



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΕΛΛΑΔΟΣ

ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ,
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΤΙΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ & ΔΙΚΤΥΑ Η/Υ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ
ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία του
Θεόφилου Σαχινίδη

Επιβλέπων: Δρ. Αναστάσιος Πολίτης, Επίκουρος Καθηγητής

ΣΕΡΡΕΣ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΕΛΛΑΔΟΣ

ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ,
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΤΙΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ & ΔΙΚΤΥΑ Η/Υ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ
ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία του
Θεόφилου Σαχινίδη

Επιβλέπων: Δρ. Αναστάσιος Πολίτης, Επίκουρος Καθηγητής

ΣΕΡΡΕΣ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023

Υπεύθυνη Δήλωση: Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία αυτή. Επίσης, έχω αναφέρει τις πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Βεβαιώνω ότι αυτή η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, στο πλαίσιο των απαιτήσεων του Μεταπτυχιακού Προγράμματος στις Τηλεπικοινωνίες & Δίκτυα Η/Υ του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδας.

Copyright (C) Σαχινίδης Θεόφιλος & Πολίτης Αναστάσιος, 2023, Σέρρες

Υπογραφή Φοιτητή:

Περίληψη

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αποτελούν έναν από τους πλέον καθοριστικούς παράγοντες της επίδοσης των δικτύων υπολογιστών. Σήμερα, τα πλέον διαδεδομένα πρωτόκολλα εσωτερικής δρομολόγησης σε συμβατικά ενσύρματα δίκτυα είναι το RIP, το OSPF και το EIGRP. Το RIP δρομολογεί με τη λογική των διανυσμάτων απόστασης, ενώ το OSPF με αυτή της κατάστασης συνδέσμων. Το EIGRP είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο, αφού συνδυάζει χαρακτηριστικά και των δύο κατηγοριών. Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη συγκριτική αποτίμηση των χρόνων σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων, σε μία μικρή δικτυακή τοπολογία. Η διαδικασία διενεργήθηκε τόσο με πραγματικό εξοπλισμό, όσο και προσομοιώνοντας την ίδια τοπολογία σε OPNET. Αποδεικνύεται ότι το EIGRP υπερέχει, συγκλίνοντας τάχιστα. Το OSPF παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερο χρόνο, ενώ το RIP συγκλίνει αργά. Αντιπαραβάλλοντας τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης, προκύπτουν κοινά συμπεράσματα. Ωστόσο οι χρόνοι στην πραγματική τοπολογία εμφανίζονται αυξημένοι, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της. Επιπλέον, τα τρία πρωτόκολλα συγκρίθηκαν και ως προς άλλες παραμέτρους (κριτήριο δρομολόγησης, επεκτασιμότητα, καθυστέρηση, κατανάλωση υπολογιστικών πόρων, παραγόμενη κίνηση). Αποδείχθηκε ότι το RIP υστερεί έναντι των άλλων δύο πρωτοκόλλων.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, αναζητείται επίσης το όριο στο πλήθος δρομολογητών μιας τοπολογίας, ώστε να επωφελείται του διαχωρισμού σε περιοχές δρομολόγησης OSPF. Για το σκοπό αυτό διενεργήθηκαν αρκετές προσομοιώσεις σε OPNET, μίας βαθμιαία αυξανόμενης τοπολογίας και μίας μεγαλύτερου πλήθους κόμβων. Η τελευταία διαμερίζεται σε περιοχές δρομολόγησης OSPF με αρκετούς τρόπους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το όφελος της διάσπασης μιας περιοχής διαφαίνεται όταν αυτή περιλαμβάνει 40 και πλέον δρομολογητές. Για 60 ή περισσότερους, η διαφορά των χρόνων σύγκλισης μεταξύ επίπεδης και διασπασμένης τοπολογίας διευρύνεται αρκετά. Σε γενικές γραμμές λοιπόν, επιβεβαιώνεται ο εμπειρικός κανόνας που προτείνει τη διάσπαση τοπολογιών με 50 ή περισσότερους κόμβους. Τέλος, αποδεικνύεται ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τοπολογίας (π.χ. αριθμός ζεύξεων) πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το διαχωρισμό της σε περιοχές OSPF.

Λέξεις Κλειδιά: Πρωτόκολλο Εσωτερικής Δρομολόγησης, RIP, OSPF, EIGRP, OPNET, Περιοχή Δρομολόγησης OSPF

Abstract

Routing protocols play a key role in the performance of computer networks. Nowadays, RIP, OSPF and EIGRP are the most popular interior gateway protocols. RIP belongs to distance vector routing protocols and OSPF to link state. EIGRP is a hybrid protocol, combining characteristics from both categories. In this master diploma thesis, the convergence times of the aforementioned protocols are compared in a topology with a few routers. The procedure took place in a real-time topology and with OPNET simulations of the same network. The results show that EIGRP converges rapidly. The convergence of OSPF takes a few more seconds and RIP converges slowly. The results deriving from the real network equipment experiment and the simulation, are the same. However, due to its special characteristics, convergence time values are higher with the real-time equipment. Also, the comparison continued according to other parameters, like best routing decision, scalability, delay, overhead, CPU and memory demands. In general, this gave prominence to RIP's drawbacks.

The effect of the number of routers per OSPF area on the network convergence duration is also studied in this thesis. This was examined through two sets of OPNET simulations, one with a gradually increasing size topology and a larger one, which can be divided into OSPF areas in several ways. When a topology includes 40 or more routers, multi-area OSPF converges faster than flat OSPF. For 60 or more nodes, the superior performance of multi-area OSPF is obvious. So, the rule of thumb to use multi-area OSPF when one domain contains 50 or more nodes, seems to fit the simulated topologies. Also, it turned out that the special characteristics of a topology, like the number of links, must be taken into account when it comes to the OSPF multi area design.

Key Words: Interior Gateway Protocol, RIP, OSPF, EIGRP, OPNET, OSPF areas

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας σηματοδοτείται το τέλος της φοιτητικής μου ζωής, στις πόλεις της Κοζάνης και των Σερρών. Μία μακρόχρονη και όμορφη περίοδος έφτασε στο τέλος της. Τα συναισθήματα είναι ανάμεικτα. Υπερτερεί η ικανοποίηση που συνοδεύει την επιτυχία μου και η ανυπομονησία για να εργαστώ ως Μηχανικός, κατόπιν εκπλήρωσης των στρατιωτικών μου υποχρεώσεων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, που συμμετέχουν στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα στις Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Η/Υ, για τις γνώσεις που μου προσέφεραν, την προθυμία και την καθοδήγησή τους.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή Δρ. Αναστάσιο Πολίτη για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και την άμεση ανταπόκρισή του κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Ακόμα, τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου και για την άριστη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο εν λόγω πρόγραμμα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη στήριξη των επιλογών μου, για την οικονομική και κάθε είδους βοήθεια που μου προσέφεραν κατά τις Προπτυχιακές και τις Μεταπτυχιακές μου σπουδές.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	ii
Ευχαριστίες	iii
Περιεχόμενα.....	iv
Κατάλογος Εικόνων.....	vii
Κατάλογος Πινάκων	x
Συντομογραφίες	xi
Εισαγωγή	xiv
Κίνητρο και Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας.....	xiv
Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας.....	xv
1 Βασικές Έννοιες.....	1
1.1 Ιεραρχική Σχεδίαση Δικτύων	1
1.2 Διευθυνσιοδότηση.....	4
1.3 Δρομολόγηση	7
1.4 Πρωτόκολλα δρομολόγησης	9
1.4.1 Δρομολόγηση με Διανύσματα Απόστασης.....	11
1.4.2 Δρομολόγηση με Κατάσταση Συνδέσμων.....	14
2 Πρωτόκολλα Εσωτερικής Δρομολόγησης.....	20
2.1 RIP.....	20
2.1.1 Ιστορικά Στοιχεία.....	20
2.1.2 Χαρακτηριστικά και Λειτουργία	21
2.1.3 Περιορισμοί	23
2.1.4 Δομή Μηνύματος Ενημέρωσης	24
2.2 OSPF	26
2.2.1 Ιστορικά Στοιχεία.....	26

2.2.2	Βασικές έννοιες.....	26
2.2.3	Λειτουργία	28
2.2.4	Υπολογισμός Κόστους Διαδρομής	32
2.2.5	Περιοχές OSPF	33
2.2.6	Δομή μηνύματος	36
2.3	EIGRP	37
2.3.1	Ιστορικά Στοιχεία.....	37
2.3.2	Βασικές Έννοιες και Λογική	38
2.3.3	Υπολογισμός Κόστους Διαδρομής	41
2.3.4	Λειτουργία	44
2.3.5	RTP	46
2.3.6	Δομή Μηνύματος Ενημέρωσης	47
2.4	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	48
3	Σύγκριση Πρωτοκόλλων Εσωτερικής Δρομολόγησης σε Πραγματική Τοπολογία	53
3.1	Χρόνος Σύγκλισης.....	53
3.2	Υπολογισμός Χρόνου Σύγκλισης Πραγματικού Δικτύου.....	54
3.3	Εκτέλεση Πειράματος	56
3.4	Αποτελέσματα.....	68
4	Σύγκριση Πρωτοκόλλων Εσωτερικής Δρομολόγησης μέσω Προσομοιώσεων	70
4.1	Event Driven Προσομοίωση σε OPNET.....	70
4.2	Σχηματισμός Τοπολογίας και Εκτέλεση Προσομοιώσεων	72
4.3	Αποτελέσματα.....	75
4.4	Άλλα Κριτήρια Σύγκρισης Πρωτοκόλλων Εσωτερικής Δρομολόγησης (IGPs)	79
4.4.1	Ικανότητα Επιλογής Βέλτιστης Διαδρομής	80
4.4.2	Επεκτασιμότητα.....	81
4.4.3	Παραγόμενη Δικτυακή Κίνηση	81
4.4.4	Κατανάλωση Υπολογιστικών Πόρων.....	83

4.4.5	Καθυστέρηση.....	85
5	Επίδραση Αριθμού Δρομολογητών ανά OSPF area στο Χρόνο Σύγκλισης.....	86
5.1	Προσομοιώσεις Βαθμιαία Αυξανόμενης Τοπολογίας	86
5.1.1	Περιγραφή Τοπολογίας και Εκτέλεση Προσομοιώσεων.....	86
5.1.2	Αποτελέσματα.....	91
5.2	Προσομοιώσεις σε Μεγαλύτερη Τοπολογία.....	95
5.2.1	Περιγραφή Τοπολογίας και Εκτέλεση Προσομοιώσεων.....	95
5.2.2	Αποτελέσματα.....	99
6	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	104
6.1	Συμπεράσματα	104
6.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	106
	Βιβλιογραφία	107

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1: Μοντέλο αναφοράς OSI [2].	3
Εικόνα 1-2: Αντιπαραβολή επιπέδων στοίβας TCP/IP και μοντέλου OSI [2].	4
Εικόνα 1-3: Κλάσεις IPv4 διευθύνσεων [4].	5
Εικόνα 1-4: Παράδειγμα προβλήματος μέτρησης έως το άπειρο.	13
Εικόνα 1-5: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, αρχική εκτέλεση.	16
Εικόνα 1-6: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβου (1).	17
Εικόνα 1-7: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβου (2).	17
Εικόνα 1-8: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβου (3).	18
Εικόνα 1-9: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβου (4).	18
Εικόνα 1-10: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβων (5) και (6).	19
Εικόνα 2-1: Πακέτο ενημέρωσης RIPv2. Οι αριθμοί εντός των παρενθέσεων αντιστοιχούν στα bytes που δεσμεύει κάθε πεδίο.	25
Εικόνα 2-2: Σχέση OSPF LSDB με LSAs [8].	27
Εικόνα 2-3: Πλημμύρα πακέτων κατάστασης συνδέσμου στο OSPF [8].	27
Εικόνα 2-4: Σύναψη γειτονικής σχέσης 2-Way.	29
Εικόνα 2-5: Ανταλλαγή LSDBs.	30
Εικόνα 2-6: Ανταλλαγή LSDB, σε τοπολογία με DR.	31
Εικόνα 2-7: Τοπολογία OSPF δικτύου, χωρισμένη σε τρεις OSPF areas [8].	34
Εικόνα 2-8: Τρόπος διάδοσης βασικότερων τύπων OSPF LSAs.	35
Εικόνα 2-9: Κεφαλίδα μηνύματος ενημέρωσης OSPF [31].	37
Εικόνα 2-10: Τοπολογία EIGRP, χωρισμένη σε δύο ASS [32].	39
Εικόνα 2-11: Βασικές έννοιες σχετικές με το EIGRP [32].	40
Εικόνα 2-12: Διαδικασία σύναψης γειτονικών σχέσεων στο EIGRP [32].	45
Εικόνα 2-13: Δομή μηνύματος ενημέρωσης EIGRP [38].	48
Εικόνα 3-1: Παραδοσιακή μέθοδος υπολογισμού χρόνου σύγκλισης πραγματικής δικτυακής τοπολογίας [58].	55
Εικόνα 3-2: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής τοπολογίας.	57
Εικόνα 3-3: Πειραματική τοπολογία, όπως δημιουργήθηκε στο εργαστήριο.	57
Εικόνα 3-4: Περιβάλλον λογισμικού PuTTY.	59
Εικόνα 3-5: Πλάνο διευθυνσιοδότησης.	60
Εικόνα 3-6: Ρυθμίσεις Traffic Generator στο NetScanTools Pro.	64

Εικόνα 3-7: Παραμετροποίηση πακέτων που αποστέλλει το NetScanTools Pro.....	65
Εικόνα 4-1: Γενικό Διάγραμμα ροής διαδικασίας προσομοίωσης δικτύου υπολογιστών στο RIVERBED [63].....	72
Εικόνα 4-2: Αποτύπωση της μελετώμενης δικτυακής τοπολογίας στο RIVERBED.....	73
Εικόνα 4-3: Επιβεβαίωση ενεργοποίησης του πρωτοκόλλου RIP.	74
Εικόνα 4-4: Επιβεβαίωση ενεργοποίησης του πρωτοκόλλου OSPF.	75
Εικόνα 4-5: Επιβεβαίωση ενεργοποίησης του πρωτοκόλλου EIGRP.	75
Εικόνα 4-6: Συγκριτική παρουσίαση χρόνων αρχικής σύγκλισης και σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων.....	76
Εικόνα 4-7: Αποτύπωση δραστηριοτήτων σύγκλισης των πρωτοκόλλων RIP, OSPF και EIGRP	78
Εικόνα 4-8: Τοπολογία σύγκρισης επιλεγόμενης διαδρομής.	80
Εικόνα 4-9: Συνολικός αριθμός bits που λαμβάνει ο R2 και σχετίζονται με το overhead εκάστου πρωτοκόλλου δρομολόγησης.	81
Εικόνα 4-10: Μεταβολή μέσης τιμής ποσοστού χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης της ζεύξης R3 – R4, για κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης.....	82
Εικόνα 4-11: Throughput ζεύξης που μεταφέρει αποκλειστικά πληροφορία ελέγχου.....	83
Εικόνα 4-12: Ποσοστό χρήσης της CPU του R2 χρησιμοποιώντας έκαστο πρωτόκολλο δρομολόγησης.....	84
Εικόνα 4-13: Μεταβολή μέσης καθυστέρησης αναμονής ζεύξης R1 – R2 που αντιστοιχεί σε κάθε πρωτόκολλο.....	85
Εικόνα 5-1: Τοπολογία 5 non backbone δρομολογητών.	87
Εικόνα 5-2: Παράγοντας αύξησης της τοπολογίας κατά 5 δρομολογητές.....	87
Εικόνα 5-3: Τοπολογία 10 non backbone δρομολογητών.	88
Εικόνα 5-4: Τοπολογία 15 non backbone δρομολογητών.	88
Εικόνα 5-5: Τοπολογία 20 non backbone δρομολογητών.	89
Εικόνα 5-6: Τοπολογία 100 non backbone δρομολογητών.	89
Εικόνα 5-7: Παράγοντας αύξησης της τοπολογίας κατά 10 δρομολογητές.....	90
Εικόνα 5-8: Παράγοντας αύξησης της τοπολογίας κατά 20 δρομολογητές.....	90
Εικόνα 5-9: Μεταβολή χρόνου αρχικής σύγκλισης με την αύξηση του αριθμού των δρομολογητών, για flat OSPF και διάσπαση σε OSPF areas των 5 κόμβων.....	91
Εικόνα 5-10: Μεταβολή χρόνου σύγκλισης κατόπιν συμβάντος με την αύξηση του αριθμού των δρομολογητών, για flat OSPF και διάσπαση σε OSPF areas των 5 κόμβων.....	92

Εικόνα 5-11: Αντιπαραβολή χρόνων αρχικής σύγκλισης για flat OSPF και διάσπαση σε OSPF areas των 5,10 και 20 δρομολογητών.	93
Εικόνα 5-12: Αντιπαραβολή χρόνων σύγκλισης κατόπιν συμβάντος για flat OSPF και διάσπαση σε OSPF areas των 5,10 και 20 δρομολογητών.	94
Εικόνα 5-13: Τοπολογία μελέτης επίδρασης αριθμού δρομολογητών ανά περιοχή στο χρόνο σύγκλισης του OSPF στο δίκτυο.	96
Εικόνα 5-14: flat OSPF (1 backbone area, 254 routers / area).	97
Εικόνα 5-15: Χωρισμός σε 3 περιοχές συνολικά (2 non backbone areas, 127 routers / area).97	
Εικόνα 5-16: Χωρισμός σε 5 περιοχές συνολικά (4 non backbone areas, 63 routers / area). .97	
Εικόνα 5-17: Χωρισμός σε 9 περιοχές συνολικά (8 non backbone areas, 31 routers / area). .98	
Εικόνα 5-18: Χωρισμός σε 25 περιοχές συνολικά (24 non backbone areas, 10 routers / area).	98
Εικόνα 5-19: Πανομοιότυπα τμήματα τοπολογίας, κατόπιν προσθήκης ζεύξεων.	99
Εικόνα 5-20: Μεταβολή χρόνου αρχικής σύγκλισης με τη διάσπαση της τοπολογίας σε μεγαλύτερο πλήθος OSPF areas, όπου ομαδοποιείται μικρότερος αριθμός δρομολογητών. 100	
Εικόνα 5-21: Μεταβολή χρόνου σύγκλισης κατόπιν συμβάντος με τη διάσπαση της τοπολογίας σε μεγαλύτερο πλήθος OSPF areas, όπου ομαδοποιείται μικρότερος αριθμός δρομολογητών.	101
Εικόνα 5-22: Επίδραση αριθμού ζεύξεων του δικτύου στη μεταβολή του χρόνου αρχικής σύγκλισης, με την αύξηση των OSPF areas.	102
Εικόνα 5-23: Επίδραση αριθμού ζεύξεων του δικτύου στη μεταβολή του χρόνου σύγκλισης κατόπιν συμβάντος, με την αύξηση των OSPF areas.	103

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Περιγραφή επιπέδων μοντέλου αναφοράς OSI.	2
Πίνακας 1-2: Πληροφορίες κύριων κλάσεων IPv4.....	6
Πίνακας 1-3: Εύρος δημόσιων και ιδιωτικών διευθύνσεων ανά κλάση.....	7
Πίνακας 3-1: Πληροφορίες ζεύξεων τοπολογίας.....	58
Πίνακας 3-2: Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας με πραγματικό εξοπλισμό.....	68
Πίνακας 3-3: Αντίστοιχα αποτελέσματα ερευνητικής δημοσίευσης [41].....	69
Πίνακας 4-1: Χρόνοι αρχικής σύγκλισης και σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων.....	76
Πίνακας 4-2: Χρόνοι αρχικής σύγκλισης και σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων, όπως υπολογίστηκαν στη δημοσίευση [41].	77
Πίνακας 4-3: Χρόνοι σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων για διαφορετικές στιγμές εμφάνισης της βλάβης.	79
Πίνακας 5-1: Αριθμός δρομολογητών ανά OSPF area και χρόνοι σύγκλισης, για κάθε διαχωρισμό.....	99

Συντομογραφίες

ABR: Area Border Router
ACK: Acknowledgement
AS: Autonomous System
ASBR: Autonomous System Border Router
BDR: Backup Designated Router
BGP: Border Gateway Protocol
BSD: Berkeley Software Distribution
BW: Bandwidth
CIDR: Classless Inter-Domain Routing
CPU: Central Processing Unit
DD: Database Description
DDN: Dotted Decimal Notation
DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol
DMVPN: Dynamic Multipoint Virtual Private Network
DR: Designated Router
DUAL: Diffusing Update Algorithm
EGP: Exterior Gateway Protocol
EIGRP: Enhanced Interior Gateway Routing Protocol
FTP: File Transfer Protocol
GNS3: General Network Simulator 3
GWINFO: Gateway Information Protocol
HTTP: Hypertext Transfer Protocol
IETF: Internet Engineering Task Force
IGP: Interior Gateway Protocol
IGRP: Interior Gateway Routing Protocol
IOS: Internetwork Operating System
IoT: Internet of Things
IP: Internet Protocol
IPv4: Internet Protocol version 4
IPv6: Internet Protocol version 6
IS-IS: Intermediate System – Intermediate System

ISO: International Organization for Standardization

ISP: Internet Service Provider

KPI: Key Performance Indicator

LAN: Local Area Network

LSA: Link State Advertisement

LSDB: Link State Data Base

LSR: Link-State Request

LSU: Link State Update

MAC: Medium Access Control

MANET: Mobile Ad hoc Networks

MTU: Maximum Transmission Unit

NAT: Network Address Translation

NFV: Network Functions Virtualization

NS: Network Slicing

OPNET: Optimized Network Engineering Tool

OSI: Open Systems Interconnections

OSPF: Open Shortest Path First

OSPFv1: OSPF version 1

OSPFv2: OSPF version 2

OSPFv3: OSPF version 3

PAT: Port Address Translation

PC: Personal Computers

PDM: Protocol Dependent Modules

PDU: Protocol Data Units

QoS: Quality of Service

RAM: Random Access Memory

RFC: Request for Comments

RID: Router ID

RIP: Routing Information Protocol

RIPng: RIP new generation

RIPv1: RIP version 1

RIPv2: RIP version 2

RTP: Real-time Transport Protocol

RTP: Reliable Transport Protocol

SDN: Software Defined Network
SPF: Shortest Path First
SSH: Secure Shale
STP: Spanning Tree Protocol
SUT: System Under Test
TCP: Transmission Control Protocol
TVL: Type-Length-Values
UDP: User Datagram Protocol
USB: Universal Serial Bus
VLAN: Virtual Local Area Network
VLSM: Variable Length Subnet Masking
VoIP: Voice over IP
WAN: Ethernet Wide Area Network
XNS: Xerox Network Systems

Εισαγωγή

Κίνητρο και Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία διακρίνεται σε δύο λογικές ενότητες. Στην πρώτη, αναλύονται τα χαρακτηριστικά και αποτιμώνται συγκριτικά οι επιδόσεις των τριών δημοφιλέστερων IGP συμβατικών δικτύων, του RIP, του OSPF και του EIGRP. Το ζήτημα της επιλογής του καταλληλότερου IGP δεν είναι νέο. Τα τρία πρωτόκολλα είναι διαθέσιμα εδώ και αρκετές δεκαετίες, με αποτέλεσμα να έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες συγκριτικής αποτίμησής τους. Έχει διαπιστωθεί ότι το RIP δεν ανταποκρίνεται στις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων δικτύων. Τα άλλα δύο IGP χρησιμοποιούνται ευρύτατα, βελτιώνονται και διερευνάται η ενσωμάτωσή τους σε επερχόμενες δικτυακές τεχνολογίες.

Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται οι δημοφιλέστερες, εδώ και αρκετά χρόνια, εκδόσεις των πρωτοκόλλων. Οι ανάγκες πολλών σύγχρονων εφαρμογών απαιτούν την απόκρυψη σχεδόν κάθε προβλήματος της υποδομής από το χρήστη. Το εφαρμοζόμενο IGP συμβάλλει στην ικανοποίηση της απαίτησης, επιτυγχάνοντας τον κατά το δυνατό μικρότερο χρόνο σύγκλισης. Συνεπώς, κατά την εκπόνηση δίδεται έμφαση στο συγκεκριμένο KPI. Η μελέτη λαμβάνει χώρα σε μία μικρή τοπολογία, τόσο με τη χρήση πραγματικών συσκευών όσο και μέσω προσομοιώσεων σε OPNET. Πλήθος ερευνητικών εργασιών πραγματοποιούνται παρόμοιες συγκρίσεις. Ωστόσο, η αντιπαραβολή αποτελεσμάτων εξαγόμενων από πραγματική τοπολογία και από προσομοιώσεις παρατίθεται σε λίγες από αυτές, κυρίως λόγω της δυσκολίας πρόσβασης σε πραγματικό εξοπλισμό. Η επιβεβαίωσή τους αποτελεί το κίνητρο εκπόνησης της συγκεκριμένης μελέτης.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας διερευνάται το όριο του αριθμού των δρομολογητών μίας τοπολογίας, όπου εφαρμόζεται το OSPF, πάνω από το οποίο είναι ωφέλιμη η χρήση περιοχών δρομολόγησης (OSPF areas). Ισοδύναμα, διερευνάται το μέγιστο πλήθος δρομολογητών που μπορούν να ομαδοποιηθούν σε κοινή OSPF area, χωρίς την υποβάθμιση των επιδόσεων του δικτύου. Η μελέτη διεξάγεται μέσω προσομοιώσεων σε OPNET. Βάσει της λογικής του πρωτοκόλλου, αναμένεται αύξηση του χρόνου σύγκλισης, με την ομαδοποίηση επιπλέον συσκευών στην ίδια περιοχή. Συνεπώς η μελέτη επικεντρώνεται και πάλι στο KPI αυτό.

Σήμερα, ο μέγιστος αριθμός δρομολογητών ανά περιοχή υπαγορεύεται κυρίως από εμπειρικούς κανόνες, γενικά αποδεκτούς από την κοινότητα των Μηχανικών Δικτύων. Η

παρούσα διερεύνηση αποσκοπεί στην επιβεβαίωση ή κατάρριψη των κανόνων αυτών για συγκεκριμένες τοπολογίες. Ακόμα φιλοδοξεί να αποτελέσει την απαρχή διατύπωσης περισσότερων και επιβεβαιωμένων κατευθυντήριων οδηγιών, αναφορικά με το όριο του εξεταζόμενου αριθμού δρομολογητών ανά περιοχή.

Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας

Δομικά, η εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο, παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο επεξήγησης θεμελιωδών εννοιών των δικτύων υπολογιστών και της διευθυνσιοδότησης. Σημαντικές έννοιες της δρομολόγησης, στις οποίες βασίζεται η μελέτη παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία του RIP, του OSPF και του EIGRP, ώστε να αποτιμηθούν συγκριτικά στα επόμενα κεφάλαια. Επιπλέον, παρατίθεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετική με τα υπό μελέτη ζητήματα.

Το τρίτο κεφάλαιο αφιερώνεται στη σύγκριση των τριών πρωτοκόλλων ως προς το χρόνο σύγκλισής τους, αφού σημειωθεί μεταβολή σε πραγματική τοπολογία. Αναλύεται η σύνδεση και η παραμετροποίηση των συσκευών, όπως και το πείραμα. Στο τέλος της ενότητας επεξηγούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Η διενέργεια της αντίστοιχης διαδικασίας μέσω προσομοίωσης σε OPNET αποτελεί το αντικείμενο του τέταρτου κεφαλαίου. Περιγράφεται η διαδικασία αποτύπωσης της τοπολογίας στο περιβάλλον του προσομοιωτή και σύγκρισης των πρωτοκόλλων με τη βοήθεια αυτού. Παρατίθενται τα εξαγόμενα αποτελέσματα και αντιπαραβάλλονται με τα αντίστοιχα του πειράματος. Επίσης διενεργείται σύγκριση ως προς άλλες μετρικές, βασισμένη στα χαρακτηριστικά εκάστου πρωτοκόλλου και σε προσομοιώσεις.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται, μέσω προσομοιώσεων, η επίδραση του αριθμού των δρομολογητών ανά OSPF area στο χρόνο σύγκλισης του δικτύου. Ισοδύναμα διερευνάται το πλήθος των δρομολογητών μίας τοπολογίας ή περιοχής, πέραν του οποίου η διάσπαση είναι ωφέλιμη. Εξετάζεται η εγκυρότητα σχετικών εμπειρικών κανόνων που έχουν διατυπωθεί.

Το έκτο και τελευταίο κεφάλαιο, αφιερώνεται στην αποτύπωση και σύνοψη των σημαντικότερων συμπερασμάτων τα οποία εξήχθησαν από την εκπόνηση της εργασίας αυτής

1 Βασικές Έννοιες

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο επεξήγησης βασικών εννοιών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Αρχικά παρατίθεται συνοπτικά η ιδέα της ιεραρχικής σχεδίασης των δικτύων, των μοντέλων αναφοράς και οι βασικές αρχές της διευθυνσιοδότησης. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικότερα η δρομολόγηση Internet Protocol (IP) πακέτων και τα πρωτόκολλα που τη διέπουν (πρωτόκολλα δρομολόγησης) .

1.1 Ιεραρχική Σχεδίαση Δικτύων

Τα πλεονεκτήματα της ιεραρχικής σχεδίασης των δικτύων υπολογιστών έγιναν αντιληπτά από τις απαρχές της ύπαρξής τους. Με τον όρο ιεραρχική σχεδίαση νοείται ο διαχωρισμός της δικτυακής αρχιτεκτονικής σε επίπεδα (layers). Καθένα επιφορτίζεται με την υλοποίηση συγκεκριμένων λειτουργιών και παρέχει στο ανώτερο του ένα σύνολο υπηρεσιών, αποκρύπτοντας τις λεπτομέρειες της υλοποίησης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται διάκριση των λειτουργιών του δικτύου, εξασφαλίζοντας καλύτερη σχεδίαση, διαχείριση και εποπτεία του. Ακόμα βελτιώνεται η επεκτασιμότητα της τοπολογίας.

Κάθε επίπεδο οργανώνει την πληροφορία σε κατάλληλες δομές, τις Μονάδες Δεδομένων Πρωτοκόλλου (Protocol Data Units – PDUs). Μία PDU απαρτίζεται από την κεφαλίδα (header) και το κύριο μέρος (payload). Η header φέρει πληροφορία ελέγχου, ενώ το payload τα δεδομένα προς μετάδοση.

Σε ένα ιεραρχικά σχεδιασμένο δίκτυο εγκαθίσταται αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ επιπέδων που συνορεύουν (κατακόρυφα βέλη στην Εικόνα 1-1), με τη μορφή διεπαφών (interfaces). Στον αποστολέα, τα δεδομένα εισέρχονται από την εφαρμογή στο ανώτερο επίπεδο της ιεραρχίας και περικλείονται στην αντίστοιχη PDU. Το πακέτο διαπερνά την ιεραρχία προς τα κάτω, οπότε περικλείεται διαδοχικά στην PDU κάθε κατώτερου επιπέδου. Δηλαδή προστίθεται σε αυτό η αντίστοιχη κεφαλίδα. Στον παραλήπτη ακολουθεί η αντίστροφη διαδικασία. Η PDU εισέρχεται στο κατώτερο επίπεδο και διαπερνά την ιεραρχία προς τα πάνω, ενώ αφαιρείται κάθε φορά μία κεφαλίδα. Ο μηχανισμός αυτός καλείται ενθυλάκωση (encapsulation).

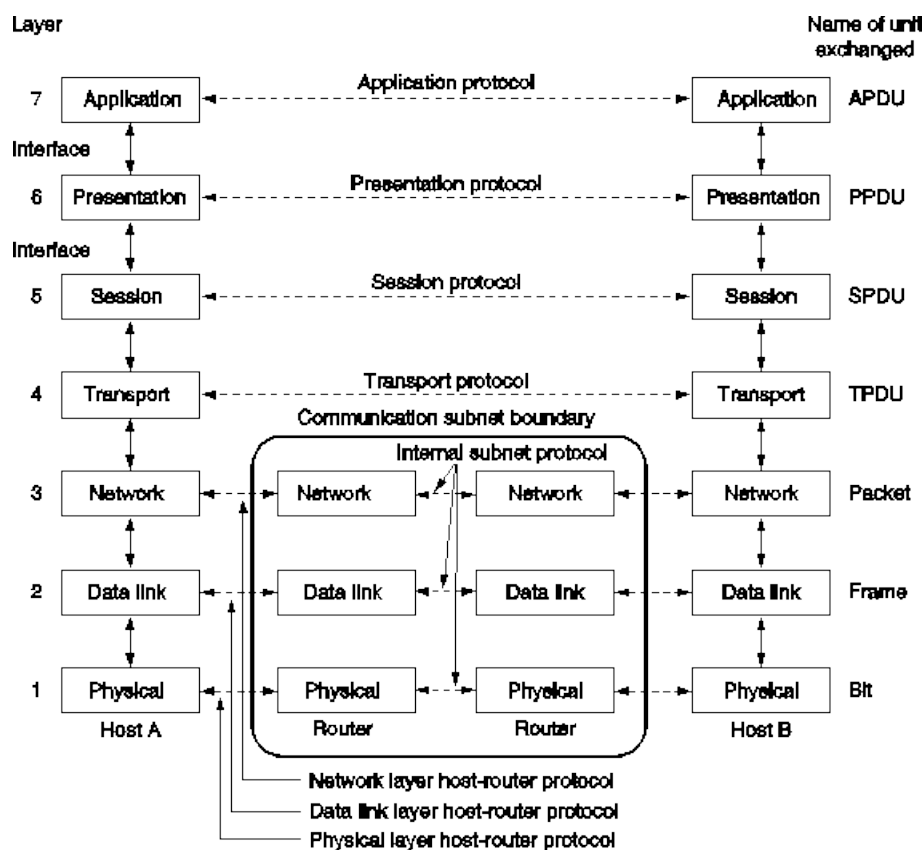
Επιπλέον εγκαθίσταται επικοινωνία και μεταξύ των ομότιμων επιπέδων (peer layers) του αποστολέα και του παραλήπτη (οριζόντια βέλη στην Εικόνα 1-1), χρησιμοποιώντας πληροφορίες της κεφαλίδας του εκάστοτε επιπέδου. Η επικοινωνία ομότιμων επιπέδων διέπεται από ένα σύνολο κανόνων, τα πρωτόκολλα. Το κατώτερο επίπεδο της ιεραρχίας

περιλαμβάνει τις φυσικές ζεύξεις σύνδεσης των δικτυακών συσκευών, δηλαδή η σύνδεση εκεί είναι φυσική. Αντίθετα, η επικοινωνία των υπόλοιπων ομότιμων επιπέδων είναι εικονική.

Το πλέον συνηθισμένο μοντέλο αναφοράς στην ιεραρχική σχεδίαση των δικτύων είναι το Open Systems Interconnections (OSI) [1] [2]. Αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Προτυποποίησης (International Organization for Standardization – ISO), το 1984. Περιλαμβάνει επτά ιεραρχικά επίπεδα (Εικόνα 1-1). Ο Πίνακας 1-1 παρουσιάζει την ονομασία, τις βασικότερες λειτουργίες και τις PDUs των επιπέδων του OSI, από κάτω προς τα πάνω.

Πίνακας 1-1: Περιγραφή επιπέδων μοντέλου αναφοράς OSI.

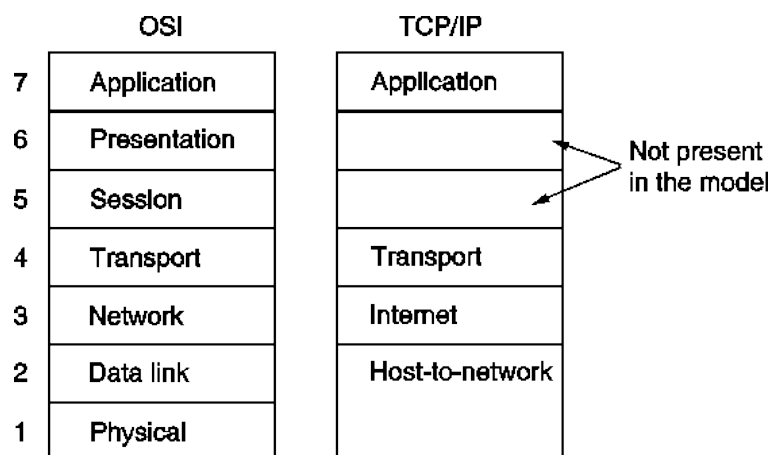
Ονομασία επιπέδου	Λειτουργίες	PDU
Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer ή Layer 1)	Φυσική προώθηση των bits από τον αποστολέα στον παραλήπτη.	δυαδικά ψηφία (bits)
Επίπεδο Συνδέσμου Μετάδοσης Δεδομένων (Data Link Layer ή Layer 2)	Εξασφάλιση λήψης πλαισίων με τη σωστή σειρά. Διαχείριση συγκρούσεων (υποεπίπεδο Medium Access Control – MAC) και επιβεβαιώσεων ορθής λήψης πλαισίων.	πλαίσια (frames)
Επίπεδο Δικτύου (Network Layer ή Layer 3)	Διευθυνσιοδότηση Δρομολόγηση Έλεγχοι (π.χ. συμφόρησης)	πακέτα (packets)
Επίπεδο Μεταφοράς (Transport Layer ή Layer 4)	Επικοινωνία απ' άκρο σ' άκρο. Εξασφάλιση ορθής λήψης πακέτων από τον προορισμό.	Transport PDU
Επίπεδο Συνόδου (Session Layer ή Layer 5)	Διαχείριση συνδέσεων μεταξύ χρηστών.	Session PDU
Επίπεδο Παρουσίασης (Presentation Layer ή Layer 6)	Λειτουργίες σχετικές με την παρουσίαση των μεταδιδόμενων δεδομένων.	Presentation PDU
Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer ή Layer 7)	Διέπουν τη λειτουργία πλήθους εφαρμογών χρήστη. Παραδείγματα πρωτοκόλλων: e mail, HTTP, FTP	Application PDU



Εικόνα 1-1: Μοντέλο αναφοράς OSI [2].

Παρά τη σχεδόν αποκλειστική χρήση του OSI ως μοντέλου αναφοράς, αυτό βρήκε ελάχιστη εφαρμογή σε πραγματικά δίκτυα. Αποτέλεσε τη βάση ανάπτυξης ομάδων πρωτοκόλλων επικοινωνίας ομότιμων επιπέδων, όπως η στοίβα Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP). Το διαδίκτυο ακολουθεί την τελευταία και την καθιστά ως την πλέον διαδεδομένη. Τα επίπεδα που περιλαμβάνει και η συσχέτισή τους με αυτά του OSI παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-2.

Τα επίπεδα συνόδου και παρουσίασης απουσιάζουν από τη στοίβα TCP/IP. Οι λειτουργίες τους μεταβαίνουν κυρίως στο επίπεδο εφαρμογής. Η δομή και ο ρόλος των επιπέδων εφαρμογής, μεταφοράς και δικτύου της στοίβας ομοιάζουν με του OSI. Συνήθως το φυσικό επίπεδο εμφανίζεται ομαδοποιημένο με το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων, υποδεικνύοντας την υποστήριξη και κοινή αντιμετώπιση οποιασδήποτε IP συσκευής.



Εικόνα 1-2: Αντιπαραβολή επιπέδων στοίβας TCP/IP και μοντέλου OSI [2].

1.2 Διευθυνσιοδότηση

Για την εγκατάσταση επικοινωνίας μεταξύ συσκευών, είναι απαραίτητο καθεμιά να διακρίνεται από μία μοναδική (εντός της οικείας τοπολογίας) ταυτότητα. Τέτοιο αναγνωριστικό επιπέδου συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων είναι η διεύθυνση MAC. Πρόκειται για έναν αριθμό των 48 bits, που περιγράφει μοναδικά την κάρτα δικτύου μιας συσκευής. Συνήθως κάθε οκτάδα από bits συμβολίζεται με τον αντίστοιχο δεκαεξαδικό αριθμό, ενώ οι οκτάδες διαχωρίζονται από άνω και κάτω τελεία. Η διεύθυνση MAC εξυπηρετεί την ανταλλαγή μηνυμάτων εντός του Τοπικού Δικτύου (Local Area Network – LAN).

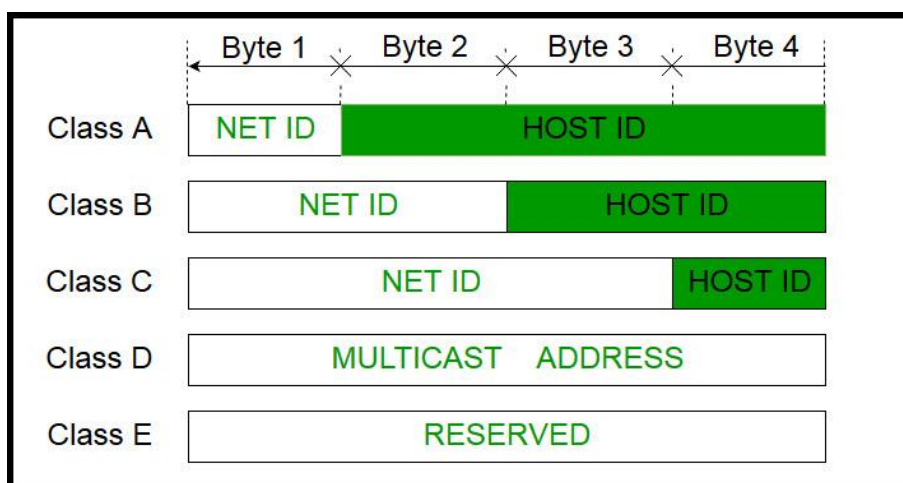
Προκειμένου κάθε συσκευή ενός δικτύου (και του διαδικτύου) να επικοινωνεί με οποιαδήποτε άλλη (και εκτός LAN), απαιτείται ταυτότητα τρίτου επιπέδου. Γνωρίζοντας τη συγκεκριμένη ταυτότητα της συσκευής ενδιαφέροντος, ο αποστολέας ξέρει που να στείλει το πακέτο δεδομένων. Στα σύγχρονα δίκτυα το ρόλο αυτό παίζουν οι διευθύνσεις IP. Διακρίνονται σε Internet Protocol version 4 (IPv4) και Internet Protocol version 6 (IPv6) [3]. Η IP κάθε διεπαφής διασύνδεσης συσκευής με το δίκτυο πρέπει να είναι μοναδική εντός αυτού, ώστε να μην προκύπτει σύγχυση.

Η IPv4 είναι ένας δυαδικός αριθμός των 32 bits. Συνήθως οι IPv4 εκφράζονται στο δεκαδικό σύστημα αρίθμησης, μέσω του Δεκαδικού Συμβολισμού με Τελείες (Dotted Decimal Notation – DDN). Για την αντιστοίχιση ο αριθμός των 32 bits διασπάται σε τέσσερις οκτάδες. Η διεύθυνση περιγράφεται από τις τιμές των οκτάδων, εκφρασμένες στο δεκαδικό σύστημα και διαχωρισμένες από το σύμβολο της τελείας. Ο DDN παρέχει μία πιο εύληπτη για τον άνθρωπο απεικόνιση του δυαδικού αριθμού.

Μία IPv4 διακρίνεται σε δύο μέρη, την ταυτότητα δικτύου (network ID) και την ταυτότητα κόμβου (host ID). Το μέρος network ID διακρίνει δίκτυα και είναι κοινό για τις

διευθύνσεις όλων των συσκευών ενός δικτύου. Το host ID χρησιμοποιείται ως αναφορά σε συγκεκριμένη διεπαφή συσκευής, οπότε είναι μοναδικό για την τοπολογία. Επομένως και η συνολική διεύθυνση ενός κόμβου είναι μοναδική στα όρια της τοπολογίας.

Οι IPv4 διακρίνονται σε τρεις κύριες κλάσεις (classes) [4], ανάλογα με τον αριθμό των bits του network ID. Η κατανομή των bits στο network και στο host ID είναι δεδομένη για κάθε κλάση, εφόσον το συνολικό μήκος της IPv4 είναι σταθερό (32 bits). Η κλάση μιας διεύθυνσης αναγνωρίζεται από την τιμή του πρώτου byte (οκτάδας), σύμφωνα με τον Πίνακα 1-2. Ορίζονται και δύο επιπλέον κλάσεις, η τέταρτη και η πέμπτη. Πρόκειται για διευθύνσεις εντός συγκεκριμένου εύρους, που έχουν δεσμευτεί για ειδικούς σκοπούς και δεν επιτρέπεται η ανάθεσή τους σε δικτυακές διεπαφές. Η δομή των διευθύνσεων κάθε κλάσης αποτυπώνονται σχηματικά στην Εικόνα 1-3.



Εικόνα 1-3: Κλάσεις IPv4 διευθύνσεων [4].

Συχνά είναι χρήσιμος ο διαχωρισμός ενός μεγάλου δικτύου σε επιμέρους μικρότερα, τα υποδίκτυα (subnets). Με τον τρόπο αυτό η δικτυακή κίνηση περιορίζεται τοπικά. Το δίκτυο καθίσταται ευκολότερα διαχειρίσιμο και επιτυγχάνει καλύτερες επιδόσεις. Ο διαχωρισμός γίνεται δεσμεύοντας κάποια από τα αριστερότερα (most significant) bits του πεδίου host ID, από τα οποία προκύπτει η ταυτότητα υποδικτύου (subnet ID). Ο αριθμός τους πρέπει να επαρκεί για την ανάθεση μοναδικού subnet ID σε κάθε υποδίκτυο. Επιπλέον τα host ID bits πρέπει να είναι αρκετά για τη διεύθυνση οδότηση κάθε διεπαφής του μεγαλύτερου υποδικτύου. Το network ID της αρχικής διεύθυνσης παραμένει αναλλοίωτο και κοινό για κάθε υποδίκτυο.

Το σύνορο μεταξύ των περιοχών subnet ID και host ID μιας διεύθυνσης προσδιορίζεται από τη μάσκα υποδικτύου (subnet mask). Πρόκειται για μία ειδικού σκοπού IP διεύθυνση, η οποία συνοδεύει κάθε διεύθυνση του δικτύου. Τα bits της μάσκας που αντιστοιχούν στα πεδία

network ID και subnet ID λαμβάνουν την τιμή 1, ενώ στον host ID την τιμή 0. Συνεπώς η εφαρμογή του λογικού τελεστή AND μεταξύ της διεύθυνσης και της μάσκας υποδικτύου δίνει τη διεύθυνση περιγραφής του υποδικτύου. Η διάκριση μεταξύ network ID και subnet ID μπορεί να γίνει από την τιμή του πρώτου byte της διεύθυνσης. Η μάσκα υποδικτύου έπεται του DDN συμβολισμού μιας διεύθυνσης, ως μία κάθετος ακολουθούμενη από τον αριθμό των most significant bits της μάσκας με τιμή 1 (prefix).

Ο Πίνακας 1-2 περιλαμβάνει συνοπτικά τις βασικές πληροφορίες που σχετίζονται με τις κύριες κλάσεις των IPv4. Ως προς την απεικόνιση της μορφής, το «N» αναφέρεται στο network ID και το «H» στο host ID. Το «x» υποδεικνύει αδιάφορο bit.

Πίνακας 1-2: Πληροφορίες κύριων κλάσεων IPv4.

Κλάση	Μορφή	1 ^ο byte (δυαδικό)	1 ^ο byte (δεκαδικό)	Μάσκα υποδικτύου
A	N.H.H.H	0xxxxxxx	0 – 127	255.0.0.0 (/8)
B	N.N.H.H	10xxxxxx	128 – 191	255.255.0.0 (/16)
C	N.N.N.H	110xxxxx	192 – 233	255.255.255.0 (/24)

Πολλές φορές ο αριθμός των κόμβων διαφέρει σημαντικά μεταξύ των υποδικτύων. Τα host bits πρέπει να είναι αρκετά για τη διευθυνσιοδότηση της μεγαλύτερης περιοχής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη «σπατάλη» host bits στα υποδίκτυα λίγων κόμβων. Τη λύση στο πρόβλημα δίνει η τεχνική Υποδικτύωσης Μάσκας Μεταβλητού Μεγέθους (Variable Length Subnet Masking – VLSM). Επιτρέπει τη χρήση διαφορετικής μάσκας σε κάθε υποδίκτυο, οπότε γίνεται καλύτερη διαχείριση των host bits.

Κάποιες IP διευθύνσεις δεσμεύονται για συγκεκριμένους σκοπούς. Σημαντικότερα τέτοια παραδείγματα είναι η πρώτη και η τελευταία διαθέσιμη διεύθυνση κάθε δικτύου ή υποδικτύου. Η πρώτη (όλα τα host bits λαμβάνουν την τιμή 0) χρησιμοποιείται ως αναφορά στο συνολικό δίκτυο ή υποδίκτυο και η τελευταία (όλα τα host bits λαμβάνουν την τιμή 1) υποδεικνύει αποστολή σε κάθε κόμβο του οικείου δικτύου ή υποδικτύου (broadcast address). Επομένως μπορούν να εξυπηρετηθούν το πολύ $2^{\text{host bits}} - 2$ συσκευές εντός του δικτύου ή υποδικτύου.

Η απόδοση των IP διευθύνσεων μπορεί να είναι στατική ή δυναμική. Η στατική ανάθεση εκτελείται από το διαχειριστή του δικτύου. Αρχικά σχεδιάζει ένα πλάνο διευθυνσιοδότησης, ξεκινώντας από το σχεδιάγραμμα του δικτύου. Ύστερα αναθέτει χειροκίνητα διευθύνσεις σε κάθε ενεργή διεπαφή της τοπολογίας, βάσει του πλάνου. Είναι

προφανές ότι η μέθοδος αυτή είναι πρακτικά μη εφαρμόσιμη σε μεγάλες τοπολογίες, π.χ. εκατοντάδων δρομολογητών. Κατά τη δυναμική διευθυνσιοδότηση, η απόδοση των διευθύνσεων στις διεπαφές γίνεται αυτόματα από το Πρωτόκολλο Δυναμικής Διαμόρφωσης Κόμβων (Dynamic Host Configuration Protocol – DHCP). Οι μόνες ενέργειες εκ μέρους του διαχειριστή αποσκοπούν στην ενεργοποίηση του πρωτοκόλλου και εκτελούνται κατά την αρχική παραμετροποίηση των συσκευών.

Οι IPv4 διακρίνονται σε δημόσιες (public) και ιδιωτικές (private). Οι δημόσιες χρησιμοποιούνται ως μοναδικά αναγνωριστικά στο διαδίκτυο. Οι ιδιωτικές αποδίδονται στους κόμβους δικτύου που διαχειρίζεται ένας οργανισμός. Κάθε κλάση παρέχει τόσο ιδιωτικές όσο και δημόσιες διευθύνσεις (Πίνακας 1-3).

Πίνακας 1-3: Εύρος δημόσιων και ιδιωτικών διευθύνσεων ανά κλάση.

