

Διατριβή Μεταπτυχιακού

**Ανοχή Σφαλμάτων και Μηχανική κυκλοφορίας
σε Δίκτυα MPLS**

Μαρία Παπά

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ιούνιος 2009

Περίληψη :

Κατά την εισαγωγή μιας ροής στο δίκτυο θα πρέπει να δρομολογείται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει αποδοτική χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου και σωστή διαχείριση των ροών, ώστε να υπάρχει ποιότητα υπηρεσιών. Αν στο δίκτυο εμφανιστεί κάποιο σφάλμα τότε το δίκτυο αποκαθίσταται με την μεταφορά της κυκλοφορίας από το αποτυχημένο μέρος του δικτύου σε ένα άλλο μονοπάτι του δικτύου, το οποίο όμως ικανοποιεί τους περιορισμούς ποιότητας υπηρεσιών και εξακολουθεί να υπάρχει καλή διαχείριση των πόρων του δικτύου για να εξασφαλίζει την δυνατότητα ανεύρεσης εναλλακτικών μονοπατιών για πιθανά σφάλματα που θα ακολουθήσουν. Η λειτουργία αυτή θα πρέπει να εκτελείται όσο το δυνατόν γρηγορότερα για να μην υπάρχει μεγάλη απώλεια πακέτων από το σημείο στο οποίο συνέβηκε το σφάλμα. Υπάρχουν δύο τεχνικές αποκατάστασης δικτύου η επαναδρομολόγηση (Rerouting) όπου το εναλλακτικό μονοπάτι υπολογίζεται δυναμικά και εγκαθίσταται μετά τον εντοπισμό του σφάλματος και η εναλλαγή σε προστατευόμενο μονοπάτι (Protection Switching) όπου το εναλλακτικό μονοπάτι είναι ήδη προϋπολογισμένο και εγκατεστημένο πριν να γίνει σφάλμα . Για μηχανική κυκλοφορίας υπάρχουν οι τεχνικές των πολλαπλών μονοπατιών, των κοινών εναλλακτικών μονοπατιών και των επιπλέον παραμέτρων στην δρομολόγηση των ροών

Αυτή η διατριβή παρουσιάζει ένα νέο αλγόριθμο που διαχειρίζεται τους πόρους του δικτύου και λαμβάνει υπόψη και δίνει λύσεις για όλες τις πιθανές περιπτώσεις σφαλμάτων που μπορούν να εμφανιστούν. Ο νέος αυτός αλγόριθμος προκύπτει από συνδυασμό ενός αλγορίθμου που υποστηρίζει μηχανική κυκλοφορίας και ενός αλγορίθμου που υποστηρίζει ανοχή σφαλμάτων και επαναφορά μετά την εμφάνιση κάποιου σφάλματος στο δίκτυο. Από την πλευρά της μηχανικής κυκλοφορίας έχει επιλεγεί ο αλγόριθμος LSFSB όπου μπορεί να συνδυάσει κατά κάποιο τρόπο και τις τρεις τεχνικές μηχανικής κυκλοφορίας. Από την πλευρά της αποκατάστασης δικτύου έχει επιλεγεί ο Hybrid όπου συνδυάζει και τις δύο μεθόδους

επαναφοράς σε περίπτωση σφάλματος. Ο νέος αλγόριθμος αυτός υλοποιήθηκε για να αξιολογηθεί. Έγινε εξέταση κατά πόσον τα αποτελέσματα είναι αυτά που αναμένονταν ώστε ο αλγόριθμος να μπορεί να συνδυάσει μηχανική κυκλοφορίας και ανοχή σφαλμάτων και να συγκαταλέγεται μέσα στους καλύτερους αλγόριθμους που μπορούν να έχουν αυτό τον συνδυασμό μεθόδων.

Ο αλγόριθμος προσομοιώθηκε στον Network Simulator 2 και με βάση τα αποτελέσματα που συλλέξαμε αφού τα επεξεργαστήκαμε καταλήξαμε σε κάποια συμπεράσματα για τις περιπτώσεις όπου ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι ο ιδανικός και σε ποιες όχι ανάλογα με το δίκτυο (τοπολογία) και το σενάριο.

ΑΝΟΧΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ MPLS

Μαρία Παπά

Η Διατριβή αυτή
Υποβλήθηκε προς Μερική Εκπλήρωση των
Απαιτήσεων για την Απόκτηση
Τίτλου Σπουδών Master
σε Προηγμένες Τεχνολογίες Πληροφορικής
στο
Πανεπιστήμιο Κύπρου

Συστήνεται προς Αποδοχή
από το Τμήμα Πληροφορικής
Ιούνης, 2009

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΡΙΣΗΣ

Διατριβή Master

ΑΝΟΧΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ MPLS

Παρουσιάστηκε από

Μαρία Παπά

Ερευνητικός Σύμβουλος	Λέκτορας Βάσος Βασιλείου Τμήμα Πληροφορικής
Ερευνητικός Σύμβουλος	Επίκουρος Καθηγητής Χρύσης Γεωργίου Τμήμα Πληροφορικής
Μέλος Επιτροπής	Επίκουρη Καθηγήτρια Άννα Φιλίππου Τμήμα Πληροφορικής Όνομα Μέλους Επιτροπής
Μέλος Επιτροπής	Επίκουρος Καθηγητής Γιώργος Έλληνας Τμήμα ΗΜΜ Όνομα Μέλους Επιτροπής

Πανεπιστήμιο Κύπρου

Ιούνης, 2009

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές της Διατριβής Μάστερ, τον κ. Βάσο Βασιλείου και τον κ. Χρύση Γεωργίου, που μου έδωσαν την δυνατότητα να εργαστώ πάνω σε αυτό το θέμα. Με την βοήθεια, την σωστή καθοδήγηση και την δική τους παρότρυνση κατάφερα να διεκπεραιώσω ένα μεγάλο μέρος της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μαρία Χατζηγιωνά για την βοήθεια που μου πρόσφερε τόσο μέσα από την διπλωματική της, όσο και για την βοήθεια της για το εργαλείο προσομοίωσης NS και μέσα από την διπλωματική της, καθώς και την οικογένεια μου και όλους τους συμφοιτητές μου που ο καθένας με τον δικό του τρόπο με έχει βοηθήσει.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρο.....	1
1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	3
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας	5
Κεφάλαιο 2 MPLS - Multiprotocol Label Switching	7
2.1 MPLS Περιοχή	7
2.1.1 Τμήματα.....	7
2.2 Προώθησης της ισοδύναμης κατηγορία	8
2.3 Ετικέτα.....	8
2.4 Διανομή ετικετών.....	10
2.5 MPLS Εναλλαγή ετικετών.....	10
2.6 Σωρός Ετικετών.....	11
2.7 Δρομολογητής Μεταγωγέας Ετικετών.....	12
2.8 Μονοπάτι Εναλλαγής Ετικετών	13
2.9 MPLS Πρωτόκολλα σηματοδότησης	13
Κεφάλαιο 3 Αποκατάσταση δικτύου MPLS	18
3.1 Ορολογίες.....	18
3.2 Ανίχνευση Σφαλμάτων.....	19
3.3 Ενημέρωση Σφάλματος	20
3.4 Μηχανισμοί αποκατάστασης δικτύου MPLS.....	21
3.4.1 Επαναδρομολόγηση	21

3.4.2	Εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι.....	22
3.5	Πορεία αποκατάστασης (Νέο εναλλακτικό μονοπάτι).....	22
3.5.1	Καθολική αποκατάσταση του δικτύου MPLS	23
3.5.2	Τοπική αποκατάσταση δικτύου MPLS.....	23
Κεφάλαιο 4 Μηχανική κυκλοφορίας.....		24
4.1	Ορισμός μηχανικής κυκλοφορίας	24
4.2	Χαρακτηριστικά κλειδιά της μηχανικής κυκλοφορίας.....	25
4.3	Στόχοι απόδοσης μηχανική κυκλοφορίας.....	25
4.4	Περιβάλλον της μηχανικής κυκλοφορίας.....	26
4.5	Μοντέλο Διεργασίας Μηχανικής κυκλοφορίας.....	26
4.6	Βασικά συστατικά της μηχανικής κυκλοφορίας.....	27
4.7	Ταξινόμηση συστημάτων της εφαρμοσμένης μηχανική Κυκλοφορίας	28
4.8	Μηχανική κυκλοφορίας και MPLS.....	30
Κεφάλαιο 5 Ανασκόπηση Προηγούμενης Ερευνητικής Εργασίας.....		34
5.1	Αλγόριθμοι Ανοχής Σφαλμάτων	36
5.1.1	Επαναδρομολόγηση	38
5.1.1.1	Αλγόριθμος MIRA.....	38
5.1.1.2	Αλγόριθμος Lin & Lui.....	39
5.1.1.3	Αλγόριθμος A.J.C.....	39
5.1.1.4	Αλγόριθμος Otel.....	40
5.1.1.5	Αλγόριθμος Max Evaluation.....	41
5.1.1.6	Αλγόριθμος Hongs.....	42
5.1.2	Εναλλαγή σε Προστατευμένο μονοπάτι	43

5.1.2.1	Αλγόριθμος Δομής Αντιστρεφόμενου δέντρου.	43
5.1.2.2	Αλγόριθμος Dual.....	47
5.1.2.3	Αλγόριθμος Makam	47
5.1.2.4	Αλγόριθμος SPM	48
5.1.2.5	Αλγόριθμος Two path protection	48
5.1.2.6	Αλγόριθμος Haskin	52
5.1.2.7	Αλγόριθμος SSPA	52
5.1.2.8	Αλγόριθμος RRL	54
5.1.2.9	Αλγόριθμος Gonfa	57
5.1.3	Συνδυασμός Επαναδρομολόγησης και Εναλλαγή σε Προστατευμένο μονοπάτι.....	59
5.1.3.1	Αλγόριθμος Hybrid.....	59
5.2	Αλγόριθμοι Μηχανικής Κυκλοφορίας	63
5.2.1	Προσανατολισμένοι στους Πόρου	65
5.2.1.1	Αλγόριθμος Reactive	65
5.2.1.2	Αλγόριθμος MATE	67
5.2.1.3	Αλγόριθμος AMP	68
5.2.1.4	Αλγόριθμος TELIC	72
5.2.1.5	Αλγόριθμος DORA	73
5.2.2	Προσανατολισμένοι στην Κυκλοφορία	74
5.2.2.1	Αλγόριθμος A.B.E	75
5.2.2.2	Αλγόριθμος JUNOS	76
5.2.2.3	Αλγόριθμος Shortest- Distance Extension.....	78
5.2.3	Προσανατολισμένοι στην Κυκλοφορία και τους Πόρους.....	79
5.2.3.1	Αλγόριθμος LSFSB	79
5.3	Αλγόριθμοι που συνδυάζουν Ανοχή Σφαλμάτων και Μηχανική Κυκλοφορίας	83
5.3.1	Αλγόριθμος TSMP	84

5.3.2	Αλγόριθμος RSVP-TE Extension.....	85
5.3.3	Αλγόριθμος Provisioning	88
5.3.4	Αλγόριθμος Resilience-Differentiated QoS (RD-QoS) Extension	89
5.3.5	Αλγόριθμος LDM.....	92
5.3.6	Αλγόριθμος Maximally Disjoint Multipaths.....	92
5.3.7	Αλγόριθμος MBAK	94
5.3.8	Αλγόριθμος SLCC	95
5.3.9	Αλγόριθμος T.C.J.K.T	96
5.3.10	Αλγόριθμος Network Protection Degree	96
5.3.11	Αλγόριθμος FTLB	98
5.3.12	Αλγόριθμος RD-QoS.....	100
5.3.13	Αλγόριθμος TJT	103
5.3.14	Αλγόριθμος Crankback	107
5.3.15	Αλγόριθμος Fast Re-route	107
5.3.16	Αλγόριθμος Με Detours	110
5.3.17	Αλγόριθμος Shared Backup LSP Restoration.....	111
5.4	Σύγκριση Αλγορίθμων	113
5.5	Αξιολόγηση Αλγορίθμων	118
5.5.1	Αλγόριθμοι Ανοχής Σφαλμάτων	118
5.5.2	Αλγόριθμοι Μηχανικής Κυκλοφορίας	119
5.5.3	Αλγόριθμοι Ανοχής Σφαλμάτων και Μηχανικής Κυκλοφορίας	120
Κεφάλαιο 6 Προτεινόμενος Αλγόριθμος		123
6.1	Ανοχή Σφαλμάτων	125
6.2	Ανίχνευση και Ενημέρωση Επιδιόρθωσης Σφάλματος	126
6.3	Μηχανική Κυκλοφορίας	126

6.4 Περιγραφή αλγορίθμου	127
6.5 Ψευδοκώδικας.....	131
6.6 Παράδειγμα Εκτέλεσης Αλγορίθμου	135
6.7 Ανάλυση Παραμέτρων Αξιολόγησης	146
6.7.1 Μηχανική Κυκλοφορίας	146
6.7.2 Χρόνος Αποκατάστασης Δικτύου	147
6.7.3 Απώλεια Πακέτων	148
6.7.4 Παραλαβή Πακέτων με Λανθασμένη Σειρά	149
6.7.5 Ανοχή Πολλαπλών Σφαλμάτων	149

Κεφάλαιο 7 Πειραματική αξιολόγηση151

7.1 Προσομοιωτής Network-Simulator	151
7.2 Παράμετροι Προσομοίωσης	151
7.2.1 Τοπολογίες.....	151
7.2.2 Πληροφορίες Δικτύου	153
7.2.3 Σενάρια	154
7.3 Παράμετροι Αξιολόγησης	156
7.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης	158
7.4.1 Γραφικές Παραστάσεις για Σενάριο 1	158
7.4.2 Γραφικές Παραστάσεις για Σενάριο 2	164
7.4.3 Γραφικές Παραστάσεις για Σενάριο 3	170
7.4.4 Γραφικές Παραστάσεις για Σενάριο 4	176
7.5 Συμπεράσματα	181

Κεφάλαιο 8 Τελικά Συμπεράσματα - Μελλοντική εργασία.....186

8.1 Τελικά Συμπεράσματα	186
8.2 Μελλοντική Εργασία	189
Βιβλιογραφία.....	191

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΜΕ ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 5.1 Τύποι αλγορίθμων ανάλογα με την λειτουργία του.....	35
Πίνακας 5.1.1.1 Αλγόριθμοι εναλλαγής σε προστατευμένο μονοπάτι.....	37
Πίνακας 5.1.1.2 Αλγόριθμοι επαναδρομολόγησης.....	37
Πίνακας 5.1.1.3 Αλγόριθμοι που συνδυάζουν επαναδρομολόγηση και εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι	37
Πίνακας 5.2.1 Αλγόριθμοι με στόχους απόδοσης προσανατολισμένους στην κυκλοφορία και τους πόρους	64
Πίνακας 5.2.2 Αλγόριθμοι με στόχους απόδοσης προσανατολισμένους στους Πόρους.....	64
Πίνακας 5.2.3 Αλγόριθμοι με στόχους απόδοσης προσανατολισμένους στην κυκλοφορία	65
Πίνακας 5.3.12.1 Κλάσεις ανεκτικότητας και τα στοιχεία τους	101
Πίνακας 5.5.1.1 Χαρακτηριστικά αλγορίθμων ανοχής σφαλμάτων	119
Πίνακας 5.5.2.1 Χαρακτηριστικά αλγορίθμων μηχανικής κυκλοφορίας.....	119
Πίνακας 5.5.3.1 Πλεονεκτήματα αλγορίθμων που συνδυάζουν ανοχή σφαλμάτων και μηχανική κυκλοφορίας	122

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 5.1.2.1.1 Ένα παράδειγμα προστασίας μονοπατιού.....	44
Σχήμα 5.1.2.1.2 Παράδειγμα εικονικά συγχωνευμένων.....	45
Σχήμα 5.1.2.5.1 Κατασκευή πορειών προστασίας: τοπολογία vBNS.....	50
Σχήμα 5.1.2.5.2 Δύο πιθανές τοποθετήσεις πορειών προστασίας.....	51
Σχήμα 5.1.2.7.3 Αλγόριθμος SSPA.....	53
Σχήμα 5.1.2.8.1 Τοπολογία παραδείγματος εκτέλεσης αλγορίθμου.....	56
Σχήμα 5.1.2.8.2 Παράδειγμα του πως η επηρεαζόμενη ροή εναλλάσσεται στο επίπεδο..	57
Σχήμα 5.1.3.1.1 Τοπολογία παραδείγματος εκτέλεσης αλγορίθμου.....	62
Σχήμα 5.2.1.1.1 Συστατικά του συστήματος κατανεμημένης αντιδραστικής MPLS μηχανικής κυκλοφορίας.....	66
Σχήμα 5.2.1.3.1 Βασική ιδέα μηχανισμού Προς Τα Πίσω.....	69
Σχήμα 5.2.1.3.2 παράδειγμα Backpressure Message (BM) από τον X στο Y0 και in/out πίνακα στον κόμβο X	71
Σχήμα 5.2.2.2.1 Κλάσεις Μηχανικής Κυκλοφορίας Junos.....	77
Σχήμα 5.2.2.2.2 Πως επηρεάζουν οι αστυνομικοί.....	78
Σχήμα 5.3.2.1 ένα – προς – ένα εναλλακτική Τεχνική.....	86
Σχήμα 5.3.2.2 Εύκολη Εναλλαγή Τεχνική	87
Σχήμα 5.3.13.1 Τμηματική επαναφορά	105
Σχήμα 5.3.13.2 Επαναφορά μονοπατιού	106
Σχήμα 5.3.15.1 Γρήγορη Επαναφορά τμηματική προστασία.....	108
Σχήμα 5.3.15.2 Γρήγορη Επαναφορά προστασία κόμβου.....	109
Σχήμα 5.3.16.1 Προστασία με Μονοπάτια Παράκαμψης.....	110
Σχήμα 5.3.17.1 Κοινά εναλλακτικά μονοπάτια.....	111
Σχήμα 5.5.17.2 Προστασία σε περίπτωση σφάλματος σε κόμβο.....	112

Σχήμα 6.6.1 Τοπολογία στην οποία εκτελείται το παράδειγμα	136
Σχήμα 6.6.2 Κυρίως και εναλλακτικό μονοπάτι της πρώτης ροής	138
Σχήμα 6.6.3 Πως διαμορφώνεται το SPT.....	139
Σχήμα 6.6.4 SPT πριν το σφάλμα των κόμβων.....	140
Σχήμα 6.6.5 Το νέο εναλλακτικό μονοπάτι μετά το σφάλμα στο αρχικό εναλλακτικό μονοπάτι.....	141
Σχήμα 6.6.6 Κυρίως και εναλλακτικό μονοπάτι για την δεύτερη ροή.....	143
Σχήμα 6.6.7 SPT πριν το σφάλμα μεταξύ των κόμβων.....	144
Σχήμα 6.6.8 SPT πριν το σφάλμα μεταξύ των κόμβων.....	145
Σχήμα 6.6.9 Οι δυο ροές πως δρομολογούνται μετά από τα σφάλματα που παρουσιάστηκαν.....	145
Σχήμα 7.3.1.1 Τοπολογία του πρώτου δικτύου.....	152
Σχήμα 7.3.1.2 Τοπολογία του δεύτερου δικτύου.....	152
Σχήμα 7.3.1.3 Τοπολογία του τρίτου δικτύου	153
Σχήμα 7.4.1.1 Ποσοστό πακέτων που χάθηκαν.....	158
Σχήμα 7.4.1.2 Ποσοστό πακέτων που παραλήφθηκαν με λανθασμένη σειρά.....	159
Σχήμα 7.4.1.3 Χρόνος αποκατάσταση κάθε σφάλματος.....	160
Σχήμα 7.4.1.4 Αριθμός πακέτων που παραλήφθηκαν.....	161
Σχήμα 7.4.1.5 Καθυστερήσεις με τους αριθμούς ακολουθίας.....	162
Σχήμα 7.4.1.6 Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις για τις τρεις τοπολογίες.....	163
Σχήμα 7.4.2.1 Ποσοστό πακέτων που χάθηκαν.....	164
Σχήμα 7.4.2.2 Ποσοστό πακέτων που παραλήφθηκαν με λανθασμένη σειρά.....	165
Σχήμα 7.4.2.3 Χρόνος αποκατάσταση κάθε σφάλματος.....	166
Σχήμα 7.4.2.4 Αριθμός πακέτων που παραλήφθηκαν.....	167
Σχήμα 7.4.2.5 Καθυστερήσεις με τους αριθμούς ακολουθίας.....	168
Σχήμα 7.4.2.6 Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις για τις τρεις τοπολογίες.....	169

Σχήμα 7.4.3.1 Ποσοστό πακέτων που χάθηκαν.....	170
Σχήμα 7.4.3.2 Ποσοστό πακέτων που παραλήφθηκαν με λανθασμένη σειρά.....	171
Σχήμα 7.4.3.3 Χρόνος αποκατάσταση κάθε σφάλματος.....	172
Σχήμα 7.4.3.4 Αριθμός πακέτων που παραλήφθηκαν.....	173
Σχήμα 7.4.3.5 Καθυστερήσεις με τους αριθμούς ακολουθίας.....	174
Σχήμα 7.4.1.6 Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις για τις τρεις τοπολογίες.....	175
Σχήμα 7.4.4.1 Ποσοστό πακέτων που χάθηκαν.....	176
Σχήμα 7.4.4.2 Ποσοστό πακέτων που παραλήφθηκαν με λανθασμένη σειρά.....	177
Σχήμα 7.4.4.3 Χρόνος αποκατάσταση κάθε σφάλματος.....	178
Σχήμα 7.4.4.4 Αριθμός πακέτων που παραλήφθηκαν.....	179
Σχήμα 7.4.4.5 Καθυστερήσεις με τους αριθμούς ακολουθίας.....	180
Σχήμα 7.4.4.6 Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις για τις τρεις τοπολογίες.....	181

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο

Με την εκρηκτική αύξηση και εμφάνιση πολύπλοκων υπηρεσιών δικτύου έχει μειωθεί η πραγματική κυκλοφορία των δεδομένων που μεταφέρονται μέσα στο δίκτυο και η ποιότητα κυκλοφορίας των υπηρεσιών. Επιπλέον παρουσιάζεται γρήγορη ανάπτυξη και αύξηση των απαιτήσεων για την ποιότητα των υπηρεσιών, για την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα.

Η χρήση του διαδικτύου αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς και έτσι πολλά δεδομένα μεταφέρονται μέσα στα δίκτυα, όμως οι υπηρεσίες του διαδικτύου γίνονται όλο και πιο περίπλοκες με αποτέλεσμα η ποιότητα των υπηρεσιών και της κυκλοφορίας των δεδομένων στο δίκτυο να μειώνεται. Με την μείωση της κυκλοφορίας των δεδομένων, μειώνονται τα δεδομένα που μεταφέρονται. Πολλαπλά σφάλματα μπορούν να συμβούν στα δίκτυα και η ροή δεδομένων επηρεάζεται. Στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου η εμφάνιση σφαλμάτων που θα επηρεάσουν τη ροή των δεδομένων που δρομολογείται στο δίκτυο είναι σημαντική γιατί μπορεί σε τέτοιες εφαρμογές οι απώλειες πακέτων και οι μεγάλες καθυστερήσεις να γίνονται αισθητές καθώς αλλοιώνονται τα αποτελέσματα. Έτσι η ροή πρέπει να δρομολογηθεί γύρω από το σφάλμα.

Η ανθεκτικότητα του δικτύου έγινε το κλειδί στην σχεδίαση δικτύων βασισμένα σε IP που υποστηρίζουν πολυμέσα και πολλαπλές υπηρεσίες. Οποιαδήποτε στρατηγική επαναφοράς μετά από σφάλμα στο δίκτυο πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις διάφορες απαιτήσεις ανεκτικότητας για

τις ροές μονής κυκλοφορίας, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική Χρήση των εφεδρικών μονοπατιών. Οι νέες υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, που καθιερώνουν επικοινωνία μεταξύ τους πριν την ανταλλαγή δεδομένων και ήδη προσφέρονται στο διαδίκτυο παρουσιάζουν αυξημένες απαιτήσεις ανεκτικότητας. Απαιτείται λοιπόν να υπάρχει ανοχή σφαλμάτων για να μην επηρεάζονται αρνητικά τα αποτελέσματα των διάφορων εφαρμογών.

Υπάρχει λοιπόν ανάγκη από μηχανισμούς που αντιμετωπίζουν τα σφάλματα που μπορεί να εμφανιστούν σε ένα δίκτυο και από μηχανισμούς που θα διευκολύνουν τη μεταφορά της κυκλοφορίας διαμέσου ενός δικτύου με τον πιο αποδοτικό, λειτουργικό και αξιόπιστο τρόπο ώστε να προσφέρεται καλύτερη υπηρεσία στους χρήστες σε σχέση με την καθυστέρηση και τα δεδομένα που μεταφέρονται ανά δευτερόλεπτο.

Για την εύκολη μεταφορά της κυκλοφορίας με αποδοτικό και λειτουργικό τρόπο χρησιμοποιήθηκε η MPLS μηχανικής κυκλοφορίας [10][11][26][16][18][55]. Έτσι τα βασικά κίνητρα για την ανάπτυξη της MPLS μηχανικής κυκλοφορίας είναι τρία. Πρώτο κίνητρο είναι η βελτιστοποίηση του εύρους ζώνης. Με την έννοια της βελτιστοποίησης εύρους ζώνης αναφέρεται στην προσπάθεια για καλύτερη χρήση των πόρων του δικτύου. Ένας δεύτερος παράγοντας που οδήγησε στην ανάπτυξη του MPLS μηχανικής κυκλοφορίας είναι η προσπάθεια για να επιβληθούν οι αυστηρές εγγυήσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσιών (QoS) για τους διάφορους τύπους υπηρεσιών π.χ ευαίσθητες ροές κυκλοφορίας όπως η φωνή και το βίντεο. Η MPLS μηχανική κυκλοφορία δρα σε επίπεδο ελέγχου και ως εκ τούτου παίρνει αποφάσεις δρομολόγησης. Η MPLS μηχανική κυκλοφορίας επιτρέπει σε ένα τελεστή να ελαττώσει το μέσο όρο και το μέγιστο βαθμό χρήσης μιας σύνδεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα λιγότερη καθυστέρηση αναμονής στην ουρά κάτι που θα επιφέρει καλύτερο QoS. Ο τρίτος παράγοντας ανάπτυξη της MPLS μηχανικής κυκλοφορίας ήταν η ανάγκη για γρήγορη επαναφορά σε

περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο. Πολλά μεγάλα δίκτυα κατέφυγαν στην MPLS μηχανική κυκλοφορίας για να κερδίσουν ως προς τους μηχανισμούς επαναφοράς.

1.2 Σκοπός της διατριβής

Σκοπός της διατριβής είναι να σχεδιαστεί ένας νέος αλγόριθμος που θα διαχειρίζεται τους πόρους του δικτύου και θα λαμβάνει υπόψη και θα δίνει λύσεις για όλες τις πιθανές περιπτώσεις σφαλμάτων που μπορούν να εμφανιστούν.

Οι αλγόριθμοι της μηχανικής κυκλοφορίας από πλευράς τους, διαχειρίζονται τους πόρους του δικτύου, θεωρώντας όμως ότι το δίκτυο δεν παρουσιάζει κάποιο σφάλμα. Π.χ Αναφέρονται σε πολλές ροές όπου κάθε μια έχει την δική της προτεραιότητα και ανάλογα με αυτή δεσμεύονται οι πόροι για κάθε μια από τις ροές. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις για τις οποίες δεν διευκρινίζεται η συμπεριφορά τους. Τέτοιες περιπτώσεις είναι (α) Η παρουσία κάποιου σφάλματος όπου θα χρειαστεί εναλλαγή της ροής (β) Όταν υπάρχουν προτεραιότητες, κατά πόσο θα μπορούν να διατηρηθούν για τις ροές και μετά την παρουσία σφαλμάτων (γ) Η περίπτωση όπου η ροή θα πρέπει να μοιραστεί σε περισσότερα από ένα εναλλακτικά μονοπάτια.

Οι αλγόριθμοι της ανοχής σφαλμάτων από πλευράς τους, ελέγχουν τα σφάλματα, φροντίζοντας την επαναφορά του δικτύου μετά την παρουσία σφάλματος στα μονοπάτια. Καθορίζεται ο τρόπος, με τον οποίο θα γίνεται η εναλλαγή της ροής στα μονοπάτια αν παρουσιαστεί σφάλμα στο μονοπάτι που φιλοξενούσε τη ροή. Στους αλγορίθμους αυτούς παραλείπονται σημαντικά στοιχεία που επηρεάζουν την απόδοση του δικτύου. Τι γίνεται αν οι εναλλαγές γίνονται στο ίδιο μονοπάτι ή σύνδεση και τα υπερφορτώνει; Γιατί να φιλοξενηθεί μια ροή αν δεν υπάρχουν πριν ή μετά το σφάλμα πόροι για να την ικανοποιήσουν;

Έχουν προταθεί κάποιοι αλγόριθμοι που συνδυάζουν ανοχή σφαλμάτων και μηχανική κυκλοφορίας. Τα κοινά προβλήματα των αλγορίθμων αυτών είναι ότι θεωρούν, ότι υπάρχει ή μπορεί να συμβεί ένα σφάλμα στο κυρίως μονοπάτι. Η προσέγγιση αυτή δεν λαμβάνει υπόψη σφάλματα που μπορούν να συμβούν τόσο στο κυρίως όσο και στο εναλλακτικό μονοπάτι, ούτε και την περίπτωση να συμβεί σφάλμα στο εναλλακτικό μονοπάτι πριν γίνει η εναλλαγή σε αυτό.

Απαιτείται λοιπόν ο σχεδιασμός ενός νέου αλγόριθμου που θα διαχειρίζεται τους πόρους του δικτύου και θα λαμβάνει υπόψη και θα δίνει λύσεις για όλες τις πιθανές περιπτώσεις σφαλμάτων που μπορούν να εμφανιστούν. Ο σχεδιασμός αυτού του νέου αλγορίθμου είναι και ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ο νέος αυτό αλγόριθμος προκύπτει από τον συνδυασμό ενός αλγορίθμου που υποστηρίζει μηχανική κυκλοφορίας και ενός αλγορίθμου που υποστηρίζει ανοχή σφαλμάτων και επαναφορά μετά την εμφάνιση κάποιου σφάλματος στο δίκτυο.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου συγκρίνουμε τους υφιστάμενους αλγορίθμους που υποστηρίζουν ανοχή σφαλμάτων για να επιλεγεί ο καλύτερος σύμφωνα με τα εξής κριτήρια: Χρόνο καθυστέρησης, αποκατάσταση δικτύου, απώλεια πακέτων, παραλαβή πακέτων με λανθασμένη σειρά. Μέσα από την σύγκριση αυτή επιλέγεται ο καλύτερος αλγόριθμος. Ως καλύτερο αλγόριθμο θεωρούμε τον αλγόριθμο που τηρεί τα περισσότερα κριτήρια. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την επιλογή του καλύτερου αλγορίθμου ως προς την μηχανική κυκλοφορίας. Τα κριτήρια είναι: Βελτίωση της χρήσης των πόρων του δικτύου, χρήση πολλαπλών μονοπατιών μεταξύ ζευγών ώστε να υπάρχει κατανομή της ροής και εξισορρόπηση φορτίου, αποθήκευση τοπικών πληροφοριών σε κάθε κόμβο ώστε να γίνονται πιο εύκολα και γρήγορα οι αναγκαίοι υπολογισμοί τιμών διαφόρων παραμέτρων, ανάγκη για γρήγορη επαναφορά σε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο, προσπάθεια για να υπάρχει ψηλό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών QoS, τις αποφάσεις για τις ροές να τις λαμβάνουν οι ακρινοί δρομολογητές (Router Based). Οι αλγόριθμοι αυτοί θα συνδυαστούν με τέτοιο τρόπο που να διατηρεί και να

αυξάνει τα πλεονεκτήματα που μας προσφέρουν. Από την πλευρά της μηχανικής κυκλοφορίας έχει επιλεγεί ο αλγόριθμος LSFSB [8,9,18] όπου μπορεί να συνδυάσει κατά κάποιο τρόπο και τις τρεις τεχνικές μηχανικής κυκλοφορίας (Προτεραιότητες, κοινά εναλλακτικά μονοπάτια και πολλαπλά μονοπάτια). Από την πλευρά της αποκατάστασης δικτύου έχει επιλεγεί ο Hybrid [37][38] όπου συνδυάζει και τις δύο μεθόδους επαναφοράς σε περίπτωση σφάλματος. Ο νέος αλγόριθμος που συνδυάζει τους δύο αλγορίθμους, υλοποιήθηκε και αξιολογήθηκε. Έγινε εξέταση κατά πόσο τα αποτελέσματα είναι αυτά που αναμένονταν ώστε ο αλγόριθμος να μπορεί να συνδυάζει μηχανική κυκλοφορίας και ανοχή σφαλμάτων και να συγκαταλέγεται μέσα στους καλύτερους αλγορίθμους που μπορούν να έχουν αυτό τον συνδυασμό μεθόδων.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μικρή εισαγωγή στο MPLS όπου προσδιορίζεται τι είναι το MPLS, εξηγούνται οι βασικοί ορισμοί του MPLS και η βασική λειτουργία του. Περιγράφεται η αρχιτεκτονική του και τα πρωτόκολλα σηματοδότησης που το υποστηρίζουν. Επιπλέον γίνεται επισκόπηση των σφαλμάτων σε ένα δίκτυο MPLS, οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του σφάλματος και ενημέρωση των άλλων δρομολογητών για την ύπαρξη του .

Στο Κεφάλαιο 3 εξηγούνται οι βασικοί μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση του δικτύου και οι βασικές ορολογίες που θα χρησιμοποιηθούν στα υπόλοιπα κεφάλαια της διπλωματικής.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται μια εισαγωγή στη μηχανική κυκλοφορίας όπου προσδιορίζεται ο ορισμός της μηχανικής κυκλοφορίας και εξηγούνται τα χαρακτηριστικά της. Περιγράφονται οι στόχοι απόδοσης της μηχανικής κυκλοφορίας και το περιβάλλον της. Παρουσιάζεται το μοντέλο διαδικασίας μηχανικής κυκλοφορίας και τα βασικά συστατικά του. Επιπλέον γίνεται ταξινόμηση

των συστημάτων της μηχανικής κυκλοφορίας και επισκόπηση του τρόπου σύνδεσης της μηχανικής κυκλοφορίας με το MPLS.

Στο Κεφάλαιο 5 καθορίζεται ο σκοπός της προηγούμενης ερευνητικής εργασίας, γίνεται περιγραφή των αλγορίθμων που υποστηρίζουν ανοχή σφαλμάτων, των αλγορίθμων που υποστηρίζουν μηχανική κυκλοφορίας και των αλγορίθμων που συνδυάζουν και τα δύο. Περιγράφονται αλγόριθμοι που είναι ήδη υλοποιημένοι αλλά δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στους αλγορίθμους LSFBSB και Hybrid. Γίνεται σύγκριση των αλγορίθμων κάθε κατηγορίας (ανοχής σφαλμάτων, μηχανικής κυκλοφορίας, συνδυασμού των δυο) σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν οριστεί για κάθε μια. Από τις συγκρίσεις αυτές προσπαθούμε να επιλέξουμε ένα αλγόριθμο από κάθε κατηγορία ως βάση για το νέο αλγόριθμο που προτείνουμε.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται αναλυτικά ο προτεινόμενος αλγόριθμος που συνδυάζει τους αλγορίθμους LSFBSB και Hybrid και παρουσιάζεται σε μορφή ψευδοκώδικα. Επιπλέον για να υπάρχει καλύτερη κατανόηση παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εκτέλεσης του. Τέλος γίνεται ανάλυση των παραμέτρων αξιολόγησης.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται πειραματική αξιολόγηση του αλγορίθμου. Παρουσιάζονται οι παράμετροι αξιολόγησης και περιγράφονται τα σενάρια και οι τοπολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έχουν παρθεί και τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από την πειραματική αξιολόγηση.

Στο Κεφάλαιο 8 καταγράφονται τα τελικά συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε μέσα από τα σενάρια που τρέξαμε και τα αποτελέσματα που πήραμε. Επίσης περιγράφεται η μελλοντική εργασία που μπορεί να γίνει στο συγκεκριμένο θέμα της ανοχής σφαλμάτων και μηχανικής κυκλοφορίας σε δίκτυα MPLS

Κεφάλαιο 2

MPLS - Multiprotocol Label Switching

Το MPLS είναι ένα πρωτόκολλο που συνδυάζει τη διαχείριση του εύρους ζώνης (bandwidth) και τις απαιτήσεις εξυπηρέτησης για IP δίκτυα [17]. Με τη χρήση του MPLS μπορούν να συνυπάρχουν πολλά είδη κυκλοφορίας στο ίδιο δίκτυο και επιπλέον η διαχείριση της κυκλοφορίας και της καλύτερης απόδοσης μπορούν να γίνουν πιο εύκολα.

2.1 MPLS Περιοχή

Μια MPLS περιοχή περιέχει ένα σύνολο από κόμβους που εκτελούν MPLS δρομολόγηση και προώθηση. Την περιοχή αυτή ρυθμίζει και ελέγχει η διοίκηση. Οπότεν υπάρχει ένα σύνολο δρομολογητών κάτω από μια διοίκηση.

2.1.1 Τμήματα

Υπάρχουν δύο τμήματα ο πυρήνας και τα άκρα της περιοχής MPLS. Κάθε MPLS κόμβος μπορεί να γειτονεύει είτε με άλλους MPLS κόμβους και αυτοί οι κόμβοι ανήκουν στον πυρήνα ή με κόμβους που δεν υποστηρίζουν MPLS και αυτοί οι κόμβοι ανήκουν στα άκρα της MPLS περιοχής. Ένας MPLS ενεργοποιημένος δρομολογητής καλείται LSR (Label Switching Router) δρομολογητής ετικέτας. Οι δρομολογητές στα άκρα της MPLS περιοχής καλούνται δρομολογητές των άκρων (Label Edge Routers- LER) ενώ οι δρομολογητές του πυρήνα ονομάζονται LSR μετάβασης (transit LSR). Οι δρομολογητές των άκρων χωρίζονται επίσης σε κόμβο εισόδου (ingress LER) και κόμβο εξόδου (egress LER). Κόμβος εισόδου είναι ο δρομολογητής που

βρίσκεται στην είσοδο της MPLS περιοχής στο μονοπάτι που μεταφέρει την ροή των δεδομένων στην περιοχή. Κόμβους εξόδου καλείται ο κόμβος στην έξοδο της MPLS περιοχής . Ακόμα δυο είδη κόμβων που υπάρχουν είναι ο προς τα πάνω (upstream LSR) και ο προς τα κάτω κόμβος (downstream LSR).

2.2 Προώθησης της ισοδύναμης κατηγορίας (Forwarding Equivalent Class)

Η προώθησης της ισοδύναμης κατηγορίας συσχετίζεται με μια συγκεκριμένη ετικέτα και ένα μονοπάτι αποστολής (forwarding path). Είναι ένα σύνολο από πακέτα που αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο από κάποιο LSR και δρομολογούνται από το ίδιο LSP έτσι η ίδια ετικέτα μπορεί να τοποθετηθεί από κάποιο LSR σε διαφορετικά πακέτα επιτυγχάνοντας την μείωση των πληροφοριών που υπάρχουν στο πακέτο. Έτσι τα πακέτα αποστέλλονται σύμφωνα με ορισμένες ή ακόμα και όλες τις πληροφορίες σύμφωνα με τον πίνακα που έχει τις πληροφορίες για τις ετικέτες.

2.3 Ετικέτα

Είναι η επιγραφή του MPLS. Βρίσκεται ανάμεσα στο επίπεδο σύνδεσης στοιχείου (Data-Link Layer) και το επίπεδο δικτύου (Network Layer). Η χρησιμότητάς της είναι τοπική δηλαδή χρησιμοποιείται μόνο για την σύνδεση δύο γειτονικών κόμβων (LSR). Η ανάθεση της ετικέτας σε κάθε πακέτο γίνεται σύμφωνα με τις πληροφορίες που παρέχει το επίπεδο δικτύου (διεύθυνση αποστολέα και παραλήπτη). Οι πληροφορίες που υπάρχουν στην ετικέτα είναι οι εξής: Label, Exp, S, TTL, Label : Η ακριβής τιμή της ετικέτας που έχει ανατεθεί στο πακέτο. Exp: χρησιμοποιείται για τις διαφοροποιημένες υπηρεσίες και παροχή των κατηγοριών υπηρεσίας. S:

Δείχνει την χρήση του σωρού ετικετών. TTL: χρόνος ζωής. Στο ingress LSR (δρομολογητής στη είσοδο της MPLS περιοχής) της MPLS περιοχής τα πακέτα χωρίζονται σε κλάσεις και δρομολογούνται στο FEC (Forwarding Equivalence Class) σύμφωνα με τις πληροφορίες που μεταφέρονται στο IP header των πακέτων και τις τοπικές πληροφορίες που διατηρεί ο LSR. Η ροή FEC στην οποία θα ανατεθεί το πακέτο κωδικοποιείται με την τιμή της ετικέτας. Όταν θα γίνει ανάθεση του κατάλληλου FEC σε κάθε πακέτο δεν χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση από τους δρομολογητές που ακολουθούν στην ίδια MPLS περιοχή. Οπότεν ο καθορισμός κάποιου και του συγκεκριμένου πακέτου σε μια συγκεκριμένη ροή γίνεται μόνο μια φορά κατά την είσοδο του στο δίκτυο. Η ετικέτα (label) τοποθετείται σε κάθε πακέτο στην MPLS περιοχή κατά την είσοδο του στη MPLS περιοχή από τον δρομολογητή στην είσοδο της MPLS περιοχής. Την ετικέτα αυτή χρησιμοποιεί κάθε LSR σαν δείκτη για να ψάξει τον πίνακα αποστολής (του LSR) και να βρει τον επόμενο κόμβο. Τα πακέτα προωθούνται μαζί με την ετικέτα όπως καθορίζεται από τον πίνακα δρομολόγησης σύμφωνα με το συγκεκριμένο δείκτη που καθορίζει τον επόμενο κόμβο. Πριν την αποστολή του πακέτου στον επόμενο κόμβο εκτελείται η διαδικασία της εναλλαγής της ετικέτας για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από τον επόμενο δρομολογητή για να τον στείλει και αυτός με την σειρά του στον επόμενο. Η ετικέτα που τοποθετήθηκε στο πακέτο κατά την είσοδο του στην MPLS περιοχή αντικαθίσταται από μια ετικέτα εξόδου (outgoing label) πακέτο πάει προς τον επόμενο LSR κόμβο. Πριν το πακέτο φύγει από την MPLS περιοχή και να παραδοθεί το MPLS ετικέτα (MPLS -header) απομακρύνεται από τον δρομολογητή εξόδου (δρομολογητής στην έξοδο της MPLS περιοχής) ο οποίος επιπλέον διαβάζει τις πληροφορίες από το επίπεδο δικτύου και το δρομολογεί ανάλογα. Στον πυρήνα οι LSRs κόμβοι χρησιμοποιούν την εναλλαγή της ετικέτας για να δρομολογήσουν τα πακέτα.

2.4 Διανομή ετικετών

Η εναλλαγή ετικετών και η δημιουργία μονοπατιών εναλλαγής γίνεται με την ανταλλαγή LDP μηνυμάτων ανάμεσα στους LDP agents των LSR κόμβων. Για την εναλλαγή των δεδομένων διαχωρίζει τον έλεγχο διαδρομής από την μεταφορά δεδομένων. Ο έλεγχος διαδρομής αποτελείται από πρωτόκολλα δρομολόγησης για το στρώμα δικτύου το οποίο είναι υπεύθυνο να διανέμει τις πληροφορίες δρομολόγησης μεταξύ των δρομολογητών και από τις διαδικασίες για δέσμευση ετικετών και την ενημέρωση των πληροφοριών στον πίνακα που είναι υπεύθυνος για την δρομολόγηση των πακέτων. Πιο αναλυτικά στον έλεγχο διαδρομής γίνεται εναλλαγή μηνυμάτων ανάμεσα στους LSR κόμβους έστω και αν δεν υπάρχουν δεδομένα για να μεταφερθούν. Δημιουργούνται μονοπάτια εναλλαγής ετικετών για κάθε κλάση με την αποστολή μηνυμάτων ανάθεσης (mapping message) από κάθε LDP αντιπρόσωπος (LDP agent) προς όλους τους άλλους που περιέχουν το FEC και την ετικέτα που θα χρησιμοποιηθεί μετά για την μεταφορά των δεδομένων. Στο τέλος όλοι οι πίνακες των MPLS κόμβων γεμίζουν και διάφορα μονοπάτια εναλλαγής ετικετών εκχωρούνται για κάθε FEC. Λόγο της χρήσης της ετικέτας για την αποστολή των πακέτων θεωρείται ότι δημιουργείται μια νοητή σήραγγα από την οποία μεταφέρονται τα δεδομένα.

2.5 MPLS Εναλλαγή Ετικετών

Ο LSR κόμβος εξετάζει την ετικέτα στην κορυφή του σωρού ετικετών και χρησιμοποιεί τον πίνακα με τις εισερχόμενες ετικέτες (Incoming Label Map ILM) και συσχετίζει την ετικέτα με τον πίνακα με τις ετικέτες εξόδου για αποστολή (Next Hop Label Forwarding NHLFE) και από τις πληροφορίες αυτού του πίνακα ο LSR κόμβος καθορίζει ποιος θα είναι ο επόμενος κόμβος

στον οποίο θα δρομολογηθεί το πακέτο και τροποποιεί κατάλληλα τον σωρό των ετικετών. Τέλος κωδικοποιεί το νέο σωρό ετικετών στο πακέτο και διαβιβάζει το αποτέλεσμα.

Πιο αναλυτικά όταν το πακέτο φτάσει στον κεντρικό κόμβο τότε το δεσμεύει ο MPLS ταξινομητής (MPLS classifier - στον κόμβο εισόδου) και το αναθέτει σε κάποια κλάση, το προωθεί και το αποστέλλει είτε στον τοπικό αντιπρόσωπο είτε σε κάποιον άλλο MPLS κόμβο. Ο κόμβος εισόδου αν δεν έχει κάποια ετικέτα για αυτό το πακέτο (αν είναι η πρώτη εμφάνιση τέτοιου τύπου πακέτου) τότε αναζητεί για την πιο μεγάλη ταύτιση (longest prefix match), βρίσκει τον επόμενο δρομολογητή και αρχικοποιεί μια ετικέτα αίτησης προς αυτό. Την ετικέτα αυτή θα την προωθήσει μέχρι τον κόμβο εξόδου. Κάθε ενδιάμεσος δρομολογητής θα λάβει την ετικέτα από τον προς τα κάτω κόμβο του (downstream LSR) και θα προσθέσουν μια νέα είσοδο στο πίνακα πληροφοριών βασισμένο στην αποστολή ετικετών (Label Information Based Forwarding-LIB). Τότε θα επιλέξουν μια νέα ετικέτα και θα το στείλουν στον προς τα πάνω κόμβο τους (upstream LSR). Ο κόμβος εισόδου θα τοποθετήσει την ετικέτα και θα αποστείλει το πακέτο στον επόμενο LSR κόμβο. Κάθε ενδιάμεσος LSR θα εξετάσει την ετικέτα του ληφθέντα πακέτου την αντικαθιστά με την ετικέτα εξόδου και το αποστέλλει σύμφωνα με το LIB πίνακα του. Όταν τελικά φτάσει στο κόμβο εξόδου (egress LER) το πακέτο τότε η ετικέτα απομακρύνεται γιατί πλέον φεύγει από την περιοχή του MPLS.

2.6 Σωρός ΕτικετώνΣειρά από ετικέτες.

Η ετικέτα που θα τοποθετηθεί τελευταία θα είναι και η πρώτη που θα εξαχθεί. Με την σωρό ετικετών επιτρέπεται σε ένα πακέτο να έχει πληροφορίες για περισσότερες από μια ροές (FEC)

έτσι επιτρέπεται στο πακέτο να διαπεράσει διαφορετικές περιοχές MPLS ή τμήματα LSP μέσα σε μια περιοχή. Η επεξεργασία των ετικετών είναι πάντα βασισμένη στην πρώτη ετικέτα. Το πεδίο S της ετικέτας δείχνει το τελευταίο στρώμα της σωρού. Η σωρός ετικετών είναι η βασική ιδέα που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση των LSP (σήραγγες στην MPLS ιεραρχία).

2.7 Δρομολογητής Μεταγωγέας Ετικετών

Είναι δρομολογητής για τα πακέτα του επιπέδου δικτύου (Network Layer) και είναι επίσης μεταγωγέας για πλαίσια στο επίπεδο στοιχείου- σύνδεσης (Data-Link Layer). Δρομολογεί τα πακέτα από και προς την περιοχή του MPLS. Η είσοδος της ετικέτας στην σωρό ετικετών γίνεται από τον κόμβο εισόδου (ingress LSR) ο οποίος δρομολογεί το πακέτο στον επόμενο κόμβο. Στην συνέχεια στους δρομολογητές του πυρήνα η δρομολόγηση γίνεται εξετάζοντας μόνο την ετικέτα από το πακέτο που έχει παραλάβει. Με την χρήση του πίνακα με τις εισερχόμενες ετικέτες (Incoming Label Map ILM) πίνακα με τις ετικέτες εξόδου για αποστολή (Next Hop Label Forwarding NHLFE) γίνεται η εναλλαγή της ετικέτας και η δρομολόγηση του πακέτου βάση την κατάλληλη σύνδεση. Η ετικέτα αντικαθίσταται με την εισερχόμενη ετικέτα που είναι παρούσα στον πίνακα πληροφοριών βασισμένο στην αποστολή ετικετών (Label Information Forwarding) και δρομολογεί το πακέτο μέσω της κατάλληλης σύνδεσης. Πριν το πακέτο φύγει από την MPLS περιοχή και να παραδοθεί το MPLS header (ετικέτα) απομακρύνεται από τον κόμβο εξόδου (egress LSR- δρομολογητής στην έξοδο της MPLS περιοχής) και πλέον η δρομολόγηση του πακέτου γίνεται σύμφωνα με το πρωτόκολλο IP.

2.8 Μονοπάτι Εναλλαγής Ετικετών

Είναι το μονοπάτι που δημιουργείται ανάμεσα στον κόμβο εισόδου και κόμβο εξόδου από τους MPLS δρομολογητές. Στο μονοπάτι αυτό μεταφέρονται τα πακέτα IP στο δίκτυο που είναι καθορισμένο από την ετικέτα. Οι ετικέτες μπορεί να βρίσκονται στην σωρό ετικετών δίνοντας μας έτσι την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε σήραγγες και τα διάφορα τμήματα των μονοπατιών εναλλαγής ετικετών (LSP) . Η εγκατάσταση αυτών των μονοπατιών είναι η βάση στην οποία στηρίζεται η διαδικασία της εναλλαγής των ετικετών. Με την εναλλαγή των ετικετών σε κάθε δρομολογητή στην MPLS περιοχή στο μονοπάτι εναλλαγής ετικετών καθορίζεται το μονοπάτι που θα ακολουθήσει η ροή. Για την εγκατάσταση των μονοπατιών θα πρέπει σε κάθε δρομολογητή να συσχετίζεται η ετικέτα εισόδου και η σύνδεση εισόδου με την αντίστοιχη ετικέτα εξόδου και σύνδεση εξόδου και αυτή η συσχέτιση φυλάσσεται στον πίνακα των πληροφοριών βασισμένο στην αποστολή ετικετών (Label Information Forwarding – LIB) αποθηκεύεται η συσχέτιση του της ετικέτας εισόδου.

2.9 MPLS Πρωτόκολλα Σηματοδότησης

Τα πρωτόκολλα είναι υπεύθυνα για την ανταλλαγή σχετικών πληροφοριών ανάμεσα στους δρομολογητές. Η ετικέτα θα πρέπει να διαδοθεί σε όλους τους δρομολογητές της MPLS περιοχής που θα πρέπει να δρομολογήσουν δεδομένα σε κάποια συγκεκριμένη ροή. Ανάλογα με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται καθορίζεται και ο τρόπος ανταλλαγής των πληροφοριών. Το MPLS υποστηρίζει τρία βασικά πρωτόκολλα σηματοδότησης:

- (α) Πρωτόκολλο διανομής ετικετών (LDP)
- (β) Πρωτόκολλο διανομής ετικετών με περιορισμούς στην δρομολόγηση (CR -LDP)
- (γ) Πρωτόκολλο κατακράτησης πόρων με επεκτάσεις εφαρμοσμένης μηχανικής για την κυκλοφορία (RSVP-TE)

Πρωτόκολλο Διανομής Ετικετών

Με το πρωτόκολλο διανομής ετικετών διαδίδονται μηνύματα που κάποιο LSR κόμβος ενημερώνει κάποιο άλλο για τις συνδέσεις ετικετών που έχει κάνει. Επιπλέον είναι το μέσο για κάθε LSR κόμβο για να εγκαταστήσει τα μονοπάτια μέσα στο δίκτυο. Με την ανταλλαγή αυτή των πληροφοριών ανάμεσα σε δυο κόμβων τότε αυτοί καθίστανται συνεργάτες LDP (peer) και μεταξύ τους έχει εγκατασταθεί μια επικοινωνία. Κάθε LSP που δημιουργείται συνδέεται με ένα FEC το οποίο διευκρινίζει ποια πακέτα συσχετίζονται με εκείνο το μονοπάτι εναλλαγής ετικετών. Τα είδη των μηνυμάτων των μονοπατιών εναλλαγής ετικετών που ανταλλάσσονται ανάμεσα στους δυο δρομολογητές είναι : (1) τα μηνύματα ανακάλυψης (Discovery messages) (2) Μηνύματα σύνδεσης (Session messages) (3) Μηνύματα ανακοίνωσης (Advertisement messages) (4) Μηνύματα ενημέρωσης (Notification messages).

Δίνουμε επιπρόσθετες πληροφορίες για κάθε είδος μηνύματος:

Μηνύματα ανακάλυψης: Με τα μηνύματα ανακάλυψης ένας LSR κόμβος γνωστοποιεί την παρουσία του στο δίκτυο (μηνύματα χαιρετισμού). Όταν κάποιος LSR κόμβος επιλέξει να εγκαταστήσει επικοινωνία με κάποιον άλλο, μαθαίνει από τα μηνύματα χαιρετισμού ότι χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο διανομής ετικετών (LDP). Όταν αυτή η διαδικασία ολοκληρωθεί οι δύο κόμβοι γίνονται συνεργάτες (LDP peers) και μπορούν να ανταλλάξουν μηνύματα επικοινωνίας. Τα μηνύματα χαιρετισμού χαρακτηρίζονται από τον χρόνο που θα τα διατηρήσει ο αποστολέας μέχρι να πιάσει το επόμενο μήνυμα χαιρετισμού.

Μηνύματα σύνδεσης : Με τα μηνύματα σύνδεσης εγκαθίσταται, διατηρείται και τερματίζεται επικοινωνία μεταξύ δύο συνεργατών LDP. Με την παραλαβή των μηνυμάτων ένας LDP ελέγχει την επικοινωνία. Κάθε δρομολογητής (LSR) για κάθε συνεργάτη του κρατά ένα μετρητή διατήρησης ζωής με την λήψη νέου LDP μηνύματος από τον συνεργάτη του ο μετρητής μηδενίζεται. Αν όμως λήξει τότε η σύνδεση είναι προβληματική και η επικοινωνία τερματίζεται. Με την εγκατάσταση κάθε επικοινωνίας ο κάθε LSR κόμβος είναι υπεύθυνος να ενημερώσει τον συνεργάτη του με ένα LDP μήνυμα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα για να εξασφαλίζεται ο μηδενισμός του μετρητή και η διατήρηση της σύνδεσης. Τα μηνύματα διατήρησης ζωής θα πρέπει να στέλλονται όταν ο LSR κόμβος δεν έχει τίποτα να στείλει.

Μηνύματα ανακοίνωσης : Τα μηνύματα ανακοίνωσης χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθούν, να αλλάξουν και να διαγραφούν ετικέτες οι οποίες είναι συσχετισμένες με συγκεκριμένες ροές (FECs).

Μηνύματα ενημέρωσης : Με τα σφάλματα αυτά φαίνονται τα σφάλματα και άλλες σημαντικές πληροφορίες. Χρησιμοποιούνται για να ενημερώνεται ο ένας LDP συνεργάτης για τα λάθη του άλλου. Χωρίζονται στα μηνύματα λάθους (error notifications) και στα συμβουλευτικά μηνύματα. (Advisory notifications). Τα μηνύματα λάθους αν τα λάβει κάποιος LSR κόμβος από κάποιο συνεργάτη του τότε θα τερματίσει την LDP συνεργασία κλείνοντας την TCP σύνδεση και θα διαγράψει όλες τις ετικέτες που αντιστοιχούν στις ροές (FECs) που χρησιμοποιούσαν το μονοπάτι εναλλαγής ετικετών που πλέον δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Τα συμβουλευτικά μηνύματα δίνουν πληροφορίες στον LSR κόμβο για την LDP σύνδεση ή για την κατάσταση από κάποιο προηγούμενο μήνυμα που λαμβάνεται από κάποιον συνεργάτη LSR κόμβο.

Πρωτόκολλο διανομής ετικετών με περιορισμούς στην δρομολόγηση

Το πρωτόκολλο διανομής ετικετών με περιορισμούς στην δρομολόγηση (Constraint Routed Label Distribution Protocol- CR-LDP) σημειώνει τους πόρους που απαιτούνται από το μονοπάτι σε κάθε βήμα της διαδρομής. Αν η διαδρομή με τους επαρκής πόρους δεν μπορεί να βρεθεί το υπάρχων μονοπάτι αλλάζει ροή για να επαναδεσμεύσει πόρους στο νέο μονοπάτι. Πιο συγκεκριμένα ροές με χαμηλή προτεραιότητα και λίγες απαιτήσεις θα μεταφερθούν σε νέα μονοπάτια ελευθερώνοντας τους πόρους που χρησιμοποιούσαν στο ήδη υφιστάμενο μονοπάτι.

Έτσι η ροή με τις πολλές απαιτήσεις θα χρησιμοποιήσει το μονοπάτι που μόλις έχει αφεθεί ελεύθερο. Αυτή είναι η διαδικασία προτίμησης μονοπατιού (path preemption). Για την ταξινόμηση των υπαρχόντων μονοπατιών χρησιμοποιούνται προτεραιότητες (holding priority) και του νέου με (setup priority) για να καθορίσουν αν το νέο μονοπάτι μπορεί να καταλάβει το υπάρχον μονοπάτι. Αυτές οι προτεραιότητες έχουν κλίμακα από 0 μέχρι 7. Το μηδέν (0) ανατίθεται στο πιο σημαντικό μονοπάτι. Αναφέρεται ως η ψηλότερη προτεραιότητα. Το επτά (7) είναι η προτεραιότητα για το λιγότερα σημαντικό μονοπάτι.

Ένα μονοπάτι εναλλαγής ετικετών μπορεί να εγκατασταθεί βασιζόμενο σε περιορισμούς ρητών δρομολογήσεων. Το μονοπάτι εναλλαγής ετικετών με περιορισμούς (CR-LSP) είναι μονοπάτι στο MPLS δίκτυο και υπολογίζεται με βάση τα κριτήρια και τις πληροφορίες δρομολόγησης. Με την χρήση CR-LSP εξασφαλίζεται κάποιο σταθερό εύρος ζώνης στο μονοπάτι εναλλαγής ετικετών. Τα μηνύματα που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο διανομής ετικετών με περιορισμούς στην δρομολόγηση είναι τα ίδια με το πρωτόκολλο διανομής ετικετών αλλά σε αυτά προσθέτονται συγκεκριμένες επιπρόσθετες πληροφορίες.

