

## Εργαστηριακή Άσκηση 9

### Δυναμική δρομολόγηση BGP

#### Πρωτόκολλο δρομολόγησης BGP (Border Gateway Protocol)

Το BGP είναι το πρωτόκολλο που κάνει το Internet να δουλεύει. Είναι πρωτόκολλο της δεκαετίας του 1990 για δίκτυα IPv4. Η πιο πρόσφατη έκδοσή του είναι η 4 (BGP4) και ορίζεται στο [RFC 4271](#) του 2006 όπου συγκεντρώθηκαν όλα τα προγενέστερα κείμενα που βασίζονται στην αρχική του εκδοχή στο [RFC 1771](#). Από το 1994 χρησιμοποιείται ευρέως στη λειτουργία του δημοσίου διαδικτύου και σε συνδυασμό με τις επεκτάσεις (multiprotocol extensions) του [RFC 4760](#), γνωστές ως MP-BGP υποστηρίζει δίκτυα IPv6 επιτρέποντας τη διανομή διαφόρων τύπων διευθύνσεων (πέραν των IPv4). Το BGP αντικατέστησε το Exterior Gateway Protocol – EGP ([RFC 904](#)) στη μετάβαση από το μοντέλο του ARPAnet (ένα δίκτυο που περιλάμβανε τον κορμό NSFNET και περιφερειακά δίκτυα) σε πλήρως αποκεντρωμένη δρομολόγηση.

Το BGP επιτρέπει σε ένα Αυτόνομο Σύστημα (Autonomous System – AS) να αναγγείλει την ύπαρξή του στο υπόλοιπο Internet. Αυτόνομο Σύστημα (AS) είναι μια συλλογή δικτύων με την ίδια πολιτική δρομολόγησης, συνήθως κάτω από την ίδια ιδιοκτησία και διαχειριστικό έλεγχο. Κάθε αυτόνομο σύστημα περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα μοναδικά, με την έννοια ότι δεν περιλαμβάνονται σε κανένα άλλο αυτόνομο σύστημα, δίκτυα. Κάθε AS χαρακτηρίζεται από έναν μοναδικό ακεραίο αριθμό ASN (AS Number). Μέχρι το 2007 ο αριθμός AS ήταν μήκους 16 bit, έκτοτε επεκτάθηκε σε 32 bit. Οι αριθμοί 1-64511 εκχωρούνται από τους περιοχικούς διαδικτυακούς ληξιαρχούς (RIR – Regional Internet Registries), π.χ. για την Ευρώπη το RIPE (<https://www.ripe.net/>). Οι αριθμοί 64512-65534 είναι για ιδιωτική χρήση ενώ οι 0 και 65535 δεν χρησιμοποιούνται.

Το BGP είναι το de-facto πρωτόκολλο για δρομολόγηση *εκτός της περιοχής διαχείρισης*. Ρυθμίζει τη δρομολόγηση μεταξύ διαφορετικών Αυτόνομων Συστημάτων και για αυτό τον λόγο ονομάζεται και **inter-AS routing protocol**. Το BGP παρέχει σε κάθε AS τα μέσα για να αποκτήσει πληροφορίες προσβασιμότητας από τα γειτονικά AS μαθαίνοντας διαδρομές προς αυτά από πολλές πηγές, να επιλέξει τις “καλύτερες” εξ αυτών βάσει της πληροφoρίας προσβασιμότητας και της πολιτικής δρομολόγησης, να τις εγκαταστήσει στον πίνακα δρομολόγησης, να διαδώσει την πληροφορία προσβασιμότητας σε όλους τους εσωτερικούς δρομολογητές του AS και να διαφημίσει τις “καλές” διαδρομές προς τα άλλα AS.

Προτού δύο αυτόνομα συστήματα, π.χ. τα AS1 και AS2, μπορέσουν να προωθήσουν κίνηση IP το ένα στο άλλο (data plane), οι ομότιμοι δρομολογητές (BGP peers) ανταλλάσσουν πληροφορίες δρομολόγησης (control plane) πάνω από ημι-μόνιμες συνδέσεις που αποκαλούνται σύνοδοι BGP. Οι δρομολογητές εγκαθιστούν τις συνόδους χρησιμοποιώντας το TCP ως πρωτόκολλο μεταφοράς (θύρα προορισμού 179, η θύρα πηγής δυναμική) ώστε να εκμεταλλευτούν την αξιοπιστία αυτού. Υπό την έννοια αυτή, θα μπορούσε να θεωρήσει κανείς το BGP ως μια εφαρμογή που τρέχει πάνω από το Internet. Το BGP επιτρέπει δύο μορφές συνόδων μεταξύ συνομιλητών BGP (BGP speakers) ή γειτόνων BGP (BGP neighbors). Στο eBGP (external BGP) οι συνομιλητές ανήκουν σε διαφορετικά AS, είναι απευθείας συνδεδεμένοι και οι σύνοδοι εγκαθίστανται χρησιμοποιώντας τη διεύθυνση IP της απέναντι διεπαφής. Στο iBGP (internal BGP) οι συνομιλητές ανήκουν στο ίδιο AS και οι σύνοδοι εγκαθίστανται εν γένει σε διαδρομές πολλών βημάτων. Οι συνομιλητές ανταλλάσσουν μηνύματα για να εγκαταστήσουν και συμφωνήσουν στις παραμέτρους της σύνδεσης. Μετά ανταλλάσσουν τους πλήρεις πίνακες δρομολόγησης. Στη συνέχεια στέλνουν ενημερώσεις μόνο όταν ανιχνεύσουν κάποια αλλαγή. Περιοδικά αποστέλλουν μηνύματα keepalive ώστε να διατηρείται ζωντανή η σύνδεση TCP. Σε περίπτωση λάθους ή ειδικών περιστάσεων αποστέλλουν μηνύματα ειδοποίησης (notification). Επίσης, διατηρούν ένα αριθμό έκδοσης του πίνακα διαδρομών που είναι ο ίδιος για όλους τους

γείτονες BGP. Ο αριθμός έκδοσης αλλάζει κάθε φορά που ενημερώνεται ο πίνακας δρομολόγησης με μια “καλύτερη διαδρομή”.

Επειδή οι διευθύνσεις IP δεν έχουν την ιεραρχία των τηλεφωνικών αριθμών, οι δρομολογητές των παρόχων δικτύων κορμού πρέπει να ανταλλάσσουν πληροφορίες για εκατοντάδες χιλιάδες δικτυακά προθέματα<sup>1</sup>. Το BGP εκτελεί εξαιρετικά αποδοτικά αυτή τη λειτουργία. Παρότι αργό όσον αφορά τη σύγκλιση, το πιο σημαντικό του χαρακτηριστικό είναι η κλιμακωσιμότητα (scalability) που οφείλεται στη σπανιότητα των διαφημίσεων μεταξύ γειτόνων. Η πλήρης γνώση για τη δρομολόγηση ανταλλάσσεται μόνο στην αρχή της συνόδου και μετά οι διαδρομές διαφημίζονται μόνο εφόσον απαιτείται, δηλαδή, όταν μαθευτεί νέα πληροφορία ή αποσυρθεί παλαιά.

Το BGP είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης *διανύσματος διαδρομών* (Path Vector - PV). Στα πρωτόκολλα διανύσματος διαδρομών ο δρομολογητής λαμβάνει από τους γείτονες ένα διάνυσμα που περιέχει τις διαδρομές προς τους προορισμούς, σε αντιδιαστολή με τα πρωτόκολλα διανύσματος αποστάσεων (Distance Vector – DV), όπου λαμβάνει ένα διάνυσμα αποστάσεων προς τους προορισμούς. Στα πρωτόκολλα δρομολόγησης διανύσματος διαδρομών (δείτε [RFC 1322](#)), ως δρόμος (route) ορίζεται το ζεύγος του προορισμού και των χαρακτηριστικών (attributes) της διαδρομής (path) που οδηγεί στον προορισμό. Στο BGP το βασικό χαρακτηριστικό της διαδρομής είναι η σειρά των αυτόνομων συστημάτων (AS) μέσα από τα οποία πέρασε η πληροφορία προσβασιμότητας. Στα πρωτόκολλα PV η επιλογή του βέλτιστου δρόμου γίνεται με χρήση κριτηρίων, πολιτικών δρομολόγησης (routing policies), που δεν είναι τα ίδια για κάθε διαχειριστική περιοχή (AS). Στην απλούστερη εκδοχή, θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει πολιτική όπως στα πρωτόκολλα διανύσματος αποστάσεων (Distance Vector – DV) με τις αποστάσεις να εκφράζονται σε βήματα, όπου ως **βήμα** (hop) νοείται το κάθε **αυτόνομο σύστημα**, και η συνολική απόσταση ενός δικτυακού προθέματος είναι το *μήκος διαδρομής* (Path length) των AS. Κατ’ επέκταση η βέλτιστη διαδρομή μεταξύ δύο δρομολογητών που ανήκουν σε διαφορετικά αυτόνομα συστήματα γίνεται με τη σύγκριση του αριθμού των AS τα οποία πρέπει να διανυθούν για ένα πρόθεμα δικτύου προορισμού (routing entry).

Το BGP δεν παρέχει πληροφορίες για την τοπολογία του δικτύου παρά μόνο *πληροφορίες προσβασιμότητας* (Reachability information), διαφημίζοντας διαδρομές AS και δίκτυα που είναι προσβάσιμα στο τέλος αυτών. Πληροφορία προσβασιμότητας είναι η πλήρης διαδρομή (AS path) σε όρους ακολουθίας αριθμών ASN των αυτόνομων συστημάτων από όπου πρέπει να διέλθει ένα πακέτο προς δοθέντα προορισμό. Η γνώση αυτή επιτρέπει τη δημιουργία ενός γράφου AS χωρίς βρόχους που χρησιμεύει στον προσδιορισμό των σημείων όπου πρέπει να επιβληθούν πολιτικές δρομολόγησης. Οι πολιτικές δρομολόγησης οδηγούν στην εύρεση της “καλύτερης” διαδρομής προς κάθε προορισμό ρυθμίζοντας έτσι τη ροή της κίνησης μεταξύ AS. Η μεγάλη αποδοχή του BGP, εκτός από την κλιμακωσιμότητα (scalability) του για μεγάλο αριθμό δικτυακών πληροφοριών, οφείλεται και στην υποστήριξη πολιτικών δρομολόγησης.

Οι πληροφορίες που διακινεί το BGP ανταλλάσσονται συνήθως μεταξύ ανταγωνιστικών εταιρειών (Internet Service Providers ISPs) μέσω εντός ανοικτού περιβάλλοντος, το δημόσιο διαδίκτυο. Όταν το AS1 αναγγέλλει ένα δικτυακό πρόθεμα στο AS2, το AS2 πρέπει να **αποδεχθεί** ότι θα προωθεί πακέτα προς το υπόψη πρόθεμα. Και αντίστροφα, όταν το AS2 αναγγέλλει ένα δικτυακό πρόθεμα στο AS1, το AS1 πρέπει να αποδεχθεί ότι θα προωθεί πακέτα προς το υπόψη πρόθεμα. Για τον λόγο αυτό το BGP δίνει έμφαση στην ασφάλεια. Οι γειτονικοί δρομολογητές πρέπει να ρυθμιστούν χειροκίνητα και πρέπει να διαθέτουν πολλαπλά φίλτρα που να επιτρέπουν στους ISP να θωρακίζουν τα δίκτυά τους και να ελέγχουν ποια πληροφορία διαφημίζουν στους ανταγωνιστές τους. Επειδή η έμφαση στην υλοποίηση του BGP βρίσκεται στα θέματα ασφάλειας και ευστάθειας, το BGP συγκλίνει πολύ αργά. Για αυτό στα μεγάλα δίκτυα των ISP απαιτούνται δύο πρωτόκολλα δρομολόγησης. Ένα πρωτόκολλο IGP (συνήθως OSPF) για να επιτευχθεί ταχεία σύγκλιση στο εσωτερικό του δικτύου (περιλαμβανομένων και των IP διευθύνσεων των δρομολογητών BGP) και

<sup>1</sup> Περισσότερα από 950.000 τον Απρίλιο του 2024. Δείτε <https://bgp.potaroo.net/> για την εξέλιξη του πλήθους των.

το BGP για την ανταλλαγή διαδρομών στο διαδίκτυο και την αναδιανομή τους στους δρομολογητές IGP εντός του AS.

### Βασική λειτουργία BGP

Η βασική του λειτουργία σε συντομία είναι: 1) μαθαίνει πληθώρα διαδρομών από εσωτερικούς (iBGP) ή εξωτερικούς (eBGP) ως προς με το δικό του AS συνομιλητές, 2) επιλέγει την καλύτερη εκ των διαδρομών αυτών, 3) την εισάγει στον πίνακα δρομολόγησης και 4) αναγγέλλει τις καλύτερες διαδρομές που γνωρίζει στους γείτονες (BGP neighbors). Η επιλογή της καλύτερης διαδρομής προκύπτει από την εφαρμογή μιας σειράς κανόνων (BGP Best Path Selection Algorithm) που περιγράφεται παρακάτω. Στο BGP, όταν αναγγέλλεται μια διαδρομή, η αναγγελία περιλαμβάνεται και μια σειρά χαρακτηριστικά (attributes) BGP. Τα επόμενα τρία χαρακτηριστικά (ORIGIN, AS\_PATH και NEXT\_HOP) είναι υποχρεωτικά για κάθε διαδρομή.

