



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

Διαχείριση και Μετανάστευση Υπηρεσιών στις Παρυφές του Δικτύου

ΤΥΜΠΑΛΕΞΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Επιβλέπων
ΚΟΛΟΜΒΑΤΣΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Λαμία, Φεβρουάριος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

INFORMATICS AND COMPUTATIONAL BIOMEDICINE

Service Management and Migration at the Edge

TYMPLALEXIS NIKOLAOS

Master thesis
Konstantinos Kolomvatsos

Lamia, February 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ

«ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
ΜΕΓΑΛΟΥ ΟΓΚΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ»

Διαχείριση και Μετανάστευση Υπηρεσιών στις
Παρυφές του Δικτύου

ΤΥΜΠΑΛΕΞΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων
Κωνσταντίνος Κολομβάτσος

Λαμία, Φεβρουάριος 2024

«Υπεύθυνη Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης»

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, και γνωρίζοντας τις συνέπειες της λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα και ενυπογράφως ότι η παρούσα εργασία με τίτλο “Διαχείριση και Μετανάστευση Υπηρεσιών στις Παρυφές του Δικτύου” αποτελεί προϊόν αυστηρά προσωπικής εργασίας και όλες οι πηγές από τις οποίες χρησιμοποίησα δεδομένα, ιδέες, φράσεις, προτάσεις ή λέξεις, είτε επακριβώς (όπως υπάρχουν στο πρωτότυπο ή μεταφρασμένες) είτε με παράφραση, έχουν δηλωθεί κατάλληλα και ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο ΔΗΛΩΝ

Ημερομηνία

Υπογραφή



Διαχείριση και Μετανάστευση Υπηρεσιών στις Παρυφές του Δικτύου

ΤΥΜΠΑΛΑΞΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Τριμελής Επιτροπή:

Κων/νος Κολομβάτσος, Επίκουρος Καθηγητής ΠΘ, (επιβλέπων)

Αθανάσιος Λουκόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΘ

Νικόλαος Τζιρίτας, Επίκουρος Καθηγητής ΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο σύγχρονο τοπίο, μια αξιοσημείωτη τάση περιλαμβάνει τη σύγκλιση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και των υποδομών Edge Computing (EC), με στόχο τη δημιουργία ενός οικοσυστήματος συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σε κοντινή απόσταση με τους χρήστες για τη βελτίωση της απόδοσης των εφαρμογών. Αυτό επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης στην επεξεργασία δεδομένων και την παροχή υπηρεσιών.

Οι κόμβοι EC διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη φιλοξενία υπηρεσιών, στην εκτέλεση εργασιών που τίθενται από τελικούς χρήστες ή εξωτερικές εφαρμογές. Δεδομένων των περιορισμών αυτών, η εφαρμογή ενός αποτελεσματικού πλαισίου για τη διαχείριση υπηρεσιών σε κατακεντρωμένους κόμβους άκρων καθίσταται επιτακτική ανάγκη.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει ένα προδραστικό μοντέλο που έχει σχεδιαστεί για τη στρατηγική κατανομή υπηρεσιών στο οικοσύστημα EC με βάση την παρατηρούμενη ζήτηση. Ο στόχος είναι να προσδιοριστούν οι βέλτιστες θέσεις για μεμονωμένες υπηρεσίες, τοποθετώντας τις σε κόμβους EC με αυξημένη ζήτηση, ενώ παράλληλα εξοικονομούνται πόροι με τον περιορισμό του αριθμού των κόμβων φιλοξενίας. Η εργασία διερευνά εκτενώς την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου μέσω μιας συγκριτικής ανάλυσης με ένα βασικό σύστημα, χρησιμοποιώντας πραγματικά σύνολα δεδομένων.

Ειδικότερα, η αξιολόγηση των προτεινόμενων μοντέλων διερευνάται εκτενώς μέσω συγκριτικής ανάλυσης με δύο βασικά μοντέλα Erdős-Renyi και Barabási-Albert, χρησιμοποιώντας πραγματικά σύνολα δεδομένων. Η πειραματική επικύρωση καταδεικνύει ότι η προληπτική

προσέγγιση ενισχύει σημαντικά την ικανότητα των διαφορετικών κόμβων άκρων να συμπεραίνουν με ακρίβεια τις κατάλληλες θέσεις για την τοποθέτηση υπηρεσιών.

Έχει αναπτυχθεί κώδικας ο οποίος προσομοιώνει με ρεαλιστικά δεδομένα και τα δύο μοντέλα. Εκτελώντας πειράματα και αλλάζοντας τις παραμέτρους κατανοούμε ότι η ζήτηση υπηρεσιών στο περιβάλλον edge μπορεί να βελτιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνολογίες.

Η έρευνα συμβάλλει στις τρέχουσες συζητήσεις σχετικά με την αποτελεσματική διαχείριση υπηρεσιών σε περιβάλλοντα υπολογιστών άκρων, προσφέροντας ιδέες σχετικά με τις πιθανές βελτιώσεις σε σχέση με τα καθιερωμένα μοντέλα.

ABSTRACT

In the current landscape, a notable trend involves the convergence of the Internet of Things (IoT) and Edge Computing (EC) infrastructures, with the goal of creating an ecosystem of near-end data collection and processing to improve application performance. This is achieved by minimizing latency in data processing and service delivery.

EC nodes play a key role in hosting services, performing tasks prompted by end users or external applications, and serve as intermediaries for transferring data to the Cloud backend. Given the limitations of these nodes, implementing an effective framework for service management in distributed edge nodes becomes imperative.

This paper presents a predictive model designed for strategic service allocation in the EC ecosystem based on the observed demand.

The goal is to determine the optimal locations for individual services by placing them in EC nodes with increased demand, while saving resources by limiting the number of hosting nodes. The paper extensively explores the evaluation of the proposed model through a comparative analysis with a baseline system using real datasets.

In particular, the evaluation of the proposed model is extensively explored through a comparative analysis with two baseline models Erdős-Renyi and Barabási-Albert, using real datasets.

Experimental validation demonstrates that the predictive approach significantly enhances the ability of different edge nodes to accurately infer the appropriate locations for service placement.

Code has been developed that simulates both models with realistic data. By running experiments and changing the parameters we understand that service demand in the edge environment can be optimized using these technologies.

The research contributes to current discussions on efficient service management in edge computing environments by offering insights on potential improvements over established models.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΣΤΙΣ ΠΑΡΥΦΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	23
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ.....	23
3.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ EDGE COMPUTING	24
3.3 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	26
3.3.Α ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΟΓΚΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	26
3.3.Β ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ	27
3.4 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΡΑΦΩΝ	29
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	29
4.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	29
4.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΓΡΑΦΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	31
4.4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΓΡΑΦΩΝ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΤΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	38
5.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	38
5.2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ERDOS-RENYI.....	43
5.3 ΜΟΝΤΕΛΟ BARABASI-ALBERT ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	45
5.4 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	46
5.5 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ KAMADA - KAWAI	47
5.6 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥΣ	51
5.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥΣ.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	56
6.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	56
6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	57
6.3 ΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	63
6.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ	71
6.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΙΚΩΝ	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	87
7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ	87

7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	89
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</u>	<u>93</u>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή

Η σύγκλιση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και των υποδομών Edge Computing (EC) δημιουργεί το οικοσύστημα Pervasive Edge Computing (PEC). Αυτό το δυναμικό περιβάλλον περιλαμβάνει συνεχείς αλληλεπιδράσεις μεταξύ πολυάριθμων συσκευών τόσο στο IoT όσο και στο EC, δημιουργώντας μια ιδιαίτερα δυναμική διαμόρφωση. Ενώ οι συσκευές IoT υπερέχουν στη συλλογή δεδομένων για μεταφορά στο Cloud, η στήριξη αποκλειστικά στην επεξεργασία που βασίζεται στο Cloud οδηγεί σε αυξημένη καθυστέρηση και αρνητικές επιπτώσεις στο εύρος ζώνης του δικτύου. Το EC αντιμετωπίζει αυτές τις προκλήσεις με την επεξεργασία δεδομένων κοντά στις πηγές και τους τελικούς χρήστες, ελαχιστοποιώντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας τις επιδόσεις μέσω της κατανεμημένης εκτέλεσης κόμβων.

Σε αυτό το πλαίσιο, η στρατηγική τοποθέτηση των υπηρεσιών σε κόμβους άκρων καθίσταται ζωτικής σημασίας. Η τοποθέτηση υπηρεσιών περιλαμβάνει την εγκατάσταση προκαθορισμένων στοιχείων λογισμικού και μηχανισμών αποθήκευσης που ευθυγραμμίζονται με συγκεκριμένες υπολογιστικές εργασίες. Η πρόκληση έγκειται στην αποτελεσματική υπαγόρευση των υπηρεσιών που υπάρχουν σε κάθε ακραίο κόμβο, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμένους πόρους τους. Η παράβλεψη της συνάφειας των εργασιών κατά την τοποθέτηση υπηρεσιών μπορεί να οδηγήσει σε συχνές μετακινήσεις υπηρεσιών και επιβάρυνση του συστήματος. Η αναγνώριση της σύνδεσης μεταξύ της τοποθέτησης υπηρεσιών και της ζήτησης εργασιών είναι απαραίτητη για αποδοτικά και αποτελεσματικά συστήματα EC, ιδίως για την ικανοποίηση των περιορισμών καθυστέρησης των σύγχρονων εφαρμογών.

Με κίνητρο αυτές τις προκλήσεις, προτείνεται ένα μοντέλο για την προληπτική τοποθέτηση υπηρεσιών με βάση την παρατηρούμενη ζήτηση. Η προσέγγισή μας επικεντρώνεται στη δυναμική τοποθέτηση υπηρεσιών στον ελάχιστο αριθμό κόμβων, αντιμετωπίζοντας τις ιδιαίτερες προκλήσεις που σχετίζονται με αυτό το έργο. Το μοντέλο καθορίζει στρατηγικά τις βέλτιστες θέσεις υπηρεσιών εντός του οικοσυστήματος, στοχεύοντας σε περιοχές με υψηλή ζήτηση και κόμβους που συνδέονται με πολλούς ομότιμους. Μετά την τοποθέτηση των υπηρεσιών, οι κόμβοι έχουν ευελιξία στη μετεγκατάσταση των υπηρεσιών που λείπουν από κοντινούς ομότιμους ή στην ανάθεση εργασιών σε ομότιμους με δημοφιλείς υπηρεσίες, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Το μοντέλο μας απομακρύνεται από τη συμβατική έμφαση στις δυνατότητες επεξεργασίας των κόμβων και τη βελτιστοποίηση της καθυστέρησης εκτέλεσης, προσδιορίζοντας αντ' αυτού τους πιο σημαντικούς κόμβους στο οικοσύστημα από άποψη ζήτησης υπηρεσιών, θέσης και συνδέσεων. Η στρατηγική αυξάνει τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης υπηρεσιών και ελαχιστοποιεί την απόσταση μεταξύ των κόμβων που φιλοξενούν δημοφιλείς υπηρεσίες και των εργασιών που ζητούν αυτές τις υπηρεσίες, οι οποίες ενδεχομένως βρίσκονται σε γειτονικούς ομότιμους κόμβους. Είναι σημαντικό ότι το μοντέλο μας μπορεί να ενσωματωθεί απρόσκοπτα με τα υπάρχοντα συστήματα, διαμορφώνοντας έναν ισχυρό μηχανισμό λήψης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης υπηρεσιών σε ολόκληρο το οικοσύστημα.

Στην αναζήτηση για υπηρεσίες υψηλής απόδοσης και χαμηλής καθυστέρησης, βρισκόμαστε στη μέση μιας τεχνολογικής καινοτομίας: των διάχυτων υπολογιστικών συστημάτων αιχμής. Αυτή η μετάβαση αναδεικνύει ένα τοπίο γεμάτο δυνατότητες και προκλήσεις που είναι βασικές προϋποθέσεις για τις τεχνολογικές εξελίξεις. Το κλειδί για αυτόν τον μετασχηματισμό είναι η σωστή οργάνωση της παροχής υπηρεσιών, μια διαδικασία που επιβάλλει την ανάπτυξη των πλατφορμών υπηρεσιών, των βάσεων δεδομένων και των αρχείων διαμόρφωσης στους κόμβους υπηρεσιών κατανεμημένων άκρων. Όπως αναλύουν και οι συγγραφείς του [6] δημιουργήσαν μια βάση δεδομένων που ονομάζεται "χάρτης πληροφοριών", δηλαδή όταν οι χρήστες μεταβαίνουν σε έναν καινούργιο διακομιστή edge οι ιδιότητες ανταλλάσσονται μεταξύ των διακομιστών. Ακόμη ο μηχανισμός που προτείνουν ενισχύει τους χρόνους απόκρισης των υπηρεσιών και μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας.

Προτείνεται η χρήση μοντέλων επεξεργασίας γράφων για την υποστήριξη του μηχανισμού συλλογισμού μας. Η υιοθέτηση δικτύων k -πυρήνων (k -core δίκτυο) στο οικοσύστημα μας επιτρέπει να εντοπίζουμε κόμβους με πολλαπλές συνδέσεις, σχηματίζοντας μια πυρήνα/συμπυκνωμένη υποομάδα κόμβων. Στη συνέχεια, εντοπίζεται το δένδρο επικάλυψης ελαχίστου κόστους (Minimum Spanning Tree - MST) για κάθε υποομάδα κόμβων για την ελαχιστοποίηση των αναπαραγωγών υπηρεσιών. Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των πειραματικών μας αποτελεσμάτων, αποδεικνύοντας τη δυνητική χρήση του προτεινόμενου μοντέλου σε πραγματικές διατάξεις υπό διάφορα σενάρια.

Αυτή η εργασία αναλύει και εφαρμόζει αλγορίθμους για την ανάπτυξη υπηρεσιών χαμηλής καθυστέρησης, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου ακόμη και οι παραμικρές καθυστερήσεις θα επέφεραν δυσάρεστα αποτελέσματα. Ρεαλιστικά παραδείγματα όπως αυτόνομα οχήματα και βιομηχανικά συστήματα IoT, τα οποία βασίζονται όλα σε στιγμιαίες αποκρίσεις.

Η κύρια πρόκληση πέρα από την απλή μετανάστευση των υπηρεσιών πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, κρύβεται στην εκτέλεση τέτοιων τοποθετήσεων με μεγάλη ακρίβεια. Οι συνηθισμένες στρατηγικές τοποθέτησης υπηρεσιών έχουν προσηλωθεί σε μεγάλο βαθμό στη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων, συχνά αγνοώντας την περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των υπηρεσιών και των σχετικών εργασιών τους. Κατά συνέπεια, οι υπηρεσίες μεταφέρονται συστηματικά χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι συγκεκριμένες εξαρτήσεις εργασιών τους, με αποτέλεσμα συχνές μετεγκαταστάσεις, αυξημένο λειτουργικό κόστος και μη βέλτιστες εμπειρίες χρήστη.

Θα εισαχθεί μια προοπτική που δίνει προτεραιότητα στις προϋποθέσεις τοποθέτησης υπηρεσιών. Η προσέγγιση σε αυτό το πρόβλημα θα ευθυγραμμίζεται με τις υπηρεσίες και με τα καθήκοντα που έχουν σχεδιαστεί να εξυπηρετούν. Τα μοντέλα που θα αναλυθούν θα παρέχουν μια ολοκληρωμένη σύνδεση μεταξύ των υπηρεσιών και των εργασιών που υποστηρίζουν, ενισχύοντας μια αποδοτική σχέση μεταξύ των υπολογιστικών δυνατοτήτων και των ειδικών απαιτήσεων. Με τη εφαρμογή των μοντέλων σε ρεαλιστικά δεδομένα θα μετριάσουν οι δυσκολίες των συχνών μεταβάσεων υπηρεσιών, φέρνοντάς το χρήστη πιο κοντά στην υλοποίηση της τοποθέτησης υπηρεσιών με χαμηλή καθυστέρηση.

Οι ενότητες της παρούσας εργασίας εμβαθύνουν στις πολυπλοκότητες που σχετίζονται με την κατανομή πόρων, την επεκτασιμότητα και τη διαθεσιμότητα υπηρεσιών εντός του υπολογιστικού άκρου. Αναλύονται οι βασικοί αλγόριθμοι διαχείρισης γραφημάτων, τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία του μοντέλου παροχής υπηρεσιών μας και παρουσιάζουμε το καινοτόμο μοντέλο τοποθέτησης υπηρεσιών που βασίζεται στα μοντέλα Erdős-Rényi (ER) και Barabási-Albert (BA). Η πειραματική προσέγγιση που παρουσιάζεται καταδεικνύει τη δυνατότητα εφαρμογής και τα οφέλη των μοντέλων στον πραγματικό κόσμο σε περιβάλλοντα όπου το καθένα ταιριάζει ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος.

Συνοψίζοντας, αυτή η εργασία στοχεύει στην κατανόησή της διαχείρισης υπηρεσιών στον τομέα του EC, υπογραμμίζοντας την κρίσιμη σημασία της τοποθέτησης υπηρεσιών σε χαμηλή καθυστέρηση. Οι συνέπειες των αποτελεσμάτων μας δείχνουν την προσπάθεια προσομοίωσης του αληθινού κόσμου ώστε να εντοπιστούν αδυναμίες και να αναπτυχθούν μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες που θα βελτιώσουν περαιτέρω το τοπίο της παροχής υπηρεσιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Η τρέχουσα εξέλιξη του IoT και του EC περιλαμβάνει μια εκτεταμένη υποδομή που τοποθετεί μονάδες επεξεργασίας κοντά στους τελικούς χρήστες για την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης των υπηρεσιών. Τα αποτελέσματα των δραστηριοτήτων επεξεργασίας, που ζητούνται από τους τελικούς χρήστες ή τις εφαρμογές, ονομάζονται αποκρίσεις. Αυτές οι εργασίες εκτελούνται σε κατανεμημένα σύνολα δεδομένων που προέρχονται από την ικανότητα συλλογής δεδομένων των συσκευών IoT και EC στο περιβάλλον τους. Τα δεδομένα που συλλέγονται μεταφέρονται φυσικά από την υποδομή IoT στο Cloud, χρησιμοποιώντας το EC ως ενδιάμεσο με συγκεκριμένες δυνατότητες αποθήκευσης και επεξεργασίας. Οι κατανεμημένες ροές δεδομένων συνήθως αναφέρουν δεδομένα σε κόμβους EC [42]. Συχνά αντιπροσωπεύουν υπό εξέταση φαινόμενα, όπως η ανίχνευση περιστατικών πυρκαγιάς ή η υποστήριξη συναγερμών που προκαλούνται από παραβιάσεις περιορισμών [58, 20, 17]. Είναι ζωτικής σημασίας να σημειωθεί ότι οι κόμβοι EC δεν διαθέτουν υπολογιστικές δυνατότητες συγκρίσιμες με το back end του Cloud. Ως εκ τούτου, τα ευφυή μοντέλα που είναι αφιερωμένα στη διαχείριση της αποθήκευσης, των εργασιών και των υπηρεσιών για την εκτέλεση των επιθυμητών δραστηριοτήτων επεξεργασίας καθίστανται επιτακτικά. Για παράδειγμα, στο [26], οι συγγραφείς προτείνουν τον συγχρονισμό πολλαπλών ροών δεδομένων και προτείνουν ένα πρωτόκολλο εναρμόνισης για τον χειρισμό της εγγενούς ετερογένειας των δεδομένων που λαμβάνονται από πολλαπλές πηγές. Για μια έρευνα σχετικά με τις προκλήσεις του οικοσυστήματος EC και περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις πρόσφατες ερευνητικές τάσεις που αφορούν μοντέλα που διαχειρίζονται κόμβους EC, οι ενδιαφερόμενοι αναγνώστες μπορούν να ανατρέξουν στο [55].

Η διαχείριση εργασιών αποτελεί σημαντική ερευνητική πρόκληση με στόχο τον εντοπισμό του σωστού κόμβου για τη φιλοξενία των εισερχόμενων εργασιών, με έμφαση στη μεγιστοποίηση της απόδοσης και την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης στην παροχή τελικών αποτελεσμάτων [1, 48]. Παραδείγματα εργασιών περιλαμβάνουν την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων [36], την περιήγηση στο διαδίκτυο με επίγνωση του πλαισίου, την προεπεξεργασία βίντεο [34] ή την εκτέλεση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης [33]. Για την παροχή αποδοτικών αλγορίθμων/μοντέλων προκύπτουν πολλαπλές προκλήσεις, οι οποίες επηρεάζονται κυρίως από την πολυπλοκότητα της διαδικασίας διαχείρισης. Πρόσθετοι περιορισμοί παρατηρούνται στην επικοινωνία

μεταξύ των κόμβων EC και του back end στο Cloud ή μεταξύ των κόμβων EC Η επικοινωνία εντός του οικοσυστήματος EC είναι ζωτικής σημασίας για την υποστήριξη συνεργατικών δραστηριοτήτων μεταξύ των κόμβων και τη δημιουργία γνώσης.

Μια αξιοσημείωτη συνεργατική δραστηριότητα είναι η μεταφόρτωση εργασιών σε ομότιμους κόμβους για την αποφυγή σεναρίων όπου οι κόμβοι EC είναι υπερφορτωμένοι ή δεν διαθέτουν τα κατάλληλα δεδομένα [8, 48, 6]. Οι δραστηριότητες εκφόρτωσης για τις εισερχόμενες εργασίες θα πρέπει να ακολουθούν κανόνες που σχετίζονται με τη χρήση υποδομών Cloud και EC, όπως τα κατάλληλα πρωτόκολλα επικοινωνίας που προτείνονται για την υποστήριξη γενικών μοντέλων απόκτησης, φιλτραρίσματος και προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων μεταξύ υπολογιστών Cloud και EC [30].

Στο [45], μπορείτε να βρείτε περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις τεχνολογίες που υιοθετούνται για τη διαμόρφωση και τη διαχείριση συνόλων δεδομένων, καθώς και τους περιορισμούς των προτεινόμενων πρακτικών. Είναι σημαντικό να εξετάζονται προσεκτικά οι περιορισμοί για την αποτελεσματική διαχείριση των διαθέσιμων δεδομένων και των επιθυμητών δραστηριοτήτων επεξεργασίας. Στο οικοσύστημα EC, η εξασφάλιση της εξισορρόπησης φορτίου είναι ζωτικής σημασίας για τη διανομή του φορτίου που σχετίζεται με την εκτέλεση εργασιών ή υπηρεσιών. Στο [22], οι συγγραφείς χρησιμοποιούν μια μέθοδο συνολικής χρησιμότητας για να μετατρέψουν ένα καθορισμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης min-max σε ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, το πρόβλημα αυτό χαλαρώνεται με τη χρήση της διπλής αποσύνθεσης κατά Lagrange, η οποία επιλύεται με την τεχνική βαθμωτής καθόδου. Παρουσιάζοντας τον αλγόριθμο Load Balancing for Resource Optimization (LBRO) στο [23], οι συγγραφείς λαμβάνουν υπόψη τις προτιμήσεις των χρηστών. Οι κόμβοι EC μπορούν να ενεργούν ως ενδιάμεσοι, υπεύθυνοι για την παρακολούθηση των παγκόσμιων πληροφοριών και την απόκτηση χαρακτηριστικών των ομότιμων χρηστών σε πραγματικό χρόνο για την αξιολόγηση της ταξινόμησης [13]. Οι κόμβοι κατηγοριοποιούνται ως κόμβοι με ελαφρύ φορτίο, με κανονικό φορτίο ή με βαρύ φορτίο και η προτεινόμενη προσέγγιση αποσκοπεί στην κατανομή εργασιών στους κόμβους με το σχετικά ελαφρύτερο φορτίο.

Στο [38], προτείνεται ένα υβριδικό υβριδικό σύστημα P2P (MHP2P) τριών επιπέδων για την ενίσχυση της αποδοτικότητας της αναζήτησης υπηρεσιών και της επεκτασιμότητας του συστήματος. Ένα άλλο σύστημα, το EdgeBalance [9], προβλέπει τη

ζήτηση CPU της εισερχόμενης κυκλοφορίας και κατανέμει τις ροές επεξεργασίας σε διαθέσιμους διακομιστές. Το [40] διερευνά ένα παράδειγμα υπολογισμού άκρων με τη βοήθεια πολλαπλών σταθμευμένων οχημάτων (MPVEC), αντιμετωπίζοντας κοινά προβλήματα βελτιστοποίησης εξισορρόπησης φορτίου και εκφόρτωσης για την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος υπό συγκεκριμένους περιορισμούς καθυστέρησης. Ένα άλλο μοντέλο εξισορρόπησης φορτίου επικεντρώνεται στη διαχείριση των εργασιών και των διαθέσιμων κόμβων ως κόμβων ενός γράφου, επιχειρώντας να επιλύσει το πρόβλημα με βάση τη λύση του προβλήματος χρωματισμού γράφου [5]. Το [39] προτείνει έναν άπληστο αλγόριθμο για την εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας σε ένα σενάριο MEC, ενώ το [5] επικεντρώνεται σε μια προσέγγιση δικτύωσης, παρέχοντας έναν εξισορροπιστή φορτίου για συστήματα IoT-edge. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει ένα δυναμικό μοντέλο ομαδοποίησης και ένα σύστημα βαθιάς ενισχυτικής μάθησης (DRL) για την εξασφάλιση των απαιτήσεων επικοινωνίας και υπολογιστικής εξισορρόπησης.

Πέρα από τη διαχείριση δεδομένων και εργασιών, η ερευνητική κοινότητα έχει στρέψει την προσοχή της στη διαχείριση υπηρεσιών. Η σωστή τοποθέτηση υπηρεσιών στους κόμβους σχετίζεται με θέματα χρονοπρογραμματισμού εργασιών, διαχείρισης πόρων και προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων. Τα μοντέλα που ασχολούνται με την τοποθέτηση υπηρεσιών στοχεύουν στη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών (QoS) μέσω της βέλτιστης αξιοποίησης των πόρων [16].

Θεωρώντας την υποδομή EC ως ένα οικοσύστημα μικροκέντρων δεδομένων [15], κάθε κόμβος έχει πρόσβαση σε ειδικά σημεία πρόσβασης για την ανοδική μεταφορά δεδομένων. Η QoS μπορεί να επηρεαστεί από την απόδοση του δικτύου και τα μοντέλα που αντιμετωπίζουν την ετερογένεια μεταξύ των διαφόρων κόμβων υπηρεσιών, ενώ ορισμένες προσπάθειες επικεντρώνονται στην επιλογή των σημείων πρόσβασης του δικτύου. Το [24] παρέχει γενικές πληροφορίες σχετικά με το πρόβλημα της τοποθέτησης υπηρεσιών και προσφέρει μια συστηματική ανασκόπηση και ασχολείται με τη "σύνδεση" μεταξύ υπηρεσιών και εργασιών, λαμβάνοντας υπόψη τη συνάφεια των εργασιών, τις εξαρτήσεις των εργασιών και την επιλογή σημείου πρόσβασης δικτύου κατά τη μετάδοση δεδομένων. Το [58] προτείνει ένα πλαίσιο δυναμικής τοποθέτησης, το DSP-DRL, αφιερωμένο στη βελτιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης, λαμβάνοντας υπόψη καθορισμένους περιορισμούς για τους φυσικούς πόρους και το λειτουργικό κόστος. Η

εργασία [21] εισάγει το πλαίσιο EPMOSO, που συνδυάζει έναν γενετικό αλγόριθμο και ένα σχήμα βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για στρατηγικές τοποθέτησης διακομιστών άκρων. Η εργασία που παρουσιάζεται στο [38] διατυπώνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης λαμβάνοντας υπόψη από κοινού περιορισμούς σχετικά με την ικανότητα αποθήκευσης του διακομιστή και την καθυστέρηση εκτέλεσης της υπηρεσίας, μετατρέποντάς το σε μια σειρά προβλημάτων άμεσης βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας έναν στοχαστικό αλγόριθμο βασισμένο σε προσέγγιση του μέσου δείγματος. Η τελική τοποθέτηση των υπηρεσιών καθορίζεται από έναν κατανεμημένο αλγόριθμο προσέγγισης Markov. Η εργασία [35] παρουσιάζει ένα δυναμικό μοντέλο εκφόρτωσης που βασίζεται σε γενετικό αλγόριθμο, ενσωματώνοντας ένα μοντέλο κόστους βάρους εργασιών που βασίζεται στην καθυστέρηση επεξεργασίας και την κατανάλωση ενέργειας. Οι συγγραφείς δίνουν έμφαση στους περιορισμένους πόρους των ακραίων κόμβων και προτείνουν ένα σχήμα κατανομής πόρων ευθυγραμμισμένο με τη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας των ακραίων διακομιστών. Η κατανομή του φόρτου εργασίας των ακραίων κόμβων μπορεί να επωφεληθεί από έναν αλγόριθμο πρόβλεψης εφαρμογών AP (Access Point) με στόχο την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων απόκρισης, όπως αναφέρεται στο [44]. Ένα νευρωνικό δίκτυο LSTM (Long Short-Term Memory) χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των εργασιών των μελλοντικών συσκευών πρόσβασης και τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για την αντιμετώπιση της ανάθεσης εργασιών και της κατανομής πόρων.

Ανασκοπώντας το πρόβλημα της τοποθέτησης υπηρεσιών, η ερευνητική κοινότητα το έχει μελετήσει εκτενώς, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφόρων μοντέλων που κατηγοριοποιούνται στις ακόλουθες ομάδες:

Μοντέλα εκτίμησης του χρόνου εξυπηρέτησης των εργασιών και της καθυστέρησης απόκρισης. Η απόδοση αυτών των μοντέλων επηρεάζεται φυσικά από σφάλματα πρόβλεψης.

Μοντέλα που βασίζονται σε πλαίσια βαθιάς μάθησης (π.χ. βαθιά ενισχυτική μάθηση, LSTM) και προβλέπουν κυρίως το χρόνο εκτέλεσης εργασιών. Η απόδοσή τους επηρεάζεται από το δύσκολο έργο της διαμόρφωσης ενός ολοκληρωμένου συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης.

Μοντέλα βασισμένα σε πλαίσια βαθιάς μάθησης (π.χ. βαθιά ενισχυτική μάθηση, LSTM) που προβλέπουν κυρίως το χρόνο εκτέλεσης εργασιών. Η απόδοσή τους

επηρεάζεται από το δύσκολο έργο της διαμόρφωσης ενός ολοκληρωμένου συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης.

Μοντέλα που βασίζονται σε τεχνολογίες υπολογιστικής νοημοσύνης (π.χ. γενετικοί αλγόριθμοι, σχήματα βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων) ή άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης που ασχολούνται με την καθυστέρηση εκτέλεσης και την κατανάλωση ενέργειας. Αυτά τα μοντέλα μπορεί να είναι πολύπλοκα και να αντιμετωπίζουν προκλήσεις στην παροχή αποτελεσματικών αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο λόγω της δυναμικής του περιβάλλοντος.

Μοντέλα που χρησιμοποιούν απλές στρατηγικές ή θεωρητικά σχήματα παιγνίων για την κατανομή υπηρεσιών με βάση το χρόνο εκτέλεσης εργασιών. Δεν είναι εγγυημένο ότι θα επιτευχθούν βέλτιστα αποτελέσματα, ιδίως σε σενάρια με ομοιόμορφες αλλαγές περιορισμών ή τυχαίες διακυμάνσεις.

Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να συνδυαστεί αποτελεσματικά με άλλα σχήματα της βιβλιογραφίας για την υποστήριξη ενός ισχυρού μηχανισμού λήψης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης υπηρεσιών σε ολόκληρο το οικοσύστημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Διαχείριση υπηρεσιών στις παρυφές του δικτύου

3.1 Εισαγωγή στη διαχείριση υπηρεσιών

Η διαχείριση υπηρεσιών παίζει βασικό ρόλο στην ανάπτυξη των περίπλοκων οικοσυστημάτων του δικτύου, λειτουργώντας ως ο κρίκος για την αποτελεσματική εκτέλεση πολλών κρίσιμων λειτουργιών. Αυτή η εισαγωγική ενότητα επιδιώκει να δημιουργήσει τις βάσεις για μια ολοκληρωμένη κατανόηση των αρχών, των δυσκολιών και των διορθωτικών μέτρων που είναι σημαντικές στη διαχείριση υπηρεσιών εντός του δικτύου.

Η διαχείριση υπηρεσιών περιλαμβάνει τον συντονισμό και το χειρισμό διαφορετικών υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών Ιστού, της αποθήκευσης δεδομένων, των πλατφορμών επικοινωνίας και άλλων. Ουσιαστικά, είναι υπεύθυνη για την παροχή, τη συντήρηση και τη βελτίωση αυτών των υπηρεσιών για να εξασφαλίσει μια άρτια εμπειρία στον χρήστη που χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ποιότητα, αξιοπιστία και γρήγορη απόκριση σχετικά με τη μεγάλη ανάγκη για μετανάστευση υπηρεσιών.