Πρωτόκολλο κατακράτησης πόρων με επεκτάσεις εφαρμοσμένης μηχανικής για την κυκλοφορία

Το Πρωτόκολλο κατακράτησης πόρων με επεκτάσεις εφαρμοσμένης μηχανικής για την κυκλοφορία (Resource Reservation Protocol with traffic engineering extensions- RSVP-TE) [3] υποστηρίζει την ρητή δρομολόγηση με ή χωρίς δέσμευση πόρων, Υποστηρίζει την δρομολόγηση την δρομολόγηση, την προτίμηση μονοπατιών και την εύρεση βρόγχων. Επίσης καθορίζει μια επικοινωνία με ένα συγκεκριμένο προορισμό και ένα συγκεκριμένο επίπεδο μεταφοράς (transport layer protocol). Ο κόμβος εισόδου χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους για να καθορίσει ποια πακέτα αντιστοιχούν στη σωστή ετικέτα. Όταν η ετικέτα ανατεθεί σε ένα σύνολο από πακέτα τότε η ετικέτα καθορίζει αποτελεσματικά τη ροή μέσω του μονοπατιού εναλλαγής ετικετών. Έτσι το LSP αντιστοιχεί σε μια σήραγγα μονοπατιού εναλλαγής ετικετών επειδή η ροή μεταφέρεται διαμέσου των ενδιάμεσων κόμβων του LSP.

Κεφάλαιο 3

Αποκατάσταση δικτύου MPLS

Αν στο δίκτυο MPLS εμφανιστεί κάποιο σφάλμα τότε το δίκτυο αποκαθίσταται με την μεταφορά της κυκλοφορίας από το αποτυχημένο μέρος του δικτύου σε ένα άλλο μονοπάτι του δικτύου. Η λειτουργία αυτή θα πρέπει να εκτελείται όσο το δυνατόν γρηγορότερα για να μην υπάρχει μεγάλη απώλεια πακέτων από το σημείο στο οποίο συνέβηκε το σφάλμα.

3.1 Ορολογίες

Παραθέτουμε έννοιες οι οποίες θα κληθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Κόριο Μονοπάτι (working path) : Το μονοπάτι που μεταφέρει την ροή πριν την εμφάνιση του σφάλματος.

Εναλλακτικό Μονοπάτι (Alternative path) : Το μονοπάτι στο οποίο μεταφέρεται η επηρεαζόμενη ροή μετά το σφάλμα με την βοήθεια των μηχανισμών αποκατάστασης του δικτύου MPLS.

LSR υπεύθυνος για την συγχώνευση μονοπατιών (Path Merge LSR- PSL): συγχωνεύει την ροή των πακέτων από το εναλλακτικό μονοπάτι πίσω στο υφιστάμενο μονοπάτι.

Σήραγγα παράκαμψης (Bypass Tunnel) : λειτουργεί σαν εναλλακτικό μονοπάτι για ένα τμήμα του κυρίως μονοπατιού ή για ένα σύνολο από υφιστάμενα μονοπάτια που χρησιμοποιούν την σωρό ετικετών.

Σήμα ένδειξης σφαλμάτων (Fault Indications Signal FIS) : είναι το σήμα που δείχνει ότι έχει εμφανιστεί ένα ελάττωμα κατά μήκος της πορείας [54]. Διαβιβάζεται περιοδικά από τον κόμβο/ους που είναι πιο κοντά στο σημείο αποτυχίας, για ορισμένο χρονικό διάστημα ή μέχρι ο κόμβος να παραλάβει μήνυμα επιβεβαίωσης από το γείτονα του.

LSR υπεύθυνος για την εναλλαγή της πορείας (Path Switch LSR-PML): είναι ένας προς τα πάνω LSR σε σχέση με το σημείο που εντοπίστηκε το σφάλμα και είναι αρμόδιος για την εναλλαγή της κυκλοφορίας στο εναλλακτικό μονοπάτι.

Σήμα αποκατάστασης ελαττωμάτων (Fault Recovery Signal - FRS): Είναι ένα μήνυμα που δείχνει ότι ένα ελάττωμα κατά μήκος ενός μονοπατιού έχει επισκευαστεί[12]. Διαβιβάζεται περιοδικά από τον κόμβο/ους που είναι πιο κοντά στο σημείο αποτυχίας, για ορισμένο χρονικό διάστημα ή μέχρι ο κόμβος να παραλάβει μήνυμα επιβεβαίωσης από το γείτονα του.

3.2 Ανίχνευση Σφαλμάτων

Τα είδη των σφαλμάτων που υπάρχουν είναι (1) σφάλμα στο μονοπάτι (2) μονοπάτι που μειώνει τις υπηρεσίες του (3) σφάλμα σε σύνδεση του δικτύου και (4) σύνδεση που μειώνει τις υπηρεσίες της.

Σφάλμα στο μονοπάτι:

Η συνδεσιμότητα της πορείας χάνεται. Με την ανίχνευση του σφάλματος καλούνται οι μηχανισμοί αποκατάστασης MPLS να επαναδρομολογήσουν την επηρεαζόμενη ροή. Η ανίχνευση των σφαλμάτων γίνεται με συνεχείς ελέγχους μεταξύ των συνεργατών LSR και χρησιμοποιώντας μηχανισμούς όπως την εξέταση συνδέσεων μεταξύ των γειτονικών δρομολογητών.

Μονοπάτι που μειώνει τις υπηρεσίες του:

Με το σφάλμα αυτό γνωστοποιείται στους μηχανισμούς αποκατάστασης MPLS ότι η ποιότητα της σύνδεσης είναι μη αναμενόμενη. Το σφάλμα αυτό εντοπίζεται με μηχανισμούς ελέγχου απόδοσης των μονοπατιών ή με μηχανισμούς που καθορίζουν το ποσοστό προβλήματος στο μονοπάτι. Το FIS μήνυμα μπορεί να στείλει πληροφορίες για την μείωση της υπηρεσίας.

Σφάλμα στη σύνδεση:

Ένδειξη από χαμηλότερο στρώμα (lower layer) ότι η σύνδεση στην οποία τα δεδομένα μεταφέρονται υπάρχει σφάλμα. Αν το χαμηλότερο στρώμα υποστηρίζει την ανίχνευση και την αναφορά του σφάλματος, τότε αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το μηχανισμό αποκατάστασης MPLS.

Σύνδεση που μειώνει τις υπηρεσίες τις:

Ένδειξη από χαμηλότερο στρώμα (lower layer) ότι η σύνδεση στην οποία η ροή μεταφέρεται λειτουργεί κάτω από ένα αποδεκτό επίπεδο. Αν το χαμηλότερο στρώμα υποστηρίζει την ανίχνευση και την αναφορά του σφάλματος, τότε αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το μηχανισμό αποκατάστασης MPLS.

3.3 Ενημέρωση Σφάλματος

Για την αποκατάσταση του δικτύου MPLS πρέπει να γίνεται σύντομη και αξιόπιστη ανακοίνωση των σφαλμάτων και της σοβαρότητας τους. Αν ο κόμβος δεν μπορεί να αντιδράσει άμεσα, πρέπει να στείλει μηνύματα FIS έτσι ώστε να ανακοινώσει προς τα πάνω το σφάλμα που εντόπισε. Το μήνυμα αυτό μεταβιβάζεται με την ψηλότερη προτεραιότητα και έτσι θα φτάσει έγκαιρα στον LSR που είναι υπεύθυνος για την αποκατάσταση της επηρεαζόμενης ροής.

3.4 Μηχανισμοί αποκατάστασης δικτύου MPLS.

Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί αποκατάστασης δικτύου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν γίνεται ο εντοπισμός και η ενημέρωση των προς τα πάνω κόμβων για την ύπαρξη του σφάλματος. Πρώτη είναι η επαναδρομολόγηση (Rerouting) [19] όπου το εναλλακτικό μονοπάτι υπολογίζεται δυναμικά και εγκαθίσταται μετά τον εντοπισμό του σφάλματος. Δεύτερη είναι η εναλλαγή σε προστατευόμενο μονοπάτι (Protection Switching) [19] όπου το εναλλακτικό μονοπάτι είναι ήδη προϋπολογισμένο και εγκατεστημένο πριν να γίνει σφάλμα και η εναλλαγή της ροής γίνεται αμέσως μόλις ανιχνευτεί το σφάλμα

3.4.1 Επαναδρομολόγηση

Το εναλλακτικό μονοπάτι υπολογίζεται και εγκαθίσταται μετά από εντοπισμό του σφάλματος. Τα νέα μονοπάτια ή τμήματα των μονοπατιών εγκαθίστανται χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα σηματοδότησης. Το κύριο και εναλλακτικό μονοπάτι είναι ξεχωριστά και υπολογίζονται σύμφωνα με τις πολιτικές δρομολόγησης του δικτύου, την τοπολογία του δικτύου και τις πληροφορίες του σφάλματος. Με την εμφάνιση του σφάλματος η διαδικασία αποκατάστασης ενεργοποιείται. Έτσι έχουμε την εξής πορεία: ανίχνευση σφάλματος, ενημέρωση γειτονικών δρομολογητών για το σφάλμα, υπολογισμός και εγκατάσταση νέου μονοπατιού και εναλλαγή της επηρεαζόμενης ροής στο νέο μονοπάτι.

Η μέθοδος της επαναδρομολόγησης παρουσιάζει μερικά πλεονεκτήματα. Αρχικά γίνεται χρήση των πληροφοριών του δικτύου την στιγμή του σφάλματος και έτσι χρησιμοποιούνται πληροφορίες που ισχύουν. Με την επαναδρομολόγηση γίνεται αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου. Η μέθοδος της επαναδρομολόγησης παρουσιάζει όμως και μειονεκτήματα. Τα

μειονεκτήματα αυτά είναι ότι χρειάζεται χρόνος για να υπολογιστεί το εναλλακτικό μονοπάτι και να εγκατασταθεί μετά τον εντοπισμό του σφάλματος και παρουσιάζεται απώλεια πακέτων.

3.4.2 Εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι

Το εναλλακτικό μονοπάτι είναι ήδη υπολογισμένο και εγκατεστημένο προτού υπάρξει σφάλμα. Με την εγκατάσταση του εναλλακτικού μονοπατιού κάποιοι πόροι σε αυτό δεσμεύονται για την περίπτωση που η ροή μεταφερθεί σε αυτό.

Η μέθοδος της εναλλαγής σε προστατευμένο μονοπάτι παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα. Επιτρέπει την γρήγορη εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι λόγω του ότι το εναλλακτικό μονοπάτι είναι ήδη εγκατεστημένο. Τέλος η απώλεια των πακέτων ισούται με τον αριθμό των πακέτων στην σύνδεση όταν παρουσιάζεται το σφάλμα.

Η μέθοδος της εναλλαγής σε προστατευμένο μονοπάτι παρουσιάζει όμως και κάποια μειονεκτήματα. Αρχικά απαιτούνται επιπρόσθετοι πόροι για την εγκατάσταση του εναλλακτικού μονοπατιού πριν την εμφάνιση του σφάλματος και μένουν αχρησιμοποίητοι μέχρι να υπάρξει κάποιο σφάλμα. Και επιπλέον χρησιμοποιούνται πληροφορίες που ίσως να μην ισχύουν την χρονική στιγμή που παρουσιάζεται το σφάλμα και άρα μπορεί να μην είναι το βέλτιστο μονοπάτι την χρονική στιγμή που συμβαίνει το σφάλμα.

3.5 Πορεία αποκατάστασης (Νέο εναλλακτικό μονοπάτι)

Η αποκατάσταση ενός δικτύου μετά από σφάλμα σε κύριο ή εναλλακτικό μονοπάτι μπορεί να γίνει είτε με καθολική αποκατάσταση του δικτύου ή τοπική μεταφέροντας τη ροή δεδομένων του δικτύου γύρω από το σφάλμα.

3.5.1 Καθολική αποκατάσταση του δικτύου MPLS

Το νέο μονοπάτι στο οποίο μεταφέρεται η ροή είναι τελείως ξεχωριστό. Το εναλλακτικό μονοπάτι που υπολογίζεται ξεκινά από τον κόμβο εισόδου μέχρι τον κόμβο εξόδου είτε αυτό υπολογίζεται δυναμικά ή είναι ήδη εγκατεστημένο. Αν χρησιμοποιηθεί η επαναδρομολόγηση θα πρέπει τα μηνύματα FIS να μεταφερθούν μέχρι τον κόμβο εισόδου για να μπορέσει να αρχίσει η εύρεση και εγκατάσταση του νέου μονοπατιού έτσι χάνεται αρκετός χρόνος.

3.5.2 Τοπική αποκατάσταση δικτύου MPLS

Στην τοπική αποκατάσταση δικτύου ο προς τα πάνω κόμβος δημιουργεί μια πορεία αποκατάστασης γύρω από το σφάλμα και η σωρός των ετικετών χρησιμοποιείται στην άμεση δρομολόγηση της ροής στην πορεία αποκατάστασης. Μόλις η κυκλοφορία παρακάμψει το σφάλμα η ετικέτα στην κορυφή της σωρού αφαιρείται και η κυκλοφορία συνεχίζει να δρομολογείται στο εναλλακτικό μονοπάτι. Οι κόμβοι εισόδου και εξόδου δεν γνωρίζουν για την ύπαρξη του σφάλματος και άρα δεν συμμετέχουν στην διόρθωση του. Με την τοπική αποκατάσταση η απώλεια πακέτων μειώνεται σημαντικά. Το εναλλακτικό μονοπάτι υπολογίζεται δυναμικά (επαναδρομολόγηση) ή είναι ήδη εγκατεστημένο (εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι).

Κεφάλαιο 4

Μηχανική Κυκλοφορίας

4.1. Ορισμός Μηχανικής Κυκλοφορίας

Όταν ερχόμαστε αντιμέτωποι με την εξάπλωση και την αύξηση του μεγέθους των δικτύων υπάρχουν δύο τεχνολογίες. Η τεχνολογία του δικτύου και η τεχνολογία της κυκλοφορίας. Η μηχανική της κυκλοφορίας (traffic engineering) [10][11][26] [16] [18] [55] διαχειρίζεται την κίνησης (ροών) ώστε να προσαρμοστεί στο δίκτυο μας, δηλαδή να διανεμηθεί στις συνδέσεις ανάλογα με τα δεδομένα του δικτύου χωρίς να προκαλεί συμφόρηση στο δίκτυο. Μερικές φορές ο ρυθμός αύξησης της συμφόρησης στο δίκτυο είναι μη προβλέψιμος. Αυτός ο γρήγορος ρυθμός αύξησης της συμφόρησης στο δίκτυο, οδηγούν σε μεγάλη ζήτηση εύρους ζώνης σε κάποια περιοχή. Η μηχανική κυκλοφορίας είναι η τεχνική του να μετακινεί την κίνηση του δικτύου γύρω από την περιοχή που υπάρχει συμφόρηση, μεταφέροντας την κυκλοφορία του συνδέσμου στον οποίο υπάρχει συμφόρηση σε συνδέσμους που έχουν διαθέσιμο χώρο. Ως εκ τούτου η μηχανική κυκλοφορίας είναι διαδικασία που ελέγχει τον τρόπο με τον οποίο η ροή της κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο μπορεί να βελτιστοποιήσει την χρήση των πόρων και την απόδοση του δικτύου. Σκοπός της είναι να επιτευχθούν συγκεκριμένοι στόχοι απόδοσης στηριζόμενη στις επιστημονικές αρχές της μέτρησης, του χαρακτηρισμού, του ελέγχου της κυκλοφορίας του διαδικτύου, με την εφαρμογή γνώσεων και τεχνικών. Καθοδηγεί τη ροή στο πυρήνα δικτύου ώστε να υπάρχει αποδοτική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης ανάμεσα σε ζευγάρια δρομολογητών.

4.2 Χαρακτηριστικά της μηχανικής κυκλοφορίας

Χαρακτηριστικά της μηχανικής κυκλοφορίας είναι ότι ανακατευθύνει την ροή ώστε να αποφύγει την συμφόρηση και να αυξήσει την αποδοτικότητα της Χρήσης των πόρων του δικτύου, δίνει προνόμιο στους παροχείς υπηρεσιών διαδικτύου, για καλύτερο έλεγχο και διαχείριση της ροής, διανέμοντας QoS στον τελικό χρήστη και εφαρμόζει το Αλγόριθμο Κοντινότερου Μονοπατιού με Περιορισμούς (Constraint Based Shortest Path First) για τις ροές.

4.3 Στόχοι απόδοσης μηχανική κυκλοφορίας

Οι στόχοι απόδοσης που συνδέονται με την μηχανική κυκλοφορίας μπορεί να είναι προσανατολισμένοι προς δύο κατευθύνσεις.

- 1) Προς την κυκλοφορία (Traffic Oriented).
- 2) Προς τους πόρους (Resource Oriented).

Οι στόχοι που είναι προσανατολισμένοι προς την κυκλοφορία (Traffic Oriented) έχουν στόχο την ενίσχυση της ποιότητας υπηρεσιών του ρεύματος της κυκλοφορίας, την ελαχιστοποίηση της απώλειας των πακέτων, την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και μεγιστοποίηση των δεδομένων που μεταφέρονται στο σύνδεσμο ανά δευτερόλεπτο.

Οι στόχοι που είναι προσανατολισμένοι προς τους πόρους στοχεύουν στην βελτιστοποίηση της Χρήσης των πόρων ώστε να χρησιμοποιούνται οικονομικά και αξιόπιστα, και τα υποσύνολα των πόρων του δικτύου να χρησιμοποιούνται ισάξια.

4.4 Περιβάλλον της μηχανικής κυκλοφορίας

Το περιβάλλον της μηχανική κυκλοφορίας έχει τα εξής επιμέρους περιβάλλοντα:

- 1) Περιβάλλον δικτύου (Network context): το περιβάλλον δικτύου περιλαμβάνει χαρακτηριστικά του δικτύου, πολιτικές του δικτύου, δομή του δικτύου, περιορισμούς του δικτύου, ποιοτικές ιδιότητες του δικτύου και κριτήρια βελτιστοποίησης του δικτύου.
- 2) Περιβάλλον προβλήματος (Problem context): Το περιβάλλον προβλήματος προσδιορίζει την αφαίρεση την αντιπροσώπευση, διατύπωση και προδιαγραφή για τα επιθυμητά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των αποδεκτών λύσεων.
- 3) Περιβάλλον λύσης (solution context): Το περιβάλλον λύσης περιλαμβάνει την ανάλυση, την αξιολόγηση, τις εναλλακτικές λύσεις, εντολές και αποφάσεις.
- 4) Λειτουργικό και υλοποιημένο περιβάλλον (implementation & operational context): Το Λειτουργικό και υλοποιημένο περιβάλλον είναι υπεύθυνο για τον προγραμματισμό, οργάνωση και εκτέλεση.

4.5 Μοντέλο Διεργασίας Μηχανικής κυκλοφορίας

Το Μοντέλο Διεργασιών μηχανικής κυκλοφορίας [28] είναι μια ακολουθία από ενέργειες οι οποίες πρέπει να εκτελεστούν για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός λειτουργικού δικτύου. Μπορεί να θεσπιστεί ρητά ή σιωπηρά από ένα αυτόνομο σύστημα ή /και από έναν άνθρωπο. Αποτελείται από τέσσερις φάσεις

- 1) Φάση διατύπωσης της πολιτικής (Policy Formulation Phase)
- 2) Φάση απόκτησης στοιχείων(Data Acquisition Phase)
- 3) Φάση ανάλυσης και χαρακτηρισμού (Analysis and Characterization)
- 4) Φάση απόδοσης της βελτιστοποίησης (Performance Optimization Phase)

Στην αρχική φάση της πολιτικής διαμορφώνεται η κατάλληλη πολιτική ελέγχου. Η απόφαση αυτή στηρίζεται στο περιβάλλον του δικτύου, το επιχειρηματικό πρότυπο, το κόστος δομής από τις επικρατούσες πολιτικές και από τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Οι πολιτικές που διατυπώνονται σε αυτή την φάση παρέχουν τις κατευθυντήριες αρχές της διαχείρισης, του ελέγχου και της λειτουργίας του δικτύου. Η δεύτερη φάση της απόκτησης στοιχείων είναι ένας μηχανισμός για την απόκτηση εμπειρικών στατιστικών οι οποίες συλλέγονται από τα λειτουργικά δίκτυα μέσω ενός συστήματος μέτρησης. Στη φάση της ανάλυσης και χαρακτηρισμού γίνεται ανάλυση της κατάστασης (δυναμική / αντιδραστική) του δικτύου και χαρακτηρισμός του φόρτου εργασίας της κυκλοφορίας. Στην δυναμική ανάλυση αναγνωρίζει πιθανά προβλήματα, ενώ η αντιδραστική αναγνωρίζει τα υπάρχοντα. Στόχοι της φάσης της απόκτησης στοιχείων είναι να γίνει κατανοητό το βασικό πρόβλημα που εμφανίζεται μέσα στο δίκτυο και να καθοριστεί η απόδοση του δικτύου κάτω από τα διάφορα σενάρια που χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους μέτρησης της απόδοσης. Στη φάση της απόδοσης του δικτύου υπάρχει η διαδικασία της απόφασης, όπου επιλέγει και υλοποιεί ένα σύνολο από ενέργειες από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων για να ενισχυθεί η απόδοση του δικτύου. Οι ενέργειες αυτές περιλαμβάνουν την χρήση κατάλληλων τεχνικών για να ελέγχεται το είδος του φορτίου της προσφερόμενης κυκλοφορίας ή για να ελέγχεται η κατανομή της κυκλοφορίας μέσω του δικτύου.

4.6 Βασικά συστατικά της μηχανικής κυκλοφορίας

Τα βασικά συστατικά του μοντέλου διεργασιών της εφαρμοσμένης μηχανικής κυκλοφορίας είναι η μέτρηση, η μοντελοποίηση, η ανάλυση και η προσομοίωση. Το συστατικό της μέτρησης καθορίζει την κατάσταση λειτουργίας και την βελτιστοποίηση ενός δικτύου. Η μέτρηση χρησιμοποιείται για να μας παρέχει τα ακατέργαστα στοιχεία σχετικά με τις δηλωμένες παραμέτρους και τις μεταβλητές των ελεγχόμενων στοιχείων του δικτύου. Η αξιολόγηση χρησιμοποιεί τα ακατέργαστα στοιχεία για να διεξάγει τα σχετικά συμπεράσματα σχετικά με το

ελεγχόμενο δίκτυο. Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει την κατασκευή αφηρημένης ή φυσικής αντιπροσώπευσης που απεικονίζει τα σχετικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας αλλά και της ιδιότητες των δικτύων. Τα μοντέλα εφαρμοσμένης μηχανικής κυκλοφορίας στο διαδίκτυο μπορεί να ταξινομηθούν με βάση τη δομή τους (structural) είτε βάση της συμπεριφοράς τους (behavioral). Τα δομικά μοντέλα επικεντρώνονται στην οργάνωση και τα συστατικά του δικτύου, ενώ τα συμπεριφορικά επικεντρώνονται στην δυναμική του δικτύου και στο φόρτο εργασίας της κυκλοφορίας. Ένας καλός προσομοιωτής δικτύων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μιμηθεί και να απεικονίσει τα χαρακτηριστικά του δικτύου κατά τις διάφορες συνθήκες. Η βελτιστοποίηση μπορεί να είναι διορθωτική ή τελειοποιητική. Η διορθωτική στοχεύει στην θεραπεία ενός προβλήματος στα αρχικά του στάδια, ενώ η τελειοποιητική στοχεύει στην βελτίωση της απόδοσης του δικτύου ακόμα και όταν τα ρητά προβλήματα δεν υπάρχουν και δεν αναμένονται. Υπάρχουν δύο ειδών επαναλήψεις βελτιστοποίησης της απόδοσης (α) υποδιεργασίες πραγματικού χρόνου (real time optimization sub-processes) (β) υποδιεργασίες μη πραγματικού χρόνου (non real time sub-processes). Στόχος της υποδιεργασίας πραγματικού χρόνου είναι να γίνει έλεγχος τη χαρτογράφησης και της κατανομής κυκλοφορίας πέρα από το υπάρχον δίκτυο για να ανακουφισθεί ή να αποφευχθεί η συμφόρηση, ώστε να υπάρχει ικανοποιητική παροχή υπηρεσιών και να βελτιστοποιηθεί η χρήση των πόρων.

4.7 Ταξινόμηση συστημάτων της εφαρμοσμένης μηχανική κυκλοφορίας

Τα συστήματα της μηχανικής κυκλοφορίας ταξινομούνται σύμφωνα με το στυλ τους. Υπάρχουν τα άμεσα συνδεδεμένα (online) και μη συνδεδεμένα (offline) συστήματα στα οποία υπολογίζονται τα σχέδια δρομολόγησης. Οι υπολογισμοί στα άμεσα συνδεδεμένα συστήματα γίνονται όταν τα σχέδια δρομολόγησης πρέπει να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου ενώ οι υπολογισμοί στα μη συνδεδεμένα συστήματα γίνονται όταν τα σχέδια δρομολόγησης να είναι εκτελεσμένα σε πραγματικό χρόνο. Υπάρχουν τα καθοδηγητικά

(prescriptive) και περιγραφικά (descriptive) συστήματα. Τα καθοδηγητικά συστήματα αξιολογούν τις εναλλακτικές λύσεις και συστήνουν ένα σχέδιο δράσης ενώ τα περιγραφικά χαρακτηρίζουν την κατάσταση του δικτύου και αξιολογούν τον αντίκτυπο των διαφόρων πολιτικών χωρίς την σύσταση οποιουδήποτε σχεδίου δράσης. Υπάρχουν τα συστήματα που στηρίζονται στο χρόνο (time-dependent) και τα συστήματα που στηρίζονται στις καταστάσεις (state-dependent). Στα τα συστήματα που στηρίζονται στο χρόνο χρησιμοποιούνται ιστορικές πληροφορίες βασισμένες στις περιοδικές παραλλαγές της κυκλοφορίας για να προγραμματιστούν εκ των προτέρων τα σχέδια δρομολόγησης και άλλοι μηχανισμοί ελέγχου. Στα συστήματα που στηρίζονται στις καταστάσεις τα σχέδια δρομολόγησης για τα πακέτα βασίζονται στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Υπάρχουν τα ανοικτού βρόγχου (open loop) και κλειστού βρόγχου (close loop) συστήματα. Στα ανοικτού βρόγχου συστήματα ο έλεγχος της δράσης δεν χρησιμοποιεί πληροφορίες από την παρούσα κατάσταση του δικτύου αλλά χρησιμοποιεί τοπικές πληροφορίες, ενώ στα κλειστού βρόγχου συστήματα ο έλεγχος χρησιμοποιεί πληροφορίες από παλιά για την κατάσταση του δικτύου. Υπάρχουν τα τακτικά (tactical) και στρατηγικά (strategic) συστήματα. Τα τακτικά στοχεύουν στην εξέταση συγκεκριμένων προβλημάτων απόδοσης, ενώ τα στρατηγικά προσεγγίζουν τα προβλήματα της απόδοσης στα δίκτυα με περισσότερη οργάνωση και λαμβάνονται υπόψη οι άμεσες και μελλοντικές συνέπειες των συγκεκριμένων πολιτικών και ενεργειών. Υπάρχουν τα τοπικά (local) όπου απαιτούν τοπικές πληροφορίες και τα καθολικά (global) που απαιτούν σφαιρικές πληροφορίες. Υπάρχουν τα κεντροποιημένα (centralized) όπου ο κεντρικός έλεγχος έχει μια κεντρική αρχή που καθορίζει τα σχέδια δρομολόγησης και τα κατανεμημένα (distributed) όπου ο κατανεμημένος έλεγχος καθορίζει την επιλογή των διαδρομών αυτόνομα από κάθε δρομολογητή βασισμένος στην άποψη των δρομολογητών όσον αφορά την κατάσταση του δικτύου.

4.8 Μηχανική κυκλοφορίας και MPLS

Η τεχνολογία MPLS πρόσφερε στη μηχανική κυκλοφορίας νέες δυνατότητες, εκτελεί μηχανική κυκλοφορίας σε ασύρματα και ενσύρματα δίκτυα. Με την εφαρμογή της MPLS τεχνολογίας, η μηχανική κυκλοφορίας ελέγχει την κυκλοφορία στο δίκτυο με Constraint Shortest Path First (CSPF). Η τεχνολογία CSPF δημιουργεί μια διαδρομή με περιορισμούς, που δεν είναι πάντα η κοντινότερη αλλά θα εκμεταλλευτεί διαδρομές που έχουν την λιγότερη συμφόρηση. Η διαδρομή που χρησιμοποιείται από το μονοπάτι εναλλαγής ετικετών (Label Switched Path - LSP) υπολογίζεται σύμφωνα με τη μηχανική κυκλοφορίας και τα διάφορα σήματα στόχο την διαθεσιμότητα των πόρων αλλά και την δυναμική κατάσταση του δικτύου.

Μερικές φορές οι ροές είναι τόσο μεγάλες και δεν μπορούν να προσαρμοστούν μέσω μιας απλής σύνδεσης έτσι δεν μπορεί να μεταφερθεί από μια απλή σήραγγα. Σε τέτοια περίπτωση σχηματίζονται πολλές LSP σήραγγες μεταξύ της εισόδου και εξόδου και η ροή θα διανεμηθεί μεταξύ τους. Υπάρχουν τρεις τύποι δρομολόγησης. Η πρώτη είναι η απλή δρομολόγηση (Simple Forwarding) στην οποία η MPLS αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί μια σταθερού μήκους ετικέτα και η δρομολόγηση κάθε πακέτου γίνεται με την MPLS ετικέτα του πακέτου. Δεύτερη είναι η δρομολόγηση σύμφωνα με την πηγή, που είναι ο μηχανισμός δρομολόγησης όπου κάτω από κάθε Label Switched Router (LSR) καθορίζεται ο κόμβος εισόδου (ingress LSR) με βάση την γνώση της διαθεσιμότητας των πόρων του δικτύου αλλά και τις απαιτήσεις των ροών. Η τεχνολογία MPLS ξεχωρίζει τις πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για την δρομολόγηση από τις πληροφορίες που μεταφέρονται από IP header. Επιπλέον ο καθορισμός των FEC και του LSP γίνεται στον ακρινό δρομολογητή (Label Edge Routers-LER). Έτσι η απόφαση για το πιο IP πακέτο θα πάρει ιδιαίτερη διαδρομή είναι εξολοκλήρου ευθύνη του LER ο οποίος υπολογίζει την διαδρομή (σύμφωνα με τον κόμβο πηγή). Τρίτη είναι η ιεραρχική προώθησης (Hierarchical Forwarding) η οποία επιτρέπει την ενθυλάκωση μιας LSP με μια άλλη.

Γίνεται χρήση του MPLS για μηχανική κυκλοφορία. Η μηχανική κυκλοφορίας μαζί με το MPLS είναι μια προσπάθεια ώστε να παίρνουμε το καλύτερο των τεχνικών της μηχανικής κυκλοφορίας. Υπάρχει η ανάγκη για να αυξήσουμε την αποδοτικότητα της χρήσης των πόρων, μειώνοντας την πιθανότητα να υπάρξει συμφόρηση στο δίκτυο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, υπάρχουν κάποιοι σύνδεσμοι που έχουν συμφόρηση, ενώ άλλοι δεν χρησιμοποιούνται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, οι αλγόριθμοι κοντινότερου μονοπατιού (Shortest –Path- First Algorithm), στέλνουν την ροή στη μικρότερη διαδρομή, παρόλο που στο μονοπάτι μπορεί να δημιουργηθεί συμφόρηση, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη τα άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου όπως το εύρος ζώνης. Το MPLS υποστηρίζει μηχανισμούς μηχανικής κυκλοφορίας [18] για να εδραιώσει ρητά μεταστρεφόμενα μονοπάτια. Η ακριβής δρομολόγηση επιτρέπει στη ροή να λαμβάνει το επίπεδο QoS που ζητά και άρα καλύτερη χρήση της υποδομής του δικτύου.

Οι στόχοι της μηχανικής κυκλοφορίας [55][5] είναι (1) Η βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός λειτουργικού δικτύου. Συγκεκριμένα τη εισαγωγή της ροής κυκλοφορίας στο υπάρχον φυσικό δίκτυο με τον πιο αποδοτικό τρόπο που να εκπληρώνει επιθυμητά λειτουργικά αποτελέσματα. (2) Η Δημιουργία ακριβής δρομολόγησης. Να μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιεί μονοπάτια πέραν από τα κοντινότερα μονοπάτια ώστε να επιτυγχάνει ένα πιο ισορροπημένο δίκτυο. Η ροή κατανέμεται στα διάφορα εναλλακτικά μονοπάτια και αποφεύγεται η συμφόρηση στο δίκτυο. Το MPLS με τη μηχανική κυκλοφορίας εδραιώνει και διατηρεί τα ακριβή μονοπάτια σε ένα IP δίκτυο για αποδοτική τοποθέτηση της ροής. (3) Η αποφυγή των πόρων που έχουν συμφόρηση. Οι μέθοδοι της μηχανικής κυκλοφορίας δρομολογούν τμήματα της ροής σε άλλες συνδέσεις. Με αυτό στοχεύουν στο να ελαχιστοποιήσουν την χρήση κάποιων συνδέσεων και άρα να μειωθεί η συμφόρηση σε τοπικά στοιχεία. (4) Η αποδοτική χρήση των πόρων του συστήματος. Ένας κόμβος συνδέεται με πολλές συνδέσεις. Οι μέθοδοι του MPLS TE κάνουν αποδοτική κατανομή του φορτίου της ροής σε αυτά. (5) Η επαναβελτιστοποίηση μετά από αποκατάσταση. Μετά από

κάποιο σφάλμα που θα παρουσιαστεί στο δίκτυο, υπολογίζεται ένα νέο σύνολο μονοπατιών για τα LSPs για την τοπολογία που έμεινε και έτσι βελτιώνεται η απόδοση μετά από κάποιο σφάλμα.

(6) Εξασφάλιση των πλεονεκτημάτων μιας αποδοτικής ροής για τις διάφορες υπηρεσίες, δηλαδή κάθε υπηρεσία θα λαμβάνει το απαραίτητο φορτίο. Εξασφαλίζει την ελάχιστη χρήση των πόρων και την διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου. Παρέχοντας έτσι QoS.

Αν προστεθούν όλα αυτά οι δύο βασικοί στόχοι της μηχανικής κυκλοφορίας είναι να τοποθετήσει τις ροές στις συνδέσεις αποδοτικά και να δημιουργήσει δίκτυα που να παρέχουν ποιότητα υπηρεσιών.

Στόχοι που μπορούν να συνδυαστούν με την παρουσία του MPLS είναι το 2) Δημιουργία ακριβούς μονοπατιού αφού μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση τεχνικών εγκατάστασης μονοπατιών με περιορισμούς όπως είναι το MPLS. Πιο συγκεκριμένα οι LSP σήραγγες που δημιουργούνται από το MPLS βοηθούν στην κατανομή της ροής στα εναλλακτικά μονοπάτια ώστε να αποφεύγετε η συμφόρηση στο δίκτυο. Οι LSP σήραγγες οδηγούν τμήματα της ροής σε μονοπάτια που δεν έχουν υπολογιστεί σαν το κοντινότερο μονοπάτι. Αυτό προσδίδει στο δίκτυο μια ελαστικότητα στο να ελέγχει τα μονοπάτια της ροής στα δίκτυα, και αυτό να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του δικτύου. Το (4) Αποδοτική χρήση των πόρων του συστήματος. Ένας κόμβος συνδέεται με πολλές συνδέσεις. Οι μέθοδοι του MPLS TE κάνουν αποδοτική κατανομή του φορτίου της ροής σε αυτά. Γίνεται χρήση των LSP παραμέτρων εύρους ζώνης για να ελέγχεται η αναλογία ζήτησης σε κάθε link, καθορίζοντας συγκεκριμένα μονοπάτια για τα LSP-tunnels και να τα διανέμει στα παράλληλα αυτά links, και δρομολογεί διαφορετικά LSPs σε διαφορετικά links. Το (5) Επαναβελτιστοποίηση μετά από αποκατάσταση, καθώς η διαδικασία που το επιτυγχάνει στηρίζεται στα LSPs. Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού LSP-tunnels επιτρέπει μεγαλύτερο έλεγχο στην κατανομή της ροής στο δίκτυο. Το (6) Εξασφάλιση των πλεονεκτημάτων μιας αποδοτικής ροής για τις διάφορες υπηρεσίες, μπορεί να συνδυαστεί με το

MPLS. Γίνεται η εξής διαδικασία: Ανάθεση των πόρων σε προκαθορισμένα LSPs για μεταφορά της ροής και δρομολόγηση των LSPs με περιορισμούς στην χωρητικότητα. Η προστασία των υπηρεσιών ελέγχει το QoS για κύριους τύπους υπηρεσιών περιορίζοντας την πρόσβαση στο εύρος ζώνης ή δίνοντας προτεραιότητες σε κάθε ροή. Με αυτό αποτρέπει τον υποσιτισμό ροών χαμηλής προτεραιότητας. Έτσι εξασφαλίζει την ελάχιστη χρήση των πόρων και την διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου.

Το MPLS βοηθά τη μηχανική κυκλοφορίας με τα ακριβή μονοπάτια που μπορεί να παρέχει. Επιπλέον διαθέτει μοντέλα επαναφοράς που του επιτρέπουν να ανιχνεύσει την ύπαρξη κάποιου σφάλματος στο δίκτυο και να επαναφέρει το δίκτυο μετά την ύπαρξη του (τοπικά ή καθολικά, δυναμικά ή στατικά).

Κεφάλαιο 5

Ανασκόπηση Προηγούμενης Ερευνητικής Εργασίας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε διάφορους αλγόριθμους που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία, τις τεχνικές που χρησιμοποιούν για να αποκαταστήσουν το δίκτυο από τυχόν σφάλματα, τις τεχνικές που εφαρμόζουν μηχανική κυκλοφορίας στο δίκτυο και τεχνικές που προσπαθούν να συνδυάσουν και τα δύο. Αρχικά περιγράφονται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν τεχνικές για να αποκαταστήσουν το δίκτυο από τυχόν σφάλματα, μετά ακολουθούν οι αλγόριθμοι όπου εφαρμόζουν μηχανική κυκλοφορίας στο δίκτυο και τέλος οι αλγόριθμοι όπου συνδυάζουν και τα δύο. Τέλος γίνεται η σύγκριση των αλγορίθμων κάθε ομάδας, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν καθοριστεί για κάθε ομάδα. Η διάκριση των αλγορίθμων έγινε ανάλογα με το τι σκοπό είχε τελικά κάθε αλγόριθμος και τι πρόσφερε στο δίκτυο με την εφαρμογή του.

Οι αλγόριθμοι ανάλογα με την λειτουργία τους μπορούν να χωριστούν στους αλγορίθμους (1) Δακτυλιδιού (2) Μονοπατιού (3) Δέντρου (4) Τμήματος. Στους αλγορίθμους δακτυλιδιού είναι όταν έχουμε επιστροφή στην αρχική διαδικασία. Στους αλγορίθμους Δέντρου χρησιμοποιείται η δομή δέντρου. Στους αλγορίθμους Τμήματος οι λειτουργίες γίνονται ανάμεσα στους γείτονες (Τοπική αποκατάσταση).

Στον πιο κάτω πίνακα φαίνεται η διάκριση των αλγορίθμων που έχουν μελετηθεί.

Δακτυλιδιού	Μονοπατιού	Δέντρου	Τμήματος
<ul style="list-style-type: none"> • Dual [29] • Reactive [51] • Crankback [15] • Fast Reroute[15] • Maximally Disjoint MultiPaths [14] 	<ul style="list-style-type: none"> • RRL [20] • Two Path [44] • Gonfa [35] • Makam [6] • MIRA[4][41] • SPM [39] • Shortest Distance Extension [40] • SSPA [43] • DORA [46] • T.C.J.K.T [52] • Network Protection Degree [19] • FTLB [47] • TJT [52] • Detours [15] 	<ul style="list-style-type: none"> • Δομή αντιστρεφόμενου δέντρου [5] • Hybrid [37][38] • Lin & Lui [31] 	<ul style="list-style-type: none"> • Haskin [13] • MBAK [32] • A.J.C [23][24] • Otel [21] • Hongs [7] • Max Evaluation [33] • Shared Backup LSP [50] • TELIC [34][36] • A.B.E [53] • JUNOS [25] • MATE [45] • AMP [27] • LSFBS [8][9][18] • TSMP [48] • RSVP-TE Extension [22] • RD-QoS Extension [3] • LDM [30] • Rd-QoS [1]

Πίνακας 5.1 Τύποι αλγορίθμων ανάλογα με την λειτουργία τους

5.1 Αλγόριθμοι Ανοχής Σφαλμάτων

Αυτό που διακρίνει τους αλγορίθμους είναι ο σκοπός τους. Οι αλγόριθμοι ανοχής σφαλμάτων έχουν σαν σκοπό να ορίζουν κάποιο τρόπο ώστε να αποκαθιστούνται τα δίκτυα μετά από την παρουσία σφαλμάτων στο δίκτυο. Οι αλγόριθμοι αυτοί πρέπει να είναι ανθεκτικοί, να επιβιώνουν και να μπορούν να επαναφέρονται γρήγορα μετά από κάποιο σφάλμα. Αυτό είναι απαραίτητο ιδιαίτερα για εφαρμογές που απαιτούν υπηρεσίας υψηλής αξιοπιστίας για να εξασφαλίζεται και η βιωσιμότητα του δικτύου. Κάθε αλγόριθμος προσπαθεί να βρίσκει τρόπους για να επαναφέρεται το δίκτυο μετά από κάποιο σφάλμα. Η επαναφορά μπορεί να επιτευχθεί είτε με επαναδρομολόγηση, είτε με εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι. Υπάρχουν όμως και αλγόριθμοι που μπορούν να τα συνδυάσουν.

Με τους αλγορίθμους ανοχής σφαλμάτων, αν στο δίκτυο εμφανιστεί κάποιο σφάλμα τότε το δίκτυο αποκαθίσταται με την μεταφορά της κυκλοφορίας από το αποτυχημένο μέρος του δικτύου σε ένα άλλο μονοπάτι του δικτύου, όσο το δυνατόν γρηγορότερα για να μην υπάρχει μεγάλη απώλεια πακέτων από το σημείο στο οποίο συνέβηκε το σφάλμα.

Πιο κάτω ακολουθεί ένας πίνακας που παρουσιάζει ποια μέθοδο επαναφοράς ακολουθεί κάθε αλγόριθμος. Κάτω από κάθε κατηγορία περιγράφεται αν γίνεται καθολική ή τοπική επαναφορά μετά από κάποιο σφάλμα.

Εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι		
Καθολική	Τοπική	Συνδυασμός
<ul style="list-style-type: none"> • Δομή Αντιστρεφόμενου Δέντρου • Dua • IMakam • SPM 	<ul style="list-style-type: none"> • Two Path Protection • Haskin • SSPA 	<ul style="list-style-type: none"> • RRL • Gonfa

Πίνακας 5.1.1.1 Αλγόριθμοι εναλλαγής σε προστατευμένο μονοπάτι

Επαναδρομολόγηση		
Καθολική	Τοπική	Συνδυασμός
<ul style="list-style-type: none"> • Mira • Lin & Lui 	<ul style="list-style-type: none"> • A.J.C • Otel • Max Evaluation • Hong's 	

Πίνακας 5.1.1.2 Αλγόριθμοι επαναδρομολόγησης

Εναλλαγή και Επαναδρομολόγηση		
Καθολική	Τοπική	Συνδυασμός
		Hybrid

Πίνακας 5.1.1.3 Αλγόριθμοι που συνδυάζουν επαναδρομολόγηση και εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι

5.1.1 Επαναδρομολόγηση

5.1.1.1 Αλγόριθμος MIRA

Ο αλγόριθμος MIRA [4][41] χρησιμοποιεί την μέθοδο της καθολικής αποκατάστασης. Το καινούργιο μονοπάτι υπολογίζεται ώστε να αποφεύγονται οι κρίσιμες συνδέσεις. Είναι βασισμένος στην θεωρία της μέγιστης ροής (max-flow), προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την υπόλοιπη χωρητικότητα μεταξύ του κόμβου εισόδου και του κόμβου εξόδου, βελτιώνοντας τις πιθανότητες για εύρεση εναλλακτικών μονοπατιών κατά την διάρκεια της αποτυχίας. Σαν είσοδο παίρνει ένα γράφο (G) και ένα σύνολο B από όλες τις συνδέσεις με τις χωρητικότητες τους. Τον κόμβο εισόδου a και τον κόμβο εξόδου b από τους οποίους διαπερνά η ροή με D μονάδες εύρους ζώνης. Ενώ σαν έξοδο παίρνουμε το μονοπάτι μεταξύ του a και b στο οποίο έχει εύρος ζώνης D.

Τα βήματα είναι τα εξής :

- Υπολογίζονται οι τιμές μεγάλης ροής για κάθε $(s,d) \in P(a,b)$
- Υπολογίζεται το σύνολο των κρίσιμων συνδέσεων C_{sd} για κάθε $(s,d) \in P(a,b)$
- Υπολογίζονται τα βάρη $w(l) = S_{(s,d): l \in C_{sd}} a_{sd} \cdot l \in L$
- Διαγράφονται όλες οι συνδέσεις που το εύρος ζώνης τους είναι μικρότερο του D και διαγράφεται ένα μειωμένο δίκτυο.
- Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Dijkstra για να υπολογιστεί το μικρότερο μονοπάτι χρησιμοποιώντας το $w(l)$ σαν βάρος στη σύνδεση l
- Η ροή που απαιτεί D μονάδες εύρους ζώνης μεταξύ των a και b δρομολογείται στο μικρότερο στο μονοπάτι που έχει υπολογιστεί.

5.1.1.2 Αλγόριθμος Lin & Lui

Ο αλγόριθμος Lin & Lui [31] χρησιμοποιεί την μέθοδο της καθολικής αποκατάστασης του δικτύου. Για την εύρεση του νέου μονοπατιού δημιουργείται ένας γράφος στον οποίο τοποθετούνται τα ζεύγη κόμβων (εισόδου – εξόδου) των εγκατεστημένων μονοπατιών χωρίς σφάλμα. Το κόστος και η χωρητικότητα των ακμών είναι η καθυστέρηση παράδοσης και το υπόλοιπο εύρος ζώνης. Του κάθε αντίστοιχου μονοπατιού στο οποίο δεν έχει εντοπιστεί το σφάλμα. Στην συνέχεια με ακμές συνδέουμε τους κόμβους εισόδου (source nodes) με τους κόμβους πηγής (destination nodes). Το κόστος των νέων ακμών είναι ο αριθμός των μεταβάσεων στο αντίστοιχο μονοπάτι ενώ η χωρητικότητά τους θέτεται άπειρο. Το πρόβλημα μεταφέρεται στο πως να στείλει την κυκλοφοριακή ροή από τον κόμβο εισόδου στον κόμβο εξόδου με το ελάχιστο κόστος. Η επιλογή του ελάχιστου μονοπατιού υπολογίζεται με συγκεκριμένη φόρμουλα. Τέλος μετά την εύρεση του μονοπατιού η αποστολή των πακέτων γίνεται διαμέσου του, με την βοήθεια της τεχνικής του σωρού των ετικετών.

5.1.1.3 Αλγόριθμος A.J.C

Ο αλγόριθμος A.J.C [23][24] χρησιμοποιεί την μέθοδο της τοπικής αποκατάστασης του δικτύου και είναι ένας αλγόριθμος ελάχιστου κόστους επαναφοράς μονοπατιού (shows Least-Cost Recovery-Path algorithm). Όταν το σφάλμα εντοπιστεί ο προς τα πάνω κόμβος εγκαθιστά το εναλλακτικό . Ακολουθείται η εξής διαδικασία : ο προς τα πάνω κόμβος που εντοπίζει το σφάλμα υπολογίζει το μονοπάτι με το ελάχιστο κόστος από όλα τα πιθανά εναλλακτικά μονοπάτια τα οποία μπορούν να σχηματιστούν μεταξύ του προς τα πάνω κόμβου και του LSR μέσα στο κύριο μονοπάτι που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως PML και το εγκαθιστά με ρητή δρομολόγηση. Η κυκλοφορία πλέον μεταφέρεται στο νέο μονοπάτι. Σε περίπτωση που δεν γίνει η εγκατάσταση του μονοπατιού τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

5.1.1.4 Αλγόριθμος Otel

Ο αλγόριθμος Otel [21] χρησιμοποιεί την μέθοδο της τοπικής αποκατάστασης. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τις εξής πληροφορίες: δέντρο με τα μικρά μονοπάτια (Short Path Tree - SPT), την σύνδεση που έχει γίνει το σφάλμα και τον προς τα πάνω κόμβο. Όταν το σφάλμα εντοπιστεί από τον προς τα πάνω κόμβο εγκαθίσταται ένα τοπικό εναλλακτικό μονοπάτι το οποίο χρησιμοποιείται ως σήραγγα παράκαμψης για την δρομολόγηση των πακέτων, αποφεύγοντας έτσι το σφάλμα. Ενημερώνονται μόνο τμήματα του SPT τα οποία επηρεάστηκαν από κάποιο σφάλμα. Ο αλγόριθμος διατηρεί τρεις βασικές δομές δεδομένων. Το SPT του οποίου η ρίζα είναι ο κόμβος ο οποίος θα εκτελέσει τους υπολογισμούς. Ένα πίνακα ο οποίος περιέχει τις αποστάσεις των πιο κοντινών μονοπατιών από τη ρίζα του SPT σε όλους τους άλλους κόμβους. Μια ουρά προτεραιότητας για τους κόμβους στην οποία κάθε κόμβος παρουσιάζεται σαν μια τετράδα (n, Δ, p, l) . Το n είναι ο κόμβος, το Δ ορίζει μοναδικά την τετράδα, το p είναι ο πατέρας του κόμβου στο SPT, l η σύνδεση που ενώνει το p και n . Η ουρά προτεραιότητας λειτουργεί ως εξής: μια νέα τετράδα για ένα κόμβο πρόκειται να εισαχθεί στην ουρά, αν η ουρά δεν περιέχει ήδη κάποια τετράδα για αυτό τον κόμβο. Αν όμως δεν υπάρχει ήδη τετράδα για αυτό τον κόμβο τότε ανάλογα με το ποια έχει το πιο μικρό Δ μένει.

Η διαδικασία είναι η εξής:

- 1) Σημαδεύουμε όλους τους κόμβους του υπάρχων SPT ως προσεγγίσιμοι.
- 2) Ορίζουμε σαν SP T υποδέντρο εκείνο που σαν ρίζα έχει τον αποσυνδεδεμένο προς τα κάτω κόμβο. Αρχίζοντας από την ρίζα του SPT υποδέντρου σημαδεύουμε όλους τους κόμβους του SPT υποδέντρου σαν απροσέγγιστοι.
- 3) Κατασκευάζουμε το σύνολο L που περιέχει τις συνδέσεις του δικτύου που έχουν σαν κόμβο εισόδου ένα κόμβο προσεγγίσιμο και έχουν σαν κόμβο εξόδου ένα κόμβο απροσέγγιστο.
- 4) Για κάθε σύνδεση l του συνόλου L:

Ορίζουμε σαν p και n τον κόμβο εισόδου και εξόδου της σύνδεσης l αντίστοιχα. Υπολογίζουμε την απόσταση της δοκιμαστικής πορείας από την ρίζα του SPT μέχρι τον κόμβο n που είναι ίσο με το άθροισμα του πιο μικρού μονοπατιού από την ρίζα του SPT στον κόμβο p και το βάρος της σύνδεσης. Υπολογίζουμε το Δ σαν την διαφορά μεταξύ της δοκιμαστικής πορείας και της απόστασης του μικρότερου μονοπατιού μεταξύ της ρίζας του SPT και του κόμβου n στην προηγούμενη μη ενημερωμένη τοπολογία.

Για τον κόμβο n εισάγουμε στην ουρά προτεραιότητας την τετράδα που έχει διαμορφωθεί από τις τιμές των n, p, l, Δ .

5) Από την ουρά προτεραιότητας εξάγουμε μια τετράδα (n', p', Δ', l') . Ενημερώνουμε το SPT διαγράφοντας το κλαδί που ενώνει τον n' με τον πατέρα του στο παλιό SPT και προσθέτοντας κλαδί με την βοήθεια της σύνδεσης l' , ενώνοντας έτσι τον απροσέγγιστο n' και με τον προσεγγίσιμο p' . Επίσης ενημερώνεται ο πίνακας που περιέχει τις αποστάσεις των πιο κοντινών μονοπατιών, υπολογίζοντας την μικρότερη απόσταση από την ρίζα του SPT στον κόμβο n' δηλαδή το άθροισμα του πιο κοντινού μονοπατιού από την ρίζα του SPT στον κόμβο p' και το βάρος της σύνδεσης l' . Αν ο κόμβος n' είναι ο κόμβος προορισμού ο αλγόριθμος τερματίζεται.

6) Σημάδεψε τον κόμβο n' και όλα τα παιδιά του στο SPT σαν προσεγγίσιμοι. Διαγράφουμε από την ουρά προτεραιότητας όλες τις τετράδες που αντιπροσωπεύουν τα παιδιά του. Ενημερώνουμε τις τιμές του συνόλου L που περιέχει τις συνδέσεις που έχουν σαν κόμβο εισόδου LSR τον κόμβο n' ή κάποιο από τα παιδιά του και σαν κόμβο εξόδου ένα κόμβο απροσέγγιστο. Πήγαινε στο βήμα 4.

5.1.1.5 Αλγόριθμος Max Evaluation

Ο αλγόριθμος Max Evaluation [33] είναι ένας δυναμικός αλγόριθμος δρομολόγηση ανοχής σφαλμάτων το οποίο επιλέγει μονοπάτια με την αξιολόγηση της μέγιστης ροής, αυξάνοντας των αριθμών των αποσυνδεδεμένων μονοπατιών προς το προορισμό.

Ο αλγόριθμος εκτελείται για κάθε πακέτο που στέλνεται από μια πηγή σε ένα προορισμό που δίνονται. Αρχικά τρέχει στον κόμβο πηγή, ο οποίος επιλέγει τον επόμενο κόμβο, από τους γείτονες του. Όταν το πακέτο φτάνει στον επόμενο κόμβο, αυτός τρέχει το αλγόριθμο για να επιλέξει τον κόμβο που θα ακολουθήσει κ.ο.κ μέχρι να φτάσει το πακέτο στον προορισμό

Ο αλγόριθμος επιλέγει τον επόμενο κόμβο του μονοπατιού με αξιολόγηση κάθε γειτονικής ακμής. Η αξιολόγηση στηρίζεται σε ένα trade-off ανάμεσα στον πλεονασμό και την απόσταση των μονοπατιών στον προορισμό από την αξιολογημένη ακμή. Μετά την αξιολόγηση, επιλέγεται η καλύτερη ακμή.

5.1.1.6 Αλγόριθμος Hongs

Ο αλγόριθμος Hongs [7] χρησιμοποιεί την μέθοδο με τοπική αποκατάσταση. Για να εκτελεστεί ο αλγόριθμος χρειάζεται ένας ενδιάμεσος γράφος με βάση τα βάρη του δικτύου (Intermediate Weighted Network Graph - IWNG). Καθορίζεται ένας ενδιάμεσος κόμβος εισόδου I' που ανήκει στο μονοπάτι και είναι προς τα πάνω κόμβος από το σημείο που έχει εντοπιστεί το σφάλμα. Στην συνέχεια βρίσκουμε τη βέλτιστη εναλλακτική πορεία από τον I' στον κόμβο εξόδου LSR με βάση κάποιους περιορισμούς από το εύρος ζώνης.

Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής :

1) Δημιουργείται ένα IWNG με τις εξής πληροφορίες:

F : το σύνολο των κόμβων (n) και συνδέσεων (l) στους οποίους έχει εντοπιστεί το

Σφάλμα LSPrec($I, E, T, H, BREQ$): I : κόμβος εισόδου

E : κόμβος εξόδου LSR , T είναι η Κλάση κυκλοφορίας (traffic class) η οποία χωρίζεται στην χρυσή, ασημένια και χάλκινη.

H : αριθμός των δρομολογητών που θα θέλουμε να έχουμε στο νέο μονοπάτι, BREQ αντιστοιχεί στις απαιτήσεις για το εύρος ζώνης PWORKING: κύριο μονοπάτι.

2) Καθορίζεται ένας κόμβος εισόδου I' ο οποίος θα οδηγήσει το εναλλακτικό μονοπάτι.

Δημιουργείται ένα $LSPrec(I, E, T, H, BREQ)$. Το I' πρέπει να ανήκει στο PWORKING

3) Βρίσκουμε το βέλτιστο μονοπάτι από το $LSPREC(I')$ στο $LSPREC(E)$ με περιορισμούς όπως T, H , και $BREQ$

4) Εάν το υπολογισμένο μονοπάτι που δημιουργήθηκε μεταξύ του $LSPREC(I')$ και $LSPREC(E)$ ικανοποιεί τους περιορισμούς, τότε το επιλέγουμε και σταματούμε την διαδικασία του αλγορίθμου.

5) Εάν δεν μπορεί να δημιουργηθεί ένα μονοπάτι μεταξύ του $LSPREC(I')$ και $LSPREC(E)$ με βάση τους καθορισμένους περιορισμούς, τότε συγκρίνουμε τον κόμβο I με τον I' .

6) Εάν είναι οι ίδιοι τότε σταματά η διαδικασία. Εάν ο κόμβος I με τον I' είναι διαφορετικός, καθορίζουμε το I' σαν κόμβο που έμμεσα σφάλμα ($F \leftarrow LSPREC(I')$). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα επέκταση του προβλήματος. Επαναλαμβάνεται η πιο πάνω διαδικασία αφού I' έχει μόλις προστεθεί στο σύνολο F μέχρι που να βρεθεί εναλλακτικό μονοπάτι.

5.1.2 Εναλλαγή σε Προστατευμένο μονοπάτι

5.1.2.1 Αλγόριθμος Δομής Αντιστρεφόμενου δέντρου

Ο αλγόριθμος Δομής Αντιστρεφόμενου Δέντρου (Reverse Notification Tree- RNT) [5] είναι ένας μηχανισμός προστασίας μονοπατιού που αποτελείται από τα τρία στοιχεία : αντίστροφο δέντρο αναγνώρισης (Reverse Notification Tree- RNT), το hello πρωτόκολλο και το ελαφρύ πρωτόκολλο μεταφοράς αναγνώρισης. Είναι απλός, γρήγορος και αποδοτικός μηχανισμός

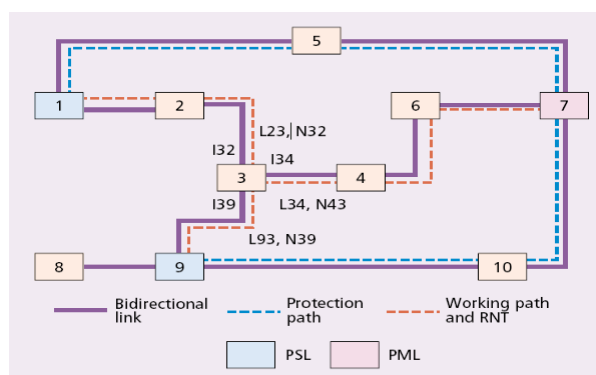
αποκατάστασης σφάλματος και επιτυγχάνει αποδοτική και γρήγορη κατανομή του μηνύματος που γνωστοποιεί το σφάλμα.

