



ΔΙΚΤΥΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Δρομολόγηση στο
διαδίκτυο



- Σύντομη αναφορά στις κυριότερες λειτουργίες του στρώματος δικτύου
- Βασικές αρχές της δρομολόγησης
- Δρομολογητές
- Μελέτη των δύο κυριότερων αλγορίθμων δρομολόγησης
- Εξειδίκευση και εφαρμογή των αλγορίθμων δρομολόγησης στο Internet

Περιεχόμενα

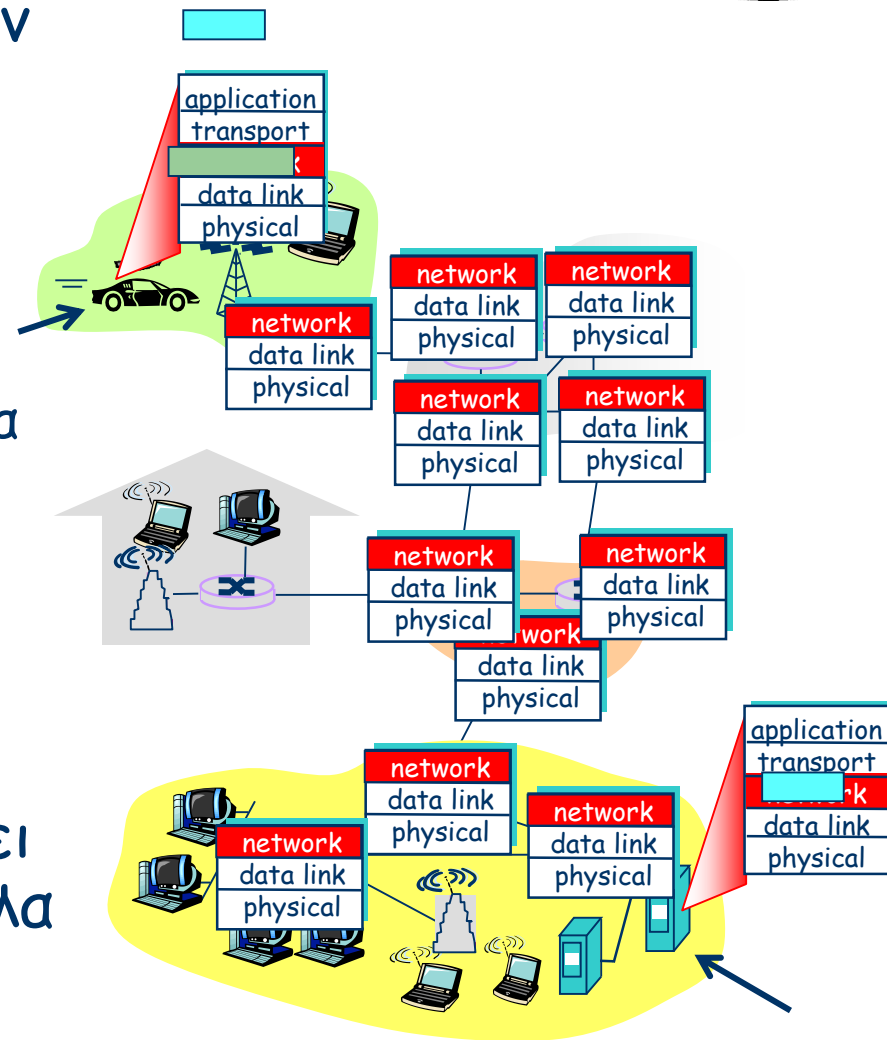


- Κυριότερες λειτουργίες του στρώματος δικτύου
 - Δίκτυα με νοητές συνδέσεις και με δεδομενογράμματα
- Βασικές αρχές της δρομολόγησης
- Δρομολογητές
 - Αρχιτεκτονική
 - Λειτουργίες
- Αλγόριθμοι δρομολόγησης
 - Διανύσματος αποστάσεων (Distance Vector)
 - Κατάστασης ζεύξεων (Link State)
- Ιεραρχική δρομολόγηση
- Πρωτόκολλα δρομολόγησης στο Internet

Στρώμα δικτύου



- Μεταφορά τεμαχίων από τον host αποστολής στον host λήψης.
 - Στην πλευρά αποστολής, τα τεμάχια ενθυλακώνονται σε πακέτα.
 - Στην πλευρά λήψης, τα τεμάχια παραδίδονται στο στρώμα μεταφοράς.
- Πρωτόκολλα στρώματος δικτύου σε *κάθε host* και *κάθε δρομολογητή*.
- Κάθε δρομολογητής εξετάζει τα πεδία επικεφαλίδας σε όλα τα πακέτα που διέρχονται από αυτόν.

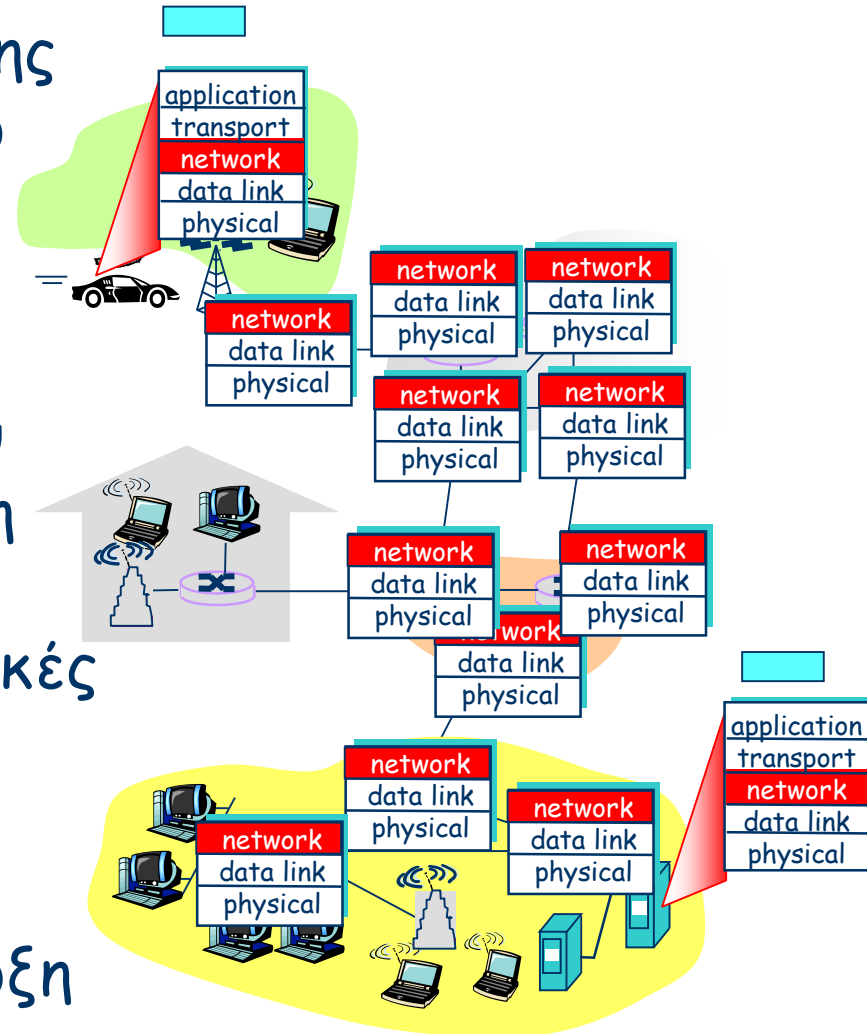


Στρώμα δικτύου



Κυριότερες Λειτουργίες

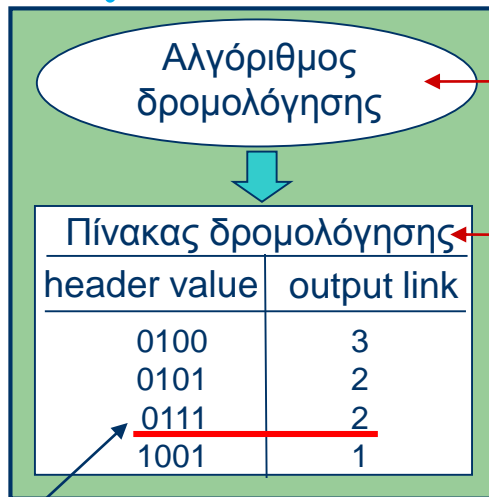
- *Δρομολόγηση*: καθορισμός της διαδρομής των πακέτων από την πηγή στον προορισμό.
Αλγόριθμοι δρομολόγησης
- *Πρώθηση*: μετακίνηση πακέτων από την είσοδο του δρομολογητή στην κατάλληλη έξοδό του.
- *Εγκατάσταση σύνδεσης*: μερικές αρχιτεκτονικές δικτύου απαιτούν εγκατάσταση διαδρομής μεταξύ των δρομολογητών πριν την έναρξη αποστολής δεδομένων.



Στρώμα δικτύου



Δρομολόγηση και προώθηση

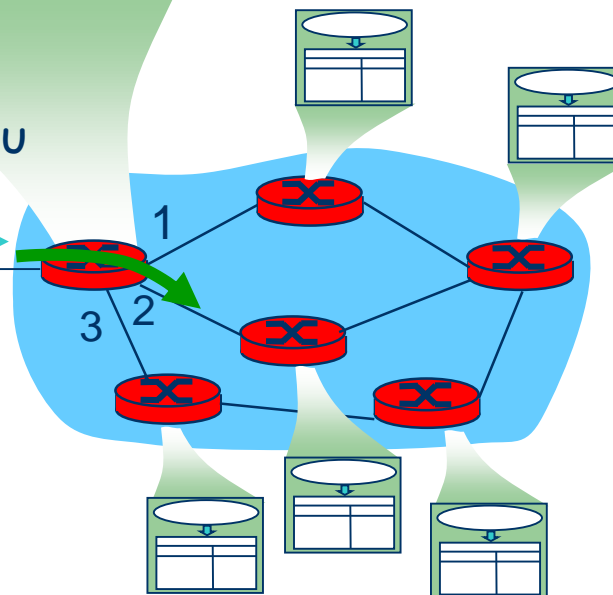


Ο αλγόριθμος δρομολόγησης καθορίζει τη διαδρομή του πακέτου στο δίκτυο.

Ο πίνακας δρομολόγησης καθορίζει τοπικά την προώθηση στον κάθε δρομολογητή.

Τιμή στην επικεφαλίδα του αφικνούμενου πακέτου

0111



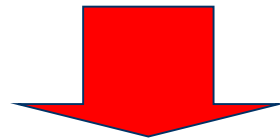
Στρώμα δικτύου



Μοντέλο υπηρεσίας δικτύου

Ποιο είναι το *μοντέλο υπηρεσίας* που παρέχει το στρώμα δικτύου;

Συνοπτική περιγραφή



νοητές συνδέσεις ή ανεξάρτητα πακέτα

υπηρεσία με σύνδεση

υπηρεσία χωρίς σύνδεση

- Υπηρεσία από host σε host.
- Το δίκτυο παρέχει τη μία ή την άλλη.
- Υλοποιείται στο δίκτυο κορμού.



Νοητές συνδέσεις

Η διαδρομή από την πηγή στον προορισμό συμπεριφέρεται ως τηλεφωνικό κύκλωμα.

- Μέριμνα του δικτύου κατά μήκος της εν λόγω διαδρομής.
- Εγκατάσταση νοητής σύνδεσης για κάθε κλήση *πριν* την αποστολή δεδομένων, απόλυση σύνδεσης στο τέλος.
- Κάθε πακέτο μεταφέρει την ταυτότητα της νοητής σύνδεσης (όχι την ταυτότητα του host προορισμού).
- Κάθε δρομολογητής στη διαδρομή πομπός-δέκτης κρατάει πληροφορίες για κάθε διερχόμενη σύνδεση.
- Μπορεί να *εκχωρηθούν* στη νοητή σύνδεση πόροι της ζεύξης και του δρομολογητή (εύρος ζώνης, buffers).



Νοητές συνδέσεις: Υλοποίηση

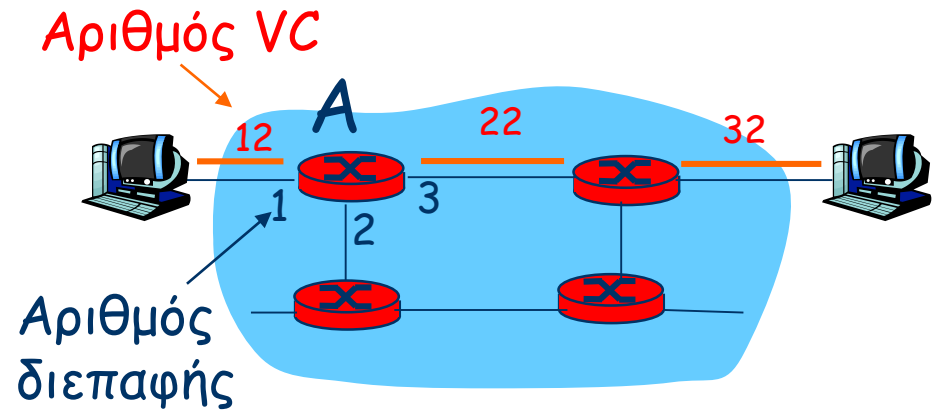
- Μια νοητή σύνδεση απαρτίζεται από:
 - Διαδρομή από την πηγή στον προορισμό,
 - Αριθμούς VC, έναν αριθμό για κάθε ζεύξη,
 - Εγγραφές στους πίνακες δρομολόγησης των δρομολογητών κατά μήκος της διαδρομής.
- Πακέτο που ανήκει σε νοητή σύνδεση μεταφέρει έναν αριθμό VC που πρέπει να αλλάζει σε κάθε ζεύξη.
 - Νέος αριθμός VC προκύπτει από τον πίνακα δρομολόγησης.

Στρώμα δικτύου



Νοητές συνδέσεις: Πίνακας δρομολόγησης

Πίνακας δρομολόγησης του δρομολογητή A



Διεπαφή εισόδου	#VC εισόδου	Διεπαφή εξόδου	#VC εξόδου
1	12	3	22
2	63	1	18
3	7	2	17
1	97	3	87
...

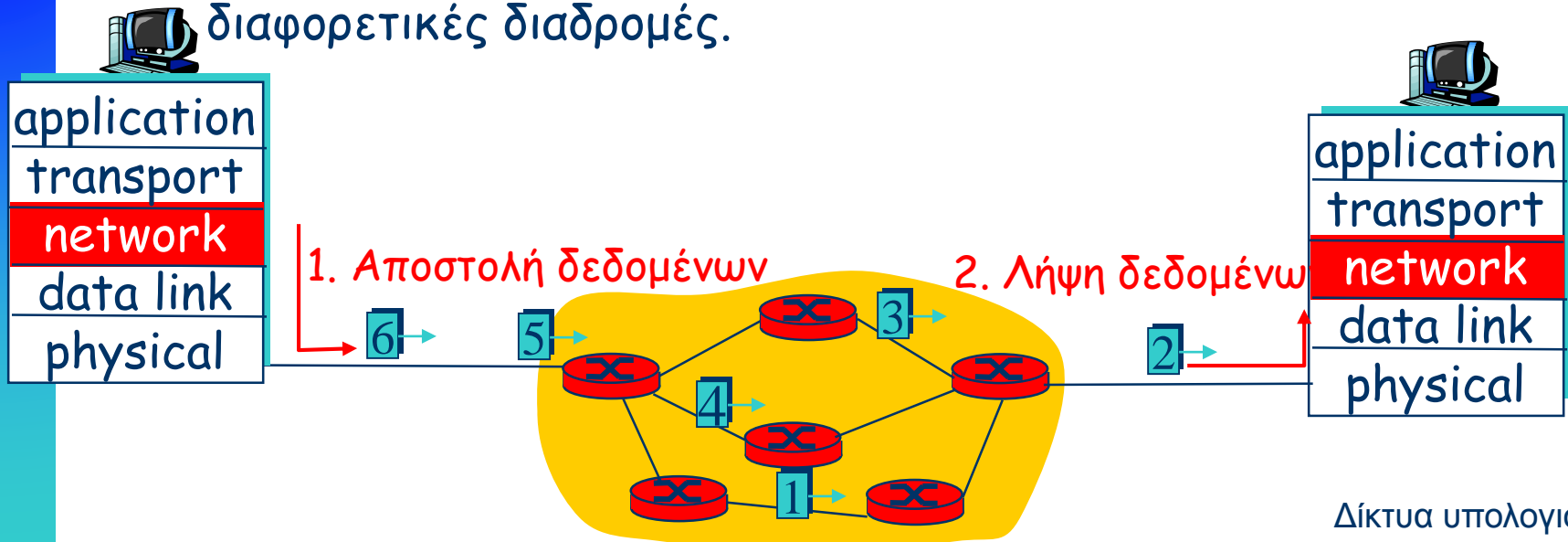
Οι δρομολογητές διατηρούν πληροφορία για την κατάσταση των συνδέσεων.

