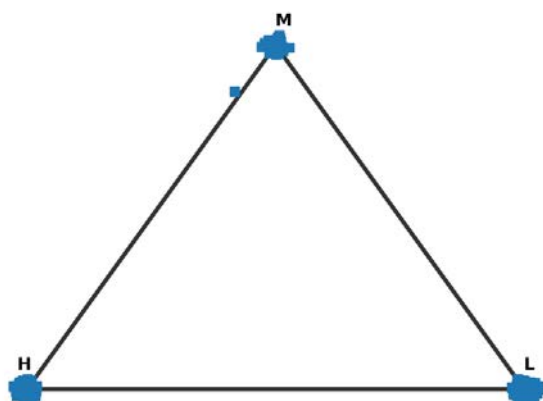
Σχήμα A.22



Σχήμα A.23



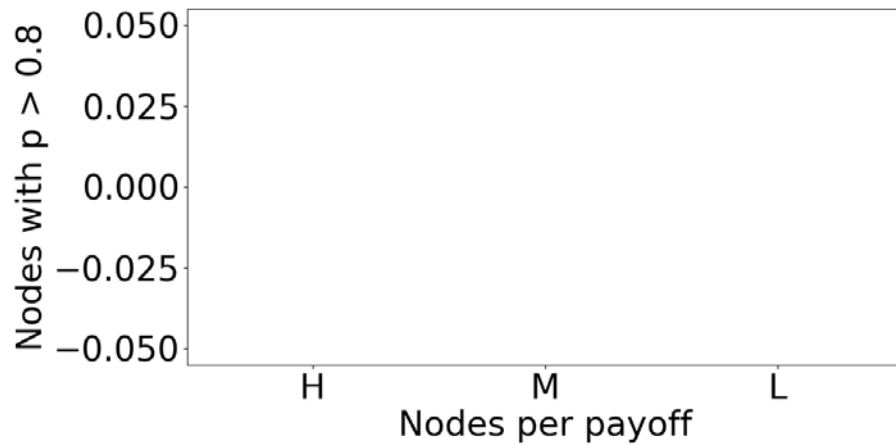
Σχήμα A.24



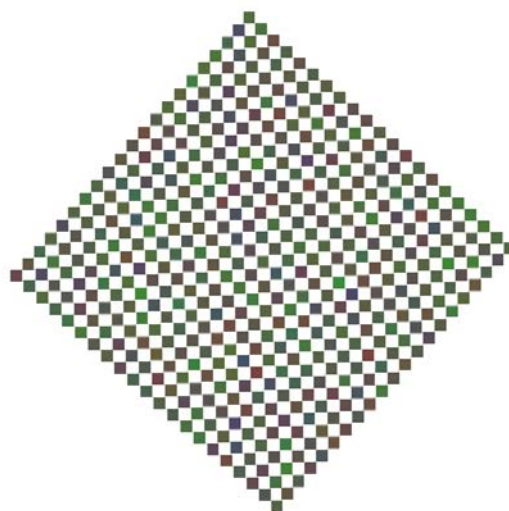
Σχήμα Α.25

B.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μετά την εισαγωγή του συντελεστή ασυμμετρίας

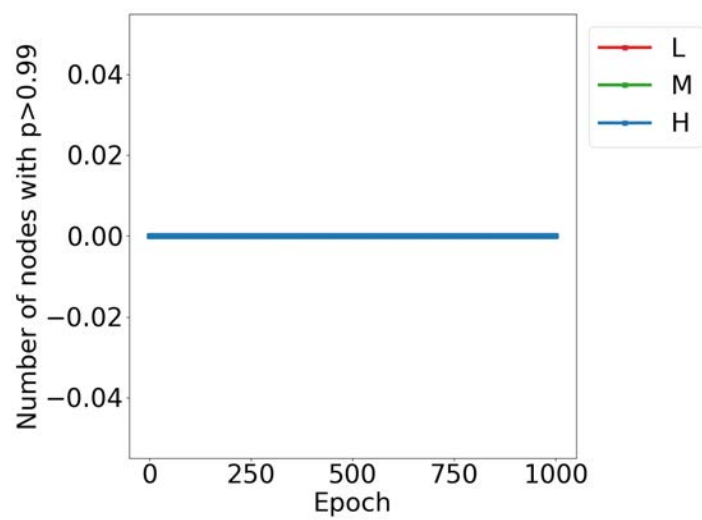
B.4.1 Αποτελέσματα για $\beta=0.3$, $\lambda=0.2$ ή $\lambda=0.4$, για κάθε $J=(J0L, J0M, J0H)$ και A



