



University of Macedonia
Master Information Systems
Networking Technologies
Professors: A.A. Economides & A. Pomportsis

Interdomain Routing

Aris Athanassiadis
Student ID: 20/06

Thessaloniki
February 2007



Πανεπιστήμιο Μακεδονίας
ΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα
Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων
Καθηγητές: Α.Α. Οικονομίδης & Α. Πομπόρτσης

Interdomain Routing

Άρης Αθανασιάδης
Α.Μ.: 20/06

Θεσσαλονίκη
Φεβρουάριος 2007

Abstract

A networking environment consists of various sub networks which are connected with routers. Routers are intelligent machines which enable the communication between subnets of different technology, in a way that is transparent to the end user. For the end user, the networking environment is viewed as a whole network unit.

World Wide Web is the most representative case of this scheme. It is segmented in many subnets, connected by routers, known as autonomous systems. These routers use common interface communication protocols. The main protocol used by internet routers today is BPG-4.

BGP was designed in 1989 to fulfill the routing demands of a concentrated network environment, which consists of various autonomous systems, replacing EGP. Today's fourth edition of BGP is the result of many improvements and enhancements and it is considered to be the last one. In the continuously changing internet environment, BGP-4 presents a low level of adaptation. Scientific research community makes an effort to develop an alternative routing protocol to replace BGP-4, so as to solve the problem mentioned above.

Περίληψη

Σε ένα δικτυακό περιβάλλον οι δρομολογητές αποτελούν τα σημεία ένωσης των διαφόρων υποδικτύων που το αποτελούν. Αναλαμβάνουν να αποκαταστήσουν την επικοινωνία ανάμεσα σε υποδίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην γίνεται αντιληπτό στον τελικό χρήστη το γεγονός ότι η κίνηση της πληροφορίας διασχίζει πολλά διαφορετικά υποδίκτυα. Με την κατάλληλη χρήση και λειτουργία των δρομολογητών, ο χρήστης έχει την αίσθηση ότι βρίσκεται σε ένα ενιαίο περιβάλλον.

Το περιβάλλον του διαδικτύου είναι μια χαρακτηριστική περίπτωση πολλών υποδικτύων που αποτελούν ένα ενιαίο δίκτυο. Τα υποδίκτυα αυτά ονομάζονται αυτόνομα συστήματα και συνδέονται μεταξύ τους μέσω δρομολογητών που χρησιμοποιούν κοινά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται από τους δρομολογητές αυτούς σήμερα είναι το BGP-4.

Το BGP σχεδιάστηκε το 1989 για να καλύψει τις απαιτήσεις δρομολόγησης ενός δικτυακού περιβάλλοντος που αποτελείται από αυτόνομα συστήματα, αντικαθιστώντας το EGP. Στο πέρασμα του χρόνου έγιναν πολλές βελτιώσεις και προσθήκες με αποτέλεσμα σήμερα να βρίσκεται στην τέταρτη έκδοσή του, η οποία διαβλέπεται να είναι και η τελευταία του. Παρουσιάζει αδυναμίες προσαρμογής στο συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον του διαδικτύου και ήδη η ερευνητική κοινότητα δραστηριοποιείται με κατεύθυνση προς την αντικατάσταση του BGP-4 με ένα νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Table of Contents

Introduction.....	7
1 General Principles.....	10
1.1 Routers and data packet routing.....	10
1.2 Autonomous Systems	12
2 Border Gateway Protocol - BGP.....	17
2.1 Introduction.....	17
2.2 Main function of BGP.....	17
2.3 BGP Routing messages exchange.....	18
2.4 BGP Decision Process	20
2.4.1 AS Path	21
2.4.2 Origin	22
2.4.3 Next Hop.....	22
2.4.4 Local Preference	22
2.4.5 Multi-Exit Discriminator - MED	23
2.4.6 Community	23
2.5 Best routing path choice.....	24
2.6 CIDR (Classless Inter-Domain Routing).....	25
2.7 BGP Foundational problems.....	27
2.7.1 Policy	28
2.7.2 Scalability	28
2.7.3 Convergence Time.....	29
2.7.4 Isolation.....	30
2.8 BGP Software	30
2.8.1 Web tools	31
2.8.2 Open source software.....	32
3 Proposals for next generation interdomain routing protocols.....	37
3.1 HLP – Hybrid Link-State Path-Vector protocol	37
3.2 MIRO – Multipath Interdomain Routing.....	38
3.3 NIRA - A New Internet Routing Architecture.....	39
4 Conclusions.....	41
Bibliography	42

Πίνακας Περιεχομένων

Παρουσίαση θέματος	7
1 Γενικές Αρχές	10
1.1 Δρομολογητές και δρομολόγηση πακέτων δεδομένων	10
1.2 Αυτόνομα Συστήματα	12
2 Border Gateway Protocol - BGP	17
2.1 Εισαγωγή	17
2.2 Λειτουργία του BGP	17
2.3 Ανταλλαγή Πληροφοριών Δρομολόγησης στο BGP	18
2.4 Λήψη αποφάσεων στο BGP	20
2.4.1 Μονοπάτι ΑΣ (AS Path)	21
2.4.2 Προέλευση (Origin)	22
2.4.3 Επόμενος Κόμβος (Next Hop)	22
2.4.4 Τοπική Προτίμηση (Local Preference)	22
2.4.5 Διευκρινιστής πολλαπλής εξόδου (Multi-Exit Discriminator - MED)	23
2.4.6 Κοινότητα (Community)	23
2.5 Σύνοψη της διαδικασίας για την επιλογή του βέλτιστου μονοπατιού	24
2.6 CIDR (Classless Inter-Domain Routing)	25
2.7 Κριτική του BGP	27
2.7.1 Πολιτικές δρομολόγησης (Policy)	28
2.7.2 Κλιμάκωση (Scalability)	28
2.7.3 Χρόνος Σύγκλισης (Convergence Time)	29
2.7.4 Απομόνωση (Isolation)	30
2.8 Λογισμικό για το BGP	30
2.8.1 Εργαλεία στο διαδίκτυο	31
2.8.2 Λογισμικό ανοικτού κώδικα	32
3 Εναλλακτικές Ερευνητικές Προτάσεις	37
3.1 HLP – Hybrid Link-State Path-Vector protocol	37
3.2 MIRO – Multipath Interdomain Routing	38
3.3 NIRA - A New Internet Routing Architecture	39
4 Συμπεράσματα - Επίλογος	41
Βιβλιογραφία	42

Παρουσίαση θέματος

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την τρέχουσα τεχνολογική κατάσταση στην οποία βρίσκεται η δρομολόγηση των πακέτων ανάμεσα σε ξεχωριστά αυτόνομα δίκτυα (ή αυτόνομα συστήματα). Ως μελέτη περιπτώσεως επιλέγεται το Internet, καθώς αποτελεί σίγουρα το μεγαλύτερο δίκτυο μέσα στο οποίο συνυπάρχουν και επικοινωνούν πολλά αυτόνομα συστήματα. Η επιλογή του θέματος έγινε λόγω του γεγονότος ότι η διαδικτυακή δρομολόγηση (Interdomain Routing) βρίσκεται σε ένα μεταβατικό στάδιο ερευνητικά και ως εκ τούτου παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον. Είναι γενικά αποδεκτό ότι το Internet καθορίζει πλέον την καθημερινότητα του ανθρώπου σε όλα τα επίπεδα. Το Interdomain routing αποτελεί δομικό στοιχείο αναφορικά με την αρχιτεκτονική του διαδικτύου. Συνεπώς, η μελέτη για την αναθεώρηση των μηχανισμών και των αλγορίθμων, που χρησιμοποιούνται σε αυτό, αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας.

Το θέμα προσεγγίζεται κυρίως βιβλιογραφικά καθώς συλλέγονται και παρουσιάζονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που θα καταστήσουν σαφές το ευρύ πεδίο της δρομολόγησης αυτόνομων συστημάτων. Η παρουσίαση εμβαθύνει περισσότερο στην δικτυακή πλευρά του θέματος και απευθύνεται σε αναγνώστες με γνώσεις πληροφορικής οι οποίοι όμως δεν είναι ειδικοί σε τεχνολογίες δικτύων. Το κείμενο είναι εμπλουτισμένο με γραφήματα και πίνακες για την καλύτερη αναπαράσταση των εννοιών και υπάρχει ένα μέρος αφιερωμένο στο λογισμικό ανοικτού κώδικα που αφορά υλοποιήσεις πρωτοκόλλων και εργαλεία διαχείρισης. Σχετικά με τις περιγραφές των αλγορίθμων δρομολόγησης αποφεύγεται η παράθεση πολύ εξειδικευμένων τεχνικών πληροφοριών και το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην περιγραφή της λειτουργίας τους.

Αρχικά γίνεται αναφορά και περιγραφή στην γενική θεωρία της δρομολόγησης δικτύων. Παρουσιάζεται με λεπτομέρειες και παραδείγματα η δομή ενός διαδικτύου το οποίο αποτελείται από πολλά επιμέρους δίκτυα και επιχειρείται ένας σαφής καθορισμός του ρόλου των δρομολογητών σε ένα τέτοιο περιβάλλον. Εισάγεται η έννοια του πίνακα δρομολόγησης και των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Τα πρωτόκολλα δυναμικής δρομολόγησης χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τα πρωτόκολλα Απόστασης – Διανύσματος (Distance – Vector) και τα πρωτόκολλα Κατάστασης

Σύνδεσης (Link – State). Γίνεται μια σύντομη αναφορά στη δομή των δύο κατηγοριών και αναφέρονται οι πιο γνωστές και διαδεδομένες υλοποιήσεις πρωτοκόλλων για την κάθε μια.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αυτόνομα συστήματα. Πρόκειται για δίκτυα τα οποία βρίσκονται υπό την επίβλεψη και διοίκηση ενός συγκεκριμένου οργανισμού και συνυπάρχουν μαζί με τα υπόλοιπα στο διαδίκτυο. Από αυτό συνεπάγεται ότι κάθε αυτόνομο σύστημα έχει την δική του πολιτική διαχείρισης της πληροφορίας η οποία ορίζεται από τον φορέα – ιδιοκτήτη του συστήματος. Για την επικοινωνία διαφορετικών αυτόνομων συστημάτων χρησιμοποιούνται δρομολογητές, οι οποίοι εγκαθίστανται στα όρια του κάθε αυτόνομου συστήματος και συνδέονται με δρομολογητές γειτονικών αυτόνομων συστημάτων. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εφαρμόζονται σε αυτές τις ζεύξεις ονομάζονται πρωτόκολλα εξωτερικής δρομολόγησης (Exterior Routing Protocols). Στο εσωτερικό ενός αυτόνομου συστήματος μπορεί να υπάρχουν επίσης δρομολογητές οι οποίοι να καθορίζουν την ομαλή ενδοεπικοινωνία του συστήματος. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό ενός αυτόνομου συστήματος ονομάζονται πρωτόκολλα εσωτερικής δρομολόγησης (Interior Routing Protocols).

Αφού ολοκληρωθεί η παράθεση των απαραίτητων στοιχείων σχετικά με την δρομολόγηση στο διαδίκτυο, παρουσιάζεται αναλυτικά το BGP-4 το οποίο είναι το κύριο πρωτόκολλο εξωτερικής δρομολόγησης που χρησιμοποιείται σήμερα στο Internet. Γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή ξεκινώντας από το 1989 που έκανε την πρώτη του εμφάνιση μέχρι την τέταρτη έκδοση που χρησιμοποιείται σήμερα και περιγράφεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου, όπως επίσης και τα βήματα μιας BGP συνόδου για την ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης ανάμεσα στους δρομολογητές ορίων δύο διαφορετικών αυτόνομων συστημάτων. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σχετικά εκτενής αναφορά στους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη από το BGP για την επιλογή του καλύτερου μονοπατιού. Δίνεται παραπάνω βαρύτητα σε αυτό το μέρος του πρωτοκόλλου επειδή ο σχεδιασμός του αλγορίθμου λήψης αποφάσεων είναι αυτός που αποτελεί την πηγή αρκετών άλυτων προβλημάτων που έχουν εντοπιστεί αναφορικά με το BGP μέχρι σήμερα. Παρατηρώντας τους παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή του βέλτιστου μονοπατιού γίνεται εύκολα αντιληπτό το γεγονός ότι το BGP στηρίζεται στις επιμέρους πολιτικές δρομολόγησης που έχει ορίσει ο διαχειριστής του κάθε αυτόνομου συστήματος προκειμένου να επιλέξει το μονοπάτι.