Στρώμα δικτύου



Ανεξάρτητα πακέτα: μοντέλο Internet

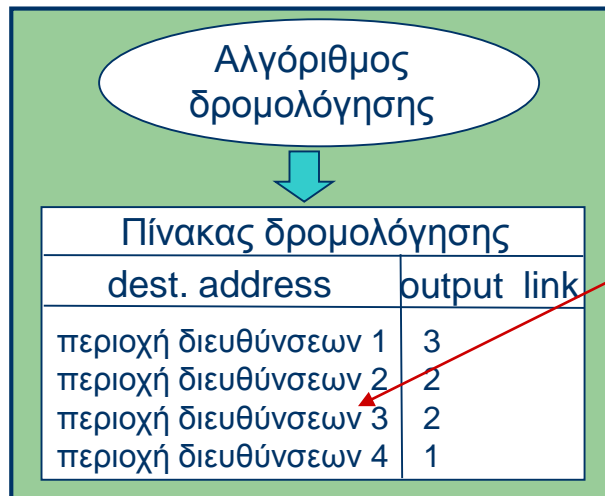
- Δεν εγκαθίσταται κλήση στο στρώμα δικτύου.
- Οι δρομολογητές δεν έχουν στοιχεία για τις συνδέσεις απ' άκρη σ' άκρη.
 - Δεν υπάρχει η έννοια της "σύνδεσης" στο στρώμα δικτύου.
- Τα πακέτα προωθούνται χρησιμοποιώντας τη διεύθυνση του host προορισμού.
 - Πακέτα μεταξύ των ίδιων ακραίων ζευγών μπορεί να ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές.



Στρώμα δικτύου

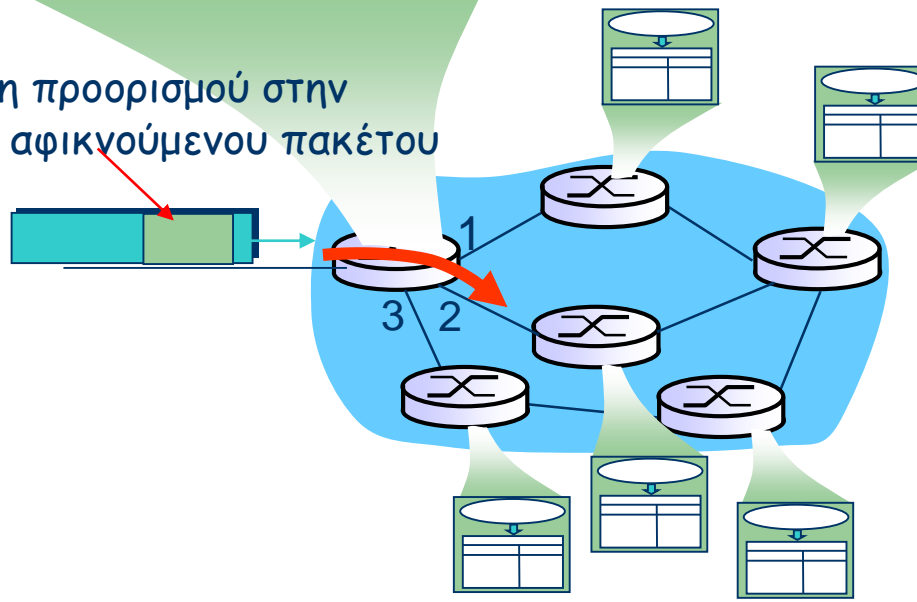


Πίνακας δρομολόγησης για ανεξάρτητα πακέτα



4 δισ. IP διευθύνσεων.
Περιέχονται περιοχές
διευθύνσεων αντί για
μοναδικές διευθύνσεις
(συγκεντρωτικές
καταχωρήσεις)

IP διεύθυνση προορισμού στην
επικεφαλίδα του αφικνούμενου πακέτου



Στρώμα δικτύου



Γιατί ανεξάρτητα πακέτα στο Internet;

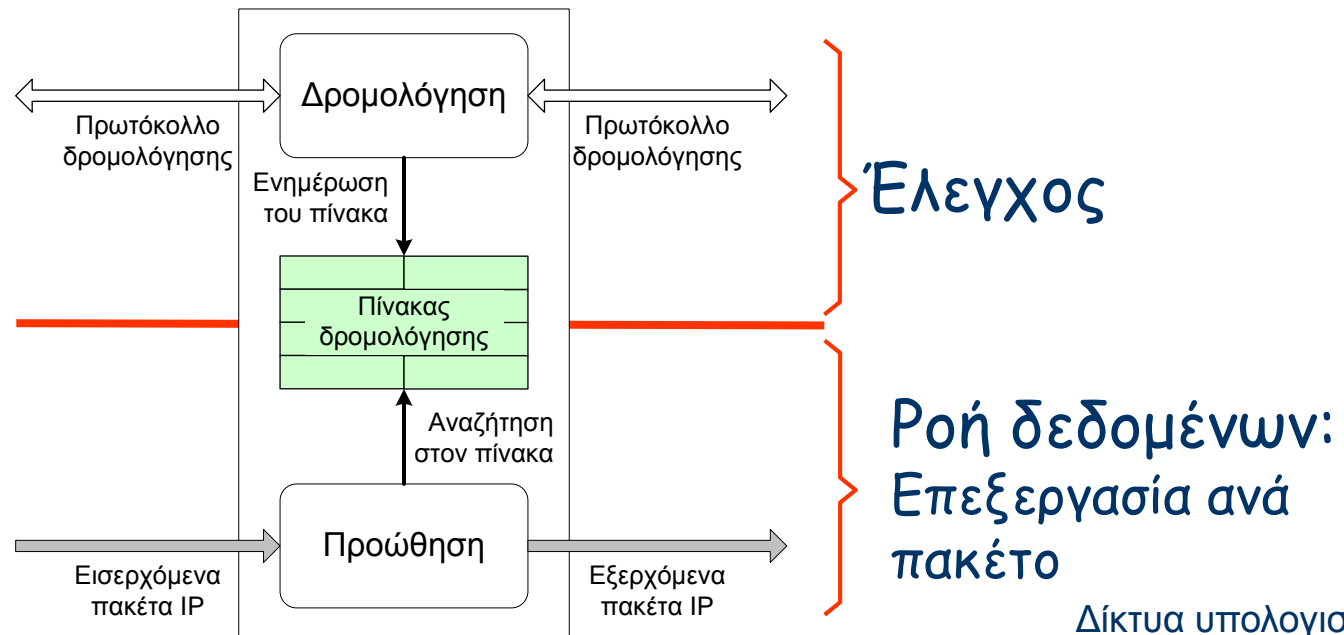
- Ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ υπολογιστών:
 - "Ελαστική" υπηρεσία, όχι αυστηρές χρονικές απαιτήσεις.
 - "Έξυπνες" τερματικές διατάξεις (υπολογιστές).
 - Μπορούν να προσαρμόζονται, να πραγματοποιούν ελέγχους, διόρθωση λαθών.
- Απλό δίκτυο, πολυπλοκότητα στα άκρα.
- Πολλοί τύποι ζεύξεων:
 - Διαφορετικά χαρακτηριστικά
 - Δύσκολη η ομοιόμορφη υπηρεσία

Δρομολογητές



Βασικές Λειτουργίες

- **Λειτουργίες ελέγχου:** Εκτέλεση των αλγορίθμων δρομολόγησης (RIP, OSPF, BGP) και ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης.
- **Λειτουργίες ροής δεδομένων:** Προώθηση των πακέτων IP από την γραμμή εισόδου στη γραμμή εξόδου. Επεξεργασία ανά πακέτο IP.





Επεξεργασία πακέτου IP

- Ο δρομολογητής —————> λαμβάνει ένα πακέτο IP
1. Εγκυρότητα επικεφαλίδας IP
 2. Επεξεργασία επιλογών στην επικεφαλίδα IP
 3. Διεύθυνση IP προορισμού
 4. Αναζήτηση στον πίνακα δρομολόγησης
 5. Μείωση TTL
 6. Θρυμματισμός (εάν απαιτείται)
 7. Υπολογισμός του πεδίου ελέγχου
 8. Προώθηση στο επόμενο βήμα
 9. Αποστολή μηνύματος ICMP (εάν απαιτείται)



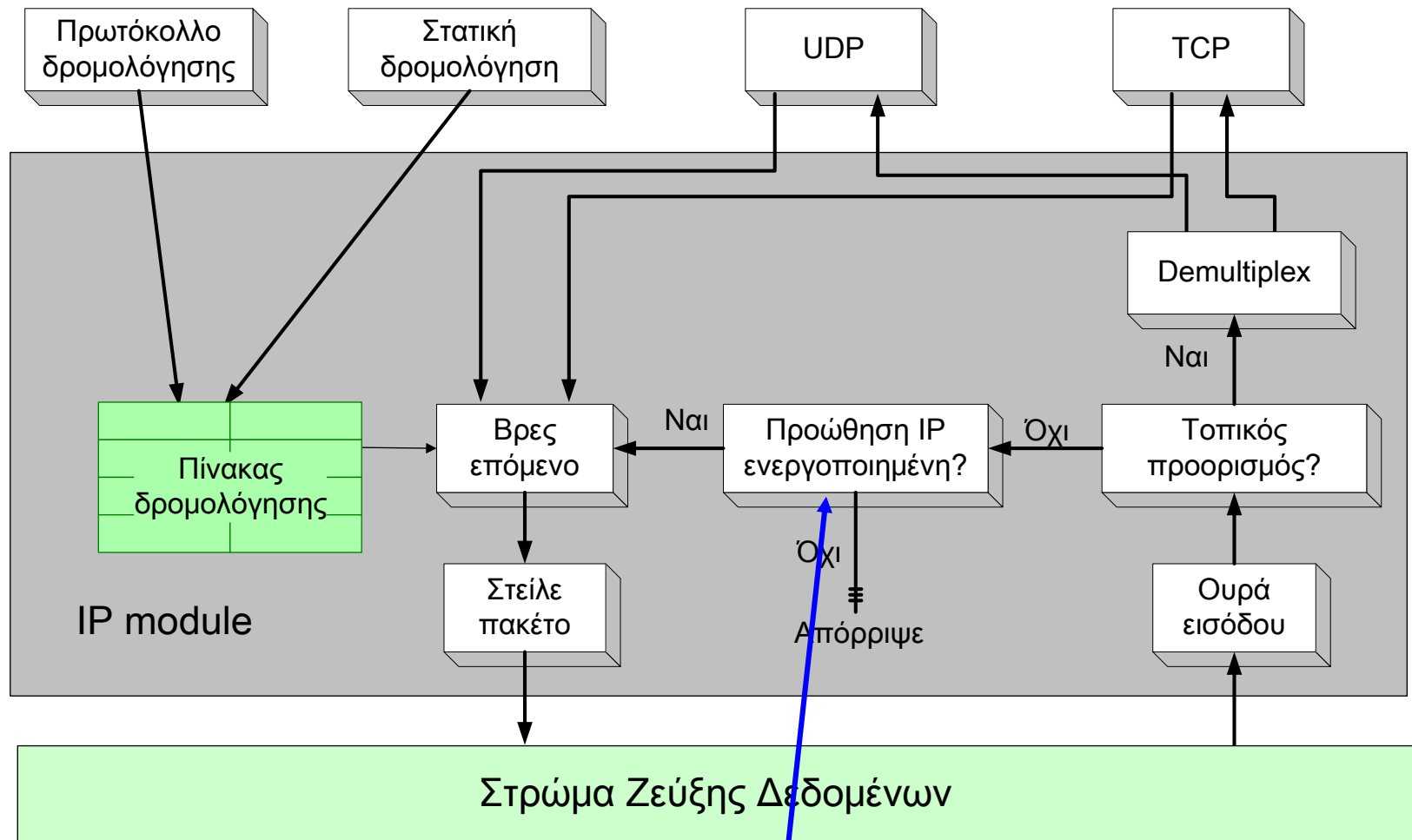
Πρώθηση πακέτου IP

- Η επεξεργασία των πακέτων IP στους δρομολογητές και υπολογιστές είναι παρόμοια.
- **Βασική διαφορά:** Η πρώθηση IP είναι ενεργοποιημένη στους δρομολογητές, ενώ είναι συνήθως απενεργοποιημένη στους υπολογιστές.
- **Ενεργοποιημένη πρώθηση IP** → εάν το πακέτο δεν προορίζεται για το τοπικό σύστημα, θα αποσταλεί σε κάποιο άλλο.
- **Απενεργοποιημένη πρώθηση IP** → εάν το πακέτο δεν προορίζεται για το τοπικό σύστημα, θα απορριφθεί.

Δρομολογητές



Πρώθηση πακέτου IP



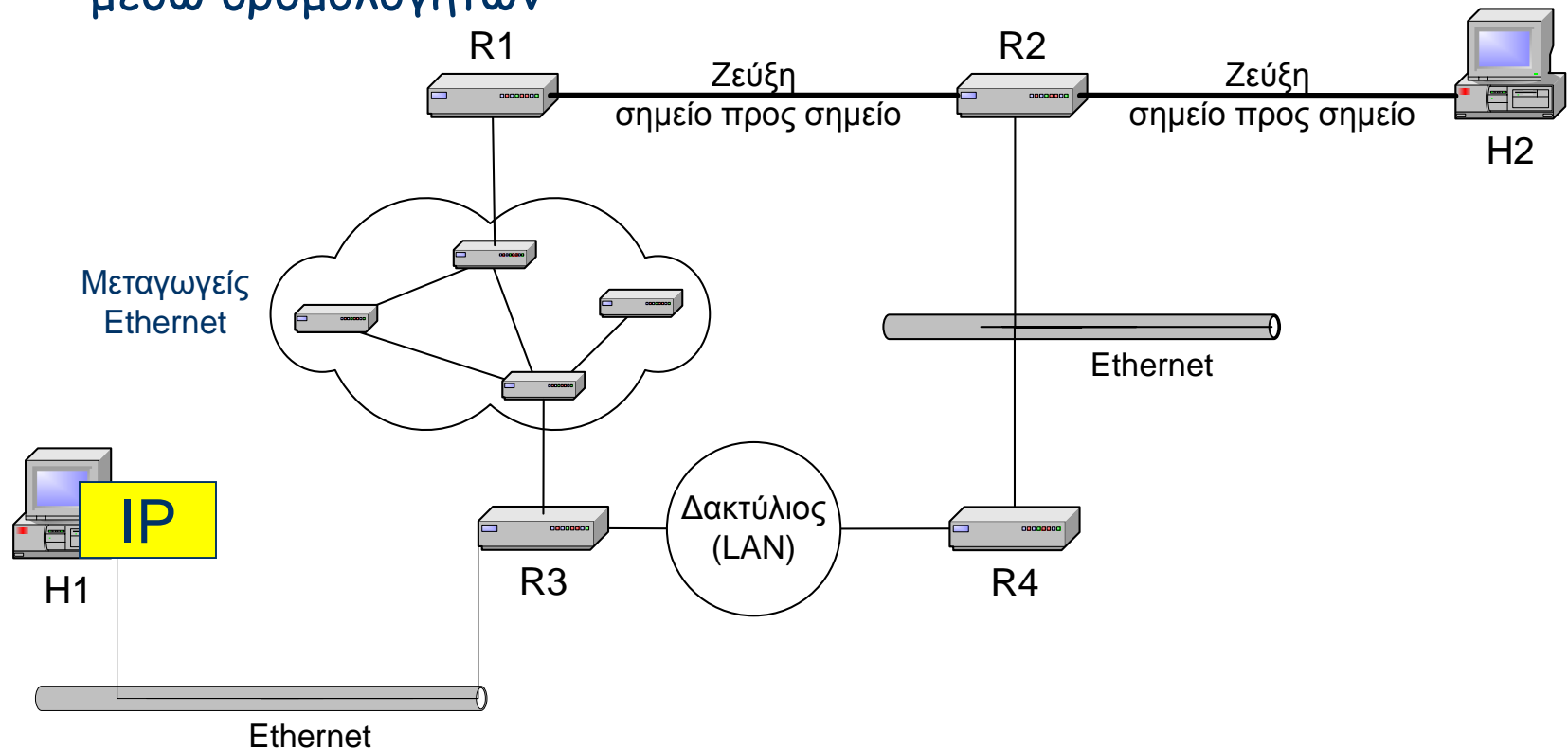
Δρομολογητής: ενεργοποιημένη
Υπολογιστής: απενεργοποιημένη



Πρώθηση πακέτου IP

➤ Όψη στο στρώμα ζεύξης δεδομένων:

- Το δίκτυο είναι μια συλλογή τοπικών δικτύων (LAN) ή ζεύξεων σημείου προς σημείο ή δικτύων μεταγωγής που διασυνδέονται μέσω δρομολογητών

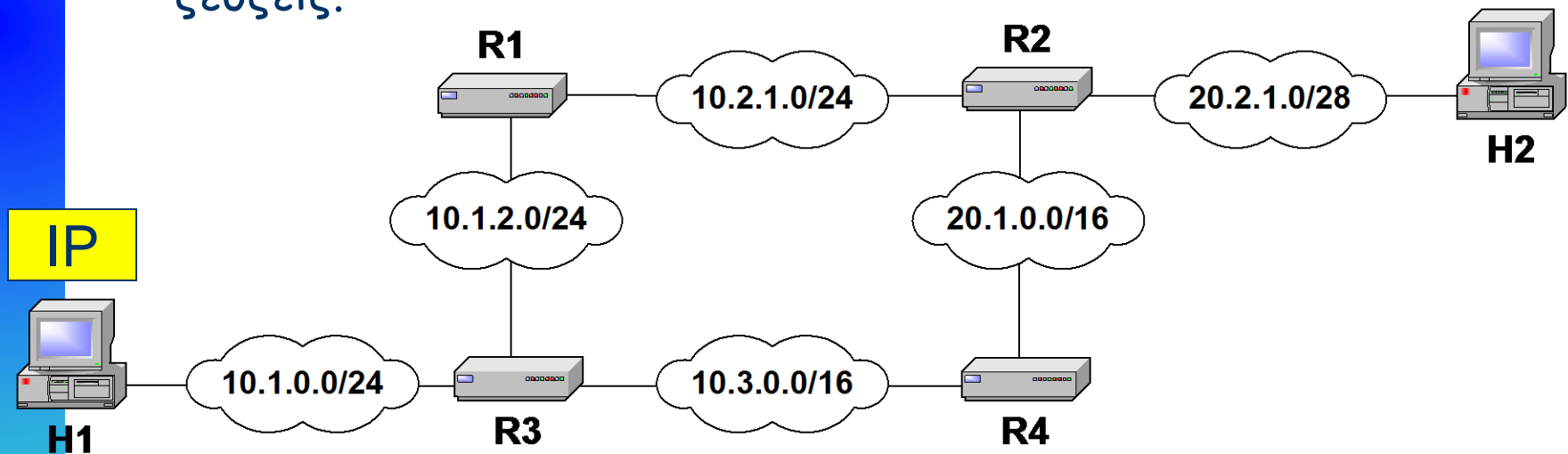




Πρώθηση πακέτου IP

➤ Όψη στο στρώμα IP :

- Το δίκτυο IP είναι μια λογική οντότητα με ένα αριθμό δικτύου.
- Αναπαριστάνουμε το δίκτυο IP με "σύννεφο".
- Η προώθηση των πακέτων βλέπει τα "σύννεφα" και αγνοεί τις ζεύξεις.





