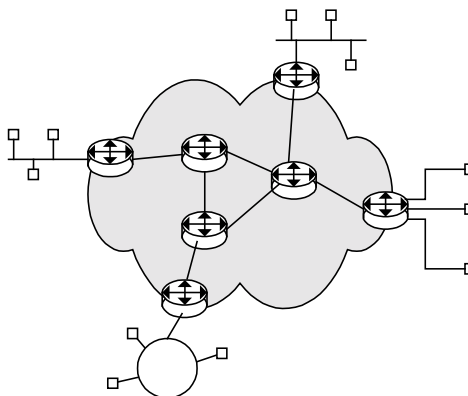


## 6. ΜΕΤΑΓΩΓΗ ΕΤΙΚΕΤΤΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ (MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING)

### 6.1 Εισαγωγή

Η Μεταγωγή Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (MultiProtocol Label Switching, MPLS) αποτελεί μετεξέλιξη της τεχνολογίας Tag switching και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για το πρωτόκολλο του Διαδικτύου IP όσο και για άλλα πρωτόκολλα επιπέδου δικτύου (Στρώμα 3 στο μοντέλο αναφοράς του OSI). Η βασική λειτουργία της τεχνολογία MPLS είναι να προωθεί τα πακέτα χρησιμοποιώντας ετικέτες που έχουν προσαρτηθεί σε κάθε πακέτο, οι οποίες διανέμονται μεταξύ των κόμβων που αποτελούν το δίκτυο.

Στα συμβατικά δίκτυα IP, οι τελικοί χρήστες συνδέονται σε δρομολογητές απόληξης (edge routers) μέσω δικτύων πρόσβασης (Σχήμα 6.1). Σήμερα υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι δικτύων πρόσβασης όπως για παράδειγμα τοπικά δίκτυα (Ethernet, Token Ring), δημόσια δίκτυα πρόσβασης μέσω του τηλεφωνικού δικτύου (dial-up access), δίκτυα σταθερής πρόσβασης (όπως για παράδειγμα δίκτυα που βασίζονται στη τεχνολογία Asymmetric Digital Subscriber Line, ADSL) κλπ. Οι δρομολογητές απόληξης διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω δρομολογητών του δικτύου πυρήνα.



**Σχήμα 6.1**  
Τυπικό δίκτυο IP

Όπως είναι γνωστό η βασική λειτουργία των δρομολογητών είναι η γρήγορη και αποτελεσματική προώθηση πακέτων από την πηγή προς τον προορισμό. Για να εκτελέσουν την παραπάνω λειτουργία, οι δρομολογητές χρειάζεται να γνωρίζουν την τοπολογία και την κατάσταση του δικτύου και φυσικά τη θέση του παραλήπτη των πακέτων. Για το σκοπό αυτό, οι δρομολογητές ανταλλάσσουν πληροφορία μεταξύ τους, μέσω ειδικών πρωτοκόλλων, η οποία τους γνωστοποιεί την τοπολογία και την κατάσταση του δικτύου.

Με βάση την παραπάνω πληροφορία, κάθε δρομολογητής μπορεί και υπολογίζει την βέλτιστη διαδρομή (για την ακρίβεια τον επόμενο δρομολογητή,

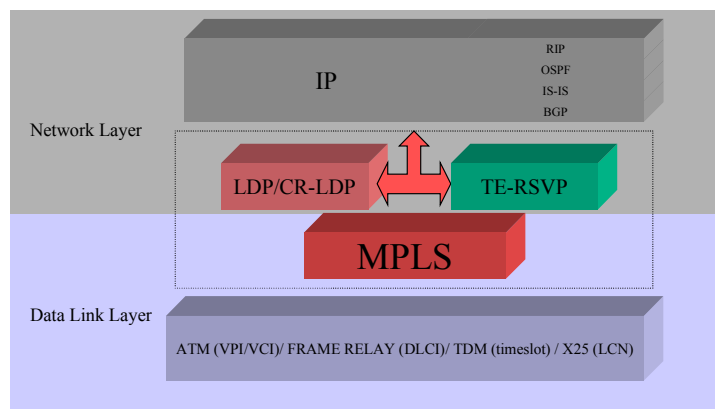
next hop) για κάθε κλάση ισοδύναμης προώθησης (Forwarding Equivalence Class, FEC). Η κλάση ισοδύναμης προώθησης υποδηλώνει ένα σύνολο πακέτων με τον ίδιο προορισμό και ίσως την ίδια ποιότητα υπηρεσίας. Έτσι, κάθε δρομολογητής δημιουργεί μια βάση δεδομένων (Forwarding Information Base, FIB) η οποία στην ουσία είναι ένας πίνακας με μία γραμμή ανά κλάση ισοδύναμης προώθησης. Κάθε δρομολογητής που λαμβάνει ένα πακέτο ελέγχει σε ποια κλάση ισοδύναμης προώθησης ανήκει το συγκεκριμένο πακέτο και το χειρίζεται ανάλογα.

Ο ρόλος της Μεταγωγή Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (MPLS) στη σημερινή αρχιτεκτονική του Διαδικτύου, στηρίζεται στο γεγονός της χρήσης δικτύων προσανατολισμένων σε σύνδεση (connection-oriented), ως υποδομή για δίκτυα που μεταφέρουν πακέτα (datagrams). Ο διαχωρισμός των στρωμάτων των δικτύων πακέτου (datagram) και των δικτύων προσανατολισμένων σε σύνδεση (connection-oriented) δεν επιτρέπει την πλήρη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των δεύτερων. Με τη χρήση του MPLS δημιουργείται μια εικονική σύνδεση μεταξύ δύο σημείων ενός δικτύου πακέτου, και μέσω αυτής μεταφέρεται κίνηση πακέτων (datagrams).

## 6.2 Βασικές αρχές-ιδέες της Μεταγωγής Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (MultiProtocol Label Switching, MPLS)

Η Μεταγωγή Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (MultiProtocol Label Switching, MPLS) [1,2] χωρίζεται λογικά και λειτουργικά σε δύο κομμάτια ώστε να παρέχει τη λειτουργικότητα της μεταγωγής ετικέτας σε ένα δίκτυο χωρίς σύνδεση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2.

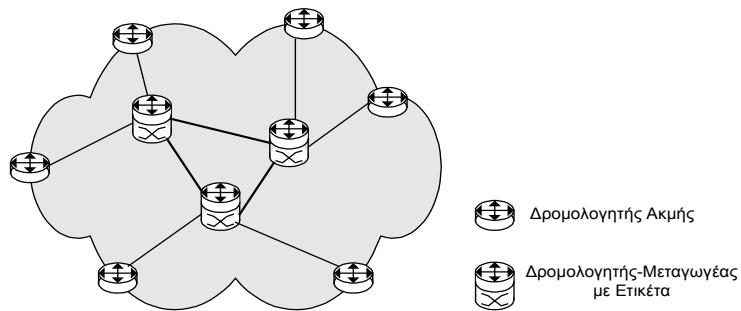
Σε έναν συμβατικό δρομολογητή, η λειτουργία προώθησης πακέτων είναι αρκετά απαιτητική ως προς την υπολογιστική ισχύ και φυσικά πρέπει να γίνεται ανά πακέτο. Καθώς οι ταχύτητες των φυσικών συνδέσεων ολοένα και αυξάνουν, οι δρομολογητές αρχίζουν να φαίνονται ολοένα και πιο αργοί συνιστώντας τη στενωπό του συστήματος.



**Σχήμα 6.2**  
Η διαστρωμάτωση στο MPLS

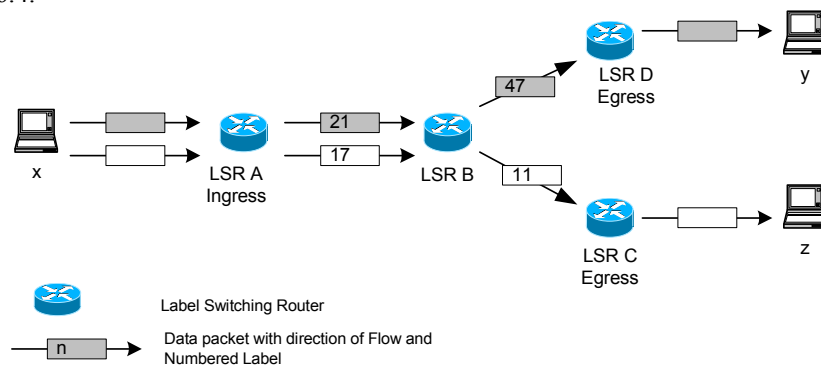
Για το λόγο αυτό η τεχνολογία Δρομολόγησης-Μεταγωγής με Ετικέτα προσπαθεί να απλουστεύσει τη λειτουργία της δρομολόγησης. Η βασική ιδέα είναι ότι οι δρομολογητές απόληξης εκτελούν κανονικά τη λειτουργία δρομολόγησης, ενώ οι ενδιάμεσοι δρομολογητές εκτελούν λειτουργία μεταγωγής, η οποία ως λειτουργία επιπέδου 2 είναι πιο γρήγορη.

Πιο συγκεκριμένα σε ένα δίκτυο τεχνολογίας MPLS, μεταξύ των δρομολογητών απόληξης εγκαθίστανται διαδρομές αναγνωριζόμενες από μια ετικέτα. Οι δρομολογητές του δικτύου πυρήνα αναβαθμίζονται και γίνονται Δρομολογητές-Μεταγωγείς ετικέτας (Label-Switched Routers, LSRs) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.3.