Ανάποδο Δέντρο Ειδοποίησης – Reverse Notification Tree

Στον αλγόριθμο αυτό η επαναφορά επιτυγχάνεται με τα σήματα γνωστοποίησης σφάλματος (fault indication signal – FIS), όπου ειδοποιούν τα LSR(s) που είναι υπεύθυνα για την εναλλαγή στο εναλλακτικό μονοπάτι και τα σήματα επαναφοράς μετά από σφάλμα (fault repair signal- FRS), όπου επιτυγχάνεται επιδιόρθωση από το σημείο που συνέβηκε το σφάλμα πίσω στο PSL.

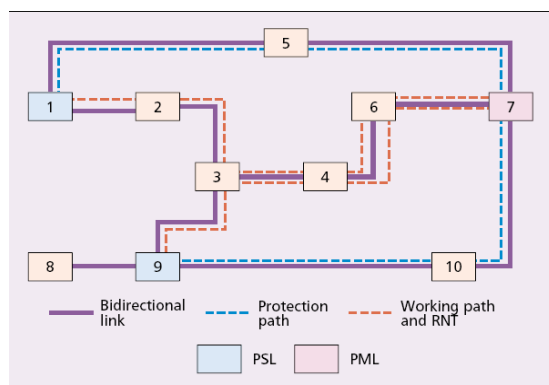
Έχουμε τις εξής περιπτώσεις :

Φυσικά Συγχωνευμένα LSPs: Η ένδειξη του λάθους και η ειδοποίηση επαναφοράς πρέπει να μπορούν να ταξιδέψουν κατά μήκος του ανάποδου μονοπατιού του κυρίως μονοπατιού προς όλα τα PSLs που επηρεάστηκαν από το σφάλμα. Στο σχήμα 5.1.2.1.1 για σφάλμα στη σύνδεση 3-4 τα επηρεαζόμενα PSLs είναι το 1 και το 9, όπου στην σύνδεση 2-3, το μόνο επηρεαζόμενο PSL είναι το 1.



Σχήμα 5.1.2.1.1 Ένα παράδειγμα προστασίας μονοπατιού [5]

Εικονικά Συγχωνευμένα LSPs: Αρκετά LSPs που ξεκινούν από διαφορετικά LSRs μοιράζονται ένα κοινό τμήμα πέρα από αρκετούς κόμβους και ένα συνηθισμένο αναγνωριστικό. Στην περίπτωση αυτή η αποθήκευση στην ειδοποίηση αναγνωρίζονται στέλλοντας μια απλή ειδοποίηση για τα κυρίως μονοπάτια



Σχήμα 5.1.2.1.2 Παράδειγμα εικονικά συγχωνευμένων LSPs [5]

Στις δύο πιο πάνω περιπτώσεις, ένα συγκεκριμένο μονοπάτι ειδοποίησης παρέχεται από το RNT, το οποίο είναι μια εικόνα καθρέπτης των κυρίως μονοπατιών που συγκλίνουν, κατά μήκος των οποίων τα FIS και τα FRS ταξιδεύουν (σχήμα 5.1.2.1.2).

Κάθε LSR κατά μήκος του μονοπατιού υπενθυμίζει την ταυτότητα του αμέσως προηγούμενου γείτονα της κάθε εισερχόμενης σύνδεσης. Ο κόμβος τότε δημιουργεί ένα “ανάποδο” πίνακα σύνδεσης για κάθε προστατευόμενο προς τα έξω LSP και διατηρεί μια λίστα από εισερχόμενα LSPs που συγχωνεύονται σε αυτό το προς τα έξω LSP, μαζί με την ταυτότητα του προς τα πάνω κόμβου και η προς τα μέσα διεπιφάνεια μέσω της οποίας έρχονται όλα τα εισερχόμενα LSP.

Τοποθετώντας τον αντίστροφο πίνακα σύνδεσης σε πίνακα εναλλαγής ετικετών, το RNT ενός σημείου προς πολλά LSP εγκαθίσταται με τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες στον αντίστροφο πίνακα σύνδεσης. Η RNT ετικέτα εισόδου και διεπιφάνεια μπορούν τότε να

χρησιμοποιηθούν σαν δείκτες στον πίνακα label-swapping για να βρει τις ετικέτες εξόδου και διεπιφάνιες του RNT LSP. Όταν λάβει ένα FIS, ένα LSR εξάγει τις ετικέτες και ελέγχει τον πίνακα εναλλαγής ετικετών για να καθορίσει τις εξερχόμενες ετικέτες και διεπιφάνιες, εκτελεί εναλλαγή ετικέτας και προωθεί το FIS σε συγκεκριμένο προς τα πάνω κόμβο. Αν ο κόμβος είναι και PSL, ένα αντίγραφο του FIS θα διανεμηθεί στα πιο πάνω επίπεδα του κόμβου, αν ο κόμβος που είναι υπεύθυνος για να ξεκινήσει τις διαδικασίες της εναλλαγής.

Hello πρωτόκολλο για αναγνώριση σφάλματος

Το hello πρωτόκολλο επιτρέπει στον προς τα πάνω κόμβο του σφάλματος να αναγνωρίσει το σφάλμα, άμεσα ή σιωπηρά. Κάθε LSR στέλνει μήνυμα ζωής (liveness μήνυμα) περιοδικά στους γείτονες του, που μεταφέρει το ID του LSR και όλα τα IDs των γειτόνων του που ανακάλυψε από τα μηνύματα ζωής που του έχουν στείλει. Ένα LSR μπορεί να μάθει αν μια σύνδεση δύο κατευθύνσεων εργάζεται αν δει το ID του στο μήνυμα ζωής που στέλνει το LSR στην άλλη άκρη της σύνδεσης

Ελαφρύ Πρωτόκολλο Μεταφοράς

Ο κόμβος που ξεκίνησε και έστειλε το FIS θα συνεχίσει να στέλνει FIS μηνύματα σε διάστημα $t1$ (που ορίζεται από το ρολόι) μέχρι ένα άλλο ρολόι $t2$ να λήξει. Μετά που το $t2$ λήξει, υποθέτει ότι η προστασία ανώτερου επιπέδου θα έχει προκληθεί ή ένας αρκετά μεγάλος αριθμός FIS μηνυμάτων θα έχει σταλεί για να φτάσει την επιθυμητή αξιοπιστία μεταβιβάζοντας την πληροφορία του σφάλματος στο PSL(s).

Στον αλγόριθμο Δομής Αντιστρεφόμενου Δέντρου, το RNT μπορεί να εδραιωθεί σε σχέση με τα κυρίως μονοπάτια, κάνοντας σε κάθε LSR που υπάρχει στο κυρίως μονοπάτι να θυμάται τον προς τα πάνω γείτονα του και είναι ένα για όλα τα κυρίως μονοπάτια που συγχωνεύονται.

Το RNT τοποθετείται σε ένα κατάλληλα επιλεγμένο LSR κατά μήκος του κοινού σημείου των συγχωνευμένων κυρίως LSPs και τερματίζεται στα PSLs.

5.1.2.2 Αλγόριθμος Dual

Στον αλγόριθμο Dual [29] χρησιμοποιείτε η τεχνική της καθολικής αποκατάστασης. Ταυτόχρονα εγκαθίστανται τα εναλλακτικά μονοπάτια και του κυρίων μονοπατιού. Για να επιτευχθεί αυτό έγινε αλλαγή του LDP πρωτοκόλλου. Στα μηνύματα αίτησης ετικέτας (Label Request Message – LRM) προστέθηκε το πεδίο διαδόχου (successor LRM- SLRM) και το πεδίο εφικτού διαδόχου (feasible successor LRM- FSLRM). Το SLRM ζητά ετικέτα για το κύριο μονοπάτι ενώ το FSLRM ζητά ετικέτα για το εναλλακτικό μονοπάτι. Στο μήνυμα συσχέτισης ετικέτας (Label Mapping Message- LMM) προστέθηκε το πεδίο διαδόχου (successor LMM- SLMM) και το πεδίο εφικτού διαδόχου (feasible successor LMM- FSLMM).). Το SLRM συσχετίζει τις ετικέτες για το κύριο μονοπάτι ενώ το FSLRM συσχετίζει τις ετικέτες για το εναλλακτικό μονοπάτι. Στον πίνακα LIB προστέθηκε το πεδίο που αποθηκεύει την ετικέτα που αντιστοιχεί στο εναλλακτικό μονοπάτι και πεδίο που αποθηκεύει ποια ετικέτα αντιστοιχεί στο κύριο μονοπάτι.

5.1.2.3 Αλγόριθμος Makam

Στον αλγόριθμο Makam [6] η αποκατάσταση του δικτύου είναι καθολική. Το εναλλακτικό μονοπάτι είναι εγκατεστημένο μεταξύ του κόμβου εισόδου και του κόμβου εξόδου και είναι ξεχωριστό από το κύριο μονοπάτι. Όταν υπάρξει σφάλμα στο κύριο μονοπάτι ο κόμβος που το εντοπίζει στέλνει FIS στον κόμβο εισόδου ώστε να τον ενημερώσει γι' αυτό. Ο κόμβος εισόδου μετά θα δρομολογήσει τα πακέτα μέσω του εναλλακτικού μονοπατιού που είναι ήδη εγκατεστημένο.

5.1.2.4 Αλγόριθμος SPM

Ο αλγόριθμος SPM [39] χρησιμοποιεί την καθολική αποκατάσταση του δικτύου. Για κάθε ζεύγος κόμβου εισόδου- εξόδου μεταφέρονται d ροές (d διαφορετικά μονοπάτια). Υπολογίζονται βάση τον αλγόριθμο k ξεχωριστά μονοπάτια με το μικρότερο μέγεθος (k Disjoint Shortest Paths- k DSP). Το σύνολο $f_d(s)$ περιέχει το μονοπάτι που έχει υποστεί σφάλμα. Για κάθε ροή που ανήκει στο d και για κάθε σφάλμα $f_d(s)$ διαμορφώνεται μια φόρμουλα I_d^f στα μονοπάτια που λειτουργούν ακόμη. Η φόρμουλα παρέχει τρόπους ελευθερίας για την ελαχιστοποίηση των εφεδρικών ικανοτήτων. Μια απλή προσέγγιση βελτιστοποίησης είναι η ανάθεση ενός μεγάλου ποσοστού των ροών d σε μονοπάτια με μικρό μήκος και ενός μικρού ποσοστού σε μονοπάτια με μεγάλο μήκος. Διανέμουμε το ποσοστό ενός συνόλου κυκλοφορίας στα μονοπάτια που λειτουργούν του SPM ανάλογα με τα μήκη αυτών των πορειών. Η συνάρτηση $f_d(s)$ χρησιμοποιείται για την εύρεση του συνόλου που περιέχει όλα τα μονοπάτια στα οποία υπάρχει σφάλμα. Το p_d^i $0 \leq i < k_d$ είναι όλα μονοπάτια που το καθένα είναι ξεχωριστό από το άλλο για τη ροή δεδομένων. $F_d(s) = (\Phi(P_d^0 s) \dots \Phi(P_d^{k_d-1} s))^T$.

5.1.2.5 Αλγόριθμος Two path protection

Ο αλγόριθμος Two path protection [44] βασίζεται στην έννοια της «προστασίας των περιοχών» όπου οι πορείες προστασίας για όλες τις πορείες λειτουργίας καταλήγουν σε έναν δρομολογητή εξόδου και υπολογίζονται ταυτόχρονα. Κάθε προστατευμένος κόμβος συνδέεται με δύο πορείες προστασίας που τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε αν υπάρξει κάποια αποτυχία σε κάποια σύνδεση δεν θα προκαλούσε την ταυτόχρονη απώλεια

σύνδεσης μεταξύ ενός κόμβου και του δρομολογητή εξόδου και στις δύο πορείες προστασίας. Οι δύο πορείες μπορούν να μοιραστούν τις συνδέσεις μέσα σε μία πορεία.

Όλες οι πορείες που προστατεύουν LSPs που υπολογίζονται ταυτόχρονα με τον αλγόριθμο τοποθέτησης προστασίας μονοπατιού. Μέσα από την τοποθέτηση των πορειών που παράγονται από αυτό τον αλγόριθμο χρησιμοποιείται το LSP συγχώνευση (LSP merging). Η προστασία μίας περιοχής επιτυγχάνεται από την εκτέλεση του αλγορίθμου για υπολογισμό των πορειών προστασίας σε κάθε δρομολογητή εξόδου.

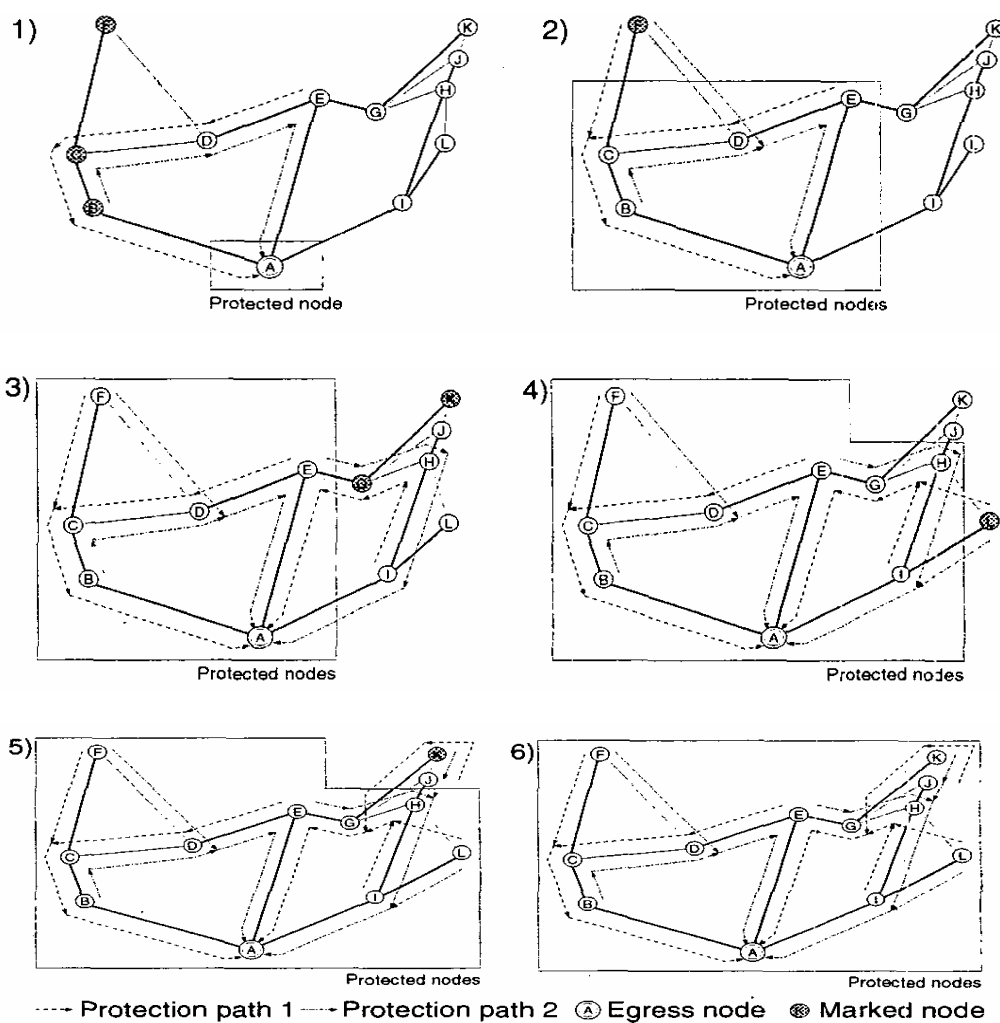
Ο τοποθέτησης προστασίας μονοπατιού αλγόριθμος δουλεύει ως εξής: Αρχικά θα βρούμε ένα δέντρο μέτρησης του γράφου G με ρίζα τον δρομολογητή εξόδου e . Τα βήματα 1-5 θα πρέπει να επαναληφθούν μέχρι όλοι οι κόμβοι να είναι προστατευμένοι.

Βήματα:

1. Επιλέγουμε ένα από τους κλάδους του δέντρου μέτρησης ο οποίος είναι κοντινός του κόμβου εξόδου και χαρακτηρίζουμε όλους τους κόμβους εκτός από τον κόμβο εξόδου.
2. Ανιχνεύουμε όλους τους χαρακτηρισμένους κόμβους για να βρούμε τον κόμβο i που έχει μία σύνδεση με κάποιο μη χαρακτηρισμένο κόμβο j .
3. Εξετάζουμε μια κυκλική πορεία η οποία αποτελείται από συνδέσεις του spanning tree από τον e στον i , τη σύνδεση του i και του j και τις συνδέσεις του spanning tree μεταξύ του j και του e
4. Βρίσκουμε της δύο πορείες που δρομολογούνται κατά μήκος αυτής της κυκλικής πορείας η μία πρέπει να είναι δεξιόστροφη και η άλλη πρέπει να κινείται αντίθετα από τους δείκτες του ρολογιού. Οι πορείες που αρχίζουν από τους δύο κόμβους που συνδέονται άμεσα με τον δρομολογητή εξόδου ακολουθούν όλη κυκλική την πορεία προς τον δρομολογητή εξόδου. Στη συνέχεια οι δύο πορείες προστασίας συγχωνεύονται με τις πορείες προστασίας που καθιερώθηκαν στις προηγούμενες επαναλήψεις.

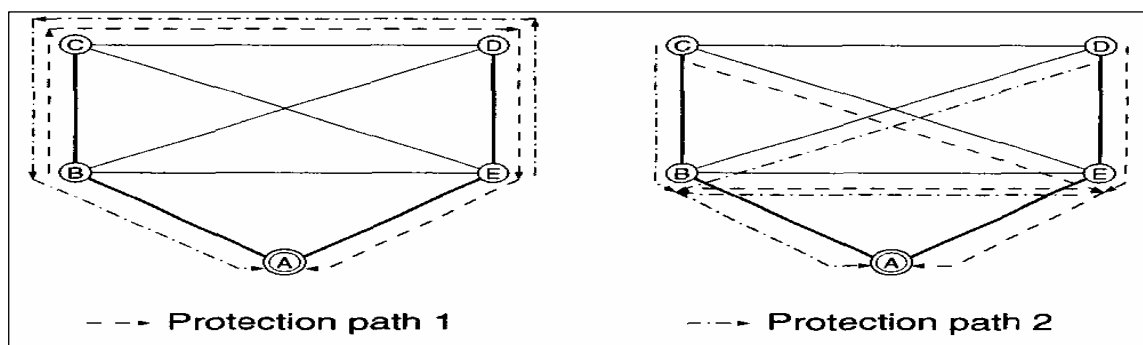
5. Στην επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου θα πρέπει να εξεταστεί ένα νέος γράφος. Αυτός ο νέος γράφος διαχειρίζεται όλους τους κόμβους που υπάρχουν στο P σαν ένα ενιαίο κόμβο ο οποίος θα ενεργεί σαν κόμβος εξόδου και με την αφαίρεση όλων των συνδέσεων που συνδέουν δύο προστατευμένους κόμβους.

Το σχήμα 5.1.3.1 παρουσιάζει τα βήματα του αλγορίθμου για τον υπολογισμό πορειών προστασίας με δρομολογητή εξόδου τον A. Οι υπόλοιποι κόμβοι του δικτύου ενεργούν σαν δρομολογητές εισόδου.



Σχήμα 5.1.2.5.1 Κατασκευή πορειών προστασίας: τοπολογία vBNS [44]

Ένα παράδειγμα στο σχήμα 5.1.2.5.2 δείχνει δύο πιθανές τοποθετήσεις των πορειών προστασίας σε ένα δίκτυο. Η πρώτη τοποθέτηση της πορείας προστασίας είναι το αποτέλεσμα του προσδιορισμού ενός κύκλου κατά μήκος των κόμβων ABCDE. Η δεύτερη τοποθέτηση πορειών προστασίας είναι το αποτέλεσμα από την επιλογή κατά μήκος των κόμβων ABE, BCE και BDE.



Σχήμα 5.1.2.5.2 Δύο πιθανές τοποθετήσεις πορειών προστασίας [44]

Ο αλγόριθμος τοποθέτησης πορειών προστασίας που έχει αναλυθεί πιο πάνω κάνει αυθαίρετες επιλογές (στο βήμα 1, βήμα 3 και στην έναρξη) . Για τον υπολογισμό των μικρότερων πορειών προστασίας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Dijkstra.

Τα κλαδιά που διακλαδίζονται με το χαμηλό βάθος εμφανίζονται να είναι οι κατάλληλοι υποψήφιοι καθώς επίσης και εκείνοι με τον μικρότερο αριθμό κόμβων για την επιλογή των κλαδιών του δέντρου μέτρησης για τον χαρακτηρισμό στο βήμα 1.

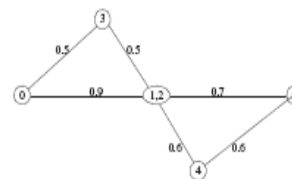
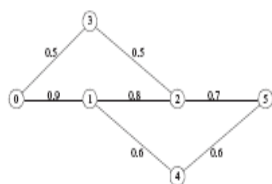
Το αποτέλεσμα του υπολογισμού ενός δέντρου μέτρησης κατά τη διάρκεια του βήματος έναρξης είναι η απόσταση από κάθε κόμβο προς τον δρομολογητή και είναι γνωστή. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το μήκος του κύκλου που διαμορφώνεται. Αυτή η σύνδεση θα χρησιμοποιηθεί και στα επόμενα βήματα του αλγορίθμου.

5.1.2.6 Αλγόριθμος Haskin

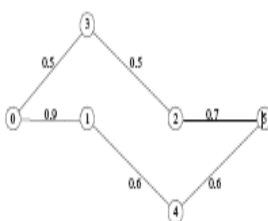
Στο αλγόριθμο Haskin [13] η αποκατάσταση δικτύου γίνεται τοπικά αν υπάρξει κάποιο σφάλμα. Το εναλλακτικό μονοπάτι αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι εγκατεστημένο ανάμεσα στον κόμβο εισόδου και στον κόμβο εξόδου της MPLS περιοχής στην αντίθετη κατεύθυνση από το κύριο μονοπάτι. Το δεύτερο κομμάτι του εναλλακτικού μονοπατιού είναι εγκατεστημένο ανάμεσα στον κόμβο εισόδου και στον κόμβο εξόδου και είναι ανεξάρτητο από το κύριο μονοπάτι. Τα δύο αυτά τμήματα ενώνονται και δημιουργούν ολόκληρο το εναλλακτικό μονοπάτι. Το μονοπάτι εγκαθίσταται πριν την εμφάνιση του σφάλματος και όταν το σφάλμα παρουσιαστεί ο κόμβος που το εντοπίζει δρομολογεί τα πακέτα μέσω της αντίθετης κατεύθυνσης του.

5.1.2.7 Αλγόριθμος SSPA

Ο αλγόριθμος SSPA (Survivable Segment Protection Algorithm) [43] είναι ένας αποδοτικός αλγόριθμος για επιλογή πρωτευόντων μονοπατιών και εναλλακτικών τμημάτων για να μεγιστοποιηθεί η βιωσιμότητα ανάμεσα στα δυο άκρα. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: Ένα μη κατευθυνόμενο δίκτυο ορίζεται από το $G = (N, L)$, όπου N είναι το σύνολο των κόμβων και L είναι το σύνολο των συνδέσεων στο δίκτυο. Η πιθανότητα σφάλματος μιας σύνδεσης Li είναι p_i . Ο κόμβος πηγή και ο προορισμός δίνονται ως $s, t \in N$. Το πρόβλημα είναι να βρει ένα κυρίως μονοπάτι από το s στο t και τα εναλλακτικά μονοπάτια, τέτοια ώστε κάθε σύνδεση στο τμήμα να καλύπτεται από ένα ή περισσότερα εναλλακτικά μονοπάτια, και η βιωσιμότητα στα άκρα μεγιστοποιείται.



Σχήμα 5.1.2.7.1 Τμηματική προστασία [43] Σχήμα 5.1.2.7.2 Μετατροπή γράφου αν
δεν αποτύχει το $L1,2$ [43]



Σχήμα 5.1.2.7.3 Μετατροπή γράφου αν
αποτύχει το $L1,2$ [42]

Για να υπολογιστεί η βιωσιμότητα για την περίπτωση επικάλυψης, υπέθεσαν ότι κάθε σύνδεση προστατεύεται από περισσότερα από ένα εναλλακτικά μονοπάτια. Η βιωσιμότητα καθορίζεται ανάλογα με το κατά πόσο κάθε επικαλυμμένη σύνδεση αποτυγχάνει ή όχι. Στο σχήμα 5.1.2.7.1 υπάρχει μόνο η επικαλυμμένη σύνδεση $L1,2$. Δίνεται ότι η $L1,2$ δεν αποτυγχάνει, έτσι στο σχήμα 5.1.2.7.2 φαίνεται η μετατροπή του γράφου. Αν η $L1,2$ παρουσιάσει σφάλμα, η μετατροπή του γράφου φαίνεται στο σχήμα 5.1.2.7.3. Η υποθετική βιωσιμότητα ανάμεσα στους κόμβους 0 και 5 αλλάζει. Ως εκ τούτου, η βιωσιμότητα ανάμεσα στα άκρα, ανάμεσα στους κόμβους 0 και 5 μπορεί να παρθεί από την συνολική πιθανότητα. Αν υπάρχουν πολλές καλυμμένες συνδέσεις στο δίκτυο, χρειάζεται να υποθέσουμε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των καταστάσεων των συνδέσεων.

Η μέθοδος στηρίζεται στον αλγόριθμο των κοντινών μονοπατιών. Σαν πρώτο βήμα παίρνουμε τον λογάριθμο της πιθανότητας να εμφανιστεί σφάλμα για κάθε σύνδεση.

Τα βήματα είναι τα εξής:

Βήμα 1: Αναθέτεις το βάρος L_i^q για κάθε σύνδεση δύο κατευθύνσεων Li . Η $q_i = 1 - p_i$, είναι η

πιθανότητα με την οποία η σύνδεση Li δεν θα αποτύχει. Η q είναι μια σταθερά, $0 < q < 1$.

Βήμα 2: Τρέχουμε τον αλγόριθμο των κοντινών μονοπατιών για να βρει το πρώτο κοντινό μονοπάτι $P1$ από την πηγή s στον προορισμό t .

Βήμα 3: Φεύγουν όλες οι συνδέσεις κατά μήκος του κοντινού μονοπατιού που είναι κατευθυνόμενες προς το t και πολλαπλασιάζεται το μήκος των συνδέσεων στην αντίθετη κατεύθυνση του κοντινού μονοπατιού με αρνητικό παράγοντα ϵ , $-1 < \epsilon < 0$. ϵ χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει επικαλυμμένες συνδέσεις.

Βήμα 4: Τρέχουμε τον αλγόριθμο ελαχίστου μονοπατιού ξανά για να βρει το δεύτερο κοντινό μονοπάτι $P2$. Αν υπάρχουν κάποιες επικαλυμμένες συνδέσεις ανάμεσα στα $P1$ και $P2$, κρατούνται όλες οι συνδέσεις του $P1$ και αφαιρούνται οι επικαλυμμένες συνδέσεις στο $P2$ για να πάρει διακριτά εναλλακτικά μονοπάτια για το $P1$.

5.1.2.8 Αλγόριθμος Resilient Routing Layers (RRL)

Ο αλγόριθμος Resilient Routing Layers (RRL) [20] εκτελεί καθολική και τοπική επαναφορά. Η ιδέα είναι ότι για κάθε κόμβο στο δίκτυο υπάρχει ένα υποσύνολο της τοπολογίας που καλείται “safe layer”-“ασφαλής στρώμα”, που μπορεί να αναλάβει οποιαδήποτε ροή επηρεάζεται από λάθος στο κόμβο που ανήκει σε αυτό ή σε οποιοδήποτε από τους κόμβους του.

Παρέχει στο διαχειριστή του δικτύου μια βάση, με καθολικές πληροφορίες (στρώματα δρομολόγησης) για το δίκτυο που δημιουργούν. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για την δρομολόγηση της ροής στην περίπτωση σφάλματος.

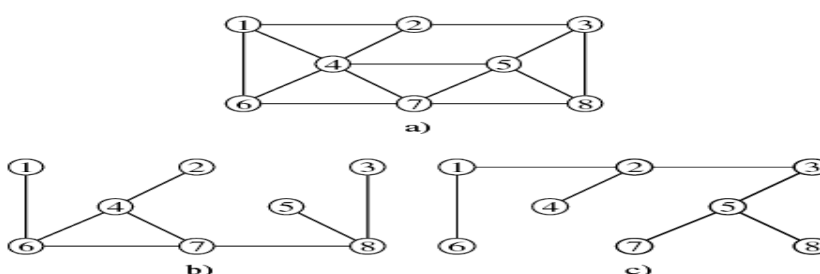
Η RRL τεχνική στηρίζεται στον υπολογισμό υποσυνόλων της τοπολογίας του δικτύου που μεταβάλλονται (επίπεδα-layers). Κάθε επίπεδο περιέχει σε όλους τους κόμβους μόνο ένα υποσύνολο των συνδέσεων στο δίκτυο. Λέμε ότι ένας κόμβος είναι ασφαλής σε ένα επίπεδο αν και μόνο αν μια από τις συνδέσεις του περιέχονται στο επίπεδο. Ο όρος ασφαλές επίπεδο χρησιμοποιείται για ένα κόμβο για να δηλώνει το επίπεδο στο οποίο ο κόμβος είναι ασφαλής. Τα επίπεδα χρησιμοποιούνται ως είσοδος σε αλγορίθμους δρομολόγησης ή εύρεσης μονοπατιού. Υπολογίζεται ένας πίνακας δρομολόγησης ή πίνακας μονοπατιού για κάθε επίπεδο.

Θα πρέπει να δημιουργηθούν επίπεδα, ώστε όλοι οι κόμβοι που δεν είναι σημεία άρθρωσης, είναι ασφαλή σε τουλάχιστον ένα επίπεδο. Στην καθολική αποκατάσταση τα πακέτα πρέπει να αντικρούσουν τον κόμβο με το σφάλμα, και να χρησιμοποιήσουν το ασφαλές επίπεδο του κόμβου από την πηγή. Στην τοπική αποκατάσταση, ο προς τα πάνω κόμβος του κόμβου που παρουσίασε το σφάλμα μεταφέρει τα πακέτα στο safe layer του κόμβου που παρουσίασε το σφάλμα όταν το πακέτο φτάνει.

Η RRL τεχνική αναλαμβάνει σφάλματα στις συνδέσεις ως εξής : Πρώτα καθορίζεται μια σύνδεση - φύλλο σαν η σύνδεση που συνδέει ένα ασφαλή κόμβο στο δίκτυο. Ένα ασφαλές επίπεδο μιας σύνδεσης μπορεί να οριστεί σαν το ασφαλές επίπεδο του προς τα κάτω της κόμβου n αν αυτός δεν είναι ο τελικός προορισμός. Και η σύνδεση φύλλο δεν είναι η σύνδεση που παρουσίασε το πρόβλημα. Αν ο προς τα κάτω κόμβος n είναι ο τελικός προορισμός και η σύνδεση φύλλο του είναι η σύνδεση που παρουσίασε σφάλμα, υπάρχουν δύο επιλογές:

1. Χρησιμοποιούμε το ασφαλές επίπεδο του προς τα πάνω κόμβου που αναγνώρισε το σφάλμα όσο η σύνδεση που παρουσίασε το πρόβλημα δεν είναι η σύνδεση φύλλο.
2. Αν είναι το ασφαλές επίπεδο του προς τα πάνω κόμβου παραμένει το ασφαλές επίπεδο της σύνδεσης , αλλά ο προς τα πάνω κόμβος στέλνει τη ροή σε άλλη σύνδεση.

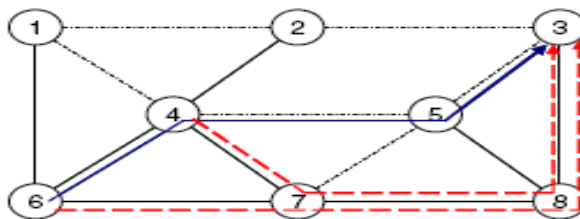
Για καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εκτέλεσης του. Η τοπολογία και τα ασφαλή επίπεδα φαίνονται στο σχήμα 5.1.2.1



Σχήμα 5.1.2.8.1 α) Δίκτυο b) Ασφαλές επίπεδο 1 c) Ασφαλές επίπεδο 2 [20]Σχήμα 5.1.2.8.1 Το δίκτυο και τα ασφαλή επίπεδα που δημιουργούνται.

Τα επίπεδα που προκύπτουν φαίνονται στα σχήματα 5.1.2.8.1b και 5.1.2. 8.1c. Το πρώτο επίπεδο - first layer ($L1$) θα υπολογίζεται ξεκινώντας από τον κόμβο 1.Ο κόμβος 1 θα είναι ο υποψήφιος ασφαλές κόμβος. Καθώς ο κόμβος 1 δεν είναι σημείο άρθρωσης (η μετακίνηση του δεν αποσυνδέει το δίκτυο) , αφαιρούμαι ακμές και γίνεται ο κόμβος 1 ασφαλές κόμβος. Οι κόμβοι 2 και αναλύονται και βρίσκουμε ότι επιλέγονται σαν ασφαλές κόμβοι στο ίδιο επίπεδο. Ο κόμβος 4 είναι σημείο άρθρωσης και δεν είναι ασφαλές i $L1$. Τελικά το layer 1 ($L1$) θα είναι το ασφαλές επίπεδο των κόμβων 1, 2, 3 και 5. όταν όλοι οι εναπομείναντες κόμβοι στο $L1$ είναι σημεία άρθρωσης (articulation points) σε αυτό, τότε ξεκινά να υπολογίζεται το layer $L2$. Ξεκινά από τον κόμβο 4 και καλύπτει τους κόμβους 4, 6, 7 και 8. Το δίκτυο του παραδείγματος μπορεί να

καλυφθεί με δύο επίπεδα. Για δίκτυα λογικού μεγέθους τα επίπεδα μπορούν να υπολογιστούν εύκολα.



Σχήμα 5.1.2.8.2 Παράδειγμα του πως η επηρεαζόμενη ροή εναλλάσσεται στο επίπεδο 1, όταν ο κόμβος 5 παρουσιάσει πρόβλημα. [20]

Πριν ο κόμβος 5 παρουσιάσει κάποιο σφάλμα, όλες οι ροές μπορούν να χρησιμοποιήσουν ολόκληρη την τοπολογία. Όταν ο κόμβος 5 αποτύχει, η ροή που περνά από τον κόμβο 5 πρέπει να δρομολογείται σύμφωνα με το επίπεδο 1 (μετακινώντας τις συνδέσεις με τις τελείες), καθώς οι άλλες ροές μπορούν να δρομολογούνται σε ολόκληρη την τοπολογία.. Στην περίπτωση της τοπικής αποκατάστασης, η ροή δρομολογείται από τον κόμβο 6 στον 4 σύμφωνα με την πλήρη τοπολογία. Ο κόμβος 4 αναγνωρίζει το σφάλμα και εναλλάσσει την ροή στο επίπεδο 1. Το μονοπάτι για την ροή ανάμεσα στους κόμβους 6 και 3 θα είναι 6-4-7-8- 3. Αν ο κόμβος 6 ενημερωθεί για το σφάλμα (global recovery) του κόμβου 5, η μεταφορά στο επίπεδο 1 μπορεί να γίνει από τον κόμβο 6. Το μονοπάτι θα είναι 6-7-8-3. Ακόμα και αν ο κόμβος 5 παρουσιάσει κάποιο σφάλμα, η μέθοδος μπορεί να αντιμετωπίσει σφάλματα στους κόμβους 1, 2 και 3. Αν το σφάλμα καθοριστεί ως μόνιμο, πρέπει να υπολογιστούν νέα επίπεδα σύμφωνα με ολόκληρη την τοπολογία.

5.1.2.9 Αλγόριθμος Gonfa

Ο αλγόριθμος Gonfa [35] χρησιμοποιεί την τοπική και την καθολική αποκατάσταση δικτύου. Το υφιστάμενο μονοπάτι μπορεί να προστατευθεί με δυο τρόπους.

Πρώτο την καθολική περιοχή προστασίας : Σύνολο από LSRs που προστατεύουν ολόκληρο το ήδη υπάρχων μονοπάτι. Χωρίζεται σε πολλαπλές περιοχές προστασίας και η αποκατάσταση του σφάλματος γίνεται μέσα στην περιοχή τμήματος και παρέχει έτσι τμηματική προστασία. Δεύτερο με την τμηματική περιοχή προστασίας.

Με την τεχνική αυτή όλη η περιοχή MPLS είναι ένα σύνολο από περιοχές προστασίας τμήματος. Η εναλλακτική πορεία για ολόκληρη την περιοχή MPLS δημιουργείται από την συνένωση μερικών σημείων των τμηματικών περιοχών.

Κατά την διαδικασία αποκατάστασης του σφάλματος η εναλλακτική πορεία είναι η συνένωση του προς τα πίσω μονοπατιού αρχίζοντας από τον LSR που εντόπισε το σφάλμα και το προκαθορισμένο εναλλακτικό μονοπάτι και το προκαθορισμένο εναλλακτικό μονοπάτι. Το προς τα πίσω μονοπάτι χρησιμοποιείται προσωρινά για την μεταφορά των πακέτων που δρομολογούνται από το κύριο LSP από τον LSR που ανιχνεύει το σφάλμα στον αρμόδιο LSR για την επαναδρομολόγηση της κυκλοφορίας.

Διαδικασία :

- Εγκατάσταση του κύριο LSP.
- Ρητή δρομολόγηση του εναλλακτικού μονοπατιού για ολόκληρο το υφιστάμενο μονοπάτι.
- Για την κάθε τμηματική περιοχή εγκαθίστανται προκαθορισμένα προς τα πίσω μονοπάτια

Χρησιμοποιείται η τεχνική της γρήγορης και αξιόπιστης δρομολόγησης, η οποία παρέχει μερικές προληπτικές ενέργειες για το προστατευμένο LSP ενάντια στην απώλεια πακέτων κατά την διάρκεια ενός σφάλματος (Reliable and Fast Rerouting - RFR). Με την τεχνική αυτή

επιτυγχάνεται η αποφυγή της απώλειας πακέτων είτε αυτό οφείλεται σε σφάλμα στην σύνδεση είτε σε σφάλμα στον κόμβο. Το κάθε πακέτο σε κάθε LSR πριν να σταλεί στην κατάλληλη σύνδεση αντιγράφεται και αποθηκεύεται στη τοπική μνήμη του LSR. Όταν κάποιο σφάλμα εμφανιστεί από κάποιο LSR η διαδικασία της αποστολής των πακέτων στο προς τα πίσω μονοπάτι ξεκινά αμέσως με τα πακέτα που είναι αποθηκευμένα στην τοπική μνήμη του LSR να στέλλονται πρώτα στο προς τα πίσω μονοπάτι οποιοδήποτε επόμενο πακέτο τι οποίο παραλαμβάνεται από το κύριο μονοπάτι στέλνεται επίσης στο προς τα πίσω μονοπάτι. Ο κόμβος αυτός έχει αντίγραφα των πακέτων που χάθηκαν από το σφάλμα σύνδεση ή κόμβου επομένως δεν υπάρχει απώλεια πακέτων. Μόλις κάθε προς τα πάνω κόμβος ανιχνεύσει το πρώτο πακέτο που δρομολογείται μέσω του προς τα πίσω μονοπατιού, αδειάζει όλα τα πακέτα τα οποία αποθηκεύτηκαν προηγουμένως για τυχόν σφάλμα στην σύνδεση εξόδου του κόμβου ή στον συνεργάτη κόμβο. Το επόμενο πακέτο που έρχεται κανονικά από το κύριο μονοπάτι, προστίθεται σε αυτό ένα στίγμα και δρομολογείται κανονικά στο κύριο μονοπάτι με αποτέλεσμα να μειώνεται η μέση καθυστέρηση πακέτων (average packet delay). Όταν το πακέτο με το στίγμα ανιχνευτεί κατά την πορεία του στο προς τα πίσω μονοπάτι δίνει την ένδειξη στον κόμβο που το ανιχνεύει ότι όλα τα επόμενα πακέτα μετά από αυτόν είναι αυτά που έχουν αποθηκευτεί και τώρα θα αποσταλούν μετά από αυτό έτσι τα πακέτα διατηρούνται σε σειρά.

5.1.3 Συνδυασμός Επαναδρομολόγησης και Εναλλαγή σε Προστατευμένο μονοπάτι

5.1.3.1 Αλγόριθμος Hybrid

Ο αλγόριθμος Hybrid [37][38] διατηρεί τέσσερις βασικές δομές δεδομένων από τις οποίες οι τρεις είναι αυτές που περιγράφονται στον Otel. Επιπρόσθετος είναι ο πίνακας στον οποίο αποθηκεύεται το κύριο και το εναλλακτικό μονοπάτι. Η τοπολογία ανοχής σφαλμάτων ακολουθεί τον αλγόριθμο Gonfa.

Λειτουργία:

- Εγκατάσταση του αρχικού LSP και με ρητή δρομολόγηση εγκαθίσταται το εναλλακτικό μονοπάτι για ολόκληρο το υφιστάμενο μονοπάτι και για την κάθε τμηματική περιοχή του υφιστάμενου μονοπατιού εγκαθιστούμε προκαθορισμένα προς τα πίσω μονοπάτια.
- Υπολογίζονται οι δομές δεδομένων που διατηρεί ο αλγόριθμος Otel (SPT, πίνακα με τις αποστάσεις των πιο κοντινών μονοπατιών από τη ρίζα του SPT σε όλους τους άλλους κόμβους).

Το σφάλμα επηρεάζει την ροή των δεδομένων αν εντοπιστεί στο μονοπάτι που δρομολογούνται τα πακέτα ή στο εναλλακτικό μονοπάτι. Ανάλογα με το που και σε ποια σειρά θα εμφανιστεί το σφάλμα, η απόκριση του δικτύου θα γίνει με διαφορετικό τρόπο.

Σαν πρώτη περίπτωση έχουμε : Όταν κάποιο σφάλμα εντοπιστεί από τον προς τα πάνω κόμβο που βρίσκεται στο αρχικό μονοπάτι και δεν έχει προηγηθεί σφάλμα στο εναλλακτικό, η αποκατάσταση του δικτύου θα γίνεται βάση τον Gonfa αλγόριθμο. Ενώσω τα σφάλματα εμφανίζονται στο κύριο μονοπάτι η αποκατάσταση του δικτύου θα γίνεται βάση τον Gonfa αλγόριθμο αφού μπορεί να ανεχτεί πολλά σφάλματα όταν εμφανίζονται στο κύριο μονοπάτι. Μηνύματα FIS στέλνονται σε όλους τους κόμβους, οι οποίοι όταν ενημερωθούν για το σφάλμα πρέπει να ενημερώσουν τις δομές δεδομένων που διατηρεί ο Otel ώστε αν θα χρειαστεί να τον εφαρμόσουμε οι δομές μας να είναι ενημερωμένες σύμφωνα με την νέα κατάσταση του δικτύου.

Αν μετά εντοπιστεί σφάλμα στο εναλλακτικό μονοπάτι εφαρμόζουμε τον Otel όπου θα μας δώσει τον εναλλακτικό τοπικό μονοπάτι ώστε να αποκατασταθεί το σφάλμα. Ενώσω τα σφάλματα εντοπίζονται στο νέο μονοπάτι που χρησιμοποιείται για την δρομολόγηση πακέτων, η αποκατάσταση του δικτύου θα γίνει με βάση τον Otel αλγόριθμο γιατί ακολουθεί τεχνική

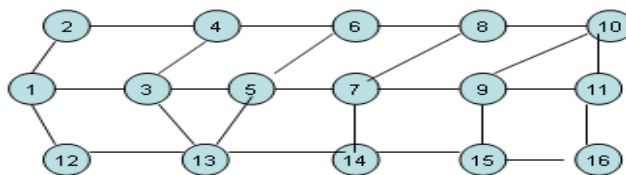
επαναδρομολόγησης που του επιτρέπει να ανέχεται πολλαπλά σφάλματα στο υφιστάμενο και στο εφεδρικό μονοπάτι.

Σαν δεύτερη περίπτωση έχουμε : Αν το σφάλμα εντοπιστεί στο εναλλακτικό μονοπάτι και δεν υπάρχει σφάλμα στο αρχικό μονοπάτι η ροή δεδομένων δεν επηρεάζεται και συνεχίζει να δρομολογεί τα πακέτα από το αρχικό μονοπάτι. Οι κόμβοι ενημερώνονται μέσω των FIS μηνυμάτων που στέλνει ο προς τα πάνω κόμβος όταν εντοπίσει το σφάλμα. Θα ενημερωθούν οι δομές δεδομένων που θα διατηρεί ο Otel έτσι ώστε όταν θα χρειαστεί να τον εφαρμόσουμε οι δομές να είναι ενημερωμένες για την νέα κατάσταση του δικτύου.

Αν όμως εμφανιστεί στην συνέχεια πρόβλημα στο αρχικό μονοπάτι τότε η αποκατάσταση του δικτύου θα γίνεται βάση τον αλγόριθμο Otel και το τοπικό εναλλακτικό μονοπάτι το βρίσκεται δυναμικά. Αν τα επόμενα σφάλματα που ακολουθούν εμφανίζονται στο νέο μονοπάτι που χρησιμοποιείται για την δρομολόγηση των πακέτων, η αποκατάσταση του δικτύου θα γίνεται με τον αλγόριθμο Otel που μπορεί να ανεχτεί πολλαπλά σφάλματα στο κύριο και στα εναλλακτικά μονοπάτια. Αν επιδιορθωθεί ένα σφάλμα αυτό θα ανιχνευτεί από τον προς τα πάνω κόμβο και θα ενημερώσει τους υπόλοιπους αλγορίθμους μέσω των FIS μηνυμάτων και άρα θα ενημερωθεί το SPT. Αν όμως το κύριο μονοπάτι επιδιορθωθεί τότε η ροή μεταφέρεται σε αυτό, αν όχι ακολουθεί το εναλλακτικό που έχει επιδιορθωθεί.

Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του αλγορίθμου παρουσιάζουμε ένα παράδειγμα και το πως συμπεριφέρεται στα λάθη που μπορούν να παρουσιαστούν.

Η τοπολογία που χρησιμοποιούμε για το παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 5.1.3.1.1



:

Σχήμα 5.1.3.1.1 Τοπολογία παραδείγματος εκτέλεσης αλγορίθμου

Αρχικά εγκαθιδρύονται το εναλλακτικό, το κύριο και τα προς τα πίσω μονοπάτια. Επιπλέον καθορίζεται ο κόμβος που θα είναι η ρίζα του SPT. Όταν εντοπιστεί το σφάλμα μεταξύ των κόμβων LSR5 και LSR7 εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Gonfa. Η ροή δρομολογείται από το προς τα πίσω μονοπάτι LSR5-LSR3-LSR4 και θα μεταφερθεί στο εναλλακτικό μονοπάτι LSR4 –LSR6-LSR8-LSR10-LSR11. Όταν ο LSR3 παραλαμβάνει τη ροή από το προς τα πίσω μονοπάτι καταλαβαίνει ότι υπάρχει πρόβλημα στο κύριο μονοπάτι και το δρομολογεί στο εναλλακτικό μονοπάτι. Κάθε κόμβος ενημερώνει τις δομές του. Το SPT τροποποιείται σύμφωνα με τα νέα δεδομένα. Έπειτα ακολουθεί σφάλμα μεταξύ των κόμβων LSR3 και LSR4. Ο αλγόριθμος Gonfa δεν μπορεί να λύσει το πρόβλημα καθώς το λάθος έχει ανιχνευτεί στο εναλλακτικό του μονοπάτι για το οποίο δεν υπάρχουν προς τα πίσω μονοπάτια εγκατεστημένα. Το δίκτυο θα αποκατασταθεί σύμφωνα με τον αλγόριθμο Gonfa. Το SPT του προς τα πάνω κόμβου LSR3 τροποποιείται. Σαν δεύτερο βήμα του αλγορίθμου Otel βρίσκουμε το SPT υπόδεντρο με ρίζα τον προς τα κάτω κόμβο του σφάλματος και αυτός ο κόμβος μαζί με τα παιδιά του γίνονται απροσέγγιστοι (εδώ μόνο το LSR4). Ελέγχεται αν ο κόμβος προορισμός ανήκει στο SPT υπόδεντρο. Δεν ανήκει, άρα υπάρχει ήδη μονοπάτι στο οποίο μπορούμε να δρομολογήσουμε την επηρεαζόμενη ροή. Το τοπικό μονοπάτι είναι μέσω του LSR3-LSR13-LSR14 και LSR17. Μετά την δρομολόγηση της ροής συνεχίζεται ο αλγόριθμος Otel για την ενημέρωση των δομών δεδομένων. Στο τρίτο βήμα υπολογίζεται το σύνολο L που περιέχει το 4-2, και 6-2. Στο τέταρτο βήμα δημιουργούμε τις τετράδες και εισάγουμε αυτή με το μικρότερο Δ στην ουρά προτεραιότητας. Σε αυτή την

περίπτωση η τετράδα που εισάγεται στην ουρά προτεραιότητας είναι η $n = 4$ $p = 2$ $\Delta = 2$ $l = 2-4$. Έπειτα στο πέμπτο βήμα εξάγουμε από την ουρά προτεραιότητας την τετράδα με το μικρότερο Δ που είναι η $n = 4$ $p = 2$ $\Delta = 2$ $l = 2-4$. Τέλος ενημερώνουμε το SPT αφαιρώντας το κλαδί από το κόμβο LSR3 και συνδέοντας το στο κόμβο LSR2.

5.2 Αλγόριθμοι Μηχανικής Κυκλοφορίας

Αυτό που διακρίνει τους αλγορίθμους μηχανική κυκλοφορίας είναι ο σκοπός τους. Οι αλγόριθμοι μηχανικής κυκλοφορίας σκοπό έχουν να κατανέμουν το φορτίο στις περιοχές του δικτύου, σε συνέχεια, προσπαθώντας να μην φορτώνονται συνδέσεις και μονοπάτια που έχουν συμφόρηση, ανταποκρινόμενος στις πλήρεις συνθήκες ροής σε πραγματικό χρόνο. Κάθε αλγόριθμος προσπαθεί να τοποθετήσει τις ροές με το εφεδρικό εύρος ζώνης εξίσου μέσο του δικτύου ώστε να επιτρέψει περισσότερες μελλοντικές διαδρομές να γίνονται αποδεκτές στο δίκτυο και να ισορροπούν το φορτίο της κυκλοφορίας. Για να το πετύχει αυτό κάθε αλγόριθμος χρησιμοποιεί διαφορετικές μεθόδους. Οι τρεις βασικές αυτές μέθοδοι είναι : 1) η χρήση επιπλέον παραμέτρων που αφορούν το εύρος ζώνης. Τέτοιες παράμετροι είναι οι κλάσεις ανεκτικότητας. 2) Τα πολλαπλά μονοπάτια είτε εναλλακτικά, είτε κυρίως για να κατανέμεται η ροή κυκλοφορίας και 3) Τα κοινά εναλλακτικά μονοπάτια τα οποία θα εξασφαλίζουν την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου.

Οι αρχές των αλγορίθμων μηχανικής κυκλοφορίας είναι να υπάρχει πολύ καλή διαχείριση των πόρων του δικτύου ώστε να χρησιμοποιούνται οικονομικά και αξιόπιστα και τα υποσύνολα των πόρων να χρησιμοποιούνται ισάξια. Επιπλέον η μηχανική κυκλοφορίας στοχεύει στην ενίσχυση της ποιότητας υπηρεσιών του ρεύματος της κυκλοφορίας μέσα από την μικρή απώλεια πακέτων, μικρές καθυστερήσεις, μεγάλο αριθμό δεδομένων που μεταφέρονται ανά δευτερόλεπτο.

Στους πιο κάτω πίνακες παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι της μηχανικής κυκλοφορίας και ποιες από τις αρχές της μηχανικής κυκλοφορίας υποστηρίζουν. Παρουσιάζει αν έχουν στόχους απόδοσης προσανατολισμένους στην κυκλοφορία, τους πόρους ή και τα δυο και μέσα από ποια μέθοδο προσπαθούν να επιτύχουν τους στόχους τους αυτούς.

Προσανατολισμένοι στην Κυκλοφορία & Τους Πόρους			
Πολλαπλά Μονοπάτια	Κοινά Εναλλακτικά	Προτεραιότητες/ Κλάσεις Ανεκτικότητας	Συνδυασμός
			LSFSB

Πίνακας 5.2.1 Αλγόριθμοι με στόχους απόδοσης προσανατολισμένους στην κυκλοφορία και τους πόρους

Προσανατολισμένοι στους Πόρους		
Πολλαπλά Μονοπάτια	Κοινά Εναλλακτικά	Προτεραιότητες/ Κλάσεις Ανεκτικότητας
<ul style="list-style-type: none"> • Reactive 	<ul style="list-style-type: none"> • AMP • MATE • TELIC 	<ul style="list-style-type: none"> • DORA

Πίνακας 5.2.2 Αλγόριθμοι με στόχους απόδοσης προσανατολισμένους στους πόρους

Προσανατολισμένοι στους Κυκλοφορίας		
Πολλαπλά Μονοπάτια	Κοινά Εναλλακτικά	Προτεραιότητες/ Κλάσεις Ανεκτικότητας
		<ul style="list-style-type: none"> • A.B.E • Junos • Shortest Distance Extension

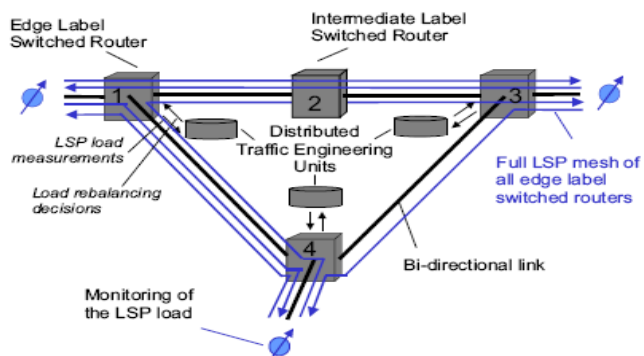
Πίνακας 5.2.3 Αλγόριθμοι με στόχους απόδοσης προσανατολισμένους στην κυκλοφορία

5.2.1 Προσανατολισμένοι στους Πόρους

5.2.1.1 Αλγόριθμος Reactive

Ο Αλγόριθμος Reactive [51] είναι ένας εξελικτικός, διανεμημένος, αντιδραστικός MPLS μηχανικής κυκλοφορίας, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βελτίωση του throughput της Best Effort ροής στα IP δίκτυα. Ο αλγόριθμος Reactive εκτελεί επαναδρομολόγηση του μονοπατιού και εξισορρόπηση σε πολλαπλά μονοπάτια.

Το σχήμα 5.2.1.1.1 δείχνει τα συστατικά του συστήματος αντιδραστικής μηχανικής κυκλοφορίας. Στην περίπτωση της επαναφοράς, κάθε κόμβος εισόδου LSR συνδέεται με κάθε κόμβο εξόδου LSR με ένα LSP. Στην περίπτωση της εξισορρόπησης σε πολλαπλά μονοπάτια, υπάρχουν δύο ή περισσότερα LSPs, τα οποία συνδέουν ένας ζεύγος LSR.



Σχήμα 5.2.1.1.1 Συστατικά του συστήματος καταμεμημένης αντιδραστικής MPLS μηχανικής κυκλοφορίας [51]

Όλοι οι κόμβοι εισόδου LSRs επανα-υπολογίζουν τα φορτία της σύνδεσης στο δίκτυο σύμφωνα με τη γνώση του μέσου φορτίου και το μονοπάτι της σύνδεσης όλων των LSPs στο δίκτυο. Ως εκ τούτου κάθε LSR κατανέμει τις πληροφορίες του μονοπατιού των LSPs κατά την αρχικοποίηση του συστήματος και μετά από κάθε επαναδρομολόγηση. Επιπρόσθετα κάθε LSR κοιτάζει το LSP φορτίο του κόμβου εισόδου και περιοδικά κατανέμει τα φορτία του LSP. Το διάστημα όπου κοιτάζει είναι στο διάστημα μερικών λεπτών. Για την κατανομή του φορτίου και του μονοπατιού χρησιμοποιείται ο μηχανισμός πλημμυρίσματος του OSPF/ISIS και οι επεκτάσεις του.

Η λειτουργικότητα της MPLS μηχανικής κυκλοφορίας κατανέμεται στους LSRs κόμβους εισόδου. Οι μονάδες MPLS TE εκτελούν τον συγχρονισμό και τους υπολογισμούς της εξισορρόπηση ξανά. Οι MPLS TE μονάδες το γνωρίζουν χρησιμοποιώντας μηνύματα ανανέωσης του LSP φορτίου και μηνύματα ανανέωσης επανα-εξισορρόπησης.

Μετά την αποστολή ή την λήψη μηνύματος ανανέωσης για το LSP φορτίο, ένα LSR αλλάζει σε κατάσταση επανα-εξισορρόπησης και περιμένει μέχρι κάθε LSR να έχει λάβει όλα τις ανανεώσεις από τις πληροφορίες που δίνονται από το πλημμύρισμα. Στην κατάσταση επανα-εξισορρόπησης ένα LSR δεν μπορεί να στέλνει πλέον ανανεώσεις για το LSP φορτίο. Τα LSRs υπολογίζουν ξανά

τα τρέχοντα φορτία των συνδέσεων και ελέγχουν αν ξεπερνούν το threshold επανα-εξισορρόπησης. Το όριο επανα-εξισορρόπησης καθορίζει το μέγιστο ανεκτό φορτίο σύνδεσης.

Σε περίπτωση υπερφόρτωσης της σύνδεσης, τα LSRs πρέπει να επιλέξουν ένα LSP για την επανα-εξισορρόπηση. Επιλέγουν το LSP όπου έχει την σύνδεση με το μεγαλύτερο φορτίο, το οποίο ταιριάζει καλύτερα για να ελαττώσει το φορτίο της σύνδεσης κάτω από το όριο επανα-εξισορρόπησης. Ο LSR πηγή εκτελεί της επανα-εξισορρόπηση του LSP. Στην περίπτωση εξισορρόπησης των πολλαπλών μονοπατιών επανα-υπολογίζει τα βάρη της κατανομής φορτίου και κατανέμει ξανά την ροή σύμφωνα με τα βάρη αυτά. Μετά από την επιτυχή επανα-εξισορρόπηση, ο LSR πηγής πλημμυρίζει με την ανανέωση επανα-εξισορρόπησης σε όλους τους κόμβους εισόδου (ingress LSRs). Τότε η διαδικασία επανα-εξισορρόπησης επαναλαμβάνει, μέχρι ούτε η σύνδεση να υπερβαίνει το threshold επανα-εξισορρόπησης ή η μη επανα-εξισορρόπηση αυξάνει την απόδοση του δικτύου.