Κάθε κατηγορία υπηρεσιών έχει τις δικές της μοναδικές περίπλοκες απαιτήσεις. Οι εφαρμογές Ιστού απαιτούν ισχυρή επεκτασιμότητα και ανταπόκριση για την πλοήγηση σε απρόβλεπτες αλλαγές στις ανάγκες των χρηστών. Οι υπηρεσίες αποθήκευσης δεδομένων, από την άλλη πλευρά, απαιτούν μια σωστή κατανομή μεταξύ της προσβασιμότητας και της ασφάλειας, που συχνά έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία ανάκτηση δεδομένων. Οι πλατφόρμες επικοινωνίας απαιτούν ελάχιστο λανθάνοντα χρόνο για να διευκολύνουν τις ομαλές και ανεπηρέαστες αλληλεπιδράσεις.

Ένα ξεχωριστό χαρακτηριστικό της διαχείρισης υπηρεσιών είναι η μακροπρόθεσμη προσέγγισή της. Σε μια εποχή όπου ακόμη και μια στιγμιαία διακοπή της υπηρεσίας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις και ζημιά στις εταιρείες, η προληπτική διαχείριση υπηρεσιών είναι απαραίτητη. Η προβλεπτική συντήρηση, η εξισορρόπηση φορτίου και η κατανομή πόρων είναι βασικές πτυχές που πρέπει να χρησιμοποιηθούν από τους διαχειριστές για τον εντοπισμό πιθανών ζητημάτων, τη βελτιστοποίηση των πόρων και την βελτίωση των μηχανισμών παροχής υπηρεσιών.

Η προγνωστική συντήρηση χρησιμοποιεί αναλύσεις δεδομένων και μηχανική μάθηση για την πρόβλεψη διακοπών της υπηρεσίας και την εφαρμογή προληπτικών μέτρων. Η εξισορρόπηση φορτίου διασφαλίζει τη δίκαιη κατανομή των απαιτήσεων

υπηρεσιών μεταξύ των τοποθεσιών δικτύου, μειώνοντας την εξάντληση των πόρων σε συγκεκριμένες περιοχές. Η αποτελεσματική κατανομή πόρων εξαρτάται από τη συνετή κατανομή πόρων σε συγκεκριμένες υπηρεσίες με βάση τις απαιτήσεις τους.

Η διαχείριση υπηρεσιών βασίζεται κυρίως στη θεωρία δικτύου, στην ανάλυση δεδομένων και στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Η θεωρία δικτύων προσφέρει πληροφορίες για τις αλληλεπιδράσεις των υπηρεσιών, τις ροές δεδομένων και τα μοτίβα κυκλοφορίας, δίνοντας τη δυνατότητα στους διαχειριστές να λαμβάνουν σωστά ενημερωμένες αποφάσεις. Η ανάλυση έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί την απόδοση των υπηρεσιών, τον εντοπισμό ανωμαλιών και την πρόβλεψη προβλημάτων. Τέλος οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην κατανομή πόρων και στην εξισορρόπηση φορτίου, ο οποίος είναι καθοριστικός για τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των υπηρεσιών του δικτύου.

3.2 Ο ρόλος του Edge Computing

Το EC έχει καθοριστικό ρόλο στην σύγχρονη διαχείριση υπηρεσιών, αντιμετωπίζοντας κρίσιμες προκλήσεις και προσφέροντας πλεονεκτήματα στην οργάνωση υπηρεσιών εντός του οικοσυστήματος. Η ταχεία επεξεργασία δεδομένων, η μειωμένη καθυστέρηση και η διορατικότητα σε ελάχιστους χρόνους, συμβάλλουν σημαντικά στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης υπηρεσιών. Σε αυτή την ενότητα, αναλύεται ο ουσιαστικός ρόλος και η επίδραση του στη μετάβαση υπηρεσιών.

Η μείωση της καθυστέρησης αποτελεί αδιαπραγμάτευτη απαίτηση στον τομέα της διαχείρισης. Η καθυστέρηση, η οποία ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να ταξιδέψουν τα δεδομένα από την πηγή τους σε έναν υπολογιστικό κόμβο και πίσω, έχει άμεση επιρροή στις ανάγκες του χρήστη. Το EC ελαχιστοποιεί αποτελεσματικά την καθυστέρηση τοποθετώντας υπολογιστικούς πόρους σε κοντινή απόσταση από τις πηγές δεδομένων και τους χρήστες. Αυτή η γεωγραφική αλλαγή μειώνει το χρόνο διαδρομής, επιτρέποντας την ταχεία και σε ελάχιστο χρόνο παροχή υπηρεσιών.

Η σημασία της χαμηλής καθυστέρησης έχει τις ρίζες της στη θεωρία της πληροφορίας και στις αρχές της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή. Η θεωρία της πληροφορίας, ένας τομέας των μαθηματικών και της επιστήμης των υπολογιστών, τονίζει ότι η γρήγορη μετάδοση δεδομένων ενισχύει την αποδοτικότητα της επικοινωνίας. Η μειωμένη καθυστέρηση προάγει μια χρήσιμη διεπαφή χρήστη, η οποία

είναι καίριας σημασίας σε εφαρμογές που απαιτούν αλληλεπιδράσεις σε ελάχιστους χρόνους.

Η μετανάστευση υπηρεσιών είναι μια δυναμική διαδικασία της εργασίας, η οποία είναι αναγκαία λόγω διακυμάνσεων στη ζήτηση υπηρεσιών ή στην κατανομή των πόρων. Οι συνηθισμένες μέθοδοι μετάβασης υπηρεσιών, οι οποίες συνήθως είναι συγκεντρωμένες σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων, αντιμετωπίζουν εκτεταμένους χρόνους μετάβασης λόγω της επιβάρυνσης της διάσχισης δεδομένων. Το EC μετασχηματίζει τη μετανάστευση υπηρεσιών φέρνοντάς την πιο κοντά στην πηγή δεδομένων, μειώνοντας τις αρνητικές επιπτώσεις των μεγάλων χρόνων μετάβασης.[26]

Ακόμη ενισχύει τη μετάβαση υπηρεσιών τηρώντας τις αρχές της τοπικότητας των δεδομένων. Η τοπικότητα των δεδομένων είναι μια θεμελιώδης έννοια στη διαχείριση και βελτιστοποίηση των δεδομένων, υποστηρίζει ότι τα δεδομένα πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πηγή τους. Με τη μετεγκατάσταση υπηρεσιών στην άκρη, όπου βρίσκονται τα δεδομένα, οι χρόνοι μετεγκατάστασης μειώνονται σημαντικά.

Επίσης με την επεκτασιμότητα και την εξισορρόπηση φορτίου επιλύονται σημαντικά προβλήματα. Η επεκτασιμότητα αφορά την προσαρμογή στις συνεχείς αλλαγές στις απαιτήσεις υπηρεσιών, ενώ η εξισορρόπηση φορτίου εξασφαλίζει την δίκαια κατανομή των αιτημάτων υπηρεσιών στους υπολογιστικούς κόμβους. Οι κόμβοι υπολογισμού άκρων, στρατηγικά τοποθετημένοι σε τοποθεσίες δικτύου, μπορούν εύκολα να επεκταθούν για να αντιμετωπίσουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις υπηρεσιών.

Διαδραματίζει ακόμη καθοριστικό ρόλο στην αντιμετώπιση των προβλημάτων ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής στη διαχείριση υπηρεσιών. Το επιστημονικό υπόβαθρο εδώ βασίζεται στην ασφάλεια υπολογιστών και στις αρχές της κρυπτογραφίας. Ασφαρίζοντας τα δεδομένα πιο κοντά στην πηγή τους, η υπολογιστική ακμής μειώνει τους κινδύνους έκθεσης των δεδομένων και ενισχύει την ασφάλεια των δεδομένων κατά τη μετάδοση και την αποθήκευση.

Καθώς υπάρχει άμεση επαφή των χρηστών στο περιβάλλον της διαχείρισης υπηρεσιών, ο ρόλος του EC αναδεικνύεται αναγκαίος. Η μείωση της καθυστέρησης, η ταχεία μετάβαση σε υπηρεσίες, η επεκτασιμότητα, η εξισορρόπηση φορτίου και η ενισχυμένη ασφάλεια και ιδιωτικότητα αποτελούν επιστημονικές αρχές που προωθούνται από το EC. Αυτές οι αρχές οδηγούν τη διαχείριση υπηρεσιών σε

λειτουργίες που χαρακτηρίζονται από ανταπόκριση σε πραγματικό χρόνο, αποτελεσματική κατανομή πόρων και αυξημένη ασφάλεια δεδομένων.

3.3 Προκλήσεις στην διαχείριση υπηρεσιών

Η διαχείριση υπηρεσιών εκτός από τον σημαντικό και αποδοτικό χαρακτήρα που έχει επιφυλάσσει και ορισμένες προκλήσεις που είναι σημαντικό να αναγνωριστούν.

Δυναμικές συνθήκες δικτύου: Το περιβάλλον του δικτύου είναι ιδιαίτερα δυναμικό. Η αποτελεσματική διαχείριση της καθυστέρησης σε ένα τέτοιο περιβάλλον απαιτεί τη δημιουργία ευφυών αλγορίθμων και πρωτοκόλλων ικανών να προσαρμόζονται άμεσα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου. Οι δυσκολίες συναντώνται στην απώλεια πακέτων, στην συμφόρηση και στις διακυμάνσεις του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Περιορισμένοι πόροι: Οι συσκευές EC συνήθως λειτουργούν με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και μνήμη. Η αποδοτική η μείωση της καθυστέρησης με περιορισμό των πόρων απαιτεί επιστημονικές εξελίξεις σε βελτιωμένους αλγορίθμους, αποδοτικές δομές δεδομένων και τεχνικές επεξεργασίας.

Ανάλυση δεδομένων σε ελάχιστο χρόνο: Η επίτευξη αποκρίσεων χαμηλής καθυστέρησης σε εφαρμογές IoT (π.χ αυτόνομα οχήματα), αποτελεί μια σημαντική πρόκληση. Η ανάπτυξη μεθοδολογιών για την ανάλυση δεδομένων είναι επιτακτική ανάγκη, η οποία περιλαμβάνει προγνωστικές αναλύσεις και αλγορίθμους λήψης αποφάσεων για την ικανοποίηση αυστηρών απαιτήσεων καθυστέρησης [9].

3.3.α Προκλήσεις στον όγκο και την επεξεργασία των δεδομένων

Ολοκλήρωση δεδομένων: Ο όγκος δεδομένων που παράγονται στο EC, ιδίως σε σενάρια που αφορούν το IoT, είναι υπερβολικός. Η αποτελεσματική διαχείριση της ενοποίησης δεδομένων από διαφορετικές πηγές, με ταυτόχρονη διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων, αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Η δημιουργία εργαλείων ολοκλήρωσης δεδομένων, αλγορίθμων καθαρισμού δεδομένων καθίσταται ζωτικής σημασίας.

Επεκτασιμότητα: Τα συστήματα υπολογισμού ακραίων σημείων πρέπει να παρουσιάζουν επεκτασιμότητα για να μπορούν να χειριστούν την επέκταση των δεδομένων χωρίς να χάνεται η απόδοση. Η εφαρμογή παράλληλης επεξεργασίας,

εξισορρόπησης φορτίου και κατανεμημένων υπολογιστικών παραδειγμάτων αποκτά καθοριστική σημασία για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης.

Απόρρητο και ασφάλεια δεδομένων: Η επιστημονική πτυχή της διαχείρισης τεράστιων όγκων δεδομένων περιλαμβάνει την αντιμετώπιση των ανησυχιών που σχετίζονται με την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια των δεδομένων. Τεχνικές όπως ο ασφαλής πολυμερής υπολογισμός και κρυπτογράφηση είναι σημαντικές για την ασφαλή επεξεργασία ευαίσθητων δεδομένων με ταυτόχρονη διατήρηση της ιδιωτικότητας.

3.3.8 Προκλήσεις στην μετάβαση σε υπηρεσίες

Συνέπεια δεδομένων: Η διασφάλιση της συνέπειας των δεδομένων κατά τη μετάβαση υπηρεσιών αποτελεί μια ανεπίλυτη πρόκληση. Ο συγχρονισμός των δεδομένων που είναι αποθηκευμένα σε κατανεμημένους κόμβους edge με τις υπηρεσίες που μεταναστεύουν απαιτεί την ανάπτυξη λύσεων που βασίζονται στη θεωρία των κατανεμημένων συστημάτων.

Κατανομή πόρων: Η βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων για τις υπηρεσίες που μεταναστεύουν συνεπάγεται την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού των πόρων. Οι στρατηγικές κατανομής πόρων πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη ζήτηση υπηρεσιών, τους διαθέσιμους πόρους και τους περιορισμούς της μετανάστευσης, απαιτώντας την εφαρμογή αλγορίθμων [22].

Κάθε μία από αυτές τις προκλήσεις αποτελεί ένα επιστημονικό πεδίο που απαιτεί καινοτόμες λύσεις σε πολλούς κλάδους, που περιλαμβάνουν την επιστήμη των υπολογιστών, την επιστήμη των δεδομένων, τη μηχανική δικτύων και τα εφαρμοσμένα μαθηματικά. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι καίριας σημασίας για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων του EC δηλαδή για την αποτελεσματική διαχείριση και μετάβαση υπηρεσιών, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται χαμηλή καθυστέρηση, σωστή και άμεση επεξεργασία δεδομένων και αδιάλειπτες μεταβάσεις.

3.4 Στόχοι και πεδίο εφαρμογής της έρευνας

Ο κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υιοθέτηση και η αξιολόγηση μοντέλων που αντιμετωπίζουν κρίσιμα ζητήματα διαχείρισης υπηρεσιών στο πλαίσιο του EC. Αυτά τα μοντέλα αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της συνδεσιμότητας των υπηρεσιών και της μετάβασης των υπηρεσιών στο EC.

Ένας πρωταρχικός στόχος περιλαμβάνει τη διατύπωση μαθηματικών μοντέλων για τη βελτίωση της συνδεσιμότητας των οικοσυστημάτων του EC. Αυτό απαιτεί την ανάπτυξη μαθηματικών εκφράσεων, αλγορίθμων και τεχνικών βελτιστοποίησης, εξασφαλίζοντας ισχυρές διασυνδέσεις μεταξύ των κόμβων (υπηρεσιών). Τα μοντέλα αυτά θα λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως την αρχιτεκτονική των ακραίων κόμβων, την τοπολογία του δικτύου και τη δυναμική της μετάδοσης δεδομένων. Οι μαθηματικές αναπαραστάσεις βασίζονται στη θεωρία γραφημάτων και στον ευρύτερο κλάδο της επιστήμης των δικτύων.

Η εργασία περιλαμβάνει επίσης τη δημιουργία μοντέλων για τη διευκόλυνση της αποτελεσματικής μετανάστευσης υπηρεσιών μεταξύ των ακραίων κόμβων. Η μετανάστευση υπηρεσιών είναι μια περίπλοκη πρόκληση που απαιτεί τη υλοποίηση μοντέλων που καλύπτουν την κατανομή πόρων, την εξισορρόπηση φορτίου και τον συγχρονισμό δεδομένων.

Η πειραματική αποτίμηση βασίζεται σε εφαρμογές του πραγματικού κόσμου και θα βελτιώσει τα μαθηματικά μοντέλα μέσω προσομοιώσεων και εμπειρικών πειραμάτων. Αυτό σημαίνει ότι οι λύσεις που θα αναπτυχθούν θα είναι σχετικές με ένα ευρύ φάσμα σεναρίων υπολογισμού ακραίων σημείων, με διαφορετικές μεταβλητές και μετρικές.

Εν κατακλείδι, αποσκοπεί να προωθήσει την κατανόηση της διαχείρισης υπηρεσιών στο πλαίσιο του EC ενώ τα μοντέλα που θα αναλυθούν μπορούν να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις τα προβλήματα στις διαδικασίες μετάβασης σε υπηρεσίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Αλγόριθμοι Διαχείρισης Γράφων

4.1 Εισαγωγή στην διαχείριση γραφημάτων

Στον τομέα της διαχείρισης υπηρεσιών, για τον συνδυασμό υπηρεσιών, κόμβων και του ευρύτερου οικοσυστήματος του δικτύου, απαιτείται μια αποτελεσματική προσέγγιση η οποία είναι απαραίτητη για την κατανόηση και οργάνωση των περίπλοκων συνδέσεων. Σε αυτό το ζήτημα θα βοηθήσει η λειτουργία της διαχείρισης γραφημάτων. Οι γράφοι, που έχουν τις βάσεις τους στη θεωρία γράφων, προσφέρουν ένα θεμελιώδες πλαίσιο για την αναπαράσταση και την ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων. Κάθε κόμβος στο γράφημα αντιπροσωπεύει μια υπηρεσία και οι ακμές υποδεικνύουν πιθανές αλληλεπιδράσεις.

Οι γράφοι έχουν την ικανότητά να παρέχουν μια δομημένη οπτική αναπαράσταση των περίπλοκων διασυνδέσεων μεταξύ των διαφόρων «στοιχείων» του δικτύου. Καθώς τα δίκτυα επεκτείνονται και γίνονται πιο πολύπλοκα, η κατανόηση αυτών των συνδέσεων απαιτεί αρχικά μια οπτική προσέγγιση μέσω των γραφημάτων που θα μας δώσουν μια αποδοτική λύση.

Η διαχείριση γραφημάτων είναι ο κορμός που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση κρίσιμων διαδικασιών, όπως η τοποθέτηση υπηρεσιών, η μετανάστευση και η κατανομή των πόρων. Με τα μοντέλα γράφων, μπορούν να τοποθετηθούν αποδοτικά οι υπηρεσίες για γρήγορη πρόσβαση, να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα των πόρων και να προσαρμοστούν δυναμικά στις εξελισσόμενες απαιτήσεις των υπηρεσιών.

Αυτές οι δομές παρέχουν τη θεμελιώδη βάση πάνω στην οποία υλοποιούνται αυτά τα μοντέλα, βελτιώνοντας συστηματικά τη διαχείριση των υπηρεσιών, ρυθμίζοντας λεπτομερώς την απόδοση του δικτύου και εξασφαλίζοντας προσομοιώσεις που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των υπηρεσιών. Τέλος δίνουν χρήσιμα αποτελέσματα για την αρχιτεκτονική του δικτύου και την εύρεση του καταλληλότερου μοντέλου για τις διαφορετικές ανάγκες των χρηστών [29].

4.2 Μοντέλα δημιουργίας γραφημάτων

Τα μοντέλα δημιουργίας γράφων προσομοιώνουν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια τα ρεαλιστικά σενάρια και δημιουργούν δίκτυα που παρουσιάζουν δομικές ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες των δικτύων του πραγματικού κόσμου. Ανεξάρτητα από τους

κανόνες και μηχανισμούς που περιγράφουν τον σχηματισμό δικτύων, τα μοντέλα αυτά μας επιτρέπουν να διερευνήσουμε, να αναλύσουμε και να προβλέψουμε τη συμπεριφορά πολύπλοκων συστημάτων. Αποτελούν βασικά εργαλεία για την κατανόηση και τον αποδοτικό χειρισμό των δικτύων. Τα μοντέλα τυχαίων γραφημάτων χρησιμεύουν ως θεμελιώδεις βάσεις για την κατανόηση των δομών του δικτύου, προσφέροντας πληροφορίες για την περίπλοκη διασύνδεση των δικτύων του πραγματικού κόσμου.

Τρία σημαντικά μοντέλα, συγκεκριμένα τα μοντέλα Erdős-Rényi, Barabási-Albert και Watts-Strogatz, παρέχουν δυνατότητες σχετικά με την πολυπλοκότητα αυτών των δικτύων και τις δομές τους. Αυτά τα μοντέλα είναι απαραίτητα εργαλεία για τη δημιουργία γραφημάτων που μιμούνται διάφορα σενάρια δικτύου. Το μοντέλο Erdős-Rényi είναι η βάση της επιστήμης του δικτύου, που επιτρέπει τη δημιουργία τυχαίων γραφημάτων καθορίζοντας τον αριθμό των κόμβων και την πιθανότητα σχηματισμού ακμών. Αυτό το μοντέλο, παρά την απλότητά του, αποτυπώνει αποτελεσματικά τη στοχαστική και πιθανοθεωρητική φύση των συνδέσεων του δικτύου [43]. Το μοντέλο Barabási-Albert εισάγει την έννοια της προτιμησιακής προσάρτησης, όπου οι νέοι κόμβοι είναι πιο πιθανό να συνδέονται με καλά διασυνδεδεμένους (πολλές ακμές) κόμβους. Δημιουργεί δίκτυα χωρίς κλίμακα που χαρακτηρίζονται από μερικούς κόμβους με πολυάριθμες συνδέσεις, που μοιάζουν με “οντότητες” με επιρροή σε δίκτυα πραγματικού κόσμου που θα αναλυθούν παρακάτω [54].

Το μοντέλο Watts-Strogatz δίνει έμφαση στην τοπική ομαδοποίηση και στα μικρά μήκη διαδρομής, υπερέχοντας στη μοντελοποίηση δικτύων μικρού κόσμου όπου οι περισσότεροι κόμβοι είναι προσβάσιμοι από οποιονδήποτε άλλο μέσω ενός μικρού αριθμού βημάτων. Αυτό το μοντέλο αποτυπώνει τις στενά συνδεδεμένες κοινότητες και τις αποτελεσματικές συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων που υπάρχουν σε διάφορα δίκτυα, από κοινωνικά δίκτυα έως δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα επιτυγχάνει μια ισορροπία μεταξύ της τάξης και της τυχειότητας, αντικατοπτρίζοντας τα συστήματα του πραγματικού κόσμου [67].

Όταν πρόκειται για σενάρια τοποθέτησης υπηρεσιών, η προσαρμογή αυτών των μοντέλων δημιουργίας γραφημάτων είναι απαραίτητη. Οι υπηρεσίες έρχονται συχνά με διαφορετικές απαιτήσεις και περιορισμούς, που απαιτούν προσαρμογές σε αυτά τα μοντέλα. Η τροποποίηση των πιθανοτήτων σύνδεσης στα δίκτυα Erdős-Rényi ή ο επηρεασμός των κανόνων προσάρτησης στα δίκτυα Barabási-Albert μπορεί να

διασφαλίσει ότι οι υπηρεσίες υψηλής ζήτησης είναι στρατηγικά τοποθετημένες εντός του δικτύου. Αυτές οι προσαρμογές δίνουν στους ερευνητές τη δυνατότητα να δημιουργήσουν δίκτυα που μοιάζουν πολύ με το περιβάλλον τοποθέτησης υπηρεσιών.

Η σημασία αυτών των μοντέλων δημιουργίας γραφημάτων επεκτείνεται στις στρατηγικές μετάβασης υπηρεσιών. Η επιλογή ενός μοντέλου επηρεάζει σημαντικά την τοπολογία του δικτύου, η οποία, με τη σειρά της, επηρεάζει τη σκοπιμότητα και την αποτελεσματικότητα της μετάβασης υπηρεσιών. Για παράδειγμα, η δομή hub-and-spoke των δικτύων χωρίς κλίμακα, χαρακτηριστική του μοντέλου Barabási-Albert, μπορεί να απαιτεί μοναδικές προσεγγίσεις μετάβασης. Ομοίως, τα δίκτυα του μικρού κόσμου, όπου μοντελοποιούνται από το μοντέλο Watts-Strogatz, ενδέχεται να απαιτούν στρατηγικές που αξιοποιούν μικρά μήκη διαδρομής για να επιταχύνουν τη μετάβαση υπηρεσιών. Στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε στα μοντέλα Erdős-Rényi και Barabási-Albert διότι αυτά στοχεύουν στην εστίαση των κρίσιμων υπηρεσιών (κόμβων) συμβάλλοντας σε μια ομαλότερη μετάβαση ελαχιστοποιώντας τις διαταραχές στο σύστημα, ενώ μπορούν να εφαρμοστούν σε σενάρια πραγματικού κόσμου

4.3 Αλγόριθμοι γράφων για την τοποθέτηση υπηρεσιών

Οι αλγόριθμοι γράφων έχουν σημαντικό ρόλο στην οργάνωση της τοποθέτησης υπηρεσιών ιδίως σε σενάρια όπου η αποτελεσματική διανομή και μετάβαση των υπηρεσιών στην άκρη του δικτύου είναι απαραίτητη. Η επιλογή αυτών των αλγορίθμων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης, η βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων και η ικανότητα εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής. Ανάμεσα σε αυτούς τους αλγόριθμους γράφων, το Minimum Spanning Tree (MST) είναι ένα μοντέλο που ξεχωρίζει για τη τοποθέτηση υπηρεσιών και θα χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της εργασίας. Παρ' όλα αυτά, τα MST δεν αποτελούν τη μοναδική λύση και μια σειρά άλλων αλγορίθμων είναι απαραίτητα στοιχεία της εργαλειοθήκης για τη διαχείριση υπηρεσιών [62].

Σε αυτή την ενότητα, θα εμβαθύνουμε στον μηχανισμό λήψης αποφάσεων που είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό των κόμβων στους οποίους θα πρέπει να τοποθετηθεί μια συγκεκριμένη υπηρεσία. Χρησιμοποιώντας το γράφημα k-core, το οποίο αντιπροσωπεύει μια υποπεριοχή του οικοσυστήματος ακμών με ισχυρή ζήτηση για την υπηρεσία "s", στοχεύουμε στην επιλογή ενός υποσυνόλου κόμβων για την τοποθέτηση της υπηρεσίας.

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Ανάλυση του γράφου k-core:

Το γράφημα k-core αποκαλύπτει το τμήμα του δικτύου με ισχυρές συνδέσεις και ζήτηση για την υπηρεσία "s". Χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο εμπνευσμένο από το [14], ο οποίος βελτιώνει το βασικό μοντέλο βελτιστοποιώντας την πολυπλοκότητα χρόνου και χώρου, προσδιορίζουμε το σύνολο k-core. Το σύνολο αυτό ορίζεται ως ο υπογράφος που σχηματίζεται από όλους τους συνδεδεμένους k-πυρήνες στο G' .

Ο αλγόριθμος εκτελεί αποσύνθεση πυρήνων, ταξινομεί τις κορυφές με βάση την πυρηνοκεντρικότητά τους και υπολογίζει τις βαθμολογίες των συνόλων k-πυρήνων για διαφορετικές τιμές του k στο διάστημα $[0, k_{\max}]$.

Υιοθετώντας μια προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω ($k_{\max}$ μέχρι το μηδέν) και χρησιμοποιώντας ένα σχήμα ταξινόμησης σε κουτιά, ο αλγόριθμος αυξάνει την αποδοτικότητα με τον σταδιακό υπολογισμό των πρωταρχικών τιμών των συνόλων k-πυρήνων.

Δημιουργία MST: Μετά την απόκτηση των k-πυρήνων του G' , το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του δέντρου επικάλυψης ελάχιστου κόστους. Το MST έχει σχεδιαστεί για να καταγράφει τις κορυφές και τις ακμές που παρουσιάζουν την υψηλότερη ζήτηση στο υποδίκτυο.

Ο αλγόριθμος για την επεξεργασία του MST συμβάλλει καθοριστικά στον εντοπισμό κόμβων με ισχυρές συνδέσεις στο δίκτυο, που χρησιμεύουν ως πιθανοί υποψήφιοι για τη φιλοξενία των υπηρεσιών με τη μεγαλύτερη ζήτηση.

Μοντέλο κάλυψης κορυφών: Βασιζόμενοι στο αποτέλεσμα της επεξεργασίας MST, δημιουργούμε ένα μοντέλο κάλυψης κορυφών. Αυτό το μοντέλο αποσκοπεί στον εντοπισμό κόμβων ακμών που περιλαμβάνουν τουλάχιστον ένα τελικό σημείο κάθε ακμής στο παραδοθέν MST. Η εστίαση είναι στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των κόμβων που απαιτούνται για την αποτελεσματική κάλυψη του MST.

Εκτέλεση MST: Τα MSTs χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μείωση του συνολικού κόστους και της καθυστέρησης που σχετίζονται με την τοποθέτηση υπηρεσιών. Το επιτυγχάνουν αυτό επιλέγοντας το ελάχιστο σύνολο ακμών που συνδέουν όλους τους κόμβους του δικτύου, ελαχιστοποιώντας ουσιαστικά το συνολικό βάρος των ακμών. Οι υπηρεσίες μπορούν να κατανεμηθούν αποτελεσματικά κατά μήκος των ακμών του MST,

οδηγώντας σε ένα λογικά ορθό, οικονομικά αποδοτικό και χαμηλής καθυστέρησης δίκτυο.

Το MST είναι μια θεμελιώδης έννοια στη θεωρία γραφημάτων και στην Επιστήμη των Υπολογιστών. Αναφέρεται στο μικρότερο δυνατό δέντρο που καλύπτει όλες τις κορυφές ενός συνδεδεμένου, μη κατευθυνόμενου γραφήματος. Ο όρος "δένδρο που εκτείνεται" υποδηλώνει ότι περιλαμβάνει όλες τις κορυφές του αρχικού γράφου και ο όρος "ελάχιστο" υποδηλώνει ότι το άθροισμα των βαρών των ακμών στο δένδρο ελαχιστοποιείται.

Βασικές ιδιότητες ενός MST:

Spanning Tree: Περιλαμβάνει όλες τις κορυφές του αρχικού γραφήματος χωρίς να σχηματίζει κύκλους. Με άλλα λόγια, είναι ένα δέντρο που εκτείνεται σε ολόκληρο το γράφημα.

Ελάχιστο βάρος: Το άθροισμα των βαρών (ή του κόστους) των ακμών στο δέντρο ελαχιστοποιείται. Αυτό εξασφαλίζει ότι το συνολικό κόστος σύνδεσης όλων των κορυφών είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερο.

Η εύρεση του ελάχιστου δέντρου διάσχισης είναι ένα κοινό πρόβλημα με πρακτικές εφαρμογές, όπως ο σχεδιασμός δικτύων, η καλωδίωση κυκλωμάτων και η ομαδοποίηση. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι για την εύρεση του ελάχιστου δέντρου διάσχισης ενός γράφου, με τρεις από τους πιο γνωστούς να είναι οι εξής:

Ο αλγόριθμος του Kruskal: Αυτός ο αλγόριθμος κατασκευάζει το ελάχιστο δέντρο διάσχισης προσθέτοντας διαδοχικά τη μικρότερη ακμή που συνδέει δύο διαφορετικές συνιστώσες του γράφου αυτόν τον αλγόριθμο χρησιμοποιείται στην εργασία μας..

Αλγόριθμος του Prim: Αυτός ο αλγόριθμος ξεκινά με έναν αυθαίρετο κόμβο και αναπτύσσει το ελάχιστο δέντρο με την προσθήκη της μικρότερης ακμής που συνδέει μια κορυφή του δέντρου με μια κορυφή εκτός του δέντρου.

Αλγόριθμος του Dijkstra: Ο αλγόριθμος του Dijkstra μπορεί να προσδιορίσει την συντομότερη διαδρομή μεταξύ κόμβων σε έναν σταθμισμένο γράφο. Όσον αφορά την τοποθέτηση υπηρεσιών, βοηθά στον προσδιορισμό της βέλτιστης διαδρομής για τις υπηρεσίες ώστε να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση. Όταν συνδυάζεται με MSTs, αποτελεί ένα ισχυρό πλαίσιο για τη βελτιστοποίηση της κατανομής υπηρεσιών με ελάχιστη καθυστέρηση [66].

Αλγόριθμοι ομαδοποίησης: Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν σχεδιαστεί για τον εντοπισμό ομάδων κόμβων με ισχυρή εσωτερική συνδεσιμότητα. Στο πλαίσιο της διαχείρισης υπηρεσιών, επιτρέπουν την ομαδοποίηση των υπηρεσιών, βελτιώνοντας την τοποθέτησή τους και μειώνοντας τις αποστάσεις μετάδοσης δεδομένων.

Μέτρα κεντρικότητας: Τα μέτρα κεντρικότητας, όπως η κεντρικότητα betweenness και closeness, είναι καθοριστικά για τον εντοπισμό των κόμβων με τη μεγαλύτερη επιρροή σε ένα δίκτυο. Αυτοί οι κόμβοι επιρροής μπορούν να χρησιμεύσουν ως στρατηγικές θέσεις για την τοποθέτηση υπηρεσιών, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική πρόσβαση.

Τυχαίοι αλγόριθμοι: Οι τυχαίοι αλγόριθμοι παράγουν τυχαία γραφήματα και εισάγουν ένα στοχαστικό στοιχείο στην τοποθέτηση υπηρεσιών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση διαφορετικών στρατηγικών για την τοποθέτηση υπηρεσιών και την ανακάλυψη απροσδόκητων, βέλτιστων λύσεων.

Αλγόριθμοι κβαντικού γράφου: Οι αναδυόμενες τεχνολογίες κβαντικών υπολογιστών έχουν μια αναδυόμενη τάση στο χώρο του δικτύου για την τοποθέτηση υπηρεσιών. Οι κβαντικοί αλγόριθμοι είναι ειδικά σχεδιασμένοι για την ταχεία επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, επιτρέποντας στρατηγικές όπου μέχρι τώρα ήταν ανέφικτες υπολογιστικά.[19].