Ακολουθεί η κριτική του BGP όπως αυτή καταγράφεται σε διάφορα RFC και άλλες πηγές. Οι σημαντικότεροι τομείς στους οποίους το BGP καταγράφεται να παρουσιάζει προβληματική συμπεριφορά είναι οι εξής: α) η αποτελεσματική εξομάλυνση των διαφορετικών πολιτικών δρομολόγησης που παρατηρούνται ανάμεσα στα αυτόνομα συστήματα του διαδικτύου, β) η προσαρμογή του πρωτοκόλλου στην συνεχή αύξηση του μεγέθους του διαδικτύου, γ) οι μεγάλοι χρόνοι σύγκλισης του πρωτοκόλλου και δ) η αδυναμία απομόνωσης σφαλμάτων και προβληματικών κόμβων. Μετά την ανάλυση των παραπάνω προβληματικών σημείων του BGP γίνεται μια καταγραφή διαφόρων διαδεδομένων λογισμικών που συνολικά καλύπτουν όλες τις ανάγκες μιας εγκατάστασης BGP δρομολογητή. Παρουσιάζονται εργαλεία που εκτελούνται μέσω web και πακέτα λογισμικού ανοικτού κώδικα.

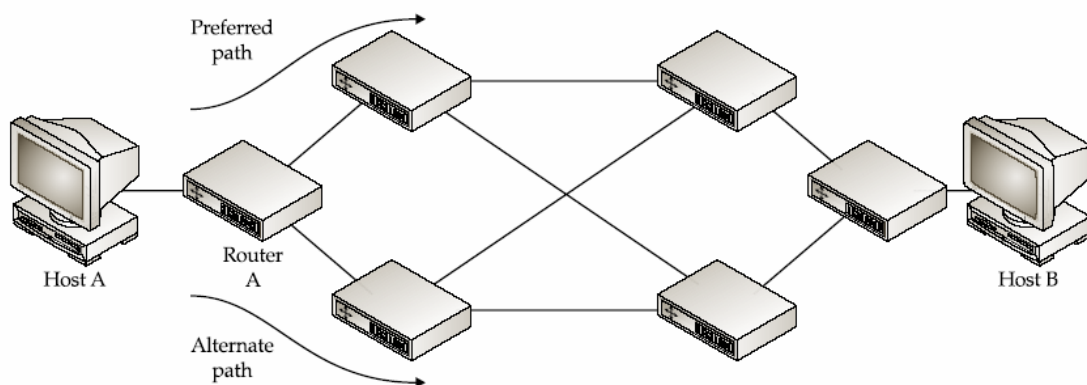
Η εργασία κλείνει με μερικές από τις σημαντικότερες εναλλακτικές ερευνητικές προτάσεις που έχουν κατατεθεί μέχρι σήμερα για την αντικατάσταση του πρωτοκόλλου. Παρουσιάζονται οι βασικές ιδέες στις οποίες βασίζονται τα πρωτόκολλα εξωτερικής δρομολόγησης HLP (Hybrid Link-State Path-Vector Protocol), MIRO (Multipath Interdomain Routing), NIRA (New Internet Routing Architecture) και τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται σήμερα η δρομολόγηση ανάμεσα στα αυτόνομα συστήματα του παγκόσμιου ιστού.

1 Γενικές Αρχές

1.1 Δρομολογητές και δρομολόγηση πακέτων δεδομένων

Η ένωση πολλών διαφορετικών δικτύων ηλεκτρονικών υπολογιστών, ανεξάρτητα από την φυσική τους θέση, ορίζεται ως διαδίκτυο. Οι δρομολογητές (routers) αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα συστατικά της δομής ενός διαδικτύου. Λειτουργούν ως σημεία ένωσης δύο ή περισσότερων δικτύων και αναλαμβάνουν τη μεταφορά των πακέτων δεδομένων ανάμεσα τους. Τα δίκτυα αυτά μπορεί να διαφέρουν αναφορικά με την υποδομή τους και τεχνολογία που χρησιμοποιούν. Ένα παράδειγμα δρομολογητή είναι αυτός που χρησιμοποιούν οι πελάτες ενός παροχέα υπηρεσιών internet (Internet Service Provider - ISP) για να έχουν ADSL πρόσβαση στο internet . Ο ADSL δρομολογητής λειτουργεί σαν σημείο ένωσης του τοπικού δικτύου του συνδρομητή και του εταιρικού δικτύου του ISP [21]. Οι δρομολογητές αναλαμβάνουν να αποκρύψουν τις όποιες τεχνικές διαφορές υπάρχουν στα επιμέρους δίκτυα και εγκαθιστούν κανάλια επικοινωνίας από το ένα δίκτυο στο άλλο.

Η βασική λειτουργία ενός δρομολογητή είναι η προώθηση των πακέτων δεδομένων που παραλαμβάνει [1]. Τα πακέτα ξεκινούν από ένα συγκεκριμένο αποστολέα και έχουν έναν συγκεκριμένο παραλήπτη. Όταν ο αποστολέας και ο παραλήπτης ανήκουν σε διαφορετικά δίκτυα, πρέπει να μεσολαβήσει η προώθηση των πακέτων από τους αντίστοιχους ενδιάμεσους δρομολογητές. Σε διαδικτύα μεγάλου μεγέθους, όπως



Εικόνα 1.1: Επιλογή καλύτερης δυνατής διαδρομής προς τον παραλήπτη [2]

είναι το internet, είναι προφανές ότι υπάρχουν πολλές εναλλακτικές διαδρομές για να φτάσει ένα μήνυμα σε έναν μακρινό παραλήπτη. Οι ενδιάμεσοι δρομολογητές που θα το προωθήσουν πρέπει να διαλέξουν την καλύτερη δυνατή διαδρομή.

Κάθε δρομολογητής είναι υπεύθυνος για την προώθηση του μηνύματος στον επόμενο κόμβο (next hop) και όχι για την εύρεση ολόκληρης της διαδρομής μέχρι τον παραλήπτη [2, 12]. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στους πίνακες δρομολόγησης (routing tables). Κάθε δρομολογητής χρησιμοποιεί έναν πίνακα δρομολόγησης στον οποίο αντιστοιχίζεται κάθε τελικός προορισμός με έναν επόμενο δρομολογητή [12]. Ο πίνακας αυτός ανανεώνεται περιοδικά και προσαρμόζεται στις μεταβολές του δικτύου. Έτσι όταν καταφθάνει ένα πακέτο, ο δρομολογητής αντιστοιχίζει τον παραλήπτη με την κατάλληλη εγγραφή του πίνακα δρομολόγησης και το προωθεί στον επόμενο δρομολογητή ή κατευθείαν στον προορισμό αν είναι ο τελευταίος δρομολογητής της διαδρομής. Για την δημιουργία και τη συντήρηση των πινάκων δρομολόγησης οι δρομολογητές χρησιμοποιούν πρωτόκολλα δυναμικής δρομολόγησης (dynamic routing protocols).

Τα πρωτόκολλα δυναμικής δρομολόγησης χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τα πρωτόκολλα Απόστασης – Διανύσματος (Distance – Vector) και τα πρωτόκολλα Κατάστασης Σύνδεσης (Link – State) [12, 25].

Στα Distance – Vector πρωτόκολλα κάθε δρομολογητής καταχωρεί στον δικό του πίνακα δρομολόγησης όλες τις γειτονικές συνδέσεις που μπορεί να κάνει, τον τελικό προορισμό με τον οποίο σχετίζεται κάθε γειτονική σύνδεση και το κόστος της κάθε σύνδεσης. Στη συνέχεια κάθε δρομολογητής επικοινωνεί περιοδικά με όλους τους γειτονικούς του δρομολογητές και του αποστέλλει τις πληροφορίες αυτές. Μόλις ληφθεί κάποια γειτονική σύνδεση σε έναν προορισμό με χαμηλότερο κόστος από τις ήδη καταχωρημένες στον πίνακα γίνεται αντικατάσταση. Για την αντικατάσταση των εγγραφών του πίνακα δρομολόγησης χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Bellman - Ford. Παραδείγματα Distance – Vector πρωτοκόλλων είναι το RIPv1 (Routing Information Protocol), το RIPv2 και το IGRP (Interior Gateway Routing Protocol) [3].

Στα Link – State πρωτόκολλα κάθε δρομολογητής έχει καταχωρημένο ολόκληρο τον χάρτη του δικτύου σε μορφή γράφου. Για να παραχθεί ο χάρτης αυτός, κάθε κόμβος στέλνει πληροφορίες στο δίκτυο αναφορικά με ποιους κόμβους μπορεί να



Εικόνα 1.2: Ο router στα 7 επίπεδα του μοντέλου αναφοράς OSI (2000, How staff works).

συνδεθεί. Οι πληροφορίες αυτές συλλέγονται από όλους τους υπόλοιπους κόμβους και δημιουργείται ο γράφος. Ο δρομολογητής χρησιμοποιεί τον χάρτη του δικτύου για να αποφασίσει ποια διαδρομή είναι η βέλτιστη για κάθε προορισμό χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Dijkstra. Παραδείγματα Link – State πρωτοκόλλων είναι το OSPF (Open Shortest Path First) και το IS - IS (Intermediate Systems to Intermediate Systems) [3, 11].

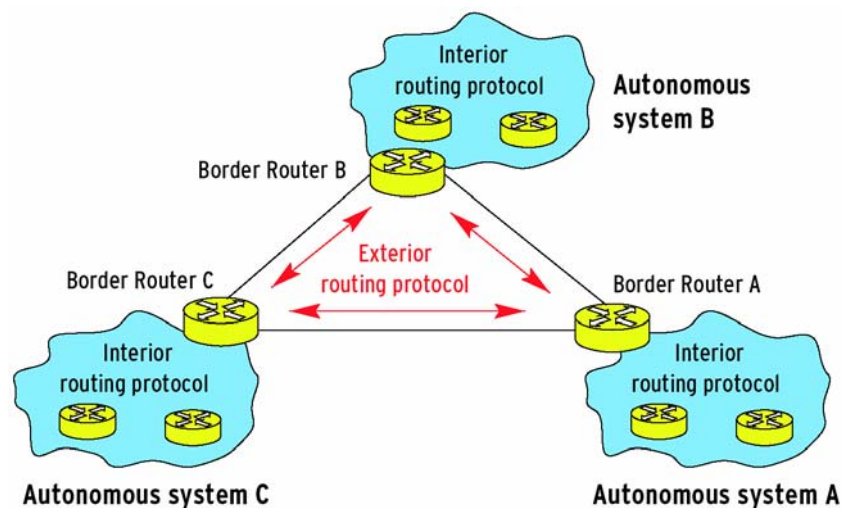
1.2 Αυτόνομα Συστήματα

Αυτόνομο σύστημα (Autonomous System - AS) είναι μια συλλογή δικτύων, ή πιο συγκεκριμένα το σύνολο των δρομολογητών που τα συνδέουν μεταξύ τους, τα οποία υπάγονται σε μια κοινή διαχειριστική αρχή και μοιράζονται την ίδια στρατηγική δρομολόγησης [2, 4, 24]. Διαχειριστική αρχή μπορεί να είναι μια εταιρία παροχής υπηρεσιών internet, ένα πανεπιστήμιο, ένας κρατικός οργανισμός κ.ά. Το internet είναι μια συλλογή από αυτόνομα συστήματα (ΑΣ) υπό τη μορφή παροχών υπηρεσιών και καλωδιακών δικτύων μεταφοράς τα οποία συνδέονται όλα μεταξύ τους χρησιμοποιώντας δρομολογητές και πρωτόκολλα δρομολόγησης. Σε κάθε ΑΣ ανατίθεται ένας μοναδικός ακέραιος αριθμός μήκους 16 bit που ονομάζεται αριθμός αυτόνομου συστήματος (Autonomous System Number - ASN) και ο οποίος αποτελεί την ταυτότητα του ΑΣ στο internet. Τα ASN όπως και οι IP διευθύνσεις διατίθενται από την IANA (Internet Assigned Numbers Authority).

Κάθε οργανισμός διαχειρίζεται το δικό του ΑΣ και εφαρμόζει μια συγκεκριμένη πολιτική για την δρομολόγηση των πακέτων στο εσωτερικό του συστήματος (internal routing) [2, 13]. Τα δημοφιλέστερα πρωτόκολλα εσωτερικής δρομολόγησης (Interior Routing Protocols - IGP) που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι το RIP και το OSPF. Το OSPF αυτή τη στιγμή θεωρείται ως το πιο σημαντικό για τα μεγάλα σε έκταση δίκτυα και για τα δίκτυα των ISPs, ενώ το RIP εξακολουθεί να είναι δημοφιλές στα μικρά ιδιωτικά δίκτυα [2].