Πίνακας δρομολόγησης

- Κάθε δρομολογητής διατηρεί έναν **πίνακα δρομολόγησης** που δείχνει πώς προωθούνται τα απερχόμενα πακέτα.
- Εγγραφές στον πίνακα δρομολόγησης:
 1. **Διεύθυνση προορισμού:** πού πηγαίνει το πακέτο IP;
 2. **Επόμενο βήμα:** πώς θα αποσταλεί το πακέτο IP;
 3. **Διεπαφή:** ποια είναι η θύρα εξόδου;
- Το επόμενο βήμα και η διεπαφή συνήθως συμπτύσσονται σε μια στήλη.
- Οι πίνακες δρομολόγησης ορίζονται έτσι, ώστε τα πακέτα να πλησιάζουν τον προορισμό τους.



Πίνακας δρομολόγησης

Προορισμός	Επόμενο βήμα	Διεπαφή
10.2.1.0/24	απευθείας	eth0
10.1.2.0/24	R1	eth1
20.2.1.0/28	απευθείας	serial0
10.3.1.0/24	R4	eth1
20.1.0.0/16	απευθείας	eth1

Τα πακέτα IP μπορούν να παραδοθούν **απευθείας**, δηλαδή, ο προορισμός βρίσκεται σε απευθείας συνδεδεμένο υποδίκτυο ή να προωθηθούν σε άλλον **δρομολογητή** για προορισμό σε όχι απευθείας συνδεδεμένο υποδίκτυο.

Δρομολογητές

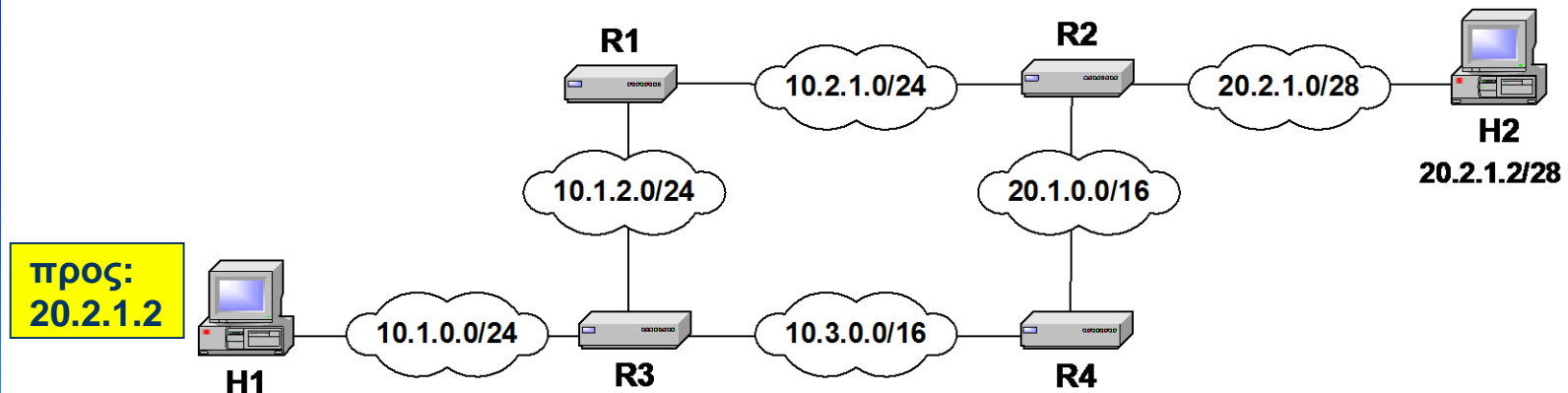


Πρώθηση με πίνακες δρομολόγησης

Προορισμός	Επ. Βήμα
10.1.0.0/24	R3
10.1.2.0/24	απευθείας
10.2.1.0/24	απευθείας
10.3.1.0/24	R3
20.2.0.0/16	R2
30.1.1.0/28	R2

Προορισμός	Επ. Βήμα
10.1.0.0/24	R1
10.1.2.0/24	R1
10.2.1.0/24	απευθείας
10.3.1.0/24	R4
20.1.0.0/16	απευθείας
20.2.1.0/28	απευθείας

Προορισμός	Επ. Βήμα
10.1.0.0/24	R2
10.1.2.0/24	R2
10.2.1.0/24	R2
10.3.1.0/24	R2
20.1.0.0/16	R2
20.2.1.0/28	απευθείας



Προορισμός	Επ. Βήμα
10.1.0.0/24	απευθείας
10.1.2.0/24	R3
10.2.1.0/24	R3
10.3.1.0/24	R3
20.1.0.0/16	R3
20.2.1.0/28	R3

Προορισμός	Επ. Βήμα
10.1.0.0/24	απευθείας
10.1.2.0/24	απευθείας
10.2.1.0/24	R4
10.3.1.0/24	απευθείας
20.1.0.0/16	R4
20.2.1.0/28	R4

Προορισμός	Επ. Βήμα
10.1.0.0/24	R3
10.1.2.0/24	R3
10.2.1.0/24	R2
10.3.1.0/24	απευθείας
20.1.0.0/16	απευθείας
20.2.1.0/28	R2

Πίνακας δρομολόγησης



Τύποι εγγραφών

➤ Διαδρομή προς δίκτυο

- Η διεύθυνση προορισμού είναι μια διεύθυνση δικτύου (π.χ., 128.100.2.0/24).
- Οι περισσότερες εγγραφές είναι διαδρομές προς δίκτυα.

➤ Διαδρομή προς υπολογιστή

- Η διεύθυνση προορισμού είναι η διεύθυνση μιας διεπαφής (π.χ., 128.100.1.2/32).
- Για να ορισθούν διαδρομές προς συγκεκριμένους υπολογιστές.

➤ Προκαθορισμένη (default) διαδρομή

- Όταν δεν υπάρχει ταίριασμα με άλλη εγγραφή.
- Ο δρομολογητής της προκαθορισμένης διαδρομής είναι η **προκαθορισμένη πύλη**.

➤ Διεύθυνση βρόχου επιστροφής

- Εγγραφή για τη διεύθυνση 127.0.0.1
- Δηλώνει ως επόμενο βήμα τη διεπαφή του βρόχου επιστροφής (lo0).

Πίνακας δρομολόγησης



Αναζήτηση: ταίριασμα μεγαλύτερου προθέματος

➤ Ταίριασμα μεγαλύτερου προθέματος:

Αναζήτηση στον πίνακα δρομολόγησης της εγγραφής που ταιριάζει και έχει διεύθυνση IP με το μεγαλύτερο πρόθεμα.

1. Αναζήτηση ταιριάσματος όλων των 32 bit
2. Αναζήτηση ταιριάσματος των 31 bit
- ...
32. Αναζήτηση ταιριάσματος με 0 bit

➤ Διαδρομή προς υπολογιστή, Διεύθυνση βρόχου επιστροφής → ταίριασμα των 32 bit

➤ Προκαθορισμένη διαδρομή (0.0.0.0/0) → ταίριασμα των 0 bit

➤ Πακέτο IP προς 147.102.38.50



Διεύθυνση προορισμού	Επόμενο βήμα
10.0.0.0/8	R1
147.102.0.0/16	R2
147.102.64.0/20	R3
147.102.192.0/20	R3
147.102.38.0/24	R4
147.102.38.56/32	R3
0.0.0.0/0	R5

➤ Το ταίριασμα με μεγαλύτερο πρόθεμα της διεύθυνσης 147.102.38.50 είναι με 24 bit στην εγγραφή 147.102.38.0/24



➤ Θα αποσταλεί στον δρομολογητή R4.

Πίνακας δρομολόγησης



Ταίριασμα μεγαλύτερου προθέματος

Πίνακας δρομολόγησης

Πρόθεμα

Διεπαφή

Προορισμός

201.10.7.17

201: 11001001

10: 00001010

7: 00000111

17: 00010001

192.0.0.0/4	0
4.83.128.0/17	1
201.10.0.0/21	3
201.10.6.0/23	2

Πίνακας δρομολόγησης



Ταίριασμα μεγαλύτερου προθέματος

Πίνακας δρομολόγησης

Προορισμός	Πρόθεμα	Διεπαφή
201.10.7.17 →	192.0.0.0/4	0
201: 11001001	4.83.128.0/17	1
10: 00001010	201.10.0.0/21	3
7: 00000111	201.10.6.0/23	2
17: 00010001		

192: 11000000

Πίνακας δρομολόγησης



Ταίριασμα μεγαλύτερου προθέματος

Πίνακας δρομολόγησης

Πρόθεμα

Διεπαφή

Προορισμός

201.10.7.17



201: 11001001

10: 00001010

7: 00000111

17: 00010001

192.0.0.0/4	0
4.83.128.0/17	1
201.10.0.0/21	3
201.10.6.0/23	2

4: 00000100

83: 01010011

128: 10000000

Πίνακας δρομολόγησης



Ταίριασμα μεγαλύτερου προθέματος

Πίνακας δρομολόγησης
Πρόθεμα Διεπαφή

Προορισμός

201.10.7.17



201: **11001001**

10: **00001010**

7: **00000111**

17: 00010001

192.0.0.0/4	0
4.83.128.0/17	1
201.10.0.0/21	3
201.10.6.0/23	2

201: **11001001**

10: **00001010**

0: **00000000**

Πίνακας δρομολόγησης



Ταίριασμα μεγαλύτερου προθέματος

Πίνακας δρομολόγησης
Πρόθεμα Διεπαφή

Προορισμός

201.10.7.17



192.0.0.0/4	0
4.83.128.0/17	1
201.10.0.0/21	3
201.10.6.0/23	2

201: 11001001

10: 00001010

7: 00000111

17: 00010001

201: 11001001

10: 00001010

6: 00000110

Δρομολόγηση πακέτων IP

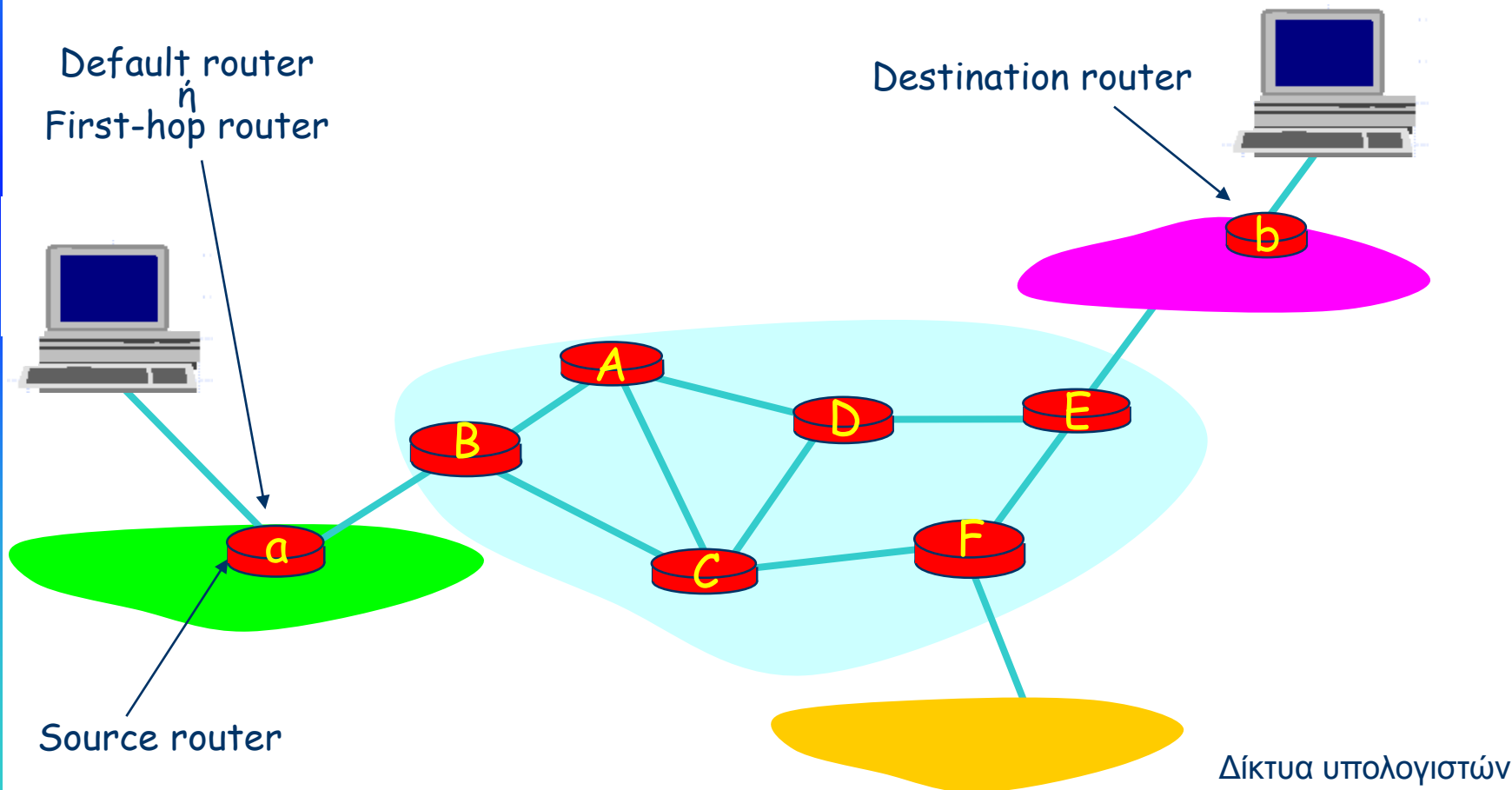


- Ανεξάρτητα από το αν παρέχει υπηρεσία με ή χωρίς σύνδεση, το στρώμα δικτύου πρέπει να **καθορίζει τη διαδρομή** των πακέτων.
- Τούτο είναι δουλειά του **πρωτοκόλλου δρομολόγησης** του στρώματος δικτύου.
- Στόχος του πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι η παράδοση των πακέτων από τον δρομολογητή πηγής στον δρομολογητή προορισμού με **αποτελεσματικό τρόπο**.

Δρομολόγηση πακέτων IP



Στόχος του πρωτοκόλλου δρομολόγησης: καθορισμός μιας "καλής" διαδρομής (ακολουθία δρομολογητών) μέσω του δικτύου από τον δρομολογητή πηγής προς τον δρομολογητή προορισμού.



Δρομολόγηση πακέτων IP



- Κύριες λειτουργίες:
 - Μετάφραση: διεύθυνση => διαδρομή.
 - Συντονιζόμενες κατανεμημένες αποφάσεις: ποια είναι η απερχόμενη ζεύξη σε κάθε κόμβο;
 - Γενικός στόχος επίδοσης: π.χ., ελαχιστοποίηση καθυστέρησης.
 - Άλλα: προτεραιότητες, ασφάλεια, πολιτικές επικρατειών.
- Γιατί ενδιαφέρει η δρομολόγηση;
 - Υπηρεσία του δικτύου κορμού.
 - Αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου.



Προβλήματα προς αντιμετώπιση

- Επίπεδος (flat) χώρος διευθύνσεων, οπότε απαιτείται υπολογισμός των διαδρομών.
 - Απαιτεί γνώση της συνολικής τοπολογίας και συντονιζόμενες κατανεμημένες αποφάσεις.
- Αντιμετώπιση των αλλαγών στην τοπολογία.
 - Πώς να κοινοποιηθούν οι ενημερώσεις και να ελαχιστοποιηθούν οι χρονικές ασυμφωνίες.
- Αποτελεσματική χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου.
 - π.χ., ελαχιστοποίηση της συμφόρησης, καθυστέρηση.
- Επεκτασιμότητα για μεγάλα δίκτυα με πολλές επικράτειες.
- Υποστήριξη πολιτικών ευέλικτης δρομολόγησης.
- Υποστήριξη εφαρμογών με απαιτήσεις QoS.