Κλάση	Εύρος δημόσιων διευθύνσεων	Εύρος ιδιωτικών διευθύνσεων
A	1.0.0.0 – 127.0.0.0	10.0.0.0 – 10.255.255.255
B	128.0.0.0 – 191.255.0.0	172.16.0.0 – 172.31.255.255
C	192.0.0.0 – 223.255.255.0	192.168.0.0 – 192.168.255.255

Σημαντικό πρόβλημα των IPv4 είναι η εξάντληση των δημόσιων διευθύνσεων, με την αύξηση του αριθμού των συσκευών του διαδικτύου. Οι νέες τάσεις, όπως το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things – IoT) καθιστούν το πρόβλημα εντονότερο. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν εφαρμοστεί διάφορες τεχνικές εξοικονόμησης IPv4, με σημαντικότερη το Network Address Translation / Port Address Translation (NAT/PAT). Η βασική του λογική έγκειται στην απόδοση μοναδικής δημόσιας IPv4 ανά συνδρομητή. Οι ενδεχομένως πολυάριθμες συσκευές του λαμβάνουν μοναδική ιδιωτική IPv4, ενώ από τη σκοπιά του διαδικτύου εκπροσωπούνται από τη μοναδική δημόσια. Μία μονιμότερη λύση είναι η μετάβαση στις IPv6. Έχουν μήκος 128 bits, οπότε αποδίδουν πολύ περισσότερες διευθύνσεις.

1.3 Δρομολόγηση

Δρομολόγηση είναι η διαδικασία του καθορισμού και της βέλτιστης επιλογής των μονοπατιών (αλληλουχίας συσκευών και ζεύξεων) που ακολουθούν τα πακέτα δεδομένων κατά την αποστολή τους από έναν κόμβο σε έναν άλλο. Οι κόμβοι βρίσκονται σε κοινό ή σε διασυνδεδεμένα δίκτυα υπολογιστών. Στη δρομολόγηση περιλαμβάνεται και η συνολική διαχείριση της δικτυακής κίνησης [5]. Εκτελείται από ειδικές δικτυακές συσκευές, τους δρομολογητές (routers), που «ανήκουν» στο επιπέδου δικτύου (τρίτο) του OSI. Σπανιότερα

εκτελείται και από ειδική κατηγορία switches (Layer 3 switch). Κάθε δρομολογητής επιφορτίζεται με δύο καίριες διαδικασίες του δικτύου. Τη δρομολόγηση, δηλαδή την κατασκευή και διατήρηση ενημερωμένου του πίνακα δρομολόγησης, καθώς και την προώθηση πακέτων δεδομένων βάσει του εν λόγω πίνακα.

Ο πίνακας δρομολόγησης κατασκευάζεται ξεχωριστά από κάθε δρομολογητή ενός δικτύου και διατηρείται στη μνήμη του. Περιλαμβάνει ένα σύνολο καταχωρήσεων σχετικών με τις βέλτιστες διαδρομές προς πιθανούς προορισμούς ενός εισερχόμενου πακέτου. Ο τρόπος διατήρησης της πληροφορίας και τα πεδία κάθε εγγραφής καθορίζονται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Η δρομολόγηση διακρίνεται σε κατηγορίες, ανάλογα με διάφορα κριτήρια.

Ως προς την υποστήριξη υποδικτύων μεταβλητού μεγέθους, χωρίζεται σε Δρομολόγηση Κοινής Κλάσης (Classful Routing) και Δρομολόγηση Άνευ Προκαθορισμένων Κλάσεων (Classless Routing). Παλαιότερα ο πίνακας δρομολόγησης δε διατηρούσε τη μάσκα υποδικτύου ή άλλη πληροφορία σχετική με τα υποδίκτυα. Κατά συνέπεια το μέγεθος όλων των υποδικτύων της τοπολογίας ήταν κοινό. Δεν υποστηρίζονταν τεχνική VLSM [6]. Αυτή είναι η περίπτωση της Classful Routing. Αντίθετα, όταν ο πίνακας δρομολόγησης περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικές με τα υποδίκτυα και υποστηρίζεται η τεχνική VLSM, η δρομολόγηση χαρακτηρίζεται ως Classless.

Ανάλογα με το μηχανισμό κατασκευής των πινάκων δρομολόγησης, η δρομολόγηση διακρίνεται σε στατική και δυναμική [7]. Στη στατική, ο πίνακας κατασκευάζεται από το διαχειριστή του δικτύου. Συνήθως μελετά το σχεδιάγραμμα της τοπολογίας, προεπιλέγει τις διαδρομές από κάθε πιθανό αποστολέα προς κάθε πιθανό παραλήπτη και τις επιβάλλει, δίνοντας σε κάθε δρομολογητή τις κατάλληλες εντολές. Η εφαρμογή της στατικής δρομολόγησης είναι πρακτικά αδύνατη σε μεγάλες δικτυακές τοπολογίες (π.χ. εκατοντάδων δρομολογητών), ενώ για την προσωρινή ανάκαμψη από βλάβη μέσω ορισμού εναλλακτικής διαδρομής απαιτείται η εμπλοκή του ανθρώπινου παράγοντα. Επιπλέον η επέκταση του δικτύου είναι μία ιδιαίτερα χρονοβόρα και κοπιαστική διαδικασία, καθώς απαιτεί την επαναρύθμιση σχεδόν του συνόλου των συσκευών. Βέβαια, η μη μεταβλητότητα των διαδρομών, η ενισχυμένη ασφάλεια και το γεγονός ότι δεν καταναλώνονται πόροι για την αυτόματη εκτέλεση της διαδικασίας αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα σε επιλεγμένες περιπτώσεις.

Μία περισσότερο χρήσιμη υποκατηγορία της στατικής δρομολόγησης είναι η δρομολόγηση προκαθορισμένων διαδρομών (default routes). Αποτελεί μία ρύθμιση του δρομολογητή ώστε να προωθεί κάθε εισερχόμενο πακέτο σε συγκεκριμένη διεπαφή του. Συνήθως η ενεργοποίηση των default routes υπαγορεύεται από τη δομή της τοπολογίας.

Η δυναμική δρομολόγηση συνίσταται στο σχηματισμό των πινάκων δρομολόγησης χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση στις συσκευές και κατόπιν στην αυτόματη ενημέρωσή τους ώστε να ανταποκρίνονται σε τυχόν μεταβολές που παρατηρούνται στο δίκτυο. Η μόνη ενέργεια που απαιτείται από το διαχειριστή του δικτύου, πέραν της ενεργοποίησης των συσκευών και της μέριμνας για την απόδοση IP διευθύνσεων, είναι η αρχική παραμετροποίηση κάθε δρομολογητή.

Κατά τη δυναμική δρομολόγηση, οι διαδρομές ορίζονται από την εκτέλεση του επιλεγμένου αλγορίθμου δρομολόγησης (routing algorithm), ο οποίος εξετάζει όλες τις πιθανές διαδρομές προς έναν κόμβο – προορισμό και επιλέγει τη βέλτιστη. Δηλαδή αυτή στην οποία αποδίδεται το ελάχιστο κόστος, βάσει ενός κριτηρίου δρομολόγησης (π.χ. καθυστέρηση, εύρος ζώνης, αριθμός αλμάτων). Ο αλγόριθμος δρομολόγησης λαμβάνει τις απαραίτητες εισόδους από το πρωτόκολλο δρομολόγησης (routing protocol).

1.4 Πρωτόκολλα δρομολόγησης

Πρωτόκολλο Δρομολόγησης (Routing Protocol) [8] ονομάζεται το σύνολο των κανόνων και αλγορίθμων με τους οποίους ένας δρομολογητής αποκομίζει πληροφορίες σχετικές με διαδρομές εντός της οικείας τοπολογίας. Η διαδικασία περιλαμβάνει την ανταλλαγή πακέτων μεταξύ γειτονικών δρομολογητών και αποσκοπεί στην ανακάλυψη των βέλτιστων διαδρομών με αφετηρία τη συγκεκριμένη συσκευή και προορισμό κάθε υποδίκτυο της τοπολογίας.

Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης αποσκοπεί στο σχηματισμό και τη διατήρηση ενημερωμένου του πίνακα δρομολόγησης κάθε συσκευής. Με άλλα λόγια, παρέχει στον αλγόριθμο δρομολόγησης τις πληροφορίες που απαιτούνται για τη λειτουργία του. Προς επίτευξη τούτου συνεργάζεται στενά με το χρησιμοποιούμενο routed protocol. Αυτό καθορίζει τη δομή των πακέτων του δικτύου και παρέχει ένα σχήμα διευθυνσιοδότησης. Τα πλέον διαδεδομένα τέτοια πρωτόκολλα είναι τα IPv4 και IPv6.

Οι βασικότερες λειτουργίες ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι:

- Εκμαίευση πληροφοριών προσέγγισης υποδικτύων της οικείας τοπολογίας, μέσω της επικοινωνίας με γειτονικούς δρομολογητές και διαφήμιση αντίστοιχων πληροφοριών σε αυτούς.
- Επιλογή βάσει μετρικής, της βέλτιστης διαδρομής προς κάθε προορισμό, ο οποίος προσεγγίζεται από πλέον της μίας διαδρομής.

- Σύγκλιση: Ορισμένες μεταβολές που συντελούνται στη δικτυακή τοπολογία (όπως διακοπή της λειτουργίας κάποιας ζεύξης, επαναλειτουργία της, βλάβη συσκευής, εργασίες κλιμάκωσης) είναι πιθανό να μεταβάλλουν τις βέλτιστες διαδρομές προς κάποιους ή το σύνολο των προορισμών. Ο δρομολογητής δύναται να αντιληφθεί τέτοια συμβάντα, οπότε τροποποιεί ανάλογα τον πίνακα δρομολόγησής του και ενημερώνει τους γειτονικούς του να πράξουν αντίστοιχα. Η διάδοση του μηνύματος συνεχίζεται μέχρις ότου ενημερωθεί το σύνολο των δρομολογητών. Οι διαδρομές πλέον αντικατοπτρίζουν τη νέα κατάσταση, οπότε το δίκτυο έχει συγκλίνει.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης διακρίνονται σε κατηγορίες, βάσει ποικίλων δομικών και λειτουργικών τους χαρακτηριστικών.

Μία τοπολογία διασυνδεμένων δικτύων, όπως το Δημόσιο Διαδίκτυο (Internet), ονομάζεται διαδίκτυο (inter-network) και χωρίζεται σε έναν αριθμό αυτόνομων συστημάτων (Autonomous Systems – ASs). Το AS είναι μία ομάδα συσκευών του διαδικτύου που σχηματίζουν ένα δίκτυο διαχειριζόμενο από συγκεκριμένη οντότητα (π.χ. επιχείρηση, οργανισμός, Internet Service Provider – ISP).

Λαμβάνοντας ως κριτήριο τη σχέση τους με τα ASs, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης ταξινομούνται σε εσωτερικά (Interior Gateway Protocols – IGP) και εξωτερικά (Exterior Gateway Protocols – EGP). Τα IGP έχουν υλοποιηθεί ώστε να εκτελούν τη δρομολόγηση εντός του AS. Είναι διαθέσιμα αρκετά τέτοια πρωτόκολλα, με κυριότερα τα Routing Information Protocol (RIP), Open Shortest Path First (OSPF), Interior Gateway Routing Protocol (IGRP), Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP) και Intermediate System – Intermediate System (IS-IS). Η επιλογή του IGP ανήκει στο διαχειριστή του AS. Τα EGPs είναι σχεδιασμένα ώστε να υλοποιούν τη δρομολόγηση μεταξύ διασυνδεμένων ASs, καθιστώντας εφικτή την επικοινωνία εντός του διαδικτύου. Το EGP στις πολιτικές του οποίου συμμορφώνονται τα ASs υπαγορεύεται από το Internet και στις μέρες μας είναι το Border Gateway Protocol (BGP).

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης διακρίνονται επίσης σε Classful και Classless, ανάλογα με το αν λαμβάνουν υπόψη τη μάσκα υποδικτύου.

Μία ακόμα διάκριση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης βασίζεται στον αντίστοιχο αλγόριθμο δρομολόγησης. Οι βασικότερες τέτοιες κατηγορίες είναι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης με Διανύσματα Απόστασης (Distance Vector) και με Κατάσταση Συνδέσμων (Link State). Τα πρωτόκολλα με διανύσματα απόστασης υπολογίζουν το κόστος με τον αλγόριθμο Bellman – Ford, ενώ τα πρωτόκολλα κατάστασης συνδέσμων με τον Dijkstra. Οι δύο αυτές κατηγορίες αναλύονται στη συνέχεια.

1.4.1 Δρομολόγηση με Διανύσματα Απόστασης

Στην κατηγορία των αλγορίθμων δρομολόγησης με διανύσματα απόστασης ανήκουν οι πρώτοι δυναμικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης που αξιοποιήθηκαν σε πρώιμα δίκτυα μεταφοράς δεδομένων (π.χ. ARPANET και CYCLADES), ήδη από το 1969. Σε αυτούς συγκαταλέγονται επίσης οι πρώτοι προτυποποιημένοι αλγόριθμοι δρομολόγησης του διαδικτύου, πολλοί από τους οποίους χρησιμοποιούνται έως σήμερα. [9]. Το συγκεκριμένο είδος δρομολόγησης βασίζεται στην κατανεμημένη εκδοχή του αλγορίθμου εύρεσης συντομότερης διαδρομής Bellman – Ford [10], απ' όπου απορρέει η εναλλακτική του ονομασία, δρομολόγηση Bellman – Ford.

Η Δρομολόγηση με Διανύσματα Απόστασης (Distance Vector Routing) [11] οφείλει την ονομασία της στη μορφή του βασικού λειτουργικού της πυλώνα, του πίνακα δρομολόγησης. Κάθε δρομολογητής διατηρεί ως τέτοιον ένα μονοδιάστατο πίνακα (διάνυσμα) που φέρει δείκτες προς κάθε άλλο δρομολογητή της τοπολογίας. Κάθε εγγραφή του διανύσματος περιλαμβάνει δύο μέρη, το ελάχιστο κόστος προσέγγισης του αντίστοιχου προορισμού και τη διεπαφή (γραμμή εξόδου) όπου θα κατευθυνθούν τα πακέτα προς τον προορισμό αυτό, για να ακολουθήσουν τη διαδρομή ελαχίστου κόστους. Δηλαδή όταν καταφτάνει ένα πακέτο σε κάποιο δρομολογητή, αυτός συμβουλεύεται το εν λόγω διάνυσμα απόστασης για την περεταίρω προώθησή του.

Ο σχηματισμός και κατόπιν η ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης μιας τοπολογίας επιτυγχάνεται αποκλειστικά μέσω της επικοινωνίας μεταξύ γειτονικών, δηλαδή άμεσα συνδεδεμένων, δρομολογητών. Μόλις τεθεί σε λειτουργία ένας δρομολογητής, προβαίνει στην ανακάλυψη των ενεργών γειτονικών του και στον υπολογισμό της απόστασης προσέγγισης καθενός από αυτούς. Σχηματίζεται έτσι το αρχικό διάνυσμα απόστασης που διατηρεί στη μνήμη του. Ακολουθεί η ανταλλαγή διανυσμάτων απόστασης με κάθε γείτονα. Κάθε συσκευή προσθέτει στο διάνυσμά της διαδρομές προς προορισμούς που δεν είχε εντοπίσει στο προηγούμενο στάδιο ή αναθεωρεί υπάρχουσες καταχωρήσεις, εφόσον εντοπιστούν συντομότερες διαδρομές προς τους αντίστοιχους κόμβους. Η πληροφορία του παλαιότερου διανύσματος απόστασης θεωρείται πλέον παρωχημένη και διαγράφεται. Με αυτόν τον τρόπο ένας δρομολογητής εμπλουτίζει ή τροποποιεί το διάνυσμα απόστασής του, το αποστέλλει σε κάθε γειτονικό του, προκειμένου να διαδώσει την αλλαγή στο δίκτυο. Η διαδικασία τερματίζεται όταν καμία συσκευή δεν προβεί σε τροποποιήσεις, καθώς το γεγονός υποδεικνύει την επίτευξη της σύγκλισης του δικτύου.

Η ανταλλαγή των πινάκων δρομολόγησης μεταξύ γειτονικών συσκευών, εκτός του ότι έπεται της εκκίνησης της λειτουργίας του δικτύου, λαμβάνει χώρα περιοδικά αλλά και σε κάθε

μεταβολή της τοπολογίας. Συγκεκριμένα η περιοδική ανταλλαγή αποσκοπεί στην επιβεβαίωση από ένα δρομολογητή ότι το σύνολο των γειτόνων του λειτουργεί απρόσκοπτα, επομένως μπορεί να προωθηθεί δικτυακή κίνηση προς αυτούς. Εάν διαπιστωθεί αδυναμία προσπέλασης ή ενεργοποίηση κάποιας ζεύξης, οι άμεσα συνδεδεμένοι κόμβοι ενημερώνουν τα διανύσματα απόστασής τους και εκκινούν τη διαδικασία της ανταλλαγής.

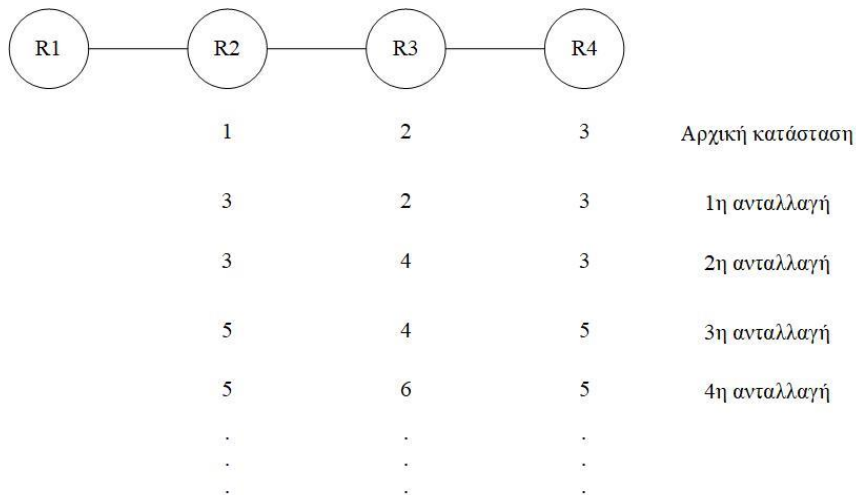
Για τον υπολογισμό του κόστους μιας διαδρομής είναι απαραίτητο κάθε δρομολογητής να γνωρίζει το κόστος προσπέλασης κάθε γειτονικού του. Οι συνηθέστερες μετρικές έκφρασης του κόστους στη δρομολόγηση διανύσματος απόστασης, είναι ο αριθμός των αλμάτων (hops) και η καθυστέρηση (delay). Η μετάβαση του πακέτου από ένα δρομολογητή σε ένα γειτονικό του, λογίζεται ως ένα άλμα. Η καθυστέρηση προς κάθε γείτονα υπολογίζεται μετρώντας το χρόνο αποστολής σε αυτόν και εκ νέου λήψης ειδικού πακέτου, που καλείται πακέτο ηχούς (echo packet).

Η συνολική απόσταση μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου είναι το άθροισμα των επιμέρους αποστάσεων που αντιστοιχούν σε κάθε ζεύξη της μεταξύ τους διαδρομής. Οι αλγόριθμοι διανυσμάτων απόστασης υπολογίζουν το κόστος κάθε εναλλακτικής διαδρομής προς έναν κόμβο προορισμού. Τελικά διατηρούν και χρησιμοποιούν αποκλειστικά τη διαδρομή ελαχίστου κόστους. Η διαχείριση της περίπτωσης εντοπισμού περισσότερων της μίας διαδρομής στις οποίες έχει αποδοθεί το ελάχιστο κόστος, εναπόκειται στην πολιτική κάθε πρωτοκόλλου. Συνήθης πρακτική είναι η διάσπαση της δικτυακής κίνησης μεταξύ των διαδρομών αυτών.

Ο υπολογισμός του κόστους μιας διαδρομής λαμβάνει χώρα ως εξής: Έστω ότι ένας δρομολογητής προσεγγίζει έναν γειτονικό του με κόστος X . Εάν στον πίνακα δρομολόγησης που λαμβάνει από τον εν λόγω γείτονα, αναφέρεται απόσταση Y μονάδων από κάποιον προορισμό, ο δρομολογητής θέτει στο διάνυσμα απόστασης που διατηρεί κόστος $(X + Y)$ μονάδων προς τον προορισμό αυτό.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα των αλγορίθμων διανυσμάτων απόστασης είναι η αδυναμία ανίχνευσης βρόχων στις επιλεγόμενες διαδρομές. Μία διαδρομή λέγεται ότι περιλαμβάνει βρόχο εάν διέρχεται από έναν τουλάχιστον κόμβο για περισσότερες από μία φορές. Η ρίζα του προβλήματος βρίσκεται στην αδυναμία ενός δρομολογητή να ανιχνεύσει εάν μία διαδρομή, καταχωρημένη σε κάποιο διάνυσμα απόστασης που λαμβάνει, έχει διέλθει πρωτύτερα από τον εαυτό του. Έτσι στην περίπτωση διακοπής κάποιας ζεύξης του δικτύου, συχνά εμφανίζεται το φαινόμενο της μέτρησης ως το άπειρο. Οπότε καθίσταται αργή η σύγκλιση.

Για την κατανόηση του φαινομένου παρατίθεται ένα παράδειγμα. Έστω τέσσερις δρομολογητές, συνδεδεμένοι όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-4. Ως μετρική απόστασης επιλέγεται ο αριθμός των αλμάτων.



Εικόνα 1-4: Παράδειγμα προβλήματος μέτρησης έως το άπειρο.

Αρχικά είναι σε λειτουργία το σύνολο των δρομολογητών, οπότε το πρώτο διάνυσμα περιλαμβάνει την απόσταση κάθε δρομολογητή από τον R1. Λίγο αργότερα τίθεται εκτός λειτουργίας ο R1. Τότε ο R2 εντοπίζει το συμβάν, καθώς ο γειτονικός του δρομολογητής δεν ανταποκρίνεται. Στην επόμενη ανταλλαγή διανυσμάτων, πληροφορείται από τον R3 ότι υπάρχει διαδρομή προς τον R1 με κόστος δύο αλμάτων. Καθώς ο R2 αγνοεί ότι η συγκεκριμένη διαδρομή διέρχεται από τον εαυτό του, την προσθέτει στο διάνυσμά του. Στη επόμενη ανταλλαγή ο R3 παρατηρεί ότι κάθε γειτονικός του έχει διαδρομή προς τον R1, με απόσταση 3. Οπότε «πιστεύει» ότι ο ίδιος απέχει 4 άλματα από το συγκεκριμένο προορισμό και ενημερώνει κατάλληλα το διάνυσμα απόστασής του. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η απόσταση κάθε δρομολογητή προς τον R1 να φτάσει στη μέγιστη τιμή (τιμή απείρου για το συγκεκριμένο δίκτυο). Ως τιμή απείρου συνήθως επιλέγεται το μέγιστο πλήθος αλμάτων που εμφανίζεται σε κάποια διαδρομή εντός του δικτύου, αυξημένο κατά μία μονάδα. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι η αύξηση του πλήθους των δρομολογητών ή η άστοχη επιλογή τιμής απείρου έχει ως αποτέλεσμα τη δραματική αύξηση του χρόνου σύγκλισης.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου έχουν προταθεί και εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές, μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα, από τη σκοπιά του πρωτοκόλλου διανυσμάτων απόστασης RIP. Ωστόσο η εφαρμογή τους δεν είναι πανάκεια και

για να είναι αποτελεσματική, η τοπολογία πρέπει να είναι σχετικά μικρή και καλά σχεδιασμένη.

1.4.2 Δρομολόγηση με Κατάσταση Συνδέσμων

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι αλγόριθμοι δρομολόγησης με κατάσταση συνδέσμων [11] αναπτύχθηκαν και προοδευτικά αντικατέστησαν τους αλγόριθμους διανύσματος απόστασης. Η υιοθέτηση των αλγορίθμων αυτών μείωσε σημαντικά το χρόνο σύγκλισης των δικτύων και βελτίωσε την επεκτασιμότητά τους.

Βασική αρχή της δρομολόγησης με κατάσταση συνδέσμων αποτελεί η διατήρηση λεπτομερούς χάρτη της πλήρους δικτυακής τοπολογίας από κάθε δρομολογητή αυτής. Δηλαδή κάθε στιγμή, στη μνήμη κάθε δρομολογητή της τοπολογίας διατηρείται πανομοιότυπο αντίγραφο του χάρτη. Από αυτό κάθε κόμβος αντλεί πληροφορίες ώστε να κατασκευάσει τοπικά τον πίνακα δρομολόγησης του. Ο αλγόριθμος εκτελείται σε κάθε δρομολογητή ξεχωριστά και σε αντίθεση με τα πρωτόκολλα διανυσμάτων απόστασης, οι γειτονικοί κόμβοι ανταλλάσσουν πληροφορίες συνδεσιμότητας και όχι αυτούσιους τους πίνακες δρομολόγησης.

Η πρώτη ενέργεια που εκτελεί ένας δρομολογητής μετά την ενεργοποίησή του είναι η ανακάλυψη των γειτονικών του. Αυτή επιτυγχάνεται με την αποστολή ενός ειδικού πακέτου χαιρετισμού (hello) προς κάθε ενεργή διεπαφή του. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, οι συσκευές που βρίσκονται στο άλλο άκρο της κάθε ζεύξης απαντούν με αντίστοιχο μήνυμα. Γνωστοποιούν ταυτόχρονα τη μοναδική για το δίκτυο, ταυτότητά τους (διεύθυνση IP). Εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις του εφαρμοζόμενου πρωτοκόλλου, οι δύο συσκευές προχωρούν στη σύναψη της γειτονικής τους σχέσης.

Στη συνέχεια, ο δρομολογητής υπολογίζει το κόστος προσέγγισης κάθε γειτονικού. Η μετρική υπολογισμού του κόστους ζεύξης, καθορίζεται βάσει κάποιου κριτηρίου δρομολόγησης. Συνήθως αποσκοπεί στην επιλογή της διαδρομής μεγίστου εύρους ζώνης, ελάχιστης καθυστέρησης ή στο συνδυασμό των δύο κριτηρίων. Η ανάθεση του κόστους προσέγγισης ενός κόμβου μπορεί να λάβει χώρα είτε αυτόματα, είτε χειροκίνητα από το διαχειριστή του δικτύου.

Κατόπιν ο δρομολογητής οργανώνει τις πληροφορίες που κατέχει αναφορικά με τους γειτονικούς του σε ειδικού τύπου πακέτα, τα πακέτα κατάστασης συνδέσμων (link state packets). Ένα τέτοιο πακέτο φέρει απαραίτητως τη διεύθυνση του κόμβου που το σχημάτισε, το σύνολο των γειτόνων του και το κόστος προσέγγισης καθενός. Οι χρονικές στιγμές

δημιουργίας των πακέτων αυτών είναι ένα αρκετά σύνθετο ζήτημα που διαχειρίζεται κάθε πρωτόκολλο.

Η πληροφορία κάθε πακέτου κατάστασης συνδέσμων πρέπει να διαδοθεί σε όλους τους δρομολογητές του δικτύου, ώστε τα αντίγραφα του χάρτη της τοπολογίας καθενός να είναι πανομοιότυπα και έγκυρα. Εάν δεν είναι, μπορούν να εμφανιστούν ποικίλα προβλήματα όπως η δρομολόγηση μέσω ανενεργής ζεύξης και ο σχηματισμός βρόχων. Για την εξασφάλιση της γρήγορης και αξιόπιστης λήψης των πακέτων από κάθε κόμβο, αυτά διαδίδονται με τη μέθοδο της πλημμύρας (flooding) (Εικόνα 2-3, τα πακέτα κατάστασης συνδέσμων του OSPF ονομάζονται LSAs). Κατά τη δρομολόγηση πλημμύρας, ο δρομολογητής προωθεί το πακέτο σε όλους τους γειτονικούς του. Αυτός με τη σειρά του, το αποστέλλει σε κάθε δικό του γείτονα και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το πακέτο φτάσει στο σύνολο των κόμβων του δικτύου.

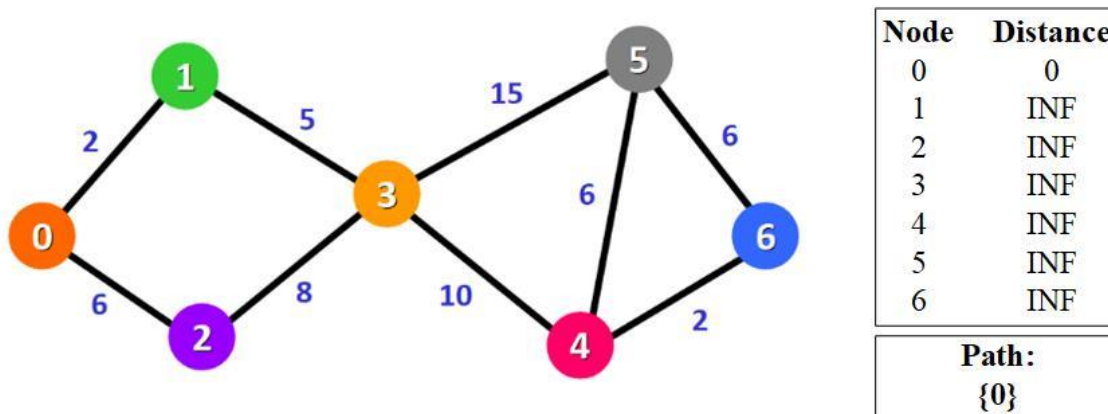
Ο έλεγχος της πλημμύρας ώστε να αποτραπεί η επ' άπειρο διάδοση, επιτυγχάνεται με τη βοήθεια δύο πεδίων της κεφαλίδας των πακέτων κατάστασης συνδέσμου. Πρόκειται για τον αριθμό ακολουθίας και την ηλικία. Έτσι κάθε δρομολογητής αναθέτει έναν αριθμό ακολουθίας σε κάθε πακέτο κατάστασης συνδέσμου που δημιουργεί, που είναι επί της ουσίας ένας αύξων αριθμός. Επίσης διατηρεί μία λίστα με το σύνολο των λοιπών δρομολογητών της τοπολογίας σε αντιστοιχία με τον αριθμό ακολουθίας του τελευταίου πακέτου που έλαβε από τον καθένα. Όταν φτάνει ένα πακέτο κατάστασης συνδέσμου σε ένα δρομολογητή, αυτός συγκρίνει τον αριθμό ακολουθίας του με αυτόν που αναγράφεται στη λίστα και αφορά το συγκεκριμένο αποστολέα. Εάν ο αριθμός ακολουθίας είναι μεγαλύτερος από τον αναγραφόμενο, το πακέτο διατηρείται και πλημμυρίζεται. Σε διαφορετική περίπτωση, απορρίπτεται ως απαρχαιωμένο και η προώθησή του ανακόπτεται. Κάθε πακέτο κατάστασης συνδέσμου αναγράφει και την ηλικία του. Πρόκειται για μία αριθμητική τιμή που μειώνεται, μέχρι μηδενισμού της, με την πάροδο του χρόνου (συνήθως κατά μία μονάδα ανά δευτερόλεπτο) ή κατά τη μετάβαση από ένα δρομολογητή σε άλλο. Πακέτα με μηδενική τιμή θεωρούνται ληγμένα και δεν επιβιώνουν (μέσω της πλημμύρας) για απεριόριστο χρονικό διάστημα. Ακόμα, το πεδίο της ηλικίας επιτρέπει τον εντοπισμό και την αποτελεσματικότερη διαχείριση σφαλμάτων, που διαφορετικά θα μπορούσαν να προκαλέσουν χάος στο δίκτυο. Τέτοια είναι η κατάρρευση και ανάκαμψη ενός δρομολογητή, οπότε παρατηρείται εκκίνηση των αριθμών ακολουθίας από το μηδέν. Άλλο σφάλμα που μπορεί να παρουσιαστεί είναι η αλλοίωση κάποιων bits του αριθμού ακολουθίας, ώστε να παραπέμπουν σε ψευδώς απαρχαιωμένο πακέτο.

Όταν ένας δρομολογητής λάβει τα πακέτα κατάστασης συνδέσμου των λοιπών δρομολογητών του δικτύου, αποκτά πλήρη γνώση της τοπολογίας του. Συγκεκριμένα,

εμφανίζεται πληροφορία για κάθε ζεύξη δύο φορές, μία ανά κατεύθυνση. Το κόστος των δύο κατευθύνσεων είναι δυνατόν να διαφέρει. Η πληροφορία αυτή αξιοποιείται για τον υπολογισμό της διαδρομής ελαχίστου κόστους προς κάθε πιθανό προορισμό (κόμβο) εντός του δικτύου. Ο υπολογισμός αυτός λαμβάνει χώρα με την τοπική εκτέλεση στο δρομολογητή του αλγορίθμου υπολογισμού ελαχίστου κόστους προς κάθε διαδρομή (Dijkstra). Οι μοναδικές ή οι συντομότερες διαδρομές προς κάθε κόμβο καταγράφονται στον πίνακα δρομολόγησης.

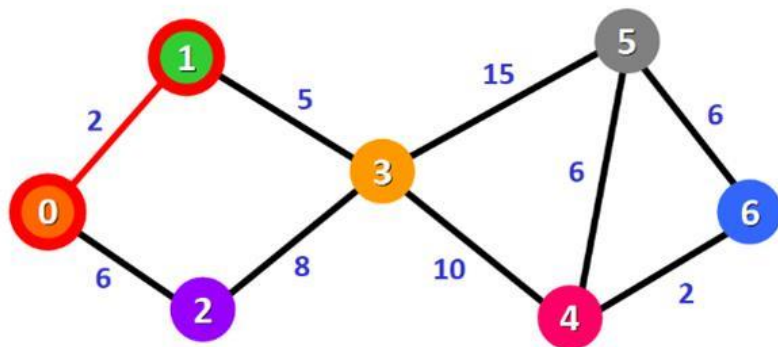
Ο αλγόριθμος Dijkstra ξεκινά, λαμβάνοντας έναν κόμβο ως αφετηρία (δρομολογητής όπου εκτελείται) και υπολογίζει την απόσταση προς κάθε άλλο κόμβο του γραφήματος (δικτύου). Κάθε στιγμή διατηρεί τη συντομότερη διαδρομή που έχει εντοπιστεί προς κάθε προορισμό και εφόσον βρεθεί συντομότερη, ενημερώνεται. Ο αλγόριθμος προσθέτει έναν κόμβο στο μονοπάτι συντομότερης διαδρομής, αφού τον προσεγγίσει εξακριβωμένα με ελάχιστο κόστος. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να προστεθούν όλοι οι κόμβοι.

Έστω το γράφημα της Εικόνα 1-5 [12]. Οι αριθμημένοι κόμβοι μπορούν να θεωρηθούν ως δρομολογητές και οι μεταξύ τους ακμές, ως ζεύξεις. Οι αριθμοί που αποδίδονται σε καθεμιά προσδιορίζουν το κόστος. Ως αφετηρία λαμβάνεται ο κόμβος 0. Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας, η απόσταση προς κάθε κόμβο τίθεται άπειρη (είναι άγνωστη) και δεν υπάρχει κόμβος, πέρα από τον αρχικό, στο μονοπάτι.



Εικόνα 1-5: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, αρχική εκτέλεση.

Ο αλγόριθμος ελέγχει τις αποστάσεις προς τους γειτονικούς κόμβους. Ο (1) προσεγγίζεται με κόστος 2 και ο (2) με κόστος 6. Ενημερώνεται ο πίνακας με τις δύο αυτές αποστάσεις και προστίθεται ο κόμβος ελαχίστου κόστους προσέγγισης (1) στο μονοπάτι (Εικόνα 1-6).

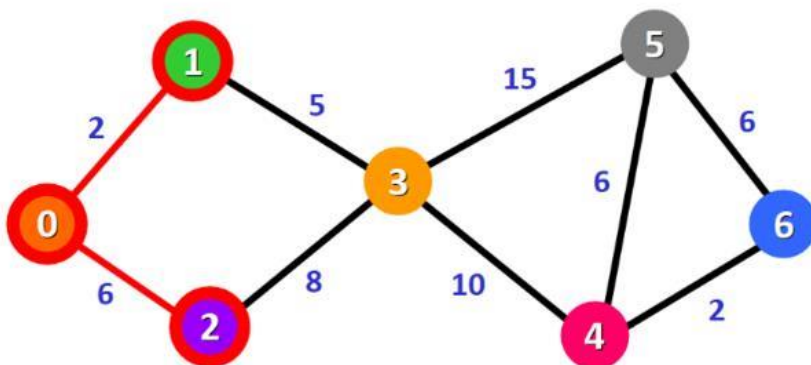


Node	Distance
0	0
1	2
2	6
3	INF
4	INF
5	INF
6	INF

Path:
{0,1}

Εικόνα 1-6: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβου (1).

Στη συνέχεια ελέγχονται οι γειτονικοί κόμβοι των (0) και (1), που είναι στο μονοπάτι. Πρόκειται για τον κόμβο (2), με κόστος 6 και για τον (3), με κόστος $2 + 5 = 7$. Ο πίνακας ενημερώνεται με τις αποστάσεις και προστίθεται στο μονοπάτι ο κοντινότερος κόμβος (2) (Εικόνα 1-7).

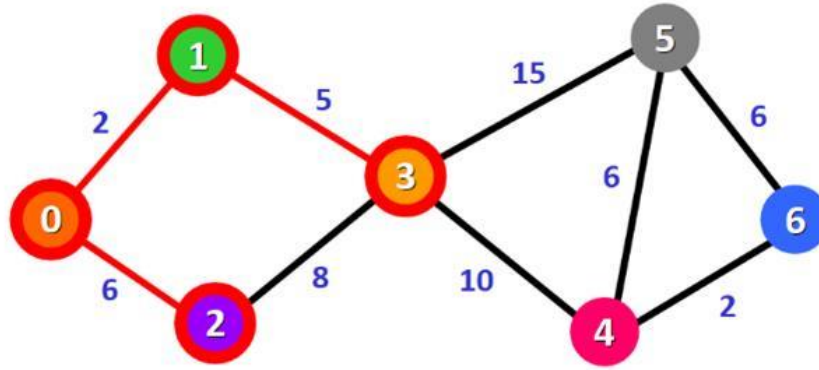


Node	Distance
0	0
1	2
2	6
3	7
4	INF
5	INF
6	INF

Path:
{0,1,2}

Εικόνα 1-7: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβου (2).

Τώρα, ο (3) προσεγγίζεται μέσω δύο εναλλακτικών διαδρομών, μέσω του 1 με κόστος $2 + 5 = 7$ και μέσω του (2) με κόστος $6 + 8 = 14$. Επιλέγεται η συντομότερη διαδρομή και προστίθεται στο μονοπάτι ο κόμβος (3) (Εικόνα 1-8).

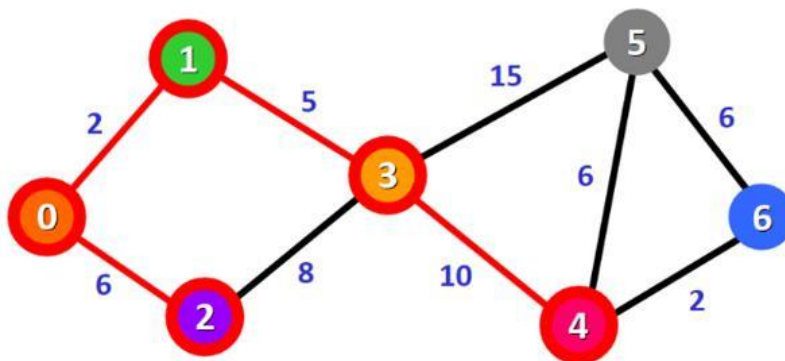


Node	Distance
0	0
1	2
2	6
3	7
4	INF
5	INF
6	INF

Path:
{0,1,2,3}

Εικόνα 1-8: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβου (3).

Οι γειτονικοί κόμβοι του (3), είναι ο (4), με κόστος 17 και ο (5), με κόστος 22. Οπότε προστίθεται ο (4) και ενημερώνεται ο πίνακας (Εικόνα 1-9).



Node	Distance
0	0
1	2
2	6
3	7
4	17
5	22
6	INF

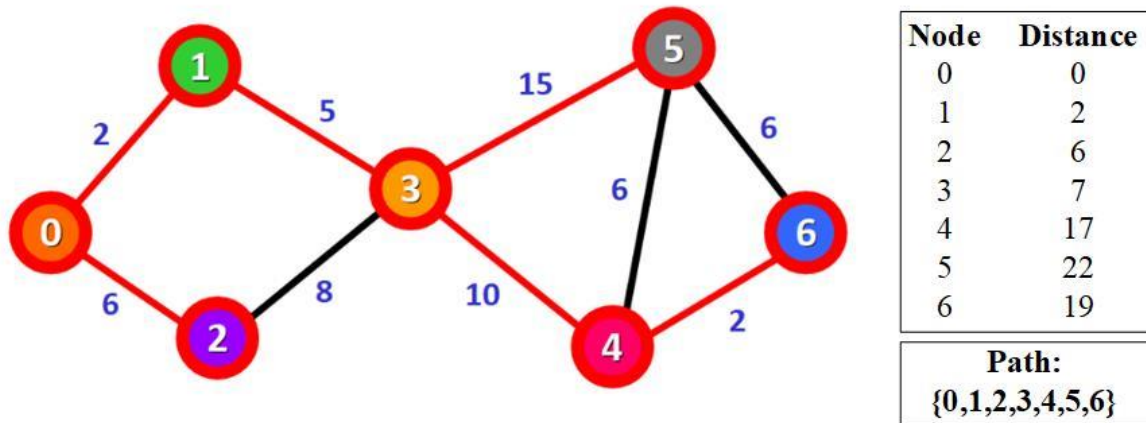
Path:
{0,1,2,3,4}

Εικόνα 1-9: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβου (4).

Στο σημείο αυτό υπάρχουν τρεις επιλογές:

- 0 – 1 – 3 – 5, με κόστος 22
- 0 – 1 – 3 – 4 – 5, με κόστος 23
- 0 – 1 – 3 – 4 – 6 – 5, με κόστος 25

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και προστίθεται ο κόμβος (5), που προσεγγίζεται με το μικρότερο κόστος. Ακόμα, προστίθεται και ο τελευταίος κόμβος (6), μέσω της διαδρομής: 0 – 1 – 3 – 4 – 6, με κόστος 19 (Εικόνα 1-10).



Εικόνα 1-10: Παράδειγμα αλγορίθμου Dijkstra, προσθήκη κόμβων (5) και (6).

Η ανταλλαγή πακέτων χαιρετισμού μεταξύ γειτονικών δρομολογητών συνεχίζεται περιοδικά και αφού συναφθεί η γειτονική σχέση. Έτσι εντοπίζονται τυχόν απενεργοποιήσεις ή ενεργοποιήσεις ζεύξεων της τοπολογίας. Εφόσον παρατηρηθεί κάποια τέτοια μεταβολή, ο δρομολογητής που την αντιλαμβάνεται μεταβάλει κατάλληλα το χάρτη της τοπολογίας του και πλημμυρίζει την αλλαγή. Το αντίστοιχο πακέτο λαμβάνεται από κάθε δρομολογητή της τοπολογίας, οπότε ενημερώνει το χάρτη και υπολογίζει εκ νέου τις συντομότερες διαδρομές. Όταν η διαδικασία εκτελεστεί από κάθε δρομολογητή, έχει επιτευχθεί η σύγκλιση του δικτύου.

2 Πρωτόκολλα Εσωτερικής Δρομολόγησης

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εστιάζει στα χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας των πρωτοκόλλων εσωτερικής δρομολόγησης RIP, OSPF και EIGRP. Επιπλέον σε αυτό παρατίθεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των υπό εξέταση θεμάτων, δηλαδή της συγκριτικής αποτίμησης των επιδόσεων των τριών πρωτοκόλλων και της επίδρασης του πλήθους των δρομολογητών ανά OSPF area στο χρόνο σύγκλισης του πρωτοκόλλου.

2.1 RIP

Το RIP είναι το πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα πρωτοκόλλου δρομολόγησης με διανύσματα απόστασης. Ακολουθεί σχεδόν αυτούσια τη λογική του υποκεφαλαίου 1.4.1.

2.1.1 Ιστορικά Στοιχεία

Το RIP είναι ένα εκ των αρχαιότερων IGP που εφαρμόστηκαν σε δίκτυα υπολογιστών και στο διαδίκτυο [9], [13]. Βασίστηκε στο παλαιότερο πρωτόκολλο δρομολόγησης Gateway Information Protocol (GWINFO), που αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970 από την Xerox. Λίγο αργότερα το GWINFO εμπλουτίστηκε και βελτιώθηκε, οπότε εισήχθη στο σύνολο πρωτοκόλλων Xerox Network Systems (XNS), ως XNS RIP. Τα επόμενα χρόνια αναπτύχθηκαν αρκετά πρωτόκολλα βάσει του XNS RIP, αποτελώντας ουσιαστικά παραλλαγές ή επεκτάσεις του. Η απαρχή της ευρείας χρήσης του συντελέστηκε το 1982, όταν συμπεριλήφθηκε στην έκδοση Berkeley Software Distribution (BSD) του λειτουργικού συστήματος UNIX. Το τελευταίο υποστήριζε τη στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP, όπου το RIP ενσωματώθηκε.

Το RIP δεν έμεινε στάσιμο κατά τη διάρκεια της μακρόχρονης ύπαρξής του, αντίθετα δέχτηκε αρκετές βελτιώσεις που υλοποιήθηκαν σε τρεις βασικές εκδόσεις. Η πρώτη (RIP version 1 – RIPv1) προτυποποιήθηκε το 1988 (Request for Comments (RFC) 1058 [14]), λίγα χρόνια μετά την ενσωμάτωση του πρωτοκόλλου στη στοίβα TCP/IP. Το RIPv1 ονομάζεται και Classful RIP, καθώς οι δυνατότητές του περιορίζονται σε αυτό το είδος δρομολόγησης.

Η απαλοιφή του παραπάνω περιορισμού ήταν η σημαντικότερη ώθηση προς τη μετάβαση στη δεύτερη έκδοση (RIP version 2 – RIPv2). Δημοσιεύτηκε το 1994 (RFC 1723 [15]) και ανακηρύχθηκε ως Internet Standard το 1998 (RFC 2453 [16]). Το RIPv2 (ή Classless RIP) υποστηρίζει την τεχνική Classless Inter-Domain Routing (CIDR), όπως και τη χρήση multicast αντί broadcast διευθύνσεων προορισμού αρκετών πακέτων ενημέρωσης. Ως

συνέπεια μειώνεται ο όγκος της πληροφορίας που διακινείται στο δίκτυο, ενώ οι κόμβοι τους οποίους δεν αφορά το πακέτο, δεν επιβαρύνονται με την επεξεργασία και την απόρριψή του. Από το 1997 υποστηρίζεται, αποκλειστικά από τη δεύτερη έκδοση του πρωτοκόλλου, μηχανισμός αυθεντικοποίησης βάσει του αλγορίθμου MD5 και τεχνικών κρυπτογράφησης. Κατά την ανάπτυξη του RIPv2 λήφθηκε μέριμνα ώστε να είναι απόλυτα συμβατό με την προγονική έκδοση.

Η πρώτη και η δεύτερη έκδοση υποστηρίζουν αποκλειστικά IPv4 διευθύνσεις. Προκειμένου να υποστηριχθούν και οι IPv6 αναπτύχθηκε το RIP νέας γενιάς (RIP new generation – RIPng), ως επέκταση του RIPv2. Το RIPng είναι εν γένει προς τα πίσω συμβατό με το RIPv2. Ωστόσο παρατηρούνται διαφοροποιήσεις όσον αφορά την αυθεντικοποίηση και τον τρόπο διατήρησης του next hop στον πίνακα δρομολόγησης.

Το RIP είναι ένα παλαιό πρωτόκολλο το οποίο θεωρείται πλέον αρκετά παρωχημένο, λόγω των αρκετών περιορισμών που το χαρακτηρίζουν. Ωστόσο χάρη στην απλότητα και τη συμβατότητά του σχεδόν με κάθε συσκευή, οι εκδόσεις RIPv2 και RIPng συνεχίζουν να βρίσκουν εφαρμογή σε σχετικά μικρές δικτυακές τοπολογίες μικρών απαιτήσεων.

2.1.2 Χαρακτηριστικά και Λειτουργία

Στο RIP [17], [18], ο πίνακας δρομολόγησης ενός δρομολογητή αποτελείται από ένα σύνολο εγγραφών που αντιστοιχούν στη μοναδική ή τη βέλτιστη διαδρομή προς κάθε προορισμό του οικείου δικτύου. Τα πεδία της εγγραφής είναι η IP διεύθυνση του προορισμού και η αντίστοιχη μάσκα υποδικτύου (για classless routing), το κόστος προσέγγισης του και η IP διεύθυνση της διεπαφής εξόδου του πακέτου.

Για το σχηματισμό και την ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης, όπως και για την ανίχνευση συμβάντων απαιτείται επικοινωνία μεταξύ γειτονικών δρομολογητών. Συγκεκριμένα, κάθε δρομολογητής αποστέλλει περιοδικά τον πίνακα δρομολόγησής του στους γειτονικούς και αναμένει αντίστοιχους πίνακες από αυτούς. Κάθε γειτονικός με τη σειρά του, αποστέλλει τον δικό του πίνακα δρομολόγησης στους δικούς του γείτονες και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου επιτευχθεί η σύγκλιση του δικτύου. Εάν ένας δρομολογητής ανιχνεύσει κάποιο συμβάν στο δίκτυο, ενημερώνει αναλόγως τον πίνακα που διατηρεί και τον αποστέλλει άμεσα στους γειτονικούς του, πληροφορώντας το δίκτυο σχετικά με το γεγονός.

Όταν ένας δρομολογητής λαμβάνει πληροφορία για διαδρομή προς κάποιον κόμβο, διαφορετική αυτής που προϋπάρχει στον πίνακα, συγκρίνει τα κόστη των δύο διαδρομών. Εάν

το κόστος της νέας διαδρομής είναι μικρότερο, αυτή αντικαθιστά την προϋπάρχουσα. Διαφορετικά δεν λαμβάνεται υπόψη.

Όταν ανακαλύπτονται δύο ή περισσότερες διαδρομές με το ίδιο κόστος προς τον ίδιο προορισμό, ενεργοποιείται η επονομαζόμενη εξισορρόπηση φορτίου ίσου κόστους (equal-cost load balancing) [9]. Δηλαδή το σύνολο των διαδρομών ίσου κόστους εισάγεται στον πίνακα δρομολόγησης και καθεμία από αυτές μεταφέρει μέρος των πακέτων στον αντίστοιχο κόμβο. Αξίζει να σημειωθεί ότι γενικά ο πίνακας δρομολόγησης περιλαμβάνει μόνο μία διαδρομή προς ένα προορισμό, με εξαίρεση την περίπτωση της εξισορρόπησης φορτίου.

Το RIP χρησιμοποιεί ως κριτήριο δρομολόγησης τον αριθμό των αλμάτων (hops). Δηλαδή, εφόσον υπάρχουν περισσότερες της μίας διαδρομές προς έναν κόμβο του δικτύου, επιλέγει εκείνη που περιλαμβάνει το μικρότερο δυνατό αριθμό δρομολογητών [17]. Το προεπιλεγμένο κόστος κάθε άλματος είναι μοναδιαίο. Ωστόσο ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να αναθέσει μεγαλύτερη τιμή, προς αποτροπή των πακέτων να ακολουθήσουν συγκεκριμένες διαδρομές. Για την διαχείριση των αδυναμιών του αλγορίθμου, είναι απαραίτητο να τεθεί ένα όριο στον μέγιστο αριθμό των αλμάτων μίας διαδρομής. Το όριο τίθεται στα δεκαπέντε άλματα, οπότε το άπειρο (απροσπέλαστος προορισμός) ισούται με 16 άλματα [17].