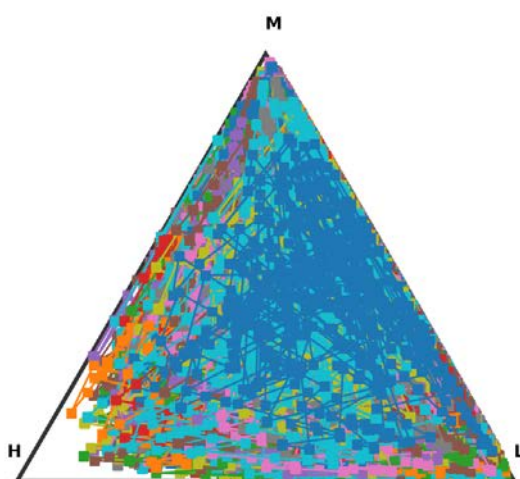
Σχήμα B.26



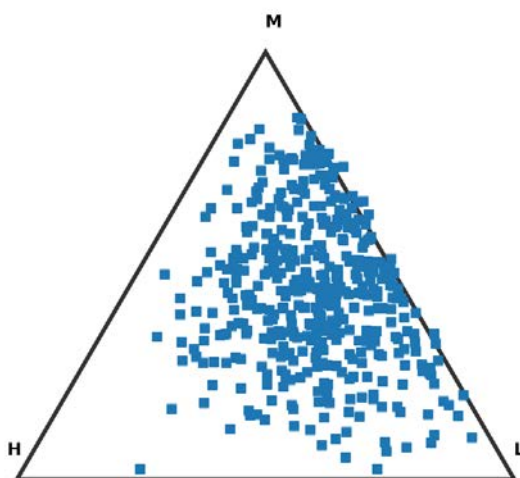
Σχήμα B.27



Σχήμα Β.28

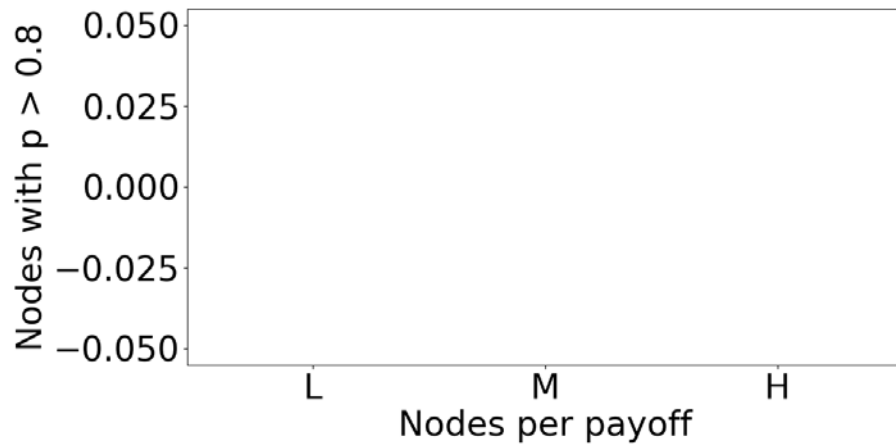


Σχήμα Β.29

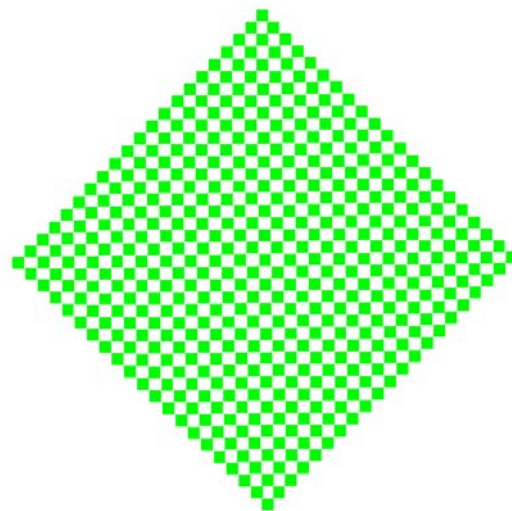


Σχήμα B.30

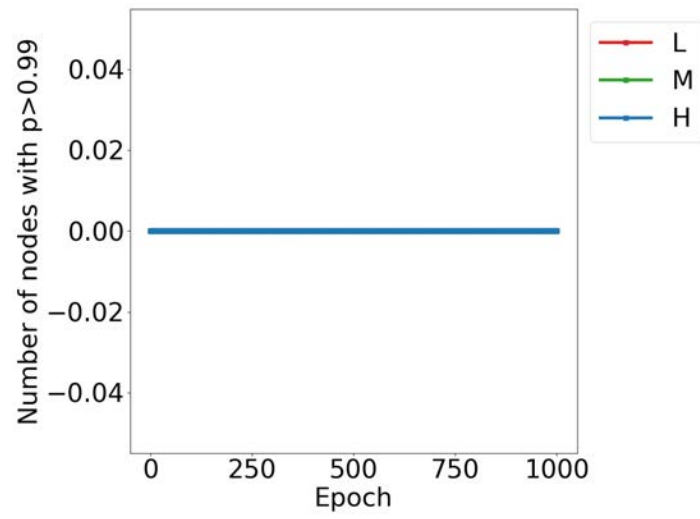
B.4.2 Αποτελέσματα για $\beta=1$, $\lambda=0.2$ ή $\lambda=0.4$, για κάθε $J=(J0L, J0M, J0H)$ και A



