

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας επικοινώνιων, ηλεκτρονικής και σύστηματών πληροφορικής

Μελέτη Επίδρασης Μεταβολής Δικτύου σε Μετρικές Ανάλυσης Σύνθετων και Κοινωνικών Δικτύων Επικοινωνιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Π. Δρούτσας

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μελέτη Επίδρασης Μεταβολής Δικτύου σε Μετρικές Ανάλυσης Σύνθετων και Κοινωνικών Δικτύων Επικοινωνιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Π. Δρούτσας

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Οκτωβρίου 2016.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Συμεών Παπαβασιλείου Καθηγητής Ε.Μ.Π. Θεοδώρα Βαρβαρίγου Καθηγητήτρια Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

..... Ιωάννα Ρουσσάκη Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

(Υπογραφή)

•••••

Χρήστος Π. Δρούτσας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright ©Droutsas Christos, 2016 - All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή μέρους αυτής, για εμπορικό ή κερδοσκοπικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για εμπορικό- κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται αποκλειστικά στους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή την εργασία εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου συμπεριλαμβανόμενων Σχολών, Τομέων και Μονάδων αυτού.

Περίληψη

Τα σύνθετα και κοινωνικά δίκτυα έχουν διεισδύσει σημαντικά στις σύγχρονες κοινωνίες, βοηθώντας στη διάδοση πληροφορίας, γνώσης, την ανάπτυξη της οικονομίας, την πολιτική και μια πληθώρα άλλων δραστηριοτήτων. Παράλληλα αναπτύχθηκε σημαντικά η τεχνολογική και κοινωνιολογική μελέτη τους, ώστε να καταστεί δυνατή η π ιο αποδοτική σχεδίαση και λειτουργία τους. Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η περαιτέρω μελέτη αυτών των δικτύων με ενιαίο τρόπο, ο οποίος θα επιτρέψει την πιο αποδοτική σχεδίαση και το βέλτιστο έλεγχό τους. Ειδικότερα, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής δικτύου σε διάφορες μετρικές, π.γ., ο συντελεστής συσσώρευσης, η κεντρικότητα, κ.λπ. οι οποίες χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως στην ανάλυση και σχεδίαση μηχανισμών ελέγχου σύνθετων και κοινωνικών δικτύων. Η μεταβολή δικτύου με τη μορφή μεταβολής κόμβων και ζεύξεων, είναι μια εγγενής διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα τόσο για φυσικά σχηματιζόμενα, όσο και για τεχνολογικά δίκτυα. Η επίδρασή της είχε αμεληθεί μέχρι τώρα, με το σχετικό ενδιαφέρον να αυξάνεται τα τελευταία χρόνια, υπό το πρίσμα της ανάγκης πιο ρεαλιστής ανάλυσης και σχεδίασης σύνθετων και κοινωνικών δικτύων. Η παρούσα διπλωματική θα κινηθεί σε αυτή την κατεύθυνση μελετώντας την επίδραση της εξέλιξης διαφόρων τύπων δικτύων σε μετρικές που έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς, προσβλέποντας σε συμπεράσματα τα οποία θα βοηθήσουν σημαντικά τις αντίστοιγες μελλοντικές ερευνητικές και τεχνολογικές μελέτες.

Λέξεις Κλειδιά: Κοινωνικά Δίκτυα, Μεταβολή Δικτύου, Μετρικές Ανάλυσης Κοινωνικών Δικτύων.

Abstract

Complex and social networks have permeated modern societies to a high degree, playing a significant role in the information and knowledge exchange, society development and many other activities. At the same time, many technological and social studies have been taking place in order to improve the design and the operations of social and complex networks. The purpose of this thesis is a further study of these networks in a way that their control and design can be optimized. More specifically, this thesis studies the effect of network churn (in the form of node and edge churn) on different topological metrics, such as clustering coefficient, centrality, node degree and average path length, which are used widely in social network analysis and design. Network churn describing the addition and deletion of nodes, edges or both of them is an inherent procedure that takes place in both physical and technological networks. The effect of network churn has not been considered until now, because the interest for more realistic analysis and better design of social and complex networks is growing only lately. This thesis will study the effect of network churn on metrics that are widely used for different types of complex networks, e.g., random, scalefree and small world, and provide results that will be very helpful for the research community in the corresponding field, and the associated research in industrial fields.

Keywords: Social and Complex Networks, Network Churn, Social Network Metrics

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Συμεών Παπαβασιλείου για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία στο τομέα της ανάλυσης των κοινωνικών δικτύων και για όλη τη βοήθεια που μου παρείχε συνολικά.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον διδάκτορα κ. Βασίλειο Καρυώτη για την πολύτιμη βοήθεια του, την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας καθώς και για τη συνεχή του παρουσία και υπομονή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένειά μου, που μου συμπαραστάθηκαν και βρίσκονταν δίπλα μου όποτε το χρειαζόμουν.

Πίνακας Περιεχομένων

1		E	ζισαγωγή	1
	1.1	По	λύπλοκα και Δυναμικά Δίκτυα	1
	1.2	Av	τικείμενο Διπλωματικής	2
	1.3	Ορ	γάνωση Κειμένου	3
2		N	Ιετρικές Ανάλυσης Κοινωνικών Δικτύων	5
	2.1	Μέ	σο Μήκος Μονοπατιού	5
	2.2	Συν	ντελεστής Ομαδοποίησης	.6
	2.3	Βα	θμός Κόμβου	8
	2.4	Kε	ντρικότητα	9
	2.4.	1	Κεντρικότητα Βαθμού (Degree Centrality)	9
	2.4.	2	Κεντρικότητα Εγγύτητας (Closeness Centrality)1	0
	2.4.	3	Ενδιαμεσική Κεντρικότητα (Betweenness Centrality)Ι	1
3		T	Γοπολογίες Δικτύων1	.4
	3.1	Rar	ndom Graphs1	4
	3.2	Δίκ	τυα Χωρίς-κλίμακα (Scale- free Graphs)1	8
	3.3	Δίκ	τυα Μικρού-κόσμου (Small -world Graphs)2	0
4		N	Δεταβολή Συνδέσεων (Edge Churn)2	3
	4.1	Ave	άλυση Μοντέλου Μεταβολής Συνδέσεων2	3
	4.2	Aλ	γόριθμος2	4
	4.3	Απ	οτελέσματα2	6
	4.3.	1	Edge churn σε τυχαίο γράφο2	6
	4.3.	2	Edge churn σε scale-free γράφο3	7
	4.3.	3	Edge churn σε small-world γράφος4	8
5		N	Λεταβολή Κόμβων (Node Churn)6	60
	5.1	Ave	άλυση Μοντέλου Μεταβολής Κόμβων6	0

	5.2	Αλγ	γόριθμος	61
	5.3	Απο	οτελέσματα	62
	5.3.	1	Node churn σε τυχαίο γράφο	62
	5.3.	2	Node churn σε scale-free γράφος	73
	5.3	3	Node churn σε small-world γράφο	84
6		Ν	Ιεταβολή Δικτύου (Network Churn)	96
	6.1	Ανό	άλυση Μοντέλου Μεταβολής	96
	6.2	Αλγ	γόριθμος	97
	6.3	Απο	οτελέσματα	99
	6.3.	1	Network churn σε τυχαίο γράφημα	99
	6.3.	2	Network churn σε scale free γράφημα	.110
	6.3	3	Network churn σε small world γράφημα	.121
7		E	πίλογος	. 133
	7.1	Σύν	νοψη και συμπεράσματα	.133
	7.2	Μελ	λλοντικές επεκτάσεις	.135
8		В	α βλιογραφία	136

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1 Υπολογισμός συντελεστή ομαδοποίησης (κεντρικού κόμβου) σε δύο διαφορετικές
τοπολογίες
Εικόνα 2 Παράδειγμα γράφου στον οποίο η κεντρικότητα των κόμβων κυμαίνεται από
υψηλές τιμές (κόκκινο χρώμα) σε χαμηλές (μπλε χρώμα) για τα διάφορα είδη κεντρικότητας.
Εικόνα 3 Ορισμένα γραφήματα Gn, pi με 10 κόμβους όπου $p1\!<\!p2\!<\!p4<\!p3$ 16
Εικόνα 4 Ένας τυχαίος (γεωμετρικός) γράφος16
Εικόνα 5 <i>Poisson κατανομή</i>
Εικόνα 6 <i>Power-law κατανομή</i> 19
Εικόνα 7 Παράδειγμα ενός scale-free γράφου20
Εικόνα 8 Παράδειγμα κυκλικού πλέγματος (ring lattice)21
Εικόνα 9 Γράφος με βάση το μοντέλο των Watts και Strogatz όπου η πιθανότητα
ανακατασκευής β αυξάνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά
Εικόνα 10 Γράφος Watts-Strogatz με N=500, K=25 και β=0.1522
Εικόνα 11 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 100 και ακμές 250
Εικόνα 12 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 100 και ακμές 100027
Εικόνα 13 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 100 και ακμές 200027
Εικόνα 14 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 250 και ακμές 1100
Εικόνα 15 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 250 και ακμές 1500
Εικόνα 16 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 250 και ακμές 3000
Εικόνα 17 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 500 και ακμές 2200
Εικόνα 18 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 500 και ακμές 350031
Εικόνα 19 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 500 και ακμές 5000

Εικόνα 20 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 750 και ακμές 3500
Εικόνα 21 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 750 και ακμές 550033
Εικόνα 22 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 750 και ακμές 7500
Εικόνα 23 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 750 και ακμές 1000035
Εικόνα 24 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω edge churn
Εικόνα 25 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω edge churn
Εικόνα 26 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn
Εικόνα 27 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και
βαθμό αρχικού πλέγματος $d=2$ λόγω edge churn40
Εικόνα 28 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω edge churn40
Εικόνα 29 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn40
Εικόνα 30 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω edge churn42
Εικόνα 31 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και
βαθμό αρχικού πλέγματος $d=4$ λόγω edge churn42
Εικόνα 32 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn42
Εικόνα 33 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω edge churn44
Εικόνα 34 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω edge churn44
Εικόνα 35 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn44
Εικόνα 36 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000
και βαθμό αρχικού πλέγματος $d=2$ λόγω edge churn
Εικόνα 37 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000
και βαθμό αρχικού πλέγματος $d=4$ λόγω edge churn46

Εικόνα 38 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn......46 Εικόνα 39 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.......49 Εικόνα 40 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......49 Εικόνα 41 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......49 Εικόνα 42 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......51 Εικόνα 43 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......51 Εικόνα 44 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......51 Εικόνα 45 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......53 Εικόνα 46 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......53 Εικόνα 47 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......53 Εικόνα 48 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......55 Εικόνα 49 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......55 Εικόνα 50 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......55 Εικόνα 51 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn......57 Εικόνα 52 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.....57 Εικόνα 53 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.....57 Εικόνα 54 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 350......63 Εικόνα 55 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 1000......63

Εικόνα 56 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 100 και ακμές 200063
Εικόνα 57 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 250 και ακμές 110065
Εικόνα 58 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 250 και ακμές 150065
Εικόνα 59 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 250 και ακμές 300065
Εικόνα 60 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 500 και ακμές 220067
Εικόνα 61 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 500 και ακμές 350067
Εικόνα 62 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 500 και ακμές 500067
Εικόνα 63 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 750 και ακμές 350069
Εικόνα 64 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 750 και ακμές 550069
Εικόνα 65 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 750 και ακμές 750069
Εικόνα 66 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 1000 και ακμές 550071
Εικόνα 67 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 1000 και ακμές 700071
Εικόνα 68 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος
κόμβων 1000 και ακμές 1000071
Εικόνα 69 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn
Εικόνα 70 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn
Εικόνα 71 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn74
Εικόνα 72 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn
Εικόνα 73 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn76

Εικόνα 74 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn76
Εικόνα 75 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn
Εικόνα 76 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn
Εικόνα 77 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn78
Εικόνα 78 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn80
Εικόνα 79 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn80
Εικόνα 80 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και
βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn80
Εικόνα 81 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn82
Εικόνα 82 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn82
Εικόνα 83 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn82
Εικόνα 84 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100,
βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn85
Εικόνα 85 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100,
βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn85
Εικόνα 86 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100,
βαθμό αρχικού πλέγματος $d=24$ και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn85
Εικόνα 87 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250,
βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγ ω node churn87
Εικόνα 88 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250,
βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn87
Εικόνα 89 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250,
βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn87
Εικόνα 90 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500,
βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn89
Εικόνα 91 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500,
βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn89

Εικόνα 92 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn......89 Εικόνα 93 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn......91 Εικόνα 94 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn......91 Εικόνα 95 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn......91 Εικόνα 96 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn......93 Εικόνα 97 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn......93 Εικόνα 98 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn......93 Εικόνα 99 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με Εικόνα 100 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με Εικόνα 101 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 3000......100 Εικόνα 102 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1550.....102 Εικόνα 103 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 2500.....102 Εικόνα 104 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με Εικόνα 105 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 1550.....104 Εικόνα 106 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2500.....104 Εικόνα 107 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 5000.....104 Εικόνα 108 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500......106 Εικόνα 109 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 5500.....106

Εικόνα 110 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με
πλήθος κόμβων 750 και ακμές 7500106
Εικόνα 111 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με
πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500108
Εικόνα 112 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με
πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 7500108
Εικόνα 113 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με
πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 10000108
Εικόνα 114 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω network churn111
Εικόνα 115 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω network churn111
Εικόνα 116 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω network churn111
Εικόνα 117 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω network churn
Εικόνα 118 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω network churn
Εικόνα 119 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω network churn
Εικόνα 120 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγ $ω$ network churn
Εικόνα 121 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγ $ω$ network churn
Εικόνα 122 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγ $ω$ network churn
Εικόνα 123 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγ ω network churn
Εικόνα 124 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγ ω network churn
Εικόνα 125 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγ ω network churn117
Εικόνα 126 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω network churn
Εικόνα 127 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000
και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω network churn119

Εικόνα 128 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω network churn......119 Εικόνα 129 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn. 122 Εικόνα 130 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn. Εικόνα 131 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn. Εικόνα 132 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.124 Εικόνα 133 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn. Εικόνα 134 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn. Εικόνα 135 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.126 Εικόνα 136 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn. Εικόνα 137 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn. Εικόνα 138 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.128 Εικόνα 139 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn. Εικόνα 140 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn. Εικόνα 141 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network xvii

Εικόνα 142 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος	κόμβων
1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω	network
churn	130
Εικόνα 143 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος	κόμβων
1000, βαθμό αρχικού πλέγματος $d=24$ και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω	network
churn	130

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 250, 1000, 200026
Πίνακας 2 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1100, 1500, 300028
Πίνακας 3 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2200, 3500, 500030
Πίνακας 4 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500, 5500, 750032
Πίνακας 5 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500, 7000, 1000034
Πίνακας 6 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος $d=2$,4, 6.
Πίνακας 7 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.
Πίνακας 8 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.
Πίνακας 9 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.
Πίνακας 10 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβαν 1000 και βαθμό αργικού πλέγματος d=2, 4,
6
Πίνακας 11 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8,16,24
και πιθανότητα ανακατασκευής $β=0.2$
Πίνακας 12 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8,16,24
και πιθανότητα ανακατασκευής $β=0.2$
Πίνακας 13 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24
και πιθανότητα ανακατασκευής $β=0.2$
Πίνακας 14 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος 8,16,24 και
πιθανότητα ανακατασκευής $β=0.2$
Πίνακας 15 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24
και πιθανότητα ανακατασκευής $β=0.2$
Πίνακας 16 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 350, 1000, 200062
Πίνακας 17 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1100, 1500, 300064
Πίνακας 18 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2200, 3500, 500066
Πίνακας 19 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500, 5500, 750068
Πίνακας 20 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500, 7000, 10000
Πίνακας 21 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.

Πίνακας 22 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.
Πίνακας 23 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.
Πίνακας 24 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.
6
Πίνακας 26 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος 8,16,24 και
πιθανότητα ανακατασκευής β=0.284
Πίνακας 27 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24
και πιθανότητα ανακατασκευής β =0.286
Πίνακας 28 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16,
24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2
Πίνακας 29 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16,
24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.290
Πίνακας 30 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24
και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.292
Πίνακας 31 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 350, 1000, 2000
Πίνακας 32 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1100, 1500, 3000101
Πίνακας 33 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2200, 3500, 5000103
Πίνακας 34 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500, 5500, 7500105
Πίνακας 35 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500, 7000, 10000107
Πίνακας 36 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος $d=2, 4, 6$.
Πινακας 37 Scale-free γράφος με πληθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος $d=2, 4, 6.$
Πίνακας 38 Scale-free νοάφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλένματος $d=2,4,6$
114
Πίνακας 39 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.
6
Πίνακας 41 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16,
24 και πιθανότητα ανακατασκευής β =0.2
Πίνακας 42 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16,
24 και πιθανότητα ανακατασκευής $B=0.2$

Πίνακας 43 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματ	ος 8, 16,
24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2	125
Πίνακας 44 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματ	ος 8, 16,
24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2	127
Πίνακας 45 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματ	ος 8, 16,
24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2	129

1

Εισαγωγή

1.1 Πολύπλοκα και Δυναμικά Δίκτυα

Ένα σύνθετο δίκτυο αποτελεί μια δομή διασύνδεσης ενός συνόλου οντοτήτων. Αυτό το σύνολο μπορεί να αποτελείται από άτομα ή αντικείμενα τα όποια συνδέονται μεταξύ τους με διάφορους τρόπους. Αυτά τα άτομα ή αντικείμενα καλούνται κόμβοι και οι μεταξύ τους συνδέσεις καλούνται ακμές. Παραδείγματα δικτύων είναι το Διαδίκτυο, ο Παγκόσμιος Ιστός (WWW), τα κοινωνικά δίκτυα στα οποία τα άτομα συνδέονται μεταξύ τους με διάφορες σχέσεις όπως αυτή της φιλίας ή της συγγένειας, οι επιχειρησιακές σχέσεις μεταξύ των εταιριών/στελεχών τους, τα νευρωνικά δίκτυα, τα μεταβολικά δίκτυα, το δίκτυο της τροφικής αλυσίδας, το δίκτυο των αιμοφόρων αγγείων και πάρα πολλά άλλα. Επειδή τα δίκτυα συναντώνται σε τόσους πολλούς τομείς και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη ζωή και τη καθημερινότητα μας, κινητοποιούν το ενδιαφέρον των επιστημόνων οι οποίοι πραγματοποιούν πολλές μελέτες για την κατανόηση της δομής τους. Οι ερευνητές μελετούν τα δίκτυα, μεταξύ άλλων, ως μια δυναμική διαδικασία. Με το πέρασμα του χρόνου τα άτομα ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν τις κοινωνικές τους διασυνδέσεις, τείνουν να αποκτήσουν όμοια χαρακτηριστικά με τους φίλους τους (τάση που είναι γνωστή ως ομοφιλία [1],[2]), επιλέγουν να γίνουν φίλοι με τους φίλους των φίλων τους (τάση γνωστή ως τριαδική κλειστότητα [3]), να δημιουργήσουν σύνδεση με ένα άτομο εκτός του κύκλου γνωριμιών τους (γνωστή ως γέφυρα [4]) ή ακόμα και να απαγορεύουν οποιαδήποτε μελλοντική σύνδεση μεταξύ δύο ατόμων που είναι άγνωστα μεταξύ τους. Έτσι οι συνδέσεις και ο κόμβοι στα δίκτυα μπορούν να μεταβάλλονται εύκολα, γεγονός που τους δίνει δυναμική υπόσταση στην πραγματικότητα.