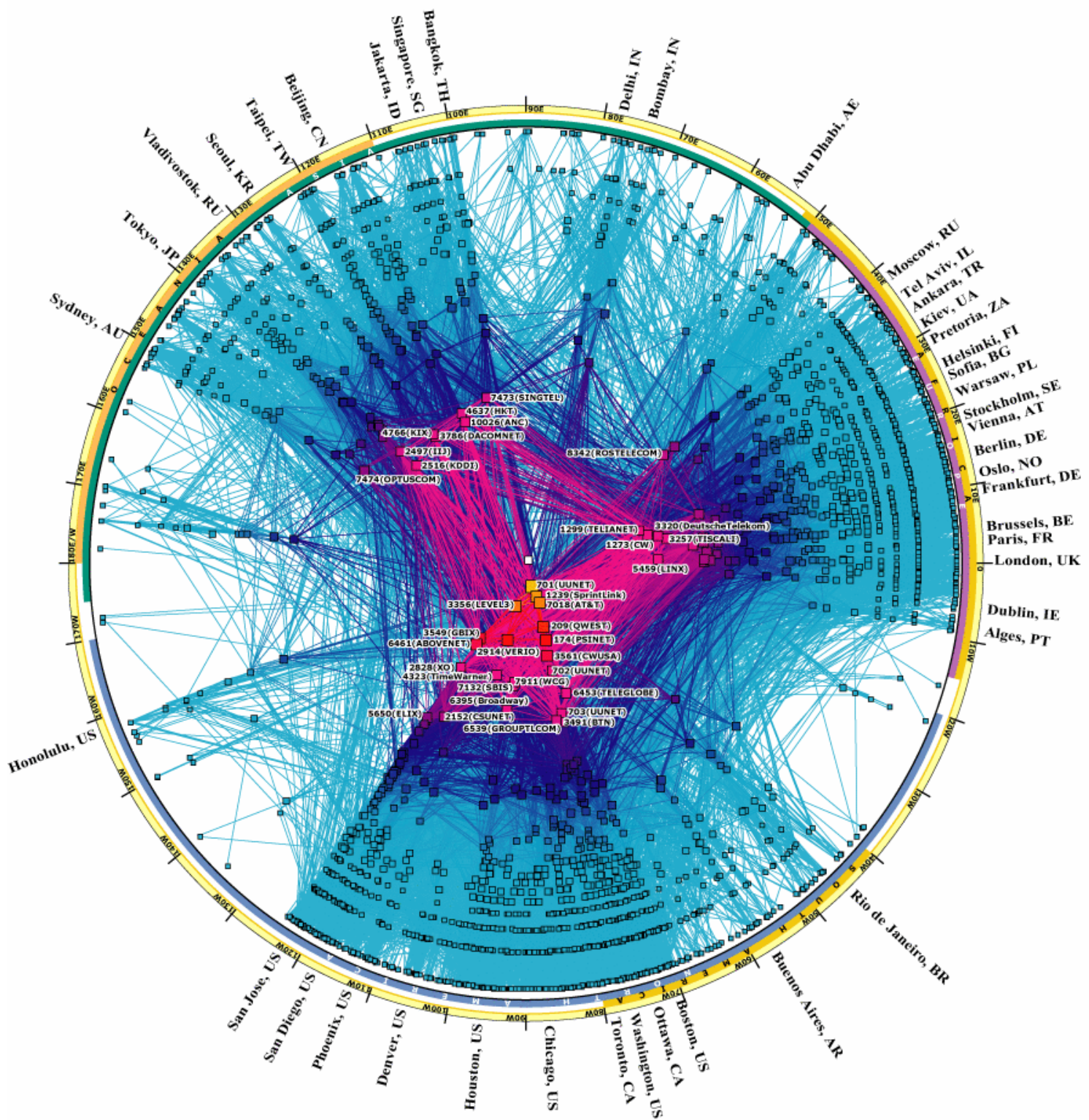
Σε κάθε ΑΣ, που επικοινωνεί με άλλα ΑΣ, υπάρχει τουλάχιστον ένας δρομολογητής ο οποίος αναλαμβάνει την δρομολόγηση των πακέτων που απευθύνονται ή έρχονται από τον «έξω κόσμο». Κάθε δρομολογητής ορίων (border router) πληροφορεί τους δρομολογητές ορίων των άλλων ΑΣ σχετικά με όλα τα εσωτερικά του δίκτυα

[10]. Έτσι κάθε ΑΣ είναι σε θέση να στείλει πακέτα δεδομένων σε ένα γειτονικό του. Η δρομολόγηση των πακέτων ανάμεσα σε ξεχωριστά ΑΣ ονομάζεται εξωτερική δρομολόγηση (exterior routing / interdomain routing) [2, 13]. Ένα πρωτόκολλο εξωτερικής δρομολόγησης (Exterior Routing Protocol - EGP) είναι υπεύθυνο για την ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης ανάμεσα στα ΑΣ. Κάθε ΑΣ πρέπει να παρουσιάσει ένα συνεπές εσωτερικό πλάνο διαδρομών και μια έγκυρη λίστα με τους προορισμούς που μπορεί να φθάσει ένα πακέτο εάν διαπεράσει το αυτόνομο σύστημα.



Εικόνα 1.3: Διασύνδεση αυτόνομων συστημάτων, εσωτερική – εξωτερική δρομολόγηση

Το πρώτο πρωτόκολλο εξωτερικής δρομολόγησης ήταν το EGP (Exterior Gateway Protocol) για τις συνδέσεις μεταξύ των πυλών διαφορετικών ΑΣ του ARPA-Internet [5]. Μετά από μια δεκαετία περίπου αναπτύχθηκε ένα νέο πρωτόκολλο για τη διασύνδεση των ΑΣ του Internet το οποίο στηρίχθηκε στην εμπειρία που αποκτήθηκε από τη χρήση του EGP στο δίκτυο κορμού του NSFNET [6] και ονομάστηκε BGP (Border Gateway Protocol). Το BGP αποτελεί σήμερα το *de facto* πρότυπο που «τρέχει» σε όλους τους δρομολογητές ορίων που συνδέουν ΑΣ με άλλα ΑΣ στο internet. Μόλις το BGP θεωρηθεί απαρχαιωμένο, είναι πιθανό να εφαρμοστεί το πρωτόκολλο IDRP (OSI Inter-Domain Routing Protocol) [4].



Εικόνα 1.4: Το internet και οι συνδέσεις μεταξύ των Αυτόνομων Συστημάτων του.

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας και στη συνέχεια ένας χάρτης με τα ενδιάμεσα αυτόνομα συστήματα που πρέπει να διασχίσει ένα μήνυμα ξεκινώντας από

έναν web server του Dallas (logbud.com) και έχοντας ως τελικό προορισμό το Πανεπιστήμιο Μακεδονίας (uom.gr).

#	AS num	Network name	Domain	IP	Time	Country	City	Organization
1	21844	NETBLK-THEPLANET-BLK-13	33.36.5546.static.theplanet.com	70.85.54.51	1.0ms	USA	Dallas	THEPLANET.COM INTERNET SERVICES
2	21844	THEPLANE725-160	vl2.dsr01.dllstx2.theplanet.com	12.96.160.41	0.5ms	USA	Dallas	THEPLANET.COM INTERNET SERVICES
3	21844	NETBLK-THEPLANET-BLK-13	vl21.dsr01.dllstx3.theplanet.com	70.85.127.65	0.9ms	USA	Dallas	THEPLANET.COM INTERNET SERVICES
4	21844	NETBLK-THEPLANET-BLK-13	et3-1.lbr04.dllstx3.theplanet.com	70.87.253.9	0.7ms	USA		
5	3356	LVL-ORG-4-8	tenge-3-1.car4.Dallas1.Level3.net	4.71.122.1	0.8ms	USA	Broomfield	Level 3 Communications
6	3356	LVL-ORG-4-8	ae-2-56.bbr2.Dallas1.Level3.net	4.68.122.161	1.5ms	USA	Broomfield	Level 3 Communications
7	3356	LVL-ORG-4-8	as-2-0.bbr2.Frankfurt1.Level3.net	4.68.128.169	122.3ms	USA	Broomfield	Level 3 Communications
8	3356	LVL-ORG-4-8	as-1-0.mp2.Milan1.Level3.net	4.68.128.186	132.4ms	USA	Broomfield	Level 3 Communications
9	3356	LVL-ORG-4-8	ge-1-1.car2.Milan1.Level3.net	4.68.125.254	132.6ms	USA	Broomfield	Level 3 Communications
10	3356	RIPE-213/MILAN-CUSTOMER-LINKS	DANTE.car2.Milan1.Level3.net	213.242.65.142	133.0ms	IT	Milan	Milan Customer Links
11	20965	RIPE-C3/GEANT		62.40.112.177	162.8ms			
12	20965	RIPE-C3/EU-DANTE-20010717	grnet-gw.rt1.ath.gr.geant2.net	62.40.124.90	162.1ms	GR	Filothei	(GRNET)
13	5408	RIPE-CBLK3/GRNET	larissa2-to-athens3.backbone.grnet.gr	195.251.27.33	165.4ms	GR	Filothei	(GRNET)
14	5408	RIPE-CBLK3/GRNET	thessaloniki2-to-larissa2.backbone.grnet.gr	195.251.27.58	168.1ms	GR	Filothei	(GRNET)
15	5408	RIPE-CBLK3/GRNET	clientRouter.uom.thessaloniki-2.access-link.grnet.gr	195.251.24.186	167.9ms	GR	Filothei	(GRNET)
16	12364	RIPE-CBLK3/UOM-NET		195.251.223.194	168.0ms			
17	12364	RIPE-CBLK3/UOM-NET	apollon.uom.gr	195.251.213.107	168.0ms	GR	Thessaloniki	University of Macedonia

Πίνακας 1.1: Δρομολόγηση μηνύματος από το logbud.com (Dallas) στο uom.gr (Θεσσαλονίκη)
(<http://www.logbud.com/>)



Εικόνα 1.5: Δρομολόγηση μηνύματος από το logbud.com (Dallas) στο uom.gr (Θεσσαλονίκη)
(<http://www.logbud.com/>)

2 Border Gateway Protocol - BGP

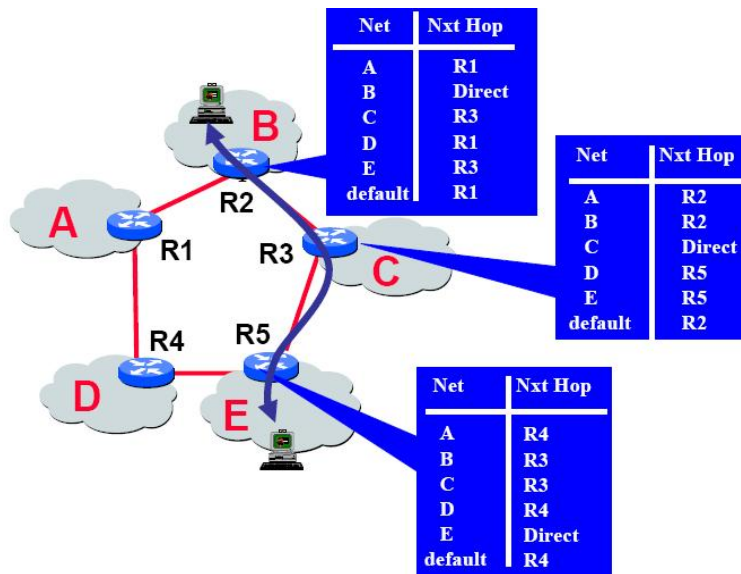
2.1 Εισαγωγή

Η πρώτη έκδοση του BGP εμφανίστηκε το 1989 με το RFC 1105, αντικαθιστώντας το πρωτόκολλο EGP (1984, RFC 904). Ακολούθησαν άλλες τρεις εκδόσεις, το BGP-2 (1990, RFC 1163), το BGP-3 (1991, RFC 1267) και το BGP-4 (1995, RFC 1771). Η 4^η έκδοση χρησιμοποιείται πλέον σχεδόν παντού, ενώ η εξέλιξη του πρωτοκόλλου συνεχίζεται [7] [8]. Από τον Ιανουάριο του 2006, το BGP-4 ορίζεται με το RFC 4271.