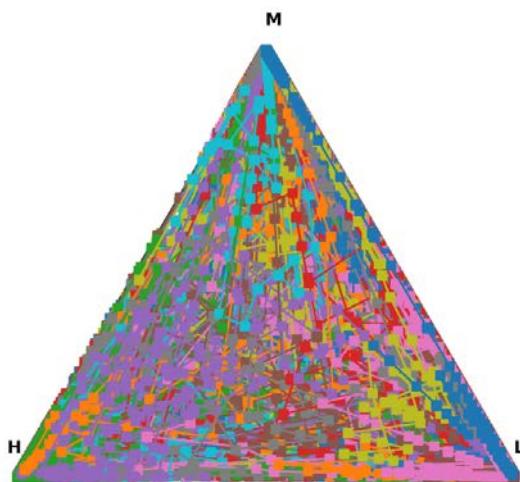
Σχήμα B.31



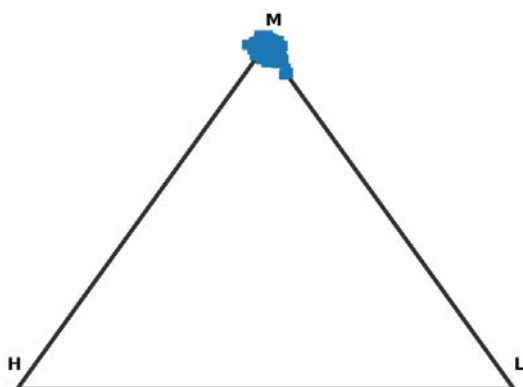
Σχήμα B.32



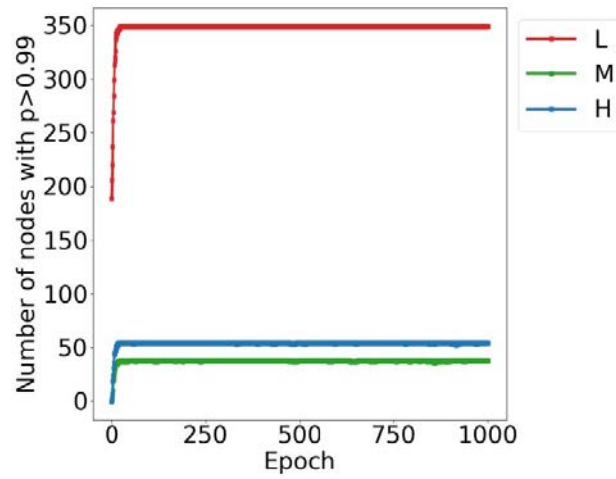
Σχήμα B.33



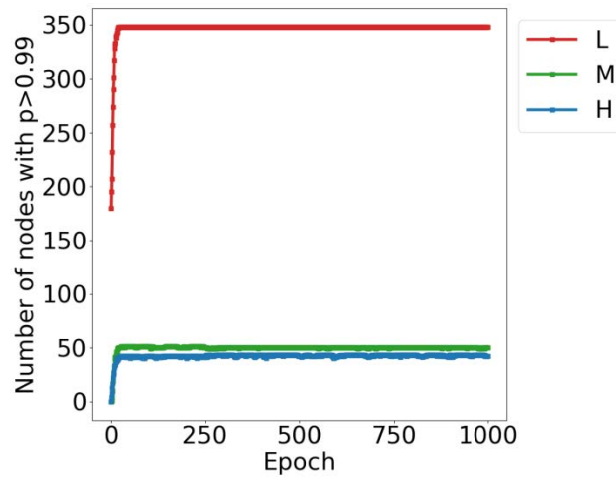
Σχήμα B.34



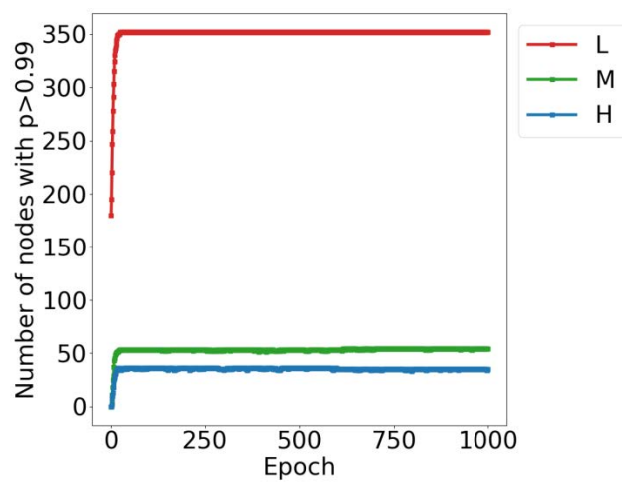
Σχήμα Β.35

B.4.3 Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$, $J=[4,1,1]$, και για κάθε A 