**ORIGIN:** η πηγή (IGP, EGP ή incomplete) της πληροφορίας προσβασιμότητας. Το IGP περιλαμβάνει όλες τις διαδρομές που έγιναν γνωστές στο BGP μέσω της εντολής network στο αντίστοιχο AS. Το EGP αναφέρεται στο μη χρησιμοποιούμενο πλέον πρωτόκολλο Exterior Gateway Protocol. Το incomplete δηλώνει ότι δεν είναι γνωστός ο τρόπος γνωστοποίησης, συνήθως, μέσω της εντολής redistribute.

**AS\_PATH:** η σειρά σε όρους αυτόνομων συστημάτων μιας διαδρομής που έχει ακολουθήσει η αναγγελία. Το πλησιέστερο AS είναι πρώτο στη λίστα, ενώ αυτό της αρχής είναι στο τέλος. Ένα πακέτο κίνησης (δεδομένα) πρέπει να διασχίσει την αντίστροφη διαδρομή προκειμένου να φτάσει στον προορισμό του.

**NEXT\_HOP:** η διεύθυνση IP του δρομολογητή από όπου προέρχεται η αναγγελία. Για το eBGP είναι η διεύθυνση του εξωτερικού δρομολογητή. Για το iBGP είναι το **NEXT\_HOP του eBGP** από τον οποίο έγινε η λήψη. Το NEXT\_HOP είναι η διεύθυνση IP που πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως επόμενο βήμα για την προώθηση της κίνησης προς τους προορισμούς που περιλαμβάνει η αναγγελία. Είναι, δηλαδή, η διεύθυνση IP για το επόμενο AS και όχι για τον επόμενο δρομολογητή.

Εκ των υπολοίπων χαρακτηριστικών BGP τα σημαντικότερα είναι:

**LOCAL\_PREF:** η προτίμηση, προκαθορισμένη τιμή το 100, για μια διαδρομή τοπικά εντός ενός AS (εσωτερικό κόστος). Περιλαμβάνεται μόνο στις αναγγελίες μεταξύ γειτόνων iBGP εντός του AS, δεν ανακοινώνεται μεταξύ γειτόνων eBGP. Χρησιμοποιείται από τους δρομολογητές του AS στην επιλογή της καλύτερης διαδρομής για την **εξερχόμενη** κίνηση. Όσο μεγαλύτερη η τιμή της, τόσο προτιμότερη είναι η διαδρομή.

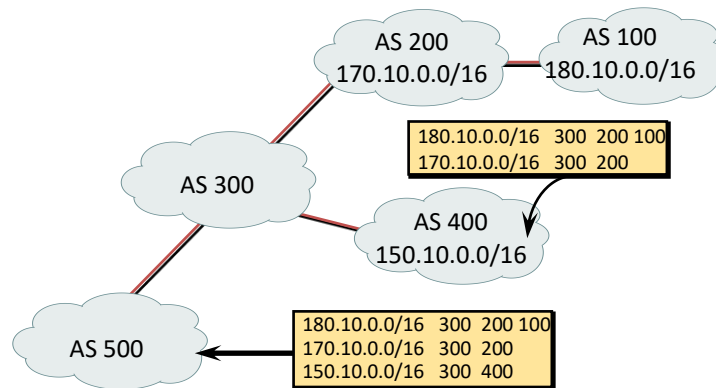
**MULTI\_EXIT\_DISC (riminator):** υποδεικνύει προτίμηση, προκαθορισμένη τιμή το 0, για τα σημεία εισόδου στο AS. Χρησιμοποιείται στην επιλογή της καλύτερης διαδρομής για την **εισερχόμενη** κίνηση στο AS. Οι διαδρομές είναι συγκρίσιμες μόνο όταν προέρχονται από το ίδιο AS. Περιλαμβάνεται στις αναγγελίες προς τους γείτονες eBGP και διαχέεται σε όλους τους δρομολογητές του γειτονικού AS (όχι σε επόμενα AS). Όσο μικρότερη η τιμή της, τόσο προτιμότερη είναι η διαδρομή ως έξοδος (exit) από το γειτονικό AS.

**WEIGHT:** τοπική στον δρομολογητή (μόνο για Cisco και Quagga) προτίμηση για τις διαδρομές.

### AS\_PATH του BGP

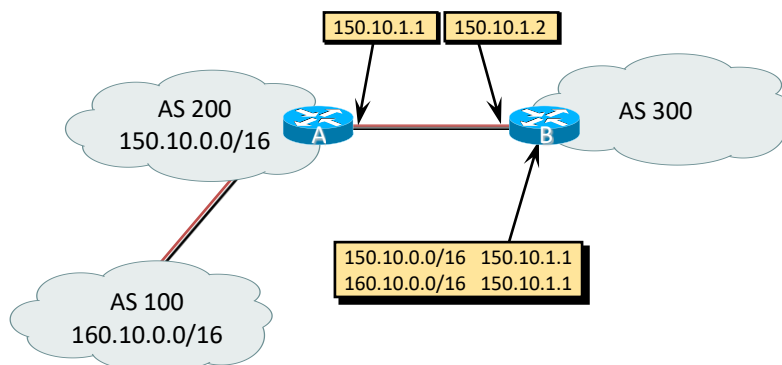
Στο BGP, για κάθε πρόθεμα δικτύου (network prefix), το AS\_PATH περιέχει τους αριθμούς AS μέσω των οποίων πέρασε η αναγγελία για το υπόψη πρόθεμα. Οι δρομολογητές BGP, στις αναγγελίες προς τους γείτονες σε άλλα AS, προωθούν αυτή την πληροφορία προσθέτοντας το δικό τους αριθμό AS **αυξάνοντας** έτσι τη **διαδρομή** AS. Για παράδειγμα, το δίκτυο 180.10.0.0/16 του επόμενου σχήματος

έχει AS\_PATH <100> όταν ανακοινώνεται από τους δρομολογητές του AS100. Το AS\_PATH του 180.10.0.0/16 γίνεται <200,100> όταν ανακοινώνεται από το AS 200. Επιπλέον το AS 200 ανακοινώνει και το δικό του δίκτυο 170.10.0.0/16. Το AS\_PATH εκτός από την εύρεση της συντομότερης διαδρομής χρησιμεύει και στην ανίχνευση βρόχων, όταν ένας δρομολογητής λάβει αναγγελία διαδρομής από εξωτερικό δρομολογητή στο AS\_PATH της οποίας περιλαμβάνει τον δικό του αριθμό AS.



### NEXT\_HOP του BGP

Το BGP για κάθε πρόθεμα δικτύου ανακοινώνει υποχρεωτικά και τη διεύθυνση IP του δρομολογητή που έκανε την ανακοίνωση (NEXT\_HOP). Το NEXT\_HOP τροποποιείται από κάθε AS που περνά η ανακοίνωση του δικτυακού προθέματος. Μέσω αυτού, το AS που λαμβάνει την αναγγελία πληροφορείται για το ποιος δρομολογητής από το αποστέλλον AS είναι το επόμενο βήμα. Σημειώστε ότι μπορεί να υπάρχουν πολλές ζεύξεις από το τρέχον AS προς το επόμενο AS.



### Αναγγελίες διαδρομών

Κάθε δρομολογητής BGP διατηρεί ένα *πίνακα γειτόνων* με τους οποίους έχει εγκαταστήσει σύνοδο BGP (δείτε κατάσταση ESTABLISHED πιο κάτω) και ένα *πίνακα διαδρομών*, την Routing Information Base – RIB, όπου αποθηκεύει για τους προορισμούς που μαθαίνει τις διαδρομές με τα χαρακτηριστικά τους. Από τις διαδρομές αυτές επιλέγει την καλύτερη προς κάθε προορισμό για τον πίνακα δρομολόγησης. Οι δρομολογητές BGP αναγγέλλουν στους γείτονες τις καλύτερες διαδρομές και τα χαρακτηριστικά τους. Κάθε αναγγελία περιλαμβάνει τη λίστα προορισμών, ως προθέματα δικτύων με τον συμβολισμό CIDR, που είναι προσβάσιμες στο τέλος της διαδρομής. Όταν η αναγγελιζόμενη διαδρομή είναι καλύτερη από τις άλλες στον πίνακα διαδρομών (RIB), ενημερώνεται ο πίνακας δρομολόγησης για το συγκεκριμένο πρόθεμα δικτύου. Οι διαδρομές αναγγέλλονται μία κάθε φορά μέχρις ότου ολοκληρωθεί η ενημέρωση της RIB. Για κάθε αναγγελία διαδρομής που λαμβάνεται γίνεται **έλεγχος της συνδεσιμότητας** της διεύθυνσης του γείτονα (NEXT\_HOP) από την οποία ανακοινώθηκε, αλλιώς δεν ενημερώνεται ο πίνακας δρομολόγησης. Μεταξύ *εξωτερικών συνομιλητών* BGP (eBGP) πρέπει να υπάρχει απευθείας σύνδεση των γειτόνων για να επιτυγχάνει ο

προηγούμενος έλεγχος. Μεταξύ *εσωτερικών συνομιλητών* BGP (iBGP) δεν απαιτείται απευθείας διασύνδεση, όμως όλοι οι iBGP δρομολογητές εντός του ιδίου AS πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους (fully meshed). Για αυτό φροντίζει το εσωτερικό IGP πρωτόκολλο δρομολόγησης (RIP, OSPF). Υπενθυμίζεται ότι ο δρομολογητής, με βάση τη διαχειριστική απόσταση, επιλέγει από τον πίνακα δρομολόγησης αυτή που θα τοποθετήσει στον *πίνακα προώθησης*, Forwarding Information Base – FIB, προσθέτοντας την αναγκαία επιπλέον πληροφορία για την απερχόμενη διεπαφή.

### Εσωτερικές συνδέσεις BGP

Οι εσωτερικές συνδέσεις BGP εντός ενός AS χρησιμοποιούνται συνήθως όταν είναι επιθυμητή η διασύνδεση με ένα γειτονικό AS σε περισσότερα από ένα σημεία (δρομολογητές) ώστε να επιτευχθεί υψηλότερη διαθεσιμότητα ή όταν πολύ απλά οι εξωτερικές συνδέσεις BGP δεν μπορούν να γίνουν στον ίδιο δρομολογητή εξαιτίας φυσικών περιορισμών (π.χ. εξωτερικές συνδέσεις σε διαφορετικές τοποθεσίες). Επιπλέον, ένα AS μπορεί να περιέχει πολλούς συνομιλητές BGP και μπορεί είναι διαβιβαστικό AS για άλλα AS.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αναγγελία των εξωτερικών διαδρομών εντός του ιδίου AS θα μπορούσε να γίνει μέσω αναδιανομής στο πρωτόκολλο IGP. Όμως αυτό δεν συνίσταται διότι το πλήθος των διαδρομών BGP είναι τεράστιο και θα δημιουργούσε προβλήματα ευστάθειας στο εσωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης. Επιπλέον, ο βασικός μηχανισμός του BGP δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγγελία διαδρομών εντός του AS, αφού αυτές θα απορρίπτονταν από τους άλλους δρομολογητές εξ αιτίας της απαίτησης κάθε δρομολογητή να προτάσσει τον δικό του αριθμό ASN στο AS\_PATH.

Αντί αυτού χρησιμοποιείται το Internal BGP (iBGP). Στο iBGP, οι εξωτερικοί συνομιλητές eBGP προωθούν τις διαδρομές που μαθαίνουν στους εσωτερικούς συνομιλητές iBGP χωρίς την προσθήκη του ιδίου ASN στο AS\_PATH. Προκειμένου να μην σχηματισθούν βρόχοι, διαδρομές που έχουν μαθευτεί από κάποιον συνομιλητή iBGP δεν προωθούνται σε άλλους εσωτερικούς συνομιλητές. Έτσι, ενώ το BGP χρησιμοποιείται πάντα ως πρωτόκολλο δρομολόγησης μεταξύ ISP (external BGP), το internal BGP χρησιμοποιείται στο δίκτυο κορμού ενός μεγάλου παρόχου για τη μεταφορά των πινάκων δρομολόγησης εντός του δικτύου του.

Όπως προαναφέρθηκε απαιτείται πλήρης συνδεσιμότητα μεταξύ των συνομιλητών iBGP, ώστε τελικά όλοι να αποκτήσουν την ίδια γνώση για τις διαδρομές. Αυτό σημαίνει ότι κάθε δρομολογητής πρέπει να συνομιλεί με όλους τους άλλους εντός του AS. Η πλήρης συνδεσιμότητα τυπικά επιτυγχάνεται εγκαθιστώντας συνόδους iBGP με χρήση διευθύνσεων διεπαφών loopback που δεν εξαρτώνται από την κατάσταση των άλλων διεπαφών. Το πρωτόκολλο εσωτερικής δρομολόγησης IGP παρέχει την αναγκαία πληροφορία προσβασιμότητας και η χρήση διεπαφών loopback προσδίδει ανθεκτικότητα μιας και είναι πάντα ενεργές. Επειδή το NEXT\_HOP στις συνδέσεις iBGP είναι ο γείτονας του eBGP δρομολογητή από τον οποίο λήφθηκε η αναγγελία, αυτός ο γείτονας θα πρέπει να είναι προσβάσιμος μέσω του IGP πρωτοκόλλου. Έτσι, οι δρομολογητές εντός του AS συντηρούν δύο πίνακες δρομολόγησης, έναν για το χρησιμοποιούμενο IGP (π.χ. RIP, OSPF) και έναν για το iBGP.