1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εξετάζει την επιρροή που έχουν διάφορες μετρικές ανάλυσης από το φαινόμενο της μεταβολής του δικτύου (network churn). Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία μελετά τρία φαινόμενα μεταβολής δικτύου, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, σε διάφορες τοπολογίες δικτύων και υπολογίζει τις μετρικές ανάλυσης των τοπολογιών πριν και μετά την αλλαγή τους, καθώς και την ποσοστιαία μεταβολή τους.

Το πρώτο φαινόμενο μεταβολής είναι η μεταβολή συνδέσεων (edge churn) κατά το οποίο οι ακμές στα δίκτυα ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται με τυχαίο τρόπο σε μια δεδομένη χρονική περίοδο.

Το δεύτερο φαινόμενο μεταβολής είναι η μεταβολή κόμβων (node churn) κατά το οποίο κόμβοι αφαιρούνται και προσθέτονται σε τοπολογίες με τυχαίο τρόπο σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Το τρίτο φαινόμενο μεταβολής είναι η συνολική μεταβολή δικτύου (network churn) το όποιο αποτελεί ουσιαστικά τον ταυτόχρονο συνδυασμό των παραπάνω φαινομένων, δηλαδή κόμβοι και ακμές ενεργοποιούνται ή αφαιρούνται τυχαία.

Στόχος της διπλωματικής, λοιπόν, είναι η μελέτη της επίδρασης των παραπάνω φαινομένων σε διάφορους τύπος δικτύου και η περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς των δυναμικών δικτύων, των οποίων η δομή μεταβάλλεται με το πέρασμα του χρόνου.

1.3 Οργάνωση Κειμένου

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια, σε καθένα από τα οποία αναλύονται τα εξής:

Στο 1° κεφάλαιο παρουσιάζεται το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, τα στάδια υλοποίησής της και η δομή της.

Στο 2° κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρικές ανάλυσης, οι οποίες υπολογίζονται για κάθε γράφημα πριν και μετά από την διαδικασία μεταβολής που υφίσταται και περιγράφεται η σημασία τους για την κατανόηση της δομής τους δικτύου.

Στο 3° κεφάλαιο περιγράφονται οι τύποι των τοπολογιών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία

Στο 4° κεφάλαιο παρουσιάζεται το φαινόμενο edge churn, διατυπώνεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση του και σημειώνονται τα αποτελέσματα των μετρικών ανάλυσης, για κάθε γράφημα που εξετάζεται, στην αρχή και στο πέρας της διαδικασίας μεταβολής.

Στο 5° κεφάλαιο παρουσιάζεται το φαινόμενο node churn και αναλύεται όμοια με το προηγούμενο κεφάλαιο.

Στο 6° κεφάλαιο παρουσιάζεται το φαινόμενο network churn και αναλύεται όμοια με τα προηγούμενα δύο κεφάλαια.

Στο 7° κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

2

Μετρικές Ανάλυσης Κοινωνικών Δικτύων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε και αναλύουμε τις βασικότερες μετρικές που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των κοινωνικών δικτύων με στόχο τη μελέτη και την αξιολόγηση τους. Με τη βοήθεια τους γίνεται ευκολότερη η κατανόηση των κοινωνικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των δικτύων και η μελέτη της δομής και της εξέλιξής τους με το πέρασμα του χρόνου, και γι' αυτό το λόγο τις χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία.

2.1 Μέσο Μήκος Μονοπατιού

Μια από τις βασικές μετρικές ανάλυσης κοινωνικών δικτύων για την εκτίμηση της επίδοσης τους είναι το μέσο μήκος μονοπατιού. Πρόκειται για το μέσο όρο των βέλτιστων κατά μήκος μονοπατιών μεταξύ όλων των πιθανών ζευγών των κόμβων.

Έστω ένα μη κατευθυνόμενο γράφημα G όπου $V = \{ u_1, u_2, ..., u_n \}$ είναι το σύνολο των κόμβων του. Θεωρούμε ως $d(u_i, u_j)$ την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των

κόμβων u_i και u_j μετρημένη σε αριθμό βημάτων (hops). Εάν δεν υπάρχει μονοπάτι μεταξύ των κόμβων αυτών τότε εξ' ορισμού $d(u_{i,}, u_j) = 0$. Το μέσο μήκος μονοπατιού του γραφήματος *G* ορίζεται ως [5]:

$$l = \frac{1}{n * (n-1)} \sum_{i \neq j} d(u_{i,j}, u_j)$$

Στην πράξη το μέσο μήκος μονοπατιού εκφράζει την προσδοκώμενη απόσταση μεταξύ δύο τυχαία επιλεγμένων κόμβων του γραφήματος. Σε ένα δίκτυο, όπως είναι το Διαδίκτυο, το μικρό σε μήκος μέσο μήκος μονοπατιού υποδηλώνει την γρήγορη μεταφορά πληροφορίας. Τα περισσότερα πραγματικά δίκτυα έχουν μικρό μέσο μήκος μονοπατιού και για αυτό κατατάσσονται στη κατηγορία δικτύων τύπου μικρού-κόσμου (small-world), που σημαίνει ότι ο κάθε κόμβος συνδέεται με έναν οποιοδήποτε άλλο κόμβο μέσω μικρού μονοπατιού κατά μέσο όρο.

2.2 Συντελεστής Ομαδοποίησης

Ο συντελεστής ομαδοποίησης (clustering coefficient) είναι μια άλλη σημαντική μετρική για τα πολύπλοκα κοινωνικά δίκτυα, η οποία δημιουργήθηκε για να υπολογίζει το βαθμό της τριαδικής κλειστότητας (triadic closure) του κοινωνικού δικτύου [6]. Η τριαδική κλειστότητα είναι η κατάσταση κατά την οποία δύο άτομα σε ένα κοινωνικό δίκτυο που έχουν ένα κοινό γείτονα είναι και γείτονες μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να σχηματίζουν ένα τρίγωνο ακμών στο δίκτυο. Ο συντελεστής ομαδοποίησης C_i ενός κόμβου i ορίζεται ως:

$$C_{i} = \frac{\pi \lambda \dot{\eta} \theta o \varsigma \tau \rho_{i} \gamma \dot{\omega} v \omega v \sigma v v \delta \epsilon \delta \epsilon \mu \dot{\epsilon} v \alpha \sigma \tau \sigma \kappa \dot{\omega} \mu \beta o i}{\pi \lambda \dot{\eta} \theta o \varsigma \tau \rho_{i} \dot{\alpha} \delta \omega v \mu \epsilon \kappa \dot{\epsilon} v \tau \rho \sigma \tau \sigma v \kappa \dot{\omega} \mu \beta o i} = \frac{\alpha \rho_{i} \theta \mu \dot{\omega} \varsigma \alpha \kappa \mu \dot{\omega} v \mu \epsilon \tau \alpha \xi \dot{\upsilon} \tau \omega v \gamma \epsilon_{i} \tau \dot{\omega} v \omega \dot{\kappa} \dot{\omega} \beta o v i}{\alpha \rho_{i} \theta \mu \dot{\omega} \varsigma \dot{\omega} v \tau \omega v \pi_{i} \theta \alpha v \dot{\omega} v \alpha \kappa \mu \dot{\omega} v \mu \epsilon \tau \alpha \xi \dot{\upsilon} \tau \omega v \gamma \epsilon_{i} \tau \dot{\omega} v \kappa \dot{\omega} \mu \beta o v i}$$

και εκφράζει την πιθανότητα δύο τυχαία επιλεγμένοι γείτονές του να είναι και γείτονες μεταξύ τους (βλ. Εικόνα 1). Γενικότερα, ο συντελεστής ομαδοποίησης ενός κόμβου κυμαίνεται από το 0 (όταν κανένας από τους γείτονες του δεν συνδέεται με κάποιον άλλο γείτονα) έως το 1 (όταν όλοι οι γείτονες του συνδέονται με όλους τους υπόλοιπους). Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ομαδοποίησης τόσο μεγαλύτερη είναι η τριαδική κλειστότητα. Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης όλου του κοινωνικού δικτύου με κόμβους Ν ορίζεται ως :

$$C_{net} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} C_i$$



Εικόνα 1 Υπολογισμός συντελεστή ομαδοποίησης (κεντρικού κόμβου) σε δύο διαφορετικές τοπολογίες.

2.3 Βαθμός Κόμβου

Βαθμό κόμβου ορίζουμε τον αριθμό των συνδέσεων ή ακμών που έχει ένας κόμβος με άλλους κόμβους. Εάν οι ακμές είναι κατευθυνόμενες σε ένα δίκτυο δηλαδή ξεκινούν ή καταλήγουν στον κόμβο αυτό τότε ο κόμβος έχει δύο βαθμούς, τον εσωτερικό (in-degree) που είναι ο αριθμός των ακμών που καταλήγουν στο κόμβο και τον εξωτερικό βαθμό (out-degree) που είναι ο αριθμός των ακμών που ξεκινούν από το κόμβο.

Σε τοπολογίες με μη-κατευθυνόμενες ακμές η κατανομή βαθμού κόμβων P(k) ορίζεται ως η πιθανότητα να έχει ένας κόμβος k γείτονες. Η κατανομή βαθμού κόμβων είναι βασικό χαρακτηριστικό της τοπολογίας των δικτύων και χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την κατηγοριοποίηση των δικτύων. Με βάση πρόσφατες έρευνες που έχουν γίνει υπάρχουν 3 βασικά είδη κατανομών κόμβων που χωρίζουν τα δίκτυα σε 3 είδη τοπολογιών [7] (περισσότερη ανάλυση για τα είδη των τοπολογιών γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο).

- Poisson τοπολογία P(k) = e^{-z} z^k/k!
 Εκθετική τοπολογία P(k) = C e^{-αk}
- Scale-free τοπολογία $P(k) = Ck^{-\gamma}$

Ωστόσο, σε πραγματικά δίκτυα είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η ακριβής κατανομή κόμβων, η οποία προσφέρει μια γενική εικόνα της μορφής του δικτύου και για αυτό το λόγο υπάρχουν και άλλες μετρικές πέρα από τη κατανομή βαθμού κόμβων για την αποδοτικότερη ανάλυση των δικτύων.

2.4 Κεντρικότητα

Σε διάφορους τύπους δικτύου είναι απαραίτητο να χαρακτηριστεί η βαρύτητα των κόμβωντης τοπολογίας ξεχωριστά, αλλά και σε σχέση με όλο το υπόλοιπο δίκτυο. Για αυτό το λόγο έχει προταθεί η μετρική της κεντρικότητας η οποία εστιάζει κυρίως στην εξέταση του ρόλου των κόμβων. Η κεντρικότητα (centrality) σε ολόκληρο το δίκτυο εκφράζει την αναμενόμενη βαρύτητα ενός κόμβου κατά μέσο όρο. Η σημασία που έχει ένας κόμβος, φυσικά είναι σχετική και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και για αυτό έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί για την κεντρικότητα του δικτύου. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι οι: κεντρικότητα βαθμού κόμβου (degree centrality), η ενδιαμεσική κεντρικότητα (betweenness centrality) και η κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) [8].

2.4.1 Κεντρικότητα Βαθμού (Degree Centrality)

Με την παρατήρηση ότι σε μια τοπολογία δικτύου που μοιάζει με αστέρα διαισθητικά ο πιο «κεντρικός» κόμβος είναι ο μεσαίος κόμβος, η πιο απλή παραδοχή είναι ότι η κεντρικότητα του δικτύου πρέπει να είναι συνάρτηση του βαθμού κόμβου. Σε αυτή τη περίπτωση όσο πιο δημοφιλής είναι ένας κόμβος , δηλαδή όσο μεγαλύτερο βαθμό έχει, τόσο περισσότερο ελέγχει τη ροή πληροφορίας μέσα στο δίκτυο. Εάν $A=[a_{ij}]$ είναι ο πίνακας γειτνίασης της τοπολογίας, όπου $a_{ij} = 1$ εάν υπάρχει ακμή (i, j) μεταξύ των κόμβων *i* και *j* και $a_{ij} = 0$ εάν δεν υπάρχει, ο πιο απλός ορισμός της κεντρικότητας του δικτύου με βάση τον βαθμό κόμβου είναι :

$$C_D(k) = \sum_{i=1}^n a_{ik}$$

Ωστόσο η συγκεκριμένη μετρική δεν έχει μεγάλη εφαρμογή στην πράξη επειδή ο βαθμός κόμβου δεν σχετίζεται άμεσα με την ισχύ στον έλεγχο πληροφορίας. Για παράδειγμα, ένας κόμβος με μεγάλο βαθμό μπορεί να μη βρίσκεται στο μονοπάτι από το οποίο διέρχεται η πληροφορία γιατί για λόγους ασφαλείας είναι προτιμότεροι οι λιγότερο δημοφιλείς κόμβοι.

2.4.2 Κεντρικότητα Εγγύτητας (Closeness Centrality)

Πρόκειται για μια μετρική κεντρικότητας που σχετίζεται άμεσα με τον έλεγχο της επικοινωνίας και εντοπίζει τους πιο κεντρικούς κόμβους σε ολόκληρο τον χώρο του δικτύου. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται μετρικές για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δύο κόμβων, από τις οποίες η πιο συχνή είναι ο ελάχιστος αριθμός κόμβων που μεσολαβούν μεταξύ τους. Έτσι, λοιπόν, η συγκεκριμένη μετρική αναθέτει μεγάλη κεντρικότητα στους κόμβους που έχουν υπολογιστεί ως πιο κεντρικοί με βάση τις μετρικές αποστάσεων.

Ο ορισμός της κεντρικότητας εγγύτητας βασίζεται στην ελάχιστη απόσταση κάθε κόμβου από όλους τους υπόλοιπους κόμβους. Αν θεωρήσουμε ως d(i, k) την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κόμβων k και i τότε η closeness centrality του κόμβου k (ή αλλιώς proximity centrality όπως ακόμα αναφέρεται στη βιβλιογραφία) είναι [9,10]:

$$C_p(k) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n d(i,k)}$$

Σύμφωνα με το παραπάνω ορισμό, ένας κόμβος που είναι σχετικά «κοντά» με τους περισσότερους κόμβους έχει υψηλή τιμή κεντρικότητας, ενώ ένας κόμβος πιο
απομακρυσμένος από το υπόλοιπο δίκτυο έχει χαμηλή τιμή κεντρικότητας. Με αυτή τη λογική, ένα μήνυμα που παράγεται από τον πιο «κεντρικό» κόμβο διαδίδεται σε ολόκληρο το δίκτυο σε ελάχιστο χρόνο.

Ωστόσο, για τον υπολογισμό της closeness και degree κεντρικότητας απαραίτητη προϋπόθεση είναι ότι το δίκτυο πρέπει να είναι πλήρως συνεκτικό. Στην περίπτωση πλήρως απομονωμένων κόμβων ο μηδενικός βαθμός κόμβου και η ύπαρξη μονοπατιών με άπειρη απόσταση προκαλούν πρόβλημα στον υπολογισμό των παραπάνω μετρικών κεντρικότητας. Γι' αυτό αναπτύχθηκε και ακόμα μια άλλη μετρική κεντρικότητας, η ενδιαμέσική κεντρικότητα (betweenness centrality) που αποφεύγει τα παραπάνω προβλήματα.

2.4.3 Ενδιαμεσική Κεντρικότητα (Betweenness Centrality)

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, οι μετρικές κεντρικότητας degree και closeness δεν είναι κατάλληλες να χρησιμοποιηθούν όταν υπάρχουν απομονωμένοι (ασύνδετοι) κόμβοι στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό, δόθηκε ένας εναλλακτικός ορισμός για την κεντρικότητα, η ενδιαμεσική (betweenness) κεντρικότητα, που βασίζεται στην ιδέα πως όσο πιο συχνά εμφανίζεται ένας κόμβος στο δίκτυο στο ελάχιστο μονοπάτι μεταξύ δύο άλλων κόμβων, τόσο πιο «κεντρικός» είναι. Με αυτή τη λογική, ένας κόμβος που εντοπίζεται συχνά στη βέλτιστη διαδρομή μεταξύ άλλων κόμβων έχει μεγαλύτερη επιρροή στη ροή πληροφορίας σε σχέση με άλλους κόμβους και αποκτά, έτσι, σπουδαιότερο και πιο «κεντρικό» ρόλο στη μετάδοση, την επικοινωνία και τη μεταφορά δεδομένων.