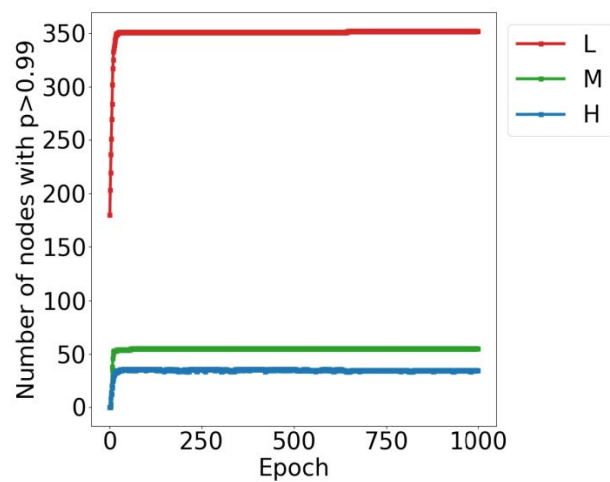
Σχήμα B.36



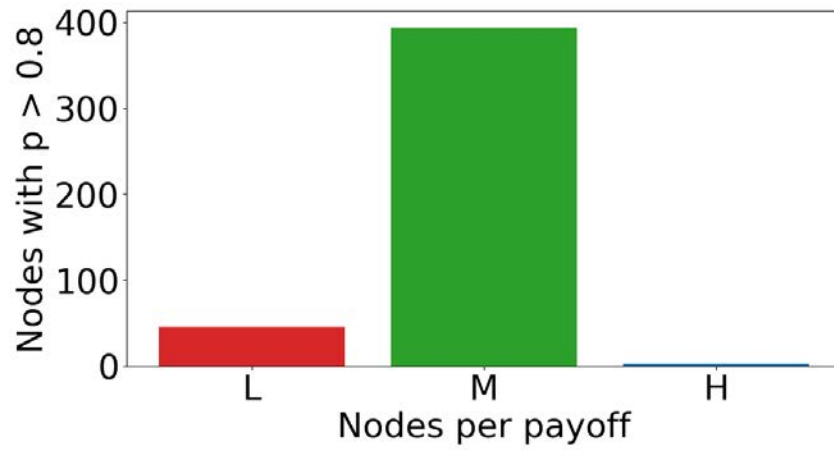
Σχήμα B.37



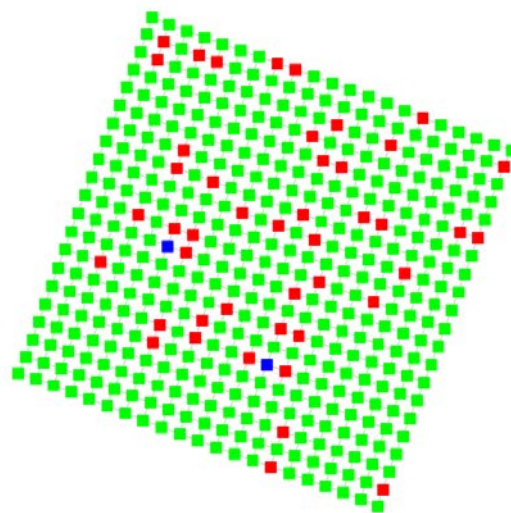
Σχήμα B.38



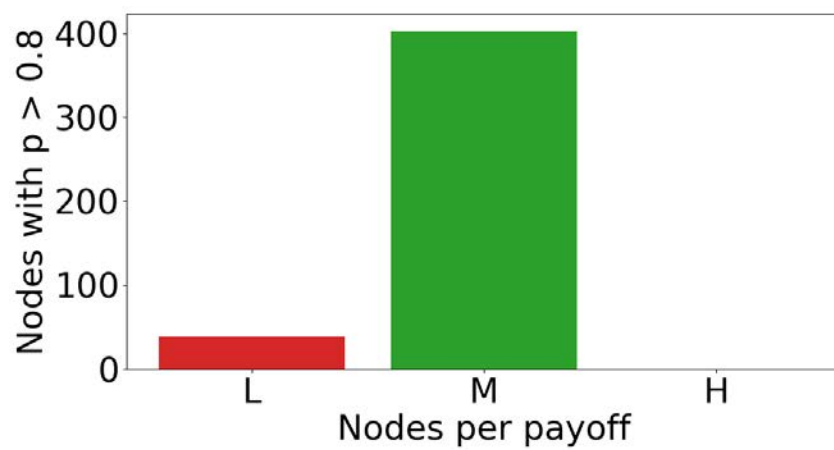
Σχήμα B.39

B.4.4 Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$, $J=[1,4,1]$ και για $A=1$ και $A=10$ 