Αλγόριθμοι δρομολόγησης



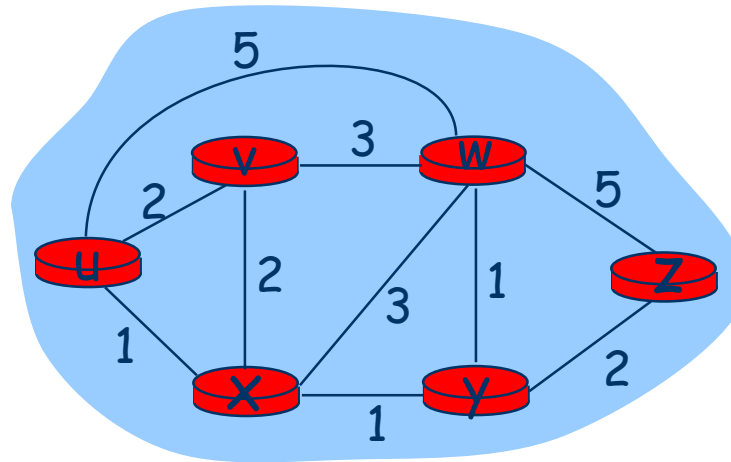
- Η καρδιά του πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι ο **αλγόριθμος δρομολόγησης**, ο οποίος καθορίζει τη διαδρομή από την πηγή στον προορισμό.
- Στοιχεία ενός αλγορίθμου δρομολόγησης:
 - Διαδικασία για την αποστολή και λήψη πληροφοριών πρόσβασης στους άλλους δρομολογητές του δικτύου.
 - Διαδικασία για τον υπολογισμό των βέλτιστων διαδρομών.
 - Οι διαδρομές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας κάποιον αλγόριθμο ελάχιστου κόστους.
 - Διαδικασίες για αντίδραση σε αλλαγές της τοπολογίας και κοινοποίησης των αλλαγών αυτών.

Αλγόριθμοι δρομολόγησης



Γράφος δικτύου

Για τη διατύπωση του αλγορίθμου δρομολόγησης χρησιμοποιείται ο γράφος του δικτύου.



Γράφος: $G = (N, E)$

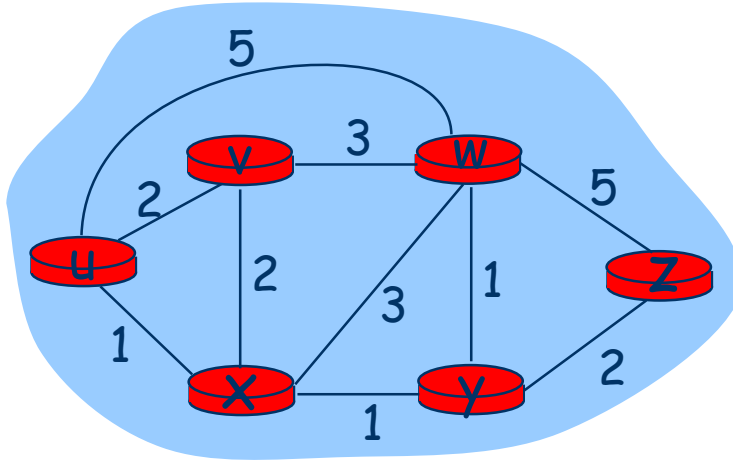
Σύνολο δρομολογητών $N = \{ u, v, w, x, y, z \}$

Σύνολο ζεύξεων $E = \{ (u,v), (u,x), (u,w), (v,x), (v,w), (x,w), (x,y), (w,y), (w,z), (y,z) \}$

Αλγόριθμοι δρομολόγησης



Γράφος δικτύου: κόστη



- $c(x, x') =$ κόστος ζεύξης (x, x')
 - π.χ., $c(w, z) = 5$
- το κόστος μπορεί να είναι πάντα 1, ή αντιστρόφως ανάλογο του εύρους ζώνης, ή ανάλογο της συμφόρησης

Κόστος διαδρομής $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) = c(x_1, x_2) + c(x_2, x_3) + \dots + c(x_{p-1}, x_p)$

Ποια είναι η διαδρομή ελάχιστου κόστους μεταξύ u και z ;

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης βρίσκει τη διαδρομή ελαχίστου κόστους.

Αλγόριθμοι δρομολόγησης



Ταξινόμηση

Πρόελευση της πληροφορίας δρομολόγησης:

Τοπική:

- Οι διαδρομές υπολογίζονται μόνο με βάση την τοπική τοπολογία και κίνηση.
- Ο δρομολογητής γνωρίζει τους φυσικά συνδεδεμένους γείτονες και το κόστος των ζεύξεων προς τους γείτονες.
- Επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού, ανταλλαγή πληροφοριών με τους γείτονες.
- **Αλγόριθμοι διανύσματος αποστάσεων**

Καθολική:

- Οι διαδρομές υπολογίζονται με βάση την συνολική τοπολογία.
- Όλοι οι δρομολογητές ξέρουν την πλήρη τοπολογία και το κόστος των ζεύξεων.
- **Αλγόριθμοι κατάστασης ζεύξεων**



Ταξινόμηση

Στατική ή δυναμική δρομολόγηση;

Στατική:

- Εκ των προτέρων καθορισμένες διαδρομές.
- Οι διαδρομές αλλάζουν αργά με το χρόνο.

Δυναμική:

- Οι διαδρομές αλλάζουν πιο συχνά.
- Επανακαθορισμός και αναδιάταξη των διαδρομών:
 - Περιοδική ενημέρωση.
 - Ενημέρωση, όταν αλλάζουν τα κόστη των ζεύξεων.

Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



- Διάνυσμα αποστάσεων: *Distance vector*
- Κάθε κόμβος ξέρει την απόσταση (κόστος) προς κάθε άμεσα συνδεδεμένο με αυτόν γείτονα.
- Κάθε κόμβος στέλνει περιοδικά το δικό του διάνυσμα αποστάσεων στους γείτονές του.
- Όταν ένας κόμβος X λάβει νέο διάνυσμα αποστάσεων από γείτονα V , ενημερώνει το δικό του διάνυσμα σύμφωνα με τη σχέση:

$$d_X(Y) = \min_V \{c(X, V) + d_V(Y)\}, \quad \forall Y \in N$$

- Μετά από μερικές αλλαγές οι αποστάσεις συγκλίνουν στις ελαχίστου κόστους.

Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



Επαναληπτικός, ασύγχρονος:

- Κάθε τοπικός επανυπολογισμός προκαλείται από:
 - Τοπική αλλαγή κόστους ζεύξης.
 - Νέο διάνυσμα αποστάσεων από τον γείτονα: αλλαγή διαδρομής ελαχίστου κόστους από τον γείτονα.
- *Τερματίζει μόνος του*, δεν απαιτείται εντολή για να σταματήσει.

Κατανεμημένος:

- Κάθε κόμβος ειδοποιεί τους γείτονες, *μόνον* όταν η ελαχίστου κόστους διαδρομή προς *οποιαδήποτε* κατεύθυνση αλλάζει.
 - Οι γείτονες τότε ειδοποιούν τους γείτονές τους, αν είναι αναγκαίο.

Κάθε κόμβος:

Περιμένει για (αλλαγή κόστους τοπικής ζεύξης ή μήνυμα από γείτονα).

Ξαναυπολογίζει τον πίνακα αποστάσεων.

Αν η διαδρομή ελαχίστου κόστους προς οιονδήποτε προορισμό έχει αλλάξει, *ειδοποιεί* τους γείτονες.

Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



Σε κάθε κόμβο διατηρείται πίνακας αποστάσεων στον οποίο υπάρχει:

- Μία σειρά για κάθε δυνατό προορισμό
- Μία στήλη για κάθε άμεσα συνδεδεμένο γειτονικό κόμβο
- Παράδειγμα: στον κόμβο X , η καταχώρηση για τον προορισμό Y , υπολογίζεται ως εξής:

$$d_X(Y) = \min\{c(X, V) + d_V(Y)\}$$

- όπου το \min λαμβάνεται για όλους τους γείτονες V του X .
Ο γειτονικός κόμβος V για τον οποίο ισχύει το \min είναι ο *next hop* στον πίνακα προώθησης του X για τον προορισμό Y .

Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



Πίνακας αποστάσεων: παράδειγμα



Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



Από τον πίνακα αποστάσεων προκύπτει ο πίνακας δρομολόγησης.

Ε	απόσταση μέσω		
	A	B	D
	A	1	14
	B	7	8
	C	6	9
	D	4	11

προορισμός

Ε	Εξερχόμενη ζεύξη προς χρήση	
	A	A,1
	B	D,5
	C	D,4
	D	D,2

προορισμός

Πίνακας αποστάσεων →

Πίνακας δρομολόγησης

Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



	A	
A		
B	1	B
C	1	C
D	2	C
E	3	C
F	4	C

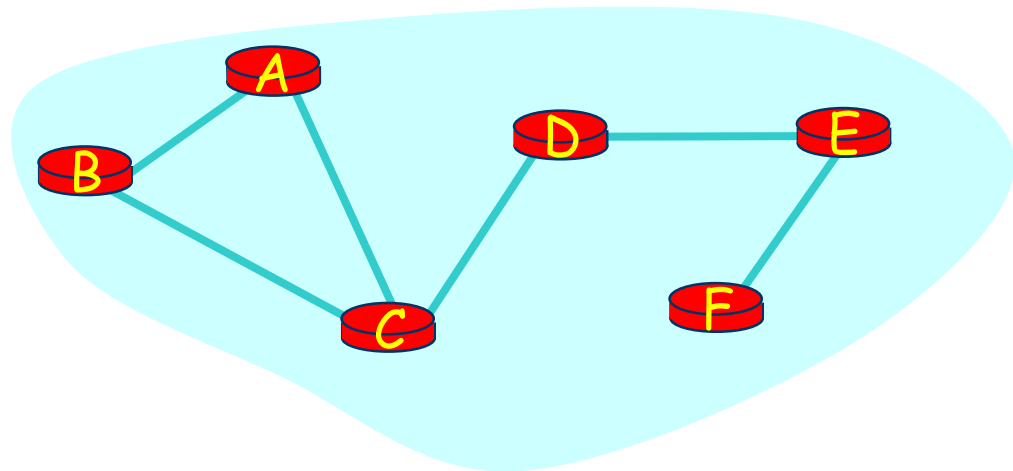
	B	
A	1	A
B		
C	1	C
D	2	C
E	3	C
F	4	C

	C	
A	1	A
B	1	B
C		
D	1	D
E	2	D
F	3	D

	D	
A	2	C
B	2	C
C	1	C
D		
E	1	E
F	2	E

	E	
A	3	D
B	3	D
C	2	D
D	1	D
E		
F	1	F

	F	
A	4	E
B	4	E
C	3	E
D	2	E
E	1	E
F		



Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



Ενημέρωση πινάκων

- Οι κόμβοι στέλνουν ενημερώσεις των διανυσμάτων αποστάσεων στους γείτονες.
- Κάθε κόμβος ενημερώνει τον πίνακά του υπολογίζοντας τη συντομότερη διαδρομή.

	A										
A											
B	1	B									
C	1	C									
D	2	C									
E	3	C									
F	4	C									

	B										
A	1	A									
B											
C	1	C									
D	2	C									
E	3	C									
F	4	C									

	C										
A	1	A									
B	1	B									
C											
D	1	D									
E	2	D									
F	3	D									

	D										
A	2	C									
B	2	C									
C	1	C									
D											
E	1	D									
F	2	E									

	E										
A	3	D									
B	3	D									
C	2	D									
D	1	D									
E											
F	1	F									

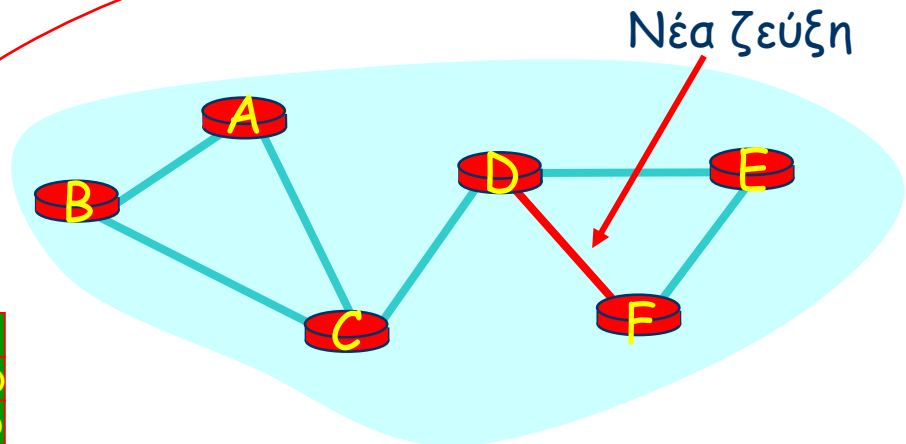
	F										
A	4	E									
B	4	E									
C	3	E									
D	2	E									
E	1	E									
F											

Ενημέρωση πίνακα
δρομολόγησης

	F										
A	4	E									
B	4	E									
C	3	E									
D	2	E									
E	1	E									
F											

	D										
A	2										
B	2										
C	1										
D											
E	1										
F	1										

	F										
A	3	D									
B	3	D									
C	2	D									
D	1	D									
E	1	E									
F											

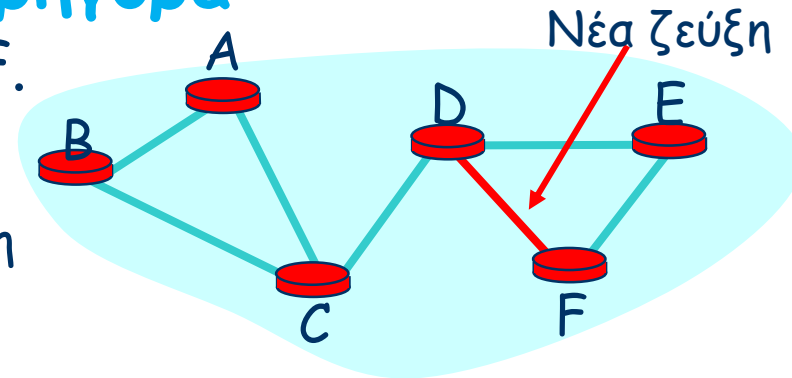


Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



Τα καλά νέα διαδίδονται γρήγορα

- Νέα ζεύξη, εγκαθίσταται η D-F.
- Διάδοση καλών ειδήσεων:
 - Βήμα 1: οι D και F μαθαίνουν για τη νέα ζεύξη.
 - Βήμα 2: ο D στέλνει πίνακα στους C, E, F.
 - Βήμα 3: ο C στέλνει πίνακα στους A, B, D.
- Χαρακτηριστικά:
 - Ταχεία σύγκλιση.
 - Μόνο οι κόμβοι που ωφελούνται αλλάζουν πίνακες.
 - Τα πακέτα δεν κάνουν βρόχους.



A	B	C	D	E	F
A	A1 A	A1 A	A2 C	A3 D	A3 D
B	B	B1 B	B2 C	B3 D	B3 D
C	C1 C	C	C1 C	C2 D	C2 D
D	D2 C	D1 D	D	D1 D	D1 D
E	E3 C	E2 D	E1 E	E	E1 E
F	F4 C	F2 D	F1 E	F1 F	F

A	B	C	D	E	F
A	A1 A	A1 A	A2 C	A3 D	A3 D
B	B	B1 B	B2 C	B3 D	B3 D
C	C1 C	C	C1 C	C2 D	C2 D
D	D2 C	D1 D	D	D1 D	D1 D
E	E3 C	E2 D	E1 E	E	E1 E
F	F3 C	F2 D	F1 E	F1 F	F

Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



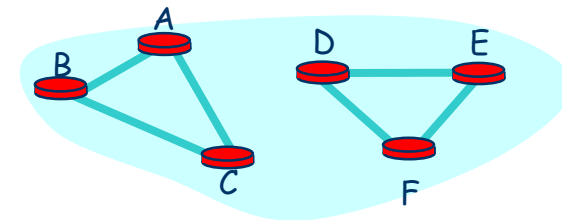
Μέτρημα μέχρι το άπειρο

- Χάνεται η ζεύξη C-D
- Διάδοση κακών ειδήσεων
 - Οι D και C το μαθαίνουν.
 - Ο C λαμβάνει ενημερώσεις από τους A και B.
 - Ο C στέλνει ενημερώσεις στους A και B.
-κ.ο.κ. μέχρι;
- Χαρακτηριστικά:
 - Αργή σύγκλιση.
 - Όλοι οι κόμβοι μπορεί να αλλάξουν πίνακες.
 - Βρόχοι πακέτων, προσωρινές αστάθειες.
- Πώς βελτιώνεται αυτό;
 - Τέχνασμα poisoned reverse.

A	B	C	D	E	F
A					
B	1 B				
C	1 C				
D	2 C				
E	3 C				
F	3 C				

A	B	C
A		
B	1 B	
C	1 C	
D	2 C	
E	3 C	
F	3 C	

A	B	C
A		
B	1 B	
C	1 C	
D	4 C	
E	5 C	
F	5 C	



Count-to-Infinity Problem



Distances to C:

A --> C is 2

B --> C is 1

Assume that link (B,C) goes down, B does not know that C is unreachable and thinks that it can reach C through A at cost: $(2+1)=3$. Then A recalculates its distance vector and finds that C is at distance $(3+1)=4$ (through B) etc.

The **critical issue** is: the fact that A's path to C depends on the (B,C) link is not considered.