Με την ενσωμάτωση διαφόρων αλγορίθμων γράφων στο πεδίο της διαχείρισης υπηρεσιών, οι ερευνητές μπορούν να αντιμετωπίσουν προκλήσεις, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι οι υπηρεσίες τοποθετούνται, μεταφέρονται και συντηρούνται με τον βέλτιστο τρόπο σε περιβάλλοντα EC.

4.4 Δυναμική και στατική διαχείριση γράφων

Στον κλάδο της δυναμικής διαχείρισης γραφημάτων η ικανότητα ανταπόκρισης στις αλλαγές του δικτύου σε ελάχιστους χρόνους είναι απαραίτητη για την επίτευξη της βέλτιστης παροχής υπηρεσιών και αποδοτικής χρήσης των πόρων. Θα χρειαστεί αντιμετώπιση των διακυμάνσεων στις συνθήκες του δικτύου και διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των λειτουργιών.

Δυναμική των κόμβων: Σε δυναμικά περιβάλλοντα δικτύου, οι κόμβοι εισάγονται ή αφαιρούνται συχνά. Αυτή η δυναμική κόμβων μπορεί να προκύπτει από την προσθήκη νέων συσκευών, την αποχώρηση συσκευών ή την προσωρινή αποσύνδεση. Οι αποτελεσματικοί αλγόριθμοι δυναμικής διαχείρισης γράφων επιτρέπουν στα δίκτυα να

προσαρμόζονται απρόσκοπτα σε αυτές τις αλλαγές. Για παράδειγμα, όταν νέες συσκευές μπαίνουν στο δίκτυο, οι αλγόριθμοι μπορούν να τις ενσωματώσουν αποτελεσματικά στο υπάρχον σύστημα, τροποποιώντας την τοποθέτηση των υπηρεσιών και τη χρήση των πόρων. Αντίθετα, όταν συσκευές αποσυνδέονται ή αφαιρούνται, οι αλγόριθμοι αυτοί διευκολύνουν την επανατοποθέτηση των υπηρεσιών για τη διατήρηση της διαθεσιμότητας και της χαμηλής καθυστέρησης [21].

Διακυμάνσεις της ζήτησης υπηρεσιών: Οι περίοδοι αιχμής της ζήτησης, για παράδειγμα, μπορεί να οδηγήσουν σε συμφόρηση και προβλήματα καθυστέρησης, εάν δεν γίνει αποτελεσματική διαχείριση. Οι αλγόριθμοι δυναμικής διαχείρισης μπορούν να αξιολογήσουν και να ανταποκριθούν στις μεταβολές της ζήτησης υπηρεσιών. Κατά τη διάρκεια της αύξησης της ζήτησης, διευκολύνουν την ανακατανομή των υπηρεσιών για την αποφυγή συμφόρησης και τη διασφάλιση της αποτελεσματικής κατανομής των πόρων.

Μετανάστευση υπηρεσιών: Η μετανάστευση υπηρεσιών, που συχνά απαιτείται λόγω αλλαγών στα απαιτούμενα της ζήτησης, βελτιστοποίησης πόρων ή ανάγκης μείωσης της καθυστέρησης, αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της δυναμικής διαχείρισης γράφων. Για παράδειγμα, όταν εμφανίζονται τοπικές αυξήσεις στη ζήτηση, οι υπηρεσίες μπορούν να μεταφερθούν δυναμικά σε κόμβους που βρίσκονται πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, μειώνοντας έτσι τους χρόνους απόκρισης και ικανοποιώντας τις ανάγκες των χρηστών [4].

Το k-core δίκτυο είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται στη στατική ανάλυση γράφων και μπορεί να συμβάλλει στην κατανόηση των περίπλοκων δομών δικτύων, ιδίως όταν πρόκειται για την εξέταση της διαχείρισης υπηρεσιών εντός των οικοσυστημάτων. Προσφέρει μια αναπαράσταση των πυκνά διασυνδεδεμένων κόμβων, καθιστώντας τα απαραίτητα στον τομέα της τοποθέτησης υπηρεσιών. Οι υπό-γράφοι k-core έχουν σημαντικές λύσεις για τη μοντελοποίηση της συνδεσιμότητας δικτύων και τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης υπηρεσιών. Η εφαρμογή των δικτύων k-core παρέχει ένα ακριβές πλαίσιο για την εξέταση της δυναμικής του δικτύου και της μετανάστευσης υπηρεσιών. Αντιπροσωπεύουν περιοχές στο δίκτυο όπου κάθε κόμβος έχει τουλάχιστον βαθμό “k”, υποδηλώνοντας υψηλό επίπεδο διασύνδεσης. Αυτή η ιδιότητα εξασφαλίζει αποτελεσματική επικοινωνία και αλληλεπιδράσεις χαμηλής καθυστέρησης, ενώ το “k” μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Στη φάση

δημιουργίας γραφημάτων της εργασίας, οι γράφοι k -core ενσωματώνονται δυναμικά. Οι γράφοι αυτοί παρέχουν μια εις βάθος κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι υπηρεσίες κατανέμονται και συνδέονται σε σενάρια ρεαλιστικών δικτύων. Καθώς οι υπηρεσίες τοποθετούνται στρατηγικά μέσα σε αυτές τις περιοχές k -core, οι στόχοι για αποδοτική μετάδοση, χαμηλή καθυστέρηση και της ευέλικτης μετάβασης καθίστανται εφικτοί[14].

Περιπτώσεις χρήσης σε πραγματικό χρόνο: Η ευθυγράμμιση ακολουθιών στη μοριακή βιοπληροφορική, η παρακολούθηση πολλαπλών αντικειμένων και η αναγνώριση πολλαπλών διαδρομών σε γονιδιακά δίκτυα. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν γρήγορους υπολογισμούς της συντομότερης διαδρομής k για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών.

Παράλληλη προσέγγιση: Για την επιτάχυνση του υπολογισμού της συντομότερης διαδρομής k , μπορούν να εισαχθούν παράλληλοι αλγόριθμοι, οι οποίοι υλοποιούν τον αλγόριθμο k -shortest path παράλληλα σε μια GPU, αξιοποιώντας την CUDA (Compute Unified Device Architecture), μια πλατφόρμα και ένα API για παράλληλους υπολογισμούς.

Πλεονεκτήματα GPU: Η παράλληλη υλοποίηση του αλγορίθμου k -shortest path σε GPU βελτιώνει σημαντικά τους χρόνους επεξεργασίας, ιδίως για μεγάλα γραφήματα. Οι GPU υπερέχουν στον παράλληλο υπολογισμό, γεγονός που τις καθιστά ιδανική επιλογή για αποδοτικές λύσεις σε περίπλοκα προβλήματα που σχετίζονται με γραφήματα[31].

Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι τα δίκτυα k -core δεν αποτελούν καθολική λύση. Η καταλληλότητά τους εξαρτάται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του εκάστοτε δικτύου που αναλύεται. Από την άλλη πλευρά έχουμε και τους γράφους με δυναμική διαχείριση.

Αυξητικοί και μειωτικοί αλγόριθμοι γράφων: Επιτρέπουν αποτελεσματικά την ενημέρωση των γράφων όταν προστίθενται ή αφαιρούνται κόμβοι ή ακμές. Δηλαδή περιλαμβάνουν αλγορίθμους εύρεσης της συντομότερης διαδρομής και ελαχίστου δέντρου.

Δυναμικές δομές δικτύων: Τα δυναμικά δέντρα όπως Link-Cut Trees, Dynamic Trees κτλ. μπορούν να χειριστούν αποτελεσματικά πιθανές εισαγωγές διαγραφές και ερωτήματα.

Partitioning γράφων: Όταν υπάρχουν μεγάλοι δυναμικοί γράφοι η διαμέριση τους σε μικρότερα στοιχεία μπορεί να βοηθήσει στην αποτελεσματική διαχείριση.

Χρονικά γραφήματα: Κάθε ακμή έχει μία χρονοσφραγίδα. Αυτό επιτρέπει να εκτελούνται χρονικά ερωτήματα και ανάλυση του γράφου με τη πάροδο του χρόνου.

Συνοψίζοντας, η δυναμική και η στατική διαχείριση γραφημάτων αποτελεί απαραίτητο στοιχείο του EC, επιτρέποντας στα δίκτυα να προσαρμόζονται άμεσα στις αλλαγές, στη ζήτηση υπηρεσιών και στην κατανομή των πόρων. Η προσαρμοστικότητα και η βοήθεια του k-core εξασφαλίζουν μία αποτελεσματική λύση για τις ανάγκες της διαχείρισης υπηρεσιών στα περιβάλλοντα EC.

Πίνακας 1. Ονοματολογία

Σύμβολο	Περιγραφή
D_I	Το i-οστό τοπικό σύνολο δεδομένων
L	Το σύνολο των κόμβων
n_i	Ο i_{th} κόμβος του EC
x	Πολυμετάβλητο διάνυσμα δεδομένων
M_I	Ο αριθμός των πλειάδων στο i-οστό σύνολο δεδομένων
m	Ο αριθμός των διαστάσεων
X_I	Τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα για την i-οστή διάσταση
S	Το σύνολο των διαθέσιμων υπηρεσιών
s_i	Η i-οστή υπηρεσία
d^i	Το διάνυσμα ζήτησης υπηρεσιών στον i-οστό κόμβο
d_j^i	Η ζήτηση για την j-οστή υπηρεσία στον i-οστό κόμβο
D	Ο συνολικός πίνακας ζήτησης υπηρεσιών
G	Το γράφημα των κόμβων EC
V	Το σύνολο των κορυφών στο γράφημα EC.
E	Το σύνολο των ακμών στο γράφημα EC
S_n	Το σύνολο των top-n δημοφιλών υπηρεσιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Το Προτεινόμενο Μοντέλο

5.1 Διατύπωση του προβλήματος

Στον **Πίνακα 1** βλέπουμε την επεξήγηση των γραφικών συμβόλων που χρησιμοποιούνται στην εργασία. Σε ένα οικοσύστημα EC που αποτελείται από L κόμβους ακμής $L = \{n_1, n_2, \dots, n_L\}$, κάθε κόμβος (n_i) είναι εξοπλισμένος με συσκευές IoT για τη λήψη, την αποθήκευση και την επεξεργασία δεδομένων. Το τοπικό σύνολο δεδομένων ενός κόμβου, που συμβολίζεται ως $D_i = \{x_j\}_{j=1}^{M_i}$, περιέχει M_i m -διάστατα πολυμεταβλητά διανύσματα δεδομένων $x = [x_1, x_2, \dots, x_m] \subset \mathbb{R}^m$. Αυτοί οι κόμβοι διαθέτουν συγκεκριμένες δυνατότητες αποθήκευσης και υπολογισμού, επιτρέποντάς τους να φιλοξενούν διάφορες υπηρεσίες, αλλά ο αριθμός τους είναι περιορισμένος σε σύγκριση με το back end του Cloud.

Σε ολόκληρο το οικοσύστημα υπάρχει ένα σύνολο S διαθέσιμων υπηρεσιών $S = \{s_1, s_2, \dots, s_S\}$. Αυτές οι υπηρεσίες περιλαμβάνουν στοιχεία για την επεξεργασία άκρων, όπως υπηρεσίες που ορίζονται από λογισμικό και εκτελούν μοντέλα μηχανικής μάθησης (ML) ή βαθιάς μάθησης (DL) και απλές μονάδες στατιστικής συμπερασματολογίας. Το οικοσύστημα συναντά εισερχόμενες εργασίες που παράγονται από τελικούς χρήστες και εφαρμογές, δημιουργώντας ζήτηση για κάθε υπηρεσία σε διακριτές χρονικές στιγμές. Αυτές οι εργασίες απαιτούν συγκεκριμένη επεξεργασία πάνω στα τοπικά δεδομένα των κόμβων, καθιστώντας αναγκαία την εκτέλεση ενός υποσυνόλου διαθέσιμων υπηρεσιών.

Οι εργασίες, που συχνά λαμβάνουν τη μορφή ροών εργασίας, δημιουργούν ζήτηση για υπηρεσίες, είτε άμεσα είτε έμμεσα, με στόχο την εξαγωγή γνώσης από τα τοπικά δεδομένα για τη βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών (QoS) για τους τελικούς χρήστες και τις εφαρμογές. Κάθε κόμβος διατηρεί μια δομή δεδομένων, γνωστή ως διάνυσμα ζήτησης υπηρεσιών Synthetic Data Validation (SDV), που απεικονίζει τη ζήτηση για κάθε υπηρεσία. Το SDV για τον κόμβο n_i αναπαρίσταται ως: $d^i = [d_1^i, d_2^i, \dots, d_S^i]$ με το d_j^i , να υποδεικνύει τον αριθμό των εργασιών που απαιτούν την εκτέλεση της j -οστής υπηρεσίας εντός ενός χρονικού παραθύρου ή ορίζοντα. Για την αποφυγή σωρευτικών επιδράσεων στους μετρητές, οι κόμβοι χρησιμοποιούν ένα ολισθαίνον παράθυρο, επανεκκινώντας περιοδικά τα SDV θέτοντας $d_j^i = 0$ σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα.

Υπάρχουν δύο τύποι διαδικασιών παρακολούθησης της ζήτησης υπηρεσιών: στατικές και δυναμικές. Στη στατική διαδικασία, το συρόμενο παράθυρο έχει σταθερό μήκος και η λήξη του επανεκκινεί τη διαδικασία παρακολούθησης. Στη δυναμική διαδικασία, απαιτείται ένας μηχανισμός λήψης αποφάσεων για τον καθορισμό του τελικού χρονικού παραθύρου. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να ενσωματώνει πολύπλοκη στατιστική επεξεργασία, που ενδεχομένως σχετίζεται με την ανίχνευση σωρευτικών αποτελεσμάτων. Η μεθοδολογία της ελάχιστης ανιχνεύσιμης επίδρασης Minimum Detectable Effect (MDE) βοηθά στο σχεδιασμό μοντέλων παρακολούθησης, βοηθώντας στην ανίχνευση της μικρότερης σημαντικής αλλαγής για την οποία ένα διάστημα εμπιστοσύνης δεν θα περιλαμβάνει το μηδέν. Η απόφαση για τη λήξη του ολισθαίνοντος παραθύρου βασίζεται στην ανίχνευση μιας στατιστικά σημαντικής διαφοράς στους διαδοχικούς δειγματικούς μέσους όρους που υπολογίζονται στις πιο πρόσφατες χρονικές στιγμές.

Οι εργασίες μπορεί να ζητούν την άμεση ή έμμεση εκτέλεση πολλαπλών υπηρεσιών s_j , επηρεάζοντας πολλαπλές τιμές d_j . Κατά συνέπεια, το d ενημερώνεται συνεχώς με την άφιξη νέων εργασιών, αποτελώντας τη βάση για τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων που εξηγούνται αργότερα.

Το μοντέλο ακολουθεί μια απλή αρχή: τοποθετήστε στρατηγικά δημοφιλείς υπηρεσίες σε τοποθεσίες που παρουσιάζουν αυξημένη ζήτηση, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς στους χρόνους κλήσης των υπηρεσιών.

Απεικονίζουμε τους κόμβους στο οικοσύστημα Edge Computing (EC) χρησιμοποιώντας ένα γράφημα $G = (L, E)$, όπου L είναι το σύνολο των κορυφών (κόμβων) και $e_{ij} \in E$ αντιπροσωπεύει μια ακμή που συνδέει τον κόμβο n_i με τον κόμβο n_j , υποδεικνύοντας την άμεση επικοινωνία. Υποθέτουμε διμερή επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, εξασφαλίζοντας ότι αν $e_{ij} \in E$, τότε $e_{ji} \in E$. Ο γράφος χρησιμεύει ως "εικονικό κάλυμμα" πάνω από τη διαθέσιμη υποδομή, αποτελώντας τη βάση για τη φιλοξενία υπηρεσιών σε μια αρχιτεκτονική ακμών-πλέγματος. Οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων δημιουργούνται με βάση τη στρατηγική των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων.

Το υπό εξέταση πρόβλημα, περιλαμβάνει την εύρεση, για κάθε διαθέσιμη υπηρεσία $s \in S$, των κατάλληλων κόμβων από το L για τη φιλοξενία της εν λόγω υπηρεσίας, ικανοποιώντας παράλληλα τους περιορισμούς ζήτησης. Η τοποθέτηση μιας υπηρεσίας σε στρατηγικές θέσεις που επηρεάζονται από τη ζήτηση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στη διαχείριση των εισερχόμενων εργασιών:

Πλεονέκτημα 1: Η τοποθέτηση μιας υπηρεσίας εκεί όπου παρατηρείται υψηλή ζήτηση μειώνει το χρόνο κλήσης της υπηρεσίας, οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους και πιθανή επαναχρησιμοποίηση πόρων στο μέλλον.

Πλεονέκτημα 2: Ακόμη και αν μια υπηρεσία δεν τοποθετηθεί αρχικά εκεί όπου ζητείται, το μοντέλο μας παρέχει έναν "χάρτη" της τοποθέτησης των υπηρεσιών, επιτρέποντας στους κόμβους να τραβήξουν την υπηρεσία (μετανάστευση υπηρεσιών) ή να μεταφορτώσουν την εργασία σε κατάλληλους κόμβους βάσει ενός μοντέλου απόφασης.

Πλεονέκτημα 3: Εάν είναι απαραίτητη η μετακίνηση μιας υπηρεσίας, το κόστος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την τοποθέτηση των υπηρεσιών στην κεντρική περιοχή του οικοσυστήματος όπου η ζήτηση είναι υψηλή, μειώνοντας το συνολικό κόστος επικοινωνίας.

Το μοντέλο μας δεν επικεντρώνεται σε έναν μηχανισμό για τη λήψη απόφασης σχετικά με τη μετανάστευση υπηρεσιών ή την εκφόρτωση εργασιών. Αντ' αυτού, αναζητά προληπτικά κόμβους όπου η τοποθέτηση κάθε υπηρεσίας μεγιστοποιεί τη μελλοντική της χρήση, όπως προκύπτει από τις εισερχόμενες εργασίες. Οι υπηρεσίες τοποθετούνται μόνο σε κόμβους που μπορούν να τις φιλοξενήσουν, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμένους πόρους των κόμβων. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος τοποθέτησης προκύπτει από την εγγενή ετερογένεια των υπολογιστικών δυνατοτήτων των κόμβων, συμπεριλαμβανομένης της ποικιλομορφίας στη διαμόρφωση του υλικού και της διαθεσιμότητας αποθήκευσης.

Συνοπτικά ας θεωρήσουμε μια εφαρμογή που συλλέγει δεδομένα σχετικά με τις απαιτήσεις υπηρεσιών σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα και κατατάσσει τις υπηρεσίες με βάση αυτές τις πληροφορίες για να καθορίσει τη δημοτικότητα τους στο οικοσύστημα EC. Τα δεδομένα συγκεντρώνονται σε έναν πίνακα $L \times S$ $D = [d^i]_{i=1}^L$, όπου κάθε γραμμή αντιπροσωπεύει το S -διάστατο διάνυσμα ζήτησης υπηρεσιών (SDV) ενός κόμβου n_i . Αυτοί οι πίνακες αποθηκεύονται κεντρικά, όπως στο Cloud, για ανάλυση.

Οι υπηρεσίες ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά με βάση τις συνολικές απαιτήσεις και επιλέγεται ένα υποσύνολο $S_n \subset S$ με τις κορυφαίες- n υπηρεσίες χρησιμοποιώντας μια ανάλυση προσανατολισμένη στη χρησιμότητα. Η υπερπαράμετρος n υποδηλώνει τον αριθμό των υπηρεσιών που θεωρείται κερδοφόρο να φιλοξενηθούν στο οικοσύστημα EC, ενώ οι υπόλοιπες $S - n$ υπηρεσίες αποθηκεύονται πιο αποτελεσματικά στο Cloud. Όταν οι εργασίες ζητούν εκτέλεση σε συγκεκριμένους κόμβους, οι κόμβοι αυτοί επικοινωνούν

με το Cloud για την εκτέλεση της υπηρεσίας, εξισορροπώντας το κόστος της τοπικής αποθήκευσης και εκτέλεσης με το κόστος και το χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά των αιτημάτων στο Cloud.

Η επιλογή της υπερπαραμέτρου n είναι ζωτικής σημασίας, αντιπροσωπεύοντας τον στρατηγικό προσανατολισμό του συστήματος στη διαχείριση του συμβιβασμού μεταξύ της φιλοξενίας υπηρεσιών κοντά στους τελικούς χρήστες και της μεταφοράς αιτημάτων στο Νέφος για ταχύτερη εκτέλεση.

Στο γράφημα κόμβων G , οι κόμβοι ομαδοποιούνται με βάση τη χωρική απόσταση. Οι κόμβοι που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση σχηματίζουν την ίδια συστάδα, και οι κορυφαίες- n υπηρεσίες τοποθετούνται σε κάθε συστάδα, λαμβάνοντας υπόψη τους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους. Η προσέγγιση αυτή αποκλίνει από τη βασική γραμμή τοποθέτησης υπηρεσιών σε όλους τους διαθέσιμους κόμβους, επιλέγοντας συγκεκριμένους κόμβους με βάση τη θέση τους, την αποθηκευτική/υπολογιστική τους ικανότητα και την παρατηρούμενη ζήτηση υπηρεσιών.

Το τεχνικό πρόβλημα εισάγεται εστιάζοντας σε μια υπηρεσία s και σε ένα υποσύνολο κόμβων που ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο υπογράφημα $G' = (L', E')$ εντός του οικοσυστήματος EC . Το ερευνητικό πρόβλημα περιλαμβάνει την εύρεση των καταλληλότερων κόμβων $A \subset L'$ που μπορούν να φιλοξενήσουν και να εκτελέσουν την υπηρεσία s .

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος προτείνεται μια διαδοχική προσέγγιση, αξιοποιώντας το γράφημα που σχηματίζεται από τις συνδέσεις μεταξύ των διαθέσιμων κόμβων ακμής. Η εστίαση γίνεται αρχικά στο δίκτυο k -πυρήνων, που αντιπροσωπεύει κόμβους με τουλάχιστον k συνδέσεις, οι οποίοι θεωρούνται σημαντικοί λόγω του μεγάλου αριθμού ομότιμων συνδέσεων. Στη συνέχεια, τα σύνολα k -core χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του MST, αποκαλύπτοντας τις κυρίαρχες ακμές μεταξύ κόμβων με ισχυρή ζήτηση για μια συγκεκριμένη υπηρεσία. Το αποτέλεσμα του MST τροφοδοτείται σε ένα σχήμα παράδοσης κάλυψης κορυφών για τον εντοπισμό κόμβων που βρίσκονται σε θέσεις πυρήνων με υψηλή ζήτηση για μια υπηρεσία. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει την τοποθέτηση των υπηρεσιών σε τοποθεσίες που ελαχιστοποιούν την απόσταση μεταξύ των κόμβων που προσφέρουν υπηρεσίες και των πιθανών αιτούντων.

Ο στόχος είναι να τοποθετηθούν οι κόμβοι σε θέσεις που βελτιστοποιούν τη συνδεσιμότητα με τις συσκευές IoT και παρέχουν εξαιρετικά προσβάσιμες υπολογιστικές δυνατότητες και υπηρεσίες στους κοντινούς χρήστες. Για τη διερεύνηση δυναμικών περιβαλλόντων, εστιάζουμε συγκεκριμένα σε έναν εντελώς τυχαίο γράφο, χρησιμοποιώντας το μοντέλο Erdős-Renyi. Επιπλέον, χρησιμοποιούμε το μοντέλο Barabási-Albert, δημιουργώντας δίκτυα χωρίς κλίμακα με προτιμησιακή προσάρτηση, όπου οι νέοι κόμβοι που εισέρχονται στο δίκτυο είναι πιο πιθανό να συνδεθούν σε υπάρχοντες κόμβους με υψηλή συνδεσιμότητα.

Στο μοντέλο Erdős-Renyi, όλα τα γραφήματα με σταθερό σύνολο κορυφών και σταθερό αριθμό ακμών θεωρούνται εξίσου πιθανά. Ενώ τα περισσότερα δίκτυα του πραγματικού κόσμου μπορεί να μην είναι εντελώς τυχαία και να παρουσιάζουν ανάμιξη με βάση την οποία οι κόμβοι υψηλού βαθμού τείνουν να συνδέονται με άλλους κόμβους υψηλού βαθμού, η μελέτη μας υποθέτει ότι οι κόμβοι της EC έχουν τυχαίες συνδέσεις με τους ομότιμους κόμβους τους, διευκολύνοντας την επικοινωνία και την ανταλλαγή δεδομένων/υπηρεσιών. Για παράδειγμα, σε ένα τυχαίο σενάριο, οι κόμβοι μπορεί να έχουν ποικίλες ακμές εξόδου, που αντιπροσωπεύουν κανάλια επικοινωνίας στο οικοσύστημα (δεν επιτρέπονται κύκλοι στο γράφημα).

Στρέφοντας την προσοχή μας στον υπογράφο k -πυρήνων, στοχεύουμε στη μεγιστοποίηση της πιθανότητας συνδέσεων στο σύνολο του δικτύου. Οι κόμβοι που υπάρχουν στον υπο-γράφο k -core έχουν συνδέσεις με ένα σημαντικό μέρος των ομότιμων τους, καθιστώντας τις εργασίες εύκολα εκφορτώσιμες ή τις υπηρεσίες εύκολα μετακινούμενες λόγω της ελάχιστης απόστασης μεταξύ του κεντρικού υπολογιστή και του υποδοχέα. Η πιθανότητα p_k αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ένας τυχαία επιλεγμένος κόμβος να έχει βαθμό ίσο με k . Το μαθηματικό υπόβαθρο όλης της εργασίας παρατίθεται παρακάτω:

Λήμμα 1: Η πιθανότητα παρατήρησης ενός βαθμού σε έναν κόμβο στο $\frac{k_{max}}{2}$ που δίνεται από το τύπο

$$q = 1 - \sum_{k=0}^{\frac{k_{max}}{2}} \binom{|L|-1}{k} p^k (1-p)^{|L|-1-k} \quad (1)$$

, η απόδειξη ολοκληρώνεται εύκολα με τη χρήση της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDF) της διωνυμικής κατανομής η οποία αναλύεται παρακάτω.

Λήμμα 2: Η πιθανότητα παρατήρησης ενός βαθμού σύνδεσης πάνω από ένα ποσοστό των διαθέσιμων κόμβων στο οικοσύστημα που ορίζεται από τη σχέση θ' είναι μικρότερη ή ίση από την $\frac{p}{\theta'}$.

Απόδειξη. Υιοθετώντας την ανισότητα του Markov, παίρνουμε ότι:

$$P(Y \geq (|L| - 1) \cdot \theta') \leq \frac{E(Y)}{(|L| - 1) \cdot \theta'}, \quad (2)$$

αφού αντικαταστήσουμε έχουμε

$$P(Y \geq (|L| - 1) \cdot \theta') \leq \frac{p}{\theta'} \quad (3)$$

Η απόφαση για την τελική τοποθέτηση έρχεται μετά το αποτέλεσμα του του αλγορίθμου MST, εφαρμόζουμε ένα μοντέλο κάλυψης κορυφών για να εντοπίζει τις ισχυρές συνδέσεις στο γράφημα και καταλήγει στο σύνολο των κορυφών που περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα τελικό σημείο κάθε ακμής του γράφου [7]. Το πρόβλημα της εύρεσης του καλύμματος κορυφών είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα που δεν μπορεί να επιλυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο.

Θεώρημα 1. Το πρόβλημα κάλυψης κορυφών είναι NP-πλήρες

Απόδειξη. Η απόδειξη παρέχεται στο [9].

5.2 Το μοντέλο Erdős-Rényi

Στην προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για τη διαχείριση των υπηρεσιών, διακρίνεται ο καίριος ρόλος της τοπολογίας του δικτύου ως βασικού παράγοντα. Βάσει αυτού, το μοντέλο, βοηθά στη προσέγγιση για την κατανόηση της δημιουργίας τυχαίων δικτύων. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει την ικανότητα να δημιουργεί τυχαίους γράφους καθορίζοντας δύο βασικές παραμέτρους: τον αριθμό των κόμβων και την πιθανότητα δημιουργίας συνδέσεων μεταξύ τους. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει την προσομοίωση δικτύων διαφόρων μεγεθών και πυκνοτήτων, που μοιάζουν πολύ με τα σενάρια του πραγματικού κόσμου. Με τη κατάλληλη ρύθμιση αυτών των παραμέτρων, μπορούν να αναπαραχθούν δίκτυα που έχουν από αραιή αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική έως πυκνά διασυνδεδεμένα οικοσυστήματα.

Εισάγει μια πιθανολογική προσέγγιση για τη δημιουργία δικτύων και επιτρέπει τη δημιουργία τυχαίων γράφων καθορίζοντας τον αριθμό των κόμβων και την πιθανότητα δημιουργίας ακμών μεταξύ τους.

Στο τομέα του EC όπου τα δίκτυα χαρακτηρίζονται από πλήθος συσκευών και κόμβων ακμής, το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να προσομοιώνουν σενάρια δικτύων που δείχνουν την πολυπλοκότητα του πραγματικού κόσμου, λαμβάνοντας υπόψη την έννοια της αβεβαιότητας για τη συνδεσιμότητα των συσκευών [15].

Υπάρχουν δύο εκδοχές για αυτό το μοντέλο:

- 1) Έχουμε $G(n, M)$, έναν γράφο που επιλέγεται τυχαία από το σύνολο γράφων με n κόμβους και M ακμές. Κάθε ακμή περιλαμβάνεται στο γράφημα με μία πιθανότητα p ανεξάρτητα από τις άλλες ακμές.
- 2) Επίσης στο $G(n, p)$, ένας γράφος δημιουργείται συνδέοντας κόμβους τυχαία. Κάθε ακμή περιλαμβάνεται στο γράφημα με μία πιθανότητα p ανεξάρτητα από τις άλλες ακμές.

Ένα γράφημα που παράγεται από το διωνυμικό μοντέλο Erdős-Rényi, έχει το p που όσο αυξάνεται από 0 στο 1, το γράφημα έχει όλο και περισσότερες πιθανότητες να έχει πολλές ακμές μεταξύ των κόμβων. Σύμφωνα με τη δεύτερη εκδοχή όπου θα χρησιμοποιηθεί και στο πείραμα μας ένας γράφος έχει κατά μέσο όρο $\binom{n}{2}p$ ακμές.

Το μοντέλο ακολουθεί την διωνυμική κατανομή οπότε κατανομή του βαθμού του κόμβου είναι:

$$p_k = \binom{n-1}{k} p^k (1-p)^{n-1-k} \quad (4)$$

, όπου n ο αριθμός των κόμβων.

Για έναν πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων η κατανομή του βαθμού (degree distribution) είναι πρακτικά μία κατανομή Poisson με πιθανότητα:

$$p_k = \frac{e^{-c} \cdot c^k}{k!} \quad (5)$$

Αξιοποιώντας το μοντέλο Erdős-Rényi, διερευνώνται τα όρια της κλιμάκωσης του δικτύου και βρίσκονται στρατηγικές για την αποτελεσματική τοποθέτηση και διαχείριση και μετάβαση των υπηρεσιών. Επιτρέπει μια αποδοτική ανάλυση της συνδεσιμότητας του δικτύου του EC, προσφέροντας πληροφορίες για το πώς και πού θα πρέπει να τοποθετηθούν βέλτιστα οι υπηρεσίες [31].

5.3 Μοντέλο Barabási-Albert στη διαχείριση υπηρεσιών

Το μοντέλο Barabási-Albert είναι γνωστό για την τάση του να δημιουργεί δίκτυα χωρίς κλίμακα, δεν είναι απλώς μια μαθηματική έννοια αλλά ένα κρίσιμο στοιχείο στο πεδίο του EC. Μπορεί και συμβάλλει στη μοντελοποίηση δικτύων, η οποία ανταποκρίνεται πλήρως στις απαιτήσεις των δυναμικών περιβαλλόντων.

Η αρχιτεκτονική του χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό που ονομάζεται προτιμησιακή προσάρτηση. Ο μηχανισμός αυτός αναθέτει μεγαλύτερη πιθανότητα νέων συνδέσεων σε κόμβους με μεγαλύτερο βαθμό, οδηγώντας στην εμφάνιση κόμβων στο δίκτυο. Τα δίκτυα endpoints συχνά παρουσιάζουν το παράδειγμα "ο πλούσιος πλουσιότερος", όπου λίγοι κόμβοι πυρήνα ή συσκευές ακραίων σημείων φιλοξενούν την πλειονότητα των υπηρεσιών [20].

Η κατανομή των βαθμών σε αυτό το μοντέλο ακολουθεί κατανομή νόμου δύναμης.

$$P(k) \sim k^{-\gamma} \quad (6)$$

όπου γ ο εκθέτης του νόμου δύναμης.