Το RIP διαθέτει ένα σύνολο μεταβλητών χρονομέτρου που διατηρούνται και ενημερώνονται, υποβοηθώντας τις βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου. Οι κυριότερες τέτοιες μεταβλητές είναι [18]:

- Χρονόμετρο Ενημερώσεων (Update Timer): Εκφράζει τη συχνότητα των ενημερώσεων, δηλαδή ανά πόσα δευτερόλεπτα προγραμματίζεται η περιοδική αποστολή των πινάκων δρομολόγησης στους γειτονικούς κόμβους. Η προεπιλεγμένη τιμή ισούται με 30 δευτερόλεπτα.
- Χρονόμετρο Ακύρωσης Διαδρομής (Invalid Timer): Μία διαδρομή της οποίας η λειτουργικότητα έπαψε να επιβεβαιώνεται μέσω περιοδικών ενημερώσεων, επισημαίνεται ως άκυρη και τίθεται σε κατάσταση Hold Down, μετά την πάροδο δευτερολέπτων ίσων με την τιμή του χρονομέτρου. Το Invalid Timer τίθεται από προεπιλογή στα 180 δευτερόλεπτα.
- Χρονόμετρα Διακοπής Ενημερώσεων (Hold Down Timers): Σύνολο μετρητών αγνόησης των περιοδικών ενημερώσεων για χρονικό διάστημα ίσο με την τιμή τους. Οι συγκεκριμένοι μετρητές υποβοηθούν την ευστάθεια δικτύου που απαρτίζεται από συσκευές της CISCO.

- Χρονόμετρο Διαγραφής Διαδρομής (Flush Timer): Εάν μία διαδρομή παραμείνει σε κατάσταση Hold Down για χρονικό διάστημα ίσο με την τιμή του χρονομέτρου και εφόσον δεν αποκατασταθεί η ροή των ενημερώσεων κατά το διάστημα αυτό, η διαδρομή διαγράφεται. Η προεπιλεγμένη τιμή του Flush Timer είναι τα 240 δευτερόλεπτα.

Το RIP χρησιμοποιεί ως πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς το User Datagram Protocol (UDP). Η πρώτη και δεύτερη έκδοση δεσμεύουν τη θύρα 520 του UDP [17], ενώ το RIPng την 521 [9].

2.1.3 Περιορισμοί

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το RIP είναι ένα παλιό πρωτόκολλο που χαρακτηρίζεται από αρκετές αδυναμίες. Μία εκ των σημαντικότερων είναι ότι ως πρωτόκολλο διανυσμάτων απόστασης, η βασική του λογική δεν εγγυάται την απουσία βρόχων. Έτσι αναπτύσσονται άλλες τεχνικές προς εξασφάλιση της συνθήκης αυτής, οι οποίες με τη σειρά τους εισάγουν επιπλέον περιορισμούς.

Θέτοντας το μέγιστο επιτρεπτό αριθμό αλμάτων για την προσέγγιση ενός προορισμού στα 15, εξασφαλίζεται ότι εάν προκύψει βρόχος η διάδοση των πακέτων δεν θα συνεχιστεί επ' άπειρο. Εισάγεται έτσι άνω όριο στο μέγεθος της τοπολογίας (διάμετρος του δικτύου) που υποστηρίζει το πρωτόκολλο.

Για τον ίδιο λόγο είναι απαραίτητη η αγνόηση των περιοδικών ενημερώσεων κατά τη διάρκεια της σύγκλισης του δικτύου. Εξασφαλίζεται με την ενεργοποίηση των Hold Down Timers.

Ένας άλλος τρόπος αποτροπής σχηματισμού βρόχων είναι ο κανόνας της Διάσπασης Ορίζοντα (Split Horizon) [17]. Σύμφωνα με αυτόν, ένας δρομολογητής δεν αποστέλλει πληροφορίες σχετικές με κάποια διαδρομή του δικτύου, στη διεπαφή μέσω της οποίας έλαβε γνώση για τη συγκεκριμένη διαδρομή. Οπότε αποφεύγεται η περίπτωση κατά την οποία ένας δρομολογητής (έστω A) προωθεί ένα πακέτο σε έναν άλλο (έστω B) και στη συνέχεια ο B το δρομολογεί μέσω μονοπατιού που διέρχεται εκ νέου από τον A, δηλαδή ο μεταξύ τους βρόχος. Βέβαια η τεχνική Split Horizon δεν αντιμετωπίζει οριστικά το πρόβλημα, ιδιαίτερα σε περίπτωση μη μελετημένης εφαρμογής του ή όταν αυξάνεται η πολυπλοκότητα λόγω εμπλοκής μεγάλου αριθμού δρομολογητών.

Για τον ίδιο σκοπό αξιοποιείται και η τεχνική της Δηλητηρίασης Ανάστροφης Διαδρομής (Poison Reverse) [19]. Όταν ένας δρομολογητής ανιχνεύσει ότι κάποια ζεύξη δεν είναι πλέον λειτουργική, διαγράφει την αντίστοιχη διαδρομή από τον πίνακα δρομολόγησης

και στη συνέχεια τη διαφημίζει στους γειτονικούς ως απροσπέλαστη (με κόστος 16). Διαγράφουν και αυτοί την απροσπέλαστη διαδρομή και διαδίδουν την πληροφορία, μέχρι την ενημέρωση του συνόλου των εμπλεκόμενων δρομολογητών. Η διαφήμιση της διαδρομής ως άκυρης, έναντι της απλής διαγραφής της συμβάλλει στην απομάκρυνσή της από όλους τους πίνακες δρομολόγησης. Εξασφαλίζεται λοιπόν ότι δε θα χρησιμοποιηθεί κάποιο τμήμα της, πράγμα που ενέχει τον κίνδυνο σχηματισμού βρόχου.

Ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα του RIP είναι η αργή σύγκλιση. Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό των αλγορίθμων δρομολόγησης διανύσματος απόστασης. Έτσι το πρωτόκολλο καθίσταται ανεπαρκές για τις σύγχρονες τοπολογίες, όπου απαιτείται η απόκρυψη σχεδόν κάθε βλάβης από το χρήστη.

Το μοναδικό κριτήριο δρομολόγησης του RIP είναι ο αριθμός των αλμάτων. Οπότε το πρωτόκολλο συχνά δεν εκμεταλλεύεται αποδοτικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης, δεν ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση και γενικότερα δεν αποσκοπεί στη διασφάλιση της βέλτιστης δυνατής ποιότητας εξυπηρέτησης.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, σήμερα το RIP έχει αντικατασταθεί από νεότερα IGP's που παρακάμπτουν ή εμφανίζουν σε μικρότερο βαθμό τους περιορισμούς αυτούς. Ωστόσο σε μικρές τοπολογίες δικτύων, που δε μεταφέρουν κρίσιμες πληροφορίες και δεν χαρακτηρίζονται από απαιτήσεις αδιάλειπτης συνδεσιμότητας, το απλό και ευρέως υποστηριζόμενο RIP συνεχίζει να αποτελεί ελκυστική επιλογή.

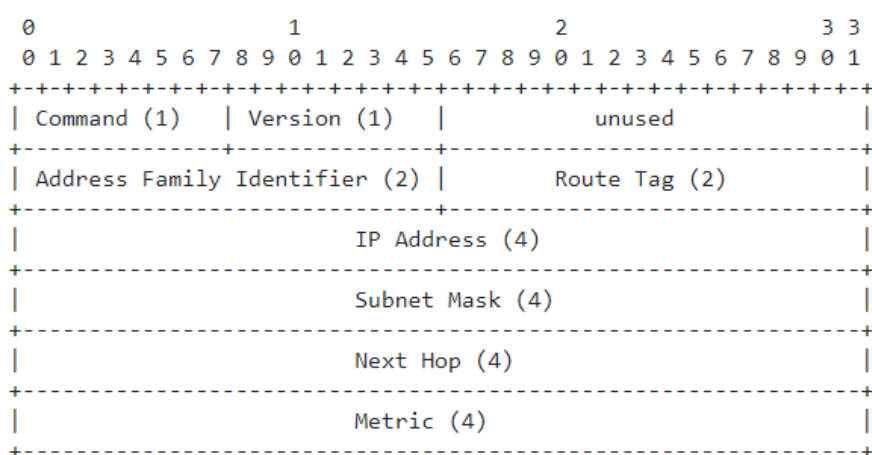
2.1.4 Δομή Μηνύματος Ενημέρωσης

Η δομή ενός μηνύματος ενημέρωσης του RIP παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-1 [14] [15]. Αποτελείται από δύο τμήματα, την επικεφαλίδα και το κύριο μήνυμα ενημέρωσης. Τα τρία πρώτα εικονιζόμενα πεδία ανήκουν στην επικεφαλίδα, ενώ τα υπόλοιπα στο μήνυμα. Ένα πακέτο ενημέρωσης περιλαμβάνει μία επικεφαλίδα, ακολουθούμενη από ένα έως είκοσι πέντε μηνύματα ενημέρωσης. Η δομή του πακέτου είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται συμβατότητα μεταξύ των εκδόσεων RIPv1 και RIPv2. Αυτό χάρη στην ύπαρξη αρκετών αχρησιμοποίητων πεδίων στο πακέτο, μέρος των οποίων βρήκε εφαρμογή στην κάλυψη των επιπλέον αναγκών του RIPv2.

Τα πεδία ενός πακέτου ενημέρωσης RIP είναι:

- Τύπος εντολής (Command) – 8 bits: Λαμβάνει την τιμή 1 εάν πρόκειται για πακέτο αιτήματος (request) και την τιμή 2 για πακέτο απάντησης (reply).

- Έκδοση (Version) – 8 bits: Υποδεικνύει τη χρησιμοποιούμενη έκδοση του πρωτόκολλου, οπότε λαμβάνει την τιμή 1 για το RIPv1 και την τιμή 2 για το RIPv2.
- Αχρησιμοποίητο Πεδίο (unused): Δεσμευμένο πεδίο για μελλοντική χρήση. Λαμβάνει μηδενικές τιμές και για τις δύο εκδόσεις.
- Αναγνωριστικό Οικογένειας Διευθύνσεων (Address Family Identifier) – 16 bits: Υποδεικνύει το σύνολο πρωτοκόλλων βάσει των οποίων λειτουργεί το δίκτυο. Η στοίβα TCP/IP αντιστοιχεί στην τιμή 2.
- Ετικέτα Διαδρομής (Route Tag) – 16 bits: Χρησιμοποιείται αποκλειστικά από το RIPv2 για να μεταφέρει πληροφορία αποτροπής σχηματισμού βρόχων. Για το RIPv1 λαμβάνει μηδενική τιμή.
- Διεύθυνση Προορισμού (IP Address) – 32 bits: Μεταφέρει τη διεύθυνση του δικτύου (ή υποδικτύου) στο οποίο αναφέρεται το μήνυμα.
- Μάσκα Υποδικτύου (Subnet Mask) – 32 bits: Χρησιμοποιείται αποκλειστικά από το RIPv2 (classless) και φέρει τη μάσκα του υποδικτύου προορισμού. Για το RIPv1 λαμβάνει μηδενική τιμή.
- Επόμενο Άλμα (Next Hop) – 32 bits: Χρησιμοποιείται αποκλειστικά από το RIPv2 και φέρει τη διεύθυνση της διεπαφής εξόδου του μηνύματος. Για το RIPv1 λαμβάνει μηδενική τιμή.
- Κόστος (Metric) – 32 bits: Αναγράφει το κόστος, δηλαδή τον αριθμό των αλμάτων προσέγγισης του προορισμού στον οποίο αφορά το μήνυμα.



Εικόνα 2-1: Πακέτο ενημέρωσης RIPv2. Οι αριθμοί εντός των παρενθέσεων αντιστοιχούν στα bytes που δεσμεύει κάθε πεδίο.

2.2 OSPF

Το OSPF αποτελεί το πλέον διαδεδομένο IGP εδώ και αρκετά χρόνια. Ανήκει στην κατηγορία των πρωτοκόλλων κατάστασης συνδέσμων, οπότε ακολουθεί τη βασική λογική που περιγράφει η το υποκεφάλαιο 1.4.2.

2.2.1 Ιστορικά Στοιχεία

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, η αύξηση του μεγέθους των δικτύων και των απαιτήσεων που αυτά καλούνταν να διαχειριστούν ανέδειξαν αρκετούς από τους περιορισμούς του RIP [20]. Έτσι το 1988, η Internet Engineering Task Force (IETF) σχημάτισε μία ομάδα εργασίας για την ανάπτυξη ενός νέου IGP, βασιζόμενο στους ήδη γνωστούς αλγορίθμους κατάστασης συνδέσμων. Το πρωτόκολλο ονομάστηκε Open Shortest Path First (OSPF). Η λέξη Open υποδεικνύει ένα δημόσιο πρωτόκολλο ελεύθερης χρήσης, χωρίς την ανάγκη δαπάνης απόκτησης σχετικής άδειας. Το υπόλοιπο μέρος της ονομασίας αντιστοιχεί στον αλγόριθμο υπολογισμού του κόστους διαδρομής, τον Shortest Path First (SPF).

Η πρώτη έκδοση του πρωτοκόλλου (OSPF version 1 – OSPFv1) δημοσιεύτηκε το 1989 (RFC 1131 [21]) και αποτέλεσε standard της στοίβας TCP/IP. Περίπου δύο χρόνια αργότερα το OSPFv1 αντικαταστάθηκε από τη δεύτερη έκδοση (OSPF version 2 – OSPFv2), η οποία προτυποποιήθηκε με το RFC 1247 [22]. Έκτοτε αυτή είναι η περισσότερο διαδεδομένη έκδοση του OSPF, που χρησιμοποιείται έως σήμερα. Έχει δεχθεί αρκετές τροποποιήσεις και βελτιώσεις (μετέπειτα RFCs, π.χ. RFC 2328 [23]).

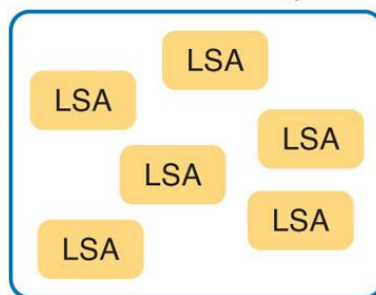
Είναι διαθέσιμη και η τρίτη έκδοση (OSPF version 3 – OSPFv3), η οποία υποστηρίζει τις διευθύνσεις IPv6 (RFC 5838 [24]). Καθώς δεν είναι προς τα πίσω συμβατή με την OSPFv2, συχνά εφαρμόζονται ταυτόχρονα και οι δύο εκδόσεις του πρωτοκόλλου. Βέβαια, οι πλέον αναθεωρημένες εκδοχές της OSPFv3 υποστηρίζουν και τα δύο είδη IP διευθύνσεων. Ενδεικνύεται λοιπόν η αυτόνομη χρήση της συγκεκριμένης έκδοσης, εφόσον υποστηρίζεται από το σύνολο των συσκευών ενδιαφέροντος [25, p. 3].

2.2.2 Βασικές έννοιες

Το OSPF [8], [26] ανήκει στα IGPs κατάστασης συνδέσμων, στα οποία κάθε δρομολογητής κατασκευάζει τοπικά τον πίνακα δρομολόγησής του βασιζόμενος σε λεπτομερή γνώση της πλήρους τοπολογίας. Για το σκοπό αυτό διατηρεί στη μνήμη του τη Βάση Δεδομένων Κατάστασης Συνδέσμων (Link State Data Base – LSDB), δηλαδή τη συλλογή των πληροφοριών της οικείας τοπολογίας. Η εκμείευση των πληροφοριών αυτών, που αφορούν σε

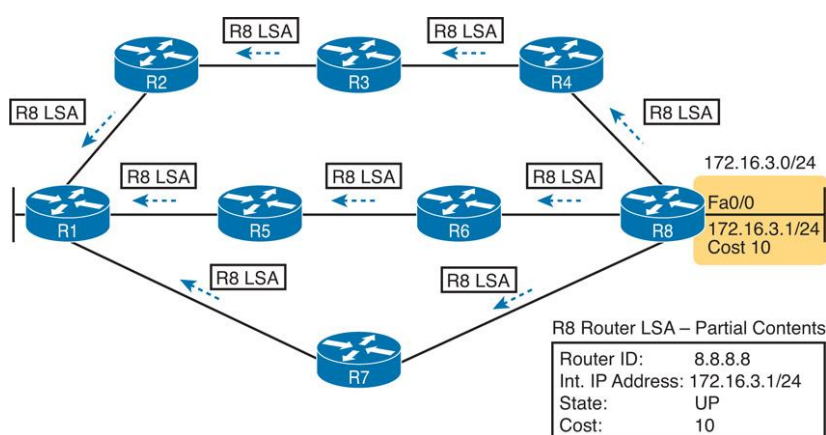
συσκευές, ζεύξεις και καταστάσεις τους, υποδίκτυα, διευθύνσεις κ.α., συντελείται με τη συνεργασία των δρομολογητών της τοπολογίας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-2, η LSDB περιλαμβάνει ένα σύνολο Διαφημίσεων Κατάστασης Συνδέσμων (Link State Advertisements – LSAs). Η LSA είναι μία ειδική δομή δεδομένων συστηματικής διατήρησης πληροφοριών της τοπολογίας.

Link State Database (LSDB)



Εικόνα 2-2: Σχέση OSPF LSDB με LSAs [8].

Όταν κάποιος δρομολογητής σχηματίζει μία LSA, τη διαδίδει στο δίκτυο ώστε να ληφθεί από κάθε άλλο δρομολογητή. Υπό συνθήκες σταθερής λειτουργίας, κάθε στιγμή η LSDB όλων των κόμβων μίας τοπολογίας είναι πανομοιότυπη. Η διάδοση των LSAs ακολουθεί τη μέθοδο της πλημμύρας (flooding), που αποτυπώνεται στην Εικόνα 2-3 και εξετάστηκε στο υποκεφάλαιο 1.4.2. Πριν την αποστολή του πακέτου κατάστασης συνδέσμων που περιλαμβάνει την LSA, ο αποστολέας επικοινωνεί με τον παραλήπτη ερωτώντας τον εάν έχει ήδη λάβει τη σχετική γνώση. Εάν ναι, το πακέτο δεν αποστέλλεται. Εξασφαλίζεται έτσι ο τερματισμός της διαδικασίας και αποτρέπεται η λήψη και διατήρηση διπλότυπων LSAs.



Εικόνα 2-3: Πλημμύρα πακέτων κατάστασης συνδέσμων στο OSPF [8].

Κάθε δρομολογητής ενός OSPF δικτύου χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό αριθμό των 32 bits, την Ταυτότητα Δρομολογητή (Router ID – RID). Ο αριθμός αυτός συνήθως συμβολίζεται ως DDN και καθορίζεται από το διαχειριστή του δικτύου. Από προεπιλογή, ως RID ορίζεται η IPv4 κάποιας εκ των ενεργών διεπαφών του δρομολογητή.

2.2.3 Λειτουργία

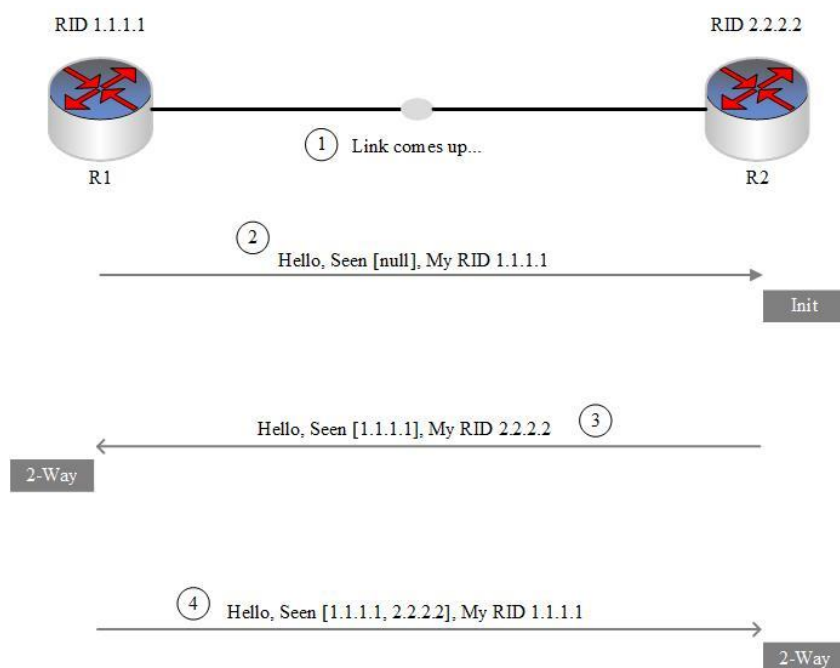
Μόλις ενεργοποιηθεί ένας δρομολογητής, επιδίδεται στην εγκαθίδρυση της προκαθορισμένης επικοινωνίας με τους γειτονικούς του. Εδώ εμπλέκεται περισσότερο ο ανθρώπινος παράγοντας, μια και ο βαθμός αυτοματοποίησης των επόμενων διεργασιών είναι μεγαλύτερος. Ως προς το OSPF, γειτονικοί θεωρούνται οι δρομολογητές που βρίσκονται στα άκρα κοινής ζεύξης (σειριακής, Ethernet Wide Area Network – WAN), ή βρίσκονται στο ίδιο Τοπικό Εικονικό Δίκτυο (Virtual Local Area Network – VLAN), έχουν ενεργοποιημένο το πρωτόκολλο και συμβατές ορισμένες βασικές παραμέτρους (π.χ. ανήκουν στο ίδιο υποδίκτυο).

Η σύναψη γειτονικών σχέσεων βασίζεται στα OSPF μηνύματα χαιρετισμού (OSPF Hello Messages). Ένας OSPF δρομολογητής αποστέλλει περιοδικά (ανά Hello Interval χρονικές μονάδες) OSPF Hello Messages σε κάθε ενεργή διεπαφή του ή αναμένει την έλευση ενός τέτοιου από κάποια εξ αυτών. Μόλις συμβεί αυτό, προβαίνει σε ένα σύνολο ελέγχων οι οποίοι εφόσον είναι επιτυχής, θεωρεί τον αποστολέα υποψήφιο γείτονα και αποστέλλει σε αυτόν αντίστοιχο μήνυμα. Η διαδικασία διευκολύνει την κλιμάκωση του δικτύου, καθώς η ανίχνευση νέας συσκευής δεν απαιτεί τροποποίηση των ρυθμίσεων στις υπάρχουσες.

Τα OSPF Hello Messages είναι ειδικά multicast πακέτα που φέρουν το RID και άλλες παραμέτρους του αποστολέα. Η αποστολή και ανίχνευσή τους γίνεται στη δεσμευμένη multicast διεύθυνση 224.0.0.5. Το μήνυμα χαρακτηρίζεται από τον τύπο IP πρωτοκόλλου 89 και η δομή του συμφωνεί με την κεφαλίδα του IP.

Η σύναψη γειτονίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-4. Το πρώτο βήμα αντιστοιχεί στην ενεργοποίηση της ζεύξης. Πρωτίτερα ο ένας δρομολογητής δε γνώριζε την ύπαρξη του άλλου. Ο R1 αποστέλλει πρώτος OSPF Hello Message. Ο R2 το λαμβάνει, εκτελεί επιτυχημένα τους απαραίτητους ελέγχους και προσθέτει τον R1 ως υποψήφιο γείτονα (κατάσταση Init) (βήμα 2). Κατόπιν αποστέλλει αντίστοιχο μήνυμα στον R1, ο οποίος εκτελεί τους ίδιους ελέγχους και προσθέτει τον R2 στη λίστα των γειτόνων του, με κατάσταση 2-Way (βήμα 3). Στο τέταρτο και τελευταίο βήμα ο R1 αποστέλλει ένα ακόμα Hello στον R2, οπότε και αυτός προσθέτει τον R1 με κατάσταση 2-Way. Με την περάτωση της διαδικασίας εγκαθιδρύεται αμφίδρομη (2-

Way) γειτονική σχέση, οπότε οι δύο συσκευές μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες δρομολόγησης.

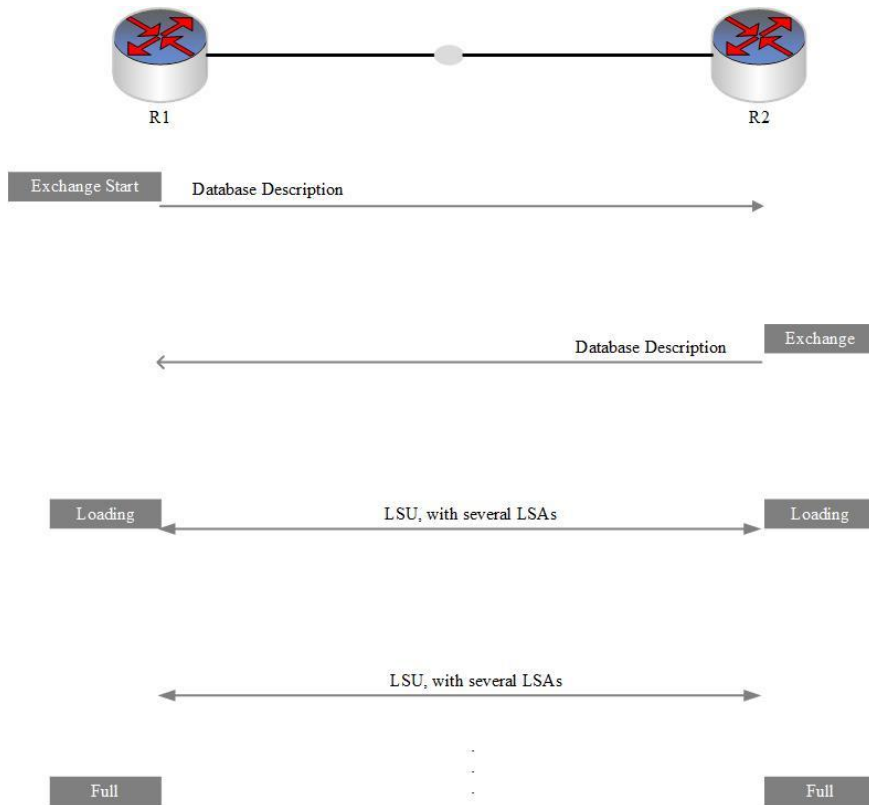


Εικόνα 2-4: Σύναψη γειτονικής σχέσης 2-Way.

Στο σημείο αυτό οι γείτονες προχωρούν στην ανταλλαγή των LSDBs τους, ώστε να μεταδοθεί η γνώση της τοπολογίας που κατέχει μόνο ο ένας, στον άλλο. Σε αδρές γραμμές η διαδικασία περιλαμβάνει δύο φάσεις. Αρχικά οι δύο γείτονες ανταλλάσσουν πακέτα Περιγραφής Βάσης Δεδομένων (Database Description – DD packets). Δηλαδή κάθε δρομολογητής αποστέλλει στον άλλο μία λίστα των LSAs της βάσης του και όχι τα ίδια τα LSAs. Κάθε συσκευή συγκρίνει τα δικά της LSAs με το περιεχόμενο της λίστας και αποστέλλει ένα Πακέτο Αιτήματος Κατάστασης Συνδέσμων (Link-State Request – LSR Packet), ζητώντας τα άγνωστα LSAs. Στη δεύτερη φάση, οι συσκευές ανταλλάσσουν πακέτα Ενημέρωσης Κατάστασης Συνδέσμων (Link State Update – LSU packets). Καθένα από αυτά περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα LSAs. Συνεπώς το LSU είναι το πακέτο κατάστασης συνδέσμων του OSPF. Με το πέρας της διαδικασίας οι δύο γείτονες διατηρούν πανομοιότυπες LSDBs, οπότε περνούν στην κατάσταση Πλήρους Γειτονίας (Full State). Χάρη στο μηχανισμό αυτό, το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί λιγότερους δικτυακούς πόρους και παράγει λιγότερη πλεονάζουσα πληροφορία απ' ό τι εάν απλώς ανταλλάσσονταν το αρχικό περιεχόμενο των δύο LSDBs.

Η Εικόνα 2-5 αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου παραδείγματος και αποτυπώνει την ανταλλαγή των LSDBs. Ο R1 ξεκινά τη διαδικασία, αποστέλλοντας στον R2 ένα πακέτο DD.

Ο R2 το λαμβάνει και απαντά με αντίστοιχο πακέτο. Κάπου εδώ ανταλλάσσονται και τα Link-State Request Packets. Ακολούθως οι δρομολογητές ανταλλάσσουν πλήθος LSUs, οπότε συγχρονίζονται οι LSDBs τους.



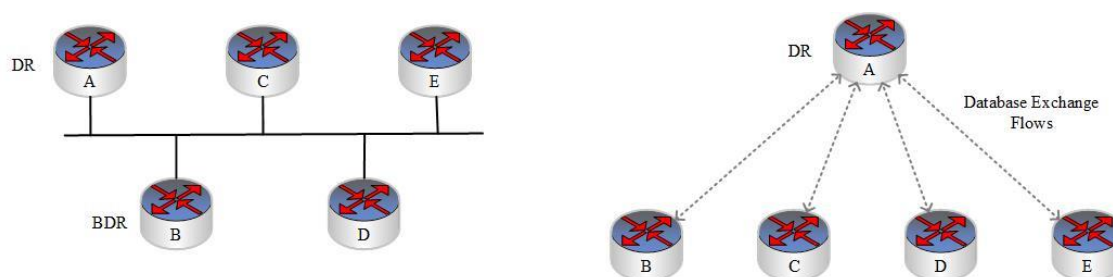
Εικόνα 2-5: Ανταλλαγή LSDBs.

Με την ολοκλήρωση της ανταλλαγής των LSDBs οι δύο δρομολογητές έχουν σχηματίσει πλήρη γειτονική σχέση, η οποία πρέπει να διατηρηθεί και να συμβάλλει στην εύρυθμη λειτουργία της συνολικής τοπολογίας. Στη διατήρηση κάθε γειτονικής σχέσης αφιερώνονται δύο μεταβλητές χρονομέτρου, η Hello Interval και η Dead Interval. Δηλαδή κάθε δρομολογητής αποστέλλει ένα πακέτο Hello ανά Hello Interval χρονικές μονάδες σε κάθε γείτονα και αναμένει την έλευση αντίστοιχων πακέτων από αυτόν. Εάν δεν λάβει πακέτα από συγκεκριμένο γείτονα για χρονικό διάστημα τουλάχιστον ίσο με Dead Interval, η γειτονική σχέση θεωρείται αποτυχημένη και η αντίστοιχη ζεύξη μη λειτουργική. Τότε ο δρομολογητής ενημερώνει τα σχετικά LSAs και υπολογίζει εκ νέου το κόστος των διαδρομών. Ακόμα πλημμυρίζει τα τροποποιημένα LSAs, ώστε να γνωστοποιήσει το συμβάν στο δίκτυο. Μία ακόμα αρμοδιότητα διατήρησης της γειτονικής σχέσης είναι η περιοδική πλημμύρα κάθε LSA από το δρομολογητή που το δημιούργησε, ακόμα και όταν το δίκτυο είναι απολύτως σταθερό. Καθορίζεται από μεταβλητή χρονομέτρου που διατηρείται ξεχωριστά για κάθε LSA. Από

προεπιλογή λαμβάνει την τιμή των 30 λεπτών. Συχνά η συγκεκριμένη λειτουργία απενεργοποιείται (DoNotAge LSAs) για τον περιορισμό του overhead.

Το OSPF δέχεται τη ρύθμιση network type, η οποία προσαρμόζει τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου στον τύπο της χρησιμοποιούμενης ζεύξης. Για τις πλέον κοινές ζεύξεις Ethernet η ρύθμιση λαμβάνει από προεπιλογή την τιμή broadcast. Αυτό επιτρέπει σε περισσότερους από δύο δρομολογητές να τοποθετηθούν στο ίδιο VLAN και να αναπτύξουν γειτονικές σχέσεις. Ένας από τους δρομολογητές της τοπολογίας εκλέγεται αυτόματα ως Χρησμένος Δρομολογητής (Designated Router – DR) και ένας ως Πλεονάζων Χρησμένος Δρομολογητής (Backup Designated Router – BDR). Αντί οι LSDBs να ανταλλάσσονται μεταξύ κάθε ζεύγους δρομολογητών, αυτό γίνεται πιο αποδοτικά μεταξύ του DR και κάθε άλλου δρομολογητή του VLAN. Ο BDR επιβεβαιώνει τακτικά ότι ο DR παραμένει λειτουργικός. Εάν διαπιστώσει το αντίθετο, γίνεται αυτόματα DR και εκλέγεται νέος BDR. Λόγω της άμεσης επικοινωνίας με τον DR και τον BDR (ώστε να παραμένει ενήμερος), κάθε δρομολογητής του VLAN αναπτύσσει Full State γειτονική σχέση με αυτούς. Οι λοιπές σχέσεις παραμένουν στην κατάσταση 2-Way.

Για παράδειγμα, έστω το VLAN της Εικόνα 2-6 (αριστερά). Η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών αυτών γίνεται όπως απεικονίζεται στο δεξιότερο τμήμα της ίδιας εικόνας.



Εικόνα 2-6: Ανταλλαγή LSDB, σε τοπολογία με DR.

Η διαδικασία αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική στον περιορισμό του overhead και της καθυστέρησης, στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότεροι των δύο δρομολογητών σε ένα VLAN. Αξιοποιώντας τη multicast διεύθυνση 224.0.0.5 ο DR αποστέλλει τα πακέτα σε όλους τους υπόλοιπους δρομολογητές του VLAN ταυτόχρονα. Επίσης όταν κάποιος δρομολογητής αποστέλλει πληροφορία στη διεύθυνση 224.0.0.6 λαμβάνεται μόνο από τον DR και τον BDR.

Αν και στη LSDB ενός δρομολογητή περιλαμβάνεται λεπτομερής γνώση της τοπολογίας, αυτή δεν μπορεί να αξιοποιηθεί άμεσα στην εύρεση της βέλτιστης διαδρομής προς

κάποιον κόμβο του δικτύου. Παρέχει ωστόσο τις απαιτούμενες εισόδους στον αλγόριθμο SPF, ο οποίος εκτελείται ξεχωριστά σε κάθε δρομολογητή και υπολογίζει το κόστος κάθε πιθανής διαδρομής με αφετηρία το συγκεκριμένο κόμβο. Η διαδρομή ελαχίστου κόστους προς κάθε προορισμό εισάγεται στον πίνακα δρομολόγησης. Για κάθε εγγραφή διατηρείται η IP διεύθυνση που περιγράφει το υποδίκτυο προορισμού, η μάσκα υποδικτύου (classless routing), η διεπαφή εξόδου του πακέτου και η IP διεύθυνση next hop.

2.2.4 Υπολογισμός Κόστους Διαδρομής

Το κριτήριο δρομολόγησης του OSPF είναι το εύρος ζώνης [27]. Δηλαδή σε περίπτωση ύπαρξης εναλλακτικών διαδρομών προς κάποιο υποδίκτυο, τα πακέτα προωθούνται μέσω της διαδρομής με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα. Η μετρική υπολογισμού του κόστους ζεύξης που αξιοποιούν οι δρομολογητές της CISCO δίδεται από τη σχέση:

$$\left\lceil \frac{10^8}{BW} \right\rceil$$

Το συνολικό κόστος μίας διαδρομής υπολογίζεται αθροίζοντας τα επιμέρους κόστη των ζεύξεων που την αποτελούν. Επιλέγεται και εισάγεται στον πίνακα δρομολόγησης η διαδρομή με το ελάχιστο κόστος. Μια και το κόστος είναι αντιστρόφως ανάλογο του εύρους ζώνης, τελικά επιλέγεται η διαδρομή μεγίστου εύρους ζώνης.

Το εύρος ζώνης λαμβάνεται από την τιμή που ανατίθεται σε κάθε διεπαφή και όχι ως το πραγματικό εύρος ζώνης της ζεύξης. Από προεπιλογή οι δύο τιμές συνήθως ταυτίζονται. Ωστόσο ο διαχειριστής των συσκευών μπορεί να μεταβάλει την απόφαση του πρωτοκόλλου τροποποιώντας το εύρος ζώνης των διεπαφών. Τέτοιες ρυθμίσεις δεν μεταβάλλουν τα πραγματικά χαρακτηριστικά της επικοινωνίας. Ακόμα έχει τη δυνατότητα να τροποποιήσει το reference bandwidth, δηλαδή τη μετρική υπολογισμού του κόστους ή να ορίσει απευθείας το κόστος κάθε διεπαφής.

Όταν το ελάχιστο κόστος προσέγγισης κάποιου προορισμού είναι κοινό για περισσότερες από μία διαδρομές, προστίθενται στον πίνακα δρομολόγησης έως τέσσερεις από αυτές. Το πρωτόκολλο δύναται να τις αξιοποιήσει χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο εξισορρόπησης φορτίου. Αυτή είναι και η μόνη περίπτωση διατήρησης πολλαπλών διαδρομών προς συγκεκριμένο προορισμό σε έναν OSPF πίνακα δρομολόγησης.

2.2.5 Περιοχές OSPF

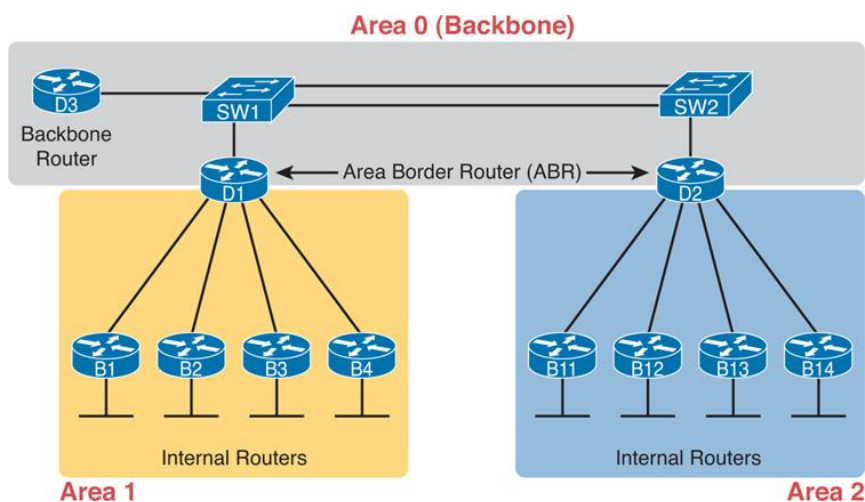
Η λειτουργία του OSPF για μεγάλες δικτυακές τοπολογίες (π.χ. εκατοντάδων δρομολογητών) παρουσιάζει αρκετές δυσχέρειες που απορρέουν κυρίως από την αύξηση του μεγέθους της LSDB. Για πολύ μεγάλες τοπολογίες ή συσκευές περιορισμένων δυνατοτήτων η διαθέσιμη μνήμη ενδέχεται να μην επαρκεί. Καθώς ο SPF επεξεργάζεται μεγάλο όγκο δεδομένων, εκτελείται αργά και απαιτεί αρκετούς υπολογιστικούς πόρους. Κάθε μεταβολή της τοπολογίας πυροδοτεί τη χρονοβόρα εκτέλεση του SPF σε κάθε δρομολογητή, ώστε να υπολογιστούν οι βέλτιστες διαδρομές βάσει των νέων δεδομένων. Ακόμα δύναται να προκληθεί συμφόρηση στο δίκτυο λόγω του πλήθους των πακέτων κατάστασης συνδέσμων που πλημμυρίζονται.

Τη λύση στα παραπάνω προβλήματα δίνει η διάσπαση της μεγάλης τοπολογίας σε περιοχές δρομολόγησης OSPF (OSPF areas). Έτσι η LSDB διασπάται σε επιμέρους μικρότερες, οι οποίες περιλαμβάνουν μόνο τα LSAs της συγκεκριμένης περιοχής. Για προορισμούς εντός διαφορετικής περιοχής διατηρούνται συνοπτικές πληροφορίες που περιορίζονται στη διεύθυνση υποδικτύου και την αντίστοιχη μάσκα υποδικτύου. Ως next hop ορίζεται η διεύθυνση του δρομολογητή προώθησης πακέτων εκτός της περιοχής.

Όταν το σύνολο των συσκευών τοποθετούνται σε κοινή περιοχή, την backbone, το εφαρμοζόμενο πρωτόκολλο λέγεται και επίπεδο (flat) OSPF. Διαφορετικά, OSPF πολλαπλών περιοχών (multi-area).

Ένα σύνολο βασικών εννοιών του OSPF σχετίζονται με την ιδέα των OSPF areas. Σε κάθε δίκτυο με OSPF areas διακρίνεται μία κύρια περιοχή (backbone area). Χαρακτηριστικό της είναι η άμεση σύνδεση με οποιαδήποτε άλλη OSPF area (non backbone area), μέσω ενός τουλάχιστον δρομολογητή. Δρομολογητές που τοποθετούνται σε τέτοια σημεία και έχουν ζεύξεις που ανήκουν σε τουλάχιστον δύο περιοχές (η μία είναι απαραίτητως η backbone), λέγονται Δρομολογητές Συνόρου Περιοχής (Area Border Routers – ABRs). Ακόμα, δρομολογητές με το σύνολο των διεπαφών τους εντός συγκεκριμένης περιοχής καλούνται Εσωτερικοί Δρομολογητές (Internal Routers). Εάν η περιοχή αυτή είναι η backbone, καλούνται Δρομολογητές Κορμού (Backbone Routers).

Ένα παράδειγμα δικτύου με τρεις OSPF areas (η μία αντιστοιχεί στην backbone) φαίνεται στην Εικόνα 2-7. Οι B1, B2, B3 και B4 είναι Internal Routers, καθώς το σύνολο των διεπαφών τους ανήκουν στην Area 1, όπως και οι B11, B12, B13, B14 με τις διεπαφές στην Area 2. Οι D1 και D2 είναι ABRs, αφού μέρος των διεπαφών τους ανήκουν στην backbone area και οι υπόλοιπες σε άλλη περιοχή. Τέλος ο D3 είναι Backbone Router, αφού όλες οι διεπαφές του τοποθετούνται στην αντίστοιχη περιοχή.



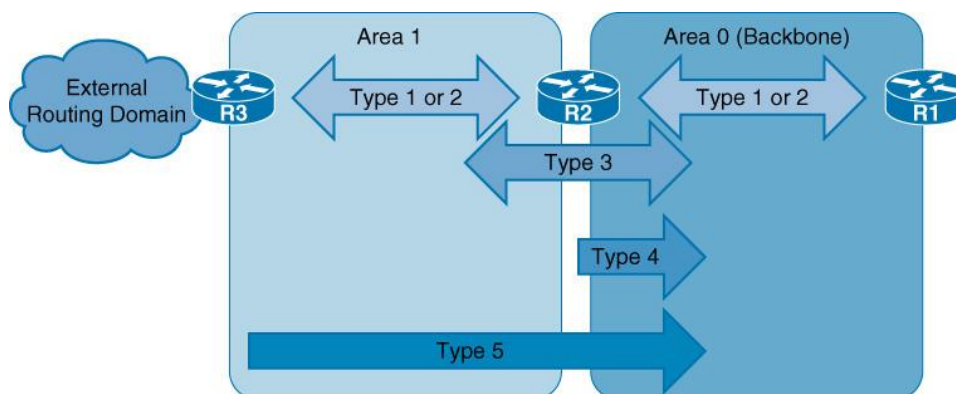
Εικόνα 2-7: Τοπολογία OSPF δικτύου, χωρισμένη σε τρεις OSPF areas [8].

Ανάλογα με το ρόλο και την εμβέλεια πλημμύρας τους τα LSAs διακρίνονται σε αρκετούς τύπους [28]. Η αναφορά σε κάθε τύπο γίνεται χρησιμοποιώντας έναν αριθμό, ως εξής:

- Τύπου 1 (Router LSA): Κάθε δρομολογητής παράγει ένα LSA του τύπου αυτού για κάθε περιοχή στην οποία ανήκει. Φέρει το RID και λεπτομερείς πληροφορίες για τις διεπαφές (διεύθυνση / μάσκα υποδικτύου, κατάσταση). Αποσκοπούν στο σχηματισμό του χάρτη τοπολογίας.
- Τύπου 2 (Network LSA): Παράγονται από κάθε DR και έχουν εμβέλεια πλημμύρας την OSPF area. Διατηρούν πληροφορία για τον DR και τον BDR, αλλά και την περιοχή.
- Τύπου 3 (Summary LSA): Παράγονται από τον ABR ώστε να διαφημίσει συνοπτικά πληροφορίες που λαμβάνει από άλλες περιοχές. Ο ABR διαθέτει ζεύξεις και στην περιοχή λήψης και στην περιοχή συνοπτικής διαφήμισης των πληροφοριών. Η σύνοψη συνήθως έγκειται στην αναφορά σε ένα σύνολο συσκευών με κατάλληλη κοινή IPv4 διεύθυνση (route summarization [29]). Από προεπιλογή, τα Summary LSA είναι απενεργοποιημένα.
- Τύπου 4 (ASBR Summary LSA): Συνοριακός Δρομολογητής Αυτόνομου Συστήματος (Autonomous System Border Router – ASBR) ονομάζεται αυτός που επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον του συνολικού OSPF αυτόνομου συστήματος, παρέχοντας συνήθως πρόσβαση στο διαδίκτυο. Ένα LSA τύπου 4 παράγεται από κάποιον ASBR και φέρει το RID και άλλες πληροφορίες προσέγγισης του αποστολέα. Πλημμυρίζεται εντός του αυτόνομου συστήματος και χρησιμοποιείται κατά την προώθηση πακέτου εκτός αυτόνομου συστήματος.

- Τύπου 5 (Autonomous System LSA): Παράγονται από ASBRs, προκειμένου να διαφημίσουν προορισμούς εξωτερικούς του αυτόνομου συστήματος. Πλημμυρίζονται σε όλο το αυτόνομο σύστημα, πλην περιοχών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.
- Τύπου 6: Χρησιμοποιούνται από multicast OSPF εφαρμογές.
- Τύπου 7 και 8: Αφορούν σε διαδρομές εξωτερικές της συνολικής OSPF τοπολογίας.
- Τύπου 10 και 11: Αποσκοπούν σε μελλοντικές επεκτάσεις του πρωτοκόλλου.

Ο τρόπος διάδοσης των πέντε πρώτων και βασικότερων τύπων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-8.



Εικόνα 2-8: Τρόπος διάδοσης βασικότερων τύπων OSPF LSAs.

Για να είναι ωφέλιμη η χρήση multi-area OSPF, το δίκτυο και οι περιοχές πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά. Ιδανικά, στην αρχή της σχεδίασης οι συνδέσεις και το πλάνο διευθυνσιοδότησης λαμβάνουν υπόψη το χωρισμό σε περιοχές, πράγμα ιδιαίτερα χρήσιμο για τη μελλοντική επεκτασιμότητα. Άλλη καλή πρακτική είναι ο ορισμός των περιοχών ως απομονωμένων (stub areas / totally stubby areas) και η ενεργοποίηση του summarization [30]. Ανταλλάσσεται λοιπόν όσο το δυνατόν λιγότερη και συνοπτικότερη πληροφορία μεταξύ των περιοχών. Οπότε η αυξάνεται ταχύτητα σύγκλισης του δικτύου και ελαχιστοποιείται η χρήση των δικτυακών και υπολογιστικών πόρων.

Να σημειωθεί πως ο πίνακας δρομολόγησης εξακολουθεί να περιλαμβάνει πληροφορίες για προορισμούς εκτός της οικείας περιοχής. Ο δρομολογητής αποκτά τη συγκεκριμένη γνώση μέσω συνοπτικών μηνυμάτων (LSAs τύπου 3 και 4) που λαμβάνει από τον ABR και έτσι δεν απαιτείται η επεξεργασία μιας μεγάλου όγκου LSDB. Το μέγεθος του πίνακα δρομολόγησης ενδέχεται να μειωθεί εφαρμόζοντας summarization και απομονώνοντας τις περιοχές.

Ο διαχωρισμός της τοπολογίας σε OSPF areas γίνεται από το διαχειριστή του δικτύου και υπακούει σε ορισμένους βασικούς κανόνες:

- Κάθε ζεύξη ανήκει αποκλειστικά σε μία περιοχή.
- Σε κάθε OSPF area ανατίθεται ένας αριθμός.
- Κάθε περιοχή πρέπει να είναι συνεχής.
- Οι διεπαφές που ανήκουν σε συγκεκριμένο υποδίκτυο τοποθετούνται σε κοινή περιοχή.
- Κάθε nonbackbone area πρέπει να επικοινωνεί με τη backbone area, μέσω τουλάχιστον ενός ABR.

2.2.6 Δομή μηνύματος

Τα πακέτα μεταφοράς μηνυμάτων OSPF δομούνται από μία ειδική κεφαλίδα που ακολουθείται από το κύριο μέρος. Το τελευταίο περικλείει πληροφορίες δρομολόγησης ως LSAs. Τα σημαντικότερα πεδία της κεφαλίδας απεικονίζονται στην Εικόνα 2-9 και είναι [31]:

- Έκδοση (Version) – 8 bits: Υποδεικνύει τη χρησιμοποιούμενη έκδοση του πρωτοκόλλου (1^η, 2^η, ή 3^η).
- Τύπος (Type) – 8 bits: Προσδιορίζει τον τύπο του πακέτου OSPF που ακολουθεί (Hello, DD, LSR, LSU, ή LS Acknowledgement).
- Μήνυμα (Message) – 16 bits: Φέρει το συνολικό μέγεθος του μηνύματος, συμπεριλαμβανομένης της κεφαλίδας.
- IP Πηγής (Source IP address) – 32 bits: Μεταφέρει την IP του κόμβου που δημιούργησε το πακέτο, δηλαδή του αποστολέα.
- Αναγνωριστικό Περιοχής (Area Identification) – 32 bits: Προσδιορίζει τον αριθμό της OSPF area του δρομολογητή που δημιούργησε το μήνυμα.
- Bits Ελέγχου (Check sum) – 16 bits: Πλεονάζοντα bits που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων μετάδοσης του μηνύματος.
- Τύπος Αυθεντικοποίησης (Auth. Type) – 16 bits: Λαμβάνει τις τιμές 0 και 1. Υποδεικνύουν την απουσία αυθεντικοποίησης ή την εφαρμογή της μέσω κωδικού πρόσβασης, αντίστοιχα.
- Αυθεντικοποίηση (Authentication) – 32 bits: Μεταφέρει τα δεδομένα αυθεντικοποίησης.

Version(8)	Type(8)	Message (16)
Source IP address		
Area Identification		
Chcek sum	Auth.Type	
Authentication (32)		

Εικόνα 2-9: Κεφαλίδα μηνύματος ενημέρωσης OSPF [31].

2.3 EIGRP

Το EIGRP είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο [32], [33], αφού συνδυάζει τα χαρακτηριστικά και επωφελείται των πλεονεκτημάτων τόσο της δρομολόγησης με διανύσματα απόστασης όσο και της δρομολόγησης με κατάσταση συνδέσμων. Η εξισορρόπηση φορτίου άνισου κόστους, η τάχιση σύγκλιση, το πλήθος και η ευελιξία των διαθέσιμων κριτηρίων δρομολόγησης αποτελούν στοιχεία υπεροχής του. Επιπλέον, έχει σχεδιαστεί ώστε να συμβάλλει κατά το δυνατόν στην εξοικονόμηση των δικτυακών πόρων. Ως πρωτόκολλο δρομολόγησης διανυσμάτων απόστασης, ο αριθμός των επιτρεπόμενων αλμάτων είναι πεπερασμένος. Το όριο τίθεται στην ικανοποιητική τιμή των 255 αλμάτων. Ένα σοβαρότερο αντίτιμο των πλεονεκτημάτων του EIGRP είναι η σημαντικά αυξημένη πολυπλοκότητα έναντι των λοιπών ευρέως χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων δρομολόγησης.