Όταν το BGP χρησιμοποιείται ως πρωτόκολλο εσωτερικής δρομολόγησης και εφαρμόζεται στο εσωτερικό ενός αυτόνομου συστήματος ονομάζεται IBGP (Interior Border Gateway Protocol) και οι δρομολογητές που το εκτελούν ονομάζονται δρομολογητές μεταγωγής (transit routers). Όταν εφαρμόζεται για τη δρομολόγηση πακέτων μεταξύ ξεχωριστών αυτόνομων συστημάτων ονομάζεται EBGP (Exterior Border Gateway Protocol) και οι δρομολογητές ονομάζονται δρομολογητές ορίων (border routers) [16].

2.2 Λειτουργία του BGP

Η βασική λειτουργία του BGP είναι η ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης ανάμεσα στους δρομολογητές ορίων των διαφορετικών ΑΣ. Ο κάθε δρομολογητής ενημερώνει τους γειτονικούς του δρομολογητές για το ποια δίκτυα - προορισμούς μπορεί να προσπελάσει καταδεικνύοντας όλα τα ενδιάμεσα ΑΣ. Ο δρομολογητής βασίζεται σε αυτές οι πληροφορίες για να δημιουργήσει έναν γράφο που αναπαριστά όλες τις συνδέσεις των ΑΣ αφαιρώντας τους βρόχους επανάληψης που ενδέχεται να εμφανιστούν [7]. Ο πίνακας δρομολόγησης που προκύπτει από την ανταλλαγή των πληροφοριών αυτών, ενημερώνεται περιοδικά και περιέχει IP διευθύνσεις δικτύων ή προθέματα IP διευθύνσεων που καταδεικνύουν τους διαθέσιμους προορισμούς των άλλων ΑΣ [3].



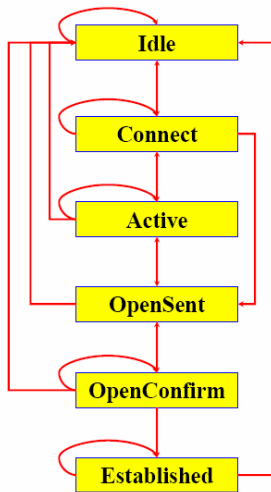
Εικόνα 2.1: Πίνακες δρομολόγησης

Το BGP είναι ένα path – vector πρωτόκολλο το οποίο προκειμένου να επιλέξει την καλύτερη διαδρομή βασίζεται σε διάφορους παράγοντες όπως στο μονοπάτι, στην πολιτική του δικτύου και στους εκάστοτε προκαθορισμένους κανόνες για τους οποίους θα γίνει αναφορά παρακάτω.

2.3 Ανταλλαγή Πληροφοριών Δρομολόγησης στο BGP

Το BGP χρησιμοποιεί το TCP ως πρωτόκολλο μεταφοράς και συγκεκριμένα την θύρα 179. Ανάμεσα σε δύο BGP δρομολογητές εγκαθίσταται μια TCP σύνδεση μέσω της οποίας ανταλλάσσονται προκαθορισμένα μηνύματα για την αποστολή πληροφοριών δρομολόγησης από τον ένα δρομολογητή στον άλλο. Οι δύο δρομολογητές ονομάζονται ομότιμοι δρομολογητές (peer routers) ή γειτονικοί (neighbors).

Αρχικά οι γειτονικοί δρομολογητές που μετέχουν σε μια σύνδεση, ανταλλάσσουν ολόκληρους τους πίνακες δρομολόγησης που έχουν. Στη συνέχεια για κάθε αλλαγή του πίνακα δρομολόγησης αποστέλλεται ενημερωτικό μήνυμα με την αλλαγή στον ομότιμο δρομολογητή (Update μήνυμα). Έτσι κάθε δρομολογητής είναι ενημερωμένος με τις τελευταίες μεταβολές του δικτύου [9]. Περιοδικά αποστέλλεται ένα ειδικό μήνυμα για τον έλεγχο της σύνδεσης που ονομάζεται keepalive. Παρακάτω ακολουθεί μια πιο αναλυτική περιγραφή μια συνόδου μεταξύ δύο BGP δρομολογητών.



Εικόνα 2.2: Οι φάσεις μιας BGP συνόδου ανάμεσα σε δύο δρομολογητές

Πριν την TCP σύνοδο οι δρομολογητές βρίσκονται στην κατάσταση Idle. Δημιουργείται ανάμεσα στους BGP γείτονες μια TCP σύνδεση στην θύρα 179. Αυτό εξασφαλίζει την αξιόπιστη επικοινωνία. Οι συνομιλούντες δρομολογητές στέλνουν μηνύματα Open ο ένας στον άλλον γνωστοποιώντας την ταυτότητα τους, ώστε να αρχικοποιηθούν και να επιβεβαιωθούν οι παράμετροι σύνδεσης και μεταβαίνουν στην κατάσταση OpenSend. Όταν κάποιος λάβει το Open μήνυμα μεταβαίνει στην κατάσταση OpenConfirm. Ακολουθεί επεξεργασία των περιεχομένων του Open μηνύματος και αν κάποιος από τους δύο διαφωνήσει στέλνει πίσω ένα Notification μήνυμα εξηγώντας τους λόγους και η σύνοδος

τερματίζεται (επιστροφή στην κατάσταση Idle). Αν αποδεχτεί τη σύνδεση στέλνει πίσω ένα KeepAlive μήνυμα και μεταβαίνει στην κατάσταση Established. Σε αυτή την κατάσταση η BGP σύνοδος χαρακτηρίζεται ως ανοικτή και οι δύο ομότιμοι μπορούν να ανταλλάσσουν μηνύματα Update, KeepAlive και Notification. Αν ένα λάθος συμβεί ενώ η σύνοδος είναι ανοικτή ο δρομολογητής στέλνει ένα Notification μήνυμα διευκρινίζοντας το λάθος και τερματίζει την TCP σύνδεση και μεταβαίνει στην Idle κατάσταση. Το ίδιο θα συμβεί αν διακοπεί η φυσική σύνδεση οπότε τα KeepAlive μηνύματα ή/και η TCP σύνοδος θα εκπνεύσουν. Σε αυτή την κατάσταση ο δρομολογητής σταματά να χρησιμοποιεί όλη την πληροφορία δρομολόγησης που έμαθε από τον ομότιμο του [8].

Η ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης είναι μια διαδικασία η οποία γίνεται συνεχώς ανάμεσα σε ομότιμους δρομολογητές (peer routers). Σαν αποτέλεσμα έχει τη συνεχή ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης σε κάθε δρομολογητή ξεχωριστά. Ο δρομολογητής έχει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για κάθε προορισμό μέσα στον πίνακα δρομολόγησης και έτσι είναι σε θέση να αποφασίσει που θα προωθήσει ένα μήνυμα.

```
BGP table version is 117, local router ID is 203.250.13.41
Status codes: s suppressed, d damped, h history, * valid, > best,
i -internal Origin codes: i - IGP, e - EGP, ? - incomplete
```

Network	Next Hop	Metric	LocPrf	Weight	Path
*> 128.213.0.0	128.213.63.2	0		0	200 i
*>i192.208.10.0	192.208.10.5	0	100	0	300 i
*>i195.211.10.0	192.208.10.5		100	0	300 500 i
*	128.213.63.2			0	200 400 500 i
*> 200.200.10.0	128.213.63.2			0	200 400 i
*> 203.250.13.0	0.0.0.0	0		32768	i
*> 203.250.14.0	0.0.0.0	0		32768	i
*>i203.250.15.0	203.250.15.2	0	100	0	i

Εικόνα 2.3: Ο πίνακας δρομολόγησης ενός BGP δρομολογητή

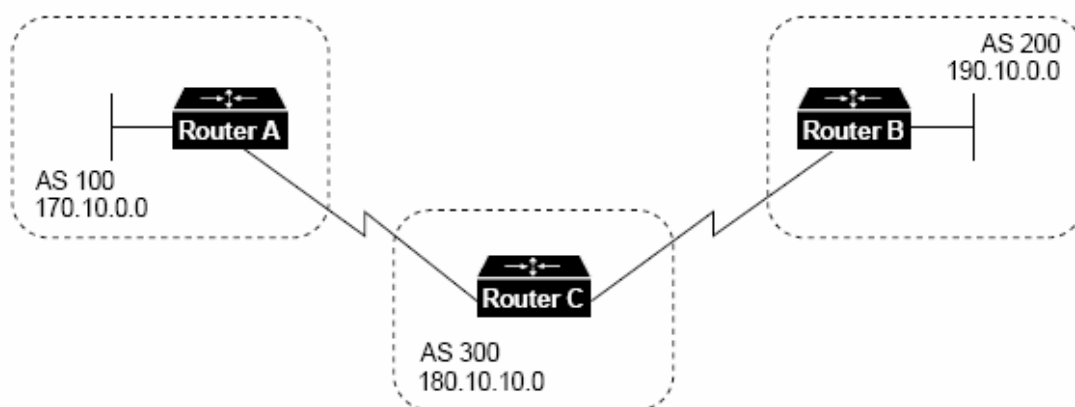
2.4 Λήψη αποφάσεων στο BGP

Όταν ένας BGP δρομολογητής λάβει update μηνύματα από διαφορετικά αυτόνομα συστήματα και τα μηνύματα αυτά περιγράφουν εναλλακτικές διαδρομές προς τον ίδιο προορισμό πρέπει να επιλέξει το μήνυμα που περιέχει την βέλτιστη διαδρομή και να απορρίψει όλα τα υπόλοιπα. Αφού το επιλέξει, αναμεταδίδει το ίδιο μήνυμα σε όλους τους γειτονικούς δρομολογητές. Η απόφαση αυτή βασίζεται στην τιμή που έχουν κάποια χαρακτηριστικά του update μηνύματος καθώς επίσης και στις διάφορες τοπικές BGP ρυθμίσεις. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων του BGP είναι τα εξής [13, 16, 26]:

- Μονοπάτι ΑΣ (AS Path)
- Προέλευση (Origin)
- Επόμενος Κόμβος (Next Hop)
- Τοπική Προτίμηση (Local Preference)
- Διευκρινιστής πολλαπλής εξόδου (Multi-Exit Discriminator)
- Κοινότητα (Community)

2.4.1 Μονοπάτι ΑΣ (AS Path)

Όταν ένα update μήνυμα διαπερνά ένα ΑΣ, το BGP προσθέτει AS path χαρακτηριστικό του μηνύματος τον αριθμό του ΑΣ. Το AS Path είναι η λίστα από τους αριθμούς των ΑΣ που διαπέρασε ένα update μήνυμα έως ότου φτάσει στον προορισμό του. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε το παρακάτω δίκτυο.



Εικόνα 2.4: Μονοπάτι αυτόνομων συστημάτων

Ο δρομολογητής B στέλνει ένα update μήνυμα στον γειτονικό του δρομολογητή Γ περιλαμβάνοντας ως προορισμό το δίκτυο 190.10.0.0 και ως μονοπάτι προς τον προορισμό, το AS 100. Ο δρομολογητής Γ θα λάβει το μήνυμα και θα ενημερώσει τον πίνακα δρομολόγησης του. Στη συνέχεια θα προσθέσει στο μονοπάτι του μηνύματος το AS 300 και θα προωθήσει το update μήνυμα στους γειτονικούς του δρομολογητές A και B. Ο B θα απορρίψει το update μήνυμα, αφού αντιληφθεί ότι πρόκειται για ένα μήνυμα που ξεκίνησε από τον ίδιο, για να αποφύγει τη δημιουργία ενός ατέρμονα βρόχου. Ο A θα λάβει το update μήνυμα και θα ενημερώσει τον πίνακα δρομολόγησης του. Τελικά, για τον δρομολογητή A ο προορισμός 190.10.0.0 έχει ως AS path χαρακτηριστικό το 300,200 ενώ αντίστοιχα για τον δρομολογητή B ο προορισμός 170.10.0.0 χαρακτηρίζεται από το AS path 300,100

2.4.2 Προέλευση (Origin)

Το χαρακτηριστικό προέλευση παρέχει πληροφόρηση για την προέλευση του προορισμού. Αν το μήνυμα ξεκίνησε από το ΑΣ 100 και περιέχει έναν προορισμό που βρίσκεται μέσα στο ΑΣ 100 τότε το χαρακτηριστικό προέλευση έχει την τιμή IGP. Αν το μήνυμα περιέχει έναν προορισμό που προήλθε από το πρωτόκολλο EGP, τότε έχει την τιμή EGP. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις το χαρακτηριστικό προέλευση παραμένει μη συμπληρωμένο.