**Σχήμα 6.3**  
Αρχιτεκτονική δικτύου μεταγωγής με ετικέτα

Η τεχνολογία MPLS δεν αντικαθιστά την δρομολόγηση IP [3], αλλά θα συνυπάρξει μαζί με υπάρχουσες και μελλοντικές τεχνολογίες δρομολόγησης, ώστε να παρέχει υψηλές ταχύτητες προώθησης δεδομένων μεταξύ των Δρομολογητών-Μεταγωγέων Ετικέτας (Label-Switched Routers, LSRs). Επιπλέον θα εξασφαλίσει εύρος ζώνης για ροές κίνησης με διαφορετικές απαιτήσεις σε Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS). Η βασική λειτουργία ενός δικτύου MPLS φαίνεται στο Σχήμα 6.4.



**Σχήμα 6.4**  
Δυο Διαδρομές Μεταγωγής Ετικέτας (LSPs) σε ένα δίκτυο MPLS

Το MPLS χρησιμοποιεί μια τεχνική γνωστή ως μεταγωγή ετικέτας για την προώθηση δεδομένων στο δίκτυο. Μια μικρή, καθορισμένου σχήματος ετικέτα εισάγεται μπροστά από κάθε πακέτο δεδομένων καθώς αυτό εισέρχεται σε ένα δίκτυο MPLS. Σε κάθε δρομολογητή μέσα στο δίκτυο, το πακέτο δρομολογείται με βάση την τιμή της ετικέτας με την οποία εισέρχεται στον δρομολογητή και αποστέλλεται με μια καινούργια τιμή στην ετικέτα.

Η διαδρομή που διασχίζουν τα δεδομένα μέσα στο δίκτυο ορίζεται από την μεταβολή στις τιμές της ετικέτας, καθώς η ετικέτα ανταλλάσσεται σε κάθε LSR. Καθώς η αντιστοίχιση μεταξύ των ετικετών είναι σταθερή σε κάθε LSR, η διαδρομή καθορίζεται από την αρχική τιμή της ετικέτας. Μια τέτοια διαδρομή ονομάζεται Διαδρομή Μεταγωγής Ετικέτας (Label Switched Path, LSP).

Στην είσοδο ενός MPLS δικτύου, κάθε πακέτο εξετάζεται ώστε να προσδιοριστεί ποια LSP πρέπει να χρησιμοποιήσει και ως εκ τούτου ποια ετικέτα να του ανατεθεί. Αυτή είναι μια τοπική απόφαση, αλλά είναι πιθανό να βασίζεται σε παράγοντες συμπεριλαμβανομένων της διεύθυνσης προορισμού, των απαιτήσεων για ποιότητα υπηρεσίας και της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου. Αυτή η ευλυγισία είναι ένα από τα στοιχεία κλειδιά που καθιστούν το MPLS τόσο χρήσιμο.

Το πλήθος των πακέτων που προωθούνται με τον ίδιο τρόπο αποτελούν την Ισοδύναμη Κλάση Προώθησης (Forwarding Equivalence Class, FEC). Μία ή περισσότερες FECs μπορεί αντιστοιχισθούν σε μια LSP. Το Σχήμα 6.4 δείχνει δυο ροές δεδομένων από το τερματικό X, μια προς τον Y, και μια προς τον Z, που αποτελούν τις δυο LSPs.

- Ο LSR A είναι το σημείο εισόδου στο δίκτυο MPLS για τα δεδομένα από το τερματικό X. Όταν αυτός λάβει πακέτα από τον X, προσδιορίζει την FEC για κάθε πακέτο, συμπεραίνει ποια LSP να χρησιμοποιήσει και προσθέτει μια ετικέτα στο πακέτο. Ο LSR A τότε προωθεί το πακέτο στο κατάλληλο σημείο προσαρμογής (interface) για την LSP.
- Ο LSR B είναι ένας ενδιάμεσος LSR σε ένα δίκτυο MPLS. Αυτός παίρνει απλά κάθε πακέτο με ετικέτα που λαμβάνει και χρησιμοποιεί το ζευγάρι {εισερχόμενο σημείο προσαρμογής, τιμή ετικέτας} για να αποφασίσει για το ζευγάρι {εξερχόμενο σημείο προσαρμογής, τιμή ετικέτας} με το οποίο θα προωθήσει το πακέτο. Αυτή η διαδικασία μπορεί απλά να περιλαμβάνει ένα ψάξιμο σε πίνακα και μαζί με την αλλαγή τιμής ετικέτας και την προώθηση πακέτου, να εκτελεστεί στο μηχανικό μέρος του υπολογιστή. Αυτό επιτρέπει στα δίκτυα MPLS να χτίζονται πάνω σε υπάρχοντα μηχανικά μέρη για μεταγωγή ετικέτας όπως το ATM (Asynchronous Transfer Mode) και η Αναμετάδοση Πλαισίου (Frame Relay). Αυτός ο τρόπος προώθησης πακέτων είναι ενδεχομένως πολύ πιο γρήγορος από την εξέταση ολόκληρης της επικεφαλίδας του πακέτου προκειμένου να προσδιοριστεί ο επόμενος κόμβος.
- Στο παράδειγμα, κάθε πακέτο με τιμή ετικέτας 21 θα σταλεί από το σημείο προσαρμογής προς τον LSR D, φέροντας τιμή ετικέτας 47. Πακέτα με τιμή ετικέτας 17 θα αποκτήσουν τιμή ετικέτας 11 και θα σταλούν στον LSR C.
- Ο LSR C και ο LSR D λειτουργούν σαν δρομολογητές εξόδου από το δίκτυο MPLS. Αυτοί οι LSRs εκτελούν το ίδιο ψάξιμο όπως οι ενδιάμεσοι

LSRs, αλλά το ζευγάρι {εξερχόμενο σημείο προσαρμογής, τιμή ετικέτας} μαρκάρει το πακέτο σαν να εξέρχεται από την LSP. Οι δρομολογητές LSRs εξόδου αφαιρούν τις ετικέτες από τα πακέτα και τα προωθούν χρησιμοποιώντας δρομολόγηση επιπέδου 3.

Έτσι, εάν ο LSR A ταυτίσει όλα τα πακέτα από το τερματικό Z με την επάνω LSP και τους βάλει την ετικέτα με την τιμή 21, αυτά θα προωθηθούν με επιτυχία στο δίκτυο.

Προς σημείωση είναι ότι το ακριβές σχήμα της ετικέτας και ο τρόπος που προστίθεται στο πακέτο εξαρτάται από τις τεχνολογίες σύνδεσης του στρώματος 2 που χρησιμοποιούνται από το δίκτυο MPLS. Για παράδειγμα, μια ετικέτα μπορεί να αντιστοιχιστεί σε ένα ATM VPI/VCI, ή σε ένα DLCI (Αναμετάδοση Πλαισίου). Για άλλους τύπους επιπέδου 2, όπως Ethernet και PPP (Point-to-Point Protocol), η ετικέτα προστίθεται στο πακέτο σε μια επικεφαλίδα MPLS “shim”, η οποία τοποθετείται μεταξύ των επικεφαλίδων επιπέδου 2 και 3. Εισάγοντας λοιπόν την έννοια της μεταγωγής σε δίκτυα δρομολόγησης, όχι μόνο επιταχύνονται κάποιες λειτουργίες αλλά επιπλέον δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ήδη εγκατεστημένα δίκτυα μεταγωγής όπως είναι το ATM και το Frame Relay.

Στην περίπτωση της απλής-συμβατικής προώθησης πακέτων IP, ένας δρομολογητής θεωρεί ότι δύο πακέτα ανήκουν στην ίδια τάξη ισοδύναμης προώθησης όταν το πρόθεμα της διεύθυνσης προορισμού του κάθε πακέτου βρίσκει την ίδια εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης, χρησιμοποιώντας την μέθοδο “longest match”. Καθώς το πακέτο ταξιδεύει στο δίκτυο, κάθε κόμβος αναλύει τη διεύθυνση προορισμού και το αντιστοιχεί σε μία FEC.

Στο MPLS η ανάλυση της επικεφαλίδας του πακέτου IP για την δρομολόγηση του γίνεται μόνο μία φορά στην είσοδο του δικτύου που χρησιμοποιεί MPLS και όχι σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο. Το πακέτο ανάλογα με την επικεφαλίδα του κατατάσσεται σε μία ροή και λαμβάνει μία ετικέτα. Με αυτόν τον τρόπο το πακέτο μεταγίνεται στο δεύτερο επίπεδο με τεχνικές ανταλλαγής ετικέτας, ενώ χρησιμοποιεί πληροφορίες δρομολόγησης τρίτου επιπέδου μόνο στην είσοδο (και έξοδο) από το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή η διαδρομή (LSP) κατασκευάζεται ανταλλάσσοντας σηματοδосία με χρήση πρωτοκόλλων του επιπέδου δικτύου (OSPF, IS-IS, BGP-4), οπότε φτιάχνεται με τις αντίστοιχες αρχές που διέπουν την προώθηση πακέτων στο IP.

### 6.2.1 Κατανομή Ετικέτας

Για να χρησιμοποιηθούν οι LSPs, πρέπει οι πίνακες προώθησης σε κάθε LSR να γεμίσουν με αντιστοιχίσεις από {εισερχόμενο σημείο προσαρμογής, τιμή ετικέτας} προς {εξερχόμενο σημείο προσαρμογής, τιμή ετικέτας}. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται εγκατάσταση των LSPs ή Κατανομή Ετικέτας (Label Distribution). Η αρχιτεκτονική MPLS δεν κάνει υποχρεωτική τη χρήση ενός μόνο πρωτοκόλλου για την κατανομή ετικετών μεταξύ των LSRs. Στην πραγματικότητα επιτρέπει ρητά τη χρήση πολλαπλών πρωτοκόλλων σε διαφορετικά σενάρια, (π.χ LDP, CR-LDP, RSVP-TE, BGP4, OSPF).