5.2.1.2 Αλγόριθμος MATE

Ο Αλγόριθμος Multipath Adaptive Traffic Engineering (MATE) [45] χρησιμοποιείται στα MPLS δίκτυα και προσπαθεί να αποφευχθεί η συμφόρηση στο δίκτυο, ισορροπώντας προσαρμοστικά το φορτίο στα πολλαπλά μονοπάτια, σύμφωνα με την μέτρηση και ανάλυση της συμφόρησης των πορειών.

Ο MATE είναι μηχανισμός μηχανικής κυκλοφορίας που στηρίζεται στις καταστάσεις.

Τα στοιχεία του είναι: 1) αλγόριθμος για κατανομή φορτίου 2) έλεγχος ανάμεσα στους κόμβους εισόδου (ingress) και κόμβους εξόδου (egress) 3) οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν χρειάζονται επιπλέον υλικό ή πρωτόκολλο 4) Δεν χρειάζεται να είναι γνωστές οι απαιτήσεις της ροής. 5) Δεν χρειάζονται υποθέσεις στην δρομολόγηση ή την διαχείριση του buffer στους κόμβους 6) Η

απόφαση βελτιστοποίησης στηρίζεται στην συμφόρηση που υπάρχει στο δίκτυο 7) Δεν υπάρχει συγχρονισμός ανάμεσα στους κόμβους 8) Ελάχιστη επαναφορά των πακέτων.

Οι λειτουργικές ρυθμίσεις του MATE υποθέτουν ότι εδραιώνονται πολλά explicit LSPs (τυπικά από δύο μέχρι πέντε) ανάμεσα στον κόμβο εισόδου και τον κόμβο εξόδου της MPLS περιοχής. Σκοπός του κόμβου εισόδου είναι να διαμοιράσει τη ροή στα LSPs ώστε τα φορτία να ισορροπούν και να μειωθεί η συμφόρηση.

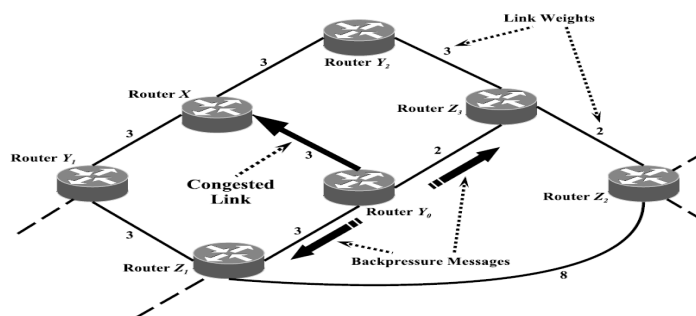
Ο MATE μπορεί να υλοποιηθεί με 1) φιλτράρισμα και διανομή της ροής (Traffic). Η λειτουργία του φιλτραρίσματος και της διανομής της ροής, αρχικά διανέμει τη ροή για να κατασκευαστεί για το ζευγάρι εισόδου-εξόδου που δίνεται ισότιμα στα N bins, που ο αριθμός τους καθορίζει το ελάχιστο ποσοστό ροής που μπορεί να μεταφερθεί. Αν η ροή που εισέρχεται για να κατασκευαστεί είναι ρυθμού R bps, κάθε bin θα λαμβάνει ποσοστό $r=R/N$ bps. Η ροή από τα N bins θα τοποθετηθεί στα LSPs σύμφωνα με τον αλγόριθμο του MATE. Η ροή μπορεί να φιλτραριστεί και να κατανεμηθεί με πολλούς τρόπους. Η πιο απλή μέθοδος είναι να κατανέμει τη ροή ανά πακέτο χωρίς φιλτράρισμα. Μετά την διανομή της ροής στα bins, πρέπει να τοποθετηθεί κάθε bin σε ένα LSP σύμφωνα με τον αλγόριθμο MATE. 2) Ανάλυση και μέτρηση της ροής . Στο MATE η διαδικασία αυτή εκτελείται από τους κόμβους εισόδου και εξόδου.

5.2.1.3 Αλγόριθμος AMP

Ο Adaptive Multi-Path routing (AMP) [27] είναι ένας νέος αλγόριθμος για δυναμική μηχανική κυκλοφορίας στο διαδίκτυο. Κύριως σκοπός είναι να κατανέμει το φορτίο στις περιοχές του δικτύου, σε συνέχεια, προσπαθώντας να μην φορτώνει συνδέσεις και μονοπάτια που έχουν συμφόρηση, ανταποκρινόμενος στις πλήρεις συνθήκες ροής σε πραγματικό χρόνο. Ο AMP

μηχανισμός σηματοδότησης επιτρέπει την ολική προώθηση των πληροφοριών για την συμφόρηση, έτσι με αποδοτικό τρόπο αντιλαμβάνεται τα γεγονότα υπερφόρτωσης στο δίκτυο.

Με το AMP, σε ένα δίκτυο ο κόμβος X είναι πληροφορημένος για τους άμεσους γείτονες του. Η προώθηση των πληροφοριών για συμφόρηση στο δίκτυο στηρίζεται στο Μηχανισμό Συμπίεσης Προς Τα Πίσω (*backpressure mechanism*). Καθώς η ροή βρίσκει αντίσταση λόγω κάποιου εμποδίου (λόγο συμφόρησης), οδηγεί στη δημιουργία μιας ακέραιης τοπικής πίεσης με δύο πιθανά συνεπακόλουθα: 1) Η πίεση αρχίζει να προωθείται αντίθετα από την κατεύθυνση της ροής (*backpressure*). Τελικά οδηγεί στην εγκατάσταση μιας νέας καθολικής πίεσης. 2) Η υπάρχουσα πίεση μπορεί να προκαλέσει την τοπική υπερχειλίση.



Σχήμα 5.2.1.3.1 Βασική ιδέα μηχανισμού Προς Τα Πίσω [27]

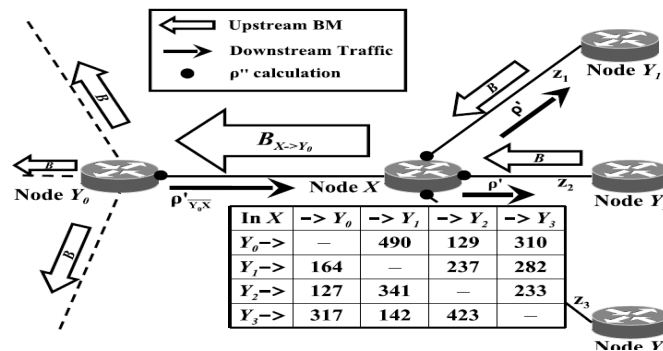
Υποθέτουμε ένα δεσποτικό κόμβο X (σχήμα 5.2.1.3.1) που έχει ένα σύνολο Ω_X από γειτονικούς κόμβους. Το Y_i ανήκει στο Ω_X , $i \geq 0$, και το XY_i δείχνει το κατευθυνόμενο σύνδεσμο που δημιουργείται από το X κόμβο στο Y_i . Με το AMP ο μόνος κόμβος που αντιδρά άμεσα είναι ο Y_0 ο ακρινός κόμβος του Y_0X , προσπαθώντας να απομακρύνει τη κίνηση μακριά από το Y_0X σε εναλλακτικά μονοπάτια. Επιπρόσθετα, ο Y_0 κόμβος περιοδικά στέλνει προς τα έξω μήνυμα συμπίεσης προς τα πίσω (*backpressure messages*- BMs) σε κάθε γειτονικό κόμβο N_j που ανήκει στο Ω_{Y_0} ώστε να πληροφορήσει το N_j για το πόσο ευθύνεται για την συμφόρηση στο σύνδεσμο

$Y0X$. Όλοι οι N_j ανήκουν στο $\Omega Y0$ με τη σειρά τους περνούν την πληροφορία στους δικούς του γειτονικούς κόμβους, με την ανάλογη ευθύνη του κάθε ενός κόμβου στην συμφόρηση κ.α. Με αυτό τον τρόπο εφαρμόζεται μηχανική κυκλοφορίας. Λειτουργώντας αυτόνομα στους κόμβους του δικτύου, κάνοντας την χρήση των τοπικών πλεονασμών (όπως τα πολλαπλά μονοπάτια) και την ίδια ώρα διατηρεί την ανταλλαγή πληροφοριών για το φόρτος τοπική (χαμηλό overhead Σε κάθε κόμβο του δικτύου, κάθε γειτονικός κόμβος που είναι πιο κοντά στον κόμβο προορισμού (σύμφωνα με το άθροισμα των βαρών των συνδέσεων) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ενδιάμεσο βήμα για να μεταφερθεί η ροή προς αυτό τον προορισμό.

Το συντομότερο μονοπάτι από το κόμβο $Y1$ στον κόμβο $Z2$ καθορίζεται από την πλήρη γραμμή, αλλά τα επιπρόσθετα μονοπάτια αναπαρίστανται με τις διακεκομμένες γραμμές. Εκτός από τα κοντινά μονοπάτια $Y1XY0Z3Z2$ and $Y1Z1Y0Z3Z2$, στους κόμβους X και $Z1$ δύο επιπρόσθετα μονοπάτια υπάρχουν σύμφωνα με το κριτήριο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Στο μονοπάτι $Y1XY2Z3Z2$ στον κόμβο X ο κόμβος $Y2$ είναι πιο κοντά στον προορισμό $Z2$ παρά ο X έτσι ο $Y2$ γίνεται ο ενδιάμεσος κόμβος για τη μεταφορά της ροής στο $Z2$ από το X . Παρόμοια στο μονοπάτι $Y1Z1Z2$, ο κόμβος $Z1$ μπορεί να πάει κατ' ευθείαν στον κόμβο $Z2$ σύμφωνα με το χαλαρό κριτήριο καλύτερου μονοπατιού.

Θεωρούμε τη σύνδεση $Y0X$ από το σχήμα 5.2.1.3.2 σαν παράδειγμα για να περιγραφούν οι πληροφορίες που χρειάζονται από το $Y0$ για κάθε μια από τις συνδέσεις εξόδου της. $Y0$ χρειάζεται δύο τύπους πληροφοριών: 1) Το ισοδύναμο φορτίο του $Y0X$, 2) Πληροφορίες για την έκταση στην οποία η ροή θα δρομολογηθεί από το $Y0$ μέσω του X . Οι πληροφορίες που χρειάζονται από το $Y0$ πρέπει να τις πάρουμε από άλλους κόμβους μέσω σηματοδότησης. Η AMP δημιούργησε ένα συγκεκριμένο τύπο μηνύματος σηματοδότησης που στέλνεται ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους που καλούνται *backpressure messages* (BMs). $BM(X, Y0)$, είναι το backpressure message που στάλθηκε από τον κόμβο X στον κόμβο $Y0$, πρέπει να περιέχει πληροφορίες για την

ακριβή κατάσταση του φορτίου στις συνδέσεις XY_i , $i \geq 1$, καθώς λαμβάνονται πληροφορίες άμεσα από downstream κόμβους. Όπως σημειώνεται στον κόμβο X από τους κόμβους Y_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, όπου n είναι ο αριθμός των εξωτερικών συνδέσεων για το X . Για να διατηρηθεί μικρό το μέγεθος του σήματος οι $2n$ παράμετροι τοποθετούνται στο $BX \rightarrow Y_0$ που περιγράφει την κατάσταση της συμμόρφωσης στον downstream link του κόμβου X



Σχήμα 5.2.1.3.2 παράδειγμα Backpressure Message (BM) από τον X στο Y_0 και in/out πίνακα στον κόμβο X [27].

Το $BX \rightarrow Y_0$ μπορεί να θεωρηθεί σαν μια συνάρτηση από τις $2n$ παραμέτρους $BX \rightarrow Y_0 = f(\rho_{XY_1}, \dots, \rho'_{XY_n}, BY_1 \rightarrow X, \dots, BY_n \rightarrow X)$. Αθροίζουμε τις καταστάσεις κάθε σύνδεσης XY_i με τη συνάρτηση g , $g_i = g(\rho'_{XY_i}, BY_i \rightarrow X)$, $i = 1, \dots, n$ (3.2.4).

Ο υπολογισμός της $BX \rightarrow Y_0$ καθορίζεται αθροίζοντας τις n παραμέτρους. Τα μηνύματα backpressure ανταλλάσσονται σχετικά γρήγορα ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους.

Ο αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου του (load balancing algorithm) AMP εκτελεί ανά κόμβο κατανομή φορτίου και σε κάθε επανάληψη ο αλγόριθμος θα αλλάζει το σχετικό hash space που μοιράζεται στα διακριτά next hops για κάθε προορισμό ξεχωριστά. Το ποσοστό της συνολικής ροής διαμοιράζεται στις λιγότερο φορτωμένες συνδέσεις και η περίοδος ελέγχου να αυξάνεται

εκθετικά. Σε περίπτωση που ένας από τους συνδέσμους που παραλαμβάνουν γίνει critical (υπερφορτωμένος), ο αλγόριθμος εξισορρόπησης φορτίου θα αρχίσει να μοιράζει την ροή μακριά από το νέο critical σύνδεσμο εξόδου σε άλλες συνδέσεις με εκθετικά βήματα. Όταν ο επόμενος σύνδεσμος γίνει critical, η κατεύθυνση της ροής αλλάζει κ.ο.κ.

5.2.1.4 Αλγόριθμος TELIC

Ο αλγόριθμος TELIC [34][36], είναι ένας αποδοτικός δυναμικός αλγόριθμος ο οποίος χρωματίζει τις ακμές του δικτύου προσπαθώντας να επιτύχει QoS στα μονοπάτια σε ένα MPLS δίκτυο. Εφαρμόζει έναν αριθμό κανόνων στο δίκτυο ώστε να δεσμεύσει τους LSP κόμβους και να εξασφαλίσει ότι θα μεταδίδουν τα πακέτα δεδομένων στο δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη τις Diffserv κλάσεις που προσφέρονται από το δίκτυο και τις δυναμικές μετρικές για τον χρωματισμό των ακμών.

Ο TELIC επεξεργάζεται τα μηνύματα LSP που αποστέλλονται στον κόμβο εισόδου του MPLS-Diffeserv δικτύου. Στο κάθε μήνυμα LSP δηλώνονται το εύρος ζώνης και η κατηγορία υπηρεσίας που απαιτούνται. Λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες αυτές προσπαθεί να καθορίσει τον καλύτερο LSP κόμβο ώστε να τηρούνται οι προαπαιτήσεις που τέθηκαν. Μόλις γίνει αυτό το βήμα, θα καταχωρήσει τον κόμβο στον πίνακα δρομολόγησης του κεντρικού LSP κόμβου στον κόμβο εισόδου και θα ανανεώσει τις αποθηκευμένες πληροφορίες για τις ακμές που ενώνονται στον εν λόγω κόμβο. Εάν δεν βρεθεί κάποιος κόμβος που να πληρεί τις απαιτήσεις που έχουν καθοριστεί τότε θα επανακαταχωρήσει κάποιον άλλο χαμηλότερης προτεραιότητας κόμβο που είναι ενεργός. Ο αλγόριθμος TELIC αναζητά το βέλτιστο μονοπάτι με το ελάχιστο κόστος ακμών όπου για το ι-οστό μονοπάτι να ισχύει η πιο κάτω εξίσωση:

$$C_i = \sum_{j=1}^N (1/B_j + D_j) * R_j$$

C_i = Κόστος του i -οστού μονοπατιού

B_j = Διαθέσιμο εύρος ζώνης της σύνδεσης j

D_j = Καθυστέρηση της σύνδεσης j

R_j = Αξιοπιστία για την σύνδεση j

Ο αλγόριθμος TELIC όταν υλοποιηθεί σε ένα δίκτυο MPLS με Diffserv διαχειρίζεται τα πακέτα δεδομένων που διοχετεύονται στα μονοπάτια του δικτύου εξασφαλίζοντας ότι θα αποστέλλονται ισόμορφα τα φορτία στις ακμές. Επιπλέον αποφεύγεται η συμφόρηση των πακέτων δεδομένων στο δίκτυο και το χάσιμο κάποιας ακμής. Υπάρχει η δυνατότητα να δεσμευτεί για δεύτερη φορά μία ακμή αφού οι απαιτήσεις που καθορίζονται είναι δυνατόν να αλλάξουν ανά πάσα στιγμή. Οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου θα διαμοιραστούν στις ακμές του, με αποτέλεσμα κάθε ακμή να μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιον αριθμό από αυτούς τους πόρους ανάλογα με την συμφόρηση στις ακμές και την σημαντικότητα των πακέτων.

5.2.1.5 Αλγόριθμος DORA

Στο αλγόριθμο DORA [46] είναι ένας δυναμικός online αλγόριθμος δρομολόγησης για την κατασκευή διαδρομών με εξασφαλισμένο εύρος ζώνης μέσα σε MPLS-enable δίκτυα. Ο αντικειμενικός στόχος του DORA αλγορίθμου είναι να τοποθετήσει τις διαδρομές με το εφεδρικό εύρος ζώνης εξίσου μέσο του δικτύου ώστε να επιτρέψει περισσότερες μελλοντικές διαδρομές να γίνονται αποδεκτές στο δίκτυο και να ισορροπούν το φορτίο της κυκλοφορίας. Κατά την διάρκεια του υπολογισμού των διαδρομών, το κλειδί του αλγορίθμου είναι να αποφύγει την δρομολόγηση μέσα από συνδέσεις οι οποίες έχουν μεγάλο ενδεχόμενο να είναι κομμάτι κάποιας άλλης διαδρομής ή να έχουν χαμηλό υπόλοιπο από διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Η λειτουργία του DORA αλγόριθμου χωρίζεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο υπολογίζει το Σημαντική Τιμή Μονοπατιού (Potential Path Value - PPV), πίνακα ο οποίος σχετίζεται με τα ζευγάρια πηγής και προορισμού και το δεύτερο στάδιο συνδυάζει την τιμή PPV με το υπολειμματικό εύρος ζώνης της σύνδεσης για να σχηματιστεί η τιμή του βάρους κάθε σύνδεσης και αυτή η τιμή χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την διαδρομή του βελτιωμένου ως προς το βάρος δίκτυα. Η κατασκευή του πρώτου σταδίου βασίζεται σε κάποιες παρατηρήσεις: Υπάρχουν πολλές διαδρομές όπου οι ροές των δεδομένων θα μπορούσαν να προσαρμοστούν μεταξύ των δεδομένων κόμβων πηγής και προορισμού και μερικές συνδέσεις έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να περιλαμβάνονται σε μια διαδρομή σε σχέση με κάποιες άλλες. Η δυνατότητα κάποιων συνδέσεων να έχουν περισσότερη πιθανότητα να περιλαμβάνονται σε μια διαδρομή παρά κάποιες άλλες συνδέσεις χαρακτηρίζεται από την τιμή του PPV.

Στο δεύτερο στάδιο θα αφαιρεθούν όλες οι συνδέσεις με που έχουν το λιγότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Η τιμή του PPV και το τρέχον διαθέσιμο εύρος ζώνης για κάθε σύνδεση συνδυάζονται μαζί για να μας δώσουν το βάρος της κάθε σύνδεσης. Το περιεχόμενο του βάρους της κάθε σύνδεσης ελέγχεται από μια παράμετρο, την BWP και παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1. Στο τέλος τρέχει ο Dijkstra αλγόριθμος για να υπολογιστούν οι βελτιωμένες ως προς το βάρος διαδρομές για κάθε κόμβο εξόδου για μια τοπολογία.

Ο αλγόριθμος DORA απορρίπτει λιγότερες αιτήσεις από άλλους αλγορίθμους δρομολόγησης. Επιπλέον στην περίπτωση σφαλμάτων στις συνδέσεις, ο αλγόριθμος απαιτεί λιγότερες διαδρομές να ξαναδημιουργηθούν και έτσι εξασφαλίζεται υψηλότερο ποσοστό επαναφοράς σε σχέση με άλλους αλγορίθμους. Επιπλέον υπολογιστικά είναι φτηνότερος.

5.2.2 Προσανατολισμένοι στην Κυκλοφορία

5.2.2.1 Αλγόριθμος A.B.E

Στον αλγόριθμο A.B.E (Available Bandwidth Estimation) [53], η επιλογή μονοπατιών γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα υπηρεσιών (QoS) για ροές που απαιτούν εύρος ζώνης και στηρίζεται στους αλγορίθμους που λαμβάνουν υπόψη το διαθέσιμο εύρος ζώνης των συνδέσεων του δικτύου. Ο αλγόριθμος προσπαθεί να προβλέψει το διαθέσιμο εύρος ζώνης και λέει την διάρκεια στην οποία ο υπολογισμός του θα παραμένει συνεπής. Για τον υπολογισμό του διαθέσιμου εύρους ζώνης πρέπει να καθοριστούν κάποιες έννοιες έτσι έχουμε: Μπορούμε να θέσουμε το διάστημα μέτρησης και μετρούμε των μέσο όρο στατιστικών για αυτό το διάστημα. Καθορίζουμε για μια σύνδεση ανάμεσα σε δύο κόμβους i και j :

- C : Χωρητικότητα της σύνδεσης σε bits per sec,
- $A(t)$: Διαθέσιμη χωρητικότητα σε χρόνο t σε bits per sec ,
- $L(t)$: Φόρτος Ροής σε χρόνο t σε bits per sec,
- τ : Μήκος του μέσου όρου διαστήματος ,
- $L\tau [k], k \in \mathbb{N}$: Μέσος όρος φορτίου σε $[(k - 1)\tau, k\tau]$.

Η διαθέσιμη χωρητικότητα δίνεται καθώς $A(t) = C - L(t)$. Έτσι είναι αρκετό να υπολογιστεί το φορτίο σε μια σύνδεση για να πάρουμε το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Επιπλέον καθορίζουμε

- p ο αριθμός των προηγούμενων μετρήσεων σε πρόβλεψη
- h ο αριθμός των μελλοντικών που προβλέπεται αξιόπιστα,
- $Ah[k]$: ο υπολογισμός στο kt που είναι έγκυρος στο $[(k + 1)\tau, (k + h)\tau]$.

Το πρόβλημα μπορεί να μετατραπεί σε γραμμική πρόβλεψη:

$$L\tau [k + a] = p-1 _ n=0L\tau [k - n]wa[n] \quad \text{για } a \in [1, h]$$

Δυναμικά αλλάζουμε τις τιμές του p και h σύμφωνα με τη δυναμική της ροής.

Χρειάζεται να λύσουμε τις εξισώσεις του Wiener- Hopf. Δίνονται με μορφή πίνακα. Για να προκύψει η αυτόματη διόρθωση της σειράς από τις διαθέσιμες μετρήσεις, την υπολογίζουμε σαν

$$rL(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} L\tau[k-i]L\tau[k-i-n]$$

Όπου το N επηρεάζει την ακρίβεια των υπολογισμών. Ο αριθμός των δειγμάτων που χρειάζεται για ένα n και N που δίνονται είναι $(n + N)$.

Η απόδοση του προτεινόμενου αλγόριθμου επιλογής μονοπατιού είναι βελτιωμένη γιατί ο διαθέσιμος αλγόριθμος υπολογισμού του εύρους ζώνης παρέχει πιο ακριβείς υπολογισμούς για το διαθέσιμο εύρος ζώνης από το να πάρει ένα στιγμιαίο δείγμα.

5.2.2.2 Αλγόριθμος JUNOS

Ο αλγόριθμος JUNOS [25] στηρίζεται στο DiffServ-Te, το οποίο δεσμεύει διαφορετικό εύρος ζώνης για διαφορετικές κλάσεις κυκλοφορίας. Αυτό γίνεται εφικτό κρατώντας στοιχεία για το πόσο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο για κάθε τύπο ροής οποιαδήποτε χρονική στιγμή στους δρομολογητές του δικτύου.

Για δέσμευση εύρους ζώνης σε ένα σύνδεσμο, ελεγχόμενη δρομολόγηση και έλεγχο αποδοχής χρησιμοποιείται το CT, όπου είναι το σύνολο των κλαδιών ροών που διασταυρώνουν ένα σύνδεσμο, και διαχειρίζονται από ένα σύνολο από περιορισμούς για το εύρος ζώνης.

Η υλοποίηση του JUNOS βάζει την κυκλοφορία που μοιράζεται την ίδια συμπεριφορά σχεδίασης στο ίδιο CT. Στο JUNOS, το CT είναι μια ουρά με τους σχετικούς πόρους. Επειδή η ανά hop συμπεριφορά (Per Hop Behavior- PHB) καθορίζεται από την ουρά και την προτεραιότητα απόρριψης, το CT μπορεί να μεταφέρει ροή από περισσότερες από μια DiffServ κλάσεις υπηρεσίας (υποθέτει ότι όλες πάνε στην ίδια ουρά σχεδίασης). Υποστηρίζονται οκτώ CTs(CT0

μέχρι CT7) . Τα LSPs που ορίζονται από τη μηχανική κυκλοφορίας για να εξασφαλίζουν εύρος ζώνης για συγκεκριμένο CT καλούνται DiffServ-TE LSPs. Η best-effort ροή οδηγείται στο CT0 και επειδή αρχικά όλα τα pre-DiffServ-TE LSPs θεωρούνται best effort, οδηγούνται στο CT0. Το μονοπάτι υπολογίζεται ως εξής: Η DiffServ-TE προσθέτει το διαθέσιμο εύρος ζώνης για κάθε μια από τις οκτώ CTs σαν ένα περιορισμό που πρέπει να εφαρμόζεται στο μονοπάτι. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης για κάθε CT σε όλα τα επίπεδα προτεραιότητας πρέπει να είναι γνωστό.

Μια TE-κλάση είναι ο συνδυασμός των (CT, προτεραιότητα). Το DiffServ-TE υποστηρίζει το πολύ οκτώ κλάσεις TE (TE0 μέχρι TE7) που επιλέγονται από 64 πιθανούς συνδυασμούς CT-προτεραιοτήτων. Στην εικόνα πιο κάτω φαίνονται οι συνδυασμοί τύπων κλάσεων και προτεραιοτήτων και η επιλογή των οκτώ TE-κλάσεων.

The TE-classes are:

TE0 (ct0, 7),
 TE1 (ct2, 7),
 TE2 (ct4, 7),
 TE3 (ct6, 5),
 TE4 (ct3, 4),
 TE5 (ct5, 4),
 TE6 (ct2, 3),
 TE7 (ct5, 2)

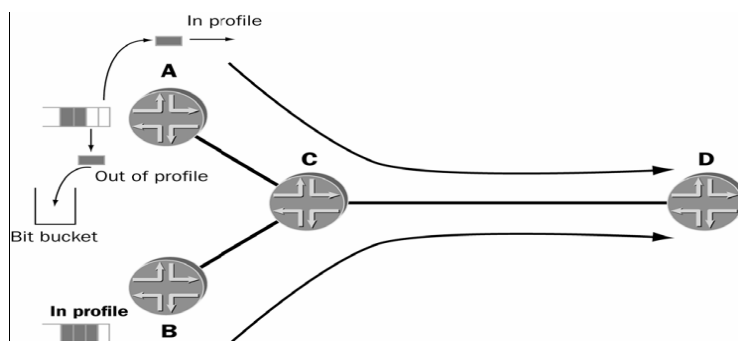
	7								
P	6								
R	5								
I	4								
O	4								
R	3								
I	2								
T	2								
Y	1								
	0								
		ct0	ct1	ct2	ct3	ct4	ct5	ct6	ct7

Class Type

Σχήμα 5.2.2.2.1 Κλάσεις Μηχανικής Κυκλοφορίας Junos [25]

Τελικά για να υπολογιστεί το μονοπάτι με περιορισμούς στο εύρος ζώνης σε κάθε CT, το CSPF αναλαμβάνει τις ανά CT απαιτήσεις πόρων και τα IGP's αναλαμβάνουν να μεταφέρουν ανά CT διαθέσιμο εύρος ζώνης σε διαφορετικά επίπεδα προτεραιοτήτων. Μετά που θα υπολογιστεί το μονοπάτι, σηματοδοτείται και ο έλεγχος αποδοχής μαζί με τον υπολογισμό του εύρους ζώνης εκτελούνται σε κάθε κόμβο.

Η υλοποίηση του JUNOS παρέχει LSP αστυνομικούς (policers). Οι αστυνομικοί επιβεβαιώνουν ότι η ροή προωθείται μέσω ενός LSP παραμένοντας στα όρια του LSP. Η ροή που βγαίνει εκτός ορίου είτε απορρίπτεται ή σημαδεύεται, επηρεάζοντας την ποιότητα υπηρεσιών του LSP που δεν συμπεριφέρεται σωστά, αλλά προστατεύει τα LSPs που συμπεριφέροντε σωστά (περνούν όλους τους συνδέσμους υποβαθμίζοντας το QoS). Αν η ροή πάει στο LSP, θα γίνει περιοχή που προστατεύεται. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 5.2.2.2



Σχήμα 5.2.2.2.2 Πως επηρεάζουν οι αστυνομικοί [25]

Η αστυνόμευση του LSP είναι ένα απλό εργαλείο που εξασφαλίζει ότι η κυκλοφορία παραμένει στα πλαίσια που ζήτησε για το LSP. Ο έλεγχος εισόδου αποτρέπει την δέσμευση των LSPs που δεν έχουν αρκετούς πόρους. Διατηρώντας τη κυκλοφορία στα όρια της δέσμευσης ενισχύεται το QoS.

5.2.2.3 Αλγόριθμος Shortest- Distance Extension

Ο αλγόριθμος Shortest- Distance Extension [40] έχει σκοπό να επιλέξει μονοπάτια με υψηλή διαθεσιμότητα σύνδεσης, καθώς την ίδια ώρα βελτιώνει την κατανάλωση των πόρων του δικτύου. Ο σκοπός επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την παράμετρο της διαθεσιμότητας των

συνδέσεων με διαφορετικούς τρόπους στην συνάρτηση κόστους για να επιλέξει μονοπάτια με μεγάλη αξιοπιστία.

Ο *SD* αλγόριθμος επεκτείνεται για να επιλέγει ένα αξιόπιστο μονοπάτι με υψηλή διαθεσιμότητα σε κάθε αίτηση ροής. Πρώτη μέθοδος είναι χρησιμοποιώντας την διαθεσιμότητα ως αρχή (policy). Έτσι έχουμε 1) *Availability Policy_Load Balancing (AP_LB)*. Με την αρχή αυτή, οι συνδέσεις με υψηλή διαθεσιμότητα είναι πιο πιθανό να επιλεγούν καθώς δίνουν καλύτερη διαθεσιμότητα 2) *Availability Policy_Hop count (AP_H)*: Υπάρχει περίπτωση να έχουν διαφορετικό κόστος και την ίδια διαθεσιμότητα. Ο λόγος είναι να ελαττωθεί το σφάλμα αν η καθολική αποκατάσταση χρησιμοποιείται για επαναφορά. Δεύτερη μέθοδος είναι χρησιμοποιώντας τη διαθεσιμότητα στην συνάρτηση κόστους. Τα *k-Shortest-Distance (k-SD)* μονοπάτια υπολογίζονται ξανά. Ανάμεσα στα *k* μονοπάτια, εφαρμόζονται δύο στρατηγικές. Πρώτη είναι η *k-SD_Availability (k-SD_A)*: Υπολογίζεται η διαθεσιμότητα κάθε μονοπατιού και επιλέγει την μια με την μέγιστη διαθεσιμότητα. Δεύτερη είναι *k-SD_A Hop count (k-SD_AH)*.

Ο αλγόριθμος αυτός δεν προσπαθεί μόνο να βρει ένα μονοπάτι με υψηλή διαθεσιμότητα αλλά ελαττώνει την επιρροή του σφάλματος.

5.2.3 Προσανατολισμένοι στην Κυκλοφορία και τους Πόρους

5.2.3.1 Αλγόριθμος LSFBS

Ο Local State Fair Share Bandwidth - LSFBS αλγόριθμος [8][9][18] είναι μια αρχιτεκτονική για μηχανική κυκλοφορίας η οποία χρησιμοποιεί τοπικές πληροφορίες. Η αρχιτεκτονική αυτή εφαρμόστηκε σε Internet Protocol Radio Access Network δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν MPLS ώστε να καταστεί δυνατή η μηχανική κυκλοφορίας για να εξασφαλίσουν την κυκλοφορία μέσα

στο RAN δίκτυο. Η αρχιτεκτονική που υλοποιήθηκε λέγεται μηχανική κυκλοφορίας router-based αρχιτεκτονική γιατί οι δρομολογητές στις άκρες του δικτύου παίρνουν τις αποφάσεις όσον τις διαδρομές στις οποίες θα πρέπει να τοποθετηθεί η κυκλοφορία που εισάγεται.

Αυτή η προσέγγιση έχει σαν στόχο να εξασφαλίσει μια φτηνή, αποδοτική και γρήγορη μέθοδο για να μειωθεί η συμφόρηση στο δίκτυο καθώς αυξάνεται το επίπεδο της ποιότητας υπηρεσιών του δικτύου σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές δρομολόγησης και μηχανικής. Οι περισσότερες προηγούμενες έρευνες μηχανικής κυκλοφορίας ασχολήθηκαν κατά κύριο λόγο με τον πυρήνα του δικτύου και την βελτιστοποίηση, ενώ δεν ασχολήθηκαν με τις απαιτήσεις του δικτύου όσον αφορά την ταχύτητα.

Για να είναι αποτελεσματικό ένα σύστημα μηχανικής κυκλοφορίας πρέπει να είναι πολύ γρήγορο για να κάνει δυνατή όλη τη δρομολόγηση ή σχεδόν όλη την δρομολόγηση των QoS πακέτων. Επιπλέον θα πρέπει να μην κοστίζει ακριβά όσον αφορά την χρήση των πόρων δηλαδή λεφτά και πληροφορίες αλλά και να παρέχει και μια λύση στο πρόβλημα QoS. Η απλότητα του LSFSB το κάνει κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα MPLS.

Ο αλγόριθμος LSFSB χρησιμοποιεί μια αναλογική δέσμευση του εύρους ζώνης του πυρήνα, επιτρέποντας την δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης του πυρήνα του δικτύου χωρίς εξωτερικά σήματα. Η αναλογική δέσμευση του εύρους ζώνης του πυρήνα καθορίζεται αρχικά από την συνδεσιμότητα κάθε ακρινού κόμβου στο δίκτυο ξεχωριστά. Ο αλγόριθμος είναι μια συνάρτηση του προορισμού της ροής στο δίκτυο και το εύρος ζώνης των ποικίλων συνδέσεων που αποτελούν το δίκτυο.

Ο LSFSB είναι ένας απλός αλγόριθμος και χρειάζεται ελάχιστη γνώση της κατάστασης του δικτύου και χρησιμοποιεί τους δρομολογητές των άκρων του δικτύου για να πάρουν αποφάσεις

όσον αφορά τις MPLS διαδρομές όπου θα τοποθετηθεί η κυκλοφορία. Αποτελείται από δύο στάδια.

Στάδιο 1 :

Στο πρώτο στάδιο του αλγορίθμου εκπληρώνει τον καταμερισμό της χωρητικότητας του πυρήνα και χρησιμοποιεί ένα Widest Shortest Path αλγόριθμο για να επιλέξει την διαδρομή από ένα σύνολο διαδρομών για κάθε ροή κυκλοφορίας. Μόλις η χωρητικότητα είναι πλήρης ο αλγόριθμος προχωρά στο δεύτερο στάδιο. Το δεύτερο στάδιο χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα του πρώτου σταδίου για να επιλέξει την διαδρομή από ένα σύνολο διαδρομών.

Στάδιο 2:

Το δεύτερο στάδιο επιτρέπει στον LSFSB αλγόριθμο να υπερφορτώσει το δίκτυο και να χρησιμοποιεί σαν πλεονέκτημα τις ικανότητες διάσπασης του IP και DiffServ. Το δεύτερο στάδιο δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει τον Widest Shortest Path αλγόριθμο όπως στο πρώτο στάδιο γιατί ο Widest Shortest Path αλγόριθμος προσδιορίζεται μόνο για διαδρομές με την αναμενόμενη χωρητικότητα.

Πιο κάτω θα γίνει ανάλυση ενός συνόλου υπολογισμών που καθιστά ικανό το κάθε RAN να κάνει συνεχή υπολογισμό και μια δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης του πυρήνα του RAN δικτύου.

Στάδιο 1 : Υποθέτουμε πως το β_c αντιπροσωπεύει το συνολικό εύρος ζώνης του πυρήνα του RAN:

$$\beta_c = \sum_{x,y} l_c^{x,y}$$

Καθορίζουμε μια συνάρτηση για να διαμοιράσουμε το β_c μεταξύ A_k και των G_i σαν συνάρτηση

του g_T^k

$$\Gamma = 1 - (g_T^k * 0.5)$$

Υποθέτουμε β_a αντιπροσωπεύει την διαθέσιμη χωρητικότητα του πυρήνα για όλα όλους τους ακρινούς κόμβους. Έπειτα :

$$\beta_a = \Gamma \cdot \beta_c$$

Στην συνέχεια καθορίζουμε συνάρτηση β_a^k για να διαμοιράσουμε το β_a μεταξύ όλων των ακρινών κόμβων RAS(A_k).

$$\beta_a^m = \left(\frac{\sum_{y \in n} l_c^{n,y}}{\sum_y l_c^{j,y}} \right) \left(\frac{l_a^{m,n}}{\sum_{k \in n} l_a^{k,n}} \right)$$

Υποθέτουμε ότι το β_a^k αντιπροσωπεύει την χωρητικότητα του πυρήνα που καθορίζεται από τους

RAS(A_k). Εν συνεχεία,

$$\beta_a^k = \alpha_a^k \cdot \beta_a$$

Τελικά, ο κάθε ακρινός κόμβος θα διανέμει το β_a^k στις συνδέσεις $l_c^{n,y}$ οι οποίες είναι συνδεδεμένες με τους ενδιάμεσους με τον πυρήνα αναλογικά με το εύρος ζώνης αυτών των συνδέσεων. Έπειτα:

$$\beta_a^m \left(l_c^{n,y} \right) = \left(\frac{l_c^{n,y}}{\sum_y l_c^{n,y}} \right) \cdot \beta_a^m$$

Στάδιο 2: Υποθέτουμε ότι οι ακρινοί κόμβοι θα αποδεχτούν την QoS κυκλοφορία στα όρια των

συνδέσεων. Εάν το β_a^k είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το $l_a^{j,k}$ για κάθε ακρινό κόμβο, το πρώτο

στάδιο του LSFSB αλγορίθμου θα αφήσει τους ακρινούς κόμβους να βάλουν όση περισσότερη κυκλοφορία μέσα στον πυρήνα του δικτύου. Εάν το $\beta \frac{k}{a}$ είναι μικρότερο από το $1 \frac{j,k}{a}$ για κάθε ακρινό κόμβο υπάρχουν δύο πιθανές συνθήκες σε λειτουργία. Η μια περίπτωση είναι να λειτουργεί το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου και να μην επιτραπεί η είσοδος επιπρόσθετης κυκλοφορίας έτσι το δίκτυο δεν θα δεχτεί περισσότερη κυκλοφορία από αυτή που ο πυρήνας μπορεί να εξυπηρετήσει. Υπάρχει όμως η πιθανότητα να γίνει το graceful degradation του DiffServ, όπου πραγματοποιείται το επιπρόσθετο στάδιο overload όπου γίνεται 1) Διανομή της εισερχόμενης κυκλοφορίας σύμφωνα με την ροή δια μέσου των κατάλληλων διαδρομών σε αναλογία με την συνολική διανομή των διαδρομών που έγινε κατά το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου. 2) Παρακολούθηση της αποστολής των ροών κατά το πρώτο στάδιο και αντικατάσταση αυτών των ροών που φεύγουν για να ανανεωθεί η διανομή των διαδρομών.

* $1 \frac{j,k}{a}$ εύρος ζώνης συνδέσεων που ενώνουν τους ακρινούς κόμβους με τον πυρήνα.

* $1 \frac{x,y}{c}$ εύρος ζώνης συνδέσεων πυρήνα

5.3 Αλγόριθμοι που συνδυάζουν Ανοχή Σφαλμάτων και Μηχανική Κυκλοφορίας

Οι αλγόριθμοι μηχανικής κυκλοφορίας είναι οι αλγόριθμοι, οι οποίοι στοχεύουν στο να εξασφαλίζεται η κατανομή του φορτίου στις περιοχές του δικτύου, χωρίς να φορτώνονται οι συνδέσεις και μονοπάτια που έχουν συμφόρηση, ανταποκρινόμενοι στις πλήρεις συνθήκες ροής σε πραγματικό χρόνο και θα μπορεί να επαναφερθεί μετά από σφάλματα χωρίς απώλειες πακέτων, καθυστερήσεις, με σωστή σειρά παραλαβής πακέτων. Οποιαδήποτε στρατηγική επαναφοράς μετά από σφάλμα στο δίκτυο πρέπει να λαμβάνει

υπόψη τις διάφορες απαιτήσεις ανεκτικότητας για τις ροές μονής κυκλοφορίας, ώστε να αποφεύγουν την υπερβολική χρήση των εφεδρικών μονοπατιών. Η εφαρμοσμένη μηχανική κυκλοφορίας που επιτρέπει την πρόνοια της ανεκτικότητας του δικτύου είναι αυτό που προσφέρουν οι αλγόριθμοι που συνδυάζουν ανοχή σφαλμάτων και μηχανικής κυκλοφορίας. Είναι οι αλγόριθμοι που παρέχουν επαναφορά χωρίς απώλεια πακέτων, καθυστερήσεις και ταυτόχρονα οι πόροι του δικτύου όπως το εύρος ζώνης χρησιμοποιούνται αποδοτικά.

5.3.1 Αλγόριθμος TSMP

Ο αλγόριθμος Threshold Sharing Multiple Paths (TSMP) [48] είναι μια νέα προσέγγιση για την ανοχή σφαλμάτων στα MPLS δίκτυα που μπορεί να ανεχτεί ένα ή πολλαπλά σφάλματα. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί το αλγόριθμο (k, n) threshold sharing με δρομολόγηση σε πολλαπλά μονοπάτια. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει την δυνατότητα του δικτύου να συνεχίζει να εργάζεται χωρίς απώλεια πακέτων, καθυστέρηση επαναφοράς και με λογική χρήση των πόρων του δικτύου, σε περίπτωση σφαλμάτων στα LSPs. Στον αλγόριθμο αυτό χρησιμοποιούνται τα σχήματα προστασίας γρήγορης επαναφοράς.

Η νέα αυτή προσέγγιση στηρίζεται στο Threshold Sharing Scheme συνδυασμένο με δρομολόγηση σε πολλαπλά μονοπάτια.. Η ιδέα πίσω από το TSS είναι να μοιράσει το μήνυμα σε n τμήματα, καλούνται shadows ή τμήματα, ώστε οποιαδήποτε k από αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναδομήσουν το αρχικό μήνυμα.

Όταν ένα IP πακέτο μπαίνει σε ένα MPLS δρομολογητή εισόδου, μια διαδικασία κατανομής χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει τα n κομμάτια του μηνύματος, το οποίο θα γίνει το ωφέλιμο

φορτίο για τα MPLS πακέτα. Αυτά τα n MPLS πακέτα δεσμεύονται στα n μέγιστα αποσυνδεδεμένα LSPs που παίρνουμε χρησιμοποιώντας την δρομολόγηση σε πολλαπλά μονοπάτια. Τα n τμήματα υπολογίζονται χρησιμοποιώντας n διαφορετικές x_i τιμές όπως συμφωνήθηκαν ανάμεσα στον αποστολέα και τον παραλήπτη. Οι τιμές για n και k επίσης χρειάζονται να καθοριστούν ανάμεσα στον αποστολέα και τον παραλήπτη. Η κατανομή και η διαδικασία της αναδόμησης εφαρμόζονται στους ακρινούς δρομολογητές που είναι υπεύθυνοι για να αναλύουν και να προωθούν τα πακέτα που εισέρχονται στο δίκτυο.

Οι βασικές διαδικασίες ορίζουν μια “peer mapping” ανάμεσα στα δύο LSRs που έχουν το ίδιο FEC/label mapping. Ο δρομολογητής εξόδου πρέπει να μπορεί να χαρτογραφεί διαφορετικές ετικέτες για το ίδιο FEC και να δεσμεύει ακριβώς κάθε ετικέτα με προς τα πάνω δρομολογητές σύμφωνα με τον αριθμό των LSPs που χρειάζονται. Οι δρομολογητές του πυρήνα σε κάθε μονοπάτι θα εφαρμόζουν κανονική (ή single) δέσμευση ετικέτας.

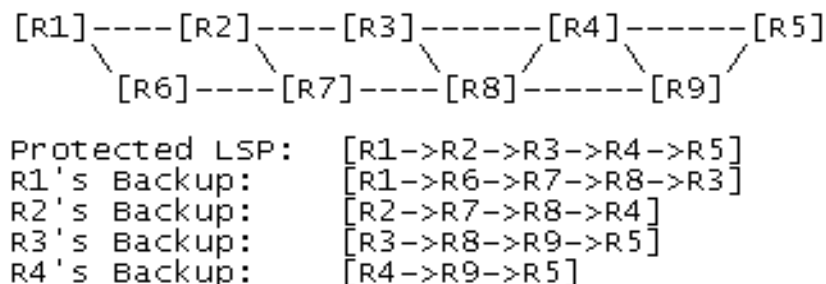
Ο δρομολογητής εισόδου επίσης χρησιμοποιεί διαφορετική ετικέτα δέσμευσης για το ίδιο FEC “Y” το οποίο αναγνωρίζει τα διαφορετικά LSPs προς τον δρομολογητή εξόδου. Γίνεται ανάθεση ενός δείκτη της τιμής x σε κάθε δέσμευση ετικέτας. Ο δρομολογητής εξόδου αντιστοίχως εφαρμόζει την ίδια τιμή x στα τμήματα που λαμβάνονται για να ανακτήσει το αρχικό IP πακέτο. Το επίπεδο του (k, n) TS σχήματος μπορεί να προσαρμοστεί στη MPLS τοπολογία δικτύου.

5.3.2 Αλγόριθμος RSVP-TE Extension

Η επέκταση του RSVP-TE [22] μπορεί να γίνει με δύο τρόπους για την εγκατάσταση εναλλακτικών LSP σηράγγων για τοπική επαναφορά των LSP σηράγγων. Επιτρέπουν την γρήγορη ανακατεύθυνση της ροής στα εναλλακτικά LSP σήραγγες.

Η μία μέθοδος είναι η ένα – προς – ένα εναλλακτική (one-to-one backup) μέθοδος όπου δημιουργεί LSPs παράκαμψης για κάθε προστατευμένο LSP σε κάθε κύριο σημείο της τοπικής επαναφοράς. Η άλλη μέθοδος είναι η εύκολη εναλλακτική (facility backup) μέθοδος που δημιουργεί σήραγγες παράκαμψης (bypass tunnel) για να προστατεύει τα σημεία που θα επηρεαστούν από κάποιο σφάλμα. Η σήραγγα παράκαμψης μπορεί να προστατεύει ένα σύνολο από LSPs που έχουν όμοιους εφεδρικούς προορισμούς περιορισμούς. Και οι δύο μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προστατεύουν συνδέσεις και κόμβους κατά την εμφάνιση σφάλματος στο δίκτυο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ή και οι δύο από ένα δίκτυο.

Η ένα – προς – ένα εναλλακτική εδραιώνει ένα μονοπάτι εναλλαγής ετικετών που επιδρά κάπου με το αρχικό LSP προς τα κάτω από το σημείο του σφάλματος στη σύνδεση ή τον κόμβο. Ένα ξεχωριστό εναλλακτικό LSP εδραιώνεται για κάθε LSP που γίνεται εναλλακτικό.



Σχήμα 5.3.2.1 ένα – προς – ένα εναλλακτική Τεχνική [22]

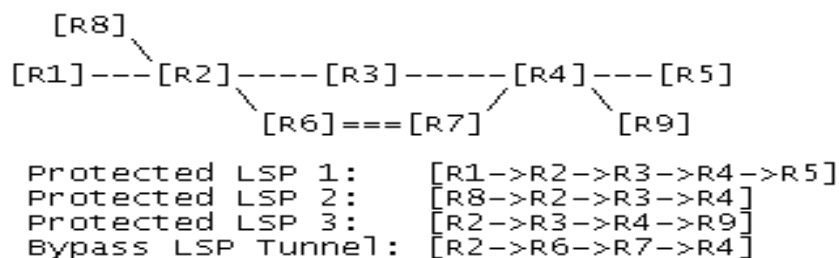
Στην απλή τοπολογία, στο σχήμα 5.3.2.1, το LSP που προστατεύεται τρέχει από το R1 στο R5. Το R2 μπορεί να παρέχει προστασία ροής δημιουργώντας μερικό εναλλακτικό LSP που προβάλλει με το LSP στο R4 που προστατεύεται, μερικό one-to-one εναλλακτικό LSP [R2->R7->R8->R4].

Για να προστατευθεί ένα LSP το οποίο διαπερνά Ν κόμβους πλήρως, μπορούν να υπάρξουν μέχρι και Ν – 1 παρακάμψεις. Το σχήμα 5.3.2.1 δείχνει τα μονοπάτια για τις παρακάμψεις που είναι

αναγκαία για να προστατεύουν πλήρως το LSP του παραδείγματος. Όταν ένα LSP παράκαμψης τέμνει το προστατευόμενο LSP σε ένα LSR με την ίδια διεπιφάνεια εξόδου, θα συγχωνευθεί.

Όταν κάποιο σφάλμα εμφανιστεί κατά μήκος του προστατευόμενου LSP, το PLR ανακατευθύνει τη ροή σε τοπική παράκαμψη. Π.χ στη σύνδεση [R2->R3] παρουσιάζει σφάλμα στο παράδειγμα 1, το R2 θα εναλλάξει τη ροή που λαμβάνει από το R1 στο προστατευόμενο LSP κατά μήκος της σύνδεσης [R2->R7], χρησιμοποιώντας την ετικέτα που παράλαβε όταν το R2 δημιουργούσε την παράκαμψη. Όταν το R4 λαμβάνει ροή με την ετικέτα να παρέχεται για την παράκαμψη του R2, το R4 θα εναλλάξει την ροή στη σύνδεση [R4->R5], χρησιμοποιώντας την ετικέτα που λαμβάνει από το R5 για το προστατευόμενο LSP. Καθώς το R2 χρησιμοποιεί την παράκαμψη του, η ροή θα πάρει το μονοπάτι [R1->R2->R7->R8->R4->R5].

Στην εύκολη εναλλακτική μέθοδο, το PLR δημιουργεί μια σήραγγα παράκαμψης που μπορεί να προστατεύσει πολλαπλά μονοπάτια. Η σήραγγα παράκαμψης πρέπει να τέμνει το μονοπάτι του αρχικού LSP(s) σε κάποιο σημείο προς τα κάτω από τον PLR. Όλα τα LSPs που περνούν μέσω του σημείου της τοπικής επαναφοράς και μέσω του κοινού κόμβου που δεν χρησιμοποιεί τις ικανότητες που συμπεριλαμβάνονται στη σήραγγα παράκαμψης διαγωνίζονται για αυτό το σύνολο των LSPs.



Σχήμα 5.3.2.2 Εύκολη Εναλλαγή Τεχνική [22]

Στο παράδειγμα 2 (Σχήμα 5.3.2.2), το R2 έκτισε μια σήραγγα παράκαμψης η οποία προστατεύει από σφάλματα στην σύνδεση [R2->R3] και τον κόμβο [R3]. Οι διπλές γραμμές αναπαριστούν τη σήραγγα. Αυτή η τεχνική παρέχει βελτίωση της επεκτασιμότητας, αυτό την ίδια σήραγγα παράκαμψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προστατεύει LSPs από οποιοδήποτε από τα R1, R2, ή R8 σε οποιοδήποτε από τα R4, R5, ή R9. Το παράδειγμα 2 περιγράφει τρία διαφορετικά προστατευμένα LSPs που χρησιμοποιούν την ίδια σήραγγα παράκαμψης για προστασία.

Όταν ένα σφάλμα συμβεί κατά μήκος του προστατευόμενου LSP, το PLR ανακατευθύνει τη ροή σε συγκεκριμένο bypass tunnel. Για παράδειγμα, αν η σύνδεση [R2->R3] παρουσιάσει κάποιο σφάλμα στο παράδειγμα 2, το R2 θα εναλλάξει τη ροή που παρέλαβε από το R1 στο προστατευόμενο LSP πάνω στη σύνδεση [R2->R6]. Αν το προτελευταίο hop-opping χρησιμοποιήθηκε, το σημείο συγχώνευσης στο παράδειγμα 2, το R4 θα λάβει το ανακατευθυνόμενο πακέτο με ετικέτα που θα δηλώνει το προστατευόμενο LSP που θα ακολουθήσει το πακέτο. Αν το προτελευταίο hop-opping δεν χρησιμοποιήθηκε, το R4 θα εξάγει την ετικέτα του bypass tunnel και θα εξετάσει την ετικέτα στο κάτω μέρος για να καθορίσει το προστατευόμενο LSP που θα ακολουθήσει το πακέτο. Όταν το R2 χρησιμοποιεί τη σήραγγα παράκαμψης για το προστατευόμενο LSP 1, η ροή παίρνει το μονοπάτι [R1->R2->R6->R7->R4->R5], τη σήραγγα παράκαμψης είναι η σύνδεση μεταξύ του R2 και R4.

5.3.3 Αλγόριθμος Provisioning

Ο αλγόριθμος Provisioning [2] χρησιμοποιεί την έννοια του LSP και το provisioning της ανεκτικότητας. Με την επαναφορά της σύνδεσης, σε περίπτωση που υπάρχει σφάλμα στο δίκτυο μια νέα LSP σήραγγα μπορεί να εγκατασταθεί για μια ομάδα από LSPs που έχουν σφάλματα για να δρομολογηθεί η ροή γύρω από το στοιχείο του δικτύου που έχει σφάλμα. Αν ένα άκρο - προς-

άκρο (end-to-end) εναλλακτικό LSP μπορεί να εγκατασταθεί την ίδια ώρα που το LSP που εργάζεται ένα μονοπάτι προστασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Προτείνεται σηματοδότηση για σφάλμα σε ενδιάμεσο στρώμα, για να ελαττώσει τον χρόνο αναγνώρισης του σφάλματος και βοηθητική επικοινωνία των στρωμάτων. Τα σφάλματα αναγνωρίζονται στις διεπιφάνειες του φυσικού επιπέδου των IP δρομολογητών, στέλνονται με σήμα στο λογισμικό του δρομολογητή και να μεταφερθούν από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Μετά που θα λάβει ένα σήμα από πιο χαμηλό επίπεδο ο IP δρομολογητής, αλλά μπορεί αμέσως να θέσει την κατάσταση του στοιχείου του δικτύου όπως αναγνωρίζεται από το σήμα του πιο κάτω επιπέδου να έχει αποτύχει. Στην συνέχεια ο δρομολογητής υπολογίζει ξανά τα μονοπάτια που επηρεάζονται από τα στοιχεία που παρουσίασαν σφάλμα, και διαφημίζουν τις αλλαγές στο μονοπάτι στους άλλους δρομολογητές.

Η επαναδρομολόγηση γίνεται με το να υπολογίζονται ξανά τα μονοπάτια και να διαφημίζονται τα νέα μονοπάτια στους γειτονικούς δρομολογητές.

5.3.4 Αλγόριθμος Resilience-Differentiated QoS (RD-QoS) Extension

Ο Αλγόριθμος Resilience-Differentiated QoS (RD-QoS) Extension [3] είναι μια επέκταση στην υπάρχουσα αρχιτεκτονική ποιότητας υπηρεσιών (QoS), όπου ενισχύει την κλασσική σηματοδότηση της ποιότητας υπηρεσιών με επιπλέον σήματα για τις απαιτήσεις της ανεκτικότητας στο δίκτυο. Στο αλγόριθμο οι απαιτήσεις ανεκτικότητας συμπεριλαμβάνονται στην σηματοδότηση των QoS, όπως είναι το εύρος ζώνης και οι απαιτήσεις για άκρο-προς-άκρο καθυστερήσεις.

Η επέκταση γίνεται ως εξής: η αρχιτεκτονική Differentiated Services (DS) πραγματοποιεί την IP ποιότητα υπηρεσιών (QoS) δίνοντας προτεραιότητα στις διάφορες υπηρεσίες στηριζόμενη στο hop-by-hop. Πιο αναλυτικά τα πακέτα κατηγοριοποιούνται, ρυθμίζονται σύμφωνα με τα όρια που υπάρχουν στο δίκτυο και ανατίθενται σε ένα σύνολο συμπεριφοράς. Η συμπεριφορά τους αυτή μπορεί να αποθηκευτεί σαν πληροφορία σε ένα πεδίο της IP επιγραφής (header) που καλείται πεδίο DS. Λόγω του πεδίου αυτού καλείται DS code points (DSCP). Ένα συγκεκριμένο DSCP επιλέγει συγκεκριμένη ανά hop συμπεριφορά (Per-Hop Behavior - PHB) για το πακέτο. Η τιμή του DSCP για κάθε σύνολο συμπεριφορών (behavior aggregates - BAs) είναι το μέσο με το οποίο γίνεται η σηματοδότηση των πακέτων με τις απαιτήσεις ανεκτικότητας.

Όταν τα πακέτα με απαιτήσεις ανεκτικότητας σφαλμάτων εισέρχονται στο DiffServ δικτύου, σηματοδεύονται είτε από την εφαρμογή είτε από κάποια συσκευή στα άκρα του. Στην περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο σφάλμα σε κόμβο ή σε σύνδεσμο, τότε προωθούνται μόνο τα πακέτα με το ψηφίο της ανεκτικότητας στην επιγραφή τους (header).

Όταν το RD-QOS επεκτείνεται με επαναφορά διαμορφώνονται οι εξής κλάσεις ανεκτικότητας:

Κλάση Ανεκτικότητας 1 (RC1) : για ροές (FECs) υπηρεσιών με υψηλές απαιτήσεις σε ανεκτικότητα και ανατίθενται σε LSP μονοπάτια με προκαθορισμένα μονοπάτια προστασίας. Μετά που θα αναγνωρισθεί κάποιο σφάλμα σε κόμβο ή σύνδεσμο του δικτύου οι ροές με χαμηλή προτεραιότητα απορρίπτονται αν υπάρχουν και μεταφέρουν το LSP στο εναλλακτικό μονοπάτι.

Κλάση Ανεκτικότητας 2 (RC2) : Για κλάσεις υπηρεσίας με μέτριες απαιτήσεις σε ανεκτικότητα (RC2) προτείνετε ένα LSP με MPLS αποκατάσταση ή σχήμα επαναδρομολόγησης. Όταν ένα LSP εγκαθιστάτε, μόνο ένα LSP στο δίκτυο σηματοδοτείται. Μετά την αναγνώριση του σφάλματος το εναλλακτικό μονοπάτι εδραιώνεται.

Κλάση Ανεκτικότητας 3 (RC3) : Για κλάσεις με μικρότερες απαιτήσεις σε ανεκτικότητα δεν διαμορφώνει κάποια μορφή επαναφοράς και δεν δεσμεύονται επιπλέον πόροι ή εναλλακτικά

μονοπάτια. Μετά την αναγνώριση κάποιου σφάλματος το δίκτυο προσπαθεί να επαναφέρει την ροή που έχει επηρεαστεί μόνο όταν έχει ολοκληρωθεί η επαναφορά του επηρεασμένων ροών για τις κλάσεις RC1 και RC2. Η εγκατάσταση των εναλλακτικών μονοπατιών της κλάσης RC3 δεν καταλαμβάνουν επιπλέον πόρους που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τα εναλλακτικά μονοπάτια της κλάσης RC2.