2.3.1 Ιστορικά Στοιχεία

Το IGRP υπήρξε ένα ακόμα διαδεδομένο πρωτόκολλο εσωτερικής δρομολόγησης διανυσμάτων απόστασης, με κατοχυρωμένη ιδιοκτησία από τη CISCO. Το 1993 η εταιρεία προχώρησε στην αντικατάστασή του με ένα νέο, το EIGRP. Υπόσχονταν καλύτερη ανταπόκριση στις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις των δικτύων, αλλά και του διαδικτύου [34]. Η κύρια ώθηση προς τη μετάβαση από το IGRP στο EIGRP δόθηκε από την ανάγκη υποστήριξης IPv4 διευθυνδιοδότησης άνευ κλάσεων.

Το EIGRP είναι ένα πρωτόκολλο κατοχυρωμένο από τη CISCO. Η εταιρεία διατήρησε την ιδιοκτησία του έως το 2013, οπότε επέτρεψε τη δωρεάν υλοποίηση περιορισμένης έκδοσής

του από άλλους κατασκευαστές και οργανισμούς. Με δημοσίευση του 2016 (RFC 7868 [35]) η CISCO διατηρεί τον έλεγχο του πρωτοκόλλου, κρατώντας τα δικαιώματα συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, σημαντικών στην υλοποίηση μονάχα εξειδικευμένων εφαρμογών, όπως του Dynamic Multipoint Virtual Private Network (DMVPN) και large-scale campus deployment.

Έχουν υλοποιηθεί δύο κύριες εκδόσεις του EIGRP, που χαρακτηρίζονται από τους αριθμούς 0 και 1 [33]. Η έκδοση 1 αναπτύχθηκε ως εξέλιξη της 0, οπότε είναι σταθερότερη και παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις. Αρκετά παλαιές συσκευές ενδέχεται να μην υποστηρίζουν τη νεότερη έκδοση.

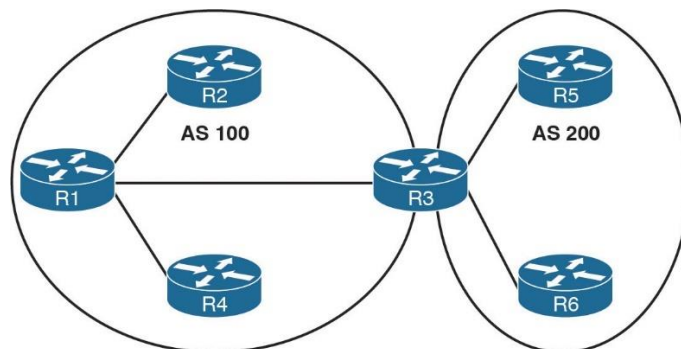
2.3.2 Βασικές Έννοιες και Λογική

Η παρούσα υποενότητα αφιερώνεται στην επεξήγηση βασικών όρων που σχετίζονται με το EIGRP και τη λειτουργία του [32].

Το EIGRP είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την έννοια του Αυτόνομου Συστήματος (Autonomous System - AS). Ορίζεται ως ένα σύνολο συνεργαζόμενων δρομολογητών οι οποίοι αποτελούν μία περιοχή δρομολόγησης. Για την επίτευξη της απρόσκοπτης ανταλλαγής των πληροφοριών εντός ενός EIGRP AS, είναι απαραίτητη η συμφωνία των συσκευών που το απαρτίζουν ως προς αρκετές παραμέτρους. Βασική απαίτηση είναι να χρησιμοποιούν κοινή μέθοδο υπολογισμού του κόστους διαδρομής. Ένας δρομολογητής είναι δυνατόν να μετέχει σε περισσότερα του ενός ASs, οπότε εκτελεί πολλαπλές EIGRP διεργασίες. Από προεπιλογή, γνώση σχετιζόμενη με διαδρομές εντός ενός EIGRP AS δεν μεταβιβάζονται σε άλλο.

Στην Εικόνα 2-10 φαίνεται τμήμα δικτυακής τοπολογίας που απαρτίζεται από δύο ASs, με αναγνωριστικά 100 και 200. Οι δρομολογητές R1, R2, R3 και R4 ανήκουν στο AS 100, ενώ οι R3, R5 και R6 στο AS 200. Γίνεται αντιληπτό ότι οι R1, R2, R4, R5 και R6 εκτελούν μία EIGRP διεργασία. Ανταλλάσσουν πληροφορίες δρομολόγησης εντός του οικείου AS και αγνοούν τις πληροφορίες του άλλου. Ο R3 ανήκει και στα δύο ASs, συνεπώς εκτελεί δύο EIGRP διεργασίες. Γνωρίζει πληροφορίες και των δύο ASs, χωρίς να τις μεταφέρει από το ένα στο άλλο.

Τονίζεται πως η έννοια του EIGRP AS δεν ταυτίζεται με τη γενικότερη έννοια ενός AS. Το γενικότερο AS περιλαμβάνει το σύνολο των EIGRP AS μιας τοπολογίας.



Εικόνα 2-10: Τοπολογία EIGRP, χωρισμένη σε δύο ASS [32].

Το EIGRP δύναται να υποστηρίξει πλήθος routed protocols. Οι διαδικασίες δρομολόγησης και προώθησης στο δίκτυο των παραγόμενων από το εκάστοτε τέτοιο πρωτόκολλο πακέτων αναπτύσσονται και εκτελούνται ως Ενότητες Εξαρτώμενες από το Πρωτόκολλο (Protocol Dependent Modules – PDMs). Προς στιγμήν υποστηρίζονται πλήρως τα πρωτόκολλα IPv4 και IPv6. Εφόσον παραστεί η ανάγκη, υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης νέων PDMs, όπως για το AppleTalk ή το IPX.

Οι έννοιες της Διαδρομής Διαδοχής (Successor Route), του Διαδόχου (Successor), της Εφικτής Απόστασης (Feasible Distance) και της Αναφερόμενης Απόστασης (Reported Distance) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δρομολόγηση βάσει του EIGRP. Οι παραπάνω όροι εξετάζονται από τη σκοπιά συγκεκριμένου δρομολογητή της τοπολογίας.

Η Successor Route ορίζεται ως το μονοπάτι ελαχίστου κόστους προς συγκεκριμένο προορισμό. Δηλαδή κάθε άλλη διαδρομή προς τον προορισμό αυτό, εάν υπάρχει, θα έχει μεγαλύτερο κόστος από αυτό της Successor Route. Ο πρώτος δρομολογητής στον οποίο αποστέλλεται το πακέτο (next hop router), όταν προωθείται μέσω της Successor Route, καλείται Successor.

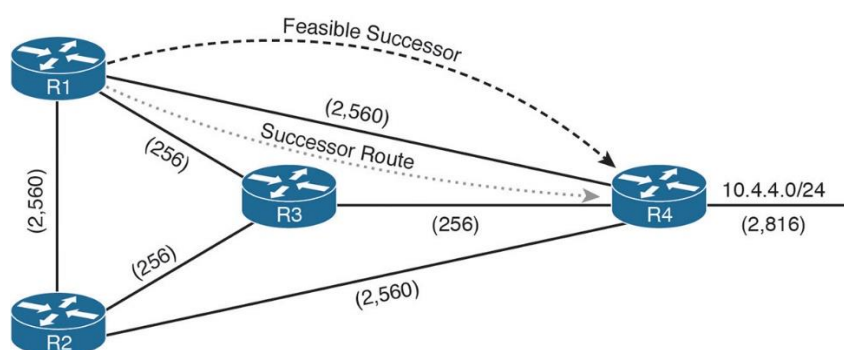
Το ελάχιστο κόστος προσέγγισης συγκεκριμένου κόμβου, μέσω διαθέσιμου μονοπατιού, ονομάζεται Feasible Distance. Υπολογίζεται τοπικά από το δρομολογητή, βάσει πληροφοριών της δικτυακής τοπολογίας. Με άλλα λόγια, είναι το κόστος της Successor Route προς τον επιθυμητό προορισμό.

Reported Distance ονομάζεται η τιμή ελαχίστου κόστους προσέγγισης προορισμού, όπως διαφημίζεται από άλλο δρομολογητή του AS. Για το δρομολογητή που διαφημίζει τη διαδρομή αποτελεί Feasible Distance προς το συγκεκριμένο προορισμό. Το κόστος κάθε διαδρομής υπολογίζεται μέσω κατάλληλης μαθηματικής σχέσης, η οποία αναλύεται στη συνέχεια.

Βασικό πλεονέκτημα του EIGRP έναντι των λοιπών ευρέως χρησιμοποιούμενων IGP's αποτελεί η τάχιστα απόκριση σε μεταβολές της τοπολογίας. Επιτυγχάνεται χάρη στον αλγόριθμο DUAL, που διατηρεί εύκολα προσβάσιμες πληροφορίες εναλλακτικών διαδρομών, ώστε εφόσον απαιτηθεί, να γίνει απευθείας μετάβαση σε αυτές. Αντίθετα, τα υπόλοιπα υπό μελέτη IGP's αναζητούν τις πληροφορίες αυτές κατόπιν εμφάνισης του συμβάντος.

Μια διαδρομή (διαφορετική της Successor Route) προς κάποιον κόμβο του δικτύου συγκαταλέγεται στις εναλλακτικές, αν και μόνο αν εξασφαλιστεί ότι δεν περιέχει βρόχο. Ο περιορισμός ικανοποιείται όταν ισχύει η επονομαζόμενη Συνθήκη Εφικτότητας (Feasibility Condition): Μία διαδρομή με Reported Distance μικρότερη από την τοπικά υπολογιζόμενη Feasible Distance, είναι απαλλαγμένη από βρόχους, καθώς ο δρομολογητής δεν περιλαμβάνεται σε αυτή για δεύτερη φορά. Μία διαδρομή που ικανοποιεί τη Feasibility Condition διατηρείται ως εναλλακτική και αποτελεί Υποψήφια Διαδρομή Διαδοχής (Feasible Successor).

Έστω ότι είναι επιθυμητή η προσέγγιση του υποδικτύου 10.4.4.0/24, ξεκινώντας από τον R1 (Εικόνα 2-11). Οι τιμές εντός παρένθεσης αναφέρονται στο κόστος των αντίστοιχων ζεύξεων. Γίνεται αντιληπτό, ότι ο προορισμός μπορεί να προσεγγιστεί μέσω αρκετών διαφορετικών διαδρομών. Ως Successor Route ορίζεται η διαδρομή R1 – R3 – R4, καθώς παρουσιάζει το ελάχιστο κόστος ($256 + 256 + 2816 = 3328$). Successor είναι ο R3, αφού σε αυτόν προωθείται αρχικά το πακέτο. Η τιμή 3328 είναι η Feasible Distance. Ο R3 διαφημίζει τον προορισμό στον R1 με Reported Distance 3072. Η διαδρομή R1 – R4 αποτελεί Feasible Successor, καθώς ισχύει η Feasibility Condition ($2816 < 3328$).



Εικόνα 2-11: Βασικές έννοιες σχετικές με το EIGRP [32].

Πλήθος πληροφοριών σχετικών με τις διαδρομές (Successor Route και εναλλακτικές) αποθηκεύονται σε ειδικούς πίνακες, τους Πίνακες Τοπολογίας (Topology Tables) [36], [32] οι οποίοι διατηρούνται στη μνήμη τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memory – RAM) κάθε

δρομολογητή. Ο πίνακας τοπολογίας είναι μία βάση δεδομένων που διατηρεί από προεπιλογή μέχρι έξι πιθανές διαδρομές προς κάθε δίκτυο ή υποδίκτυο εντός του οικείου AS. Κάθε εγγραφή του πίνακα περιλαμβάνει το δίκτυο ή υποδίκτυο προορισμού συνοδευόμενο από την αντίστοιχη μάσκα υποδικτύου, το γειτονικό δρομολογητή που διαφήμισε τη διαδρομή (ή τη διεπαφή λήψης της διαφήμισης), τη Reported Distance προς τον εξεταζόμενο προορισμό και τις μετρικές υπολογισμού της. Ο πίνακας τοπολογίας περιλαμβάνει και τις διαδρομές ελαχίστου κόστους, οι οποίες αντιγράφονται στον πίνακα δρομολόγησης. Προς μείωση του χρόνου σύγκλισης, οι εναλλακτικές διαδρομές διατηρούνται στον πίνακα τοπολογίας. Εφόσον απαιτηθεί, η μετάβαση στην εναλλακτική διαδρομή ελαχίστου κόστους γίνεται τάχιστα.

Κάθε εγγραφή του πίνακα τοπολογίας χαρακτηρίζεται από μία μεταβλητή κατάστασης, που λαμβάνει τις τιμές «Παθητική» (Passive – τυπώνεται ως P) ή «Ενεργητική» (Active – τυπώνεται ως A). Η Passive υποδεικνύει σταθερότητα του συγκεκριμένου τμήματος της δικτυακής τοπολογίας, οπότε οι αντίστοιχες διαδρομές μπορούν να προωθήσουν πακέτα. Οι διαδρομές (πιθανότατα όχι το σύνολό τους) μεταβαίνουν σε κατάσταση Active κατά τη συντέλεση μεταβολών στην τοπολογία και δεν μεταφέρουν πακέτα. Μόλις επιτευχθεί η σύγκλιση, οι διαδρομές επιστρέφουν στην κατάσταση P.

2.3.3 Υπολογισμός Κόστους Διαδρομής

Ο υπολογισμός του κόστους διαδρομής στο EIGRP συντελείται συνδυάζοντας διαφορετικές παραμέτρους, οπότε η δρομολόγηση καθίσταται αποτελεσματικότερη [32], [37]. Η κλασική μετρική υπολογισμού του κόστους διαδρομής (classic metric) του πρωτοκόλλου δίνεται από τη μαθηματική σχέση:

$$\left(K_1 * BW + \frac{K_2 * BW}{256 - Load} + K_3 * Delay \right) * \frac{K_5}{K_4 + Reliability}$$

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση, τα πιθανά κριτήρια δρομολόγησης είναι:

- Εύρος ζώνης (Bandwidth – BW): Αναφέρεται στην ελάχιστη τιμή εύρους ζώνης που παρατηρείται σε ζεύξη της διαδρομής. Ως εύρος ζώνης λαμβάνεται αυτό που έχει οριστεί στη διεπαφή. Εκφράζεται σε kbps και κλιμακώνεται για ζεύξεις ταχύτητας έως 10 Gbps (10^7). Το κλιμακωμένο BW υπολογίζεται ως:

$$Scaled\ BW = \frac{10^7}{BW}$$

όπου BW το ελάχιστο εύρος ζώνης της διαδρομής, σε kilobits per second

- Φόρτος (Load): Το ενεργό φορτίο τηλεπικοινωνιακής κίνησης στη διαδρομή, εκφρασμένο με έναν αριθμό από 0 έως 255. Η τιμή 255 αντιστοιχεί σε 100% «φορτωμένη» διαδρομή.
- Καθυστέρηση (Delay): Αναφέρεται στη συνολική καθυστέρηση μετάδοσης ενός bit μέσω της εξεταζόμενης διαδρομής και κλιμακώνεται σε δεκάδες microseconds. Η κλιμακωμένη καθυστέρηση υπολογίζεται ως:

$$Scaled\ Delay = \frac{Delay}{10}$$

- Αξιοπιστία (Reliability): Εκφράζει την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων και αποδίδεται με έναν αριθμό από 0 έως 255. Η τιμή 0 αντιστοιχεί σε 100% πιθανότητα ανεπιτυχούς μετάδοσης του πακέτου, ενώ το 255 εκφράζει μηδενική τιμή της ίδιας πιθανότητας.

Οι παράμετροι K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 (K values), καθορίζουν ποια εκ των προαναφερθέντων κριτηρίων αξιοποιούνται στον υπολογισμό του κόστους και με ποιο βάρος. Παρατηρώντας τη μαθηματική σχέση γίνεται αντιληπτό ότι μία παράμετρος δεν αντιστοιχεί απαραίτητα σε μοναδικό κριτήριο. Ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να μεταβάλλει τις K values, ώστε να επιβάλλει το επιθυμητό κριτήριο δρομολόγησης. Οι K values λαμβάνουν ακέραιες τιμές εντός του διαστήματος [0,128].

Οι προεπιλεγμένες τιμές των K values, που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα, είναι: $K_1 = K_3 = 1$ και $K_2 = K_4 = K_5 = 0$. Έτσι λαμβάνεται υπόψιν αποκλειστικά το κλιμακωμένο εύρος ζώνης και η κλιμακωμένη καθυστέρηση. Άρα η σχέση γίνεται:

$$256 * \left(\frac{10^7}{BW} + \frac{Total\ Delay}{10} \right)$$

Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη της τεχνολογίας αύξησε σημαντικά το εύρος ζώνης των ζεύξεων. Το γεγονός επέβαλε μεταβολές στην κλιμάκωση του εύρους ζώνης και της καθυστέρησης, καθώς όταν εκφράζονται βάσει των παραπάνω σχέσεων, ζεύξεις με «ταχύτητα» μεγαλύτερη μίας οριακής τιμής εξάγουν την ίδια μετρική, οδηγώντας σε εσφαλμένες αποφάσεις.

Προς αντιμετώπιση του προβλήματος, εισήχθη η διευρυμένη μετρική υπολογισμού κόστους διαδρομής (wide metrics formula), που δίδεται από τη μαθηματική σχέση:

$$\left(K_1 * BW + \frac{K_2 * BW}{256 - Load} + K_3 * Delay + K_6 * Extended \right) * \frac{K_5}{K_4 + Reliability}$$

Οι wide metrics χρησιμοποιούνται για των υπολογισμό του κόστους ζεύξεων από 1 gigabit έως 4.2 terabits. Στις wide metrics προστέθηκε η μεταβλητή K_6 . Αντιστοιχεί σε έναν παράγοντα Extended, ο οποίος μπορεί να εκφράζει το jitter, την ενέργεια ή άλλο μέγεθος. Το εύρος ζώνης κλιμακώνεται ως εξής:

$$Scaled\ BW = \frac{10^7 * 65536}{BW}$$

όπου η τιμή 65536 εκφράζει μία σταθερά (wide-scale constant)

Η καθυστέρηση για εύρος ζώνης κάτω του 1 gigabit υπολογίζεται ως:

$$Scaled\ Delay\ (below\ 1\ gbit) = \frac{Delay * 65536}{10}$$

όπου 65536 η wide-scale constant

ενώ για εύρος ζώνης μεγαλύτερο του 1 gigabit ως:

$$Scaled\ Delay\ (above\ 1\ gbit) = \frac{\frac{10^7 * 65536}{10}}{BW}$$

όπου 65536 η wide-scale constant

Οι προεπιλεγμένες τιμές των K values των wide metrics είναι $K_1 = K_3 = 1$ και $K_2 = K_4 = K_5 = K_6 = 0$, οπότε το αποτέλεσμα ταυτίζεται με την περίπτωση των classic metrics.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι classic metrics είναι προς τα πίσω συμβατές με αυτές του IGRP και οι wide metrics με τις classic metrics. Αυτό εξασφαλίζεται χρησιμοποιώντας κοινές τιμές των K values, καθώς και από τη δομή των μαθηματικών εκφράσεων του κόστους. Οι συσκευές αντιλαμβάνονται αυτόματα το εύρος ζώνης κάθε ζεύξης, οπότε χρησιμοποιούν τις μετρικές της κατάλληλης κατηγορίας. Βέβαια, η μεικτή χρήση συσκευών που χρησιμοποιούν διαφορετική κατηγορία μετρικών δύναται να οδηγήσει σε μη βέλτιστες αποφάσεις.

2.3.4 Λειτουργία

Η σύναψη και διατήρηση γειτονικών σχέσεων μεταξύ άμεσα συνδεδεμένων δρομολογητών αποτελεί προϋπόθεση για τη συμπλήρωση των πινάκων δρομολόγησης και την προώθηση πακέτων στο δίκτυο και στην περίπτωση του EIGRP. Το πρωτόκολλο αυτό ορίζει πέντε διαφορετικούς τύπους πακέτων που ανταλλάσσονται μεταξύ γειτονικών δρομολογητών, οι οποίοι είναι:

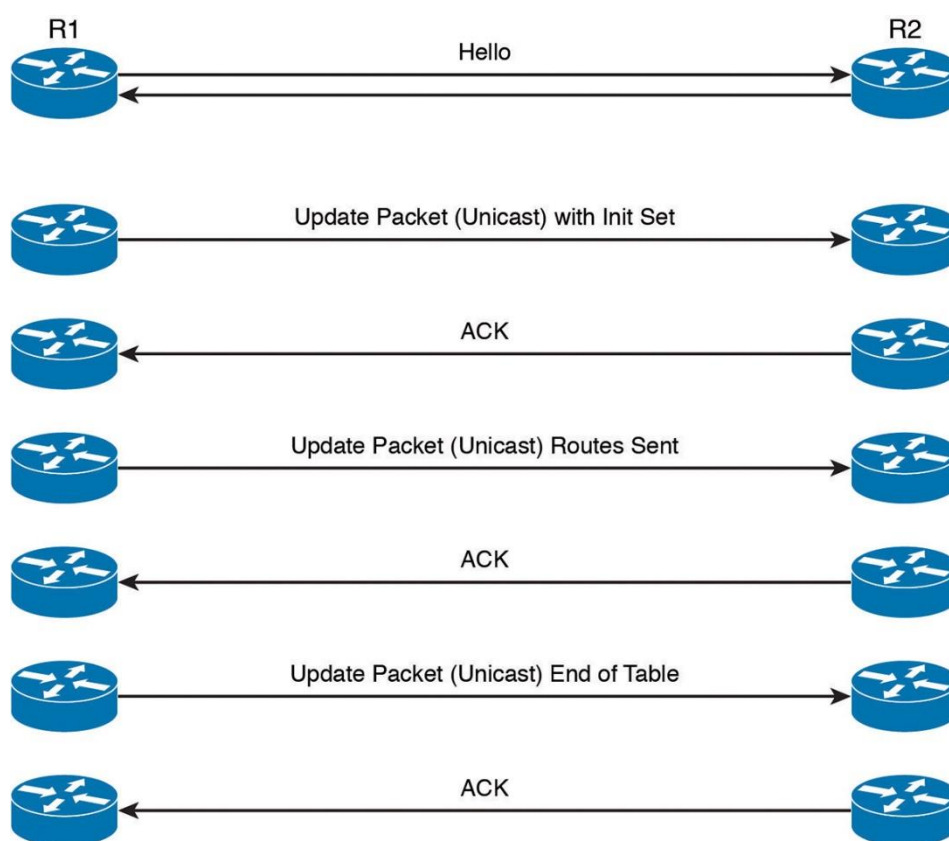
- Τύπου 1 (Hello): Μικρά πακέτα που στέλνονται περιοδικά. Στοχεύουν στην ανακάλυψη γειτονικών συσκευών ή ζευξέων που έχουν καταστεί ανενεργές.
- Τύπου 2 (Request): Αποστέλλονται από ένα δρομολογητή σε έναν ή περισσότερους γειτονικούς του, ζητώντας συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με την οικεία τοπολογία.
- Τύπου 3 (Update): Χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση μηνυμάτων που σχετίζονται με τη δρομολόγηση και τη δυνατότητα προσέγγισης κόμβων εντός της οικίας τοπολογίας.
- Τύπου 4 (Query): Αποστέλλονται σε γειτονικούς δρομολογητές κατά τη διάρκεια της σύγκλισης, προς αναζήτηση εναλλακτικών διαδρομών.
- Τύπου 5 (Reply): Πακέτα απάντησης σε Query. Περιλαμβάνουν πληροφορίες εντοπισμού των εναλλακτικών διαδρομών προς συγκεκριμένο δικτυακό κόμβο, εφόσον υπάρχουν.

Η σύναψη γειτονικών σχέσεων μεταξύ EIGRP δρομολογητών ξεκινά ανταλλάσσοντας πακέτα hello μεταξύ τους και έτσι η μία συσκευή πληροφορείται την ύπαρξη της άλλης. Όταν ένας δρομολογητής λάβει το πακέτο hello, προχωρά άμεσα στον έλεγχο των προϋποθέσεων γειτονίας. Συγκεκριμένα, οι δύο δρομολογητές πρέπει να ανήκουν στο ίδιο AS, να υπολογίζουν το κόστος διαδρομής βάσει κοινής μετρικής και οι IP διευθύνσεις που έχουν αποδοθεί στις θύρες σύνδεσής τους να υποδεικνύουν κοινό υποδίκτυο και άρα να συνοδεύονται και από κοινή μάσκα υποδικτύου. Επιπλέον, απαιτείται συμβατότητα των μεθόδων και των παραμέτρων αυθεντικοποίησης των δύο συσκευών.

Κατά τη σύναψη της γειτονικής σχέσης, οι δύο δρομολογητές ανταλλάσσουν τους πλήρεις πίνακες δρομολόγησής τους. Με τον τρόπο αυτό εκτός, από τον πίνακα δρομολόγησης, σχηματίζεται ή εμπλουτίζεται και ο πίνακας τοπολογίας με πληροφορίες για εναλλακτικές διαδρομές. Όπως έχει αναφερθεί, αυτό εξυπηρετεί την τάχιστα σύγκλιση.

Αντίθετα με τα λοιπά IGP που μελετώνται, η διατήρηση των γειτονικών σχέσεων στο EIGRP δεν βασίζεται στην περιοδική διαφήμιση των δικτύων και υποδικτύων της περιοχής δρομολόγησης (AS), υπό συνθήκες σταθερής λειτουργίας. Μεταξύ των γειτόνων ανταλλάσσονται αποκλειστικά πακέτα ενημέρωσης σχετικά με μεταβολές του δικτύου.

Η σύναψη γειτονίας μεταξύ δύο δρομολογητών, έστω R1 και R2, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-12 (από τη σκοπιά του R1). Κατά το πρώτο βήμα, ο R1 αποστέλλει πακέτο χαιρετισμού στον R2 και κατόπιν λαμβάνει αντίστοιχο από αυτόν. Αφού ελέγξει τη συμβατότητα των παραμέτρων του με αυτές του R2, ξεκινά την αποστολή πακέτων ενημέρωσης (update packets) προς τον R2. Ο αριθμός των πακέτων αυτών είναι ο απαιτούμενος ώστε να προωθήσει στο γείτονα τον συνολικό πίνακα δρομολόγησής του. Τα πακέτα ενημέρωσης αποστέλλονται αποκλειστικά στον R2 (unicast) και η μετάδοση καθενός συνοδεύεται από τη λήψη αντίστοιχης επιβεβαίωσης (ACK). Αργότερα, ο R1 θα λάβει με αντίστοιχο τρόπο την πληροφορία που κατέχει ο R2.



Εικόνα 2-12: Διαδικασία σύναψης γειτονικών σχέσεων στο EIGRP [32].

Η περιοδική αποστολή πακέτων στο EIGRP είναι περιορισμένη και αποσκοπεί αποκλειστικά στην ανίχνευση συμβάντων, κάτι που δεν γίνεται εύκολα με διαφορετικό τρόπο. Τα πακέτα χαιρετισμού (hellos) χρησιμοποιούνται και για τη συγκεκριμένη λειτουργία, καθώς όταν ένας δρομολογητής λάβει ένα τέτοιο πακέτο, αντιλαμβάνεται ότι η αντίστοιχη ζεύξη παραμένει ενεργή.

Τα *hello*s και οι αντίστοιχοι μετρητές (λογική και προεπιλεγμένες τιμές) έχουν σχεδιαστεί ώστε να συμβάλλουν στην ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση του δικτύου και στην επίτευξη γρήγορης σύγκλισης, μέσω της σύντομης ανίχνευσης του συμβάντος. Το μέγεθος των *hello*s είναι το μικρότερο δυνατό, οπότε συμβάλλουν ελάχιστα σε τυχόν συμφόρηση του δικτύου. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής δύο διαδοχικών πακέτων *hello* (*Hello Interval*) διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της χρησιμοποιούμενης ζεύξης, οπότε για «γρήγορες» ζεύξεις η προεπιλεγμένη τιμή του τίθεται στα 5 δευτερόλεπτα ενώ για «αργές» στα 60 δευτερόλεπτα. Επιτυγχάνεται λοιπόν συμβιβασμός μεταξύ της επιβάρυνσης του δικτύου, που είναι μεγαλύτερη για ζεύξεις περιορισμένου εύρους ζώνης και του χρόνου που μεσολαβεί από την εμφάνιση ενός προβλήματος μέχρι την ανίχνευσή του. Βέβαια ο χειριστής των δικτυακών συσκευών έχει τη δυνατότητα τροποποίησης της τιμής του *Hello Interval*. Μία ακόμα μεταβλητή χρονομέτρου του EIGRP είναι η *Hold Time*. Αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα για το οποίο ένας δρομολογητής θεωρεί μία ζεύξη ενεργή, ενώ έχει πάψει να λαμβάνει πακέτα χαιρετισμού από αυτή. Συνήθως το *Hold Time* τίθεται τριπλάσιο από το *Hello Interval*. Κατά τον ορισμό της τιμής του ενός χρονομέτρου είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη και η τιμή του άλλου.

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο το EIGRP ελαχιστοποιεί την επιβάρυνση του δικτύου είναι η μετάδοση πακέτων σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα (*multicast*) αντί σε όλους (*broadcast*), όταν κάτι τέτοιο είναι εφικτό. Οπότε λαμβάνουν και επεξεργάζονται τα πακέτα μόνο οι κόμβοι που τα αναμένουν και δεν επιφορτίζονται με τη διαχείρισή τους οι υπόλοιποι. Για να γίνει αυτό, το πρωτόκολλο δεσμεύει το σύνολο των IP διευθύνσεων 224.0.0.10 και τη διεύθυνση MAC 01:00:5e:00:00:0a, η οποία παίζει τον ίδιο ρόλο από τη σκοπιά του δεύτερου επιπέδου αναφοράς του OSI. Το ίδιο το EIGRP χαρακτηρίζεται από τον αριθμό πρωτοκόλλου (*Internet Protocol Number*) 88.

2.3.5 RTP

Στο επίπεδο μεταφοράς το EIGRP χρησιμοποιεί ένα εξειδικευμένο πρωτόκολλο, το *Reliable Transport Protocol* (RTP) [32]. Αποτελεί ιδιοκτησία της CISCO και σχεδιάστηκε ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες του EIGRP. Εξασφαλίζει την ανάκτηση της σειράς των *multicast* πακέτων στο δέκτη και την επιβεβαίωση ορθής λήψης ορισμένων πακέτων από αυτόν. Χάρη στο RTP η αποστολή ορισμένων τύπων πακέτων επιβεβαιώνεται, ενώ άλλων όχι. Αυτό δεν θα ήταν εφικτό με το TCP ή το UDP που χρησιμοποιούν τα λοιπά υπό μελέτη πρωτόκολλα.

Η μετάδοση των πακέτων στο RTP είναι σειριακή και υλοποιείται με τη χρήση ουράς αναμονής, ενώ υποβοηθάται από τον αριθμό ακολουθίας (sequence number) και τον αριθμό επιβεβαίωσης (acknowledgement number) της κεφαλίδας του EIGRP. Ο αριθμός ακολουθίας είναι ένας (μοναδικός για την επικοινωνία) αύξων αριθμός που λαμβάνει κάθε πακέτο, ενώ ο αριθμός επιβεβαίωσης ταυτίζεται με τον αριθμό ακολουθίας του πακέτου στη λήψη του οποίου αναφέρεται.

Η απόδοση της συντομογραφίας RTP στο πρωτόκολλο μεταφοράς του EIGRP είναι λίγο άστοχη. Στο χώρο των δικτύων συνηθέστερα περιγράφει το Real-time Transport Protocol, που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση φωνής σε δίκτυα IP (Voice over IP – VoIP).

2.3.6 Δομή Μηνύματος Ενημέρωσης

Τα πακέτα ενημέρωσης του EIGRP [38] είναι κατά το δυνατόν μικρά και απλά, προς εξοικονόμηση δικτυακών και υπολογιστικών πόρων. Κάθε τέτοιο πακέτο περιλαμβάνει μία κεφαλίδα των 20 bytes που ακολουθείται από το σώμα (payload) του πακέτου. Το συνολικό μέγεθος του πακέτου ενημέρωσης είναι μεταβλητό και περιορίζεται μόνο από τη Μέγιστη Μονάδα Μεταφοράς (Maximum Transmission Unit – MTU) του IP. Το payload περιλαμβάνει ένα σύνολο Type-Length-Values (TLVs), που αποτελούν έναν δομημένο τρόπο αποστολής της πληροφορίας δρομολόγησης. Τα TLVs, που συναντώνται και σε άλλα πρωτόκολλα, περιλαμβάνουν τα εξής βασικά πεδία (Εικόνα 2-13):

- Τύπος (Type): Είδος μεταφερόμενου μηνύματος.
- Μήκος (Length): Συνολικό μέγεθος του TLV.
- Τιμή (Value): Φέρει το ίδιο το μήνυμα.

Τα πεδία της κεφαλίδας είναι:

- Έκδοση (Version) – 4 bits: Αναφέρεται στην έκδοση του EIGRP. Από τη στιγμή της δημιουργίας του πρωτοκόλλου λαμβάνει την τιμή 2.
- Κωδικός (Opcode) – 4 bits: Κωδικός πακέτου που υποδεικνύει τον τύπο του, ως εξής: 1 = update, 3 = query, 4 = reply, 5 = hello/ack, 10 = SIA query, 11 = SIA reply
- Δυαδικά Ψηφία Ελέγχου (Checksum) – 24 bits: Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ορθής λήψης του πακέτου.
- Flags – 32 bits: Σύνολο λογικών (Boolean) μεταβλητών, η τιμή των οποίων υποδεικνύει συγκεκριμένες καταστάσεις και γεγονότα.
- Αριθμός Ακολουθίας (Sequence Number) – 32 bits: Διατηρεί τον μοναδικό για την επικοινωνία αριθμό ακολουθίας που αποδόθηκε στο πακέτο. Χρησιμοποιείται από το RTP.

- Επιβεβαίωση (Acknowledgement) – 32 bits: Διατηρεί τον αριθμό επιβεβαίωσης που αντιστοιχεί στο τελευταίο πακέτο που ελήφθη από το γείτονα. Το πεδίο χρησιμοποιείται από το RTP και διακρίνει τα πακέτα hello από τα ack.
- Ταυτότητα Εικονικού Δρομολογητή (Virtual Router ID) – 16 bits: Μοναδικός αριθμός που αποδίδεται σε κάθε (εικονικό) δρομολογητή. Η τιμή του υποδεικνύει εάν πρόκειται για unicast ή multicast πακέτο.
- Αριθμός Αυτόνομου Συστήματος (Autonomous System Number) – 16 bits: Διατηρεί τον αριθμό του EIGRP AS.

Octet	<----- 32 bits ----->		
4	Version=2	Opcode	Checksum
8	Flags		
12	Sequence Number		
16	Acknowledgement		
20	Virtual Router ID	Autonomous System Number	
24	<u>TLVs</u>		
28	<u>TLVs</u>		

Εικόνα 2-13: Δομή μηνύματος ενημέρωσης EIGRP [38].

2.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Τα τρία υπό μελέτη πρωτόκολλα μετρούν αρκετά χρόνια ύπαρξης. Συνεπώς το ζήτημα της συγκριτικής αποτίμησης των επιδόσεών τους, ως προς αρκετούς βασικούς δείκτες επίδοσης (Key Performance Indicators – KPIs), δεν είναι νέο.

Πλήθος ερευνητικών εργασιών των τελευταίων δεκαετιών πραγματεύονται το ζήτημα της σύγκρισης των τριών πρωτοκόλλων, αναφορικά με το χρόνο σύγκλισης. Κατά κοινή ομολογία, διαπιστώνεται η σημαντική υπεροχή του EIGRP ως προς το χαρακτηριστικό αυτό. Ακολουθεί το OSPF, με γενικά αποδεκτούς χρόνους. Η συνεργασία του με εξειδικευμένα σύγχρονα πρωτόκολλα και τεχνικές βελτιώνει πολύ το χρόνο σύγκλισής του [26], καθιστώντας τον συγκρίσιμο με αυτόν του EIGRP. Το RIP χαρακτηρίζεται από αρκετά μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου, πράγμα που συγκαταλέγεται στους σημαντικούς παράγοντες της τάσης προς κατάργησή του.

Στις περισσότερες εργασίες, η αποτίμηση των χρόνων σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων λαμβάνει χώρα μέσω προσομοιώσεων. Αυτό διότι η μέτρηση σε πραγματική τοπολογία είναι μία απαιτητική προσεγγιστική διαδικασία, ενώ απαιτεί την πρόσβαση σε δικτυακό εξοπλισμό υψηλού κόστους, τη στιγμή που δεν εξυπηρετεί συνδρομητές. Ιδιαίτερα

συχνή είναι η επιλογή του προσομοιωτή Optimized Network Engineering Tool (OPNET), καθώς είναι εύχρηστος και διαθέτει υλοποιημένα τα πρωτόκολλα, εξασφαλίζοντας ελάχιστη πιθανότητα σφαλμάτων.

Οι συγγραφείς της ερευνητικής δημοσίευσης [39] προσομοίωσαν σε OPNET δύο σενάρια διαδοχικών συγκλίσεων, που έρχονται ως αποτέλεσμα συχνής διακοπής της λειτουργίας επιλεγμένης ζεύξης και κατόπιν επαναφοράς της. Από τις προσομοιώσεις επιβεβαιώθηκε η παραπάνω κατάταξη των τριών πρωτοκόλλων ως προς την παράμετρο αυτή. Τα ίδια γενικά αποτελέσματα αναφέρονται και στη δημοσίευση [40], όπου προσομοιώνεται σε OPNET μία μεγαλύτερη τοπολογία τεσσάρων υποδικτύων. Μέσω αυτής διακινούνται πακέτα αρκετών εφαρμογών, αντίστοιχα με ένα πραγματικό δίκτυο. Οι ζεύξεις που διακόπτονται και ανακάμπτουν συνδέουν υποδίκτυα. Εδώ, ο χρόνος σύγκλισης του OSPF φαίνεται να προσεγγίζει περισσότερο αυτόν του EIGRP.

Οι συγγραφείς της δημοσίευσης [41] καταλήγουν στα ίδια συμπεράσματα αναφορικά με το χρόνο σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων, ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία με αυτήν που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Η αποτίμηση των επιδόσεων λαμβάνει χώρα μέσω προσομοιώσεων σε OPNET, ενώ τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πραγματικής τοπολογίας. Αποτελείται από πέντε δρομολογητές CISCO, σε παρόμοια συνδεσμολογία με αυτή της παρούσας εργασίας. Οι συγγραφείς μελετούν επίσης τις επιπτώσεις της «βλάβης» σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (video και ήχος).

Αναφορικά με το χρόνο αρχικής σύγκλισης, (αφορά δηλαδή το σχηματισμό των πινάκων δρομολόγησης μετά την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των συσκευών) το OSPF παρουσιάζει τη χειρότερη επίδοση [42]. Ακολουθεί το RIP, συχνά με οριακή διαφορά [41]. Και πάλι το EIGRP υπερέχει σημαντικά.

Τα τρία πρωτόκολλα έχουν αποτιμηθεί και με βάση άλλες παραμέτρους. Μία διαχρονικά σημαντική για την επίδοση του δικτύου μετρική αποτελεί η καθυστέρηση. Μέσω των προσομοιώσεων αποδείχθηκε ότι, σε επίπεδο ζεύξης, το EIGRP εμφανίζει την ελάχιστη. Ακολουθεί το OSPF και τέλος το RIP [39], [43]. Συχνά, η τιμή για το RIP παρουσιάζεται αρκετά αυξημένη [42].

Οι απλούστεροι αλγόριθμοι υπερέχουν ως προς την επιβάρυνση του δικτύου με πλεονάζουσα πληροφορία (overhead). Έτσι, το RIP εμφανίζει την καλύτερη συμπεριφορά, ακολουθεί αρκετά κοντά το OSPF και τέλος το EIGRP. Στις προσομοιώσεις, το overhead μετρείται απευθείας ή αναλύοντας το ποσοστό χρήσης ζεύξης και το throughput ζεύξης που μεταφέρει αποκλειστικά πληροφορίες ελέγχου [39], [42].

Πλήθος ερευνητικών δημοσιεύσεων συγκρίνουν τα τρία πρωτόκολλα βάσει των επιδόσεων (κυρίως καθυστέρηση και χρόνος απόκρισης εφαρμογής) ποικίλων εφαρμογών που εκτελούνται στο δίκτυο όπου εφαρμόζονται. Αποδεικνύεται η γενική υπεροχή του EIGRP για τις πλέον συνηθισμένες εφαρμογές (π.χ. File Transfer Protocol (FTP), e-mail, Hypertext Transfer Protocol (HTTP), Video streaming, μετάδοση φωνής) [44], [45]. Επιτυγχάνει μικρότερη καθυστέρηση και μικρότερη διακύμανση καθυστέρησης (jitter). Ακολουθεί το OSPF, ενώ οι επιδόσεις του RIP εμφανίζονται αρκετά χειρότερες. Βέβαια, αναφέρονται περιπτώσεις υπεροχής κάθε πρωτοκόλλου για συγκεκριμένες εφαρμογές και υπό συγκεκριμένες συνθήκες [40].

Έχουν εκπονηθεί αρκετές εργασίες αποτίμησης του χρόνου σύγκλισης και της καθυστέρησης των τριών πρωτοκόλλων, εξομοιώνοντας δικτυακές τοπολογίες στο λογισμικό General Network Simulator 3 (GNS3). Ένας εξομοιωτής «τρέχει» το λειτουργικό σύστημα της κάθε συσκευής και λαμβάνει υπόψη σχεδόν κάθε παράμετρο της πραγματικής τοπολογίας. Έτσι, η συμπεριφορά και οι μετρικές που εξάγονται από την εξομοίωση έρχονται σχεδόν σε ταύτιση με της αντίστοιχης πραγματικής τοπολογίας. Οι συγγραφείς της εργασίας [46] συνέκριναν στον GNS3, τα τρία IGP ως προς το χρόνο σύγκλισης κατόπιν συμβάντος, την ολική καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου από τον αποστολέα στον παραλήπτη και το throughput σε μία αρκετά μεγάλη δικτυακή τοπολογία μιας υποτιθέμενης επιχείρησης. Κατέληξαν στην ίδια κατάταξη των πρωτοκόλλων ως προς το χρόνο σύγκλισης. Ως προς την καθυστέρηση και το throughput, οι επιδόσεις του RIP αποδείχθηκαν χειρότερες έναντι των άλλων δύο πρωτοκόλλων. Στη συγκεκριμένη τοπολογία, το OSPF υπερέχει του EIGRP ως προς τις παραμέτρους αυτές, ωστόσο η διαφορά δεν είναι μεγάλη. Η δημοσίευση [47] πραγματεύεται αντίστοιχη εξομοίωση, επίσης αρκετά μεγάλης δικτυακής τοπολογίας. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα αφορούν το χρόνο σύγκλισης και την καθυστέρηση και γενικά ταυτίζονται με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης.

Σήμερα, η χρήση του RIP είναι αρκετά περιορισμένη λόγω των μειονεκτημάτων του. Στον αντίποδα, τα χαρακτηριστικά των άλλων δύο πρωτοκόλλων εξελίσσονται διαρκώς ώστε να ανταποκριθούν στις ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις, αλλά και να συνεργαστούν με τις νέες τάσεις και τεχνολογίες. Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες αφορούν το πλέον δημοφιλές πρωτόκολλο, το OSPF [26].

Έχουν αναπτυχθεί επεκτάσεις του OSPF, ώστε να εκτελεί δρομολόγηση σε Αυτοσχηματιζόμενα Δίκτυα Κινητών Συσκευών (Mobile Ad hoc Networks – MANETs) [48]. Πρόκειται για δίκτυα που σχηματίζονται και οργανώνονται αυτόματα και κατά απαίτηση. Βασική πρόκληση για το πρωτόκολλο αποτελούν οι διαρκείς μεταβολές της τοπολογίας, με τη

συνεχή προσθήκη ή αποχώρηση ασύρματων συσκευών από το δίκτυο. Πλήθος ερευνητικών εργασιών αφιερώθηκαν στην ανάπτυξη και τη βελτίωση αυτών των επεκτάσεων του πρωτοκόλλου, όπως [49], [50], [51].

Τα Καθορισμένα από Λογισμικό Δίκτυα (Software Defined Networks – SDN) είναι μία νέα τάση στα δίκτυα υπολογιστών. Αυτός ο τύπος δικτύου αναμένεται να επικρατήσει, συνεργαζόμενος με άλλες τεχνολογίες, όπως η Εικονοποίηση των Λειτουργιών Δικτύωσης (Network Function Virtualization – NFV) και ο Τεμαχισμός του Δικτύου (Network Slicing – NS), υποσχόμενος καλύτερη ανταπόκριση στις σύγχρονες απαιτήσεις. Αρκετές ερευνητικές εργασίες των τελευταίων ετών αποσκοπούν στην αποτίμηση των επιδόσεων του OSPF στα δίκτυα αυτά, όπως και τη συνεργασία των SDNs με «παραδοσιακά» δίκτυα, βασικός λειτουργικός πυλώνας των οποίων είναι το OSPF [52], [53]. Επιπλέον διερευνάται η ανάπτυξη ειδικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τέτοια δίκτυα, βασισμένα στη λογική των καταστάσεων συνδέσμων και του OSPF [54]. Η αντίστοιχη έρευνα για το EIGRP είναι ιδιαίτερα περιορισμένη [55].

Η διαθέσιμη βιβλιογραφία που αφορά το δεύτερο μέρος της εργασίας, δηλαδή την επίδραση του αριθμού των δρομολογητών ανά OSPF areas στο χρόνο σύγκλισης του δικτύου, είναι αρκετά περιορισμένη. Η πολυετής χρήση του πρωτοκόλλου έχει αναδείξει αρκετούς εμπειρικούς κανόνες. Σύμφωνα με αυτούς, τοπολογίες που αποτελούνται από 50 ή περισσότερους δρομολογητές είναι καλό να διασπώνται σε περιοχές [8]. Βέβαια η λήψη της απόφασης εφαρμογής OSPF areas είναι πολυπαραγοντική, καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της LSDB. Αυτό επηρεάζεται, εκτός από τον αριθμό των δρομολογητών, από τη γενικότερη σχεδίαση της τοπολογίας, τον αριθμό και τον τύπο των σχέσεων γειτονίας και τον τύπο των περιοχών που θα εφαρμοστούν [30].

Οι ερευνητές που δημοσίευσαν την εργασία [56] ασχολήθηκαν με τον περιορισμό του ρυθμού αύξησης των LSAs, καθώς αυξάνεται το πλήθος των δρομολογητών σε μία τοπολογία. Η αύξηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δαπάνη περισσότερων υπολογιστικών πόρων κάθε δρομολογητή. Ο στόχος επιτυγχάνεται με τη χρήση multi – area OSPF. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι η διάσπαση σε ίσου μεγέθους OSPF areas, οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα.

Ο συγγραφέας του άρθρου [47] συγκρίνει την επίδοση δικτύου μιας Πανεπιστημιούπολης, με flat OSPF και με multi areas OSPF. Οι πειραματικές μετρήσεις ανέδειξαν ότι ο χρόνος σύγκλισης κατόπιν συμβάντος βελτιώνεται με το διαχωρισμό της τοπολογίας. Να σημειωθεί ότι το πείραμα γίνεται με συγκεκριμένο πραγματικό δικτυακό εξοπλισμό, όπου τους δρομολογητές αντικαθιστούν τα layer 3 switches. Για το σχεδιασμό δικτύων Πανεπιστημιούπολης με OSPF, η CISCO προτείνει την κατά το δυνατόν ομαδοποίηση

των κόμβων ανά κτήριο και τη χρήση totally stubby areas. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το μέγεθος των πινάκων δρομολόγησης, οι βλάβες εντός μίας περιοχής δεν επηρεάζουν τις υπόλοιπες και περιορίζεται η πιθανότητα εσφαλμένης προώθησης κίνησης εντός non backbone area, όπου πιθανότατα υπάρχουν ζεύξεις και συσκευές μικρότερων δυνατοτήτων [57].

3 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Εσωτερικής Δρομολόγησης σε Πραγματική Τοπολογία

Η παρούσα ενότητα αφιερώνεται στη σύγκριση των πρωτοκόλλων εσωτερικής δρομολόγησης RIP, OSPF και EIGRP σε μία μικρή πραγματική δικτυακή τοπολογία. Ως παράμετρος σύγκρισης επιλέγεται ο χρόνος σύγκλισης του δικτύου, αφού εμφανιστεί βλάβη σε αυτό. Στις επόμενες σελίδες περιγράφεται η διαδικασία του φυσικού σχηματισμού της τοπολογίας και οι ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν σε κάθε συσκευής της. Αναλύεται η μέθοδος διεξαγωγής του πειράματος και μελετώνται τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

3.1 Χρόνος Σύγκλισης

Οι παράγοντες που συντελούν στη διακοπή ή την υποβάθμιση της λειτουργίας μίας ή περισσότερων ζεύξεων ή κόμβων του δικτύου είναι ποικίλοι και είναι δυνατό να προέρχονται από οποιοδήποτε επίπεδο του μοντέλου αναφοράς OSI. Η ανίχνευση και η αυτόματη ανάκαμψη (εφόσον είναι εφικτή) από τέτοια συμβάντα συχνά συντελείται μέσω της συνεργασίας πρωτοκόλλων διαφορετικών επιπέδων. Για τον περιορισμό των συνεπειών του προβλήματος προβλέπονται πλεονάζουσες φυσικές συνδέσεις μεταξύ των συσκευών δρομολόγησης, οπότε σχηματίζονται αρκετές εναλλακτικές διαδρομές μεταξύ συγκεκριμένων κόμβων.

Τα σύγχρονα δίκτυα υπολογιστών διαθέτουν μηχανισμούς τάχιστης ανίχνευσης της διακοπής κάποιας ζεύξης (failover). Οπότε ανακατευθύνουν την κίνηση στον προορισμό μέσω εναλλακτικής διαδρομής, εφόσον υπάρχει. Η διαδικασία που συντελείται από τη στιγμή του failover μέχρι την πλήρη προσαρμογή του δικτύου στη νέα κατάσταση καλείται σύγκλιση (convergence). Συνεπώς, ως χρόνος σύγκλισης λογίζεται το χρονικό διάστημα από την εμφάνιση ενός συμβάντος στο δίκτυο (συνήθως διακοπή ή αποκατάσταση κάποιας ζεύξης), μέχρι την πλήρη αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου [58]. Μόλις ολοκληρωθεί η σύγκλιση, ο πίνακας δρομολόγησης κάθε συσκευής περιλαμβάνει τις βέλτιστες διαδρομές προς τους πιθανούς προορισμούς εντός της οικίας τοπολογίας, υπό τις τρέχουσες συνθήκες. Ο χρόνος σύγκλισης κατόπιν συμβάντος είναι και η παράμετρος σύγκρισης των τριών πρωτοκόλλων εσωτερικής δρομολόγησης στα πλαίσια του πειράματος της παρούσας ενότητας.

Η αντίστροφη διαδικασία ανάκαμψης ζεύξης, η οποία προηγουμένως είχε τεθεί εκτός λειτουργίας, ονομάζεται αποκατάσταση (failback). Και στην περίπτωση του failback συντελείται αυτόματη ανίχνευση και σταδιακή ενημέρωση του συνόλου των πινάκων

δρομολόγησης. Ωστόσο η ταχύτητα επιτέλεσης των διεργασιών αυτών κρίνεται ήσσονος σημασίας συγκρινόμενη με αυτή του failover, καθώς ο χρήστης δεν αντιλαμβάνεται απώλεια ή υποβάθμιση της υπηρεσίας κατά τη διάρκεια του συμβάντος.