2.4.3 Επόμενος Κόμβος (Next Hop)

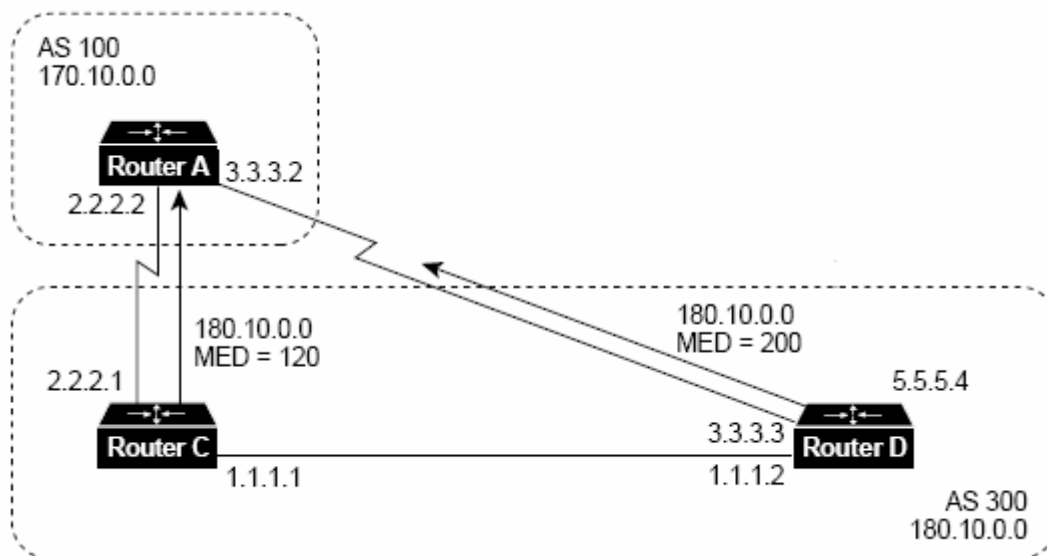
Το χαρακτηριστικό επόμενος κόμβος είναι η IP διεύθυνση του αμέσως επόμενου κόμβου του μονοπατιού προς τον τελικό προορισμό. Για το EBGP το χαρακτηριστικό επόμενος κόμβος περιέχει συνήθως την IP διεύθυνση ενός γειτονικού δρομολογητή.

2.4.4 Τοπική Προτίμηση (Local Preference)

Όταν υπάρχουν πολλοί γειτονικοί δρομολογητές τότε είναι συχνό το φαινόμενο να παρουσιάζονται update μηνύματα που περιέχουν εναλλακτικά μονοπάτια προς τον ίδιο προορισμό. Ο δείκτης τοπικής προτίμησης μπορεί να οριστεί για κάθε γειτονικό δρομολογητή ξεχωριστά και να καταδεικνύει το μονοπάτι που θα επιλεγεί. Επιλέγεται το μονοπάτι που προήλθε από τον γειτονικό δρομολογητή με την μεγαλύτερη τιμή τοπικής προτίμησης. Η εξ ορισμού τιμή είναι το 100.

2.4.5 Διευκρινιστής πολλαπλής εξόδου (Multi-Exit Discriminator - MED)

Το χαρακτηριστικό αυτό είναι μια ένδειξη που παρέχει ένας δρομολογητής ενός ΑΣ προς τους γειτονικούς δρομολογητές για την προτιμώμενη είσοδο στο ΑΣ όταν υπάρχουν πάνω από μια. Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει το παρακάτω δίκτυο.



Εικόνα 2.5: Το χαρακτηριστικό MED στους δρομολογητές των αυτόνομων συστημάτων

Ο δρομολογητής A λαμβάνει update μηνύματα για τον προορισμό 180.10.0.0 από τον C και τον D. Ο δρομολογητής A θα επιλέξει τον δρομολογητή C ως το καλύτερο μονοπάτι για τον προορισμό 180.10.0.0 γιατί ο τελευταίος έχει μικρότερη τιμή MED.

2.4.6 Κοινότητα (Community)

Το χαρακτηριστικό αυτό χρησιμοποιείται για την δημιουργία ομάδων προορισμών (κοινότητες) για τις οποίες μπορούν να καθοριστούν προτιμήσεις δρομολόγησης όπως είναι η αποδοχή, η προτίμηση από άλλες ομάδες ή η μετατροπή σε άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Μερικές από τις προκαθορισμένες κοινότητες είναι οι εξής:

- **no-export** : απαγορεύεται η ενημέρωση των EBGP γειτονικών δρομολογητών για τον προορισμό
- **no-advertise**: απαγορεύεται η ενημέρωση όλων των γειτονικών δρομολογητών για τον προορισμό
- **internet**: ενημερώνονται όλοι οι δρομολογητές για αυτόν τον προορισμό

2.5 Σύνοψη της διαδικασίας για την επιλογή του βέλτιστου μονοπατιού

Το BGP επιλέγει μόνο ένα μονοπάτι ως το καλύτερο δυνατό. Μόλις αυτό επιλεγεί προστίθεται στον πίνακα δρομολόγησης και προωθείται με update μήνυμα σε όλους τους γειτονικούς δρομολογητές. Η διαδικασία επιλογής του βέλτιστου μονοπατιού προς έναν προορισμό περιγράφεται αποτελείται από τα παρακάτω βήματα [16]:

1. Αν το μονοπάτι περιέχει έναν επόμενο κόμβο ο οποίος δεν είναι προσπελάσιμος τότε ολόκληρο το update μήνυμα απορρίπτεται
2. Προτιμάται το μονοπάτι με τον μεγαλύτερο δείκτη τοπικής προτίμησης
3. Αν ο δείκτης τοπικής προτίμησης είναι ο ίδιος, προτιμάται το μονοπάτι με το συντομότερο AS path
4. Αν όλα τα AS path έχουν το ίδιο μήκος, προτιμάται το μονοπάτι με τον μικρότερο τύπο προέλευσης (όπου ισχύει IGP < EGP < Μη συμπληρωμένος)
5. Αν ο τύπος προέλευσης είναι ο ίδιος, προτιμάται το μονοπάτι με το χαμηλότερο MED
6. Αν όλα τα εναλλακτικά μονοπάτια έχουν την ίδια τιμή MED, προτιμάται το εξωτερικό μονοπάτι έναντι του εσωτερικού
7. Αν τα εναλλακτικά μονοπάτια εξακολουθούν να είναι ίδια, προτιμάται το μονοπάτι που περνά μέσω του κοντινότερου εσωτερικού (IGP) γειτονικού δρομολογητή
8. Προτιμάται το μονοπάτι με την χαμηλότερη IP διεύθυνση

2.6 CIDR (Classless Inter-Domain Routing)

Στην εποχή του ARPANET υπήρχαν λίγα δίκτυα τα οποία ήταν αρκετά μεγάλα και η IP διεύθυνση των 32 bit χωριζόταν ως εξής: τα 8 πρώτα bit ήταν η διεύθυνση του δικτύου και τα υπόλοιπα 24 bit ήταν οι υπολογιστές του δικτύου. Αυτή η χρήση της IP διεύθυνσης είχε ως αποτέλεσμα να υπάρχουν 256 διαθέσιμες διευθύνσεις δικτύων οι οποίες ήταν εμφανές ότι δεν θα επαρκούσαν από τη στιγμή που τα πρώτα LAN έκαναν την εμφάνισή τους. Ως λύση ανάγκης οι IP διευθύνσεις προσαρμόστηκαν έτσι ώστε να επιτρέπουν την επιλογή από τρία διαφορετικά μεγέθη για την διεύθυνση του δικτύου όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα [3].

Κλάση	Αρχικά bit	Bits Διεύθυνσης Δικτύου	Υπόλοιπα Bits
Class A	0	7	24
Class B	10	14	16
Class C	110	21	8
Class D (multicast)	1110		
Class E (reserved)	1111		

Πίνακας 1.1: Κλάσεις δικτύων και χρήση των 32 bit της IP διεύθυνσης

Οι κλάσεις δικτύων (Classful networks) όπως ονομάστηκαν είχαν ως αποτέλεσμα τους διαθέσιμους αριθμούς δικτύων και υπολογιστών που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Class	Leading Value	Network Numbers	Addresses Per Network
Class A	0	126	16,777,216
Class B	10	16,384	65,534
Class C	110	2,097,152	254

Πίνακας 2.2: Διαθεσιμότητα σε διευθύνσεις δικτύων και υπολογιστών στις τρεις κλάσεις

Παρόλο που οι κλάσεις δικτύων έλυσαν αρχικά το πρόβλημα, με την πάροδο του χρόνου εμφανίστηκε εκ νέου το πρόβλημα έλλειψης IP διευθύνσεων. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις δικτύων είχαν πάνω από 254 υπολογιστές και έπρεπε να χρησιμοποιήσουν κλάση B. Με την ταχύτατη ανάπτυξη του Internet οι περίπου 16.000 κλάσεις B ήταν εμφανές ότι δεν θα επαρκούσαν.

Για να λυθεί το πρόβλημα, η δικτύωση με κλάσεις αντικαταστάθηκε από το CIDR το 1993 και είναι η τελευταία βελτίωση στον τρόπο που ερμηνεύονται οι IP διευθύνσεις. Η IP διεύθυνση εξακολουθεί να χωρίζεται σε δύο μέρη, το πρώτο για την δήλωση της ομάδας των διευθύνσεων και το δεύτερο για την διεύθυνση του κάθε μέλους. Ο χωρισμός αυτός γίνεται με την δημιουργία των CIDR blocks. Ένα CIDR block αναπαρίσταται χρησιμοποιώντας την γνωστή δεκαδική μορφή των IP διευθύνσεων, μια κάθετο και έναν αριθμό από το 0 έως το 32 ο οποίος αναπαριστά των αριθμό των bit που είναι κοινά για μια ομάδα διευθύνσεων και καθορίζουν την διεύθυνση της ομάδας ή αλλιώς του δικτύου. Ουσιαστικά είναι το ίδιο με την δημιουργία 32 κλάσεων.

Για παράδειγμα μπορούμε να υποθέσουμε το CIDR block 10.10.1.37 / 27. Αυτό άμεσα σημαίνει ότι ομαδοποιούνται όλες οι IP διευθύνσεις που έχουν τα 27 αρχικά τους bit ίδια με τα 27 αρχικά bit της διεύθυνσης 10.10.1.37. Επίσης σημαίνει ότι αυτή η ομάδα μπορεί να περιέχει μέχρι 2^5 , δηλαδή μέχρι 32 διαφορετικές διευθύνσεις, επειδή από τα 32 bit αφαιρώντας τα 27 που είναι κοινά, υπολείπονται 5 bit για να καθορίσουν την τελική διεύθυνση του μέλους της ομάδας. Στην πραγματικότητα μπορεί

να περιέχει μέχρι 30 καθώς η πρώτη διαθέσιμη διεύθυνση χρησιμοποιείται συνήθως για το δίκτυο και η τελευταία για broadcasting.

Μια από τις σημαντικότερες αλλαγές που έγιναν στην 4^η έκδοση του BGP είναι η προσθήκη ενός συνόλου από διαδικασίες για την υποστήριξη και αξιοποίηση του CIDR. Στις προηγούμενες εκδόσεις του BGP υπήρχε η αντιμετώπιση των δικτυακών κλάσεων για τις IP διευθύνσεις – προορισμούς. Στην 4^η έκδοση υποστηρίζεται η προώθηση update μηνυμάτων που το κάθε ένα περιέχει μια ομάδα από προορισμούς ως ένα πρόθεμα IP (CIDR block). Έτσι χρειάζεται μόνο μία καταχώρηση στον πίνακα [3, 9].

2.7 Κριτική του BGP

Η υψηλή πολυπλοκότητα που παρατηρείται στη δρομολόγηση των μηνυμάτων στο Internet πηγάζει κυρίως από την ανάγκη που υπάρχει να γίνουν αποδεκτές και να αφομοιωθούν ολοένα και περισσότερες πολιτικές δρομολόγησης από κάθε ένα ΑΣ που ενσωματώνεται στο δίκτυο. Παρά την εντυπωσιακή πρόοδο που έχει επιτευχθεί από την 1^η έκδοση του BGP έως σήμερα σχετικά με την κάλυψη των ελλείψεων και των αδυναμιών του, υπάρχουν ακόμα αρκετά προβλήματα που παραμένουν άλυτα.