Fixing the Count-to-Infinity problem



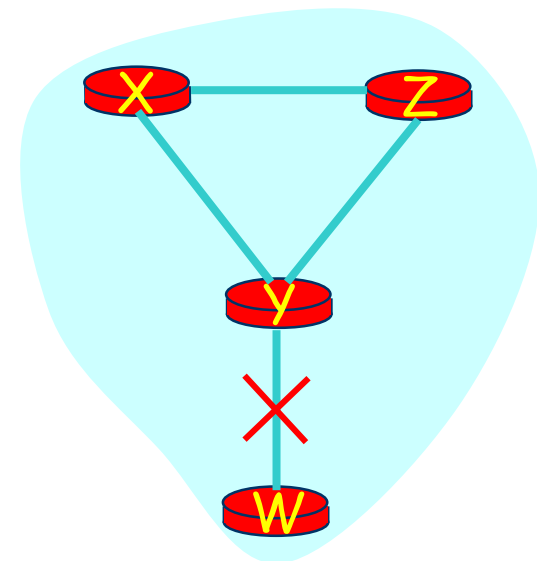
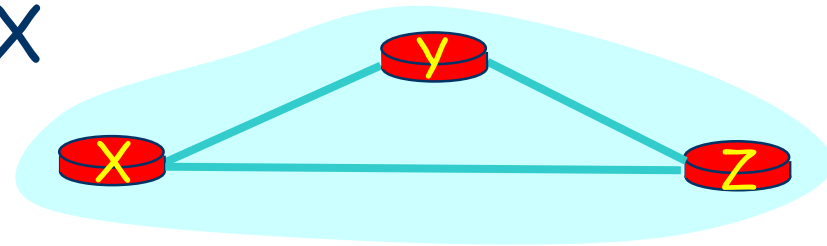
- Apply a maximum value on the cost (i.e. 20 hops)
 - slow convergence
- Report the entire path to the destination in addition to the cost to the destination
 - very expensive solution
- Split horizon technique: If router R forwards traffic for destination D through neighbor N then R reports to N that R's distance to D is infinity. Because R is routing traffic to D through N, R's real distance to D cannot possibly matter to N.

Αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων



Τέχνασμα Poisoned reverse

- Αν ο Z δρομολογεί προς X μέσω του Y, τότε ο Z θα αναγγέλλει προς Y ότι η απόστασή του από τον X είναι ∞ .
- Το poisoned reverse μερικές φορές αποτυγχάνει.



Αλγόριθμος κατάστασης ζεύξεων



- Δύο είναι τα βασικά μειονεκτήματα του αλγόριθμου διανύσματος αποστάσεων:
 - Δεν λαμβάνει υπόψη τη χωρητικότητα των γραμμών.
 - Μερικές φορές ο αλγόριθμος καθυστερεί υπερβολικά για να συγκλίνει.
- Για τους λόγους αυτούς, επινοήθηκε ένας καινούργιος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος **κατάστασης ζεύξεων (link state)**.

Αλγόριθμος κατάστασης ζεύξεων



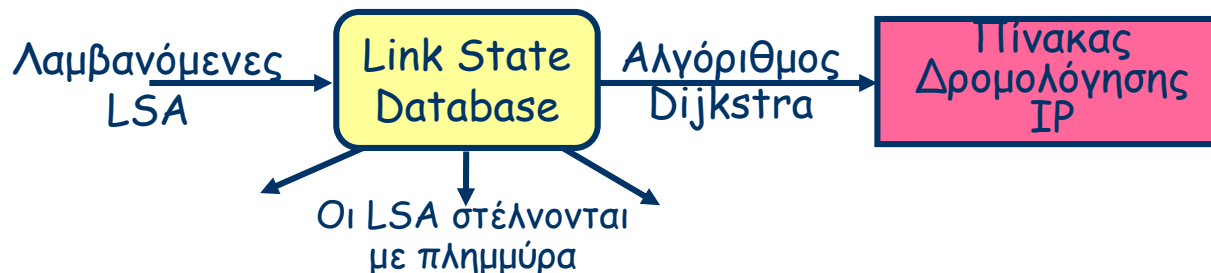
- Η τοπολογία δικτύου και τα κόστη των ζεύξεων είναι γνωστά σε όλους τους κόμβους.
- Επιτυγχάνεται με **εκπομπή**, από κάθε δρομολογητή προς όλους τους δρομολογητές του δικτύου, του κόστους των ζεύξεων που είναι συνδεδεμένες σ' αυτόν.
- Όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια πληροφορία.
- Κάθε κόμβος εκτελεί τον αλγόριθμο και υπολογίζει τις διαδρομές ελαχίστου κόστους προς όλους τους άλλους.
- Αποτέλεσμα: ο **πίνακας δρομολόγησης** για τον κόμβο.
- **Ο αλγόριθμος Dijkstra**: επαναληπτικός, μετά k επαναλήψεις είναι γνωστή η διαδρομή ελαχίστου κόστους για k προορισμούς.

Αλγόριθμος κατάστασης ζεύξεων



Βασικές αρχές λειτουργίας

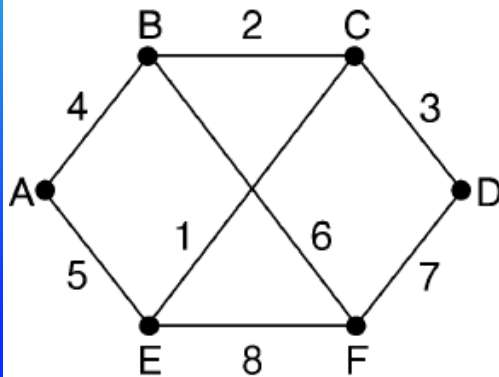
1. Κάθε δρομολογητής αναπτύσσει σχέση με τους γείτονές του.
2. Υπολογίζει την καθυστέρηση ή το κόστος για καθέναν από τους γείτονές του.
3. Παράγει *αναγγελίες κατάστασης ζεύξεων (LSA)*, οι οποίες διανέμονται σε όλους τους δρομολογητές
 - LSA = (link id, κατάσταση ζεύξης, κόστος, γείτονες).
4. Διατηρεί database με όλες τις λαμβανόμενες LSA (*database τοπολογίας* ή *link state database*), που περιγράφει το δίκτυο ως γράφο με τα βάρη των κλάδων.
5. Κάθε δρομολογητής χρησιμοποιεί την link state database του για να τρέξει έναν αλγόριθμο ελάχιστης διαδρομής (αλγόριθμος Dijkstra) και να βρει την ελάχιστη διαδρομή προς κάθε προορισμό.



Αλγόριθμος κατάστασης ζεύξεων



Αναγγελίες



(α)

Πακέτα Κατάστασης Ζεύξεων

A	B	C	D	E	F
Seq.	Seq.	Seq.	Seq.	Seq.	Seq.
Age	Age	Age	Age	Age	Age
B 4	A 4	B 2	C 3	A 5	B 6
E 5	C 2	D 3	F 7	C 1	D 7
	F 6	E 1		F 8	E 8

(β)

- Αύξοντες αριθμοί 32 bit για να μην γίνεται αναδίπλωση γρήγορα.
- Ηλικία κάθε πακέτου. Το πεδίο ηλικίας μειώνεται κατά ένα από κάθε δρομολογητή κατά τη διαδικασία της πλημύρας και μία φορά ανά sec.
- Προσωρινή αναμονή των πακέτων σε κάθε δρομολογητή.
- Επαληθεύσεις, για ασφάλεια έναντι λαθών.

Link State Routing Algorithm Operation



- **Construction of Link State Packet (LSP):** Each router constructs a packet known as Link State Packet that contains a list of the names and cost to each neighbor
- **Distribution of LSPs:** The LSP is transmitted to all the routers and each router stores the “**most recently**” generated LSP from each other router
- **Calculation of routes:** Each router armed with a complete map of the topology computes routes to each destination (i.e. compute shortest paths)

Distribution of LSPs



- Flooding: each packet received is transmitted to each neighbor except the one from which it was received
 - use of max # of hops to prevent a single packet's spawning an infinite number of offspring
 - exponential number of copies for each packet
- If an LSP (from source S) is received from neighbor N and the LSP is identical to the one from S that is stored, then ignore it (it is duplicate). Otherwise store the received LSP and transmit it to all neighbors except N . The LSP travels each link in the network only once.

Most Recently Generated LSP?



- A router R can not always assume that the most recently received LSP from S is the most recently generated by S (two LSP's may travel different paths).
- Possible solutions:
 - use of timestamp
 - use of sequence numbers
 - use of AGE field: starts at some initial value and gets decremented as it is held in memory. If it reaches zero the LSP is considered too old and an LSP with a non-zero age field is accepted as newer (regardless of sequence number etc.)

Computing Shortest Paths



Computing shortest paths (Dijkstra's Algorithm)

Shortest Path Routing (Dijkstra's Algorithm)

Let $D(v)$ be the distance (sum of link weights along a given path) from source 1 to node v . Let $\ell(i,j)$ be the (given) cost between node i and node j . There are then two parts to the algorithm: an initialization step, and a step to be repeated until the algorithm terminates:

1. *Initialization.* Set $N = \{1\}$. For each node v not in N , set $D(v) = \ell(1,v)$. (We use ∞ for nodes not connected to 1; any number larger than the maximum cost or distance in the network would suffice.)
2. *At each subsequent step.* Find a node w not in N for which $D(w)$ is a minimum, and add w to N . Then update $D(v)$ for all nodes remaining that are not in N by computing

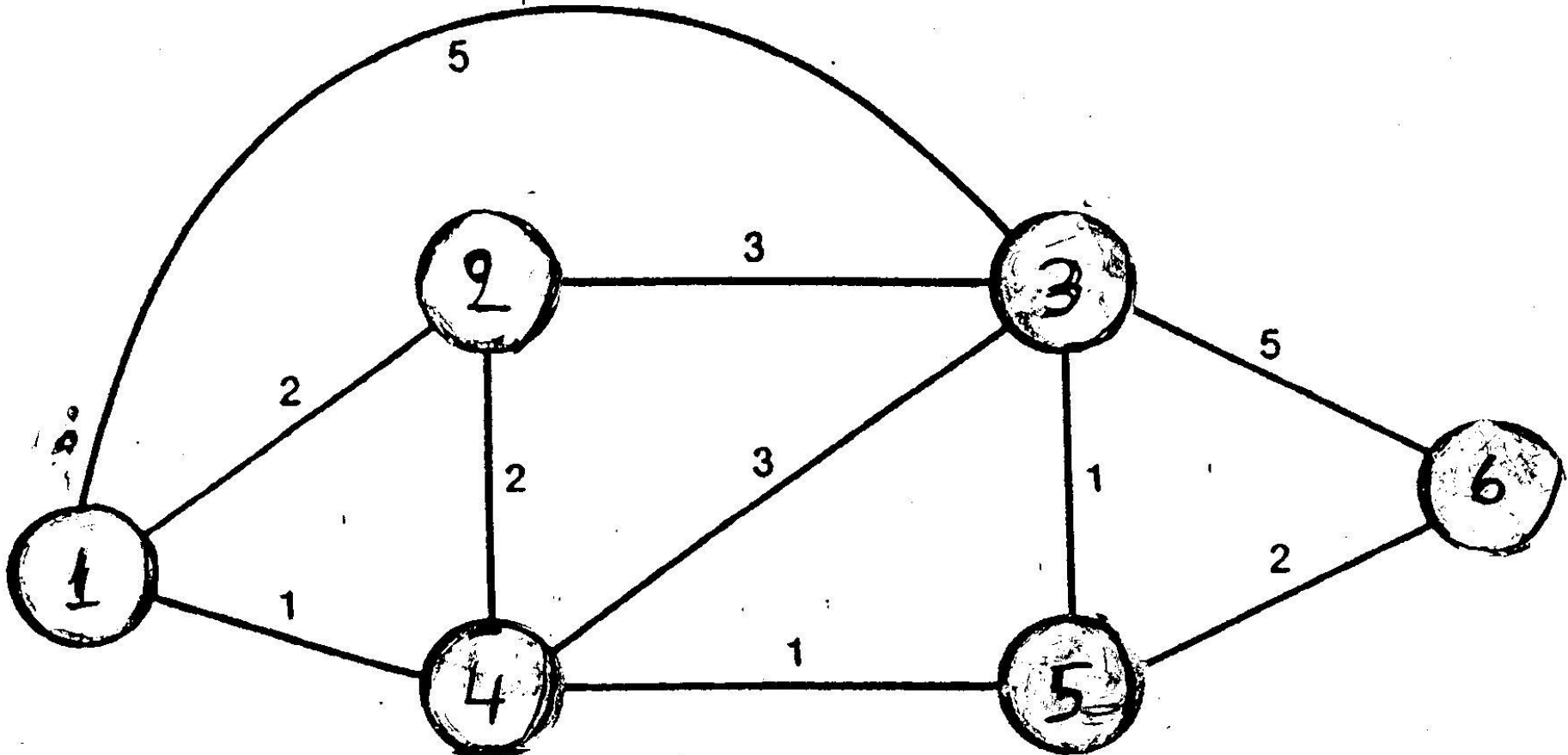
$$D(v) \leftarrow \text{Min}[D(v), D(w) + \ell(w,v)]$$

Step 2 is repeated until all nodes are in N .

An Example:



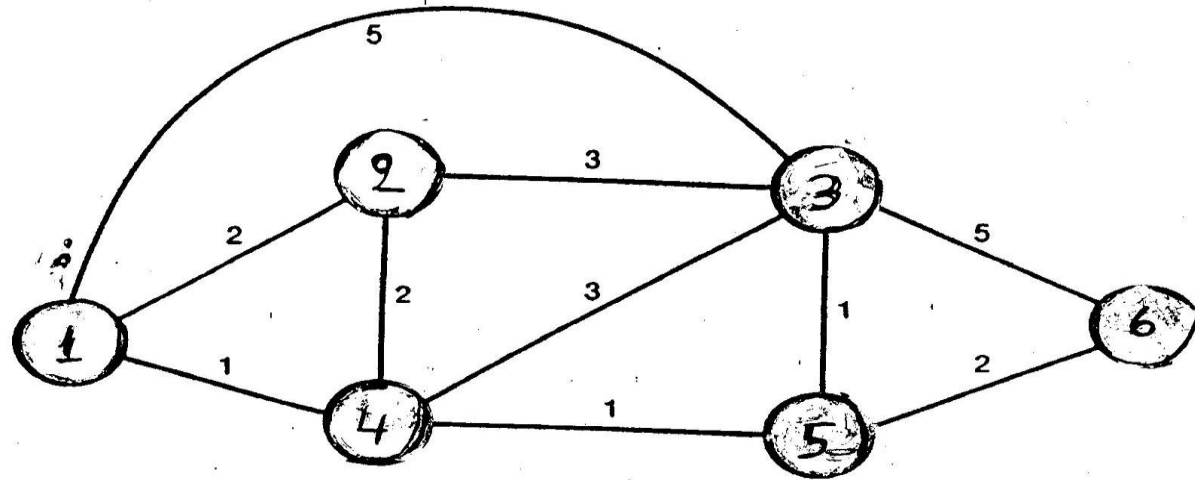
- For the network below, calculate the shortest paths from node 1 to all other nodes, using Dijkstra's algorithm



Final Calculation



Example:
Dijkstra's Algorithm

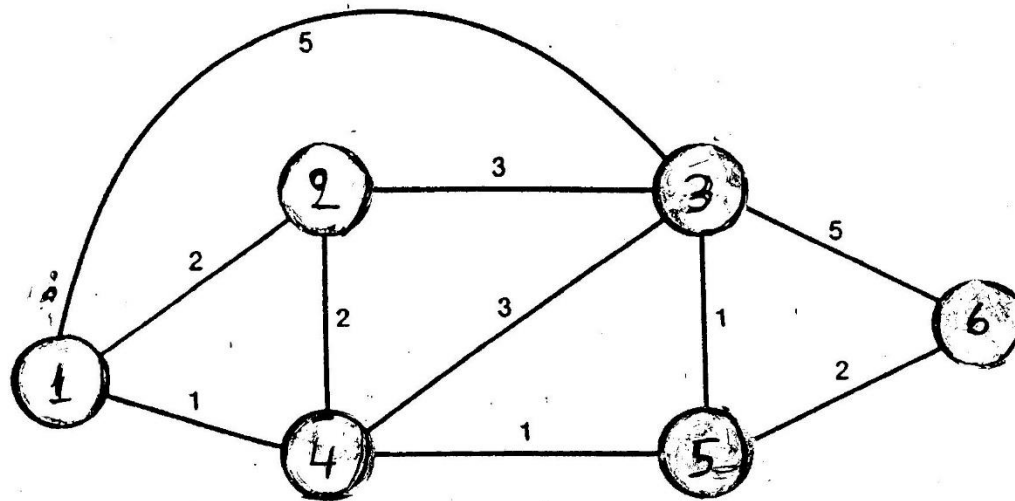


Example network

Step	N	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)
Initial	{1}	2	5	1	∞	∞
1	{1,4}	2	4	①	2	∞
2	{1,4,5}	2	3	1	②	4
3	{1,2,4,5}	②	3	1	2	4
4	{1,2,3,4,5}	2	③	1	2	4
5	{1,2,3,4,5,6}	2	3	1	2	④

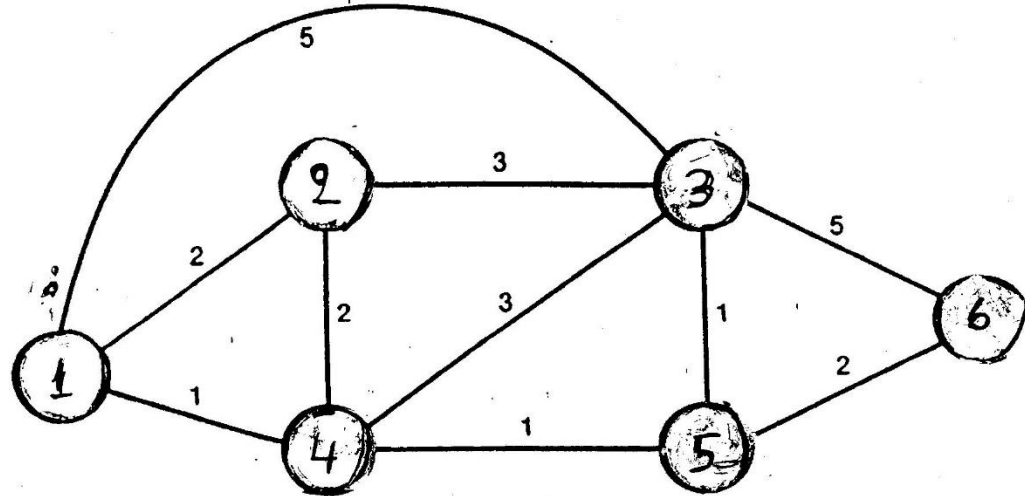
Step by step calculation:

Initialization phase



- Initialization step: $N=\{1\}$
- For each node v not in N (e.g. $v=\{2,3,4,5,6\}$):
 $D(v)=l(1,v)$
- $D(2)=l(1,2)=2$; $D(3)=l(1,3)=5$; $D(4)=l(1,4)=1$;
- $D(5)=l(1,5)=\text{inf}$; $D(6)=l(1,6)=\text{inf}$
- These values are placed in the first row of the table (see previous figure)

Step 1

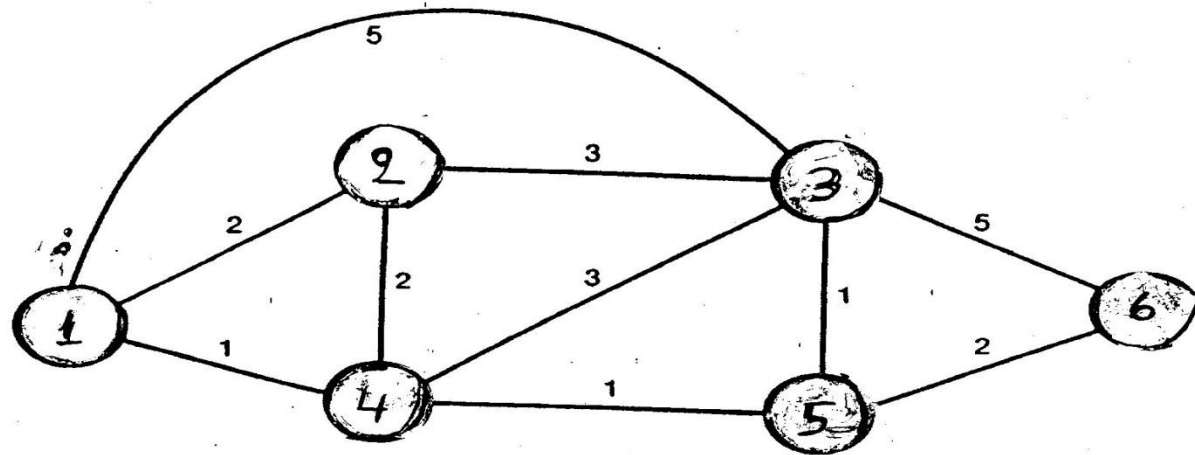


- Find node w not in N , such that $D(w)$ is minimum. In this step: $w=4$, since $D(4)=1$. (see first row of the table in previous figure). Now: $N=\{1,4\}$
- Update $D(v)$ for all nodes v not in N (e.g. $v=\{2,3,5,6\}$), using:
- $D(v)=\text{Min}\{D(v), D(w)+l(w,v)\}$
- Example:
- For $v=2$: $D(2)=\text{Min}\{D(2), D(4)+l(4,2)\}=\text{Min}\{2, 1+2\}=2$
- For $v=3$: $D(3)=\text{Min}\{D(3), D(4)+l(4,3)\}=\text{Min}\{5, 1+3\}=4$
- For $v=5$: $D(5)=\text{Min}\{D(5), D(4)+l(4,5)\}=\text{Min}\{\text{inf}, 1+1\}=2$
- For $v=6$: $D(6)=\text{Min}\{D(6), D(4)+l(4,6)\}=\text{Min}\{\text{inf}, 1+\text{inf}\}=\text{inf}$
- Based on this calculation Step 1 row (second row of the final table) is calculated

Example (cont.)



Example: Dijkstra's Algorithm



Example network

Step	N	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)
Initial	{1}	2	5	1	∞	∞
1	{1,4}	2	4	①	2	∞
2	{1,4,5}	2	3	1	②	4
3	{1,2,4,5}	②	3	1	2	4
4	{1,2,3,4,5}	2	③	1	2	4
5	{1,2,3,4,5,6}	2	3	1	2	④

Following steps



- Same procedure as before is repeated in order to obtain the new updated calculation (Step 2 row in the final table). In step 2 we have to find node w not in N , such that $D(w)$ is minimum (see second row on the table). In this step we choose: $w=5$, since $D(5)=2$. Please note that $D(2)=D(5)=2$ in this step. In the case of tie as here, among those nodes that tie, we choose one node randomly. Here we chose $w=5$. Therefore: $N=\{1,4,5\}$.
- In this step we update $D(v)$ for all nodes v not in N (e.g. $v=\{2,3,6\}$), using: $D(v)=\text{Min}\{D(v), D(w)+l(w,v)\}$. After completing this step, Step 2 row (third row in the final table) is completed, and so on, until you exhaust all the nodes..

Comparison of Link State and Distance Vector Routing



- Memory: Assume n -nodes in the network and that each node has k -neighbors:
 - Distance Vector: Each DV is $O(n)$ and keeps distance vector from each of its k neighbors. Therefore $O(k \times n)$.
 - Link State: Each node keeps n LSPs (one from each node in the network). Each LSP is proportional to k . Therefore: $O(n \times k)$.
- Bandwidth Consumption: Depends heavily on the topology.

Comparison of Link State and Distance Vector Routing (cont.)



- Distance Vector fans: a link change only propagates control messages as far as the link change's routing effect (i.e. in case of two parallel links where one fails and recovers)
- Link State fans: a link change can cause the transmission of multiple control packets over a single link under distance Vector (i.e. count to infinity problem). Under LS each LSP travels only once on each link.
- Speed of convergence: LSP converges faster than the DV.

Ιεραρχική δρομολόγηση



Έως τώρα η μελέτη για τη δρομολόγηση ήταν ιδανική:

- όλοι οι δρομολογητές ίδιοι,
- το δίκτυο "επίπεδο",
- ... δεν συμβαίνει το ίδιο στην πράξη.

Κλίμακα

Με 200×10^6 προορισμούς:

- Αδυναμία αποθήκευσης όλων των προορισμών στους πίνακες δρομολόγησης!
- Η ανταλλαγή των πινάκων δρομολόγησης θα πλημμύριζε τις ζεύξεις!

Διοικητική αυτονομία

- Διαδίκτυο = δίκτυο από δίκτυα.
- Κάθε διαχειριστής δικτύου μπορεί να θέλει να ελέγχει τη δρομολόγηση στο δίκτυό του.



Ιεραρχική δρομολόγηση

- Το Internet αποτελείται από **Αυτόνομα Συστήματα (AS)** διασυνδεδεμένα μεταξύ τους:
- **Stub AS**: μικρή επιχείρηση, μία σύνδεση με άλλο AS.
- **Multihomed AS**: μεγάλη επιχείρηση (όχι transit), πολλαπλές συνδέσεις με άλλα AS.
- **Transit AS**: πάροχος, διασυνδέει πολλά AS.
- Δρομολογητές στο ίδιο AS τρέχουν το ίδιο **"intra-AS"** πρωτόκολλο δρομολόγησης.
- Δρομολογητές σε διαφορετικά AS μπορεί να τρέχουν διαφορετικό **intra-AS** πρωτόκολλο δρομολόγησης.

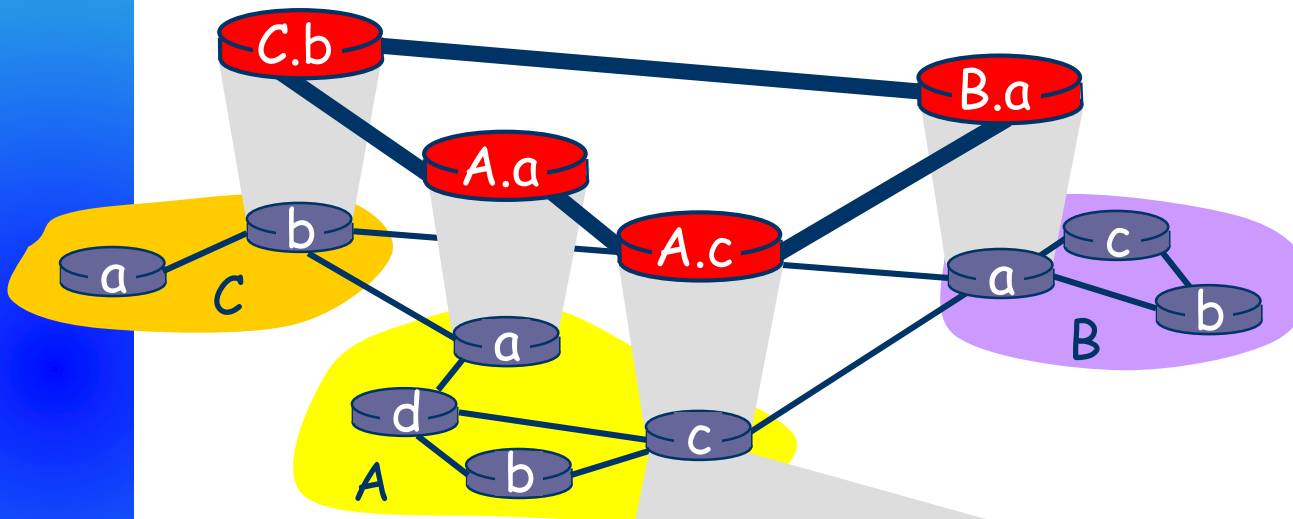
Δρομολογητές πύλες

- Ειδικοί δρομολογητές στο AS.
- Υπεύθυνοι για δρομολόγηση προς προορισμούς εκτός AS.
 - Τρέχουν πρωτόκολλο δρομολόγησης **inter-AS** με τους άλλους δρομολογητές πύλες.

Ιεραρχική δρομολόγηση



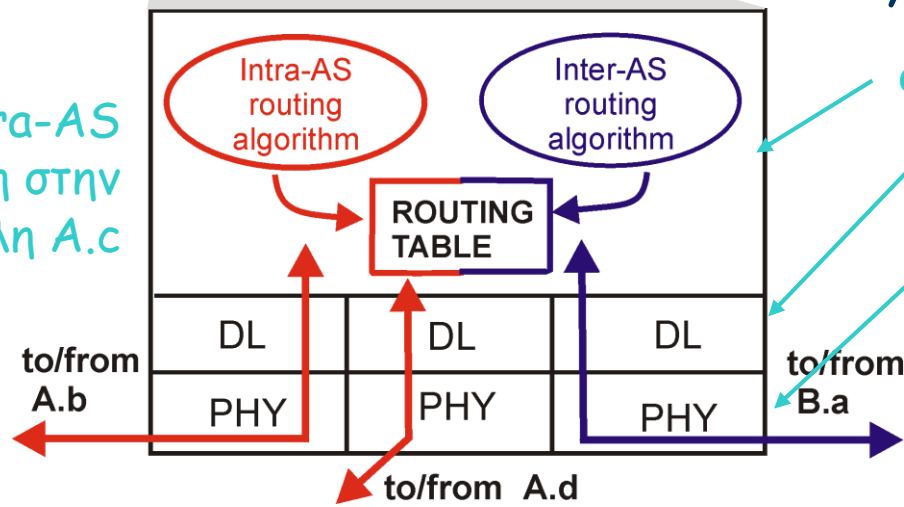
Δρομολόγηση Intra-AS και Inter-AS



Πύλες:

- Πραγματοποιούν δρομολόγηση **inter-AS** μεταξύ τους.
- Πραγματοποιούν δρομολόγηση **intra-AS** με τους άλλους δρομολογητές στο AS τους.

inter-AS & intra-AS
δρομολόγηση στην
πύλη A.c



στρώμα δικτύου

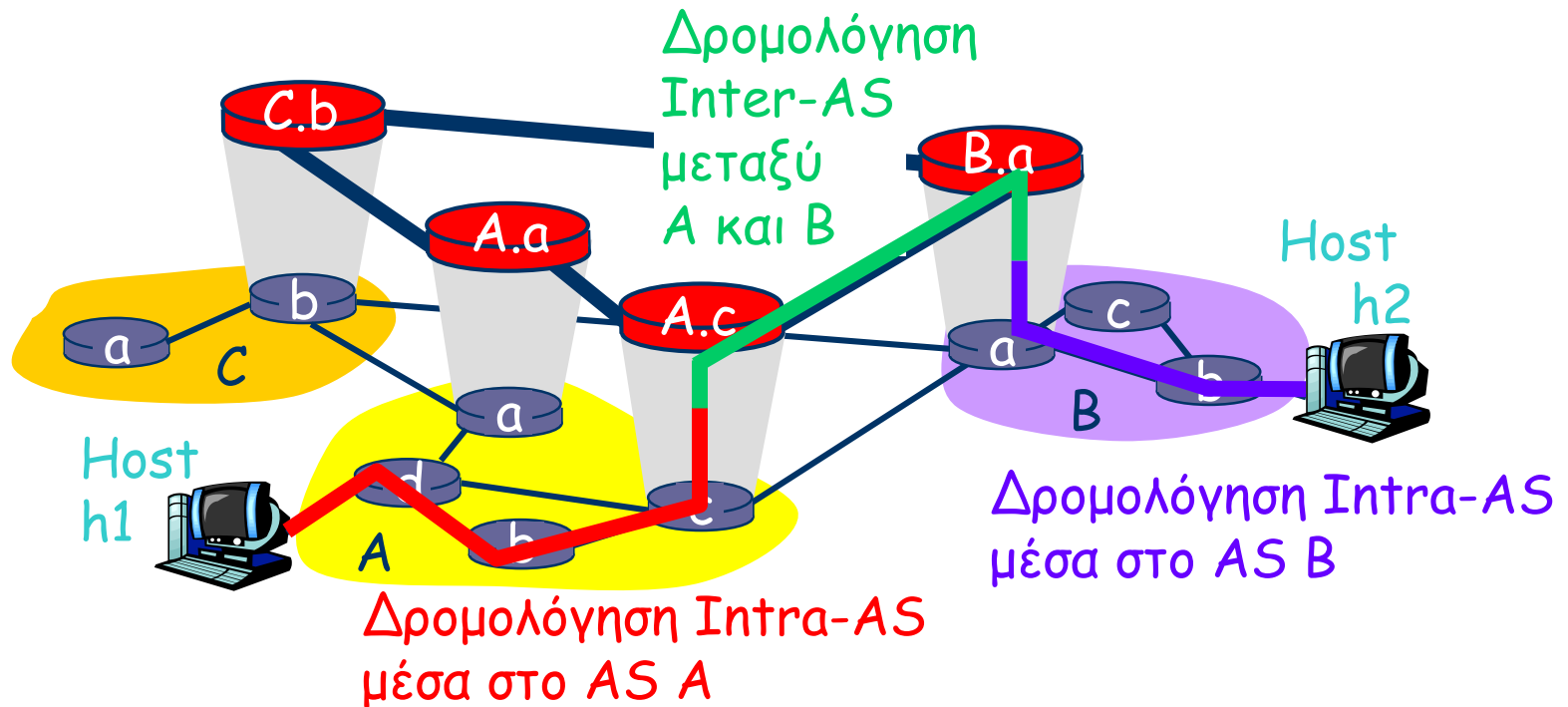
στρώμα ζεύξης

φυσικό στρώμα

Ιεραρχική δρομολόγηση



Δρομολόγηση Intra-AS και Inter-AS



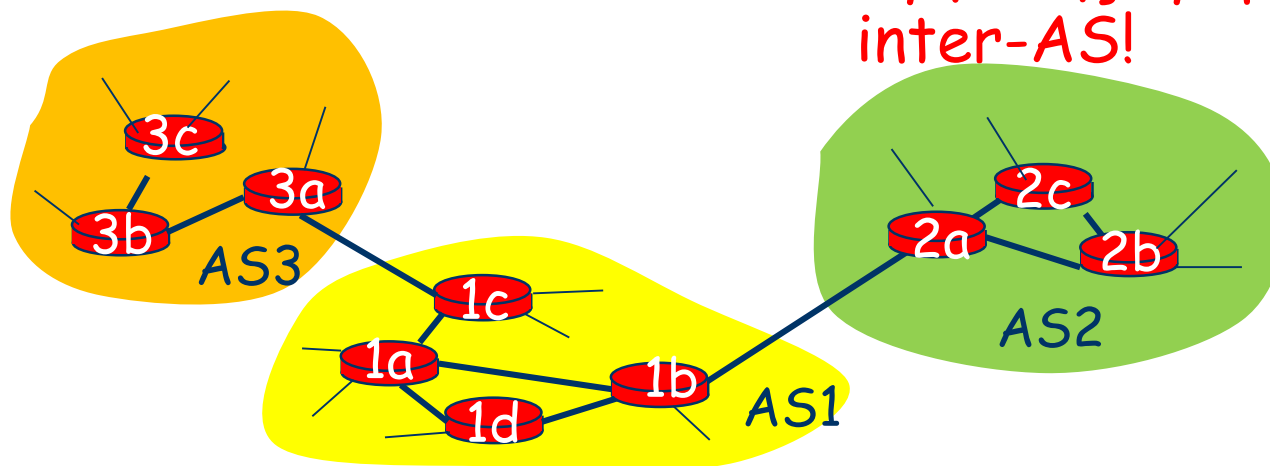


Δρομολόγηση Inter-AS

Το AS1 πρέπει:

- Έστω ότι κάποιος router στο AS1 λαμβάνει πακέτο με προορισμό εκτός του AS1:
 - Ο router θα πρέπει να προωθήσει το πακέτο στον gateway router, αλλά ποιον;
1. Να μάθει ποιοι προορισμοί είναι προσβάσιμοι μέσω του AS2 και ποιοι μέσω του AS3.
 2. Να διαδώσει αυτή την πληροφορία πρόσβασης σε όλους τους routers στο AS1.

