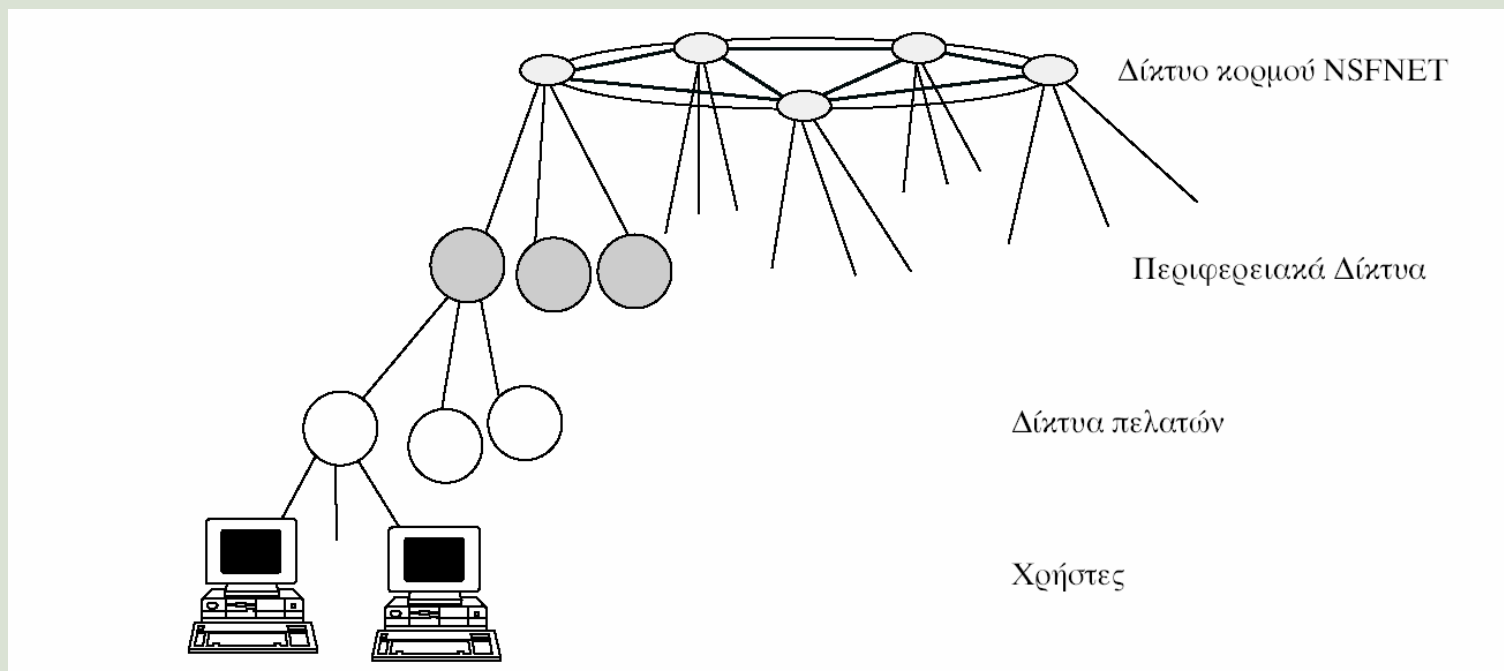




Ιστορική αναδρομή

Σχεδιάγραμμα του Διαδικτύου γύρω στο 1990.





Ιστορική αναδρομή

1962: προτείνεται η μεταγωγή πακέτων (Paul Baran – Rand Corporation)

1969: συνδέονται οι τέσσερις πρώτοι κόμβοι του ARPANET

1974: δημοσιεύονται οι βασικοί μηχανισμοί του TCP (Vint Cerf και Bob Kahn)

1982: ορίζεται το σύνολο πρωτοκόλλων TCP/IP για το ARPANET

1984: εισάγεται το σύστημα ονομασίας πεδίων (Domain Name System - DNS)

1986: δημιουργείται το NFSNET (στα 56 kbps)

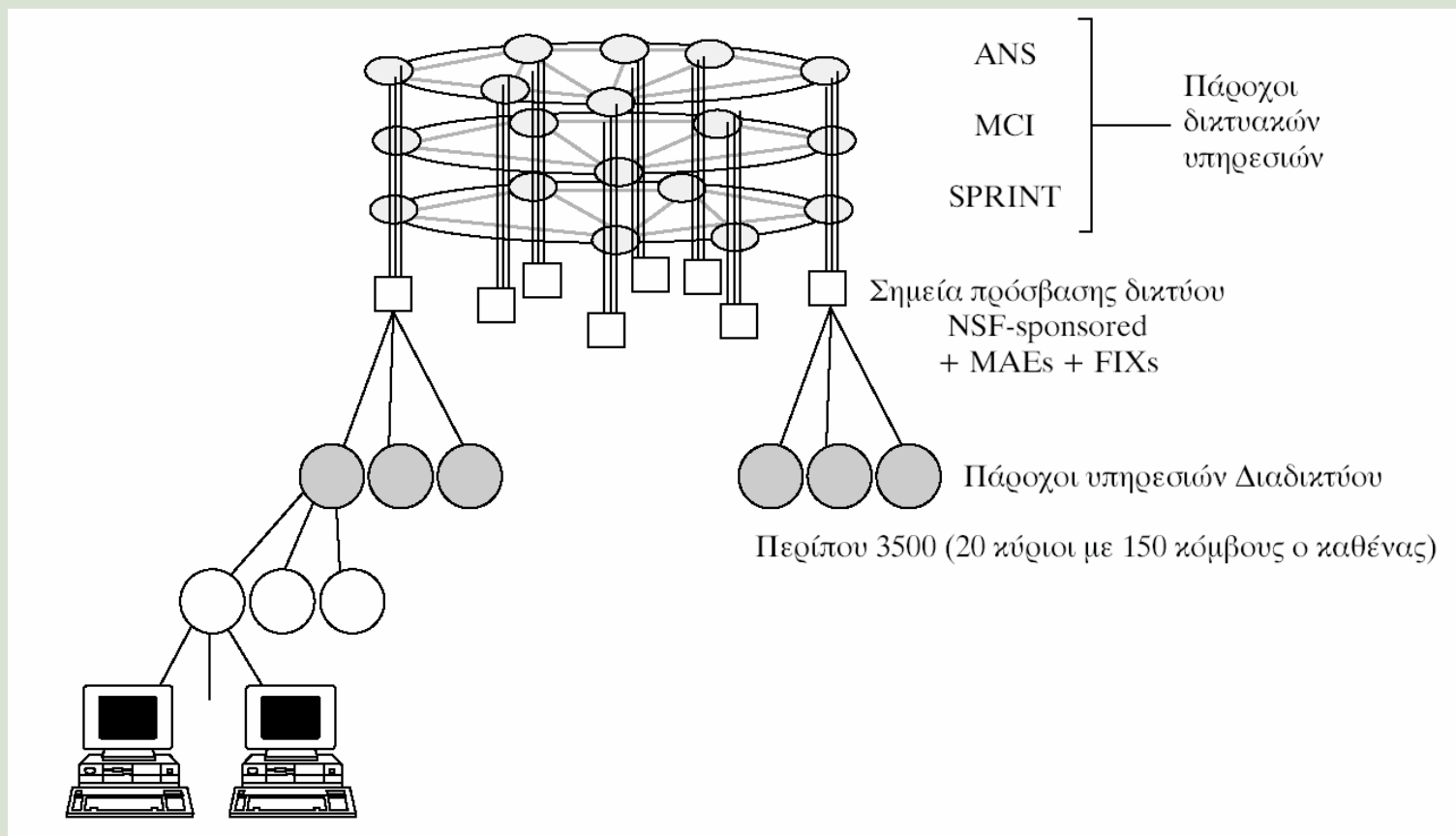
1992: δημοσιοποιείται ο Παγκόσμιος Ιστός (World Wide Web – WWW)
(Tim Berners-Lee - CERN)

2005: GENI (Global Environment for Network Innovations) ξεκινά μεγάλης κλίμακας προσπάθεια «εξέλιξης» του Internet με ανοικτή την προοπτική ανάπτυξης ενός νέου διαδικτύου



Ιστορική αναδρομή

Σχεδιάγραμμα του Internet το 1997.



Αρχιτεκτονική των δικτύων TCP/IP

Κίνητρο

- Διασύνδεση «ετερογενών» δικτύων που το καθένα εξυπηρετεί πολλές εφαρμογές
 - Διασύνδεση δικτύων
 - Διευθυνσιοδότηση

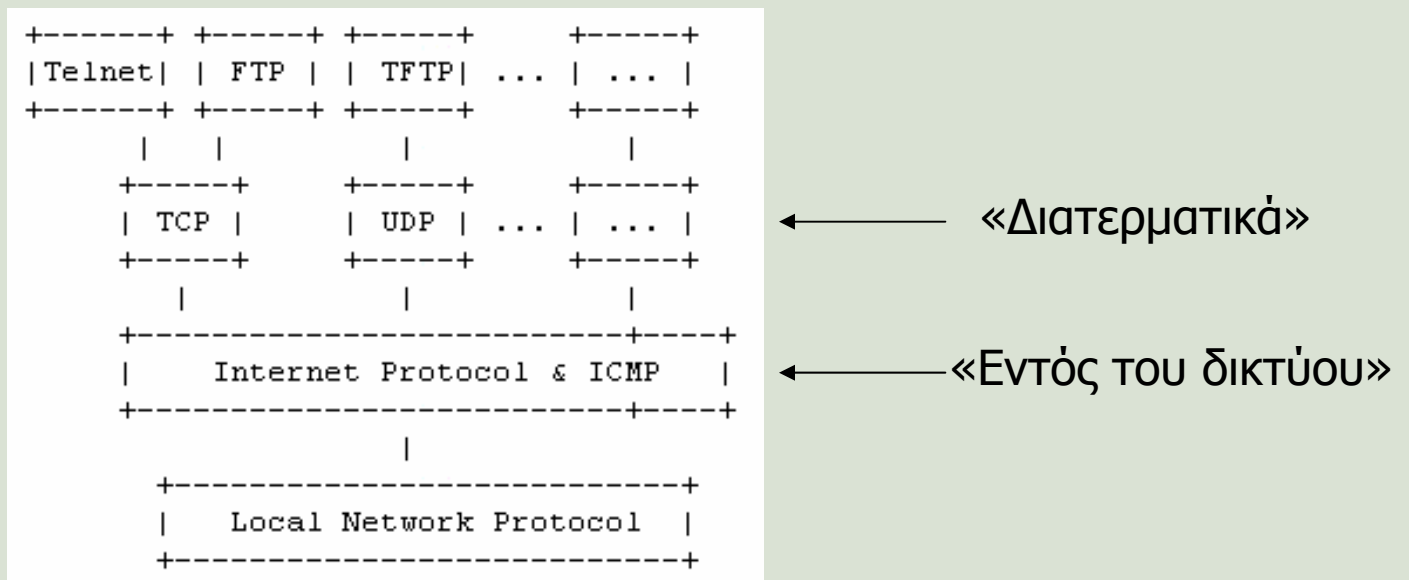
```
+-----+ +-----+ +-----+ +-----+
|Telnet| | FTP | | TFTP| ... | ... |
+-----+ +-----+ +-----+ +-----+
```

```
+-----+
| Local Network Protocol |
+-----+
```