Ο χρόνος σύγκλισης αποτελεί KPI των σημερινών δικτύων. Η ελαχιστοποίησή του έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τους ερευνητές τα τελευταία χρόνια. Παλαιότερα, οι χρόνοι σύγκλισης των πρωτοκόλλων εσωτερικής δρομολόγησης ήταν της τάξης των εκατοντάδων milliseconds και ήταν αποδεκτοί για τις ανάγκες της εποχής. Τα δίκτυα μετέφεραν σχεδόν αποκλειστικά δεδομένα, με αποτέλεσμα η σύγκλιση να γίνεται σπάνια αισθητή στο χρήστη. Τα απορριφθέντα πακέτα αναμεταδίδονταν με μέριμνα του επιπέδου μεταφοράς (πρωτόκολλο TCP) και λαμβάνονταν σε αποδεκτό χρόνο.

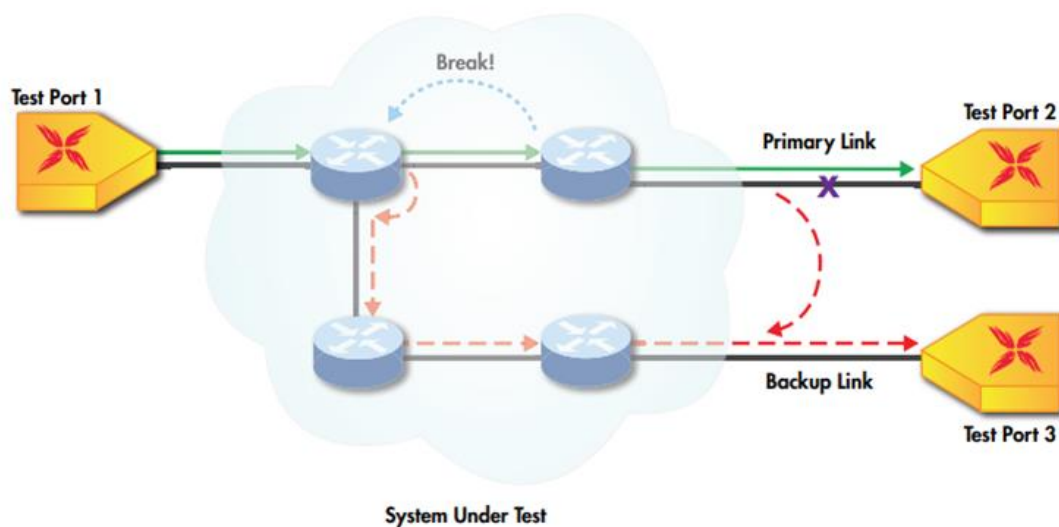
Με την εδραίωση των πολυμεσικών εφαρμογών πραγματικού χρόνου η κατάσταση άλλαξε σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Τα δίκτυα, εκτός από δεδομένα, μεταφέρουν πλέον πληροφορία φωνής και εικόνας (video). Έτσι ένας χρόνος σύγκλισης των εκατοντάδων milliseconds υποβαθμίζει σημαντικά την ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service – QoS). Τα πακέτα που μεταφέρονται στο δίκτυο παράγονται από ετερογενείς εφαρμογές, συνεπώς έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Για πολλές από αυτές η πανταχού διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία, που περιορίζονται από μεγαλύτερους χρόνους σύγκλισης, είναι ζωτικής σημασίας. Μάλιστα πλήθος τηλεπικοινωνιακών παρόχων υπόσχονται στα Συμφωνητικά Επιπέδου Υπηρεσίας (Service Level Agreements – SLAs) που συνάπτουν με τους πελάτες τους αξιοπιστία 99.999%. Προς ικανοποίηση αυτών των αναγκών και φιλοδοξιών τα δίκτυα απαιτείται να διακρίνονται από σταθερότητα και αξιοπιστία, ώστε κάθε πρόβλημα να παραμένει κρυφό από το χρήστη. Ακόμα χρειάζεται να προσαρμόζονται στις ανάγκες της εκάστοτε προσφερόμενης υπηρεσίας. Σημαντική πρόσφατη βελτίωση αποτελεί η μείωση του χρόνου σύγκλισης γύρω στα 50 milliseconds. Συντελέστηκε κυρίως μέσω νέων τεχνικών και εξειδικευμένων πρωτοκόλλων που συνεργάζονται με τα υφιστάμενα.

3.2 Υπολογισμός Χρόνου Σύγκλισης Πραγματικού Δικτύου

Ο ακριβής υπολογισμός του χρόνου σύγκλισης μίας πραγματικής δικτυακής τοπολογίας είναι ιδιαίτερα δύσκολος, διότι δεν υπάρχει τρόπος καταγραφής των γεγονότων που συμβαίνουν σε κάθε συσκευή. Όταν ο χρόνος αναμένεται της τάξης πολλών εκατοντάδων milliseconds ή μεγαλύτερος, προσεγγίζεται ικανοποιητικά με μία ιδιαίτερα διαδεδομένη («παραδοσιακή») διαδικασία που περιγράφεται στην ερευνητική δημοσίευση [58]. Οι

συγγραφείς της εν λόγω εργασίας ανέπτυξαν μία ακριβέστερη, αλλά δυσκολότερα εφαρμόσιμη μέθοδο προσέγγισης ακόμα και πολύ μικρότερης τάξης χρόνων σύγκλισης.

Η παραδοσιακή διαδικασία κρίνεται επαρκής για τους σκοπούς του παρόντος πειράματος. Λαμβάνει μετρήσεις για ένα σύνολο δρομολογητών, που απαρτίζουν το Ελεγχόμενο Σύστημα (System Under Test – SUT). Αυτό επικοινωνεί με το «περιβάλλον» μέσω τριών θυρών ελέγχου. Ένα πιθανό SUT τεσσάρων δρομολογητών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-1. Τα πακέτα εισέρχονται στο δίκτυο από τη θύρα 1, με σταθερό ρυθμό και επαρκώς μεγάλη συχνότητα. Οι δρομολογητές έχουν ενεργοποιημένο το προς μελέτη πρωτόκολλο δρομολόγησης και είναι ρυθμισμένοι ώστε υπό φυσιολογικές συνθήκες το σύνολο των πακέτων να εξέρχεται από τη θύρα 2, ακολουθώντας την πράσινη διαδρομή. Σε περίπτωση αστοχίας της συγκεκριμένης διαδρομής προβλέπεται μετάβαση στην εναλλακτική (κόκκινη), οπότε τα πακέτα καταφτάνουν στη θύρα 3. Τα πακέτα που εισέρχονται από τη θύρα 1 είναι αριθμημένα και κατά την απροβλημάτιστη λειτουργία καταφτάνουν σειριακά στη θύρα 2. Κατόπιν επαληθεύεται ότι ο ρυθμός εισαγωγής πακέτων στο SUT, από τη θύρα 1, ταυτίζεται με το ρυθμό εξαγωγής τους από τη θύρα 2. Ισοδύναμα επιβεβαιώνεται η ορθή σειριακή παραλαβή των πακέτων στη θύρα 2. Τότε διακόπτεται με κάποιον τρόπο (αποσύνδεση καλωδίου, απενεργοποίηση θύρας ή συσκευής) η λειτουργία της Πρωτεύουσας Ζεύξης (Primary Link). Αφού μεσολαβήσουν λίγα δευτερόλεπτα η σύγκλιση επιτυγχάνεται και τα πακέτα καταφτάνουν πλέον στη θύρα 3. Ο χρόνος σύγκλισης εκτιμάται ως το πηλίκο του αριθμού των χαμένων πακέτων προς το ρυθμό εισαγωγής πακέτων στο SUT.



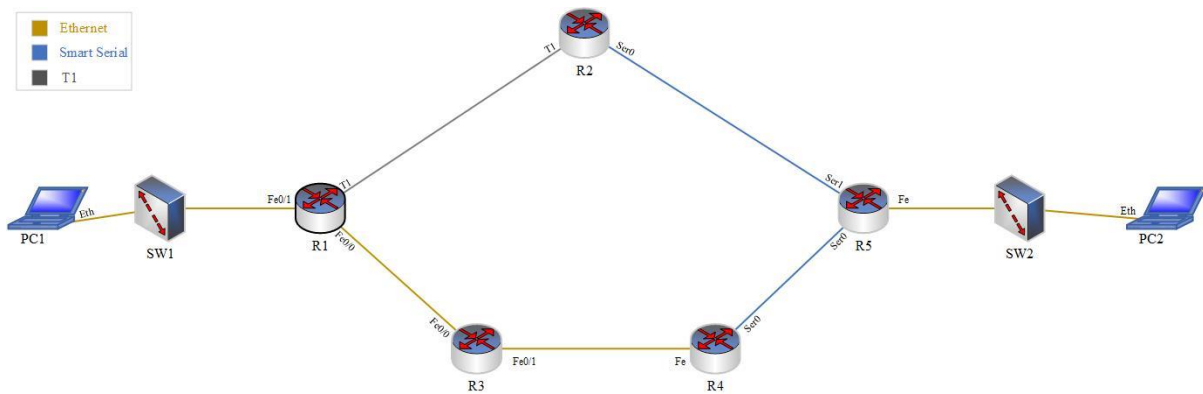
Εικόνα 3-1: Παραδοσιακή μέθοδος υπολογισμού χρόνου σύγκλισης πραγματικής δικτυακής τοπολογίας [58].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ακολουθείται η κεντρική ιδέα της παραπάνω διαδικασίας, με ορισμένες διαφοροποιήσεις. Η υπό εξέταση τοπολογία παρουσιάζεται παρακάτω, στην Εικόνα 3-2. Ο PC1 τροφοδοτεί το δίκτυο με διαρκή ροή πακέτων UDP. Αφού διέλθουν από το δίκτυο, τα πακέτα λαμβάνονται από τον PC2 ακολουθώντας τη διαδρομή που έχει επιβληθεί ως κύρια (PC1 – R1 – R2 – R5 – PC2). Ενώ το δίκτυο βρίσκεται υπό σταθερή λειτουργία και άρα ο PC2 λαμβάνει διαρκώς πακέτα, αποσυνδέεται το ένα άκρο της ζεύξης των R2 και R5. Το πρωτόκολλο «αντιλαμβάνεται» το συμβάν και προχωρά στη διαδικασία της αναζήτησης νέας διαδρομής (σύγκλιση). Λίγα δευτερόλεπτα αργότερα η σύγκλιση επιτυγχάνεται με τη μετάβαση στην εναλλακτική διαδρομή (PC1 – R1 – R3 – R4 – R5 – PC2), οπότε τα πακέτα προωθούνται στον PC2 μέσω αυτής. Αντίθετα με τη διαδικασία που αποτυπώνεται στην Εικόνα 3-1, τα πακέτα είτε ακολουθήσουν την κύρια είτε την εναλλακτική διαδρομή καταφτάνουν στον ίδιο προορισμό, τον PC2. Ο τελευταίος λαμβάνει κάθε πακέτο και σημειώνει με μεγάλη ακρίβεια τη χρονική στιγμή άφιξής του. Λόγω της σύγκλισης παρατηρείται κενό μερικών δευτερολέπτων στη λίστα των λαμβανόμενων πακέτων, από το οποίο προσεγγίζεται ο ζητούμενος χρόνος σύγκλισης. Αυτός αντιστοιχεί στη διαφορά της χρονοσφραγίδας του πρώτου πακέτου μετά τη σύγκλιση από το τελευταίο πριν την εμφάνιση της «βλάβης». Δηλαδή ο χρόνος σύγκλισης προσεγγίζεται μέσω της διαφοράς των δύο χρονικών στιγμών και όχι από τον αριθμό των απολεσθέντων πακέτων.

3.3 Εκτέλεση Πειράματος

Η μελέτη του χρόνου σύγκλισης διεξάγεται πειραματικά σε μία πραγματική δικτυακή τοπολογία πέντε δρομολογητών (τριών CISCO 1700 series και δύο CISCO 2800 series), δύο switches CISCO Catalyst 2960 series SI και δύο φορητών προσωπικών υπολογιστών γενικής χρήσης (Personal Computers – PCs).

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας συνίσταται στη φυσική σύνδεση των συσκευών, μέσω κατάλληλων ζεύξεων (καλωδίων), οπότε σχηματίζεται η φυσική τοπολογία (Εικόνα 3-2). Η Εικόνα 3-3 παρουσιάζει την ίδια τοπολογία, όπως δημιουργήθηκε στο εργαστήριο του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, στην πόλη των Σερρών όπου εκπονήθηκε η παρούσα εργασία.



Εικόνα 3-2: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής τοπολογίας.



Εικόνα 3-3: Πειραματική τοπολογία, όπως δημιουργήθηκε στο εργαστήριο.

Όπως γίνεται αντιληπτό και από την Εικόνα 3-2, η επικοινωνία των συσκευών διεξάγεται μέσω ζεύξεων που ανήκουν σε δύο κύριες κατηγορίες, Fast Ethernet (Fe, Eth) και σειριακές (ser, T1). Η επιλογή του τύπου κάθε ζεύξης υπαγορεύεται από τις διαθέσιμες διεπαφές (interfaces) ή θύρες (ports) των συσκευών και τα ιδιαίτερα γνωρίσματα κάθε τύπου

(π.χ. μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης). Το είδος και οι διεπαφές κάθε ζεύξης της πειραματικής τοπολογίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1: Πληροφορίες ζεύξεων τοπολογίας.

Ζεύξη	Είδος	Θύρες
PC1 – R1	Fast Ethernet	Ethernet (PC1) – FastEthernet0/1 (R1)
R1 – R2	Serial (T1)	T1 (R1) – T1 (R2)
R1 – R3	Fast Ethernet	FastEthernet0/0 (R1) – FastEthernet0/0 (R3)
R2 – R5	Smart Serial	Serial0 (R2) – Serial1 (R5)
R3 – R4	Fast Ethernet	FastEthernet0/1 (R3) – FastEthernet0 (R4)
R4 – R5	Smart Serial	Serial0 (R4) – Serial0 (R5)
R5 – PC2	Fast Ethernet	FastEthernet0 (R5) – Ethernet (PC2)

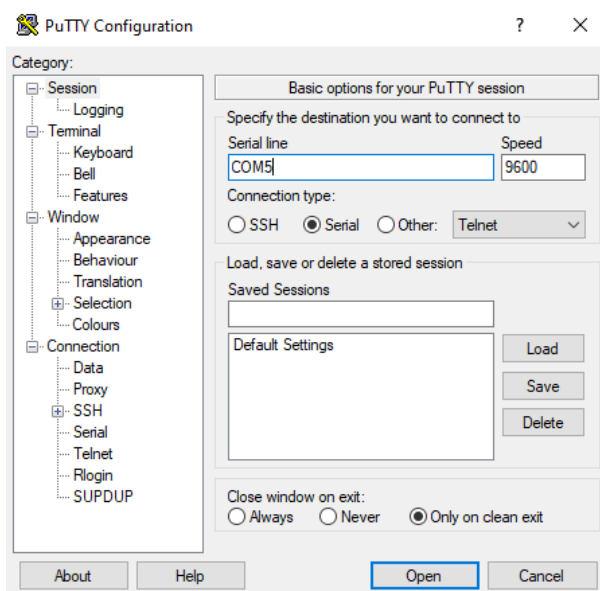
Η χρήση των ζεύξεων Ethernet είναι προτιμότερη έναντι των σειριακών, κυρίως διότι επιτυγχάνουν σημαντικά υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Αυτός ανέρχεται στα 10 Mbps, 100 Mbps (Fast Ethernet), 1000 Mbps (Gigabit Ethernet) ή περισσότερο, ανάλογα με την παλαιότητα και τα χαρακτηριστικά της συσκευής. Οι δρομολογητές της παρούσας τοπολογίας διαθέτουν τουλάχιστον μία διεπαφή fast ethernet.

Η άμεση σύνδεση ενός δρομολογητή με έναν άλλο ή με έναν PC μέσω ζεύξης Ethernet απαιτεί έναν ειδικό τύπο καλωδίου, το Crossover Ethernet, που περιέχει κάποια επιπλέον σύρματα από ένα «απλό». Διαφορετικά παρεμβάλλεται ένα switch. Δηλαδή οι δύο συσκευές συνδέονται με αυτό, μέσω «απλού» καλωδίου Ethernet. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτός είναι και ο μόνος λόγος ύπαρξης των δύο switches στο εξεταζόμενο δίκτυο.

Οι σειριακές ζεύξεις αποτελούν έναν παλαιότερο τρόπο σύνδεσης δρομολογητών και άλλων συσκευών. Επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που σπάνια προσεγγίζουν τα 50 Mbps και χαρακτηρίζονται από λιγότερο ελκυστικά χαρακτηριστικά διαύλων (τύπος συνδετήρα, βάρος καλωδίου). Με την πάροδο του χρόνου συντελέστηκαν προσπάθειες βελτίωσης των χαρακτηριστικών αυτών και έτσι προέκυψαν υποκατηγορίες των σειριακών θυρών, όπως οι έξυπνες σειριακές θύρες (smart serials) και οι θύρες T1. Στις smart serials αντιστοιχεί συνδετήρας μικρότερου μεγέθους από τον κλασικό. Στις θύρες T1 κουμπώνει συνδετήρας RJ-45, παρόμοιος με αυτόν του Ethernet, καθιστώντας τη σύνδεση ευκολότερη. Οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνουν οι σειριακές θύρες των δρομολογητών του εργαστηρίου δεν υπερβαίνουν τα 2 Mbps.

Μόλις περατωθεί η φυσική διασύνδεση των συσκευών, αυτές τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα ώστε να ρυθμιστούν κατάλληλα. Για να γίνει αυτό συνδέεται διαδοχικά σε καθεμιά ένα τερματικό (συνήθως προσωπικός υπολογιστής), μέσω ενός ειδικού καλωδίου (rollover cable). Το ένα του άκρο διαθέτει συνδετήρα RJ-45 και κουμπώνει σε ειδική θύρα της συσκευής, που φέρει την ένδειξη console. Το άλλο φέρει σειριακό συνδετήρα ή συνδετήρα Universal Serial Bus (USB) και συνδέεται με τον υπολογιστή. Σε νεότερους υπολογιστές, που δε διαθέτουν σειριακή υποδοχή, τα παλαιότερα rollover cables χρησιμοποιούνται με τη βοήθεια κατάλληλων μετατροπέων. Αυτό φάνηκε χρήσιμο και κατά την εκτέλεση του πειράματος.

Η απόκτηση πρόσβασης στο λειτουργικό σύστημα συσκευής CISCO (Internetwork Operating System – IOS) μέσω του προσωπικού υπολογιστή, απαιτεί την εγκατάσταση ειδικού λογισμικού σε αυτόν. Ως τέτοιο επιλέχθηκε το PuTTY [59], το περιβάλλον του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 3-4. Πρόκειται για ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα που παρέχει απομακρυσμένη πρόσβαση σε συσκευή από λειτουργικό σύστημα Windows, μέσω του Telnet ή του ασφαλέστερου Secure Shale (SSH). Μία ακόμα από τις πολλές δυνατότητές του είναι η παροχή πρόσβασης στο λειτουργικό σύστημα συσκευής (π.χ. IOS), επιτρέποντας τη ρύθμισή της με την πληκτρολόγηση των κατάλληλων εντολών.

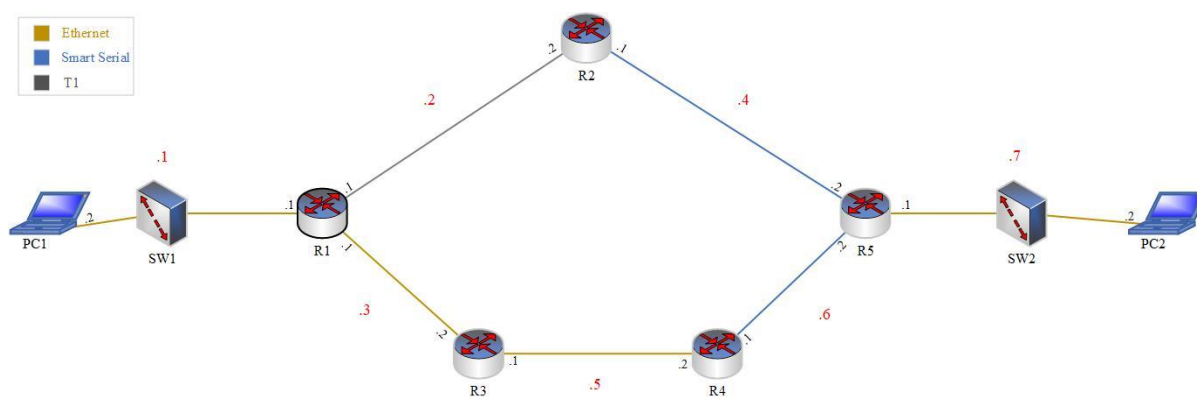


Εικόνα 3-4: Περιβάλλον λογισμικού PuTTY.

Οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις των switches της CISCO εξασφαλίζουν την επικοινωνία των συσκευών που συνδέονται στις θύρες τους, χωρίς περαιτέρω παραμετροποιήσεις [8]. Από προεπιλογή κάθε θύρα του switch είναι ενεργή, ενώ το σύνολο των θυρών του ανήκει στο ίδιο

VLAN, πράγμα που επιτρέπει την επικοινωνία από και προς οιαδήποτε θύρα. Επιπλέον, χρησιμοποιείται το Πρωτόκολλο Δέντρου Συνδέσμων (Spanning Tree Protocol – STP). Αυτό εξασφαλίζει την απουσία βρόχων σε περιπτώσεις ύπαρξης περισσότερων της μίας διαδρομής προς κάποιον κόμβο του δικτύου, διευκολύνοντας την προώθηση των πλαισίων Ethernet στο δίκτυο βάση της διεύθυνσης MAC.

Οι πρώτες ρυθμίσεις κάθε δρομολογητή αφορούν τον ορισμό του επιθυμητού ονόματος και την απόδοση IP διεύθυνσης σε κάθε θύρα του, μέσω της οποίας συνδέεται με άλλη συσκευή. Η αλλαγή του ονόματος είναι ιδιαίτερα απλή και εξυπηρετεί αποκλειστικά στην αμεσότερη αναγνώριση του δρομολογητή που παραμετροποιείται σε δεδομένη στιγμή. Για την ανάθεση IP διευθύνσεων στο σύνολο των ενεργών διεπαφών του δικτύου, δημιουργήθηκε ένα απλό πλάνο διευθυνσιοδότησης (Εικόνα 3-5). Σύμφωνα με αυτό το δίκτυο χωρίζεται σε επτά υποδίκτυα, χρησιμοποιώντας τη μοναδική ιδιωτική διεύθυνση κλάσης C. Ο αριθμός που σημειώνεται με κόκκινο αντιστοιχεί στην τρίτη οκτάδα της διεύθυνσης και χαρακτηρίζει το υποδίκτυο. Η μοναδική IPv4 κάθε διεπαφής υποδεικνύεται από τον εκεί σημειωμένο αριθμό (αντιστοιχεί στην τέταρτη οκτάδα).



Εικόνα 3-5: Πλάνο διευθυνσιοδότησης.

Οι διευθύνσεις αποδίδονται στατικά στις διεπαφές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα χαρακτηριστικά της στατικής διευθυνσιοδότησης αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμα. Πρόκειται για μικρή δικτυακή τοπολογία, οπότε η διαδικασία δεν είναι αποτρεπτικά χρονοβόρα, ενώ είναι ιδιαίτερα βολική η μη μεταβλητότητα των διευθύνσεων και συνεπώς η συμφωνία τους με το πλάνο.

Για τον ορισμό του επιθυμητού ονόματος στον R1 και την ανάθεση IP διευθύνσεων στις ενεργές διεπαφές του, δίνονται οι παρακάτω εντολές:


```
Router>enable
Router#configure terminal
Enter configuration commands, one per line.  End with CNTL/Z.
Router(config)#hostname R1
R1(config)#interface fastEthernet 0/1
R1(config-if)#ip address 192.168.1.1 255.255.255.0
R1(config-if)#no shutdown
Jan  2 12:49:08.815: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface
FastEthernet0/1, changed state to up
R1(config-if)#exit
R1(config)# interface fastEthernet 0/0
R1(config-if)#ip address 192.168.3.1 255.255.255.0
R1(config-if)#no shutdown
Jan  2 12:50:06.739: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface
FastEthernet0/0, changed state to up
R1(config-if)#exit
R1(config)# interface serial 0/2/0
R1(config-if)#ip address 192.168.2.1 255.255.255.0
R1(config-if)#no shutdown
R1(config-if)#clock rate 2000000
Jan  2 14:14:14.431: %LINK-3-UPDOWN: Interface Serial0/2/0, changed state
to up
Jan  2 14:14:15.431: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface
Serial0/2/0, changed state to up
```

Αρχικά το PuTTY εισέρχεται στην κατάσταση χρήστη (user mode) του IOS του R1, απ' όπου είναι εφικτή η επισκόπηση αρκετών ρυθμίσεων της συσκευής. Για την τροποποίησή τους γίνεται μετάβαση στην προνομιούχα κατάσταση (privileged mode), με την εντολή `enable`. Στην κατάσταση αυτή ανήκει ένα μικρό σύνολο εντολών, ενώ οι περισσότερες δίδονται στην κατάσταση ρυθμίσεων (configuration mode). Η εντολή `configure terminal` παρέχει πρόσβαση σε αυτή.

Η εντολή `hostname` ορίζει το όνομα του δρομολογητή ως το αλφαριθμητικό που την ακολουθεί. Εδώ, το προεπιλεγμένο όνομα της συσκευής (Router) μεταβάλλεται σε R1.

Η εντολή `interface` οδηγεί σε ένα περιβάλλον καθορισμού πλήθους παραμέτρων της διεπαφής που ακολουθεί την εντολή. Εδώ ορίζονται στατικά οι διευθύνσεις IP μέσω της εντολής `ip address`, που ακολουθείται από την επιθυμητή διεύθυνση και έπειτα από την αντίστοιχη μάσκα υποδικτύου. Από προεπιλογή οι διεπαφές των δρομολογητών της CISCO

είναι ανενεργές (administratively down). Ενεργοποιούνται με την εντολή `no shutdown`. Μόλις ενεργοποιηθεί κάποια διεπαφή, το λειτουργικό σύστημα του δρομολογητή τυπώνει αντίστοιχο μήνυμα.

Για να λειτουργήσουν οι σειριακές θύρες, χρειάζεται επιπλέον να συγχρονιστούν οι συνδεδεμένες συσκευές. Αυτό γίνεται δίνοντας την εντολή `clock rate` σε έναν από τους δύο δρομολογητές, ώστε να επιβάλλει το χρονισμό, στέλνοντας κατάλληλα μηνύματα μέσω της ζεύξης. Ακολουθείται από έναν αριθμό, που εκφράζει την οριζόμενη «ταχύτητα» της επικοινωνίας σε bps [8]. Η εντολή δίνεται στο περιβάλλον παραμετροποίησης της διεπαφής που εξυπηρετεί τη σύνδεση.

Παρακάτω παρατίθενται οι εντολές παραμετροποίησης των λοιπών δρομολογητών της τοπολογίας, για λόγους πληρότητας. Τα μηνύματα που τυπώνει το λειτουργικό σύστημα παραλείπονται.

R2:

```
R2>enable
R2#configure terminal
R2(config)#hostname R2
R2(config)#interface serial 1/0
R2(config-if)#ip address 192.168.2.2 255.255.255.0
R2(config-if)#no shutdown
R2(config-if)#exit
R2(config)#interface serial0
R2(config-if)#ip address 192.168.4.1 255.255.255.0
R2(config-if)#no shutdown
R2(config-if)#exit
```

R3:

```
R3>enable
R3#configure terminal
R3(config)#hostname R3
R3(config)#interface fastEthernet 0/0
R3(config-if)#ip address 192.168.3.2 255.255.255.0
R3(config-if)#no shutdown
R3(config-if)#exit
R3(config)#interface fastEthernet 0
R3(config-if)#ip address 192.168.5.1 255.255.255.0
R3(config-if)#no shutdown
```

```
R3(config-if)#exit
```

R4:

```
R4>enable
R4#configure terminal
R4(config)#hostname R4
R4(config)#interface fastEthernet 0
R4(config-if)#ip address 192.168.5.2 255.255.255.0
R4(config-if)#no shutdown
R4(config-if)#exit
R4(config)#interface serial 0
R4(config-if)#ip address 192.168.6.1 255.255.255.0
R4(config-if)#no shutdown
R4(config-if)#exit
```

R5:

```
R5>enable
R5#configure terminal
R5(config)#hostname R5
R5(config)#interface fastEthernet 0
R5(config-if)#ip address 192.168.7.1 255.255.255.0
R5(config-if)#no shutdown
R5(config-if)#exit
R5(config)#interface serial 0
R5(config-if)#ip address 192.168.6.2 255.255.255.0
R5(config-if)#no shutdown
R5(config-if)#clock rate 2000000
R5(config-if)#exit
R5(config)#interface serial 1
R5(config-if)#ip address 192.168.4.2 255.255.255.0
R5(config-if)#no shutdown
R5(config-if)#clock rate 2000000
R5(config-if)#exit
```

Εκτός από τις ενεργές διεπαφές κάθε δρομολογητή, είναι απαραίτητη η ανάθεση IP διευθύνσεων και στις διεπαφές σύνδεσης των PCs με το δίκτυο (διεπαφές Ethernet). Από τις αντίστοιχες καρτέλες ρυθμίσεων του λειτουργικού συστήματος κάθε PC (Windows 10), ορίζεται ότι η θύρα Ethernet θα εξυπηρετήσει τη σύνδεση με το υπό μελέτη δίκτυο και αποδίδεται σε αυτή κατάλληλη IP διεύθυνση. Ακόμα ορίζεται η μάσκα υποδικτύου και η

προκαθορισμένη πύλη (default gateway), όπου κατευθύνεται αρχικά κάθε πακέτο με προορισμό το δίκτυο. Ως διεύθυνση προκαθορισμένης πύλης, ορίζεται αυτή της διεπαφής του δρομολογητή που συνδέεται άμεσα με τον υπολογιστή.

Πριν την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας απαιτείται η εγκατάσταση κατάλληλων εφαρμογών στους προσωπικούς υπολογιστές. Στον PC1 ανατίθεται το έργο της παραγωγής της δικτυακής κίνησης. Ο PC2 λαμβάνει τα πακέτα και καταγράφει τον ακριβή χρόνο άφιξης εκάστου, αποτελώντας καταβόθρα (sink).

Στον PC1 εγκαθίσταται η δωρεάν δοκιμαστική έκδοση τριάντα ημερών του λογισμικού NetScanTools Pro [60]. Η πλήρης έκδοση απευθύνεται σε Μηχανικούς Δικτύων και αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο παρατήρησης, διαχείρισης και αποκατάστασης προβλημάτων σε δίκτυα υπολογιστών. Για το συγκεκριμένο πείραμα, το λογισμικό χρησιμοποιείται ώστε να παράγει τη δικτυακή κίνηση (traffic generator). Η Εικόνα 3-6 παρουσιάζει την καρτέλα του NetScanTools Pro που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη επιλογή και μέρος των σχετικών ρυθμίσεων. Συγκεκριμένα ορίζεται η αποστολή UDP πακέτων από τον PC1, στον οποίο εκτελείται το λογισμικό, προς τον PC2. Το ωφέλιμο περιεχόμενο (payload) κάθε πακέτου είναι το σύντομο μήνυμα κειμένου «Hello from PC1» (Εικόνα 3-7). Η γέννηση και αποστολή νέου πακέτου λαμβάνει χώρα ανά 150 milliseconds, αδιάκοπα. Η έναρξη και ο τερματισμός της αποστολής πακέτων καθορίζεται χειροκίνητα.

The screenshot displays the NetScanTools Pro configuration window. It is divided into several sections:

- Packet Building and Sending:**
 - Select Packet Type:** Set to UDP.
 - Send Continuously:** Checked.
 - Send Now, no scripting:** Button.
 - Number to Send:** Set to 1.
 - Packet Interval (ms):** Set to 150.
 - Stop:** Button.
 - Select Script:** Button.
 - Edit Script:** Button.
 - Run Script:** Button.
 - Script Path:** c:\users\sachi\appdata\roaming\nwps\netscantoolspro
- Header Ethernet MAC Address Override:**
 - Enable MAC Address Override:** Unchecked.
 - Source MAC:** AC:E2:D3:D2:69:91
 - Destination MAC:** 00:25:45:4E:08:5D
- IPv4 Header Parameters:**
 - Source IP:** 192 . 168 . 1 . 2
 - Destination IP:** 192 . 168 . 7 . 2
 - Time To Live:** 128
 - Override IP Checksum:** 65535
 - Override Packet Length:** 40
 - Identification Field Value:** 12345
 - DS Codepoint Bits 0-2:** 000-Default
 - Fragmentation:**
 - DF flag:** 0 - May Fragment
 - MF flag:** 0 - Last Fragment
 - Offset:** 0 x 8 bytes
 - Other options:** DSCP Bit 3, 4, 5, ECN-ECT Bit 6, ECN-CE Bit 7 (all unchecked).
- Notifications/Errors:**
 - Enable Script Debugging Messages:** Unchecked.
- Right Panel:**
 - Jump To Automated:** Button.
 - Reports:** Button.
 - Add to Favorites:** Unchecked.
 - IPv4:** Green status icon.
 - IPv6:** Red status icon.
 - Packet Payload Editor:**
 - Launch Hex Editor:** Button.
 - Capture Packets:**
 - Launch Packet Capture:** Button.
 - Playback Capture File:**
 - Packet Capture Playback:** Button.

Εικόνα 3-6: Ρυθμίσεις Traffic Generator στο NetScanTools Pro.

Για την καταγραφή των πακέτων που καταφτάνουν από το δίκτυο στον PC2, χρησιμοποιείται η δωρεάν και δημοφιλής εφαρμογή ανάλυσης δικτυακής κίνησης Wireshark [61]. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ακριβής καταγραφή της χρονικής στιγμής άφιξης κάθε πακέτου. Εδώ, ως μορφή αποτύπωσης του χρόνου (time display) επιλέγεται «Time of Day». Έτσι ο χρόνος αυτός εκφράζεται με ακρίβεια αρκετών δεκαδικών ψηφίων.

Προκειμένου να καταστεί το δίκτυο πλήρως λειτουργικό, δηλαδή να υπάρχει δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κόμβων αυτού, απαιτείται η συμπλήρωση των πινάκων δρομολόγησης κάθε δρομολογητή. Στα πλαίσια του συγκεκριμένου πειράματος η διαδικασία λαμβάνει χώρα δυναμικά, με την ενεργοποίηση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης που εξετάζεται κάθε φορά.

Εικόνα 3-7: Παραμετροποίηση πακέτων που αποστέλλει το NetScanTools Pro.

Αρχικά ενεργοποιείται το πρωτόκολλο RIP και συγκεκριμένα η έκδοση RIPv2. Για να γίνει αυτό συνδέεται ο προσωπικός υπολογιστής σε κάθε δρομολογητή και δίνονται οι παρακάτω εντολές, σε configuration mode.

```
RX(config)#router rip
RX(config-router)#network 192.168.0.0
RX(config-router)#version 2
```

Το X αντιστοιχεί στον αριθμό του δρομολογητή που ρυθμίζεται κάθε φορά. Οι εντολές είναι πανομοιότυπες για κάθε δρομολογητή. Η εντολή `router rip` ενεργοποιεί το RIP.

Αφού δοθεί, γίνεται μετάβαση σε περιβάλλον παραμετροποίησης του πρωτοκόλλου. Η εντολή `network` ακολουθείται από την IP διεύθυνση περιγραφής του συνόλου των υποδικτύων στα οποία εφαρμόζεται το πρωτόκολλο. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να δοθεί μεγαλύτερος αριθμός τέτοιων εντολών, καθεμία από τις οποίες θα περιέγραφε μικρότερο αριθμό υποδικτύων. Τέλος με την εντολή `version` καθορίζεται η χρήση της δεύτερης έκδοσης του πρωτοκόλλου και όχι της προεπιλεγμένης πρώτης.

Το κριτήριο δρομολόγησης του RIP είναι ο αριθμός των αλμάτων. Έτσι τα πακέτα θα ακολουθούν την κύρια διαδρομή χωρίς περαιτέρω ενέργειες επιβολής της.

Αφού επιτευχθεί η αρχική σύγκλιση του δικτύου, μερικά δευτερόλεπτα κατόπιν της ενεργοποίησης του πρωτοκόλλου και στον τελευταίο δρομολογητή, οι πίνακες δρομολόγησης είναι πλήρεις και εκτελείται το πρώτο πείραμα (για το RIP). Δηλαδή ενεργοποιείται ο `traffic generator` στον PC1 και η καταγραφή των λαμβανόμενων πακέτων στον PC2. Αφού ληφθούν μερικά πακέτα, αποσυνδέεται η σειριακή ζεύξη R2 – R5. Η πρωτεύουσα διαδρομή καθίσταται ανενεργή και οι δρομολογητές εξαναγκάζονται σε σύγκλιση στη δευτερεύουσα. Μόλις αυτή επιτευχθεί και καταφτάσουν πακέτα μέσω της εναλλακτικής διαδρομής, υπολογίζεται η προσέγγιση του χρόνου σύγκλισης, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Προκειμένου να ληφθεί στατιστικά σημαντικό δείγμα, το πείραμα επαναλαμβάνεται δεκαπέντε φορές και ως χρόνος σύγκλισης λαμβάνεται η μέση τιμή των εξαγόμενων χρόνων.

Στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το OSPF. Οι παρακάτω εντολές, που δίνονται αυτούσιες σε κάθε δρομολογητή, εξασφαλίζουν ότι το μόνο ενεργοποιημένο IGP στην τοπολογία είναι το OSPF.

```
RX(config)#no router rip
RX(config)# router ospf 0
RX(config-router)#network 192.168.0.0 0.0.255.255 area 0
RX(config-router)#exit
```

Η πρώτη εντολή απενεργοποιεί το RIP που είχε οριστεί προηγουμένως. Με την επόμενη, ενεργοποιείται το OSPF και η συσκευή τοποθετείται στη μοναδική περιοχή δρομολόγησης με αναγνωριστικό τον αριθμό 0. Η εντολή `network` ορίζει τα υποδίκτυα στα οποία θα ενεργοποιηθεί το πρωτόκολλο. Ακολουθείται από μία διεύθυνση IP που προσδιορίζει τα επιθυμητά υποδίκτυα και με τη σειρά της ακολουθείται από τη `wildcard`. Η τελευταία έχει τη μορφή μίας διεύθυνσης IP, όπου το δυαδικό 0 επιβάλλει απόλυτη ταύτιση με το αντίστοιχο bit της IP, ενώ με το δυαδικό 1 αγνοείται η τιμή του bit αυτού. Ο συνδυασμός IP διεύθυνσης

και wildcard πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να υποδεικνύει την ενεργοποίηση του πρωτοκόλλου στο επιθυμητό δίκτυο. Στο τέλος της εντολής αναφέρεται η OSPF area της συσκευής.

Το κριτήριο δρομολόγησης του OSPF είναι η μεγιστοποίηση του εύρους ζώνης. Για την αρχική επιλογή της κύριας διαδρομής, χρησιμοποιείται η εντολή bandwidth. Μέσω αυτής ανατίθεται μεγαλύτερη τιμή εύρους ζώνης στις ζεύξεις της επιθυμητής διαδρομής.

```
RX(config)#interface Y
RX(config-if)#bandwidth 10000
```

Η εντολή δίνεται για κάθε διεπαφή δρομολογητή που ανήκει στην κύρια διαδρομή. Το X αντιστοιχεί στη ρυθμιζόμενη συσκευή και το Y στη διεπαφή. Η εντολή ακολουθείται από το εύρος ζώνης που είναι επιθυμητό να λαμβάνεται υπόψη, εκφρασμένο σε kilobits. Να αναφερθεί πως η εντολή δε μεταβάλλει το πραγματικό εύρος ζώνης της διεπαφής ή της ζεύξης. Αφού εξασφαλιστεί η επιλογή της κύριας διαδρομής, λαμβάνονται οι μετρήσεις του χρόνου σύγκλισης του OSPF.

Τέλος η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ακόμα μία φορά, με μόνο ενεργοποιημένο πρωτόκολλο δρομολόγησης το EIGRP. Οπότε σε κάθε δρομολογητή δίνονται οι εντολές:

```
RX(config)#no router ospf
RX(config)# router eigrp 1
RX(config-router)#network 192.168.0.0 0.0.255.255
RX(config-router)#exit
```

Αρχικά απενεργοποιείται το OSPF, ώστε η δρομολόγηση να λαμβάνει χώρα αποκλειστικά βάσει του EIGRP. Η δεύτερη εντολή ενεργοποιεί το πρωτόκολλο και τοποθετεί το δρομολογητή στο EIGRP AS 1. Κατ' αντιστοιχία με τις προηγούμενες περιπτώσεις, με την εντολή network ορίζονται τα υποδίκτυα εκτέλεσης της δρομολόγησης.

Ως κριτήριο δρομολόγησης χρησιμοποιείται η προεπιλογή του EIGRP, δηλαδή το εύρος ζώνης και η καθυστέρηση της διαδρομής. Επομένως διατηρώντας τις προηγούμενες ρυθμίσεις του εύρους ζώνης, το EIGRP επιλέγει με βεβαιότητα την επιθυμητή διαδρομή. Τέλος, λαμβάνονται μετρήσεις και για το πρωτόκολλο αυτό.

3.4 Αποτελέσματα

Ο Πίνακας 3-2 περιλαμβάνει τους προσεγγιστικούς χρόνους σύγκλισης εκάστου πρωτοκόλλου, για τις δεκαπέντε φορές εκτέλεσης του πειράματος. Στην τελευταία γραμμή αναφέρεται ο μέσος όρος των χρόνων σύγκλισης κάθε πρωτοκόλλου, που είναι και το στατιστικά σημαντικό αποτέλεσμα.

Πίνακας 3-2: Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας με πραγματικό εξοπλισμό.

Αριθμός εκτέλεσης	RIP (sec)	OSPF (sec)	EIGRP (sec)
1	16.350318	7.650271	2.249723
2	24.149699	7.651597	2.249710
3	19.649536	7.049670	2.249706
4	12.749663	7.649661	2.099807
5	14.549720	7.649639	2.249685
6	12.000294	7.649595	2.099817
7	10.199585	7.349498	2.249808
8	15.899613	7.349579	2.249667
9	20.099492	7.799631	2.249730
10	11.099602	7.649622	2.249782
11	23.099561	7.650399	2.249875
12	31.799549	7.649749	2.099799
13	16.949618	5.699762	2.099711
14	18.449539	7.649858	2.249744
15	23.399478	5.849870	2.249745
Μέσος όρος	18.029684	7.329893	2.209754

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ταχύτητα ανταπόκρισης των τριών πρωτοκόλλων σε κάποια μεταβολή του δικτύου δεν είναι ίδια. Το EIGRP συγκλίνει σε περίπου 2.2 δευτερόλεπτα, το OSPF σε 7.3 δευτερόλεπτα και το RIP σε 18 δευτερόλεπτα. Φαίνεται ότι το EIGRP εμφανίζει σημαντική υπεροχή ως προς το χαρακτηριστικό αυτό. Μάλιστα ο αμέσως καλύτερος χρόνος σύγκλισης, του OSPF, είναι μεγαλύτερος του διπλάσιου. Ο χρόνος σύγκλισης του OSPF είναι γενικά αποδεκτός αν ληφθούν υπόψη οι διαρκείς βελτιώσεις του. Εδώ δεν εφαρμόζεται κάποια τέτοια. Ο χρόνος σύγκλισης του RIP εμφανίζεται αυξημένος κατά 10.7 δευτερόλεπτα σε σχέση με αυτόν του OSPF, και 15.8 δευτερόλεπτα μεγαλύτερος από του EIGRP. Τέτοιες τιμές απέχουν πολύ από τις σύγχρονες απαιτήσεις.

Το πείραμα απέδειξε τη σημαντική υπεροχή του EIGRP ως προς το εν λόγω χαρακτηριστικό. Η παρατήρηση είναι αναμενόμενη και αποδίδεται στη διατήρηση προϋπολογισμένων εναλλακτικών διαδρομών στον πίνακα τοπολογίας. Εφόσον απαιτηθεί, η μετάβαση στη βέλτιστη εξ αυτών συντελείται τάχιιστα. Αντίθετα, το RIP και το OSPF εκκινούν

την αναζήτηση εναλλακτικής διαδρομής αφού εντοπιστεί η βλάβη. Ένας επιπλέον λόγος υπεροχής του EIGRP είναι η εφαρμογή μηχανισμών γρήγορης ανίχνευσης της βλάβης.

Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε και η αργή σύγκλιση του RIP. Εμφανίζεται ως απόρροια της φύσης των αλγορίθμων δρομολόγησης με διανύσματα απόστασης και των μεγάλων προεπιλεγμένων τιμών που αποδίδονται στα χρονόμετρα.

Μία ακόμα παρατήρηση είναι η έντονη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων του πρωτοκόλλου RIP, καθώς οι χρόνοι σύγκλισης του στις δεκαπέντε εκτελέσεις του πειράματος κυμαίνονται από 10.3 έως 31.8 δευτερόλεπτα περίπου. Το γεγονός αποδίδεται στην εξάρτηση του αποτελέσματος από τη στιγμή της εμφάνισης της βλάβης και αναλύεται περαιτέρω στο υποκεφάλαιο 4.3. Αντίθετα τα αποτελέσματα των δεκαπέντε μετρήσεων του OSPF και του EIGRP παρουσιάζουν ελάχιστη διακύμανση. Δύο μόνο μετρήσεις, που αφορούν το OSPF, παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερη απόκλιση.

Οι συγγραφείς της ερευνητικής εργασίας [41] εκτέλεσαν παρόμοιο πείραμα σε παρόμοια τοπολογία. Οι εξαγόμενοι χρόνοι σύγκλισης παρατίθενται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3: Αντίστοιχα αποτελέσματα ερευνητικής δημοσίευσης [41]

Πρωτόκολλο δρομολόγησης	Χρόνος Σύγκλισης (sec)
RIP	13.66
OSPF	6
EIGRP	2.12

Παρατηρώντας τον πίνακα, φαίνεται ότι οι συγγραφείς κατέληξαν στα ίδια συμπεράσματα. Η κατάταξη των τριών πρωτοκόλλων ως προς το χρόνο σύγκλισης είναι η ίδια, ενώ οι διαφορές των μεταξύ τους χρόνων απέχουν λίγο. Οι εξαγόμενοι χρόνοι από την παρούσα πειραματική διαδικασία είναι ελάχιστα υψηλότεροι. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στη χρήση πιο αργών ζεύξεων. Ο χρόνος σύγκλισης του RIP υπολογίστηκε αρκετά χαμηλότερος από τους συγγραφείς. Μία πειστική εξήγηση του φαινομένου είναι ότι ο χρόνος σύγκλισης του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου εμφανίζει μεγάλη διακύμανση ανάλογα με τη στιγμή εμφάνισης της βλάβης.

4 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Εσωτερικής Δρομολόγησης μέσω Προσομοιώσεων

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αφιερώνεται στη συγκριτική αποτίμηση των επιδόσεων των τριών δημοφιλέστερων IGP (RIP, OSPF και EIGRP), αναφορικά με το χρόνο σύγκλισης και άλλες παραμέτρους. Για το σκοπό αυτό αποτυπώνεται η τοπολογία που μελετήθηκε πειραματικά, στο περιβάλλον του λογισμικού event driven προσομοιώσεων OPNET. Αρχικά διενεργούνται προσομοιώσεις σύγκρισης των χρόνων σύγκλισης. Τα αποτελέσματα αντιπαρατίθενται με τα εξαγόμενα από το προηγούμενο πείραμα και με αυτά αντίστοιχης ερευνητικής εργασίας. Τέλος, πραγματοποιείται εμπειριστατωμένη σύγκριση των πρωτοκόλλων βάσει άλλων μετρικών και χαρακτηριστικών τους, όπως η ικανότητα λήψης βέλτιστης απόφασης, η επεκτασιμότητα, η καθυστέρηση, οι απαιτούμενοι υπολογιστικοί πόροι, και το ποσό της πληροφορίας δρομολόγησης με την οποία επιβαρύνουν το δίκτυο. Αυτό γίνεται επιλέγοντας διαφορετικές εξόδους από την ίδια προσομοίωση και αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του κάθε πρωτοκόλλου.

4.1 Event Driven Προσομοίωση σε OPNET

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι προσομοιώσεις διενεργούνται στην έκδοση του OPNET, που διαθέτει το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος. Πρόκειται για ένα εξειδικευμένο λογισμικό εκτέλεσης γεγονοδηγούμενων (event driven) προσομοιώσεων της λειτουργίας δικτύων υπολογιστών. Το OPNET χρησιμοποιείται στην Έρευνα και Ανάπτυξη (Research & Development). Διευκολύνει και επιταχύνει την ανάλυση και τη σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών δικτύων, συσκευών, πρωτοκόλλων και εφαρμογών, συμβάλλοντας συχνά στην εξοικονόμηση χρημάτων. Εκδόσεις του προσομοιωτή είναι διαθέσιμες από το 1986, ενώ από το 2012 μετονομάστηκε σε RIVERBED [62], λόγω εξαγοράς από την ομώνυμη εταιρεία.

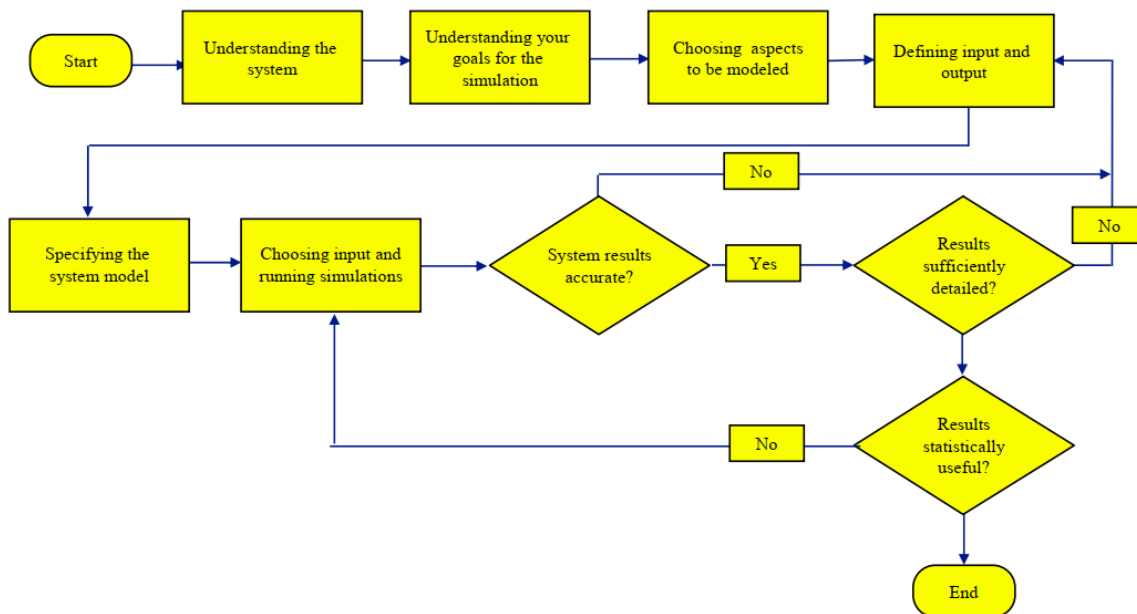
Τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος ανάπτυξης του OPNET το ανέδειξαν ως έναν δημοφιλή και αποτελεσματικό προσομοιωτή. Το γραφικό του περιβάλλον, το πλήθος των διαθέσιμων εξαρτημάτων (components) αναπαράστασης διάφορων δικτυακών οντοτήτων και η ευκολία παραμετροποίησής τους τον καθιστούν ιδιαίτερα εύχρηστο. Ακόμα υποστηρίζει τα περισσότερα διαδεδομένα πρωτόκολλα και τεχνολογίες, εξασφαλίζοντας ελάχιστη πιθανότητα σφαλμάτων στην υλοποίησή τους. Η χρήση τεχνικών παράλληλης και καταναμημένης επεξεργασίας, όταν είναι εφικτή, μειώνει δραστικά το χρόνο εκτέλεσης ακόμα και ιδιαίτερα

πολύπλοκων ή προσομοιώσεων εκτενούς δικτυακής τοπολογίας. Ο τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων είναι εύληπτος, μια και οπτικοποιούνται ως πίνακες, γραφήματα ή σχήματα. Διευκολύνεται έτσι η κατανόηση, η ερμηνεία και η σύγκρισή τους.