Για τον υπολογισμό της συγκεκριμένης κεντρικότητας πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι μεταξύ δύο κόμβων μπορεί να υπάρχουν περισσότερες από μια βέλτιστες διαδρομές. Αυτό σημαίνει πως ένας κόμβος που συναντάται σε μερικά από αυτά τα μονοπάτια, αλλά όχι σε όλα, καθίσταται «μερικώς κεντρικός». Ακολουθεί ο ορισμός της ενδιαμεσικής κεντρικότητας:

Έστω ένας κόμβος k και ένα τυχαία επιλεγμένο ζευγάρι κόμβων {i,j}, όπου i≠j≠k. Εαν g_{ij} είναι ο αριθμός των βέλτιστων (συντομότερων) μονοπατιών που συνδέει τους κόμβους i και j και $g_{ij}(k)$ είναι ο αριθμός των βέλτιστων μονοπατιών που συνδέει τους κόμβους i και j και περιλαμβάνει τον κόμβο k, τότε η ενδιαμεσική κεντρικότητα του κόμβου k ορίζεται ως:

$$C_B(k) = \sum_{i \neq k \neq j, i < j} \frac{g_{ij}(k)}{g_{ij}}$$

Στη συνέχεια, στην Εικόνα 2, παρατίθενται κάποια παραδείγματα υπολογισμών των διαφόρων ειδών κεντρικότητας για τους κόμβους ενός γράφου.



Betweenness centrality



Closeness centrality



Degree centrality

Εικόνα 2 Παράδειγμα γράφου στον οποίο η κεντρικότητα των κόμβων κυμαίνεται από υψηλές τιμές (κόκκινο χρώμα) σε χαμηλές (μπλε χρώμα) για τα διάφορα είδη κεντρικότητας.

3

Τοπολογίες Δικτύων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε διάφορες τοπολογίες δικτύων και αναλύουμε τις ιδιότητες τους, τους μαθηματικούς τους ορισμούς, τη δομή τους και τα κοινωνικά τους χαρακτηριστικά με βάση τις μετρικές ανάλυσης. Οι παρακάτω τύποι γραφημάτων έχουν μεγάλη εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο και γι' αυτό η μελέτη της δομής αλλά και της εξέλιξής τους στο χρόνο, που πραγματοποιούμε στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας, έχει μεγάλη σημασία για τον τομέα της ανάλυσης των κοινωνικών δικτύων.

3.1 Random Graphs

Μία από τις τοπολογίες που εξετάζουμε είναι οι τυχαίοι γράφοι (random graphs). Οι τυχαίοι γράφοι είναι ουσιαστικά μια συλλογή από κόμβους που συνδέονται μεταξύ τους με ακμές με τυχαίο τρόπο. Το πιο γνωστό μοντέλο τυχαίου γράφου είναι αυτό των Erdös and Rényi [11] και είναι αυτό που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία.

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο αυτό, έστω $G_{n,m}$ όλο το σύνολο των γράφων με κορυφές στο σύνολο $V = \{1, 2, ..., n\}$ και m ακμές, $0 \le m \le {n \choose 2}$. Ένα οποιοδήποτε γράφημα $G \subseteq G_{n,m}$ έχει πιθανότητα :

$$P(G) = {\binom{n}{2} \choose m}^{-1}$$

Ένα άλλο παρόμοιο μοντέλο για τους τυχαίους γράφους είναι αυτό που εισήγαγε ο Gilbert, κατά το οποίο εάν $0 \le p \le 1$ είναι η πιθανότητα της παρουσίας μιας ακμής τότε η πιθανότητα ενός γράφου $G_{n,p}$ με η κόμβους και m ακμές είναι:

$$P(G) = p^m (1-p)^{\binom{n}{2}-m}$$

Ισοδύναμα, το συγκεκριμένο μοντέλο αρχίζει από ένα γράφημα με n κόμβους χωρίς ακμές και πραγματοποιεί $\binom{n}{2}$ ανεξάρτητα πειράματα Bernoulli με εισαγωγή ακμών με πιθανότητα p. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα p τόσο πιο «πυκνό» είναι το γράφημα (βλ. Εικόνα 3). Η μέση τιμή του πλήθους των ακμών σε ολόκληρο το γράφημα είναι $\frac{1}{2}n(n-1)p$ και ο μέσος βαθμός ενός κόμβου είναι $z = \frac{n(n-1)p}{n} = (n-1)p \approx np$ [12].

Οι τυχαίοι γράφοι έχουν μεγάλη εφαρμογή σε πραγματικά δίκτυα σε πολλούς τομείς. Συναντώνται σε κοινωνικά δίκτυα όπου άνθρωποι γνωρίζονται τυχαία μεταξύ τους, σε δίκτυα ψηφιακής επικοινωνίας όπως είναι το δίκτυο του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, στα νευρωνικά δίκτυα, στις συνδέσεις των νευρώνων, ακόμα και σε δίκτυα που σχετίζονται με την επιδημιολογία. Συγκεκριμένα, η μετάδοση μιας ασθένειας εξαρτάται από το μοτίβο των επαφών των ατόμων που έχουν προσληφθεί από την ασθένεια και αυτών που δεν έχουν ακόμα μολυνθεί. Το μοτίβο αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί ως γράφημα όπου τα άτομα είναι οι κόμβοι και οι επικίνδυνες επαφές για τη μετάδοση της ασθένειας είναι οι ακμές. Η μεγάλη κλάση των επιδημιολογικών μοντέλων που σχετίζονται με την ευπάθεια σε μια αρρώστια, την μετάδοση της και την θεραπεία της (γνωστή στη και ως SIR models) βασίζονται στη θεωρία ότι οι επαφές γίνονται τυχαία και ανεξάρτητα, και γι' αυτό είναι ουσιαστικά τυχαίοι γράφοι [13-15].



Εικόνα 3 Ορισμένα γραφήματα G_{n,p_i} με 10 κόμβους όπου $p_1 < p_2 < p_4 < p_3$.



Εικόνα 4 Ένας τυχαίος (γεωμετρικός) γράφος

Ωστόσο, οι τυχαίοι γράφοι έχουν και ορισμένες διαφορές από τα πραγματικά δίκτυα. Η πρώτη μεγάλη διαφορά όπως διατυπώθηκε από τους Watts και Strogatz είναι ότι τα πραγματικά δίκτυα παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή ομαδοποίησης σε αντίθεση με το μοντέλο των Erdös and Rényi. Ουσιαστικά, μεγάλος συντελεστής ομαδοποίησης προκύπτει όταν η πιθανότητα να υπάρχει ακμή μεταξύ δύο κόμβων είναι μεγαλύτερη όταν οι κόμβοι έχουν ένα κοινό μεταξύ τους γείτονα. Στα αληθινά δίκτυα ο συντελεστής ομαδοποίησης δείχνει να έχει υψηλή τιμή ενώ στους τυχαίους γράφουςόπου η παρουσία μιας ακμής είναι ανεξάρτητη από τη παρουσία οποιασδήποτε άλλης, χαμηλή.

Οι τυχαίοι γράφοι διαφέρουν, επίσης, από τα πραγματικά δίκτυα ως προς την κατανομή βαθμού κόμβου. Η πιθανότητα p_k κατά την οποία ένας κόμβος έχει k γείτονες δίνεται από την διωνυμική κατανομή :

$$p_k = \binom{n-1}{k} p^k (1-p)^{n-1-k}$$

Εαν $n \gg kz$ τότε η κατανομή γίνεται $p_k = \frac{z^k e^{-z}}{k!}$, που είναι γνωστή ως κατανομή Poisson.

Ωστόσο, ο Παγκόσμιος Ιστός και το Διαδίκτυο μοιάζει να ακολουθούν την εκθετική κατανομή που σημαίνει ότι ένα μικρό ποσοστό των κόμβων έχει πολύ μεγάλο βαθμό.

Για τους λόγους αυτούς, επιστήμονες έχουν κάνει πολλές προσπάθειες με σκοπό να διορθώσουν το συντελεστή ομαδοποίησης και την κατανομή βαθμού κόμβου στα τυχαία γραφήματα και να καταστήσουν, έτσι, όμοια με τα πραγματικά δίκτυα [16-18].

3.2 Δίκτυα Χωρίς-κλίμακα (Scale- free Graphs)

Μέχρι πρόσφατα, η επιστημονική κοινότητα θεωρούσε ότι όλα τα δίκτυα είναι τυχαία και ότι ακολουθούν το μοντέλο των Erdös και Rényi. Στο μοντέλο αυτό, όπως έχει προαναφερθεί, η κατανομή του βαθμού των κόμβων είναι Poisson (βλ. Εικόνα 5) με αποτέλεσμα η πιθανότητα ένας κόμβος να έχει k συνδέσεις να μειώνεται όσο το k αυξάνεται. Ωστόσο, το μοντέλο των τυχαίων γράφων δεν λαμβάνει υπόψη δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά των δικτύων. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι η «εξέλιξη» τους (growth), δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο οι νέοι κόμβοι υπεισέρχονται στο δίκτυο και συνδέονται με τους ήδη υπάρχοντες. Το δεύτερο, είναι η προτίμηση στους ήδη «διάσημους» κόμβους , που σημαίνει πως όταν οι κόμβοι διαμορφώνουν καινούργιες συνδέσεις, τείνουν να συνδέονται με τους πιο «δημοφιλείς» κόμβους, δηλαδή με τους κόμβους που έχουν μεγάλο βαθμό (preferential attachment).

Μια κλάση μοντέλων που ανταποκρίνονται σε αυτές τις ιδιότητες είναι η κλάση των δικτύων χωρίς-κλίμακα (scale-free γράφοι). Ο βαθμός κόμβου στις scale-free τοπολογίες ακολουθεί την κατανομή νόμου δύναμης (power-law distribution) $P(k) \sim k^{-\gamma}$ όπου 2.1 < γ < 4 [19]. Στις power-law κατανομές (βλ. Εικόνα 6) των scale-free γράφων βλέπουμε πως όταν ο βαθμός κόμβου αυξάνεται, η αντίστοιχη πιθανότητα μειώνεται λογαριθμικά και έτσι γίνεται φανερό πως ο αριθμός κόμβων που κυριαρχούν στο δίκτυο (hubs) είναι πολύ μικρός.



Εικόνα 5 Poisson κατανομή



Εικόνα 6 Power-law κατανομή

Το πιο γνωστό μοντέλο scale-free τοπολογίας είναι αυτό που εισήγαγαν οι Albert και Barabási και είναι και αυτό που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία. Στο συγκεκριμένο μοντέλο [19] το αρχικό δίκτυο έχει m_o κόμβους, ο χρόνος διαιρείται σε χρονικές στιγμές t και κάθε νέος κόμβος που εισέρχεται στο δίκτυο συνδέεται με m κατάλληλα επιλεγμένους γείτονες. Τα βήματα του αλγορίθμου για κάθε χρονική στιγμή είναι τα εξής:

Βήμα 1: Ένας καινούργιος κόμβος εισέρχεται στο δίκτυο και συνδέεται με *m* κατάλληλους κόμβους.

Βήμα 2: Κάθε *m* κόμβος επιλέγεται ως εξής: κάθε κόμβος i με βαθμό $k_i(t)$ επιλέγεται με πιθανότητα $\prod(k_i) = \frac{k_i(t)}{\sum_{\forall j} k_j(t)}$, όπου το άθροισμα στον παρανομαστή αφορά όλους τους κόμβους στο δίκτυο.

Έτσι, λοιπόν, βλέπουμε πως το συγκεκριμένο μοντέλο ανταποκρίνεται στο μηχανισμό της «εξέλιξης» (growth) των δικτύων, καθώς νέοι κόμβοι προσθέτονται στο δίκτυο και συνδέονται με κόμβους που ήδη υπάρχουν, αλλά και στο μηχανισμό της «σύνδεσης κατά προτίμησης» (preferential attachment), αφού υπάρχει κάποιο κριτήριο με βάση το οποίο ορισμένοι κόμβοι είναι πιο «θελκτικοί» από άλλους.

Οι scale-free τοπολογίες βρίσκουν εφαρμογή στο Διαδίκτυο/WWW, σε νευρωνικά, power grid και κυτταρικά δίκτυα, σε γράφους που απεικονίζουν το δίκτυο των ηθοποιών, των τηλεφωνικών καταλόγων, της τροφικής αλυσίδας, των δρόμων, ή ακόμα και των σεξουαλικών σχέσεων, κ.λπ.



Εικόνα 7 Παράδειγμα ενός scale-free γράφου

3.3 Δίκτυα Μικρού-κόσμου (Small -world Graphs)

Μια άλλη κατηγορία γράφων που μελετά η παρούσα εργασία είναι οι τοπολογίες μικρού-κόσμου (small-world). Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι το μικρό μέσο μήκος μονοπατιού. Αυτό σημαίνει ότι δύο τυχαία άτομα που είναι ξένα μεταξύ τους συνδέονται μέσα από ένα μικρό σε μήκος μονοπάτι επαφών (small-world phenomenon). Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι αυτό το μονοπάτι δε γίνεται να περιέχει παραπάνω από έξι άτομα, [20]. Αυτά τα δίκτυα έχουν, επίσης, υψηλό δείκτη ομαδοποίησης που σημαίνει ότι οι γείτονες ενός κόμβου τείνουν να συνδέονται μεταξύ τους. Ένα δίκτυο, θεωρητικά, έχει μεγάλο συντελεστή ομαδοποίησης όταν αυτός ξεπερνά τον συντελεστή ομαδοποίησης ενός τυχαίου γραφήματος με ίσο αριθμό κόμβων.

Το πιο γνωστό μοντέλο small-world γράφου είναι αυτό που εισήγαγαν οι Watts και Strogatz, [21]. Τα βασικά βήματα του αλγορίθμου για το μοντέλο αυτό είναι τα εξής:

Βήμα 1: Αρχικά δημιουργείται ένας κυκλικός γράφος με μορφή πλέγματος (βλ. Εικόνα 8) με N κόμβους με βαθμό κόμβου 2k. Κάθε κόμβος συνδέεται με τους k κοντινότερους γείτονες από την κάθε πλευρά.

Βήμα 2: Για κάθε κόμβο $n_i=n_0,...,n_{n-1}$ η ακμή (n_i,n_j) όπου i < jανακατασκευάζεται με πιθανότητα β. Η ανακατασκευή γίνεται με αντικατάσταση της ακμής (n_i, n_j) με μια άλλη ακμή (n_i, n_k) όπου το k επιλέγεται τυχαία από όλες τις πιθανές τιμές με εξαίρεση αυτές που δημιουργούν self-loop $(k \neq i)$ και διπλή σύνδεση (δηλαδή δύο κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους μόνο με μία ακμή).

Εύκολα συμπεραίνουμε πως αν $\beta = 0$ τότε καμία ακμή δεν ανακατασκευάζεται και ο γράφος παραμένει πλέγμα, ενώ αν $\beta = 1$ τότε όλες οι ακμές ανακατασκευάζονται τυχαία, οπότε ο γράφος γίνεται τυχαίος .(βλ. Εικόνα 9)



Εικόνα 8 Παράδειγμα κυκλικού πλέγματος (ring lattice).



Εικόνα 9 Γράφος με βάση το μοντέλο των Watts και Strogatz όπου η πιθανότητα ανακατασκευής β αυξάνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά.

Small-world δίκτυα εντοπίζονται στο δίκτυο των ιστοσελίδων με επιλογές πλοήγησης, στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, στο σύστημα των νευρώνων του εγκεφάλου, σε δίκτυα ψηφοφόρων, σε δίκτυα που εξετάζουν την επιρροή που δέχονται τα άτομα από άλλα άτομα ως προς ένα φαινόμενο ή μια κατάσταση, σε δίκτυα power grids, κ.λπ.



Εικόνα 10 Γράφος Watts-Strogatz με N=500, K=25 και β =0.15.

4

Μεταβολή Συνδέσεων (Edge Churn)

4.1 Ανάλυση Μοντέλου Μεταβολής Συνδέσεων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζουμε τη μεταβολή δικτύου κατά την οποία ακμές/συνδέσεις προσθέτονται και αφαιρούνται στο γράφο που μελετάμε με τυχαίο τρόπο (edge churn). Συγκεκριμένα, επιλέγουμε να προσθέσουμε μια ακμή με πιθανότητα $p_{add} = 0.55$ και να αφαιρέσουμε με πιθανότητα $p_{del} = 1 - p_{add} = 0.45$. Προσθέτουμε ή αφαιρούμε την ακμή τυχαία. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία 2500 φορές (οι οποίες αντιστοιχούν σε συνολικά 2500 time slots). Στην αρχή και στο τέλος της συγκεκριμένη μεταβολής δικτύου υπολογίζουμε τις μετρικές ανάλυσης της τοπολογίας, δηλαδή το μέσο μήκος μονοπατιού (average path length), το μέσο συντελεστή ομαδοποίησης (average cluster coefficient), το μέσο βαθμό κόμβου (average node degree), τη μέση «κοντινή» (closeness) και ενδιαμεσική (betweeneess) κεντρικότητα και παραθέτουμε τα αποτελέσματα.