Η πιθανότητα $P_i(t)$ ότι ένας κόμβος συνδέεται με έναν υπάρχοντα κόμβο i είναι ανάλογη του τρέχοντος βαθμού.

$$P_i(t) = \frac{k_i(t)}{\sum_j k_j(t)} \quad (7)$$

όπου $k_i(t)$ είναι ο βαθμός του κόμβου i στον χρόνο t .

Το χαρακτηριστικό μήκος της διαδρομής L σε ένα δίκτυο Barabási–Albert είναι συχνά λογαριθμικό ως προς τον αριθμό των κόμβων.

$$L \sim \frac{\log N}{\log(\log N)} \quad (8)$$

Το EC βασίζεται στην αρχή της αποτελεσματικής τοποθέτησης και μετάβασης υπηρεσιών. Για να διασφαλιστεί ότι οι υπηρεσίες φτάνουν γρήγορα και αξιόπιστα στους τελικούς χρήστες, πρέπει να τοποθετούνται στρατηγικά μέσα στο δίκτυο. Η τάση του για

σχηματισμό κόμβων προσομοιώνει τη φυσική εμφάνιση κόμβων πλούσιων σε πόρους σε περιβάλλοντα EC, διευκολύνοντας τον προσδιορισμό των βέλτιστων θέσεων για την τοποθέτηση υπηρεσιών.

Αυτά τα δίκτυα μικρών κόσμων παρουσιάζουν τοπική ομαδοποίηση και μικρά μήκη διαδρομής, δύο ιδιότητες ιδιαίτερα επιθυμητές στα οικοσυστήματα ακμών. Επιτρέπουν στις υπηρεσίες να διατηρούν τόσο την συσχέτισή με τους τελικούς χρήστες όσο και αποτελεσματικές διαδρομές επικοινωνίας.

Καθώς το EC συνεχίζει να μεταμορφώνει το ψηφιακό τοπίο, το μοντέλο βοηθά τη βελτιστοποίηση του δικτύου και την σωστή τοποθέτηση των υπηρεσιών στο EC.

5.4 Προσαρμογές στην τοποθέτηση υπηρεσιών

Εύρεση της βέλτιστης κάλυψης του δικτύου: Η εργασία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της βέλτιστης κάλυψης του δικτύου μέσω της εφαρμογής ενός αλγορίθμου *k*-core graph. Ο αλγόριθμος αυτός προσδιορίζει το σύνολο *k*-πυρήνων, το οποίο ορίζεται ως ο υπογράφος που περιλαμβάνει όλους τους συνδεδεμένους *k*-πυρήνες στο G' . Η προσέγγιση βασίζεται στο βασικό μοντέλο με βελτιώσεις που προτάθηκε στο [14], με στόχο την εύρεση του πιο αποδοτικού *k* από άποψη πολυπλοκότητας χρόνου και χώρου. Η βασική λύση επικεντρώνεται στο G' και χρησιμοποιεί μια μετρική βαθμολόγησης της κοινότητας Q . Ο αλγόριθμος εκτελεί διαδοχικά την αποσύνθεση πυρήνων, διατάσσει τις κορυφές με βάση την πυρηνοκεντρικότητά τους και υπολογίζει τις βαθμολογίες των συνόλων *k*-πυρήνων για όλους τους ακέραιους *k* εντός του εύρους $[0, k_{max}]$. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένα σύστημα ταξινόμησης σε κάδους για την τακτοποίηση των κορυφών με βάση την πυρηνοκεντρικότητά τους, σημειώνοντας την αρχική θέση των κορυφών με την ίδια πυρηνοκεντρικότητα. Ειδικότερα, η βελτίωση του αλγορίθμου έγκειται στον σταδιακό υπολογισμό πρωτογενών τιμών για σύνολα *k*-πυρήνων που προέρχονται από σύνολα $(k + 1)$ -πυρήνων.

Οι βαθμολογίες υπολογίζονται από πάνω προς τα κάτω, από το k_{max} προς το μηδέν. Η τελική έξοδος του αλγορίθμου, οι *k*-πυρήνες του G' , χρησιμοποιείται στη συνέχεια στην επόμενη φάση λήψης αποφάσεων. Αυτή η φάση επικεντρώνεται στη δημιουργία του MST και αποσκοπεί στον εντοπισμό κόμβων με ισχυρές συνδέσεις στο δίκτυο, θεωρώντας τους ως πιθανούς υποδοχείς για υπηρεσίες υψηλής ζήτησης.

Σε αυτή την εργασία εστιάζουμε στα μοντέλα Erdős-Rényi και Barabási-Albert, ώστε να γίνουν καταλληλότερα για την τοποθέτηση υπηρεσιών στα οικοσυστήματα edge.

Αυτές οι προσαρμογές είναι εξαιρετικά σημαντικές για να εξασφαλιστεί ότι η δομή του δικτύου μπορεί και αποτυπώνει τα χαρακτηριστικά του πραγματικού κόσμου.

Ενώ το μοντέλο Erdős-Rényi είναι γνωστό για τη στοχαστική και τυχαία δημιουργία γράφων, η ικανότητα του να προσαρμόζεται είναι αυτή που το καθιστά κατάλληλο για το πείραμα. Προσαρμόζοντας τις παραμέτρους του ώστε να αντιπροσωπεύει τις συγκεκριμένες ανάγκες συνδέσεων των συσκευών και υπηρεσιών, γίνεται ένα αποτελεσματικό εργαλείο. Μπορούμε να ρυθμίσουμε λεπτομερώς την πιθανότητα δημιουργίας ακμών. Για παράδειγμα, μια υψηλότερη πιθανότητα σχηματισμού ακμών μεταξύ κόμβων που αντιπροσωπεύουν προσομοιώσεις της καθημερινότητας μπορεί να μιμηθεί την πραγματική λειτουργία τους [15].

Αντίθετα, το μοντέλο Barabási-Albert, με την τάση του προς τη δημιουργία δικτύων χωρίς κλίμακα, παρουσιάζει μια αποτελεσματική προσαρμογή στον κλάδο της τοποθέτησης υπηρεσιών. Τα δίκτυα ακμών συχνά εμφανίζουν ιεραρχική κατανομή των υπηρεσιών, με λίγους κεντρικούς κόμβους να έχουν τις περισσότερες ακμές. Αυτοί οι κόμβοι αντιστοιχούν σε συσκευές άκρων που χρησιμεύουν ως κατάλληλοι προορισμοί για τη μετανάστευση υπηρεσιών. Αυτή η προσαρμογή διασφαλίζει ότι το δίκτυο διατηρεί την τοπική ομαδοποίηση, ενώ παράλληλα επιτρέπει μικρά μήκη διαδρομής, που είναι ζωτικής σημασίας για την ευέλικτη και αποτελεσματική τοποθέτηση υπηρεσιών σε περιβάλλοντα ακμών [20].

Στο περιβάλλον του EC, η τοποθέτηση υπηρεσιών είναι η κύρια βάση για την παροχή αποδοτικών λειτουργιών στους χρήστες και η μείωση της καθυστέρησης. Τα δύο μοντέλα χρειάζονται ορισμένες προσαρμογές είτε στις μεταβλητές είτε στον αριθμό κόμβων ώστε οι πρακτικές προκλήσεις της τοποθέτησης υπηρεσιών στην άκρη να αντιμετωπιστούν βρίσκοντας μετά εφαρμογές σε σενάρια του πραγματικού κόσμου.

5.5 Ανασκόπηση του αλγορίθμου Kamada - Kawai

Ο αλγόριθμος διάταξης Kamada-Kawai, που χρησιμοποιείται εκτενώς στην οπτικοποίηση δικτύων, αποδεικνύεται πολύτιμος στη διαχείριση υπηρεσιών μέσω της μαθηματικής βελτιστοποίησης των σχέσεων υπηρεσιών. Η διαχείριση υπηρεσιών, που περιλαμβάνει την περίπλοκη οργάνωση των υπηρεσιών, απαιτεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση των πολύπλοκων εξαρτήσεων. Ο αλγόριθμος μεταφράζει αυτές τις σχέσεις σε ένα γράφημα, όπου οι κόμβοι υποδηλώνουν τις υπηρεσίες και οι ακμές τις εξαρτήσεις.

Οι θεμελιώδεις αρχές του αλγορίθμου αξιοποιούν μαθηματικές έννοιες για την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας εντός ενός συστήματος. Αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή του νόμου του Hooke για τις δυνάμεις ελατηρίου και του νόμου του Coulomb για τις δυνάμεις απόθησης:

1. Δυνάμεις ελατηρίου (Νόμος του Hooke):

$$F_{spring} = k \cdot (d - L) \quad (9)$$

όπου k είναι η σταθερά του ελατηρίου, d είναι η τρέχουσα απόσταση μεταξύ των κόμβων και L είναι το μήκος ηρεμίας του ελατηρίου.

2. Δυνάμεις απόθησης (Νόμος του Coulomb):

$$F_{repulsion} = \frac{k_{repulsion}}{d^2} \quad (10)$$

όπου k η απόθηση και d η απόσταση μεταξύ των κόμβων. Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο Kamada-Kawai σε ένα k -core δίκτυο. Η διάταξη Kamada-Kawai τείνει να τοποθετεί τους κόμβους με ισχυρότερες συνδέσεις πιο κοντά ο ένας στον άλλο. Εφαρμόζοντάς την στον k -core, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι κεντρικοί κόμβοι με υψηλότερους βαθμούς ή ισχυρότερες συνδέσεις είναι οπτικά πιο κεντρικοί στη διάταξη. Αυτό μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη σημασία των κόμβων εντός του k -core [65].

Ο αλγόριθμος διάταξης βοηθά στον εντοπισμό συστάδων ή κοινοτήτων εντός ενός δικτύου, υποστηρίζοντας την ανάλυση ανίχνευσης κοινοτήτων και αποκαλύπτοντας φυσικές ομαδοποιήσεις εντός των δεδομένων.

Για το μοντέλο Erdős-Renyi:

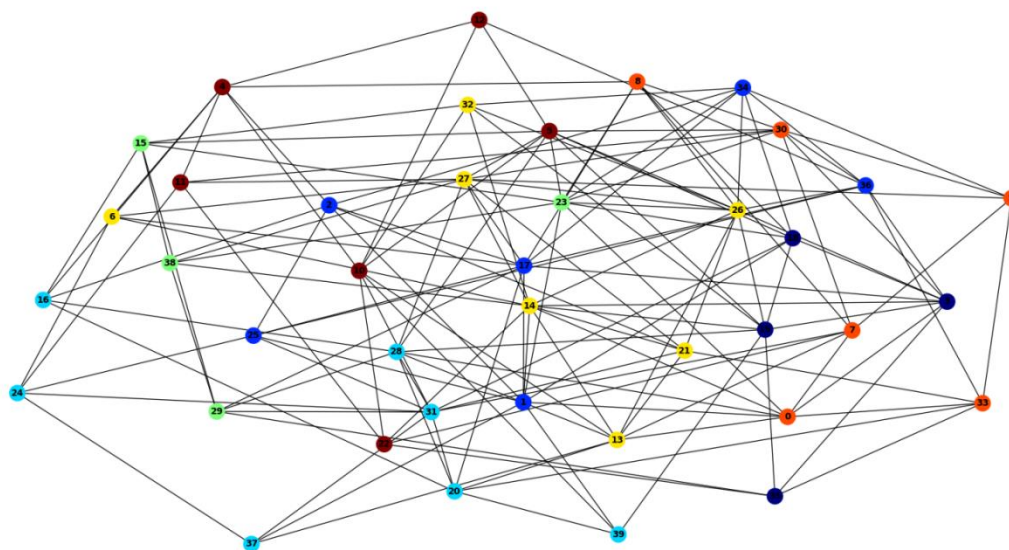


Figure 1. Ο αλγόριθμος Kamada-Kawai για το μοντέλο Erdős-Renyi

Για το μοντέλο Barabási-Albert:

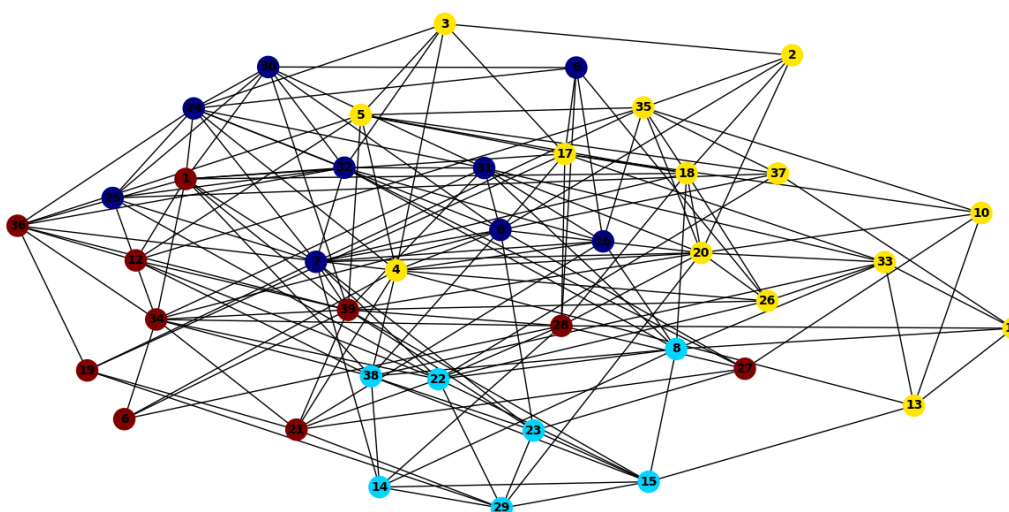


Figure 2. Ο αλγόριθμος Kamada-Kawai για το μοντέλο Barabási-Albert

Παρατηρούμε ότι οι ισχυρά συνδεδεμένοι κόμβοι (που έχουν ίδιο χρώμα) στο πρώτο μοντέλο βρίσκονται σχετικά διασκορπισμένοι μέσα στον γράφο ενώ στο δεύτερο μοντέλο είναι πιο κοντά ο ένας με τον άλλον δημιουργώντας «κοινότητες».

5.6 Ενσωμάτωση της δυναμικής ζήτησης υπηρεσιών και στρατηγικές τοποθέτησης τους

Στον τομέα του EC σε συνδυασμό με τη διαχείριση υπηρεσιών, είναι υψίστης σημασίας η κατανόηση της δυναμικής φύσης της ζήτησης υπηρεσιών. Για την αποτελεσματική τοποθέτηση υπηρεσιών στο EC, είναι αναγκαίο να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια η συνεχής αλλαγή των αναγκών της ζήτησης υπηρεσιών. Οι υπηρεσίες δεν είναι στατικές δηλαδή η ζήτησή τους μπορεί να μεταβάλλεται λόγω πολλών παραγόντων που εξαρτώνται από την ώρα της ημέρας πχ. λόγω κίνησης σε ένα συγκεκριμένο σημείο οι ανάγκες για εφαρμογές GPS θα είναι υπερβολικά αυξημένες σχετικά με τον μέσο όρο. Για αυτό απαιτούνται μοντέλα για την πρόβλεψη και την προσαρμογή, σε αυτές τις απρόσμενες αλλαγές σε άμεσο χρόνο. Θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα ιστορικά των διαφόρων αναγκών, οι γεωγραφικές συντεταγμένες και φυσικά οι τάσεις των χρηστών ώστε να υπάρχει δυναμικός χαρακτήρας στην παροχή υπηρεσιών. Η σταθερή ή στατική τοποθέτηση δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τις συνεχείς αλλαγές σε ένα οικοσύστημα το οποίο αλλάζει συνεχώς και πολλές φορές απρόβλεπτα. Οι στρατηγικές προσαρμογής διασφαλίζουν ότι οι υπηρεσίες βρίσκονται εκεί όπου χρειάζονται περισσότερο σε κάθε στιγμή. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει δυναμική μετανάστευση υπηρεσιών, εξισορρόπηση φορτίου ή προληπτική κατανομή βάσει αναλύσεων ή ιστορικών στοιχείων. Η σωστή υποδομή στο EC πρέπει να είναι ικανή να κατανέμει και να επιλέγει δυναμικά τους πόρους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παροχή υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων ανάλογα με τη μεταβολή της ζήτησης. Η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης είναι μία βασική ανάγκη σε ένα οικοσύστημα. Η μείωση του χρόνου μεταφοράς των δεδομένων μεταξύ των χρηστών και των υπηρεσιών μπορεί να επιτευχθεί, με τη χρήση της προσωρινής αποθήκευση του περιεχομένου στην ανάπτυξη διακομιστών EC καθώς και την χρήση αλγορίθμων σαν αυτούς που αναλύονται στην εργασία.

Μία άλλη στρατηγική είναι η διασφάλιση των λειτουργιών QoS. Δηλαδή οι υπηρεσίες που είναι τοποθετημένες στο EC πρέπει να ικανοποιούν αυστηρά τα προκαθορισμένα πρότυπα απόδοσης, ακόμη και όταν υπάρχει μεταβολή στην ζήτηση. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται δυναμική διαχείριση QoS, όπου οι πόροι

κατανέμονται με βάση τη ζήτηση σε πραγματικό χρόνο και την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων.

Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης από την άλλη μπορούν να παίρνουν σωστές και τεκμηριωμένες αποφάσεις για την τοποθέτηση υπηρεσιών συμβάλλοντας στο απαιτητικό πεδίο της διαχείρισης των υπηρεσιών στο EC.

5.7 Σύγκριση των δύο μοντέλων και περιοχές εφαρμογής τους

Σε αυτή τη σύγκριση των δύο μοντέλων, εξετάζουμε τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους. Προσφέρουν διαφορετικές προσεγγίσεις για τη δομή του δικτύου, τη συνδεσιμότητα και για τη διαχείριση υπηρεσιών όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες.

Τυχαιότητα ακμών και προτιμησησική προσκόλληση:

Το μοντέλο Erdős-Rényi αντιπροσωπεύει την τυχαιότητα κατά το σχηματισμό του δικτύου. Σε αυτό το μοντέλο, οι ακμές σχηματίζονται ανεξάρτητα μεταξύ των κόμβων με βάση μια προκαθορισμένη πιθανότητα. Αυτή η τυχαιότητα αντικατοπτρίζει σενάρια όπου οι συνδέσεις δικτύου είναι απρόβλεπτες και αυθαίρετες, χωρίς συγκεκριμένη τάση σύνδεσης προς συγκεκριμένους κόμβους. Αντίθετα, το μοντέλο Barabási-Albert λειτουργεί με βάση την αρχή της προτιμησησικής προσκόλλησης. Δημιουργεί δίκτυα χωρίς κλίμακα όπου ένας μικρός αριθμός κόμβων, προσελκύουν μεγάλο αριθμό συνδέσεων. Αυτό μοιάζει με καταστάσεις του πραγματικού κόσμου όπου συγκεκριμένοι κόμβοι λειτουργούν ως πάροχοι υπηρεσιών, προσελκύοντας περισσότερη κίνηση λόγω της υψηλής συνδεσιμότητάς τους.

Ομοιογένειας και ετερογένειας των γράφων:

Τα δίκτυα Erdős-Rényi τείνουν να εμφανίζουν ομοιογένεια, με τους κόμβους να έχουν παρόμοιο βαθμό συνδεσιμότητας κατά μέσο όρο. Αυτή η ομοιογένεια ευθυγραμμίζεται με σενάρια όπου η κατανομή των υπηρεσιών είναι σχετικά ομοιόμορφη και ο πρωταρχικός στόχος είναι η εξασφάλιση της προσβασιμότητας και της αξιοπιστίας σε όλο το δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο Barabási-Albert εισάγει ετερογένεια δημιουργώντας δίκτυα όπου ένας μικρός αριθμός κόμβων χρησιμεύει ως κόμβος, ενώ πολλοί κόμβοι έχουν μόνο λίγες συνδέσεις. Αυτή η ετερογένεια είναι ιδιαίτερα σημαντική σε αναπτύξεις υπολογιστών άκρων,

όπου συγκεκριμένοι κόμβοι φιλοξενούν υπηρεσίες υψηλής ζήτησης, ενώ άλλοι εξυπηρετούν πιο εξειδικευμένες λειτουργίες.

Παγκόσμια συνδεσιμότητα και κεντρικοί κόμβοι:

Τα δίκτυα Erdős-Rényi διαθέτουν συνήθως παγκόσμια συνδεσιμότητα, εξασφαλίζοντας υψηλή πιθανότητα να είναι προσβάσιμοι όλοι οι κόμβοι από οποιοδήποτε σημείο εκκίνησης. Αυτό το χαρακτηριστικό ταιριάζει σε σενάρια όπου οι υπηρεσίες είναι διαθέσιμες από ένα κεντρικό σημείο και η προσβασιμότητα σε όλο το δίκτυο είναι απαραίτητη. Αντίθετα, το μοντέλο Barabási-Albert οδηγεί συχνά σε δίκτυα με κεντρικούς κόμβους που χρησιμεύουν ως κύριοι πάροχοι υπηρεσιών. Αυτός ο συγκεντρωτισμός ευθυγραμμίζεται με τα σενάρια υπολογισμού ακμών στον πραγματικό κόσμο, όπου ορισμένοι κόμβοι ακμών διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην παροχή υπηρεσιών και προσελκύουν μεγαλύτερη κίνηση λόγω της υψηλής συνδεσιμότητάς τους.

Ομοιόμορφη κατανομή και δυναμική δημιουργία γράφων:

Τα δίκτυα Erdős-Rényi τείνουν να ευνοούν μια ομοιόμορφη κατανομή ακμών, η οποία είναι πλεονεκτική για τη διατήρηση ισορροπημένου φορτίου και πλεονασμού σε όλο το δίκτυο. Αντίθετα, το μοντέλο Barabási-Albert περιλαμβάνει δυναμική ανάπτυξη του δικτύου. Οι νέοι κόμβοι συνδέονται κατά προτίμηση σε καλά συνδεδεμένους κόμβους, αντικατοπτρίζοντας τη σταδιακή προσθήκη συσκευών ακμής σε εξελισσόμενα περιβάλλοντα υπολογισμού ακμής.

Η επιλογή μεταξύ αυτών των μοντέλων επηρεάζει σημαντικά τη διαχείριση των υπηρεσιών στο EC. Όταν η ομοιόμορφη διανομή υπηρεσιών και η προσβασιμότητα σε όλο το δίκτυο είναι υψίστης σημασίας, το μοντέλο Erdős-Rényi είναι η κατάλληλη επιλογή. Ωστόσο, όταν πρόκειται για την ετερογένεια, τον συγκεντρωτισμό και τη δυναμική ανάπτυξη των δικτύων άκρων, το μοντέλο Barabási-Albert αποδεικνύεται καταλληλότερο. Η απόφαση μεταξύ αυτών των μοντέλων υπογραμμίζει τη σημασία της ευθυγράμμισης της επιλογής του μοντέλου δικτύου με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και τους στόχους ενός συγκεκριμένου πλαισίου υπολογισμού ακμών. Τελικά, το επιλεγμένο μοντέλο διαμορφώνει όχι μόνο τη δομή του δικτύου αλλά και την αποδοτικότητα και την

αποτελεσματικότητα της διαχείρισης των υπηρεσιών στο συνεχώς εξελισσόμενο τοπίο του υπολογισμού ακραίων σημείων.

Μοντέλο Erdős-Rényi

Κατανεμημένα Δίκτυα αισθητήρων: Είναι μια κατάλληλη επιλογή όταν υπάρχει ανάγκη για ένα κατανεμημένο δίκτυο αισθητήρων στην περιβαλλοντική παρακολούθηση. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τυχαίες συνδέσεις μεταξύ των κόμβων αισθητήρων, εξασφαλίζοντας τη συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές αμερόληπτα.

Δίκτυα πλέγματος (mesh networks) για την αντιμετώπιση

καταστροφών: Σε καταστάσεις αντιμετώπισης καταστροφών όπου εγκαθίστανται προσωρινά δίκτυα πλέγματος, η συνδεσιμότητα του δικτύου πρέπει να είναι τόσο τυχαία όσο και ανθεκτική. Το μοντέλο είναι εφαρμόσιμο για τη δημιουργία ad-hoc δικτύων μεταξύ των ομάδων αντιμετώπισης, εξασφαλίζοντας την επικοινωνία μεταξύ όλων των μελών της ομάδας.

Γενικό κορμό του διαδικτύου: Σε μια γενικότερη ιδέα του Διαδικτύου, όπου ο στόχος είναι να παρέχεται παγκόσμια εμβέλεια και ισότιμη πρόσβαση σε όλους τους χρήστες χωρίς να ευνοούνται συγκεκριμένοι κόμβοι, τα δίκτυα Erdős- Rényi είναι κατάλληλα. Αυτό το μοντέλο ευθυγραμμίζεται με τον στόχο των παρόχων υπηρεσιών να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους ομοιόμορφα σε όλους τους χρήστες.

Μοντέλο Barabási-Albert

Δίκτυα κοινωνικής δικτύωσης: Σε πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης, ορισμένοι χρήστες γίνονται influencers με σημαντικά περισσότερους ακόλουθους από τον μέσο χρήστη. Το μοντέλο Barabási-Albert είναι κατάλληλο για τη μοντελοποίηση κοινωνικών δικτύων όπου η συμπεριφορά προτιμησιακής προσκόλλησης οδηγεί σε δημοφιλείς χρήστες (κόμβους) που αποκτούν περισσότερες συνδέσεις.

Δίκτυα παράδοσης περιεχομένου (CDN): Τα δίκτυα παράδοσης περιεχομένου, όπου μερικοί κεντρικοί διακομιστές ή κέντρα δεδομένων χρησιμεύουν ως βασικές πηγές περιεχομένου, μπορούν να αναπαρασταθούν με το

μοντέλο Barabási-Albert. Το μοντέλο αυτό αντικατοπτρίζει τη δομή των CDN, με τους παρόχους περιεχομένου να συνδέονται με μεγάλο αριθμό τελικών χρηστών.

Edge network του IoT: Σε εφαρμογές IoT, συγκεκριμένες συσκευές άκρων με υψηλότερες δυνατότητες μπορούν να λειτουργούν ως κόμβοι, συλλέγοντας δεδομένα από πολυάριθμους αισθητήρες. Το μοντέλο μπορεί να μιμηθεί αυτό το σενάριο, αποτυπώνοντας τη συγκέντρωση των συνδέσεων σε αυτές τις συσκευές κόμβων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Πειραματική Αξιολόγηση

6.1 Πειραματική Διάταξη

Αυτή η ενότητα περιγράφει την πειραματική προσέγγιση που εφαρμόστηκε για τη διερεύνηση της μετάβασης υπηρεσιών σε κόμβους υπολογιστικών ακμών. Ο πρωταρχικός στόχος του πειράματός μας είναι να εντοπιστούν και να μεταφερθούν οι υπηρεσίες υψηλής ζήτησης, για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας διαχείρισης υπηρεσιών και την ελαχιστοποίηση του χρόνου.

Το πείραμά μας βασίζεται στα δύο αυτά μοντέλα γράφων που έχουν σχεδιαστεί για να προσομοιώνουν την κατανομή των υπηρεσιών σε κόμβους μέσα σε ένα δίκτυο. Υπολογίζονται τα βάρη με βάση τις τιμές ζήτησης των συνδεδεμένων κόμβων. Αυτός ο υπολογισμός βάρους είναι ζωτικής σημασίας για να καθοριστεί ποιες υπηρεσίες θα πρέπει να τοποθετούνται κοντά στους κόμβους.

Στο μοντέλο Erdős-Rényi δύο βασικές τεχνικές ανάλυσης δικτύου, συγκεκριμένα το MST και η ανάλυση υπογραφών k -core, παίζουν ζωτικούς ρόλους. Το MST του μοντέλου εντοπίζει το μικρότερο σύνολο ακμών που απαιτούνται για τη σύνδεση όλων των κόμβων στο δίκτυο χωρίς να σχηματίζονται βρόγχοι. Ταυτόχρονα, η ανάλυση υπογραφήματος k -core εστιάζει στην απομόνωση των στενά συνδεδεμένων βασικών στοιχείων εντός του δικτύου. Ενώ αποκαλύπτονται ομάδες κόμβων με πυκνότερες συνδέσεις, οι οποίες αποδεικνύονται ανεκτίμητες για τον εντοπισμό υπηρεσιών με υψηλή ζήτηση.

Στο πλαίσιο του μοντέλου Barabási-Albert το οποίο δημιουργεί δίκτυα χωρίς κλίμακα μέσω προτιμησιακής προσάρτησης το MST αποκαλύπτει τους κρίσιμους κόμβους, που στηρίζουν τη δομή του δικτύου καθώς υπαγορεύουν τις συντομότερες διαδρομές προς διάφορα μέρη του δικτύου. Επιπλέον, η ανάλυση υπογραφήματος k -core στα μοντέλα Barabási-Albert τονίζει τη σημασία των κόμβων εντοπίζοντας εξαιρετικά διασυνδεδεμένα βασικά στοιχεία του δικτύου. Για υπηρεσίες με σημαντική ζήτηση, αυτές οι βασικές περιοχές παρέχουν μια ιδανική τοποθέτηση για να εξασφαλίσουν βέλτιστη πρόσβαση και ελάχιστο λανθάνοντα χρόνο.

6.2 Παράμετροι Προσομοίωσης

Αυτή η ενότητα προσφέρει μια εξερεύνηση των παραμέτρων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.

- **Αριθμός κόμβων:** Η εργασία βασίζεται στον αριθμό των κόμβων που υπάρχουν στο δίκτυο. Για αυτήν την προσομοίωση, έχει επιλεγθεί ένα πλήθος κόμβων 30, 40 και 60. Η επιλογή αυτού του συγκεκριμένου αριθμού ευθυγραμμίζεται με το εύρος ενός διαχειρίσιμου «οπτικά» δικτύου με το οποίο θα μπορούσαμε να καταλήξουμε εύκολα σε συμπεράσματα. Παρόλα αυτά θα μπορούσε να θεωρηθεί οποιοσδήποτε αριθμός κόμβων στην προσομοίωση ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου.
- **Πιθανότητα ακμών:** Η παράμετρος της πιθανότητας ακμών αποτελεί σημαντική παράμετρο, υπαγορεύοντας την πιθανότητα σχηματισμού ακμών μεταξύ των κόμβων στο δίκτυό μας. Στο πείραμα, χρησιμοποιείται μια πιθανότητα δημιουργίας ακμής από το 0 έως το 1. Αυτή η επιλογή, επιτρέπει την ρύθμιση της πυκνότητας του δικτύου καθορίζοντας την πιθανότητα συνδέσεων μεταξύ των κόμβων. Η τιμή του 0,50 προέρχεται από την λογική ότι μπορεί να παράγει μια δίκαιη κατανομή, διατηρώντας ένα ικανοποιητικό επίπεδο συνδεσιμότητας.
- **Τιμές ζήτησης:** Οι τιμές ζήτησης, που παίζουν έναν σημαντικό ρόλο στο πείραμά μας. Για να γίνουν τα πράγματα πιο πραγματικά, προστέθηκε τυχαιότητα στη δημιουργία των τιμών ζήτησης. Δεν επιλέχθηκαν αριθμοί τελείως τυχαίου, αλλά δημιουργήθηκαν τιμές που κινούνται εντός ενός συγκεκριμένου εύρους. Το εύρος αυτό εξαρτάται από τις ελάχιστες και μέγιστες αξίες ζήτησης των κόμβων, έτσι ώστε να έχουμε μια ρεαλιστική ποικιλία ζήτησης σε όλους τους κόμβους.
- **Ανάλυση υπογραφών k-core:** Η αναπαράσταση αυτών των γράφων βοηθά στον εντοπισμό βασικών στοιχείων εντός του δικτύου. Ορίζοντας την τιμή του k (που αντιπροσωπεύει το επίπεδο πυρήνα), καθιερώνονται κεντρικοί κόμβοι και οι διασυνδέσεις τους.
- **Minimum Spanning Tree (MST):** Το MST προβάλλει τις βέλτιστες συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του πυρήνα, χρησιμεύοντας ως βάση για την κατανόηση των πιο αποτελεσματικών τρόπων τοποθέτησης υπηρεσιών.[10]

- **Δεδομένα του πραγματικού κόσμου:** Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του πειράματος λαμβάνονται από το σύνολο δεδομένων υπηρεσιών μέσω του Socrata Open Data API ‘311 Service Requests from 2010 to Present’ of NYC Open Data και πιο συγκεκριμένα τα 20 πιο

«δημοφιλή» αιτήματα για τον Απρίλιο του 2022. Είναι ορισμένα καθημερινά αιτήματα για μη έκτακτες υπηρεσίες όπως παράνομο παρκάρισμα, φασαρία, βρώμικοι δρόμοι κτλ. Βάση αυτών των πραγματικών δεδομένων γίνεται η προσομοίωση στον κώδικά μας. Στην προσομοίωσή μας, επικεντρωνόμαστε στην καταγγελία "Noise - Residential", αντιμετωπίζοντας κάθε δρόμο με αυτή την καταγγελία ως κόμβο, ορίζοντας την υπηρεσία ζήτησης. Η ζήτηση για κάθε κόμβο καθορίζεται από τον αριθμό των αιτημάτων που λαμβάνει ένας δρόμος, με τιμές που δημιουργούνται τυχαία στο εύρος από 1 έως 34.