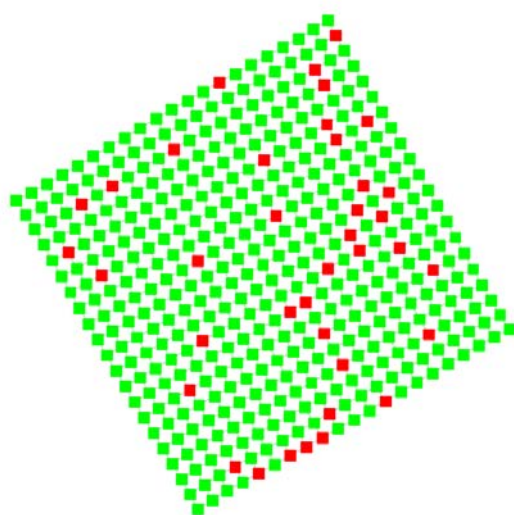
Σχήμα B.40



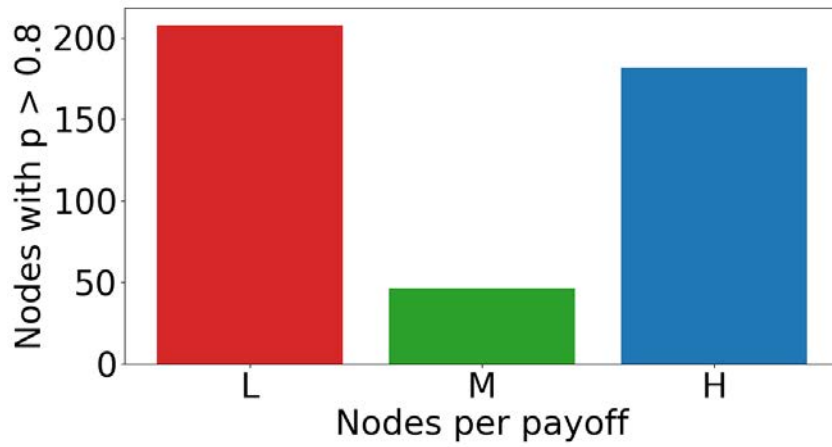
Σχήμα B.41



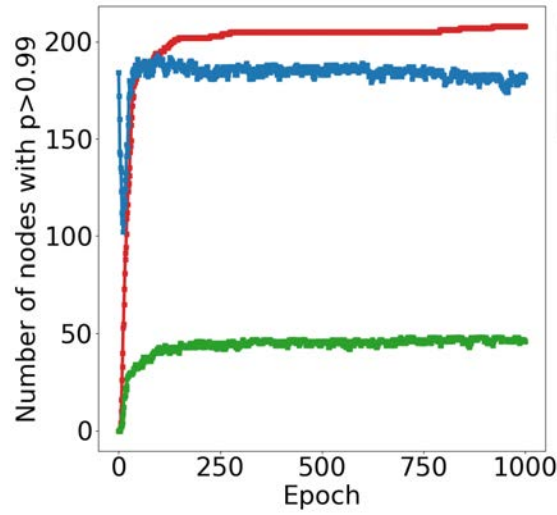
Σχήμα Β.42



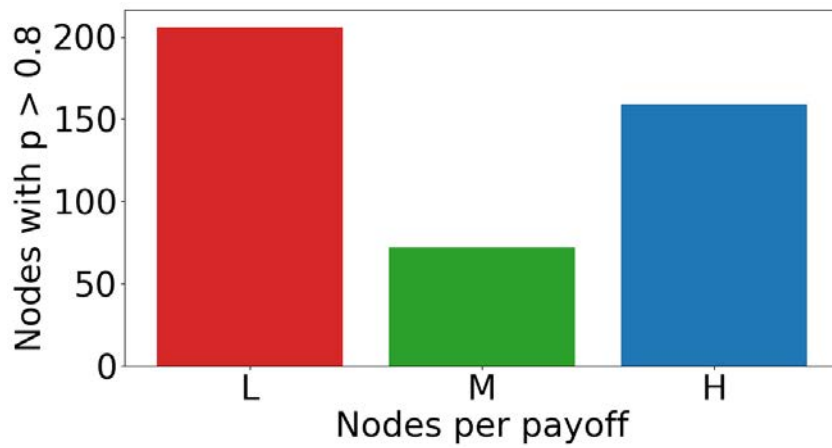
Σχήμα Β.43

B.4.5 Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.2$, $J=[1,1,4]$ και για $A=5$ και $A=100$ 