4.2 Αλγόριθμος

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιούμε για να αναπαραστήσουμε τη μεταβολή δικτύου (edge churn) είναι ο παρακάτω:

Αρχικοποίηση:

Βήμα 1: Ορίζεται το πλήθος των time slots ως Τ και η τιμή της πιθανότητας p_{add}.
 Βήμα 2: Κατασκευάζεται το γράφημα με χρήση κατάλληλης συνάρτησης σε μορφή πίνακα γειτνίασης Α.

Βήμα 3: Υπολογίζονται οι μετρικές ανάλυσης του γραφήματος με κατάλληλες συναρτήσεις.

Βήμα 4 : Κατασκευάζεται πίνακας zero[N², 2] που σε κάθε γραμμή περιέχει τις συντεταγμένες (i, j) των μηδενικών της άνω τριγωνικής περιοχής του πίνακα A και εκχωρείται σε μια μεταβλητή zeros το πλήθος των μηδενικών.

Βήμα 5 : Κατασκευάζεται ο πίνακας one[N², 2] που περιέχει τις συντεταγμένες των μονάδων της άνω τριγωνικής περιοχής του πίνακα Α και εκχωρείται σε μια μεταβλητή ones το πλήθος των μονάδων.

Επαναληπτικός βρόχος t από 1 μέχρι Τ:

Βήμα 6 : Επιλέγεται στη τύχη ένας αριθμός r

Eάν $r < p_{add}$ τότε :

Βήμα 7: Επιλέγεται στη τύχη μια γραμμή k του πίνακα zero και εκχωρούνται στις μεταβλητές i, j οι αντίστοιχες συντεταγμένες zero[k, 1] και zero[k, 2]
Βήμα 8: Στις θέσεις zero[k, 1] και zero[k, 2] εκχωρούνται αντίστοιχα οι τιμές zero[k, zero] και zero[k, zero] και η μεταβλητή zeros μειώνεται κατά 1.
Βήμα 9: Η μεταβλητή ones αυζάνεται κατά 1 και εκχωρούνται στις μεταβλητές one[ones][1] και one[ones][2] οι τιμές i, j.
Βήμα 10: Εκχωρείται στις θέσεις A[i, j] και A[j, i] η τιμή 1.

Αλλιώς

Βήμα 7: Επιλέγεται στη τύχη μια γραμμή k του πίνακα one και εκχωρούνται στις μεταβλητές i, j οι αντίστοιχες συντεταγμένες one[k, 1] και one[k, 2]

Βήμα 8: Στις θέσεις one[k, 1] και one[k, 2] εκχωρούνται αντίστοιχα οι τιμές one[k, zero] και one[k, zero] και η μεταβλητή ones μειώνεται κατά 1.
Βήμα 9: Η μεταβλητή zero αυζάνεται κατά 1 και εκχωρούνται στις μεταβλητές zeros[zero][1] και zeros[zero][2] οι τιμές i, j.
Βήμα 10: Εκχωρείται στις θέσεις A[i, j] και A[j, i] η τιμή 0.

Τέλος

Τέλος

Βήμα 10: Υπολογίζονται ζανά οι μετρικές ανάλυσης του γραφήματος με κατάλληλες συναρτήσεις

4.3 Αποτελέσματα

Στο συγκεριμένο κεφάλαιο παραθέτουμε τα αποτελέσματα της μεταβολής συνδέσεων σε τυχαίους γράφους, δίκτυα χωρίς-κλίμακα και δίκτυα μικρού-κόσμου.

4.3.1 Edge churn σε τυχαίο γράφο

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τις αριθμιτικές τιμές των μετρικών ανάλυσης σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 250, 1000, 2000 πριν και μετά τη μεταβολή συνδέσεων καθώς και τη ποσοστιαία μεταβολή τους. Όμοια καταγάφονται τα αποτελέσματα για διαφορετικούς γράφους στους υπόλοιπους πίνακες.

E	250	1000	2000
Average Path Length(before)	2,2275	1,8117	1,6429
Average Path Length(after)	1,7523	1,683	1,1171
Percentage Change(%)	-21,33%	-7,00%	-32,00%
Cluster Coefficient(<i>before</i>) 0,0357479955		0,0775278896	0,1844
Cluster Coefficient(after)	uster Coefficient(after) 0,098561982		0,2374
Percentage Change(%)	175,71%	70,13%	28,74%
Node Degree(before)	5	20,1564	40,6286
Node Degree(after)	22	30,8385	48,2353
Percentage Change(%)	341,60%	53,00%	18,72%
Closeness Centr.(before)	0,0045524027	0,0055815903	0,0063
Closeness Centr.((after)	0,0057583522	0,0059925645	0,0067
Percentage Change(%)	26,49%	7,36%	6,35%
Betweeness Centr.((before)	0,0111462785	0,0051323065	7,90E-004
Betweeness Centr.((after)	0,0031185589	0,001601057	4,69E-004
Percentage Change(%)	-72,02%	-68,80%	-40,55%

Πίνακας 1 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 250, 1000, 2000.



Εικόνα 11 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 250.



Εικόνα 12 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 1000.



Εικόνα 13 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 2000.

Τυχαίος γράφος	ιε πλήθος	κόμβων	250 και	ακμές	1100,	1500.	3000:
- 0, 010 \$ /p 010 \$	<i>pio majo o 5</i>			our pros	,	1000,	

E	1100	1500	3000
Average Path Length(before)	2,764	2,4928156053	1,9921574297
Average Path Length(after)	2,379825	2,2556915663	1,9334248996
Percentage Change(%)	-14,27%	-9,51%	-3,04%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,0133	0,0163589096	0,0341888918
Cluster Coefficient(after)	0,0185	0,0228828442	0,0394485734
Percentage Change(%)	39,10%	39,88%	15,38%
Node Degree(before)	8	12,5714285714	24,25
Node Degree(after)	13	16,7428571429	27,15
Percentage Change(%)	56,16%	33,18%	11,96%
Closeness Centr.(before)	0,0015	0,0016147653	0,002017972
Closeness Centr.((after)	0,0017	0,0017844187	0,002078383
Percentage Change(%)	13,33%	10,51%	2,99%
Betweeness Centr.((before)	0,0071375	0,0048585498	0,003479068
Betweeness Centr.((after)	0,004287	0,0041216384	0,0029397383
Percentage Change(%)	-39,93%	-15,17%	-15,50%

Πίνακας 2 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1100, 1500, 3000.



Εικόνα 14 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1100.



Εικόνα 15 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1500.



Εικόνα 16 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 3000.

Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2200, 3500, 5000:

E	2200	3500	5000
Average Path Length(before)	3,0929	2,6409	2,3913
Average Path Length(after)	2,8645	2,566	2,3403
Percentage Change(%)	-7,38%	-2,84%	-2,13%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,0058	0,0095	0,0137
Cluster Coefficient(after)	0,0073	0,0105	0,0147
Percentage Change(%)	25,86%	10,53%	7,30%
Noda Dograa(hafara)	0.0	15 8333	18.4
Node Degree(<i>bejore</i>)	9,9	15,6555	10,4
Node Degree(after)	10,833	16,0909	19,8
Percentage Change(%)	9,42%	1,63%	7,61%
Closeness Centr.(before)	6,50E-004	0,00076	8,39E-004
Closeness Centr.((after)	7,01E-004	0,000782	8,58E-004
Percentage Change(%)	7,87%	2,6%	2,18%
Betweeness Centr.((before)	0,0043	0,0026	0,002
Betweeness Centr.((after)	0,0037	0,0022	0,002
Percentage Change(%)	-13,95%	-15,38%	0

Πίνακας 3 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2200, 3500, 5000.



Εικόνα 17 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2200.



Εικόνα 18 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 3500.



Εικόνα 19 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 5000.

$I U \chi a log \gamma \rho a \phi o g \mu e \pi \lambda \eta \theta o g \kappa o \mu \beta \omega v / 50 ka l a \kappa \mu e g 5500, 5500, / 500$	Τυχαίος γράφος	με πλήθος	κόμβων 7.	50 και	ακμές 3	500, 5500,	7500:
--	----------------	-----------	-----------	--------	---------	------------	-------

E	3500	5500	7500
Average Path Length(before)	3,2113	2,7082	2,5449
Average Path Length(after)	3,071	2,7464	2,5153
Percentage Change(%)	-4,3689471554%	1,41053098%	-1,1631105348%
	0.004	0.00.00	0.0002
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,004	0,0069	0,0092
Cluster Coefficient(after)	0,0045	0,0072	0,0093
Percentage Change(%)	12,5%	4,347826087%	1,0869565217%
Node Degree(before)	9,75	12,8	18,35
Node Degree(after)	11,625	13,75	18,6
Percentage Change(%)	19,2307692308%	7,42%	1,366%
Closeness Centr.(before)	0,000417	0,000487	0,000525
Closeness Centr.((after)	0,000436	0,00493	0,000531
Percentage Change(%)	4,5148296449	1,4055275866	1,1807049951
Betweeness Centr.((before)	0,0029	0,0019	0,0013
Betweeness Centr.((after)	0,0028	0,0018	0,0013
Percentage Change(%)	-3,4482758621%	-5,2631578947%	0

Πίνακας 4 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500, 5500, 7500.



Εικόνα 20 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500.



Εικόνα 21 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 5500.



Εικόνα 22Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 7500.

Τυγαίος	νράφος με	πλήθος κόμβων	1000 Kai	akuéc 5500	7000	10000
τυχαίος	γραφος με	ππησος κομρων	1000 KUI	<i>α</i> κμες 5500,	7000,	10000.

E	5500	7000	10000
Average Path Length(before)	3,1395	2,8793	2,63
Average Path Length(after)	3,0593	2,8416	2,6168
Percentage Change(%)	-2,55%	-1,3093%	-0,5019%
Cluster Coefficient(before)	0,0032	0,0047	0,0068
Cluster Coefficient(after)	0,0042	0,0052	0,007
Percentage Change(%)	31,25%	10,63%	2,94%
Node Degree(before)	11,5	13,2	17,8
Node Degree(after)	12,5	14,45	19,25
Percentage Change(%)	8,695%	9,469%	8,14%
Closeness Centr.(before)	3,20E-004	3,48E-004	3,80E-004
Closeness Centr.((after)	3,28E-004	3,53E-004	3,82E-004
Percentage Change(%)	2,6%	1,30%	0,595%
Betweeness Centr.((before)	0,0021	0,0018	0,001
Betweeness Centr.((after)	0,002	0,0017	0,001
Percentage Change(%)	-4,76%	-5,5%	0

Πίνακας 5 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500, 7000, 10000.



Εικόνα 23Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500.



Εικόνα 22 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 7500.



Εικόνα 23 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω edge churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 10000.

Για κάθε μετρική παρατηρούμε τα εξής:

- Το μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε πλήθος κόμβων μειώνεται. Όσο πιο πυκνό γίνεται το γράφημα τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο γιατί στην ουσία μέσα από το edge churn προκύπτει ένα τυχαίο γράφημα με 0.55*2500-0.45*2500 = 250 (περίπου) περισσότερες ακμές με αποτέλεσμα ο γράφος να γίνεται πιο πυκνός.
- Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης και ο μέσος βαθμός κόμβου αυξάνονται, το οποίο είναι λογικό γιατί το γράφημα «πυκνώνει». Όσο πληθαίνουν οι ακμές στα σενάρια, τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή.
- Η closeness centrality αυξάνεται σε όλα τα σενάρια γιατί κάθε κόμβος έρχεται πιο κοντά με όλους τους υπόλοιπους.
- Η betweeness centrality αντίθετα μειώνεται και έτσι παρατηρούμε ότι ο μέσος κόμβος μετά το churn εμφανίζεται σε βέλτιστα μονοπάτια με μικρότερη συχνότητα.

4.3.2 Edge churn σε scale-free γράφο

d	2	4	6
Average Path Length(before)	2,9840606061	2,3472767677	2,0946545455
Average Path Length(after) 1,7872161616		1,7710020202	1,7545171717
Percentage Change(%)	-40,11%	-24,55%	-16,24%
Cluster Coefficient(before)	0,0183962675	0,0430454495	0,0618789008
Cluster Coefficient(after)	(after) 0,0855055367 0,0		0,0985271742
Percentage Change(%)	364,80%	112,60%	59,23%
	27	7.1	10.16
Node Degree(<i>before</i>)	3,7	/,1	10,16
Node Degree(after)	21,5	22,98	24,5
Percentage Change(%)	481,83%	223,00%	141,22%
Closeness Centr (before)	0.003451813	0.0043539091	0.0048667236
Closeness Centr.((after)	0,0056558141	0,0057072336	0,0057609055
Percentage Change(%)	63,85%	31,08%	18,37%
Betweeness Centr.((before)	0,0254130681	0,0133179471	0,0107096089
Betweeness Centr.((after)	0,0042463694	0,0036453808	0,003094605
Percentage Change(%)	-83,29%	-72,63%	-71,10%

Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2,4,6:

Πίνακας 6 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 ,4, 6.



Εικόνα 24 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω edge churn.



Εικόνα 25 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω edge churn.



Εικόνα 26 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,4488	2,6597	2,3804
Average Path Length(after)	2,6106	2,4476	2,2879
Percentage Change(%)	-24,30%	-7.92%	-3,89%
Chuster Coofficient(before)	0.0086	0.0223	0.0322
	0,0000	0,0225	0,0322
Cluster Coefficient(after)	0,014	0,0189	0,025
Percentage Change(%)	62,79%	-15,24%	-22,36%
Node Degree(before)	3,8	7,5	10,98
Node Degree(after)	10,4	12,7	15,46
Percentage Change(%)	171,44%	68,00%	40,78%
Closeness Centr.(before)	0,0012	0,0015	0,0017
Closeness Centr.((after)	0,0015	0,0016	0,0018
Percentage Change(%)	25,00%	6,60%	5,88%
Betweeness Centr.((before)	0,0119	0,0062	0,0046
Betweeness Centr.((after)	0,0057	0,0046	0,0041
Percentage Change(%)	-52,10%	-25,80%	-10,87%

Πίνακας 7 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 27 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω edge churn.



Εικόνα 28 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω edge churn.



Εικόνα 29 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	5,2316	2,888	2,5958
Average Path Length(after)	2,9817	2,901	2,6167
Percentage Change(%)	-43,21%	0,45%	0,81%
	0.2127	0.012	0.0102
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,3127	0,013	0,0192
Cluster Coefficient(after)	0,032	0,0095	0,0151
Percentage Change(%)	-89,76%	-26,92%	-21,35%
Node Degree(before)	3,9	7,69	11,6
Node Degree(after)	6,49	9,6	13,06
Percentage Change(%)	65,00%	24,78%	14,97%
Closeness Centr.(before)	3,86E-004	7,00E-004	7,77E-004
Closeness Centr.((after)	6,74E-004	6,94E-004	7,69E-004
Percentage Change(%)	74,62	-0,83%	0,08%
Betweeness Centr.((before)	0,0067	0,0035	0,0025
Betweeness Centr.((after)	0,0039	0,0036	0,0025
Percentage Change(%)	-41,79%	0,35%	0,00%

Πίνακας 8 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 30 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω edge churn.



Εικόνα 31 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω edge churn.



Εικόνα 32 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn.

Scale-free y	ράφος με πλ	<i>ιήθος κόμβων 7</i>	750 και βαθμ	ό αρχικού πλέχ	γματος d=2, 4, 6:
--------------	-------------	-----------------------	--------------	----------------	-------------------

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,29	3,011	2,688
Average Path Length(after)	3,4	3,08	2,73
Percentage Change(%)	3,03%	2,291	1,56%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,007	0,0096	0,0145
Cluster Coefficient(after)	0,0045	0,0077	0,0118
Percentage Change(%)	-35,71%	-19,79	-18,62%
Node Degree(before)	3,94	7,7	11,54
Node Degree(after)	5,44	8,86	12,55
Percentage Change(%)	37,65%	15,0649350649	8,7521663778
	0.000410	0.000447	0.0007
Closeness Centr.(before)	0,000410	0,000447	0,0005
Closeness Centr.((after)	0,000395	0,000436	0,000491
Percentage Change(%)	-3,744%	-2,45%	-1,8%
Betweeness Centr.((before)	0,003	0,0025	0,0018
Betweeness Centr.((after)	0,0032	0,0026	0,0018
Percentage Change(%)	6,666%	4%	0

Πίνακας 9 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 33 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω edge churn.



Εικόνα 34 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω edge churn.



Εικόνα 35 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,42	3,09	2,79
Average Path Length(after)	3,53	3,1687	2,82
Percentage Change(%)	3,216%	2,546%	1,07%
Cluster Coefficient(before)	0,0066	0,008	0,0115
Cluster Coefficient(after)	0,0059	0,0072	0,01
Percentage Change(%)	-10.6%	-10%	-13,043%
Nada Dagrag(hafaya)	3.0	7 78	11.53
Node Degree(<i>bejore</i>)	3,7	1,10	11,55
Node Degree(after)	5,4	8,887	12,56
Percentage Change(%)	37,06%	13,90%	0,12%
Closeness Centr.(before)	0,000295	0,000326	3,61E-004
Closeness Centr.((after)	0,000286	0,000317	3,59E-004
Percentage Change(%)	-3,18%	-3,01%	-0,451%
Betweeness Centr.((before)	0,0024	0,0019	0,0014
Betweeness Centr.((after)	0,0025	0,002	0,0015
Percentage Change(%)	4,166%	5,26%	7,14%

Πίνακας 10 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 36 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω edge churn.



Εικόνα 37 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω edge churn.