Ο κώδικας ξεκινά με την εισαγωγή των απαραίτητων βιβλιοθηκών Python: requests, pandas και random.

Η requests χρησιμοποιείται για την υποβολή αιτημάτων API, η pandas για την επεξεργασία δεδομένων και η random για τη δημιουργία τυχαίων τιμών.

Η μεταβλητή api_endpoint ορίζεται ως το τελικό σημείο API όπου είναι διαθέσιμο το σύνολο δεδομένων. Αυτή είναι η πηγή δεδομένων από την οποία θα αντληθούν πληροφορίες σχετικά με τις καταγγελίες "Noise-Residential".

Ο κώδικας ορίζει μια ημερομηνία έναρξης (start_date) και μια ημερομηνία λήξης (end_date) για το φιλτράρισμα των δεδομένων. Σε αυτή την περίπτωση, ο κωδικός έχει οριστεί να συλλέγει δεδομένα για τον Απρίλιο του 2022.

Το σενάριο χρησιμοποιεί τη συνάρτηση requests.get() για να πραγματοποιήσει ένα αίτημα API. Περιλαμβάνει παραμέτρους στη διεύθυνση URL του αιτήματος για να φιλτράρει τα δεδομένα με βάση τον τύπο καταγγελίας ("Noise-Residential") και το καθορισμένο εύρος

ημερομηνιών. Η αίτηση έχει οριστεί να περιορίζει τον αριθμό των εγγραφών σε 100.000.000.

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από το αίτημα API είναι σε μορφή JSON.

Ο κώδικας μετατρέπει αυτά τα δεδομένα JSON σε ένα πλαίσιο δεδομένων Pandas DataFrame χρησιμοποιώντας το `pd.DataFrame(data)`. Το σενάριο εντοπίζει μοναδικές διευθύνσεις γειτονιάς με καταγγελίες "Noise-Residential" και εκτυπώνει τις 10 πρώτες διευθύνσεις. Φιλτράρει το DataFrame για να διατηρήσει μόνο τα δεδομένα που σχετίζονται με αυτές τις 10 διευθύνσεις γειτονιάς.

```
# Create a DataFrame from the JSON data
df = pd.DataFrame(data)

# Get unique neighborhood addresses with "Illegal Parking" complaints
neighborhood_addresses = df['incident_address'].unique()[:10]
print("10 Neighborhood Addresses with 'Noise - Residential' Complaints:")
for address in neighborhood_addresses:
    print(address)

# Filter the DataFrame for the 10 neighborhood addresses
neighborhood_data = df[df['incident_address'].isin(neighborhood_addresses)]

# Calculate the demand (number of complaints) for each address
demand_per_address = neighborhood_data['incident_address'].value_counts()

print("Demand for Service (Number of 'Noise - Residential' Complaints) for 10 Neighborhood Addresses (Nodes):")
for address, demand in demand_per_address.items():
    print(f"Node Address: {address}, Demand: {demand}")

# Generate random demand values within the range of the calculated demand
max_demand = demand_per_address.max()
min_demand = demand_per_address.min()
print("Max Demand:")
print(max_demand)
print("Min Demand:")
print(min_demand)
```

Figure 3. Κώδικας σε Python για το φιλτράρισμα και την καταγραφή των οδών

Ο κώδικας υπολογίζει τη ζήτηση (αριθμός καταγγελιών) για κάθε μία από τις 10 διευθύνσεις γειτονιάς. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στη μεταβλητή `demand_per_address`. Δημιουργεί τυχαίες τιμές ζήτησης εντός του εύρους των υπολογισμένων απαιτήσεων, τόσο της μέγιστης όσο και της ελάχιστης ζήτησης.

Ο παρακάτω κώδικας εκτυπώνει τις οδούς της συγκεκριμένης καταγγελίας και εντοπίζει το πόσες φορές ζητήθηκε η συγκεκριμένη καταγγελία στη συγκεκριμένη οδό. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται το service demand των κόμβων που θα εξεταστεί παρακάτω.

```
1 import requests
2 import pandas as pd
3 import random
4
5
6 # API endpoint for the 311 service requests dataset
7 api_endpoint = "https://data.cityofnewyork.us/resource/erm2-nwe9.json"
8
9 # Define the address and date range
10 #target_incident_type = "Illegal Parking"
11 start_date = "2022-04-01T00:00:00"
12 end_date = "2022-04-30T23:59:59"
13
14 # API request to fetch data for the specified address and date range
15 response = requests.get(api_endpoint, params={
16     "$where": f"complaint_type = 'Noise - Residential' AND created_date >= '{start_date}' AND created_date <= '{end_date}'",
17     "$limit": 100000000
18 })
19
20 data = response.json()
21 (variable) df: DataFrame the JSON data
22 df = pd.DataFrame(data)
```

Figure 4. Κώδικας σε Python για την εξαγωγή δεδομένων μέσω API

```
10 Neighborhood Addresses with 'Noise - Residential' Complaints:
144-16 MELBOURNE AVENUE
BUSHWICK AVENUE
359 20 STREET
31 HEMLOCK STREET
BECK STREET
NASHVILLE BOULEVARD
1 STUYVESANT OVAL
199 EAST 4 STREET
620 WEST 141 STREET
130-20 LEFFERTS BOULEVARD
Demand for Service (Number of 'Noise - Residential' Complaints) for 10 Neighborhood Addresses (Nodes):
Node Address: 620 WEST 141 STREET, Demand: 34
Node Address: BECK STREET, Demand: 12
Node Address: 199 EAST 4 STREET, Demand: 6
Node Address: 359 20 STREET, Demand: 4
Node Address: 1 STUYVESANT OVAL, Demand: 3
Node Address: 144-16 MELBOURNE AVENUE, Demand: 2
Node Address: BUSHWICK AVENUE, Demand: 2
Node Address: 31 HEMLOCK STREET, Demand: 1
Node Address: NASHVILLE BOULEVARD, Demand: 1
Node Address: 130-20 LEFFERTS BOULEVARD, Demand: 1
Max Demand:
34
Min Demand:
1
```

Figure 5. Καταγραφή των οδών με την συγκεκριμένη καταγγελία

- Βάρος ακμών: Σε κάθε ακμή του δικτύου εκχωρείται ένα βάρος, μια παράμετρος καθοριστική για τη συνάρτηση προσαρμοσμένου βάρους μας. Το βάρος επηρεάζει σημαντικά τις σχέσεις μεταξύ κόμβων και υπηρεσιών, επηρεάζοντας τις αποφάσεις που σχετίζονται με τη μετεγκατάσταση υπηρεσιών λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ζήτηση, ο λανθάνοντας χρόνος και η διαθεσιμότητα πόρων. Η σωστή αντιστοίχιση βάρους ενισχύει την ακρίβεια των αποφάσεων τοποθέτησης υπηρεσιών, ευθυγραμμιζόμενη με τους ερευνητικούς μας στόχους. Η προτεινόμενη συνάρτηση βάρους είναι ένας συνδυασμός εκθετικών και πολυωνυμικών όρων που εφαρμόζονται στις τιμές ζήτησης δύο κόμβων που συνδέονται με μια ακμή. Είναι μια συνάρτηση που έχει σχεδιαστεί για την εκχώρηση βαρών σε ακμές σε ένα δίκτυο με βάση τη ζήτηση για υπηρεσίες μεταξύ κόμβων. Αυτή η συνάρτηση δημιουργήθηκε για να αντικατοπτρίζει μια προτίμηση για άκρες που συνδέουν κόμβους με υψηλή ζήτηση για την υπηρεσία δίνοντας χαμηλότερα βάρη σε τέτοιες ακμές. Συνδυάζει εκθετικούς όρους ($e_value ** demand_u$ και $e_value ** demand_v$) για να μεγεθύνει τη διαφορά ζήτησης μεταξύ κόμβων και πολυωνυμικούς όρους ($demand_u^2$ και $demand_v^2$) για να τονίσει κόμβους με υψηλές ατομικές απαιτήσεις. Οι παράμετροι α , β , γ και δ , επιτρέπουν να προσαρμοστεί η επιρροή αυτών των όρων. Το βάρος μεταξύ των ακμών δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$W_{ij} = \frac{\alpha * (e^{d_s^i} + e^{d_s^j}) + [\beta * (d_s^i)^2 + \gamma * (d_s^j)^2]}{\delta} \quad (11)$$

```
def WeightFunction(u, v, demand_values):
    dsi = demand_values[u]
    dsj = demand_values[v]
    e_value = math.e
    a = 0.21
    b = 0.09
    c = 1.54
    δ = 3

    numerator = a * ((e_value ** dsi + e_value ** dsj)) + (b * dsi**2 + c * dsj**2)
    denominator = δ

    weight = numerator / denominator
    print(f"Calculated weight for edge ({u}, {v}): {weight}")
    return weight
```

Figure 6. Η συνάρτηση βάρους των ακμών σε κώδικα Python

Στην συνέχεια βλέπουμε την συνάρτηση WeightFunction που χρησιμοποιείται στον κώδικα για την εξαγωγή των βαρών σε συνάρτηση με το demand που έχει αναπαραχθεί. Όπου u,v είναι οι κόμβοι που συνδέονται μεταξύ τους [23].

Η παράμετρος “a” με την τιμή 0.21 υποδηλώνει ότι θα δοθεί μέτρια βαρύτητα στον εκθετικό όρο. Η παράμετρος “b” σχετίζεται με το τετράγωνο των τιμών ζήτησης demand_value[u] για τον κόμβο “u” και αντιπροσωπεύει την επίδραση του τετραγώνου της ζήτησης στο βάρος. Η τιμή 0.09 δείχνει ότι θέλουμε να δώσουμε σχετικά μικρό βάρος στο τετραγωνικό όρο της ζήτησης. Ο τύπος αυτός είναι ένας τύπος τύπου νόμου δύναμης που χρησιμοποιείται συνήθως για τη μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ δύο μεγεθών. Στην περίπτωση αυτή, οι δύο ποσότητες είναι οι απαιτήσεις των δύο κορυφών. Οι σταθερές a, b και c ελέγχουν το σχήμα της σχέσης power-law. Η τιμή του “δ” καθορίζει τη συνολική κλίμακα των τιμών βαρών. Αυτές οι παράμετροι προσομοίωσης θέτουν τα όρια και τις συνθήκες του ερευνητικού μας πειράματος. Η προσεκτική επιλογή και η διαμόρφωσή τους στοχεύουν στην αντιμετώπιση των στόχων και των προκλήσεων της μετάβασης υπηρεσιών προς τα άκρα.

6.3 Μετρικές Αξιολόγησης

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται οι μετρήσεις αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται για την ποσοτική μέτρηση των αποτελεσμάτων του πειράματός μας σχετικά με τη μετανάστευση υπηρεσιών στο EC του δικτύου. Αυτές οι μετρήσεις είναι προσαρμοσμένες για να αξιολογούν την αποτελεσματικότητα, την απόδοση και την επιρροή των ερευνημένων στρατηγικών τοποθέτησης υπηρεσιών.

Ανάλυση ζήτησης για τους 5 κόμβους με τη μεγαλύτερη ζήτηση

Η αρχική μας μέτρηση επικεντρώνεται στη διεξαγωγή ενδελεχούς εξέτασης της ζήτησης υπηρεσιών. Για να κατανοήσουμε τη δυναμική του δικτύου, προσδιορίζουμε και απαριθμούμε τους πέντε κορυφαίους κόμβους με τις υψηλότερες τιμές ζήτησης. Αυτοί οι κόμβοι είναι υποψήφιοι για μετεγκατάσταση υπηρεσιών και η αξιολόγηση των κόμβων υψηλής ζήτησης είναι μεγάλης σημασίας για την κατανόηση του πιθανών αποτελεσμάτων της μετεγκατάστασης υπηρεσιών στην απόδοση του δικτύου.

Στο μοντέλο Erdős-Renyi το δίκτυο σχηματίζεται τυχαία με σταθερή πιθανότητα αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι έχουν περίπου ίσες πιθανότητες να έχουν υψηλό ή χαμηλό demand. Εξαιτίας της τυχαιότητας του μοντέλου οι κόμβοι με το μεγαλύτερο demand μπορεί να διαφέρουν η μία από την άλλη προσομοίωση που δοκιμάζουμε. Οπότε είναι λιγότερο πιθανό να έχουμε κόμβους με υπερβολικά μεγάλες τιμές ζήτησης επειδή η κατανομή βαθμών είναι σχετικά ομοιόμορφη.

Για το μοντέλο Erdős-Renyi έχουμε:

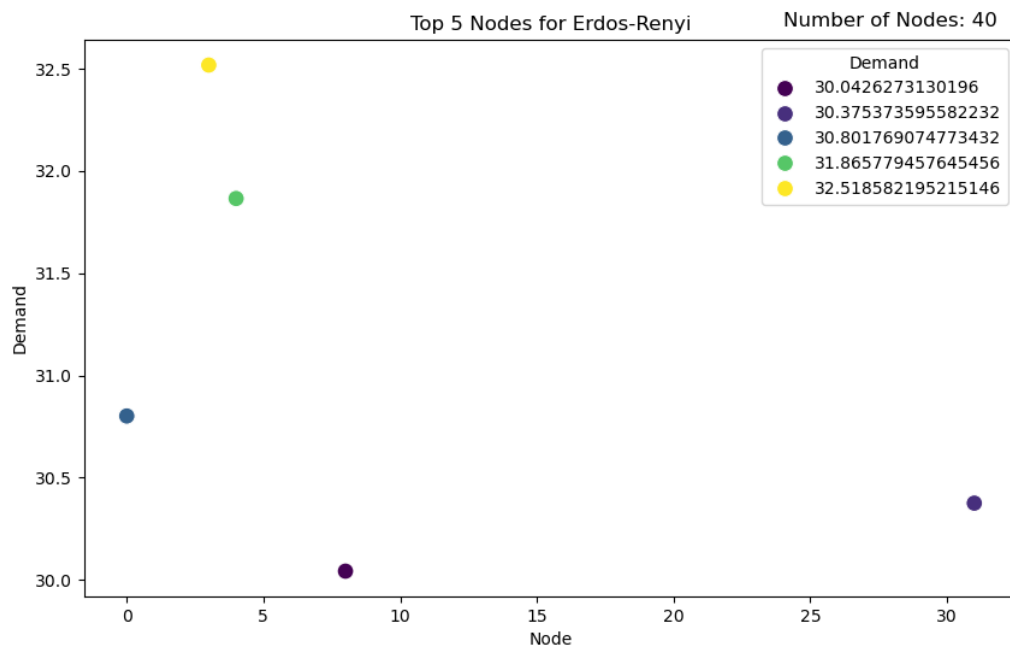


Figure 7. Οι 5 πιο δημοφιλείς κόμβοι με τη μεγαλύτερη ζήτηση για το 3-core

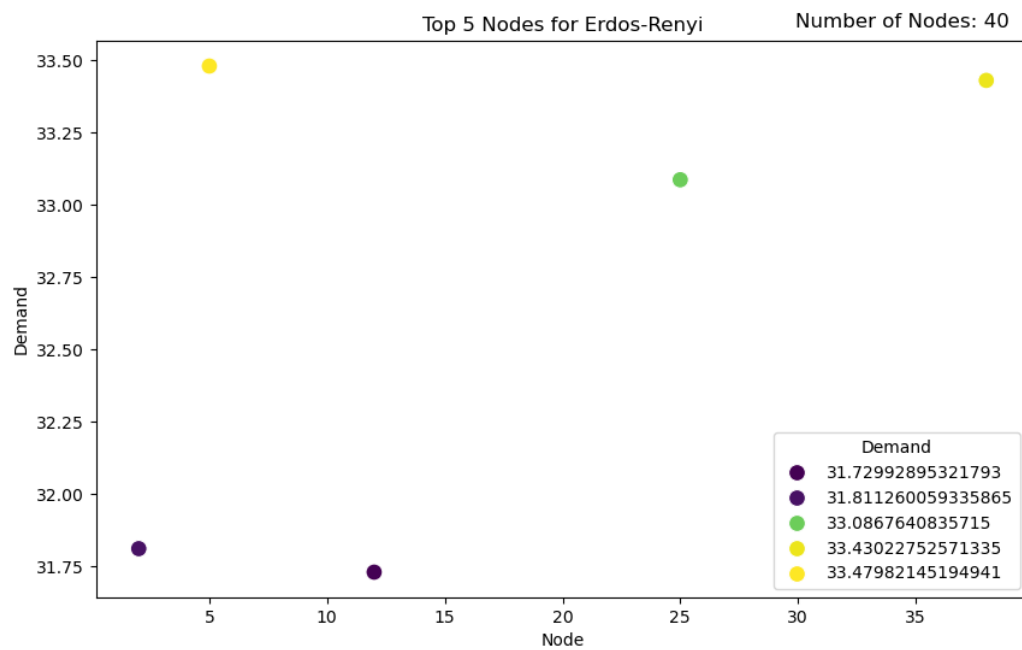


Figure 8. Οι 5 πιο δημοφιλείς κόμβοι με τη μεγαλύτερη ζήτηση για το 4-core

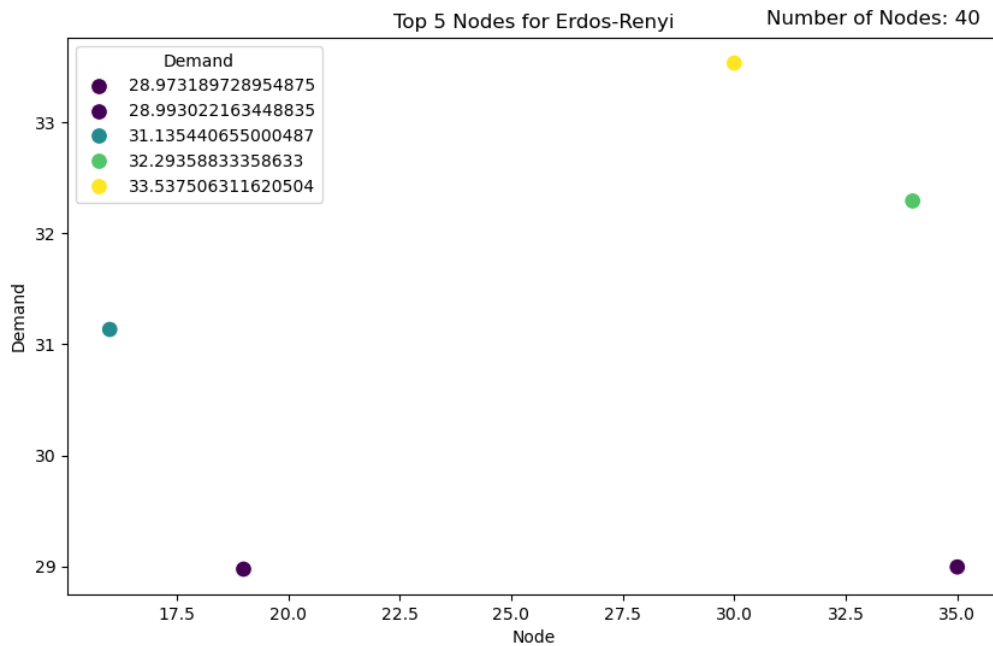


Figure 9. Οι 5 πιο δημοφιλείς κόμβοι με τη μεγαλύτερη ζήτηση για το 5-core

Στο μοντέλο Barabási-Albert , το δίκτυο δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου και οι νέοι κόμβοι συνδέονται κατά προτίμηση σε υπάρχοντες κόμβους με υψηλούς βαθμούς. Οι κόμβοι που δημιουργήθηκαν πρώτοι σε αυτό το μοντέλο και έχουν πολλές συνδέσεις είναι πιο πιθανό να έχουν μεγαλύτερες τιμές ζήτησης, άρα πιο πιθανό να είναι οι κόμβοι με το μεγαλύτερο demand. Άρα σε αυτό το μοντέλο είναι πιθανότερο να έχουμε κόμβους με πολύ μεγάλο demand σε σύγκριση με το Erdős-Renyi.

Για το μοντέλο Barabási-Albert έχουμε:

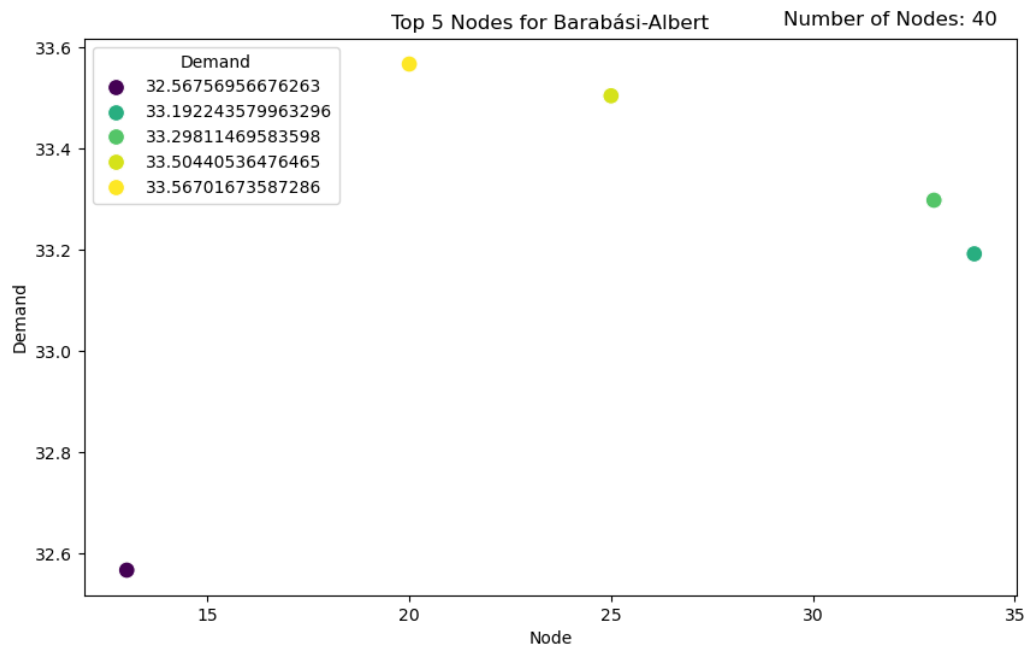


Figure 10. Οι 5 πιο δημοφιλείς κόμβοι με τη μεγαλύτερη ζήτηση για το 3-core

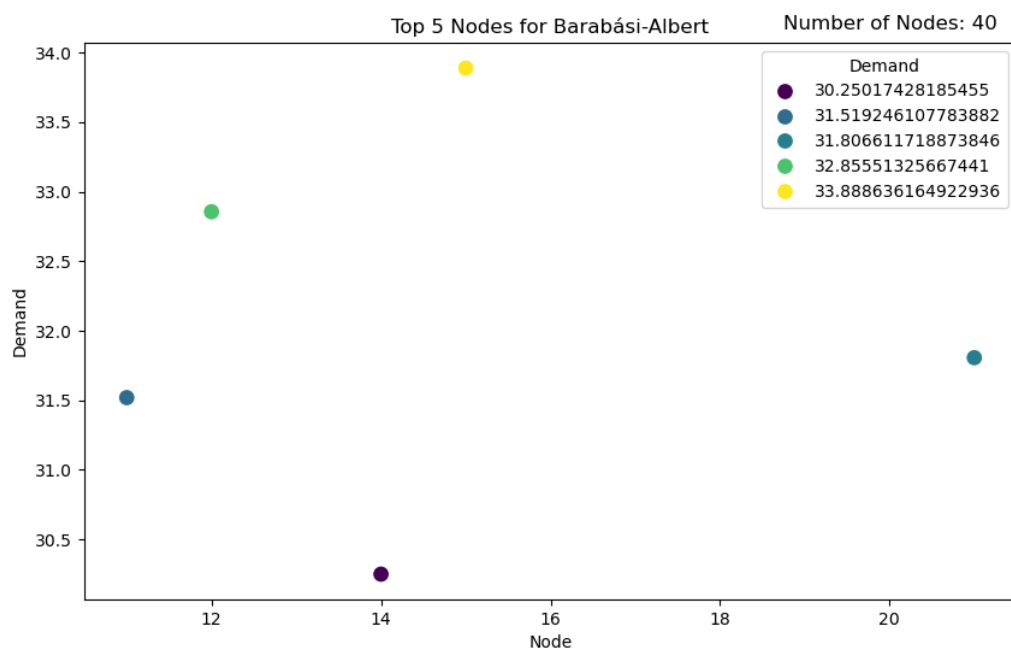


Figure 11. Οι 5 πιο δημοφιλείς κόμβοι με τη μεγαλύτερη ζήτηση για το 4-core

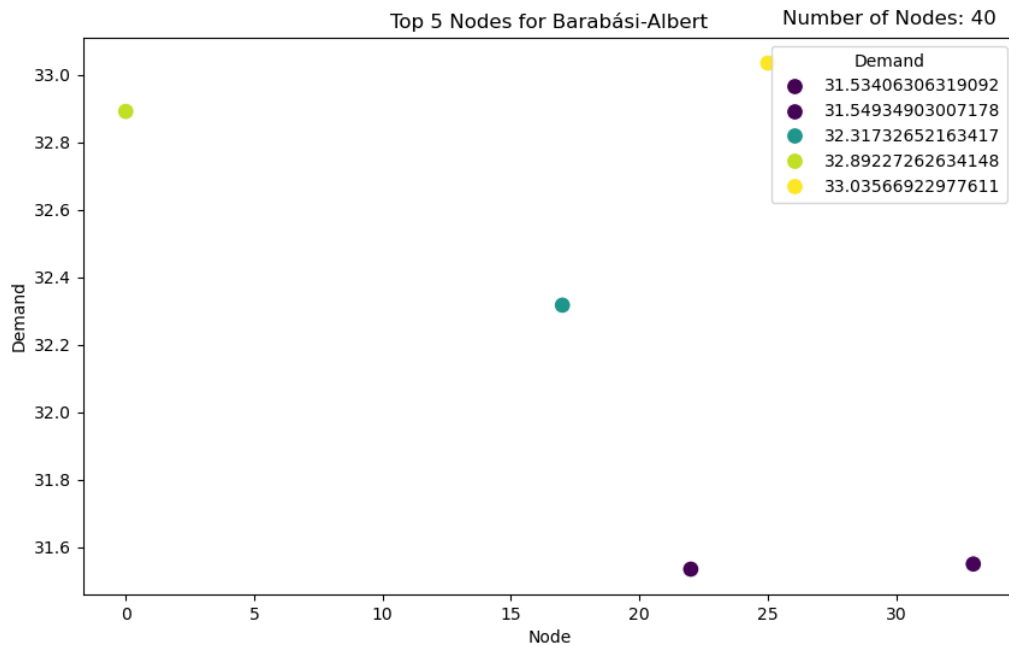


Figure 12. Οι 5 πιο δημοφιλής κόμβοι με τη μεγαλύτερη ζήτηση για το 5-core

Απαιτούμενος χρόνος για υπογράφημα K-Core

Η δεύτερη μέτρηση στοχεύει στην ποσοτικοποίηση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την κατασκευή του υπογράφου k-core. Αυτή η αξιολόγηση του χρόνου που απαιτείται για τη δημιουργία αυτού του βασικού στοιχείου δικτύου παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα της αναγνώρισης k-core. Προσφέρει κατανόηση της επεκτασιμότητας της προσέγγισής μας και της συνάφειάς της σε σενάρια υπολογιστών αιχμής σε πραγματικό χρόνο. Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν το 3-core, 4-core, 5-core και 6-core σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η δημιουργία ενός k-core δικτύου τείνει να είναι ταχύτερη για δίκτυα με κατανομή βαθμού power-law, πράγμα που είναι χαρακτηριστικό πολλών δικτύων που δημιουργούνται με τη χρήση του μοντέλου Barabási-Albert. Ενώ η δημιουργία του γράφου Erdős-Renyi είναι ταχύτερη από αυτή του Barabási-Albert.

Αυτό μας δείχνει ότι ο αλγόριθμός φαίνεται να λειτουργεί αποτελεσματικά διότι το 3-core χρειάστηκε έναν συγκεκριμένο χρόνο δημιουργίας ενώ το 4-core και το 5-core χρειάστηκαν μικρότερο χρόνο διότι δεν υπήρχε τόση διαφορά με το 3-core.

Από την άλλη το 6-core χρειάστηκε παραπάνω χρόνο διότι έπρεπε να αφαιρεθούν κόμβοι από το 5-core ώστε να πάρουμε το σωστό αποτέλεσμα. Όμοια ανάλυση είναι και για τα επόμενα διαγράμματα και των δύο μοντέλων για τα οποία έχει γίνει υλοποίηση για 40 κόμβους με την πιθανότητα για το μοντέλο Erdős-Rényi να είναι $p = 0.2$ για το 3,4-core και $p = 0.17$ για το 5,6,7-core ενώ για το Barabási-Albert το $m = 4$ (οι ακμές που θα έχει κάθε κόμβος) για το 3,4-core και $m=6$ για τα υπόλοιπα.

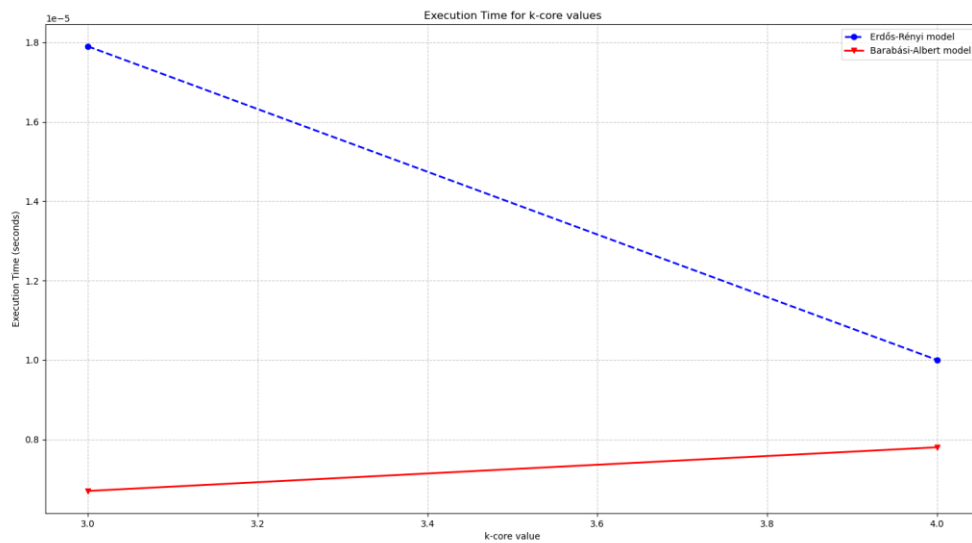


Figure 13. Διάγραμμα χρόνου για τα δύο μοντέλα του 3-core και 4-core

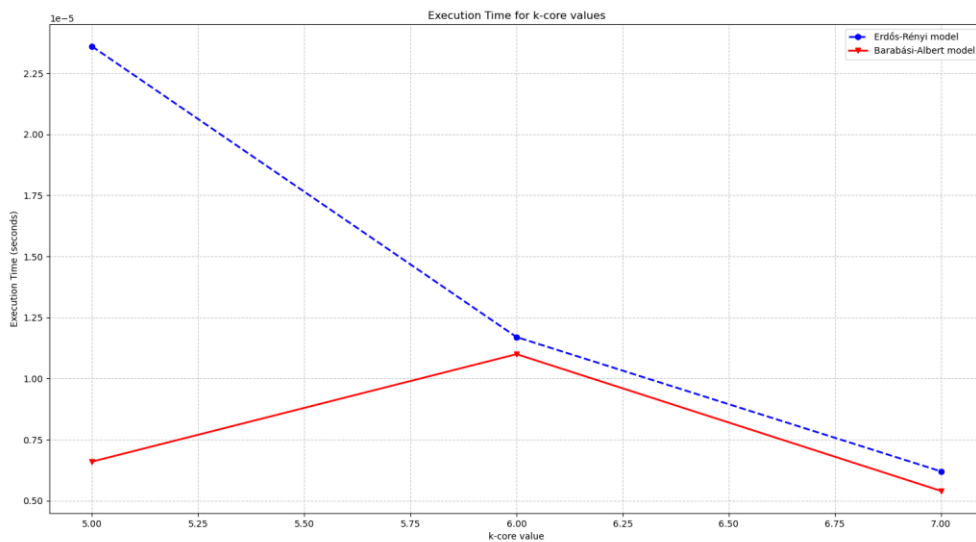


Figure14. Διάγραμμα χρόνου για τα δύο μοντέλα του 5-core, 6-core και 7-core

Μέσες συνδέσεις κόμβων σε K-Core

Η τρίτη μας μετρική εμβαθύνει στις δομικές πτυχές του δικτύου. Υπολογίζει τον μέσο αριθμό συνδέσεων ανά κόμβο εντός του υπογράφου k -core. Αυτή η μέτρηση παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την κεντρική θέση των κόμβων στο δίκτυο, επιτρέποντάς μας να αξιολογήσουμε τη συνολική συνδεσιμότητα εντός του επιλεγμένου k -core. Λειτουργεί ως δείκτης απόδοσης και αποδοτικότητας του δικτύου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μέσων συνδέσεων των κόμβων ανά k -core network.