### Ανακοίνωση ιδίων προθεμάτων δικτύου

Το BGP ανακοινώνει στους γείτονες (BGP peers) μόνον ό,τι είναι ήδη γνωστό. Έτσι για την ανακοίνωση των ιδίων δικτυακών προθεμάτων ενός AS, ο κανόνας είναι ότι πρέπει να είναι **τοπικώς προσβάσιμα**, δηλαδή να υπάρχει διαδρομή IGP για αυτά ή για κάποιο υποδίκτυό τους, το οποίο σημαίνει ότι προτού ανακοινωθούν πρέπει να βρίσκονται ήδη στον τοπικό πίνακα δρομολόγησης. Εάν είναι εφικτό μαζί με τις ανακοινώσεις γίνεται και σύντμηση (aggregation) των προθεμάτων δικτύου ώστε να μειώνεται το μέγεθος των πινάκων BGP.

### Επιλογή της καλύτερης διαδρομής στο BGP (BGP Best Path Selection Algorithm)

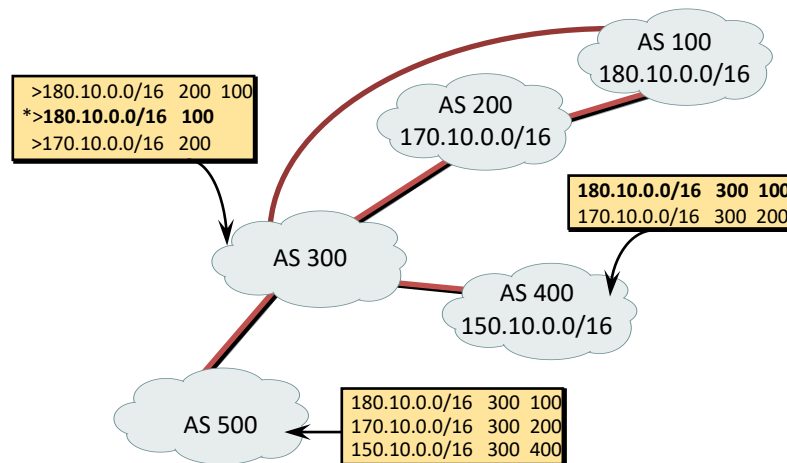
Η RIB μπορεί να περιέχει περισσότερες από μία διαδρομές προς κάποιο πρόθεμα δικτύου. Μερικές από αυτές δεν θα ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής της καλύτερης που περιγράφεται στη συνέχεια. Συγκεκριμένα:

- Αγνοούνται, παρότι εγγράφονται στη RIB, διαδρομές προς δίκτυα για τα οποία το NEXT\_HOP δεν είναι προσβάσιμο (δεν υπάρχει δηλαδή εγγραφή για αυτό στον πίνακα δρομολόγησης).
- Απορρίπτονται και δεν εγγράφονται στη RIB, διαδρομές από γείτονες eBGP εάν το τοπικό αυτόνομο σύστημα εμφανίζεται στο AS\_PATH.

Η διαδικασία επιλογής ξεκινά με την πρώτη έγκυρη διαδρομή που λαμβάνεται να είναι η καλύτερη. Η εκάστοτε καλύτερη συγκρίνεται με την επόμενη διαδρομή για το συγκεκριμένο πρόθεμα δικτύου μέχρι την τελευταία αυτών. Η σύγκριση για την καλύτερη ξεκινώντας από τα ισχυρότερα κριτήρια προς τα πιο αδύναμα είναι:

- Η διαδρομή με το υψηλότερο βάρος (WEIGHT), μετρική με τοπικό χαρακτήρα για τον δρομολογητή. Αφορά μόνο δρομολογητές Cisco και το Quagga/FRR. Οι διαδρομές που πηγαίνουν από τον δρομολογητή έχουν προκαθορισμένη τιμή 32768 και όλες οι άλλες έχουν βάρος 0.
- Η διαδρομή με την υψηλότερη τιμή τοπικής προτίμησης (LOCAL\_PREF) εντός του AS, όπου η τιμή της τοπικής προτίμησης δηλώνει το πόσο επιθυμητή είναι μια διαδρομή για την **απερχόμενη** από το AS κίνηση.
- Η διαδρομή που ορίζεται τοπικά στο AS (locally originated route) σε σχέση με μια που έγινε γνωστή μέσω γείτονα eBGP. Οι διαδρομές που ορίζονται τοπικά έχουν ως επόμενο βήμα το 0.0.0.0 και το Quagga/FRR θέτει αυτόματα σε αυτές βάρος 32768.
- Η διαδρομή με μικρότερο μήκος AS\_PATH. Το BGP εδώ λειτουργεί ως αλγόριθμος DV για κάθε πρόθεμα που λαμβάνει από παραπάνω από μία διαδρομή. Ελέγχει το μήκος των εναλλακτικών διαδρομών με όρους πλήθους ASN, διαλέγει τη συντομότερη, την οποία στη συνέχεια ανακοινώνει στους γείτονες του (δείτε παράδειγμα στο επόμενο σχήμα).
- Η διαδρομή με το μικρότερο τύπο πηγής ORIGIN (όπου IGP < EGP < incomplete).
- Για διαδρομές με το ίδιο πρώτο βήμα AS, η διαδρομή με τη μικρότερη τιμή MED (Multi-Exit Discriminator), εφόσον αυτή έχει τεθεί. Η τιμή MED δηλώνει το πόσο επιθυμητή είναι μια διαδρομή για την **εισερχόμενη** προς το AS κίνηση.
- Η διαδρομή που έγινε γνωστή από γείτονα eBGP σε σχέση με iBGP. Συνέχεια στο βήμα Multipath BGP εάν έγινε επιλογή της βέλτιστης.
- Η διαδρομή με τη χαμηλότερη μετρική IGP (απόσταση) για το NEXT\_HOP. Συνέχεια στο βήμα Multipath BGP ακόμη και εάν έγινε επιλογή της βέλτιστης.
- Multipath BGP: Το BGP τυπικά επιλέγει **μία** μόνο διαδρομή. Εάν επιτρέπονται πολλές διαδρομές, το BGP θα χρησιμοποιήσει αυτές που μπορεί να θεωρηθούν ως ισοδύναμες ώστε να γίνει καταμερισμός φορτίου. Εάν δεν έχει ήδη γίνει επιλογή, συνέχεια στο επόμενο βήμα.
- Από τις διαδρομές eBGP η αρχαιότερη, δηλαδή, αυτή που είναι ήδη εγκατεστημένη στον πίνακα δρομολόγησης.
- Η διαδρομή που έγινε γνωστή από τον δρομολογητή με τη χαμηλότερη Router-ID.
- Η διαδρομή με τη μικρότερη διεύθυνση IP γείτονα. Επειδή δεν είναι δυνατό να υπάρξουν πολλαπλοί γείτονες με την ίδια διεύθυνση IP, η διαδικασία επιλογής θα τερματίσει.





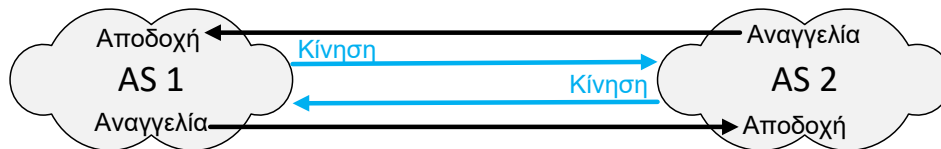
Για περισσότερες λεπτομέρειες δείτε <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/border-gateway-protocol-bgp/13753-25.html>.

### Πολιτική δρομολόγησης (routing policy)

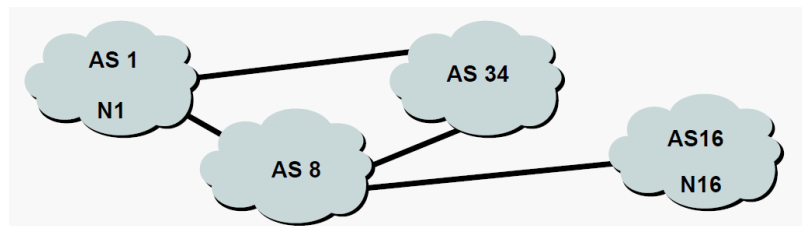
Εκεί που όλα τα άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης ασχολούνται με το να βρουν τη συντομότερη διαδρομή προς όλους τους γνωστούς προορισμούς, το BGP δεν ακολουθεί αυτή την απλοϊκή προσέγγιση. Ένα από τα συστατικά της επιτυχίας του BGP είναι ότι επιτρέπει στον διαχειριστή του AS να εκφράσει μια πολιτική δρομολόγησης (routing policy). Σε απλά λόγια αυτό σημαίνει ότι επιβάλλει περιορισμούς, οι οποίοι μπορεί να προκύπτουν π.χ. από οικονομικές συνθήκες, συμφωνίες διασύνδεσης (peering agreements) μεταξύ ISP, κλπ. Τα εργαλεία για την επιβολή πολιτικών είναι: η λίστα προθεμάτων (prefix-list), το φίλτρο AS (filter-list) και ο χάρτης διαδρομών (route-map). Μέσω αυτών ο διαχειριστής ενός AS μπορεί να δεχθεί ή απορρίψει προθέματα δικτύων, να δεχθεί ή απορρίψει AS και να θέσει χαρακτηριστικά (attributes) που επηρεάζουν την επιλογή διαδρομών. Οι πολιτικές δρομολόγησης χρησιμοποιούνται για να ρυθμίζει ο πάροχος την εισερχόμενη και εξερχόμενη κίνηση αναφορικά με τους γείτονές του. Ο πάροχος αποφασίζει για το ποια πληροφορία δρομολόγησης δέχεται και ποια απορρίπτει από τους γείτονές του. Η πληροφορία μπορεί να αφορά μεμονωμένες διαδρομές, διαδρομές που πηγάζουν από συγκεκριμένα AS, διαδρομές που διασχίζουν συγκεκριμένα AS, διαδρομές που ανήκουν σε συγκεκριμένες ομάδες (που ορίζονται όπως νομίζει ο πάροχος). Για να επηρεάσει την πολιτική δρομολόγησης ο διαχειριστής μπορεί π.χ. να μεταβάλλει τεχνητά το μήκος μιας διαδρομής AS (AS που χρειάζεται να διανυθούν) ώστε να αλλάξει η μετρική για το δίκτυο (του προορισμού). Έτσι η επιλογή της κατάλληλης διαδρομής ρυθμίζεται συνδυαστικά αφενός μεν από τον αλγόριθμο επιλογής βέλτιστης διαδρομής και αφετέρου δε από την εκάστοτε πολιτική δρομολόγησης.

### Ροή κίνησης και ροή δρομολόγησης

Η εξερχόμενη κίνηση (Egress traffic) από ένα AS εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα διαδρομών (τι ανάγγειλαν τα άλλα AS), την αποδοχή τους από το εν λόγω AS, την πολιτική και βελτιστοποίηση (τι κάνει το AS με τις διαδρομές των άλλων) και τις συμφωνίες διασύνδεσης και διαβίβασης (Peering and transit agreements). Αντίστοιχα, η εισερχόμενη κίνηση (Ingress traffic) σε ένα AS εξαρτάται από τη πληροφορία αποστέλλει το AS και σε ποιον, βάσει του δικτυακού προθέματος και αριθμού AS, καθώς και τις πολιτικές των άλλων (τι δέχονται για το εν λόγω AS και τι κάνουν με αυτό). Για να επικοινωνήσει δίκτυο του AS1 με δίκτυο του AS2, το AS1 πρέπει να αναγγέλλει (announce) στο AS2, το AS2 πρέπει να δέχεται (accept) από το AS1, το AS2 πρέπει να αναγγέλλει στο AS1 και το AS1 πρέπει να δέχεται από το AS2. Η ροή της κίνησης (data plane) είναι πάντα αντίθετη από την ροή της πληροφορίας προσβασιμότητας (control plane). Το φιλτράρισμα της εξερχόμενης πληροφορίας σταματά την εισερχόμενη ροή κίνησης. Το φιλτράρισμα της εισερχόμενης πληροφορίας σταματά την εξερχόμενη ροή κίνησης.

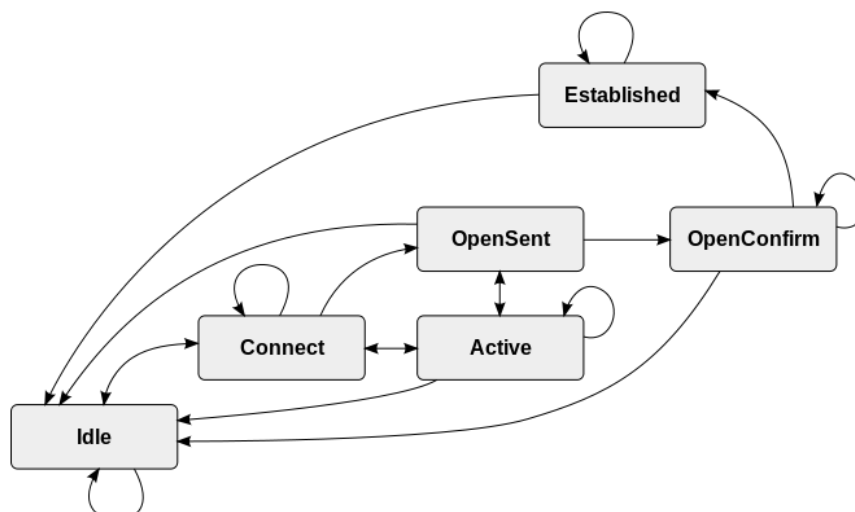


Στο παράδειγμα του επόμενου σχήματος, για να μπορεί το δίκτυο N1 στο AS1 να στέλνει κίνηση στο δίκτυο N16 του AS16, το AS16 πρέπει να αναγγείλει το N16 στον AS8, το AS8 πρέπει να αποδεχτεί το N16 από το AS16 και στη συνέχεια να αναγγείλει το N16 (όχι ως πηγή αυτή φορά) στο AS1 ή στο AS34 και τέλος το AS1 πρέπει να αποδεχθεί το N16 από το AS8 ή το AS34. Για την αντίστροφη κίνηση από το N1 στο N16 πρέπει να γίνει αντίστοιχα αναγγελία και αποδοχή. Δοθέντων των πολλαπλών διαδρομών και διασυνδέσεων, οι πολιτικές δρομολόγησης εύκολα μπορεί να γίνουν εξαιρετικά πολύπλοκες.