Αρχιτεκτονική των δικτύων TCP/IP

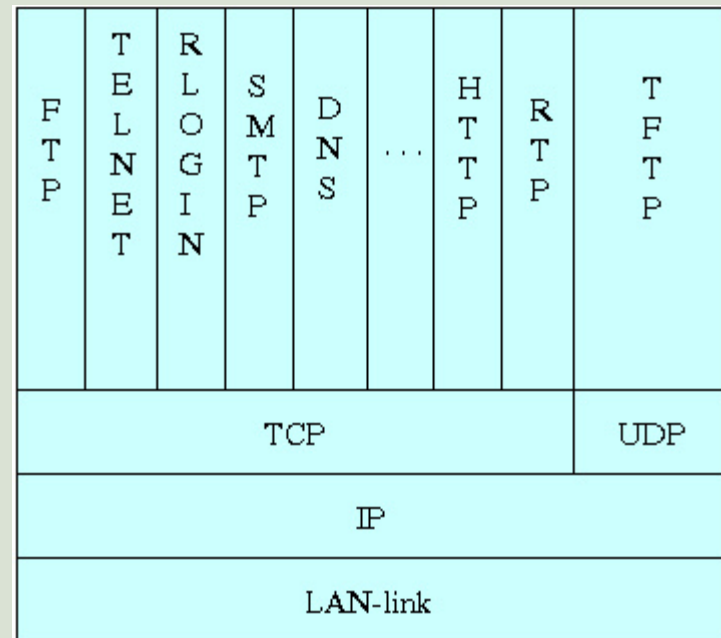
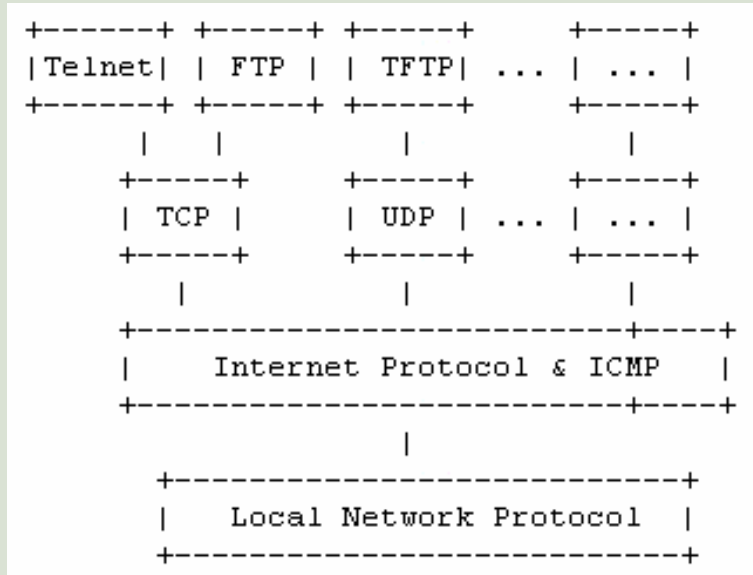
Κίνητρο

- Διασύνδεση «ετερογενών» δικτύων που το καθένα εξυπηρετεί πολλές εφαρμογές
 - Διασύνδεση δικτύων
 - Διευθυνσιοδότηση



- Απλότητα εντός του δικτύου ⇔ ελάχιστες λειτουργίες (δρομολόγηση, διευθυνσιοδότηση)

Αρχιτεκτονική των δικτύων TCP/IP



- Επίπεδο Εφαρμογής
- Επίπεδο Μεταφοράς
- Επίπεδο Δικτύου
- Επίπεδο Τοπικού Δικτύου-Ζεύξης



Επίπεδο Τοπικού Δικτύου-Ζεύξης

ζεύξεις / LANs και οτιδήποτε είναι μεταξύ δρομολογητών

- Μια ζεύξη ενδέχεται να περιλαμβάνει περισσότερες από μία φυσικές ζεύξεις (π.χ. δρομολογητές IP που διασυνδέονται με μόνιμα εικονικά κυκλώματα ATM)

- Κύρια χαρακτηριστικά ζεύξης:
 - Μέγιστη μονάδα μεταφοράς (Maximum Transfer Unit - MTU)
(π.χ. 1500 bytes για το Ethernet)
 - ρυθμός μετάδοσης
(π.χ. 1Gbps για το gigabit Ethernet)
 - ρυθμός σφαλμάτων πακέτων (Packet Error Rate - PER)
(για «τυπικές» ενσύρματες ζεύξεις << 1%)



Επίπεδο Δικτύου - IP

Διευθυνσιοδότηση κόμβων - Δρομολόγηση πακέτων

- πρωτόκολλο Internet (MTU=64Kbytes) → διατεματική παράδοση πακέτων
 - Internet Control Message Protocol - ICMP → επίβλεψη / έλεγχος
1. Δρομολόγηση αυτοδύναμων πακέτων – διεύθυνση πηγής / προορισμού στο πακέτο
 2. Στο IP οι δρομολογητές δεν κρατούν καταστάσεις σχετικά με τα πακέτα / συνδέσεις (σε αντίθεση με το ATM και τα εικονικά κυκλώματα) [⇒ Stateless]
 3. Εύρωστο, λόγω 1, 2, αφού μετά από απώλεια ενός δρομολογητή τα πακέτα μπορούν να βρουν εναλλακτικούς δρόμους
 4. Έλεγχος συμφόρησης δεν γίνεται από τους δρομολογητές (IP επίπεδο)
 5. Κλιμάκωση ευνοείται λόγω των 1,2,4



Επίπεδο Μεταφοράς

επιβλέπει τη διατεμαστική παράδοση των πακέτων

- Το επίπεδο μεταφοράς υλοποιείται από τα δύο τερματικά συστήματα
⇒ το Internet (δρομολογητές) διατηρείται όσο γίνεται απλούστερο
- Δύο πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς για το διαδίκτυο:
 - TCP (Transmission Control Protocol)
 - UDP (User Datagram Protocol)
- UDP απορρίπτει εσφαλμένα πακέτα, όχι επαναμετάδοση, όχι έλεγχο ρυθμού
- TCP έχει μηχανισμούς επαναμετάδοσης πακέτων και ελέγχου ροής / συμφόρησης



Επίπεδο Εφαρμογής

υλοποιεί υπηρεσίες παράδοσης πληροφορίας που χρειάζονται εφαρμογές στο χρήστη

FTP (File Transfer Protocol) [πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων]

- Μεταφορά αρχείων μεταξύ υπολογιστών μέσω δικτύου
- Συνήθως αμφίδρομη, δυνατότητα για δημιουργία, αλλαγή και ανάγνωση αρχείων από μακριά
- Τρόποι μεταφοράς : με συνεχή ροή (stream), με συμπίεση, με τμήματα (block) όταν υπάρχουν πολλά σφάλματα
- 2 TCP συνδέσεις – μία για τις εντολές και μία για τα δεδομένα
- Μία TCP διεργασία τρέχει συνεχώς στον κόμβο (host) περιμένοντας εντολές
- Οι εντολές φθάνουν από συγκεκριμένη θύρα (21)
- Έλεγχος και επαλήθευση της ταυτότητας του χρήστη γίνεται με κωδικό

SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) [απλό πρωτόκολλο μεταφοράς ταχυδρομείου]

- Μια διεργασία εξυπηρετητή ταχυδρομείου «τρέχει» συνέχεια και δέχεται μηνύματα ταχυδρομείου και διευθύνσεις προώθησης



Επίπεδο Εφαρμογής

TELNET [Πρωτόκολλο εικονικού τερματικού του διαδικτύου]

- Προσομοίωση άμεσης σύνδεσης ενός τερματικού με έναν υπολογιστή μέσω δικτύου. Απλό, ώστε να είναι υλοποιήσιμο από κάθε είδους τερματικό

rlogin (remote log in) [εντολή της απομακρυσμένης σύνδεσης]

- σύνδεση τοπικού τερματικού με έναν απομακρυσμένο κόμβο υποδοχής

HTTP (Hypertext Transfer Protocol) [πρωτόκολλο μεταφοράς υπερκείμενου]

- Ο διαφυλλιστής του Ιστού (web browser) είναι ο πελάτης και ο υπολογιστής όπου βρίσκεται το αιτούμενο υπερκείμενο είναι ο εξυπηρετητής
- Ανοίγεται μία TCP σύνδεση από την πελάτη, εκτελείται η μεταφορά του εγγράφου (η πολλών) και η σύνδεση κλείνει

RTP (Real-time Transfer Protocol) [πρωτόκολλο μεταφοράς πραγματικού χρόνου]

- Για τη μεταφορά ήχου και κινούμενης εικόνας μέσω του Διαδικτύου
- Προσθέτει επικεφαλίδες που ενημερώνουν για τον τρόπο συμπίεσης, το χρόνο παραγωγής του πακέτου, κ.λ.π.



Ονόματα και Διευθύνσεις

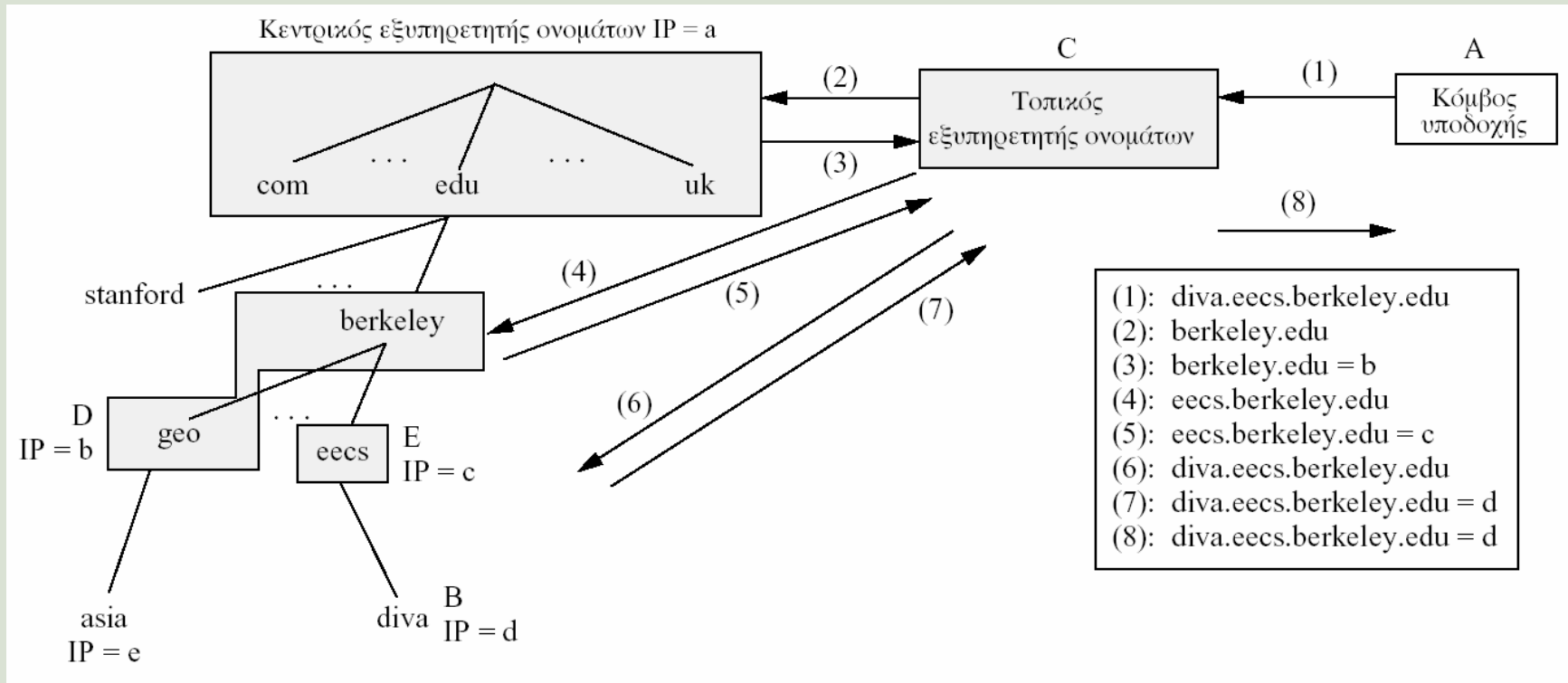
- Χρήστες (& εφαρμογές): χρήση ονομάτων
- Επίπεδο μεταφοράς και δικτύου: χρήση διευθύνσεων δικτύου
- ⇒ Βασικό πρόβλημα: όνομα υπολογιστή → διεύθυνση δικτύου (αντίστοιχο παράδειγμα: τηλεφωνικός κατάλογος)

- Ονόματα στο Internet: ιεραρχική δομή (όχι γεωγραφική, μεταβλητού «βάθους»)
 - πεδία (domains): .com, .edu, .gov, .int, .mil, ..., .gr, .fr, .be, ...
 - υπόπεδια (Sub-domains): berkeley.edu, uoa.gr, forth.gr, ...
 - υπό-υπόπεδια (sub-sub-domains): di.uoa.gr, thetis.ics.forth.gr, ...