Για το μοντέλο Erdős-Renyi έχουμε:

Καθώς η τιμή του μέσου όρου συνδέσεων αυξάνεται από το 3-core στο 6-core, οι μέσες συνδέσεις των κόμβων μειώνονται. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη, διότι το k -core αντιπροσωπεύει ένα υπογράφημα, όπου κάθε κόμβος έχει τουλάχιστον k ακμές. Ένας υψηλός πυρήνας k έχει ως αποτέλεσμα ένα πιο συνδεδεμένο υπογράφημα και επομένως λιγότερες μέσες συνδέσεις ανά κόμβο. Η επιλογή της καλύτερης τιμής k εξαρτάται από τους συγκεκριμένους στόχους ενός σεναρίου. Για παράδειγμα, εάν θέλουμε υπογράφους με υψηλή σύνδεση το 3-core είναι πιο αποτελεσματικό ενώ εάν θέλουμε πιο απομονωμένες και δομημένες κοινότητες θα προσανατολιστούμε σε μεγαλύτερο k .

Στο μοντέλο αυτό, οι ακμές σχηματίζονται ανεξάρτητα με μία σταθερή πιθανότητα. Αυτό οδηγεί σε ένα δίκτυο όπου οι κόμβοι έχουν τυχαίες κατανομές βαθμών που μοιάζουν με την Poisson. Όσο πιο μεγάλο το p , τόσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο και τόσο υψηλότερος και ο μέσος όρος.

Στο μοντέλο Barabási-Albert, λίγοι κόμβοι έχουν υψηλό βαθμό και οι περισσότεροι κόμβοι έχουν χαμηλό βαθμό. Η μέση σύνδεση κόμβου στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι χαμηλότερη από το μοντέλο Erdős-Renyi διότι πολλοί κόμβοι έχουν μόνο λίγες συνδέσεις ενώ λίγοι είναι αυτοί με πολύ μεγάλο αριθμό συνδέσεων.

Η επιλογή μεταξύ των δύο μοντέλων εξαρτάται από τις ανάγκες του δικτύου που θέλουμε να αναπαραστήσουμε.

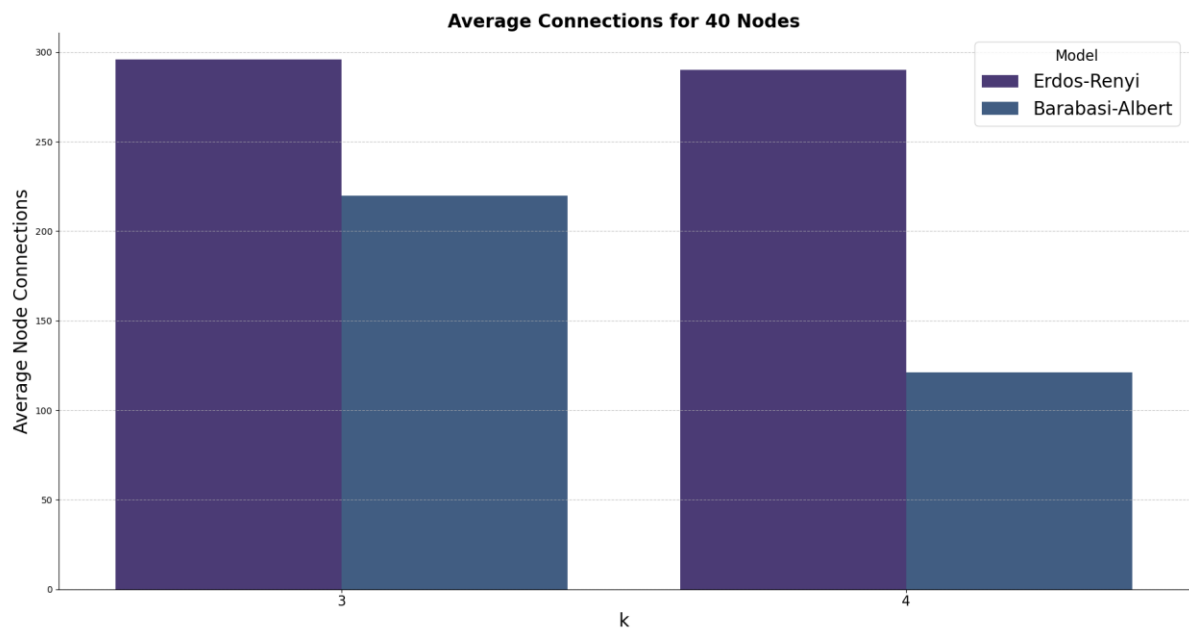


Figure 15. Ραβδόγραμμα μέσου αριθμού συνδέσεων για τα δύο μοντέλα για 40 κόμβους (3,4 core)

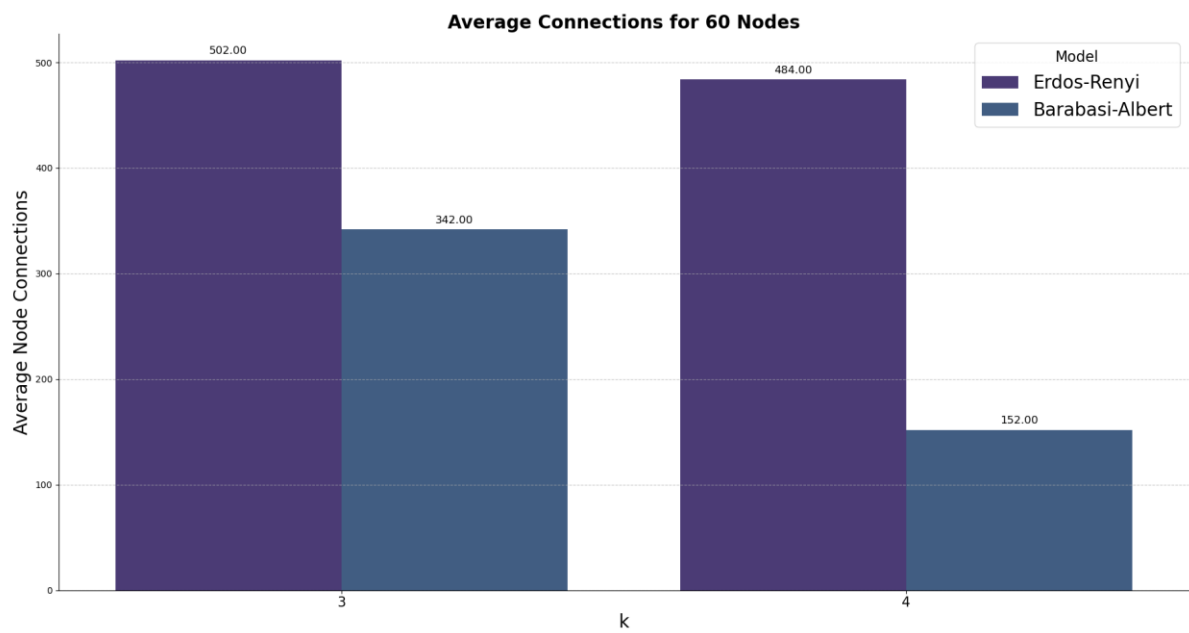


Figure 16. Ραβδόγραμμα μέσου αριθμού συνδέσεων για τα δύο μοντέλα για 60 κόμβους (3, 4 core)

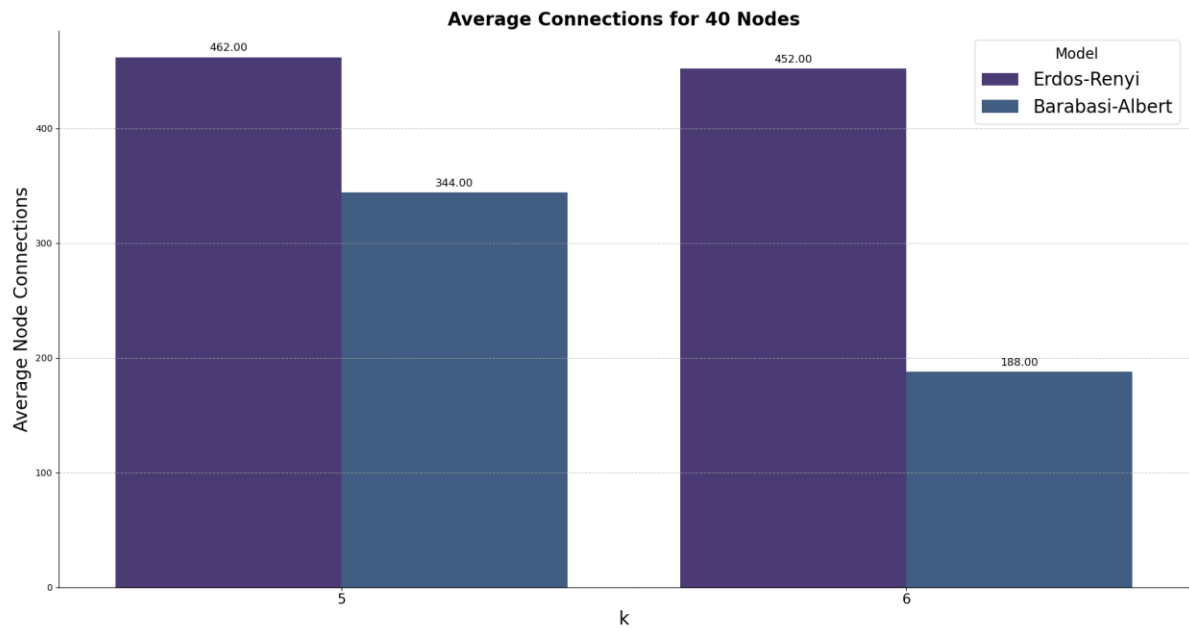


Figure 17. Ραβδόγραμμα μέσου αριθμού συνδέσεων για τα δύο μοντέλα για 40 κόμβους (5, 6 core)

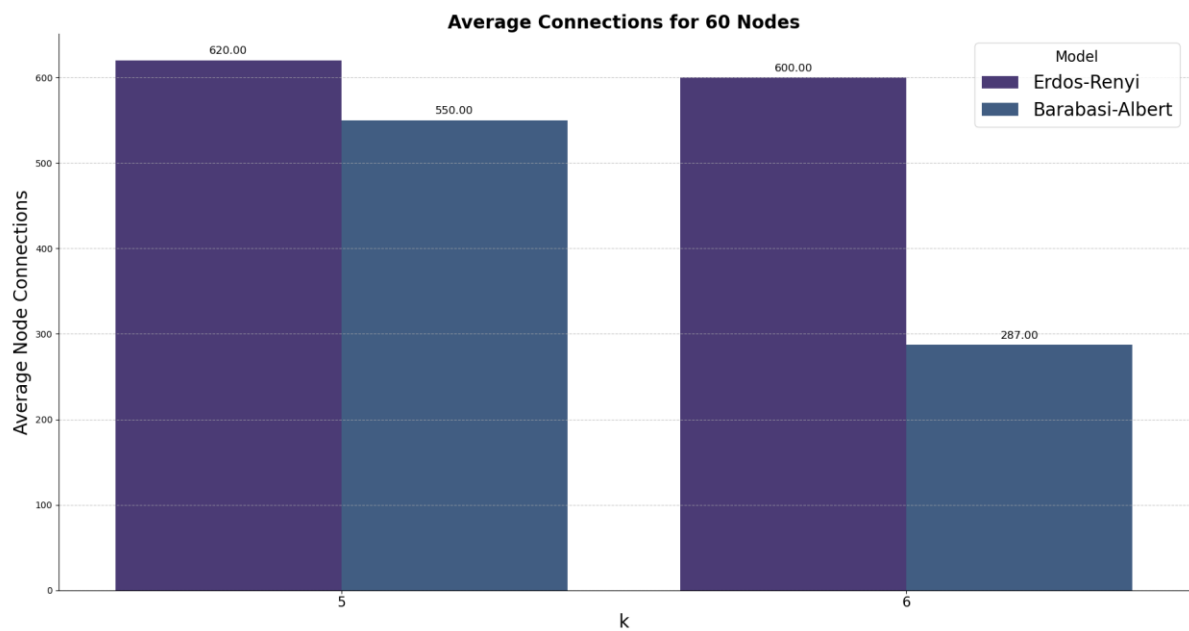


Figure 18. Ραβδόγραμμα μέσου αριθμού συνδέσεων για τα δύο μοντέλα για 60 κόμβους (5, 6 core)

6.4 Πειραματικά σενάρια

Σε αυτή την ενότητα, περιγράφονται τα διάφορα πειραματικά σενάρια που δημιουργήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης των μεθόδων μετεγκατάστασης υπηρεσιών στην άκρη του δικτύου. Κάθε σενάριο αντιπροσωπεύει μια μοναδική διαμόρφωση επιτρέποντάς την αξιολόγηση της ευελιξίας και της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων μοντέλων και προσεγγίσεων.

Σενάριο 1: Τυχαία δημιουργία δικτύου

Αυτό το σενάριο περιλαμβάνει την προσομοίωση ενός περιβάλλοντος δικτύου χρησιμοποιώντας το μοντέλο Erdős-Renyi , το οποίο είναι γνωστό για την τυχαία και πιθανολογική φύση του στη δημιουργία ακμών. Ο στόχος είναι να μελετηθεί η θεμελιώδης απόδοση των στρατηγικών μετάβασης υπηρεσιών σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο δίκτυο. Χρησιμοποιούμε τιμές τυχαίας ζήτησης για υπηρεσίες για να αξιολογήσουμε πώς τοποθετούνται οι υπηρεσίες σε τέτοιες δομές δικτύου.

```
if __name__ == "__main__":  
    num_nodes = 15  
    edge_probability = 0.50  
    random_graph = nx.erdos_renyi_graph(num_nodes, edge_probability)
```

Figure 19. Δημιουργία γράφου Erdős-Renyi με κώδικα Python

Στην εικόνα βλέπουμε τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του γράφου με το συγκεκριμένο μοντέλο. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι ο αριθμός των κόμβων και η πιθανότητα δημιουργίας μιας ακμής. Η πιθανότητα ορίστηκε ως 0.50 για να υπάρχει η έννοια της τυχαιότητας στο γράφημα.

Σενάριο 2: Μοντέλο Barabási-Albert

Σε αυτό το σενάριο, το μοντέλο δημιουργεί δίκτυα με δομή χωρίς κλίμακα που χαρακτηρίζεται από κόμβους και κόμβους με διαφορετικούς βαθμούς συνδεσιμότητας. Χρησιμοποιούμε αυτό το σενάριο για να αναλύσουμε την τοποθέτηση υπηρεσιών σε δίκτυα χωρίς κλίμακα, δίνοντας έμφαση στην επίδραση της τοπολογίας του δικτύου στην αποτελεσματικότητα της μετάβασης και στην εκπλήρωση της ζήτησης.

```
if __name__ == "__main__":  
    num_nodes = 15  
    m_parameter = 3 # The m parameter sets the number of the edges  
    # Generate a Barabasi-Albert graph  
    barabasi_albert_graph = nx.barabasi_albert_graph(num_nodes, m_parameter)
```

Figure 20. Δημιουργία γράφου Barabási-Albert με κώδικα Python

Σενάριο 3: Ανάλυση του πυρήνα K

Σε αυτό το σενάριο εκτελείται η ανάλυση k-core στο παραγόμενο τυχαίο γράφημα. Επαναλαμβάνονται διαφορετικές τιμές k-core και αναλύουμε τη δομή του γράφου.

Σενάριο 4: Διάγραμμα κατανομής βαθμών

Σχεδιάζεται η κατανομή των βαθμών των κόμβων στο γράφημα. Αυτό παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη συνδεσιμότητα των κόμβων εντός του δικτύου. Η κατανομή βαθμού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ένα defaultdict της Python. Για κάθε κόμβο στο γράφημα, ο κώδικας μετράει τον αριθμό των ακμών που συνδέονται με αυτόν τον κόμβο και καταγράφει τον αριθμό στο λεξικό κατανομής βαθμού. Η έξοδος αυτού του υπολογισμού είναι ένα λεξικό όπου τα κλειδιά αντιπροσωπεύουν τον βαθμό (αριθμός ακμών που συνδέονται με έναν κόμβο) και οι τιμές αντιπροσωπεύουν το κλάσμα των κόμβων του δικτύου που έχουν αυτόν τον βαθμό. Η κατανομή του βαθμού είναι μια ουσιαστική μετρική για τον χαρακτηρισμό των δομών δικτύων. Βοηθά στην κατανόηση της κατανομής της συνδεσιμότητας των κόμβων, στον εντοπισμό κόμβων ή κόμβων με υψηλή συνδεσιμότητα και στην αποκάλυψη της συνολικής δομής του δικτύου. Η συνάρτηση που υπολογίζει την κατανομή των βαθμών φαίνεται παρακάτω μαζί με τα διαγράμματα αυτών.

```
29 def calculateDegreeDistribution(graph):
30     degree_distribution = defaultdict(lambda: 0)
31     total_nodes = len(graph)
32
33     for node in graph:
34         degree = len(graph[node])
35         degree_distribution[degree] += 1
36
37     for degree, count in degree_distribution.items():
38         degree_distribution[degree] = count / total_nodes
39
40     return degree_distribution
```

Figure 21. Συνάρτηση υπολογισμού degree distribution με κώδικα Python

Η ανάλυση της κατανομής των βαθμών παρέχει πληροφορίες για τη δομή του δικτύου, αποκαλύπτοντας τον τρόπο με τον οποίο κατανέμονται οι βαθμοί των κόμβων. Βοηθά στον εντοπισμό μοτίβων, όπως η επικράτηση κόμβων (κόμβοι με υψηλούς βαθμούς) ή η ύπαρξη δομής χωρίς κλίμακα. Η σύγκριση της κατανομής βαθμών του προσομοιωμένου δικτύου με την αναμενόμενη κατανομή βάσει ενός

θεωρητικού μοντέλου βοηθά στην επικύρωση της ικανότητας του μοντέλου να παράγει δίκτυα με συγκεκριμένα υποκείμενα χαρακτηριστικά. Το σχήμα της κατανομής βαθμών προσφέρει πληροφορίες για τη συνολική συμπεριφορά του δικτύου. Για παράδειγμα, μια κατανομή power-law υποδηλώνει ένα δίκτυο χωρίς κλίμακα, ενώ μια κατανομή Poisson είναι χαρακτηριστική ενός τυχαίου δικτύου.

Η κατανομή των βαθμών χρησιμοποιείται για να κατανοήσουμε την επικράτηση των κόμβων με διαφορετικό αριθμό συνδέσεων. Ένα δίκτυο μπορεί να έχει κόμβους με παρόμοιο αριθμό συνδέσεων ενώ ένα άλλο δίκτυο μπορεί να έχει κόμβους με πολλές συνδέσεις και κόμβους με λίγες. Στο μοντέλο Erdős-Rényi επειδή ακολουθεί την κατανομή βαθμών Poisson οι περισσότεροι κόμβοι έχουν παρόμοιο μέτριο βαθμό. Το μοντέλο Barabási-Albert έχει τη μεγαλύτερη κατανομή βαθμών διότι δημιουργεί δίκτυα με πιο ετερογενή κατανομή βαθμών [16].

3 core:

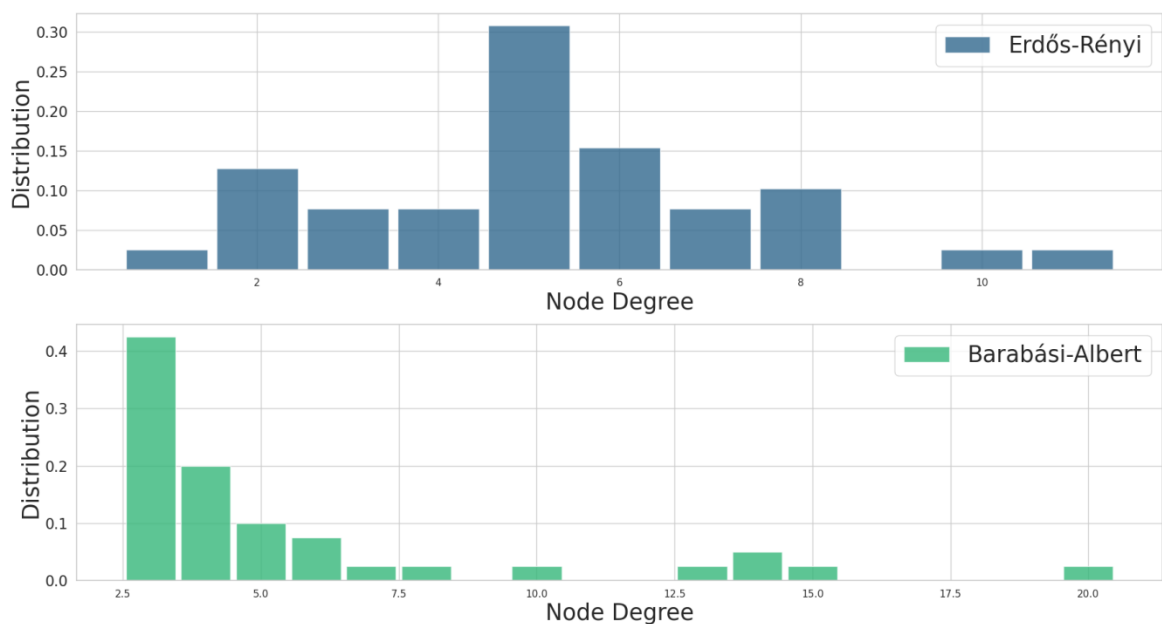


Figure 22. Ραβδόγραμμα κατανομής βαθμού για τα δύο μοντέλα (40 κόμβοι 3-core)

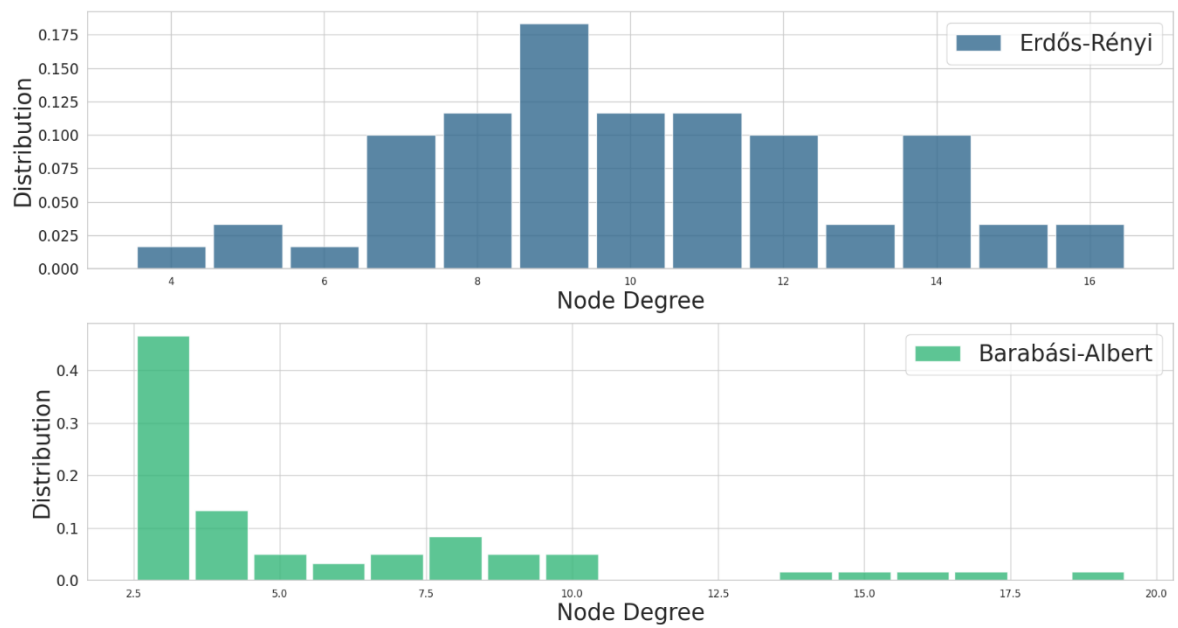


Figure 23. Ραβδόγραμμα κατανομής βαθμού για τα δύο μοντέλα (60 κόμβοι 3-core)

4 core:

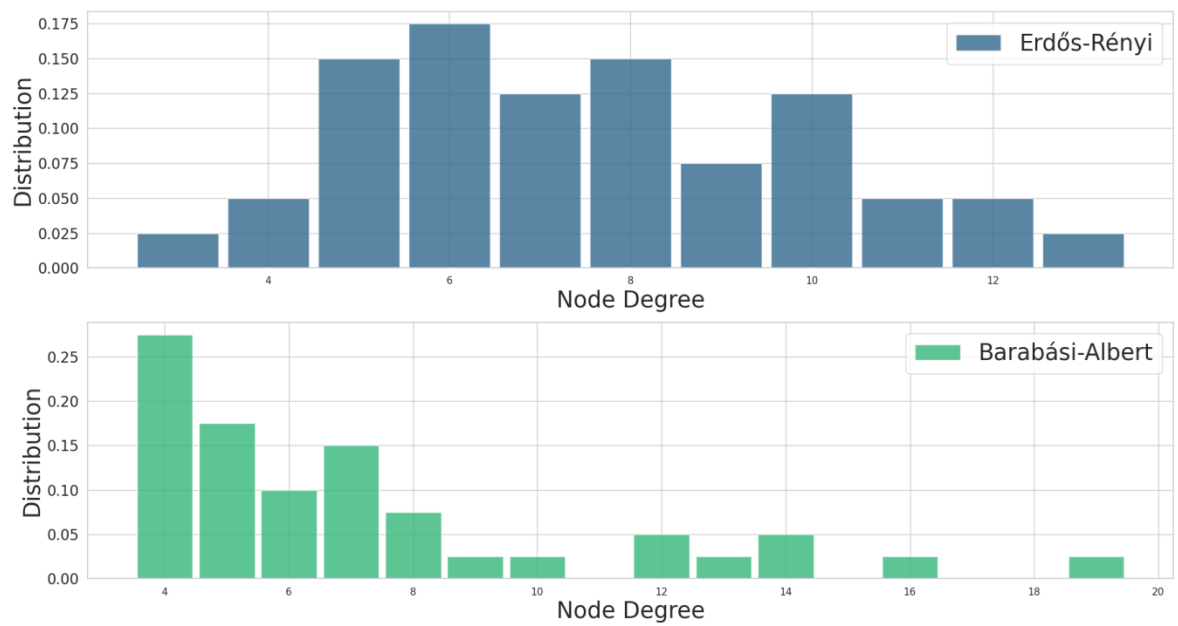


Figure 24. Ραβδόγραμμα κατανομής βαθμού για τα δύο μοντέλα (40 κόμβοι 4-core)

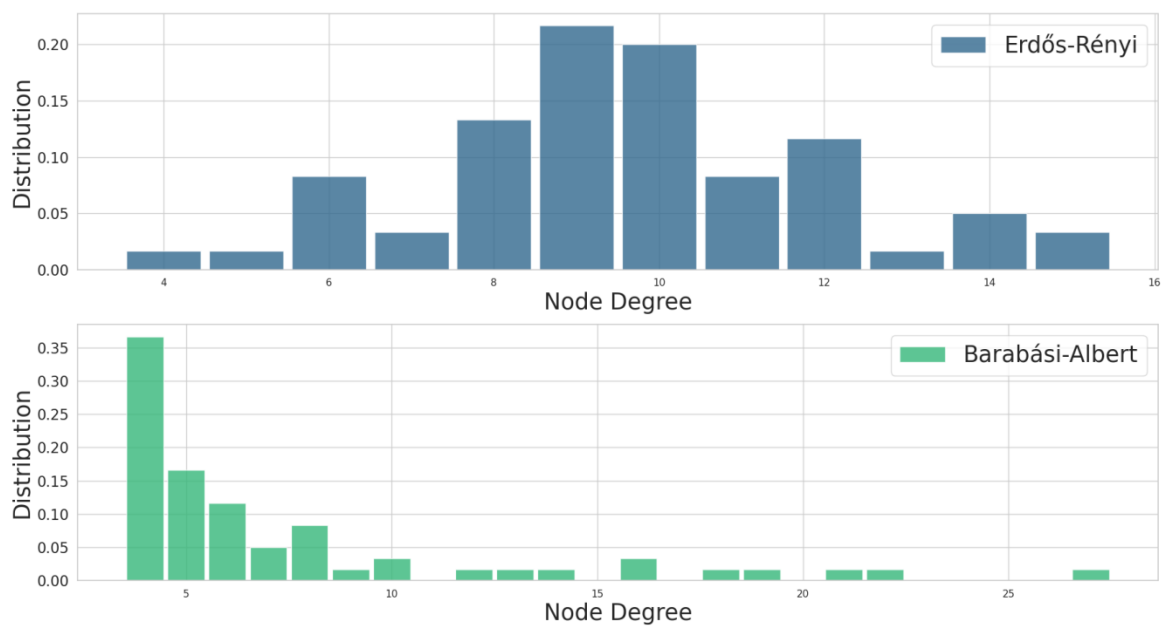


Figure 25. Ραβδόγραμμα κατανομής βαθμού για τα δύο μοντέλα (60 κόμβοι 4-core)

5 core:

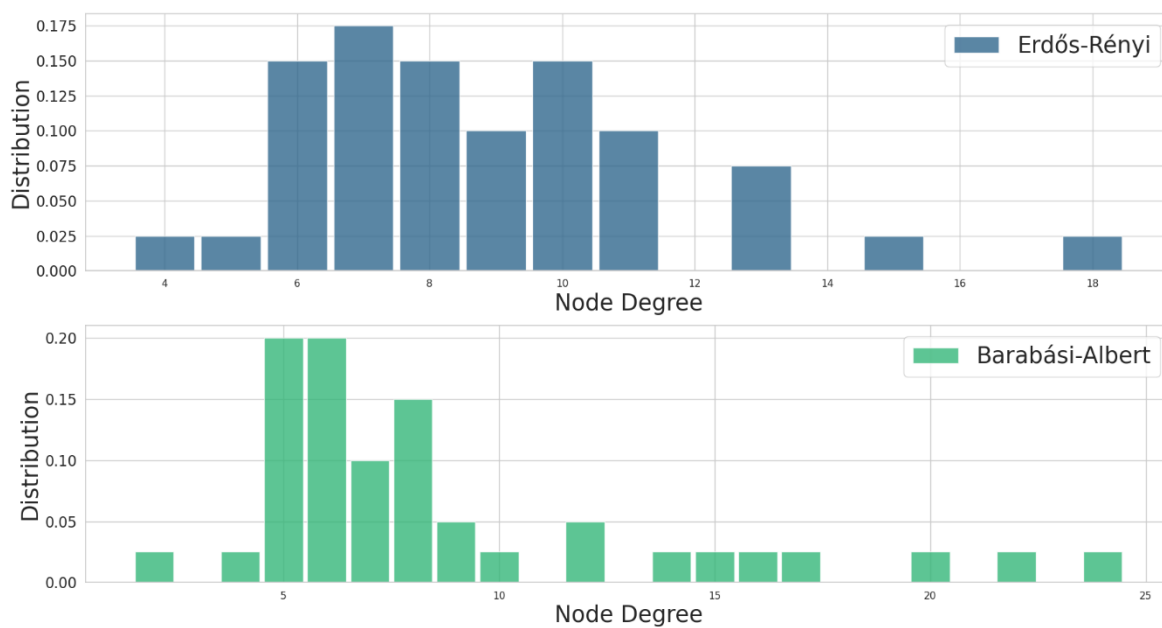


Figure 26. Ραβδόγραμμα κατανομής βαθμού για τα δύο μοντέλα (40 κόμβοι 5-core)

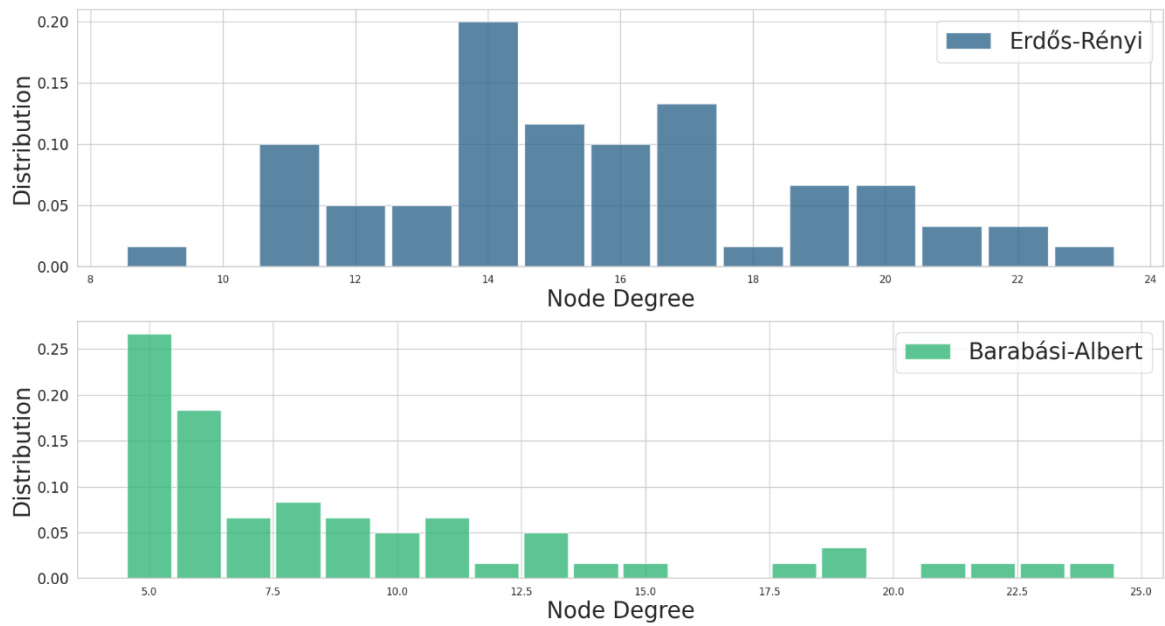


Figure 27. Ραβδόγραμμα κατανομής βαθμού για τα δύο μοντέλα (60 κόμβοι 5-core)

Σενάριο 5: Υπολογισμός και απεικόνιση μετρικών ανάλυσης K-Core

Υπολογίζονται και σχεδιάζονται διάφορες μετρικές που σχετίζονται με την ανάλυση k-core. Αυτό περιλαμβάνει τους χρόνους εκτέλεσης, τις μέσες συνδέσεις κόμβων και τους μέσους βαθμούς για διαφορετικές τιμές k-core. Παρακάτω βλέπουμε τα 3,4 – core του μοντέλου Erdős-Rényi (30 κόμβοι $p=0.2$).