Εικόνα 38 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω edge churn.
Για κάθε μετρική παρατηρούμε τα εξής:

- Το μέσο μήκος μονοπατιού για μικρό πλήθος κόμβων μειώνεται, ενώ για μεγάλο πλήθος αυξάνεται. Πρακτικά, με το edge churn αφαιρούνται ακμές από κυρίαρχους κόμβους (hubs) γιατί συνδέονται με πολλούς κόμβους επομένως είναι πολύ πιθανό να επιλεγεί ακμή προς αφαίρεση που στο ένα άκρο της να υπάρχει hub. Αντίστοιχα, προσθέτονται ακμές μεταξύ κόμβων που έχουν μικρό βαθμό γιατί κυριαρχούν σε πλήθος όποτε είναι πολύ πιθανό να επιλεγούν σε πλήθος όποτε είναι πολύ πιθανό του της να υπάρχει hub. Αντίστοιχα, προσθέτονται ακμές μεταξύ κόμβων που έχουν μικρό βαθμό γιατί κυριαρχούν σε πλήθος όποτε είναι πολύ πιθανό να επιλεγούν σε πλήθος όποτε είναι πολύ πιθανό να επιλεγούν προς σύνδεση. Για μεγάλο πλήθος βλέπουμε ότι αυτό οδηγεί στην απομάκρυνση των κόμβων μεταξύ τους κατά μέσο όρο.
- Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης βλέπουμε ότι για μικρό πλήθος κόμβων αυξάνεται, ενώ για μεγάλο πλήθος μειώνεται. Κάτι τέτοιο είναι αρκετά λογικό, γιατί όταν συνδέουμε δύο κόμβους με μια ακμή, σε μικρό πλήθος κόμβων, είναι πολύ πιθανό αυτοί οι κόμβοι να έχουν ένα κοινό γείτονα μεταξύ τους, αντίθετα με τη περίπτωση πολλών κόμβων. Ωστόσο, όταν τα δίκτυα γίνονται πιο πυκνά, ταυτόχρονα γίνονται πιο ομαδοποιημένα (clustered). Με την αφαίρεση μιας ακμής είναι πολύ πιθανό να «σπάσει» ένα τρίγωνο κόμβων, ενώ με την προσθήκη μιας ακμής μεταξύ δύο τυχαίων κόμβων που κατά πάσα πιθανότητα δεν θα έχουν ένα κοινό γείτονα μεταξύ τους είναι δύσκολο να ανασχηματιστεί καινούργιο «τρίγωνο» κόμβων. Έτσι, η αύξηση των ακμών στα γραφήματα έχει επίπτωση στο συντελεστή ομαδοποίησης.
- Ο μέσος βαθμός κόμβου αυξάνεται σε όλα τα σενάρια. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, αφού προσθέτονται περισσότερες ακμές από αυτές που αφαιρούνται.
- Η closeness centrality βλέπουμε ότι για μικρό πλήθος κόμβων αυξάνεται, ενώ για μεγάλο πλήθος μειώνεται κατά λίγο. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει με την betweeness centrality.

4.3.3 Edge churn σε small-world γράφος

d 8		16	24	
Average Path Length(before)	3,3119191919	2,5112121212	2,1630868687	
Average Path Length(after)	1,7646707071	1,7124565657	1,6527676768	
Percentage Change(%)	-46,72%	-31,81%	-23,59%	
Cluster Coefficient(before)	0,3111494557	0,4020638074	0,4362516043	
Cluster Coefficient(after)	0,0943548709	0,118934557	0,1520204746	
Percentage Change(%)	-69,68%	-70,42%	-65,15%	
Node Degree(before)	8,48	16,38	24,16	
Node Degree(after)	22,94	28,82	33,96	
Percentage Change(%)	170,52%	75,95%	40,56%	
Closeness Centr.(before)	0,0030771842	0,0040385735	0,004682214	
Closeness Centr.((after)	0,0057278035	0,0059026558	0,0061164668	
Percentage Change(%) 86,14%		46,16%	30,63%	
Betweeness Centr.((before)	0,0212848065	0,0126991307	0,0068394412	
Betweeness Centr.((after)	0,0034201201	0,0020288977	0,0012080722	
Percentage Change(%)	-83,93%	-84,02%	-82,34%	

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β =0.2.

Πίνακας 11 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8,16,24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 39 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω edge churn.



Εικόνα 40 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.



Εικόνα 41 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	4,5327	3,3419	2,8955
Average Path Length(after)	2,4152	2,1441	1,9853
Percentage Change(%)	-46,72%	-35,84%	-31,43%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,318	0,4001	0,434
Cluster Coefficient(after)	0,0219	0,0539	0,0954
Percentage Change(%)	-93,11%	-86,53%	-78,02%
Node Degree(before)	8,1333	16,4	24,6
Node Degree(after)	13,533	20,26	27,6
Percentage Change(%)	66,39%	23,54%	12,20%
	0.000002	0.0012	0.0014
Closeness Centr.(<i>before</i>)	0,000893	0,0012	0,0014
Closeness Centr.((after)	0,0017	0,0019	0,002
Percentage Change(%)	90,40%	58,33%	42,86%
Betweeness Centr.((before)	0,0116	0,0075	0,0064
Betweeness Centr.((after)	0,0044	0,0039	0,0033
Percentage Change(%)	-62,07%	-48,00%	-48,44%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β =0.2.

Πίνακας 12 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8,16,24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 42 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω edge churn.



Εικόνα 43 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.



Εικόνα 44 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	5,2316	2,888	2,5958
Average Path Length(after)	2,9817	2,901	2,6167
Percentage Change(%)	-43,21%	0,45%	0,81%
Cluster Coefficient(before)	0,3127	0,013	0,0192
Cluster Coefficient(after)	0,032	0,0095	0,0151
Percentage Change(%)	-89,76%	-26,92%	-21,35%
Node Degree(before)	8,3	131,95	177
Node Degree(after)	10,2	80,3	128,85
Percentage Change(%)	22,89%	-39,14%	-27,20%
Closeness Centr.(before)	0,000386	0,0007	0,000777
Closeness Centr.((after)	0,000674	0,000694	0,000769
Percentage Change(%)	74,62	-0,83%	0,08%
Betweeness Centr.((before)	0,0067	0,0035	0,0025
Betweeness Centr.((after)	0,0039	0,0036	0,0025
Percentage Change(%)	-41,79%	0,35%	0,00%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 13 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 45 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω edge churn.



Εικόνα 46 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn



Εικόνα 47 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn

d	8	16	24
Average Path Length(before)	5,86	4,29	3,877
Average Path Length(after)	3,4	2,92	2,7108
Percentage Change(%)	-41,97%	-31,93%	-30,07%
Cluster Coefficient(before)	0,3192	0,3979	0,4339
Cluster Coefficient(after)	0,0575	0,1482	0,2157
Percentage Change(%)	-81,98%	-62,75%	-50,288%
Node Degree(before)	8,5	16	24
Node Degree(after)	10,62	16,5	25,65
Percentage Change(%)	14,7%	3%	6,8
Closeness Centr.(before)	0,000229	0,000312	0,000345
Closeness Centr.((after) 0,000393		0,000457	0,00049
Percentage Change(%)	71,61%	46,60%	42,98%
Betweeness Centr.((before)	0,0049	0,0033	0,0027
Betweeness Centr.((after)	0,0031	0,0024	0,0016
Percentage Change(%)	-36,734	-27,27%	-40,7%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 14 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος 8,16,24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 48 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω edge churn.



Εικόνα 49 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.



Εικόνα 50 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	5,9173	3,13	2,75
Average Path Length(after)	3,6869	2,73	2,71
Percentage Change(%)	-37,69%	-12,779%	-1,45%
	0.0101	0.007.6	0.0111
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,3101	0,0076	0,0111
Cluster Coefficient(after)	0,0828	0,0057	0,0058
Percentage Change(%)	-73,29%	-25%	-47,74%
Node Degree(before)	8,45	16,76	24,2
Node Degree(after)	8,8	17,46	24,1
Percentage Change(%)	4,14%	5,9%	0.2%
Closeness Centr.(before)	1,70E-004	3,22E-004	3,66E-004
Closeness Centr.((after)	Closeness Centr.((after) 2,72E-004		3,40E-004
Percentage Change(%)	59,95%	-3,726%	-7,12%
Betweeness Centr.((before)	0,0038	0,002	0,0014
Betweeness Centr.((after)	0,0027	0,0011	0,0011
Percentage Change(%)	-28,9%	-45%	-21,42%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 15 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 51 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω edge churn.



Εικόνα 52 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.



Εικόνα 53 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω edge churn.

Για κάθε μετρική παρατηρούμε τα εξής:

- Το μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε πλήθος κόμβων μειώνεται. Όσο πληθαίνουν οι ακμές στα σενάρια τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή.
- Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης επίσης μειώνεται, το οποίο είναι απολύτως λογικό, αφού όπως εξηγήσαμε και παραπάνω, στα «clustered» δίκτυα με την αφαίρεση ακμής σπάνε «τρίγωνα κόμβων», ενώ με τη προσθήκη ακμής είναι δύσκολο να ανασχηματιστούν καινούργια «τρίγωνα», επειδή η επιλογή των κόμβων γίνεται τυχαία οπότε όταν συνδέονται δύο κόμβοι με μια καινούργια ακμή, είναι λίγες οι πιθανότητες να έχουν κοινό γείτονα μεταξύ τους.
- Ο μέσος βαθμός κόμβου αυξάνεται. Είναι λογικό γιατί προσθέτονται περισσότερες ακμές από αυτές που αφαιρούνται.
- Η closeness centrality αυξάνεται σε όλα τα σενάρια, ενώ η betweeness centrality μειώνεται.

5

Μεταβολή Κόμβων (Node Churn)

5.1 Ανάλυση Μοντέλου Μεταβολής Κόμβων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζουμε τη μεταβολή δικτύου κατά την οποία κόμβοι προσθέτονται και αφαιρούνται στο γράφο που μελετάμε με τυχαίο τρόπο (node churn). Συγκεκριμένα, επιλέγουμε να προσθέσουμε έναν κόμβο με πιθανότητα $p_{add} = 0.55$ και να αφαιρέσουμε με πιθανότητα $p_{del} = 1 - p_{add} = 0.45$. Όταν προσθέτουμε έναν κόμβο συνδέουμε έναν καινούργιο κόμβο τυχαία με 20 διαφορετικούς γείτονες και όταν αφαιρούμε επιλέγουμε τυχαία έναν κόμβο στο δίκτυο και τον αποσυνδέουμε από όλους τους γείτονες του. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία 2500 φορές (συνολικά 2500 time slots). Στην αρχή και στο τέλος της συγκεκριμένη μεταβολής δικτύου υπολογίζουμε τις μετρικές ανάλυσης της τοπολογίας, δηλαδή το μέσο μήκος μονοπατιού (average path length), το μέσο συντελεστή ομαδοποίησης (average cluster coefficient), το μέσο βαθμό κόμβου (average node degree), τη μέση κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality) και παραθέτουμε τα αποτελέσματα.

5.2 Αλγόριθμος

Αρχικοποίηση:

Βήμα 1: Ορίζεται το πλήθος των time slots $\omega \zeta T$ και η τιμή της πιθανότητας p_{add} .

Βήμα 2: Κατασκευάζεται το γράφημα με χρήση κατάλληλης συνάρτησης σε μορφή πίνακα γειτνίασης Α.

Βήμα 3: Υπολογίζονται οι μετρικές ανάλυσης του γραφήματος με κατάλληλες συναρτήσεις.

Επαναληπτικός βρόχος t από 1 μέχρι Τ:

Βήμα 4: Επιλέγεται στην τύχη ένας αριθμός r

Eάν $r < p_{add}$ τότε :

Βήμα 5: Αυζάνουμε τις διαστάσεις του Α από NxN σε (N+1)x(N+1). Βήμα 6: Επιλέγουμε τους 20 τυχαίους γείτονες με τον καινούργιο κόμβο και βάζουμε μονάδα στις αντίστοιχες θέσεις του πίνακα γειτνίασης.

Βήμα 7: Αυξάνουμε το πλήθος των κόμβων κατά 1

Αλλιώς

Βήμα 5: Επιλέγουμε στην τύχη τον κόμβο προς διαγραφή
Βήμα 6:Διαγράφουμε την αντίστοιχη γραμμή και στήλη του πίνακα Α.
Βήμα 7: Μειώνουμε το πλήθος των κόμβων κατά 1

Τέλος

Τέλος

Βήμα 8: Υπολογίζονται ξανά οι μετρικές ανάλυσης του γραφήματος με κατάλληλες συναρτήσεις

5.3 Αποτελέσματα

Στο συγκεριμένο κεφάλαιο παραθέτουμε τα αποτελέσματα της μεταβολής κόμβων σε τυχαίους γράφους, δίκτυα χωρίς-κλίμακα και δίκτυα μικρού-κόσμου.

5.3.1 Node churn σε τυχαίο γράφο

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τις αριθμητικές τιμές των μετρικών ανάλυσης σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 350, 1000, 2000 πριν και μετά την μεταβολή κόμβων καθώς και την ποσοστιαία μεταβολή τους. Όμοια καταγάφονται τα αποτελέσματα για διαφορετικούς γράφους στους υπόλοιπους πίνακες.

E	350	1000	2000
Average Path Length(before)	3,4373636364	1,8108363636	1,595959596
Average Path Length(after)	2,1784565477	2,1752978574	2,1627469529
Percentage Change(%)	-36,62%	20,13%	35,51%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,3203378908	0,0780470307	0,1841977321
Cluster Coefficient(after)	0,0210110385	0,0210035626	0,0222533617
Percentage Change(%)	-93,44%	-73,09%	-87,92%
Node Degree(before)	8,25	20,46	40,44
Node Degree(after)	23,45	23,72	23,74
Percentage Change(%)	184,24%	15,93%	-41,30%
Closeness Centr.(before)	0,0029683877	0,0055827414	0.006334989814870629
Closeness Centr.((after)	0,0012864834	0,0013012129	0.001401140210315075
Percentage Change(%)	-56,66%	-76,69%	-77,88%
Betweeness Centr.((before)	0,0219840359	0,0051455662	7,88E-004
Betweeness Centr.((after)	0,0028234595	0,0028520677	0,0033
Percentage Change(%)	-87,16%	-44,57%	321,17%

Πίνακας 16 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 350, 1000, 2000.



Εικόνα 54 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 350.



Εικόνα 55 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 1000.



Εικόνα 56 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 2000.

Τυχαίος γράφος	ιε πλήθος	κόμβων 25	50 και ακι	ιές 1100.	1500, 3000:
10,0005,000905	<i>pio majoo</i> 5	100000 20	0 100 <i>1</i> 01.0p	wy 1100,	1000, 00000

E	1100	1500	3000
Average Path Length(before)	2,7783	2,4933127711	1,9927755823
Average Path Length(after)	2,322	2,3128822609	2,3204930551
Percentage Change(%)	-16,42%	-7,24%	16,45%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,0121	0,016590114	0,0342947901
Cluster Coefficient(after)	0,0145	0,0149495901	0,0146375575
Percentage Change(%)	19,83%	-9,89%	-57,32%
Node Degree(before)	7,933	12,16	22,92
Node Degree(after)	23,7333	23,18	25,62
Percentage Change(%)	199,17%	90,63%	11,78%
Closeness Centr.(before)	0,0015	0,0016145021	0,0020173812
Closeness Centr.((after)	8,46E-004	8,85E-004	8,61E-004
Percentage Change(%)	-43,61%	-45,17%	-57,33%
Betweeness Centr.((before)	0,00715	0,0048542949	0,0034736693
Betweeness Centr.((after)	0,00216	0,0020599143	0,0020067463
Percentage Change(%)	-69,79%	-57,57%	-42,23%

Πίνακας 17 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1100, 1500, 3000.



Εικόνα 57 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1100.



Εικόνα 58 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1500.



Εικόνα 59 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 3000.

E	2200	3500	5000
Average Path Length(before)	3,0936	2,6413	2,3911
Average Path Length(after)	2,4925666667	2,4816	2,478
Percentage Change(%)	-19,43%	-6,05%	3,63%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,0061	0,0095	0,0137
Cluster Coefficient(after)	0,00948	0,0097	0,0098
Percentage Change(%)	55,41%	2,11%	-28,47%
Nodo Dograo(hefore)	0 533333333	13 1667	10.18
Node Degree(<i>bejore</i>)	7,333333333	13,1007	17,10
Node Degree(after)	21,73	23,1667	22,74
Percentage Change(%)	127,94%	75,95%	18,56%
Closeness Centr.(before)	5,37E-004	7,60E-004	8,39E-004
Closeness Centr.((after) 6,50E-004		5,37E-004	5,47E-004
Percentage Change(%)	21,00%	-29,27%	-34,85%
Betweeness Centr.((before)	0,0043	0,0026	0,002
Betweeness Centr.((after)	0,00135	0,0013	0,0013
Percentage Change(%)	-68,60%	-50,00%	-35,00%

Πίνακας 18 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2200, 3500, 5000.



Εικόνα 60 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2200.



Εικόνα 61 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 3500.



Εικόνα 62 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 5000.

Τυγαίος γράφο	ς με πλήθος	κόμβων	750 και	ακμές 3500	, 5500.	7500:
					,,	

E	3500	5500	7500
Average Path Length(before)	3,21	2,74	2,54
Average Path Length(after)	2,6	2,56	2,59
Percentage Change(%)	-19,00%	-6,57%	1,97%
Cluster Coefficient(before)	0,0042	0,0069	0,0091
Cluster Coefficient(after)	0,0066	0,0072	0,007
Percentage Change(%)	57,14%	4,34%	-23,08%
Node Degree(before)	7,5	14,37	20,87
Node Degree(after)	17,87	23,25	23
Percentage Change(%)	138,27%	61,79%	10,20%
Closeness Centr.(before)	4,16E-004	4,87E-004	5,25E-004
Closeness Centr.((after)	3,96E-004	4,39E-004	3,87E-004
Percentage Change(%)	-6,25%	-9,85%	-26,28%
Betweeness Centr.((before)	0,003	0,0019	0,0013
Betweeness Centr.((after)	0,0009	0,001	0,001
Percentage Change(%)	-70,00%	-47,37%	-23,08%

Πίνακας 19 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500, 5500, 7500.