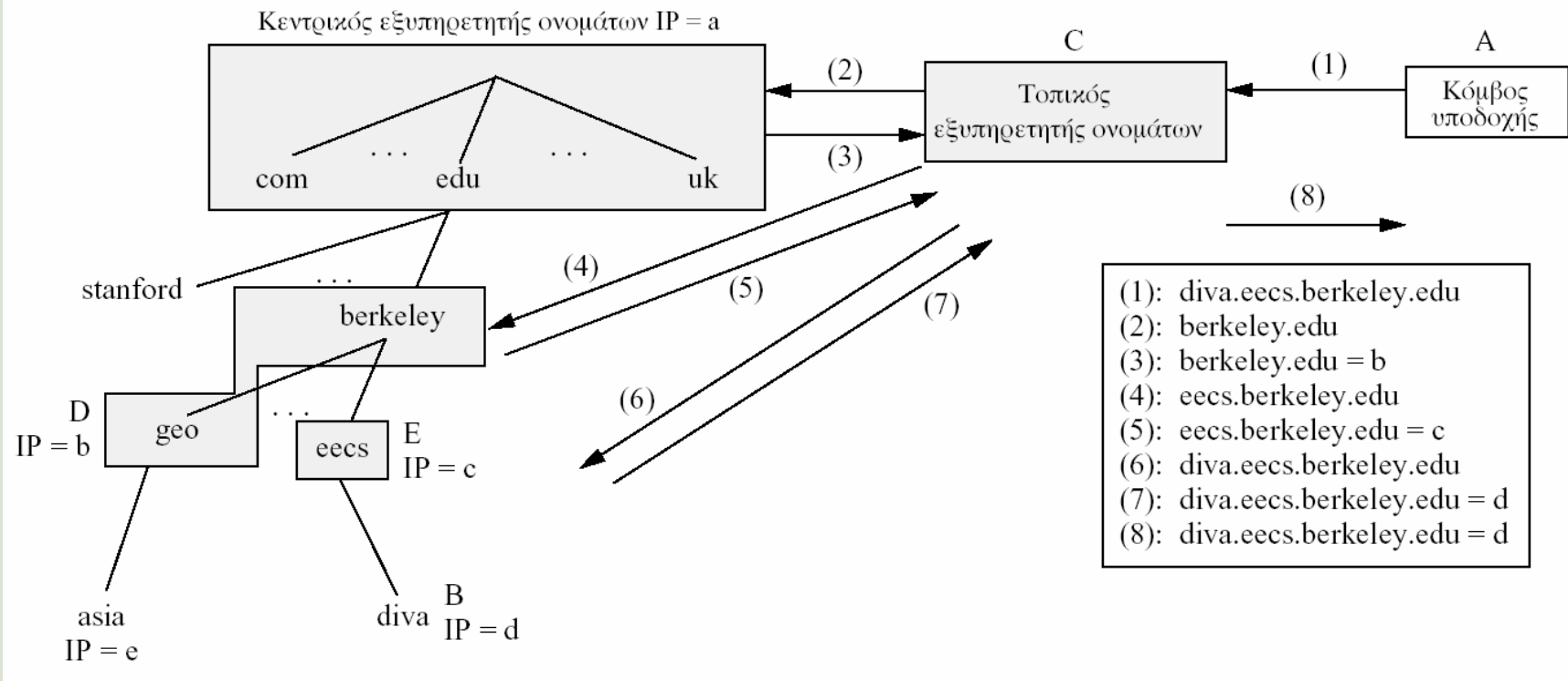
- κάθε (υπο) πεδίο έχει έναν υπεύθυνο εξυπηρετητή ονομάτων (Domain Name Server - DNS)
- ένας DNS γνωρίζει τις διευθύνσεις των DNS των υποπεδίων του

Ονόματα και Διευθύνσεις

Δομή ονομάτων στο IP και ανταλλαγή μηνυμάτων για την εύρεση από τον A της διεύθυνσης IP του B (diva.eecs.berkeley.edu)



Ονόματα και Διευθύνσεις

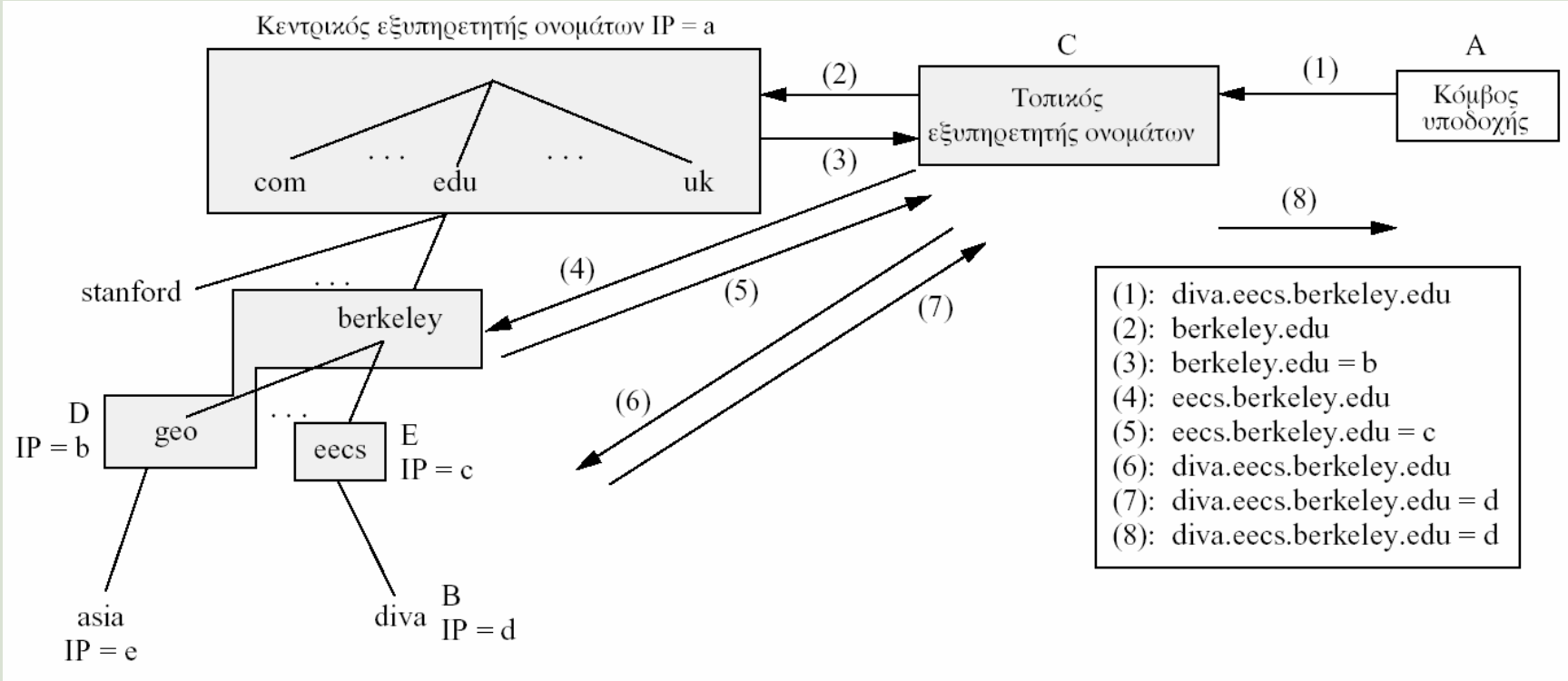


Ο Α αναζητά το όνομα του Β στη μνήμη cache (έστω ότι δεν το βρίσκει)

(1) Ο Α ζητά τη διεύθυνση από τον τοπικό εξυπηρετητή ονομάτων, έστω C

(2), (3) Ο C ζητά από τον κεντρικό εξυπηρετητή ονομάτων τη διεύθυνση του εξυπηρετητή ονομάτων του υποπεδίου berkeley.edu, έστω D

Ονόματα και Διευθύνσεις



- (4), (5) Ο C ζητά από τον εξυπηρετητή ονομάτων D τη διεύθυνση του εξυπηρετητή ονομάτων του eecs.berkeley.edu, έστω E
- (6), (7) Ο C ζητά από τον E τη διεύθυνση του B
- (8) Ο C δίνει τη διεύθυνση του B στον A



Διευθυνσιοδότηση

- Διευθύνσεις μήκους 32 bits (IPv4)

⇒ Ασύμφορη η διατήρηση και ενημέρωση της πληροφορίας για κάθε κόμβο σε κάθε δρομολογητή

- Ιεραρχική δομή διευθύνσεων

Στόχοι:

- Μείωση της απαιτούμενης πληροφορίας / δρομολογητή
- Αποδοτική διαχείριση διευθύνσεων

Υλοποιήσεις:

- Διευθυνσιοδότηση βασιζόμενη σε κλάσεις
 - Υποδικτύωση (Subnetting)
 - CIDR (Classless Interdomain Routing)
- Δεκαδική γραφή διευθύνσεων ανά byte

π.χ. 10000000 00100000 10011000 00011010 → 128.32.152.26

10000000	00100000	10011000	00011010
128	32	152	26

Διευθυνσιοδότηση βασιζόμενη σε κλάσεις

Μορφή διευθύνσεων: "δίκτυο.κόμβος_υποδοχής" ("network.host")

Διαισθητικά: Το Διαδίκτυο αποτελείται από δίκτυα που αποτελούνται από κόμβους

- Το πρόθεμα καθορίζει την κλάση (A → 0 B → 10 C → 110)
(κλάση, # bits → δίκτυο, # bits → κόμβους) → (A, 8, 24), (B, 16, 16), (C, 24, 8)

Μορφή των διευθύνσεων και πλήθος των δικτύων και των κόμβων υποδοχής σε διαφορετικές κλάσεις.

A	0	Δίκτυο	Κόμβος υποδοχής	128 / 16 εκατομμύρια
		7	24	
B	1 0	Δίκτυο	Κόμβος υποδοχής	16 χιλιάδες / 64 χιλιάδες
		14	16	
C	1 1 0	Δίκτυο	Κόμβος υποδοχής	2 εκατομμύρια / 256
		21	8	

- Κλάση διευθύνσεων D δεσμευμένη για ομάδες πολυεκπομπής

Διευθυνσιοδότηση βασιζόμενη σε κλάσεις

π.χ.

10000000 00100000 10011000 00011010 → 128.32.152.26

⇒ διεύθυνση κλάσης B

10	000000 00100000	10011000 00011010
----	-----------------	-------------------

⇒ δίκτυο 128.32

Τα μεγέθη των δικτύων δεν αντιστοιχούν καλά στις ανάγκες

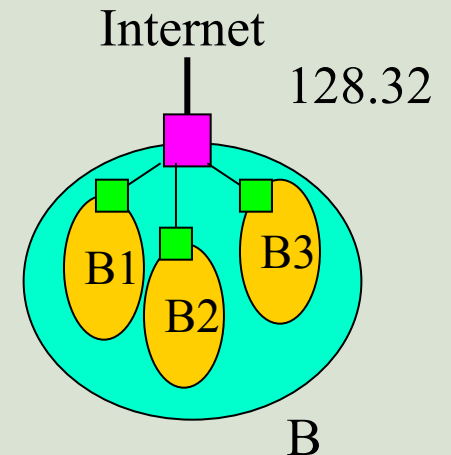
- Class-based διευθύνσεις μπορεί να μην είναι αρκετές για τους hosts ενός π.χ. Class C δικτύου η να είναι πολλές για ένα π.χ. class A δίκτυο
- ⇒ Αναγκαίο να υπάρξει ευελιξία στα όρια μεταξύ Network και host διεύθυνσης
- ⇒ subnetting και classless addressing

Υποδικτύωση (Subnetting)

Μηχανισμός διαχωρισμού ενός (μεγάλου) δικτύου σε υποδίκτυα

Προσθήκη ενός ακόμα επιπέδου στην ιεραρχία

- Ένα μεγάλο (π.χ. κλάσης B) δίκτυο χωρίζεται σε πολλά μικρότερα που:
 - όλα έχουν την ίδια (κλάσης B) διεύθυνση δικτύου, αλλά
 - διαφορετικές διευθύνσεις υποδικτύου (subnet)
- «Εξωτερικά» είναι γνωστό μόνο το δίκτυο
 - Οι «εξωτερικοί» δρομολογητές γνωρίζουν μόνο τη διεύθυνση του δικτύου και όχι του υποδικτύου
(⇒ δεν επιβαρύνονται με περισσότερες διευθύνσεις στη δρομολόγηση)
- Εντός του δικτύου γίνεται η διαχείριση πολλαπλών υποδικτύων
 - «Οι εσωτερικοί» δρομολογητές δρομολογούν την κίνηση βάση του υποδικτύου