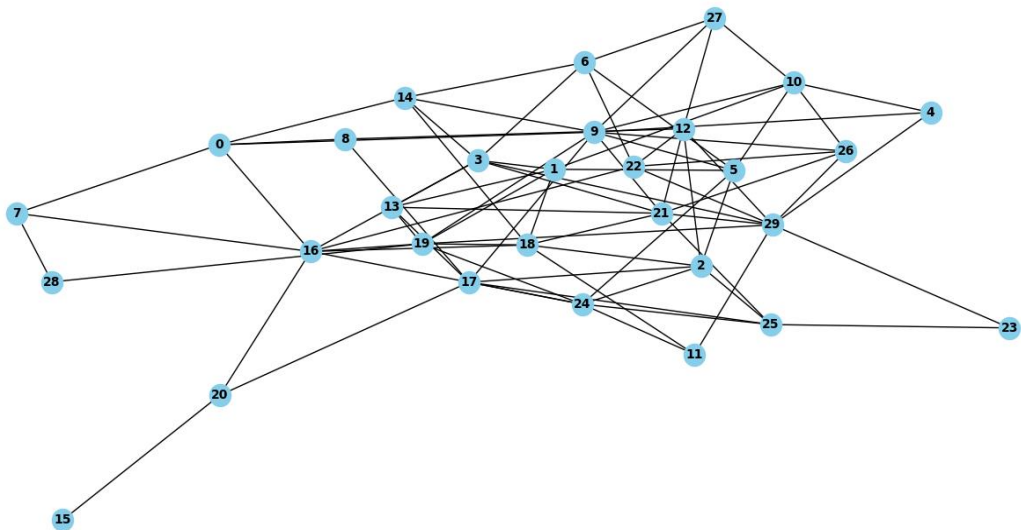


Figure 28. Ο γράφος για το μοντέλο Erdős-Rényi

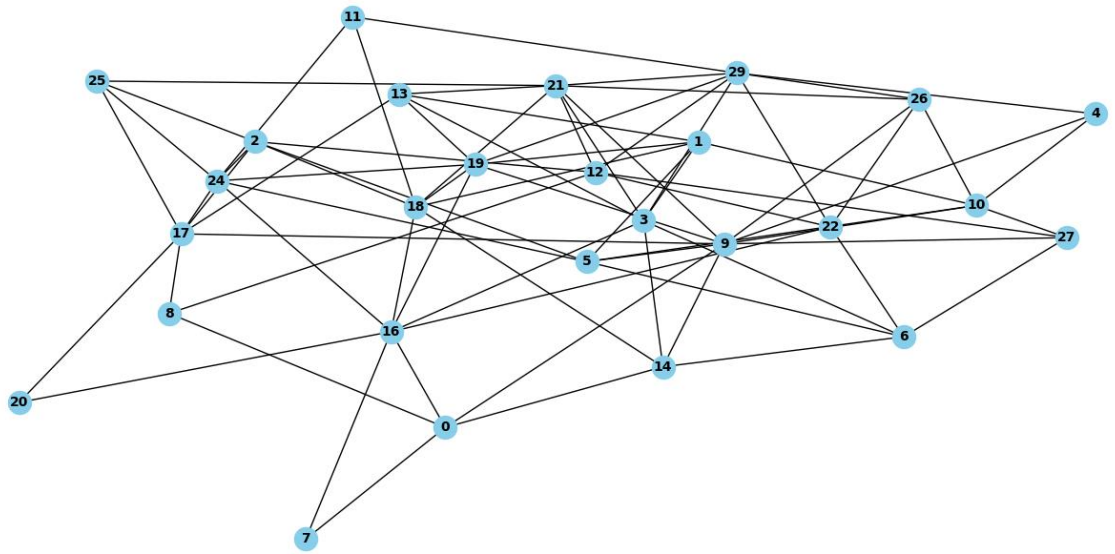


Figure 29. Ο γράφος για το 3-core του Erdős-Rényi

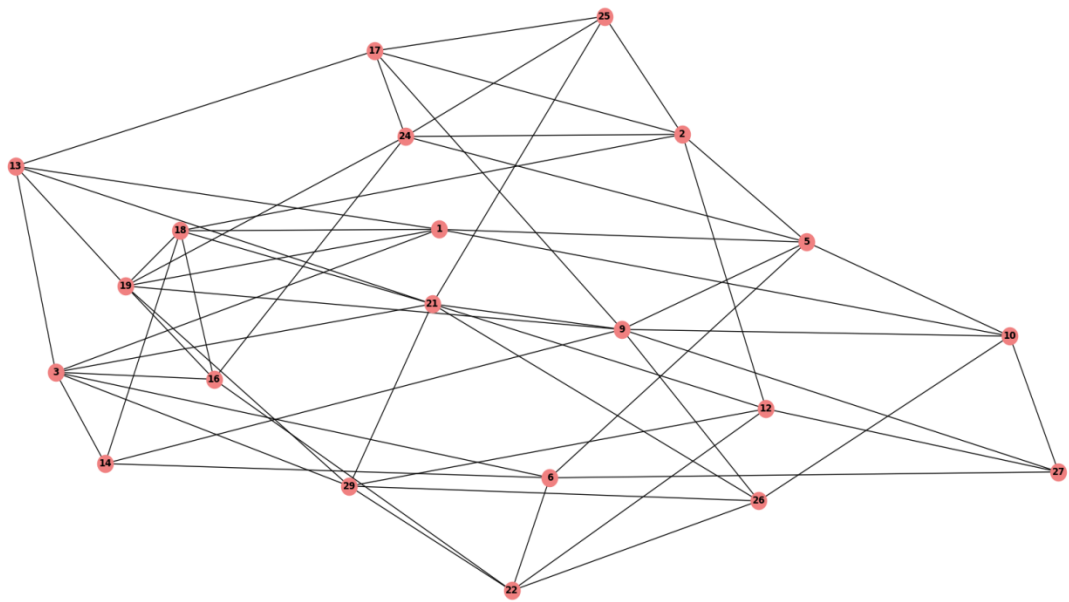


Figure 30. Ο γράφος για το 4-core του Erdős-Rényi

Σενάριο 6: Απεικόνιση των κορυφαίων κόμβων με τη μεγαλύτερη ζήτηση

Αυτό το σενάριο επικεντρώνεται στην απεικόνιση των κόμβων με τις υψηλότερες τιμές ζήτησης. Επιλέγουμε και σχεδιάζουμε τους κορυφαίους κόμβους με βάση τις τιμές ζήτησής τους.

Σενάριο 7: Υπολογισμός και σχεδίαση τιμών ζήτησης

Υπολογίζονται οι τιμές ζήτησης που σχετίζονται με κάθε κόμβο. Αυτή η απεικόνιση βοηθά στον εντοπισμό των κόμβων με την υψηλότερη και τη χαμηλότερη ζήτηση. Μέσω ενός API εξάγονται δεδομένα στα οποία εντοπίζεται η μέγιστη και ελάχιστη τιμή. Έπειτα ανάμεσα σε αυτές τις τιμές παράγονται random values για κάθε κόμβο.

```
# Generate random demand values
demand_values = {}
for node in range(num_nodes):
    demand_values[node] = random.uniform(min_demand, max_demand)
```

Figure 31. Υπολογισμός τιμών ζήτησης με κώδικα Python

Σενάριο 8: Δημιουργία πίνακα βαρών και ο αλγόριθμος Kamada-Kawai

Δημιουργείται ένας πίνακας βαρών για την αναπαράσταση των βαρών των ακμών μεταξύ των κόμβων στο γράφημα. Έστω ότι τρέχουμε το πρόγραμμα για 10 κόμβους. Αυτός ο πίνακας αποθηκεύει τα υπολογισμένα βάρη για κάθε ακμή. Σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο Kamada-Kawai μπορούμε να εντοπίσουμε εκτός από το k-core network και τους ισχυρά συνδεδεμένους κόμβους που δημιουργούν κοινότητες όπως δείξαμε παραπάνω.

```
Calculated weight for edge (0, 1): 67.98699075347137
Calculated weight for edge (0, 2): 383.7297327382145
Calculated weight for edge (0, 3): 153.05176865586432
Calculated weight for edge (0, 4): 263.1248313072594
Calculated weight for edge (0, 5): 115.76857048593523
Calculated weight for edge (0, 6): 370.0936149289799
Calculated weight for edge (1, 4): 245.9129311064817
Calculated weight for edge (1, 5): 98.55667028515752
Calculated weight for edge (1, 6): 352.88171472820227
Calculated weight for edge (1, 7): 482.18362714280096
Calculated weight for edge (1, 8): 523.9666218258942
Calculated weight for edge (1, 9): 21.754056387369758
Calculated weight for edge (3, 4): 252.04794843332346
Calculated weight for edge (3, 5): 104.69168761199931
Calculated weight for edge (3, 7): 488.3186444696427
Calculated weight for edge (4, 8): 537.553603215944
Calculated weight for edge (5, 6): 356.3974919330116
Calculated weight for edge (6, 7): 502.8039072392972
Calculated weight for edge (6, 9): 42.37433648386604
Calculated weight for edge (7, 8): 552.9413051195379
Calculated weight for edge (7, 9): 50.72873968101353
```

Figure 32. Βάρη των ακμών μεταξύ των κόμβων για το μοντέλο Erdős-Renyi


```

degree 21 01212007120071200
Calculated weight for edge (0, 6): 23.479955392169405
Calculated weight for edge (1, 5): 59.231428191596784
Calculated weight for edge (1, 7): 274.8388447664034
Calculated weight for edge (1, 9): 281.6257417738043
Calculated weight for edge (2, 5): 85.0457382247516
Calculated weight for edge (2, 10): 566.5757398556719
Calculated weight for edge (3, 4): 619.3364725396463
Calculated weight for edge (5, 6): 6.56551854096266
Calculated weight for edge (6, 12): 163.9402015318657
Calculated weight for edge (7, 11): 435.44542618751774
Calculated weight for edge (9, 12): 184.09405154086127
Calculated weight for edge (9, 13): 36.12859194943665
Calculated weight for edge (10, 12): 200.86088585231406
Calculated weight for edge (10, 14): 300.4983285954398

```

Figure 33. Βάρη των ακμών μεταξύ των κόμβων για το μοντέλο Barabási-Albert

Σενάριο 9: Ελάχιστο δέντρο σάρωσης

Εκτυπώνεται το MST του γράφου. Το MST αντιπροσωπεύει τον πιο αποτελεσματικό τρόπο σύνδεσης όλων των κόμβων και παρουσιάζεται ξεχωριστά για το κάθε μοντέλο και για τους διαφορετικούς κόμβους.

Πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις για το μοντέλο Erdős-Rényi στο 3-core και 4-core που αναπαραστήσαμε στην **Figure 29** με 30 κόμβους και πιθανότητα δημιουργίας ακμών ($p = 0,4$) και για το μοντέλο BA ($m=3$). Οι επιλεγμένοι κόμβοι αντιστοιχούν σε τιμές ζήτησης που δημιουργήθηκαν όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Επιπλέον, το μοντέλο μας εξάγει το MST για το συγκεκριμένο δίκτυο. Το δεύτερο διάγραμμα στο MST παρουσιάζει τις καθιερωμένες συνδέσεις που θα αξιοποιηθούν για τη μετάβαση δεδομένων ή υπηρεσιών σε γειτονικούς κόμβους. Το **Figure 30** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για ένα σενάριο που αφορά ένα δίκτυο 4 πυρήνων. Επίσης έχει σχεδιαστεί προσεκτικά για να αντιμετωπίσει συγκεκριμένες ερευνητικούς σκοπούς και να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την προσαρμοστικότητα και την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων μοντέλων και στρατηγικών. Το συνολικό βάρος των ακμών στο MST ελαχιστοποιείται. Αυτό σημαίνει ότι το άθροισμα των βαρών των ακμών στο MST είναι μικρότερο ή ίσο με το άθροισμα των βαρών των ακμών σε οποιοδήποτε άλλο δένδρο διάσχισης του ίδιου γραφήματος.

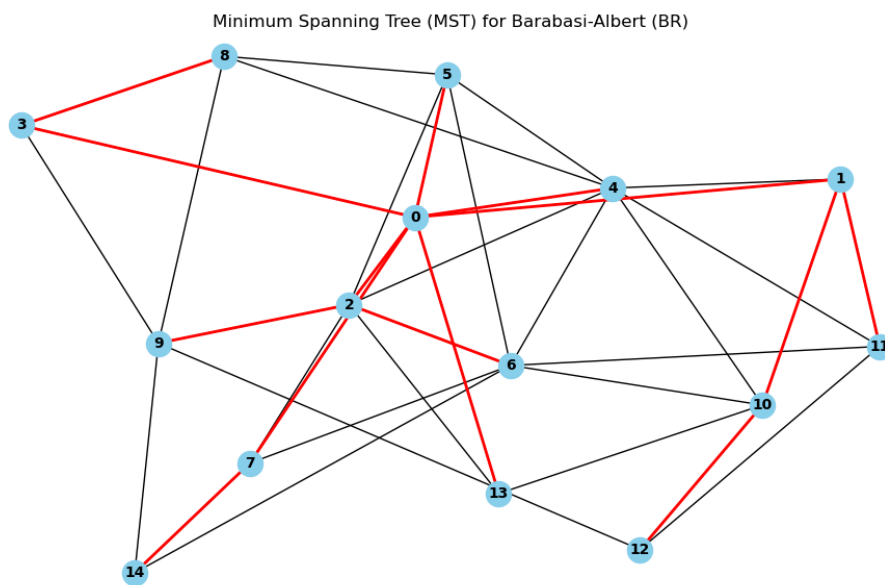


Figure 34. MST για 10 κόμβους για το μοντέλο Barabási-Albert

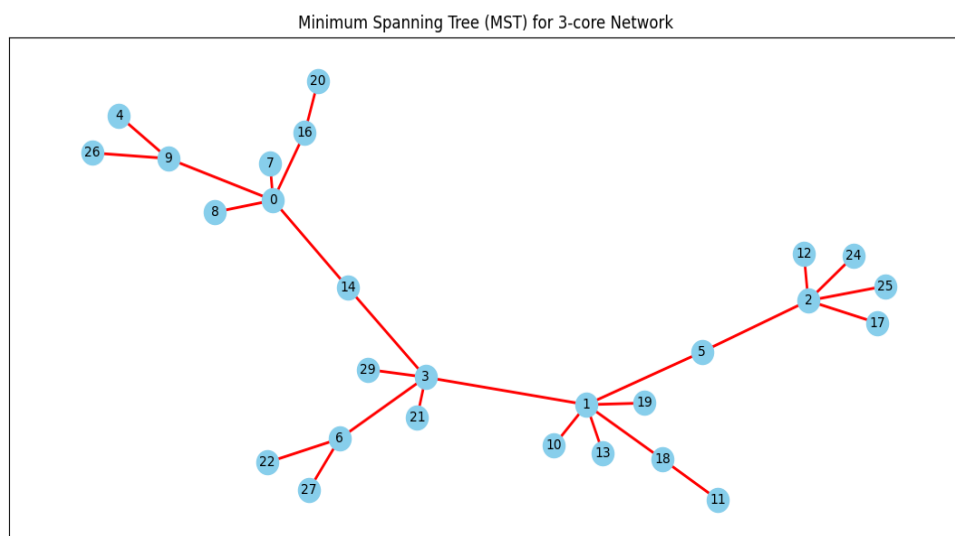


Figure 35. MST 3-core για το μοντέλο Erdős-Renyi

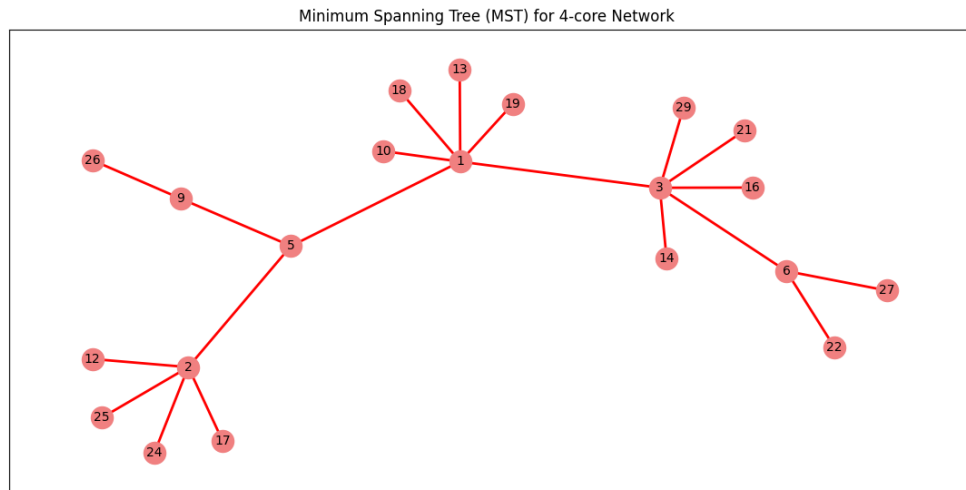


Figure 36. MST 4-core για το μοντέλο Erdős-Renyi

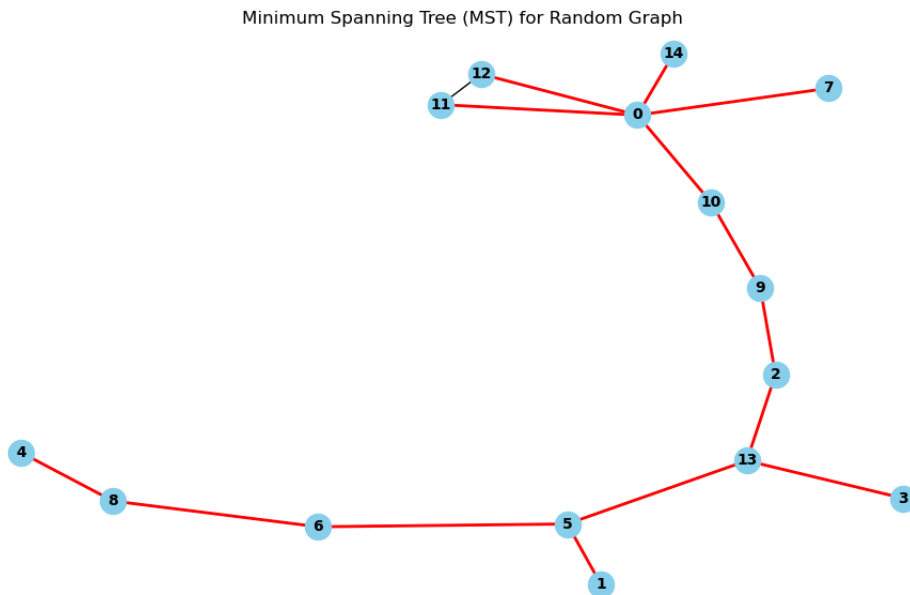


Figure 37. MST για 10 κόμβους για ένα τυχαίο μοντέλο

Σενάριο 10: Cumulative degree distribution

Η αθροιστική κατανομή βαθμού, γνωστή και ως συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (CDF) της κατανομής βαθμού, παρέχει πληροφορίες σχετικά με την πιθανότητα ένας τυχαία επιλεγμένος κόμβος σε ένα δίκτυο να έχει βαθμό μικρότερο ή ίσο από μια δεδομένη τιμή. Είναι ένας τρόπος ανάλυσης των μοτίβων συνδεσιμότητας των κόμβων σε έναν γράφο.

Η μαθηματική προσέγγιση για ένα γράφημα με κατανομή βαθμού $P(k)$ (η πιθανότητα ενός κόμβου να έχει βαθμό k .), η αθροιστική κατανομή βαθμού $F(k)$ ορίζεται ως:

$$F(k) = \sum_{k'=0}^k P(k') \quad (11)$$

Με απλούστερους όρους, το $F(k)$ σε ένα συγκεκριμένο βαθμό k δίνει την πιθανότητα ένας τυχαία επιλεγμένος κόμβος να έχει βαθμό μικρότερο ή ίσο με k . Αντιπροσωπεύει την αθροιστική κατανομή πιθανότητας μέχρι αυτόν τον βαθμό.

Η ανάλυση της αθροιστικής κατανομής βαθμών μπορεί να δώσει πληροφορίες για τη συνολική δομή ενός δικτύου. Για παράδειγμα, εάν η αθροιστική κατανομή βαθμών έχει απότομη κλίση σε χαμηλούς βαθμούς, αυτό υποδηλώνει ότι ένα σημαντικό τμήμα των κόμβων έχει χαμηλούς βαθμούς. Από την άλλη πλευρά, μια πιο βαθμιαία κλίση υποδηλώνει ένα πιο ομοιόμορφα κατανομημένο δίκτυο ή δίκτυο χωρίς κλίμακα.

Συνοψίζοντας, η αθροιστική κατανομή βαθμών είναι μια χρήσιμη μετρική για την κατανόηση της κατανομής των βαθμών των κόμβων σε ένα δίκτυο και μπορεί να βοηθήσει στον χαρακτηρισμό των δομικών ιδιοτήτων του.

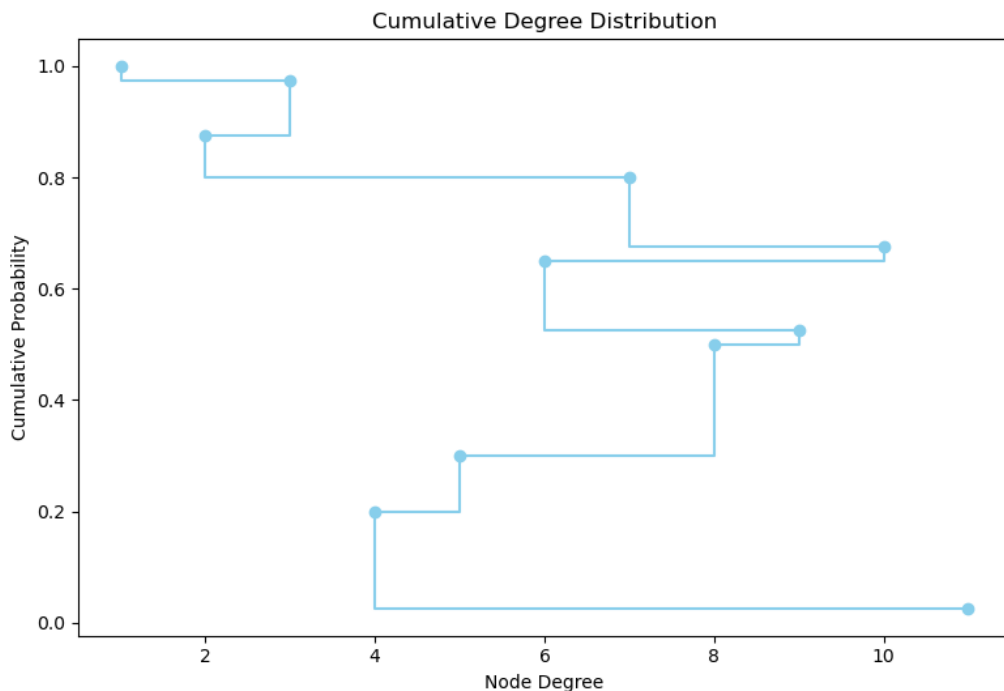


Figure 38. Η αθροιστική κατανομή βαθμών για το Erdős-Renyi

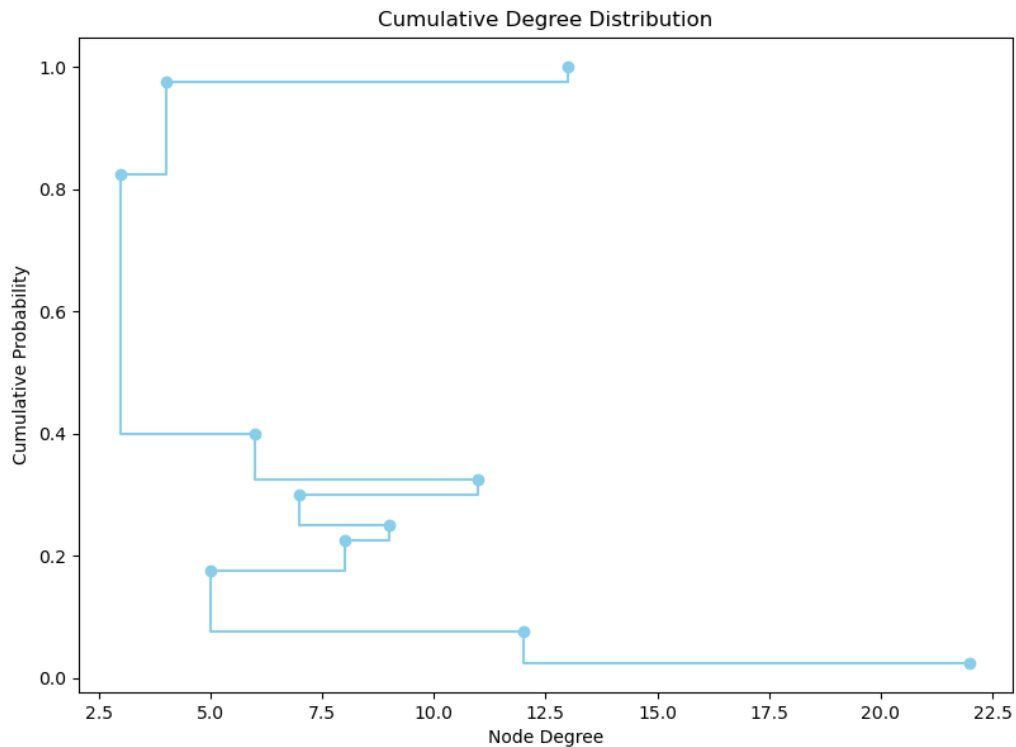


Figure 39. Η αθροιστική κατανομή βαθμών για το Barabási-Albert

6.5 Ανάλυση και αξιολόγηση των μετρικών

Σε αυτή την ενότητα, παρέχεται μια ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματός μας. Έχουν προσαρμοστεί οι παράμετροι και εφαρμόστηκαν τεχνικές ανάλυσης γραφημάτων για να δοθούν πιο ακριβή αποτελέσματα.

Ανάλυση υπογραφών K-Core

Στο επίκεντρο της εργασίας βρίσκεται η εξέταση του υπογράφου k-core μέσα στο δίκτυό μας. Αυτή η ανάλυση πυρήνα βοηθά στην αναγνώριση των κεντρικών κόμβων και τη διασύνδεσή τους. Καθορίζοντας το επίπεδο πυρήνα (k), απομονώνεται μια ομάδα κόμβων που αποτελούν τη δομή του πυρήνα του δικτύου. Στα διάφορα πειράματα που εκτελέστηκαν παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή του k-core στα μοντέλα Erdős-Renyi και Barabási-Albert είναι αποδοτική. Ειδικά στη περίπτωση του πρώτου όπου παρατηρείται μεγάλος μέσος αριθμός συνδέσεων και k-core network το οποίο διατηρεί τους περισσότερους κόμβους του μετά την εφαρμογή του k-core. Όπου θα μπορούν να μεταναστεύσουν τα δεδομένα του δικτύου. Επιπλέον, τα διαγράμματα για τους πυρήνες 3 και 4 απεικονίζουν τους

κόμβους στους οποίους αποθηκεύονται τα δεδομένα. Η προσομοίωση που διεξήχθη στο μοντέλο Erdős-Renyi περιλάμβανε 40 κόμβους με πιθανότητα δημιουργίας ακμών ρυθμισμένη σε $p=0,2$. Αξίζει να σημειωθεί ότι, κατά μέσο όρο, αφαιρούνται 1-2 κόμβοι για τον πυρήνα 3, ενώ 4-5 κόμβοι για τον πυρήνα 4 σύμφωνα με τα **Figure 29** και **Figure 30**. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν επαρκείς κόμβοι διαθέσιμοι για την αποθήκευση δεδομένων και τη διαχείριση υπηρεσιών.

Ελάχιστη έκταση δέντρων (MST)

Η ανάλυσή επεκτείνεται και στο MST του υπογράφου k-core. Υπολογίζοντας το MST, δημιουργείται ένας αποτελεσματικός κορμός του δικτύου που τονίζει τις πιο ευνοϊκές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του πυρήνα. Αυτή η θεμελιώδης δομή, καθοδηγεί την κατανόησή και την υιοθέτηση των βέλτιστων στρατηγικών τοποθέτησης υπηρεσιών εντός του δικτύου [3].

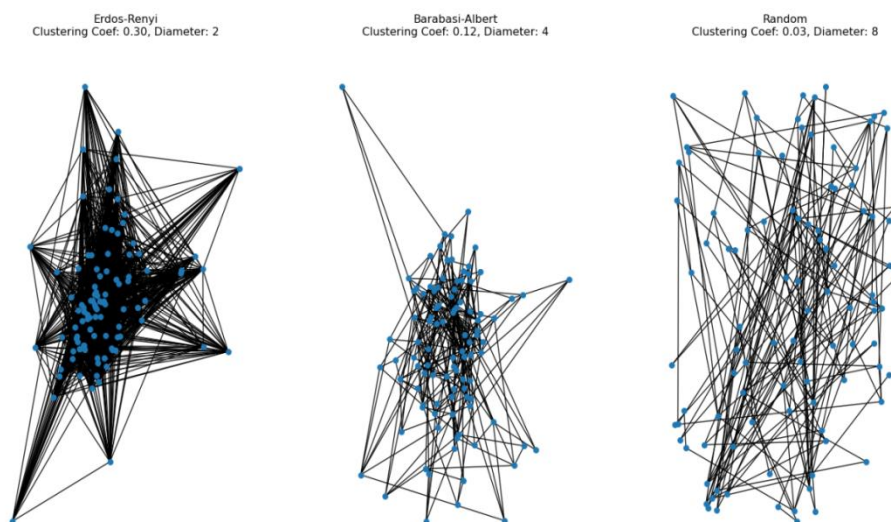


Figure 40. Οπτική προσέγγιση τριών γράφων

Κορυφαίοι κόμβοι με υψηλή ζήτηση

Ως βασικό μέρος του πειράματός, εντοπίζονται και οι κόμβοι με τις υψηλότερες τιμές ζήτησης. Η επιλογή αυτών των κόμβων είναι κρίσιμης σημασίας για τη στρατηγική μετεγκατάστασης υπηρεσιών, επιτρέποντάς την έμφαση σε υπηρεσίες με τις μεγαλύτερες δυνατότητες για μετανάστευση. Παρατηρούμε ότι παρόλο που το μοντέλο Erdős-Renyi έχει πιο πυκνή διασύνδεση μεταξύ των κόμβων και έχει

αρκετούς κόμβους με μεγάλο demand που έρχεται σε αντίθεση με το BA που έχει λίγους κόμβους με πολύ μεγάλη τιμή του demand καθώς οι νέοι κόμβοι προστίθενται στους ήδη υπάρχοντες που έχουν επίσης μεγάλη τιμή του demand.