Κλάση Ανεκτικότητας 4 (RC4) : Τα LSPs χαμηλών απαιτήσεων που δεν έχουν απαιτήσεις όσον αφορά την ανεκτικότητα μπορούν να μεταφερθούν σαν επιπλέον κυκλοφορία χρησιμοποιώντας τους επιπλέον πόρους των κλάσεων με υψηλές απαιτήσεις (RC1 to RC3) όταν δεν υπάρχουν σφάλματα στην MPLS περιοχή. Όταν υπάρξει ανάγκη για πόρους για να καλυφτούν ανάγκες ανεκτικότητας, οι ροές της RC4 απορρίπτονται. Όταν υπάρχει RD-QoS διαθέσιμο, η MPLS επαναφορά επιτρέπει να δει από πριν την ανεκτικότητα για να εξυπηρετήσει τις διάφορες κλάσεις.

Στην RD-QoS TE διαδικασία οι πόροι που χρησιμοποιούνται για τις κλάσεις ανεκτικότητας σε κάθε σύνδεσμο πρέπει να υπολογίζονται. Οι πόροι δεσμεύονται για τα ενεργά μονοπάτια των RC1 και RC2 και για RC3. Οι απαιτήσεις των RC4 μπορούν να μοιραστούν τους πόρους των εναλλακτικών μονοπατιών των RC1 και RC2. Σε περίπτωση σφάλματος τα RC4 LSPs είναι προδεδεσμευμένα, κάνοντας τους πόρους διαθέσιμους για την αποκατάσταση των RC1 και RC2 LSPs. Οι απαιτήσεις της RC1 παίρνουν την μεγαλύτερη προτεραιότητα και δρομολογούνται πρώτες. Στην συνέχεια δρομολογούνται οι απαιτήσεις των RC2, RC3, και RC4.

Με τις κλάσεις ανεκτικότητας, οι απαιτήσεις των διαφόρων ζευγών κόμβων ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά ως προς το εύρος ζώνης, άρα οι απαιτήσεις του ζευγαριού κόμβων με το υψηλότερο εύρος ζώνης δρομολογούνται πρώτα.

5.3.5 Αλγόριθμος LDM

Ο Load Distribution over Multi-Path αλγόριθμος [30] είναι ένας αλγόριθμος μηχανικής κυκλοφορίας ο οποίος διαχωρίζει το φορτίο της κυκλοφορίας σε ένα αριθμό διαθέσιμων LSPs βασισμένος στην δυναμική κατάσταση του δικτύου για να ενισχυθεί καθώς επίσης να γίνει αντιληπτή από τους χρήστες. Ο LDM αλγόριθμος προορίζεται για την best-effort τύπου κυκλοφορίας και κατά τον τύπο αυτό δεν απαιτείται καμία απαίτηση υπηρεσιών του δικτύου. Η απόφαση δρομολόγησης για το LDM αλγόριθμο γίνεται στο επίπεδο ροής (flow-level) προκειμένου να αποφευχθούν τα γενικά έξοδα ξανα-παραγγελίας των πακέτων. Επιπλέον τα LSPs γίνονται στατιστικά από τις καθολικές πληροφορίες για την τοπολογία του δικτύου για να ελαττωθεί η καθυστέρηση και η δημιουργία LSPs. Για κάθε ροή που εισέρχεται στο δίκτυο το LSP που θα ακολουθήσει καθορίζεται δυναμικά με βάση το τρέχον επίπεδο της συμφόρησης αλλά και το μήκος της διαδρομής όσον αφορά τον αριθμό των hops.

Ο LDM αλγόριθμος μοιάζει με τον OSPF στο ότι προσπαθεί να επεκτείνει τις υποψήφιες διαδρομές που θα ιδρυθούν καθώς όταν το επίπεδο της συμφόρησης των υποψήφιων διαδρομών.

5.3.6 Αλγόριθμος Maximally Disjoint Multipaths

Ο Αλγόριθμος Maximally Disjoint Multipaths [14] είναι μια νέα στρατηγική για MPLS δρομολόγηση σε πολλαπλά μονοπάτια. Αποτελείται από το καθορισμό αποσυνδεδεμένων στο μέγιστο βαθμό πολλαπλών μονοπατιών (maximally disjoint multipaths) και συγκεκριμένων μηχανισμών επαναδρομολόγησης της ροής για επαναφορά της μετά από κάποιο σφάλμα.

Η λειτουργία είναι η εξής:

Υποθέτουμε ότι υπάρχουν c LSPs που κτίζονται ανάμεσα στην πηγή και τον προορισμό στην περιοχή του MPLS. Ο δρομολογητής εισόδου θα αποσυμπλέξει τα IP πακέτα που ταξιδεύουν στον κόμβο εξόδου σε αυτά τα LSPs. Κάθε LSP δίνεται σε ένα εξυπηρετητή (LSR) στο μοντέλο. Διαφορετικά IP πακέτα μπορούν να έχουν διαφορετικά μεγέθη, το οποίο μεταφράζεται σε διαφορετικές αιτήσεις που έχουν διαφορετικούς χρόνους εξυπηρέτησης και οι παράμετροι αυτοί του χρόνου εξυπηρέτησης προκύπτει από το μέγεθος του πακέτου. Επιπλέον διαφορετικά LSPs μπορεί να έχει διαφορετικά εύρη ζώνης.

Ένας εξυπηρετητής μπορεί να εξυπηρετήσει μόνο μια αίτηση στο μέγιστο βαθμό. Αν φτάσει κάποια άλλη αίτηση καθώς εξυπηρετεί ήδη κάποια, τότε η νέα αίτηση θα πρέπει να περιμένει στο buffer μέχρι ο εξυπηρετητής να ελευθερωθεί ξανά. Αν περισσότερες από μια αιτήσεις περιμένουν στην ουρά, τότε αυτές θα εξυπηρετηθούν με την σειρά που έχουν φτάσει.

Η στρατηγική της επαναφοράς καθορίζει την σειρά της επαναφοράς συνδέσεων που παρουσιάζουν σφάλματα, όταν υπάρχουν περισσότερες από μια. Οι πιο απλές και κοινότερες αρχές επαναφοράς είναι Ερχόμενος Τελευταίος Εξυπηρετείται Πρώτος (Last-Come-First-Serve - LCFS) και Ερχόμενος Πρώτος Εξυπηρετείται Πρώτος (First-Come-First-Serve-FCFS), όπου η σειρά επαναφοράς εξαρτάται από την σειρά εμφάνισης σφαλμάτων σε αυτές. Το κλειδί σύμφωνα με τις στρατηγικές, το οποίο στηρίζεται στις προτεραιότητες των συνδέσεων είναι ότι οι συνδέσεις με την ψηλότερη προτεραιότητα πρέπει να επαναφέρονται πιο γρήγορα ακόμα και αν το σφάλμα συνέβηκε πιο μετά. Δημιουργείται λίστα των συνδέσεων με την σειρά που θα πρέπει να επαναφερθούν. Η συνάρτηση επιλογής στηρίζεται σε τρεις παραμέτρους, το ρυθμό σφαλμάτων, το ρυθμό επαναφοράς και το εύρος ζώνης των ιδανικών συνδέσεων. Αξίζει να επαναφερθούν συνδέσεις με μικρότερο ρυθμό σφαλμάτων, με μεγαλύτερο ρυθμό επαναφοράς και με μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Η ροή για να μεταφερθεί ανάμεσα στον κόμβο εισόδου και τον κόμβο εξόδου ακολουθεί την ON-OFF διαδικασία με δύο καταστάσεις (ON – OFF). Οι ON και OFF περίοδοι κατανέμονται. Η πρώτη στρατηγική επαναφοράς καλείται Prior1 και στηρίζεται μόνο στο ρυθμό σφαλμάτων στις συνδέσεις. Η δεύτερη στρατηγική καλείται Prior2 και στηρίζεται στην συνάρτηση απόφασης (w_i). Υπολογίζεται σύμφωνα με συγκεκριμένη εξίσωση. Λαμβάνει υπόψην περισσότερες πληροφορίες για τις συνδέσεις του δικτύου για να αποφασίσει για την σειρά επαναφοράς που θα μπορεί να δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα. Εξισορροπεί τον ρυθμό σφαλμάτων, το ρυθμό επαναφοράς και το εύρος ζώνης των συνδέσεων που χρησιμοποιούνται για να περάσουν τα LSPs.

5.3.7 Αλγόριθμος MBAK

Ένας νέος αλγόριθμος που καλείται MBAK (Modified Bak's αλγόριθμος) [32] αναπτύχθηκε για να υπολογίσει συγκεκριμένα εναλλακτικά μονοπάτια, σε ένα μη κατευθυνόμενο γράφο για ζεύγη κόμβων (s, t). Ο MBAK αλγόριθμος προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την αξιοπιστία δρομολόγησης εξετάζοντας διαμοιρασμένα άκρα κατά μήκος των μονοπατιών, και τα μήκη των μονοπατιών. Το κόστος ως προς το χρόνο του MBAK είναι $T_{MBAK} = O(M \times \log N)$.

Η λειτουργία είναι η εξής:

- 1). Κτίζει το shortest path tree (SPT) το οποίο είναι ριζομένο στον κόμβο πηγή s και το SPT ριζομένο στον κόμβο προορισμό t .
- 2). Παίρνει το κοντινότερο μονοπάτι (το πρωτεύον μονοπάτι) από το s στο t $P_0(s, t)$.
- 3). Βάζει κάθε κόμβο x . Σε ένα σύνολο κόμβων T , το οποίο περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του G που δεν είναι στο $P_0(s, t)$.
- 4). Για κάθε $x \in T$, κτίζει ένα μονοπάτι $P'(s, t) = P_0(s, x) + P_0(x, t)$. Βάζει το $P'(s, t)$ σε ένα σύνολο μονοπατιών H . Αν το $P'(s, t)$ συμπεριλαμβάνει επανάληψη, ή το $P'(s, t)$ είναι διπλό μονοπάτι στο H , τότε δεν βάζουμε το $P'(s, t)$ στο H .

- 5). Ταξινόμηση του συνόλου H σε αύξουσα σειρά σύμφωνα με το μήκος του μονοπατιού και τα διαμοιραζόμενα άκρα ανάμεσα στο πρωτεύον και το σχετικό εναλλακτικό μονοπάτι.
- 6). Επιλογή δυο αποδεκτών εναλλακτικών μονοπατιών από το H εξετάζοντας τους προκαθορισμένους περιορισμούς για τα μήκη των μονοπατιών και τον αριθμό των διαμοιραζόμενων άκρων.

5.3.8 Αλγόριθμος SLCC

Ο Αλγόριθμος SLCC [2] είναι ένα σχήμα μηχανικής κυκλοφορίας με πολλαπλά μονοπάτια ανοχής σφαλμάτων για MPLS δίκτυα. Αποτελείται από το σχηματισμό των μονοπατιών που είναι αποσυνδεδεμένα στο μέγιστο και το μηχανισμό επαναδρομολόγησης ροής για επαναφορά σφάλματος. Χρησιμοποιώντας τον περιορισμό δρομολόγησης (rerouting limit) η χρήση των πόρων του δικτύου είναι βελτιωμένη. Ως εκ τούτου το προτεινόμενο σχήμα μηχανικής κυκλοφορίας είναι χρήσιμο και πρακτικό για να παρέχει μηχανική κυκλοφορίας και ανοχή σφαλμάτων στα MPLS δίκτυα.

Η επαναδρομολόγηση της ροής σε περίπτωση σφάλματος σε σύνδεση είναι: Ορίζεται ο αλγόριθμος επαναφοράς για ποιότητα υπηρεσιών (QoS) δρομολόγησης με ανοχή σφαλμάτων. Όταν κάποιος κόμβος παρουσιάσει κάποια σφάλματα, μερικά LSPs αποσυνδέονται, ώστε η ροή που υπήρχε στη σύνδεση που παρουσίασε το σφάλμα να δρομολογηθεί σε άλλα LSPs. Το πιο πάνω πρόβλημα μορφοποιείται σαν LP με $G'=(V,E')$, όπου το E' είναι το σύνολο των συνδέσεων εκτός από τις συνδέσεις στις οποίες παρουσιάστηκε το σφάλμα ως προς το αρχικό σύνολο E .

Επιπρόσθετα, η επαναδρομολογημένη ροή που υπολογίζεται με την λιγότερη προσπάθεια δίνεται ως περιορισμός : Όριο Επαναφοράς (*Reroute Limit*), το οποίο είναι το άθροισμα των ARR και MinReroute. Το MinReroute είναι η συνολική ροή που υπήρχε στο αποσυνδεδεμένο μονοπάτι

(λόγο κάποιων σφαλμάτων). Το ARR είναι το ανώτατο όριο της επιπρόσθετης ροής που επαναδρομολογείται στο μονοπάτι διαμέσου ενός ζεύγους κόμβων που δεν υπάρχουν σφάλματα μεταξύ τους.

5.3.9 Αλγόριθμος T.C.J.K.T

Ο αλγόριθμος T.C.J.K.T [52] είναι μια νέα προσέγγιση για να επιλέγονται εναλλακτικά μονοπάτια, ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα επιτυχούς αποκατάστασης του δικτύου και να ελαττωθεί ο χρόνος της αποκατάστασης. Χρησιμοποιώντας την έννοια του ισοδύναμου εύρους ζώνης, αναπτύσσεται ένα πρόγραμμα το οποίο καθορίζει ένα σύνολο από εναλλακτικά μονοπάτια, όπου ικανοποιούν τους περιορισμούς QoS και ελαττώνουν την συνολική χωρητικότητα (capacity) που χρειάζεται.

5.3.10 Αλγόριθμος Network Protection Degree

Ο αλγόριθμος Network Protection Degree [19] σε αντίθεση με τους άλλους αλγορίθμους λαμβάνει υπόψη την πιθανότητα σφάλματος στο δίκτυο ή παραμέτρους που αφορούν την ποιότητα προστασίας, όπως η απώλεια πακέτων και ο χρόνος επαναφοράς. Προτείνει λοιπόν νέες έννοιες για να υπολογίζεται ο βαθμός προστασίας του δικτύου (Network Protection Degree - *NPD*), όπως βαθμός ευαισθησίας σφάλματος (Failure Sensibility Degree - *FSD*) ή βαθμός επιρροής σφάλματος (Failure Impact Degree - *FID*).

Υπάρχουν δύο βασικά στοιχεία του *NPD*: όπως βαθμός ευαισθησίας σφάλματος (Failure Sensitivity Degree - *FSD*) και βαθμός επιρροής σφάλματος (Failure Impact Degree - *FID*). Το *FSD* αφορά την στατιστική ανάλυση σφάλματος στο δίκτυο και το *FID* αξιολογεί την επιρροή

του σφάλματος στο δίκτυο. Το *FID* εκφράζεται σε όρους γνωστών παραμέτρων όπως είναι η απώλεια πακέτων και ο χρόνος επαναφοράς.

Στο δίκτυο μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές πρόβλεψης βασισμένες σε στατιστικές λαθών. Η πιθανότητα λάθους (Link Failure Probability –*LFP*) καθορίζει τον βαθμό προστασίας. Το να καθορίζεται το *FSD* εξυπηρετεί τους παροχείς δικτύου ώστε να καθορίσουν τον επιθυμητό βαθμό προστασίας για τους πελάτες τους και τους επιτρέπει να παρέχουν ποιότητα όσον αφορά την διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία (στηρίζεται στο *SLA* - Service Level Agreement).

Η επιρροή του λάθους στο δίκτυο μετρίεται με την καθυστέρηση επαναφοράς και απώλειας πακέτων. Ο όρος καθυστέρηση επαναφοράς (Recovery Delay - *TREC*) καθορίζεται ως η περίοδος ανάμεσα στο λάθος και της επαναφοράς της ροής στο εναλλακτικό μονοπάτι. Η απώλεια πακέτων (Packet Loss -*PLS*) καθορίζεται σαν ο συνολικός αριθμός των πακέτων που χάνονται κατά την διάρκεια του *TREC*. Το *FID* υπολογίζεται βάση του *TREC* και *PLS*. Το *FSD* εκφράζει την συνολική πιθανότητα της αποτυχίας στο δίκτυο. Ένα μονοπάτι αποτυγχάνει αν οποιοδήποτε τμήμα

Η συνολική πιθανότητα λάθους σε ένα *LSP* είναι το άθροισμα των πιθανοτήτων λάθους για κάθε σύνδεσμο του. Σημαντικό θα ήταν σε κάθε τμήμα του *LSP* να ανατεθεί μια δυαδική τιμή, για να ξέρει κατά πόσο ένας σύνδεσμος πρέπει να προστατευθεί. Αυτό καθορίζεται σαν Link Protection Requirements (*LPR*). Το *LPR* θα γίνει ίσο με μηδέν (0) στους συνδέσμους όπου το *LFP* ίσο με 0 και το *LPR* θα γίνει ίσο με ένα (1) με *LFP* μεγαλύτερο του μηδέν (0). Αυτό μας επιτρέπει έναν εύκολο υπολογισμό του συνολικού αριθμού συνδέσεων του *LSP* που πρέπει να προστατευθούν (*LSP* Number of Link to Protect - *LSP_NLP*).

Σύμφωνα με τις πιο πάνω έννοιες το *FSD* μπορεί να καθοριστεί σαν ένας πίνακας πιθανότητας λάθους όλων των τρέχων LSPs (*LSP_FP*) στο δίκτυο ή σαν ένας πίνακας με το αριθμό των συνδέσεων που θα πρέπει να προστατευθούν ανά LSP (*LSP_NLP*). Η απώλεια πακέτων είναι ανάλογη στο *TREC* και στο ρυθμό μετάδοσης (transmission Rate -*RTR*). Τα πακέτα που χάνονται από τον σύνδεσμο που τα μεταφέρει προστίθενται στο τελικό αποτέλεσμα στην απώλεια πακέτων

Στηριζόμενοι στον Widest Shortest Path (WSP) έχουν προταθεί τρεις νέοι αλγόριθμοι για να προσθέτους παραμέτρους για την προστασία κατά την επιλογή κάποιου μονοπατιού. Θα πρέπει να αναπτυχθεί ένας προ-υπολογισμός ενός k-WSP αλγορίθμου. Στα κ διαφορετικά πιθανά LSPs εφαρμόζονται διαφορετικές στρατηγικές προστασίας:

- 1) **PWSP_FP**, Προστατευόμενο WSP που λαμβάνει υπόψη την πιθανότητα λάθους: Επιλέγεται το LSP με την μικρότερη πιθανότητα αποτυχίας. Επιλέγεται το *LSP_FP*
- 2) **PWSP_NLP**, Προστατευόμενο WSP που λαμβάνει υπόψη των αριθμών των συνδέσεων που θα προστατευθούν. Επιλέγεται το LSP με το μικρότερο αριθμό LSPs (*LSP_NLP*)
- 3) **PWSP_FPD**, Προστατευόμενο WSP που λαμβάνει υπόψη τις πιθανότητες σφάλματος και τις αποστάσεις ($D(i,a)$). Το πλεονέκτημα είναι ότι μειώνει την πιθανότητα σφάλματος αλλά και την επιρροή του σφάλματος (ελαττώνοντας την απόσταση $D(i,a)$). Κάθε σύνδεσμος του LSP έχει σαν βάρος το γινόμενο της απόστασης $D(i,a)$ με το LFP. Με το συνολικό άθροισμα των τιμών αυτών, επιλέγεται το LSP με την μικρότερη τιμή.

Για όλους αυτούς τους αλγορίθμους, αν υπάρχουν πολλά τέτοια μονοπάτια με τα ίδια χαρακτηριστικά, θα επιλεγόταν ένα τυχαία.

5.3.11 Αλγόριθμος FTLB

Ο αλγόριθμος FTLB (Fault Tolerant Load Balancing) [47] ψάχνει για πολλαπλά μονοπάτια που είναι ανεξάρτητα στο μέγιστο βαθμό (*maximally disjoint*) τέτοια ώστε η επιρροή σφάλματος σε

σύνδεση ή σε κόμβο να ελαττώνεται σημαντικά και η χρήση των πολλαπλών μονοπατιών να δίνει υπηρεσίες QoS πιο ανθεκτικές σε συνθήκες μη αξιόπιστου δικτύου. Ο αλγόριθμος εκμεταλλεύεται τα μερικώς χωρισμένα μονοπάτια επιλέγοντας και διατηρώντας προσεκτικά κοινές συνδέσεις έτσι ώστε να δημιουργήσει περισσότερες επιλογές. Τα υπολογισμένα μονοπάτια πρέπει να ικανοποιούν τους περιορισμούς QoS που δίνονται.

Για τον υπολογισμό των πολλαπλών μονοπατιών επεκτείνεται ο αλγόριθμος υπολογισμού ενός μονοπατιού με πολλαπλούς QoS περιορισμούς σε αλγόριθμο υπολογισμού πολλαπλών μονοπατιών που εξακολουθούν όμως να ενδιαφέρονται για μονοπάτια που ικανοποιούν QoS με πολλούς περιορισμούς. Πολλαπλά μονοπάτια μπορούν να προκύψουν με την διατήρηση κοινών συνδέσεων τα οποία πρέπει να διατηρούνται στους υπολογισμούς για να δημιουργούνται πιο εφικτά πολλαπλά μονοπάτια.

Πιο συγκεκριμένα έχουμε τον υπολογισμό ενιαίας πορείας QoS με πολλούς QoS περιορισμούς σαν αλγόριθμος κατά βάθους αναζήτησης ελαττώνοντας τα βήματα και ικανοποιώντας πολλούς QoS περιορισμούς. Ο αλγόριθμος αυτός επεκτείνεται για να εκτελεί υπολογισμούς πολλαπλών QoS μονοπατιών. Κάθε κόμβος στο δίκτυο κτίζει την κατάσταση της σύνδεσης βάση δεδομένων του με όλες τις πρόσφατες διαφημίσεις για τις καταστάσεις των συνδέσεων από άλλους κόμβους. Κάθε συνθήκη ορίζεται ως QoS μετρική και κάθε σύνδεση στο δίκτυο σχετίζεται με πολλές QoS μετρικές που μετρήθηκαν και διανεμήθηκαν πριν από κάθε κόμβο.

Βασικός σκοπός είναι να βρίσκει το πιο κοντινό μονοπάτι από αυτούς που έχουν αρκετούς πόρους σε άλλη μετρική κόστους. Κάθε QoS μετρική διαχειρίζεται με το ίδιο τρόπο.

Καθορίζουμε εναλλακτικά μονοπάτια με τις εξής συνθήκες: α) Ικανοποιούν τους QoS περιορισμούς που καθορίζονται β) Αποσυνδεδεμένα στο μέγιστο βαθμό από τα ήδη υπολογισμένα μονοπάτια γ) Ελαττώνοντας το hop count.

Ο αλγόριθμος υπολογισμού του πολλαπλού μονοπατιού μπορεί να προκύψει από τον αλγόριθμο υπολογισμού του μονού μονοπατιού με απλές τροποποιήσεις. Αυτός ο αλγόριθμος υπολογισμού του πολλαπλού παράγει αυξανόμενα ένα μονό μονοπάτι σε κάθε επανάληψη και όχι πολλαπλών μονοπατιών από την πρώτη φορά. Όλα τα μονοπάτια που είχαν δημιουργηθεί πιο πριν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του επόμενου μονοπατιού.

Μεγαλώνουμε τον QoS descriptor με δύο νέες μεταβλητές, n για το “new” και o για το “old,” για να αποθηκεύει το βαθμό του να είναι αποσυνδεδεμένο. Οι μεταβλητές αυτές ανανεώνονται ελέγχοντας αν ο κόμβος του QoS descriptor έχει ήδη συμπεριληφθεί σε ένα μονοπάτι που έχει υπολογιστεί από πριν. Το n αυξάνεται όταν ο κόμβος δεν συμπεριλαμβάνεται σε οποιοδήποτε μονοπάτι που έχει υπολογιστεί από πριν και το o αυξάνεται όταν αναγνωρίζεται σε αυτά τα μονοπάτια.

5.3.12 Αλγόριθμος RD-QoS

Ο αλγόριθμος Resilience-Differentiated QoS (RD-QoS) [1] είναι μια επέκταση στην υπάρχουσα αρχιτεκτονική ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Ενισχύει την κλασική σηματοδότηση της ποιότητας υπηρεσιών με επιπλέον σήματα για τις απαιτήσεις της ανεκτικότητας στο δίκτυο (συνδυάζει QoS και απαιτήσεις ανεκτικότητας). Ελέγχει για την υπηρεσία ανεκτικότητας στα άκρα και τον πυρήνα του δικτύου και αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα του.

Η RD-QoS αρχιτεκτονική επεκτείνει την υπάρχουσα αρχιτεκτονική για QoS, για να υποστηρίξει τις διάφορες απαιτήσεις ανεκτικότητας. Οι απαιτήσεις ανεκτικότητας συμπεριλαμβάνονται στην σηματοδότηση ανάμεσα στο δίκτυο και τις εφαρμογές.

Ο Kirstädter και Autenrieth πρότειναν τέσσερις κλάσεις ανεκτικότητας που καθορίζονται ώστε να διαφέρουν στην προστασία, την κοινή αποκατάσταση με εγγυημένους επιπλέον πόρους, μη εγγυημένη κοινή αποκατάσταση και χαμηλής προτεραιότητας κυκλοφορία η οποία μπορεί να προαγοραστεί για να ευνοηθεί η αποκατάσταση της κυκλοφορίας. Η διάκριση τους γίνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις στον χρόνο αποκατάστασης. Η διάκριση φαίνεται στον πιο κάτω πίνακα.

Service class	RC1	RC2	RC3	RC4
Resilience requirements	High	Medium	Low	None
Recovery time	10–100 ms	100 ms–1 s	1 s–10 s	n.a.
Resilience scheme	Protection	Restoration	Rerouting	Preemption
Recovery path setup	Pre-established	On-demand immediate	On-demand delayed	None
Resource allocation	Pre-reserved	On-demand (assured)	On-demand (if available)	None
QoS after recovery	Equivalent	May be temporarily reduced	May have reduced QoS	None

Πίνακας 5.3.12.1 Κλάσεις ανεκτικότητας και τα στοιχεία τους [1]

Τα στοιχεία κάθε κλάσης φαίνονται τον πίνακα 5.5.12.1 και εξηγούνται πιο κάτω.

Ροές Κυκλοφορίας της Κλάσης Ανεκτικότητας 1 (RC1): έχει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ανεκτικότητα σφαλμάτων. Για να επιτυγχάνεται η ανεκτικότητα χρησιμοποιείται η εναλλαγή σχημάτων προστασίας.

Ροές Κυκλοφορίας της Κλάσης Ανεκτικότητας 2 (RC2): έχει μέτριες απαιτήσεις σε ανεκτικότητα σφαλμάτων. Μετά την εμφάνιση κάποιου σφάλματος, αν εγκατασταθούν τα εναλλακτικά μονοπάτια, χρησιμοποιούνται μηχανισμοί γρήγορης αποκατάστασης.

Ροές Κυκλοφορίας της Κλάσης Ανεκτικότητας 3 (RC3): έχει τις μικρότερες απαιτήσεις σε ανεκτικότητα σφαλμάτων. Ο χρόνος που απαιτεί για την αποκατάσταση είναι ο πιο μεγάλος. Τα πακέτα θα δρομολογηθούν αν υπάρχουν διαθέσιμοι αρκετοί πόροι για να γίνει δέσμευση τους για να δρομολογηθεί η ροή.

Ροές Κυκλοφορίας της Κλάσης Ανεκτικότητας 4 (RC4): είναι για ροές που δεν έχουν απαιτήσεις για σφάλματα. Σε περίπτωση που κάποιο σφάλμα παρουσιαστεί τα πακέτα που βρίσκονται στην ροή με RC4 υπηρεσίες δεν θα αποκατασταθούν.

Κάθε κλάση έχει την δική της συμπεριφορά. Για να επιτευχθεί πιο αποδοτική διαχείριση των πόρων καθορίζονται κάποια επιπρόσθετα χαρακτηριστικά ανεκτικότητας. Για την αρχιτεκτονική του RD-QoS, η σηματοδότηση με το RSVP πρέπει να επεκταθεί. Αυτό που προτείνεται είναι να συμπεριλαμβάνονται οι απαιτήσεις ανεκτικότητας σφαλμάτων στον καθορισμό των πόρων του RSVP (Resource Specification- RSpec of RSVP). Όταν μια RD-QoS ροή με υψηλές απαιτήσεις ανεκτικότητας (RC1 ή RC2) εγκαθίσταται, το δίκτυο πρέπει να δεσμεύει αρκετούς πόρους ώστε σε περίπτωση σφάλματος να μπορεί να βρεθεί ένα εναλλακτικό μονοπάτι με τις την απαραίτητη ποιότητα υπηρεσιών. Τα εναλλακτικά μονοπάτια εγκαθίστανται μετά από κάποιο σφάλμα (μετά την αναγνώριση του). Όταν η ροές είναι RC3 δεν δεσμεύονται οποιοδήποτε πόροι ή εναλλακτικά μονοπάτια. Αν παρουσιαστεί σφάλμα στο δίκτυο οι ροές της RC4 κλάσης μπορεί να απορριφθούν για να ελευθερώσουν πόρους του δικτύου που χρειάζονται για τις υπηρεσίες που απαιτούν ανεκτικότητα στα σφάλματα. Αυτό συμβαίνει αν δεν υπάρχουν αρκετοί πόροι για την αποκατάσταση των ροών με περισσότερες απαιτήσεις ανεκτικότητας.

Αν οι κλάσεις ανεκτικότητας συνδυαστούν με την MPLS επαναφορά τότε για κάθε κλάση έχουμε τα εξής χαρακτηριστικά:

Κλάση Ανεκτικότητας 1 (RESILIENCE CLASS 1 (RC1): Στην κλάση αυτή ανήκουν ροές (FECs) υπηρεσιών με υψηλές απαιτήσεις σε ανεκτικότητα και ανατίθενται σε LSP μονοπάτια με προκαθορισμένα μονοπάτια προστασίας. Μετά που θα αναγνωρισθεί κάποιο σφάλμα σε κόμβο ή σύνδεσμο του δικτύου οι ροές με χαμηλή προτεραιότητα απορρίπτονται και μεταφέρουν το LSP στο εναλλακτικό μονοπάτι.

Κλάση Ανεκτικότητας 2 (RESILIENCE CLASS 2 - RC2): Για κλάσεις υπηρεσίας με μέτριες απαιτήσεις σε ανεκτικότητα (RC2) προτείνετε ένα LSP με MPLS αποκατάσταση ή σχήμα επαναδρομολόγησης. Όταν ένα LSP εγκαθίσταται, μόνο ένα LSP στο δίκτυο σηματοδοτείται. Μετά την αναγνώριση του σφάλματος το εναλλακτικό μονοπάτι εδραιώνεται.

Κλάση Ανεκτικότητας 3 (RESILIENCE CLASS 3 -RC3): Για κλάσεις με μικρότερες απαιτήσεις σε ανεκτικότητα δεν διαμορφώνει κάποια μορφή επαναφοράς και δεν δεσμεύονται επιπλέον πόροι ή εναλλακτικά μονοπάτια. Μετά την αναγνώριση κάποιου σφάλματος το δίκτυο προσπαθεί να επαναφέρει την ροή που έχει επηρεαστεί μόνο όταν έχει ολοκληρωθεί η επαναφορά του επηρεασμένων ροών για τις κλάσεις RC1 και RC2.

Κλάση Ανεκτικότητας 4 (RESILIENCE CLASS 4 - RC4): Τα LSPs χαμηλών απαιτήσεων που δεν έχουν απαιτήσεις όσον αφορά την ανεκτικότητα μπορούν να μεταφερθούν σαν επιπλέον κυκλοφορία χρησιμοποιώντας τους επιπλέον πόρους των κλάσεων με υψηλές απαιτήσεις (RC1 to RC3) όταν δεν υπάρχουν σφάλματα στην MPLS περιοχή. Όταν υπάρξει ανάγκη για πόρους για να καλυφτούν ανάγκες ανεκτικότητας, οι ροές της RC4 απορρίπτονται.

5.3.13 Αλγόριθμος TJT

Στον αλγόριθμο TJT [52] χρησιμοποιείται η έννοια του ισοδύναμου εύρους ζώνης, καθορίζει ένα σύνολο από εναλλακτικά μονοπάτια, όπου ικανοποιούν τους περιορισμούς QoS και ελαττώνουν

την συνολική χωρητικότητα (capacity) που χρειάζεται και αυξάνει την πιθανότητα να επαρκούν οι πόροι (αλλάζοντας τον τρόπο επιλογής εναλλακτικού μονοπατιού). Η διαδικασία της επαναφοράς για κάθε επηρεαζόμενη FEC στο νέο αυτό αλγόριθμο αποτελείται από τα εξής βήματα :

Βήμα 1: Αίτηση για επαναφορά: Όταν ο προς τα κάτω κόμβος LSR της σύνδεσης που παρουσίασε το πρόβλημα αναγνωρίσει το λάθος τότε θα πρέπει να ελέγξει το εναλλακτικό μονοπάτι αν διαθέτει επαρκής πόρους για να διοχετεύσει σε αυτό τη ροή στέλνοντας Restoration Request (RR) μήνυμα προς την αντίθετη κατεύθυνση κατά μήκος του εναλλακτικού μονοπατιού. Κάθε LSR υπολογίζει την ισοδύναμη χωρητικότητα που απαιτείται σύμφωνα με τους πόρους του buffer, την ποιότητα υπηρεσίας που απαιτείται και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά traffic. Αν η ακριβής χωρητικότητα είναι διαθέσιμη, το LSR κάνει τις απαραίτητες αλλαγές για την δέσμευση των πόρων και προωθεί το RR μήνυμα προς τα πίσω στο επόμενο LSR στο εναλλακτικό μονοπάτι. Αν δεν υπάρχουν οι απαραίτητοι πόροι, το LSR θα τερματίσει το RR μήνυμα και στέλνει μήνυμα αποδέσμευσης (Release Message -RM) στην κατεύθυνση που βρίσκεται ο προς τα κάτω κόμβος άκρης της σύνδεσης που παρουσίασε το πρόβλημα. Το RM θα καθαρίζει τους πόρους που έχουν ήδη δεσμευθεί κατά μήκος του εναλλακτικού μονοπατιού. Όταν ο προς τα κάτω LSR λάβει RM, θα πάει στο βήμα 2.

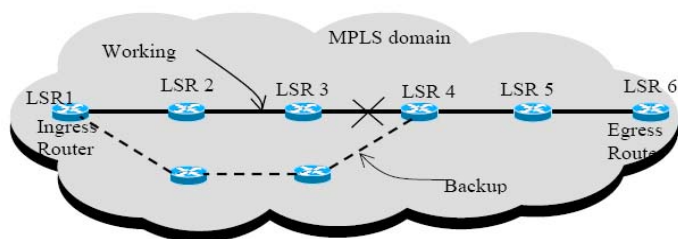
Βήμα 2: Νέα προσπάθεια για Επαναφορά : Αν το LSR στην προς τα κάτω πλευρά της σύνδεσης που παρουσιάστηκε το σφάλμα λάβει RM, θα ξαναπροσπαθήσει να ελέγξει για ακριβή πόρους σε άλλο υποψήφιο εναλλακτικό μονοπάτι. Το LSR θα αποκλείσει το μονοπάτι που είχε επιλεγεί πιο πριν από το σύνολο των εφικτών εναλλακτικών μονοπατιών.

Το βήμα 1 ξαναγίνεται και στο δεύτερο εναλλακτικό μονοπάτι. Επειδή αυτό το δεύτερο εναλλακτικό μονοπάτι δεν έχει προεδραιωθεί, το RR μήνυμα δρομολογείται με το εναλλακτικό μονοπάτι που δημιουργήθηκε από το LSR. Επιπλέον το RR μήνυμα θα μεταφέρει την ετικέτα, τις ανανεώσεις των πινάκων και αλλαγές στις δεσμεύσεις του εύρους ζώνης για κάθε LSR. Αν το RR

μήνυμα επιτύχει να περάσει κατά μήκος του υποψήφιου μονοπατιού, η διαδικασία της επαναφοράς θα πάει στο βήμα 3. Αν όμως το RR μήνυμα απορριφθεί από οποιοδήποτε LSR, ένα Release μήνυμα θα επιστραφεί και θα επιστρέψει στο βήμα 2 για τα εναπομείναντα εφικτά εναλλακτικά μονοπάτια του συνόλου. Όταν εξαντληθούν χωρίς επιτυχία τότε η ροή FEC στην οποία παρουσιάστηκε το σφάλμα δεν μπορεί να επαναφερθεί με τις QoS απαιτήσεις της.

Βήμα 3: Επαναδρομολόγηση στο εναλλακτικό μονοπάτι: Αν το RR μήνυμα προωθηθεί στο LSR στο πάνω άκρο του συνδέσμου στο οποίο παρουσιάστηκε το σφάλμα, θα αλλάξει το πίνακα δρομολόγησης ώστε να επαναδρομολογήσει τη ροή από το σύνδεσμο με το σφάλμα στο εναλλακτικό μονοπάτι.

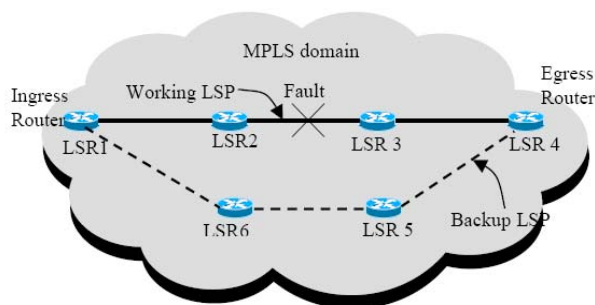
Στην περίπτωση που ο κόμβος που παρουσιάζει σφάλμα είναι ο προς τα κάτω που θα αναλάμβανε την επαναφορά τότε δεν μπορεί αυτή να γίνει. Η τμηματική επαναφορά προσπαθεί να βρει ένα εναλλακτικό μονοπάτι από αυτό τον κόμβο που ανίχνευσε το σφάλμα μέχρι τον ακρινό κόμβο εισόδου της MPLS περιοχής, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.13.1.



Σχήμα 5.3.13.1 Τμηματική επαναφορά [52]

Αν το σφάλμα συμβεί κοντά στον κόμβο εισόδου της MPLS περιοχής (ingress LSR), το εναλλακτικό μονοπάτι θα είναι μικρό και θα έχει γρήγορη επαναφορά. Αν συμβεί κοντά στον κόμβο εξόδου της MPLS περιοχής (egress LSR), η επαναφορά θα είναι αργή.

Το να επαναδρομολογείς ολόκληρο το LSP που παρουσίασε πρόβλημα σε κάποιο άλλο μονοπάτι ανάμεσα στους κόμβους εισόδου και εξόδου όπως στο σχήμα 5.3.13.2.



Σχήμα 5.3.13.2 Επαναφορά μονοπατιού [52]

Όταν το LSR αναγνωρίζει το σφάλμα θα στείλει Fault Notification μήνυμα κάτω προς τον κόμβο εξόδου της MPLS περιοχής (egress LSR) . Ένα εναλλακτικό μονοπάτι είναι προεδραιωμένο ανάμεσα στα ingress LSR και egress LSR. Όταν το egress LSR λάβει το Fault Notification μήνυμα, θα στείλει RR μήνυμα προς την αντίθετη κατεύθυνση κατά μήκος του εναλλακτικού μονοπατιού για να ελέγξει για εύρος ζώνης και δεσμεύει πόρους. Το RR μήνυμα φτάνει στο ingress LSR με επιτυχία, το LSR θα εναλλάξει την indicated FEC στο εναλλακτικό μονοπάτι. Αν οποιοδήποτε LSR κατά μήκος του εναλλακτικού μονοπατιού απορρίπτει το RR μήνυμα, ένα Release μήνυμα θα σταλεί πίσω στο egress LSR, το οποίο θα δοκιμάσει ένα άλλο εναλλακτικό μονοπάτι.

Στον νέο αλγόριθμο προτείνεται μια προσαρμοστική προσέγγιση σε περιοδική ανανέωση των επιλογών εναλλακτικών μονοπατιών. Αυτή η διαδικασία αποτελείται από δύο βήματα: 1) LSRs θα μοιράζονται τις ανανεωμένες καταστάσεις και QoS πληροφορίες μέσω του extended OSPF, και 2) τα εναλλακτικά μονοπάτια που είχαν κάποια υπεροχή από τα άλλα ξαναυπολογίζονται.

Ο κάθε νέος υπολογισμός υλοποιείται σε κανονικά διαστήματα αλλά οι ανανεωμένες πληροφορίες διαφημίζουν σημαντικές αλλαγές στη ροή έτσι μπορεί να γίνει ένας πιο γρήγορος υπολογισμός. Αν τα μονοπάτια που υπολογίζονται ξανά είναι τα ίδια από αυτά που είναι ήδη εδραιωμένα, οι LSR πίνακες δρομολόγησης ανανεώνονται με τα νέα εναλλακτικά μονοπάτια.

5.3.14 Αλγόριθμος Crankback

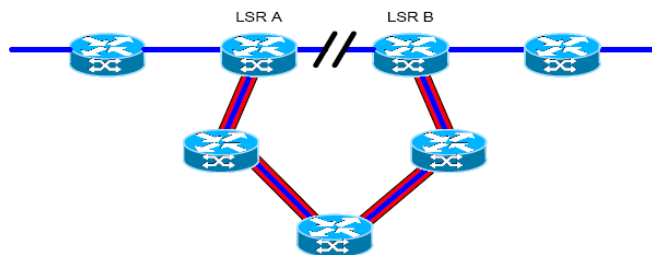
Ο αλγόριθμος Crankback [15] είναι η διαδικασία όπου αναφέρονται πληροφορίες για τα σφάλματα στο μονοπάτι πίσω κατά μήκος του μονοπατιού προς το κόμβο εισόδου. Μπορεί να γίνουν προσθήκες στο μήνυμα πρωτοκόλλου και να μεταφέρει λεπτομέρειες για το ποια σύνδεση παρουσίασε πρόβλημα και σε ποιο LSR. Παρέχει γρηγορότερη ανάδραση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθά στην επαναδρομολόγηση του LSP, ειδικά από το ingress. Όταν το LSP διασταυρώνει περιοχή ή όρια κάποιας περιοχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επαναδρομολογήσει το LSP από την περιοχή χωρίς να χρειάζεται να προωθήσει το λάθος πίσω προς το κόμβο εισόδου.

5.3.15 Αλγόριθμος Fast Re-route

Ο αλγόριθμος Fast Re-route [15] είναι η διαδικασία όπου MPLS δεδομένα μπορούν να κατευθυνθούν γύρω από τη σύνδεση που παρουσιάστηκε το σφάλμα χωρίς να εκτελεστεί οποιαδήποτε σηματοδότηση όταν αναγνωρίζεται το σφάλμα. Το σημείο επαναφοράς γίνεται το σημείο που αναγνωρίζεται το λάθος. Στηρίζεται στους εναλλακτικούς πόρους που έχουν σηματοδοτηθεί από πριν.

Όταν το σφάλμα γνωστοποιηθεί στο σημείο επαναφοράς, κάνει ανανέωση στην εναλλαγή ώστε τα δεδομένα που πριν στάλθηκαν έξω από μια διεπιφάνεια με μια ετικέτα, τώρα στέλνονται από διαφορετική διεπιφάνεια με άλλη ετικέτα.

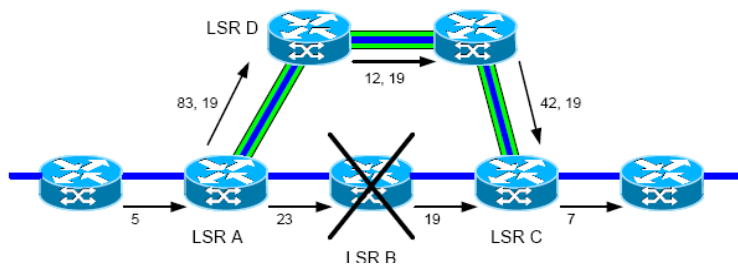
Η πιο απλή μορφή μέθοδος γρήγορης επαναφοράς καλείται προστασία τμήματος. Ένα LSP τούνελ εγκαθίσταται στο δίκτυο για να είναι το εναλλακτικό για μια τρωτή φυσική σύνδεση. Το LSP παρέχει μια παράλληλη εικονική σύνδεση. Όταν μια σύνδεση έχει σφάλμα, ο προς τα πάνω κόμβος εναλλάσσει τη ροή από τη φυσική σύνδεση στην εικονική ώστε τα δεδομένα να συνεχίζουν, με την ελάχιστη διακοπή. Το σχήμα 5.3.15.1 δείχνει ένα κόκκινο τούνελ το οποίο έχει εγκατασταθεί για να προστατεύει τη σύνδεση ανάμεσα στα LSRs A και B. Όταν η σύνδεση παρουσιάσει κάποιο σφάλμα, το μπλε LSP ανακατευθύνεται κάτω προς το κόκκινο τούνελ ώστε τα δεδομένα να εξακολουθούν να ρέουν από το A στο B.



Σχήμα 5.3.15.1 Γρήγορη Επαναφορά τμηματική προστασία [15]

Αφήνει μερικά LSPs απροστάτευτα, έτσι απαιτείται λιγότερο εύρος ζώνης. Το ιδεατό εναλλακτικό LSP χρησιμοποιείται σαν ένα LSP τούνελ. Προστέθηκε ακόμα μια ετικέτα (top label) και αυτή χρησιμοποιείται για την προώθηση των πακέτων κατά μήκος του εναλλακτικού LSP. Όταν φτάσει στην άλλη πλευρά της σύνδεσης που παρουσίασε πρόβλημα, η ετικέτα κορυφής αφαιρείται από το πακέτο και τα δεδομένα προωθούνται σύμφωνα με την προς τα κάτω ετικέτα (αυτή που χρησιμοποιούταν για την προώθηση πακέτων προς τα κάτω στη σπασμένη

σύνδεση). Υπάρχουν δύο λύσεις (1) Κατευθύνουμε την εικονική διεπιφάνεια πίσω στο αρχικό φυσική διεπιφάνεια εισόδου. (2) Χρήση του Γενικού Χώρου Ετικετών Label Space για κάθε LSPs που προστατεύονται από το εναλλακτικό τούνελ. Στο σχήμα 5.3.15.2 υπάρχει ένα πράσινο τούνελ από το LSR A στο LSR C το οποίο προστατεύει σε περίπτωση σφάλματος στο LSR B. Όταν το LSR A αναγνωρίζει το σφάλμα, το μπλε LSP επαναδρομολογείται κάτω στο τούνελ και τα δεδομένα συνεχίζουν να ρέουν. Το αντικείμενο αποτελείται από μια λίστα από LSR Ids και ετικέτες που περιγράφουν κάθε hop. Περνά προς τα πάνω κατά την εδραίωση του LSP ώστε κάθε κόμβος στο μονοπάτι γνωρίζει τις ετικέτες που χρησιμοποιούνται σε κάθε σύνδεση. Όταν η πληροφορία αυτή πάει πίσω πάνω, κάθε LSR μπορεί να ορίσει τη σωστή στοίβα ετικέτας όταν θα επαναδρομολογεί ένα LSP μετά από αποτυχία. Π.χ στο σχήμα 5.3.15.3 η πρόοδος της ετικέτας στο αρχικό LSP μέσω των LSRs A, B και C είναι 5, 23, 19, 7. Το εναλλακτικό τούνελ έχει ετικέτες 83, 12, 42. Με την χρήση προστασίας σύνδεσης έχει σαν συνέπεια τα πακέτα που στέλνονται από το LSRA στο LSR D να παίρνουν την ετικέτα (83, 23) η οποία σημαίνει ότι όταν τα πακέτα φτάσουν στο LSR C η top θα αφαιρεθεί και αφήνοντας την ετικέτα του 23 που είναι άγνωστη για το LSR C. Αν όμως η ετικέτα στέλνεται πίσω στο Record Route, το LSR A μπορεί να γνωρίζει την σωστή τιμή της ετικέτας για να χρησιμοποιήσει (19) ώστε τα πακέτα να βγαίνουν από το τούνελ προστασίας στο LSR C μεταφέροντας την ίδια ετικέτα την οποία έχουν χρησιμοποιήσει αν έχουν φτάσει στο αρχικό LSP.

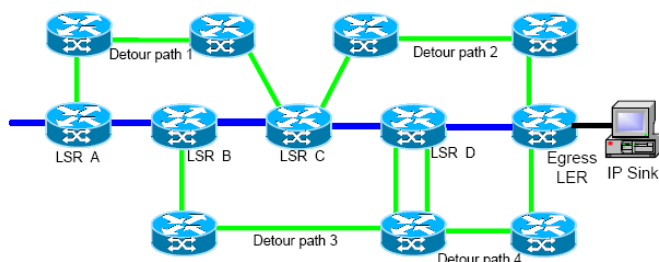


Σχήμα 5.3.15.2 Γρήγορη Επαναφορά προστασία κόμβου [15]

Δεν χρειάζεται να είναι όλα τα LSPs που περνούν μέσω συγκεκριμένου προστατευόμενα. Για να ελαττωθεί το εύρος ζώνης που απαιτείται στο εναλλακτικό tunnel ένας μπορεί να επιλέξει να αφήσει τις ροές χαμηλής προτεραιότητας απροστάτευτες. Έτσι το LSR στην αρχή του εναλλακτικού μονοπατιού πρέπει να αποφασίσει ποια LSPs να εναλλάξει στο εναλλακτικό και ποια να αφήσει

5.3.16 Αλγόριθμος Με Detours

Ο αλγόριθμος Με Detours [15] είναι ένα σχήμα γρήγορης επαναδρομολόγησης. Ένας μηχανισμός που εδραιώνει μονοπάτια παράκαμψης (detours) σε per-LSP βάση που μπορεί να δρομολογήσει τα δεδομένα γύρω από τον προς τα κάτω σύνδεσμο και τα σφάλματα του κόμβου. Στο σχήμα 5.3.16.1, το πρωτεύον μονοπάτι (μπλε), προστατεύετε από τέσσερα διαφορετικά μονοπάτια παράκαμψης (πράσινο). Τα μονοπάτια παράκαμψης εγκαθίστανται ώστε οποιοσδήποτε μονός κόμβος ή σφάλμα στη σύνδεση στο πρωτεύον μονοπάτι μπορούν να αποφευχθούν. Π.χ αν υπάρχει σφάλμα στο LSR B, τα δεδομένα μπορούν να ρέουν στο μονοπάτι παράκαμψης 1. Σφάλμα στη πρωτεύουσα σύνδεση ανάμεσα στο LSR D και το Egress μπορούν να αποφευχθούν παίρνοντας το μονοπάτι παράκαμψης 4.



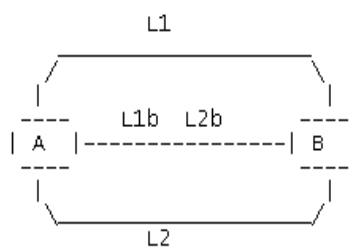
Σχήμα 5.3.16.1 Προστασία με Μονοπάτια Παράκαμψης [15]

Προτείνεται νέο RSVP μήνυμα σηματοδότησης που χρησιμοποιείται για να ζητήσει αν τα μονοπάτια παράκαμψης είναι εγκατεστημένα όταν τα πρωτεύοντα είναι. Τα LSRs που το

υποστηρίζουν αρχικοποιούν αυτόματα υπολογισμό του μονοπατιού παράκαμψης που προστατεύει το επόμενο προς τα κάτω κόμβο και σύνδεση στο πρωτεύον μονοπάτι. Οι LSRs που γειτνιάζουν με το LSR εξόδου μπορούν να υπολογίσουν detour το οποίο προστατεύει από την σύνδεση ανάμεσα σε αυτό και το κόμβο εξόδου. Για να υπολογιστούν τα μονοπάτια παράκαμψης, το LSR χρειάζεται να ξέρει 1) από ποιους προς τα κάτω κόμβους περνά το πρωτεύον μονοπάτι 2) ποια outgoing σύνδεση χρησιμοποιεί το πρωτεύον μονοπάτι 3) ποιους προς τα κάτω κόμβους θα προστατεύει 4) Τη μηχανική κυκλοφορίας που χρειάζεται για το detour. Το LSR καθορίζει τον προορισμό για το detour μονοπάτι ή το επόμενο. Μετά υπολογίζει το μονοπάτι στο προορισμό ικανοποιώντας τους εξής περιορισμούς. Το detour μονοπάτι πρέπει να ξεκινά από το τρέχον LSR. Πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της μηχανικής κυκλοφορίας. Τα detour μονοπάτια εγκαθίστανται δυναμικά.

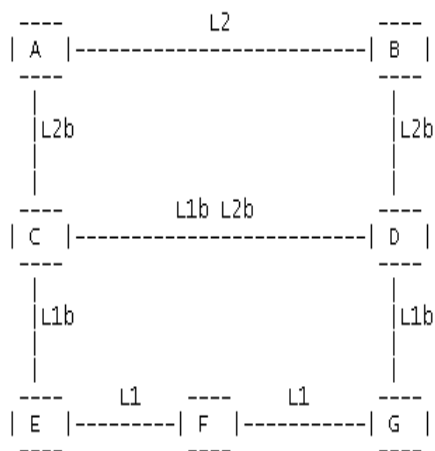
5.3.17 Αλγόριθμος Shared Backup LSP Restoration

Στον αλγόριθμο Shared Backup LSP Restoration [50] Τα εναλλακτικά LSPs μπορούν να δρομολογηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε το εύρος ζώνης να μπορεί να μοιραστεί ανάμεσα στις εναλλακτικές συνδέσεις και από περισσότερα από ένα ενεργό μονοπάτι ενώ εξακολουθεί να εγγυάται δυνατότητα επαναφοράς μετά από ένα σύνολο σφαλμάτων. Εναλλακτικό μονοπάτι που διαμοιράζεται εφαρμόζεται στην επαναφορά μετά από σφάλμα στη σύνδεση (Single Link Failure Recovery)



Σχήμα 5.3.17.1 Κοινά εναλλακτικά μονοπάτια [50]

Στο σχήμα 5.3.17.1 παρουσιάζεται μια απλή περίπτωση διαμοιρασμού εναλλακτικών μονοπατιών. Το L1b είναι το εναλλακτικό για το L1 και L2b είναι το εναλλακτικό για το L2. Το L1b και L2b μπορούν να φιλοξενηθούν στην ίδια σύνδεση και να μοιράζονται το εύρος ζώνης. Έτσι αν ένα από τα L1 ή L2 αποτύχει το σύστημα μπορεί να επανακάμψει.



Σχήμα 5.3.17.2 Προστασία σε περίπτωση σφάλματος σε κόμβο [50]

Το σχήμα 5.3.17.2 παρουσιάζει μια απλή περίπτωση διαμοιρασμού εναλλακτικών μονοπατιών. Το L1 είναι ένα ενεργό μονοπάτι κατά μήκος του E-F-G. Το αντίστοιχο εναλλακτικό του μονοπάτι L1b είναι κατά μήκος του μονοπατιού E-C-D-G. Όμοια το L2 είναι ένα ενεργό μονοπάτι κατά μήκος του A-B. Το L2b είναι το αντίστοιχο εναλλακτικό του κατά μήκος του A-C-D-B. Αν $\max\text{-bandwidth}(L1,L2)$ δεσμευτεί στη σύνδεση C-D για L1b και L2b μαζί, το σύστημα μπορεί να επιβεβαιώσει την επαναφορά μετά από κάποιο σφάλμα στον κόμβο.

Εναλλακτικό μονοπάτι που διαμοιράζεται εφαρμόζεται με τοπική επαναφορά.

Η ικανότητα διαμοιρασμού του εναλλακτικού μονοπατιού απαιτεί γενικές πληροφορίες για όλα τα LSPs στο δίκτυο που δεν είναι διαθέσιμες στον κόμβο εισόδου. Ένας κόμβος στο δίκτυο μπορεί να διατηρεί (σε τοπική βάση) explicit hop και εύρος ζώνης για τα LSPs των οποίων τα

κύρια ή τα εναλλακτικά μονοπάτια περνούν μέσα από αυτό. Ο κόμβος αυτός καθορίζει τοπικά το ποσοστό του εύρους ζώνης που θα μοιράζεται και το δεσμεύσει σε όλες τις συνδέσεις που ενώνονται άμεσα στον κόμβο. Για την σύνδεση A-B που είναι προσαρτισμένη στους κόμβους A και B, το σύνολο των ενεργών μονοπατιών των οποίων τα εναλλακτικά περνούν από την σύνδεση A-B, είναι γνωστές και των κόμβων A και B. Για κάθε σύνδεση που είναι σε ένα από αυτά τα κύρια μονοπάτια, υπολογίζει το άθροισμα αυτών των εύρων ζώνης των LSPs των οποίων το κύριο μονοπάτι παρουσιάζει κάποιο σφάλμα.

5.4 Σύγκριση Αλγορίθμων

Μετά από έρευνα και μελέτη των αλγορίθμων που υποστηρίζουν ανοχή σφαλμάτων, μηχανική κυκλοφορίας και αλγορίθμων που συνδυάζουν και τα δύο, επιλέγουμε τους καλύτερους αλγορίθμους για την μηχανική κυκλοφορίας και την ανοχή σφαλμάτων. Για την επιλογή των καλύτερων αλγορίθμων αναγκαία προϋπόθεση είναι να ορίσουμε συγκεκριμένα κριτήρια για την ανοχή σφαλμάτων και την μηχανική κυκλοφορίας με βάση τα οποία θα γίνει η επιλογή. Τα τέσσερα κριτήρια για την ανοχή σφαλμάτων είναι: (1) Ανοχή πολλαπλών σφαλμάτων.(2) Ελάχιστος χρόνος επαναφοράς. (3) Ελάχιστη Απώλεια Πακέτων.(4) Σωστή σειρά παραλαβής των πακέτων. Τα έξι κριτήρια για την μηχανική κυκλοφορίας: (1) Βελτίωση της χρήσης των πόρων του δικτύου. Όχι συμφόρηση των συνδέσεων και μη χρήση άλλων (max utilization). (2) Χρήση πολλαπλών μονοπατιών μεταξύ ζευγών κατανομή της ροής και εξισορρόπηση φορτίου. Θα πρέπει να είναι μη τεμνόμενα στον μέγιστο βαθμό για να ελαττώνεται η επιρροή από τα σφάλματα και άρα να χρειάζονται περισσότεροι πόροι για την αντιμετώπιση τους. (3) Αποθήκευση τοπικών πληροφοριών σε κάθε κόμβο (Τοπική ανταλλαγή πληροφοριών). Για να είναι χαμηλό το κόστος ως προς τις πληροφορίες. (4) Ανάγκη για γρήγορη επαναφορά σε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο (Min Delay) και άρα μεγάλος αριθμός δεδομένων που μεταφέρονται ανά δευτερόλεπτο (max Throughput). (5) Προσπάθεια για να υπάρχει ψηλό

επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών QoS. Έτσι θα εξασφαλίσει ότι το μονοπάτι θα έχει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. (6) Στηρίζεται στους ακρινούς κόμβους (Router Based - ο ακρινός κόμβος να αποφασίσει για το μονοπάτι το οποίο θα τοποθετηθεί μια ροή).

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων που συνδυάζουν και τα δυο και θα πρέπει να ικανοποιεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι: (1) Η πολυπλοκότητα θα πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα , δηλαδή οι υπολογισμοί των μονοπατιών που εκτελούνται να πραγματοποιούνται γρήγορα και εύκολα, (2) Δυναμικός αλγόριθμος. Δηλαδή θα είναι προσαρμοστικός ανάλογα με τις αλλαγές τους δικτύου, (3) Κριτήρια Μηχανικής Κυκλοφορίας, (4) Κριτήρια Ανοχής Σφαλμάτων.