Η χαοτική φύση του Internet απαιτεί ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που αλγοριθμικά θα πρέπει να είναι άρτιο και αυστηρό. Παράλληλα πρέπει να είναι σε θέση να καλύψει τις υψηλές απαιτήσεις σε ευελιξία σχετικά με τις πολιτικές δρομολόγησης οι οποίες διαφέρουν κατά πολύ από ΑΣ σε ΑΣ. Οι δύο αυτοί παράγοντες είναι δύσκολο να συνδυαστούν καθώς σαν έννοιες είναι αντικρουόμενες. Το BGP απέναντι σε αυτήν την πρόκληση έχει μια απόλυτη θέση σύμφωνα με την οποία κάθε πολιτική δρομολόγησης παραμένει ιδιωτική και ασκείται τοπικά στον δρομολογητή που έχει εγκατασταθεί [15]. Τα update μηνύματα προς τους γειτονικούς δρομολογητές δεν προωθούν την πολιτική δρομολόγησης παρά μόνο το μονοπάτι προς τον προορισμό. Η IRTF (Routing Research Group) οργάνωσε δύο ερευνητικές ομάδες που είχαν ως στόχο τον καθορισμό των απαιτήσεων ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης επόμενης γενιάς για το Internet [14]. Από την συνολική καταγραφή των απαιτήσεων αυτών οι

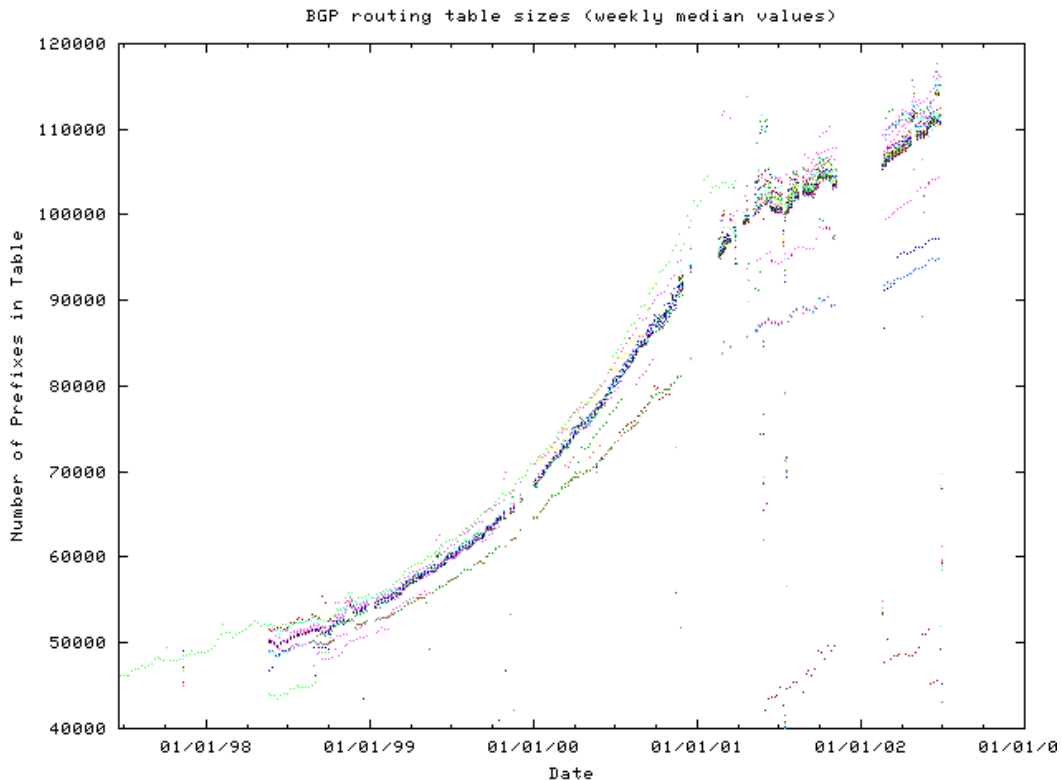
σημαντικότερες περιγράφονται παρακάτω. Παράλληλα περιγράφεται και η αδυναμία του BGP να τις καλύψει.

2.7.1 Πολιτικές δρομολόγησης (Policy)

Η πολυπλοκότητα της δρομολόγησης στο Internet καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν οι διάφορες πολιτικές δρομολόγησης και έτσι αυξάνονται οι πιθανότητες της εξάπλωσης των επί μέρους προβληματικών ρυθμίσεων. Η αλληλεξάρτηση των πολιτικών δρομολόγησης ανάμεσα σε διαφορετικά ΑΣ μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα όπως μόνιμες ακυρώσεις και επανεντάξεις εγγραφών δρομολόγησης (route oscillations). Λόγω του ότι η επιλογή του μονοπατιού βασίζεται στις τοπικές προτιμήσεις των ΑΣ αντί να βασίζεται στο μήκος του μονοπατιού, υπάρχει η πιθανότητα ένας συνδυασμός προτιμήσεων μιας ομάδας από ΑΣ να οδηγήσει σε συνεχές route oscillation που δεν σταματά ποτέ. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται λόγω του ότι δεν υπάρχει κανένα πιθανό μονοπάτι για το οποίο τουλάχιστον ένα ΑΣ δεν διαθέτει ένα καλύτερο μονοπάτι. Έτσι κάθε ΑΣ επιλέγει το καλύτερο και αυτή η εναλλαγή δημιουργεί ένα διαφορετικό μονοπάτι που είναι μη σταθερό [14, 15, 17, 20, 22, 23, 27].

2.7.2 Κλιμάκωση (Scalability)

Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για το Internet θα πρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα στη συνεχή ανάπτυξη και επέκταση του δικτύου[22]. Το BGP με την πάροδο του χρόνου δείχνει σημάδια κορεσμού καθώς ο αριθμός των update μηνυμάτων που λαμβάνει ένας δρομολογητής αυξάνει γραμμικά όσο αυξάνεται το μέγεθος του Internet [23]. Από το 1997 ένας πίνακας δρομολόγησης έχει αυξηθεί από τα 3.000 στα 17.000 ΑΣ και από τις 50.000 IP διευθύνσεις στις 200.000, παρόλο που έχει μεσολαβήσει η ενσωμάτωση του CIDR το οποίο δίνει τη δυνατότητα της ομαδοποίησης των IP διευθύνσεων που ανήκουν στο ίδιο υπερδίκτυο [15].



Εικόνα 2.6: Τα μεγέθη των πινάκων δρομολόγησης του BGP από το 1998 έως το 2003
 (<http://www.routeviews.org/dynamics/>)

2.7.3 Χρόνος Σύγκλισης (Convergence Time)

Προκειμένου να παρέχουν αξιόπιστη προσβασιμότητα, οι δρομολογητές του Internet πρέπει να είναι σχετικά σταθεροί και όταν μια αλλαγή πραγματοποιείται σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου θα πρέπει πολύ γρήγορα να την αντιλαμβάνονται και να προσαρμόζονται στη νέα κατάσταση. Όταν ένα μονοπάτι προς ένα προορισμό πάψει να υφίσταται για οποιοδήποτε λόγο πρέπει ο δρομολογητής να το αφαιρέσει από τον πίνακα δρομολόγησης και να βρει ένα εναλλακτικό μονοπάτι προς τον προορισμό αυτό. Ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή της ακύρωσης μέχρι τη στιγμή που θα είναι διαθέσιμο το εναλλακτικό μονοπάτι ονομάζεται χρόνος σύγκλισης. Το BGP είναι γνωστό για τις σημαντικές αστάθειες στην δρομολόγηση των πακέτων και για τους μεγάλους χρόνους σύγκλισης που παρουσιάζει λόγω της διαδικασίας εκμάθησης του μονοπατιού η οποία είναι περισσότερο μηχανική παρά ευφυής. Περίπου το 25% των IP προορισμών ενός πίνακα δρομολόγησης ακυρώνονται και επανακαταχω-

ρούνται συνεχώς (route flapping). Οι περισσότερες από τις διευθύνσεις αυτές προκαλούν τεράστιους χρόνους σύγκλισης στον δρομολογητή που μπορεί να φτάσουν και τις μερικές ώρες. Το υπόλοιπο 75% των σχετικά σταθερών καταχωρήσεων δρομολόγησης συνήθως προκαλούν χρόνο σύγκλισης από 2 έως 5 λεπτά [14, 15, 22].

2.7.4 Απομόνωση (Isolation)

Το διαδίκτυο έχει την ιδιαιτερότητα ότι όταν παρουσιαστεί ένα πρόβλημα σε ένα συγκεκριμένο σημείο υπάρχει γενικότερη επίδραση σε όλο το δίκτυο. Με αυτό το δεδομένο είναι σίγουρο ότι κανένας σχεδιασμός δε θα μπορούσε να παράγει ένα τέλειο πρωτόκολλο δρομολόγησης. Το BGP παρουσιάζει έντονη αδυναμία σχετικά με την απομόνωση των προβληματικών σημείων του Internet. Μια απλή ανάλυση του Routeviews BGP data [29] δείχνει ότι σχεδόν το 20% των συμβάντων του πρωτοκόλλου γίνεται αντιληπτό από όλους τους δρομολογητές και επίσης ότι πολλά από τα μηνύματα ενημέρωσης που δέχεται ένας δρομολογητής είναι σε μεγάλο βαθμό αποτελέσματα συμβάντων που εκτελούνται πολύ μακριά από τον δρομολογητή [14].

2.8 Λογισμικό για το BGP

Το BGP4 είναι το πρωτόκολλο δρομολόγησης που διαχειρίζεται την κυκλοφορία των πληροφοριών στο Internet. Συνεπώς είναι λογικό να υπάρχουν πολλά βοηθητικά προγράμματα και εργαλεία όπως επίσης και διάφορες υλοποιήσεις του BGP. Το κεφάλαιο αυτό θα επικεντρωθεί στο λογισμικό ανοικτού κώδικα ή ελεύθερης άδειας χρήσης και σε διάφορα βοηθητικά εργαλεία που έχουν τη βάση τους στο διαδίκτυο και εκτελούνται από εκεί.

2.8.1 Εργαλεία στο διαδίκτυο

BGP-Inspect

Merit Networks / Univ. of Maryland

<http://bgpinspect.merit.edu/>

Το BGP-Inspect είναι ένα εργαλείο έρευνας των update μηνυμάτων του BGP. Ο στόχος του είναι να προσφέρει εύκολα πρόσβαση σε μαζικές ποσότητες δεδομένων δρομολόγησης σε διαχειριστές δικτύων αλλά και στην ερευνητική κοινότητα. Επιτρέπει την αναζήτηση και ανάκτηση των update μηνυμάτων αλλά και στατιστικά στοιχεία και αναλύσεις των δεδομένων που βοηθούν στον εντοπισμό και στην αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων.

BGP Monitor

Massachusetts Institute of Technology

<http://bgp.lcs.mit.edu/>

Το BGP Monitor επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύων και στους ερευνητές να παρατηρούν την κίνηση και το ιστορικό των ενημερώσεων του BGP με σκοπό την εξερεύνηση αποτυχιών και λαθών του δικτύου. Παίρνει δεδομένα από τον BGP δρομολογητή ορίων του MIT και υποστηρίζει online ερωτήματα(queries) αλλά και ερωτήματα στο ιστορικό των δεδομένων τα οποία αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων ανά 30 λεπτά.

Web-based BGP Tools

Netconfigs.com

<http://www.netconfigs.com/>

Ένα σύνολο χρήσιμων εργαλείων για πολλές λειτουργίες

Network Explorer (NETEXP)

Network Examiner and Range Disassembler (NERD)

RobTex

<http://www.robtext.com/netexp/>

<http://www.robtext.com/nerd/>

Εργαλεία γενικού ενδιαφέροντος σχετικά με το Internet

2.8.2 Λογισμικό ανοικτού κώδικα

BGP++ Simulation Tool

Maniacs Research Group at Georgia Tech

<http://www.ece.gatech.edu/research/labs/MANIACS/BGP++/>

Το BGP++ είναι μια C++ υλοποίηση του BGP για τον εξομοιωτή δικτύων ns-2. Δεν έχει υλοποιηθεί από την αρχή αλλά βασίζεται στο ήδη υπάρχον λογισμικό ανοικτού κώδικα Zebra bgpd το οποίο απλώς τροποποιήθηκε για να ενσωματωθεί στον ns-2. Το Zebra αποτελεί υλοποίηση του BGP και άλλων πρωτοκόλλων δρομολόγησης για UNIX πλατφόρμες.

bgpd.pl

Steven Hessing

<http://bgpd.sourceforge.net/>

Το bgpd.pl είναι ένα script γραμμένο σε perl το οποίο παρακολουθεί όλη την εισερχόμενη κίνηση των update μηνυμάτων ενός BGP δρομολογητή και προσφέρει πολλά στατιστικά στοιχεία.