Η event driven προσομοίωση [63], όπως υποδηλώνει και η ονομασία της, βασίζεται στα γεγονότα (events). Event είναι ένα τμήμα κώδικα που εκτελείται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, προσομοιώνοντας ένα σύνολο διεργασιών του δικτύου. Βασικά στοιχεία της event driven προσομοίωσης είναι μία καθολική λίστα γεγονότων (global event list) και μία καθολική μεταβλητή ρολογιού (global clock), που υποδεικνύει τη σειρά εκτέλεσης των events. Η global event list είναι ουσιαστικά μία ουρά αναμονής. Διατηρεί τα events προς εκτέλεση, ταξινομημένα κατά χρονολογική σειρά, ενδεχομένως και κατά προτεραιότητα. Το πέρας της εκτέλεσης ενός event ακολουθεί η διαγραφή του από τη global event list. Καθένα μπορεί να πυροδοτήσει τη μελλοντική εκτέλεση ενός άλλου ή του εαυτού του, ωθώντας το στη global event list με τις ενδεδειγμένες παραμέτρους (χρόνος έναρξης εκτέλεσης, προτεραιότητα, κλπ.). Το τελευταίο συνήθως τερματίζει την προσομοίωση και «παρουσιάζει» τα αποτελέσματα στο χρήστη.

Το OPNET αποκρύπτει την παραπάνω διαδικασία από το χρήστη. Τα components και άλλα τμήματα του προσομοιωτή συνοδεύονται από τον κώδικα των αντίστοιχων events. Οι είσοδοι του κώδικα λαμβάνονται από την παραμετροποίηση των components και της προσομοίωσης. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να εστιάσει στο πρόβλημα και να εργαστεί σύμφωνα με το διάγραμμα ροής της Εικόνα 4-1.

Για να προσομοιωθεί ένα σύστημα με το OPNET, αρχικά πρέπει να μελετηθεί το ίδιο το σύστημα και να οριστούν με σαφήνεια οι επιθυμητοί στόχοι. Επιπλέον καθορίζονται οι είσοδοι και οι έξοδοι της προσομοίωσης και επιλέγονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος που επιδρούν στο αποτέλεσμα. Ακολούθως, αποτυπώνεται η τοπολογία στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού και εκτελούνται οι προσομοιώσεις. Εφόσον τα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι λογικά, ανταποκρίνονται στους αρχικούς στόχους και διαθέτουν την απαιτούμενη ακρίβεια, περατώνεται η διαδικασία. Διαφορετικά απαιτείται η επιστροφή σε προηγούμενα στάδια, η εφαρμογή διορθώσεων και η επανάληψη της διαδικασίας.



Εικόνα 4-1: Γενικό Διάγραμμα ροής διαδικασίας προσομοίωσης δικτύου υπολογιστών στο RIVERBED [63]

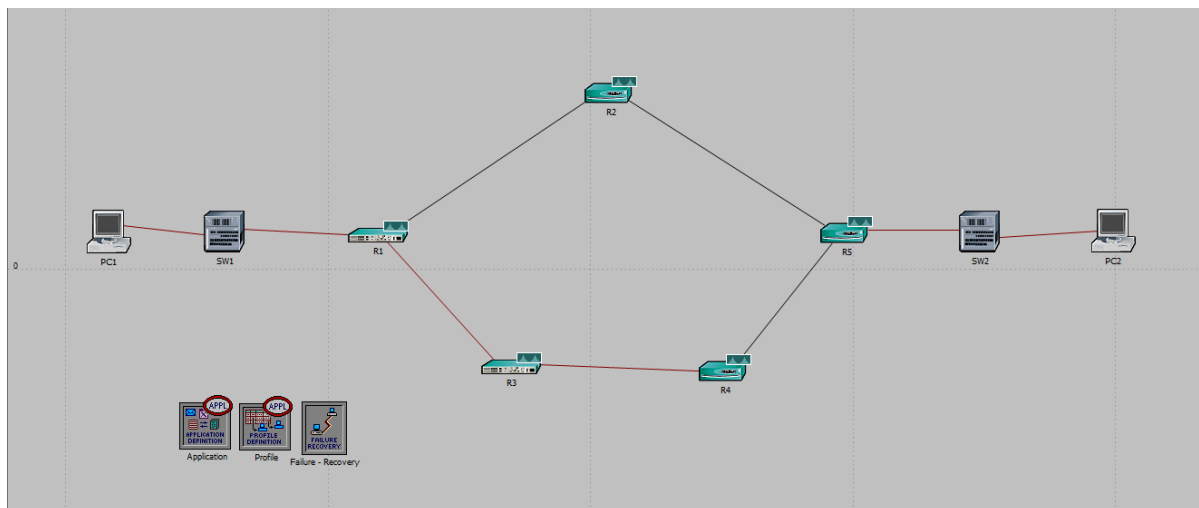
4.2 Σχηματισμός Τοπολογίας και Εκτέλεση Προσομοιώσεων

Η προσεκτική επιλογή των components εξασφαλίζει την κατά το δυνατόν πιστή αναπαράσταση της προηγούμενης τοπολογίας στον προσομοιωτή. Χρησιμοποιούνται λοιπόν τα components που αντιστοιχούν στις οντότητες του πραγματικού δικτύου. Όπου αυτό δεν είναι εφικτό, επιλέγονται εικονικές συσκευές με παρόμοιες ιδιότητες.

Σε ότι αφορά το υλικό, οι προσωπικοί υπολογιστές γενικής χρήσης (PC1 και PC2) προσομοιώνονται από το εξάρτημα «ethernet workstation» και τα switches (SW1, SW2) με οποιοδήποτε αντίστοιχο component. Δίνεται προσοχή ώστε το τελευταίο να διαθέτει διεπαφές Ethernet και να υλοποιεί το πρωτόκολλο STP. Επιπλέον επιλέγονται components προσομοίωσης της λειτουργίας δρομολογητών κατασκευασμένων από τη CISCO, καθώς είναι διαθέσιμα. Χρησιμοποιούνται λοιπόν τρεις δρομολογητές CISCO 1720 (πανομοιότυποι με δύο από αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα) και δύο CISCO 2621, με επιθυμητά χαρακτηριστικά διαθέσιμων διεπαφών.

Ακολουθεί η σύνδεση των παραπάνω components, οπότε σχηματίζεται η τοπολογία (Εικόνα 4-2). Οι ζεύξεις Ethernet («απλές» και crossover) προσομοιώνονται με το (εικονικό) καλώδιο «100BaseT». Είναι full duplex και επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 100 Mbps, αντίστοιχα με την πειραματική τοπολογία. Οι σειριακές ζεύξεις (smart και T1) αναπαρίστανται με την εικονική ζεύξη T1 και στις δύο περιπτώσεις. Είναι full duplex και χαρακτηρίζονται από χαμηλό ρυθμό μετάδοσης (έως 1,544 Mbps), όπως και οι αντίστοιχες ζεύξεις του πειράματος.

Ο τύπος κάθε ζεύξης (Ethernet ή σειριακή) που επιλέγεται στην προσομοίωση υπαγορεύεται από τον αντίστοιχο της πραγματικής τοπολογίας. Η διαθεσιμότητα των θυρών εξασφαλίστηκε χάρη στην προσεκτική επιλογή των δρομολογητών.



Εικόνα 4-2: Αποτύπωση της μελετούμενης δικτυακής τοπολογίας στο RIVERBED

Αφού σχηματιστεί η τοπολογία, κάθε component μετονομάζεται σύμφωνα με την Εικόνα 3-2. Το OPNET υποστηρίζει τη στατική ανάθεση IP διευθύνσεων, οπότε σε κάθε ενεργή θύρα συσκευής θα μπορούσε να ανατεθεί και να μείνει αμετάβλητη η διεύθυνση που υποδεικνύει το πλάνο διευθυνσιοδότησης (Εικόνα 3-5). Ωστόσο, χάριν ευκολίας και καθώς δεν είναι απαραίτητη η εμφάνιση των συγκεκριμένων διευθύνσεων, προτιμάται η αυτόματη ανάθεση IPv4 διευθύνσεων.

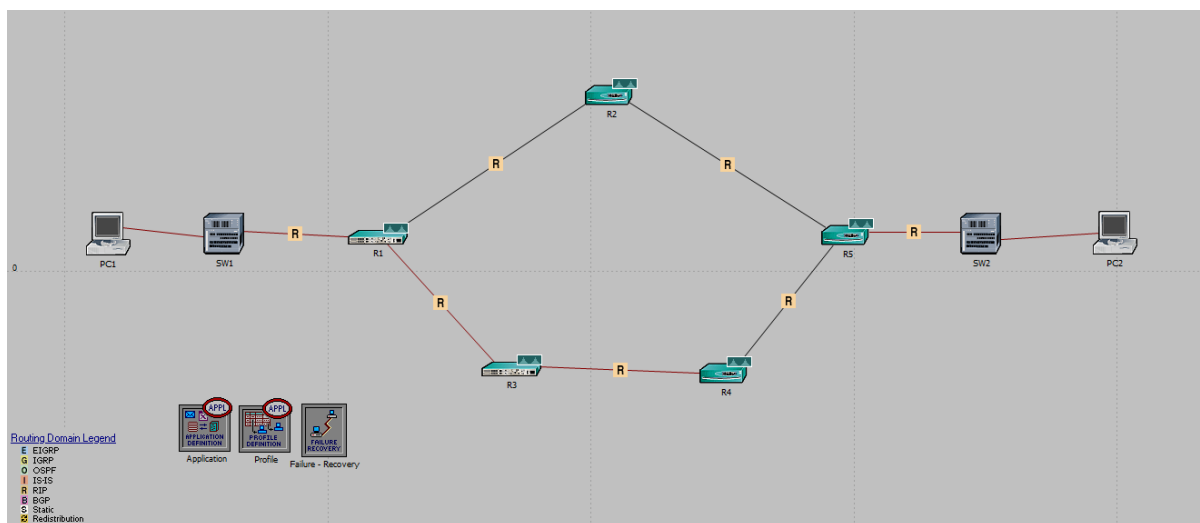
Η δικτυακή κίνηση παράγεται από εφαρμογή που «τρέχει» εικονικά στον PC1 και έχει ως αποδέκτη τον PC2. Για την προσέγγιση της περιοδικής αποστολής πακέτων UDP επιλέγεται εφαρμογή video, καθώς είναι γνωστό ότι χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς. Βέβαια στην προσομοίωση ο χρόνος σύγκλισης, ως ενδογενές χαρακτηριστικό του δικτύου, δε θα έπρεπε να μεταβάλλεται από τον τύπο ή την ένταση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Για τη μοντελοποίηση της εφαρμογής video στο OPNET αξιοποιούνται τα components «Application Definition» και «Profile Definition», μέσω των οποίων προσομοιώνεται η αποστολή video υψηλής ευκρίνειας από το χρήστη του PC1.

Στην Εικόνα 4-2 φαίνεται ένα ακόμα εξάρτημα, με την ονομασία «Failure Recovery». Το OPNET μοντελοποιεί γεγονότα βλάβης σε κάποια ζεύξη ή συσκευή, όπως και την ανάκαμψη από αυτή με το συγκεκριμένο εξάρτημα. Εδώ, κατ' αντιστοιχία με την πειραματική διαδικασία, ορίζεται η διακοπή της σειριακής ζεύξης μεταξύ των δρομολογητών R2 και R5. Ο

χρόνος εμφάνισης της βλάβης τίθεται στα 150 δευτερόλεπτα μετά την έναρξη της προσομοίωσης, οπότε η αρχική σύγκλιση του εκάστοτε πρωτοκόλλου έχει ήδη επιτευχθεί.

Το πρώτο IGP που ενεργοποιείται στο σύνολο των δρομολογητών είναι το RIP. Στο OPNET αυτό γίνεται άμεσα, ενώ η επιτυχής ενεργοποίηση γίνεται αντιληπτή με την εμφάνιση ετικέτας που φέρει το γράμμα R σε κάθε ενεργή ζεύξη (Εικόνα 4-3).

Καθώς το RIP λαμβάνει ως μοναδικό κριτήριο δρομολόγησης τον αριθμό των αλμάτων, η κίνηση θα διέλθει ακολουθώντας την επιθυμητή διαδρομή (PC1 – R1 – R2 – R5 – PC2). Επομένως δεν απαιτούνται περαιτέρω ενέργειες.



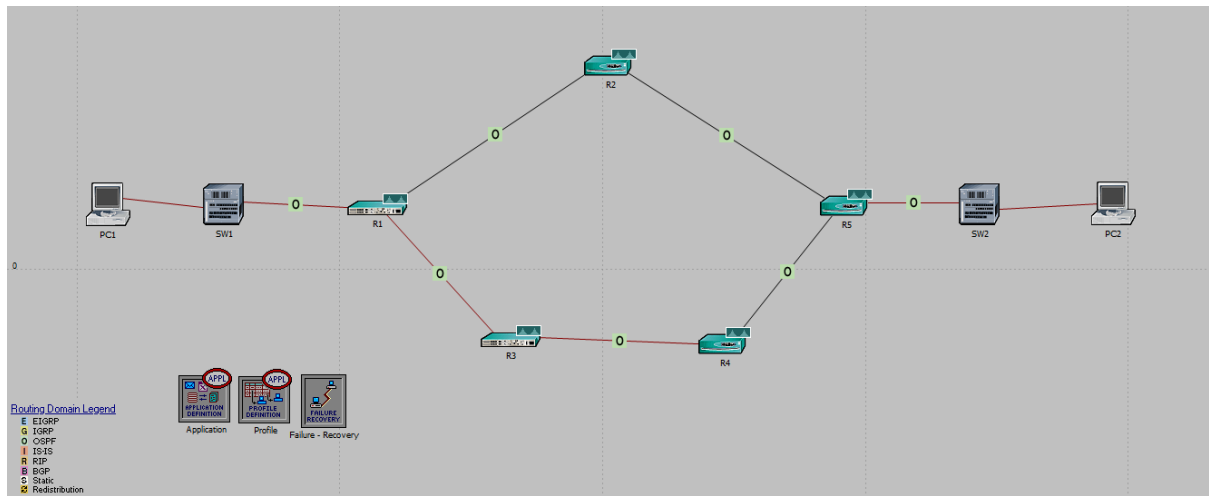
Εικόνα 4-3: Επιβεβαίωση ενεργοποίησης του πρωτοκόλλου RIP.

Ο χρόνος σύγκλισης στο OPNET εξάγεται με την απλή επιλογή της αντίστοιχης εξόδου και έτσι δεν απαιτείται η προσεγγιστική διαδικασία του πειράματος. Δηλαδή αρκεί η επιλογή της global μετρικής «Network Convergence Duration (sec)». Εκφράζει το χρόνο σύγκλισης του δικτύου σε δευτερόλεπτα, κάθε φορά που αυτό απαιτείται. Η μετρική αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την εμφάνιση ενός συμβάντος (εδώ της βλάβης), μέχρι την ολοκλήρωση της τροποποίησης όλων των πινάκων δρομολόγησης.

Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας για το RIP περιλαμβάνει την εκτέλεση της προσομοίωσης, ώστε να διατηρηθεί ο χρόνος σύγκλισής του. Εκτελείται για τρία λεπτά, με προεπιλεγμένες τιμές των λοιπών παραμέτρων. Καλό είναι η παράμετρος «Simulation Efficiency» του πρωτοκόλλου να απενεργοποιηθεί.

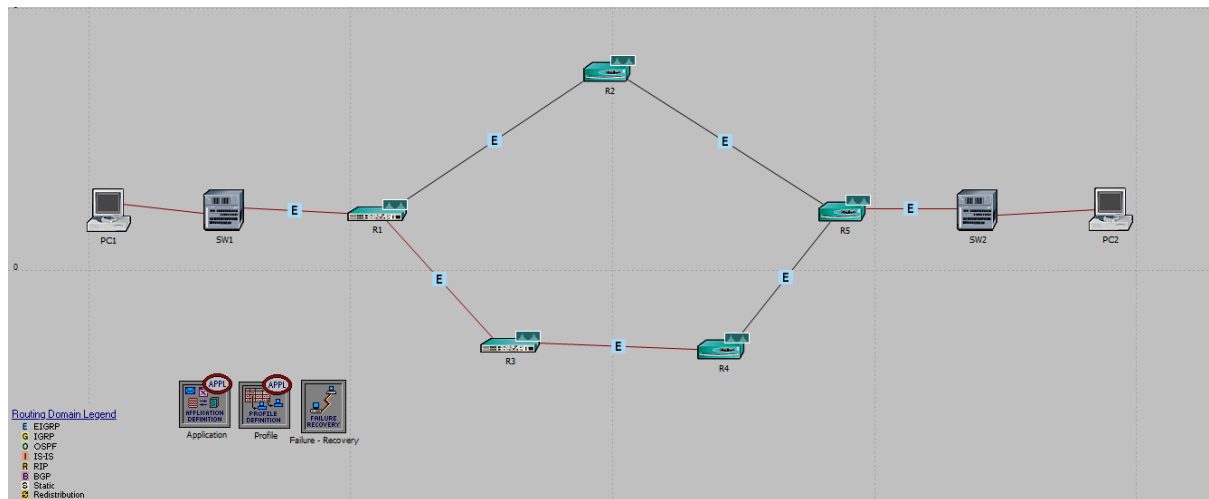
Ακολουθεί η επανάληψη της διαδικασίας για το OSPF. Δημιουργείται ένα νέο σενάριο με την ίδια τοπολογία και παραμέτρους. Σε αυτό, το μόνο IGP εν χρήση πρέπει να είναι το

OSPF (Εικόνα 4-4). Η προσομοίωση εκτελείται για τρία λεπτά, οπότε λαμβάνεται ο χρόνος σύγκλισης του OSPF.



Εικόνα 4-4: Επιβεβαίωση ενεργοποίησης του πρωτοκόλλου OSPF.

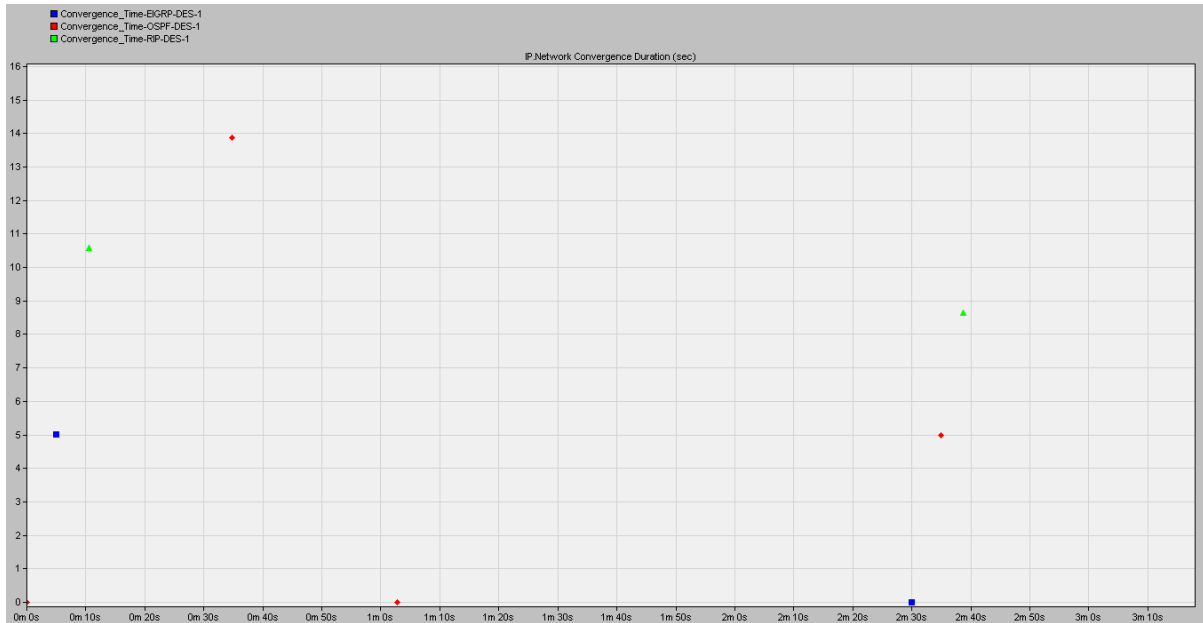
Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ακόμα μία φορά, με μόνο ενεργοποιημένο πρωτόκολλο το EIGRP (Εικόνα 4-5). Διατηρείται λοιπόν και ο δικός του χρόνος σύγκλισης.



Εικόνα 4-5: Επιβεβαίωση ενεργοποίησης του πρωτοκόλλου EIGRP.

4.3 Αποτελέσματα

Αφού εκτελεστεί η τελευταία προσομοίωση (για το EIGRP), επιλέγεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και για τα τρία σενάρια. Το συγκριτικό γράφημα των χρόνων αρχικής σύγκλισης αλλά και σύγκλισης κατόπιν συμβάντος (έστω σύγκλιση) των τριών πρωτοκόλλων παρατίθεται στην Εικόνα 4-6.



Εικόνα 4-6: Συγκριτική παρουσίαση χρόνων αρχικής σύγκλισης και σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων

Οι αριθμητικές τιμές στις οποίες αντιστοιχούν τα σημεία του παραπάνω διαγράμματος αναφέρονται στον Πίνακα 4-1. Οι χρόνοι εκφράζονται σε δευτερόλεπτα.

Πίνακας 4-1: Χρόνοι αρχικής σύγκλισης και σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων.

Πρωτόκολλο	Χρόνος αρχ.σύγκλισης (sec)	Χρόνος σύγκλισης (sec)
RIP	10.576	8.657
OSPF	13.886	5.001
EIGRP	5.003	0.005

Παρά τους αρκετά μεγαλύτερους χρόνους σύγκλισης της πραγματικής τοπολογίας, τα συμπεράσματα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης συμφωνούν. Δηλαδή οι χρόνοι σύγκλισης κατά αύξουσα σειρά είναι $T_{EIGRP} < T_{OSPF} < T_{RIP}$ (όπου T ο χρόνος σύγκλισης). Ακόμα, το μέγεθος της διαφοράς των τιμών μεταξύ των τριών πρωτοκόλλων προκύπτει παραπλήσιο. Οι τιμές των OSPF και EIGRP εμφανίζονται κατά 2 δευτερόλεπτα μεγαλύτερες. Στο RIP δεν ισχύει κάτι τέτοιο, καθώς η συγκεκριμένη τιμή παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα.

Η ερευνητική δημοσίευση [41], πραγματεύεται παρόμοια διαδικασία. Οι συγγραφείς της κατέληξαν σε ανάλογο συμπέρασμα, αναφορικά με την αντιπαραβολή των χρόνων σύγκλισης της πραγματικής τοπολογίας και της προσομοίωσης.

Αυτές οι διαφορές πιθανότατα παρατηρούνται επειδή ο προσομοιωτής δε λαμβάνει υπόψη παράγοντες που επιδρούν στο χρόνο ανίχνευσης της βλάβης. Επιπλέον, οι σειριακές ζεύξεις της πραγματικής τοπολογίας επιτυγχάνουν αρκετά χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ώστε να προστίθεται αρκετή καθυστέρηση κατά την ανταλλαγή μηνυμάτων, η οποία πιθανότατα λαμβάνεται μικρότερη.

Στην προσομοίωση, είναι ιδιαίτερα εύκολο να μελετηθεί και ο χρόνος της αρχικής σύγκλισης εκάστου πρωτοκόλλου. Πρόκειται για το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή της ταυτόχρονης ενεργοποίησης όλων των συσκευών του δικτύου, μέχρι τη στιγμή ολοκλήρωσης του σχηματισμού και του τελευταίου πίνακα δρομολόγησης. Θεωρείται ότι η παραμετροποίηση των συσκευών και η ενεργοποίηση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης σε αυτές έχει προηγηθεί, ενώ οι ρυθμίσεις διατηρήθηκαν όσο οι συσκευές ήταν εκτός λειτουργίας.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4-1, γίνεται αντιληπτό ότι το OSPF παρουσιάζει τον μεγαλύτερο χρόνο αρχικής σύγκλισης, ενώ ακολουθεί το RIP με διαφορά λίγων δευτερολέπτων. Το έξυπνα σχεδιασμένο EIGRP διατηρεί την υπεροχή του και ως προς την παράμετρο αυτή. Ο μεγάλος χρόνος αρχικής σύγκλισης του OSPF δικαιολογείται από τη φύση του, ως πρωτόκολλο κατάστασης συνδέσμων. Αυτό διότι η διάδοση της λεπτομερούς πληροφορίας του δικτύου που διατηρεί κάθε κόμβος χρειάζεται χρόνο.

Αντιπαραβάλλοντας τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα των συγγραφέων του ερευνητικού άρθρου [41] (Πίνακας 4-2), παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις. Σημαντικότερη είναι ο μικρότερος χρόνος αρχικής σύγκλισης του OSPF, που για λίγο δεν υπερβαίνει του RIP. Το μέγεθος των αποκλίσεων επιβεβαιώνει την ορθότητα του αποτελέσματος. Οφείλονται πιθανότατα σε διαφοροποιήσεις της τοπολογίας (π.χ. συσκευές, ζεύξεις) και ίσως στη διαφορετική έκδοση ή παραμετροποίηση του προσομοιωτή.

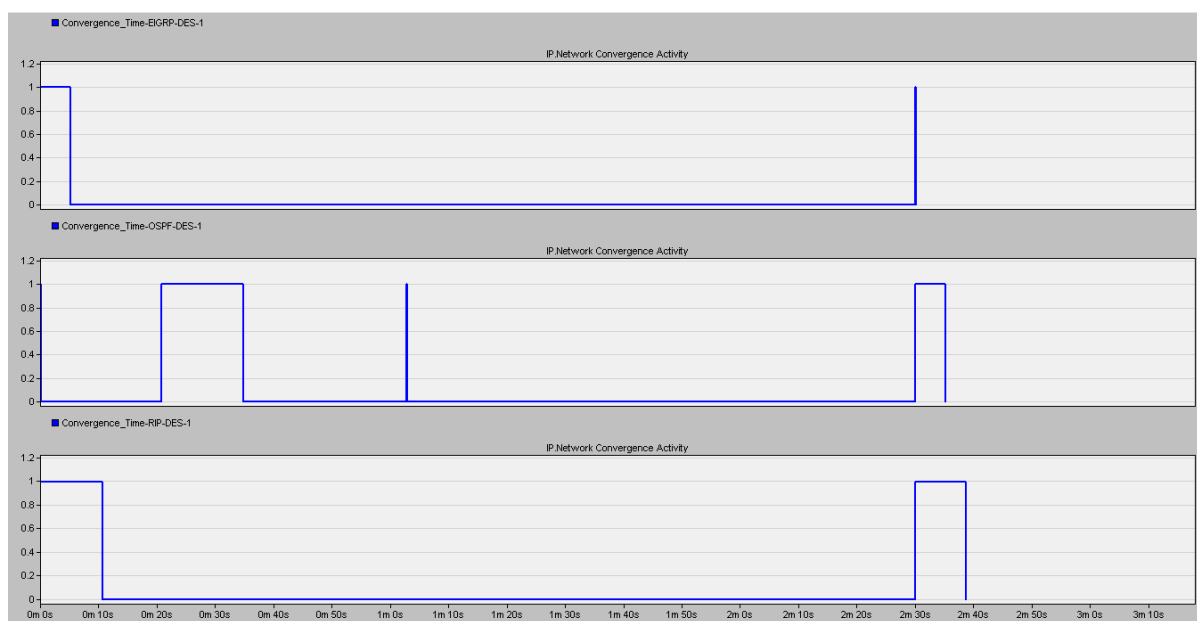
Πίνακας 4-2: Χρόνοι αρχικής σύγκλισης και σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων, όπως υπολογίστηκαν στη δημοσίευση [41].

Πρωτόκολλο	Χρόνος αρχ.σύγκλισης (sec)	Χρόνος σύγκλισης (sec)
RIP	11.010	8.660
OSPF	10.750	5.010
EIGRP	5.018	0.025

Ως προς το χρόνο αρχικής σύγκλισης του OSPF, τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα αφού η πραγματική σταθεροποίηση του δικτύου συντελείται αρκετά αργότερα από το χρόνο των περίπου 14 δευτερολέπτων. Το γεγονός γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα της Εικόνα 4-6, όπου εμφανίζονται δύο ακόμα τιμές της τάξης των microseconds εκατέρωθεν του

αναφερόμενου χρόνου αρχικής σύγκλισης. Από το διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι η πλήρης σταθεροποίηση επέρχεται περί τα 64 δευτερόλεπτα από την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των συσκευών.

Το OPNET διαθέτει τη μετρική «Network Convergence Activity», μέσω της οποίας αποτυπώνεται περισσότερο εύληπτα η εξεταζόμενη συμπεριφορά του OSPF (Εικόνα 4-7). Το γράφημα απεικονίζει τη μετρική και για τα τρία πρωτόκολλα. Η τιμή 1 αντιστοιχεί στην επιτέλεση διεργασιών σύγκλισης τη στιγμή της μέτρησης, ενώ η τιμή 0 στην απουσία τους.



Εικόνα 4-7: Αποτύπωση δραστηριοτήτων σύγκλισης των πρωτοκόλλων RIP, OSPF και EIGRP

Η σύγκλιση του OSPF φαινομενικά ξεκινά μερικά δευτερόλεπτα μετά την ενεργοποίηση των συσκευών. Αρκετά δευτερόλεπτα μετά τον τερματισμό της παρατηρείται μία ακόμα στιγμιαία σχετική δραστηριότητα. Το γεγονός αποδίδεται στην αρκετά πολύπλοκη διαδικασία αρχικού συγχρονισμού των LSDBs. Αποδεικνύεται στη συνέχεια ότι αφού παρέλθουν τα περίπου 14 δευτερόλεπτα, το δίκτυο είναι λειτουργικό. Από το ίδιο γράφημα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αρχική σύγκλιση των RIP και EIGRP εκκινεί τη χρονική στιγμή ενεργοποίησης των συσκευών. Μετά το πέρας της δεν επιτελούνται τέτοιες διαδικασίες, εκτός και αν παρατηρηθεί κάποιο συμβάν (όπως η διακοπή της ζεύξης στα 150 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης).

Μετρώντας το χρόνο σύγκλισης του RIP στην πραγματική τοπολογία διαπιστώθηκε αρκετά μεγάλη διακύμανσή του, μεταξύ διαδοχικών εκτελέσεων του πειράματος. Το γεγονός οφείλεται στο σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών

περιοδικών ενημερώσεων. Εάν η βλάβη εμφανιστεί λίγο πριν την έλευση πακέτου ενημέρωσης, η σύγκλιση θα είναι αισθητά ταχύτερη απ' ό,τι εάν εμφανιστεί αμέσως μετά την έλευση του πακέτου [41].

Προς διερεύνηση της κατάστασης, εκτελείται η προσομοίωση για έξι διαφορετικές χρονικές στιγμές εμφάνισης της βλάβης. Λαμβάνεται μέριμνα ώστε η περίοδος των στιγμών δειγματοληψίας να μην ταυτίζεται με αυτή των ενημερώσεων. Τα αποτελέσματα κάθε πρωτοκόλλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3: Χρόνοι σύγκλισης των τριών πρωτοκόλλων για διαφορετικές στιγμές εμφάνισης της βλάβης.

	60 sec	80 sec	100 sec	120 sec	140 sec	160 sec
RIP	8,66	18,66	5,44	14,51	18,66	4,56
OSPF	2,77	22,23	5,00	5,00	5,00	5,00
EIGRP	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005

Παρατηρώντας τον πίνακα γίνεται αντιληπτή η μεταβλητότητα του χρόνου σύγκλισης του RIP, ανάλογα με τη χρονική στιγμή εμφάνισης του συμβάντος στο δίκτυο. Μάλιστα για εμφάνιση στα 160 δευτερόλεπτα μετά την ενεργοποίηση των συσκευών, το RIP συγκλίνει ελαφρώς γρηγορότερα από το OSPF. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται στα άλλα δύο πρωτόκολλα, εφόσον η βλάβη εμφανιστεί υπό συνθήκες σταθερής τοπολογίας.

Μία άλλη αξιοσημείωτη παρατήρηση αφορά το OSPF. Όπως έχει αναφερθεί, η αρχική σύγκλιση του επιτυγχάνεται περίπου στα 14 δευτερόλεπτα, ωστόσο το δίκτυο σταθεροποιείται πλήρως αρκετά αργότερα (πριν τα 90 δευτερόλεπτα). Εφόσον η βλάβη εμφανιστεί στο μεσοδιάστημα της αρχικής σύγκλισης και της πλήρους σταθεροποίησης, ο χρόνος εμφανίζει μεγάλη στοχαστικότητα (τιμές για διακοπή ζεύξης στα 60 και 80 δευτερόλεπτα). Ωστόσο η σύγκλιση είναι επιτυχημένη.

4.4 Άλλα Κριτήρια Σύγκρισης Πρωτοκόλλων Εσωτερικής Δρομολόγησης (IGPs)

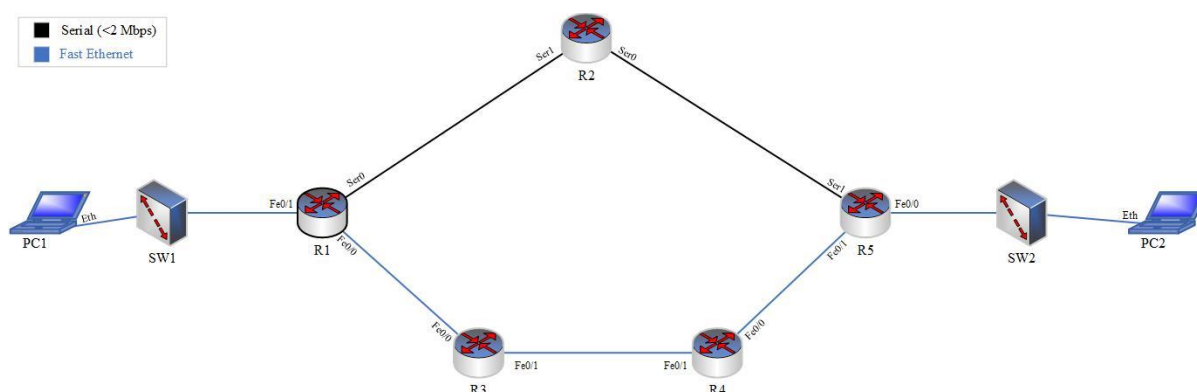
Ο χρόνος σύγκλισης είναι μία σημαντική παράμετρος επιλογής του κατάλληλου IGP, όχι όμως η μοναδική. Στην παρούσα υπόθεση συγκρίνονται τα τρία πρωτόκολλα ως προς ποικίλες άλλες παραμέτρους. Η αποτίμηση ως προς αυτές λαμβάνει χώρα βάσει των χαρακτηριστικών κάθε IGP και βάσει προσομοιώσεων σε OPNET. Αυτές αφορούν στην ίδια τοπολογία, με τη διαφορά ότι δεν προσομοιώνεται η διακοπή κάποιας ζεύξης. Επιπλέον δεν πραγματοποιείται κάποια ρύθμιση που να αναγκάζει τα πακέτα να ακολουθούν συγκεκριμένη

διαδρομή. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα αποτελούν μέσο όρο των τιμών που συλλέχθηκαν από το λογισμικό κατά τη σταθερή λειτουργία του δικτύου για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα (ο χρόνος προσομοίωσης τίθεται στις δύο ώρες). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνονται και από τη βιβλιογραφία [42], [39].

4.4.1 Ικανότητα Επιλογής Βέλτιστης Διαδρομής

Η ικανότητα κάθε πρωτοκόλλου να αξιοποιεί κάθε φορά τη βέλτιστη διαδρομή προς έναν κόμβο, που προσεγγίζεται μέσω εναλλακτικών διαδρομών, μπορεί να εξεταστεί λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο δρομολόγησης. Όπως αναφέρθηκε, το RIP επιλέγει τη διαδρομή βάσει του μικρότερου αριθμού αλμάτων, οπότε δεν εγγυάται ότι αυτή χαρακτηρίζεται από κάποια βέλτιστη παράμετρο. Από προεπιλογή, το OSPF χρησιμοποιεί ως κριτήριο δρομολόγησης το εύρος ζώνης, ενώ το EIGRP το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση της διαδρομής. Επιπλέον, τα δύο αυτά πρωτόκολλα επιδέχονται σχετικές ρυθμίσεις ώστε να δρομολογούν και βάσει άλλων παραμέτρων [39]. Χάρη στις K values θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το EIGRP πλεονεκτεί έναντι του OSPF, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία.

Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί μια παραλλαγή της εξεταζόμενης τοπολογίας (Εικόνα 4-8), όπου η διαδρομή R1 – R2 – R5 αποτελείται από σειριακές ζεύξεις μέγιστου ρυθμού κάτω των 2 Mbps, ενώ όλες οι υπόλοιπες ζεύξεις της τοπολογίας είναι τύπου Fast Ethernet (100 Mbps). Το RIP θα επέλεγε την αργή διαδρομή PC1 – R1 – R2 – R5 – PC2, ενώ τα άλλα δύο πρωτόκολλα την PC1 – R1 – R3 – R4 – R5 – PC2.



Εικόνα 4-8: Τοπολογία σύγκρισης επιλεγόμενης διαδρομής.

Συμπερασματικά λοιπόν διακρίνεται η αδυναμία του RIP έναντι των άλλων δύο πρωτοκόλλων ως προς την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής.

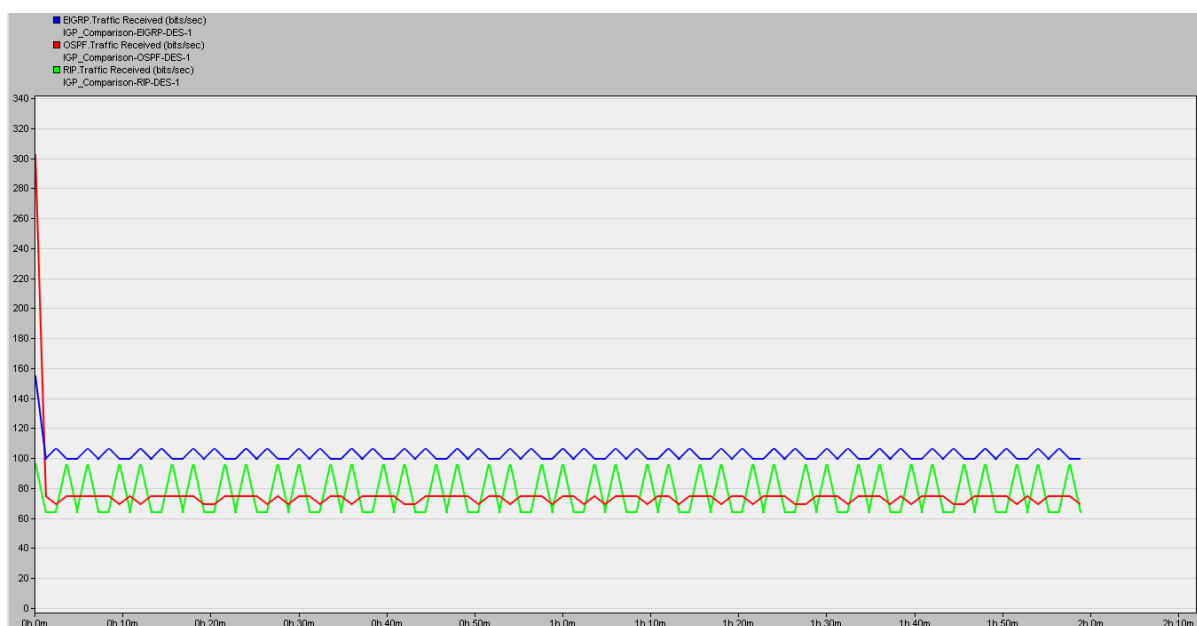
4.4.2 Επεκτασιμότητα

Ως γνωστόν, το RIP δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερες τοπολογίες, μια και ο μέγιστος υποστηριζόμενος αριθμός αλμάτων τίθεται στα 16. Επιπλέον δεν έχει προτυποποιηθεί κάποια μέθοδος διαχωρισμού μιας μεγάλης τοπολογίας, με τον περιορισμό να ισχύει εντός κάθε υποσυνόλου συσκευών. Αντίθετα, το OSPF και το EIGRP διατηρούν τις επιδόσεις ενός μεγάλου δικτύου σε αποδεκτά επίπεδα. Σε αυτό συμβάλλει η διάσπαση σε OSPF areas και EIGRP ASs, αντίστοιχα.

4.4.3 Παραγόμενη Δικτυακή Κίνηση

Κάθε IGP παράγει δικτυακή κίνηση (overhead), που αντιστοιχεί σε πακέτα ανταλλαγής πληροφοριών δρομολόγησης. Το overhead ενός πρωτοκόλλου πρέπει να διατηρείται κατά το δυνατόν σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να μη συμβάλλει σημαντικά στη συμφόρηση του δικτύου. Η συμπεριφορά κάθε πρωτοκόλλου ως προς την παράμετρο αυτή αναλύεται εξετάζοντας τον αριθμό των πακέτων που λαμβάνει κάθε δρομολογητής του δικτύου, όταν εφαρμόζεται έκαστο πρωτόκολλο και δεν μεταβάλλεται άλλη παράμετρος.

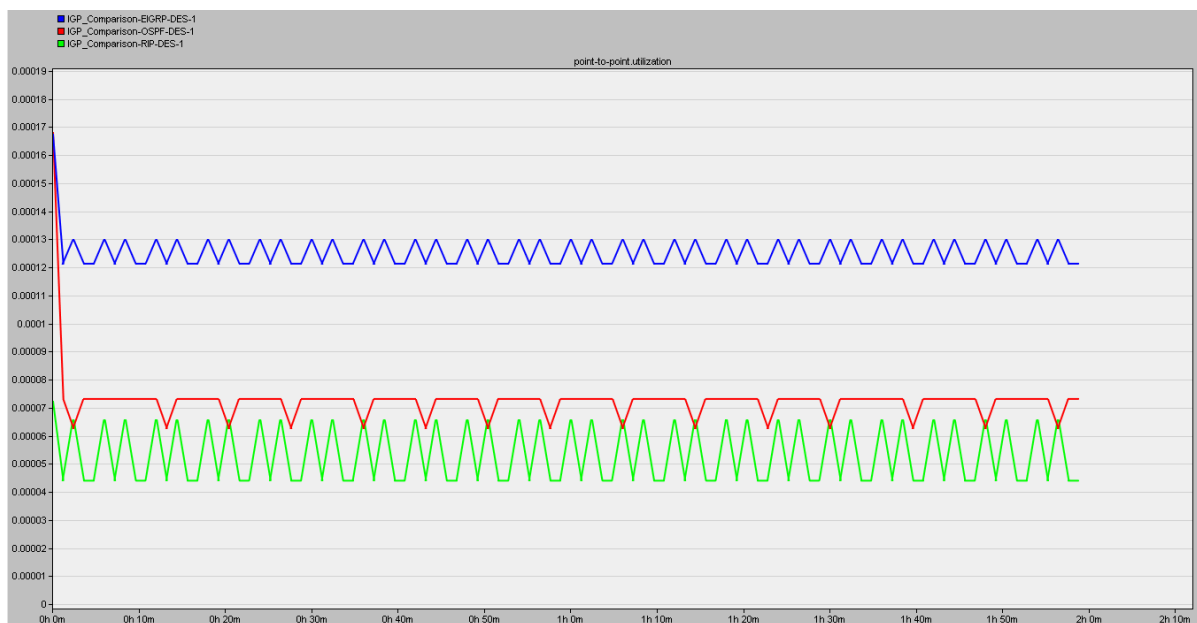
Για το σκοπό αυτό εξάγεται από την προσομοίωση η μετρική «Traffic Received» για κάθε πρωτόκολλο. Αντιστοιχεί στον αριθμό των bits δικτυακής κίνησης, σχετικής με το εφαρμοζόμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης, που λαμβάνονται από το σύνολο των διεπαφών ενός δρομολογητή, ανά δευτερόλεπτο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τον R2 αποτυπώνονται στην Εικόνα 4-9 και εν γένει ταυτίζονται με των λοιπών δρομολογητών.



Εικόνα 4-9: Συνολικός αριθμός bits που λαμβάνει ο R2 και σχετίζονται με το overhead εκάστου πρωτοκόλλου δρομολόγησης.

Όπως γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας το συγκριτικό γράφημα, το overhead που παράγεται από το RIP και το OSPF είναι αισθητά χαμηλότερο από αυτό του EIGRP. Το τελευταίο, παρά τον προσεκτικό σχεδιασμό του, παρουσιάζει χειρότερη συμπεριφορά από τα άλλα δύο απλούστερα πρωτόκολλα. Το RIP, λόγω των προεπιλεγμένων αραιών περιοδικών ανταλλαγών ολόκληρου του πίνακα δρομολόγησης μεταξύ των γειτόνων, εμφανίζει στιγμιαία μεγαλύτερο overhead από το OSPF.

Ένας ακόμη τρόπος σύγκρισης του overhead που παράγει κάθε πρωτόκολλο είναι η ανάλυση του ποσοστού χρήσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης των διαύλων για κάθε περίπτωση, υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας του δικτύου. Στο OPNET η μετρική point-to-point «Utilization» εκφράζει το ποσοστό επί τοις εκατό του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης κάποιας ζεύξης. Τιμή 100% αντιστοιχεί σε πλήρη χρήση. Παρατίθεται το διάγραμμα για τη ζεύξη R3 – R4, απ’ όπου διέρχονται αποκλειστικά πακέτα συντονισμού του δικτύου (Εικόνα 4-10). Τα διαγράμματα ζεύξεων απ’ όπου διέρχονται επιπλέον τα UDP πακέτα της εφαρμογής εμφανίζονται λίγο διαφοροποιημένα.



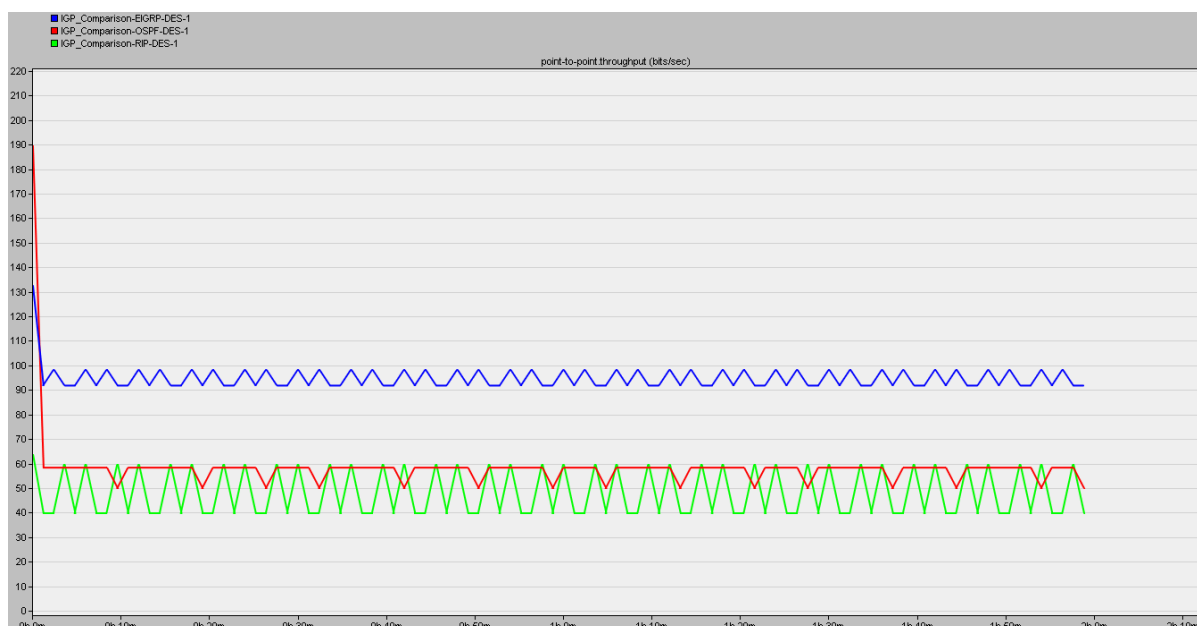
Εικόνα 4-10: Μεταβολή μέσης τιμής ποσοστού χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης της ζεύξης R3 – R4, για κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Το διάγραμμα επιβεβαιώνει τα παραπάνω συμπεράσματα. Καθώς από τη συγκεκριμένη ζεύξη διέρχονται αποκλειστικά πληροφορίες ελέγχου και διατηρείται η ίδια παραμετροποίηση για κάθε IGP, ο μόνος παράγοντας επηρεασμού του ποσοστού χρήσης ζεύξης είναι το overhead του πρωτοκόλλου. Φαίνεται ότι το overhead του RIP είναι το ελάχιστο και εμφανίζει κορυφές, που αντιστοιχούν στις στιγμές ανταλλαγής πινάκων δρομολόγησης μέσω του δίαυλου. Η

αντίστοιχη καμπύλη του OSPF υποδεικνύει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές και παρουσιάζει μικρότερες διακυμάνσεις. Τέλος, το ποσοστό χρήσης του εύρους ζώνης από το EIGRP είναι σαφώς υψηλότερο. Βέβαια, οι τιμές της παραμέτρου και για τα τρία πρωτόκολλα είναι χαμηλές και απολύτως βιώσιμες.

Μία ακόμα επιβεβαίωση του μεγαλύτερου overhead του EIGRP είναι η εμφάνιση μεγαλύτερου throughput σε επίπεδο ζεύξης. Η μετρική για ζεύξη απ' όπου δεν μεταφέρονται πακέτα της εφαρμογής αποτυπώνεται στην Εικόνα 4-11, για κάθε πρωτόκολλο.

Η διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput) ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο διέρχονται τα δεδομένα από ένα δίαυλο, για δεδομένο χρονικό διάστημα και έχει μονάδα μέτρησης bits / second ή packets / second. Αντιστοιχεί στη μετρική point-to-point «throughput (bits/sec)» του OPNET.