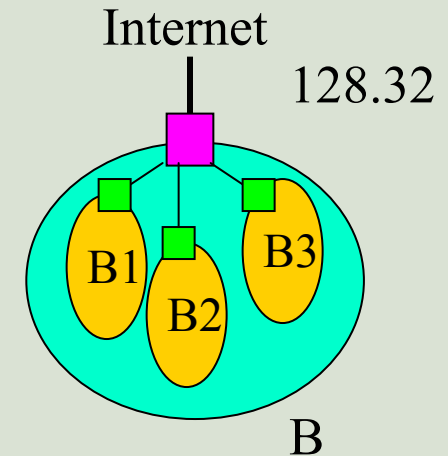


Υποδικτύωση (Subnetting)

- Σε κάθε κόμβο δίνεται μια διεύθυνση δικτύου και μια μάσκα υποδικτύου



16K/64K



Subnet mask: 255.255.255.0

Network address: 128.32.134.26

- Το υποδίκτυο του κόμβου καθορίζεται από bit-by-bit "AND" της IP διεύθυνσης και της μάσκας. Π.χ.:

10000000 00100000 10011000 00011010 (128.32.152.26) διεύθυνση δικτύου κόμβου

⊗ 11111111 11111111 11111111 00000000 (255.255.255.0) μάσκα υποδικτύου

= 10000000 00100000 10011000 00000000 (128.32.152.0)

⇒ υποδίκτυο 128.32.152.0

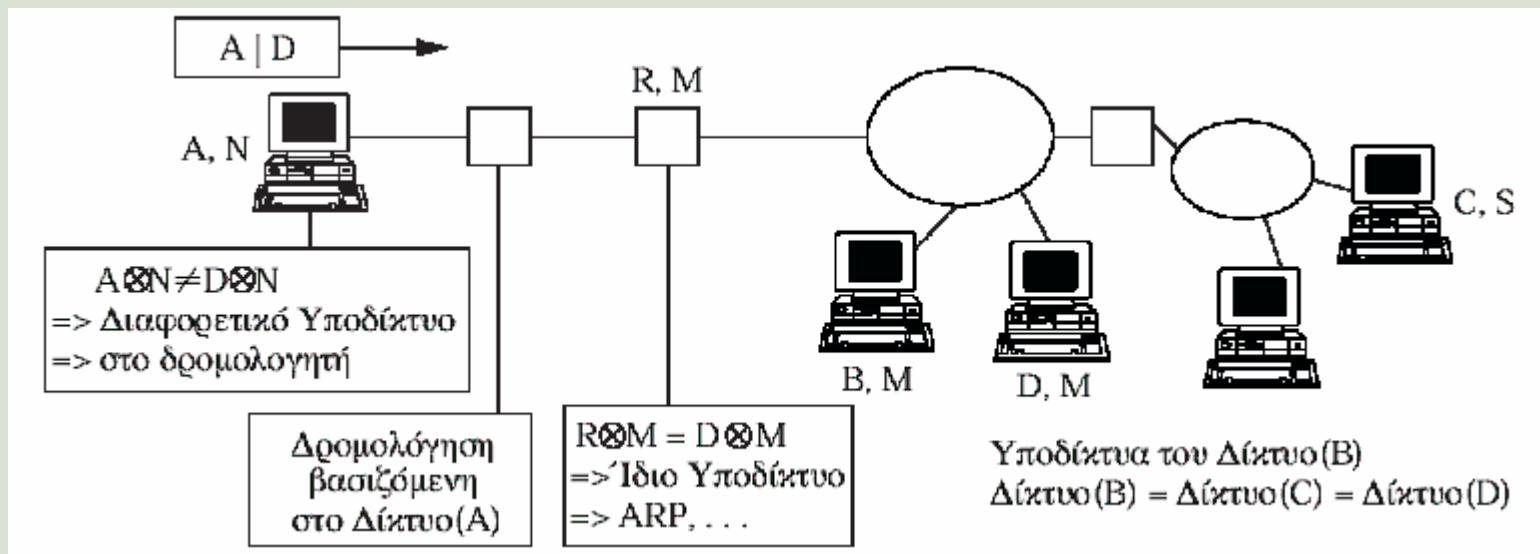
Υποδικτύωση (Subnetting)

Υπολογιστής A με διεύθυνση A = 128.32.152.26 και μάσκα N = 255.255.255.0
θέλει να στείλει πακέτο στον υπολογιστή B με διεύθυνση B = 128.32.134.56

$$A \otimes N = 128.32.152.0 \neq B \otimes N = 128.32.134.0$$

⇒ Ο B δε βρίσκεται στο ίδιο υποδίκτυο

Ο A στέλνει το πακέτο στο δρομολογητή του (υποδικτύου του)





CIDR (Classless Interdomain Routing) - Υπερδικτύωση

- Αγνοείται ο ορισμός των κλάσεων
- Επιτρέπονται διευθύνσεις δικτύων με αυθαίρετο μήκος (δηλ. ισοδύναμα, μάσκες αυθαίρετου μήκους και χωρίς κλάσεις)
- Το δίκτυο καθορίζεται από (διεύθυνση δικτύου, μάσκα)
- Οι δρομολογητές για κάθε δίκτυο αποθηκεύουν (διεύθυνση δικτύου, μάσκα)
- Η δρομολόγηση βασίζεται στην εύρεση του μέγιστου προθέματος που ταιριάζει με τη διεύθυνση προορισμού του πακέτου
- Βασίζεται στη απόδοση «συνεχόμενων» διευθύνσεων
- Επιτρέπει την «ομαδοποίηση» δικτύων («απαιτείται» ιεραρχική δομή δικτύου, ιεραρχική απόδοση διευθύνσεων)



CIDR (Classless Interdomain Routing)

- Το δίκτυο καθορίζεται από (διεύθυνση δικτύου, μάσκα)

195.134.64.0/18 (μάσκα: 18 πρώτα bits ορίζουν το δίκτυο)

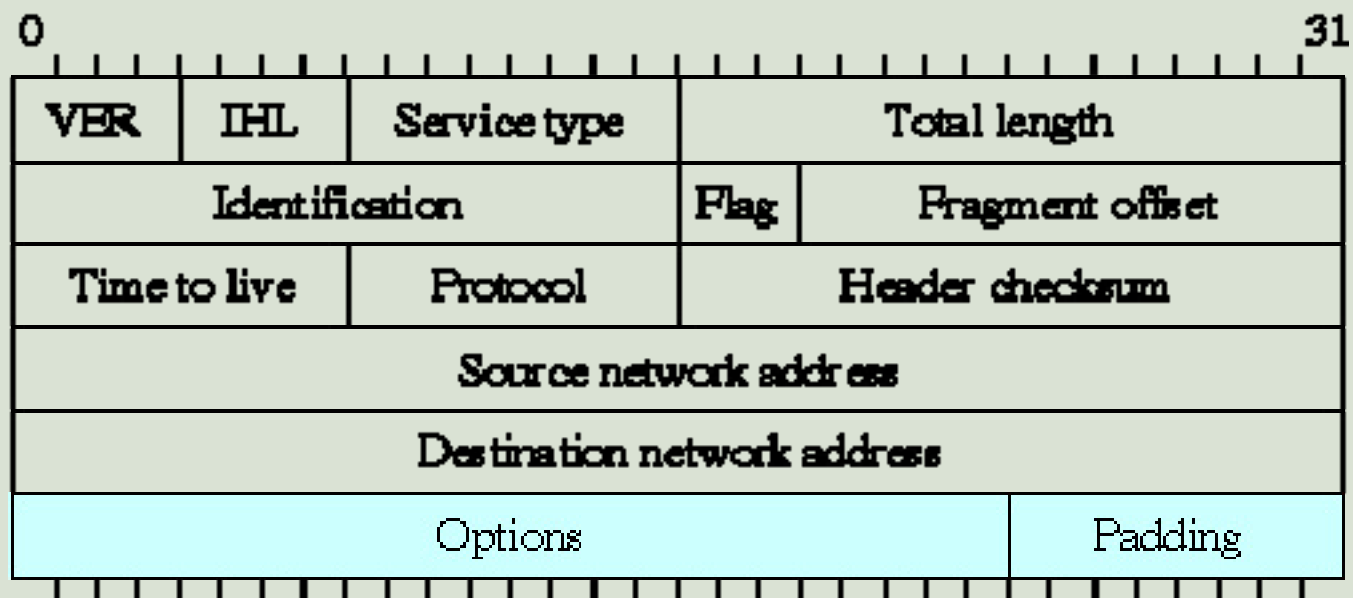
195.134.64.0, 255.255.192.0

195.134.64.0 - 195.134.127.255

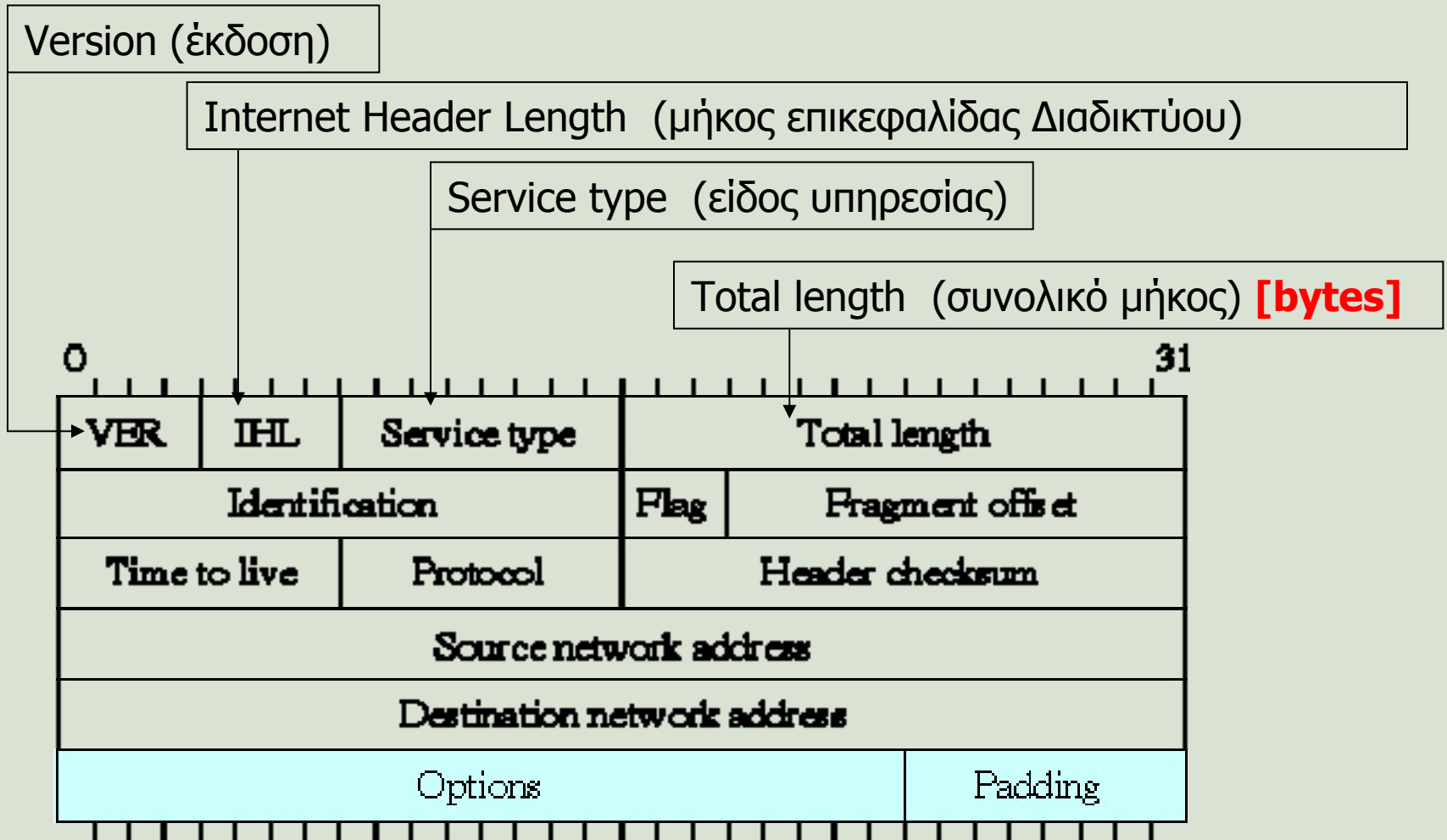
11000011	10000110	01000000	00000000	195.134.64.0
11111111	11111111	11000000	00000000	255.255.192.0
11000011	10000110	01xxxxxx	xxxxxxxx	