Πιο κάτω περιγράφονται αναλυτικά τα κριτήρια που έχουν καθοριστεί για κάθε αλγόριθμο. Που στηρίζεται ο υπολογισμός του κάθε κριτηρίου, ποιοι παράμετροι το επηρεάζουν, πότε συμβαίνει, ποιες παραμέτρους επηρεάζει.

Ελάχιστος χρόνος επαναφοράς

Κάθε αλγόριθμος χαρακτηρίζεται από την καθυστέρηση της αποκατάστασης του MPLS δικτύου, δηλαδή το χρόνο μεταξύ της ανίχνευσης του σφάλματος και του χρόνου όταν αρχίζει να δρομολογείται η ροή στο εναλλακτικό LSP. Ο χρόνος για να ενεργοποιηθεί η εναλλακτική πορεία και να αρχίσει να μεταφέρει πακέτα μετά από ένα ελάττωμα θα πρέπει να είναι μικρός. Στην αντίθετη περίπτωση θα παρουσιαστεί απώλεια πακέτων που είναι ανεπιθύμητο.

Απώλεια πακέτων

Η απώλεια πακέτων επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό ρυθμοαπόδοσης (throughput rate) του δικτύου. Στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου η απώλεια πακέτων μπορεί να γίνει αισθητή στο

χρήστη και άρα θα πρέπει να έχει ελάχιστο ποσοστό απώλειας πακέτων. Η απώλεια πακέτων είναι ανάλογη με τον χρόνο αποκατάστασης του δικτύου. Η εύρεση των καλύτερων αλγορίθμων όσον αφορά αυτό το κριτήριο βασίζεται κυρίως στον χρόνο αποκατάστασης του κάθε αλγορίθμου ανοχής σφαλμάτων.

Παραλαβή πακέτων με λανθασμένη σειρά

Η παραλαβή των πακέτων σε λανθασμένη σειρά συμβαίνει όταν η καθυστέρηση του υφιστάμενου μονοπατιού μεταξύ δύο κόμβων είναι μεγαλύτερο από την καθυστέρηση του εναλλακτικού μονοπατιού για τους δυο κόμβους (τοπική αποκατάσταση) ή όταν η καθυστέρηση μέχρι το FIS να φτάσει στο κόμβο εισόδου μαζί με την καθυστέρηση του εναλλακτικού μονοπατιού να είναι μικρότερη σε σχέση με την καθυστέρηση του υφιστάμενου μονοπατιού (καθολική αποκατάσταση).

Ανοχή πολλαπλών σφαλμάτων

Τα διάφορα σφάλματα μπορούν να εμφανιστούν στα κυρίως ή στα εναλλακτικά μονοπάτια, σε κόμβους ή συνδέσεις. Όταν αναγνωριστούν πρέπει να αντιμετωπίζονται για να επαναφέρονται οι ροές και να συνεχίσουν να μεταφέρονται. Η επαναφορά μπορεί να γίνει είτε με την διαδικασία της εναλλαγής σε προστατευμένο μονοπάτι είτε με την επαναδρομολόγηση. Η εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι βοηθά την γρήγορη επαναφορά κατά κύριο λόγο για σφάλματα που παρουσιάζονται στα κυρίως μονοπάτια. Η επαναδρομολόγηση (δυναμικά) βοηθά την αντιμετώπιση σφαλμάτων στα εναλλακτικά μονοπάτια. Αλγόριθμοι που μπορούν και συνδυάζουν και τα δυο μπορούν να αντιμετωπίσουν τόσο τα σφάλματα στα κυρίως όσο και στα εναλλακτικά μονοπάτια εφαρμόζοντας την κατάλληλη μέθοδο κάθε φορά. Επιπλέον η επαναδρομολόγηση μπορεί να αντιμετωπίσει τα σφάλματα σε κόμβους και τα σφάλματα σε συνδέσεις αφού μπορεί

να υπολογίσει εναλλακτικά όσο σφάλματα και να παρουσιαστούν ταυτόχρονα. Η ανοχή πολλαπλών σφαλμάτων εξασφαλίζει στο δίκτυο την μη διακοπή (η μικρή διακοπή) της λειτουργίας των ροών που περνούν από αυτό.

Βελτίωση της χρήσης των πόρων του δικτύου

Όπως υποστηρίζεται και από τον ορισμό της μηχανικής κυκλοφορίας, με την βελτίωση των πόρων του δικτύου, οι πόροι του δικτύου θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ισάξια. Δηλαδή δεν θα πρέπει κάποιοι πόροι να υπερχρησιμοποιούνται και να έχουμε υπερφόρτωση στις συνδέσεις, ενώ άλλοι να μην χρησιμοποιούνται καθόλου και να χάνονται. Με την βελτίωση της χρήσης των πόρων του δικτύου εννοεί την μη συμφόρηση των συνδέσεων και μη χρήση άλλων και την μέγιστη χρήση. Η βελτίωση της χρήσης των πόρων του δικτύου χρειάζεται και πριν αλλά και μετά την εμφάνιση σφαλμάτων. Με την βελτίωση των πόρων του δικτύου εξασφαλίζει ότι θα υπάρχουν πάντα πόροι διαθέσιμοι για την εναλλαγή της ροής σε περίπτωσης του σφάλματος. \

Χρήση πολλαπλών μονοπατιών

Όταν μια ροή εισέρχεται στο δίκτυο ή θα πρέπει να επαναδρομολογηθεί, αν οι διαθέσιμοι πόροι του LSP που θα την φιλοξενήσει δεν είναι αρκετοί θα πρέπει να γίνεται κατανομή της ροής σε περισσότερα από ένα LSP ώστε να επιτυγχάνεται εξισορρόπηση φορτίου.

Τοπική ανταλλαγή πληροφοριών

Για να υπολογίζονται και να εδραιώνονται τα μονοπάτια θα πρέπει να γίνεται ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κόμβων. Αυτό γίνεται αποδοτικό αν γίνεται τοπική ανταλλαγή πληροφοριών. Για να μπορεί να υπάρξει τοπική ανταλλαγή πληροφοριών, θα πρέπει να υπάρχει

αποθήκευση τοπικών πληροφοριών σε κάθε κόμβο. Για να είναι χαμηλό το κόστος ως προς τις πληροφορίες.

Ψηλό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών QoS

Τα μονοπάτια θα πρέπει να έχουν από την αρχή και να διατηρούν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που αφορούν την ποιότητα υπηρεσιών. Έτσι θα εξασφαλίσει ότι το μονοπάτι θα έχει τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ακόμα και μετά την εμφάνιση σφαλμάτων στο δίκτυο.

Στηρίζεται στους ακρινούς κόμβους - Router Based

Για να μην επιβαρύνονται οι ενδιάμεσοι κόμβοι και να δυσκολεύονται στις υπόλοιπες διαδικασίες τους, ο ακρινός κόμβος αναλαμβάνει να αποφασίσει για το μονοπάτι το οποίο θα τοποθετηθεί μια ροή, κατά την είσοδο του στο δίκτυο. Η λειτουργικότητα του δικτύου όσον αφορά τις ροές μεταφέρεται στα άκρα του δικτύου, τα οποία αποφασίζουν για τις ροές.

Μεγάλος αριθμός δεδομένων που μεταφέρονται ανά δευτερόλεπτο (Max Throughput)

Όσο πιο γρήγορα γίνεται η επαναδρομολόγηση της ροής τότε θα ελαττώνεται ο αριθμός των πακέτων που χάνονται και θα εξακολουθούν να μεταφέρονται στο δίκτυο. Επιπλέον όταν οι πόροι του δικτύου χρησιμοποιούνται με τον βέλτιστο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν χαμένες συνδέσεις ή υπερφορτωμένες, τότε θα μεταφέρονται ροές από όλες τις συνδέσεις με αποδοτικό τρόπο και άρα θα μεταφέρονται πολλά δεδομένα ανά δευτερόλεπτο.

5.5 Αξιολόγηση Αλγορίθμων

Για να μπορεί να γίνει η επιλογή του καλύτερου αλγορίθμου από κάθε τομέα, οι διαφορετικοί αλγόριθμοι που έχουν μελετηθεί έχουν τοποθετηθεί σε πίνακες όπου φαίνεται ποιες από τις ιδιότητες που έχουν οριστεί για κάθε κατηγορία πληροί ο κάθε ένας.

5.5.1 Αλγόριθμοι Ανοχής Σφαλμάτων

Αλγόριθμος	Εναλλαγή	Επαναδρομο + λόγηση	Καθυστέρι- ση	Απόλεια πακέτων	Λαμβασμένη + παραλαβή	Ανοχή πυλών + σφαλμάτων
MIRA [4][41]		+			+	+
Lin & Lui [31]		+				
Hosigs [7]		+				
SPM [39] Δομής	+		+	+	+	+
DUAL [29] Αντιστρεφό- μενου δέντρου [5]	+		+	+		
RRL [20]	+		+			+
Hybrid [37][38]	+	+	+	+	+	+
Two Path [44]	+					+
Maximum Flow Evaluation [33]	+					+
SSPA [43]	+					+
Gonfa [35]	+		+	+	+	
Haskin [13]	+			+		
Makam [6]	+				+	
A.J.C [23][24]		+			+	+
Otel [21]		+	+	+		+

Πίνακας 5.5.1.1 Χαρακτηριστικά αλγορίθμων ανοχής σφαλμάτων
5.5.2 Αλγόριθμοι Μηχανικής Κυκλοφορίας

5.5.2 Αλγόριθμοι Μηχανικής Κυκλοφορίας

Αλγόριθμος	Βελτίωση χρήσης Πόρων	Πολυπλάμιονοπάτια	Τοπικές Πληροφορίες	Γρήγορη Επαναφορά	QoS	Router
Shortest- Distance Extension [40]	+					+
AMP [27]	+	+	+	+		
A.B.E[53]	+				+	+
Reactive [51]	+	+		+		+
TELIC [34][36]	+				+	+
Junos [25]	+		+		+	+
MATE: [45]	+	+				+
LSFSB [8][9][18]	+	+	+	+	+	+
DORA [46]						

Πίνακας 5.5.2.1 Χαρακτηριστικά αλγορίθμων μηχανικής κυκλοφορίας

5.5.3 Αλγόριθμοι Ανοχής Σφαλμάτων και Μηχανικής Κυκλοφορίας

Για τους αλγορίθμους αυτούς εξετάστηκε ποιες μεθόδους χρησιμοποιούν για να εφαρμόσουν μηχανική κυκλοφορίας στο σύστημα τους και ποια τα πλεονεκτήματα που τους προσφέρει .

Πολλαπλά Εναλλακτικά Μονοπάτια	Κοινά Εναλλακτικά	Απαιτήσεις	Κέρδος για μηχανική κυκλοφορίας	Κέρδος για ανοχή σφαλμάτων	Αλγόριθμος
+			Εξισορρόπηση Φορτίου Τοπικές βάσεις δεδομένων QoS	<ul style="list-style-type: none"> Ανοχή σφαλμάτων Μικρή καθυστέρηση Μικρή ή απώλεια πακέτων Σωστή παραλαβή πακέτων 	FTLB [47]
		+	<ul style="list-style-type: none"> Όχι υπερχρήση εφεδρικών μονοπατιών QoS 	<ul style="list-style-type: none"> Πάντα διαθέσιμοι πόροι 	RD-QoS [1]
	+		Όχι υπερχρήση εφεδρικών μονοπατιών	<ul style="list-style-type: none"> Γρήγορη επαναφορά Μικρή απώλεια πακέτων Σωστή παραλαβή πακέτων 	RSVP-TE Extension [22]
	+		<ul style="list-style-type: none"> Διαθέσιμοι πόροι για τα κυρίως μονοπάτια 	<ul style="list-style-type: none"> Προστατεύονται περισσότερες συνδέσεις 	Shared Backup Label [50]
		+	<ul style="list-style-type: none"> Ελάττωση πίεσης 		Crankback [15]

			<p>πόρων Διαθέσιμοι πόροι για τα κυρίως</p>		
+			<ul style="list-style-type: none"> • QoS Ελάττωση συνολικής χωρητικότητας 	<ul style="list-style-type: none"> • Μικρός χρόνος αποκατάστασης • Μικρή απώλεια πακέτων • Μικρές καθυστερήσεις • Όχι διάφοροι χρόνοι καθυστερήσεων 	T.C.J.K.T [52]
		+	<ul style="list-style-type: none"> • Επιλογή των συνδέσεων που προστατεύονται 	<ul style="list-style-type: none"> • Μειώνει την πιθανότητα σφάλματος 	Network Protection Degree [19]
		+	QoS	<ul style="list-style-type: none"> • Γρήγορη επαναδρομολόγηση • Μικρή απώλεια πακέτων • Σωστή παραλαβή πακέτων 	Provisioning [2]
+			<ul style="list-style-type: none"> • Ομοιόμορφη κατανομή φορτίου Max 	<ul style="list-style-type: none"> • Γρήγορη επαναφορά • Μικρή απώλεια 	TSMP[48]

			utilization	πακέτωνΑνοχή σφαλμάτωνΣωσ τή σειρά παραλαβής	
		+	<ul style="list-style-type: none"> • QoS Αποδοτική Διαχείριση του εύρους ζώνης 	<ul style="list-style-type: none"> • Ανοχή σφαλμάτων 	RD-QoS Extension [3]
+		+	<ul style="list-style-type: none"> • Ισορροπημένη ροή QoS Max utilization 	<ul style="list-style-type: none"> • Όχι απώλεια πακέτων Ανοχή σφαλμάτων Γρήγορη επαναφορά 	Maximally Disjoint Multipaths [14]
+			<ul style="list-style-type: none"> • Αποδοτική χρήση πόρων Max utilization 	<ul style="list-style-type: none"> • Ανοχή πολλαπλών σφαλμάτων 	LDM [30]
+			QoS	<ul style="list-style-type: none"> • Ανοχή σφαλμάτων 	MBAK [32]
+			Αποδοτική χρήση πόρων QoS	<ul style="list-style-type: none"> • Ανοχή σφαλμάτωνΓρήγορη επαναφορά 	SLCC [2]
+			<ul style="list-style-type: none"> • Αποδοτική χρήση πόρωνΙσορροπημένη ροή QoS 	Ανοχή πολλαπλών σφαλμάτων	TJT [51]

		+	Αποδοτικότερη χρήση πόρων	<ul style="list-style-type: none"> • Γρήγορη επαναφοράΑνοχή ή σφαλμάτων 	Fast Re-route [15]
		+	QoS	<ul style="list-style-type: none"> • Γρήγορη επαναφοράΑνοχή ή σφαλμάτων 	Με Detours [15]

Πίνακας 5.5.3.1 Πλεονεκτήματα αλγορίθμων που συνδυάζουν ανοχή σφαλμάτων και μηχανική κυκλοφορίας

Κεφάλαιο 6

Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Κατά την μελέτη των υφιστάμενων αλγορίθμων που συνδυάζουν ανοχή σφαλμάτων και μηχανική κυκλοφορίας παρατηρήθηκε ότι οι πλείστοι αλγόριθμοι θεωρούν, ότι υπάρχει ή μπορεί να συμβεί ένα σφάλμα στο κυρίως μονοπάτι μη μεριμνώντας για το τι θα γίνει σε περίπτωση που εμφανιστούν περισσότερα σφάλματα ή εμφανιστεί σφάλμα σε οποιοδήποτε άλλο μονοπάτι πρώτα και μετά στο κυρίως. Έτσι αποφασίσαμε να δημιουργήσουμε ένα νέο αλγόριθμο που θα μπορεί να συνδυάζει μηχανική κυκλοφορίας και ανοχή σφαλμάτων λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δυνατές περιπτώσεις σφαλμάτων (ένα ή πολλά, στο κυρίως ή σε εναλλακτικά). Στόχος του νέου αλγορίθμου είναι να διαχειρίζεται τους πόρους του δικτύου και να λαμβάνει υπόψη και να δίνει λύσεις για όλες τις πιθανές περιπτώσεις σφαλμάτων που μπορούν να εμφανιστούν. Η ανοχή σφαλμάτων και η μηχανική κυκλοφορίας θα πρέπει να συνδυαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε ένας μηχανισμός να ικανοποιεί στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τους στόχους του και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει στα δίκτυα με την εφαρμογή του.

Για να γίνει η επιλογή των αλγορίθμων, όπως προαναφέραμε, καθορίστηκαν κάποια κριτήρια για την ανοχή σφαλμάτων και κάποια για την μηχανική κυκλοφορίας. Σύμφωνα με αυτά τα κριτήρια επιλέχθηκε ένας αλγόριθμος από κάθε μηχανισμό (αυτός που ικανοποιούσε τα περισσότερα κριτήρια στο μέγιστο βαθμό). Στη ανοχή σφαλμάτων έχει επιλεγεί ο αλγόριθμος Hybrid [37][38]. Ο Hybrid είναι ένας νέος αλγόριθμος οποίος, επιτυγχάνει να ικανοποιεί και τα τέσσερα κριτήρια της ανοχής σφαλμάτων (της καθυστέρησης, της απώλειας πακέτων, της σειράς παραλαβής των πακέτων και της ανεκτικότητας σε πολλαπλά σφάλματα). Στην μηχανική κυκλοφορίας έχει

επιλεγεί ο LSFBSB[8][9][18]. Ο LSFBSB είναι ο μόνος αλγόριθμος που προσπαθεί να βελτιώσει την χρήση των πόρων του δικτύου με εξισορρόπηση του φορτίου, χρησιμοποιεί πολλαπλά μονοπάτια όταν παρουσιαστεί υπερφόρτωση του δικτύου για να κατανέμει την ροή, αποθηκεύει τοπικές πληροφορίες κάνοντας πιο εύκολους του υπολογισμούς μονοπατιών, οι αποφάσεις για την εισαγωγή μιας ροής στο δίκτυο λαμβάνονται από τους ακρινούς, προσπαθεί για γρήγορη επαναφορά και μέγιστο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων και προσπαθεί να έχει ποιότητα υπηρεσιών διατηρώντας την αξιοπιστία του δικτύου.

Οι δύο αλγόριθμοι για να μπορούν να ενωθούν θα πρέπει να τροποποιηθούν λίγο. Ο LSFBSB αλλάζει για να μπορεί να προσαρμοστεί στο MPLS δίκτυο, ενώ ο Hybrid αλλάζει για να μπορεί να αποδεχθεί πολλές ροές. Οι αλλαγές στον LSFBSB είναι οι εξής: πρώτα ορίζουμε πλέον ως ακρινούς δρομολογητές τους κόμβους εισόδου, εξόδου και το εύρος ζώνης του πυρήνα το αναλαμβάνουν αυτοί.

Οι αλλαγές στον Hybrid είναι οι εξής: το εναλλακτικό και το κυρίως μονοπάτι θα καθορίζονται στην αρχή σύμφωνα με τον αλγόριθμο LSFBSB, ακόμα και αν τελικά το εναλλακτικό μονοπάτι δεν θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί λόγω έλλειψης πόρων για να φιλοξενήσουν τη ροή που θα εναλλαγεί. Μια ακόμα αλλαγή που θα πρέπει να γίνει στον Hybrid για να μπορέσει να συνενωθεί με αλγόριθμο μηχανικής κυκλοφορίας είναι, στα κριτήρια του αλγορίθμου Otel (δυναμικού υπολογισμού εναλλακτικού μονοπατιού) να προστίθεται και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Ο αλγόριθμος Otel τροποποιήθηκε, έτσι όπως εφαρμόζεται μέσα από τον Hybrid αλγόριθμο, αντί να επιλέγεται κάθε φορά η σύνδεση με το μικρότερο Δ , επιλέγεται η σύνδεση με το μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης και το μικρότερο Δ . Ο προτεινόμενος αλγόριθμος από την πλευρά της μηχανικής κυκλοφορίας δίνει έμφαση στο εύρος ζώνης. Για τα σφάλματα στα κυρίως μονοπάτια γίνεται στα εναλλακτικά μονοπάτια που έχουν υπολογιστεί αρχικά σύμφωνα με τον LSFBSB αλγόριθμο, αν υπάρχουν οι απαραίτητοι πόροι. Αν όμως δεν υπάρχουν, θα πρέπει να ξαναγίνουν

οι υπολογισμοί. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνει γρήγορη εναλλαγή σε ένα εναλλακτικό μονοπάτι, καθώς τα μονοπάτι είναι ήδη υπολογισμένα απλά θα χρειαστεί να επιλέξει ένα και να βάλει την ροή σε αυτό. Έτσι και με αυτό τον τρόπο, διατηρούνται σε μεγάλο βαθμό τα πλεονεκτήματα της άμεσης επαναφοράς που προσφέρει ο Gofa.

6.1 Ανοχή Σφαλμάτων

Η αποκατάσταση του δικτύου ξεκινά αφού γίνει ανίχνευση του σφάλματος. Αυτό γίνεται με την βοήθεια μηχανισμών που προσφέρει το MPLS. Χρησιμοποιώντας μηχανισμούς διατήρησης των επικοινωνιών μεταξύ των γειτονικών δρομολογητών, μπορούμε να ανιχνεύσουμε ένα σφάλμα στο μονοπάτι. Συγκεκριμένα κάθε δρομολογητής κρατά τον μετρητή για το χρόνο διατήρησης ζωής για κάθε γείτονα στην κάθε εγκατάσταση κάποιου μονοπατιού. Ο μετρητής αυτός μηδενίζεται κάθε φορά που λαμβάνει ένα μήνυμα LDP από τον συνεργάτη γείτονα του στο συγκεκριμένο μονοπάτι. Όταν ο μετρητής λήξει χωρίς να παραλάβει κάποιο LDP μήνυμα από τον γειτονικό του δρομολογητή τότε ο LSR καταλήγει στο συμπέρασμα ότι κάποιο σφάλμα υπάρχει στη σύνδεση ή στο συνεργάτη LSR. Κατά την εγκατάσταση του μονοπατιού καθορίζεται και ο χρόνος διατήρησης ζωής. Κάθε LSR είναι υπεύθυνος ότι ο συνεργάτης LSR λαμβάνει ένα μήνυμα LDP σε κάθε χρονικό διάστημα της διατήρησης ζωής παραλαβής. Όταν ένας LSR δεν έχει άλλα πακέτα για να στείλει στον γείτονα του τότε στέλνει στο γείτονα του τότε στέλνει μηνύματα διατήρησης ζωής.

Αφού γίνει η ανίχνευση σφάλματος από τον LSR, τότε είναι υπεύθυνος να στείλει μηνύματα FIS τα οποία ερμηνεύονταν σαν ένα σήμα που δείχνει ότι υπάρχει σφάλμα στο κατά μήκος του μονοπατιού. Το FIS αναμεταδίδεται από κάθε ενδιάμεσο LSR στον προς τα πάνω ή προς τα κάτω γείτονα του, έως ότου φτάσει στον LSR όπου είναι υπεύθυνος για την αποκατάσταση του MPLS δικτύου, δηλαδή στον κόμβο εισόδου. Το FIS μήνυμα μεταδίδεται περιοδικά από τον LSR που

έχει ανιχνεύσει το σφάλμα για κάποιο χρονικό διάστημα ή μέχρι να παραλάβει τα μηνύματα επιβεβαίωσης από το γείτονα του.

6.2 Ανίχνευση και Ενημέρωση Επιδιόρθωσης Σφάλματος

Τα LDP μηνύματα χαιρετισμού ανταλλάσσονται μεταξύ των LSRs σαν μέρος του μηχανισμού ανακάλυψης LSPs. Επομένως, όταν κάποιος LSR επιδιορθωθεί στέλνει μηνύματα χαιρετισμού στους γείτονες του επιδεικνύοντας τους την παρουσία του. Μετά τον εντοπισμό της επιδιόρθωσης σφάλματος χρησιμοποιείται το FRS σήμα το οποίο δείχνει ότι το σφάλμα στο μονοπάτι έχει επιδιορθωθεί. Αναμεταδίδεται από κάθε ενδιάμεσο LSR στον προς τα πάνω ή προς τα κάτω γείτονα του, εως ότου να φτάσει στο LSR που θα εκτελέσει την μεταφορά της ροής δεδομένων στην αρχική πορεία. Το FRS μήνυμα μεταδίδεται περιοδικά από τον LSR που έχει ανιχνεύσει ότι το σφάλμα έχει επιδιορθωθεί για κάποιο χρονικό διάστημα ή μέχρι να παραλάβει μηνύματα επιβεβαίωσης από τον γείτονα του.

6.3 Μηχανική Κυκλοφορίας

Πριν από οποιαδήποτε ενέργεια (στην αρχή) υπολογίζονται ένα σύνολο κοντινών μονοπατιών (LSPs). Όταν θα φτάσει ροή θα επιλέξει εφαρμόζοντας τον Widest Shortest Path αλγόριθμο το μονοπάτι που θα ακολουθήσει η ροή από τον σύνολο των μονοπατιών που έχουν προϋπολογιστεί και με την ίδια διαδικασία θα επιλέξει και το εναλλακτικό μονοπάτι. Αν όμως το δίκτυο υπερφορτώνεται τότε ή δεν θα δεχτεί τη ροή ή θα διαμοιράσει τη ροή σε πολλά μονοπάτια. Κάθε ακρινός κόμβος θα απαντήσει για την ροή που φτάνει ελέγχοντας κατά πόσο το συγκεκριμένο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο στην τοπική σύνδεση για να υποστηρίξει την αίτηση.

Κάθε ακρινός κόμβος παίρνει σύμφωνα με υπολογισμούς συγκεκριμένη χωρητικότητα του πυρήνα που μπορεί να χρησιμοποιήσει. Με την σειρά του κάθε ακρινός κόμβος διανέμει την χωρητικότητα του πυρήνα στις συνδέσεις του, οι οποίες τον ενώνουν με άλλες συνδέσεις στον πυρήνα ανάλογα με το εύρος ζώνης τους. Οι ακρινοί κόμβοι που θα λαμβάνουν την κάθε νέα QoS που θα έρχεται, θα αποδέχεται την ροή αν και μόνο αν η χωρητικότητα του πυρήνα που καθορίζεται από τον συγκεκριμένο κόμβο είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το εύρος ζώνης που μπορεί να μεταφέρει η σύνδεση. Όταν όμως φτάσει σε σημείο όπου η χωρητικότητα του πυρήνα που δικαιούται κάθε κόμβος είναι μικρότερη από το εύρος ζώνης που μπορεί να μεταφέρει η σύνδεση τότε ή δεν θα δεχτεί την επιπρόσθετη κυκλοφορία ή θα ενεργοποιηθεί το στάδιο της υπερφόρτωσης όπου είτε θα διαμοιράσει την κυκλοφορία ή θα αντικαθιστά τις ροές που φεύγουν για να ανανεωθεί η διανομή των διαδρομών.

Αν κατά την εναλλαγή στο εναλλακτικό μονοπάτι διαπιστωθεί ότι το εναλλακτικό μονοπάτι έχει ήδη χρησιμοποιηθεί επαναλαμβάνονται οι διαδικασίες του LSFSB (διανομή εύρους ζώνης και επιλογή μονοπατιού).

6.4 Περιγραφή αλγορίθμου

Ο τρόπος με τον οποίο προσπαθεί να συνενωθεί η ανοχή σφαλμάτων με την μηχανική κυκλοφορίας είναι να ξεκινήσει ο αλγόριθμος εφαρμόζοντας μηχανική κυκλοφορίας για την αποδοτική δρομολόγηση των ροών και να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός ανοχής σφαλμάτων με την εμφάνιση σφάλματος στο δίκτυο, η οποία όμως πλέον θα συμπεριλαμβάνει μέσα στα κριτήρια επιλογής εναλλακτικών μονοπατιών και το διαθέσιμο εύρος ζώνης, ώστε να βελτιωθεί η χρήση των πόρων του δικτύου και να γίνει όσο το δυνατό πιο αξιόπιστο το δίκτυο και οι υπηρεσίες που προσφέρει. Με αυτό τον τρόπο θα συνυπάρχουν ταυτόχρονα στον αλγόριθμο και ανοχή σφαλμάτων και μηχανική κυκλοφορίας.

Αρχικά λοιπόν εφαρμόζεται η ιδέα του αλγορίθμου LSFSB. Όπως καθορίζεται από τον LSFSB αλγόριθμο πριν να γίνει οποιαδήποτε διαδικασία θα πρέπει να εφαρμοστεί αλγόριθμος που θα υπολογίσει τα κοντινά μονοπάτια. Με τον αλγόριθμο LSFSB διαμοιράζονται οι ροές και το εύρος ζώνης. Ο LSFSB αποτελείται από δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται ο καταμερισμός της χωρητικότητας του πυρήνα και χρησιμοποιείται ένας Widest Shortest Path αλγόριθμος για να επιλέξει τη διαδρομή από ένα σύνολο διαδρομών για κάθε ροή κυκλοφορίας και το εναλλακτικό μονοπάτι στο οποίο μπορεί να τη στείλει μετά από την εμφάνιση σφάλματος στο κυρίως μονοπάτι. Μόλις η χωρητικότητα είναι πλήρης ο αλγόριθμος προχωρά στο δεύτερο στάδιο. Το δεύτερο στάδιο χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα του πρώτου σταδίου για να επιλέξει την διαδρομή από ένα σύνολο διαδρομών. Επομένως ξεκινά υπολογίζοντας το εύρος ζώνης του πυρήνα. Την διαθέσιμη αυτή χωρητικότητα του πυρήνα την αναθέτει στους κόμβους εισόδου (διαμοιρασμός). Κάθε κόμβος εισόδου διανέμει την ροή που του αναλογεί στις συνδέσεις του που τον ενώνουν με τον πυρήνα (MPLS δίκτυο), ανάλογα με το δικό τους εύρος ζώνης. Στο δεύτερο στάδιο ορίζεται ότι όταν οι κόμβοι εισόδου θα αποδεχτούν την QoS κυκλοφορία στα όρια των συνδέσεων, ενώσω το εύρος ζώνης του πυρήνα είναι μεγαλύτερο από αυτό που μπορεί να μεταφέρει η σύνδεση που τον ενώνει στον πυρήνα, θα επιτρέπει την είσοδο της ροής. Όταν όμως αρχίσει να γεμίζει ο πυρήνας τότε μπορούν να συμβούν δύο πράγματα (1) θα λειτουργήσει το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου και να δεν θα επιτρέψει την είσοδο επιπρόσθετης κυκλοφορίας. (2) Μπορεί να δεχτεί την ροή και αν την δεχτεί (α) θα διανέμει τη εισερχόμενη κυκλοφορία σύμφωνα με την ροή δια μέσου των κατάλληλων διαδρομών σε αναλογία με την συνολική διανομή των διαδρομών που έγινε κατά το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου και (β) παρακολούθηση της αποστολής των ροών κατά το πρώτο στάδιο και αντικατάσταση αυτών των ροών που φεύγουν για να ανανεωθεί η διανομή των διαδρομών. Επομένως χρειάζεται ένα επιπλέον στάδιο της υπερφόρτωσης όπου γίνεται κατανομή της εισερχόμενης κυκλοφορίας. Επομένως με αυτό τον

τρόπο κάθε ροή που θα εισέρχεται στο δίκτυο από τον κόμβο εισόδου θα εισάγεται σε ένα LSP σύμφωνα με τον αλγόριθμο LSFBSB.

Το σφάλμα για να επηρεάσει την ροή δεδομένων είτε άμεσα, είτε έμμεσα, πρέπει να εντοπιστεί στο μονοπάτι που δρομολογούνται τα πακέτα ή στο εναλλακτικό μονοπάτι. Ανάλογα με το που και με ποια σειρά θα εντοπιστεί το σφάλμα, η αποκατάσταση του δικτύου θα γίνει με διαφορετικό τρόπο.

Πρώτη Περίπτωση : Όταν κάποιο σφάλμα εντοπιστεί από τον προς τα πάνω κόμβο, ο οποίος βρίσκεται στο αρχικό μονοπάτι και δεν έχει προηγηθεί σφάλμα στο εναλλακτικό μονοπάτι, τότε όταν ο ακρινός κόμβος ενημερωθεί μέσω μηνυμάτων για το σφάλμα θα πάει να ελέγξει το εναλλακτικό μονοπάτι που είχε υπολογιστεί στην αρχή για την συγκεκριμένη ροή αν διαθέτει ακόμα τους απαραίτητους πόρους για να το φιλοξενήσει. Αν ναι τότε εναλλάσσει τη ροή στο εναλλακτικό μονοπάτι αλλιώς, επαναλαμβάνει τον διαμοιρασμό του εύρους ζώνης και υπολογίζει ξανά το νέο εναλλακτικό μονοπάτι. Ταυτόχρονα όλοι οι κόμβοι θα ενημερωθούν μέσω των μηνυμάτων FIS που στέλνει ο προς τα πάνω κόμβος όταν εντοπιστεί το σφάλμα και ο κόμβος εισόδου θα ενημερώσει τις δομές που διατηρεί ο Otel έτσι όταν θα χρειαστεί να τον εφαρμόσουμε οι ροές μας θα είναι πλήρως ενημερωμένες σύμφωνα με την νέα κατάσταση του δικτύου.

Αν έπειτα εντοπιστεί σφάλμα στο μονοπάτι το οποίο όρισε σαν το νέο και μπορεί να θεωρηθεί το εναλλακτικό του, εφαρμόζεται ο Otel όπου θα μας δώσει το τοπικό εναλλακτικό μονοπάτι ώστε να αποκατασταθεί το σφάλμα. Ο Otel επιλέγει το εναλλακτικό ανάλογα με τα βάρη των συνδέσεων και το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης. Όσον αφορά το εύρος ζώνης επιλέγεται το μονοπάτι που έχει το μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Πλέον θα υπολογίζεται νέο μονοπάτι σύμφωνα και με τα δύο κριτήρια και έτσι το νέο μονοπάτι θα ικανοποιεί και τα βάρη και το εύρος ζώνης. Όσο τα σφάλματα εντοπίζονται στα εναλλακτικά μονοπάτια που χρησιμοποιούνται για

την δρομολόγηση των πακέτων, η αποκατάσταση του δικτύου θα γίνει σύμφωνα με τον τροποποιημένο Otel αλγόριθμο όπως ορίζει ο Hybrid αλγόριθμος. Αυτό γιατί ακολουθεί τεχνική επαναδρομολόγησης και όλοι οι αλγόριθμοι που ακολουθούν αυτή την τεχνική είναι ικανοί να ανεχτούν πολλαπλά σφάλματα στο υφιστάμενο και στο εφεδρικό μονοπάτι. Επιπλέον όλοι οι κόμβοι θα ενημερωθούν μέσω των μηνυμάτων FIS που στέλνει ο προς τα πάνω κόμβος όταν εντοπιστεί το σφάλμα. Τότε ο κόμβος εισόδου θα ενημερώσει τις δομές που διατηρεί ο Otel.

Με την τροποποίηση που του έγινε μπορεί να επιλέγει μη φορτωμένες συνδέσεις που θα μπορούν να μεταφέρουν την ροή μαζί.

Η διαδικασία αυτή θα γίνεται και θα ισχύει για κάθε ροή που θα εισέρχεται στο δίκτυο.

Δεύτερη περίπτωση

Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα έχει εντοπιστεί σε μονοπάτια που δεν μεταφέρουν ροές κυκλοφορίας και δεν υπάρχει σφάλμα στα μονοπάτια που δρομολογούνται οι κυρίως ροές, η ροή δεδομένων δεν επηρεάζεται και συνεχίζει να δρομολογείται από το αρχικό μονοπάτι. Όμως όλοι οι κόμβοι θα ενημερωθούν μέσω των μηνυμάτων FIS που στέλνει ο προς τα πάνω κόμβος όταν εντοπιστεί το σφάλμα. Τότε ο κόμβος εισόδου θα ενημερώσει τις δομές που διατηρεί ο Otel έτσι όταν θα χρειαστεί να τον εφαρμόσουμε οι ροές μας θα είναι πλήρως ενημερωμένες σύμφωνα με την νέα κατάσταση του δικτύου.

Στην συνέχεια αν υπάρξει νέο σφάλμα το οποίο θα εντοπιστεί από τον προς τα πάνω κόμβο ο οποίος βρίσκεται στο αρχικό μονοπάτι τότε η αποκατάσταση του δικτύου θα γίνει με βάση τον αλγόριθμο Otel. Χρησιμοποιείται ο Otel ο οποίος χρησιμοποιεί τοπική εύρεση τοπικού εναλλακτικού μονοπατιού. Ο Otel επιλέγει το εναλλακτικό ανάλογα με τα βάρη των συνδέσεων

και το εύρος ζώνης. Πλέον θα υπολογίζεται. νέο μονοπάτι σύμφωνα και με τα δύο κριτήρια και έτσι το νέο μονοπάτι θα ικανοποιεί και τα βάρη και το εύρος ζώνης.

Αν έπειτα ακολουθήσουν και άλλα σφάλματα στο νέο μονοπάτι το οποίο χρησιμοποιείται για την δρομολόγηση πακέτων, η αποκατάσταση του δικτύου θα συνεχιστεί να γίνεται με βάση τον αλγόριθμο Otel (όπως έχει τροποποιηθεί), ο οποίος ανέχεται πολλαπλά σφάλματα στο υφιστάμενο αλλά και στο εφεδρικό μονοπάτι.

Η διαδικασία αυτή θα γίνεται και θα ισχύει για κάθε ροή που θα εισέρχεται στο δίκτυο.

6.5 Ψευδοκώδικας

Περιγραφεί με ψευδοκώδικα του πως λειτουργεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος έτσι όπως έχει οριστεί.

Αρχικά :

Υπολογίζεται ένα σύνολο κοντινότερων μονοπατιών. Γίνεται ο καταμερισμός της χωρητικότητας του πυρήνα. Δίνεται στους ακρινούς κόμβους ένα ποσοστό του εύρους ζώνης του πυρήνα.. Κάθε ακρινός κόμβος διανέμει το εύρος ζώνης που του αναλογεί στις συνδέσεις του που τον ενώνουν με τον πυρήνα αναλογικά με το εύρος ζώνης αυτών των συνδέσεων.

Υπολογίζονται :

1. SPT
2. Πίνακας με τις αποστάσεις των κόμβων μεταξύ τους
3. Πίνακας με το αρχικό μονοπάτι
4. Βάρη κάθε σύνδεσης

5. Διαθέσιμο εύρος ζώνης κάθε σύνδεσης

Κάθε LSR εδραιώνει όσο το δυνατό πιο ανεξάρτητα μονοπάτια ανάμεσα σε αυτό και τους ακρινούς κόμβους και ανάμεσα σε αυτό και τους άλλους δρομολογητές μέσα στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας την self-discovery διαδικασία με τις πληροφορίες της IP δρομολόγησης. Εδραιώνονται πριν από οποιαδήποτε λειτουργία του δικτύου, χωρίς όμως να δεσμεύεται εύρος ζώνης.

Με την είσοδο της ροής στο δίκτυο γνωρίζοντας τις απαιτήσεις της σε εύρος ζώνης εφαρμόζεται ο αλγόριθμος WSP όπου θα επιλέξει την πλέον κατάλληλη από τις υπάρχουσες διαδρομές σύμφωνα με τις απαιτήσεις της για εύρος ζώνης και το διαθέσιμο που έχει κάθε υπολογισμένο LSP και αποτελεί την κύρια διαδρομή ενώ επιλέγεται με τον ίδιο τρόπο και το εναλλακτικό μονοπάτι της ροής. Μόλις βρει την κατάλληλη ροή γίνεται και η εδραίωση του μονοπατιού και έτσι η ροή ξεκινά από τον κόμβο εισόδου προς τον κόμβο προορισμό.

Αν (η χωρητικότητα του πυρήνα είναι μεγαλύτερη από αυτό που μπορεί να στείλει η σύνδεση που ενώνει με τον πυρήνα) τότε

- 1.Θα αποδέχεται την ροή και θα την δρομολογήσει
- 2.Αλλαγή διαθέσιμων εύρος ζώνης των συνδέσεων
- 3.Αλλαγή βαρών των συνδέσεων

Να

Αν (η σύνδεση έχει εύρος ζώνης μεγαλύτερο από τη χωρητικότητα του πυρήνα – πλήρης χωρητικότητα) τότε

- 1.Μη επιτρεπτή η είσοδος επιπρόσθετης κυκλοφορίας ή

2. (α) Διανομή της εισερχόμενης κυκλοφορίας σύμφωνα με την ροή διαμέσου των κατάλληλων διαδρομών που έγινε κατά το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου. Οι ροές δεν διαμοιράζονται.

1.Αλλαγή διαθέσιμων εύρος ζώνης των συνδέσεων

2.Αλλαγή βαρών κάθε σύνδεσης

ή

(β) Παρακολούθηση των ροών κατά το πρώτο στάδιο και αντικατάσταση των ροών που φεύγουν για να ανανεωθεί η διανομή των διαδρομών.

1. Αλλαγή διαθέσιμων εύρος ζώνης των συνδέσεων

2. Αλλαγή βαρών κάθε σύνδεσης

Περίπτωση Λάθους :

Αν (το λάθος παρουσιαστεί στο κύριο μονοπάτι) τότε

Το κύριο μονοπάτι δεν είναι πλέον διαθέσιμο.

νΑ

Αν (το λάθος παρουσιαστεί στο εναλλακτικό μονοπάτι) τότε

Το εναλλακτικό μονοπάτι δεν είναι πλέον διαθέσιμο.

νΑ

Αν (το κύριο μονοπάτι είναι διαθέσιμο & το εναλλακτικό είναι διαθέσιμο) τότε

1. Το SPT διαμορφώνεται με τα νέα δεδομένα

2. Ο πίνακας με τα μεγέθη ενημερώνεται για κάθε κόμβο.

3. Αλλάζουν τα βάρη κάθε σύνδεσης.

4. Αλλαγή διαθέσιμων εύρος ζώνης των συνδέσεων

νΑ

Αν (το κύριο μονοπάτι δεν είναι διαθέσιμο & το εναλλακτικό είναι διαθέσιμο) τότε

1. Το SPT διαμορφώνεται με τα νέα δεδομένα , ο πίνακας με τα μεγέθη ενημερώνεται για κάθε κόμβο.
2. Αλλάζουν τα βάρη κάθε σύνδεσης
3. Το λάθος επιδιορθώνεται σύμφωνα με τον αλγόριθμο LSFBSB.

Ο ακρινός κόμβος ελέγχει αν το υπολογισμένο εναλλακτικό του μονοπάτι μπορεί να το φιλοξενήσει.

Αν ναι εναλλάσσουν τη ροή σε αυτό,

αλλιώς επαναλαμβάνει τους υπολογισμούς του LSFBSB για να υπολογίσει ένα νέο μονοπάτι για να στείλει την ροή.

Αλλαγή διαθέσιμων εύρος ζώνης των συνδέσεων

νΑ

Αν (το κύριο μονοπάτι είναι διαθέσιμο & το εναλλακτικό δεν είναι διαθέσιμο) τότε

1. Το SPT διαμορφώνεται με τα νέα δεδομένα
2. Ο πίνακας με τα μεγέθη ενημερώνεται για κάθε κόμβο.
3. Αλλαγή διαθέσιμων εύρος ζώνης των συνδέσεων
4. Αλλαγή των βαρών κάθε σύνδεσης

νΑ

Αν (το κύριο μονοπάτι & το εναλλακτικό δεν είναι διαθέσιμα) τότε

1. Το SPT διαμορφώνεται με τα νέα δεδομένα
2. Ο πίνακας με τα μεγέθη ενημερώνεται για κάθε κόμβο.
3. Αλλάζουν τα βάρη κάθε σύνδεσης.

4. Το λάθος επιδιορθώνεται σύμφωνα με τον αλγόριθμο Otel που επιλέγει την νέα ροή λαμβάνοντας υπόψη και το διαθέσιμο εύρος ζώνης των συνδέσεων.

5. Αλλαγή διαθέσιμων εύρος ζώνης των συνδέσεων

να

Επιδιόρθωση λάθους:

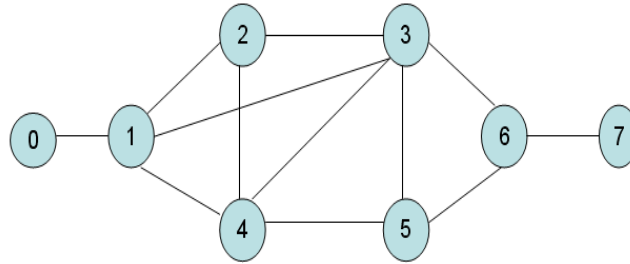
1. Το SPT διαμορφώνεται με τα νέα δεδομένα , ο πίνακας με τα μεγέθη ενημερώνεται για κάθε κόμβο.

2. Αλλάζουν τα βάρη κάθε σύνδεσης.

3. Αλλαγή διαθέσιμων εύρος ζώνης των συνδέσεων

6.6 Παράδειγμα Εκτέλεσης Αλγορίθμου

Για καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου ακολουθεί παράδειγμα. Η τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 6.6.1. Στο παράδειγμα αυτό υποθέτουμε ότι εισέρχονται και αιτούνται να μουν στο δίκτυο δύο ροές. Η δεύτερη θα προσπαθήσει να εισέλθει στο δίκτυο αφού έχουν ήδη προηγηθεί ένα σφάλμα στο κυρίως και ένα στο εναλλακτικό της πρώτης ροής που είχε εισέλθει στο δίκτυο. Λόγω επάρκειας των πόρων η ροή θα επιτύχει να γίνει αποδεκτή από τον ακρινό κόμβο και θα εισαχθεί στο δίκτυο. Όταν πλέον η ροή θα κυκλοφορεί στο δίκτυο τότε θα παρουσιαστεί σφάλμα στο κυρίως της μονοπάτι και μετέπειτα στο εναλλακτικό της. Το ίδιο θα γίνει και για την δεύτερη ροή αφού εισέλθει στο δίκτυο.



Σχήμα 6.6.1 Τοπολογία στην οποία εκτελείται το παράδειγμα

Θεωρούμε σαν ακρινό κόμβο που μπορεί να αποδεχτεί ροή τον κόμβο 0 και ως ενδιάμεσο κόμβο τον κόμβο 1. Ως κόμβο εξόδου θεωρούμε τον κόμβο 7.

Αρχικά υπολογίζονται χωρίς όμως να δεσμεύονται τα κοντινότερα μονοπάτια ανάμεσα σε ζεύγη κόμβων (Πριν από οποιαδήποτε άλλη λειτουργία στο δίκτυο). Στην συνέχεια γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για να διαμοιράσει ο ακρινός κόμβος, την χωρητικότητα του πυρήνα που του αναλογεί στους κόμβους που συνδέουν τον ενδιάμεσο κόμβο με τον πυρήνα.

Υπόθεση:

Κάθε σύνδεση έχει εύρος ζώνης 2 MB

Υπολογισμοί

β_c : Χωρητικότητα πυρήνα = Άθροισμα του εύρους ζώνης των συνδέσεων του πυρήνα.

$$\beta_c = \sum_{x,y} l_c^{x,y} = 20 \text{ MB}$$

β_a : Χωρητικότητα πυρήνα που αντιστοιχεί στους ακρινούς κόμβους του δικτύου

$$\beta_a = \beta_c = 20 \text{ MB}$$

β_a^1 : Χωρητικότητα πυρήνα που αντιστοιχεί στον κόμβο εισόδου 1 του πυρήνα.

$$\beta_a^1 = \beta_a = 20 \text{ MB}$$

Έχουμε τρεις συνδέσεις που ενώνονται άμεσα στον πυρήνα με τον ενδιάμεσο και σε αυτές ο κόμβος εισόδου 1 θα κατανέμει τη χωρητικότητα του πυρήνα που του αναλογεί ανάλογα με το εύρος ζώνης κάθε σύνδεσης:

Χωρητικότητα του πυρήνα που αναλογεί στην σύνδεση 1-2 που συνδέει τον κόμβο εισόδου 1 με τον πυρήνα.

$$\beta_a^{1(l_c^{1,2})} = \left(\frac{l_c^{1,2}}{\sum_y l_c^{n,y}} \right) * \beta_a^1 = \frac{2MB}{6MB} * 20MB = 6,6 \text{ MB}$$

Χωρητικότητα του πυρήνα που αναλογεί στην σύνδεση 1-3 που συνδέει τον κόμβο εισόδου 1 με τον πυρήνα.

$$\beta_a^{1(l_c^{1,3})} = \left(\frac{l_c^{1,3}}{\sum_y l_c^{n,y}} \right) * \beta_a^1 = \frac{2MB}{10MB} * 20MB = 4 \text{ MB}$$

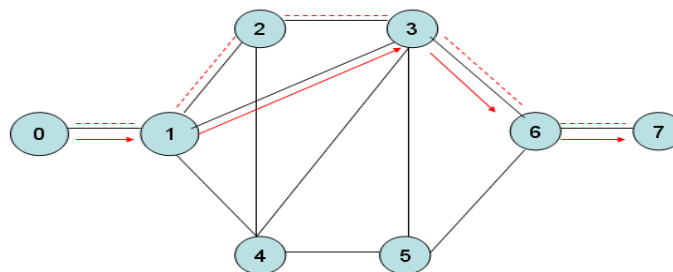
Χωρητικότητα του πυρήνα που αναλογεί στην σύνδεση 1-4 που συνδέει τον κόμβο εισόδου 1 με τον πυρήνα.

$$\beta_a^{1(l_c^{1,4})} = \left(\frac{l_c^{1,4}}{\sum_y l_c^{n,y}} \right) * \beta_a^1 = \frac{2MB}{8MB} * 20MB = 5 \text{ MB}$$

Σύμφωνα με τους πιο πάνω υπολογισμούς ο ακρινός κόμβος διαμοιράζει την χωρητικότητα του πυρήνα που του αναλογεί στις συνδέσεις όπου είναι άμεσα συνδεδεμένες με τον ενδιάμεσο κόμβο που είναι ενωμένος ο ακρινός. Στην περίπτωση εδώ ο κόμβος 1 που είναι ο ενδιάμεσος θα

πάρει παίρνει χωρητικότητα 2MB για τη σύνδεση 1-3, 3.3MB για την σύνδεση 1-2 και 5MB για τη σύνδεση 1-4. Επιπλέον δημιουργείται ένας πίνακας όπου θα κρατά το διαθέσιμο εύρος ζώνης κάθε σύνδεσης που τους δίνεται με την δημιουργία της σύνδεσης.

Όταν θα εισέλθει η πρώτη ροή μέσα καθώς εφαρμόζεται ήδη ο LSFSB θα ακολουθήσει κανονικά την διαδικασία του που ορίζει ο αλγόριθμος αυτός και θα επιλέξει από το σύνολο των κοντινών μονοπατιών το μονοπάτι 0-1-3-6-7 καθώς είναι το μόνο με το ελάχιστο hop count τρία και δεν θα χρειαστεί να ελέγξει το ιδανικό εύρος ζώνης. Επιπλέον θα επιλέξει το αμέσως επόμενο πιθανό μονοπάτι για να αποτελέσει το εναλλακτικό του, το 0-1-2-3-6-7. Τα αμέσως επόμενα πιθανά μονοπάτια με το ελάχιστο hop ήταν πολλά που είχαν το ίδιο hop (τέσσερα) και έτσι εφάρμοσε τον αλγόριθμο Widest Shortest Path για να επιλέξει. Στο πιο κάτω σχήμα φαίνονται το κυρίως και το εναλλακτικό μονοπάτι για την πρώτη ροή που αιτείται να εισέλθει στο δίκτυο.

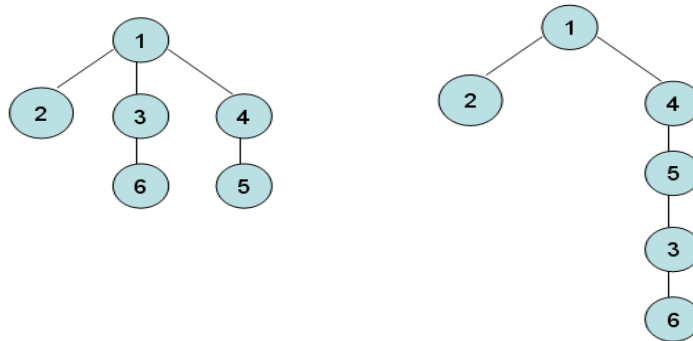


Σχήμα 6.6.2 Κυρίως και εναλλακτικό μονοπάτι της πρώτης ροής

Η ροή μας απαιτεί 0.5MB εύρος ζώνης το οποίο και είναι διαθέσιμο, επίσης η χωρητικότητα του πυρήνα που του αναλογεί 20MB είναι μεγαλύτερη από το 2MB εύρος ζώνης της σύνδεσης και άρα δρομολογείται σε αυτό το μονοπάτι η ροή. Όταν θα δρομολογήσει την ροή τότε ενημερώνει τον πίνακα του εύρους ζώνης των συνδέσεων αφαιρώντας από τις συνδέσεις που ανήκουν στο LSP, το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για να φιλοξενήσει τη ροή.

Όταν εντοπιστεί το σφάλμα στην σύνδεση 1-3 τότε ενημερώνεται ο ακρινός κόμβος. Ο ακρινός κόμβος θα ελέγχει το εναλλακτικό μονοπάτι αν μπορεί να φιλοξενήσει τη ροή. Επειδή δεν χρησιμοποιήθηκε από άλλη ροή είναι διαθέσιμο και εναλλάσσει πλέον την ροή σε αυτό. Έτσι το νέο μονοπάτι είναι το 0-1-2-3-6-7. Ενώ ταυτόχρονα ενημερώνονται οι δομές δεδομένων που κρατά ο κάθε κόμβος (και θα χρησιμοποιηθούν πιο μετά με την εφαρμογή του Otel αλγόριθμου) ενημερώνει των πίνακα του εύρους ζώνης των συνδέσεων προσθέτοντας στις συνδέσεις που ανήκουν στο LSP και δεν έχουν σφάλμα, το εύρος ζώνης που χρησιμοποίησαν για τη ροή.

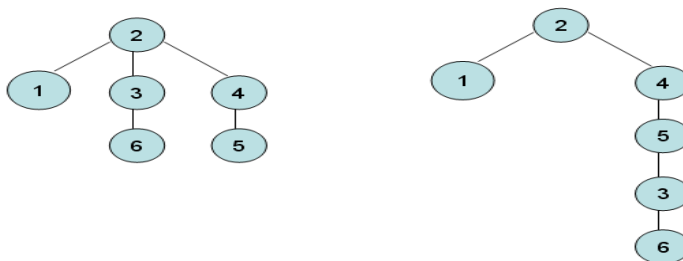
Συγκεκριμένα θα μελετήσουμε τις δομές δεδομένων που κρατά ο κόμβος 1, αφού παρουσιάστηκε σφάλμα στην σύνδεση 1-3 και άρα ο κόμβος 1 θα είναι ο υπεύθυνος για την δρομολόγηση της επηρεαζόμενης ροής. Στο σχήμα 6.6.3 α) είναι το SPT πριν το σφάλμα μεταξύ των κόμβων 1-3 με ρίζα τον κόμβο 1, στο σχήμα β) είναι το SPT μετά το σφάλμα στο κυρίως μονοπάτι.



Σχήμα 6.6.3 α) Πως διαμορφώνεται το SPT πριν το σφάλμα β) είναι το SPT μετά το σφάλμα στο κυρίως μονοπάτι

Έπειτα ακολουθεί σφάλμα μεταξύ των κόμβων 2-3. Ο αλγόριθμος LFSFB δεν μπορεί πλέον να δώσει λύση στο πρόβλημα, έτσι ο αλγόριθμος Otel αναλαμβάνει την αποκατάσταση του δικτύου. Το SPT δέντρο του κόμβου 2 δίνεται στο σχήμα α) πιο κάτω, σαν βήμα 2 του αλγορίθμου

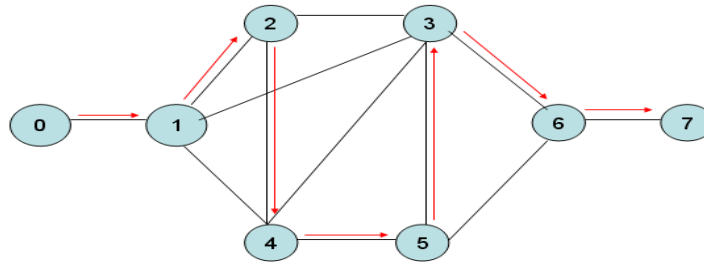
βρίσκουμε το SPT υπόδεντρο με ρίζα τον προς τα κάτω κόμβο του σφάλματος και θέτουμε ως απροσέγγιστους εκείνον και τα παιδιά του. Στην περίπτωση μας το SPT υπόδεντρο είναι ο κόμβος 3 και ο κόμβος 6. Έπειτα ελέγχουμε αν ο κόμβος προορισμού ανήκει στο SPT υπόδεντρο. Άρα θα πρέπει να υπολογιστεί νέο μονοπάτι. Με την εμφάνιση του σφάλματος ενημερώνονται και οι δομές του Otel. Συγκεκριμένα θα μελετήσουμε τις δομές δεδομένων που κρατά ο κόμβος 2, αφού θα επακολουθήσει σφάλμα μεταξύ των 2-3 κόμβων και άρα ο κόμβος 2 θα είναι ο υπεύθυνος για την δρομολόγηση της επηρεαζόμενης ροής. Στο σχήμα 6.6.4 α) είναι το SPT πριν το σφάλμα μεταξύ των κόμβων 2-3 με ρίζα τον κόμβο 2, στο σχήμα β) είναι το SPT μετά το σφάλμα στο εναλλακτικό.



Σχήμα 6.6.4 α) SPT πριν το σφάλμα των κόμβων 2-3 με ρίζα τον κόμβο 2 β) είναι το SPT μετά το σφάλμα στο εναλλακτικό.

Στο βήμα 3 του αλγορίθμου υπολογίζεται το σύνολο των συνδέσεων L και είναι οι 3-5, 3-1 και 3-4. Στο βήμα 4 μετά υπολογίζονται οι τετράδες και εισάγουμε στην ουρά προτεραιότητας αυτή με το μικρότερο Δ και το μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Σε αυτή την περίπτωση εισάγουμε την τετράδα με το μικρότερο Δ αφού το εύρος ζώνης είναι για όλες το ίδιο. Έτσι έχουμε $n=3$, $p=5$, $\Delta=0$, $l=3-5$. Σαν βήμα 5 εξάγουμε από την ουρά προτεραιότητας την τετράδα με το μικρότερο Δ που είναι $n=3$, $p=5$, $\Delta=0$, $l=3-5$. Τέλος ενημερώνουμε το SPT αφαιρώντας το κλαδί από τον κόμβο 2 και συνδέοντας τον στον κόμβο 5, όπως φαίνεται στο σχήμα β). Έτσι έχουμε το νέο

τοπικό μονοπάτι 2-4-5-3 και πλέον η ροή δρομολογείται μέσα από αυτό (μονοπάτι 1-2-4-5-3-6) όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα 6.6.5 Το νέο εναλλακτικό μονοπάτι μετά το σφάλμα στο αρχικό εναλλακτικό μονοπάτι

Όταν θα εισέλθει η δεύτερη ροή μέσα εφαρμόζεται ο LSFSB. Γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για να διαμοιράσει ο ακρινός κόμβος, την χωρητικότητα του πυρήνα που του αναλογεί στους κόμβους που συνδέουν τον ενδιαμέσο κόμβο με τον πυρήνα σύμφωνα με τα νέα δεδομένα αφού πλέον κάποιες συνδέσεις του πυρήνα έχουν παρουσιάσει σφάλμα και πλέον δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Υπολογισμοί

β_c : Χωρητικότητα πυρήνα = Άθροισμα του εύρους ζώνης των συνδέσεων του πυρήνα.

$$\beta_c = \sum_{x,y} l_c^{x,y} = 18 \text{ MB}$$

β_a : Χωρητικότητα πυρήνα που αντιστοιχεί στους ακρινούς κόμβους του δικτύου

$$\beta_a = \beta_c = 18 \text{ MB}$$

β_a^1 : Χωρητικότητα πυρήνα που αντιστοιχεί στον κόμβο εισόδου 1 του πυρήνα.

$$\beta_a^1 = \beta_a = 18 \text{ MB}$$

Έχουμε τρεις συνδέσεις που ενώνονται άμεσα στον πυρήνα με τον ενδιάμεσο. Νοούμενου ότι οι σύνδεση 1-3 έχει παρουσιάσει σφάλμα έχουμε :

Χωρητικότητα του πυρήνα που αναλογεί στην σύνδεση 1-2 που συνδέει τον κόμβο εισόδου 1 με τον πυρήνα.

$$\beta_a^{1(l^1,2)_c} = \left(\frac{l^{1,2}}{\sum_y l^{n,y}_c} \right) * \beta_a^1 = \frac{0MB}{6MB} * 18MB = 0 \text{ MB}$$

Χωρητικότητα του πυρήνα που αναλογεί στην σύνδεση 1-3 που συνδέει τον κόμβο εισόδου 1 με τον πυρήνα.