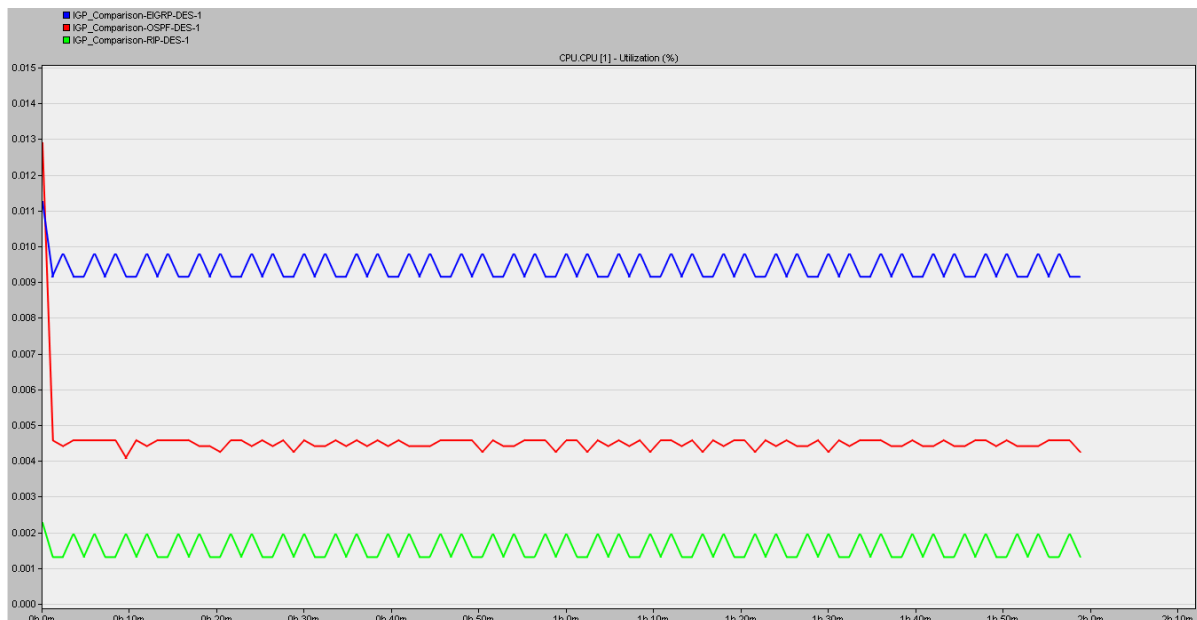
Εικόνα 4-11: Throughput ζεύξης που μεταφέρει αποκλειστικά πληροφορία ελέγχου.

4.4.4 Κατανάλωση Υπολογιστικών Πόρων

Μία άλλη παράμετρος σύγκρισης των IGP's είναι η κατανάλωση υπολογιστικών πόρων του δρομολογητή. Κυριότεροι τέτοιοι πόροι είναι η επεξεργαστική ισχύς και η μνήμη (RAM).

Η προσομοίωση καθιστά δυνατή τη σύγκριση των πρωτοκόλλων ως προς την επεξεργαστική ισχύ, με τη μετρική Node CPU «Utilization (%)». Εκφράζει το ποσοστό επί τοις εκατό χρήσης της «Simple CPU», δηλαδή αυτής που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία πληροφοριών προώθησης IP πακέτων και εφαρμογών που εκτελούνται στο προσκήνιο ή το παρασκήνιο. Επεξεργαστική ισχύς που δαπανάται στην επεξεργασία πληροφοριών σχετικών

με χρονοθυρίδες του IP δε λαμβάνεται υπόψη. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τον R2 παρατίθενται στην Εικόνα 4-12. Τα γραφήματα που αντιστοιχούν στους υπόλοιπους δρομολογητές είναι ανάλογα.



Εικόνα 4-12: Ποσοστό χρήσης της CPU του R2 χρησιμοποιώντας έκαστο πρωτόκολλο δρομολόγησης.

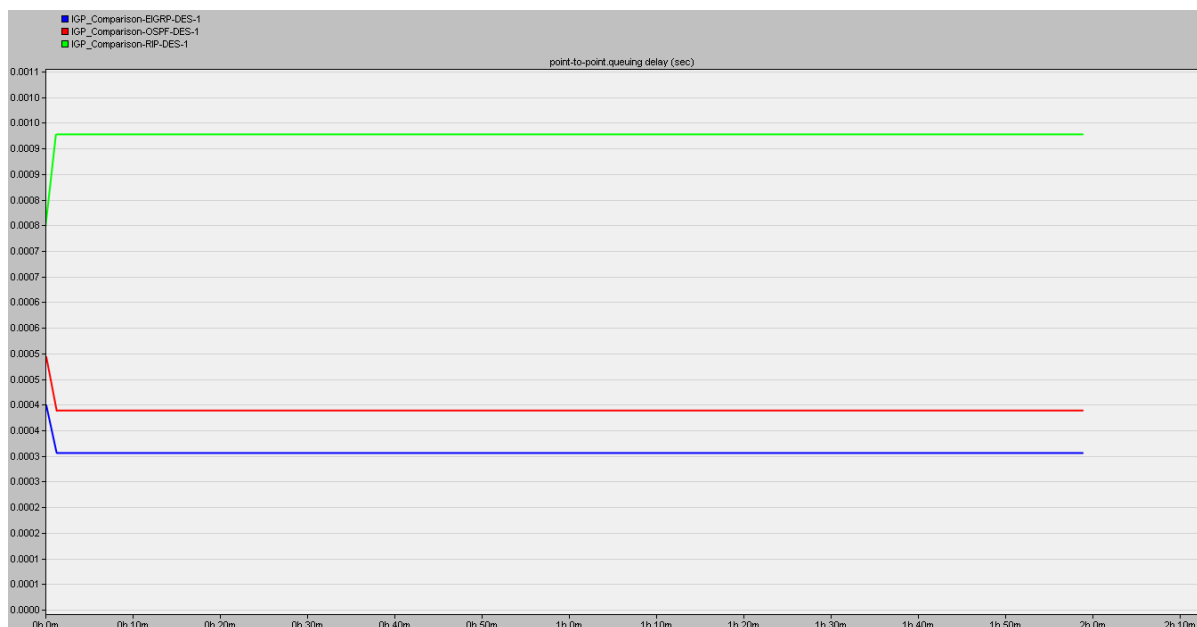
Γίνεται ξεκάθαρο ότι το ποσοστό χρήσης της Simple CPU είναι μικρότερο για το RIP, ακολουθεί το OSPF και τέλος το EIGRP. Το γεγονός μπορεί να εξηγηθεί θεωρώντας την πολυπλοκότητα του κάθε αλγορίθμου δρομολόγησης. Του RIP είναι ιδιαίτερα απλός. Του OSPF επίσης, ωστόσο επεξεργάζεται πληροφορία της συνολικής τοπολογίας. Αντίθετα για το EIGRP, το τίμημα της άμεσης σύγκλισης και των εξελιγμένων χαρακτηριστικών του είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα. Συνεπώς καταναλώνει περισσότερους πόρους.

Αναφορικά με τη χρήση της μνήμης, τα αποτελέσματα είναι παρόμοια. Το RIP αποθηκεύει σε αυτή τον πίνακα δρομολόγησης και ελάχιστες άλλες πληροφορίες. Το OSPF διατηρεί επιπλέον τη LSDB και περισσότερες πληροφορίες που αφορούν σε γειτονικές σχέσεις και καταστάσεις τους. Το EIGRP διατηρεί επίσης αρκετές πληροφορίες γειτνίασης και τον πίνακα τοπολογίας.

Βέβαια οι σύγχρονες συσκευές διαθέτουν αρκετά μεγάλη υπολογιστική ισχύ και μνήμη. Έτσι οι απαιτήσεις των τριών πρωτοκόλλων μπορούν να καλυφθούν, αρκεί να ληφθεί μέριμνα κατά τη σχεδίαση του δικτύου. Σε διαφορετική περίπτωση, η εκθετική αύξηση των υπολογισμών του αλγορίθμου εξαντλεί τους πόρους, όσοι και αν είναι.

4.4.5 Καθυστέρηση

Η εξασφάλιση ελάχιστης καθυστέρησης μετάδοσης αποτελεί μία ακόμα καίρια απαίτηση στα σύγχρονα δίκτυα υπολογιστών. Προς την κατεύθυνση αυτή είναι ανάγκη να συμβάλλει και το πρωτόκολλο εσωτερικής δρομολόγησης. Το OPNET αποδίδει τη συγκεκριμένη παράμετρο με τη μετρική point-to-point «queuing delay». Λαμβάνει στιγμιαίες μετρήσεις, σε επίπεδο ζεύξης, του χρόνου αναμονής ενός πακέτου στην ουρά του πομπού. Συγκεκριμένα εκφράζει το χρονικό διάστημα από τη στιγμή εισόδου του πακέτου στην ουρά έως τη στιγμή της μετάδοσης και του τελευταίου bit αυτού. Εδώ παρουσιάζονται οι καμπύλες της μέσης τιμής του queuing delay της ζεύξης R1 – R2 (Εικόνα 4-13). Για τις υπόλοιπες, τα συμπεράσματα είναι όμοια. Οι τιμές ενδέχεται να παρουσιάζουν αποκλίσεις της τάξης λίγων microseconds, ανάλογα και με τον τύπο της κάθε ζεύξης.



Εικόνα 4-13: Μεταβολή μέσης καθυστέρησης αναμονής ζεύξης R1 – R2 που αντιστοιχεί σε κάθε πρωτόκολλο.

Φαίνεται ότι η καθυστέρηση κάθε πρωτοκόλλου διατηρείται σταθερή, αφού επιτευχθεί η σύγκλιση. Το EIGRP εξασφαλίζει την ελάχιστη καθυστέρηση, ενώ ακολουθεί το OSPF με ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή. Η καθυστέρηση που αντιστοιχεί στο RIP είναι αρκετά microseconds μεγαλύτερη. Πρόκειται για έναν επιπλέον περιορισμό του πρωτοκόλλου αναφορικά με τα πακέτα ευαίσθητων στην καθυστέρηση εφαρμογών.

5 Επίδραση Αριθμού Δρομολογητών ανά OSPF area στο Χρόνο Σύγκλισης

Το κεφάλαιο αυτό αφιερώνεται στη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ του αριθμού των δρομολογητών μίας OSPF area και του χρόνου σύγκλισης του πρωτοκόλλου. Δηλαδή αναζητείται το όριο του αριθμού των δρομολογητών μιας τοπολογίας, ώστε αυτή να επωφελείται του διαχωρισμού σε OSPF areas. Ισοδύναμα, διερευνάται το όριο του πλήθους συσκευών εντός μίας OSPF area, για το οποίο ο χρόνος σύγκλισης διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα. Η μελέτη βασίζεται στη διενέργεια δύο συνόλων προσομοιώσεων σε OPNET. Παρακάτω περιγράφεται η εκτέλεσή τους και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα.

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί και την ουσιαστική συνεισφορά της εργασίας στο σώμα της γνώσης, μια και η πρακτική επίλυση των εξεταζόμενων θεμάτων βασίζεται κυρίως σε εμπειρικούς κανόνες. Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην επαλήθευση ή την κατάρριψη των κανόνων αυτών σε συγκεκριμένες τοπολογίες.

5.1 Προσομοιώσεις Βαθμιαία Αυξανόμενης Τοπολογίας

Προς διερεύνηση του ορίου στον αριθμό των δρομολογητών πάνω από τον οποίο η τοπολογία επωφελείται από το διαχωρισμό σε OSPF areas, διενεργείται ένα σύνολο προσομοιώσεων. Αρχικά κατασκευάζεται στο περιβάλλον του προσομοιωτή OPNET μία μικρή, αλλά εύκολα επεκτάσιμη τοπολογία. Χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα διάσπασης σε δύο OSPF areas, οπότε αντιπαραβάλλεται η συμπεριφορά της με flat OSPF και με multi-area OSPF. Στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές, αυξάνοντας βαθμιαία τον αριθμό των συσκευών και εκτελώντας την αντιπαραβολή. Ο αριθμός που αναζητείται, αντιστοιχεί στο σημείο όπου ο εξαγόμενος χρόνος σύγκλισης εμφανίζεται αρκετά μικρότερος για την τμηματοποιημένη τοπολογία,

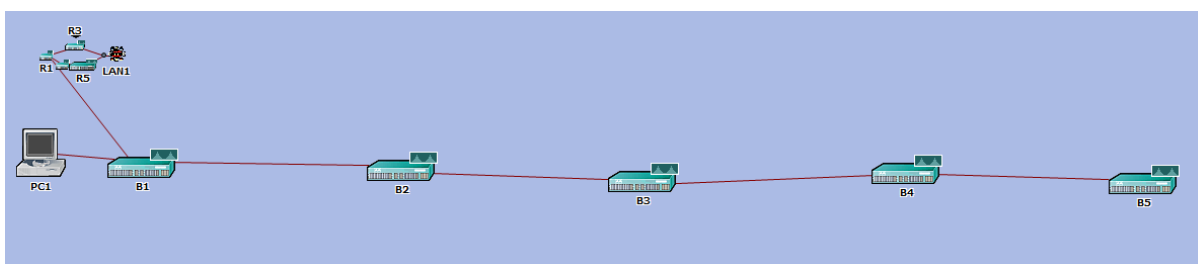
Προς διερεύνηση της επίδρασης του αριθμού των δρομολογητών ανά OSPF area, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, ομαδοποιώντας περισσότερους δρομολογητές στο επαναλαμβανόμενο τμήμα.

5.1.1 Περιγραφή Τοπολογίας και Εκτέλεση Προσομοιώσεων

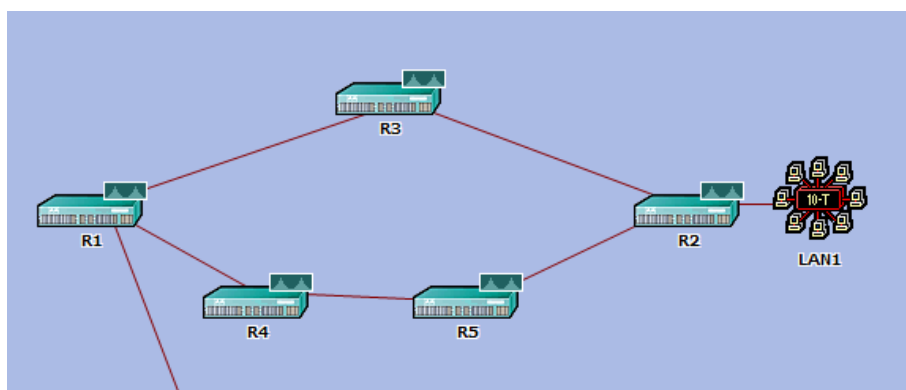
Η διαδικασία ξεκινά με την σχεδίαση στο λογισμικό μίας σχετικά μικρής τοπολογίας, δέκα δρομολογητών. Λαμβάνεται μέριμνα ώστε να επεκταθεί διαδοχικά, αυξανόμενη κάθε φορά κατά σταθερό αριθμό συσκευών.

Για λόγους απλότητας, το σύνολο των δρομολογητών, των τερματικών (LANS) και των ζευξεων παριστάνονται από συγκεκριμένα components. Ειδικότερα χρησιμοποιούνται δρομολογητές «CISCO 4500», τοπικά δίκτυα «10BaseT_LAN» και ένας «Ethernet workstation». Επιλέγονται ζεύξεις «10BaseT», καθώς ο συγκεκριμένος δρομολογητής διαθέτει ικανό αριθμό αντίστοιχων διεπαφών.

Τα components συνδέονται όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-1. Κατόπιν, επιλέγεται η αυτόματη ανάθεση IPv4 διευθύνσεων σε κάθε διεπαφή και ενεργοποιείται το flat OSPF. Ο PC1 χρησιμοποιείται για την παραγωγή δικτυακής κίνησης. Ορίζεται λοιπόν ροή πακέτων VoIP από αυτόν προς κάθε άλλον κόμβο. Η διακοπή της ζεύξης μεταξύ των R2 και R3 προγραμματίζεται 500 δευτερόλεπτα μετά την έναρξη της προσομοίωσης. Τέλος, καθορίζεται ως επιθυμητή έξοδος, ο χρόνος σύγκλισης του OSPF στο δίκτυο («Network Convergence Duration (sec)», global καρτέλα του OSPF). Η προσομοίωση εκτελείται για 800 δευτερόλεπτα, οπότε διατηρούνται τα αποτελέσματα της περίπτωσης αυτής.



Εικόνα 5-1: Τοπολογία 5 non backbone δρομολογητών.



Εικόνα 5-2: Παράγοντας αύξησης της τοπολογίας κατά 5 δρομολογητές.

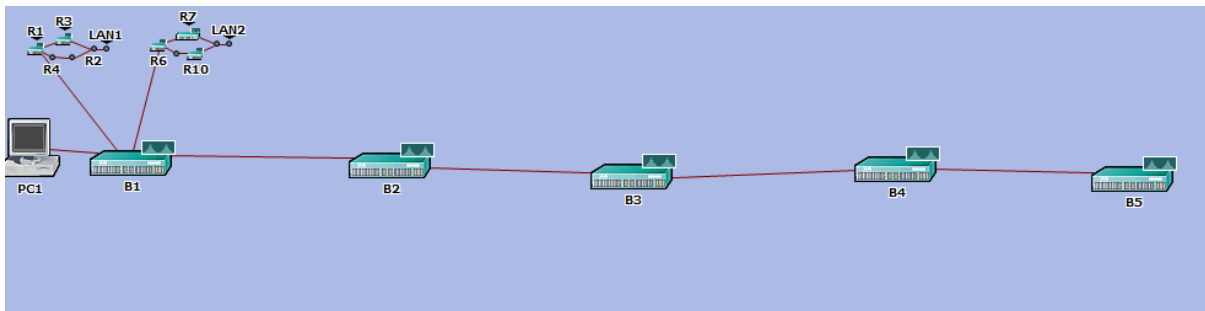
Στη συνέχεια δημιουργείται ένα νέο σενάριο στο OPNET. Περιλαμβάνει την ίδια ακριβώς τοπολογία, χωρισμένη σε δύο OSPF areas. Στη backbone τοποθετούνται οι ζεύξεις

μεταξύ των δρομολογητών που φέρουν το B (Backbone) ως αρχικό γράμμα της ονομασίας τους. Οι υπόλοιπες ομαδοποιούνται σε διαφορετική περιοχή.

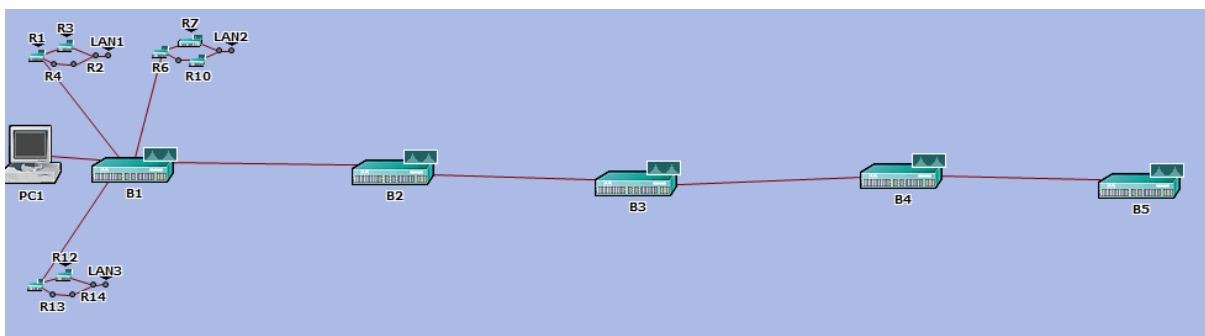
Το σενάριο προσομοιώνεται με τις παραμέτρους που εφαρμόστηκαν και στην περίπτωση του flat OSPF. Καθίσταται λοιπόν εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο περιπτώσεων.

Ακολουθεί η επανάληψη της διαδικασίας αρκετές φορές, με τη δημιουργία νέων ζευγών σεναρίων flat και area OSPF. Ο αριθμός των δρομολογητών κάθε επόμενου ζεύγους αυξάνεται βαθμιαία, με την προσθήκη πανομοιότυπης συνδεσμολογίας 5 δρομολογητών (Εικόνα 5-2). Στα multi-area OSPF σενάρια, κάθε τέτοια συνδεσμολογία τοποθετείται σε διαφορετική περιοχή. Οι 5 δρομολογητές με ζεύξεις αποκλειστικά εντός της backbone area διατηρούνται σταθεροί. Οι τοπολογίες που προσομοιώθηκαν κατασκευάστηκαν με την ακόλουθη διαδικασία:

Στην προηγούμενη τοπολογία προστίθεται ένα ακόμα τμήμα, όμοιο με αυτό της Εικόνα 5-2, οπότε προκύπτει το δίκτυο της Εικόνα 5-3.

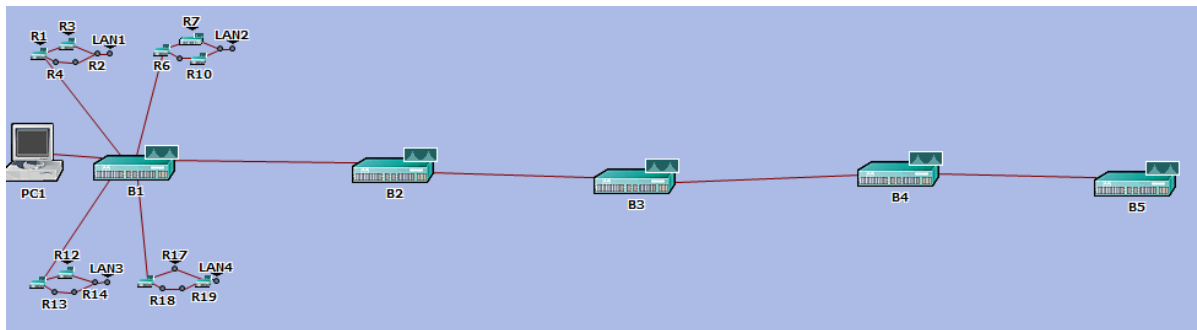


Εικόνα 5-3: Τοπολογία 10 non backbone δρομολογητών.

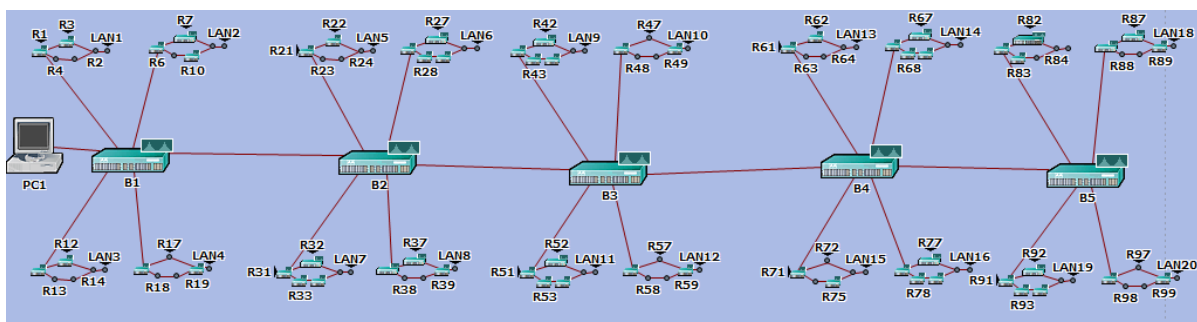


Εικόνα 5-4: Τοπολογία 15 non backbone δρομολογητών.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, με τη διαδοχική προσθήκη του ίδιου τμήματος. Η επόμενη τοπολογία παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-4, ενώ αυτή που την ακολουθεί στην Εικόνα 5-5. Στο τελευταίο βήμα, το δίκτυο φαίνεται όπως στην Εικόνα 5-6.

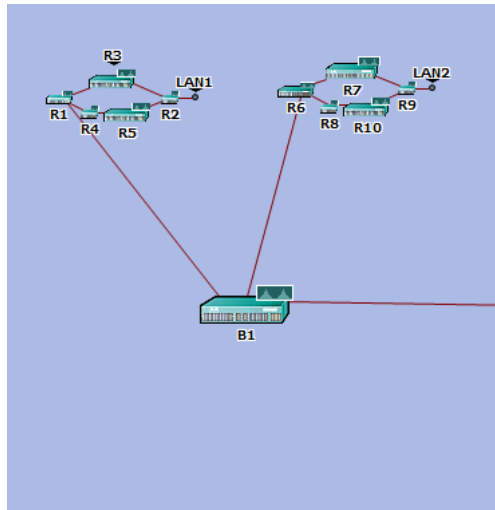


Εικόνα 5-5: Τοπολογία 20 non backbone δρομολογητών.



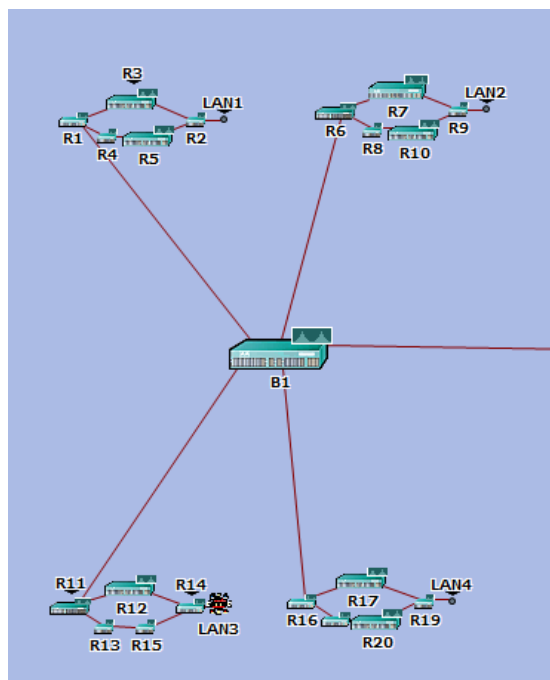
Εικόνα 5-6: Τοπολογία 100 non backbone δρομολογητών.

Προς περαιτέρω διερεύνηση της σχέσης μεταξύ αριθμού δρομολογητών ανά περιοχή και εξεταζόμενου χρόνου σύγκλισης, η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τη βαθμιαία αύξηση της ίδιας αρχικής τοπολογίας, κατά δέκα δρομολογητές. Δηλαδή κάθε φορά προστίθενται δύο πεντάδες δρομολογητών, ομαδοποιημένες στην ίδια περιοχή (Εικόνα 5-7). Η backbone area διατηρείται σταθερή και ίδια με του προηγούμενου συνόλου εκτελέσεων. Κάθε άλλη απαρτίζεται από δέκα δρομολογητές.



Εικόνα 5-7: Παράγοντας αύξησης της τοπολογίας κατά 10 δρομολογητές.

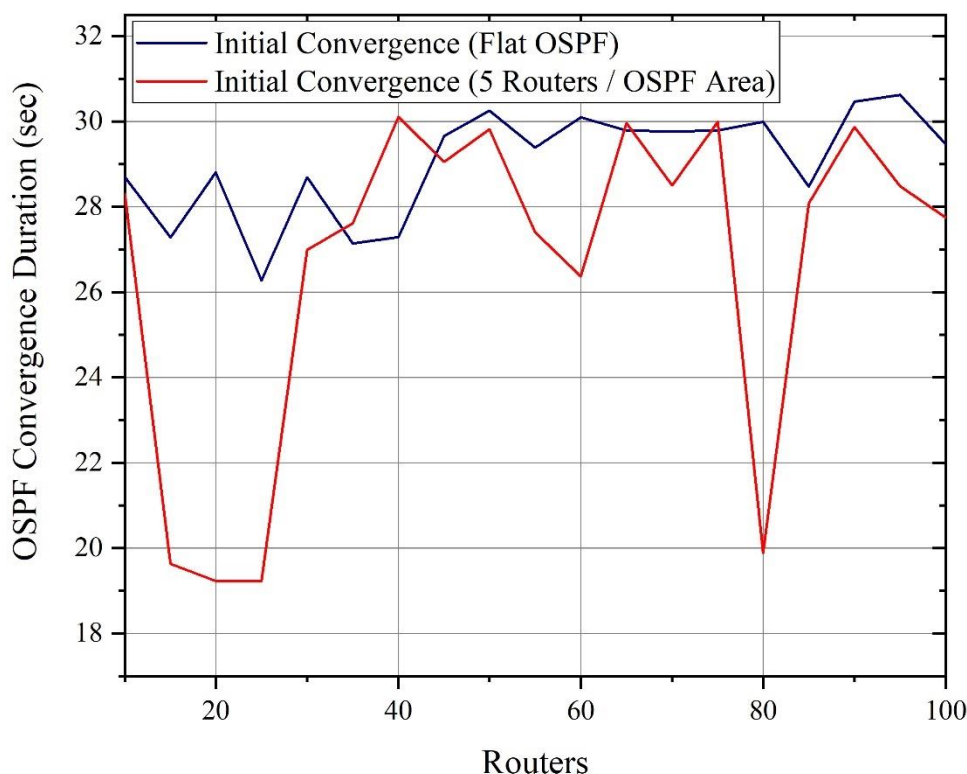
Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί, με την ίδια λογική και για είκοσι δρομολογητές ανά περιοχή. Δηλαδή το δίκτυο αυξάνεται κάθε φορά, κατά το τμήμα της Εικόνα 5-8. Και πάλι η backbone area δεν μεταβάλλεται, ενώ οι τέσσερις πεντάδες τοποθετούνται σε κοινή non backbone area.



Εικόνα 5-8: Παράγοντας αύξησης της τοπολογίας κατά 20 δρομολογητές.

5.1.2 Αποτελέσματα

Το διάγραμμα της Εικόνα 5-9 παρουσιάζει τη μεταβολή του χρόνου αρχικής σύγκλισης του OSPF, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των δρομολογητών που απαρτίζουν τη συνολική τοπολογία. Ο αριθμός του άξονα Χ αντιστοιχεί στο πλήθος των δρομολογητών εντός των non backbone area. Δηλαδή δεν περιλαμβάνει αυτούς που έχουν ζεύξεις εντός της backbone. Οι δύο καμπύλες αντιστοιχούν στο flat OSPF (μπλε) και στο multi-area OSPF, με 5 συσκευές (κόκκινη) ανά area.

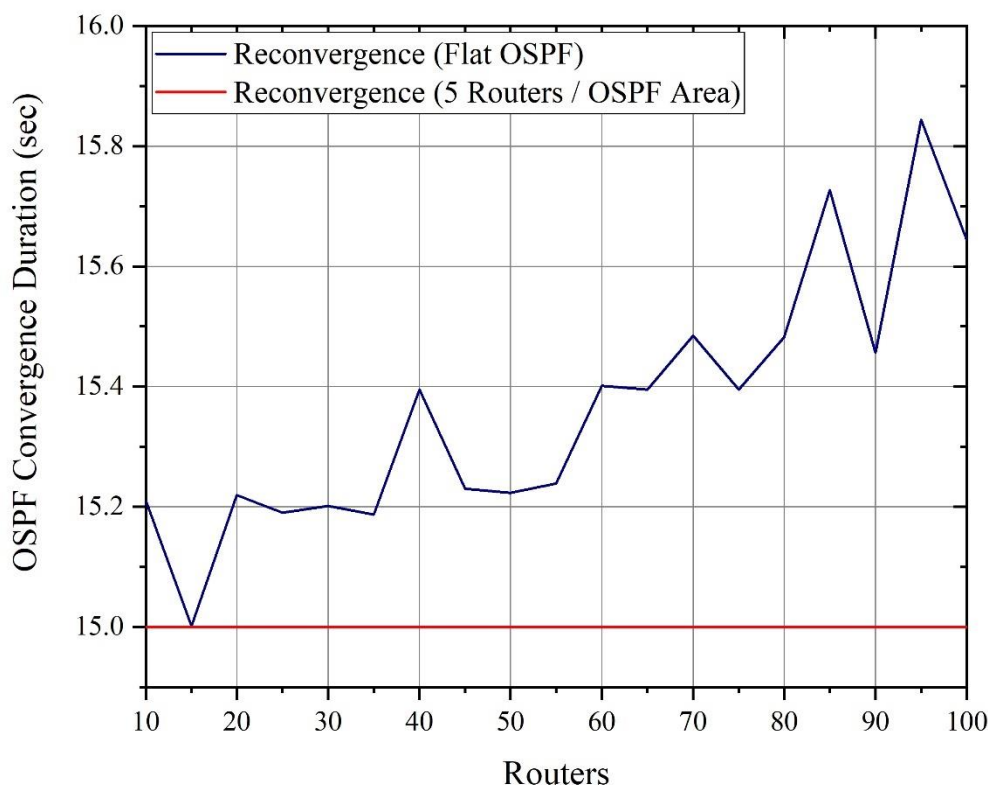


Εικόνα 5-9: Μεταβολή χρόνου αρχικής σύγκλισης με την αύξηση του αριθμού των δρομολογητών, για flat OSPF και διάσπαση σε OSPF areas των 5 κόμβων.

Ο χρόνος αρχικής σύγκλισης για το flat OSPF παρουσιάζει σχετικά μικρή αύξηση, καθώς το πλήθος των συσκευών μεταβαίνει βαθμιαία από τις 5 στις 100. Ο αντίστοιχος χρόνος για τη διαμερισμένη τοπολογία παρουσιάζει έντονη διακύμανση. Λόγω αυτής δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα αναφορικά με την αριθμό των συσκευών πάνω από τον οποίο η συγκεκριμένη σχεδίαση υπερτερεί, ως προς τον εξεταζόμενο παράγοντα. Πάντως, σχεδόν σε κάθε περίπτωση η σύγκλιση επιτυγχάνεται ταχύτερα με την εφαρμογή του multi-area OSPF.

Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως για 20 δρομολογητές, η επιτάχυνση της σύγκλισης είναι αρκετά σημαντική.

Η Εικόνα 5-10 αποτυπώνει τις γραφικές παραστάσεις της μεταβολής του χρόνου σύγκλισης κατόπιν συμβάντος, όσο αυξάνονται οι δρομολογητές της τοπολογίας κατά σταθερό παράγοντα (5 συσκευές). Αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν εφαρμόζοντας flat OSPF και multi-area OSPF των 5 συσκευών ανά area. Ο αριθμός του άξονα X και πάλι δεν περιλαμβάνει τους δρομολογητές με ζεύξεις στη backbone area.



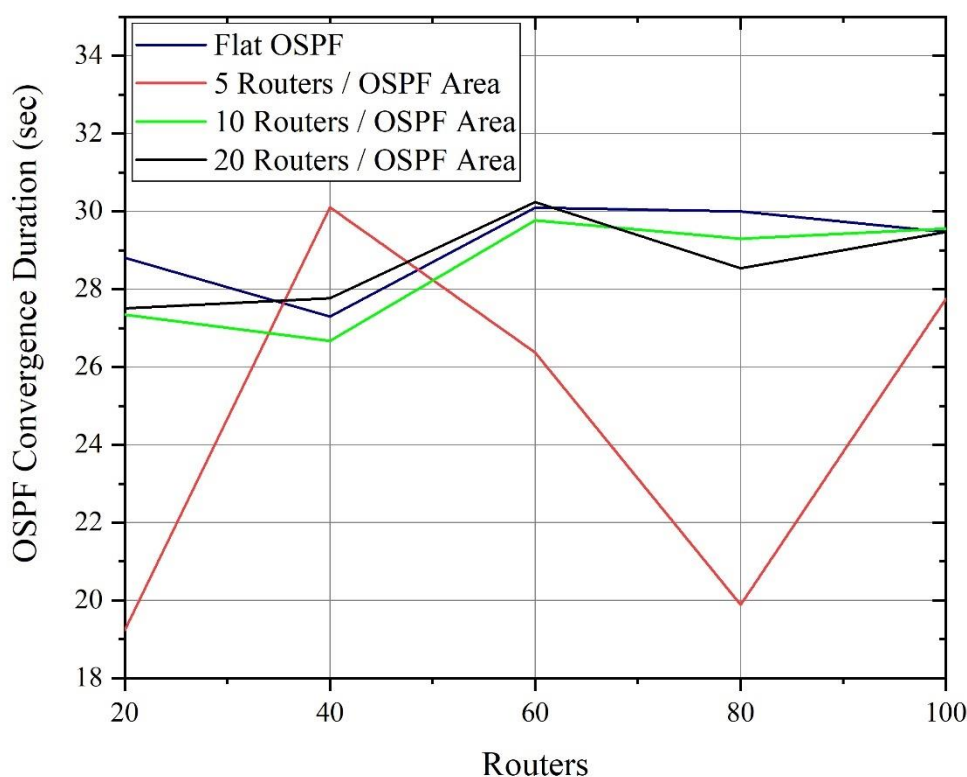
Εικόνα 5-10: Μεταβολή χρόνου σύγκλισης κατόπιν συμβάντος με την αύξηση του αριθμού των δρομολογητών, για flat OSPF και διάσπαση σε OSPF areas των 5 κόμβων.

Φαίνεται πως ο χρόνος σύγκλισης κατόπιν συμβάντος βαίνει αυξητικά, καθώς μεγαλώνει το πλήθος των συσκευών της τοπολογίας, όταν εφαρμόζεται το flat OSPF. Αντίθετα, στην περίπτωση των OSPF areas διατηρείται σταθερός. Αυτό διότι το συμβάν που προσομοιώνεται αφορά σε ζεύξη μεταξύ Internal Routers μιας περιοχής. Συνεπώς δεν απαιτείται ενημέρωση της LSDB των συσκευών εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος.

Για πλήθος δρομολογητών έως 35, ο χρόνος του flat OSPF είναι ίδιος ή λίγο (0.2 δευτερόλεπτα) μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της multi-area OSPF τοπολογίας. Μέχρι τους

55 ή 60 κόμβους ανά περιοχή, διαφαίνεται μία αρκετά ήπια αύξηση του υπό μελέτη χρόνου. Για μεγαλύτερο πλήθος, ο χρόνος εμφανίζεται αρκετά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της διαμερισμένης τοπολογίας. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το συγκεκριμένο δίκτυο επωφελείται του διαχωρισμού, όταν απαρτίζεται από 40 (35 + 5 με backbone ζεύξεις) και πλέον δρομολογητές. Για 60 (55 + 5 με backbone ζεύξεις) και πλέον κόμβους, η διάσπαση συνιστάται ισχυρά, καθώς μετά το σημείο αυτό η διαφορά του χρόνου σύγκλισης μεταξύ της flat OSPF και της multi-area OSPF περίπτωσης διευρύνεται. Εν γένει, φαίνεται να επιβεβαιώνεται ο εμπειρικός κανόνας των 50 δρομολογητών.

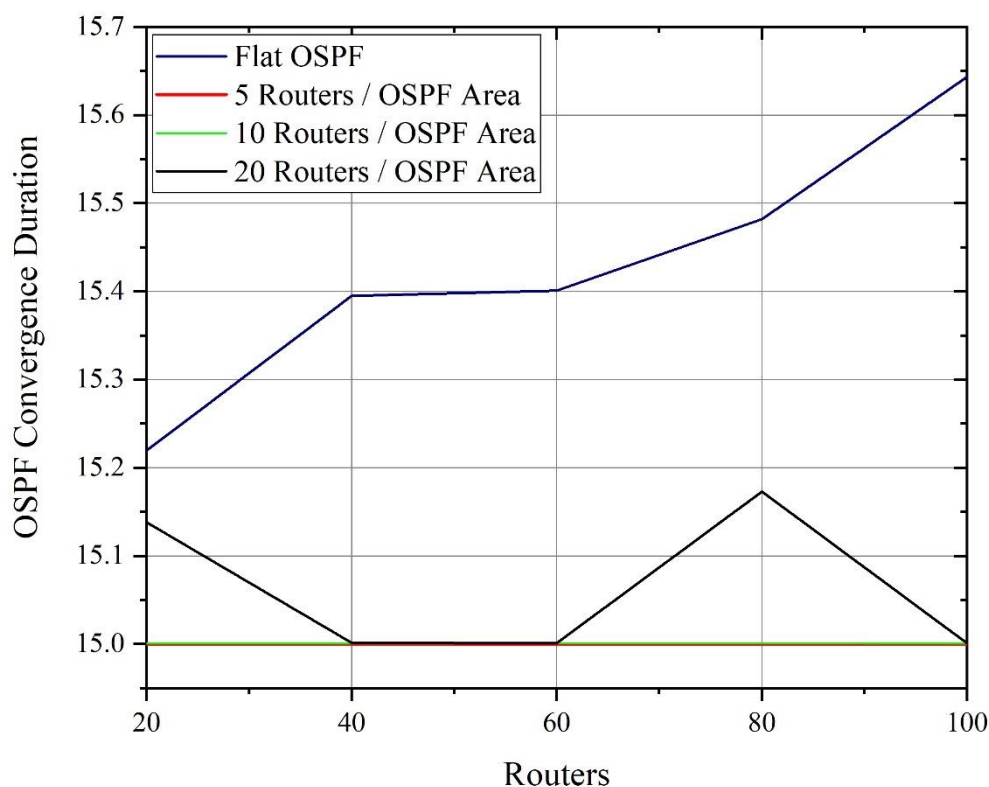
Στο διάγραμμα της Εικόνα 5-11 αντιπαραβάλλεται η μεταβολή του χρόνου αρχικής σύγκλισης με την αύξηση των συσκευών εντός της τοπολογίας, για το flat OSPF και για τις τρεις multi-area OSPF περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν. Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο flat OSPF, η κόκκινη στο χωρισμό με 5 δρομολογητές ανά περιοχή (προηγούμενη περίπτωση), η πράσινη σε αυτόν με 10 και η μαύρη με 20 συσκευές ανά περιοχή. Ο ρυθμός δειγματοληψίας επιβάλλεται από την περίπτωση αύξησης των συσκευών ανά 20, όπου λαμβάνονται οι λιγότερες μετρήσεις.



Εικόνα 5-11: Αντιπαραβολή χρόνων αρχικής σύγκλισης για flat OSPF και διάσπαση σε OSPF areas των 5, 10 και 20 δρομολογητών.

Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι οι χρόνοι χαρακτηρίζονται από αρκετή διακύμανση σε κάθε περίπτωση. Γενικά, για μεγαλύτερο αριθμό περιοχών (των λιγότερων δρομολογητών) η αρχική σύγκλιση επιτυγχάνεται γρηγορότερα. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις αυτό δεν ισχύει, λόγω της διακύμανσης. Βέβαια, ο διαχωρισμός σε περιοχές των 5 δρομολογητών, είναι εμφανές ότι επιτυγχάνει γενικά καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τις λοιπές περιπτώσεις.

Στο διάγραμμα της Εικόνα 5-12 παρατίθεται ανάλογη σύγκριση που αφορά τη σύγκλιση κατόπιν συμβάντος. Και πάλι η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο flat OSPF και η κόκκινη, η πράσινη και η μαύρη στο χωρισμό σε multi-area OSPF των 5, 10 και 20 συσκευών ανά περιοχή, αντίστοιχα.



Εικόνα 5-12: Αντιπαραβολή χρόνων σύγκλισης κατόπιν συμβάντος για flat OSPF και διάσπαση σε OSPF areas των 5, 10 και 20 δρομολογητών.

Γίνεται φανερό πως όσο μειώνεται ο αριθμός των δρομολογητών ανά περιοχή, μειώνεται και ο χρόνος σύγκλισης κατόπιν συμβάντος, για δεδομένη τιμή του συνολικού πλήθους δρομολογητών. Η συμπεριφορά του δικτύου δεν διαφοροποιείται κατά την ομαδοποίηση των κόμβων ανά 5 ή ανά 10. Εάν ομαδοποιηθούν ανά 20, ο εξαγόμενος χρόνος

είναι ίδιος ή λίγο μεγαλύτερος (λιγότερο από 0.2 δευτερόλεπτα). Συνεπώς η επίδοση του δικτύου κρίνεται ικανοποιητική και καλύτερη από το flat OSPF, για την εφαρμογή οποιουδήποτε από τους υπό μελέτη διαχωρισμούς. Παρατηρείται επίσης ότι οι διαμερίσεις σε OSPF areas των 5 ή 10 επιτυγχάνουν χρόνο σύγκλισης η τιμή του οποίου δεν περιορίζεται περαιτέρω.

5.2 Προσομοιώσεις σε Μεγαλύτερη Τοπολογία

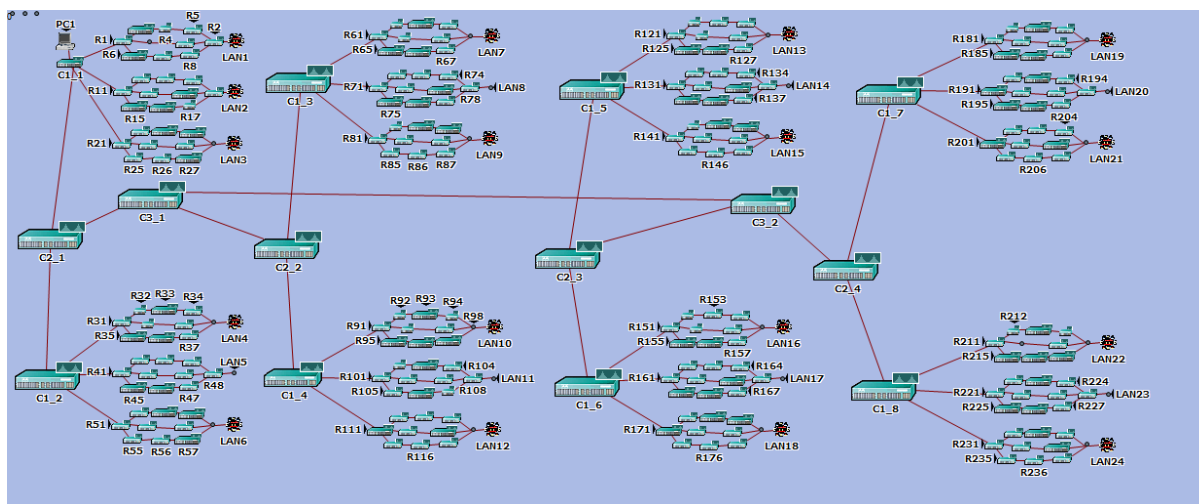
Με το δεύτερο σύνολο προσομοιώσεων διερευνάται η επίδραση διαφορετικών τρόπων διάσπασης μιας τοπολογίας σε πανομοιότυπες OSPF areas, στο χρόνο σύγκλισης του πρωτοκόλλου στο συνολικό δίκτυο. Για το σκοπό αυτό, σχηματίζεται στο περιβάλλον του OPNET μία τοπολογία μεγαλύτερου πλήθους δρομολογητών. Λαμβάνεται μέριμνα ώστε να μπορεί να διασπαστεί σε OSPF areas με αρκετούς τρόπους, χωρίς να παραβιάζεται η ιεραρχία των δύο επιπέδων (πλήθος non backbone areas συνδέονται απευθείας με την backbone area). Δηλαδή σε κάθε περίπτωση, ο αριθμός των OSPF areas που δημιουργούνται είναι διαφορετικός, όπως και ο αριθμός των τοποθετούμενων ζεύξεων (ή δρομολογητών) σε καθεμία. Ο συνολικός αριθμός των συσκευών διατηρείται σταθερός, όπως και ο αριθμός τους ανά περιοχή. Οι ABRs λογίζονται συνήθως ως δρομολογητές της αντίστοιχης non backbone area. Ως έξοδος των προσομοιώσεων ορίζεται και πάλι ο χρόνος σύγκλισης του πρωτοκόλλου στο δίκτυο (αρχικός και κατόπιν συμβάντος), οπότε εξετάζονται οι διακυμάνσεις του με τη μεταβολή του αριθμού των δρομολογητών ανά περιοχή.

5.2.1 Περιγραφή Τοπολογίας και Εκτέλεση Προσομοιώσεων

Η τοπολογία σχεδιάζεται και παραμετροποιείται παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση. Επιλέγονται τα ίδια components, η αυτόματη απόδοση IPv4 διευθύνσεων σε κάθε κόμβο και παρόμοιος τρόπος παραγωγής δικτυακής κίνησης. Το μόνο ενεργοποιημένο πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι το OSPF. Στα 500 δευτερόλεπτα μετά την έναρξη της προσομοίωσης διακόπτεται η ζεύξη μεταξύ δύο δρομολογητών, προκειμένου να μελετηθεί η σύγκλιση κατόπιν συμβάντος. Λαμβάνεται μέριμνα ώστε οι συγκεκριμένοι δρομολογητές να μην αποκτούν το ρόλο ABR, σε κανένα διαχωρισμό της τοπολογίας. Η προσομοίωση εκτελείται για 800 δευτερόλεπτα και εξάγει τη ίδια μετρική («Network Convergence Duration (sec)», global καρτέλα του OSPF).

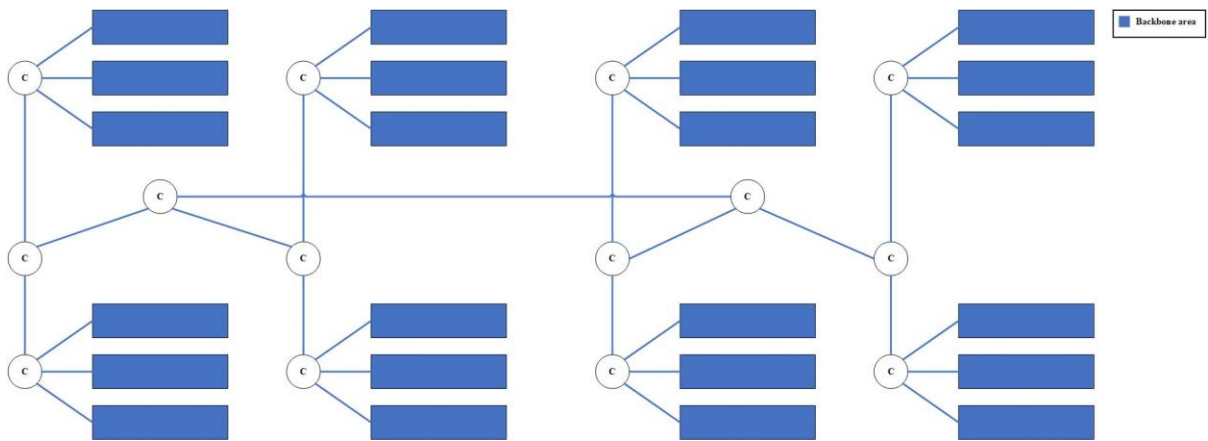
Το σχεδιαζόμενο δίκτυο απαρτίζεται από 24 πανομοιότυπες ομάδες των 10 δρομολογητών, που διασυνδέονται με τη βοήθεια άλλων 14. Συνεπώς η συνολική τοπολογία

περιλαμβάνει 254 δρομολογητές. Ο ρόλος καθενός (ABR, Internal) δεν παραμένει απαραίτητα σταθερός σε κάθε διάσπαση. Η τοπολογία παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-13.

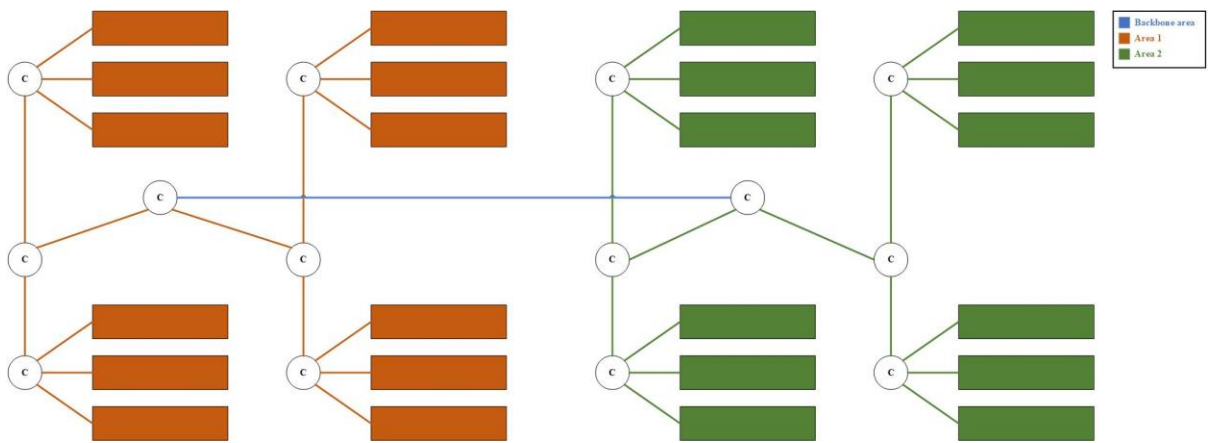


Εικόνα 5-13: Τοπολογία μελέτης επίδρασης αριθμού δρομολογητών ανά περιοχή στο χρόνο σύγκλισης του OSPF στο δίκτυο.