Εικόνα 63 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500.



Εικόνα 64 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 5500.



Εικόνα 65 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 7500.

E	5500	7000	10000
Average Path Length(before)	3,14	2,82	2,63
Average Path Length(after)	2,68	2,66	2,65
Percentage Change(%)	-14,65%	-5,67%	0,76%
Cluster Coefficient(before)	0,0035	0,0052	0,007
Cluster Coefficient(after)	0,0053	0,0054	0,006
Percentage Change(%)	51,40%	3,85%	-14,28%
Node Degree(before)	10,6	15,5	20,12
Node Degree(after)	19,9	22	22,4
Percentage Change(%)	84,90%	41,94%	11,33%
	2.105.004	2.505.004	2.705.004
Closeness Centr.(before)	3,10E-004	3,50E-004	3,70E-004
Closeness Centr.((after)	2,90E-004	2,90E-004	3,20E-004
Percentage Change(%)	-6,45%	-17,14%	-13,51%
Betweeness Centr.((before)	0,0021	0,0016	0,001
Betweeness Centr.((after)	0,000834	8,03E-004	8,90E-004
Percentage Change(%)	-60,28%	-49,83%	-11,00%

Πίνακας 20 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500, 7000, 10000.



Εικόνα 66 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500.



Εικόνα 67 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 7000.



Εικόνα 68 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω node churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 10000.

Για κάθε μετρική παρατηρούμε τα εξής:

- Το μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε πλήθος κόμβων στους γράφους με λίγες ακμές μειώνεται ενώ σ' αυτά με πάρα πολλές ακμές αυξάνεται. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο γιατί στα πολύ «πυκνά» γραφήματα αφαιρούνται κόμβοι με πολύ μεγάλο βαθμό και προσθέτονται κόμβοι με μικρό βαθμό (που ισούται με 20 συγκεκριμένα).
- Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης, αντίθετα βλέπουμε ότι στα αραιά γραφήματα αυξάνεται, ενώ στα πυκνά μειώνεται. Τα πυκνά γραφήματα είναι λογικό να έχουν υψηλό συντελεστή ομαδοποίησης, επομένως όταν αφαιρούνται κόμβοι είναι πολύ πιθανό «τρίγωνα» κόμβων να «σπάνε». Αντίστοιχα όταν προσθέτονται τυχαία κόμβοι είναι δύσκολο να σχηματιστούν τέτοια «τρίγωνα» αφού ένας καινούργιος κόμβος στο δίκτυο είναι σχεδόν απίθανο να συνδεθεί με δύο κόμβους που είναι γείτονες μεταξύ τους.
- Ο μέσος βαθμός κόμβου για κάθε πλήθος κόμβων αυξάνεται και όσο πληθαίνουν οι ακμές η μεταβολή είναι μικρότερη. Συγκεκριμένα, ο μέσος βαθμός κόμβου μετά τη μεταβολή πλησιάζει το 20, που είναι ο βαθμός των κόμβων που εισέρχονται στο δίκτυο με το node churn.
- Η closeness και η betweeness centrality στη πλειοψηφία των περιπτώσεων μειώνονται.

5.3.2 Node churn σε scale-free γράφος

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,0129	2,3513090909	2,088
Average Path Length(after)	2,165	2,1668746444	2,186
Percentage Change(%)	-28,14%	-7,84%	4,69%
Cluster Coefficient(before)	0,0176	0,0425349577	0,0634
Cluster Coefficient(after)	0,0217	0,0215863794	0,0211
Percentage Change(%)	23,30%	-49,25%	-66,72%
Nodo Doomo(hafana)	3 72	5 37	6.06
Node Degree(<i>before</i>)	3,72	5,57	0,90
Node Degree(after)	22,32	22	22,07
Percentage Change(%)	500,00%	309,68%	214,40%
Closeness Centr.(before)	0,0034	0,0043472557	0,0049
Closeness Centr.((after)	0,0013	0,0013399252	0,0013
Percentage Change(%)	-61,76%	-69,18%	-73,47%
Betweeness Centr.((before)	0,0259	0,013321927	0,0107
Betweeness Centr.((after)	0,0029	0,0029081995	0,003
Percentage Change(%)	-88%	-78,17%	-71,96%

Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6:

Πίνακας 21 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 69 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn.



Εικόνα 70 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn.



Εικόνα 71 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,4	2,64	2,37
Average Path Length(after)	2,29	2,3	2,32
Percentage Change(%)	-32,37%	-12,87%	-2,10%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,0085	0,0223	0,0316
Cluster Coefficient(after)	0,0135	0,0189	0,0144
Percentage Change(%)	58,82%	-15,25%	-54,43%
Node Degree(<i>before</i>)	3.87	5.66	7,44
Node Degree(after)	22,23	22,188	22,22
Percentage Change(%)	455,00%	292,00%	198,65%
Closeness Centr.(before)	0,0012	0,0015	0,0017
Closeness Centr.((after)	9,92E-004	8,76E-004	8,53E-004
Percentage Change(%)	-17,33%	-41,60%	-50,00%
Betweeness Centr.((before)	0,011885	0,0062	0,0046
Betweeness Centr.((after)	0,00562	0,0046	0,0022
Percentage Change(%)	-52,71%	-25,81%	-52,17%

Πίνακας 22 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 72 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn.



Εικόνα 73 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn.



Εικόνα 74 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,7125	2,8955	3,3976
Average Path Length(after)	2,4875	2,4866	2,4659
Percentage Change(%)	-33,00%	-14,12%	-27,42%
		0.0100	0.4202
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,005575	0,0133	0,4303
Cluster Coefficient(after)	0,0094	0,0097	0,1634
Percentage Change(%)	68,61%	-27,07%	-62,03%
Node Degree(before)	3,9	5,8	7,66
Node Degree(after)	21,6	21,51	21,56
Percentage Change(%)	453,80%	270,70%	181,46%
Closeness Centr.(before)	5,47E-004	6,98E-004	7,75E-004
Closeness Centr.((after)	5,21E-004	5,40E-004	5,28E-004
Percentage Change(%)	-4,83%	-22,70%	-31,87%
Betweeness Centr.((before)	0,0064	0,0036	0,0037
Betweeness Centr.((after)	0,0013	0,0013	0,0018
Percentage Change(%)	-79,69%	-63,89%	-51,35%

Πίνακας 23 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 75 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn.



Εικόνα 76 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn.



Εικόνα 77 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3.29	3.011	2.688
Average Path Length(after)	2,62	2,61	2,61
Percentage Change(%)	-20,36%	-13,31%	-2,90%
Cluster Coefficient(before)	0,0041	0,0096	0,0145
Cluster Coefficient(after)	0,0069	0,0067	0,0067
Percentage Change(%)	70,14%	-30,208	-53,799
Node Degree(before)	3,92	5,85	7,74
Node Degree(after)	21,12	21,13	21,15
Percentage Change(%)	438,00%	261,00%	173,00%
Closeness Centr.(before)	4,10E-004	4,47E-004	5,00E-004
Closeness Centr.((after)	3,75E-004	3,63E-004	3,62E-004
Percentage Change(%)	-8,57%	-18,87%	-27,56%
Betweeness Centr.((before)	0,003	0,0025	0,0018
Betweeness Centr.((after)	9,83E-004	9,34E-004	9,29E-004

Πίνακας 24 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.

-62,64%

-67,23%

Percentage Change(%)

-48,40%



Εικόνα 78 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn.



Εικόνα 79 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn.



Εικόνα 80 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,9	3,1	2,75
Average Path Length(after)	2,69	2,69	2,66
Percentage Change(%)	-32,06%	-14,06%	-3,27%
Cluster Coefficient(before)	0,0032	0,0078	0,0116
Cluster Coefficient(after)	0,005	0,0011	0,0011
Percentage Change(%)	56,25%	-85,8974358974	-90,5%
Node Degree(<i>before</i>)	3.95	5,88	7.75
Node Degree(after)	19,93	20,28	20,4
Percentage Change(%)	403,90%	271,70%	163,00%
Closeness Centr (hofere)	2 60E 004	3 20E 004	3 66F 004
Closeness Centr. ((after)	3.00E-004	3,20E-004	3,00E-004
Percentage Change(%)	17,23%	-4,68%	-18,03%
Betweeness Centr.((before)	0,0034	0,002	0,0014
Betweeness Centr.((after)	9,00E-004	8,90E-004	8,20E-004
Percentage Change(%)	-73,53%	-55,50%	-41,42%

Πίνακας 25 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 81 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω node churn.



Εικόνα 82 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω node churn.



Εικόνα 83 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω node churn.
Για κάθε μετρική παρατηρούμε τα εξής:

- Το μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε πλήθος κόμβων μειώνεται. Κατά τη διάρκεια του node churn όπου η επιλογή προς αφαίρεση κόμβων γίνεται τυχαία, τα hubs παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστα γιατί είναι πολύ λίγα και έτσι είναι σχεδόν απίθανό να επιλεχτούν προς αφαίρεση σε αντίθεση με τους κόμβους μικρού βαθμού που είναι πάρα πολλοί. Έτσι, με το node churn ουσιαστικά αφαιρούνται κόμβοι μικρού βαθμού και οι καινούργιοι κόμβοι συνδέονται με άλλους κόμβους που έχουν επίσης μικρό βαθμό με αποτέλεσμα όλοι οι κόμβοι να έρχονται πιο κοντά μεταξύ τους.
- Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης στη πλειοψηφία των περιπτώσεων μειώνεται. Πράγματι, όπως έχουμε εξηγήσει και σε άλλα σενάρια με την αφαίρεση κόμβων στο node churn σε scale-free γράφο, που είναι αρκετά ομαδοιημένος (clustered), είναι πολύ πιθανό να σπάνε «τρίγωνα» κόμβων ενώ με τη προσθήκη κόμβων είναι δύσκολο να δημιουργούνται τέτοια τρίγωνα γιατί η επιλογή των υποψήφιων γειτόνων είναι απολύτως τυχαία.
- Ο μέσος βαθμός κόμβου σε όλα τα σενάρια αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά node churn επιλέγονται με μεγάλη πιθανότητα κόμβοι με μικρό βαθμό γιατί είναι πάρα πολλοί, προς αφαίρεση, και εισέρχονται κόμβοι με σχετικά υψηλό βαθμό (20 συγκεκριμένα) με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο μέσος βαθμού κόμβου. Επίσης, όπως προαναφέραμε ο μέσος βαθμός κόμβου μετά τη μεταβολή πλησιάζει το 20, που είναι ο βαθμός κόμβου των κόμβων που εισέρχονται στο δίκτυο με το node churn.
- Η closeness και η betweeness centrality στη πλειοψηφία των περιπτώσεων μειώνονται.

5.3.3 Node churn σε small-world γράφο

d	8	16	24	
Average Path Length(before)	3,4364	2,5503	2,1852	
Average Path Length(after)	2,1805	2,1933	2,14	
Percentage Change(%)	-36,55%	-13,9983531349	-2,07%	
Cluster Coefficient(before)	0,3209	0,4073	0,4394	
Cluster Coefficient(after)	0,021	0,02 0,02		
Percentage Change(%)	-93,46%	-95,09%	-94,90%	
Node Degree(before)	8,4	16,4	24,34	
Node Degree(after)	22,46	25,6	24,8	
Percentage Change(%)	167,38%	56,10%	1,89%	
Closeness Centr.(before)	oseness Centr.(<i>before</i>) 0,003		0,0046	
Closeness Centr.((after)	0,0013	0,0012 0,0		
Percentage Change(%)	-56,67%	-70,00%	-69,57%	
Betweeness Centr.((before)	0,0217	0,0127	0,0072	
Betweeness Centr.((after)	0,00295	0,0025	0,003	
Percentage Change(%)	-86,41%	-80,31%	-58,33%	

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 26 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος 8,16,24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 84 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn.



Εικόνα 85 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.



Εικόνα 86 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.

d	8	16	24	
Average Path Length(before)	4,5474	3,3659 2,8		
Average Path Length(after)	2,32	2,32	2,3	
Percentage Change(%)	-48,98%	-31,07%	-20,27%	
Cluster Coefficient(before)	0,3165	0,4006	0,4329	
Cluster Coefficient(after)	0,0146	0,0145	0,0151	
Percentage Change(%)	-95,39%	-96,38%	-96,51%	
Node Degree(before)	8,3	16,5	24	
Node Degree(after)	22,3	24,8	25,9	
Percentage Change(%)	168,67%	50,30%	7,92%	
Closeness Centr.(before)	8,90E-004	0,0012	0,0014	
Closeness Centr.((after)	8,55E-004	9,29E-004	8,66E-004	
Percentage Change(%)	-3,94%	-22,50%	-38,14%	
Betweeness Centr.((before)	0,0118	0,0075	0,0063	
Betweeness Centr.((after)	0,002	0,002	0,0021	
Percentage Change(%)	-83,05%	-73,33%	-66,67%	

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 27 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 87 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn.



Εικόνα 88 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.



Εικόνα 89 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	5,3393	3,9608	3,4354
Average Path Length(after)	2,4848	2,4918	2,48
Percentage Change(%)	-53,46%	-37,09%	-27,81%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0.3159	0.399	0.4315
Cluster Coefficient(after)	0,0099	0,0097	0,0103
Percentage Change(%)	-96,87%	-97,57%	-97,61%
Node Degree(before)	8,6	16,3	24,38
Node Degree(after)	20,9	21,6	22
Percentage Change(%)	143,02%	32,52%	-9,75%
Closeness Centr.(before)	0,006	4,97E-004 5,85E-004	
Closeness Centr.((after)	0,005	4,49E-004	5,42E-004
Percentage Change(%)	-16,67%	-9,65%	-7,44%
Betweeness Centr.((before)	0,0068	0,0046	0,0038
Betweeness Centr.((after)	0,0013	0,0013	0,0013
Percentage Change(%)	-80,88%	-71,74%	-65,79%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 28 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 90 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn.



Εικόνα 91 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.



Εικόνα 92 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	5,86 4,29		3,877
Average Path Length(after)	2,61	2,61	2,59
Percentage Change(%)	-55,46%	-39,16%	-33,20%
Cluster Coefficient(before)	0,3192	0,3979	0,4339
Cluster Coefficient(after)	0,0069	0,0069	0,0072
Percentage Change(%)	-97,84%	4% -98,27% -9	
Node Degree(before)	8,5	16,37	24,38
Node Degree(after)	21,06	21,41	22,13
Percentage Change(%)	147,76%	30,78%	-9,22%
Closeness Centr.(before)	2,29E-004	3,12E-004	3,45E-004
Closeness Centr.((after)	3,70E-004	3,70E-004	3,84E-004
Percentage Change(%)	61,57%	18,66%	11,28%
Betweeness Centr.((before)	0,0049	0,0033	0,0027
Betweeness Centr.((after)	9,64E-004	9,55E-004	9,58E-004
Percentage Change(%)	-80,32%	-71,06%	-64,52%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 29 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 93 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn.



Εικόνα 94 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.



Εικόνα 95 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	5,83	4,49	3,96
Average Path Length(after)	2,69	2,69	2,64
Percentage Change(%)	-53,85%	-40,08%	-33,33%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,3072	0,3957	0,42
Cluster Coefficient(after)	0,0064	0,0107	0,0144
Percentage Change(%)	-97,91%	-97,29%	-96,57%
	0.75	16.125	21.5
Node Degree(<i>before</i>)	8,75	16,125	24,5
Node Degree(after)	18	22,5	24,75
Percentage Change(%)	105,71%	39,53%	1,02%
Closeness Centr.(before)	1,73E-004	2,20E-004	2,50E-004
Closeness Centr.((after)	2,80E-004	2,90E-004	3,20E-004
Percentage Change(%)	62,31%	31,81%	28,00%
Betweeness Centr.((before)	0,0037	0,0027	0,0021
Betweeness Centr.((after)	8,33E-004	8,60E-004	8,40E-004
Percentage Change(%)	-77,40%	-68,15%	-60,00%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 30 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 96 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω node churn.



Εικόνα 97 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.



Εικόνα 98 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω node churn.

Για κάθε μετρική παρατηρούμε τα εξής:

- Το μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε πλήθος κόμβων μειώνεται. Όσο αυξάνονται οι ακμές σε κάθε σενάριο τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή.
- Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης σε όλα τα σενάρια μειώνεται και μάλιστα κατά πολύ περισσότερο σε σχέση με το edge churn. Όπως συμβαίνει με την αφαίρεση ακμών, έτσι και κατά την αφαίρεση κόμβων σπάνε «τρίγωνα» κόμβων. Για να σχηματιστούν νέα «τρίγωνα» θα πρέπει ένας καινούργιος κόμβος να συνδεθεί με δύο κόμβους που είναι γείτονες μεταξύ τους κάτι που είναι αρκετά δύσκολο από άποψη πιθανοτήτων με αποτέλεσμα το δίκτυο να γίνεται πολύ λιγότερο ομαδοποιημένο (clustered).
- Ο μέσος βαθμός κόμβου σε όλα τα σενάρια αυξάνεται και πλησιάζει το 20,
 που είναι ο βαθμός κόμβου των κόμβων που εισέρχονταν στο δίκτυο με το node churn.
- Η closeness centrality για μικρό πλήθος κόμβων μειώνεται ενώ για μεγάλο πλήθος μειώνεται.
- Η betweeneess centrality σε όλα τα σενάρια μειώνεται.