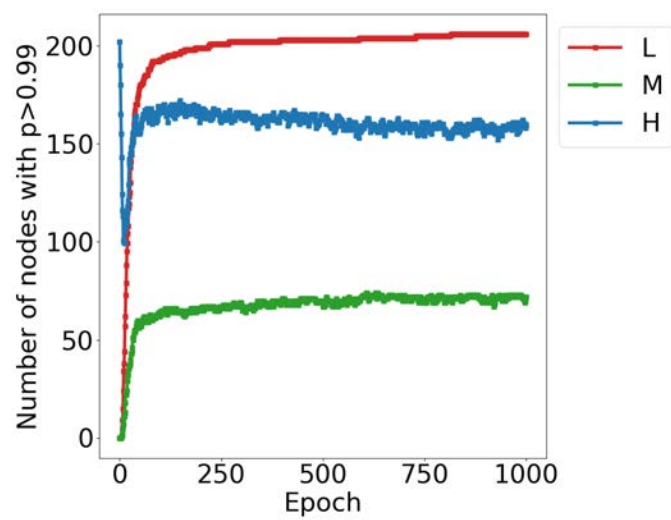
Σχήμα B.44



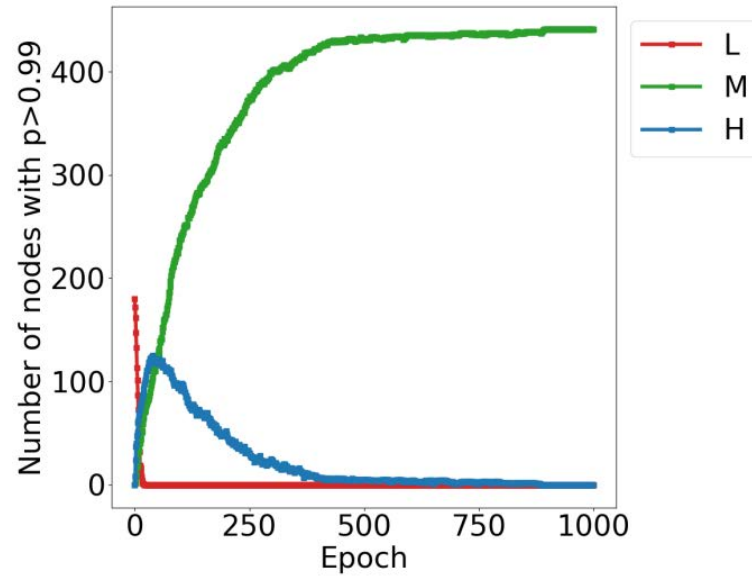
Σχήμα B.45



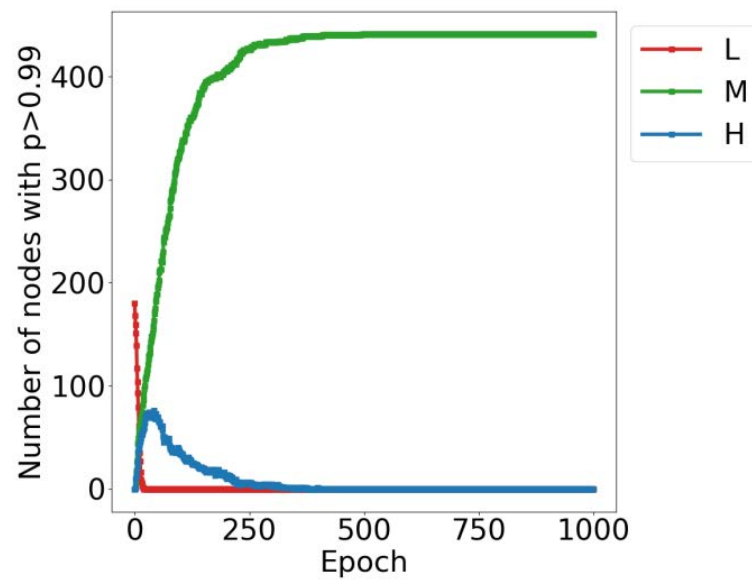
Σχήμα B.46



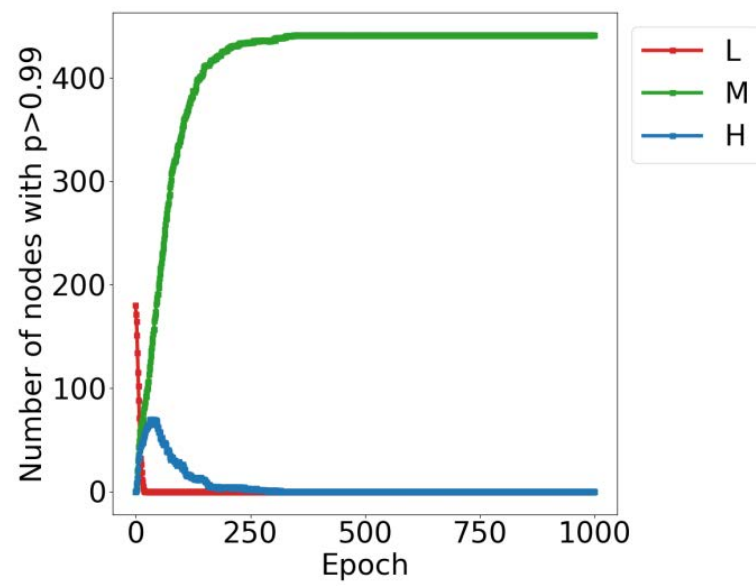
Σχήμα Β.47

B.4.6 Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.4$, $J=[4,1,1]$, και για κάθε A 