Μετρήσεις χρόνου και συνδεσιμότητας

Πέρα από τη δομική ανάλυση, το πείραμά λαμβάνει υπόψη βασικές μετρήσεις για τη μετανάστευση υπηρεσιών. Μετράται ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή του υπογράφου k -core, προσφέροντας πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης και τους υπολογισμούς του πυρήνα. Αναλύοντας τις μετρήσεις χρόνου, γίνεται φανερό ότι, γενικά, το μοντέλο Erdős-Renyi επιδεικνύει ελαφρώς ταχύτερους χρόνους εκτέλεσης για τον υπολογισμό k -πυρήνων σε σύγκριση με το μοντέλο Barabasi-Albert σε διαφορετικές τιμές k . Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά απόδοσης μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με παράγοντες όπως το μέγεθος του δικτύου, η δομή και άλλοι παράγοντες που το επηρεάζουν. Πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο Erdős-Renyi είναι πιο αποδοτικό από το Barabasi-Albert για προσομοιώσεις δυναμικού περιβάλλοντος σε πραγματικά σενάρια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Συμπέρασμα και μελλοντικές προεκτάσεις

7.1 Συμπέρασμα

Η αποτελεσματική διαχείριση υπηρεσιών στην άκρη των δικτύων είναι ένα ζωτικής σημασίας εγχείρημα που υπόσχεται σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση και την ανταπόκριση των σύγχρονων δικτυακών υποδομών. Η εργασία επικεντρώνεται στον περίπλοκο κόσμο της διαχείρισης υπηρεσιών και της μετανάστευσης στην άκρη του δικτύου, με στόχο να αντιμετωπίσει τις περίπλοκες προκλήσεις που παρουσιάζουν τα εξελισσόμενα οικοσυστήματα δικτύου. Η έρευνά μας περιστρέφεται γύρω από δύο βασικά μαθηματικά μοντέλα: το μοντέλο Erdős-Renyi και το μοντέλο Barabási-Albert, που και τα δύο χρησιμεύουν ως θεμελιώδη στοιχεία για την ανάλυσή μας.

Στην πρώτη ενότητα, "Διαχείριση Υπηρεσιών στις Παρυφές του Δικτύου", παρουσιάστηκαν οι θεμελιώδεις έννοιες της διαχείρισης υπηρεσιών, τονίζοντας τον κρίσιμο ρόλο του EC. Το EC, λόγω της αλληλεπίδρασης του με τελικούς χρήστες και συσκευές, αναδεικνύεται ως καθοριστική λύση για την επιτάχυνση της μετάβασης υπηρεσιών και τη μείωση της καθυστέρησης. Επίσης παρουσιάστηκαν οι προκλήσεις που στηρίζουν τη διαχείριση υπηρεσιών, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη διαχείριση λανθάνοντος χρόνου, στους αυξανόμενους όγκους δεδομένων και στις περιπλοκές της μετάβασης υπηρεσιών. Κατέστη σαφές ότι η ελαχιστοποίηση του λανθάνοντος χρόνου και η βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων είναι υψίστης σημασίας, ειδικά υπό το φως των ολοένα αυξανόμενων όγκων δεδομένων.

Η τρίτη ενότητα, "Το προτεινόμενο μοντέλο", αποκάλυψε τα μαθηματικά μας μοντέλα, τα μοντέλα Erdős-Renyi και Barabasi-Albert, τα οποία προσαρμόστηκαν στις ανάγκες του πειράματός μας. Παράλληλα τονίστηκε η σημασία της ενσωμάτωσης της ζήτησης υπηρεσιών σε αυτά τα μοντέλα, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα να βελτιστοποιηθεί αποτελεσματικά η μετανάστευση υπηρεσιών ώστε να ανταποκριθεί στις δυναμικές απαιτήσεις των χρηστών.

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα της έρευνάς μας είναι η επιβεβαίωση ότι η υιοθέτηση μοντέλων δικτύου χωρίς κλίμακα, όπως το μοντέλο Barabási-Albert

συμβάλλει στην αποτελεσματική τοποθέτηση υπηρεσιών. Αυτά τα μοντέλα επιδεικνύουν αξιοσημείωτη ανθεκτικότητα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου και προωθούν τη βέλτιστη μετάβαση υπηρεσιών, ενώ οι στρατηγικές με επίγνωση της ζήτησης μπορούν να μετατοπίσουν δυναμικά τις υπηρεσίες με βάση δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Τα πειράματά μας συμβάλλουν στην ευρύτερη συζήτηση για την υπολογιστική ακραίων σημείων ρίχνοντας φως στις βασικές εκτιμήσεις για την αποτελεσματική τοποθέτηση υπηρεσιών. Η ενσωμάτωση των μοντέλων όχι μόνο εμπλουτίζει την κατανόηση των χαρακτηριστικών τυχαίας και προτιμησιακής προσκόλλησης, αλλά παρέχει επίσης μια σταθερή βάση για τη μελλοντική έρευνα στη βελτιστοποίηση των δομών δικτύων στα οικοσυστήματα EC. Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από την προσομοίωση της κατανομής των κόμβων με τη χρήση μοντέλων τυχαίων γράφων έχουν πρακτικές συνέπειες για το σχεδιασμό και τη διαχείριση περιβαλλόντων υπολογισμού ακμών. Καθώς η ζήτηση για ποικίλες υπηρεσίες συνεχίζει να αυξάνεται, η μελέτη μας υπογραμμίζει τη σημασία του εντοπισμού και της στρατηγικής τοποθέτησης υπηρεσιών σε κόμβους με υψηλή συνδεσιμότητα και σημαντική ζήτηση. Αυτή η στοχευμένη προσέγγιση διασφαλίζει την αποτελεσματική ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών, ευθυγραμμιζόμενη με τον γενικότερο στόχο της βελτίωσης της εμπειρίας των χρηστών στις εφαρμογές υπολογισμού ακμών. Η εξερεύνηση των υπο-γραμμάτων k-core αποκάλυψε αποχρώσεις στη συνδεσιμότητα του δικτύου που υπερβαίνουν τις παραδοσιακές προσεγγίσεις. Εντοπίζοντας κόμβους με σημαντική ζήτηση για συγκεκριμένες υπηρεσίες, η μελέτη μας ανοίγει το δρόμο για πιο προσαρμοσμένες και ευέλικτες στρατηγικές τοποθέτησης υπηρεσιών. Αυτή η κατανόηση των δομών του δικτύου παρέχει ένα πολύτιμο σχέδιο για την ενορχήστρωση της ανάπτυξης υπηρεσιών με τρόπο που να αξιοποιεί βέλτιστα τους υπολογιστικούς πόρους και να ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση.

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων που περιλαμβάνει την κατασκευή ενός γράφου k-πυρήνων και ενός δέντρου MST αντιπροσωπεύει μια ισχυρή μεθοδολογία για τον εντοπισμό βέλτιστων κόμβων για την τοποθέτηση υπηρεσιών. Αυτή η μεθοδολογική συνεισφορά ενισχύει την αναπαραγωγιμότητα και τη δυνατότητα εφαρμογής της προσέγγισής μας, παρέχοντας έναν συστηματικό τρόπο στους ερευνητές και τους επαγγελματίες να εφαρμόζουν αποτελεσματικές

στρατηγικές τοποθέτησης υπηρεσιών σε διάφορα σενάρια υπολογισμού ακμών. Επιπλέον, η εισαγωγή μιας ευρετικής μεθόδου στάθμισης με βάση τη ζήτηση υπηρεσιών σηματοδοτεί μια προνοητική προσέγγιση για την αντιμετώπιση των πολύπλευρων προκλήσεων της τοποθέτησης υπηρεσιών.

Η έμφαση στην ελαχιστοποίηση των αποστάσεων και στη διευκόλυνση της εκφόρτωσης εργασιών μέσω της μετανάστευσης υπηρεσιών υπογραμμίζει τη δέσμευσή μας όχι μόνο για τη βελτιστοποίηση των υπολογιστικών πόρων, αλλά και για τη βελτίωση της συνολικής απόκρισης και της ευελιξίας των συστημάτων υπολογισμού ακραίων σημείων. Συμπερασματικά, η διαχείριση υπηρεσιών στην αιχμή είναι μια προκλητική αλλά απαραίτητη πτυχή των σύγχρονων συστημάτων δικτύου. Με την ενσωμάτωση μαθηματικών μοντέλων και προσαρμοστικών τεχνικών, θέτονται οι βάσεις για τη διαχείριση υπηρεσιών που όχι μόνο λειτουργεί αποτελεσματικά αλλά και ανταποκρίνεται άρτια στις δυναμικές απαιτήσεις των σημερινών εφαρμογών και υπηρεσιών. Η εργασία συνεισφέρει χρήσιμες γνώσεις και μεθοδολογίες σε αυτό το πεδίο, με τη δυνατότητα να αναδιαμορφώσει το τοπίο της διαχείρισης υπηρεσιών στην άκρη.

7.2 Μελλοντικές Προεκτάσεις

Στα επόμενα χρόνια αναμένεται συνεχής βελτίωση και προσαρμογή των μοντέλων και των στρατηγικών, που μπορούν να διαμορφώσουν ενεργά το μέλλον της διαχείρισης υπηρεσιών. Αρκετοί βασικοί τομείς θα οδηγήσουν την ανάπτυξη και την εξέλιξη στο πεδίο της διαχείρισης υπηρεσιών και της μετάβασης στην άκρη:

Συντονισμός υπηρεσιών EC: Ο συντονισμός των υπηρεσιών στο edge θα είναι μια καίρια πτυχή της διαχείρισης του δικτύου. Με τον αυξανόμενο αριθμό συσκευών IoT και την ανάγκη για υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο και χαμηλής καθυστέρησης, η εννοχήστρωση εφαρμογών και υπηρεσιών πιο κοντά στο edge θα είναι ζωτικής σημασίας. Τα πλαίσια συντονισμού των υπηρεσιών θα είναι κεντρικής σημασίας για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής, αυτοματοποιημένης και ασφαλούς ανάπτυξης και διαχείρισης των υπηρεσιών.

Ασφάλεια και συμμόρφωση των άκρων: Με την επεξεργασία δεδομένων και τις υπηρεσίες να λαμβάνουν χώρα πιο κοντά στις πηγές δεδομένων,

η ασφάλεια και η συμμόρφωση θα είναι υψίστης σημασίας. Οι επερχόμενες εξελίξεις στη διαχείριση υπηρεσιών θα επικεντρωθούν στη βελτίωση των μέτρων ασφαλείας, της κρυπτογράφησης και των προτύπων συμμόρφωσης για την προστασία ευαίσθητων δεδομένων και τη διασφάλιση της τήρησης των κανονισμών.

Διαχείριση υπηρεσιών με τεχνητή νοημοσύνη: Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η μηχανική μάθηση (ML) θα διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης υπηρεσιών στην άκρη. Η προληπτική συντήρηση και η προληπτική ανίχνευση βλαβών θα ενσωματωθούν στα πλαίσια διαχείρισης υπηρεσιών, μειώνοντας τον χρόνο διακοπής λειτουργίας και βελτιώνοντας τις εμπειρίες των χρηστών.

Υπολογιστική ακραίων σημείων πολλαπλής πρόσβασης (MEC): Το Multi-Access Edge Computing είναι μια αναδυόμενη έννοια που συνδυάζει το cloud computing και το EC. Οι μελλοντικές τάσεις περιλαμβάνουν την ευρεία υιοθέτηση του MEC, επιτρέποντας στους φορείς εκμετάλλευσης να φιλοξενούν και να διαχειρίζονται υπηρεσίες, πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, με αποτέλεσμα τη βελτίωση των επιδόσεων, τη μείωση της καθυστέρησης και την καλύτερη εμπειρία των χρηστών [22].

5G και network slicing: Η ανάπτυξη των δικτύων 5G θα αποτελέσει κινητήριο παράγοντα για τη διαμόρφωση του μέλλοντος της διαχείρισης υπηρεσιών άκρου. Το network slicing θα επιτρέψει τη δημιουργία αποκλειστικών, εικονικών τμημάτων δικτύου βελτιστοποιημένων για συγκεκριμένες υπηρεσίες. Αυτό θα επιτρέψει τη δυναμική κατανομή και διαχείριση των πόρων για ποικίλες εφαρμογές.

DevOps και αυτοματοποίηση εφαρμογών EC: Η ενσωμάτωση των πρακτικών DevOps και της αυτοματοποίησης στη διαχείριση υπηρεσιών edge θα βελτιώσει τις διαδικασίες ανάπτυξης, δοκιμής και εγκατάστασης. Ο αυτοματισμός θα διασφαλίσει την αποτελεσματική κλιμάκωση των υπηρεσιών και την ταχεία ανταπόκριση στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις.

Συνεργασία οικοσυστήματος: Η συνεργασία μεταξύ των διαφόρων ενδιαφερόμενων φορέων του κλάδου, συμπεριλαμβανομένων των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων, των παρόχων υπηρεσιών cloud, των κατασκευαστών υλικού και των προγραμματιστών λογισμικού, θα είναι ζωτικής σημασίας για τη

διαμόρφωση του μέλλοντος της διαχείρισης υπηρεσιών. Η ανάπτυξη ανοικτών προτύπων και πλαισίων διαλειτουργικότητας θα διευκολύνει ένα ενοποιημένο και κλιμακούμενο οικοσύστημα υπηρεσιών.

Η υιοθέτηση αυτών των προοπτικών θα είναι απαραίτητη για την παροχή υπηρεσιών υψηλής απόδοσης και χαμηλής καθυστέρησης, με παράλληλη διατήρηση της ασφάλειας, της συμμόρφωσης και της επεκτασιμότητας σε έναν κόσμο που επικεντρώνεται όλο και περισσότερο στις τεχνολογίες του EC.

Καθώς κοιτάμε μπροστά, η μελλοντική έρευνα μπορεί να βασιστεί στα θεμέλια που τέθηκαν στην παρούσα μελέτη. Η διερεύνηση της προσαρμοστικότητας του πλαισίου μας σε διαφορετικά σενάρια υπολογισμού ακμών και η επέκτασή του ώστε να προσαρμόζεται στις αναδυόμενες τεχνολογίες θα εδραιώσει περαιτέρω την πρακτική του σημασία. Επιπλέον, η διερεύνηση της υλοποίησης της προτεινόμενης προσέγγισής μας στον πραγματικό κόσμο σε διάφορα περιβάλλοντα υπολογιστών ακμής μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την επεκτασιμότητα και την αποτελεσματικότητά της σε δυναμικά, εξελισσόμενα οικοσυστήματα.

Εν κατακλείδι, η παρούσα μελέτη όχι μόνο προάγει την κατανόηση της τοποθέτησης υπηρεσιών σε υπολογιστές ακραίων σημείων, αλλά και προσφέρει απτές συνεισφορές στην ανάπτυξη πρακτικών πλαισίων. Αντιμετωπίζοντας την πολυπλοκότητα της συνδεσιμότητας των κόμβων, της ζήτησης υπηρεσιών και των υπολογιστικών πόρων, η εργασία μας παρέχει ένα εφελκυστικό για τη συνεχή εξέλιξη και βελτιστοποίηση των οικοσυστημάτων υπολογισμού άκρων στο διαρκώς μεταβαλλόμενο τοπίο της πληροφορικής. Ενώ η έρευνά μας έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην κατανόηση και τη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης υπηρεσιών στο EC, υπάρχουν αρκετοί δρόμοι για μελλοντική διερεύνηση και βελτίωση:

- Η επέκταση του μοντέλου ώστε να φιλοξενεί ένα ευρύτερο φάσμα χωρητικότητας κόμβων και διαφορετικών τύπων υπηρεσιών θα ενίσχυε τη δυνατότητα εφαρμογής του σε ετερογενή περιβάλλοντα EC. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές υπολογιστικές και αποθηκευτικές ικανότητες επηρεάζουν τις

αποφάσεις τοποθέτησης υπηρεσιών είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων.

- Η διερεύνηση της ενσωμάτωσης τεχνικών μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να παρέχει δυνατότητες πρόβλεψης για τις απαιτήσεις υπηρεσιών. Η ανάλυση ιστορικών δεδομένων και προτύπων χρηστών μέσω μοντέλων μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να συμβάλει στην ακριβέστερη πρόβλεψη των απαιτήσεων υπηρεσιών, επιτρέποντας στρατηγικές προληπτικής τοποθέτησης υπηρεσιών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G. Karakostas, ‘A better approximation ratio for the Vertex Cover problem’.
- [2] C. T. Nguyen *et al.*, ‘A Comprehensive Survey of Enabling and Emerging Technologies for Social Distancing—Part I: Fundamentals and Enabling Technologies’, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153479–153507, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018140.
- [3] A. Karanika, P. Oikonomou, K. Kolomvatsos, and T. Loukopoulos, ‘A Demand-driven, Proactive Tasks Management Model at the Edge’, in *2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Glasgow, United Kingdom: IEEE, Jul. 2020, pp. 1–8. doi: 10.1109/FUZZ48607.2020.9177653.
- [4] M. Chen, W. Li, G. Fortino, Y. Hao, L. Hu, and I. Humar, ‘A Dynamic Service Migration Mechanism in Edge Cognitive Computing’, *ACM Trans. Internet Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 1–15, May 2019, doi: 10.1145/3239565.
- [5] J. Lim and D. Lee, ‘A Load Balancing Algorithm for Mobile Devices in Edge Cloud Computing Environments’, *Electronics*, vol. 9, no. 4, p. 686, Apr. 2020, doi: 10.3390/electronics9040686.
- [6] C.-K. Tham and R. Chattopadhyay, ‘A load balancing scheme for sensing and analytics on a mobile edge computing network’, in *2017 IEEE 18th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Macau, China: IEEE, Jun. 2017, pp. 1–9. doi: 10.1109/WoWMoM.2017.7974307.
- [7] Z. Duan *et al.*, ‘A novel load balancing scheme for mobile edge computing’, *Journal of Systems and Software*, vol. 186, p. 111195, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jss.2021.111195.
- [8] K. Kolomvatsos and C. Anagnostopoulos, ‘A Proactive Statistical Model Supporting Services and Tasks Management in Pervasive Applications’, *IEEE Trans. Netw. Serv. Manage.*, vol. 19, no. 3, pp. 3020–3031, Sep. 2022, doi: 10.1109/TNSM.2022.3161663.
- [9] K. Kolomvatsos and C. Anagnostopoulos, ‘A probabilistic model for assigning queries at the edge’, *Computing*, vol. 102, no. 4, pp. 865–892, Apr. 2020, doi: 10.1007/s00607-019-00767-8.
- [10] Z. Zhou, X. Li, and G. Sun, ‘Accelerate service live migration in resource-limited edge computing systems’, in *Proceedings of the 4th ACM/IEEE Symposium on Edge Computing*, Arlington Virginia: ACM, Nov. 2019, pp. 354–355. doi: 10.1145/3318216.3363456.
- [11] C. Anagnostopoulos, S. Hadjiefthymiades, and K. Kolomvatsos, ‘Accurate,

- Dynamic, and Distributed Localization of Phenomena for Mobile Sensor Networks’, *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 12, no. 2, pp. 1–59, May 2016, doi: 10.1145/2882966.
- [12] K. Bhardwaj, P. Agrawal, A. Gavrilovska, and K. Schwan, ‘AppSachet: Distributed App Delivery from the Edge Cloud’, in *Mobile Computing, Applications, and Services*, vol. 162, S. Sigg, P. Nurmi, and F. Salim, Eds., in Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol. 162., Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 89–106. doi: 10.1007/978-3-319-29003-4_6.
 - [13] C. Li, Q. Cai, C. Zhang, B. Ma, and Y. Luo, ‘Computation offloading and service allocation in mobile edge computing’, *J Supercomput*, vol. 77, no. 12, pp. 13933–13962, Dec. 2021, doi: 10.1007/s11227-021-03749-w.
 - [14] G. J. Baxter, S. N. Dorogovtsev, K.-E. Lee, J. F. F. Mendes, and A. V. Goltsev, ‘Critical Dynamics of the k -Core Pruning Process’, *Phys. Rev. X*, vol. 5, no. 3, p. 031017, Aug. 2015, doi: 10.1103/PhysRevX.5.031017.
 - [15] X. Xu and W. Dai, ‘Data Acquisition, Filtering and Buffering Protocol Design for Edge Computing Nodes’, in *2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Palma de Mallorca, Spain: IEEE, Jul. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/INDIN45523.2021.9557533.
 - [16] A. Paullada, I. D. Raji, E. M. Bender, E. Denton, and A. Hanna, ‘Data and its (dis)contents: A survey of dataset development and use in machine learning research’, *Patterns*, vol. 2, no. 11, p. 100336, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.patter.2021.100336.
 - [17] K. Kolomvatsos, C. Anagnostopoulos, and S. Hadjiefthymiades, ‘Data Fusion and Type-2 Fuzzy Inference in Contextual Data Stream Monitoring’, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern, Syst.*, vol. 47, no. 8, pp. 1839–1853, Aug. 2017, doi: 10.1109/TSMC.2016.2560533.
 - [18] Q. Liu, T. Xia, L. Cheng, M. Van Eijk, T. Ozcelebi, and Y. Mao, ‘Deep Reinforcement Learning for Load-Balancing Aware Network Control in IoT Edge Systems’, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 1491–1502, Jun. 2022, doi: 10.1109/TPDS.2021.3116863.
 - [19] Z. Ning *et al.*, ‘Distributed and Dynamic Service Placement in Pervasive Edge Computing Networks’, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 1277–1292, Jun. 2021, doi: 10.1109/TPDS.2020.3046000.
 - [20] K. Kolomvatsos, C. Anagnostopoulos, and S. Hadjiefthymiades, ‘Distributed Localized Contextual Event Reasoning Under Uncertainty’, *IEEE Internet Things J.*, vol. 4, no. 1, pp. 183–191, Feb. 2017, doi: 10.1109/JIOT.2016.2638119.

- [21] L. Su, N. Wang, R. Zhou, and Z. Li, ‘Dynamic service placement and request scheduling for edge networks’, *Computer Networks*, vol. 213, p. 108997, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.comnet.2022.108997.
- [22] H. Tabatabaee Malazi *et al.*, ‘Dynamic Service Placement in Multi-Access Edge Computing: A Systematic Literature Review’, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 32639–32688, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3160738.
- [23] A. Mosa and R. Sakellariou, ‘Dynamic Virtual Machine Placement Considering CPU and Memory Resource Requirements’, in *2019 IEEE 12th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*, Milan, Italy: IEEE, Jul. 2019, pp. 196–198. doi: 10.1109/CLOUD.2019.00042.
- [24] N. A. Sulieman, L. Ricciardi Celsi, W. Li, A. Zomaya, and M. Villari, ‘Edge-Oriented Computing: A Survey on Research and Use Cases’, *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 452, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15020452.
- [25] W. Zhang, A. Sharma, and T. Wood, ‘EdgeBalance: Model-Based Load Balancing for Network Edge Data Planes’.
- [26] N. Wang, B. Varghese, M. Matthaiou, and D. S. Nikolopoulos, ‘ENORM: A Framework For Edge NODe Resource Management’, *IEEE Trans. Serv. Comput.*, pp. 1–1, 2019, doi: 10.1109/TSC.2017.2753775.
- [27] P. Loff, ‘[Experiences with the anti-rheumatic agent Exrheudon]’, *Munch Med Wochenschr*, vol. 113, no. 28, pp. 1034–1035, Jul. 1971.
- [28] D. Chu *et al.*, ‘Finding the Best k in Core Decomposition: A Time and Space Optimal Solution’, in *2020 IEEE 36th International Conference on Data Engineering (ICDE)*, Dallas, TX, USA: IEEE, Apr. 2020, pp. 685–696. doi: 10.1109/ICDE48307.2020.00065.
- [29] T. Wang, J. Zhou, A. Liu, M. Z. A. Bhuiyan, G. Wang, and W. Jia, ‘Fog-Based Computing and Storage Offloading for Data Synchronization in IoT’, *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 4272–4282, Jun. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2875915.
- [30] X. Xia *et al.*, ‘Graph-Based Optimal Data Caching in Edge Computing’, in *Service-Oriented Computing*, vol. 11895, S. Yangui, I. Bouassida Rodriguez, K. Drira, and Z. Tari, Eds., in Lecture Notes in Computer Science, vol. 11895., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 477–493. doi: 10.1007/978-3-030-33702-5_37.
- [31] A. P. Singh and D. P. Singh, ‘Implementation of K-shortest Path Algorithm in GPU Using CUDA’, *Procedia Computer Science*, vol. 48, pp. 5–13, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.04.103.
- [32] J. Chen, I. A. Kanj, and G. Xia, ‘Improved Parameterized Upper Bounds for Vertex Cover’, in *Mathematical Foundations of Computer Science 2006*, vol.

- 4162, R. Kráľovič and P. Urzyczyn, Eds., in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4162., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 238–249. doi: 10.1007/11821069_21.
- [33] A. Garcia-Saavedra, G. Iosifidis, X. Costa-Perez, and D. J. Leith, ‘Joint Optimization of Edge Computing Architectures and Radio Access Networks’, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 36, no. 11, pp. 2433–2443, Nov. 2018, doi: 10.1109/JSAC.2018.2874142.
 - [34] K. Poularakis, J. Llorca, A. M. Tulino, I. Taylor, and L. Tassiulas, ‘Joint Service Placement and Request Routing in Multi-cell Mobile Edge Computing Networks’, 2019, doi: 10.48550/ARXIV.1901.08946.
 - [35] Y.-X. Kong, G.-Y. Shi, R.-J. Wu, and Y.-C. Zhang, ‘k -core: Theories and applications’, *Physics Reports*, vol. 832, pp. 1–32, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.physrep.2019.10.004.
 - [36] K. Brunnström, E. Dima, T. Qureshi, M. Johanson, M. Andersson, and M. Sjöström, ‘Latency impact on Quality of Experience in a virtual reality simulator for remote control of machines’, *Signal Processing: Image Communication*, vol. 89, p. 116005, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.image.2020.116005.
 - [37] X. Xue, ‘Law of large numbers for the SIR model with random vertex weights on Erdős–Rényi graph’, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 486, pp. 434–445, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.physa.2017.04.096.
 - [38] M. Z. Nayyer *et al.*, ‘LBRO: Load Balancing for Resource Optimization in Edge Computing’, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 97439–97449, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3205741.
 - [39] X. Li, F. Zeng, G. Fang, Y. Huang, and X. Tao, ‘Load balancing edge server placement method with QoS requirements in wireless metropolitan area networks’, *IET Communications*, vol. 14, no. 21, pp. 3907–3916, Dec. 2020, doi: 10.1049/iet-com.2020.0651.
 - [40] N. Harth, C. Anagnostopoulos, H.-J. Voegel, and K. Kolomvatsos, ‘Local & Federated Learning at the network edge for efficient predictive analytics’, *Future Generation Computer Systems*, vol. 134, pp. 107–122, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.future.2022.03.030.
 - [41] Y. Yu, ‘Mobile edge computing towards 5G: Vision, recent progress, and open challenges’, *China Commun.*, vol. 13, no. Supplement2, pp. 89–99, 2016, doi: 10.1109/CC.2016.7833463.
 - [42] K. Kolomvatsos and C. Anagnostopoulos, ‘Multi-criteria optimal task allocation at the edge’, *Future Generation Computer Systems*, vol. 93, pp.

- 358–372, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.future.2018.10.051.
- [43] M. Löwe and F. Torres, ‘On hitting times for a simple random walk on dense Erdős–Rényi random graphs’, *Statistics & Probability Letters*, vol. 89, pp. 81–88, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.spl.2014.02.017.
- [44] P. Oikonomou, A. Karanika, C. Anagnostopoulos, and K. Kolomvatsos, ‘On the Use of Intelligent Models towards Meeting the Challenges of the Edge Mesh’, *ACM Comput. Surv.*, vol. 54, no. 6, pp. 1–42, Jul. 2022, doi: 10.1145/3456630.
- [45] Z. Qin, Z. Cheng, C. Lin, Z. Lu, and L. Wang, ‘Optimal Workload Allocation for Edge Computing Network Using Application Prediction’, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1–13, Mar. 2021, doi: 10.1155/2021/5520455.
- [46] F. Mohd-Zaid, C. M. S. Kabban, R. F. Deckro, and E. D. White, ‘Parameter specification for the degree distribution of simulated Barabási–Albert graphs’, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 465, pp. 141–152, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.physa.2016.07.024.
- [47] V. G. Bochorishvili, ‘[Present questions in the diagnosis and treatment of sepsis]’, *Ter Arkh*, vol. 51, no. 3, pp. 88–94, 1979.
- [48] K. Kolomvatsos, C. Anagnostopoulos, M. Koziri, and T. Loukopoulos, ‘Proactive & Time-Optimized Data Synopsis Management at the Edge’, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/TKDE.2020.3021377.
- [49] C. Anglano, M. Canonico, and M. Guazzone, ‘Profit-aware Resource Management for Edge Computing Systems’, in *Proceedings of the 1st International Workshop on Edge Systems, Analytics and Networking*, Munich Germany: ACM, Jun. 2018, pp. 25–30. doi: 10.1145/3213344.3213349.
- [50] M. Sarfati *et al.*, ‘Prognostic importance of serum soluble CD23 level in chronic lymphocytic leukemia’, *Blood*, vol. 88, no. 11, pp. 4259–4264, Dec. 1996.
- [51] M. Bey, P. Kuila, B. B. Naik, and S. Ghosh, ‘Quantum-inspired particle swarm optimization for efficient IoT service placement in edge computing systems’, *Expert Systems with Applications*, vol. 236, p. 121270, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121270.
- [52] H. Akama, J. Jung, T. Joyce, and M. Miyake, ‘Random graph model simulations of semantic networks for associative concept dictionaries’, in *Proceedings of the 3rd Textgraphs Workshop on Graph-Based Algorithms for Natural Language Processing - TextGraphs ’08*, Manchester, United Kingdom: Association for Computational Linguistics, 2008, pp. 57–60. doi:

10.3115/1627328.1627337.

- [53] N. A. Angel, D. Ravindran, P. M. D. R. Vincent, K. Srinivasan, and Y.-C. Hu, ‘Recent Advances in Evolving Computing Paradigms: Cloud, Edge, and Fog Technologies’, *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 196, Dec. 2021, doi: 10.3390/s22010196.
- [54] P. Louridas, ‘Review of Network Science by Albert-Làaszlò Barabási’, *SIGACT News*, vol. 49, no. 2, pp. 10–13, Jun. 2018, doi: 10.1145/3232679.3232683.
- [55] P. Simoens, Y. Xiao, P. Pillai, Z. Chen, K. Ha, and M. Satyanarayanan, ‘Scalable crowd-sourcing of video from mobile devices’, in *Proceeding of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services*, Taipei Taiwan: ACM, Jun. 2013, pp. 139–152. doi: 10.1145/2462456.2464440.
- [56] S. Yangui, I. Bouassida Rodriguez, K. Drira, and Z. Tari, Eds., *Service-Oriented Computing: 17th International Conference, ICSOC 2019, Toulouse, France, October 28–31, 2019, Proceedings*, vol. 11895. in Lecture Notes in Computer Science, vol. 11895. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-33702-5.
- [57] M. Subramony and S. D. Pugh, ‘Services Management Research: Review, Integration, and Future Directions’, *Journal of Management*, vol. 41, no. 1, pp. 349–373, Jan. 2015, doi: 10.1177/0149206314557158.
- [58] I. E. Antoniou and E. T. Tsompa, ‘Statistical Analysis of Weighted Networks’, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2008, pp. 1–16, 2008, doi: 10.1155/2008/375452.
- [59] M. L. Bertotti and G. Modanese, ‘The configuration model for Barabasi-Albert networks’, *Appl Netw Sci*, vol. 4, no. 1, p. 32, Dec. 2019, doi: 10.1007/s41109-019-0152-1.
- [60] Y. Xu, Z. Zheng, X. Liu, A. Yao, and X. Li, ‘Three-way decisions based service migration strategy in mobile edge computing’, *Information Sciences*, vol. 609, pp. 533–547, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ins.2022.07.115.
- [61] V. T. Le, N. E. Ioini, H. R. Barzegar, and C. Pahl, ‘Trust management for service migration in Multi-access Edge Computing environments’, *Computer Communications*, vol. 194, pp. 167–179, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.comcom.2022.07.039.
- [62] G. Ghoshal, L. Chi, and A.-L. Barabási, ‘Uncovering the role of elementary processes in network evolution’, *Sci Rep*, vol. 3, no. 1, p. 2920, Oct. 2013, doi: 10.1038/srep02920.
- [63] T. K. Phan, M. Rocha, D. Griffin, and M. Rio, ‘Utilitarian Placement of

- Composite Services’, *IEEE Trans. Netw. Serv. Manage.*, vol. 15, no. 2, pp. 638–649, Jun. 2018, doi: 10.1109/TNSM.2018.2798413.
- [64] Q. Vu Khanh, V.-H. Nguyen, Q. N. Minh, A. Dang Van, N. Le Anh, and A. Chehri, ‘An efficient edge computing management mechanism for sustainable smart cities’, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 38, p. 100867, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.suscom.2023.100867.
 - [65] T. Kamada and S. Kawai, ‘AN ALGORITHM FOR DRAWING GENERAL UNDIRECTED GRAPHS’, *INFORMATION PROCESSING LETTERS*, vol. 31, no. 1, 1989.
 - [66] A. Silva and K. R. M. Leino, Eds., *Computer Aided Verification: 33rd International Conference, CAV 2021, Virtual Event, July 20–23, 2021, Proceedings, Part II*, vol. 12760. in Lecture Notes in Computer Science, vol. 12760. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-81688-9.
 - [67] D. Watts and S. Strogatz, ‘Collective Dynamics of Small-World Networks’, vol. 393, 1998.