Έργο της δρομολόγησης inter-AS!

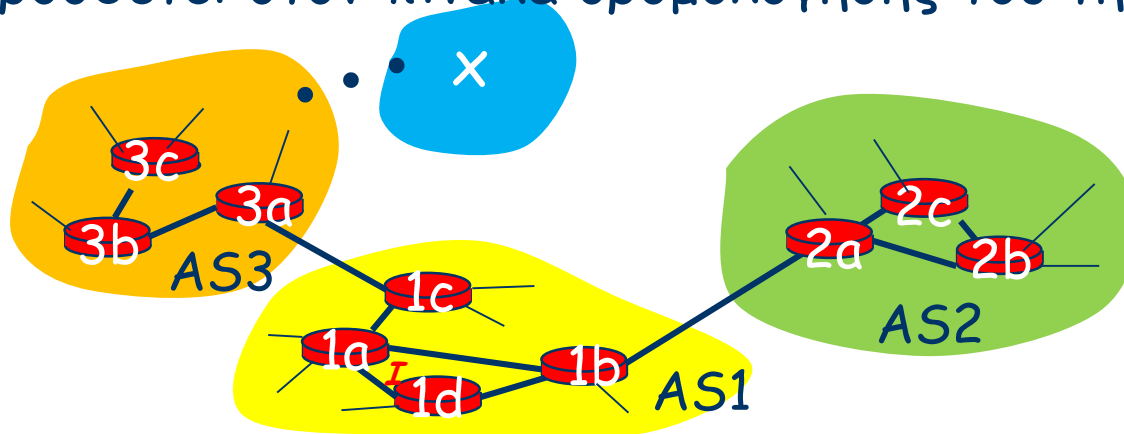


Ιεραρχική δρομολόγηση



Παράδειγμα διάρθρωσης πίνακα δρομολόγησης

- Έστω ότι το AS1 μαθαίνει (μέσω του πρωτοκόλλου inter-AS) ότι υποδίκτυο **X** είναι προσβάσιμο μέσω του AS3 (gateway 1c) αλλά όχι μέσω του AS2 (gateway 1b).
- Το πρωτόκολλο inter-AS διαδίδει την πληροφορία πρόσβασης σε όλους τους εσωτερικούς δρομολογητές.
- Ο δρομολογητής 1d γνωρίζει από τη δρομολόγηση intra-AS ότι η **I** διεπαφή του είναι στην διαδρομή ελαχίστου κόστους προς τον 1c.
- προσθέτει στον πίνακα δρομολόγησής του την εγγραφή **(X,I)**



Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Intra-AS



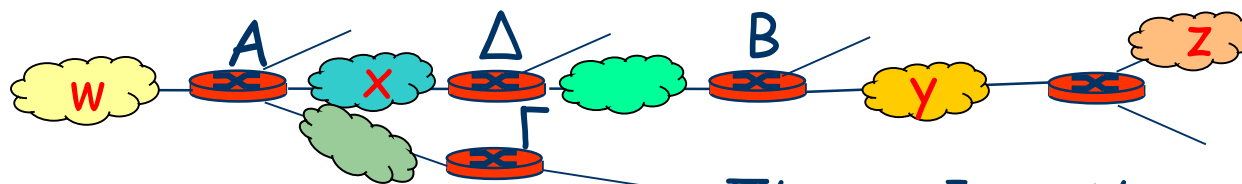
- Γνωστά και ως **Interior Gateway Protocols (IGP)**.
- Τα γνωστότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης Intra-AS:
 - **RIP**: Routing Information Protocol
 - **OSPF**: Open Shortest Path First
 - **IGRP**: Interior Gateway Routing Protocol (ιδιωτικό της Cisco)



- **RIP: Routing Information Protocol**
- Χρησιμοποιεί αλγόριθμο διανύσματος αποστάσεων.
- Ως μέτρο των αποστάσεων χρησιμοποιείται ο αριθμός των βημάτων [max = 15 βήματα (hops)].
- Τα διανύσματα αποστάσεων ανταλλάσσονται μεταξύ γειτόνων κάθε 30 sec μέσω απαντητικού μηνύματος, που ονομάζεται **αναγγελία RIP (RIP advertisement)**.
- Κάθε αγγελία είναι μια λίστα που περιέχει μέχρι 25 υποδίκτυα προορισμού μέσα στο AS.



Παράδειγμα



Πίνακας δρομολόγησης του Δ

Προορ. Επόμε. βήμα Αρ. βημάτων

w	A	2
y	B	2
z	B	7
x	--	1
...

Διάνυσμα
από A προς Δ

Προορ. βήμ.

w	-
x	-
z	3
...	...



Προορ. Επόμε. βήμα Αρ. βημάτων

w	A	2
y	B	2
z	B A	7 4
x	--	1
...



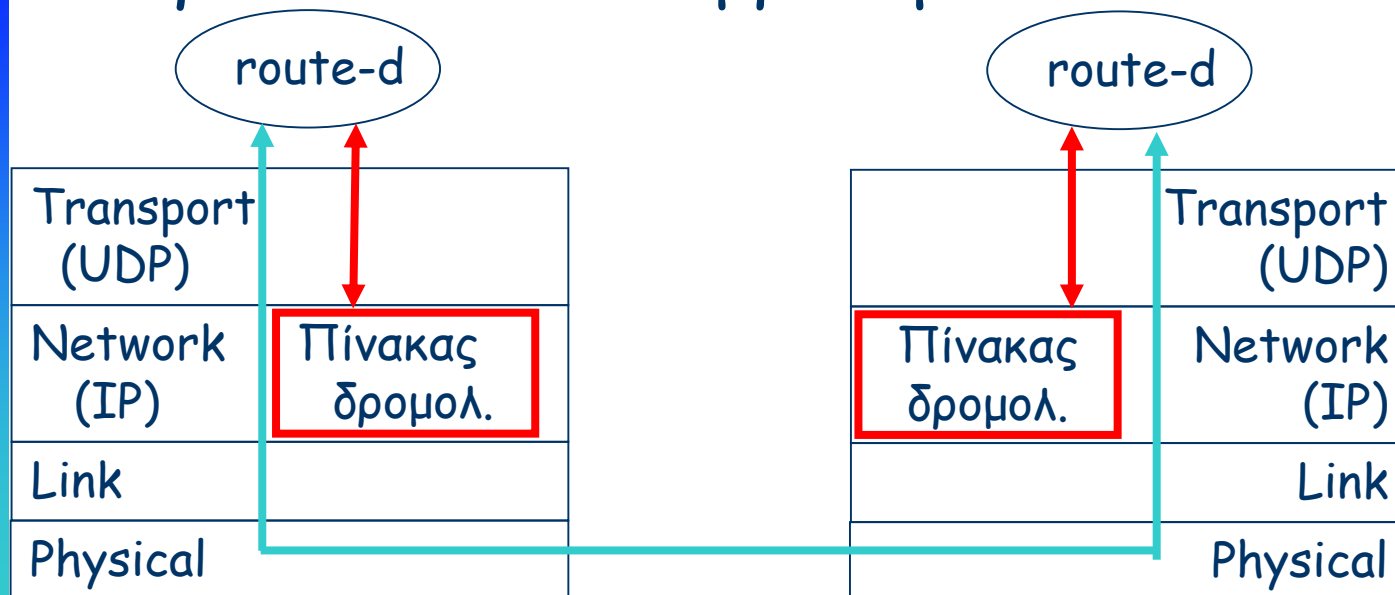
Ανακάλυψη διακοπής ζεύξης

- Αν δεν ακουστεί αγγελία μετά 3 min, η ζεύξη προς τον γείτονα θεωρείται νεκρή.
 - Οι διαδρομές μέσω του γείτονα ακυρώνονται.
 - Στέλνονται νέες αγγελίες προς τους γείτονες.
 - Οι γείτονες με τη σειρά τους στέλνουν νέες αγγελίες (αν αλλάξουν οι πίνακες).
 - Η πληροφορία για τη διακοπή ζεύξης διαδίδεται σ' όλο το δίκτυο.
 - Χρησιμοποιείται poisoned reverse για να παρεμποδιστούν οι βρόχοι (άπειρη απόσταση = 16 βήματα).



Διαχείριση πινάκων

- Η διαχείριση των πινάκων δρομολόγησης RIP γίνεται από διαδικασία του στρώματος εφαρμογών που ονομάζεται `route-d` (daemon).
- Οι αγγελίες στέλνονται με πακέτα UDP, περιοδικά επαναλαμβανόμενα.





Παράδειγμα πίνακα

Router: *giroflée.eurocom.fr*

Destination	Gateway	Flags	Ref	Use	Interface
127.0.0.1	127.0.0.1	UH	0	26492	lo0
192.168.2.	192.168.2.5	U	2	13	fa0
193.55.114.	193.55.114.6	U	3	58503	le0
192.168.3.	192.168.3.5	U	2	25	qaa0
224.0.0.0	193.55.114.6	U	3	0	le0
default	193.55.114.129	UG	0	143454	

- Συνδέονται τρία δίκτυα κατηγορίας C (LAN)
- Ο δρομολογητής γνωρίζει μόνο τις διαδρομές για τα συνδεδεμένα LAN
- Χρησιμοποιείται Default δρομολογητής για προώθηση
- Διεύθυνση πολλαπλής διανομής: 224.0.0.0
- Διεπαφή βρόχου επιστροφής (loopback) για debugging



- **OSPF: Open Shortest Path First**
- "Open": δημόσια διαθέσιμο.
- Χρησιμοποιεί αλγόριθμο κατάστασης ζεύξεων:
 - Διασπορά πακέτων κατάστασης ζεύξεων,
 - Τοπολογία σε κάθε κόμβο,
 - Υπολογισμός διαδρομής με αλγόριθμο Dijkstra.
- Η αναγγελία OSPF έχει μια εγγραφή για κάθε γειτονικό δρομολογητή.
- Οι αγγελίες διασπείρονται σε **όλο** το AS (με πλημμύρα).
 - Μεταφέρονται από μηνύματα OSPF απευθείας πάνω στο IP (upper-layer protocol: 89).

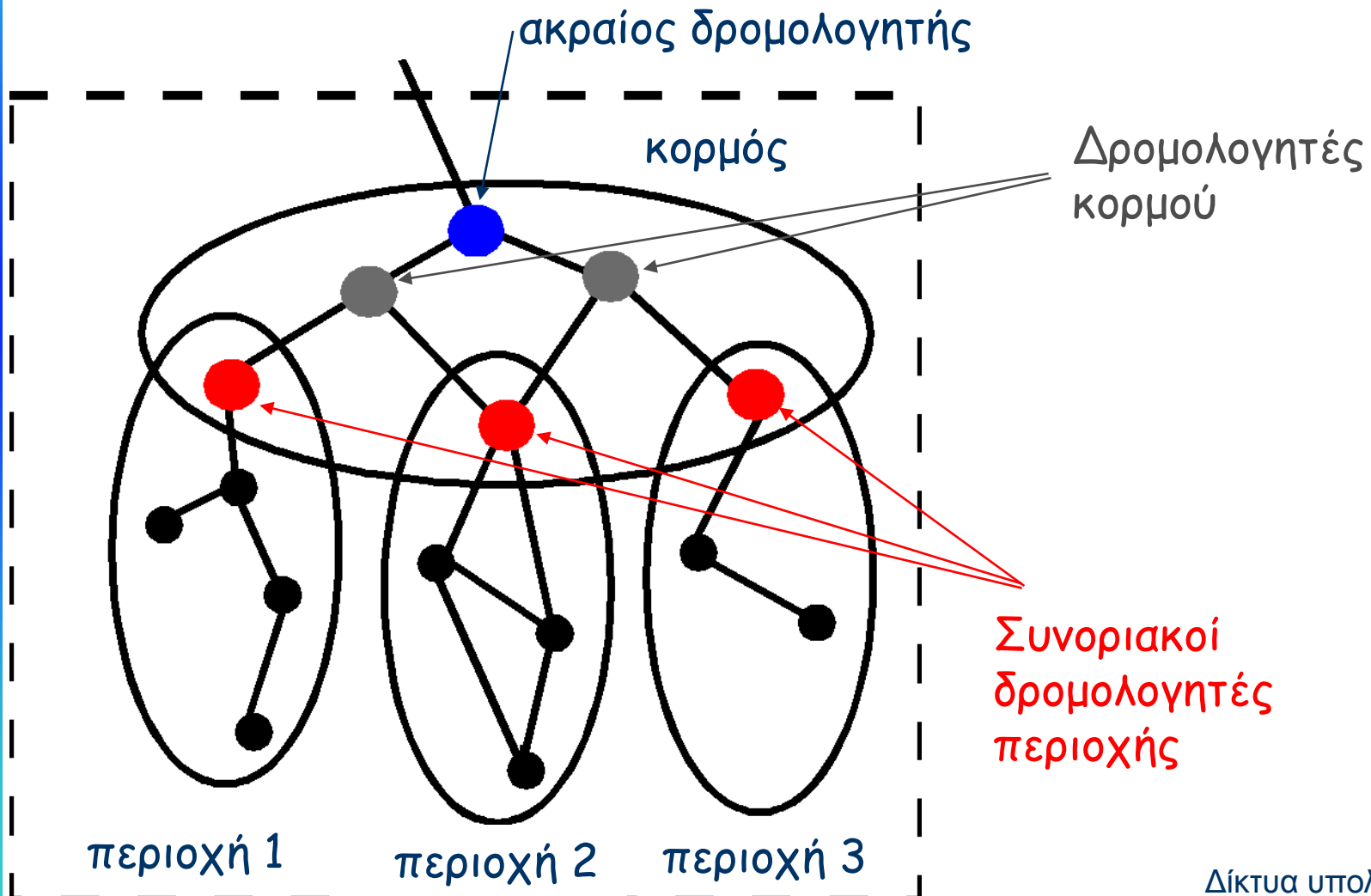


Εξελιγμένες ιδιότητες

- Ασφάλεια: πιστοποιείται η αυθεντικότητα όλων των μηνυμάτων OSPF.
- Επιτρέπονται περισσότερες τις μιας διαδρομές με το ίδιο κόστος (μόνο μία για το RIP).
- Για κάθε ζεύξη υπάρχουν πολλαπλές μετρικές για διαφορετικούς ΤΟΣ (π.χ., το κόστος της δορυφορικής ζεύξης τίθεται "χαμηλό" για best effort και "υψηλό" για πραγματικό χρόνο).
- Ολοκληρωμένη υποστήριξη απλής μετάδοσης και πολλαπλής διανομής:
 - Το Multicast OSPF (MOSPF) χρησιμοποιεί την ίδια βάση δεδομένων για την τοπολογία με το OSPF.
- Ιεραρχικό OSPF σε μεγάλες επικράτειες.



Ιεραρχικό OSPF





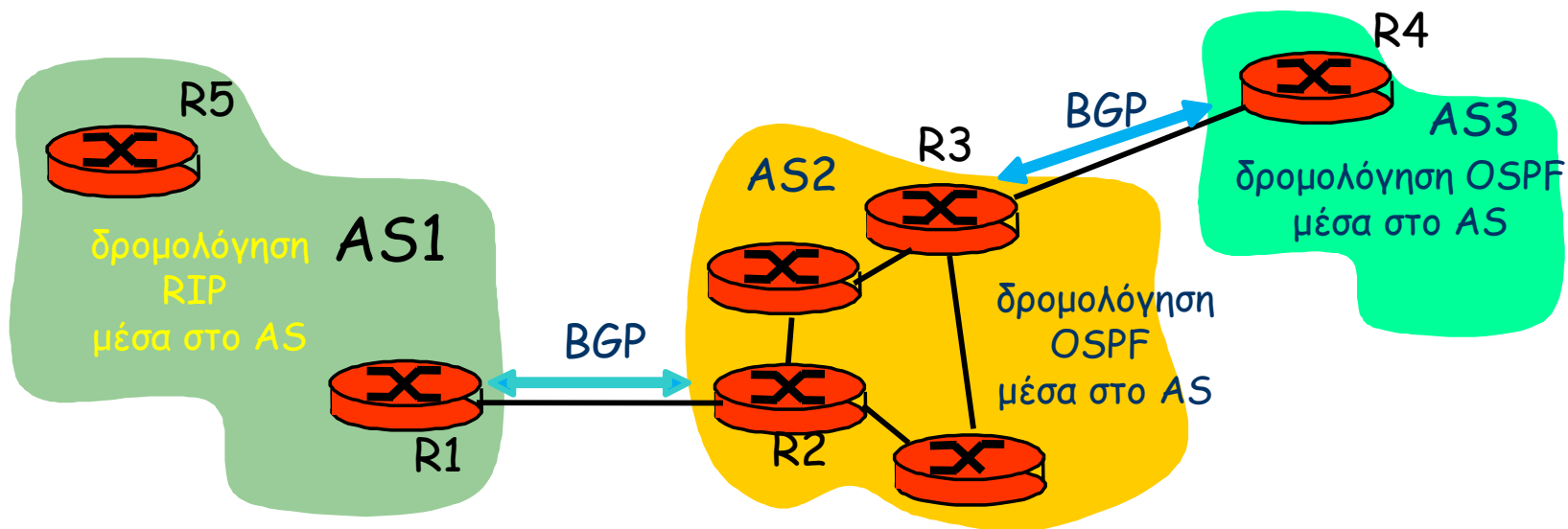
Ιεραρχικό OSPF

- **Ιεραρχία δύο επιπέδων:** τοπική περιοχή, δίκτυο κορμού.
 - Αγγελίες κατάστασης ζεύξεων μόνο στην περιοχή.
 - Κάθε κόμβος γνωρίζει λεπτομερώς την τοπολογία της περιοχής.
 - Για τα δίκτυα άλλων περιοχών γνωρίζει μόνο την κατεύθυνση (συντομότερη διαδρομή).
- **Συνοριακοί δρομολογητές περιοχής (Area border routers):** "συνοψίζουν" αποστάσεις για τα δίκτυα της περιοχής τους και τις αναγγέλλουν προς άλλους Area Border routers.
- **Δρομολογητές κορμού (Backbone routers):** τρέχουν OSPF δρομολόγηση περιοριζόμενη στο backbone.
- **Ακραίοι δρομολογητές (Boundary routers):** συνδέουν με άλλα AS.