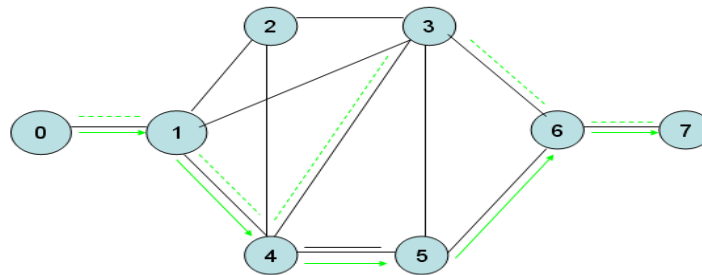
$$\beta_a^{1(l^1,3)_c} = \left(\frac{l^{1,3}}{\sum_y l^{n,y}_c} \right) * \beta_a^1 = \frac{1.5MB}{10MB} * 18MB = 2,7MB$$

Χωρητικότητα του πυρήνα που αναλογεί στην σύνδεση 1-4 που συνδέει τον κόμβο εισόδου 1 με τον πυρήνα.

$$\beta_a^{1(l^1,4)_c} = \left(\frac{l^{1,4}}{\sum_y l^{n,y}_c} \right) * \beta_a^1 = \frac{2MB}{8MB} * 18MB = 4,5 \text{ MB}$$

* για την σύνδεση 1-2 χρησιμοποιώ το εύρος ζώνης που της απομένει αν αφαιρεθεί το ήδη χρησιμοποιούμενο.

Επιλέγει από το σύνολο των κοντινών μονοπατιών το μονοπάτι 0-1-4-5-6-7 . Υπάρχουν πολλά κοντινά μονοπάτια με τον ελάχιστο αριθμό hop τέσσερα και από αυτά επιλέγει με τον Widest Shortest Path αλγόριθμο αυτό που στη πρώτη σύνδεση του αναλογεί το μεγαλύτερο μέρος της χωρητικότητας του πυρήνα που του δίνει ο κόμβος. Επιπλέον θα επιλέξει το αμέσως επόμενο πιθανό μονοπάτι για να αποτελέσει το εναλλακτικό του, το 0-1-4-3-6-7. Τα αμέσως επόμενα πιθανά μονοπάτια με το ελάχιστο hop ήταν πολλά που είχαν το ίδιο Hop (τέσσερα) και έτσι εφάρμοσε τον αλγόριθμο Widest Shortest Path για να επιλέξει. Στο πιο κάτω σχήμα φαίνονται το κυρίως και το εναλλακτικό μονοπάτι για την πρώτη ροή που αιτείται να εισέλθει στο δίκτυο.



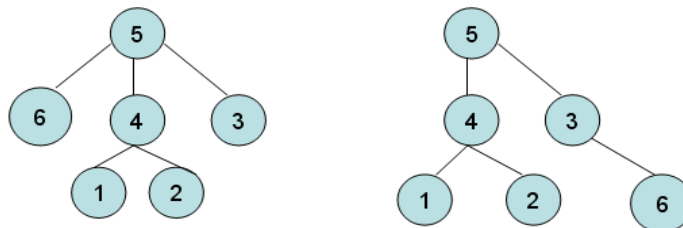
Σχήμα 6.6.6 Κυρίως και εναλλακτικό μονοπάτι για την δεύτερη ροή

Η ροή μας απαιτεί 1MB εύρος ζώνης το οποίο και είναι διαθέσιμο, επίσης η χωρητικότητα του πυρήνα που του αναλογεί 6MB είναι μεγαλύτερη από το 1MB εύρος ζώνης της σύνδεσης και άρα δρομολογείται σε αυτό το μονοπάτι η ροή. Όταν θα δρομολογήσει την ροή τότε ενημερώνει των πίνακα του εύρους ζώνης των συνδέσεων αφαιρώντας από τις συνδέσεις που ανήκουν στο LSP, το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για να φιλοξενήσει τη ροή.

Όταν εντοπιστεί το σφάλμα στην σύνδεση 5-6 τότε ενημερώνεται ο ακρινός κόμβος. Ο ακρινός κόμβος θα ελέγχει το εναλλακτικό μονοπάτι αν μπορεί να φιλοξενήσει τη ροή. Επειδή δεν χρησιμοποιήθηκε από άλλη ροή είναι διαθέσιμο και εναλλάσσει πλέον την ροή σε αυτό. Έτσι το νέο μονοπάτι είναι το 0-1-4-3-6-7. Ενώ ταυτόχρονα ενημερώνονται οι δομές δεδομένων που

κρατά ο κάθε κόμβος (και θα χρησιμοποιηθούν πιο μετά με την εφαρμογή του Otel αλγόριθμου) ενημερώνει τον πίνακα του εύρους ζώνης των συνδέσεων προσθέτοντας στις συνδέσεις που ανήκουν στο LSP και δεν έχουν σφάλμα, το εύρος ζώνης που χρησιμοποίησαν για τη ροή.

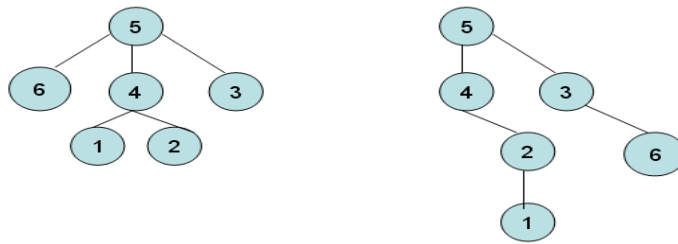
Συγκεκριμένα θα μελετήσουμε τις δομές δεδομένων που κρατά ο κόμβος 5, αφού παρουσιάστηκε σφάλμα στην σύνδεση 5-6 και άρα ο κόμβος 5 θα είναι ο υπεύθυνος για την δρομολόγηση της επηρεαζόμενης ροής. Στο σχήμα 6.6.7 α) είναι το SPT πριν το σφάλμα μεταξύ των κόμβων 5-6 με ρίζα τον κόμβο 5, στο σχήμα β) είναι το SPT μετά το σφάλμα στο κυρίως μονοπάτι.



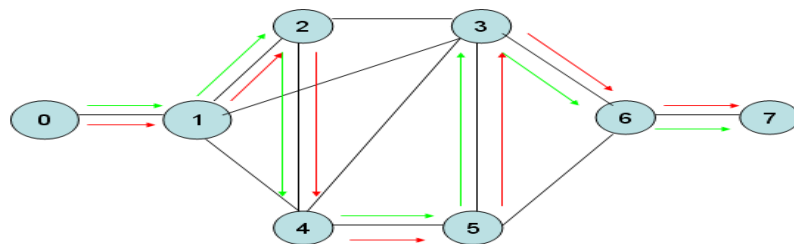
Σχήμα 6.6.7 α) SPT πριν το σφάλμα μεταξύ των κόμβων, ρίζα τον κόμβο 5 β) SPT μετά το σφάλμα στο κυρίως μονοπάτι

Έπειτα ακολουθεί σφάλμα μεταξύ των κόμβων 1-4. Ο αλγόριθμος LSFSB δεν μπορεί πλέον να δώσει λύση στο πρόβλημα, έτσι ο αλγόριθμος Otel αναλαμβάνει την αποκατάσταση του δικτύου. Το SPT δέντρο του κόμβου 5 δίνεται στο σχήμα α) πιο κάτω, σαν βήμα 2 του αλγορίθμου βρίσκουμε το SPT υπόδεντρο με ρίζα τον προς τα κάτω κόμβο του σφάλματος και θέτουμε ως απροσέγγιστους εκείνον και τα παιδιά του. Στην περίπτωση μας το SPT υπόδεντρο είναι ο κόμβος 6. Έπειτα ελέγχουμε αν ο κόμβος προορισμού ανήκει στο SPT υπόδεντρο. Άρα θα πρέπει να υπολογιστεί νέο μονοπάτι. Με την εμφάνιση του σφάλματος ενημερώνονται και οι δομές του Otel. Συγκεκριμένα θα μελετήσουμε τις δομές δεδομένων που κρατά ο κόμβος 5. Στο σχήμα α) είναι το SPT πριν το σφάλμα μεταξύ των κόμβων 4-1 με ρίζα τον κόμβο 5, στο σχήμα β) είναι το SPT μετά το σφάλμα στο εναλλακτικό.

Στο βήμα 3 του αλγορίθμου υπολογίζεται το σύνολο των συνδέσεων L και είναι οι 1-2. Στο βήμα 4 μετά υπολογίζονται οι τετράδες και εισάγουμε στην ουρά προτεραιότητας αυτή με το μικρότερο Δ και το μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Σε αυτή την περίπτωση εισάγουμε την τετράδα με το μικρότερο Δ αφού το εύρος ζώνης είναι για όλες το ίδιο. Έτσι έχουμε $n=1$, $p=2$, $\Delta=1$, $l=1-2$. Σαν βήμα 5 εξάγουμε από την ουρά προτεραιότητας την τετράδα με το μικρότερο Δ που είναι $n=1$, $p=2$, $\Delta=1$, $l=1-2$. Τέλος ενημερώνουμε το SPT αφαιρώντας το κλαδί από τον κόμβο 4 και συνδέοντας τον στον κόμβο 2, όπως φαίνεται στο σχήμα β). Έτσι έχουμε το νέο μονοπάτι 1-2-4-5-3-6 όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα 6.6.8 α) SPT πριν το σφάλμα μεταξύ των κόμβων, ρίζα τον κόμβο 5 β) SPT μετά το σφάλμα



Σχήμα 6.6.9 Οι δυο ροές πως δρομολογούνται μετά από τα σφάλματα που παρουσιάστηκαν

Τελικά και τα δύο μονοπάτια πάνε από το ίδιο μονοπάτι χωρίς όμως να υπερφορτώνεται η συνδέσεις καθώς δεν χρησιμοποιείται όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης τους και επιπλέον χρησιμοποιούνται και εκμεταλλεύονται όλοι πόροι για την δρομολόγηση των ροών και με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν πάντα διαθέσιμα μονοπάτια για την εναλλαγή των ροών.

6.7 Ανάλυση Παραμέτρων Αξιολόγησης

6.7.1 Μηχανική Κυκλοφορίας

Η μηχανική κυκλοφορίας εφαρμόζεται σε όλα τα σημεία του αλγορίθμου. Από την αρχή που θα εισέλθει η ροή θα αποφασίσει κατά πόσο μπορεί να την φιλοξενήσει και μετά ή θα την φιλοξενήσει ή θα την διαμοιράσει σε πολλά μονοπάτια.

Με τον πιο πάνω αλγόριθμο επιτυγχάνει να συνδυάσει όλες τις μεθόδους και τα πλεονεκτήματα τους σε ένα. Πιο αναλυτικά: (α) Πολλαπλά εναλλακτικά μονοπάτια: Στον προτεινόμενο αλγόριθμο όταν η εισερχόμενη ροή δεν μπορεί να φιλοξενηθεί από ένα μονοπάτι τότε μοιράζεται σε πολλά ή απορρίπτεται. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εξισορρόπηση φορτίου και μέγιστη χρήση (max utilization). Επιπλέον για κάθε ροή που εισέρχεται σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο υπολογίζεται ένα κυρίως μονοπάτι που εδραιώνεται και ένα εναλλακτικό, αυτά τα μονοπάτια για να αποφεύγεται η μεταφορά των σφαλμάτων θα πρέπει να είναι αποσυνδεδεμένα στο μέγιστο. (β) Κοινά εναλλακτικά μονοπάτια. Στο δίκτυο υπάρχουν πολλά εναλλακτικά μονοπάτια και ροές. Όταν εμφανιστούν πολλές ροές τότε κάποια από τα εναλλακτικά μονοπάτια θα έχουν κοινό μέρος με τα εναλλακτικά κάποια άλλης ροής. Αυτό δεν αποτελεί μειονέκτημα γιατί μέσα από τα κοινά εναλλακτικά μονοπάτια επιτυγχάνει αποφυγή υπερβολικής χρήσης

εφεδρικών μονοπατιών, μένουν διαθέσιμοι πόροι για τα κυρίως μονοπάτια και άρα επιτυγχάνεται ελάττωση της συνολικής χωρητικότητας. (γ) Προτεραιότητες Στον αλγόριθμο στο σημείο όπου σύμφωνα με τον Hybrid αλγόριθμο εφαρμόζεται ο Otel το εναλλακτικό μονοπάτι επιλέγεται όχι μόνο σύμφωνα με το βάρος των συνδέσεων (ανάλογα με το κόστος τους), αλλά και σύμφωνα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Έτσι έχουμε μορφή προτεραιοτήτων και την μεγαλύτερη προτεραιότητα την έχει η σύνδεση με το μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Σύμφωνα με αυτό επιτυγχάνεται αποδοτική διαχείριση του εύρους ζώνης και ελαττώνεται η πίεση στους πόρους (καθώς έχουμε επιλεκτική χρήση τους) Και οι τρεις οι τεχνικές προσφέρουν στο σύστημα ποιότητας υπηρεσιών (QoS),

6.7.2 Χρόνος Αποκατάστασης Δικτύου

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

1) Η ύπαρξη σφαλμάτων στο αρχικό μονοπάτι, έπειτα στο εναλλακτικό κάθε ροής. Σε αυτό το ενδεχόμενο γίνεται η άμεση αποκατάσταση της επηρεαζόμενης ροής με τον αλγόριθμο LSFBSB προς την μηχανική κυκλοφορίας και την τεχνική της εναλλαγής σε προστατευόμενο μονοπάτι και έπειτα με τον Otel(που πλέον συνδυάζει και εύρος ζώνης) γίνεται η εύρεση τοπικού εναλλακτικού μονοπατιού σε χρόνο ανάλογο του βάθους του δέντρου.

2) Η ύπαρξη σφαλμάτων στο εναλλακτικό μονοπάτι αρχικά, έπειτα στο κυρίως μονοπάτι. Σε αυτήν την περίπτωση, η αποκατάσταση του δικτύου γίνεται μόνο με τον τροποποιημένο αλγόριθμο όπου ο χρόνος εύρεσης τοπικού εναλλακτικού μονοπατιού είναι ανάλογος με το δέντρο.

Επομένως ο συνολικός χρόνος αποκατάστασης του δικτύου, εφαρμόζοντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο είναι ανάλογος του δέντρου που δημιουργείται για τον

τροποποιημένο αλγόριθμο Otel, αφού εφαρμόζεται και στις δύο περιπτώσεις, ο οποίος μας δίνει την πιο μεγάλη καθυστέρηση αποκατάστασης δικτύου. Ενώ η εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι που υπολογίζεται από τον LSFSB αλγόριθμο, γίνεται αμέσως. Έτσι ο προτεινόμενος αλγόριθμος θα έχει ως χρόνο καθυστέρησης αποκατάστασης δικτύου, το χρόνο καθυστέρησης αποκατάστασης του αλγορίθμου με την πιο μεγάλη καθυστέρηση.

6.7.3 Απώλεια Πακέτων

Όταν η επαναφορά της ροής γίνεται με την εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι τότε δεν έχουμε απώλεια πακέτων. Μόλις ο προς τα πάνω κόμβος εντοπίσει το σφάλμα αμέσως τα πακέτα δρομολογούνται, στο εναλλακτικό μονοπάτι το οποίο είναι ήδη υπολογισμένο, αφού το εγκαταστήσει. Επίσης χρησιμοποιείται η τεχνική RFR, η οποία παρέχει μερικές προληπτικές ενέργειες για το προστατευμένο LSP ενάντια στην απώλεια πακέτων κατά την διάρκεια μιας αποτυχίας. Το RFR διατηρεί τα ίδια πλεονεκτήματα του αλγορίθμου μειώνοντας έτσι τις απώλειες πακέτων, σε περίπτωση σφάλματος στη σύνδεση ή στον κόμβο. Επομένως αν υπάρχει χάσιμο πακέτων, υπάρχει στο χρονικό διάστημα μέχρι που ο προς τα πάνω κόμβος εντοπίσει το σφάλμα, όπως συμβαίνει σε όλους τους αλγορίθμους.

Όταν οι ροές θα δρομολογηθούν σύμφωνα με τον τροποποιημένο αλγόριθμο Otel, η απώλεια πακέτων είναι ελάχιστη. Η αποκατάσταση του δικτύου γίνεται τοπικά και έτσι για να γίνει η αποκατάσταση του δικτύου δεν πρέπει να ενημερωθεί και ο κόμβος εισόδου. Επομένως στον προτεινόμενο αλγόριθμο η απώλεια πακέτων υπάρχει όταν την δρομολόγηση των πακέτων την αναλαμβάνει ο Otel, μετά το σφάλμα, στο οποίο είναι η μόνη περίπτωση απώλειας πακέτων.

6.7.4 Παραλαβή Πακέτων με Λανθασμένη Σειρά

Η εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι δεν προκαλεί παραλαβή των πακέτων με λανθασμένη σειρά, λόγω της τεχνικής RFR που χρησιμοποιεί, η οποία συντηρεί την σειρά με την οποία παραλαμβάνονται τα πακέτα. Χρησιμοποιείται αποθήκευση των πακέτων στους δρομολογητές και ακολουθώντας την τεχνική η δρομολόγηση των αποθηκευμένων πακέτων θα γίνει πάλι με την σωστή σειρά.

Όσον αφορά τον τροποποιημένο αλγόριθμο Otel ο αριθμός των πακέτων που πιθανόν να παραληφθούν με λανθασμένη σειρά εξαρτάται από το χρόνο εύρεσης του εναλλακτικού μονοπατιού. Αν ο χρόνος μέχρι να γίνει η αποκατάσταση του δικτύου και τα πακέτα να φτάσουν στον παραλήπτη είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο που απαιτείται για τα εναπομείναντα πακέτα να δρομολογηθούν μέσω του ήδη υπάρχον LSP τότε δεν θα υπάρξει πρόβλημα λανθασμένης σειράς πακέτων, σε αντίθετη περίπτωση θα υπάρξει.

Επομένως στον προτεινόμενο αλγόριθμο, η περίπτωση που πιθανόν να προκαλείται παραλαβή πακέτων με λανθασμένη σειρά είναι όταν την επαναδρομολόγηση των πακέτων αναλαμβάνει ο τροποποιημένος Otel. Καταλήξαμε σε αυτό το συμπέρασμα γιατί ο προτεινόμενος αλγόριθμος είτε θα εφαρμόσει τον τροποποιημένο Otel, είτε την εναλλαγή σε προστατευμένο μονοπάτι. Έτσι συνολικά θα έχει ως παραλαβή πακέτων με λανθασμένη σειρά, την αντίστοιχη του αλγορίθμου Otel που προκαλεί το μεγαλύτερο ποσοστό.

6.7.5 Ανοχή Πολλαπλών Σφαλμάτων

Σε ένα δίκτυο μπορεί να υπάρξουν πολλαπλά σφάλματα στα εναλλακτικά και στα κυρίως μονοπάτια. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι ικανός να αποκαταστήσει το δίκτυο σε τέτοιου

είδους σφάλματα. Αυτό γιατί όταν υπάρξει σφάλμα στο αρχικό μονοπάτι η ροή θα δρομολογηθεί αμέσως στο εναλλακτικό αν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι σε αυτό, αν όμως δεν υπάρχουν θα υπολογιστεί ένα νέο και θα την δρομολογήσει. Μπορεί να ανεχτεί πολλά σφάλματα στα κυρίως μονοπάτια. Όταν υπάρξουν σφάλματα στα εναλλακτικά μονοπάτια, τότε με την τεχνική επαναδρομολόγησης μέσα από τον τροποποιημένο αλγόριθμο Otel διορθώνονται τα προβλήματα. Άρα πάντοτε θα είναι σε θέση να υπολογίζει δυναμικά ένα άλλο τοπικό μονοπάτι έτσι ώστε να δρομολογηθούν τα πακέτα και να είναι ικανός να επαναδρομολογήσει την επηρεαζόμενη ροή όσες φορές και αν παρουσιαστεί σφάλμα στο εναλλακτικό μονοπάτι.

Κεφάλαιο 7

Πειραματική αξιολόγηση

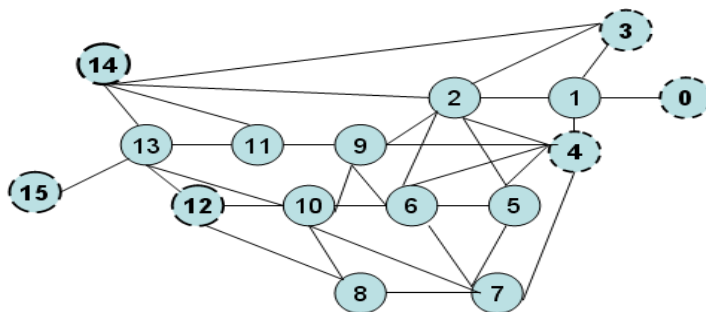
7.1 Προσομοιωτής Network-Simulator 2

Για να αξιολογήσουμε πειραματικά τον αλγόριθμο έγινε προσομοίωση με τον προσομοιωτή Network Simulator 2 [58]. Ο σχεδιασμό των τοπολογιών δικτύων και ο καθορισμός των λειτουργιών τους έγινε με την γλώσσα προγραμματισμού TCL (Tool Command Language) [56][57], όπου είναι απλή στην σύνταξη. Επίσης μπορούμε να έχουμε γραφική αναπαράσταση των τοπολογιών και των λειτουργιών που γίνονται σε κάθε τοπολογία. Με βάση τα αποτελέσματα στο Gnuplot δημιουργούμε γραφικές παραστάσεις και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα. Μπορούμε να δημιουργήσουμε τοπολογίες και να βγάλουμε αποτελέσματα σχηματίζοντας βρόγχους, εντολές επιλογής, πίνακες, διαβάζοντας δεδομένα δίνοντας αποτελέσματα και διαβάζοντας από αρχεία. Για μερικά από τα αποτελέσματα οι γραφικές τους δημιουργήθηκαν στην Excel ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγεί μια γραφική παράσταση που να μπορεί να ομαδοποιεί τα αποτελέσματα και γενικά να επεξεργαστεί καλύτερα.

7.2 Παράμετροι Προσομοίωσης

7.2.1 Τοπολογίες

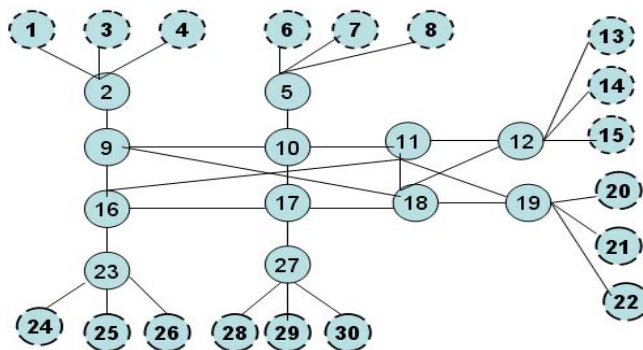
Τοπολογία1 –Επικοινωνιακό Δίκτυο ΗΠΑ



Σχήμα 7.3.1.1: Τοπολογία του πρώτου δικτύου

Παρατηρήσεις: Ακρινοί κόμβοι εισόδου θεωρήθηκαν οι κόμβοι 0, 3, 4. Ακρινοί κόμβοι εξόδου θεωρήθηκαν οι κόμβοι 12, 14, 15. Έτσι στο δίκτυο μας υπήρχαν πέραν της μιας ροές.

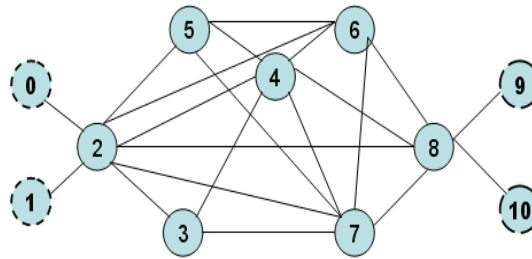
Τοπολογία 2



Σχήμα 7.3.1.2: Τοπολογία του δεύτερου δικτύου

Παρατηρήσεις: Ακρινοί κόμβοι εισόδου και εξόδου θεωρήθηκαν οι κόμβοι, 1, 3, 4, 6, 7, 8, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 30. Έτσι στο δίκτυο μας υπήρχαν πέραν της μιας ροές.

Τοπολογία 3



Σχήμα 7.3.1.3: Τοπολογία του τρίτου δικτύου

Παρατηρήσεις: Ακρινοί κόμβοι εισόδου θεωρήθηκαν οι κόμβοι 0, 1. Ακρινοί κόμβοι εξόδου θεωρήθηκαν οι κόμβοι 9, 10. Έτσι στο δίκτυο μας υπήρχαν πέραν της μιας ροές.

7.2.2 Πληροφορίες Δικτύου

Για την υλοποίηση των δικτύων πέραν από τις τοπολογίες οι οποίες έχουν καθοριστεί πολλές άλλες σημαντικές παράμετροι του δικτύου μας έχουν καθοριστεί πριν να τρέξουμε τα διάφορα σενάρια .

Ο τύπος της ουράς που χρησιμοποιήθηκε είναι DropTail. Με αυτό ξέρουμε ότι η διαχείριση του χώρου αποθήκευσης κάθε κόμβου θα γίνεται με FIFO και όταν γεμίζει τα πακέτα που θα φθάνουν στον κόμβο θα απορρίπτονται. Για την δρομολόγηση χρησιμοποιείται ο Distance Vector αλγόριθμος, όπου στέλνει περιοδικά μηνύματα ανανέωσης. Οι συνδέσεις για να μπορούν να μεταφέρουν αρκετές ροές τους έχει δοθεί εύρος ζώνης 2MB. Επιπλέον ο χρόνος καθυστέρησης που δίνεται στις ροές είναι 1ms. Για τις ροές έχουν καθοριστεί συγκεκριμένα κοινά χαρακτηριστικά διαφέρουν όμως στις

προτεραιότητες. Υπάρχουν δύο τύποι ροών ανάλογα με την προτεραιότητα τους. Για τον ένα τύπο ροών έχουμε προτεραιότητα 4 και για τον άλλο 6. Όλες οι ροές δημιουργούν πακέτα είναι 200 και ο ρυθμός με τον οποίο στέλνονται τα πακέτα είναι 400KB. Οι κόμβοι υποστηρίζουν το UDP πρωτόκολλο και η εφαρμογή της ροής είναι CBR, όπου τα δημιουργεί πακέτα με σταθερό ρυθμό.

7.2.3 Σενάρια

Σε κάθε διαφορετική τοπολογία έχουν εφαρμοστεί διαφορετικά σενάρια. Σε όλες όμως τις περιπτώσεις λόγω του ότι ελέγχθηκε και η μηχανική κυκλοφορίας υπήρχαν περισσότερες από μια ροές. Κάθε ροή συνδέεται και ακολουθεί LSP που θα είναι αποσυνδεδεμένο στο μέγιστο βαθμό από τα LSPs των ροών που είδη τρέχουν στο δίκτυο. Κάθε ροή όμως σε περίπτωση λάθους αντιμετωπίζεται με τον ίδιο τρόπο, αλλά τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά ανάλογα με την σειρά εμφάνισης των σφαλμάτων για κάθε ροή. Π.χ Αν για την μια ροή εμφανιστεί πρώτα σφάλμα στο εναλλακτικό και μετά στο κυρίως, θα χρησιμοποιηθεί για την επαναδρομολόγηση σύμφωνα με τον αλγόριθμο Hybrid θα ακολουθήσει η λογική του αλγορίθμου Otel με την επιπλέον παράμετρο του εύρους ζώνης.

Η γενική ιδέα όλων των σεναρίων για όλες τις τοπολογίες η ίδια αλλά κάθε φορά προσαρμοσμένη στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα σε κάθε τοπολογία τα λάθη συμβαίνουν σε συνδέσεις που είναι στα εναλλακτικά ή στα κυρίως μονοπάτια των ροών όπως αυτά έχουν οριστεί από τον αλγόριθμο LSFSB και όχι στις ίδιες συνδέσεις για όλα τα δίκτυα

Για όλες τις συνδέσεις το εύρος ζώνης είναι 2MB. Στο δίκτυο εισέρχονται από την αρχή μέχρι τον τερματισμό ροές. Υπάρχουν δύο τύποι ροών ως προς τις προτεραιότητες και τα δεδομένα που

μεταφέρουν. Υπάρχουν ροές με προτεραιότητα 4 και με προτεραιότητα 1. Επιπλέον υπάρχουν ροές που μεταφέρουν 0.25MB και άλλες 0.5MB. Τα σφάλματα συμβαίνουν σε συγκεκριμένους χρόνους εκτός από το σενάριο με τα τυχαία σφάλματα όπου συμβαίνουν σε τυχαίες χρονικές στιγμές. Το πρώτα σφάλματα για τα συγκεκριμένα γίνεται στην αρχή με την είσοδο των ροών και συνεχίζουν την εμφάνιση τους μέχρι τον τερματισμό της ροής για τα τρία πρώτα σενάρια.

Σενάριο Εκτέλεσης 1: Με την είσοδο των ροών στο δίκτυο, υπολογίζονται τα κυρίως μονοπάτια των ροών αυτών. Αρχικά παρουσιάζεται σφάλμα σε συνδέσεις στα κυρίως μονοπάτια των κυρίως ροών. Όταν οι ροές στραφούν στα εναλλακτικά τους μονοπάτια τότε παρουσιάζονται σφάλματα στο εναλλακτικό

Παρατηρήσεις: Τα σφάλματα συμβαίνουν στα μονοπάτια κάθε ροής. Τα αρχικά σφάλματα επειδή υπάρχουν οι πόροι επιδιορθώνονται στέλνοντας τη ροή στα εναλλακτικά μονοπάτια που έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τον αλγόριθμο LSFSB. Τα σφάλματα στα εναλλακτικά μονοπάτια επιδιορθώνονται με τον αλγόριθμο Otel (που λαμβάνει πλέον υπόψη και το διαθέσιμο εύρος ζώνης) και για τους δύο αλγορίθμους, έτσι τα εναλλακτικά μονοπάτια κάθε ροής είναι διαφορετικά.

Σενάριο Εκτέλεσης 2: Με την είσοδο των ροών στο δίκτυο, υπολογίζονται τα κυρίως μονοπάτια των ροών αυτών. Αρχικά παρουσιάζεται σφάλμα σε συνδέσεις στα εναλλακτικά μονοπάτια των κυρίως ροών. Μετά παρουσιάζεται σφάλμα στα κυρίως μονοπάτια των ροών.

Παρατηρήσεις: Τα σφάλματα συμβαίνουν στα μονοπάτια κάθε ροής. Τα αρχικά σφάλματα δεν επηρεάζουν τις ροές και συνεχίζουν κανονικά στα μονοπάτια τους. Όταν παρουσιαστούν σφάλματα στα κυρίως μονοπάτια, επειδή τα εναλλακτικά που είχαν υπολογιστεί έχουν συνδέσεις με σφάλματα, τα σφάλματα στα κυρίως μονοπάτια επιδιορθώνονται με τον αλγόριθμο Otel (που λαμβάνει πλέον υπόψη και το διαθέσιμο εύρος ζώνης) και για τους δύο αλγορίθμους, έτσι τα κυρίως μονοπάτια κάθε ροής είναι διαφορετικά

Σενάριο Εκτέλεσης 3: Με την είσοδο των ροών στο δίκτυο, υπολογίζονται τα κυρίως μονοπάτια των ροών αυτών. Αρχικά παρουσιάζεται σφάλμα σε συνδέσεις στα κυρίως μονοπάτια των ροών. Μετά παρουσιάζεται σφάλμα σε κόμβο που επηρεάζει όλες τις ροές.

Παρατηρήσεις: Τα σφάλματα συμβαίνουν στα μονοπάτια κάθε ροής. Τα αρχικά σφάλματα επειδή υπάρχουν οι πόροι επιδιορθώνονται στέλνοντας τη ροή στα εναλλακτικά μονοπάτια που έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τον αλγόριθμο LSFSB. Τα σφάλματα στα εναλλακτικά μονοπάτια που προκαλεί το σφάλμα σε κόμβο επιδιορθώνονται με τον αλγόριθμο Otel (που λαμβάνει πλέον υπόψη και το διαθέσιμο εύρος ζώνης) και για τους δύο αλγορίθμους, έτσι τα εναλλακτικά μονοπάτια κάθε ροής είναι διαφορετικά.

Σενάριο Εκτέλεσης 4: Με την είσοδο των ροών στο δίκτυο, υπολογίζονται τα κυρίως μονοπάτια των ροών αυτών. Παρουσιάζονται τυχαία λάθη σε κάθε ροή.

Παρατηρήσεις: Τα σφάλματα συμβαίνουν στα μονοπάτια κάθε ροής. Τα αρχικά σφάλματα επειδή υπάρχουν οι πόροι επιδιορθώνονται στέλνοντας τη ροή στα εναλλακτικά μονοπάτια που έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τον αλγόριθμο LSFSB. Τα σφάλματα στα εναλλακτικά μονοπάτια που προκαλεί το σφάλμα σε κόμβο επιδιορθώνονται με τον αλγόριθμο Otel (που λαμβάνει πλέον υπόψη και το διαθέσιμο εύρος ζώνης) και για τους δύο αλγορίθμους, έτσι τα εναλλακτικά μονοπάτια κάθε ροής είναι διαφορετικά.

7.3 Παράμετροι Αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων έχουμε τρέξει κάποια σενάρια και μαζέψαμε κάποια αποτελέσματα που θα μας βοηθήσουν στην αξιολόγηση του αλγορίθμου μας σε σχέση με τα αρχικά κριτήρια που έχουμε ορίσει .

Στα σενάρια υπήρχαν διάφορα είδη τοπολογιών δικτύου: (1) επικοινωνιακό δίκτυο ΗΠΑ (2) Τυχαία τοπολογία (οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων δημιουργούνται με τυχαίο τρόπο) (3) Ιεραρχική τοπολογία. Κάθε μια από τις τοπολογίες αντιπροσωπεύει διαφορετικό τύπο δικτύου ως προς την μηχανική κυκλοφορίας. Δηλαδή σε μερικά δίκτυα μπορεί μεγαλύτερος αριθμός κόμβων να δεχτεί ροή για να την εντάξει στο δίκτυο. Εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις: (α) Να συμβαίνουν αρχικά λάθη στα κυρίως μονοπάτια και μετά λάθη στα εναλλακτικά μονοπάτια των ροών που εισέρχονται στο σύστημα (που υπολογίστηκαν από τον αλγόριθμο LSFSB, με την είσοδο τους στο δίκτυο) (β) Να συμβαίνει αρχικά λάθος στο εναλλακτικό μονοπάτι κάθε ροής και μετά λάθος σε σύνδεση στο κυρίως μονοπάτι κάθε ροής. (γ) Να συμβεί σφάλμα σε κόμβο.

Για να επιτευχθεί η αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου για κάθε σενάριο που τρέξαμε μετρήσαμε από κάθε σενάριο:

- (1) Χρόνος παραλαβής πακέτων (delays): Γραφική παράσταση με άξονα των y να είναι ο χρόνος και ο άξονας x να είναι ο αριθμός ακολουθίας και οι σειρές να είναι για τον κάθε αλγόριθμο
- (2) Πακέτα που παραλαμβάνονται: Γραφική παράσταση με άξονα των x να είναι τα σενάρια και των y το ποσοστό των πακέτων ως προς αυτά που δέχεται.
- (3) Πακέτα που χάνονται: Γραφική παράσταση με άξονα των x να είναι τα σενάρια και των y το ποσοστό των πακέτων ως προς αυτά που δέχεται.
- (4) Πακέτα που λαμβάνονται με λανθασμένη σειρά (Received-Unordered-Lost): Γραφική παράσταση με άξονα των x να είναι τα σενάρια και των y το ποσοστό των πακέτων ως προς αυτά που δέχεται.
- (5) Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο χρήσης των συνδέσεων (Throughputs) : Γραφική παράσταση με άξονα των x τον χρόνο και y τα Mb (MegaBit).
- (6) Χρόνος αποκατάστασης του κάθε σφάλματος (Recovery time) : Γραφική παράσταση με άξονα των x να είναι οι αλγόριθμοι με τα λάθη τους και y να είναι ο χρόνος.

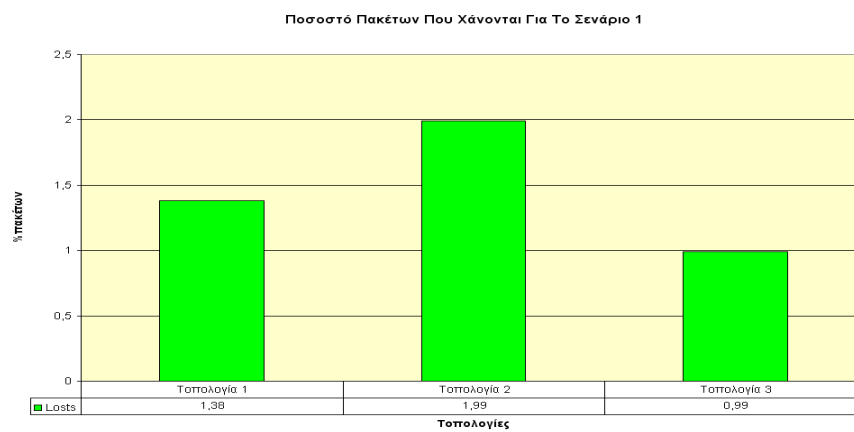
7.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα που πήραμε από τα διάφορα σενάρια υλοποίησης του αλγορίθμου, παρουσιάζονται μέσω γραφικών παραστάσεων. Μέσα από τις γραφικές παραστάσεις είναι πιο εύκολο να εξάγουμε συμπεράσματα που αφορούν το συνδυασμό μηχανικής κυκλοφορίας και ανοχής σφαλμάτων και τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Κάτω από ποιες συνθήκες λειτουργεί αποδοτικά και ποια τα αποτελέσματα τους για τα κριτήρια που έχουν καθοριστεί στην αρχή με τον καθορισμό του αλγορίθμου. Πάρθηκαν μετρήσεις ξεχωριστά για κάθε σενάριο.

Οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τον μέσο όρο των ροών. Για την γραφική παράσταση που παρουσιάζει τα δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις, παρουσιάζουμε μόνο δυο ροές. Υπάρχουν πολλές ροές αλλά είναι μόνο δυο τύποι, που απλώς επαναλαμβάνονται. Οι δυο τύποι αυτοί διαφέρουν σε προτεραιότητα

7.4.1 Γραφικές Παραστάσεις για Σενάριο 1

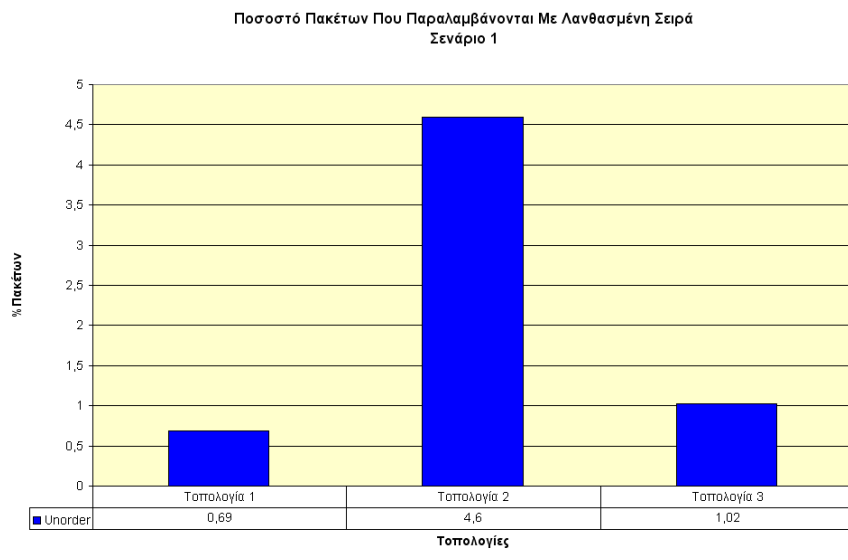
Πακέτα που χάνονται



Σχήμα 7.4.1.1 Ποσοστό πακέτων που χάθηκαν

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των ποσοστών πακέτων (όλων των ροών) που χάνονται διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Λίγο περισσότερα είναι για το δίκτυο που έχει τις λιγότερες συνδέσεις γιατί δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές και άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δύο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότεν το δίκτυο δεχόταν μεγαλύτερο αριθμό ροών που έπρεπε να φιλοξενήσει και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα για αυτό και τα λίγο περισσότερα πακέτα (δύσκολη επιλογή εναλλακτικού μονοπατιού).

Πακέτα που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά

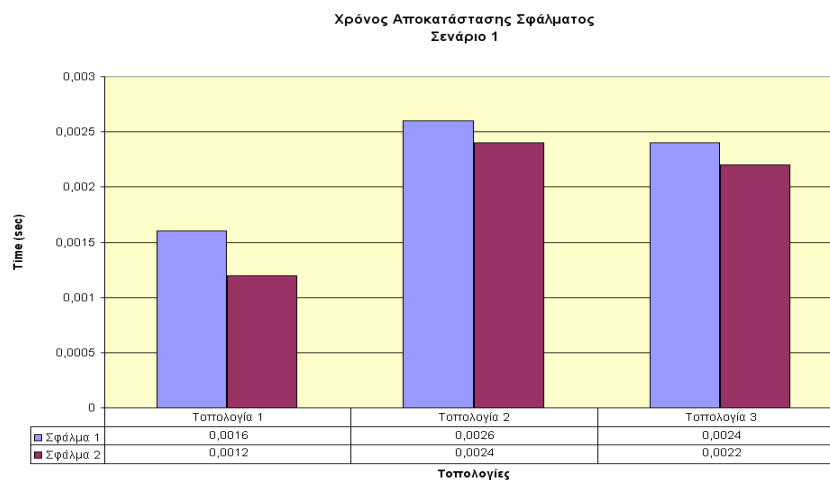


Σχήμα 7.4.1.2 Ποσοστό πακέτων που παραλήφθηκαν με λανθασμένη σειρά

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που λαμβάνονται με λανθασμένη σειρά διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Περισσότερα

είναι για το δίκτυο που έχει τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές και άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι ροές αναγκάζονται να κατανεμηθούν και αργούν να δρομολογηθούν, λόγω του μικρού αριθμού συνδέσεων που υπάρχουν στα δίκτυα. Σε περίπτωση που υπάρχουν όπως στην τρίτη τοπολογία και βρίσκει γρήγορα εναλλακτικά και δεν είναι υπερφορτωμένα, τα πακέτα που φτάνουν με λανθασμένη σειρά είναι ελάχιστα. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δυο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότεν στο δίκτυο δεχόταν μεγαλύτερο αριθμό ροών που έπρεπε να φιλοξενήσει και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα για αυτό και τα λίγο περισσότερα πακέτα.

Χρόνος Αποκατάστασης του κάθε σφάλματος

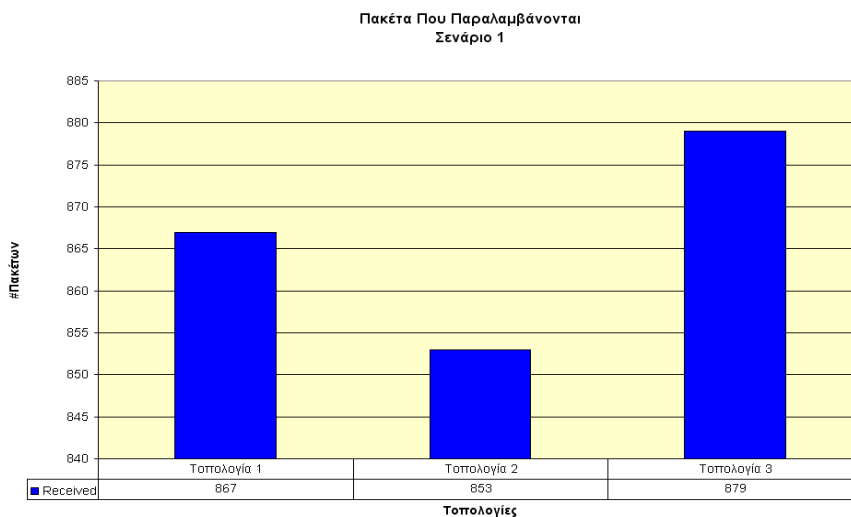


Σχήμα 7.4.1.3 Χρόνος αποκατάσταση κάθε σφάλματος

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος χρόνος επαναφοράς μετά από σφάλμα (όλων των ροών) διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και για την επαναφορά με τα

εναλλακτικά μονοπάτια όπως υπολογίζονται από τον LSFSB αλγόριθμο και για την επαναφορά με τον τροποποιημένο αλγόριθμο Otel. Ελάχιστα πιο αυξημένο παρουσιάζεται για το δίκτυο με λιγότερες συνδέσεις όπου δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών. Οι ροές αναγκάζονται να κατανεμηθούν και αργούν να δρομολογηθούν, λόγο του μικρού αριθμού συνδέσεων που υπάρχουν στα δίκτυα. Αν υπάρχουν, όπως στην τρίτη τοπολογία και βρίσκει γρήγορα εναλλακτικά και δεν είναι υπερφορτωμένα τότε ο χρόνος επαναφοράς είναι πολύ μικρός. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δυο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότεν στο δίκτυο δεχόταν μεγαλύτερο αριθμό ροών και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα.

Πακέτα που παραλαμβάνονται

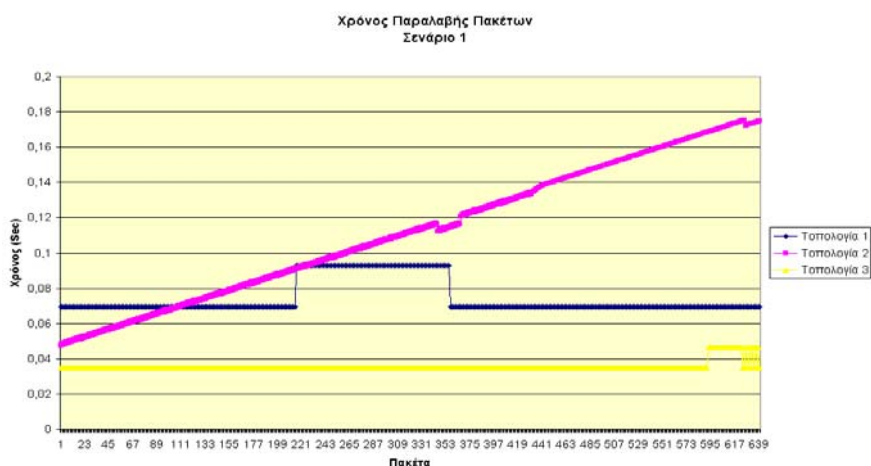


Σχήμα 7.4.1.4 Αριθμός πακέτων που παραλήφθηκαν

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που λαμβάνονται διατηρούνται σε ψηλά επίπεδα για το δίκτυο με πολλές συνδέσεις. Ελαττώνονται αμυδρά για τα δίκτυα που έχουν τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο

να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς και άρα χάνει περισσότερα πακέτα. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές και άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης.

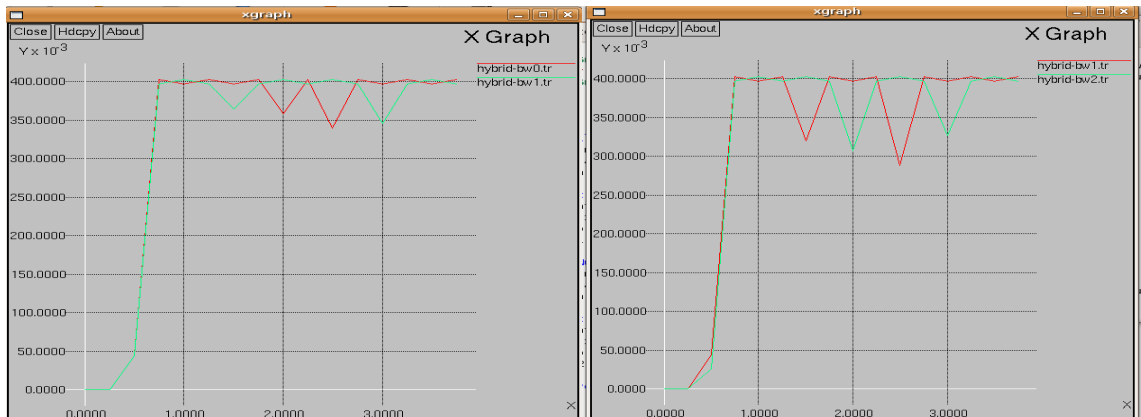
Χρόνος Παραλαβής Πακέτων



Σχήμα 7.4.1.5 Καθυστερήσεις με τους αριθμούς ακολουθίας

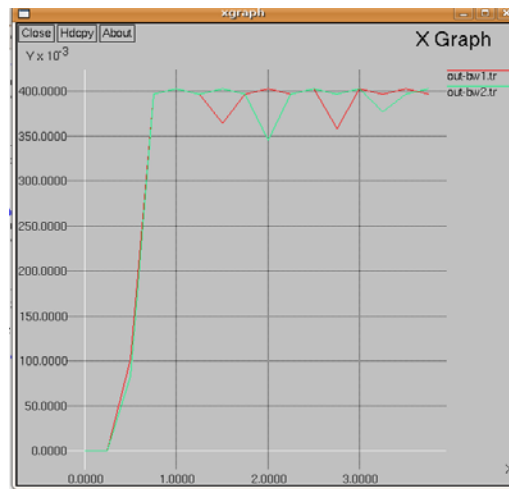
Παρατηρούμε ότι ο χρόνος περίπου παραμένει σταθερός για τις τοπολογίες ένα και τρία, ενώ για την τοπολογία τρία αυξάνεται. Ο λόγος είναι ότι λόγω της υπερβολικής χρήσης των ροών τα εναλλακτικά μονοπάτια που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο Otel ώστε να πληρούν κριτήρια εύρους ζώνης και βάρους είναι μακρινά και μεταφέρουν όχι μόνο μια ροή έτσι η παραλαβή των πακέτων να καθυστερεί. Στις δύο άλλες τοπολογίες με τις περισσότερες συνδέσεις είναι πιο εύκολο να μεταφερθεί κάθε ροή σε κοντινές συνδέσεις μόνη της.

Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις



Τοπολογία 1

Τοπολογία 2



Τοπολογία 3

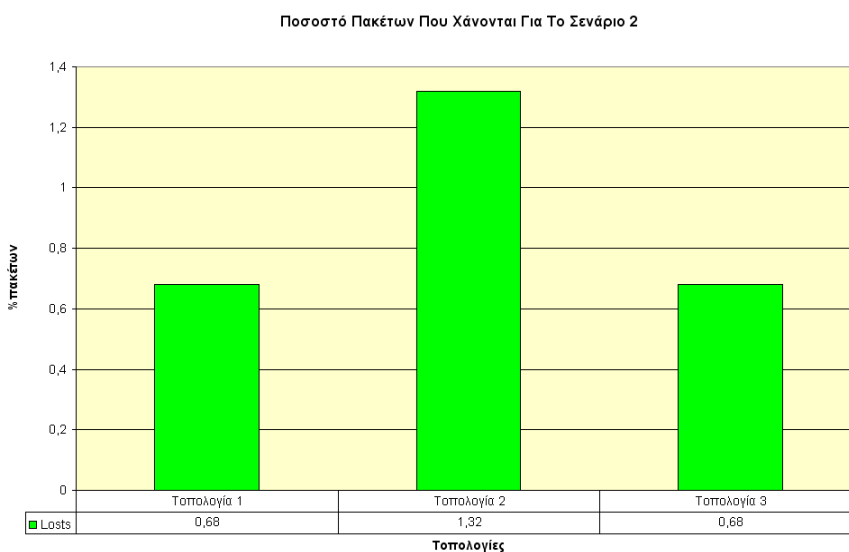
Σχήμα 7.4.1.6 Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις για τις τρεις τοπολογίες

Από τις πιο πάνω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι τα δεδομένα που μεταφέρονται ανά δευτερόλεπτο για κάθε ροή διατηρούνται σε ψηλά επίπεδα (max utilization). Τα περισσότερα δεδομένα μεταφέρονται από τις ροές με την μεγαλύτερη προτεραιότητα. Πέφτει ελάχιστα για κάθε ροή μόνο όταν θα παρουσιαστεί σφάλμα, μέχρι να γίνει η

επαναφορά. Το διάστημα αυτό μεταφέρονται περισσότερα δεδομένα από τις ροές με μικρότερες προτεραιότητες.

7.4.2 Γραφικές Παραστάσεις για Σενάριο 2

Πακέτα που χάνονται

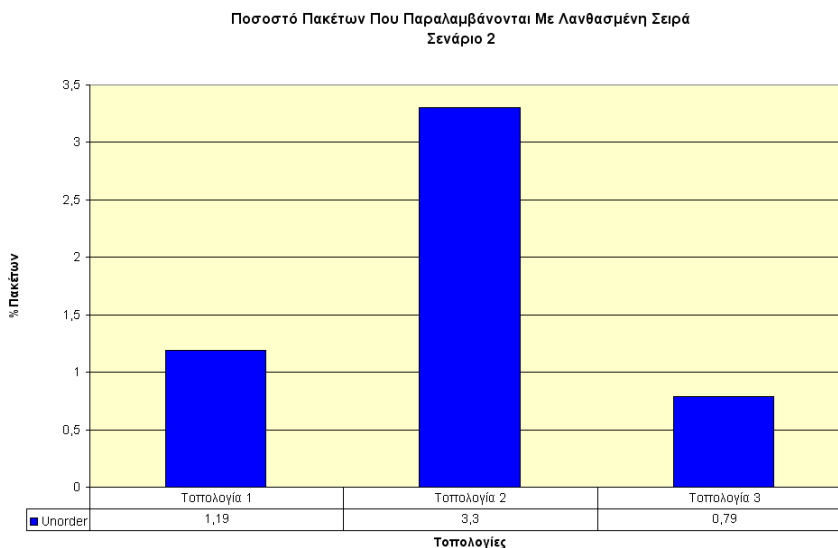


Σχήμα 7.4.2.1 Ποσοστό πακέτων που χάνονται

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που χάνονται διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Λίγο περισσότερα είναι για το δίκτυο που έχει τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές και άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δύο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότεν το δίκτυο δεχόταν

μεγαλύτερο αριθμό ροών που έπρεπε να φιλοξενήσει και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα και άρα περισσότερα πακέτα.

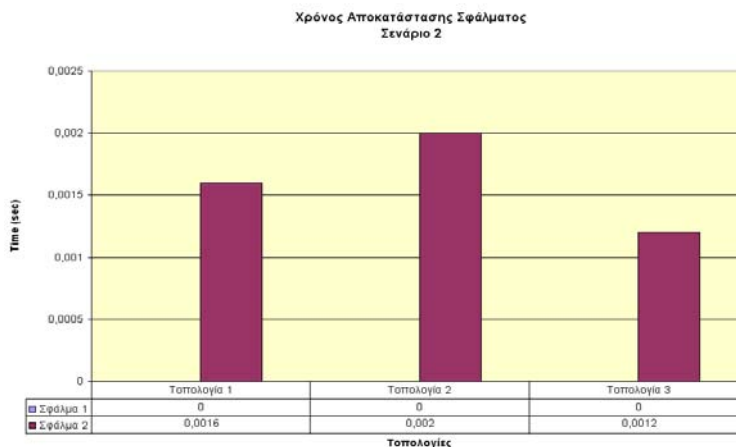
Πακέτα που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά



Σχήμα 7.4.2.2 Ποσοστό πακέτων που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που λαμβάνονται διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Περισσότερα είναι για τα δίκτυα που έχουν τις λιγότερες συνδέσεις, όπου δυσκολεύεται να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές, άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι ροές αναγκάζονται να κατανεμηθούν και αργούν να δρομολογηθούν, λόγω του μικρού αριθμού συνδέσεων που υπάρχουν στα δίκτυα.

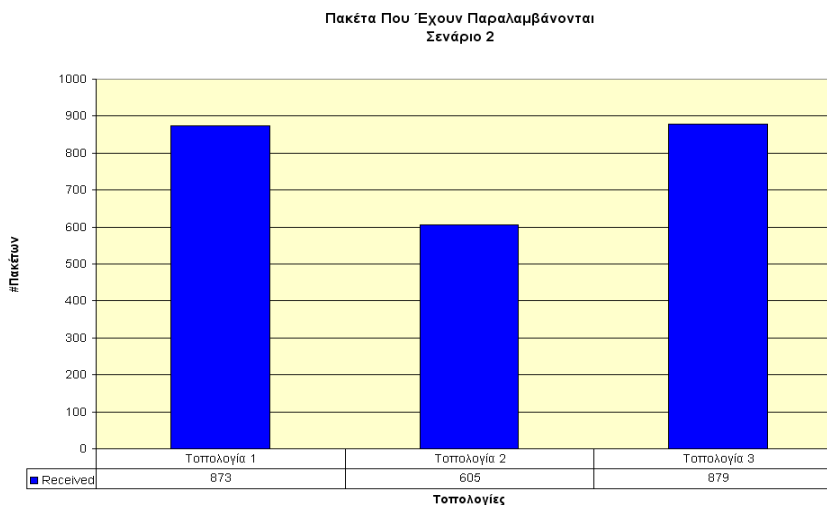
Χρόνος Αποκατάστασης του κάθε σφάλματος



Σχήμα 7.4.2.3 Χρόνος αποκατάστασης σφάλματος

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος χρόνος επαναφοράς μετά από σφάλμα (όλων των ροών) διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και για την επαναφορά με τα εναλλακτικά μονοπάτια όπως υπολογίζονται από τον LSFSB αλγόριθμο και για την επαναφορά με τον τροποποιημένο αλγόριθμο Otel . Περισσότερα είναι για το δίκτυο που έχει τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές και άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι ροές αναγκάζονται να κατανεμηθούν και αργούν να δρομολογηθούν. Σε περίπτωση που υπάρχουν όπως στην τρίτη τοπολογία και βρίσκει γρήγορα εναλλακτικά και δεν είναι υπερφορτωμένα ο χρόνος επαναφοράς είναι πολύ μικρός. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δυο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότε στο δίκτυο δεχόταν μεγαλύτερο αριθμό ροών που έπρεπε να φιλοξενήσει και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα, άρα είναι πιο δύσκολο να βρεθούν μονοπάτια που να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, κόστος (βάρος).