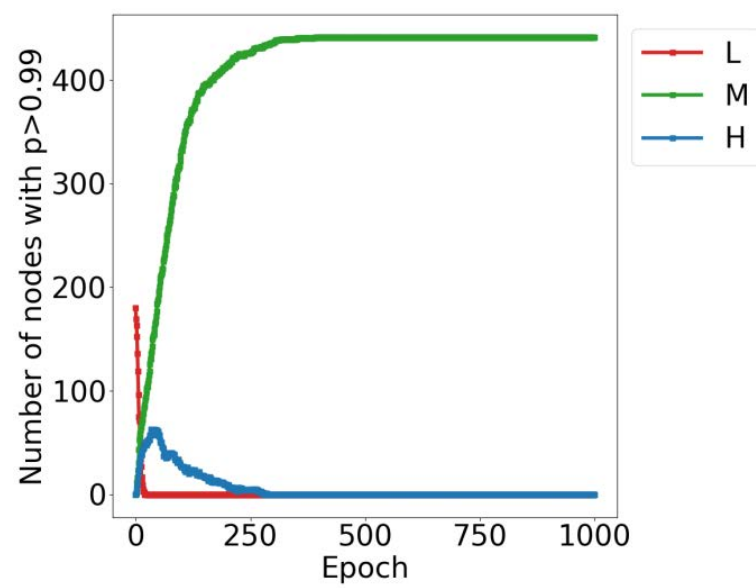
Σχήμα B.48



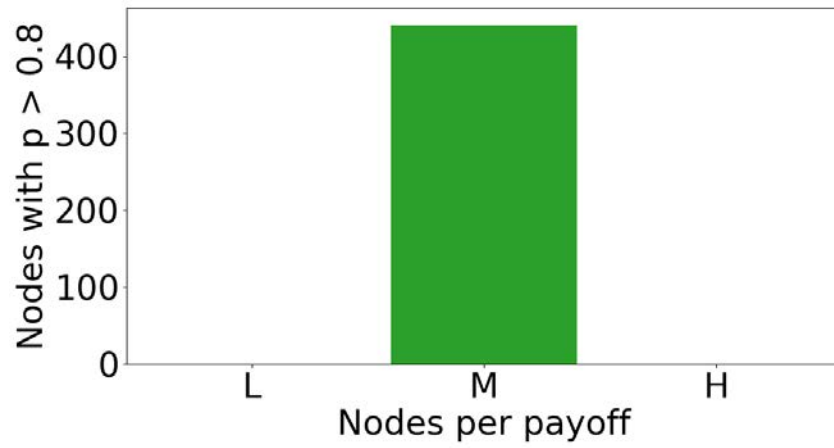
Σχήμα B.49



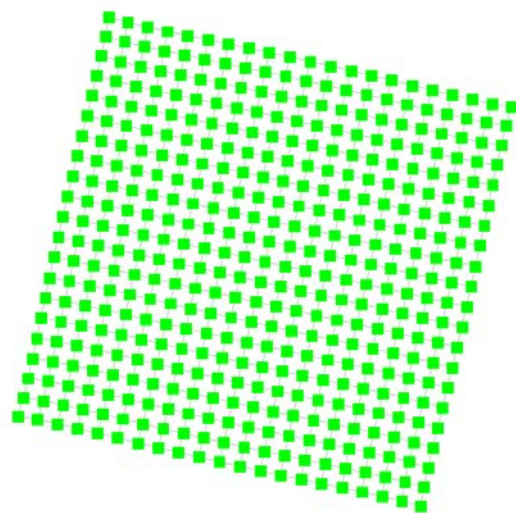
Σχήμα B.50



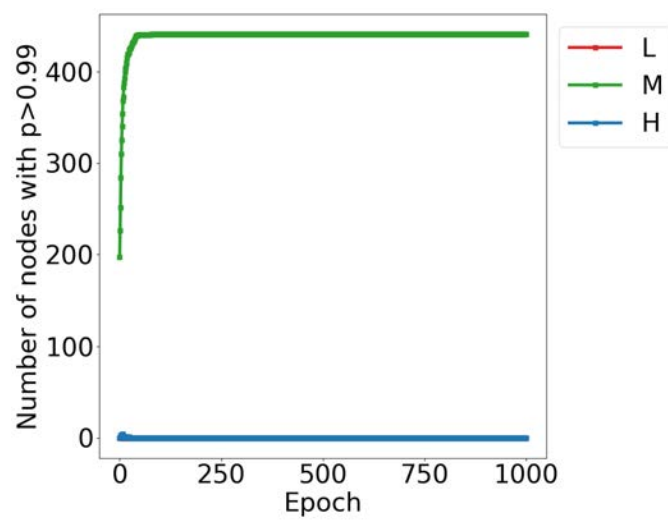
Σχήμα B.51

B.4.7 Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.4$, $J=[1,4,1]$, και για κάθε A 