Αρκετά διαφορετικές προσεγγίσεις για την κατανομή ετικέτας μπορεί να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου MPLS και τις πολιτικές διαχείρισης που χρησιμοποιούνται από το δίκτυο.

Οι υποκείμενοι κανόνες ορίζουν ότι μια LSP εγκαθίσταται είτε ως απάντηση μετά από αίτηση από έναν LSR εισόδου (downstream on-demand), ή από LSRs μέσα στο δίκτυο περιλαμβάνοντας και τον LSR εξόδου (downstream unsolicited). Είναι πιθανό και τα δυο να γίνουν ταυτόχρονα και η LSP να συναντηθεί στη μέση του δικτύου. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι ετικέτες κατανέμονται κατά τη διεύθυνση της ροής δεδομένων (downstream), δηλαδή γνωστοποιούνται με διεύθυνση προς την πηγή δεδομένων. Κατά συνέπεια στο Σχήμα 6.4, ο LSR D ειδοποιεί τον LSR B ότι ο LSR B πρέπει να χρησιμοποιήσει την ετικέτα 47 για όλα τα πακέτα για το τερματικό (host) Z. Ο LSR B διαθέτει μια καινούργια ετικέτα (21), εισάγει την αντιστοίχιση στον πίνακα προώθησης που έχει και ειδοποιεί τον LSR A πως πρέπει να χρησιμοποιήσει την ετικέτα 21 για όλα τα πακέτα για το τερματικό (host) Z.

Στη συνέχεια περιγράφονται μερικές πιθανές επιλογές για τον έλεγχο εγκατάστασης των LSPs, και τα πρωτόκολλα που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη του ελέγχου:

- Η από κόμβο σε κόμβο κατανομή ετικέτας είναι μια διαδικασία σύμφωνα με την οποία οι αιτήσεις εγκατάστασης LSP δρομολογούνται ανάλογα με την δρομολόγηση του επόμενου κόμβου προς τη διεύθυνση των δεδομένων. Η εγκατάσταση LSP μπορεί να ξεκινήσει από ενημερώσεις του πίνακα δρομολόγησης, ή ως αντίδραση σε μια καινούργια ροή κίνησης. Το IETF MPLS Working Group έχει προσδιορίσει το Πρωτόκολλο Κατανομής Ετικέτας (Label Distribution Protocol, LDP) ως πρωτόκολλο για την από κόμβο σε κόμβο κατανομή της ετικέτας. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν το Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων (Resource Reservation Protocol, RSVP) και το Πρωτόκολλο Κατανομής Ετικέτας με Περιορισμούς (Constraint Routed Label Distribution Protocol, CR-LDP).
- Στην κατανομή ετικέτας κατά τη διεύθυνση ροής των δεδομένων (downstream unsolicited), ο LSR εξόδου κατανέμει την ετικέτα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως προς κάποιο συγκεκριμένο τερματικό (host). Το έναυσμα για αυτό είναι συνήθως μια καινούργια πληροφορία δρομολόγησης που έλαβε ο κόμβος εξόδου. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζεται ένα δέντρο από LSPs με ρίζα κάθε LSR εξόδου. Το Πρωτόκολλο Κατανομής Ετικέτας (Label Distribution Protocol, LDP) είναι σήμερα το μόνο κατάλληλο πρωτόκολλο για αυτόν τον τρόπο κατανομής ετικέτας.
- Αφού οι LSPs έχουν εγκατασταθεί σε ένα δίκτυο, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη νέων διαδρομών υπό τον όρο ότι είναι διαθέσιμοι. Καθώς τα πρωτόκολλα δρομολόγησης (π.χ. BGP) κατανέμουν τη νέα πληροφορία δρομολόγησης αντίθετα με τη διεύθυνση ροής των δεδομένων, μπορούν επίσης να προσδιορίσουν ποια ετικέτα (π.χ. ποια LSP) πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να φτάσει στον προορισμό στον οποίο αναφέρεται η διαδρομή.
- Εάν ένας LSR εισόδου θέλει να εγκαταστήσει μια LSP, η οποία δεν ακολουθεί τον επόμενο κόμβο σύμφωνα με τη δρομολόγηση, πρέπει να

χρησιμοποιήσει ένα πρωτόκολλο κατανομής ετικέτας που να επιτρέπει τον προσδιορισμό μιας συγκεκριμένης διαδρομής (Explicit Route). Αυτό απαιτεί κατανομή ετικέτας κατά απαίτηση προς την διεύθυνση ροής δεδομένων (downstream on-demand). Τα CR-LDP και RSVP είναι δυο πρωτόκολλα που παρέχουν αυτήν την λειτουργία.

- Ένας LSR εισόδου μπορεί επίσης να θέλει να εγκαταστήσει μια LSP που να παρέχει ένα συγκεκριμένο επίπεδο υπηρεσίας, παραδείγματος χάρη, να δεσμεύει πόρους σε κάθε ενδιάμεσο LSR κατά μήκος μιας διαδρομής. Σε αυτήν την περίπτωση, η διαδρομή μιας LSP μπορεί να περιορίζεται από την διαθεσιμότητα των πόρων και την ικανότητα των κόμβων να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσίας. Το CR-LDP και το RSVP είναι δυο πρωτόκολλα που επιτρέπουν η κατανομή ετικέτας κατά απαίτηση προς την διεύθυνση ροής δεδομένων (downstream on-demand) να περιλαμβάνει αιτήσεις για συγκεκριμένες εγγυήσεις υπηρεσίας.

### 6.2.2.1 Συγκεκριμένες Διαδρομές (Explicit Routes)

Μια Συγκεκριμένη Διαδρομή (Explicit Route) είναι σαν συγκεκριμένη ακολουθία βημάτων από την είσοδο προς την έξοδο του δικτύου, που δημιουργείται για συγκεκριμένους σκοπούς. Μια LSP στο MPLS μπορεί να εγκατασταθεί ώστε να ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδρομή, π.χ. μια λίστα από διευθύνσεις IP, ωστόσο, δεν χρειάζεται να προσδιοριστεί πλήρως. Μια Συγκεκριμένη Διαδρομή (explicit route) θα πρέπει να ελέγχεται αυστηρά, αφού προϋποτίθεται ότι υποστηρίζει μια συγκεκριμένη ανάγκη του δικτύου.

Παραδείγματος χάρη, μια διαδρομή μπορεί να προσδιορίσει μόνο τους πρώτους κόμβους. Αφού έχουμε φτάσει στον τελευταίο κόμβο που έχει προσδιοριστεί, η δρομολόγηση της LSP συνεχίζεται με δρομολόγηση από κόμβο σε κόμβο.

Κάθε λοιπόν διαδρομή που εγκαθίσταται στο δίκτυο γίνεται με χρήση σηματοδοσίας. Επιπλέον με τη χρήση της συγκεκριμένης δρομολόγησης, η διαδρομή δε χρειάζεται να ακολουθεί την κανονική διαδρομή δρομολόγησης προς τον προορισμό. Αντίθετα, η διαδρομή που ακολουθείται από την LSP προσδιορίζεται από τη σηματοδοσία.

Μια Συγκεκριμένη Διαδρομή (explicit route) μπορεί επίσης να περιέχει έναν ενδείκτη ενός αυτόνομου συστήματος (Autonomous System, AS). Αυτό επιτρέπει στην LSP να δρομολογείται μέσα σε μια περιοχή του δικτύου που είναι εκτός του ελέγχου του Αυτόνομου Συστήματος που ξεκίνησε η LSP. Η διαδρομή μπορεί να περιέχει αρκετούς κόμβους σε ένα αυτόνομο σύστημα πριν καταλήξει στον επόμενο κόμβο της συγκεκριμένης διαδρομής.

Μια συγκεκριμένη διαδρομή μπορεί να ταξινομηθεί ως «αυστηρή» ή «χαλαρή». Μια αυστηρή διαδρομή πρέπει να περιέχει μόνο κόμβους ή αυτόνομα συστήματα που έχουν προσδιοριστεί στην συγκεκριμένη διαδρομή, και πρέπει να χρησιμοποιεί αυτά με τη σειρά που έχουν προδιαγραφεί. Μια χαλαρή διαδρομή πρέπει να περιέχει όλους τους κόμβους που προσδιορίζονται, και πρέπει να διατηρεί τη σειρά, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιεί επιπρόσθετους κόμβους εάν είναι απαραίτητο για να γίνουν προσιτοί οι κόμβοι που έχουν προσδιοριστεί.

Εφόσον μια χαλαρή διαδρομή έχει εγκατασταθεί, μπορεί να τροποποιηθεί ή μπορεί να περιοριστεί (rinned) έτσι ώστε να μην αλλάζει. Η συγκεκριμένη δρομολόγηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για να αναγκάσει μια LSP να ακολουθήσει μια διαδρομή που διαφέρει από αυτή που προσφέρεται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατανέμει την κίνηση σε ένα δίκτυο με πολλή κίνηση, να δρομολογήσει σε περίπτωση βλάβης δικτύου, ή να παρέχει από πριν εγκαταστημένες LSPs για υποστήριξη ενάντια σε βλάβες του δικτύου.