BGPlay

Roma Tre University

<http://www.ris.ripe.net/bgplay/>

Το BGPPlay είναι μια Java εφαρμογή που αναπαριστά την δραστηριότητα της δρομολόγησης ενός συγκεκριμένου προορισμού με κινούμενα γραφικά. Λόγω της γραφικής αναπαράστασης γίνεται πολύ πιο εύκολα κατανοητό το πως οι ενημερώσεις BGP επηρεάζουν την δρομολόγηση προς έναν προορισμό.

bgptools

M.I.T. Laboratory for Computer Science
<http://nms.lcs.mit.edu/software/bgp/bgptools/>

Εργαλεία που ως κύριο στόχο έχουν την ανάλυση των update μηνυμάτων είτε μέσα από τα log files των δρομολογητών είτε μέσω real-time καταγραφής των δεδομένων. Παρέχουν ένα API για την εύκολη και γρήγορη ανάπτυξη αναλύσεων στα BGP δεδομένα.

BGPView

Kuniaki Kondo, Internet Initiative Japan Inc., Intec NetCore, Inc
<http://www.bugest.net/software/bgpview/index-e.html>

Το BGPView εγκαθιστά μια σύνδεση σε έναν δρομολογητή και εμφανίζει λεπτομέρειες και στατιστικά για τα εισερχόμενα μηνύματα.

BIRD Internet Routing Daemon

RNDr. Libor Forst, Martin Mare, Pavel Machek, Ondrej Filip
<http://bird.network.cz/>

Το project BIRD έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και δυναμικού IP λογισμικού δρομολόγησης ανοικτού κώδικα, αρχικά σχεδιασμένο για UNIX πλατφόρμες. Υποστηρίζει IPv4, IPv6, πολλαπλούς πίνακες δρομολόγησης, BGP, RIP, OSPF, command-line interface, ειδική γλώσσα για την ρύθμιση των περιορισμών και των φίλτρων της δρομολόγησης κ.ά.

MRLG4PHP - Multi-Router Looking Glass (PHP version)

Denis Ovsienko

<http://freshmeat.net/projects/mrlg4php/>

Πολύ - εργαλείο γραμμένο σε PHP και βασισμένο στο MRLG (Multi-Router Looking Glass -perl Source Code- by John Fraizer). Επιτρέπει σε διαχειριστές δικτύων να εκτελούν εντολές σε διάφορους δρομολογητές μέσω ενός εύχρηστου web interface. Είναι ευέλικτο, σταθερό και παραμετροποιήσιμο.

C-BGP

University of Louvain-la-Neuve

<http://cbgp.info.ucl.ac.be/>

Το C-BGP είναι ένας εξομοιωτής της διαδικασίας λήψης αποφάσεων του BGP. Ρυθμίζεται ακριβώς όπως ένας CISCO BGP δρομολογητής και προσφέρεται για αλλαγές πειραματισμού στην διαδικασία αποφάσεων και στα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου. Λόγω της άριστης αποδοτικότητας του μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξομοίωση πολύ μεγάλων τοπολογιών όπως είναι το Internet. Είναι γραμμένο σε γλώσσα C και προορίζεται για UNIX based πλατφόρμες.

Flamingo: Visualizing Internet Traffic

Merit Network, Inc.

<http://flamingo.merit.edu/>

Αποτελεί ένα μοναδικό εργαλείο που δίνει τη δυνατότητα της real-time εξερεύνησης των δεδομένων που διακινούνται στο Internet. Εκτός από τις τρισδιάστατες αναπαραστάσεις δεδομένων προσφέρει και τον απαραίτητο έλεγχο στον χρήστη για να μπορεί να παραμετροποιεί και να φιλτράρει οποιαδήποτε εικονική αναπαράσταση. Αποτελείται από δύο μέρη: Το πρόγραμμα εξυπηρετητή(server) και τον πελάτη(client). Ο server συλλέγει ποσότητες δεδομένων από διάφορους δρομολογητές τις οποίες επεξεργάζεται και ακολούθως τις αποστέλλει στο client πρόγραμμα το οποίο

αναλαμβάνει την εικονική αναπαράσταση. Παρέχει πολλές δυνατότητες, μεγάλη ποικιλία λειτουργιών και αυξημένη ευελιξία. Προορίζεται για Linux πλατφόρμες.

OpenBGPD

OpenBSD Project

<http://www.openbgpd.org/>

Το OpenBGPD είναι μια ελεύθερη υλοποίηση του BGP4. Μετατρέπει έναν συνηθισμένο υπολογιστή σε ολοκληρωμένο BGP δρομολογητή. Η ανάπτυξη του ξεκίνησε λόγω της δυσaráσκειας από τις υπόλοιπες υλοποιήσεις και σήμερα βρίσκεται εγκατεστημένο σε πολλά αυτόνομα συστήματα. Είναι γνωστό για την ευχρηστία του, την αξιοπιστία του και την υψηλή του απόδοση. Προορίζεται για OpenBSD λειτουργικά συστήματα.

MRTd

Merit Network Research Staff

<http://osx.freshmeat.net/projects/mrtd/>

Πλήρες πακέτο δρομολόγησης και βοηθητικών εργαλείων. Υποστηρίζει σχεδόν όλα τα συνηθισμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης, υποστηρίζει το set εντολών της CISCO και μετρά πολλές εγκαταστάσεις στο Internet.

XORP Open Source IP Router

Xorp.org

<http://www.xorp.org/>

Το XORP είναι ένα project δρομολόγησης ανοικτού κώδικα που αναπτύσσεται στο ICSI Center for Open Networking (ICON) που ανήκει στο International Computer Science Institute του Berkeley των ΗΠΑ. Ο στόχος του είναι να αποτελέσει ένα σταθερό περιβάλλον ανάπτυξης που θα κλείσει το κενό ανάμεσα στην έρευνα και τον πραγματικό κόσμο. Βασίζεται στον διαχωρισμό των ξεχωριστών λειτουργιών σε modules και παρέχει ξεχωριστό API για το καθένα. Έτσι επιτυγχάνει να είναι επε-

κτάσιμο, αποτελεσματικό και σταθερό ταυτόχρονα. Προορίζεται για Linux και FreeBSD και διανέμεται και σε live-cd.

Zebra / GNU Zebra

Kunihiro Ishiguro

<http://www.zebra.org/>

Το Zebra είναι ένα ελεύθερο λογισμικό ανοικτού κώδικα για τη διαχείριση πρωτοκόλλων δρομολόγησης που βασίζονται στο TCP/IP. Διανέμεται υπό την GNU άδεια χρήσης και υποστηρίζει το BGP4, το RIPv1 κ 2 και το OSPFv2. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές και ακόμα και τις νέες modular αρχιτεκτονικές το Zebra προσφέρει πραγματική τμηματοποίηση. Είναι μοναδικό στο σχεδιασμό του κυρίως λόγω του ότι έχει ξεχωριστές διεργασίες για κάθε πρωτόκολλο. Προορίζεται για όλα τα UNIX- based λειτουργικά συστήματα.

Quagga Routing Software Suite

Quagga Project

<http://www.quagga.net/>

Πρόκειται για μια σουίτα λογισμικού που παρέχει υλοποιήσεις για τα OSPFv2, OSPFv3, RIP v1 και v2, RIPv3 και BGPv4 για Unix πλατφόρμες. Το Quagga αποτελεί μια εναλλακτική πρόταση στο GNU Zebra το οποίο υλοποιήθηκε από τον Kunihiro Ishiguro. Το Quagga στοχεύει στην υλοποίηση ενός περισσότερο ανοικτού προς την ερευνητική κοινότητα λογισμικού δρομολόγησης σε αντίθεση με το GNU Zebra το οποίο χαρακτηρίζεται από μια αυστηρά συγκεντρωμένη διαχείριση.

3 Εναλλακτικές Ερευνητικές Προτάσεις

Η πρόκληση της υποστήριξης πολλών διαφορετικών και πολύπλοκων πολιτικών δρομολόγησης χωρίς να αυξηθεί σημαντικά η πολυπλοκότητα του πρωτοκόλλου και χωρίς να μειωθεί η απόδοσή του, έχει ενεργοποιήσει έντονα την ερευνητική κοινότητα. Τα προβλήματα του BGP έχουν καταγραφεί από διάφορους φορείς και είναι ήδη γνωστά.

Αρκετά πανεπιστήμια αλλά και ερευνητικά ινστιτούτα καταθέτουν εναλλακτικούς σχεδιασμούς και αλγορίθμους για ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης επόμενης γενιάς. Μερικές από τις προτάσεις αυτές καθώς και μια συνοπτική περιγραφή για την κάθε μια παρατίθενται παρακάτω.

3.1 HLP – Hybrid Link-State Path-Vector protocol

Μια από τις σημαντικές εναλλακτικές προτάσεις για την αντικατάσταση του BGP είναι το HLP. Η σχεδιαστική του φιλοσοφία βασίζεται στην γνωστοποίηση μόνο των κοινών πολιτικών δρομολόγησης που μπορούν να τεκμηριωθούν από το BGP σήμερα και επίσης στη βελτιστοποίηση της δομής του πρωτοκόλλου με στόχο τους χαμηλότερους χρόνους σύγκλισης των δρομολογητών. Επίσης αποκρύπτει πολλές πληροφορίες από αυτές που διαδίδει το BGP καθώς έχει αποδειχθεί ότι δεν είναι

	BGP	HLP
Routing structure	Flat	Hierarchical
Policy structure	Support for generic policies	Optimize for common cases of policies
Path structure	Prefix based	AS based
Routing style	Path vector	Hybrid routing

Πίνακας 3.1: Κύρια χαρακτηριστικά HLP σε σύγκριση με το BGP

απαραίτητο να διαδοθούν. Έτσι αποφεύγει αποτελεσματικότερα τα προβλήματα της κλιμάκωσης και την απομόνωσης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Χαρακτηρίζεται ως υβριδικό link-state path-vector πρωτόκολλο και σε σύγκριση με το BGP μειώνει κατά 100 περίπου φορές τη δραστηριότητα του πρωτοκόλλου σε ένα ΑΣ και 400 περίπου φορές την γενικότερη δραστηριότητα του πρωτοκόλλου σε όλο το δίκτυο [15].

3.2 MIRO – Multipath Interdomain Routing

Το BGP περιορίζει κάθε δρομολογητή να χρησιμοποιεί ένα μοναδικό μονοπάτι για κάθε προορισμό. Αυτό μπορεί να μην ικανοποιεί τις απαιτήσεις πολλών τελικών χρηστών. Στο BGP και στις πρόσφατες προτάσεις για ένα πρωτόκολλο νέας γενιάς οι δρομολογητές ορίων αποφασίζουν για το από άκρη σ' άκρη (end to end) μονοπάτι που θα χρησιμοποιηθεί. Συνεπώς οι ενδιάμεσοι τομείς δεν διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και από το χαρακτηριστικό αυτό απορρέουν προβλήματα κλιμάκωσης αλλά και ασφάλειας. Το MIRO σχεδιάστηκε έτσι ώστε να παρέχει ευελιξία καθώς δίνει στους ενδιάμεσους κόμβους τη δυνατότητα να ελέγχουν την κίνηση που διαπερνά μέσα από την δομή τους και να αποφεύγουν την τοπική υπερφόρτωση κατά τη διασπορά πληροφορίας προσβασιμότητας.

	BGP	MIRO
Control over path selection	Destination based	AS-level path selection
Policy interaction	Single path routing	Policy driven exports of alternate routes
Route learning	Path vector	Negotiation for alternate routes
AS's traffic control	Local policy based	Tunnels to direct traffic (on alternate paths)

Πίνακας 3.2: Κύρια χαρακτηριστικά MIRO σε σύγκριση με το BGP

Στο MIRO οι δρομολογητές μαθαίνουν τα εξ ορισμού μονοπάτια μέσω του BGP και παράλληλα τυχαία ζεύγη κόμβων μπορούν να διαπραγματευτούν την εγκα-

τάσταση ενός μονοπατιού το οποίο θα είναι αποκλειστικά προσαρμοσμένο στις δικές τους ανάγκες. Πειράματα με πραγματικά δεδομένα δρομολόγησης στο Internet απέδειξαν ότι το MIRO προσφέρει πολύ μεγάλη ευελιξία στην επιλογή μονοπατιού προσθέτοντας ένα λογικό και υποφερτό φορτίο(overhead) στο δίκτυο [18].