### Μηχανή καταστάσεων γειτόνων BGP

Δύο δρομολογητές BGP γίνονται γείτονες αφού εγκαταστήσουν μια σύνδεση TCP μεταξύ των. Η σύνδεση είναι αναγκαία προκειμένου να ξεκινήσει η ανταλλαγή μηνυμάτων δρομολόγησης. Προς τούτο το BGP υλοποιεί ένα μηχανισμό μετάβασης καταστάσεων, ο οποίος καθορίζεται από τις καταστάσεις (states) και τα γεγονότα (events) που μεσολαβούν για την προκαθορισμένη μετάβαση από μια κατάσταση σε μια επόμενη. Οι δρομολογητές BGP περνούν από πολλές καταστάσεις με τους γείτονές τους, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, προτού μπορέσουν να δρομολογήσουν πακέτα. Οποιαδήποτε κατάσταση πλην της *Established* σημαίνει ότι οι δρομολογητές δεν είναι γείτονες και δεν μπορούν να ανταλλάξουν ενημερώσεις BGP.



Στην κατάσταση *Idle*, αναμένεται ένα γεγονός έναρξης BGP και δεν γίνονται δεκτές οι εισερχόμενες συνδέσεις BGP. Στην κατάσταση *Connect*, το BGP περιμένει για μια σύνδεση TCP. Εάν γίνει επιτυχής σύνδεση, το BGP στέλνει το μήνυμα OPEN στον γείτονα και μεταπίπτει στην κατάσταση *OpenSent*. Σε περίπτωση αποτυχίας, μεταβαίνει στην κατάσταση *Active*, παραμένει στην *Connect* ή επιστρέφει στην *Idle*, ανάλογα με την αιτία. Στην κατάσταση *Active*, το BGP προσπαθεί να ξεκινήσει



μια σύνδεση TCP με ένα γείτονα. Εάν γίνει επιτυχής σύνδεση, το BGP στέλνει το μήνυμα OPEN στον γείτονα και μεταπίπτει στην κατάσταση *OpenSent*. Σε περίπτωση αποτυχίας, παραμένει στην *Active* ή επιστρέφει στην *Idle*, ανάλογα με την αιτία. Στην κατάσταση *OpenSent*, το BGP έχει στείλει ένα μήνυμα OPEN και περιμένει απάντηση (OPEN reply) από τον γείτονα. Εάν έρθει απάντηση, το BGP μεταβαίνει στην κατάσταση *OpenConfirm* και στέλνει στον γείτονα ένα μήνυμα KEEPALIVE, διαφορετικά επιστρέφει στην κατάσταση *Active* ή *Idle*. Στην κατάσταση *OpenConfirm*, ο γείτονας έχει απαντήσει στο OPEN και το BGP περιμένει να λάβει μηνύματα KEEPALIVE από αυτόν. Εάν ναι, μεταβαίνει στην κατάσταση *Established*. αλλιώς επιστρέφει στην *Idle*. Στην κατάσταση *Established* έχει επιτευχθεί η σύνδεση των γειτόνων και μπορούν να ανταλλαχθούν μηνύματα UPDATE, KEEPALIVE και NOTIFICATION.

## Μηνύματα BGP

OPEN: ανοίγει σύνδεση TCP προς ομότιμη οντότητα και πιστοποιεί την αυθεντικότητα του αποστολέα. Περιλαμβάνει τα πεδία Version (που καθορίζει την έκδοση, default 4), Autonomous System (ο αριθμός AS του αποστολέα), Hold-Time (ο μέγιστος χρόνος που μπορεί να παρέλθει προτού θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει σύνδεση, τυπικά 180 sec), BGP Identifier (η ταυτότητα του αποστολέα), Optional Parameters Length (ένδειξη παρουσίας ή απουσίας προαιρετικών επιλογών) και Optional Parameters (λίστα προαιρετικών επιλογών π.χ. για ταυτοποίηση).

UPDATE: αναγγέλλει μία νέα διαδρομή ή αποσύρει παλαιά. Περιλαμβάνει τα πεδία Unfeasible Routes Length (μήκος του πεδίου αποσυρόμενων διαδρομών, εάν υπάρχουν), Withdrawn Routes (λίστα των προθεμάτων δικτύου που αποσύρονται), Total Path Attribute Length (μήκος του πεδίου χαρακτηριστικών διαδρομής, εάν υπάρχει), Path Attributes (περιγραφή των χαρακτηριστικών της διαφημιζόμενης διαδρομής που περιλαμβάνει τουλάχιστον τα υποχρεωτικά χαρακτηριστικά ORIGIN, AS\_PATH και NEXT\_HOP) και το Network Layer Reachability Information (NLRI) που περιέχει τη λίστα των προθεμάτων δικτύου που αφορά η διαφημιζόμενη διαδρομή.

KEEPALIVE: διατηρεί ανοικτή τη σύνδεση όταν δεν υπάρχουν μηνύματα UPDATE. Επίσης, επαληθεύει την αίτηση OPEN. Έχει μήκος 152 bit και αποστέλλεται μεταξύ γειτόνων κάθε 60 sec, το 1/3 φορές του διαστήματος hold-time (180 sec).

NOTIFICATION: αναφέρει σφάλματα προηγούμενου μηνύματος. Επίσης, χρησιμοποιείται για το κλείσιμο σύνδεσης.

## Προετοιμασία στο σπίτι

### Οδηγίες εγκατάστασης BGP

Στον εικονικό δρομολογητή BSDRP (router.ona) θα βρείτε το BGP εγκατεστημένο και ενεργό. Ως άσκηση για το σπίτι, ενεργοποιήστε στο FreeBSD 13.2 με το FRR, που δημιουργήσατε στην Εργαστηριακή Άσκηση 8, το πρωτόκολλο δρομολόγησης BGP. Για να ξεκινήσετε τη διεργασία BGP:

1. Κλείστε την υπηρεσία frr με “service frr stop”.
2. Στο αρχείο παραμετροποίησης /etc/rc.conf προσθέστε το bgpd τη γραμμή frr\_daemons=“zebra static ripd ospfd”, ώστε να γίνει frr\_daemons=“zebra staticd ripd ospfd bgpd”.
3. Ξεκινήστε την υπηρεσία frr ξανά με “service frr start”.
4. Κλείστε το εικονικό μηχάνημα με την εντολή poweroff και από τη διαδρομή *File* → *Export Appliance...* στο VirtualBox δημιουργήστε ένα αρχείο ona για χρήση στη συνέχεια.

Στο FRR η παραμετροποίηση του πρωτοκόλλου BGP γίνεται μέσω του ενιαίου περιβάλλοντος που παρέχει το vtysh. Στο Quagga ο πιο απλός τρόπος είναι μέσω του cli (ισοδύναμο με το vtysh).

Εναλλακτικά, στο Quagga, μπορείτε να συνδεθείτε με telnet (στη θύρα 2605 για το BGP), αφού πρώτα ορίσετε συνθηματικό πρόσβασης.

Για την παραμετροποίηση του BGP, θα πρέπει να δώσετε (όντας σε global configuration mode) την εντολή:

**router bgp *ASnumber*** ενεργοποιεί το πρωτόκολλο BGP στον δρομολογητή, θέτει τον αριθμό αυτόνομου συστήματος σε *ASnumber* και οδηγεί σε router configuration mode για περαιτέρω παραμετροποίηση. Στο router configuration mode η προτροπή (prompt) αλλάζει σε:

**routername(config-router)#**

Μπορείτε να επιστρέψετε σε global configuration mode δίνοντας την εντολή **exit**.

Στο επίπεδο Router Configuration Mode μερικές από τις διαθέσιμες εντολές για την παραμετροποίηση BGP είναι:

**network *netaddr*** καθορίζει ότι το δίκτυο με IPv4 διεύθυνση *netaddr* θα διαφημισθεί από το BGP. Σε αντίθεση με την network στα RIP και OSPF δεν ενεργοποιεί το πρωτόκολλο BGP στις αντίστοιχες διεπαφές δικτύου. Το δίκτυο *netaddr* πρέπει να υπάρχει στον τοπικό πίνακα δρομολόγησης, αλλιώς δεν θα αναγγελθεί.

**neighbor *IPaddr* remote-as *ASnumber*** προσθέτει τον γείτονα με διεύθυνση *IPaddr* και αριθμό αυτόνομου συστήματος *ASnumber* στον πίνακα γειτόνων BGP. Ο δρομολογητής πρέπει να έχει διαδρομή προς την *IPaddr* για να μπορέσει να εγκατασταθεί σύννοδος. Όταν λαμβάνει πακέτο BGP για νέα σύννοδο, ελέγχεται εάν η διεύθυνση πηγής αυτού υπάρχει στον πίνακα. Εάν ναι, η σύννοδος εγκαθίσταται, αλλιώς το πακέτο αγνοείται. Εάν ο *ASnumber* είναι ίδιος με αυτόν της εντολής router bgp, η σύννοδος είναι iBGP, αλλιώς είναι eBGP.

**neighbor *IPaddr* next-hop-self** θέτει ως NEXT\_HOP στις αναγγελίες προς τον γείτονα *IPaddr* τον αναγγέλλοντα δρομολογητή.

**neighbor *IPaddr* shutdown** διακόπτει τη σύννοδο με τον γείτονα *IPaddr*.

**bgp router-id *IPaddr*** θέτει ως ταυτότητα του δρομολογητή (Router ID) την IP διεύθυνση *IPaddr*.

**redistribute static, redistribute connected, redistribute rip, redistribute ospf** ανακοινώνει στατικές διαδρομές, συνδεδεμένα δίκτυα, διαδρομές RIP ή διαδρομές OSPF, αντίστοιχα.

**aggregate-address** ορίζει συντμήσεις προθεμάτων δικτύου ώστε να μειώνεται το μέγεθος των πινάκων BGP.

Για πληροφορίες σχετικές με τη δρομολόγηση BGP μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τις εντολές (σε Privileged EXEC Mode):

**show ip bgp** για να δείτε τον πίνακα διαδρομών (RIB) του πρωτοκόλλου BGP.

**show ip route bgp** για να δείτε τις εγγραφές BGP στον πίνακα δρομολόγησης.

**show ip bgp summary** για να δείτε συνοπτικές πληροφορίες για το BGP και τους γείτονες.

**show ip bgp *netaddr*** για να δείτε πληροφορίες για τις διαδρομές προς τον προορισμό *netaddr*.

**show ip bgp neighbors** για να δείτε πληροφορίες για τους γείτονες BGP.

**show ip bgp neighbors *IPaddr*** για να δείτε πληροφορίες για τον γείτονα *IPaddr*.

**show ip bgp neighbors *IPaddr* advertised-routes** για να δείτε τις διαδρομές που ανακοινώνει το BGP στον γείτονα *IPaddr*.

**show ip bgp neighbors *IPaddr* routes** για να δείτε τις διαδρομές που μαθαίνει το BGP από τον γείτονα *IPaddr*.

**clear ip bgp *IPaddr*** για να επανεκκινήσετε τη σύννοδο BGP με τον γείτονα *IPaddr*.

Για την εφαρμογή πολιτικών (policies) στο BGP μερικές από τις διαθέσιμες εντολές είναι:

**neighbor IPaddr prefix-list PrefixListName [in/out]** για την εφαρμογή λίστας προθεμάτων με όνομα *PrefixListName* στον γείτονα με διεύθυνση *IPaddr* κατά την εισερχόμενη (*in*) ή εξερχόμενη (*out*) κατεύθυνση με σκοπό το φιλτράρισμα προθεμάτων δικτύου.

**ip prefix-list PrefixListName (permit/deny) prefix** για να ορίσετε ένα φίλτρο επιτρεπτού (*permit*) ή απαγορευμένου (*deny*) προθέματος δικτύου *prefix* με όνομα *PrefixListName*.

**neighbor IPaddr route-map RouteMapName [in/out]** για την εφαρμογή χάρτη διαδρομών με όνομα *RouteMapName* στον γείτονα με διεύθυνση *IPaddr* κατά την εισερχόμενη (*in*) ή εξερχόμενη (*out*) κατεύθυνση με σκοπό τον ορισμό ή χειρισμό χαρακτηριστικών στοιχείων (*attributes*) των διαδρομών.

**route-map RouteMapName (permit/deny) order** για να ορίσετε την *order* κατά σειρά εγγραφή σε ένα route-map με όνομα *RouteMapName*.