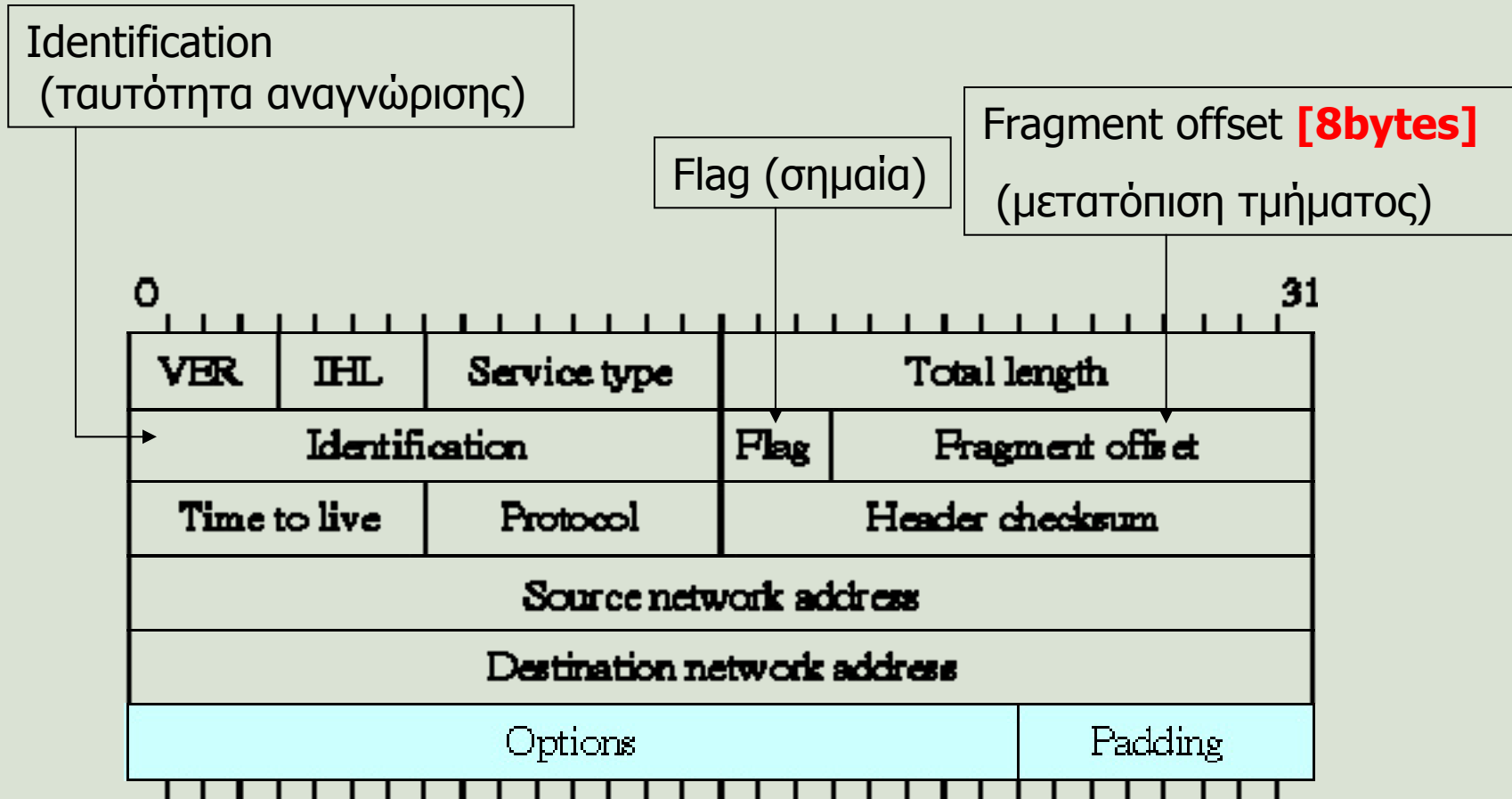
Επικεφαλίδα IP



Επικεφαλίδα IP

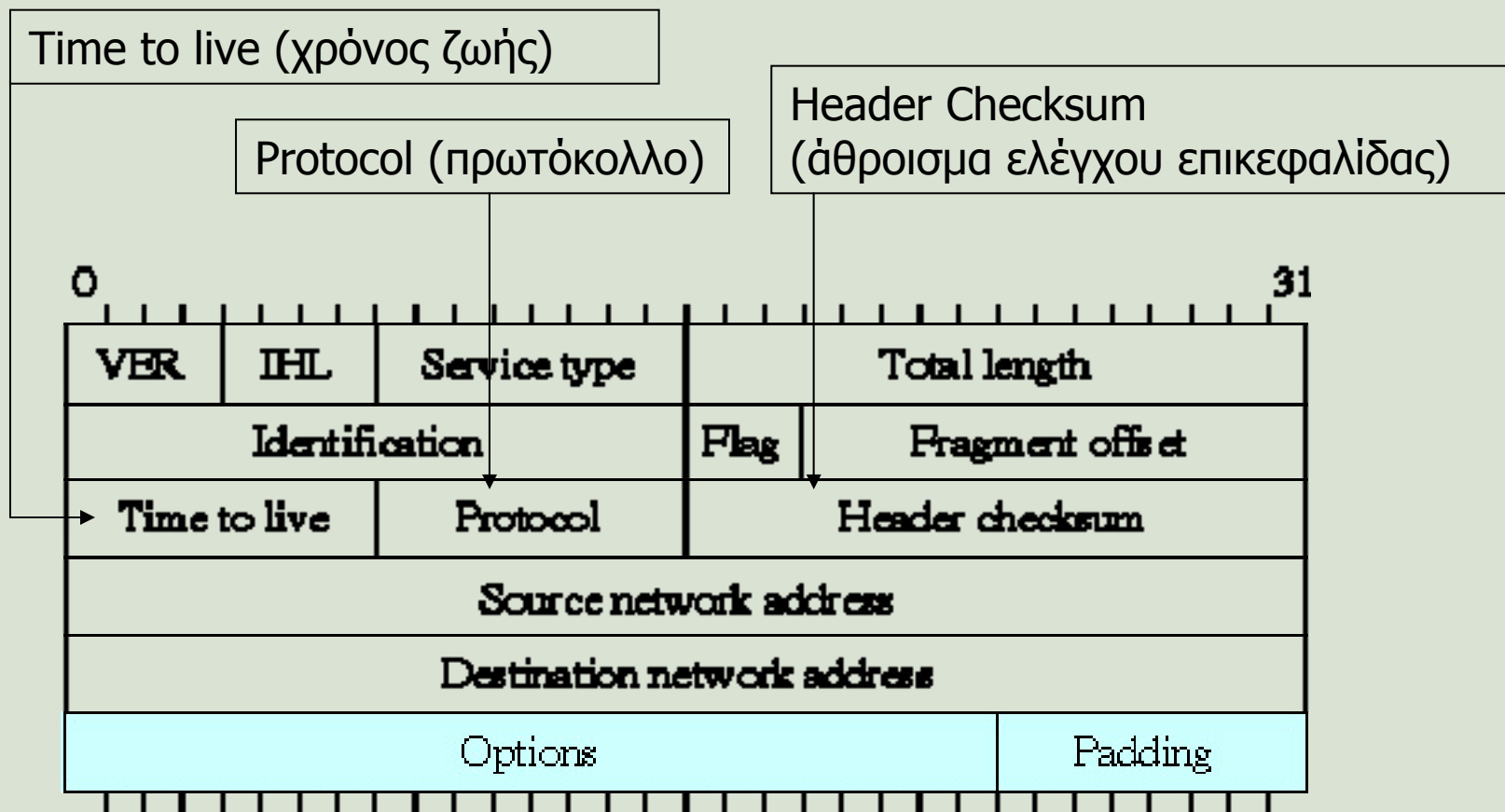


Επικεφαλίδα IP





Επικεφαλίδα IP

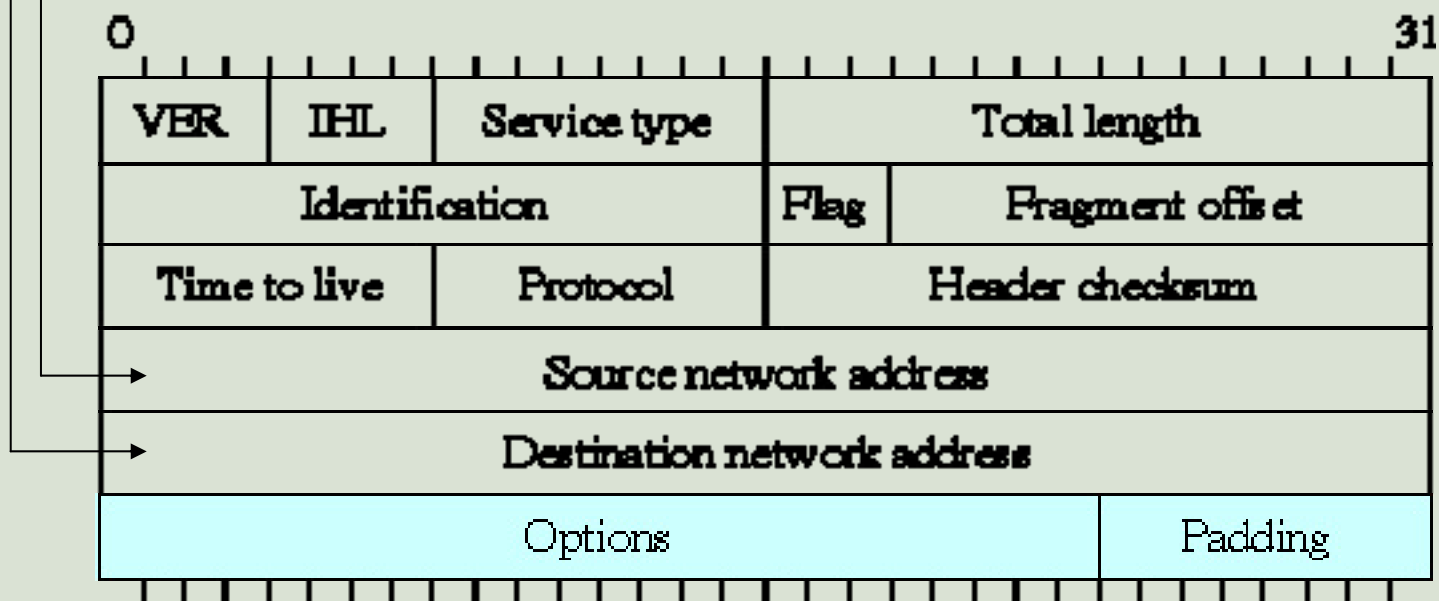




Επικεφαλίδα IP

Source network address
(διεύθυνση δικτύου πηγής)