3.3 NIRA - A New Internet Routing Architecture

Στην σημερινή κατάσταση λειτουργίας του Internet, οι χρήστες μπορούν να επιλέξουν τον παροχέα διαδικτυακών υπηρεσιών της προτίμησής τους αλλά δεν έχουν την δυνατότητα να καθορίσουν την δρομολόγηση των πακέτων που φεύγουν από αυτούς. Από την στιγμή που ένα πακέτο ξεκινά από τον χρήστη και εισέρχεται στο δίκτυο του παροχέα, η δρομολόγηση ελέγχεται από τις εκάστοτε πολιτικές που έχουν καθοριστεί από τον τελευταίο. Η φιλοσοφία που υπάρχει πίσω από τον σχεδιασμό του NIRA, στοχεύει στην παροχή στον τελικό χρήστη της δυνατότητας επιλογής των ενδιάμεσων κόμβων που θα διαπεράσει ένα πακέτο. Όταν η επιλογή αυτή θα γίνεται από τους χρήστες του Internet θα αναπτύσσουν τον ανταγωνισμό ανάμεσα στους παροχείς των διαδικτυακών ο οποίος επιβάλλει μια οικονομική αρχή στην αρχή και επίσης προωθεί την καινοτομία και την εισαγωγή νέων υπηρεσιών. Το NIRA έχει ως κύριο στόχο να παρέχει στους χρήστες την δυνατότητα να επιλέγουν:

- τον τρόπο που ένας χρήστης ανακαλύπτει τα μονοπάτια δρομολόγησης και αν οι δυναμικές συνθήκες αυτών των μονοπατιών ικανοποιούν τις απαιτήσεις του
- τον τρόπο που θα αναπαριστά τα μονοπάτια επαρκώς
- τον τρόπο που θα αποζημιώνονται οι παροχείς διαδικτυακών υπηρεσιών όταν ένας χρήστης επιλέξει να τους χρησιμοποιήσει

Συγκεκριμένα το NIRA χρησιμοποιεί ένα ιεραρχικό σχήμα διευθυνσιοδότησης το οποίο προέρχεται από τον παροχέα έτσι ώστε ένα κοινό μονοπάτι μπορεί να αναπαρασταθεί επαρκώς από ένα ζευγάρι διευθύνσεων. Κάθε χρήστης συλλέγει και κρατάει τα στοιχεία της τοπολογίας των ενδιάμεσων κόμβων που του παρέχουν υπηρεσίες μεταγωγής για τα πακέτα του. Μετά από την απαίτηση ενός προορισμού η πηγή ανακτά την πληροφορία για το που βρίσκεται ο προορισμός και την συνδυάζει με

τις πληροφορίες που έχει ήδη συλλέξει για να δημιουργήσει το πλήρες μονοπάτι δρομολόγησης. Αυτή η διαδικασία ανακάλυψης των μονοπατιών διασφαλίζει ότι κάθε χρήστης δε χρειάζεται να γνωρίζει όλη την τοπολογία του Internet [19].

4 Συμπεράσματα - Επίλογος

Συμπερασματικά, είναι φανερό ότι το BGP και συνεπώς η τρέχουσα υποδομή του διαδικτύου σε ότι αφορά την δρομολόγηση της κίνησης, έχει εξαντλήσει την περίοδο της ωρίμανσης και οδηγείται στο στάδιο της παρακμής. Σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σε μια περίοδο στην οποία οι απαιτήσεις ήταν λιγότερες και έφτασε να βρίσκεται εν ενεργεία ακόμα και σήμερα, ανταποκρινόμενο θετικά στις προκλήσεις της εποχής. Παρόλα αυτά, τα πρώτα φαινόμενα αδυναμίας του BGP είναι έκδηλα ιδιαίτερα σε ότι αφορά την δυναμική που το χαρακτηρίζει σχετικά με την προσαρμογή σε ένα περιβάλλον το οποίο συνεχώς διογκώνεται, έχει διαφορετικές πολιτικές και προτιμήσεις στις επιμέρους περιοχές του, παρουσιάζει συχνές βλάβες και συνάμα απαιτεί τους ταχύτερους δυνατούς χρόνους απόκρισης και δρομολόγησης της κίνησης.

Σε ολόκληρη την ερευνητική κοινότητα παρουσιάζεται έντονη ενεργητικότητα σχετικά με το θέμα του επόμενου πρωτοκόλλου που θα εφαρμοστεί για την δρομολόγηση των πακέτων στο διαδίκτυο. Έχουν ήδη προταθεί νέοι αλγόριθμοι δρομολόγησης από διάφορους ακαδημαϊκούς φορείς. Η IRTF (Internet Research Task Force) είναι μια ανοικτή παγκόσμια κοινότητα η οποία αποτελείται από σχεδιαστές, διαχειριστές, επιχειρήσεις και ερευνητές με έναν κοινό σκοπό ο οποίος είναι η ανάπτυξη των δικτυακών τεχνολογιών [3]. Η κοινότητα αυτή, η οποία σχετίζεται άμεσα με την IETF (Internet Engineering Task Force), έχει ως αποστολή της την προώθηση της σημαντικής έρευνας για την ανάπτυξη του μελλοντικού internet. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργεί ερευνητικές ομάδες, οι οποίες είναι μικρές, ευέλικτες και εργάζονται για αρκετό καιρό με συγκεκριμένο προσανατολισμό σε έναν τομέα ο οποίος σχετίζεται με τα πρωτόκολλα, τις εφαρμογές, την αρχιτεκτονική και την τεχνολογία του διαδικτύου. Το Interdomain Routing αποτελεί θέμα υψηλής προτεραιότητας για την IRTF και για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν και δραστηριοποιούνται ήδη οι παρακάτω ερευνητικές ομάδες:

- Routing Research Group's (RRG),
- Future Domain Routing (FDR),
- Scalability Research Subgroup (RR-FS).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Aranda Gutiérrez, Pedro A. “BGP-4.” Telefonica Investigacion Y Dessarollo, Spain, September, 2003.

- [2] Sheldon, Tom, ed. *Encyclopedia of Networking and Telecommunications*. California: Osborne/McGraw-Hill, 2001. <http://www.linktionary.com>. Also available in print form and as a CD-ROM.

- [3] Wikipedia. <http://www.wikipedia.org>.

Online εγκυκλοπαίδεια με αρκετά υψηλό δείκτη κάλυψης αναφορικά με τις βασικές έννοιες δικτύωσης, δρομολόγησης και πρωτοκόλλων.

- [4] Hawkinson, J., Bates, T. Guidelines for creation, selection, and registration of an Autonomous System (AS). RFC 1930, March 1996.

- [5] Mills, D.L. Exterior Gateway Protocol Formal Specification. RFC 904, April 1984.

- [6] Rekhter, Y., Li, T. A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). RFC 1654, July 1994.

- [7] Rekhter, Y., Li, T., Hares, S. A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). Internet draft, 2003.

- [8] Athens Wireless Metropolitan Network. “BGP, Border Gateway Protocol.”
[ngia.rootforge.org/content/Tutorials/Routing/BGP_part1.pdf](http://www.ngia.rootforge.org/content/Tutorials/Routing/BGP_part1.pdf)
(accessed September 9, 2004)

Εκτενής παρουσίαση με θέμα το Interdomain Routing και το πρωτόκολλο BGP-4, διαθέσιμη στην παραπάνω ιστοσελίδα από την ομάδα ngia του AWMN.

- [9] Cisco. “IP routing, BGP Case studies.”
<http://www.cisco.com/warp/public/459/bgp-toc.pdf> (accessed January, 2, 2007).

Online tutorial στον δικτυακό τόπο της εταιρείας CISCO σχετικά με το BGP.

- [10] Halabi, Sam, and Danny McPherson. *Internet Routing Architectures*. Indianapolis: Cisco Press, 2000

- [11] Moy, J. OSPF Version 2. RFC 1583, March 1994.

- [12] Page, M, *Internetworking technologies handbook*. Indianapolis: Cisco Press, 2001.

- [13] Carling, Matt, and Healy, Greg. “ Introduction to BGP for the Enterprise.” Presented at Cisco Systems, 2002.

- [14] Subramanian, L., Caesar, M., Handley, M., Mao, M., Shenker S., and Stoica I. “Towards a Next Generation Inter-domain Routing Protocol.” International Science Computer Institute.
<http://www.icsi.berkeley.edu/cgi-bin/pubs/publication.pl?ID=001709>

(accessed January 5, 2007).

[15] Subramanian, Lakshminarayanan, Caesar, Matthew, Ee, Cheng Tien, Handley, Mark, Mao, Morley, Shenker, Scott, and Stoica Ion. “HLP: A Next Generation Interdomain Routing Protocol.” *SIGCOMM’05*, August 21-26, (2005): 13-24.

[16] Cisco. “IP routing, BGP Case studies.”
<http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/ics/icsbgp4.htm> (accessed January, 2, 2007).

Online documentation στην ιστοσελίδα της εταιρείας CISCO για την χρήση του BGP ως πρωτόκολλο εξωτερικής δρομολόγησης.

[17] Feigenbaum, Joan, Papadimitriou, Christos, Sami, Rahul, and Shenker, Scott. “A BGP-based Mechanism for Lowest-Cost Routing.” Paper presented at the twenty-first annual symposium on Principles of distributed computing, California, USA, 2002.

[18] Xu, Wen, and Rexford Jennifer. “MIRO: Multi-path Interdomain Routing.” *SIGCOMM’06*, September, 11-15, (2006): 171-182.

[19] Yang, Xiaowei. “NIRA: A New Internet Routing Architecture.” Workshops, ACM SIGCOMM, Karlsruhe, Germany, August 25&27, 2003.

[20] Sharad Agarwal, Chen-Nee Chuah, Randy H. Katz. “OPCA: Robust Interdomain Policy Routing and Traffic Control”, in *IEEE Openarch*, April 2003.

- [21] Caesar, Matthew, Rexford, Jennifer. “BGP Routing Policies in ISP Networks.” UC Berkeley.
<http://techreports.lib.berkeley.edu/accessPages/CSD-05-1377.html>
(accessed December 20, 2006).

Άρθρο, δημοσιευμένο στην ιστοσελίδα του Berkeley University, που αφορά τις πολιτικές δρομολόγησης που εφαρμόζονται στα δίκτυα των Internet Service Providers.

- [22] Feamster, Nick, Balakrishnan, Hari, Rexford, Jennifer. “Some Foundational Problems in Interdomain Routing.” 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets), San Diego, CA, November 2004.

- [23] Griffin, T., and Mao, Z. “Interdomain Routing Streams.” Workshop on management and Processing of Data Streams, June 2003.

- [24] Colitti, Lorenzo, Di Battista, Giuseppe, Mariani, Federico, Patrignani, Maurizio, Pizzonia, Maurizio. “Visualizing Interdomain Routing with BGPlay”. *Journal of Graph Algorithms and Applications*, 9 (1), 117–148 (2005).

- [25] Χειλάς, Κωνσταντίνος Σ. “Δίκτυα Η/Υ II.” ΤΕΙ Σερρών.
www.teiser.gr/icd/staff/chilas/files/Δίκτυα%20II.pdf (accessed: January 13, 2007).

Εκπαιδευτικό υλικό διαθέσιμο στην ιστοσελίδα από το ΤΕΙ Σερρών το οποίο περιγράφει τις βασικές έννοιες του Interdomain Routing.

- [26] van Beijnum, Iljitsch. “BGP Building Reliable Networks with the Border Gateway Protocol.”

http://www.onlamp.com/pub/a/onlamp/excerpt/bgp_ch06/ (accessed: January 13, 2007).

Το έκτο κεφάλαιο του βιβλίου διατίθεται στην παραπάνω ιστοσελίδα και αφορά την διαδικασία λήψης αποφάσεων του BGP-4, για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής

- [27] Maennel, Olaf, and Feldmann, Anja. "Identifying Problematic Inter-domain Routing Issues." The North American Network Operators' Group. <http://www.nanog.org/mtg-0202/bgp.html> (accessed: January 12, 2007).

Άρθρο των Olaf Maennel and Anja Feldmann από το Saarland University του Saarbruecken της Γερμανίας στο οποίο παρουσιάζονται τεκμηριωμένα τα προβλήματα του BGP-4 μετά από την χρήση ειδικών εφαρμογών.

- [28] BGP Expert. <http://www.bgpexpert.com/resources.php>

Μια ιστοσελίδα η οποία περιέχει αρκετά links σε πηγές που αφορούν το BGP-4 και το Interdomain Routing.

- [29] BGP Core Routing Table Size. University of Oregon Route Views Project <http://www.routeviews.org/dynamics/> (accessed: January 12, 2007).

Σελίδα του πανεπιστημίου του Oregon των ΗΠΑ η οποία λειτουργεί ως εργαλείο για την online real-time ανάκτηση δεδομένων και στατιστικών που αφορούν το παγκόσμιο σύστημα δρομολόγησης του διαδικτύου.