Οι χάρτες διαδρομών υλοποιούν μια δομή τύπου case/switch των γλωσσών προγραμματισμού και επιτρέπουν τον δομημένο τρόπο περιγραφής μιας πολιτικής δρομολόγησης εν είδη ακολουθίας *if else-if ... else*. Η εγγραφή περιέχει (προαιρετικά) κάποιο κριτήριο ταιριάσματος (*match*) και κάποια ενέργεια (*action*). Για κάθε διαδρομή που λαμβάνεται, οι εγγραφές στο route map εξετάζονται για το κατά πόσο ικανοποιείται το κριτήριο ταιριάσματος. Εάν επιτρέπει (*permit*) κάποια ενέργεια και ικανοποιείται το κριτήριο, η ενέργεια αυτή εφαρμόζεται και τερματίζει η επεξεργασία. Εάν απαγορεύει (*deny*) κάποια ενέργεια και ικανοποιείται το κριτήριο, η ενέργεια αυτή δεν εφαρμόζεται και τερματίζει η επεξεργασία. Εάν δεν ικανοποιείται το κριτήριο, είτε επιτρέπεται είτε απαγορεύεται η ενέργεια, εξετάζεται η επόμενη εγγραφή, κοκ., μέχρις ότου εξαντληθούν οι εγγραφές, οπότε τερματίζει με σιωπηλή άρνηση (*implicit deny*). Για παράδειγμα,

```
route-map test permit 10
  match ip address prefix-list mine
  set local-preference 200
```

ορίζει την εγγραφή 10 στο route map με όνομα test όπου εάν η διεύθυνση IP μιας διαδρομής ταιριάζει με κάποιο πρόθεμα της λίστας mine, τότε θα τεθεί η τιμή 200 στη local-preference.

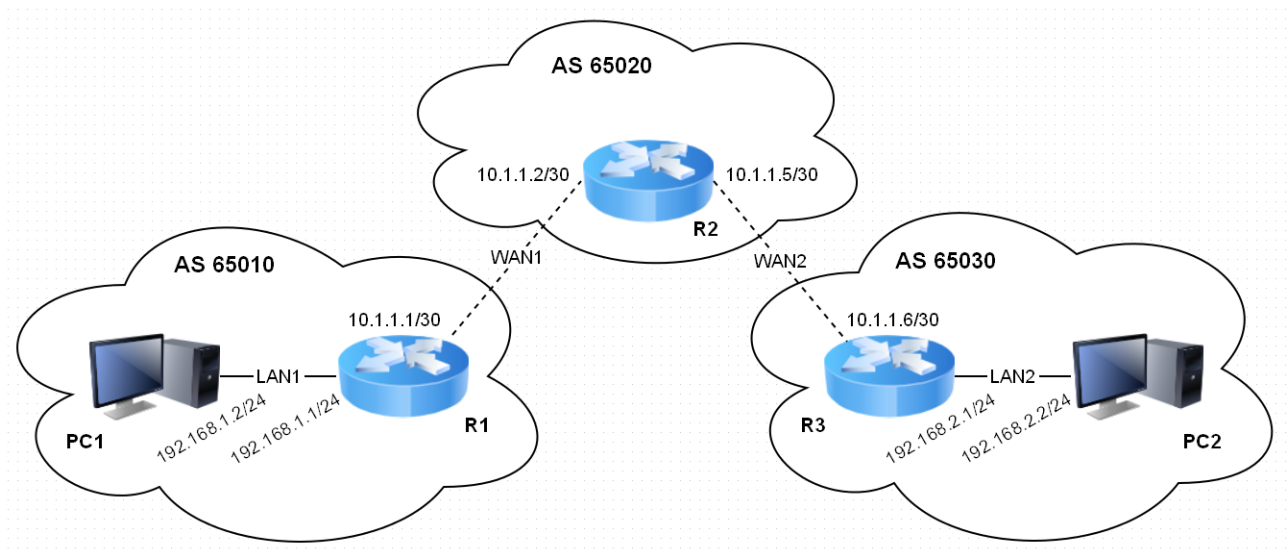
Για τον πλήρη κατάλογο εντολών σχετικών με το πρωτόκολλο BGP δείτε τα εγχειρίδια του Quagga ή FRR: <https://www.nongnu.org/quagga/docs.html> και <https://docs.frrouting.org/en/latest/>.

## Άσκηση 1: Εισαγωγή στο BGP

Κατασκευάστε στο VirtualBox το δίκτυο του επομένου σχήματος χρησιμοποιώντας ως δρομολογητή το BSDRP (router.ova). Για τα PC χρησιμοποιήστε το FreeBSD 13.2 με FRR. *Προσοχή: Καθώς θα κατασκευάζετε τα εικονικά μηχανήματα για τους δρομολογητές που θα απαιτηθούν για την ολοκλήρωση της άσκησης, φροντίστε ώστε οι R1 και R3 να έχουν εξ αρχής 4 διεπαφές και μνήμη τουλάχιστον 384 Mb.*

Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 1.1 Στα PC1 και PC2 μέσω vtysh ορίστε το όνομα, τη διεύθυνση IP και προεπιλεγμένη διαδρομή.
- 1.2 Στα R1, R2 και R3 ορίστε μέσω cli το όνομα και τις διευθύνσεις IP των διεπαφών τους.
- 1.3 Στον R1 εμφανίστε τον πίνακα δρομολόγησης μέσω cli και βεβαιωθείτε ότι δεν υπάρχει καμία στατική εγγραφή.
- 1.4 Στον R1 αφού εισέλθετε στο επίπεδο global configuration mode δείτε εάν είναι διαθέσιμο το πρωτόκολλο δρομολόγησης BGP στο Quagga.
- 1.5 Εισέλθετε στο router configuration mode για το πρωτόκολλο BGP, ορίζοντας AS 65010.
- 1.6 Χρησιμοποιήστε τη βοήθεια ώστε να βρείτε πόσες είναι οι διαθέσιμες εντολές.
- 1.7 Ορίστε ως γείτονα στο AS 65020 τον R2.



- 1.8 Αναγγείλτε το δίκτυο 192.168.1.0/24.
- 1.9 Βγείτε από το configuration mode και περιμένετε περίπου ένα λεπτό. Έχει αλλάξει κάτι στον πίνακα δρομολόγησης του R1;
- 1.10 Εμφανίστε τον πίνακα διαδρομών (RIB) του BGP στους R1 και R2. Τι παρατηρείτε;
- 1.11 Στον R2 εισέλθετε στο router configuration mode για το πρωτόκολλο BGP, ορίζοντας AS 65020.
- 1.12 Ορίστε τον R1 ως γείτονα στο AS 65010 και τον R3 ως γείτονα στο 65030.
- 1.13 Βγείτε από το configuration mode και περιμένετε περίπου ένα λεπτό. Έχει αλλάξει κάτι στις RIB του BGP των R2 και R1; Αιτιολογήστε.
- 1.14 Εμφανίστε τον πίνακα δρομολόγησης στον R3. Υπάρχει διαδρομή για το 192.168.1.0/24;
- 1.15 Στον R3 εισέλθετε στο router configuration mode για το πρωτόκολλο BGP, ορίζοντας AS 65030.
- 1.16 Ορίστε ως γείτονα στο AS 65020 τον R2.
- 1.17 Αναγγείλτε το δίκτυο 192.168.2.0/24.
- 1.18 Βγείτε από το configuration mode και περιμένετε περίπου ένα λεπτό. Τι έχει αλλάξει στις RIB του BGP των R1, R2 και R3;
- 1.19 Δείτε τον πίνακα δρομολόγησης στον R2. Πώς ξεχωρίζουν οι εγγραφές που πρόσθεσε το πρωτόκολλο BGP;
- 1.20 Πώς δηλώνονται οι εγγραφές που έχουν επιλεγεί και εισαχθεί στον πίνακα προώθησης FIB για κάποιον προορισμό;
- 1.21 Ποια είναι η διαχειριστική απόσταση (administrative distance) των διαδρομών BGP;
- 1.22 Δείτε μόνο τις εγγραφές BGP στον πίνακα δρομολόγησης του R1; Πόσες βλέπετε;
- 1.23 Δείτε τον πίνακα διαδρομών (RIB) του BGP. Πόσες εγγραφές βλέπετε και ποια επιπλέον πληροφορία εμφανίζεται για αυτές σε σχέση με τον πίνακα δρομολόγησης;
- 1.24 Καταγράψτε τα NEXT\_HOP, WEIGHT και το AS\_PATH για τα δίκτυα 192.168.1.0/24 και 192.168.2.0/24.
- 1.25 Δικαιολογήστε την τιμή για το βάρος (WEIGHT) των ως άνω εγγραφών.
- 1.26 Τι παριστάνει το γράμμα i στο τέλος του AS\_PATH;
- 1.27 Εξέλθετε από το Quagga και εμφανίστε τον πίνακα δρομολόγησης όπως τον αντιλαμβάνεται το λειτουργικό σύστημα. Μπορείτε να καταλάβετε αν κάποια εγγραφή είναι δυναμική;
- 1.28 Επικοινωνεί το PC1 με το PC2;

## Άσκηση 2: Λειτουργία του BGP

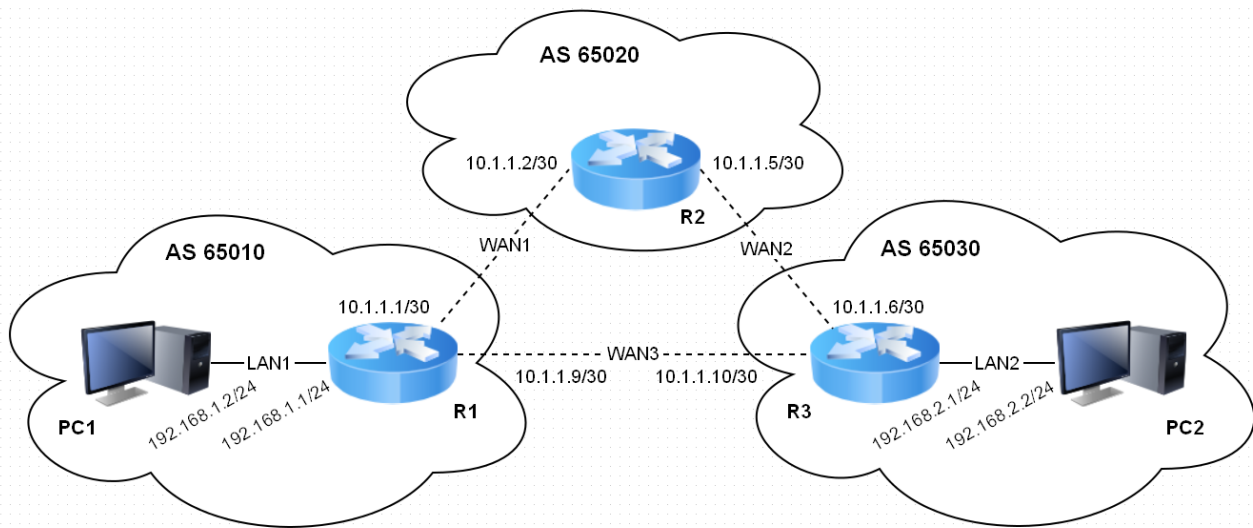
Θα χρησιμοποιήσετε την τοπολογία της προηγούμενης άσκησης για να δείτε πιο αναλυτικά τη λειτουργία του BGP.

Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 2.1 Πώς μπορείτε να καταλάβετε αν η σύννοδος BGP είναι external ή internal με τη βοήθεια της εντολής `show ip bgp neighbors`;
- 2.2 Πώς μπορείτε από το αποτέλεσμα της παραπάνω εντολής να καταλάβετε την κατάσταση της συνόδου BGP;
- 2.3 Ανοίξτε με Alt+F2 ένα νέο παράθυρο εντολών στον R1 και ξεκινήστε καταγραφή πακέτων με το tcpdump στη διεπαφή του στο WAN1, εμφανίζοντας λεπτομερείς πληροφορίες για τα πακέτα χωρίς επίλυση ονομάτων και περιμένετε τουλάχιστον ένα λεπτό.
- 2.4 Τι είδους μηνύματα BGP παρατηρείτε;
- 2.5 Ποιο πρωτόκολλο μεταφοράς και ποια θύρα χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο BGP; Συγκρίνετε με την αντίστοιχη πληροφορία που δίνει η εντολή `show ip bgp neighbors`.
- 2.6 Πόσο συχνά βλέπετε τα μηνύματα BGP; Συγκρίνετε αυτό το χρόνο με το αποτέλεσμα της εντολής `show ip bgp neighbors`.
- 2.7 Ποιο είναι το TTL των πακέτων IP για τα μηνύματα BGP που βλέπετε;
- 2.8 Στον R2 με τη βοήθεια της εντολής `show ip bgp summary` βρείτε το Router-ID; Γιατί έχει την τιμή που παρατηρείτε;
- 2.9 Πόση μνήμη καταναλώνεται για κάθε εγγραφή στην RIB του BGP;
- 2.10 Ποιο είναι το Router-ID του R1; Πώς το βρήκατε;
- 2.11 Ορίστε ως διεύθυνση loopback την 172.17.17.1/32. Ποιο είναι το Router-ID του R1 τώρα;
- 2.12 Ακυρώστε τη διεύθυνση loopback. Επανέρχεται το προηγούμενο Router-ID;
- 2.13 Με ποια εντολή μπορεί να ρυθμιστεί το Router-ID χειροκίνητα;
- 2.14 Ανοίξτε με Alt+F2 ένα νέο παράθυρο εντολών στον R2 και ξεκινήστε μια νέα καταγραφή στη διεπαφή του στο WAN1 εμφανίζοντας λεπτομερείς πληροφορίες μόνο για τα μηνύματα BGP που στέλνει ο R2 χωρίς επίλυση ονομάτων και αφήστε την να τρέχει.
- 2.15 Στον R3 διαγράψτε το δίκτυο 192.168.2.0/24 από το BGP.
- 2.16 Ποιο νέο είδος μηνύματος BGP βλέπετε στην καταγραφή;
- 2.17 Υπήρξε καθυστέρηση στην παραγωγή του και στην συνακόλουθη ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης του R1;
- 2.18 Στον R3 αναγγείλτε και πάλι το 192.168.2.0/24.
- 2.19 Υπήρξε καθυστέρηση στην ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης του R1;
- 2.20 Συγκρίνετε με την αντίστοιχη πληροφορία που δίνει η εντολή `show ip bgp neighbors`.
- 2.21 Με ποιο μήνυμα BGP έγινε η αναγγελία της νέας διαδρομής;
- 2.22 Ποια χαρακτηριστικά (attributes) διαδρομής μεταφέρει το μήνυμα αυτό, ποιες οι τιμές τους και ποια η λίστα προθεμάτων δικτύου;

## Άσκηση 3: Χαρακτηριστικά διαδρομών BGP

Στην παραπάνω τοπολογία δικτύου προσθέστε τη διασύνδεση WAN3, σύμφωνα με το σχήμα. Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.