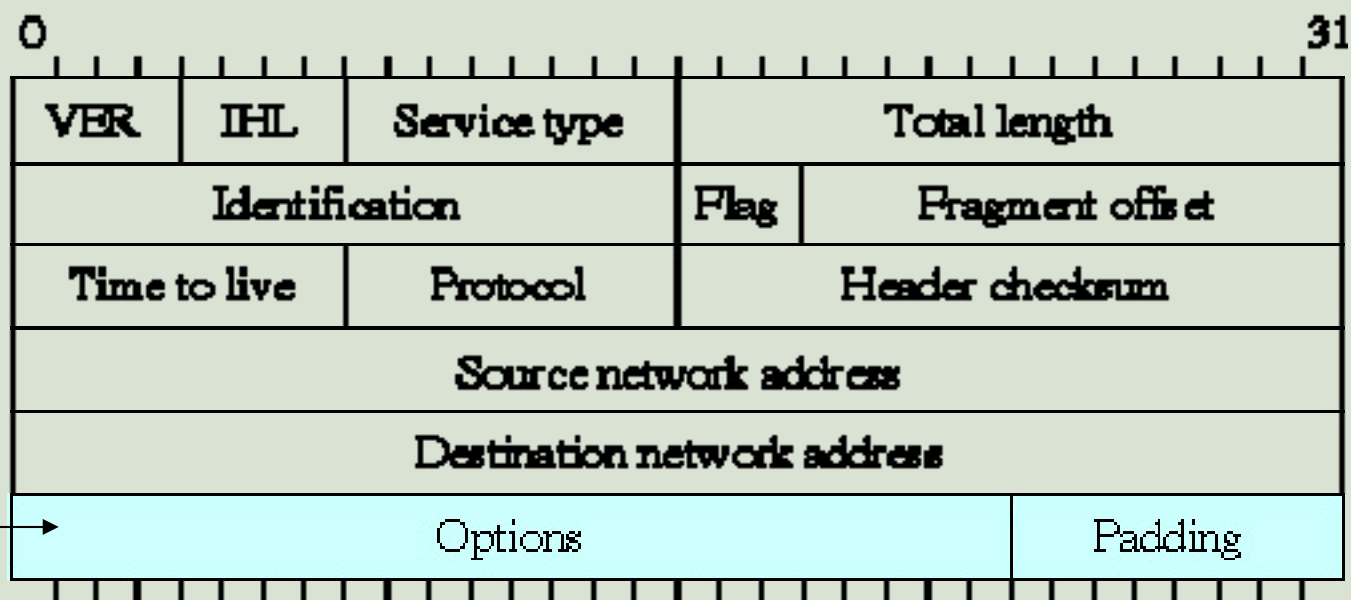
Destination network address
(διεύθυνση δικτύου προορισμού)





Επικεφαλίδα IP

Options (επιλογές)





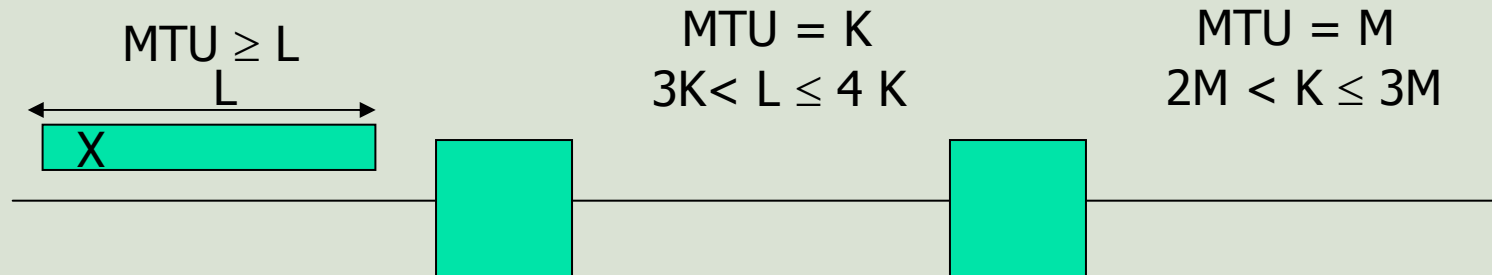
Κατάτμιση

- Οι ζεύξεις χαρακτηρίζονται από ένα μέγιστο μέγεθος πακέτου που μεταδίδουν
→ μέγιστη μονάδα μεταφοράς (Maximum Transfer Unit - MTU)

- Αν μέγεθος πακέτου $>$ MTU της εξερχόμενης ζεύξης
ο δρομολογητής τεμαχίζει το πακέτο σε τμήματα (fragments)
- το πακέτο επανασυντίθεται στον προορισμό

- Τα τμήματα σημειώνονται με:
 - τον αριθμό ταυτότητας αναγνώρισης (identification number) του αρχικού πακέτου
 - τη μετατόπιση (offset) του τμήματος σε σχέση με το πρώτο byte του πακέτου

Κατάτμιση



- Έστω πακέτο με αριθμό ταυτότητας αναγνώρισης X και μήκος L
- Ο 1ος δρομολογητής τεμαχίζει το πακέτο σε τέσσερα κομμάτια με μήκη K K K K', K' = L - 3K ≤ K που τα σημειώνει ως (X, 0) (X, K) (X, 2K) (X, 3K)
- Ο 2ος δρομολογητής τεμαχίζει το κάθε τμήμα σε τρία τμήματα (υπολογίζει τις μετατοπίσεις των επιμέρους τμημάτων με βάση την αρχική μετατόπιση του κάθε τμήματος και τη νέα παράμετρο MTU)
- Π.χ. το τρίτο τμήμα (X, 2K) τεμαχίζεται σε τρία τμήματα
- με μήκη M M M' που σημειώνονται ως (X, 2K) (X, 2K + M) (X, 2K + 2M)



Κατάτμιση

X

(X, 0) | (X, K) | (X, 2K) | (X, 3K)

(X, 0) | (X, K) | (X, 2K) | (X, 3K)

(X, 0) (X, M) (X, 2M) (X, K) (X, K+M) (X, K+2M) (X, 2K) (X, 2K+M) (X, 2K+2M) (X, 3K) (X, 3K+M) (X, 3K+2M)

- Το συγκεκριμένο παράδειγμα δεν είναι ακριβές (επικεφαλίδες, τμήμα= $n*8\text{bytes}$)

Κατάτμιση

Παράδειγμα από RFC 791

Data = 452 bytes

```
0 1 2 3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
|Ver= 4 |IHL= 5 |Type of Service| Total Length = 472 |
| Identification = 111 |Flg=0| Fragment Offset = 0 |
| Time = 123 | Protocol = 6 | header checksum |
| source address |
| destination address |
| data |
| data |
\ \
| data |
| data |
```

MTU = 280 bytes

```
0 1 2 3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
|Ver= 4 |IHL= 5 |Type of Service| Total Length = 276 |
| Identification = 111 |Flg=1| Fragment Offset = 0 |
| Time = 119 | Protocol = 6 | Header Checksum |
| source address |
| destination address |
| data |
| data |
\ \
| data |
| data |
```

```
0 1 2 3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
|Ver= 4 |IHL= 5 |Type of Service| Total Length = 216 |
| Identification = 111 |Flg=0| Fragment Offset = 32 |
| Time = 119 | Protocol = 6 | Header Checksum |
| source address |
| destination address |
| data |
| data |
\ \
| data |
| data |
```



Κατάτμιση

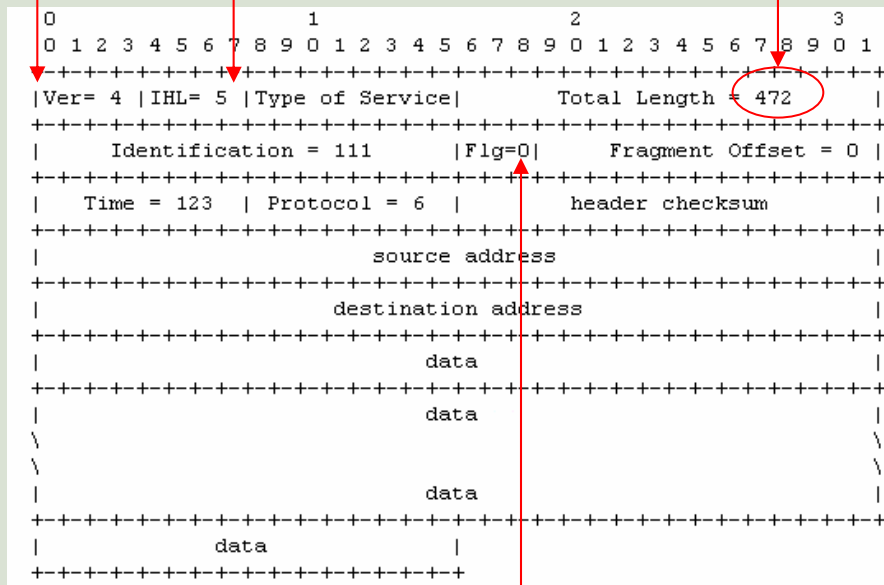
Παράδειγμα από RFC 791

IPv4

Data = 452 bytes

452+20

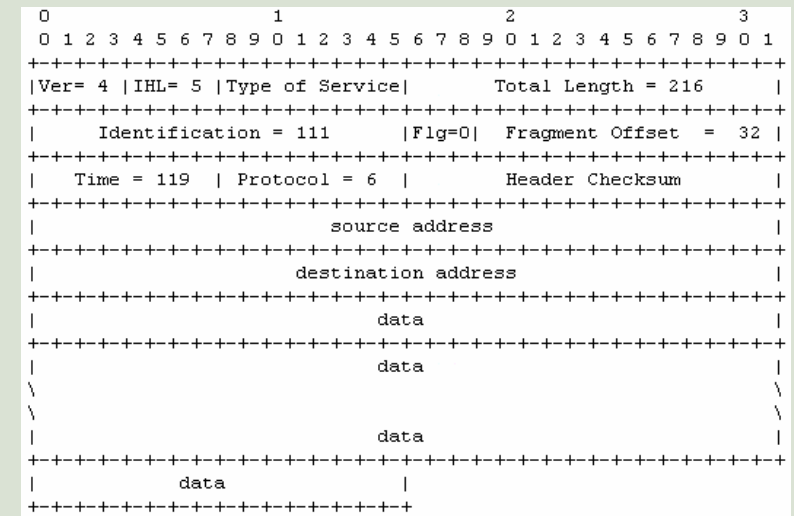
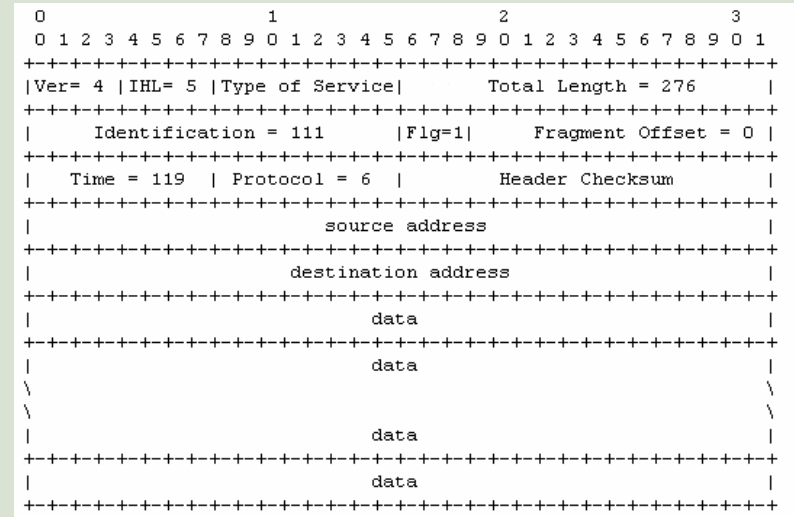
Μήκος επικεφαλίδας 5* 4bytes



3ο bit=0 ⇒ Δεν ακολουθούν άλλα τμήματα

Θα πρέπει 2ο bit=0 ⇒ επιτρέπεται η κατάτμιση

MTU = 280 bytes



Κατάτμιση

Παράδειγμα από RFC 791

Data = 452 bytes

Υπολογίζονται ξανά

MTU = 280 bytes

```
0 1 2 3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
|-----|-----|-----|-----|
|Ver= 4 |IHL= 5 |Type of Service| Total Length = 472 |
|-----|-----|-----|-----|
| Identification = 111 |Flg=0| Fragment Offset = 0 |
|-----|-----|-----|-----|
| Time = 123 | Protocol = 6 | header checksum |
|-----|-----|-----|-----|
| source address |
|-----|-----|-----|-----|
| destination address |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
```

```
0 1 2 3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
|-----|-----|-----|-----|
|Ver= 4 |IHL= 5 |Type of Service| Total Length = 276 |
|-----|-----|-----|-----|
| Identification = 111 |Flg=1| Fragment Offset = 0 |
|-----|-----|-----|-----|
| Time = 119 | Protocol = 6 | Header Checksum |
|-----|-----|-----|-----|
| source address |
|-----|-----|-----|-----|
| destination address |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
```

```
0 1 2 3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
|-----|-----|-----|-----|
|Ver= 4 |IHL= 5 |Type of Service| Total Length = 216 |
|-----|-----|-----|-----|
| Identification = 111 |Flg=0| Fragment Offset = 32 |
|-----|-----|-----|-----|
| Time = 119 | Protocol = 6 | Header Checksum |
|-----|-----|-----|-----|
| source address |
|-----|-----|-----|-----|
| destination address |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
| data |
|-----|-----|-----|-----|
```