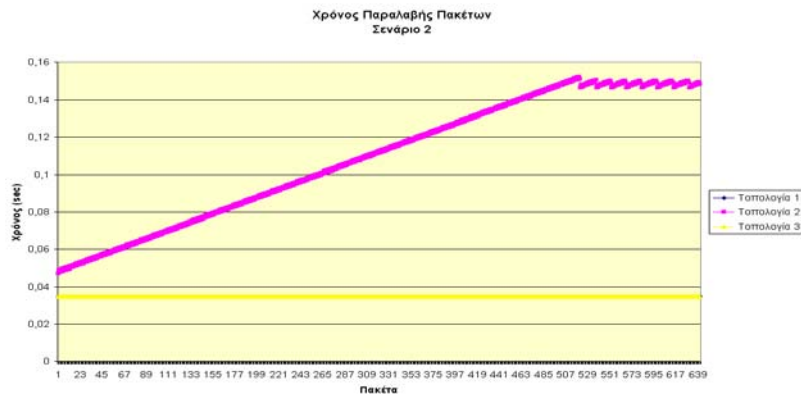
Πακέτα που παραλαμβάνονται



Σχήμα 7.4.2.4 Αριθμός πακέτων που παραλαμβάνονται

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που λαμβάνονται διατηρούνται σε ψηλά επίπεδα. Ελαττώνονται αμυδρά για τα δίκτυα που έχουν τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς και άρα χάνει περισσότερα πακέτα. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών. Οι ροές αναγκάζονται να κατανεμηθούν και αργούν να δρομολογηθούν, λόγω του μικρού αριθμού συνδέσεων που υπάρχουν στα δίκτυα. Αν υπάρχουν όπως στην τρίτη τοπολογία βρίσκει γρήγορα εναλλακτικά και δεν είναι υπερφορτωμένα και άρα τα πακέτα που φτάνουν είναι πολλά.

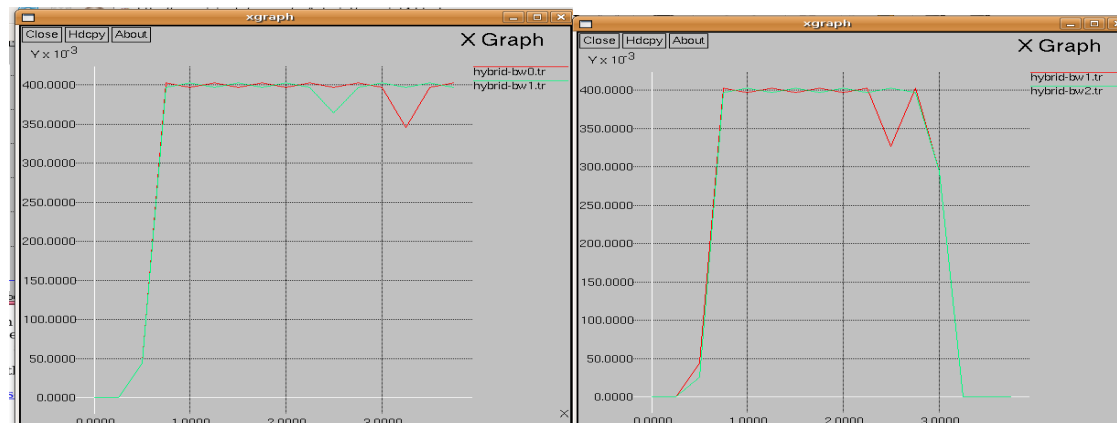
Χρόνος Παραλαβής Πακέτων



Σχήμα 7.4.2.5 Καθυστερήσεις με τους αριθμούς ακολουθίας

Παρατηρούμε ότι ο χρόνος περίπου παραμένει σταθερός για τις τοπολογίες ένα και τρία, ενώ για την τοπολογία τρία αυξάνεται. Ο λόγος είναι ότι λόγω της υπερβολικής χρήσης των ροών τα εναλλακτικά μονοπάτια που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο Otel ώστε να πληρούν κριτήρια εύρους ζώνης και βάρους είναι μακρινά και μεταφέρουν όχι μόνο μια ροή με αποτέλεσμα η παραλαβή των πακέτων να καθυστερεί. Στις δύο άλλες τοπολογίες με τις περισσότερες συνδέσεις είναι πιο εύκολο να μεταφερθεί κάθε ροή σε κοντινές συνδέσεις μόνη της.

Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις



Τοπολογία 1

Τοπολογία 2



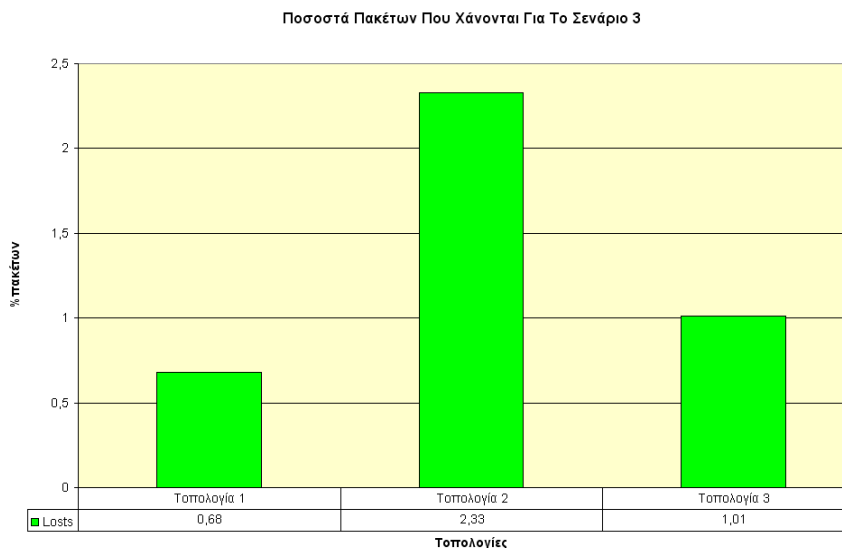
Τοπολογία 3

Σχήμα 7.4.2.6 Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις για τις τρεις τοπολογίες

Από τις πιο πάνω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι τα δεδομένα που μεταφέρονται ανά δευτερόλεπτο για κάθε ροή διατηρούνται σε ψηλά επίπεδα (max utilization). Τα περισσότερα δεδομένα μεταφέρονται από τις ροές με την μεγαλύτερη προτεραιότητα. Πέφτει ελάχιστα για κάθε ροή μόνο όταν θα παρουσιαστεί σφάλμα, μέχρι να γίνει η επαναφορά. Το διάστημα αυτό μεταφέρονται περισσότερα δεδομένα από τις ροές με μικρότερες προτεραιότητες

7.4.3 Γραφικές Παραστάσεις για το Σενάριο 3

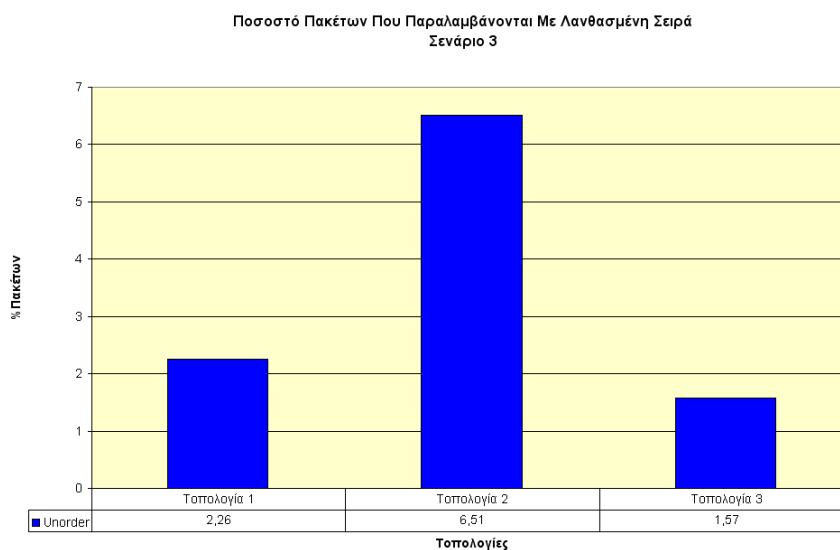
Πακέτα που χάνονται



Σχήμα 7.4.3.1 Ποσοστά πακέτων που χάνονται

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που χάνονται διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Λίγο περισσότερα είναι για το δίκτυο που έχει τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών. Και είναι πιο δύσκολο να βρεθούν μονοπάτια που να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, κόστος (βάρος).

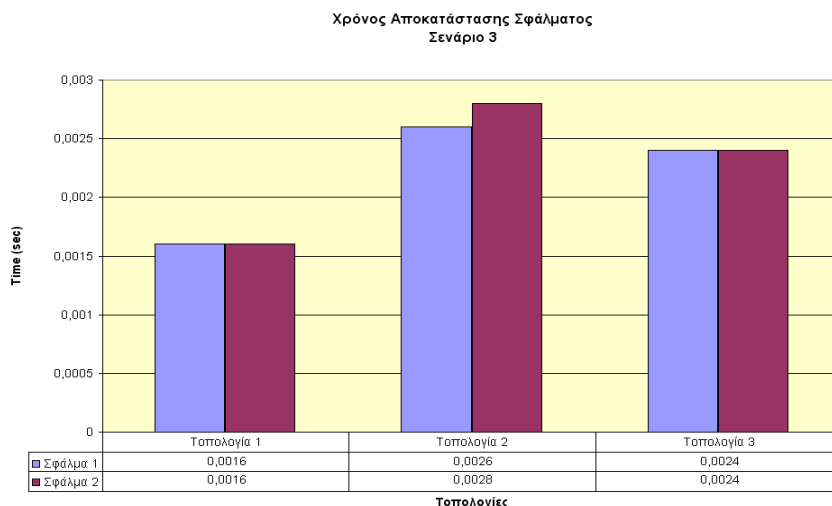
Πακέτα που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά



Σχήμα 7.4.3.2 Ποσοστό πακέτων που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που λαμβάνονται με λανθασμένη σειρά διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Περισσότερα είναι για το δίκτυο που έχει τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δυο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότεν στο δίκτυο δεχόταν μεγαλύτερο αριθμό ροών που έπρεπε να φιλοξενήσει και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα.

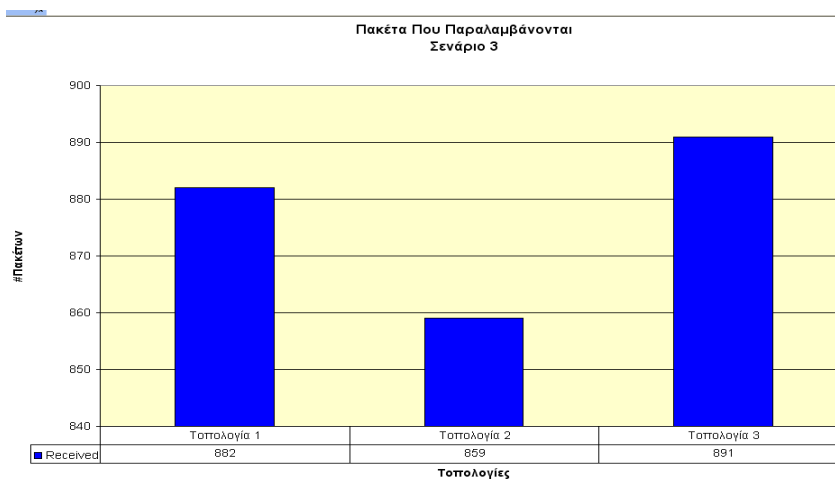
Χρόνος Αποκατάστασης του κάθε σφάλματος



Σχήμα 7.4.3.3 Χρόνος αποκατάστασης σφάλματος

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος χρόνος επαναφοράς μετά από σφάλμα (όλων των ροών) διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα για την επαναφορά με τα εναλλακτικά μονοπάτια όπως υπολογίζονται από τον LSFSB αλγόριθμο και για την επαναφορά με τον τροποποιημένο αλγόριθμο Otel. Ελάχιστα πιο αυξημένο παρουσιάζεται για το δίκτυο με λιγότερες συνδέσεις όπου δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δυο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότεν στο δίκτυο δεχόταν μεγαλύτερο αριθμό ροών που έπρεπε να φιλοξενήσει και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα.

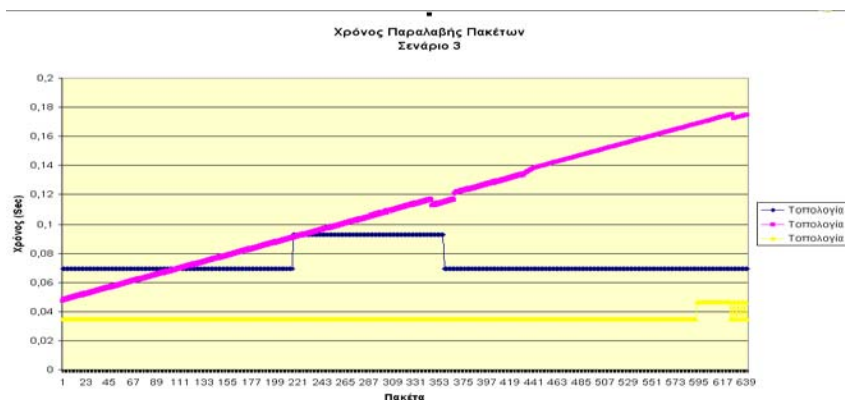
Πακέτα που παραλαμβάνονται



Σχήμα 7.4.3.4 Αριθμός πακέτων που παραλαμβάνονται.

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που λαμβάνονται διατηρούνται σε ψηλά επίπεδα. Ελαττώνονται αμυδρά για τα δίκτυα που έχουν τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς και άρα χάνει περισσότερα πακέτα. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές και άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι ροές αναγκάζονται να κατανεμηθούν και αργούν να δρομολογηθούν. Αυτό όμως συμβαίνει λόγω του μικρού αριθμού συνδέσεων που υπάρχουν στα δίκτυα. Σε περίπτωση που υπάρχουν όπως στην τρίτη τοπολογία και βρίσκει γρήγορα εναλλακτικά και δεν είναι υπερφορτωμένα και άρα τα πακέτα που φτάνουν είναι πολλά.

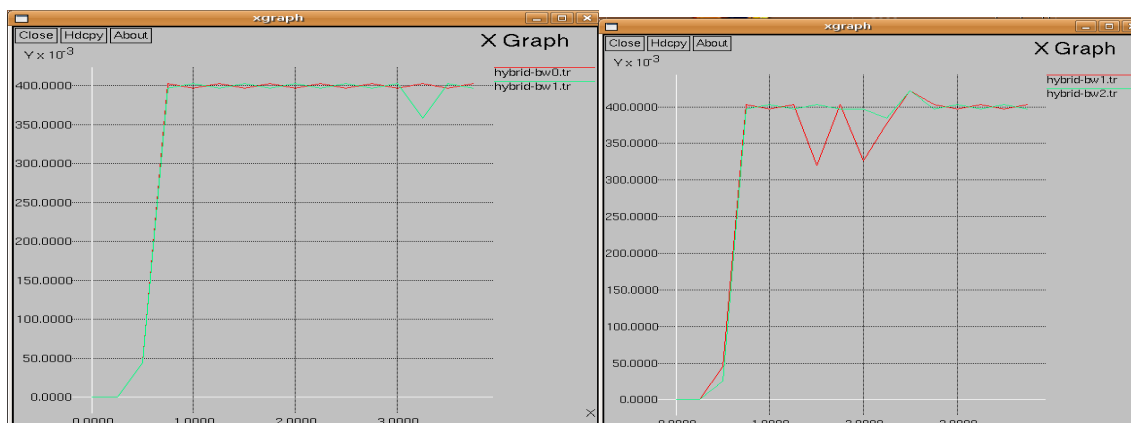
Χρόνος Παραλαβής Πακέτων



Σχήμα 7.4.3.5 Καθυστερήσεις με τους αριθμούς ακολουθίας

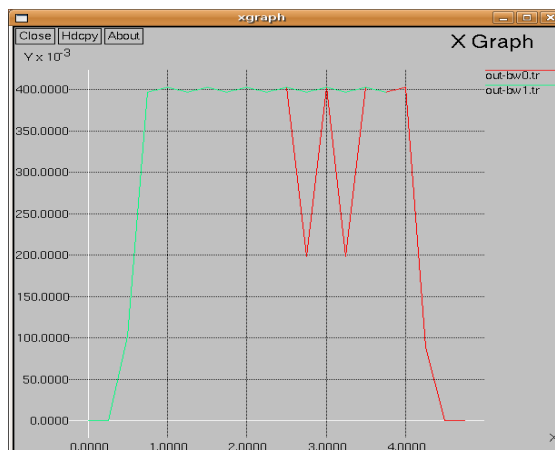
Παρατηρούμε ότι ο χρόνος περίπου παραμένει σταθερός για τις τοπολογίες ένα και τρία, ενώ για την τοπολογία τρία αυξάνεται. Ο λόγος είναι ότι λόγω της υπερβολικής χρήσης των ροών τα εναλλακτικά μονοπάτια που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο Otel ώστε να πληρούν κριτήρια εύρους ζώνης και βάρους είναι μακρινά και μεταφέρουν όχι μόνο μια ροή με αποτέλεσμα η παραλαβή των πακέτων να καθυστερεί. Στις δύο άλλες τοπολογίες με τις περισσότερες συνδέσεις είναι πιο εύκολο να μεταφερθεί κάθε ροή σε κοντινές συνδέσεις μόνη της.

Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις



Τοπολογία 1

Τοπολογία 2



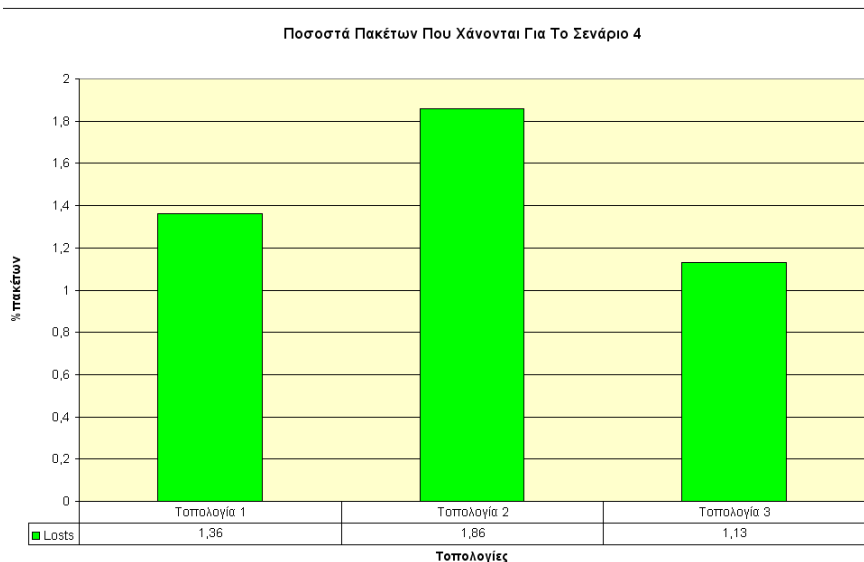
Τοπολογία 3

Σχήμα 7.4.1.6 Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις για τις τρεις τοπολογίες

Από τις πιο πάνω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι τα δεδομένα που μεταφέρονται ανά δευτερόλεπτο για κάθε ροή διατηρούνται σε ψηλά επίπεδα (max utilization). Τα περισσότερα δεδομένα μεταφέρονται από τις ροές με την μεγαλύτερη προτεραιότητα. Πέφτει ελάχιστα για κάθε ροή μόνο όταν θα παρουσιαστεί σφάλμα, μέχρι να γίνει η επαναφορά. Το διάστημα αυτό μεταφέρονται περισσότερα δεδομένα από τις ροές με μικρότερες προτεραιότητες.

7.4.1 Γραφικές Παραστάσεις για Σενάριο 4

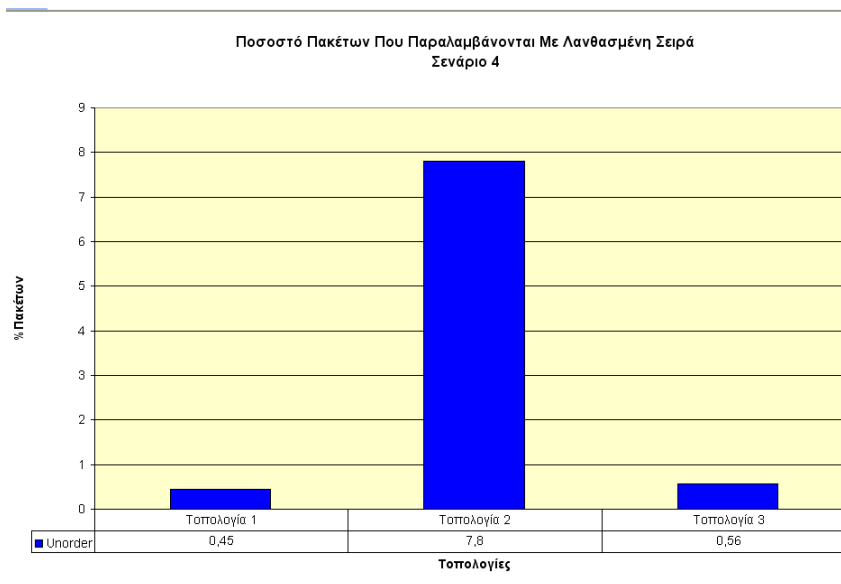
Πακέτα που χάνονται



Σχήμα 7.4.4.1 Αριθμός πακέτων που χάθηκαν

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που χάνονται διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Λίγο περισσότερα είναι για το δίκτυο που έχει τις λιγότερες συνδέσεις γιατί δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές και άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δύο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότεν το δίκτυο δεχόταν μεγαλύτερο αριθμό ροών που έπρεπε να φιλοξενήσει και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα για αυτό και τα λίγο περισσότερα πακέτα (δύσκολη επιλογή εναλλακτικού μονοπατιού).

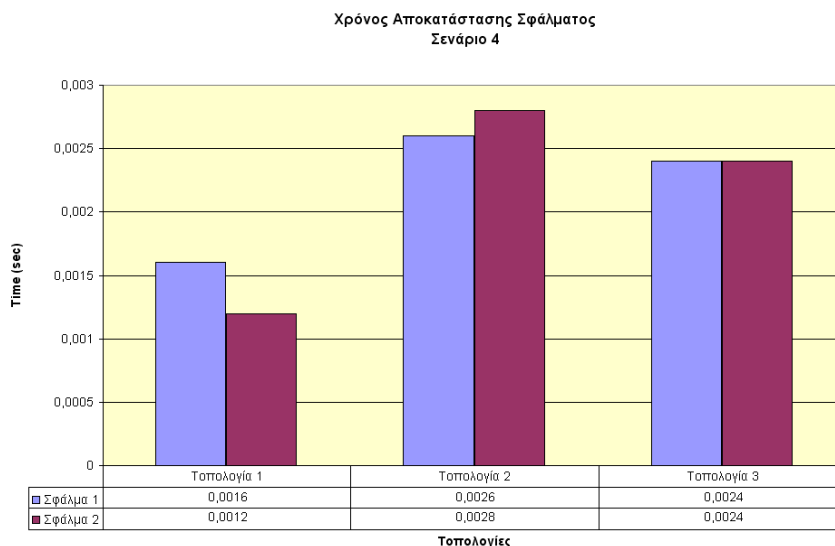
Πακέτα που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά



Σχήμα 7.4.4.2 Ποσοστά πακέτων που παραλήφθηκαν με λανθασμένη σειρά

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που λαμβάνονται με λανθασμένη σειρά διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Περισσότερα είναι για το δίκτυο που έχει τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές και άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι ροές αναγκάζονται να κατανεμηθούν και αργούν να δρομολογηθούν, λόγω του μικρού αριθμού συνδέσεων που υπάρχουν στα δίκτυα. Σε περίπτωση που υπάρχουν όπως στην τρίτη τοπολογία και βρίσκει γρήγορα εναλλακτικά και δεν είναι υπερφορτωμένα, τα πακέτα που φτάνουν με λανθασμένη σειρά είναι ελάχιστα. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δυο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότεν στο δίκτυο δεχόταν μεγαλύτερο αριθμό ροών που έπρεπε να φιλοξενήσει και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα για αυτό και τα λίγο περισσότερα πακέτα.

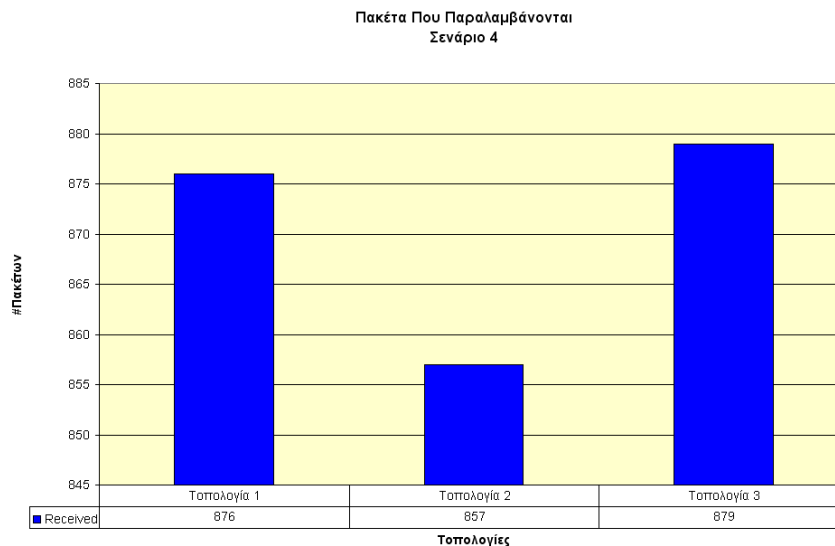
Χρόνος Αποκατάστασης του κάθε σφάλματος



Σχήμα 7.4.4.3 Χρόνος αποκατάσταση κάθε σφάλματος

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος χρόνος επαναφοράς μετά από σφάλμα (όλων των ροών) διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και για την επαναφορά με τα εναλλακτικά μονοπάτια όπως υπολογίζονται από τον LSFSB αλγόριθμο και για την επαναφορά με τον τροποποιημένο αλγόριθμο Otel. Ελάχιστα πιο αυξημένο παρουσιάζεται για το δίκτυο με λιγότερες συνδέσεις όπου δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών. Οι ροές αναγκάζονται να κατανεμηθούν και αργούν να δρομολογηθούν, λόγο του μικρού αριθμού συνδέσεων που υπάρχουν στα δίκτυα. Αν υπάρχουν, όπως στην τρίτη τοπολογία και βρίσκει γρήγορα εναλλακτικά και δεν είναι υπερφορτωμένα τότε ο χρόνος επαναφοράς είναι πολύ μικρός. Επιπλέον στις τοπολογίες ένα και δυο έχουν οριστεί περισσότεροι κόμβοι από τους οποίους μπορούσε να εισέλθει ροή οπότεν στο δίκτυο δεχόταν μεγαλύτερο αριθμό ροών και άρα υπάρχει μεγαλύτερη συμφόρηση στα δίκτυα.

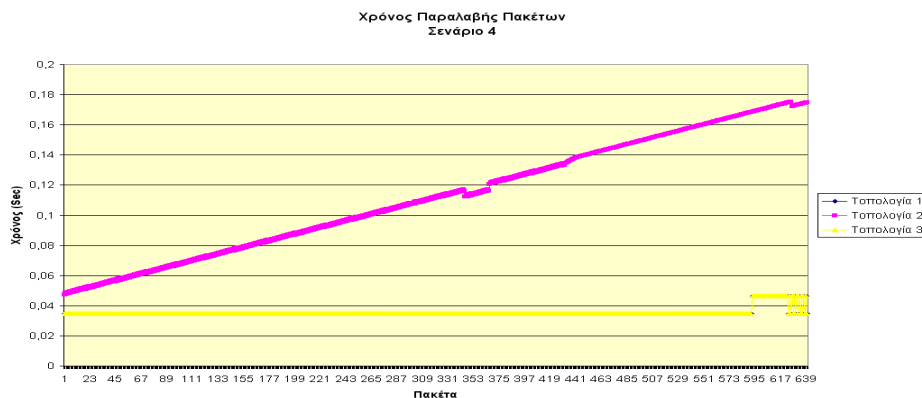
Πακέτα που παραλαμβάνονται



Σχήμα 7.4.4.4 Αριθμός πακέτων που παραλήφθηκαν

Από την πιο πάνω γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των πακέτων (όλων των ροών) που λαμβάνονται διατηρούνται σε ψηλά επίπεδα για το δίκτυο με πολλές συνδέσεις. Ελαττώνονται αμυδρά για τα δίκτυα που έχουν τις λιγότερες συνδέσεις και άρα δυσκολεύεται στο να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ο τροποποιημένος Otel και άρα καθυστερεί ο συνολικός χρόνος επαναφοράς και άρα χάνει περισσότερα πακέτα. Η παρουσία των λίγων συνδέσεων δυσχεραίνει την επιλογή των μονοπατιών γιατί α) ελαττώνονται οι προσβάσιμες συνδέσεις και β) όσες απομένουν χρησιμοποιούνται και από άλλες ροές και άρα είναι δύσκολο να βρει μονοπάτια με το απαιτούμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Χρόνος Παραλαβής Πακέτων



Σχήμα 7.4.4.5 Καθυστερήσεις με τους αριθμούς ακολουθίας

Παρατηρούμε ότι ο χρόνος περίπου παραμένει σταθερός για τις τοπολογίες ένα και τρία, ενώ για την τοπολογία τρία αυξάνεται. Ο λόγος είναι ότι λόγω της υπερβολικής χρήσης των ροών τα εναλλακτικά μονοπάτια που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο Otel ώστε να πληρούν κριτήρια εύρους ζώνης και βάρους είναι μακρινά και μεταφέρουν όχι μόνο μια ροή με αποτέλεσμα η παραλαβή των πακέτων να καθυστερεί. Στις δύο άλλες τοπολογίες με τις περισσότερες συνδέσεις είναι πιο εύκολο να μεταφερθεί κάθε ροή σε κοντινές συνδέσεις μόνη της.

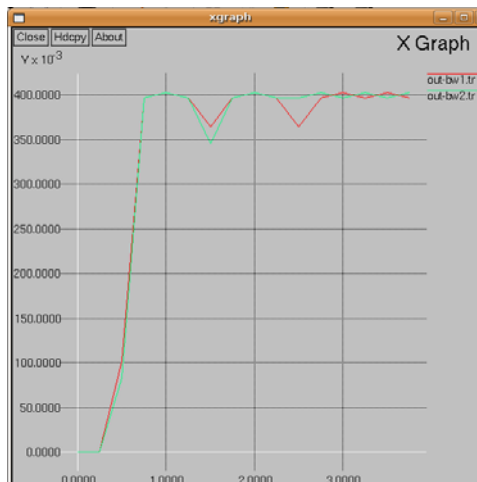
Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις



Τοπολογία 1



Τοπολογία 2



Τοπολογία 3

Σχήμα 7.4.4.6 Δεδομένα που μεταφέρονται το δευτερόλεπτο στις συνδέσεις για τις τρεις τοπολογίες

Από τις πιο πάνω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι τα δεδομένα που μεταφέρονται ανά δευτερόλεπτο για κάθε ροή διατηρούνται σε ψηλά επίπεδα (max utilization). Τα περισσότερα δεδομένα μεταφέρονται από τις ροές με την μεγαλύτερη προτεραιότητα. Πέφτει ελάχιστα για κάθε ροή μόνο όταν θα παρουσιαστεί σφάλμα, μέχρι να γίνει η επαναφορά. Το διάστημα αυτό μεταφέρονται περισσότερα δεδομένα από τις ροές με μικρότερες προτεραιότητες.

7.5 Συμπεράσματα

Από Πειραματική Αξιολόγηση Από την πραγματοποίηση των πιο πάνω πειραμάτων καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα τόσο για τον αλγόριθμο όσο και για τους παράγοντες που επηρέασαν τα αποτελέσματα μας.

7.5 Συμπεράσματα

Διαφορετικές τοπολογίες μπορούν να προκαλέσουν διαφορετικά αποτελέσματα για το ίδιο σενάριο. Αυτό γίνεται γιατί τα εναλλακτικά μονοπάτια υπολογίζονται δυναμικά σύμφωνα με το δέντρο των μικρότερων διαδρομών (SPT - Shortest Path Tree) που προκύπτει από το δίκτυο και

το διαθέσιμο εύρος ζώνης κάθε σύνδεσης (μονοπατιού συνολικά). Για την απόδοση κάποιου αλγορίθμου μεγάλο μέρος εξαρτάται από την τοπολογία.

Γενικά

Ο αλγόριθμος είναι πιο αποδοτικός όταν χρησιμοποιείται σε δίκτυα με πολλές συνδέσεις. Στα δίκτυα με λίγες συνδέσεις δυσκολεύεται να βρει εναλλακτικά μονοπάτια που να πληρούν συγκεκριμένους περιορισμούς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος επαναφοράς και κατ' επέκταση να αυξάνονται τα πακέτα που φτάνουν με λανθασμένη σειρά.

Ο αλγόριθμος μπορεί να ανεχτεί μεγάλο αριθμό σφαλμάτων, είτε να συμβούν όλα σε μια ροή είτε αυτά παρουσιαστούν σε πολλές ροές στο δίκτυο. Ελέγχονται και επαναδρομολογούνται.

Εξυπηρετούνται όλες οι ροές που εισάγονται στο σύστημα, τόσο για την είσοδο τους και τη φιλοξενία τους από το δίκτυο, όσο και για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων που παρουσιάζονται στην κάθε μια από αυτές.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει μηχανική κυκλοφορία και ανοχή σφαλμάτων, με τέτοιο τρόπο ώστε το ένα να εξυπηρετεί το ένα το άλλο. Συγκεκριμένα επιτυγχάνει (1) να κατανέμει τις ροές που εισέρχονται στο δίκτυο χρησιμοποιώντας διαφορετικά μονοπάτια (εξισορρόπηση φορτίου). (2) Να μεταφέρεται μεγάλος αριθμός δεδομένων ανά δευτερόλεπτο (max utilization). Από αυτά δίνει την δυνατότητα στον αλγόριθμο να κρατά πάντα διαθέσιμους πόρους, που μπορεί να χρησιμοποιήσει για τα εναλλακτικά μονοπάτια και να εξασφαλίζει την επαναφορά της ροής, έστω και αν αυτό μπορεί να στοιχίσει λίγο ως προς την σειρά παραλαβής των πακέτων.

Ο νέος αλγόριθμος μπορεί να αντιμετωπίσει με αποδοτικό τρόπο τυχαία σφάλματα που συμβαίνουν στο δίκτυο.

Η δυνατότητα του αλγορίθμου LSFSB να υπολογίζει μονοπάτια που είναι ανεξάρτητα στο μέγιστο βαθμό για κάθε ροή που ελέγχει, εξασφαλίζει τον περιορισμό των συνεπειών κάποιου σφάλματος που θα εμφανιστεί σε κάθε ροή να επηρεάζει μόνο αυτή.

Ποιότητα Υπηρεσιών

Διατηρεί κάθε ροή όλα τα χαρακτηριστικά της, όπως π.χ. η απώλεια πακέτων σε χαμηλά επίπεδα, παραλαβή μεγάλου αριθμού πακέτων, μικρές καθυστερήσεις, εξασφαλίζει QoS στο δίκτυο.

Πακέτα που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά

Τα πακέτα που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και στην περίπτωση που θα πρέπει τα εναλλακτικά μονοπάτια να υπολογιστούν από τον αλγόριθμο Otel.

Πακέτα που χάνονται

Τα πακέτα που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και στην περίπτωση που θα πρέπει τα εναλλακτικά μονοπάτια να υπολογιστούν από τον αλγόριθμο Otel.

Μέγιστη Χρησιμοποίηση

Με τον προτεινόμενο αλγόριθμο επιτυγχάνεται η μέγιστη χρήση των πόρων. Δηλαδή μπορούν να μεταφερθούν πολλά δεδομένα ανά δευτερόλεπτο, ιδιαίτερα για τις ροές που έχουν υψηλές προτεραιότητες. Μικρή πτώση υπάρχει την ώρα που υπολογίζονται τα εναλλακτικά μονοπάτια για μια ροή, μέχρι να αλλάξει μονοπάτι όπου θα δρομολογηθεί, αλλά ακόμα και εκεί φροντίζει να χρησιμοποιείται από ροές μικρότερης προτεραιότητας.

Χρόνος Παραλαβής Πακέτων – Ελάχιστες Καθυστερήσεις

Οι αλλαγές στους χρόνους γίνονται ανάλογα με το πότε η ροή επαναφέρεται στα νέα μονοπάτια κάθε φορά. Η χρήση της άμεσης επαναδρομολόγησης ελαττώνει το χρόνο παραλαβής πακέτων. Ο χρόνος παραλαβής των πακέτων είναι μικρός και διατηρείται μικρός. Πρόβλημα παρουσιάζει μόνο σε δίκτυα με μικρό αριθμό συνδέσεων που το αναγκάζει να δρομολογεί τις ροές σε μονοπάτια που έχουν κοινά τμήματα μεταξύ τους και σε μεγάλα με αποτέλεσμα, ο χρόνος παραλαβής των πακέτων να αυξάνεται με κάθε σφάλμα που θα παρουσιαστεί και θα υποχρεώσει την ροή να αλλάξει μονοπάτι.

Χρόνος Αποκατάστασης

Η χρήση της άμεσης επαναδρομολόγησης ελαττώνει το χρόνο αποκατάστασης δικτύου.

Απώλεια Πακέτων

Το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών που υπάρχουν σε πακέτα οφείλονται στην χρήση του τροποποιημένου αλγορίθμου Otel, όπου δυναμικά υπολογίζει τα μονοπάτια με την εμφάνιση του σφάλματος.

Router Based

Η χρήση τοπικών πληροφοριών και η ιδιότητα του router-based του αλγορίθμου LSFSB, μειώνει την συμφόρηση στο δίκτυο, αφήνοντας τις συνδέσεις να χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά από τις ροές και όχι τα μηνύματα.

Κεφάλαιο 8

Τελικά Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

8.1 Τελικά Συμπεράσματα

Μετά από την μελέτη των διαφόρων αλγορίθμων τόσο για ανοχή σφαλμάτων, όσο και για την μηχανική κυκλοφορίας και αλγορίθμους που κατά ένα μέρος μπορούν να συνδυάσουν και τα δύο, καταλήξαμε σε κάποια συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αφορούν το κατά πόσο υπάρχουν αλγόριθμοι που να μπορούν να συνδυάσουν την ανοχή σφαλμάτων και την μηχανική κυκλοφορίας, αν ναι ποιες μεθόδους χρησιμοποιούν και πόσο ικανοποιητικές είναι. Επιπλέον μετά από την μελέτη των αλγορίθμων επιλέγηκαν ένας αλγόριθμος από την ανοχή σφαλμάτων και ένας από την μηχανική κυκλοφορίας όπου συνδυάστηκαν και δημιούργησαν ένα νέο αλγόριθμο που αποτελεί τον καλύτερο αλγόριθμο και ως προς την ανοχή σφαλμάτων και ως προς τη μηχανική κυκλοφορίας.

Τα συμπεράσματα αυτά είναι:

Υπάρχει ανάγκη από μηχανισμούς που αντιμετωπίζουν τα σφάλματα που μπορεί να εμφανιστούν σε ένα δίκτυο και μηχανισμούς που θα διευκολύνουν τη μεταφορά της κυκλοφορίας διαμέσου ενός δικτύου με τον πιο αποδοτικό, λειτουργικό και αξιόπιστο τρόπο ώστε να προσφέρεται καλύτερη υπηρεσία στους χρήστες σε σχέση με την καθυστέρηση και τα δεδομένα που μεταφέρονται ανά δευτερόλεπτο.

Οι προτεραιότητες που ορίζονται για τις ροές κάποιου δικτύου επιτυγχάνουν πιο αποδοτική διαχείριση των πόρων και μεγαλύτερη ανοχή σφαλμάτων. Με τις προτεραιότητες καθορίζονται τα πακέτα που είναι πιο σημαντικά για να μπορούν να χρησιμοποιούν πόρους από τα λιγότερο σημαντικά.

Στους αλγορίθμους που συνδυάζουν μηχανική κυκλοφορίας και ανοχή σφαλμάτων (όπως και στον προτεινόμενο) λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα λάθους με τις προτεραιότητες. Έτσι υπάρχουν πάντα πόροι για να δρομολογήσει τη ροή του.

Είναι σημαντικό να μπορούν να συνδυαστούν η ανοχή σφαλμάτων και η μηχανική κυκλοφορίας. Η ανοχή σφαλμάτων είναι σημαντικό να υπάρχει για να αντιμετωπίζει την εμφάνιση σφαλμάτων στα μονοπάτια και η μηχανική κυκλοφορίας που θα φροντίζει τα εναλλακτικά μονοπάτια τα οποία θα επιλέγονται να είναι σε θέση να μεταφέρουν το φορτίο της σύνδεσης που εμφανίστηκε το σφάλμα.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι μια καινούργια ιδέα καθώς, όλοι οι άλλοι αλγόριθμοι που έχουν προταθεί για να συνδυάσουν ανοχή σφαλμάτων και μηχανική κυκλοφορίας αποτελούν επεκτάσεις αλγορίθμων που υπάρχουν είδη είτε για μηχανική κυκλοφορίας ή ανοχή σφαλμάτων.

Ο συνδυασμός της ανοχής σφαλμάτων μπορεί να έχει κάποια πλεονεκτήματα, όπως το να ενισχύει την ποιότητα υπηρεσιών με καλύτερη διαχείριση των πόρων.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος σε αντίθεση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους που έχουν προταθεί παίρνει τα πλεονεκτήματα και της επαναδρομολόγησης και της εναλλαγής σε προστατευμένο μονοπάτι. Οι υπόλοιποι χρησιμοποιούν μια από τις δύο μεθόδους κάθε φορά.

Ο αλγόριθμος είναι πιο αποδοτικός όταν χρησιμοποιείται σε δίκτυα με πολλές συνδέσεις. Στα δίκτυα με λίγες συνδέσεις δυσκολεύεται να βρει εναλλακτικά μονοπάτια που να πληρούν συγκεκριμένους περιορισμούς.

Ο αλγόριθμος μπορεί να ανεχτεί αρκετά σφάλματα, είτε να συμβούν όλα σε μια ροή είτε αυτά παρουσιαστούν σε πολλές ροές στο δίκτυο. Ελέγχονται και επαναδρομολογούνται.

Εξυπηρετούνται όλες οι ροές που εισάγονται στο σύστημα, τόσο για την είσοδο τους και τη φιλοξενία τους από το δίκτυο, όσο και για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων που παρουσιάζονται στην κάθε μια από αυτές.

Ο νέος αλγόριθμος μπορεί να αντιμετωπίσει με αποδοτικό τρόπο τυχαία σφάλματα που συμβαίνουν στο δίκτυο.

Διατηρεί κάθε ροή όλα τα χαρακτηριστικά της, όπως π.χ η απώλεια πακέτων σε χαμηλά επίπεδα, παραλαβή μεγάλου αριθμού πακέτων, μικρές καθυστερήσεις, εξασφαλίζει QoS στο δίκτυο.

Τα πακέτα που χάνονται, τα πακέτα που παραλαμβάνονται με λανθασμένη σειρά διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και στην περίπτωση που θα πρέπει τα εναλλακτικά μονοπάτια να υπολογιστούν από τον τροποποιημένο αλγόριθμο Otel.

Με τον προτεινόμενο αλγόριθμο επιτυγχάνεται η συνεχής μεταφορά πολλών δεδομένων ανά δευτερόλεπτο. Μικρή πτώση υπάρχει την ώρα που υπολογίζονται τα εναλλακτικά μονοπάτια για μια ροή.

Ο χρόνος παραλαβής των πακέτων είναι μικρός και διατηρείται μικρός. Πρόβλημα παρουσιάζει μόνο σε δίκτυα με μικρό αριθμό συνδέσεων που το αναγκάζει να δρομολογεί τις ροές σε μονοπάτια που έχουν κοινά τμήματα μεταξύ τους και μεγάλα.

Η χρήση της άμεσης επαναδρομολόγησης ελαττώνει το χρόνο αποκατάστασης δικτύου.

Ο αλγόριθμος μπορεί να αντιμετωπίσει ακόμα και σφάλματα σε κόμβους, έστω και αν πολλές συνδέσεις πλέον δεν είναι προσβάσιμες.

Ο νέος αλγόριθμος μπορεί να αντιμετωπίσει με αποδοτικό τρόπο τυχαία σφάλματα που συμβαίνουν στο δίκτυο

8.2 Μελλοντική Εργασία

Μέσα από την διπλωματική αυτή εργασία πιστεύουμε ότι ο υβριδικός αλγόριθμος που δημιουργήθηκε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων Hybrid για ανοχή σφαλμάτων και LSFBSB είναι ο καλύτερος αλγόριθμος για την επαναφορά ενός δικτύου μετά την παρουσίαση προβλήματος είτε σε κόμβους ή συνδέσμους του δικτύου επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα και την καλή διαχείριση των πόρων του δικτύου (δεν μένουν αχρησιμοποίητοι κάποιοι πόροι και άλλοι να χρησιμοποιούνται στο μέγιστο βαθμό). Αυτό οφείλεται στο ότι συνδυάζει αλγορίθμους που έχουν επιλεγεί οι καλύτεροι ο κάθε ένας στο τομέα του βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων. Ο Hybrid στην ανοχή σφαλμάτων και ο LSFBSB στην μηχανική κυκλοφορίας.

Παρόλο όμως ότι πιστεύουμε ότι νέος αλγόριθμος είναι ο καλύτερος αλγόριθμος που συνδυάζει ανοχή σφαλμάτων και μηχανική κυκλοφορίας, για επαναφορά ενός δικτύου μετά από κάποιο

σφάλμα και για μηχανική κυκλοφορίας υπάρχουν διάφορα ανοικτά θέματα τα οποία μπορούν να επεκταθούν.

Μπορεί να γίνει πειραματική σύγκριση του αλγορίθμου με τους αλγορίθμους LSFSB και Hybrid και άλλους αλγορίθμους που συνδυάζουν μηχανικής κυκλοφορίας και ανοχής σφαλμάτων για να διαφανεί ξεκάθαρα η ανωτερότητα του.

Ο Network-Simulator είναι ένας προσομοιωτής με πολλές δυνατότητες. Έτσι η υλοποίηση των αλγορίθμων Hybrid και LSFSB και του προτεινόμενου αλγορίθμου μπορεί να μας δώσει πραγματικά αποτελέσματα για την απόδοση του δικτύου, με βάση τα καθορισμένα κριτήρια. Διαφορετικές τοπολογίες, σφάλματα να προκαλούνται τυχαία καθώς πρόσθεση και άλλων κόμβων IP στο δίκτυο οι οποίοι να στέλνουν και να παραλαμβάνουν δεδομένα μέσω του MPLS δικτύου, επιπλέον ροές θα είναι παράγοντες που θα μας δώσουν επιπλέον πληροφορίες για το πότε ο προτεινόμενος αλγόριθμος δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Με βάση τα αποτελέσματα θα μπορούμε να βελτιώσουμε τον αλγόριθμο έτσι ώστε το δίκτυο να αποδίδει περισσότερο.

Αφού λοιπόν υπολογίζεται ότι είναι ο καλύτερος ο αλγόριθμος για την επαναφορά ενός δικτύου μετά την παρουσίαση προβλήματος και κάνει καλή διαχείριση των πόρων του δικτύου μπορεί να υλοποιηθεί όχι μόνο στον NS αλλά σε πραγματικό περιβάλλον. Η υλοποίηση λοιπόν αυτού του αλγορίθμου θα ήταν ένα μεγάλο βήμα προς μια πιο ρεαλιστική πειραματική αξιολόγηση του σε πραγματικό περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

1. Autenrieth, A. Kirstädter, “*Engineering end-to-end IP Resilience Using Resilience-Differentiated QoS*”, IEEE Communications Magazine, vol. 40, pp 50-57 January, 2002
2. A. Autenrieth and A.Kirstädter, “*Fault Tolerance and Resilience Issues in IP-Based Networks*”, Second International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2000
3. A. Autenrieth, A. Kirstädter, “*Components of MPLS Recovery Supporting Differentiated Resilience Requirements*”, IFIP Workshop on IP and ATM Traffic Management WATM, 2001.
4. A. Capone, L.Fratta , F. Martignon, “*Dynamic Routing of Bandwidth Guaranteed Connections in MPLS*”, Polytechnic of Milano, Italy, May 2003
5. C. Huang V. Sharma, K. Owens, S. Makam, “*Building Reliable MPLS Networks Using a Path Protection Mechanism*”, vol. 40, Communications Magazine IEEE, pp156-162, March 2002
6. C. Huang, K. Owens, S. Makam, V. Sharma, B. Mack-Crane, “*A Path Protection/Restoration Mechanism for MPLS Networks*”, IETF Internet Draft, July 2001
7. D. Won-Kyu Hong, C. Seon Hong, “*A Rerouting Scheme with Dynamic Control of Restoration Scope for Survivable MPLS Network*”, Information Networking, Vol. 3391/2005 , Springer, Berlin / Heidelberg, 2005, pp 233-243.
8. D. A. Barlow, V. Vassiliou, S. Krasser, H. L. Owen, J. Grimminger, H. Huth, Joachim Sokol, “*Traffic Engineering Based on Local States in Internet Protocol-Based Radio Access Networks*”, Journal of Communications and Networks, Vol.7(No.3), pp. 377-384 , 2005
9. D. A. Barlow, H. L. Owen, V. Vassiliou, J. Grimminger, H. Huth, J. Sokol, “*Router-based Traffic-Engineering in MPLS/DiffServ/HMIP Radio Access Networks*”, Germany, May, 2002

10. D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, X. Xiao, “*Overview and Principles of Internet Traffic Engineering*”, RFC3272, May, 2002
11. D. Awduche, J. Malcolm, J. Agogbua, M. O’Dell, J. McManus, “*Requirements for Traffic Engineering Over MPLS*”, RFC 2702, September 1999
12. D. Awduche, Movaz Networks, Inc. L. Berger D. Gan, Juniper Networks, Inc. T.Li Procket Networks, Inc.V. Srinivasan Cosine Communication, Inc. G.Swallow “*RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels*”, RFC 3209, December 2001
13. D. Haskin and R. Krishnan, “*A Method for Setting an Alternative Label Switched Paths to Handle Fast Reroute*”,RFC 2026, May, 2000
14. D. Papp, T. Van Do, R. Chakka, X. Mai Thi Truong , “*Repair Strategies on the Operation of MPLS Routing*” in “Recent Advances in Modeling and Simulation Tools for Communication Networks and Services”, Ed. US: Springer, 2008, pp 319-330,
15. E. Harrison, A. Farrel, B. Miller, “*Protection and Restoration In MPLS Networks*”, United Kingdom: Data Connection Limited, January, 2001
16. E. Osborne, A. Simha, “*Traffic Engineering With MPLS Design Configure and manage MPLSTE to optimize network performance*”, Cisco Press
17. E. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, “*Multiprotocol Label Switching Architecture* ”, RFC 3031, January 2001
18. Elena Hadjilouca, “*Traffic Engineerinr in MPLS-based Radio Access Networks* ”, Master Thesis, Computer Science Department, University of Cyprus, 2007

19. E. Calle, J. L Marzo, A. Urrea, P. Vila, “*Enhancing MPLS QoS routing algorithms by using the Network Protection Degree paradigm*”, Global Telecommunications Conference , 2003, pp 3053 – 3057.
20. F. Hansen A. Kvalbein T. Cicic S. Gjessing and O. Lysne, “*Resilient Routing Layers for Recovery in Packet Networks*”, International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN’05) ,IEEE Computer Society, 2005, pp 238 – 247
21. F. Daniel Otel, “*On Fast Computing Bypass Tunnel Routes in MPLS-Based Local Restoration*”, High Speed Networks and Multimedia Communications 5th IEEE International Conference , 2002, pp 234-238
22. G. Swallow, P. Pan, A. Atlas, J. Philippe Vasseur, M. Jork, Der-Hwa Gan, D. Cooper, ”*Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels*”, RFC 4090, May 2005
23. G. Ahn, J. Jang, and W. Chun “*An Efficient Rerouting Scheme for MPLS-Based Recovery and Its Performance Evaluation*”, Telecommunication Systems, Vol.19, No.3-4, 2002, pp 481-495
24. G. Apostolopoulos , S. Tripathi , “*On the Effectiveness of Path Pre-Computation in Reducing the Processing Cost of On-Demand QoS Path Computation*”, In Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communication, 1998, pp 42-46
25. I. Minei, “*MPLS DiffServ-aware Traffic Engineering*”, Juniper Networks White Paper, 2004
26. I. Minei, J. Lucek, “*MPLS-Enabled Applications, Emerging Developments and New Technologies*”, Juniper Networks, WILEY, 2005

27. I. Gojmerac, "*Adaptive Multi-Path Routing for Internet Traffic Engineering*", Thesis, Telecommunications Research Center, Vienna, April, 2007
28. J. Vasseur, M. Pickavet, P. Demeester, "*Network Recovery, Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS*", Morgan Kaufmann Publishers, 19 August 2004
29. J. Chen, C. Chiou, S. Wu, "*A Fast Path Recovery Mechanism for MPLS Networks*" in Networking - ICN 2005, Volume 3421/2005, Ed Berlin/Heidelberg : Springer, April 2005, pp 58-65
30. J. Song, S. Kim, M. Lee, H. Lee, T. Suda, "*Adaptive Load Distribution over Multipath in MPLS Networks*", in Proc IEEE Communications 2003. ICC '03. IEEE International Conference on, 11-15 May 2003, pp 233- 237
31. J. Lin, H. Liu, "*An Efficient Fault-Tolerant Approach for MPLS Network Systems*" In Parallel and Distributed Processing and Applications, Vol. 3358/2005, pp 815-824, January 17, 2005
32. J. Pu, E. Manning, G. C. Shoja, "*Reliable Routing in MPLS Networks*", Panda Group, Computer Science Department, University of Victoria, Victoria, BC, Canada
33. J. Schroeder, E. Procopio Duarte Jr, "*Fault-Tolerant Dynamic Routing Based on Maximum Flow Evaluation*" in LADC, Vol. 4746/2007, Springer Berlin / Heidelberg, 12.9.2007, pp 7-24
34. J. Ahmed Zubairi, "*A comparative study of Routing Label Switched Paths With Shortest Distance Algorithm and TELIC*", In Proc. Applied Telecommunications Symposium, March 2003, pp17-22

35. J. Ahmed Zubairi, “*An Automated Traffic Engineering Algorithm for MPLS-Diffserv Domain*“, Department of Mathematics and Computer Science SUNY, Fredonia
36. L. Hundesa Gonfa, “*Enhanced Fast Rerouting Mechanism for Protected Traffic in MPLS Networks*“, Polytechnic University of Catalunya, Barcelona , February 2003
37. M. Hadjiona, “*Σχεδιασμός Αλγορίθμου Για Ανοχή Σφαλμάτων Σε δίκτυα MPLS*”, Thesis, University of Cyprus, Department of Computer Science, 2006
38. M. Hadjiona, C. Georgiou, M. Papa, V. Vassiliou, “*A Hybrid Fault-Tolerant Algorithm for MPLS Networks*“ in WWIC, 2008, pp 41-52
39. M. Menth, J. Milbrandt, A. Reifert, “*Self-Protecting Multipaths – A simple and Resource-Eggicient Protection Switching Mechanism for MPLS Networks*” in NETWORKING 2004, Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications, Vol. 3042/2004, Springer Berlin / Heidelberg, April 08, 2004, pp 526- 537
40. M. Amin, K. Ho, G. Pavlou, “*MPLS QoS-aware traffic engineering for Network Resilience*” , Centre for Communication Systems Research, University of Surrey, UK, January, 2008
41. M. Kodialam T. V. Lakshman, “*Minimum Interference Routing with Applications to MPLS Traffic Engineering* “,in: IEEE INFOCOM, vol. 2, 2000, pp. 884-893

42. Q. Ma, P. Steenkiste, “*On Path selection for traffic with Bandwidth Guarantees*”, Computer Science Department, In Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols, 1997, pp 191-202
43. Q. She, X. Huang, J.P. Jue, “*Survivable Routing for Segment Protection under Multiple Failures*”, in Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007, pp 1-3
44. R. Bartos, M. Raman, “*A Heuristic Approach to Service Restoration in MPLS Networks*”, in Communications IEEE International Conference, 2001, pp117-121
45. R. Ganesh V, M. V. Ramana Murthy , “*MPLS Traffic Engineering (An Implementation Framework)*” , MultiTech , 2002
46. R. Boutaba, W. Szeto, Y.Iraqil, “*DORA: Efficient Routing for MPLS Traffic Engineering*”, Journal of Network and Systems Management, Vol. 10, pp 309-325, November 02, 2004
47. S. Seongwook Lee, M. Gerla, “*Fault Tolerance and Load Balancing in QoS Provisioning with Multiple MPLS Paths*”, Lecture Notes in Computer Science, 2001,International Workshop on Quality of Service (IWQoS) , pp155-169, 2001
48. S. Alouneh, A. Agarwal, A. En-Nouaary, “*A Novel Approach for Fault Tolerance in MPLS Networks*” in Innovations in Information Technology, pp 1- 5, November 2006
49. Y. Seok, Y. Lee, N. Choi, and Y. Choi, “*Fault-tolerant Multipath Traffic Engineering for MPLS Networks*”, *Proceeding (408) Communications, Internet, and Information Technology - 2003*

50. S. Kini , M. Kodialam, T.V. Lakshman, S. Sengupta, “*Shared Backup Label Switched Path Restoration*”, RFC 4090 , May 2001
51. S. Butenweg, “*Two Distributed Reactive MPLS Traffic Engineering Mechanisms for Throughput Optimization in Best Effort MPLS Networks*”, in Eighth IEEE International Symposium on Computers and Communication (ISCC’03), 2003, pp 379- 384
52. T. M. Chen, J.L. Kennington and Tae(Tom) Oh1, “*Fault Restoration Techniques for MPLS with QoS Constraints*”, Technical Report 00-CSE-7, August 2000
53. T. Anjali, C. Scoglio, J. C. de Oliveira, Leonardo C. Chen, I.F. Akyildiz, J. A. Smith, G. Uhl2, A. Sciuto, “*A New Path Selection Algorithm for MPLS Networks Based on Available Bandwidth Estimation*”, in QoS Provisioning to QoS Charging, Vol. 2511/2008205-214, January 01, 2002.
54. V. Sharma, F. Hellstrand, “*Framework for Multi-Protocol Label Switching (MPLS)-based Recovery*”, RFC 3469, February 2003
55. U. Lakshman, L. Lobo, MPLS Traffic Engineering:
<http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=426640&rl=1>, Jan 13, 2006
http://saturn.acad.bg/bis/pdfs/04_doklad.pdf
56. TCL Tutorial: <http://www.tcl.tk/man/tcl8.5/tutorial/tcltutorial.html>
57. Tcl/Tk Tutorial:
http://www.usenix.org/publications/library/proceedings/tcl96/full_papers/skinner/index.html
58. Ns Manual: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>