#### 6.2.2.2 Περιορισμένες Διαδρομές

Η διαδρομή που μπορεί να ακολουθήσει μια LSP μπορεί να είναι περιορισμένη από αρκετές απαιτήσεις που έχει επιλέξει ο LSR εισόδου. Μια συγκεκριμένη διαδρομή είναι ένα παράδειγμα μιας περιορισμένης διαδρομής όταν ο περιορισμός είναι η σειρά με την οποία θα διασχίσουμε τους ενδιάμεσους LSRs. Άλλοι περιορισμοί μπορεί να τεθούν από την περιγραφή της κίνησης, που μπορεί να περιλαμβάνει εύρος ζώνης, καθυστέρηση, τάξη κίνησης και προτεραιότητα.

Μια προσέγγιση είναι ο LSR εισόδου να υπολογίζει ολόκληρη τη διαδρομή βασισμένος σε περιορισμούς και πληροφορίες που έχει σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση ολόκληρου του δικτύου. Αυτό οδηγεί τον LSR στο να παράγει μια συγκεκριμένη διαδρομή που να ικανοποιεί τους περιορισμούς. Η άλλη προσέγγιση είναι μια παραλλαγή της από κόμβο σε κόμβο δρομολόγησης, όπου σε κάθε LSR, ο επόμενος κόμβος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας πληροφορίες που έχει ο LSR σχετικά με τη διαθεσιμότητα των τοπικών πόρων.

Οι δυο προσεγγίσεις μπορεί να συνδυαστούν εάν δεν είναι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με ένα τμήμα της διαδρομής. Σε αυτήν την περίπτωση, η διαδρομή μπορεί να προσδιοριστεί χαλαρά εν μέρει και να δρομολογηθεί συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας τους περιορισμούς όπου είναι απαραίτητο.

#### 6.2.3 Το Πρωτόκολλο Κατανομής Ετικετών (Label Distribution Protocol, LDP)

Το Πρωτόκολλο Κατανομής Ετικετών (Label Distribution Protocol, LDP) καθορίζει ένα σύνολο από διεργασίες και μηνύματα με τα οποία οι Δρομολογητές-Μεταγωγείς Ετικέτας (Label Switched Routers, LSRs) εγκαθιδρύουν Διαδρομές με Μεταγωγή Ετικέτας (Label Switched Paths, LSPs) διαμέσου του δικτύου MPLS, αντιστοιχίζοντας άμεσα την πληροφορία δρομολόγησης του επιπέδου δικτύου σε διαδρομές στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων [4]. Οι LSPs αυτές μπορούν να έχουν τελικό σημείο έναν άμεσο γειτονικό κόμβο ή μπορούν να έχουν ως τελικό σημείο ένα κόμβο εξόδου από το δίκτυο κάνοντας μεταγωγή διαμέσου εσωτερικών κόμβων.

Δύο LSRs που χρησιμοποιούν LDP για να ανταλλάξουν πληροφορίες για συνδεδεμένες ετικέτες ονομάζονται ομότιμοι και η σύνδεση μεταξύ τους ονομάζεται συνεδρία.

Για την εγκαθίδρυση συνεδριών χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο TCP, το οποίο εγγυάται την αξιόπιστη μεταφορά των μηνυμάτων κάθε συνεδρίας. Το LDP παρέχει ένα μηχανισμό ώστε ένας LSR να βρίσκει τους ομότιμους / γειτονικούς του δρομολογητές LSR, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται από τους



διαχειριστές να τους ρυθμίζουν ρητά. Όταν ένας LSR βρίσκει έναν άλλο LSR τότε εγκαθιδρύουν μία συνεδρία LDP ώστε να ανταλλάξουν παραμέτρους που θα καθορίζουν τη μέθοδο κατανομής των ετικετών. Το LDP καθορίζει δύο μεθόδους κατανομής ετικετών που ονομάζονται Downstream Unsolicited και Downstream On demand. Στην πρώτη μέθοδο ο LSR από μόνος του (αυτόκλητα) εκπέμπει τις συνδεδεμένες ετικέτες που διαθέτει για κάθε FEC όταν είναι έτοιμος να προωθήσει τέτοιες ετικέτες στις αντίστοιχες FECs, ενώ στη δεύτερη περίπτωση απαντάει κατ' απαίτηση σε έναν ομότιμο LSR για την ετικέτα που αντιστοιχεί σε μία FEC.

Ένας LSR μπορεί να επιλέξει αν θα κρατήσει όλες τις συνδεδεμένες ετικέτες που του αποστέλλονται από έναν ομότιμο LSR ή αν θα κρατήσει αυτές που του χρειάζονται άμεσα για να προωθήσει πακέτα. Αντίστοιχα κατά την ενημέρωση ομότιμων LSR, ένας LSR μπορεί να ακολουθήσει ανεξάρτητο έλεγχο για την αποστολή των συνδεδεμένων ετικετών, και να τις αποστέλλει όταν αυτός νομίζει ότι χρειάζεται ή να ακολουθήσει ταξινομημένο έλεγχο, που σημαίνει ότι εκπέμπει μόνο όταν λάβει μια ετικέτα για μία FEC από τη FEC του διπλανού κόμβου ή τη FEC του κόμβου εισόδου.

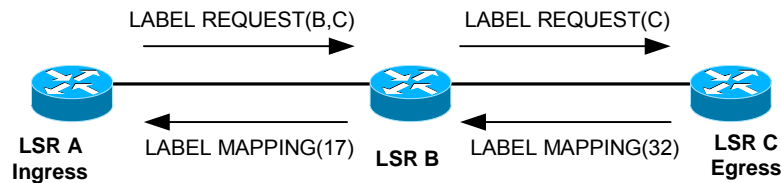
#### 6.2.4 Δρομολόγηση με περιορισμούς

Για τη δυνατότητα καλύτερης και πιο αποδοτικής εκμετάλλευσης των πόρων ενός δικτύου είναι επιθυμητό ένα πακέτο να περάσει από μια συγκεκριμένη διαδρομή LSP σύμφωνα με κάποια κριτήρια-περιορισμούς. Για να επιτευχθεί αυτό έχουν προταθεί δύο πρωτόκολλα: το Πρωτόκολλο Κατανομής Ετικέτας με Περιορισμούς (Constraint Routed Label Distribution Protocol, CR-LDP) και το Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων με επεκτάσεις (Resource Reservation Protocol - TE, RSVP-TE). Στη συνέχεια περιγράφονται τα δύο αυτά πρωτόκολλα και εξηγείται η λειτουργία τους.

##### 6.2.4.1 Το Πρωτόκολλο Κατανομής Ετικετών με Περιορισμούς (Constraint Routed Label Distribution Protocol, CR-LDP)

Το πρωτόκολλο CR-LDP [5] χρησιμοποιεί τα μηνύματα του απλού LDP και μπορεί να συνυπάρχει με αυτό σε ένα δίκτυο MPLS. Εισάγει όμως και επιπλέον δεδομένα για να καθορίζει υποχρεωτικές διαδρομές ή άλλους περιορισμούς. Όπως και το LDP, χρησιμοποιεί συνόδους TCP μεταξύ δυο γειτονικών LSRs και στέλνει μηνύματα για κατανομή ετικέτας κατά τη διάρκεια των συνόδων. Αυτό του επιτρέπει να υποθέτει αξιόπιστη κατανομή των μηνυμάτων ελέγχου. Τα επιπλέον μηνύματα που εισάγει το CR-LDP είναι το LSPID, το οποίο επιτρέπει τον χαρακτηρισμό μιας μοναδικής κλειστής διαδρομής (τούνελ-tunnel), το ER όπου καθορίζει ακριβώς τον κάθε κόμβο μιας διαδρομής (στην ουσία είναι ένας αριθμός από διευθύνσεις IP που πρέπει να ακολουθήσει το πακέτο), το Resource Class (ή Color) που περιορίζει τη διαδρομή σε κόμβους με συγκεκριμένο χρώμα (color) και τέλος κάποιοι παράμετροι κίνησης, πανομοιότυπες με αυτές που χρησιμοποιεί το ATM για να εγκαταστήσει μία κλήση, που καθορίζουν την μεταχείριση του πακέτου και την κράτηση πόρων στο δίκτυο (Peak Rate, Committed rate, Excess Burst size, variable delay).

Το βασικό διάγραμμα για εγκατάσταση LSP κάνοντας χρήση CR-LDP φαίνεται στο Σχήμα 6.5.



**Σχήμα 6.5**

Χρήση CR-LDP για εγκατάσταση LSP

Ο LSR εισόδου, δηλαδή ο LSR A, καθορίζει ότι χρειάζεται να εγκαταστήσει μια καινούρια LSP προς τον LSR C. Οι παράμετροι κίνησης που απαιτούνται για την σύνοδο ή για τις πολιτικές διαχείρισης (administrative policies) που εφαρμόζει το δίκτυο, δίνουν τη δυνατότητα στον LSR A να καθορίσει τη διαδρομή για την καινούρια LSP μέσω του LSR B. Ο LSR A κατασκευάζει ένα μήνυμα LABEL\_REQUEST με μια συγκεκριμένη διαδρομή (B, C) και αναφέρει λεπτομέρειες σχετικά με τις παραμέτρους της κίνησης που απαιτούνται για τη νέα διαδρομή. Ο LSR A δεσμεύει τους πόρους που χρειάζεται για την καινούρια LSP, και μετά προωθεί το μήνυμα LABEL\_REQUEST στον LSR B μέσω της συνόδου TCP.