- 3.1 Στους R1 και R3 ορίστε μέσω cli τη διεύθυνση IP για το WAN3.
- 3.2 Μέσω ποιας διαδρομής επικοινωνεί το PC1 με το PC2;
- 3.3 Ορίστε μέσω cli στη διεπαφή loopback του R1 τη διεύθυνση IP 172.17.17.1/32.
- 3.4 Ορίστε μέσω cli στη διεπαφή loopback του R2 τη διεύθυνση IP 172.17.17.2/32.
- 3.5 Ορίστε μέσω cli στη διεπαφή loopback του R3 τη διεύθυνση IP 172.17.17.3/32.
- 3.6 Εισέλθετε στο router configuration mode των R1, R2 και R3 για το πρωτόκολλο BGP και αναγγείλτε αντίστοιχα τα 172.17.17.1/32, 172.17.17.2/32 και 172.17.17.3/32.
- 3.7 Ποιοι είναι οι γείτονες BGP του R1;
- 3.8 Για ποια δίκτυα μαθαίνει διαδρομές ο R1 μέσω BGP και ποια τα NEXT\_HOP;
- 3.9 Ποιοι είναι οι γείτονες BGP του R2;
- 3.10 Για ποια δίκτυα μαθαίνει διαδρομές ο R2 μέσω BGP και ποια τα NEXT\_HOP;
- 3.11 Ποιοι είναι οι γείτονες BGP του R3;
- 3.12 Για ποια δίκτυα μαθαίνει διαδρομές ο R3 μέσω BGP και ποια τα NEXT\_HOP;
- 3.13 Στον R3, σε νέο παράθυρο εντολών, ξεκινήστε μια καταγραφή πακέτων με το tcpdump στη διεπαφή του στο WAN3 εμφανίζοντας λεπτομερείς πληροφορίες για τα πακέτα χωρίς επίλυση ονομάτων και αφήστε την να τρέχει.
- 3.14 Στον R1 ορίστε ως γείτονα BGP στο AS 65030 τον R3.
- 3.15 Έχουν αλλάξει οι γείτονες BGP στους R1 και R3;
- 3.16 Είναι διαθέσιμη για δρομολόγηση μέσω BGP η διαδρομή μεταξύ R1 και R3;
- 3.17 Σε ποια κατάσταση βρίσκεται η σύνοδος BGP του R1 με τον R3;
- 3.18 Ποια ένδειξη για το AS 65030 υπάρχει στον R1; [Υποδ. *show ip bgp summary*]
- 3.19 Ποιο νέο είδος μηνύματος BGP σχετικό με την εγκατάσταση συνόδου BGP βλέπετε στην καταγραφή;
- 3.20 Κάθε πότε επαναλαμβάνεται; Πώς απαντά ο R3 όταν το λαμβάνει;
- 3.21 Σταματήστε την καταγραφή. Έχει εγκατασταθεί μόνιμη σύνδεση TCP μεταξύ R1 και R3;
- 3.22 Στον R1, σε νέο παράθυρο εντολών, ξεκινήστε μια καταγραφή πακέτων με το tcpdump στη διεπαφή του στο WAN3 εμφανίζοντας λεπτομερείς πληροφορίες για τα πακέτα χωρίς επίλυση ονομάτων και αφήστε την να τρέχει.
- 3.23 Στον R3 ορίστε ως γείτονα BGP στο AS 65010 τον R1.
- 3.24 Σε ποια κατάσταση βρίσκεται η σύνοδος BGP του R1 με τον R3;



- 3.25 Είναι τώρα διαθέσιμη για δρομολόγηση μέσω BGP η διαδρομή μεταξύ R1 και R3;
- 3.26 Ποιες νέες διαδρομές προστέθηκαν στην RIB του R3;
- 3.27 Μέσω ποιας διαδρομής επικοινωνεί τώρα το PC1 με το PC2;
- 3.28 Σταματήστε την καταγραφή. Τι διαφορετικό παρατηρείτε σχετικά με τα μηνύματα BGP που ανταλλάχθηκαν για την εγκατάσταση συνόδου μεταξύ των R1 και R3;
- 3.29 Ποια άλλα μηνύματα BGP παρατηρήσατε με την εγκατάσταση της συνόδου;
- 3.30 Για κάθε μήνυμα BGP UPDATE που έστειλε ο R1 καταγράψτε τα δίκτυα που διαφημίζει και το AS\_PATH των διαδρομών προς αυτά.
- 3.31 Ποιες από τις προηγούμενες διαδρομές αγνοήθηκαν από τον R3 και γιατί;
- 3.32 Στον R1 βρείτε πληροφορίες για διαδρομές προς τον προορισμό 172.17.17.2/32. Πόσες διαδρομές υπάρχουν προς αυτόν; Ποια είναι η καλύτερη;
- 3.33 Ποια είναι τα NEXT\_HOP, ORIGIN, AS\_PATH και Local Preference αυτών;
- 3.34 Ποιο από τα κριτήρια επιλογής μεταξύ διαφορετικών διαδρομών καθορίζει την καλύτερη διαδρομή προς τον 172.17.17.2/32;
- 3.35 Στον R1 ξεκινήστε μια καταγραφή πακέτων με το tcpdump στη διεπαφή του στο WAN3 χωρίς επίλυση ονομάτων και εμφανίζοντας λεπτομερείς πληροφορίες μόνο για τα μηνύματα BGP που στέλνει ο R3 χωρίς επίλυση ονομάτων και αφήστε την να τρέχει.
- 3.36 Στον R3 ξεκινήστε αντίστοιχη καταγραφή πακέτων στη διεπαφή του στο WAN2 μόνο για τα μηνύματα BGP που στέλνει ο R2.
- 3.37 Στον R2 διαγράψτε την αναγγελία για το 172.17.17.2/32.
- 3.38 Ποιο μήνυμα BGP παράχθηκε και τι είδους πληροφορία μεταφέρει;
- 3.39 Στον R2 αναγγείλτε πάλι το 172.17.17.2/32.
- 3.40 Ποια είναι τα ORIGIN, AS\_PATH και NEXT\_HOP στα μηνύματα BGP UPDATE σχετικά με τη διαδρομή προς το 172.17.17.2/32 που καταγράψατε;
- 3.41 Στον R2 ορίστε στατική διαδρομή προς το δίκτυο 5.5.5.0/24 μέσω της loopback του.
- 3.42 Σε router configuration mode για το πρωτόκολλο BGP δώστε την κατάλληλη εντολή ώστε να γνωστοποιηθεί (redistribute) η διαδρομή αυτή στο BGP.
- 3.43 Ποιο είναι το ORIGIN στα μηνύματα BGP UPDATE που καταγράψατε;
- 3.44 Σταματήστε τις καταγραφές. Με ποιο τρόπο εμφανίζεται η πληροφορία για τον τύπο πηγής ORIGIN στην RIB του BGP όσον αφορά τη διαδρομή προς το 5.5.5.0/24;

#### **Άσκηση 4: Εφαρμογή πολιτικών στο BGP**

Στο BGP οι αποφάσεις δρομολόγησης μπορεί να βασίζονται στη διαδρομή AS, στα προθέματα δικτύου ή σε χαρακτηριστικά (attributes). Για τον σκοπό αυτό ορίζονται και εφαρμόζονται πολιτικές (policies). Όπως αναφέρθηκε τα εργαλεία για τον ορισμό πολιτικών συνίστανται στον ορισμό λιστών Prefix-list για το φιλτράρισμα προθεμάτων δικτύου, Filter-list για το φιλτράρισμα AS καθώς και χαρτών διαδρομών Route-map για τον χειρισμό των χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια θα εφαρμόσετε μια απλή πολιτική βασισμένη σε φιλτράρισμα προθεμάτων δικτύων.

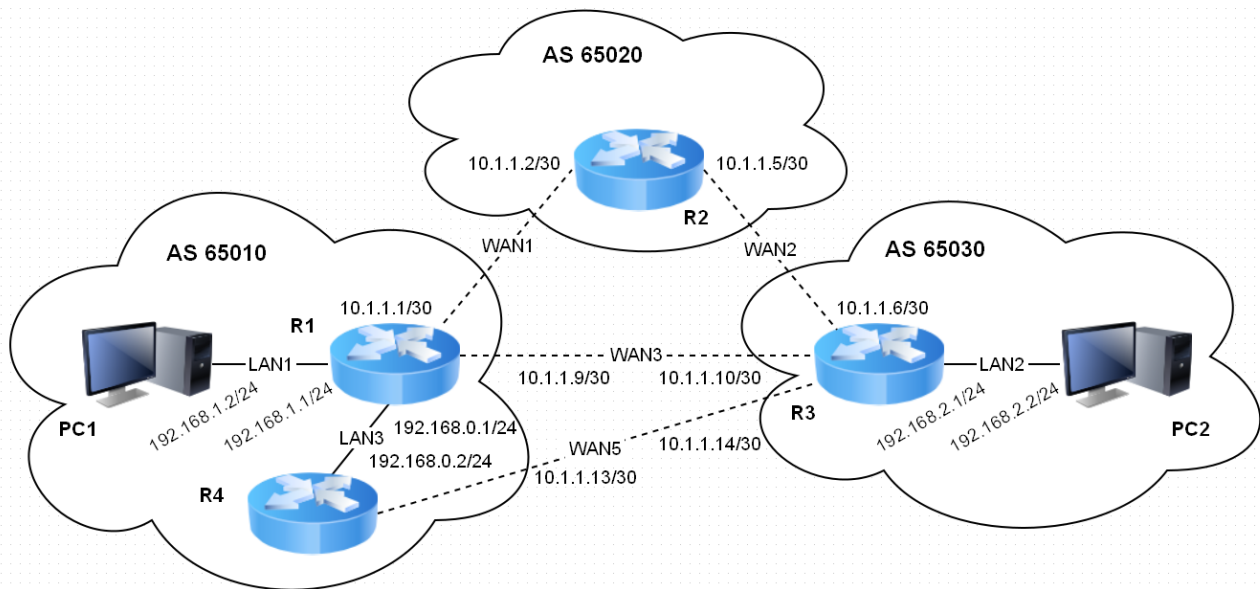
Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 4.1 Καταγράψτε στον R1 τις διαδρομές της RIB προς το 192.168.2.0/24.
- 4.2 Αντίστοιχα στον R3 για τις διαδρομές της RIB προς το 192.168.1.0/24.
- 4.3 Καταγράψτε στον R2 τις διαδρομές της RIB προς τα 192.168.1.0/24 και 192.168.2.0/24.

- 4.4 Με ποια εντολή μπορείτε να δείτε τις διαδρομές που διαφημίζει ο R1 στον R3; Καταγράψτε τις.
- 4.5 Με ποια εντολή μπορείτε να δείτε τις διαδρομές που μαθαίνει ο R1 από τον R3; Καταγράψτε τις.
- 4.6 Στον R1, σε global configuration mode, με τη βοήθεια της εντολής ip prefix-list ορίστε λίστα προθεμάτων με όνομα “geitones\_in” όπου δηλώνεται ως ανεπιθύμητο (deny) το δίκτυο 192.168.2.0/24.
- 4.7 Με τον ίδιο τρόπο προσθέστε στη λίστα “geitones\_in” εγγραφή που επιτρέπει (permit) ανακοινώσεις για όλα τα άλλα δίκτυα (any).
- 4.8 Στον R1, αφού εισέλθετε σε router configuration mode για το πρωτόκολλο BGP, εφαρμόστε στον γείτονα 10.1.1.10 την prefix-list με όνομα “geitones\_in” κατά την εισερχόμενη (in) κατεύθυνση με σκοπό το φιλτράρισμα εισερχόμενων αγγελιών για το 192.168.2.0/24. [Υποδ. Δείτε υποεντολές της neighbor IPaddr.]
- 4.9 Χωρίς να βγείτε από το router configuration mode του R1, δείτε εάν έχει αλλάξει η RIB του BGP για το δίκτυο 192.168.2.0/24.
- 4.10 Για να ενεργοποιηθεί το φιλτράρισμα εισερχόμενων αγγελιών από τον 10.1.1.10 θα πρέπει να επανεκκινήσετε τη σύνοδο BGP με τον 10.1.1.10 εκτελώντας την εντολή “do clear ip bgp 10.1.1.10”. Εάν δεν χρησιμοποιούσατε το do, τι θα έπρεπε να έχετε κάνει προκειμένου να γίνει δεκτή η εντολή clear;
- 4.11 Περιμένετε λίγο για να διαδοθούν οι αλλαγές. Ποια αλλαγή έγινε στις διαδρομές που μαθαίνει ο R1 από τον R3;
- 4.12 Ποια αλλαγή έγινε στις διαδρομές που διαφημίζει ο R1 στον R3;
- 4.13 Τι άλλαξε στην RIB του R1 για τη διαδρομή προς το LAN2;
- 4.14 Τι άλλαξε στην RIB του R2 για τη διαδρομή προς το LAN2;
- 4.15 Μέσω ποιας διαδρομής επικοινωνεί τώρα το PC1 με το PC2; [Υποδ. Δείτε έξοδο εντολής ping -R.]
- 4.16 Επηρεάζει η προηγούμενη αλλαγή τη διαδρομή της εισερχόμενης κίνησης προς το AS 65010 από το δίκτυο 192.168.2.0/24;
- 4.17 Στον R1 ορίστε λίστα προθεμάτων με όνομα “geitones\_out” όπου δηλώνεται ως ανεπιθύμητο (deny) το δίκτυο 192.168.1.0/24.
- 4.18 Όπως πριν προσθέστε στη λίστα “geitones\_out” εγγραφή που επιτρέπει (permit) ανακοινώσεις για όλα τα άλλα δίκτυα (any).
- 4.19 Στον R1 εφαρμόστε την prefix-list με όνομα “geitones\_out” στον γείτονα 10.1.1.10 για την εξερχόμενη (out) κατεύθυνση με σκοπό το φιλτράρισμα εξερχόμενων αγγελιών για το 192.168.1.0/24.
- 4.20 Επανεκκινήστε τη σύνοδο BGP όπως στην ερώτηση 4.10 και περιμένετε λίγο για να διαδοθούν οι αλλαγές.
- 4.21 Ποια αλλαγή έγινε στις διαδρομές που διαφημίζει ο R1 στον R3;
- 4.22 Ποια αλλαγή έγινε στις διαδρομές που μαθαίνει ο R1 από τον R3;
- 4.23 Τι άλλαξε στην RIB του R3 για τη διαδρομή προς το LAN1;
- 4.24 Τι άλλαξε στην RIB του R2 για τη διαδρομή προς το LAN1;
- 4.25 Μέσω ποιας διαδρομής επικοινωνεί τώρα το PC1 με το PC2;
- 4.26 Αφαιρέστε τα προηγούμενα φίλτρα και επανεκκινήστε την σύνοδο BGP ώστε να επανέλθετε στην αρχική κατάσταση.