$8 \text{ bytes} * k + 20 \text{ bytes} \leq 280 \text{ bytes}$
 $\Rightarrow k = 32 \Rightarrow 1\text{o} \text{ τμήμα} \rightarrow 256 \text{ bytes data}$
 $2\text{o} \text{ τμήμα} \rightarrow 196 \text{ bytes data}$



Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)

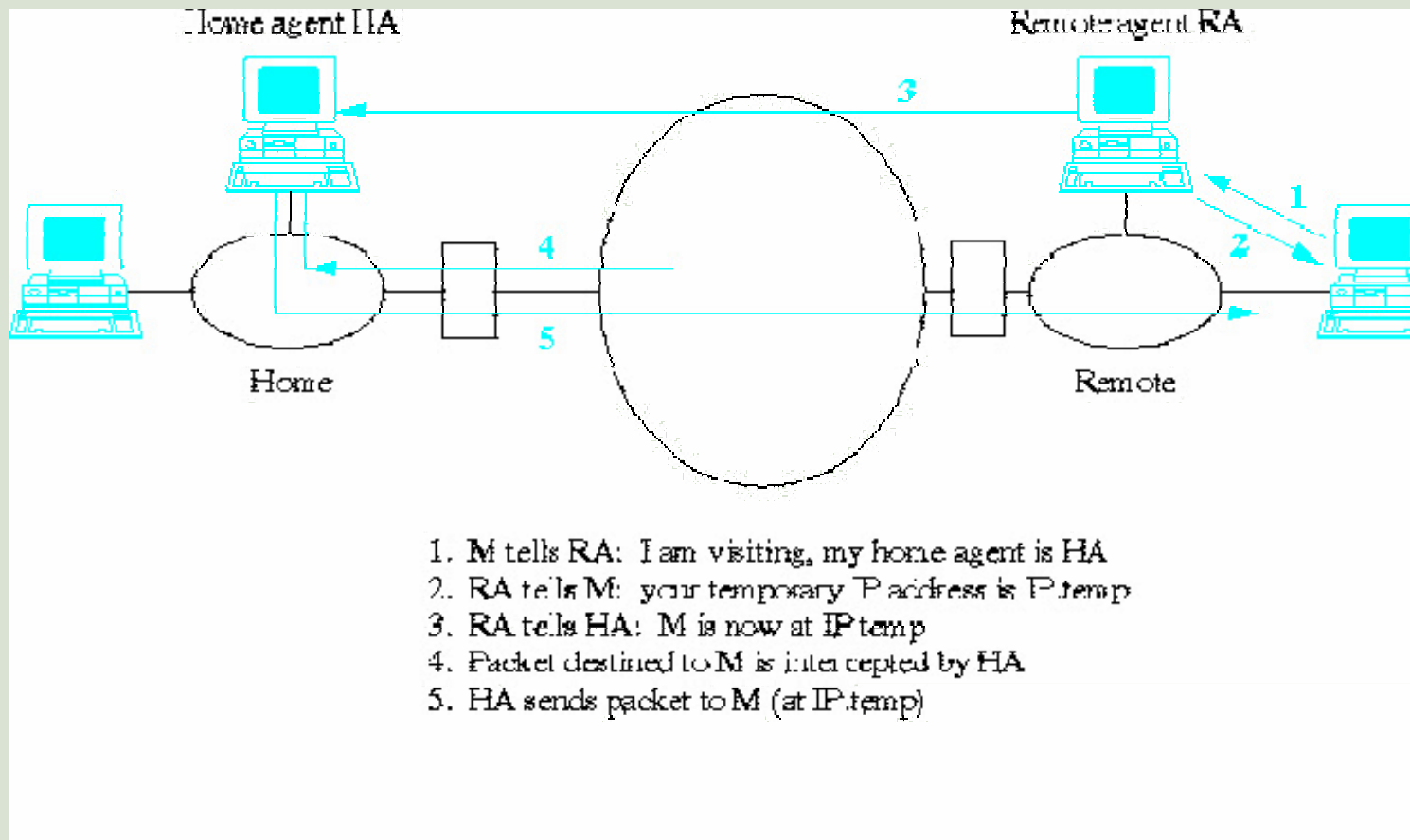
(πρωτόκολλο δυναμικής διαμόρφωσης κόμβου υποδοχής)

- δυναμική εκχώρηση διευθύνσεων
 - πιο αποδοτική χρήση (δέσμευση για όσο χρειάζεται)
 - κινητός υπολογιστής που αλλάζει δίκτυα
- εκχώρηση διεύθυνσης με χρόνο ζωής

Κινητό IP

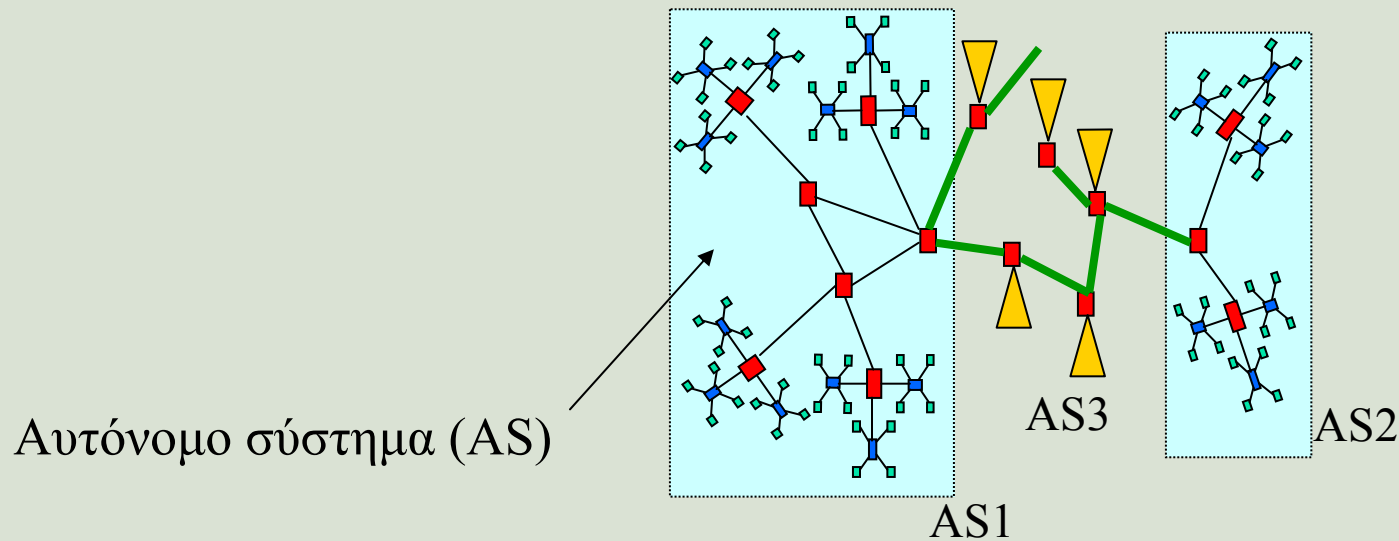
Επιτρέπει την ανεύρεση ενός υπολογιστή που βρίσκεται (προσωρινά) σε ξένο δίκτυο

- Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί: DHCP + πράκτορες (agents)



Ιεραρχική δρομολόγηση

- Κατατάσσει κόμβους σε αυτόνομα συστήματα (Autonomous Systems - ASs) (AS: υποδίκτυο που βρίσκεται υπό τον έλεγχο ενός μόνο οργανισμού)
- Αυτόνομα συστήματα συνδέονται με συννοριακές πύλες (border gateways)
- Εσωτερικά στο AS: OSFP (Open Shortest Path First) (αλγόριθμο Dijkstra) [«αντικατέστησε» το Routing Information Protocol - RIP (Bellman-Ford)]
- Μεταξύ ASs: BGP (Border Gateway Protocol)





Open Shortest Path First (OSPF)

Κάθε δρομολογητής κατασκευάζει ένα «χάρτη» του δικτύου βασιζόμενος σε μηνύματα που λαμβάνει και υπολογίζει τα ελάχιστου κόστους μονοπάτια με χρήση του αλγόριθμου του Dijkstra

- ο δρομολογητής υπολογίζει μια (ή περισσότερες) μετρική για κάθε εξερχόμενη ζεύξη
 - η μετρική βασίζεται π.χ. στο ρυθμό μετάδοσης, τη μέση καθυστέρηση
- Ο δρομολογητής i προετοιμάζει ένα μήνυμα της μορφής

$$M = [i \mid s \mid k_1, d_1 \mid k_2, d_2 \mid \dots \mid k_m, d_m]$$

όπου:

s : αριθμός ακολουθίας μηνύματος

k_1, k_2, \dots, k_m : γείτονες

d_1, d_2, \dots, d_m : αντίστοιχες μετρικές

- Ο δρομολογητής i στέλνει το μήνυμα M σε κάθε εξερχόμενη ζεύξη



Open Shortest Path First (OSPF)

Όταν ο δρομολογητής j λάβει ένα τέτοιο μήνυμα :

- Ελέγχει αν $i = j$
 - Αν $i = j$ το πακέτο απορρίπτεται
- Ελέγχει αν $s >$ μέγιστος αριθμός ακολουθίας μηνύματος που έχει λάβει από τον i
- Αν s μεγαλύτερο \Rightarrow M νέο μήνυμα
 - Ανανέωση μέγιστου αριθμού ακολουθίας μηνύματος που έχει λάβει από τον i
 - Αποθήκευση μηνύματος
 - Αποστολή σε όλες τις ζεύξεις (εκτός από εκεί που ήρθε)
[πλημμύρα (flooding)]

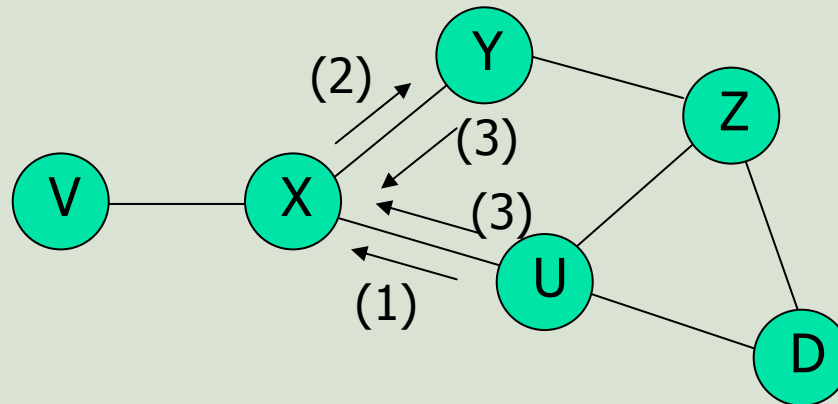


Border Gateway protocol (BGP)

- Χρησιμοποιείται για την δρομολόγηση ανάμεσα σε Αυτόνομα Συστήματα
- Κατανεμημένο πρωτόκολλο (διαφορετικοί δρομολογητές έχουν, ενδεχομένως, διαφορετική πληροφορία για το δίκτυο)
- Κάθε AS ενημερώνει για προτιμητέες διαδρομές
- Μετάδοση πληροφορίας για ολόκληρο το μονοπάτι
 - για την αποφυγή βρόχων
 - επιβολή πολιτικών ως προς άλλα αυτόνομα συστήματα
- οι «εσωτερικές» μετρικές για την ενημέρωση του BGP δεν είναι απαραίτητο να είναι ίδιες, αρκεί να είναι συνεπείς

Border Gateway protocol (BGP)