Ο LSR B στην συνέχεια λαμβάνει το μήνυμα LABEL\_REQUEST, καθορίζει ότι δεν είναι ο LSR εξόδου για αυτήν την LSP, και μετά προωθεί την αίτηση κατά μήκος της διαδρομής που προσδιορίζεται από το μήνυμα. Και αυτός δεσμεύει τους απαιτούμενους πόρους για τη νέα LSP, τροποποιεί τη συγκεκριμένη διαδρομή στο μήνυμα LABEL\_REQUEST και μεταβιβάζει το μήνυμα στον LSR C. Εάν είναι αναγκαίο, ο LSR B μπορεί να μειώσει την δέσμευση πόρων για τη νέα LSP εάν οι κατάλληλες παράμετροι είχαν μαρκαριστεί σαν διαπραγματεύσιμες στο μήνυμα LABEL\_REQUEST.

Ο LSR C καθορίζει ότι είναι ο κόμβος εξόδου για τη νέα LSP. Εκτελεί οποιαδήποτε τελική διαπραγμάτευση για τους πόρους και στη συνέχεια δεσμεύει μια ετικέτα για τη νέα LSP, την οποία και κατανέμει στον LSR B μέσω ενός μηνύματος LABEL\_MAPPING, που περιέχει τις τελικές παραμέτρους κίνησης που έχουν καθοριστεί για την LSP.

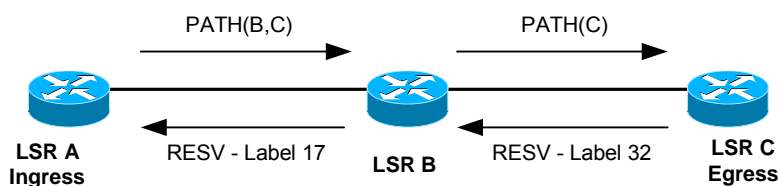
Ο LSR B λαμβάνει το μήνυμα LABEL\_MAPPING και το αντιστοιχεί στην αρχική αίτηση χρησιμοποιώντας το LSP ID που περιέχεται και στα δυο μηνύματα (στο LABEL\_MAPPING και στο LABEL\_REQUEST). Οριστικοποιεί την δέσμευση, δεσμεύοντας μια ετικέτα για την LSP, βάζοντας την είσοδο στον πίνακα δρομολόγησης και περνώντας τη νέα ετικέτα στον LSR A μέσω ενός μηνύματος LABEL\_MAPPING.

Η επεξεργασία στον LSR A είναι παρόμοια, αλλά ο LSR A δεν δεσμεύει ετικέτα ούτε προωθεί το μήνυμα σε έναν επόμενο LSR επειδή αυτός είναι ο LSR εισόδου για τη νέα LSP.

#### 6.2.4.2 Το Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων με επεκτάσεις (Resource Reservation Protocol - TE, RSVP-TE) για κατανομή ετικέτας

Το RSVP με επεκτάσεις [6] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό μιας κλειστής διαδρομής (τούνελ) μέσα στο δίκτυο MPLS, αυξάνοντας το μήνυμα RSVP PATH με ένα αντικείμενο LABEL\_REQUEST, και το μήνυμα RSVP Resv με ένα αντικείμενο LABEL. Η διαδικασία της κατανομής των ετικετών γίνεται κατά απαίτηση (distribution on demand). Με το μήνυμα RSVP PATH γίνεται η κράτηση των ετικετών μέχρι τον τελικό κόμβο, ενώ με το RSVP Resv γίνεται η ενημέρωση-κατανομή των ετικετών. Η παραπάνω διαδρομή στηρίζεται σε αλγόριθμους δρομολόγησης επιπέδου δικτύου, που στην ουσία κατασκευάζουν ένα δένδρο κοντινότερης διαδρομής (Sortest Path Tree). Στην περίπτωση που επιθυμείται ο καθορισμός μιας υποχρεωτικής διαδρομής δρομολόγησης, τότε με αντίστοιχες επεκτάσεις μπορεί να κατασκευαστεί ένα μήνυμα RSVP PATH με ένα αντικείμενο EXPLICIT\_ROUTE όπου ενθυλακώνει το σύνολο των διαδρομών που πρέπει να ακολουθηθεί το πακέτο.

Το βασικό διάγραμμα για την εγκατάσταση μιας LSP χρησιμοποιώντας RSVP-TE φαίνεται στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7

Εγκατάσταση LSP με χρήση RSVP-TE

Ο LSR εισόδου, LSR A, καθορίζει ότι χρειάζεται να εγκαταστήσει μια νέα LSP προς τον LSR C. Οι παράμετροι κίνησης που απαιτούνται για την σύνοδο καθιστούν ικανό τον LSR A να καθορίσει ότι η διαδρομή για τη νέα LSP πρέπει να πάει μέσω του LSR B. Ο LSR A φτιάχνει ένα μήνυμα PATH με μια συγκεκριμένη διαδρομή (B, C) και αναφέρει λεπτομέρειες σχετικά με τις παραμέτρους της κίνησης που απαιτούνται για τη νέα διαδρομή. Ο LSR A στην συνέχεια προωθεί το μήνυμα PATH στον LSR B σαν ένα πακέτο IP.

Ο LSR B λαμβάνει την αίτηση PATH, καθορίζει ότι δεν είναι ο LSR εξόδου και προωθεί την αίτηση κατά μήκος της διαδρομής όπως προσδιορίζεται στην αίτηση. Τροποποιεί τη συγκεκριμένη διαδρομή στο μήνυμα PATH και προωθεί το μήνυμα στον LSR C.

Ο LSR C, ορίζει ότι είναι ο LSR εξόδου για τη νέα LSP και καθορίζει το εύρος ζώνης που πρέπει να δεσμεύσει. Επιλέγει μια ετικέτα για τη νέα LSP και κατανέμει την ετικέτα στον LSR B με ένα μήνυμα RESV, το οποίο περιέχει λεπτομέρειες για τη δέσμευση που απαιτείται για την LSP.

Ο LSR B, λαμβάνει το μήνυμα RESV και το αντιστοιχεί στην αρχική αίτηση χρησιμοποιώντας το LSP ID που περιέχεται και στο μήνυμα PATH και στο μήνυμα RESV. Καθορίζει τους πόρους που θα δεσμεύσει από τις λεπτομέρειες

του μηνύματος RESV, αναθέτει μια ετικέτα στην LSP, εγκαθιστά τον πίνακα προώθησης και προωθεί τη νέα ετικέτα στον LSR A μέσω ενός μηνύματος RESV.

Η επεξεργασία, στον LSR A, είναι παρόμοια, αλλά δεν χρειάζεται να δεσμεύσει νέα ετικέτα και να προωθήσει σε επόμενο LSR αφού αυτός είναι ο LSR εισόδου για τη νέα LSP.

#### 6.2.4.3 Σύγκριση CR-LDP και RSVP

Οι βασικές διαφορές μεταξύ των CR-LDP και RSVP είναι η αξιοπιστία του πρωτοκόλλου μεταφοράς και η κατεύθυνση στην οποία γίνονται οι δεσμεύσεις πόρων. Από αυτά τα σημεία προέρχονται πολλές λειτουργικές διαφορές. Ο Πίνακας 6.1 συνοψίζει τις κύριες τεχνικές διαφορές και ομοιότητες των δυο πρωτοκόλλων.

**Πίνακας 6.1**

Σύγκριση RSVP-TE και CR-LDP

	<b>CR-LDP</b>	<b>RSVP</b>
Επίπεδο μεταφοράς	TCP	IP
Ασφάλεια	Ναι	Ναι
Υποστήριξη πολλαπλών προορισμών	Όχι	Όχι
Συγχώνευση LSP	Ναι	Ναι
Κατάσταση LSP	Σκληρή	Απαλή
Ανανέωση LSP (Refresh)	Δεν χρειάζεται	Περιοδική, βήμα-βήμα
Διαθεσιμότητα	Όχι	Ναι
Επαναδρομολόγηση	Ναι	Ναι
Συγκεκριμένη δρομολόγηση	Αυστηρή και χαλαρή	Αυστηρή και χαλαρή
Pinning της διαδρομής	Ναι	Ναι, μετά από καταγραφή της διαδρομής
Προ-εγκατάσταση LSP	Ναι, βάσει προτεραιοτήτων	Ναι, βάσει προτεραιοτήτων
Προστασία LSP	Ναι	Ναι
Έλεγχος Κίνησης	Forward Path	Reverse Path
Αστυνόμευση	Έμμεση	Ρητή
Layer 3 Protocol Indicated	Όχι	Ναι
Περιορισμός Resource Class	Ναι	Όχι

Στις επόμενες παραγράφους μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά των δυο πρωτοκόλλων περιγράφονται πιο αναλυτικά.

**Επαναδρομολόγηση (Re-routing):** Αυτή η ενότητα αναφέρεται στην εξασφάλιση (provision) μιας καινούργιας διαδρομής για μια LSP [7] μετά από γνωστοποίηση βλάβης ή αλλαγής στην τοπολογία του δικτύου. Ο προγραμματισμός από την αρχή για εναλλακτικές διαδρομές για μια LSP είναι γνωστός σαν προστασία LSP (LSP protection) και αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο.

Μια αυστηρά καθορισμένη ρητή διαδρομή (explicit route) μπορεί να επαναδρομολογηθεί μόνο από τον LSR εισόδου. Συνεπώς, η βλάβη σε κάποιο σημείο μιας LSP θα πρέπει να αναφερθεί στον LSR εισόδου, με αποτέλεσμα να καταστρέψει ολόκληρη την LSP. Ωστόσο, ένα μέρος μιας ρητά δρομολογούμενης (explicit routed) LSP που έχει δρομολογηθεί χαλαρά, και κάθε μέρος μιας LSP που έχει δρομολογηθεί βήμα-βήμα, μπορεί να επαναδρομολογηθεί εάν εντοπισθεί μια αποτυχημένη διαδρομή ή ένας γειτονικός δρομολογητής (τοπική ανάκτηση, local recovery), εφόσον μια καλύτερη διαδρομή είναι διαθέσιμη και αν οι πόροι μιας LSP απαιτούνται για μια καινούρια LSP, μεγαλύτερης προτεραιότητας (προ-εγκατάσταση, pre-emption).