## Άσκηση 5: iBGP

Προσθέστε στο δίκτυο της προηγούμενης άσκησης ένα νέο δρομολογητή R4, σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα. Εάν δεν έχετε δώσει μνήμη 384 Mb στους R1 και R3, θα πρέπει να το κάνετε τώρα. Αποθηκεύστε τη διάρθρωση των R1 και R3 με την εντολή *write* στο cli και μετά από γραμμή εντολών με *config save*. Αφού κλείσετε τα VM, αυξήστε την μνήμη και επανεκκινήστε τα.



Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 5.1 Ορίστε μέσω cli του R4 το όνομα και τις διευθύνσεις IP των διεπαφών του στα LAN3 και WAN5.
- 5.2 Ορίστε μέσω cli στη διεπαφή loopback του R4 τη διεύθυνση IP 172.17.17.4/32.
- 5.3 Ορίστε μέσω cli του R1 τη διεύθυνση IP για το LAN3.
- 5.4 Ορίστε μέσω cli του R3 τη διεύθυνση IP για το WAN5.
- 5.5 Εισέλθετε στο router configuration mode του R4 για το πρωτόκολλο BGP, ορίζοντας AS 65010.
- 5.6 Στον R4 ορίστε τον R1 ως γείτονα στο ίδιο AS, καθορίζοντας έτσι σύνοδο τύπου iBGP και αναγγείλτε το 172.17.17.4/32.
- 5.7 Στον R1 ορίστε τον R4 ως γείτονα BGP στο ίδιο AS.
- 5.8 Στον R1 πώς μπορείτε να καταλάβετε από το αποτέλεσμα της εντολής “*show ip bgp neighbors 192.168.0.2*” εάν η σύνοδος BGP είναι external ή internal;
- 5.9 Για ποια δίκτυα έχει μάθει ο R4 διαδρομές από τον R1 και τις έχει περιλάβει στην RIB; Ποιο είναι το αντίστοιχο NEXT\_HOP;
- 5.10 Για ποια δίκτυα έχει μάθει ο R1 διαδρομές από τον R4 και τις έχει περιλάβει στην RIB; Ποιο είναι το αντίστοιχο NEXT\_HOP;
- 5.11 Πώς διακρίνετε στην RIB τις διαδρομές που έγιναν γνωστές μέσω iBGP;
- 5.12 Για τις εν λόγω διαδρομές έχουν τεθεί ρητά τιμές για τα Metric και Local Preference; Εάν ναι, ποιες είναι;
- 5.13 Διαδρομές προς ποια εκ των δικτύων της ερώτησης 5.9 έχουν εισαχθεί στον πίνακα δρομολόγησης του R4;

- 5.14 Διαδρομές προς ποια δίκτυα δεν έχουν εισαχθεί πίνακα δρομολόγησης του R4; Εξηγήστε τον λόγο με βάση το αποτέλεσμα της 5.9. [Υποδ. Δείτε παράγραφο για επιλογή καλύτερης διαδρομής.]
- 5.15 Προσθέστε στατική εγγραφή στον R4 για το 10.1.1.8/30 μέσω του R1 και περιμένετε λίγο.
- 5.16 Έχει τοποθετηθεί τώρα το δίκτυο 192.168.2.0/24 στον πίνακα δρομολόγησης του R4; Πώς εμφανίζεται η πληροφορία για το επόμενο βήμα;
- 5.17 Έχουν εισαχθεί όλα τα υπόλοιπα δίκτυα της ερώτησης 5.14 στον πίνακα δρομολόγησης του R4; Εάν όχι, εξηγήστε τον λόγο;
- 5.18 Στον R1 ορίστε ότι στις διαφημίσεις του προς τον R4 το επόμενο βήμα είναι ο εαυτός του και περιμένετε λίγο.
- 5.19 Τι έχει αλλάξει στον πίνακα δρομολόγησης του R4; Ποιο είναι το επόμενο βήμα για τις διαδρομές iBGP;
- 5.20 Ποια είναι η διαχειριστική απόσταση των διαδρομών BGP στον πίνακα δρομολόγησης του R4; Γιατί διαφέρει από αυτήν της ερώτησης 1.21; [Υποδ. Αναζητήστε *administrative distance* στο διαδίκτυο].
- 5.21 Μπορείτε από τον R4 να κάνετε ping τη διεπαφή του R1 στο WAN3;
- 5.22 Μπορείτε από τον R4 να κάνετε ping τη διεπαφή του R3 στο WAN3; Γιατί;
- 5.23 Στο BGP του R1 διαφημίστε το δίκτυο 192.168.0.0/24 και περιμένετε περίπου ένα λεπτό.
- 5.24 Μπορείτε τώρα από τον R4 να κάνετε ping τη διεπαφή του R3 στο WAN3;
- 5.25 Στο BGP του R1 συνοψίστε τα δικτυακά προθέματα των LAN1 και LAN3 σε 192.168.0.0/23.
- 5.26 Περιμένετε περίπου ένα λεπτό και εμφανίστε την RIB του R3. Πόσες σχετικές με το δίκτυο 192.168.0.0/23 ή τα υποδίκτυά του εγγραφές βλέπετε;
- 5.27 Στον R1 αλλάξτε την εντολή της ερώτησης 5.25 προσθέτοντας την επιλογή *summary-only* στο τέλος.
- 5.28 Περιμένετε περίπου ένα λεπτό και εμφανίστε την RIB του R3. Πόσες σχετικές με το δίκτυο 192.168.0.0/23 εγγραφές βλέπετε;
- 5.29 Αφαιρέστε τη σχετική με το *aggregate-address* εντολή από τον R1.
- 5.30 Στον R4, σε νέο παράθυρο εντολών, ξεκινήστε καταγραφή των μηνυμάτων BGP στη διεπαφή του στο LAN3, εμφανίζοντας λεπτομερείς πληροφορίες χωρίς επίλυση ονομάτων και περιμένετε τουλάχιστον ένα λεπτό.
- 5.31 Ποιο είναι το TTL των πακέτων IP για τα μηνύματα BGP που βλέπετε; Γιατί διαφέρει από αυτό που βρήκατε στην ερώτηση 2.7;

## Άσκηση 6: Περισσότερα περί πολιτικών στο BGP

Υπάρχουν δύο απευθείας διαδρομές από το AS65010 προς το AS65030 και το BGP μπορεί να χρησιμοποιήσει αμφότερες. Στη συνέχεια θα δείτε πώς γίνεται η επιλογή της καλύτερης εξ αυτών όταν ενεργοποιηθεί η γειτνίαση μεταξύ R3 και R4.

Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 6.1 Ορίστε στον R4 τον R3 ως γείτονα BGP και αντίστροφα.
- 6.2 Στον R4 ορίστε ότι αναγγέλλει ως επόμενο βήμα στις διαφημίσεις του προς τον R1 τον εαυτό του.

- 6.3 Πόσες διαδρομές προς το δίκτυο 192.168.2.0/24 έχει η RIB του R1 και ποια εξ αυτών έχει τοποθετηθεί στον πίνακα δρομολόγησης;
- 6.4 Γιατί επιλέχθηκε αυτή η συγκεκριμένη διαδρομή από τον R1; [*Υποδ. Συμβουλευθείτε τα κριτήρια επιλογής μεταξύ διαφορετικών διαδρομών.*]
- 6.5 Πόσες διαδρομές προς το δίκτυο 192.168.2.0/24 έχει η RIB του R4 και ποια εξ αυτών έχει τοποθετηθεί στον πίνακα δρομολόγησης;
- 6.6 Γιατί επιλέχθηκε αυτή η συγκεκριμένη διαδρομή από τον R4;
- 6.7 Πόσες διαδρομές προς το δίκτυο 172.17.17.2/32 έχει η RIB του R4 και ποια εξ αυτών έχει τοποθετηθεί στον πίνακα δρομολόγησης;
- 6.8 Γιατί επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διαδρομή από τον R4;
- 6.9 Πόσες διαδρομές προς το δίκτυο 192.168.1.0/24 έχει η RIB του R3 και ποια εξ αυτών έχει τοποθετηθεί στον πίνακα δρομολόγησης;
- 6.10 Γιατί επιλέχθηκε αυτή η συγκεκριμένη διαδρομή από τον R3; [*Υποδ. “show ip bgp 192.168.1.0/24”.*]
- 6.11 Στον R1 επανεκκινήσετε τη σύνοδο BGP με τον R3 και περιμένετε λίγο. Τι άλλαξε στον R3 για τις διαδρομές προς το δίκτυο 192.168.1.0/24;
- 6.12 Στον R4 επανεκκινήσετε τη σύνοδο BGP με τον R3. Ποια είναι τώρα στον R3 η διαδρομή προς το δίκτυο 192.168.1.0/24;

Έστω ότι η σύνδεση στο WAN3 έχει μεγαλύτερο κόστος μεταφοράς δεδομένων από ότι στο WAN5. Μπορείτε να επηρεάσετε την επιλογή των διαδρομών από το AS 65010 προς το AS 65030 με τη βοήθεια *χαρτών διαδρομών*. Προς τούτο θα ορίσετε μια λίστα προθεμάτων (prefix-list) για τα δίκτυα του AS65030 και θα θέσετε σε αυτά κατάλληλη τιμή της τοπικής προτίμησης (Local-Preference), ώστε ο R1 να αποφεύγει τη δρομολόγηση μέσω του R3.

- 6.13 Στον R4, σε global configuration mode, ορίστε λίστα προθεμάτων με όνομα “AS65030” όπου δηλώνονται ως επιτρεπόμενα (permit) τα δίκτυα 192.168.2.0/24 και 172.17.17.3/32.
- 6.14 Στη συνέχεια ορίστε route-map με όνομα set-locpref που να επιτρέπει (permit) μια ενέργεια στη σειρά εγγραφής 10.
- 6.15 Μετά ορίστε ως κριτήριο ταιριάσματος (match) να περιέχεται η διεύθυνση IP μιας διαδρομής στη λίστα AS65030. [*Υποδ. Δείτε παράδειγμα προηγούμενως.*]
- 6.16 Ακολούθως, ορίστε ως ενέργεια να τεθεί τιμή μεγαλύτερη του default (100), π.χ. 150, στην παράμετρο local-preference και εξέλθετε με exit.
- 6.17 Τέλος, ορίστε στο route-map με όνομα set-locpref τη σειρά εγγραφής 20 που να επιτρέπει (permit) μια ενέργεια και εξέλθετε (χωρίς κριτήριο ταιριάσματος και ενέργεια).
- 6.18 Στον R4, σε router configuration mode για το πρωτόκολλο BGP, εφαρμόστε στον γείτονα 10.1.1.14 το route-map με όνομα “set-locpref” κατά την εισερχόμενη (in) κατεύθυνση με σκοπό τον ορισμό μεγαλύτερης τιμής local-preference στις διαφημιζόμενες από τον R3 προς τον R4 διαδρομές.
- 6.19 Ενεργοποιήστε τις αλλαγές στον R4 επανεκκινώντας όλες τις συνόδους BGP με την εντολή “do clear ip bgp \*”. Περιμένετε περίπου ένα λεπτό. Σε ποιες διαδρομές του AS 65010 έχει αλλάξει η τιμή του local-preference;
- 6.20 Ποια διαδρομή επιλέχθηκε τώρα από τον R1 για τα 192.168.2.0/24, 172.17.17.3/32 και γιατί; [*Υποδ. “show ip bgp 192.168.2.0/24”*]
- 6.21 Ποια αλλαγή παρατηρείτε στην RIB του R4 όσον αφορά τα δίκτυα 192.168.2.0/24 και 172.17.17.3/32;

- 6.22 Δείτε τις διαδρομές που διαφημίζει ο R1 στον R4. Υπάρχουν διαδρομές για τα δίκτυα του AS 65030;
- 6.23 Εξηγήστε τις αλλαγές που παρατηρήσατε προηγουμένως στην RIB του R4.
- 6.24 Εάν από το PC1 κάντε ping στο PC2, ποια διαδρομή ακολουθούν τα πακέτα IP; *[Υποδ. Χρησιμοποιήστε την επιλογή για καταγραφή διαδρομής.]*

Εάν θέλουμε να επηρεάσουμε τον R3 ώστε να χρησιμοποιεί και αυτός τη διαδρομή μέσω του WAN5, μπορούμε να ορίσουμε κατάλληλη τιμή μετρικής εξόδου MED (Multi Exit Discriminator Metric).