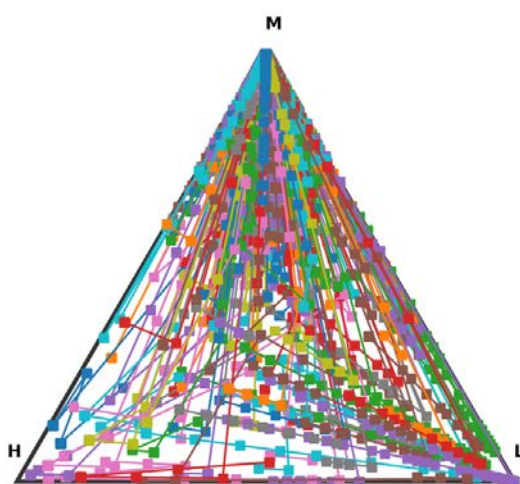
Σχήμα B.52



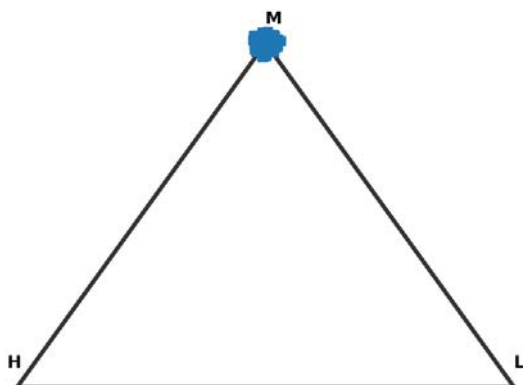
Σχήμα B.53



Σχήμα B.54

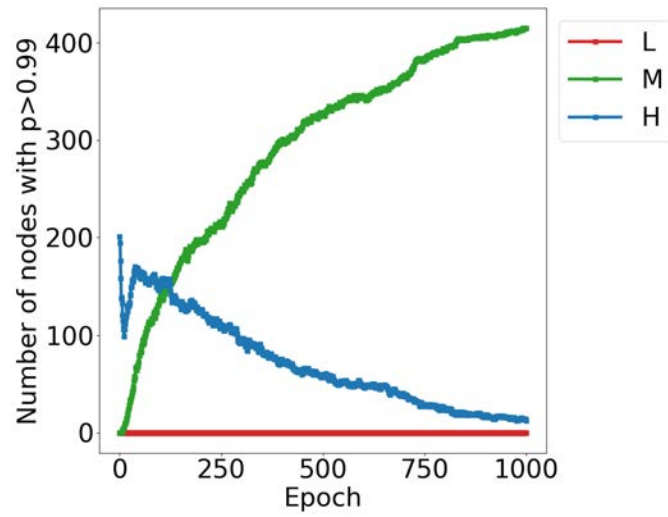


Σχήμα B.55

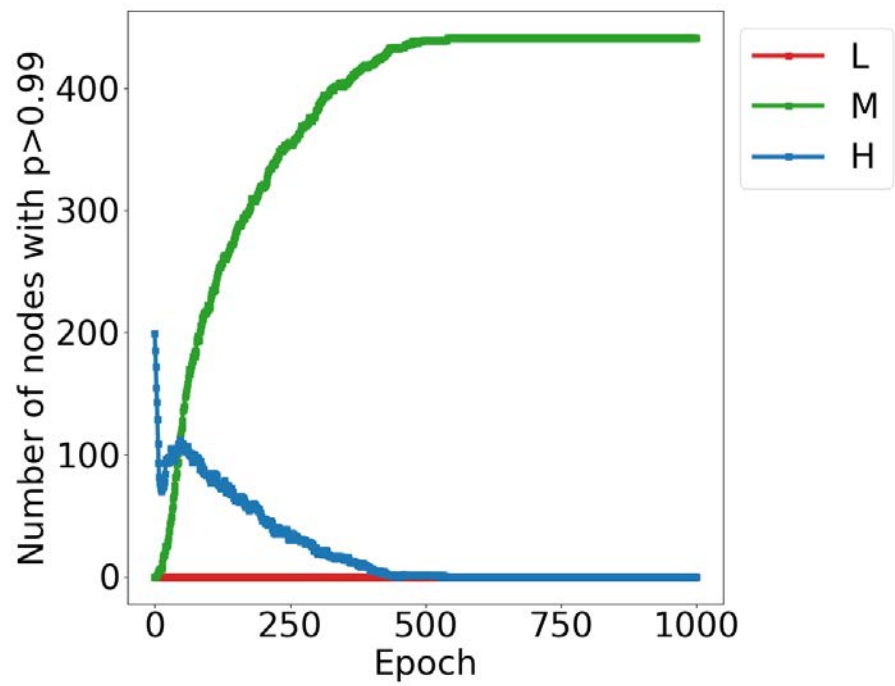


Σχήμα B.56

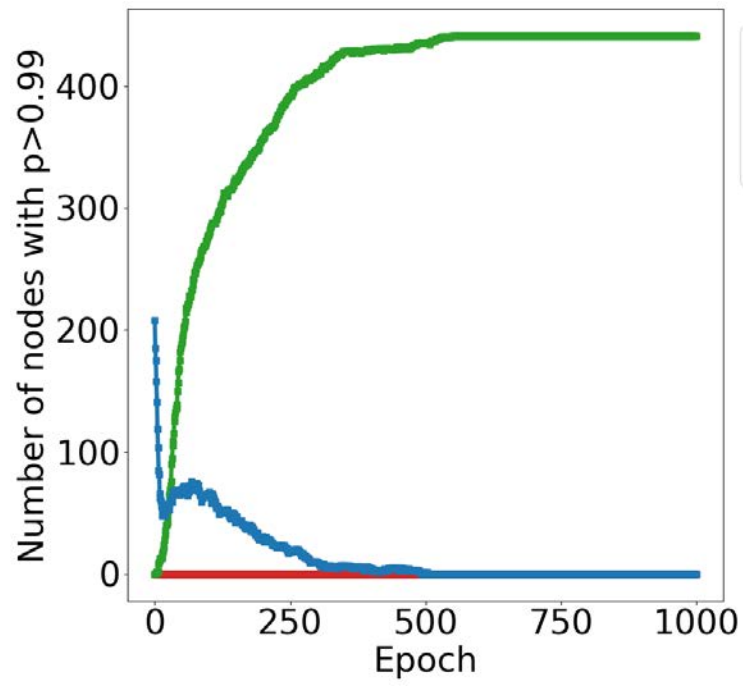
B.4.8 Αποτελέσματα για $\beta=3$, $\lambda=0.4$, $J=[1,1,4]$, και για κάθε A



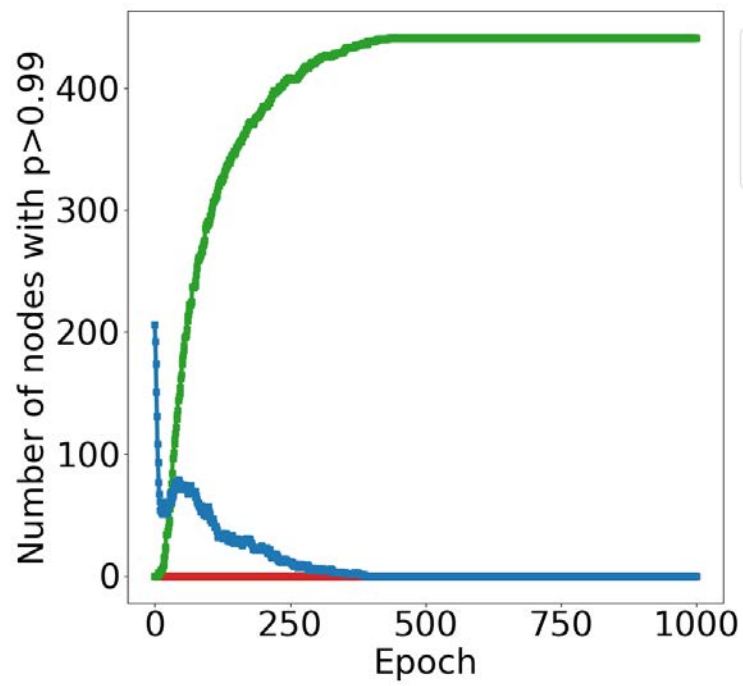
Σχήμα B.57



Σχήμα B.58



Σχήμα B.59



Σχήμα B.60