6

Μεταβολή Δικτύου (Network Churn)

6.1 Ανάλυση Μοντέλου Μεταβολής

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζουμε τη μεταβολή δικτύου κατά την οποία ακμές και κόμβοι προσθέτονται και αφαιρούνται στο γράφημα που μελετάμε με τυχαίο τρόπο (network επιλέγουμε churn). Συγκεκριμένα, να προσθέσουμε/αφαιρέσουμε ακμές (edge churn) με πιθανότητα $p_{edge \ churn} = 0.50$ και επιλέγουμε να προσθέσουμε/αφαιρέσουμε κόμβους (node churn) με πιθανότητα $p_{node \ churn} = 1 - p_{edge \ churn} = 0.50$. Αν επιλέξουμε να πραγματοποιήσουμε edge churn τότε εκτελούμε τον αλγόριθμό του edge churn που διατυπώσαμε στο σχετικό κεφάλαιο. Αν επιλέξουμε να πραγματοποιήσουμε node churn εκτελούμε αντίστοιχα τον αλγόριθμο του node churn. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία 2500 φορές (συνολικά 2500 time slots). Στην αρχή και στο τέλος της συγκεκριμένη μεταβολής δικτύου υπολογίζουμε τις μετρικές ανάλυσης της τοπολογίας, δηλαδή το μέσο μήκος μονοπατιού (average path length), το μέσο συντελεστή ομαδοποίησης (average cluster coefficient), το μέσο βαθμό κόμβου (average node degree), τη μέση «κοντινή» (closeness) και ενδιαμεσική (betweeneess) κεντρικότητα και παραθέτουμε τα αποτελέσματα.

6.2 Αλγόριθμος

Αρχικοποίηση:

Βήμα 1: Ορίζεται το πλήθος των time slots ως Τ και η τιμή της πιθανότητας p_{add}.
 Βήμα 2: Κατασκευάζεται το γράφημα με χρήση κατάλληλης συνάρτησης σε μορφή πίνακα γειτνίασης Α.

Βήμα 3: Υπολογίζονται οι μετρικές ανάλυσης του γραφήματος με κατάλληλες συναρτήσεις.

Επαναληπτικός βρόχος t από 1 μέχρι Τ:

Βήμα 6 : Επιλέγεται στη τύχη ένας αριθμός r

Eάν $r < p_{edge \ churn}$ τότε :

Βήμα 7 : Επιλέγεται στη τύχη ένας αριθμός r

Βήμα 8 : Κατασκευάζεται πίνακας zero[N², 2] που σε κάθε γραμμή περιέχει τις συντεταγμένες (i, j) των μηδενικών της άνω τριγωνικής περιοχής του πίνακα A και εκχωρείται σε μια μεταβλητή zeros το πλήθος των μηδενικών.

Βήμα 9 : Κατασκευάζεται ο πίνακας one[N², 2] που περιέχει τις

συντεταγμένες των μονάδων της άνω τριγωνικής περιοχής του πίνακα A και εκχωρείται σε μια μεταβλητή ones το πλήθος των μονάδων

Βήμα 10: Επιλέγεται στη τύχη ένας αριθμός r

Eάν $r < p_{add}$ τότε :

Βήμα 11: Επιλέγεται στη τύχη μια γραμμή k του πίνακα zero και εκχωρούνται στις μεταβλητές i, j οι αντίστοιχες συντεταγμένες zero[k, 1] και zero[k, 2]

Βήμα 12: Στις θέσεις zero[k, 1] και zero[k, 2] εκχωρούνται αντίστοιχα οι τιμές zero[k, zero] και zero[k, zero] και η μεταβλητή zeros μειώνεται κατά 1.

Βήμα 13: Η μεταβλητή ones αυζάνεται κατά 1 και εκχωρούνται στις μεταβλητές one[ones][1] και one[ones][2] οι τιμές i,j. Βήμα 14: Εκχωρείται στις θέσεις Α[i, j] και Α[j, i] η τιμή 1.

Αλλιώς

Βήμα 15: Επιλέγεται στη τύχη μια γραμμή k του πίνακα one και εκχωρούνται στις μεταβλητές i, j οι αντίστοιχες συντεταγμένες one[k, 1] και one[k, 2]

Βήμα 16: Στις θέσεις one[k, 1] και one[k, 2] εκχωρούνται αντίστοιχα οι τιμές one[k, zero] και one[k, zero] και η μεταβλητή ones μειώνεται κατά 1.

Βήμα 17: Η μεταβλητή zero αυζάνεται κατά 1 και εκχωρούνται στις μεταβλητές zeros[zero][1] και zeros[zero][2] οι τιμές i, j. Βήμα 18: Εκχωρείται στις θέσεις Α[i, j] και Α[j, i] η τιμή 0.

Τέλος

Αλλιώς

Βήμα 7: Επιλέγεται στη τύχη ένας αριθμός r

Eάν $r < p_{add}$ τότε :

Βήμα 5: Αυζάνουμε τις διαστάσεις του Α από ΝxΝ σε (N+1)x(N+1). Βήμα 6: Επιλέγουμε τους 20 τυχαίους γείτονες με τον καινούργιο κόμβο και βάζουμε άσσο στις αντίστοιχες θέσεις του πίνακα γειτνίασης.

Βήμα 7: Αυξάνουμε το πλήθος των κόμβων κατά 1

Αλλιώς

Βήμα 5: Επιλέγουμε στη τύχη των κόμβο προς διαγραφή Βήμα 6:Διαγράφουμε την αντίστοιχη γραμμή και στήλη του πίνακα Α. Βήμα 7: Μειώνουμε το πλήθος των κόμβων κατά 1

Τέλος

.

Τέλος

Τέλος

Βήμα 19: Υπολογίζονται ζανά οι μετρικές ανάλυσης του γραφήματος με κατάλληλες συναρτήσεις

6.3 Αποτελέσματα

Στο συγκεριμένο κεφάλαιο παραθέτουμε τα αποτελέσματα της μεταβολής δικτύου σε τυχαίους γράφους, δίκτυα χωρίς-κλίμακα και δίκτυα μικρού-κόσμου.

6.3.1 Network churn σε τυχαίο γράφημα

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τις αριθμητικές τιμές των μετρικών ανάλυσης σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 350, 1000, 2000 πριν και μετά τη μεταβολή δικτύου καθώς και τη ποσοστιαία μεταβολή τους. Όμοια καταγάφονται τα αποτελέσματα για διαφορετικούς γράφους στους υπόλοιπους πίνακες

E	350	1000	2000
Average Path Length(before)	2,2461	1,811	1,59
Average Path Length(after)	1,99885	1,984	1,99451
Percentage Change(%)	-11,01%	9,55%	25,00%
Cluster Coefficient(before)	0,035775	0,077	0,035533
Cluster Coefficient(after)	0,03532	0,031	0,033
Percentage Change(%)	-1,27%	-59,74%	-4,77%
Node Degree(before)	10,025	21,333	40
Node Degree(after)	23,1	22,08	21,8
Percentage Change(%)	130,42%	3,50%	-45,00%
Closeness Centr.(before)	0,0045	0,0056	0,0063
Closeness Centr.((after)	0,0024	0,0024	0,0024
Percentage Change(%)	-46,67%	-57,14%	-61,39%
Betweeness Centr.((before)	0,0111	0,0051	7,88E-004
Betweeness Centr.((after)	0,004	0,0041	0,004
Percentage Change(%)	-63,96%	-19,61%	412,80%

Πίνακας 31 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 350, 1000, 2000.



Εικόνα 99 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 350.



Εικόνα 100 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 1000.



Εικόνα 101 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 100 και ακμές 3000.

E	1100	1500	3000
Average Path Length(before)	2,8747	2,4935	1,9922746988
Average Path Length(after)	2,2	2,1998	2,1847854084
Percentage Change(%)	-23,47%	-11,78%	9,66%
Cluster Coefficient(before)	0,0107	0,0167	0,0345492639
Cluster Coefficient(after)	0,0204	0,0196	0,0204135356
Percentage Change(%)	90,00%	17,37%	-40,91%
Node Degree(<i>before</i>)	7	11,2	22,45
Node Degree(after)	23,05	23,3	25,7
Percentage Change(%)	229,29%	108,04%	14,48%
Closeness Centr.(before)	0,0014	0,0016	0,0020178226
Closeness Centr.((after)	0,00121	0,0012	0,0012371399
Percentage Change(%)	-13,57%	-25,00%	-38,69%
Betweeness Centr.((before)	0,0079	0,0048	0,0034810095
Betweeness Centr.((after)	0,00239	0,0027	0,0027337028
Percentage Change(%)	-69,75%	-43,75%	-21,47%

Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1100, 1500, 3000:

Πίνακας 32 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1100, 1500, 3000.



Εικόνα 102 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 1550.



Εικόνα 103 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 2500.



Εικόνα 104 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 250 και ακμές 5000.

Τυναίος νοάφος	με πλήθος	κόμβων	500 kai	ακμές 2200	3500	5000.
τυχαίος γραφος	με πληθύς	κομρων	500 nui	<i>ακμες 2200</i> ,	, 5500,	5000.

E	2200	3500	5000
Average Path Length(before)	3,0933	2,64	2,31
Average Path Length(after)	2,4523	2,43 2,4	
Percentage Change(%)	-20,72%	-7,95%	3,90%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,0059	0,0095	0,0151
Cluster Coefficient(after)	0,0122	0,0115	0,0118
Percentage Change(%)	106,77%	21,05%	-21,85%
Node Degree(<i>before</i>)	6,6	14,0667	21,73
Node Degree(after)	17,53	21,2	23,13
Percentage Change(%)	165,60%	50,71%	6,44%
Closeness Centr (before)	0.0007	0.0008	0.0009
	0,0007	0,0007	0,0007
Closeness Centr.((after)	0,0007	0,0007	0,0007
Percentage Change(%)	0	-12,5	-22,22%
Betweeness Centr.((before)	0,0041	0,00262	0,0018
Betweeness Centr.((after)	0,0015	0,0015	0,0015
Percentage Change(%)	-63,41%	-42,75%	-16,66%

Πίνακας 33 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2200, 3500, 5000.



Εικόνα 105 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 1550.



Εικόνα 106 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 2500.



Εικόνα 107 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 500 και ακμές 5000.

Tourseland	-1.40		750		5500	7500.
Τυχαίος γράφος μ	με πλήθος	κόμβων	750 και	ακμές 3500	, 5500,	7500:

E	3500	5500	7500	
Average Path Length(before)	3,2	2,57	2,54	
Average Path Length(after)	2,6	2,58	2,55	
Percentage Change(%)	-18,75%	0,39%	0,39%	
Cluster Coefficient(before)	0,0044	0,0065	0,0091	
Cluster Coefficient(after)	0,0075	0,0078 0,008		
Percentage Change(%)	70,45%	20,00%	-12,09%	
Node Degree(before)	8,5	15,25	24	
Node Degree(after)	17	21	24,25	
Percentage Change(%)	100,00% 37,70%		1,04%	
	4 165 004	4 87E 004	1.6	
Closeness Centr.(<i>before</i>)	4,10E-004	4,87E-004	4,0	
Closeness Centr.((after)	4,53E-004	4,67E-004	4,15	
Percentage Change(%)	8,89%	-4,11%	-9,78%	
Betweeness Centr.((before)	0,003	0,0019	0,0013	
Betweeness Centr.((after)	0,0012	0,0012	0,001	
Percentage Change(%)	-60,00%	-36,84%	-23,08%	

Πίνακας 34 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500, 5500, 7500.



Εικόνα 108 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 3500.



Εικόνα 109 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 5500.



Εικόνα 110 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 750 και ακμές 7500.

Turnel a construction of the	-1.40 - 1.40	1000		7000	10000.
Τυναιός νοαφός με	π_{λ} nhoc koursov		akuec and	///////	111111
10,0005 100005 00		1000 1000	0.0000000000000000000000000000000000000	,000,	10000.

E	5500	7000	10000
Average Path Length(before)	3,14	2,82	2,6383
Average Path Length(after)	2,71	2,67	2,6322
Percentage Change(%)	-13,69%	-5,32%	-0,23%
Cluster Coefficient(before)	0,0035	0,005	0,0067
Cluster Coefficient(after)	0,0056	0,0059	0,0062
Percentage Change(%)	60,00%	18,00%	7,46%
Node Degree(before)	11	16	20
Node Degree(after)	20,5	18	22,5
Percentage Change(%)	86,3636363636	12,5	12,5
		0.000.4	0.000.1
Closeness Centr.(before)	0.0003	0,0004	0,0004
Closeness Centr.((after)	0,0003	0,0003	0,0003
Percentage Change(%)	0	-25	-25
Betweeness Centr.((before)	0,0021	0,0016	0,001
Betweeness Centr.((after)	0,0011	0,001	0,0009
Percentage Change(%)	-47,619047619	-37,5	-10

Πίνακας 35 Τυχαίος γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500, 7000, 10000.



Εικόνα 111 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 5500.



Εικόνα 112 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 7500.



Εικόνα 113 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών λόγω network churn σε τυχαίο γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και ακμές 10000.

Για κάθε μετρική παρατηρούμε τα εξής:

- Το μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε πλήθος κόμβων στα γραφήματα με λίγες ακμές μειώνεται ενώ σ' αυτά με πάρα πολλές ακμές αυξάνεται.
- Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης, αντίθετα βλέπουμε ότι στα αραιά γραφήματα αυξάνεται ενώ στα πυκνά μειώνεται.
- Ο μέσος βαθμός κόμβου για κάθε πλήθος κόμβων αυξάνεται, όσο πληθαίνουν οι ακμές η μεταβολή είναι μικρότερη και σε όλα τα σενάρια πλησιάζει τον αριθμό 20, που είναι ο βαθμός κόμβου των κόμβων που εισέρχονταν στο δίκτυο με το node churn.
- Η closeness centrality μειώνεται και όσο αυξάνονται οι ακμές η μεταβολή γίνεται μεγαλύτερη, ενώ η betweeneess centrality μειώνεται και όσο αυξάνονται οι ακμές η μεταβολή γίνεται μικρότερη.

6.3.2 Network churn σε scale free γράφημα

Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6:

· · ·		T .	
d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,03024	2,3587	2,1005
Average Path Length(after)	1,995	1,9978	1,9771
Percentage Change(%)	-34,16%	-15,30%	-5,87%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,0175	0,0422	0,0629
Cluster Coefficient(after)	0,0359	0,0349	0,0382
Percentage Change(%)	105,14%	-17,30%	-39,27%
Node Degree(<i>before</i>)	3.72	6.98	9.98
	20.59	-,	22.04
Node Degree(after)	22,58	22,19	22,04
Percentage Change(%)	506,70%	217,90%	120,80%
Closeness Centr.(before)	0,0034	0,0043	0,0049
Closeness Centr.((after)	0,0023	0,0022	0,0025
Percentage Change(%)	-32,35%	-48,84%	-48,98%
Betweeness Centr.((before)	0,0257	0,0134	0,0106
Betweeness Centr.((after)	0,004	0,0039	0,0041
Percentage Change(%)	-84,44%	-70,90%	-61,32%

Πίνακας 36 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 114 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω network churn.



Εικόνα 115 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω network churn.



Εικόνα 116 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω network churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,3972	2,6597	2,3916
Average Path Length(after)	2,2046	2,1941	2,1891
Percentage Change(%)	-35,11%	-17,51%	-8,47%
	0.0097	0.0227	0.022
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,0087	0,0227	0,032
Cluster Coefficient(after)	0,0198	0,0203	0,0207
Percentage Change(%)	127,59%	-10,57%	-35,31%
Node Degree(<i>before</i>)	3,9	7,5	11,2
Node Degree(after)	21,98	21,5	22
Percentage Change(%)	463,00%	186,00%	48,00%
Closeness Centr.(before)	0,0012	0,0015	0,0017
Closeness Centr.((after)	0,0012	0,0012	0,0013
Percentage Change(%)	0	-20	-23,53%
Betweeness Centr.((before)	0,0116	0,0063	0,0046
Betweeness Centr.((after)	0,0028	0,0028	0,0029
Percentage Change(%)	-75,86%	-55,56%	-36,96%

Πίνακας 37 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 117 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω network churn.



Εικόνα 118 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω network churn.



Εικόνα 119 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω network churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	5,2636	3,98	3,463
Average Path Length(after)	2,456	2,42	2,4
Percentage Change(%)	-54,37%	-39,20%	-29,41%
Cluster Coefficient(before)	0,0055	0,0134	0,0196
Cluster Coefficient(after)	0,0108	0,0111	0,0117
Percentage Change(%)	96,36%	-17,16%	-40,30%
Node Degree(<i>before</i>)	3,91	7,69	11,4
Node Degree(after)	20,15	20,7	20,85
Percentage Change(%)	416,60%	168,80%	82,40%
Closeness Centr.(before)	0,0004	7,01E-004	7,79E-004
Closeness Centr.((after)	0,0007	6,54E-004	6,54E-004
Percentage Change(%)	75%	-7,12%	-16,02%
Betweeness Centr.((before)	0,0067	0,0045	0,0037
Betweeness Centr.((after)	0,0015	0,0015	0,0015
Percentage Change(%)	-77,61%	-66,66%	-59,45%

Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6:

Πίνακας 38 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 120 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω network churn.



Εικόνα 121 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω network churn.



Εικόνα 122 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω network churn.

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,87	3,07	2,73
Average Path Length(after)	2,64	2,61	2,58
Percentage Change(%)	-31,78%	-14,98%	-5,49%
Cluster Coefficient(before)	0,0042	0,0096	0,148
Cluster Coefficient(after)	0,0079	0,0073	0,009
Percentage Change(%)	88,09%	-23,95%	-93,91%
Node Degree(before)	3,96	7,9	11,5
Node Degree(after)	17	19	19,9
Percentage Change(%)	325,00%	140,50%	73.04%
Closeness Centr.(before)	4,44E-004	4,70E-004	4,91E-004
Closeness Centr.((after)	4,34E-004	4,33E-004	4,46E-004
Percentage Change(%)	-2,25%	-7,93%	-9,24%
Betweeness Centr.((before)	0,0044	0,0025	0,0018
Betweeness Centr.((after)	0,0014	0,0012	0,0011
Percentage Change(%)	3,87%	3,07%	2,73%

Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6:

Πίνακας 39 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.