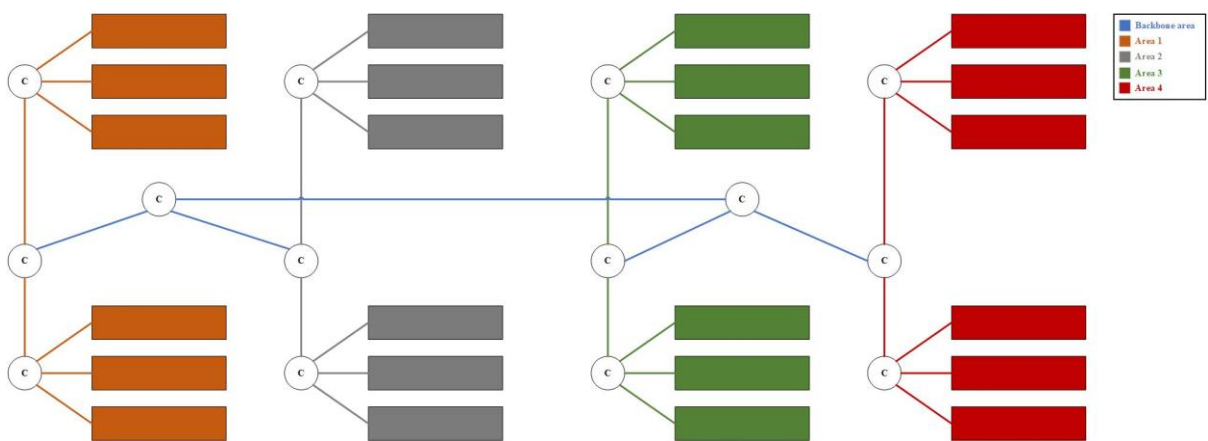
Η οργάνωση των δρομολογητών σε OSPF areas είναι δυνατή με 5 διαφορετικούς τρόπους, που παρουσιάζονται σχηματικά στις ακόλουθες εικόνες. Αρχικά, τοποθετούνται όλοι σε μία περιοχή (flat OSPF), την backbone (Εικόνα 5-14). Προφανώς, η OSPF area περιλαμβάνει 254 δρομολογητές. Στη συνέχεια διακρίνονται σε δύο περιοχές (εκτός της backbone), των 127 συσκευών η καθεμία (Εικόνα 5-15). Μπορούν ακόμα να ομαδοποιηθούν σε 4 OSPF areas των 63 δρομολογητών και μία backbone (Εικόνα 5-16). Επίσης σε 8 areas των 31 δρομολογητών και μία backbone (Εικόνα 5-17). Οι 4 δρομολογητές με δύο ζευγείς εντός της backbone area, θεωρούνται δρομολογητές της περιοχής αυτής. Τέλος, χωρίζονται έτσι ώστε κάθε τμήμα των 10 συσκευών να αποτελεί ξεχωριστή περιοχή. Προκύπτουν δηλαδή 24 OSPF areas και μία backbone (Εικόνα 5-18).



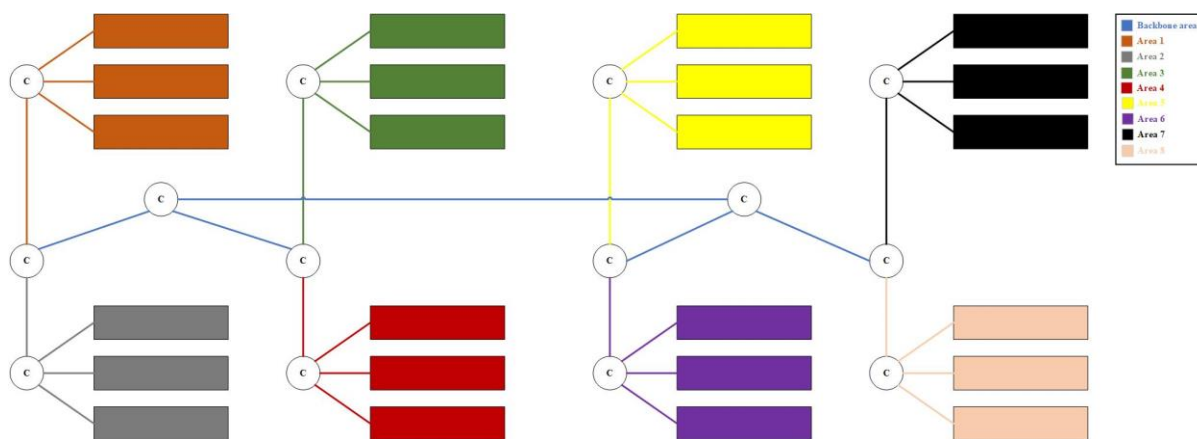
Εικόνα 5-14: flat OSPF (1 backbone area, 254 routers / area).



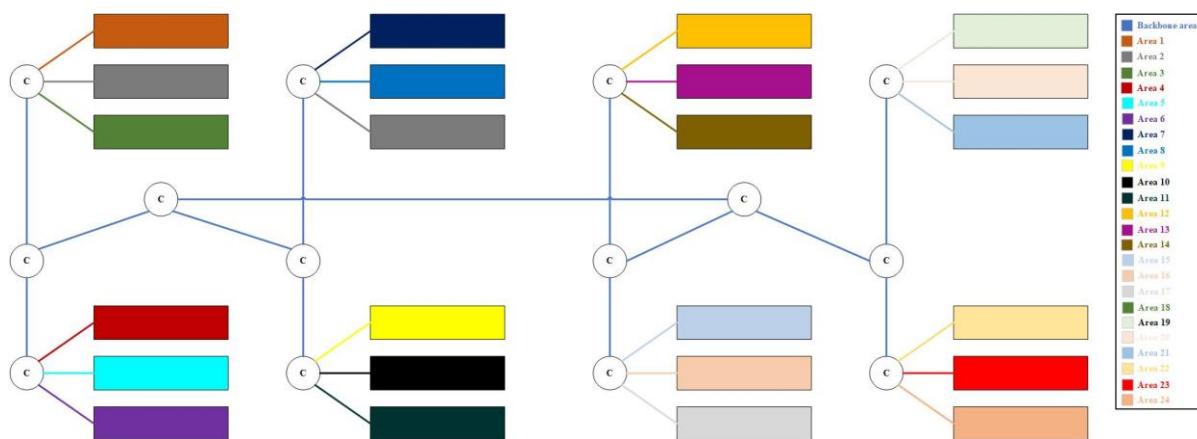
Εικόνα 5-15: Χωρισμός σε 3 περιοχές συνολικά (2 non backbone areas, 127 routers / area).



Εικόνα 5-16: Χωρισμός σε 5 περιοχές συνολικά (4 non backbone areas, 63 routers / area).



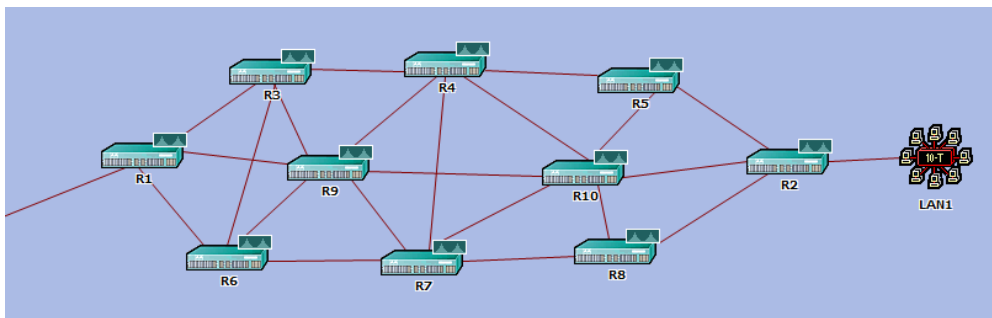
Εικόνα 5-17: Χωρισμός σε 9 περιοχές συνολικά (8 non backbone areas, 31 routers / area).



Εικόνα 5-18: Χωρισμός σε 25 περιοχές συνολικά (24 non backbone areas, 10 routers / area).

Οι διαφορετικοί τρόποι σχεδίασης των περιοχών προσομοιώνονται σε διαφορετικά σενάρια, με μόνη παράμετρο διαφοροποίησης τη διαφορετική τμηματοποίηση και άρα το διαφορετικό πλήθος κόμβων ανά OSPF area. Τέλος, εκτελείται κάθε προσομοίωση ώστε να αναλυθούν τα αποτελέσματα.

Σύμφωνα με έναν εμπειρικό κανόνα [30], το πλήθος και η σχετική θέση των ζεύξεων μιας τοπολογίας παίζει σημαντικό ρόλο στον ενδεδειγμένο σχεδιασμό του multi-area OSPF. Προκειμένου να διερευνηθεί και αυτή η περίπτωση, επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία σε ελαφρώς τροποποιημένη τοπολογία. Κάθε ομάδα των 10 δρομολογητών (που αντιστοιχεί στα παραλληλόγραμμα των Εικόνα 5-14 έως Εικόνα 5-18), περιλαμβάνει αρκετά μεγαλύτερο αριθμό ζεύξεων (Εικόνα 5-19). Περιλαμβάνει και πάλι τους 254 δρομολογητές, οργανωμένους με πανομοιότυπο τρόπο. Εκτελούνται λοιπόν οι προσομοιώσεις που αντιστοιχούν στις πέντε διαμερίσεις σταθερού αριθμού κόμβων ανά περιοχή και αυτής της τοπολογίας.



Εικόνα 5-19: Πανομοιότυπα τμήματα τοπολογίας, κατόπιν προσθήκης ζεύξεων.

5.2.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπως και ο αριθμός των δρομολογητών ανά OSPF area που αντιστοιχεί σε κάθε διάσπαση, παρατίθενται στον Πίνακα 5-1. Κατόπιν, παρουσιάζονται με τη μορφή γραφημάτων και αναλύονται.

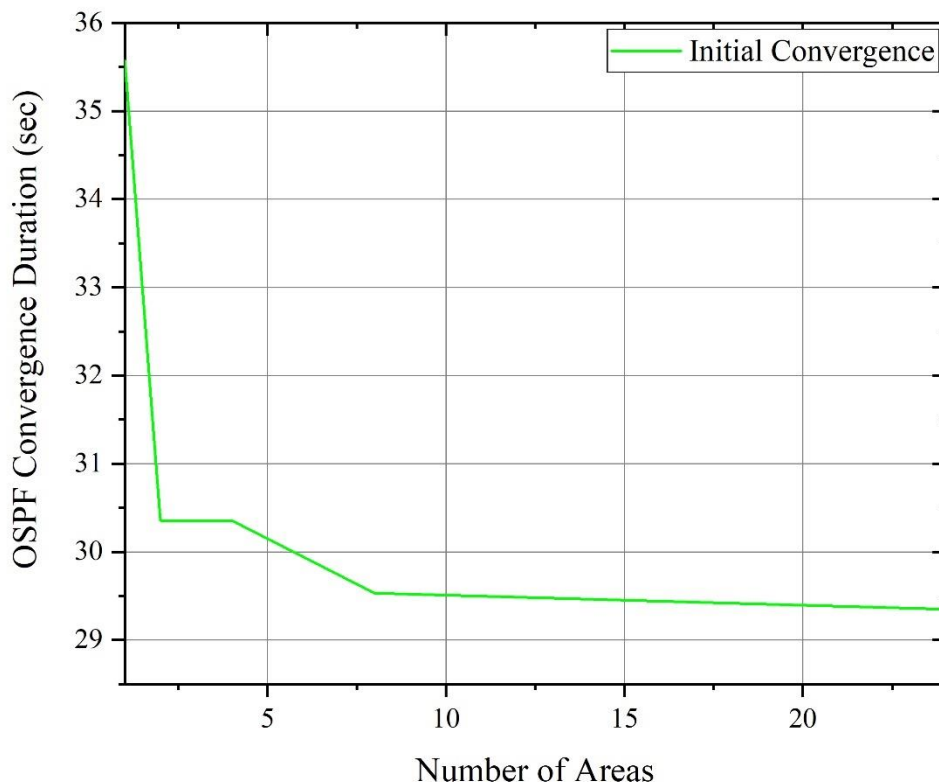
Πίνακας 5-1: Αριθμός δρομολογητών ανά OSPF area και χρόνοι σύγκλισης, για κάθε διαχωρισμό.

Areas	Routers / Area	Initial Topology		Topology with More Links	
		Initial Convergence	Reconvergence	Initial Convergence	Reconvergence
1	254	35.57646121	16.08462544	36.30723326	15.65824146
2	125	30.35407386	16.0910765	35.68636616	15.42225218
4	63	30.35407386	15.45207729	30.06793591	15.21112461
8	30	29.53409656	15.18088752	30.06793591	15.00123125
24	10	29.34800876	15.00048742	30.15693401	15.00053993

Το γράφημα της Εικόνα 5-20 παρουσιάζει τη μεταβολή του χρόνου αρχικής σύγκλισης του πρωτοκόλλου, με την αύξηση του αριθμού των OSPF areas. Στον άξονα X αποτυπώνεται το πλήθος των non backbone areas. Λαμβάνονται τιμές για 1, 2, 4, 8 και 24 τέτοιου είδους περιοχές. Σε κάθε διαχωρισμό, ο αριθμός των δρομολογητών ανά περιοχή διατηρείται σταθερός. Καθίσταται λοιπόν εφικτή η μελέτη της επίδρασης του αριθμού των δρομολογητών ανά περιοχή στο χρόνο αρχικής σύγκλισης του OSPF.

Παρατηρώντας το γράφημα γίνεται αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των περιοχών, μειώνεται ο χρόνος επίτευξης αρχικής σύγκλισης. Ισοδύναμα, όσο μειώνεται ο αριθμός των δρομολογητών ανά περιοχή, μειώνεται και ο χρόνος σύγκλισης. Σε κάθε επόμενο διαχωρισμό, ο χρόνος μειώνεται με βραδύτερο ρυθμό από τον προηγούμενο. Η μείωση μεταξύ των διαμερίσεων σε 8 και σε 24 περιοχές είναι αρκετά μικρή, επομένως ο αριθμός των

δρομολογητών που αντιστοιχεί στις 8 περιοχές (31 δρομολογητές ανά OSPF area) θα μπορούσε να ειπωθεί ότι δεν χρήζει περαιτέρω διάσπασης.



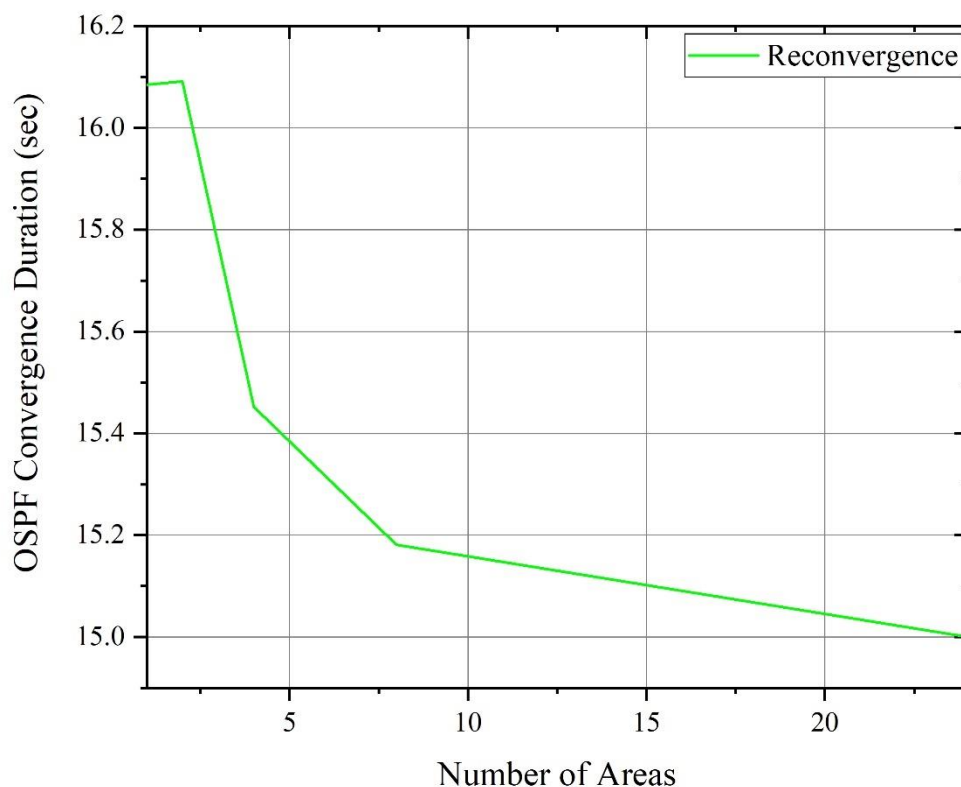
Εικόνα 5-20: Μεταβολή χρόνου αρχικής σύγκλισης με τη διάσπαση της τοπολογίας σε μεγαλύτερο πλήθος OSPF areas, όπου ομαδοποιείται μικρότερος αριθμός δρομολογητών.

Επομένως ο διαχωρισμός μιας μεγαλύτερης τοπολογίας σε OSPF areas, βελτιώνει και το χρόνο αρχικής σύγκλισης. Στη μικρότερη τοπολογία, που εξετάστηκε προηγουμένως, το συμπέρασμα αυτό ήταν λιγότερο εμφανές.

Το γράφημα της Εικόνα 5-21 είναι το αντίστοιχο που αφορά τη σύγκλιση κατόπιν συμβάντος. Από την τάξη μεγέθους του άξονα «Network Convergence Duration» των δύο διαγραμμάτων φαίνεται ότι η σύγκλιση κατόπιν συμβάντος επέρχεται περίπου στο μισό χρόνο από την αρχική. Το γεγονός εξηγείται από τη σημαντικά μικρότερη ποσότητα πληροφορίας που ανταλλάσσεται στο δίκτυο.

Και εδώ, ο διαχωρισμός σε μεγαλύτερο αριθμό περιοχών συνεπάγεται μικρότερο χρόνο σύγκλισης. Μάλιστα η κλίση της καμπύλης είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Δηλαδή όσο μικρότερος ο αριθμός των δρομολογητών ανά OSPF area, τόσο γρηγορότερα επιτυγχάνεται η σύγκλιση κατόπιν συμβάντος. Αυτό συμβαίνει καθώς χρειάζεται

να ενημερωθεί μόνο η LSDB των δρομολογητών εντός της περιοχής. Οι υπόλοιποι ενημερώνουν τον πίνακα δρομολόγησης τους, εφόσον απαιτείται (ενημέρωση διαδρομής ή προορισμού ως απροσπέλαστου, μη χρήση summarization), αφού λάβουν Summary LSA και χωρίς την εκτέλεση του SPF (Dijkstra).

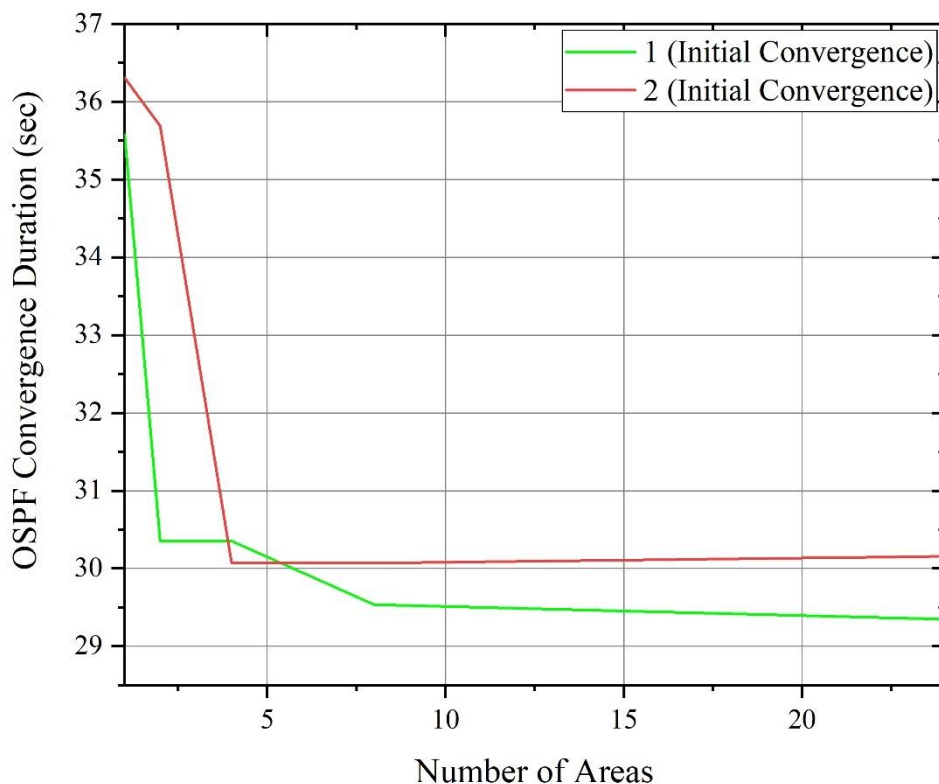


Εικόνα 5-21: Μεταβολή χρόνου σύγκλισης κατόπιν συμβάντος με τη διάσπαση της τοπολογίας σε μεγαλύτερο πλήθος OSPF areas, όπου ομαδοποιείται μικρότερος αριθμός δρομολογητών.

Επίσης στις συσκευές όπου εκτελείται ο αλγόριθμος, ο όγκος των δεδομένων προς επεξεργασία είναι σαφώς μικρότερος, χάρη στο μέγεθος της LSDB. Οι εξαγόμενες τιμές από τις διασπάσεις σε 8 και σε 24 περιοχές, παρουσιάζουν σχετικά μικρή απόκλιση. Οι 8 περιοχές αντιστοιχούν σε 31 δρομολογητές ανά OSPF area. Επομένως, για 31 ή λιγότερους δρομολογητές ανά OSPF area, οι επιδόσεις του πρωτοκόλλου ως προς το χρόνο σύγκλισης φαίνονται αποδεκτές. Στα δίκτυα μεταφοράς εξαιρετικά ευαίσθητων δεδομένων, ίσως θα ήταν καλό να εφαρμοστεί η επιτρεπόμενη διαμέριση που αντιστοιχεί στο μικρότερο δυνατό αριθμό δρομολογητών ανά OSPF area.

Στην Εικόνα 5-22 αντιπαραβάλλεται η μεταβολή του χρόνου σύγκλισης αυξάνοντας τον αριθμό των OSPF areas, στην προηγούμενη τοπολογία και σε όμοιου αριθμού

δρομολογητών και περισσότερων ζεύξεων. Η καμπύλη με τον αριθμό 1 (πράσινη) αντιστοιχεί στην αρχική τοπολογία, ενώ αυτή με τον αριθμό 2 (κόκκινη) σε αυτή με τις περισσότερες ζεύξεις.

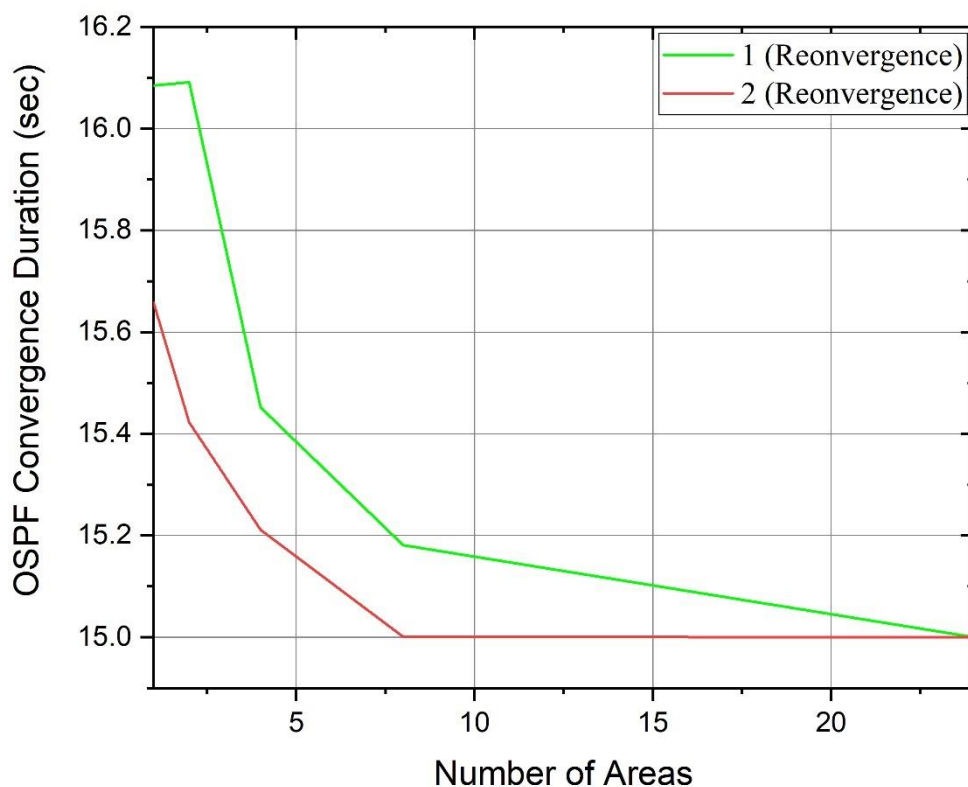


Εικόνα 5-22: Επίδραση αριθμού ζεύξεων του δικτύου στη μεταβολή του χρόνου αρχικής σύγκλισης, με την αύξηση των OSPF areas.

Φαίνεται ότι η προσθήκη ζεύξεων αυξάνει το χρόνο αρχικής σύγκλισης. Πρόκειται για ένα λογικό συμπέρασμα, καθώς πληροφορία για καθεμιά περιλαμβάνεται στη LSDB κάθε δρομολογητή της περιοχής. Σε μία μόνο περίπτωση (4 OSPF areas) ο χρόνος για την τοπολογία περισσότερων ζεύξεων είναι ελαφρώς μικρότερος.

Μία επιπλέον παρατήρηση έγκειται στην επιπεδοποίηση της καμπύλης που αντιστοιχεί στην τοπολογία περισσότερων ζεύξεων, όταν περιλαμβάνονται λιγότεροι των 63 δρομολογητών ανά OSPF area (4 ή περισσότερες OSPF areas). Γίνεται λοιπόν σαφές ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τοπολογίας, όπως ο αριθμός των ζεύξεων, παίζουν σημαντικό ρόλο στο σημείο επιπεδοποίησης της καμπύλης αυτής. Για τη συγκεκριμένη τοπολογία οι επιδόσεις φαίνεται να μην περιορίζονται για λιγότερες των 60 συσκευών ανά OSPF area.

Η Εικόνα 5-23 παρουσιάζει την αντίστοιχη αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων της σύγκλισης κατόπιν συμβάντος. Η καμπύλη με τον αριθμό 1 (πράσινη) αντιστοιχεί στην αρχική τοπολογία, ενώ αυτή με τον αριθμό 2 (κόκκινη) σε αυτή με τις περισσότερες ζεύξεις.



Εικόνα 5-23: Επίδραση αριθμού ζεύξεων του δικτύου στη μεταβολή του χρόνου σύγκλισης κατόπιν συμβάντος, με την αύξηση των OSPF areas.

Διακρίνεται ότι στην περίπτωση της σύγκλισης κατόπιν συμβάντος, ο χρόνος για την τοπολογία περισσότερων ζεύξεων είναι μικρότερος. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα διότι το σύνολο σχεδόν των δρομολογητών εντός της περιοχής είναι άμεσα συνδεδεμένοι και ανταλλάσσουν το μήνυμα της ενημέρωσης, ταχύτητα.

Μία ακόμα παρατήρηση, είναι ότι σε δίκτυο με μεγαλύτερο αριθμό ζεύξεων, το όριο του χαμηλότερου χρόνου σύγκλισης (επιπεδοποίηση της καμπύλης) επιτυγχάνεται για περισσότερες συσκευές ανά OSPF area. Δηλαδή περεταίρω μείωση του πλήθους των κόμβων δε μεταφράζεται σε μείωση του χρόνου σύγκλισης.

6 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Στο πρώτο μέρος της εργασίας αποτιμήθηκαν συγκριτικά οι επιδόσεις των τριών δημοφιλέστερων IGP, του RIP, του OSPF και του EIGRP. Ο χρόνος σύγκλισης αποτελεί βασικό KPI των πρωτοκόλλων αυτών. Η σχετική σύγκριση έλαβε χώρα τόσο σε πραγματική δικτυακή τοπολογία όσο και μέσω προσομοιώσεων, στο εξειδικευμένο λογισμικό OPNET. Αναδείχθηκε η σημαντική υπεροχή του EIGRP, το οποίο επιτυγχάνει τάχιση σύγκλιση, χάρη στην άμεση μετάβαση σε προϋπολογισμένες εναλλακτικές διαδρομές. Ακολουθεί το OSPF, με χρόνο μεγαλύτερο κατά μερικά δευτερόλεπτα. Ο χρόνος του RIP περιλαμβάνει αρκετά επιπλέον δευτερόλεπτα και χαρακτηρίζεται ως μη αποδεκτός για πλήθος σύγχρονων εφαρμογών.

Οι χρόνοι που μετρήθηκαν στην πραγματική τοπολογία είναι αρκετά μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους της προσομοίωσης. Αυτό πιθανότατα συμβαίνει διότι στην προσομοίωση αγνοούνται πολλές παράμετροι αύξησης του χρόνου ανίχνευσης της βλάβης. Επιπλέον, οι αρκετά χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης αρκετών ζεύξεων επιβραδύνουν τόσο την ανίχνευση όσο και την ανταλλαγή πληροφορίας δρομολόγησης. Ωστόσο, τα συμπεράσματα του πειράματος ταυτίζονται με αυτά της προσομοίωσης, ως προς την κατάταξη των τριών χρόνων σύγκλισης και τις μεταξύ τους αποκλίσεις.

Το OSPF υστερεί ως προς το χρόνο αρχικής σύγκλισης, δηλαδή αυτής που έπεται της ταυτόχρονης ενεργοποίησης των συσκευών. Έτσι προβλήματα ταυτόχρονης διακοπής της λειτουργίας πλήθους δρομολογητών για κάποια δευτερόλεπτα, αποτελούν ένα από τα χειρότερα σενάρια.

Η αποτίμηση λαμβάνει υπόψη και άλλα χαρακτηριστικά. Βασικό KPI είναι η καθυστέρηση. Το EIGRP υπερτερεί και ως προς αυτό το χαρακτηριστικό. Λίγο μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζει το OSPF, ενώ το RIP αρκετά υψηλότερη. Επιπλέον, το OSPF και το EIGRP υπερτερούν του RIP αναφορικά με την επιλογή διαδρομής βέλτιστων χαρακτηριστικών και την επεκτασιμότητα.

Το αντίτιμο των βελτιωμένων χαρακτηριστικών του EIGRP είναι η αυξημένη του πολυπλοκότητα. Έτσι υστερεί ως προς την κατανάλωση υπολογιστικών πόρων, κάτι που συνήθως αντισταθμίζεται από τη διαθεσιμότητά τους στις νεότερες συσκευές. Το RIP, ως απλούστερος αλγόριθμος, χαρακτηρίζεται από μικρότερες υπολογιστικές απαιτήσεις, ενώ το OSPF τοποθετείται μεταξύ των δύο. Ένα σοβαρότερο μειονέκτημα του EIGRP είναι ότι, παρά

τον προσεκτικό του σχεδιασμό, επιβαρύνει το δίκτυο με περισσότερη πληροφορία δρομολόγησης από τα άλλα δύο πρωτόκολλα.

Παρά τη σαφή υπεροχή του EIGRP έναντι του OSPF στα πλέον κρίσιμα χαρακτηριστικά (καθυστέρηση και χρόνος σύγκλισης) και την αποδεκτή επίδοσή του στα υπόλοιπα, το τελευταίο είναι περισσότερο διαδεδομένο σήμερα. Αυτό διότι το EIGRP για πολλά χρόνια αποτελούσε ιδιοκτησία της CISCO, οπότε υποστηρίζονταν σχεδόν αποκλειστικά από συσκευές της εταιρίας. Ακόμα και σήμερα πολλές δυνατότητές του δεν έχουν διατεθεί σε άλλους κατασκευαστές. Αντίθετα, το OSPF είναι ελεύθερο και συμβατό με δρομολογητές κάθε τύπου. Έτσι τα χαρακτηριστικά του διαρκώς βελτιώνονται και αναπτύσσονται νέα πρωτόκολλα με τα οποία συνεργάζεται και έτσι ανταποκρίνεται στις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Τελικά, τα χαρακτηριστικά του καθίστανται συγκρίσιμα με του EIGRP.

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση του αριθμού των δρομολογητών μιας OSPF area στο χρόνο σύγκλισης του πρωτοκόλλου στο δίκτυο. Για το σκοπό αυτό διενεργήθηκαν δύο σύνολα προσομοιώσεων σε OPNET, μίας βαθμιαία επεκτεινόμενης τοπολογίας και μίας μεγαλύτερης, που χωρίστηκε σε OSPF areas με διαφορετικούς τρόπους.

Διαπιστώθηκε ότι ένα δίκτυο επωφελείται του διαχωρισμού σε OSPF areas όταν περιλαμβάνει περίπου 40 ή περισσότερους δρομολογητές. Τότε, η ανταπόκριση της διαχωρισμένης τοπολογίας σε μεταβολές είναι αρκετά ταχύτερη. Για 60 και περισσότερους, η διάσπαση κρίνεται ως απαραίτητη, καθώς εξασφαλίζει σημαντική μείωση του χρόνου σύγκλισης κατόπιν συμβάντος εντός της περιοχής. Τα ίδια συμπεράσματα ισχύουν και για το πλήθος των κόμβων μιας OSPF area. Ο χρόνος αρχικής σύγκλισης εμφανίζεται επίσης βελτιωμένος, όταν ο αριθμός των δρομολογητών στην τοπολογία ή την περιοχή δεν υπερβαίνει το παραπάνω όριο. Η υπεροχή της διαχωρισμένης τοπολογίας είναι μεγαλύτερη όταν το συνολικό δίκτυο περιλαμβάνει μεγάλο πλήθος δρομολογητών, συγκεκριμένα πάνω από 60. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ο εμπειρικός κανόνας που θέλει τη διάσπαση δικτύων ή τμημάτων τους με 50 ή περισσότερες συσκευές, επιβεβαιώνεται στις υπό μελέτη τοπολογίες.

Ακόμα, επιβεβαιώνεται ο κανόνας σύμφωνα με τον οποίο ο αριθμός των ζεύξεων και των σχέσεων γειτονίας εντός μιας τοπολογίας επιδρά καθοριστικά στην υπό μελέτη παράμετρο. Συγκεκριμένα, η προσθήκη ζεύξεων εντός μίας OSPF area (και όχι μεταξύ αυτών) έχει ως συνέπεια την αύξηση του χρόνου αρχικής σύγκλισης και τη μείωση του χρόνου απόκρισης σε μεταβολή εντός της περιοχής. Επιπλέον, το κατώφλι πέρα του οποίου περαιτέρω μείωση του πλήθους των συσκευών ανά περιοχή δεν επιφέρει μείωση του χρόνου σύγκλισης, αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο πλήθος συσκευών ανά περιοχή και για τους δύο χρόνους.

6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής επιβεβαιώθηκε σε γενικές γραμμές, η ισχύς του εμπειρικού κανόνα του ορίου των 50 κόμβων ανά OSPF area, εξετάζοντας το χρόνο σύγκλισης του πρωτοκόλλου σε δύο συγκεκριμένες τοπολογίες. Για την ισχυρότερη επιβεβαίωση του κανόνα θα ήταν χρήσιμη η μελέτη περισσότερων τοπολογιών, όπως και η επίδραση του σημείου εμφάνισης της βλάβης (ζεύξη μεταξύ περιοχών, εντός non backbone area ή backbone area) στο χρόνο σύγκλισης. Ακόμα, θα μπορούσε να αντιπαρατεθεί η επίδραση του flat OSPF και διάφορων σχεδιασμών multi-area OSPF στις επιδόσεις δημοφιλών εφαρμογών, υπό σταθερή λειτουργία και κατά τη σύγκλιση. Περαιτέρω διερεύνησης χρήζει και η επίδραση του αριθμού των ζεύξεων εντός και μεταξύ των OSPF areas στην εξεταζόμενη παράμετρο. Εφόσον ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία, θα διατυπωθούν κατευθυντήριες οδηγίες βέλτιστου αρχικού σχεδιασμού ενός OSPF δικτύου.

Επιπλέον, θα μπορούσαν να αποτιμηθούν συγκριτικά οι επιδόσεις μιας τοπολογίας μεγάλου αριθμού δρομολογητών, όταν διαχωρίζεται με βέλτιστο για αυτήν τρόπο σε multi-area OSPF, σε αντιπαραβολή με τη βέλτιστη αξιοποίηση των EIGRP ASs. Και σε αυτήν την επέκταση προτείνεται η εξέταση του χρόνου σύγκλισης του δικτύου και των επιδόσεων κοινών εφαρμογών, για κάθε πρωτόκολλο. Η συγκεκριμένη έρευνα θα μπορούσε να διεξαχθεί μέσω προσομοίωσης, εξομοίωσης ή σε σύγχρονο πραγματικό εξοπλισμό.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε και η σύγκριση του χρόνου σύγκλισης του OSPF και του EIGRP, όταν εφαρμόζονται οι πλέον σύγχρονες εκδόσεις των δύο πρωτοκόλλων, συνοδευόμενες από οποιονδήποτε άλλο μηχανισμό περιορισμού του εν λόγω χρόνου. Και στην περίπτωση αυτή δύναται να χρησιμοποιηθεί προσομοίωση, εξομοίωση ή σύγχρονες δικτυακές συσκευές.

Βιβλιογραφία

- [1] ‘Layers of OSI Model’, *GeeksforGeeks*, Aug. 30, 2017. <https://www.geeksforgeeks.org/layers-of-osi-model/> (accessed Feb. 11, 2023).
- [2] ‘1.4. Refrence models’. <https://fmfi-uk.hq.sk/Informatika/Distribuvane%20Systemy/knihy/ICN/ch1s4.htm> (accessed Feb. 11, 2023).
- [3] Douglas E. Comer, *Διαδίκτυα με TCP/IP Αρχές, Πρωτόκολλα και Αρχιτεκτονικές*, 4th ed., vol. 1. Κλειδάριθμος.
- [4] ‘Introduction of Classful IP Addressing’, *GeeksforGeeks*, Jul. 08, 2015. <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-of-classful-ip-addressing/> (accessed Feb. 12, 2023).
- [5] ‘What Is Routing?’, *Cisco*. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/what-is-routing.html> (accessed Jan. 17, 2023).
- [6] ‘Introduction of Variable Length Subnet Mask (VLSM)’, *GeeksforGeeks*, Aug. 28, 2018. <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-of-variable-length-subnet-mask-vlsm/> (accessed Feb. 12, 2023).
- [7] ‘Types of Routing’, *GeeksforGeeks*, May 04, 2018. <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-routing/> (accessed Jan. 17, 2023).
- [8] Wendell Odom, *Official Cert Guide CCNA 200-301*, vol. 1, 2 vols. Pearson.
- [9] ‘Routing Information Protocol’, *Wikipedia*. Oct. 10, 2022. Accessed: Jan. 17, 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Routing_Information_Protocol&oldid=111527870
- [10] K. Sasaki, ‘Illustration of Distributed Bellman-Ford Algorithm’, *The First Cry of Atom*, Feb. 03, 2019. <http://www.lewuathe.com/illustration-of-distributed-bellman-ford-algorithm.html> (accessed Jan. 17, 2023).
- [11] Andrew S. Tanenbaum and David J. Wetherall, *Δίκτυα Υπολογιστών*, 5th ed. Κλειδάριθμος.
- [12] ‘Understanding Dijkstra’s Shortest Path Algorithm in Network Routing using Python’, *Engineering Education (EngEd) Program | Section*. <https://www.section.io/engineering-education/dijkstra-python/> (accessed Feb. 20, 2023).

- [13] ‘what’s RIP’. <https://ipsit.bu.edu/sc546/sc546Fall2002/RIP2/RIP/02.html> (accessed Jan. 17, 2023).
- [14] ‘Routing Information Protocol’, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 1058, Jun. 1988. doi: 10.17487/RFC1058.
- [15] G. S. Malkin, ‘RIP Version 2 - Carrying Additional Information’, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 1723, Nov. 1994. doi: 10.17487/RFC1723.
- [16] G. S. Malkin, ‘RIP Version 2’, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 2453, Nov. 1998. doi: 10.17487/RFC2453.
- [17] Wendell Odom, *Cisco CCNA Exam #640-607 Certification Guide*, 3rd ed. Cisco Systems.
- [18] ‘What is Routing Information Protocol (RIP) and How Does It Work?’, *Networking*. <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/Routing-Information-Protocol> (accessed Jan. 17, 2023).
- [19] ‘What Is Poison Reverse in Networking?’, *GeeksforGeeks*, Dec. 24, 2021. <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-poison-reverse-in-networking/> (accessed Jan. 24, 2023).
- [20] ‘The TCP/IP Guide - OSPF Overview, History, Standards and Versions’. http://www.tcpipguide.com/free/t_OSPFOverviewHistoryStandardsandVersions.htm (accessed Feb. 03, 2023).
- [21] ‘OSPF specification’, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 1131, Oct. 1989. doi: 10.17487/RFC1131.
- [22] J. Moy, ‘OSPF Version 2’, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 1247, Jul. 1991. doi: 10.17487/RFC1247.
- [23] J. Moy, ‘OSPF Version 2’, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 2328, Apr. 1998. doi: 10.17487/RFC2328.
- [24] M. Barnes, S. Mirtorabi, R. Aggarwal, A. Roy, and A. Lindem, ‘Support of Address Families in OSPFv3’, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 5838, Apr. 2010. doi: 10.17487/RFC5838.
- [25] R. Molenaar, ‘OSPFv3 for IPv4 Configuration’, *NetworkLessons.com*, Apr. 13, 2015. <https://networklessons.com/ospf/ospfv3-for-ipv4-configuration> (accessed Feb. 03, 2023).
- [26] M. Goyal *et al.*, ‘Improving Convergence Speed and Scalability in OSPF: A Survey’, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 14, no. 2, pp. 443–463, 2012, doi: 10.1109/SURV.2011.011411.00065.

- [27] ‘OSPF Metric cost Calculation Formula Explained’, *ComputerNetworkingNotes*. <https://www.computernetworkingnotes.com/ccna-study-guide/ospf-metric-cost-calculation-formula-explained.html> (accessed Feb. 12, 2023).
- [28] Diane Teare, Bob Vachon, and Rick Graziani, ‘OSPF Implementation’, in *Implementing Cisco IP Routing (ROUTE) Foundation Learning Guide: (CCNP ROUTE 300-101)*, 1st ed., Cisco Press, 2015.
- [29] ‘Route Summarization > Example for Understanding Route Summarization | Cisco Press’. <https://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=2995352> (accessed Feb. 10, 2023).
- [30] John Tiso, *Designing Cisco Network Service Architectures (ARCH) Foundation Learning Guide: (CCDP ARCH 642-874)*, 3rd ed. Cisco Press, 2011.
- [31] ‘OSPF Protocol | Open Shortest Path First Protocol - javatpoint’, *www.javatpoint.com*. <https://www.javatpoint.com/ospf-protocol> (accessed Feb. 04, 2023).
- [32] Raymond Lacoste and Bradley Edgeworth, *CCNP Enterprise Advanced Routing ENARSI 300-410 Official Cert Guide*, 1st ed. 2020.
- [33] ‘Understand and Use the Enhanced Interior Gateway Routing Protocol - Cisco’. <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/enhanced-interior-gateway-routing-protocol-eigrp/16406-eigrp-toc.html#anc33> (accessed Feb. 07, 2023).
- [34] ‘Enhanced Interior Gateway Routing Protocol’, *Wikipedia*. Sep. 26, 2022. Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Enhanced_Interior_Gateway_Routing_Protocol&oldid=1112522186
- [35] D. Savage, J. Ng, S. Moore, D. Slice, P. Paluch, and R. White, ‘Cisco’s Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP)’, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 7868, May 2016. doi: 10.17487/RFC7868.
- [36] ‘Topology Table - an overview | ScienceDirect Topics’. <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/topology-table> (accessed Feb. 19, 2023).
- [37] ‘IP Routing EIGRP Configuration Guide, Cisco IOS Release 15S - EIGRP Wide Metrics [Cisco IOS 15.5S]’, *Cisco*. https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios-xml/ios/iproute_eigrp/configuration/15-s/ire-15-s-book/ire-wid-met.html (accessed Jan. 17, 2023).
- [38] A. S. Chamberlain, ‘EIGRP Packet Format’, *The Traceroute Blog*, Sep. 30, 2018. <https://traceroute.home.blog/2018/09/30/eigrp-packet-format/> (accessed Feb. 11, 2023).

- [39] S. Y. Jalali, S. Wani, and M. Derwesh, ‘Qualitative Analysis and Performance Evaluation of RIP, IGRP, OSPF and EGRP Using OPNET™’.
- [40] I. Fitigau and G. Todorean, ‘Network performance evaluation for RIP, OSPF and EIGRP routing protocols’, in *Proceedings of the International Conference on ELECTRONICS, COMPUTERS and ARTIFICIAL INTELLIGENCE - ECAI-2013*, Pitesti, Arges, Romania, Jun. 2013, pp. 1–4. doi: 10.1109/ECAI.2013.6636217.
- [41] D. Sankar and D. Lancaster, ‘Routing Protocol Convergence Comparison using Simulation and Real Equipment’, *Adv. Commun.*.
- [42] S. G. Thorenoor, ‘Dynamic Routing Protocol Implementation Decision between EIGRP, OSPF and RIP Based on Technical Background Using OPNET Modeler’, in *2010 Second International Conference on Computer and Network Technology*, Bangkok, Thailand, 2010, pp. 191–195. doi: 10.1109/ICCNT.2010.66.
- [43] D. Xu and L. Trajkovi, ‘Performance Analysis of RIP, EIGRP, and OSPF using OPNET’.
- [44] Noman, A and Chowdhury, Abhijit, ‘Performance Analysis of EIGRP and OSPF for Different Applications using OPNET’, *Australasian J. of Computer Science*, vol. 1, pp. 1–8, 2014.
- [45] L. D. Circiumarescu, G. Predusca, N. Angelescu, and D. Puchianu, ‘Comparative Analysis of Protocol RIP, OSPF, RIGRP and IGRP for Service Video Conferencing, E-mail, FTP, HTTP’, in *2015 20th International Conference on Control Systems and Computer Science*, Bucharest, Romania, May 2015, pp. 584–589. doi: 10.1109/CSCS.2015.17.
- [46] M. Athira, L. Abrahami, and R. G. Sangeetha, ‘Study on network performance of interior gateway protocols — RIP, EIGRP and OSPF’, in *2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2)*, Chennai, India, Mar. 2017, pp. 344–348. doi: 10.1109/ICNETS2.2017.8067958.
- [47] J. Borthakur, ‘A comparison study of single area OSPF Network to multiple area OSPF Network implementation in a Campus area Network’, in *2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kharagpur, India, Oct. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCCNT54827.2022.9984627.
- [48] R. Ogier and P. Spagnolo, ‘Mobile Ad Hoc Network (MANET) Extension of OSPF Using Connected Dominating Set (CDS) Flooding’, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 5614, Aug. 2009. doi: 10.17487/RFC5614.
- [49] G. Pei, P. A. Spagnolo, S. Bae, T. R. Henderson, and J. H. Kim, ‘Performance Improvements of OSPF MANET Extensions: A Cross Layer Approach’, in *MILCOM 2007 -*

IEEE Military Communications Conference, Orlando, FL, USA, Oct. 2007, pp. 1–7. doi: 10.1109/MILCOM.2007.4455134.

[50] P. Spagnolo and T. Henderson, ‘Comparison of Proposed Ospf Manet Extensions’, in *MILCOM 2006*, Washington, DC, USA, Oct. 2006, pp. 1–7. doi: 10.1109/MILCOM.2006.302376.

[51] T. R. Henderson, P. A. Spagnolo, and G. Pei, ‘Evaluation of OSPF MANET Extensions’.

[52] Y. Guo, Z. Wang, X. Yin, X. Shi, and J. Wu, ‘Traffic Engineering in SDN/OSPF Hybrid Network’, in *2014 IEEE 22nd International Conference on Network Protocols*, Raleigh, NC, USA, Oct. 2014, pp. 563–568. doi: 10.1109/ICNP.2014.90.

[53] M. Caria, T. Das, and A. Jukan, ‘Divide and conquer: Partitioning OSPF networks with SDN’, in *2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, Ottawa, ON, Canada, May 2015, pp. 467–474. doi: 10.1109/INM.2015.7140324.

[54] X. Sun, Z. Jia, M. Zhao, and Z. Zhang, ‘Multipath Load Balancing in SDN/OSPF Hybrid Network’, in *Network and Parallel Computing*, vol. 9966, G. R. Gao, D. Qian, X. Gao, B. Chapman, and W. Chen, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 93–100. doi: 10.1007/978-3-319-47099-3_8.

[55] Choi, Youngjun and Kwon, Taewook, ‘Design and Implementation of The EIGRP based on the SDN’, *Journal of Korea Multimedia Society*, vol. 22, pp. 178--185, 2019.

[56] A. V. Aho and D. Lee, ‘Hierarchical networks and the LSA N-squared problem in OSPF routing’, in *Globecom '00 - IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record (Cat. No.00CH37137)*, San Francisco, CA, USA, 2000, vol. 1, pp. 397–404. doi: 10.1109/GLOCOM.2000.892036.

[57] ‘High Availability Campus Network Design--Routed Access Layer using EIGRP or OSPF’, *Cisco*. <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Campus/routed-ex.html> (accessed Feb. 19, 2023).

[58] ‘Measuring Network Convergence Time’. Ixia, Jan. 2014. [Online]. Available: <https://support.ixiacom.com/sites/default/files/resources/whitepaper/convergence.pdf>

[59] ‘PuTTY: Software for your own computer: ...: ITS: University of Sussex’. <https://www.sussex.ac.uk/its/services/software/owncomputer/putty> (accessed Dec. 21, 2022).

[60] ‘NetScanTools® Pro Edition Product Information’. <https://www.netscantools.com/nstpromain.html> (accessed Dec. 23, 2022).

[61] ‘Wireshark · Go Deep.’ <https://www.wireshark.org/> (accessed Jan. 29, 2023).

- [62] ‘Riverbed Modeler | Discrete Event Simulator for Network Simulation | Riverbed’.
<https://www.riverbed.com/en-gb/products/riverbed-modeler> (accessed Jan. 06, 2023).
- [63] OPNETWORK, ‘Introduction to Using OPNET Modeler’, 2002.