- 6.25 Στον R1, σε global configuration mode, ορίστε σε νέο route-map με όνομα set-MED που να επιτρέπει (permit) μια ενέργεια στη σειρά εγγραφής 15.
- 6.26 Ακολουθώντας, ορίστε ως ενέργεια το να τεθεί τιμή μεγαλύτερη του default (0) στην παράμετρο metric και εξέλθετε.
- 6.27 Στον R1, σε router configuration mode για το πρωτόκολλο BGP, εφαρμόστε το route-map με όνομα set-MED στον BGP γείτονα R3 στην κατεύθυνση εξόδου (out) με σκοπό τον ορισμό μετρικής εξόδου στις διαφημιζόμενες από τον R1 προς τον R3 διαδρομές.
- 6.28 Στον R1 επανεκκινήστε τη σύνοδο BGP με τον R3 και περιμένετε λίγο. Σε ποιες διαδρομές της RIB στον R3 έχει αλλάξει η τιμή του Metric;
- 6.29 Ποια διαδρομή προς το δίκτυο 192.168.1.0/24 έχει επιλεγθεί από το BGP στον R3; Γιατί;
- 6.30 Επαναλάβετε το ping από το PC1 στο PC2. Ποια διαδρομή ακολουθούν τα πακέτα IP τώρα;

Εάν για το ίδιο δίκτυο προορισμού υπάρχουν δύο εναλλακτικές διαδρομές και η απόφαση για την καλύτερη διαδρομή γίνεται με βάση το AS\_PATH, το πρωτόκολλο BGP θα διαλέξει αυτή με το μικρότερο **μήκος** (πλήθος AS που χρειάζεται να διανυθούν). Ο διαχειριστής ενός AS μπορεί να επηρεάσει το μήκος που υπολογίζει ο αλγόριθμος προτάσσοντας (pre pending) στη διαδρομή τον δικό του αριθμό AS (ASN) πάνω από μία φορά. Μπορείτε να επηρεάσετε τις επιλογές του R2 ώστε να μην προωθεί την κίνηση προς το AS 65010 μέσω της απευθείας διαδρομής. Αρκεί να δηλώσετε τις διαδρομές που διαφημίζει ο R1 ως μεγαλύτερες από ότι πράγματι είναι προτάσσοντας στο AS\_PATH πάνω από μία φορά τον αριθμό 65010.

- 6.31 Στον R1, σε global configuration mode, ορίστε σε νέο route-map με όνομα set-prepend που να επιτρέπει (permit) μια ενέργεια στη σειρά εγγραφής 5.
- 6.32 Ακολουθώντας, ορίστε ως ενέργεια το να τεθεί στο as-path ως επιπρόσθετο (prepend) το 65010 65010 και εξέλθετε.
- 6.33 Στον R1, σε router configuration mode για το πρωτόκολλο BGP, εφαρμόστε στον γείτονα 10.1.1.2 το route-map με όνομα set-prepend στην κατεύθυνση εξόδου (out) με σκοπό τον ορισμό επιπρόσθετων ASN στο AS-PATH των διαφημιζόμενων από τον R1 προς τον R2 διαδρομών.
- 6.34 Στον R1 επανεκκινήστε τη σύνοδο BGP με τον R2 και περιμένετε λίγο. Τι έχει αλλάξει στην RIB του R2 και γιατί;
- 6.35 Ποιο είναι το επόμενο βήμα στον πίνακα δρομολόγησης του R2 για τις διαδρομές BGP;
- 6.36 Τι έχει αλλάξει στην RIB του R3;
- 6.37 Γιατί δεν έγινε καμία αλλαγή στην RIB του R4;



## **Άσκηση 7: Περισσότερα για το iBGP και την προκαθορισμένη διαδρομή**

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσετε την προηγούμενη τοπολογία και θα ενεργοποιήσετε το BGP στο PC1. Θα δείτε πώς διαδίδονται οι διαδρομές στο εσωτερικό ενός AS και πώς μπορεί να ορισθεί η προκαθορισμένη διαδρομή στο BGP.

- 7.1 Στο PC1 καταργήστε την προεπιλεγμένη διαδρομή και ορίστε τον R1 ως γείτονα στο ίδιο AS, καθορίζοντας έτσι σύνοδο τύπου iBGP.
- 7.2 Στον R1 ορίστε το PC1 ως γείτονα BGP στο ίδιο AS και περιμένετε λίγο.
- 7.3 Έχουν εγκατασταθεί στον πίνακα δρομολόγησης του PC1 διαδρομές προς όλους τους προορισμούς που έμαθε από τον R1; Εάν όχι, γιατί;
- 7.4 Στον R1 ορίστε ότι στις διαφημίσεις του προς το PC1 το επόμενο βήμα είναι ο εαυτός του και περιμένετε λίγο. Προς ποια δίκτυα γνωρίζει τώρα διαδρομές το PC1;
- 7.5 Γιατί δεν υπάρχουν διαδρομές προς το δίκτυο 192.168.2.0/24 και τους βρόχους επιστροφής των R3 και R4;
- 7.6 Στο PC1 ορίστε τον R4 ως γείτονα BGP στο ίδιο AS και το αντίστροφο. Περιμένετε λίγο.
- 7.7 Τι ακόμη πρέπει να κάνετε ώστε να εγκατασταθεί η διαδρομή προς το LAN2 στον πίνακα δρομολόγησης του PC1;
- 7.8 Επικοινωνεί το PC1 με όλα τα δίκτυα της τοπολογίας;
- 7.9 Από το PC1 κάντε ping στο PC2. Ποια διαδρομή ακολουθούν τα πακέτα IP;
- 7.10 Ποια διαδρομή ακολουθεί η κίνηση από το LAN1 προς το 5.5.5.0/24 και ποια από το 5.5.5.0/24 προς το LAN1;
- 7.11 Γιατί το ping 10.1.1.9 είναι επιτυχές από το PC2, ενώ αποτυγχάνει από το PC1;
- 7.12 Στον R2 αναγγείλτε το δίκτυο 0.0.0.0/0 και περιμένετε λίγο.
- 7.13 Έχει προστεθεί η προκαθορισμένη διαδρομή στην RIB του R2; Γιατί δεν έχει προστεθεί στον πίνακα δρομολόγησης του R2;
- 7.14 Έχει προστεθεί η προκαθορισμένη διαδρομή στον πίνακα δρομολόγησης των άλλων δρομολογητών (R1, R2, R4) και του PC1;
- 7.15 Ποιος είναι ο τύπος πηγής ORIGIN για την προκαθορισμένη διαδρομή στις RIB αυτών;
- 7.16 Μπορείτε από το PC1 να κάνετε ping στις διευθύνσεις IP των WAN1, WAN2 και WAN3;
- 7.17 Εάν από το PC1 κάνετε ping στη διεύθυνση 10.1.1.14, τι θα συμβεί; Γιατί;
- 7.18 Εναλλακτικά μπορείτε να εισάγετε στη δρομολόγηση την προκαθορισμένη διαδρομή με αναδιανομή της ως στατική εγγραφή. Στον R2, αφού ακυρώσετε τη διαφήμιση του δικτύου 0.0.0.0/0, ορίστε την loopback αυτού ως προκαθορισμένη πύλη και περιμένετε λίγο.
- 7.19 Τι αλλάζει στις RIB των δρομολογητών όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της προκαθορισμένης διαδρομής;
- 7.20 Γιατί δεν χρειάστηκε να δώσετε την εντολή αναδιανομής;
- 7.21 Τι θα συμβεί εάν από το PC1 κάνετε ping στη διεύθυνση 10.1.1.14; Γιατί;

Όνοματεπώνυμο:		Όνομα PC:
Ομάδα:	Ημερομηνία:	

## Εργαστηριακή Άσκηση 9

### Δυναμική δρομολόγηση BGP

Απαντήστε στα ερωτήματα στον χώρο που σας δίνεται παρακάτω και στην πίσω σελίδα εάν δεν επαρκεί. Το φυλλάδιο αυτό θα παραδοθεί στον επιβλέποντα.

**1**

1.1 .....

1.2 .....

.....

.....

1.3 .....

1.4 .....

1.5 .....

1.6 .....

1.7 .....

1.8 .....

1.9 .....

1.10 .....

.....

1.11 .....

1.12 .....

.....

1.13 .....

.....

1.14 .....

1.15 .....

1.16 .....

1.17 .....

1.18 .....

.....

1.19 .....

1.20 .....

.....

1.21 .....

1.22 .....

1.23	.....
	.....
	.....
1.24	.....
	.....
1.25	.....
	.....
1.26	.....
1.27	.....
1.28	.....
<b>2</b>	
2.1	.....
2.2	.....
2.3	.....
2.4	.....
2.5	.....
	.....
2.6	.....
	.....
2.7	.....
2.8	.....
	.....
2.9	.....
2.10	.....
2.11	.....
	.....
2.12	.....
	.....
2.13	.....
2.14	.....
2.15	.....
2.16	.....
2.17	.....
2.18	.....
2.19	.....
2.20	.....

2.21	.....
2.22	.....
	.....
	.....
<b>3</b>	
3.1	.....
3.2	.....
3.3	.....
3.4	.....
	.....
3.5	.....
3.6	.....
	.....
	.....
3.7	.....
3.8	.....
	.....
	.....
	.....
3.9	.....
3.10	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
3.11	.....
3.12	.....
	.....
	.....
	.....
3.13	.....
3.14	.....
3.15	.....
3.16	.....
3.17	.....
3.18	.....
3.19	.....

- 3.20 .....  
3.21 .....  
3.22 .....  
3.23 .....  
3.24 .....  
3.25 .....  
3.26 .....  
.....  
.....  
3.27 .....  
3.28 .....  
.....  
.....  
3.29 .....  
3.30 .....  
.....  
.....  
.....  
3.31 .....  
.....  
3.32 .....  
3.33 .....  
.....  
.....  
3.34 .....  
3.35 .....  
3.36 .....  
3.37 .....  
3.38 .....  
3.39 .....  
3.40 .....  
.....  
.....  
3.41 .....  
3.42 .....  
3.43 .....  
3.44 .....

**4**

- 4.1 .....  
.....
- 4.2 .....  
.....
- 4.3 .....  
.....  
.....  
.....
- 4.4 .....  
.....  
.....  
.....  
.....
- 4.5 .....  
.....  
.....
- 4.6 .....
- 4.7 .....
- 4.8 .....
- 4.9 .....
- 4.10 .....
- 4.11 .....
- 4.12 .....
- 4.13 .....  
.....
- 4.14 .....  
.....
- 4.15 .....  
.....
- 4.16 .....
- 4.17 .....
- 4.18 .....
- 4.19 .....
- 4.20 .....
- 4.21 .....
- 4.22 .....



4.23	.....
	.....
4.24	.....
	.....
4.25	.....
	.....
4.26	.....
	.....
	.....
<b>5</b>	
5.1	.....
5.2	.....
5.3	.....
5.4	.....
5.5	.....
5.6	.....
	.....
5.7	.....
5.8	.....
5.9	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
	.....
5.10	.....
	.....
5.11	.....
5.12	.....
	.....
5.13	.....
	.....
5.14	.....
	.....
	.....

5.15	.....
5.16	.....
	.....
5.17	.....
	.....
5.18	.....
5.19	.....
	.....
5.20	.....
	.....
5.21	.....
5.22	.....
	.....
5.23	.....
5.24	.....
5.25	.....
5.26	.....
5.27	.....
5.28	.....
5.29	.....
5.30	.....
5.31	.....
	.....
<b>6</b>	
6.1	.....
	.....
6.2	.....
6.3	.....
	.....
6.4	.....
6.5	.....
	.....
6.6	.....
6.7	.....
	.....
6.8	.....

6.9	.....
	.....
6.10	.....
6.11	.....
	.....
6.12	.....
	.....
6.13	.....
	.....
6.14	.....
6.15	.....
6.16	.....
6.17	.....
6.18	.....
6.19	.....
6.20	.....
	.....
6.21	.....
	.....
6.22	.....
6.23	.....
	.....
6.24	.....
6.25	.....
6.26	.....
6.27	.....
6.28	.....
	.....
6.29	.....
	.....
6.30	.....
6.31	.....
6.32	.....
6.33	.....
6.34	.....
	.....
6.35	.....

6.36	.....
6.37	.....
<b>7</b>	
7.1	.....
	.....
7.2	.....
7.3	.....
	.....
7.4	.....
	.....
7.5	.....
7.6	.....
	.....
7.7	.....
	.....
7.8	.....
	.....
7.9	.....
	.....
7.10	.....
	.....
7.11	.....
	.....
7.12	.....
7.13	.....
	.....
7.14	.....
7.15	.....
7.16	.....
7.17	.....
	.....
7.18	.....
	.....
7.19	.....
7.20	.....
7.21	.....