Η επαναδρομολόγηση ρυθμίζεται πιο εύκολα από τον δρομολογητή εισόδου και υποστηρίζεται από το CR-LDP και από το RSVP με μικρές διαφορές.

- Μια LSP που χρησιμοποιεί RSVP μπορεί να εγκαταστήσει μια νέα διαδρομή, ανανεώνοντας (refresh) απλά το Path για μια LSP προς ένα διαφορετικό επόμενο κόμβο, μόλις μια εναλλακτική διαδρομή είναι διαθέσιμη ή απαιτείται. Η παλιά διαδρομή μπορεί να αφαιρεθεί να λήξει (left to time out), αφού μηνύματα refresh δεν στέλνονται πλέον. Ωστόσο, με αυτόν τον τρόπο σπαταλούνται πόροι από την παλιά διαδρομή
- “Make-before-break” είναι ένας μηχανισμός όπου η παλιά διαδρομή χρησιμοποιείται (και γίνεται refresh) ενώ μια καινούργια διαδρομή εγκαθίσταται και μετά ο δρομολογητής LSR που εκτελεί την επαναδρομολόγηση αλλάζει και χρησιμοποιεί τη νέα διαδρομή και καταστρέφει την παλιά. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να αποφευχθεί μια διπλή κράτηση πόρων και στο CR-LDP και στο RSVP
- Η επαναδρομολόγηση μερών μιας διαδρομής που έχουν δρομολογηθεί χαλαρά, από ενδιάμεσους LSRs, σε περίπτωση που μια καλύτερη διαδρομή είναι διαθέσιμη, μπορεί να οδηγήσει μη σταθερά δίκτυα σε καταστροφή. Για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο, μια διαδρομή που έχει δρομολογηθεί χαλαρά μπορεί να γίνει “rinned”. Στο CR-LDP αυτό γίνεται απλά σημαδεύοντας με μια flag ως rinned το μέρος της συγκεκριμένης διαδρομής. Αυτό σημαίνει, ότι αφού η διαδρομή εγκατασταθεί, θεωρείται σαν να είχε προσδιορισθεί αυστηρά και δεν μπορεί να αλλάξει. Στο RSVP, το rinning απαιτεί επιπλέον επεξεργασία. Το αντικείμενο Record Route χρησιμοποιείται από τα μηνύματα Path και Resv για να επανατροφοδοτήσουν τη διαδρομή που έχει επιλεγεί προς τον δρομολογητή εισόδου. Ο δρομολογητής εισόδου μπορεί τότε να χρησιμοποιήσει αυτήν την πληροφορία ώστε να επαναχρησιμοποιήσει το μήνυμα Path με μια αυστηρά προσδιορισμένη συγκεκριμένη διαδρομή.

Και το RSVP και το CR-LDP προσφέρουν ελαστικές προσεγγίσεις για την επαναδρομολόγηση και την εγκατάσταση πριν την καταστροφή (break) των LSPs.

**Προστασία LSPs:** Η προστασία των LSPs είναι ο επαναπρογραμματισμός εναλλακτικών διαδρομών για μια LSP με αυτόματη μεταγωγή σε άλλη διαδρομή, εάν η αρχική διαδρομή καταστραφεί. Αν και εννοιολογικά η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με την επαναδρομολόγηση, η προστασία LSP θεωρείται ότι είναι μια λειτουργία με ισχυρούς χρονικούς περιορισμούς, αφού ο στόχος είναι να γίνει η αλλαγή στη νέα διαδρομή με την ελάχιστη προσωρινή διακοπή (λιγότερο από 50ms), όσον αφορά την κίνηση που υπάρχει εκείνη τη στιγμή στο LS. Πολλαπλά επίπεδα προστασίας LSP είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν και για τα δυο πρωτόκολλα. Η πιο απλή μορφή προστασίας LSP για έναν δρομολογητή εισόδου ή για έναν ενδιάμεσο LSR είναι να προσπαθήσει αμέσως να επαναδρομολογήσει την LSP όταν ειδοποιηθεί για μια βλάβη. Αυτό είναι δυνατό και στα δυο πρωτόκολλα, αλλά μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα μια αργή διαδικασία ανάκτησης από τη βλάβη (failure) (τυπικά τουλάχιστον μερικά δευτερόλεπτα) καθώς πρέπει να μεταβιβαστεί και η κίνηση στη νέα LSP. Αυτό δεν είναι αρκετά γρήγορο για εφαρμογές όπως η φωνή.

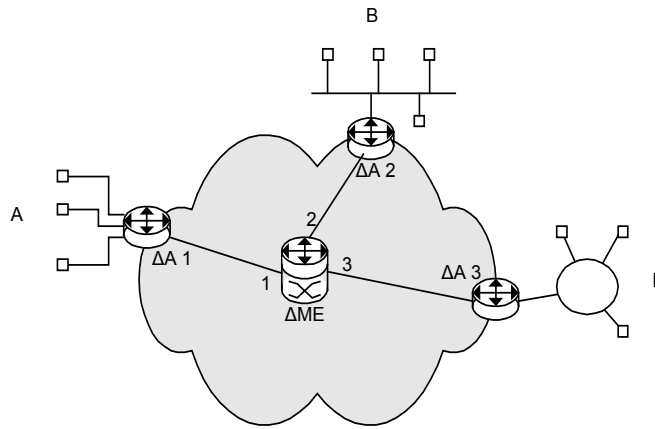
Γρηγορότερη προστασία LSP μπορεί να επιτευχθεί εάν η διαδρομή μεταξύ των LSPs προστατεύεται από ένα σύστημα προστασίας επιπέδου σύνδεσης όπως το SONET. Μια τέτοια προστασία είναι διαφανής για την LSP και μπορεί να εφαρμοστεί από οποιοδήποτε πρωτόκολλο.

#### 6.2.4.4 Παράδειγμα Δημιουργίας Πίνακα Κλάσεων Ισοδύναμης Προώθησης

Η εγκατάσταση και ο έλεγχος των διαδρομών σε ένα δίκτυο τεχνολογίας δρομολόγησης με ετικέτα γίνεται καταναμημένα από όλους τους δρομολογητές-μεταγωγείς που παρεμβάλλονται. Κάθε κόμβος για κάθε κλάση ισοδύναμης προώθησης διαπραγματεύεται μια τιμή ετικέτας με τον αμέσως επόμενο κόμβο. Ο «επόμενος» κόμβος δεσμεύει μια ελεύθερη τιμή ετικέτας για τη συγκεκριμένη κλάση ισοδύναμης προώθησης και τη μεταφέρει στον προηγούμενο κόμβο. Η μεταφορά πληροφορίας για τις ετικέτες μεταξύ των κόμβων γίνεται με το πρωτόκολλο LDP. Αποτέλεσμα της προηγούμενης διαδικασίας είναι η δημιουργία σε κάθε δρομολογητή μιας βάσης δεδομένων (Label Information Base, LIB), η οποία αντιστοιχίζει κλάσεις ισοδύναμης προώθησης με ετικέτες διαδρομών. Την όλη διαδικασία εγκατάστασης της διαδρομής την ξεκινάει ο δρομολογητής ακμής που συνδέει τον πομπό στο δίκτυο πυρήνα. Πέραν της ετικέτας και της κλάσης ισοδύναμης προώθησης, στη βάση δεδομένων LIB αποθηκεύονται και η θύρα του δρομολογητή από όπου πρέπει να εξέλθει το πακέτο.

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα την τοπολογία δικτύου μεταγωγής με ετικέτα του Σχήματος 6.8. Στο Σχήμα 6.8 το δίκτυο αποτελείται από ένα Δρομολογητή-Μεταγωγέα με ετικέτα (LSR), τρεις Δρομολογητές Απόληξης και τρία δίκτυα πρόσβασης Α, Β, Γ.

Ο Δρομολογητής-Μεταγωγέας με ετικέτα έχει τρεις θύρες με τις οποίες συνδέεται στους τρεις δρομολογητές ακμής. Οι πίνακες κλάσεων ισοδύναμης προώθησης και δρομολόγησης-ετικέτας για τον Δρομολογητή-Μεταγωγέα με ετικέτα είναι οι Πίνακες 6.2 και 6.3.



**Σχήμα 6.8**  
Παράδειγμα δικτύου μεταγωγής με ετικέτα

**Πίνακας 6.2**  
Πίνακας κλάσεων ισοδύναμης προώθησης

Προορισμός	Ποιότητα υπηρεσίας (ToS byte)	Κλάση ισοδύναμης Προώθησης	Επόμενος Κόμβος	Θύρα εξόδου
A	X	A1	ΔΑ1	1
B	X	B1	ΔΑ2	2
B	Y	B2	ΔΑ2	2
Γ	Z	Γ1	ΔΑ3	3

**Πίνακας 6.3**  
Πίνακας Δρομολόγησης με ετικέτα

Κλάση ισοδύναμης Προώθησης	Ετικέτα εισόδου	Θύρα εισόδου	Ετικέτα εξόδου	Θύρα εξόδου
A1	BET1	2	AET1	1
A1	ΓΕΤ1	3	AET2	1
B1	AET1	1	BET1	2
B2	AET2	1	BET2	2
B1	ΓΕΤ2	3	BET3	2
B2	ΓΕΤ3	3	BET4	2
Γ1	BET2	1	ΓΕΤ1	3
Γ2	AET3	2	ΓΕΤ2	3

Επειδή κάθε κόμβος μπορεί να έχει πολλούς προηγούμενους κόμβους για τον ίδιο προορισμό ή την ίδια κλάση ισοδύναμης προώθησης, οι διαδρομές που

εγκαθίστανται στην τεχνολογία μεταγωγής με ετικέττα είναι τύπου πολλαπλών σημείων προς σημείο (multipoint-to-point paths).