Εικόνα 123 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω network churn.



Εικόνα 124 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω network churn.



Εικόνα 125 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω network churn

d	2	4	6
Average Path Length(before)	3,9593	3,13	2,75
Average Path Length(after)	2,788	2,73	2,71
Percentage Change(%)	-29,583%	-12,77%	-1,45%
Cluster Coefficient(before)	0.0027	0.0076	0.0111
Cluster Coefficient(<i>bejore</i>)	0,0027	0,0070	0,0111
Cluster Coefficient(after)	0,0052	0,0057	0,0058
Percentage Change(%)	92,59%	-25%	-47,74
Node Degree(before)	3,95	7,8	11,6
Node Degree(after)	16,8	17,67	19,4
Percentage Change(%)	325,31%	125,00%	67,24%
Closeness Centr.(before)	2,56E-004	3,22E-004	3,66E-004
Closeness Centr.((after)	3,13E-004	3,19E-004	3,43E-004
Percentage Change(%)	22,118%	-0,90%	-6,174%
Betweeness Centr.((before)	0,0034	0,002	0,0014
Betweeness Centr.((after)	0,0012	0,0011	0,0011
Percentage Change(%)	-64,70%	-45%	-21,428%

Πίνακας 40 Scale-free γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2, 4, 6.


Εικόνα 126 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=2 λόγω network churn.



Εικόνα 127 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=4 λόγω network churn.



Εικόνα 128 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε scale-free γράφο με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος d=6 λόγω network churn.

Για κάθε μετρική παρατηρούμε τα εξής:

- Το μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε πλήθος κόμβων μειώνεται. Όσο πληθαίνουν οι ακμές, τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή.
- Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης για λίγες ακμές αυξάνεται, ενώ για πολλές ακμές μειώνεται.
- Ο μέσος βαθμός κόμβου σε όλα τα σενάρια αυξάνεται και πλησιάζει το 20, που είναι ο βαθμός κόμβου των κόμβων που εισέρχονταν στο δίκτυο με το node churn.
- Η closeness centrality μειώνεται και όσο πληθαίνουν οι ακμές η μεταβολή γίνεται μεγαλύτερη.
- Η betweeness centrality μειώνεται και όσο πληθαίνουν οι ακμές η μεταβολή γίνεται μικρότερη.

6.3.3 Network churn σε small world γράφημα

d	8	16	24
Average Path Length(before)	3,4616	2,5559	2,1898
Average Path Length(after)	2,0108	1,987	2,0016
Percentage Change(%)	-41,91%	-22,26%	-8,59%
Cluster Coefficient(before)	0,3225	0,405	0,4403
Cluster Coefficient(after)	0,0338	0,0358	0,035
Percentage Change(%)	-89,52%	-91,16%	-92,05%
	0.25	16.45	24.2
Node Degree(<i>before</i>)	8,35	16,45	24,2
Node Degree(after)	24,5	26,6	23,75
Percentage Change(%)	193,41%	61,70%	-1,86%
Closeness Centr.(before)	0,003	0,004	0,0046
Closeness Centr.((after)	0,0022	0,0023	0,0023
Percentage Change(%)	-26,67%	-42,50%	-50,00%
Betweeness Centr.((before)	0,0217	0,0126	0,0073
Betweeness Centr.((after)	0,0039	0,0039	0,004
Percentage Change(%)	-82,03%	-69,05%	-45,21%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 41 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 100 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 129 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω network churn.



Εικόνα 130 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.



Εικόνα 131 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 100, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	4,4784	3,3734	2,9013
Average Path Length(after)	2,1923	2,1845	2,16
Percentage Change(%)	-51,04%	-35,24%	-25,55%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,3156	0,4009	0,4344
Cluster Coefficient(after)	0,0202	0,0206	0,0216
Percentage Change(%)	-93,59%	-94,86%	-95,027%
Node Degree(<i>before</i>)	8.35	16.3	24.5
Node Degree(after)	22,7	21,45	24,3
Percentage Change(%)	171,85%	31,59%	-0,816%
Closeness Centr.(before)	0,009	0,0012	0,0014
Closeness Centr.((after)	0,0012	0,0013	0,0013
Percentage Change(%)	33,33%	8,33%	-7,1428571429%
Betweeness Centr.((before)	0,0117	0,0075	0,0064
Betweeness Centr.((after)	0,0028	0,0028	0,0029
Percentage Change(%)	-76,068%	-62,666%	-54,6875%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 42 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 250 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 132 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω network churn.



Εικόνα 133 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.



Εικόνα 134 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 250, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	4,95	4,2097	3,52
Average Path Length(after)	2,4675	2,42	2,3939
Percentage Change(%)	-50,15%	-42,51%	-31,99%
Cluster Coefficient(before)	0 30/3	0.4072	0.4355
Cluster Coefficient(<i>bejore</i>)	0,50+5	0,4072	0,4355
Cluster Coefficient(after)	0,0116	0,0147	0,0191
Percentage Change(%)	-96,18%	-96,38%	-95,61%
Node Degree(before)	8	16	24,35
Node Degree(after)	20	19	22,7
Percentage Change(%)	150%	18%	-6,77%
Closeness Centr.(before)	4,07E-004	4,79E-004	5,69E-004
Closeness Centr.((after)	6,24E-004	6,38E-004	7,37E-004
Percentage Change(%)	53,45%	33,27%	29,52%
Betweeness Centr.((before)	0,0068	0,0046	0,0037
Betweeness Centr.((after)	0,0015	0,0015	0,0017
Percentage Change(%)	-77,9411764706	-67,3913043478	-54,0540540541

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 43 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 500 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2



Εικόνα 135 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω network churn.



Εικόνα 136 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.



Εικόνα 137 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 500, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	5,8	4,22	3,73
Average Path Length(after)	2,62	2,58	2,55
Percentage Change(%)	-54,82%	-38,86%	-31,63%
Chuster Coefficient(hefere)	0.2127	0.2042	0.4225
Cluster Coefficient(<i>bejore</i>)	0,5157	0,3942	0,4323
Cluster Coefficient(after)	0,0099	0,0187	0,0338
Percentage Change(%)	-96,84%	-95,25%	-92,18%
Node Degree(<i>before</i>)	9	16	24
Node Degree(after)	16	20	28
Percentage Change(%)	8,0625%	25%	16,66%
Closeness Centr.(before)	2,33E-004	3,17E-004	3,56E-004
Closeness Centr.((after)	4,49E-004	4,40E-004	4,50E-004
Percentage Change(%)	92,94%	38,77%	26,404%
Betweeness Centr.((before)	0,0048	0,0033	0,0027
Betweeness Centr.((after)	0,0013	0,0011	0,0011
Percentage Change(%)	-72,9%	-66,66%	-59,25%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 44 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 750 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2



Εικόνα 138 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω network churn.



Εικόνα 139 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.



Εικόνα 140 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 750, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.

d	8	16	24
Average Path Length(before)	5,95	4,62	3,98
Average Path Length(after)	2,75	2,69	2,65
Percentage Change(%)	-53,78%	-41,77%	-33,41%
Cluster Coefficient(<i>before</i>)	0,311	0,3996	0,4309
Cluster Coefficient(after)	0,0108	0,0299	0,0508
Percentage Change(%)	-96,52%	-92,51%	-88,21%
Node Degree(<i>before</i>)	8	16,5	25
Node Degree(after)	13	19	24
Percentage Change(%)	62,5%	15,15%	-4%
Closeness Centr.(before)	1,60E-004	2,10E-004	2,52E-004
Closeness Centr.((after)	3,40E-004	3,20E-004	3,60E-004
Percentage Change(%)	112,5%	52,38%	42,800
Betweeness Centr.((before)	0,0038	0,0027	0,0021
Betweeness Centr.((after)	0,0013	9,70E-004	9,90E-004
Percentage Change(%)	-65,78%	-64,07%	-52,866%

Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$

Πίνακας 45 Small-world γράφος με πλήθος κόμβων 1000 και βαθμό αρχικού πλέγματος 8, 16, 24 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2.



Εικόνα 141 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=8 και πιθανότητα ανακατασκευής β=0.2 λόγω network churn.



Εικόνα 142 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=16 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.



Εικόνα 143 Ποσοστιαία μεταβολή των μετρικών σε small-world γράφο με πλήθος κόμβων 1000, βαθμό αρχικού πλέγματος d=24 και πιθανότητα ανακατασκευής $\beta=0.2$ λόγω network churn.

Για κάθε μετρική παρατηρούμε τα εξής:

- Το μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε πλήθος κόμβων μειώνεται. Όσο αυξάνονται οι ακμές σε κάθε σενάριο τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή.
- Ο μέσος συντελεστής ομαδοποίησης σε όλα τα σενάρια μειώνεται σταθερά.
- Ο μέσος βαθμός κόμβου σε όλα τα σενάρια αυξάνεται και πλησιάζει το 20, που είναι ο βαθμός κόμβου των κόμβων που εισέρχονταν στο δίκτυο με το node churn.
- Η closeness centrality αυξάνεται.
- Η betweeneess centrality σε όλα τα σενάρια μειώνεται.

.

7

Επίλογος

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, για την κάθε μεταβολή δικτύου προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Κατά τη μεταβολή edge churn σε τυχαίο γράφο, προσθέτονται περισσότερες ακμές από αυτές που αφαιρούνται, με τυχαίο τρόπο, και έτσι το γράφημα παραμένει τυχαίο, αλλά γίνεται πιο πυκνό. Για αυτό το λόγο, όπως βλέπουμε και από τα αποτελέσματα, το μέσο μήκος μονοπατιού και η betweeneess centrality μειώνονται, ενώ ο μέσος βαθμός κόμβου, ο συντελεστής ομαδοποίησης και η closeness centrality αυξάνονται.
- Κατά τη μεταβολή edge churn σε scale-free γράφο βλέπουμε ότι για μικρό πλήθος ακμών, ο συντελεστής ομαδοποίησης αυξάνεται, το μέσο μήκος μονοπατιού μειώνεται, η κεντρικότητα εγγύτητας αυξάνεται και η ενδιαμεσική κεντρικότητα μειώνεται. Το αντίθετο συμβαίνει για μεγάλο πλήθος ακμών. Επειδή προσθέτονται περισσότερες ακμές από αυτές που αφαιρούνται ο μέσος βαθμός κόμβου προφανώς αυξάνεται.

- Κατά τη μεταβολή edge churn σε small-world γράφημα βλέπουμε ότι μειώνεται το μέσο μήκος μονοπατιού και η betweeneess centrality και αυξάνεται ο μέσος βαθμός κόμβου και η closeness centrality. Ο συντελεστής ομαδοποίησης μειώνεται κατά πολύ μεγάλο βαθμό επειδή κατά την αφαίρεση ακμών πλήθος «τριγώνων» που σχηματίζουν κόμβοι «σπάνε», ενώ κατά την προσθήκη ακμής δεν δημιουργούνται εύκολα τέτοια τρίγωνα, γιατί όταν δυο κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με μια καινούργια ακμή είναι λίγες οι πιθανότητες να έχουν κοινό γείτονα μεταξύ τους.
- Κατά τη μεταβολή node churn σε τυχαίο γράφο παρατηρούμε ότι σε γράφους με λίγες ακμές μειώνεται το μέσο μήκος μονοπατιού και ο συντελεστής ομαδοποίησης αυξάνεται ενώ σε γράφους με πολλές ακμές το μέσο μήκος μονοπατιού αυξάνεται και μειώνεται ο συντελεστής ομαδοποίησης. Αυτό οφείλεται στο ότι ο μέσος βαθμός κόμβου συνεχώς αυξάνεται (πλησιάζει το 20 συγκεκριμένα) που σημαίνει ότι κόμβοι με μικρό βαθμό αποχωρούν από το δίκτυο και κόμβοι με μεγάλο βαθμό (20) εισέρχονται σε αυτό. Παρατηρούμε ότι betweeneess και closeness centrality μειώνονται.
- Κατά τη μεταβολή node churn σε scale-free γράφημα παρατηρούμε ότι επίσης ο βαθμός κόμβου αυξάνεται. Κάτι τέτοιο είναι λογικό γιατί στα scale-free γραφήματα υπάρχει μεγάλο πλήθος από κόμβους που έχουν μικρό βαθμό και επομένως κατά το node churn τέτοιοι κόμβοι επιλέγονται με μεγάλη πιθανότητα προς αφαίρεση. Στο δίκτυο εισέρχονται κόμβους μικρού βαθμού κατά πάσα πιθανότητα με αποτέλεσμα να μειώνεται το μέσο μήκος μονοπατιού, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα. Φυσικά, η μεγάλη αυτή αύξηση του μέσου βαθμού κόμβου επηρεάζει το μέσο μήκος μονοπατιού, το οποίο συνεχώς μειώνεται. Επίσης, όσο πληθαίνουν οι ακμές στα γραφήματα το δίκτυο γίνεται πιο «clustered» και όσο πιο συντελεστή ομαδοποίησης με τις τυχαίες αλλαγές του node churn, κάτι που βλέπουμε και από τους πίνακες. Οι closeness και betweeneess centrality μειώνοται.

- Κατά τη μεταβολή node churn σε small-world γράφημα βλέπουμε παρόμοιες μεταβολές με αυτές του edge churn. Ο μέσος βαθμός κόμβου αυξάνεται και πλησιάζει τον αριθμό 20 και το μέσο μήκος μονοπατιού μειώνεται. Ο συντελεστής ομαδοποίησης, που είναι πολύ υψηλός σε αυτά τα δίκτυα μειώνεται συντριπτικά λόγω των τυχαίων αλλαγών. Οι closeness και betweeneess centrality μειώνονται.
- Κατά τη μεταβολή network churn βλέπουμε σε όλους τους γράφους ότι οι μεταβολές στις μετρικές πλησιάζουν τη μέση τιμή των αντίστοιχων μεταβολών του node και edge churn, κάτι που είναι πολύ λογικό αφού στον αλγόριθμό του network churn εκτελείται με πιθανότητα 0.5 ο αλγόριθμος του edge churn όπως και αυτός του node churn.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Δεδομένου ότι τα πολύπλοκα και δυναμικά δίκτυα έχουν πολλές και ποικίλες εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο και κερδίζουν συνεχώς το ενδιαφέρον των ερευνητών, υπάρχουν πολλές προοπτικές για βελτίωση στη μελέτη της συμπεριφοράς τους και διεκπεραίωση πειραματισμών. Συγκεκριμένα, μπορεί κατ' αρχάς να γίνει η κατασκευή διάφορων μοντέλων τοπολογιών που να αναπαριστούν ακριβέστερα συγκεκριμένους τύπους δικτύων που εντοπίζονται στον πραγματικό κόσμο και να εφαρμοστεί πάνω σε αυτά η μεταβολή δικτύου. Επίσης, μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε η πραγματοποίηση αλγόριθμων μεταβολής δικτύων όπου η επιλογή για αφαίρεση/προσθήκη μιας ακμής ή ενός κόμβου θα βασίζεται σε ορισμένα κριτήρια πχ κόστος ακμής, βαθμός κόμβου και δεν θα είναι εντελώς τυχαία.

8

Βιβλιογραφία

[1] Berger, M. (1954). Freedom and control in modern society. New York: Van Nostrand.

[2] Kossinets, G., & Watts, D. J. (2006). Empirical analysis of an evolving social network. *science*, *311*(5757), 88-90.

[3] Rapoport, A. (1953). Spread of information through a population with sociostructural bias: Assumption of transitivity. *The bulletin of mathematical biophysics*, *15*(4), 523-533.

[4]Granovetter, M. S. (1973). The strength of weak ties. *American journal of sociology*, 1360-1380.

[5] Albert, R., & Barabási, A. L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern physics*, 74(1), 47.

[6] Newman, M. E. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM review*, 45(2), 167-256.

[7] Strogatz, S. H. (2001). Exploring complex networks. *Nature*, 410(6825), 268-276.

[8] Karyotis, V., Stai, E., & Papavassiliou, S. (2013). *Evolutionary Dynamics of Complex Communications Networks*. CRC Press.

[9] Beauchamp, M. A. (1965). An improved index of centrality. *Behavioral science*, *10*(2), 161-163.

[10] Friedkin, N. E. (1991). Theoretical foundations for centrality measures. *American journal of Sociology*, 1478-1504.

- [11] Erdös, P., & Rényi, A. (1960). On the evolution of random graphs. *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci*, *5*(17-61), 43.
- [12] Gilbert, E. N. (1961). Random plane networks. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 9(4), 533-543.

[13]L. Sattenspiel and C. P. Simon, "The spread and persistence of infectious diseases in structured populations," Mathematical Biosciences 90, 367–383 (1988).

[14] R. M. Anderson and R. M. May, "Susceptible–infectious– recovered epidemic models with dynamic partnerships," Journal of Mathematical Biology 33, 661–675 (1995).

[15] M. Kretschmar and M. Morris, "Measures of concurrency in networks and the spread of infectious disease," Mathematical Biosciences 133, 165–195 (1996).

[16]Newman, M. E., Strogatz, S. H., & Watts, D. J. (2001). Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications. *Physical review E*, 64(2), 026118.

[17]Albert, R., & Barabási, A. L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern physics*, 74(1), 47.

[18]Newman, M. E. (2002). Random graphs as models of networks. *arXiv preprint cond-mat/0202208*.

[19]Albert, R., & Barabási, A. L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern physics*, 74(1), 47.

[20]Watts, D. J. (2004). *Six degrees: The science of a connected age*. WW Norton & Company.

[21]Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world'networks. *nature*, 393(6684), 440-442.