Δρομολόγηση μεταξύ AS



BGP (Border Gateway Protocol)



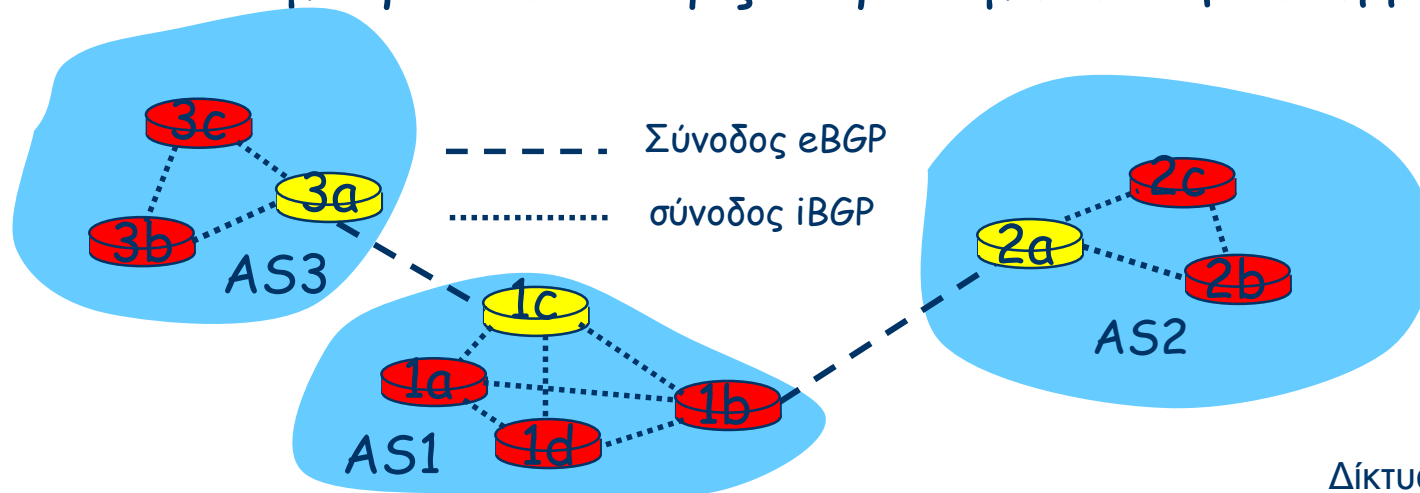


- Είναι το πρότυπο που ισχύει για δρομολόγηση μεταξύ AS.
- Παρέχει σε κάθε AS τα μέσα για:
 - Να αποκτήσει πληροφορίες προσβασιμότητας από τα γειτονικά AS.
 - Να διαδίδει τη πληροφορία προσβασιμότητας σε όλους τους εσωτερικούς δρομολογητές του.
 - Να καθορίζει "καλές" διαδρομές προς τα άλλα AS βάσει της πληροφορίας προσβασιμότητας και της πολιτικής δρομολόγησης.
- Επιτρέπει σε ένα AS να αναγγείλει την ύπαρξή του στο υπόλοιπο Internet.



Ανταλλαγή πληροφοριών

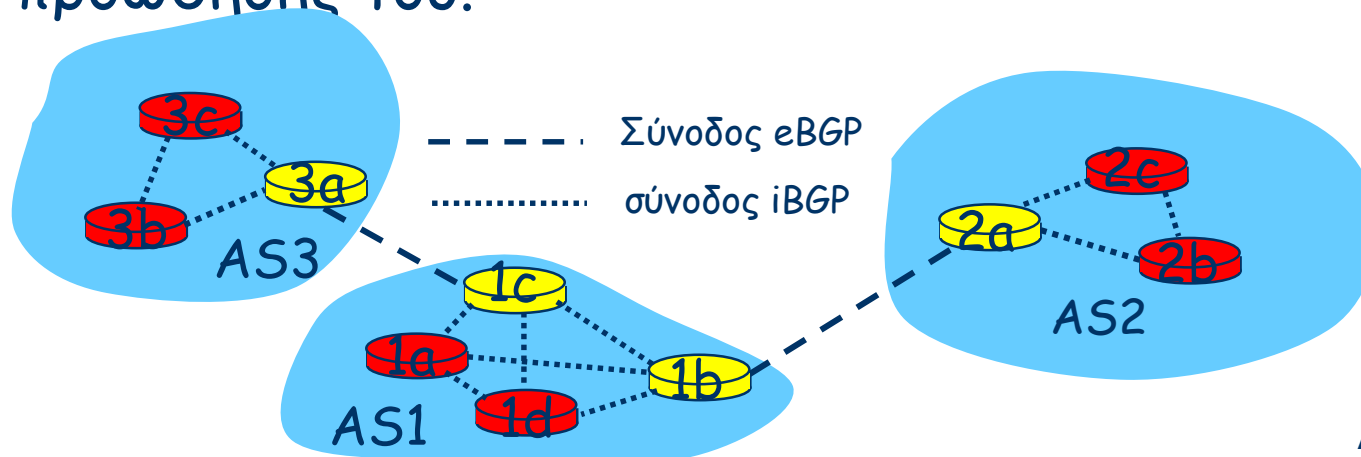
- Ζεύγη δρομολογητών (BGP peers) ανταλλάσσουν πληροφορίες δρομολόγησης πάνω από ημι-μόνιμες συνδέσεις TCP: **σύνοδοι BGP**.
- Οι σύνοδοι BGP δεν αντιστοιχούν σε φυσικές ζεύξεις.
- Όταν το AS2 αναγγέλλει ένα πρόθεμα στο AS1, το AS2 **υπόσχεται** ότι θα προωθεί πακέτα προς το υπόψη πρόθεμα.
- Το AS2 μπορεί να συνοψίζει προθέματα στην αναγγελία του.





Διανομή πληροφορίας

- Χρησιμοποιώντας τη σύνοδο eBGP μεταξύ 3a και 1c, το AS3 στέλνει πληροφορία προσβασιμότητας στο AS1.
- Ο 1c μπορεί στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας iBGP να διανείμει αυτή τη νέα πληροφορία σε όλους τους δρομολογητές του AS1.
- Ο 1b μπορεί μετά να επαναγγείλει τη νέα πληροφορία προσβασιμότητας στο AS2 μέσω της συνόδου eBGP μεταξύ 1b και 2a.
- Όταν ένας δρομολογητής μαθαίνει για ένα νέο πρόθεμα, δημιουργεί μια εγγραφή για το πρόθεμα αυτό στον πίνακα προώθησής του.



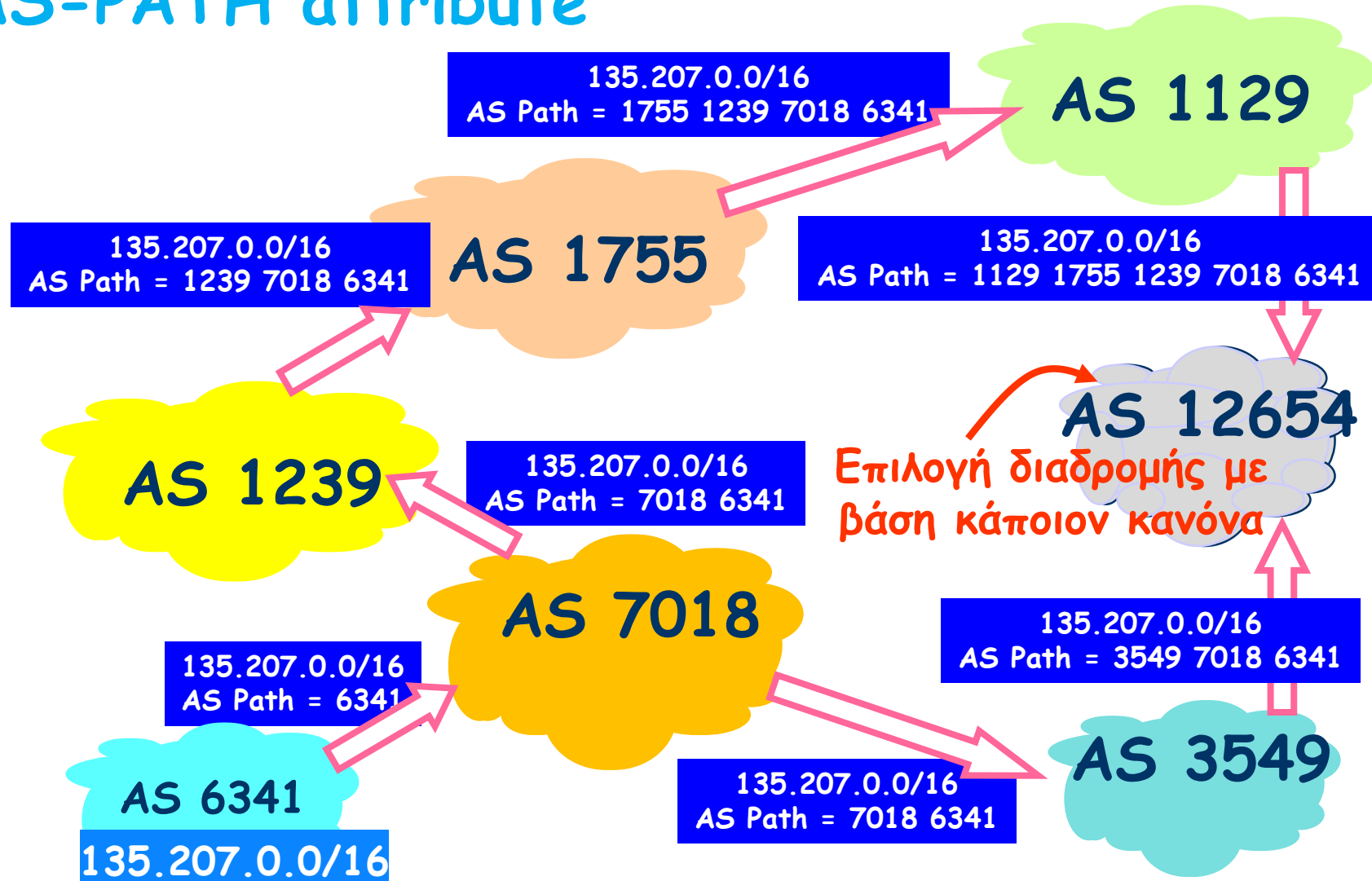


Διαδρομές BGP

- Όταν αναγγέλλεται ένα πρόθεμα, η αναγγελία περιέχει και χαρακτηριστικά BGP.
 - prefix + attributes = "route"
- Δύο ενδιαφέροντα attributes:
 - **AS-PATH**: περιέχει τα AS μέσω των οποίων πέρασε η αναγγελία για το υπόψη πρόθεμα: AS 67 AS 17.
 - **NEXT-HOP**: πληροφορεί το AS που λαμβάνει την αναγγελία για το ποιος δρομολογητής από το αποστέλλον AS είναι ο next-hop. (Μπορεί να υπάρχουν πολλές ζεύξεις από το τρέχον AS προς το next-hop-AS.)
- Όταν ένας δρομολογητής πύλη λαμβάνει αναγγελία διαδρομής, χρησιμοποιεί **πολιτική εισαγωγής** για να τη δεχθεί ή να την απορρίψει.



AS-PATH attribute





Επιλογή διαδρομής

- Ένας δρομολογητής μπορεί να πληροφορηθεί για περισσότερες από μία διαδρομές προς κάποιο πρόθεμα. Πρέπει τότε να επιλέξει διαδρομή.
- Κανόνες επιλογής διαδρομής:
 - Πολιτική δρομολόγησης
 - Συντομότερη AS-PATH
 - Πλησιέστερος NEXT-HOP router
 - Επιπρόσθετα κριτήρια
- Ένας δρομολογητής μπορεί να μη θέλει να αναγγέλλει κάποιες διαδρομές.



Μηνύματα BGP

- Τα μηνύματα BGP ανταλλάσσονται με χρήση TCP.
- Μηνύματα BGP:
 - **OPEN**: ανοίγει σύνδεση TCP προς ομότιμη οντότητα και πιστοποιεί την αυθεντικότητα του αποστολέα.
 - **UPDATE**: αναγγέλλει νέα διαδρομή (ή αποσύρει παλαιά).
 - **KEEPALIVE**: διατηρεί ανοικτή τη σύνδεση όταν δεν υπάρχουν μηνύματα UPDATE. Επίσης, επαληθεύει αίτηση OPEN.
 - **NOTIFICATION**: αναφέρει σφάλματα προηγούμενου μηνύματος. Επίσης, χρησιμοποιείται για κλείσιμο σύνδεσης.



Δρομολόγηση μεταξύ AS

- Έστω ότι η πύλη X στέλνει προς την ομότιμη πύλη W τη διαδρομή της προς Z.
- Η W μπορεί και να μην επιλέξει τη διαδρομή που προσφέρεται από τη X.
 - Κόστος, πολιτική (ανταγωνιστικό AS), αποφυγή βρόχου.
- Αν η W επιλέξει τη διαδρομή που αναγγέλλεται από την X, τότε:

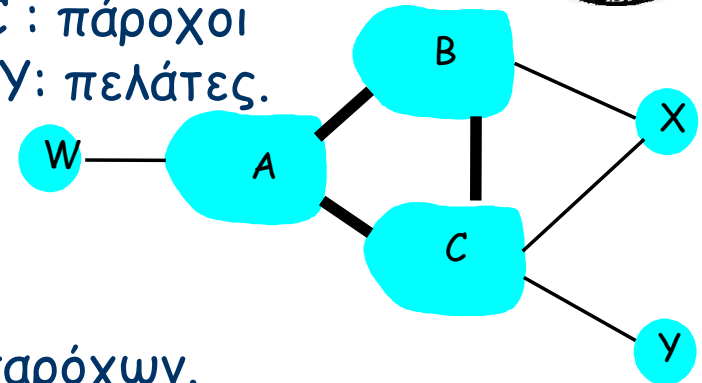
$$\text{Path}(W,Z) = \text{Path}(W,X), \text{Path}(X,Z)$$

- Η X μπορεί να ελέγχει την εισερχόμενη κίνηση ελέγχοντας τις αναγγελίες προς τις ομότιμες πύλες.
 - π.χ., αν δεν θέλει δρομολόγηση προς τη Z δεν θα αναγγέλλει διαδρομές προς τη Z.



Απλά σενάρια

A,B,C : πάροχοι
X,W,Y: πελάτες.



Σενάριο 1

- Το X είναι συνδεδεμένο σε δύο δίκτυα παρόχων.
 - Το X δεν θέλει διαδρομή από το B προς το C μέσω X \Rightarrow το X δεν αναγγέλλει στο B τη διαδρομή προς το C.

Σενάριο 2

- Το A αναγγέλλει στο B τη διαδρομή AW.
- Το B αναγγέλλει στο X τη διαδρομή BAW.
- Πρέπει το B να αναγγείλει στο C τη διαδρομή BAW;
 - Όχι! Το B δεν κερδίζει τίποτε από τη διαδρομή CBAW, καθότι ούτε το W ούτε το C είναι πελάτες του B.
 - Το B θέλει να ωθήσει το C να δρομολογεί στο W μέσω του A.
 - Το B θέλει να δρομολογεί **μόνο** προς/από τους πελάτες του!



Λειτουργία δρομολογητή BGP

Ένας δρομολογητής BGP:

- Λαμβάνει και φιλτράρει αγγελίες διαδρομών από άμεσα συνδεόμενους γείτονες.
- Επιλέγει διαδρομές.
 - Για τον προορισμό X , ποια διαδρομή (από αρκετές αναγγελλόμενες) θα επιλεγεί;
- Στέλνει αγγελίες διαδρομών προς τους γείτονες.

Γιατί δρομολόγηση Intra- και Inter-AS:



Πολιτική:

- Inter-AS: ο διαχειριστής θέλει να ελέγχει πώς δρομολογείται η κίνηση του δικτύου του και ποιος δρομολογεί μέσω του δικτύου του.
- Intra-AS: μία επικράτεια διαχείρισης, οπότε δεν χρειάζεται πολιτική δρομολόγησης.

Κλίμακα:

- Η ιεραρχική δρομολόγηση εξοικονομεί μέγεθος πινάκων, περιορίζει το φορτίο ενημέρωσης.

Επίδοση:

- Intra-AS: μπορεί να εστιάσει στην επίδοση.
- Inter-AS: η πολιτική μπορεί να επισκιάζει την επίδοση.