### 6.2.5 Ανακεφαλαίωση Περιγραφής Λειτουργίας

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως η τεχνολογία μεταγωγής με ετικέττα διαχωρίζει τις λειτουργίες δρομολόγησης στα άκρα του δικτύου από αυτές στον πυρήνα του δικτύου. Ένας δρομολογητής απόληξης κάνει τις παρακάτω λειτουργίες:

1. Αναγνωρίζει την κλάση ισοδύναμης προώθησης βάσει της διεύθυνσης προορισμού και ίσως και την ποιότητα υπηρεσίας (η ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να αναγνωρισθεί κοιτάζοντας την οκτάδα TOS της επικεφαλίδας του πακέτου IP).
2. Βρίσκει την κατάλληλη ετικέττα από τον πίνακα δρομολόγησης ετικέττας.
3. Τοποθετεί την ετικέττα στο πακέτο και το προωθεί στον επόμενο κόμβο.

Αντίθετα ένας Δρομολογητής-Μεταγωγέας κάνει τις παρακάτω λειτουργίες:

1. Χρησιμοποιεί την ετικέττα (εισόδου) ως δείκτη στον πίνακα δρομολόγησης ετικέττας για να βρει τη θύρα εξόδου και την ετικέττα εξόδου.
2. Αλλάζει την ετικέττα εισόδου με την ετικέττα εξόδου.
3. Προωθεί το πακέτο στον επόμενο κόμβο.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η τεχνολογία μεταγωγής με ετικέττα επιτρέπει την χρησιμοποίηση των ήδη εγκατεστημένων δικτύων μεταγωγής όπως είναι το ATM και το Frame Relay. Στην περίπτωση του ATM, οι ετικέττες που αναφέραμε προηγουμένως δεν είναι τίποτα άλλο από τους ενδείκτες νοητών συνδέσεων/διαδρομών (ATM VCI/VPI). Ωστόσο, μια σημαντική διαφορά της τεχνολογία μεταγωγής με ετικέττα από άλλες τεχνολογίες IP πάνω από δίκτυα ATM (π.χ. MPOA) είναι ότι για την εγκατάσταση των διαδρομών δε χρησιμοποιείται η συμβατική σηματοδότηση του δικτύου ATM (δηλ. Q.2931 ή UNI3.1). Αντίθετα οι διαδρομές εγκαθίστανται με το μηχανισμό που περιγράφηκε προηγουμένως και με τη χρήση του πρωτοκόλλου LDP. Για αυτό το λόγο η τεχνολογία MPLS απαιτεί αναβάθμιση των μεταγωγέων ATM (θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτελούν πρωτόκολλα δρομολόγησης διαδικτύου και το LDP) το οποίο είναι και ένα σημαντικό μειονέκτημα της τεχνολογίας

## 6.3 Τεχνολογία Επικοινωνιακής Κίνησης (Traffic Engineering)

Για να αντιμετωπισθεί η αυξημένη κίνηση που διέρχεται στο σημερινό Διαδίκτυο αλλά και να προσφερθούν νέες υπηρεσίες, υψηλότερων δικτυακών απαιτήσεων σε όρους ποιότητας υπηρεσίας οι παροχείς υπηρεσιών Διαδικτύου έχουν τις εξής επιλογές: Τη βελτίωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου τους, την επέκταση της χωρητικότητας ή την κατάλληλη προπαρασκευή και διάρθρωση του δικτύου τους σε σχέση με την κίνηση που καλείται να μεταγάγει.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου έχει να κάνει με το σχεδιασμό του σε υψηλό επίπεδο, και μια επιτυχημένη και ευέλικτη προσέγγιση είναι απαραίτητη για να εκπληρωθούν οι σημερινές και μελλοντικές απαιτήσεις. Η επέκταση της χωρητικότητας των δικτύων έχει χρησιμοποιηθεί εντατικά τα προηγούμενα χρόνια. Συγκεκριμένα, τα δίκτυα κορμού των μεγάλων παροχέων Διαδικτύου



επεκτάθηκαν από μισθωμένες γραμμές αρχικά σε κυκλώματα OC-1 και μετέπειτα σε OC-3 και OC-12 (51.84, 155.52 και 622.08 Mbps). Ενώ και αυτή η ενέργεια κρίνεται απαραίτητη, δεν μπορεί να προσφέρει εγγυήσεις για την επιτυχημένη μεταγωγή υπηρεσιών όπως Φωνή πάνω από IP (Voice over IP), Κινούμενη Εικόνα κατ' Απαίτηση (Video on Demand), Ιδεατά Ιδιωτικά Δίκτυα (Virtual Private Networks) κ.ά., με εγγενείς απαιτήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας. Παράλληλα οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις δε δίνουν λύσεις σε προβλήματα αποδοτικού ελέγχου και διαχείρισης του δικτύου τους. Αποτέλεσμα αυτών, καθώς και των αδυναμιών των πρωτοκόλλων δρομολόγησης του IP, είναι να παρουσιάζονται ζεύξεις που υπέρ-χρησιμοποιούνται, οδηγώντας σε εξάντληση το διαθέσιμο εύρος ζώνης, ενώ άλλες εναλλακτικές διαδρομές παραμένουν χωρίς σημαντικό φορτίο. Παράλληλα, η αντιμετώπιση βλαβών στο δίκτυο δεν είναι αυτοματοποιημένη και δεν ακολουθεί τις βέλτιστες διαδικασίες. Η συνειδητοποίηση των παραπάνω ζητημάτων προβάλλει τον σημαντικό ρόλο της προπαρασκευής και διάρθρωσης του δικτύου (Traffic Engineering).

Η Τεχνολογία Επικοινωνιακής Κίνησης (Traffic Engineering) στο Διαδίκτυο μπορεί να οριστεί ως η διάρθρωση του δικτύου με σκοπό τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του, με επιστημονικές και όχι μόνο εμπειρικές μεθόδους. Εφαρμόζοντας διαδικασίες μέτρησης, μοντελοποίησης και χαρακτηρισμού της κίνησης, η Τεχνολογία Επικοινωνιακής Κίνησης προτείνει μηχανισμούς έλεγχου κίνησης και εναλλακτικές διαρθρώσεις του δικτύου. Σκοπός είναι η αποδοτική αξιοποίηση των πόρων του δικτύου, ο ορθολογικός σχεδιασμός της χωρητικότητας των διαφόρων ζεύξεων, η αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου και η άμεση ανταπόκριση του με σκοπό τον έλεγχο βλαβών. Τελικά, η χρήση της Τεχνολογίας Επικοινωνιακής Κίνησης παρέχει στον παροχέα υπηρεσιών Διαδικτύου και στους πελάτες του ένα δίκτυο υψηλότερης αξίας και δυνατοτήτων.

### 6.3.1 Διαδικασία εφαρμογής της Τεχνολογίας Επικοινωνιακής Κίνησης

Ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα υψηλού επιπέδου θεωρείται ένα δίκτυο που αποτελείται από ένα σύνολο από κόμβους με πεπερασμένους πόρους, από την εισερχόμενη κίνηση, που θέτει ορισμένες απαιτήσεις προς ικανοποίηση από το δίκτυο, και από το σύστημα ελέγχου του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Με τη διαδικασία της Τεχνολογίας Επικοινωνιακής Κίνησης θέτουμε τις παραμέτρους των τριών αυτών υποσυστημάτων στο καταλληλότερο σημείο λειτουργίας. Η διαδικασία εφαρμογής έχει τα ακόλουθα στάδια:

- Τον καθορισμό των μηχανισμών ελέγχου του δικτύου, επιλέγοντας τους καταλληλότερους κάθε φορά από τα διαθέσιμα πρωτόκολλα και μηχανισμούς του Διαδικτύου. Το MPLS αποτελεί το σημαντικότερο εργαλείο για την Τεχνολογία Επικοινωνιακής Κίνησης αυτή τη στιγμή στο Διαδίκτυο (βλέπε 6.3.3).
- Την παρακολούθηση της λειτουργίας του δικτύου. Τα στοιχεία που συνθέτουν αυτήν τη λειτουργία προσφέρουν την απαραίτητη ανάδραση για την πρόταση του τελικού τρόπου λειτουργίας του δικτύου.

- Η ανάλυση της κατάστασης του δικτύου από τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί. Σε αυτό το σημείο ανακαλύπτονται πιθανά σημεία συμφόρησης και άλλες μη επιθυμητές ή επιθυμητές καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου.
- Το τελικό στάδιο είναι η βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων του δικτύου και εν γένει της διάρθρωσης του. Επίσης, μπορούν να τροποποιηθούν παράμετροι που έχουν σχέση με τη διαχείριση της κίνησης, όπως η δρομολόγηση της, και με τους μηχανισμούς έλεγχου κίνησης που επιβάλλονται.

Όπως γίνεται φανερό η διαδικασία της Τεχνολογίας Επικοινωνιακής Κίνησης είναι δυναμική και εξαιρετικά προσαρμόσιμη σε πολλά διαφορετικά είδη προβλημάτων. Επίσης, αποτελεί ένα χώρο όπου τεχνολογίες ενεργών δικτύων, ευφυών και κινητών πρακτόρων βρίσκουν πρόσφορο έδαφος για εφαρμογή, ιδιαίτερα κατά τη φάση συλλογής των δεδομένων, ανάλυσης τους και βελτιστοποίησης του δικτύου. Για την επιλογή ενός κατάλληλου σχήματος ελέγχου, το MPLS αποτελεί την πλέον εφικτή και αποδοτική λύση. Ακόμα ειδικότερα, στο περιβάλλον του Διαδικτύου η αποτελεσματική διαχείριση του δικτύου και η εφαρμογή διαδικασιών Τεχνολογίας Επικοινωνιακής Κίνησης έχει κάποιες ιδιαιτερότητες, αφού η κίνηση είναι ασύμμετρη, ενώ η υποδομή των δικτύων επεκτείνεται μετά από περιόδους στασιμότητας. Επίσης, το Διαδίκτυο δεν είναι σχεδιασμένο εξ αρχής για την υποστήριξη εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας, καθώς και η κίνηση είναι ιδιαίτερα εκρηκτική, παρουσιάζοντας δυναμικά φαινόμενα. Σαν αποτέλεσμα η εφαρμογή της Τεχνολογίας Επικοινωνιακής Κίνησης μέσω του MPLS και η χρήση αρχών ενεργών δικτύων και ευφυών πρακτόρων παρουσιάζεται ως μια ελπιδοφόρα προοπτική.

### 6.3.2 Η Τεχνολογία Επικοινωνιακής Κίνησης στο σημερινό Διαδίκτυο

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης IGP που χρησιμοποιούνται για τη δρομολόγηση εσωτερικά ενός αυτόνομου συστήματος όπως το IS-IS και το OSPF, παίρνουν αποφάσεις με μοναδικό κριτήριο την τοπολογία του δικτύου. Συγκεκριμένα επιλέγονται οι πιο σύντομες διαδρομές μεταξύ των προορισμών. Κάθε δρομολογητής εκτελεί ανεξάρτητα τον αλγόριθμο δρομολόγησης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ευέλικτου, ανθεκτικού και με μεγάλες δυνατότητες κλιμάκωσης κατανεμημένου συστήματος δρομολόγησης. Ωστόσο, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερφόρτωση των συντομότερων διαδρομών ενώ άλλες παραμένουν χωρίς σημαντικό φορτίο κατά τις περιόδους αιχμής. Ενώ μπορούν να εισαχθούν διαχειριστικά βάρη στις εναλλακτικές διαδρομές, αυτή είναι μια λύση, που ιδιαίτερα σε δίκτυα σημαντικού μεγέθους, συνεπάγεται ανεπιθύμητες παρενέργειες σε άλλα τμήματα του δικτύου και γενικά απρόβλεπτη συμπεριφορά. Επίσης, πληροφορίες, όπως η βέλτιστη χρησιμοποίηση των ζεύξεων του δικτύου, η δρομολόγηση με βάση απαιτήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας και ο καθορισμός εναλλακτικών διαδρομών σε περιπτώσεις βλάβης του δικτύου, δεν καλύπτονται.

Για να αντιμετωπισθούν κάποια από τα παραπάνω προβλήματα και να καταστεί η υποδομή του Διαδικτύου πιο ευέλικτη και αποτελεσματική εισάγεται η έννοια των επικαλυπτομένων δικτύων. Συγκεκριμένα, ένα ATM δίκτυο χρησιμοποιείται ως στρώμα σύνδεσης δεδομένων (2 επίπεδο OSI) μεταξύ

γειτονικών δρομολογητών IP. Με αυτόν το τρόπο το συνολικό δίκτυο αποτελείται από 2 διακριτά δίκτυα, με συνεπακόλουθο να απαιτείται η διαχείριση ενός δικτύου ATM και του δικτύου IP που επικαλύπτει το δίκτυο ATM. Αν και το παραπάνω αποτελεί μειονέκτημα, ωστόσο παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα που έχουν καταστήσει την αρχιτεκτονική αυτή ευρέως εξαπλωμένη. Το ATM προσφέρει τις δυνατότητες εγκατάστασης μονίμων νοητών διαδρομών και συνδέσεων (Permanent VPs και VCs) επιτρέποντας το σχεδιασμό σύμφωνα με τις ανάγκες του δικτύου μιας νοητής τοπολογίας και συνδεσμολογίας μεταξύ των δρομολογητών IP. Οι προηγμένες δυνατότητες σηματοδοσίας και παροχής Ποιότητας Υπηρεσίας του ATM δεν αξιοποιούνται, αλλά αντί για αυτές αξιοποιείται η δυνατότητα ευέλικτης διαχείρισης νοητών διαδρομών όπως αυτές έχουν προκύψει από τον αρχικό σχεδιασμό του δικτύου και την Τεχνολογία Επικοινωνιακής Κίνησης.

### 6.3.3 Το MPLS και η Τεχνολογία Επικοινωνιακής Κίνησης

Το μειονέκτημα της διαχείρισης δύο δικτύων, καθώς και η διαφαινόμενη υστέρηση του ATM να διαχειριστεί συνδέσεις της τάξης του OC-48 και παραπάνω, ευνοούν την ανάπτυξη ολοκληρωμένων λύσεων για τη μεταγωγή κίνησης IP βασισμένων σε ένα μόνο πρωτόκολλο, το οποίο θα ενσωματώνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ATM, λειτουργώντας χωρίς ένα ενδιάμεσο δίκτυο ανάμεσα στο στρώμα 2 και 3. Το MPLS [8,9,10] αναπτύχθηκε με σκοπό να αποτελέσει το ενιαίο δίκτυο πάνω από το οποίο μπορεί να μεταχθεί κίνηση διαφορετικών πρωτοκόλλων. Οι λειτουργίες ενός μοντέλου διαχείρισης δικτύου με το MPLS έχει τα ακόλουθα λειτουργικά στοιχεία:

- Μηχανισμούς προώθησης πακέτου
- Προώθηση των πακέτων, όπως έχει προαναφερθεί επιτελείται με μεταγωγή ετικέτας
- Κατανομή της πληροφορίας για την κατάσταση του δικτύου. Επεκτάσεις του OSPF και των πρωτοκόλλων IGP μπορούν να συμπεριλαμβάνουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου, όπως δυναμική ανανέωση στοιχείων για τη χρησιμοποίηση τμημάτων του δικτύου, πληροφορίες καθυστέρησης, μέγιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης, χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης κ.ά. Οι πληροφορίες αυτές αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων που αναπαριστά την τοπολογία του δικτύου και τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος για την Τεχνολογία Επικοινωνιακής Κίνησης κάθε ζεύξης (Traffic Engineering Database, TED).
- Επιλογή διαδρομής. Η επιλογή της διαδρομής από μια αφετηρία σε έναν προορισμό και ανάμεσα από ένα σύνολο διαφορετικών επιλογών είναι μια λειτουργία που μπορεί να γίνει “offline” με διαχειριστικές λειτουργίες και σε μεγάλη κλίμακα χρόνου, αλλά και “online” δηλαδή σε πραγματικό χρόνο και με λειτουργίες ελέγχου. Η μη πραγματικού χρόνου επιλογή μπορεί να γίνει με τη χρήση εξομοιώσεων, αξιοποίηση στατιστικών στοιχείων ή και με έμπειρα συστήματα μέσα από ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης δικτύου. Η επιλογή μπορεί να υπόκειται σε μια σειρά από περιορισμούς, π.χ. η διαδρομή να περνά από ορισμένους κόμβους, να έχει μήκος μικρότερο από κάποια τιμή, να προσφέρει συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας

υπηρεσίας, δηλαδή δρομολόγηση με βάση περιορισμούς (Constraint based routing). Στη περίπτωση του «προϋπολογισμού» των διαδρομών αυτές μπορούν να εγκατασταθούν με λειτουργίες διαχείρισης (ακριβώς όπως στην περίπτωση των επικαλυπτόμενων δικτύων ATM και IP) ή να εγκατασταθούν με σηματοδότηση και εφόσον υπάρξει απαίτηση για χρήση τους. Επίσης, η επιλογή τους μπορεί να γίνει και δυναμικά σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η επιλογή, αν και προσφέρει τη μέγιστη ευελιξία, επιβαρύνει με πρόσθετο υπολογιστικό φόρτο, απαιτώντας για μια ρεαλιστική υλοποίηση του προηγμένες αρχιτεκτονικές κατανεμημένης επεξεργασίας ή και ενεργών δικτύων. Τέλος, μπορεί ένα μέρος της διαδρομής να έχει προεπιλεγεί και να επιλέγονται δυναμικά κάποιοι από τους υπόλοιπους κόμβους.

- Στοιχεία σηματοδότησης και ελέγχου. Αυτά ενσωματώνονται εγγενώς στο μοντέλο του MPLS. Υποψήφια για χρήση είναι τα LDP και RSVP-TE [11]. Σε περίπτωση χρήσης ευφυών ή κινούμενων διαμεσολαβητών (agents), η γλώσσα επικοινωνίας πρακτόρων (ACL) συνιστά άλλη μια πρόσθετη μορφή σηματοδότησης
- Λειτουργίες που μια επιτυχημένη εφαρμογή της Τεχνολογίας Επικοινωνιακής Κίνησης πρέπει να προβλέπει είναι συγκεκριμένοι τρόποι αντιμετώπισης λαθών και βλαβών του δικτύου μέσω της εγκατάστασης εφεδρικών διαδρομών, της διαβάθμισης των LSPs με βάση διαφορετικές προτεραιότητες και της πρόβλεψης της περίπτωσης που μια LSP απαιτεί πόρους που παρακρατούνται από χαμηλότερης προτεραιότητας LSP, κ.ά.