- Ασυνέπειες λόγω παλαιώσης πληροφορίας



(1) το U γνωστοποιεί μία μετρική = 12 για τον προορισμό D

(2) το X υπολογίζει μια μετρική = 15 για τον D, τη στέλνει στο Y

(3)

- το Y υπολογίζει μια μετρική = 17 για τον D (μέσω του X), τη στέλνει στο X
- το U έχει μία νέα εκτίμηση της μετρική προς τον D (=18), τη στέλνει στο X

- Αν δε στέλνονται τα μονοπάτια δεν αποκλείεται το X να επιλέξει το Y ως ενδιάμεσο προς το D (αν $L(X,Y) \leq L(X,U)$) \Rightarrow βρόχος



Αλγόριθμος Dijkstra

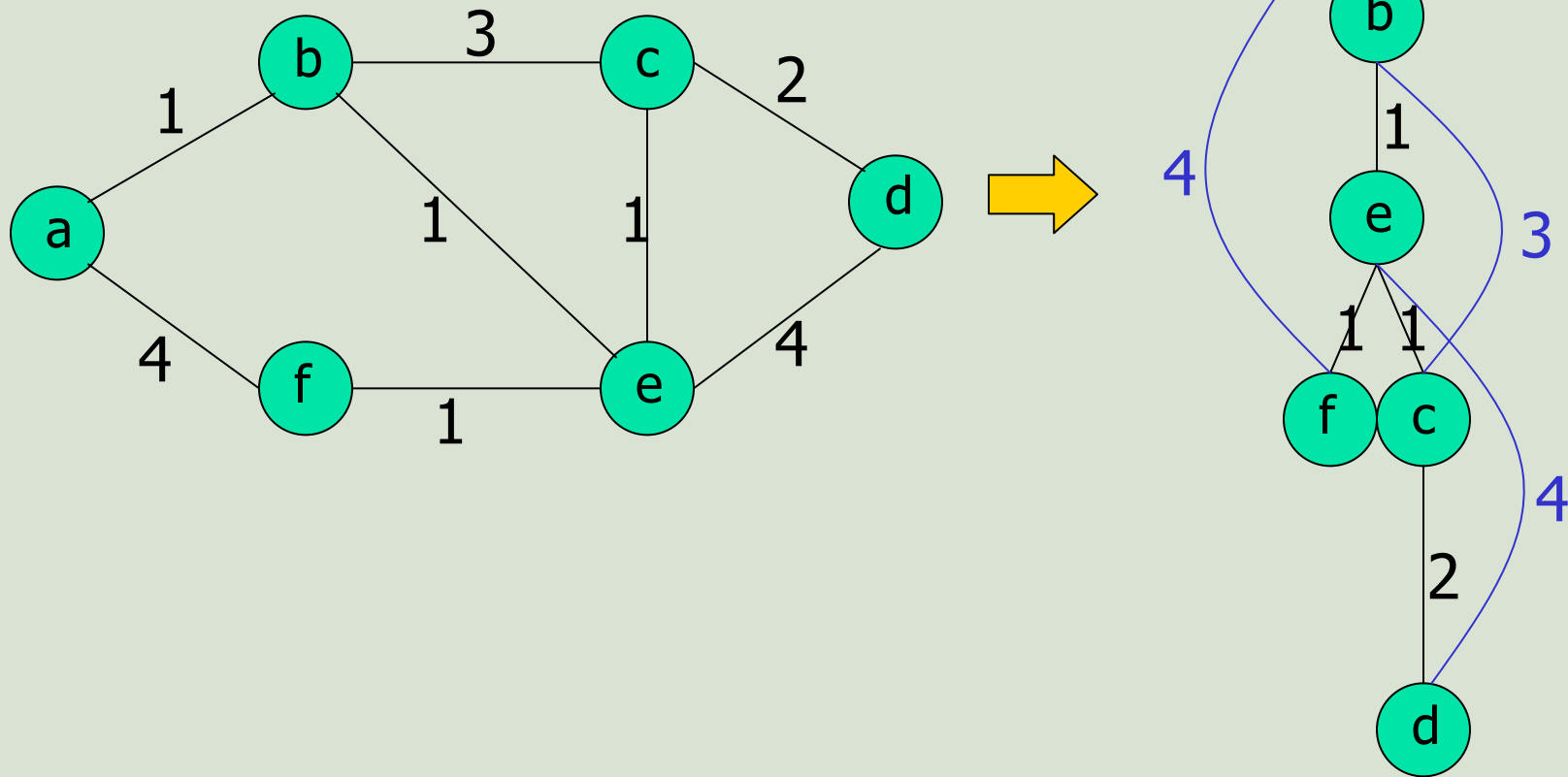
- Τοπολογία δικτύου και κόστη συνδέσεων θεωρούνται γνωστά
 - Κόστος: καθυστέρηση, επίπεδο συμφόρησης κτλ.
- Σκοπός ο υπολογισμός μονοπατιών ελάχιστου κόστους από την πηγή στον προορισμό (έτσι προκύπτει ο πίνακας δρομολόγησης)
- Το δίκτυο μοντελοποιείται σαν ένας γράφος όπου οι δρομολογητές παρίστανται σαν κόμβοι και οι ζεύξεις σαν ακμές

Έστω:

- **S** σύνολο από N κόμβους
- $\{L(i,j), i, j \in \mathbf{S}\}$ μήκη ζεύξεων μεταξύ των κόμβων ($L(i,j)=\infty$ αν δεν υπάρχει ζεύξη)

Εύρεση συντομότερου μονοπατιού από τον κόμβο $a \in \mathbf{S}$ προς κάθε άλλο κόμβο

Αλγόριθμος Dijkstra - Φυσικό Μοντέλο



Αλγόριθμος Dijkstra

- **U(n)**: το σύνολο των κόμβων για τους οποίους το ελαχίστου μήκους μονοπάτι έχει καθοριστεί στο βήμα n
(σύνολο από μπάλες οι οποίες έχουν σηκωθεί από το πάτωμα στο βήμα n)
- **F(n)**: το σύνολο των κόμβων για τους οποίους το ελαχίστου μήκους μονοπάτι δεν έχει καθοριστεί στο βήμα n
(σύνολο από μπάλες που εξακολουθούν να βρίσκονται στο πάτωμα στο βήμα n)
$$(\mathbf{U}(n) \cup \mathbf{F}(n) = \mathbf{S})$$
- b_n : κόμβος για τον οποίο το ελαχίστου μήκους μονοπάτι καθορίζεται στο βήμα n
(μπάλα σηκώνεται από το πάτωμα στο βήμα n)
- **N(n)**: σύνολο των γειτονικών ως προς το b_n κόμβων για τους οποίους το ελαχίστου μήκους μονοπάτι δεν έχει καθοριστεί στο βήμα n
(σύνολο από γειτονικές ως προς τη b_n μπάλες που βρίσκονται ακόμα στο πάτωμα)
- $d_n(i)$: εκτίμηση του μήκους του ελαχίστου μήκους μονοπατιού από τον κόμβο a στον κόμβο i στο βήμα n
- $(P_n(i) , i)$: τελευταία ζεύξη του μονοπατιού μήκους $d_n(i)$

Αλγόριθμος Dijkstra

$$n=1$$

$$b_1 = a, d_1(a) = 0,$$

$$\mathbf{U}(1) = \{a\}, \mathbf{F}(1) = \mathbf{S} - \mathbf{U}(1),$$

$$d_1(i) = \infty, P_1(i) = \emptyset \quad \forall i \in \mathbf{F}(1)$$

Αρχικοποίηση αλγορίθμου

$$\mathbf{N}(n) = \{j \in \mathbf{F}(n) \mid L(b_n, j) < \infty\}$$

$$d_{n+1}(i) = \min\{d_n(i), d_n(b_n) + L(b_n, i)\} \quad \forall i \in \mathbf{N}(n)$$

Ανανέωση εκτιμήσεων

$$P_{n+1}(i) = \begin{cases} P_n(i) & \text{εάν } d_n(i) \leq d_n(b_n) + L(b_n, i), \\ \{b_n\} & \text{εάν } d_n(i) > d_n(b_n) + L(b_n, i). \end{cases}$$

$$\begin{aligned} d_{n+1}(i) &= d_n(i), \\ P_{n+1}(i) &= P_n(i) \quad \forall i \in \mathbf{S} - \mathbf{N}(n) \end{aligned}$$

$n < N$

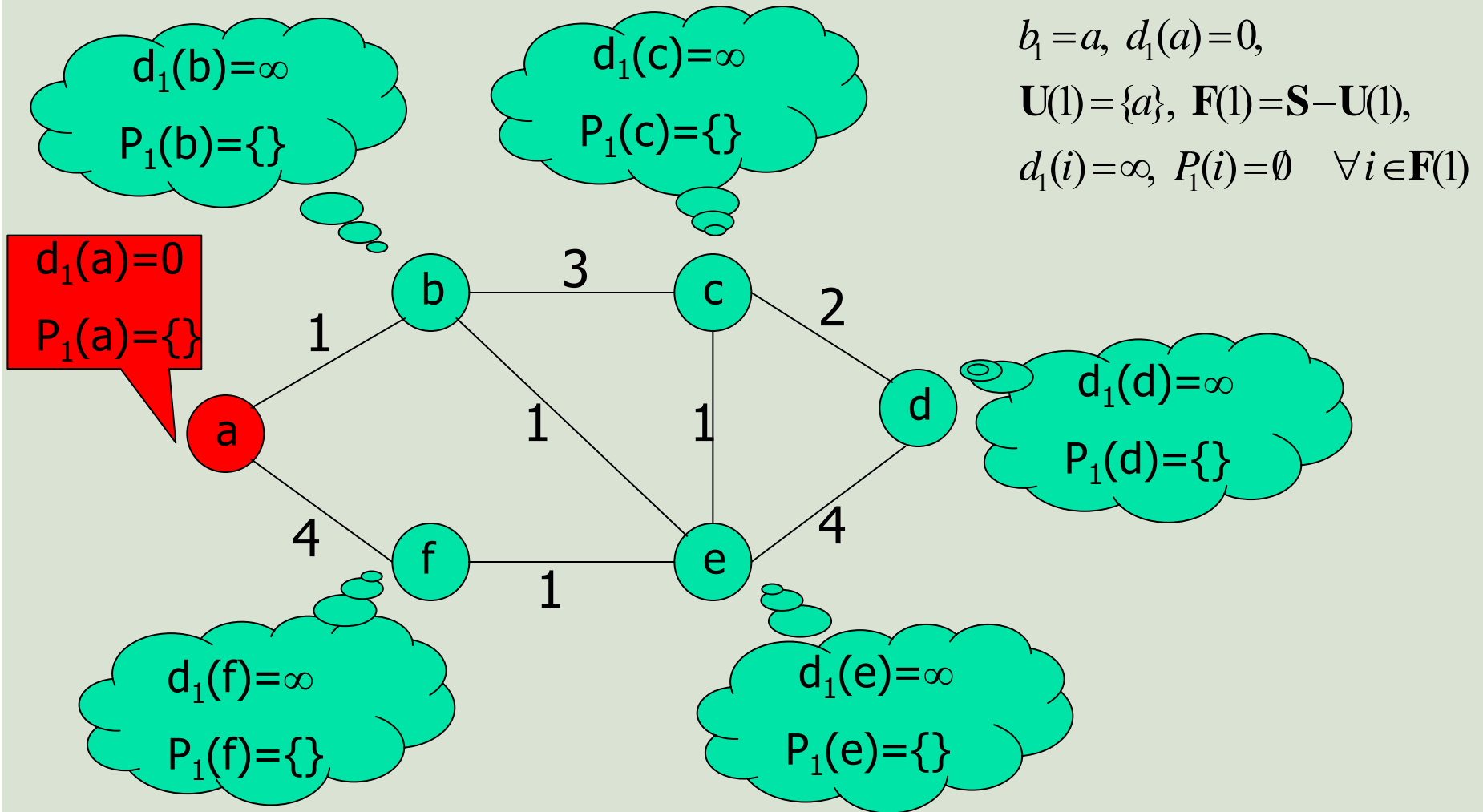
$$b_{n+1} = \operatorname{argmin}\{d_{n+1}(i), i \in \mathbf{F}(n)\}$$

Εύρεση επόμενου συντομότερου μονοπατιού

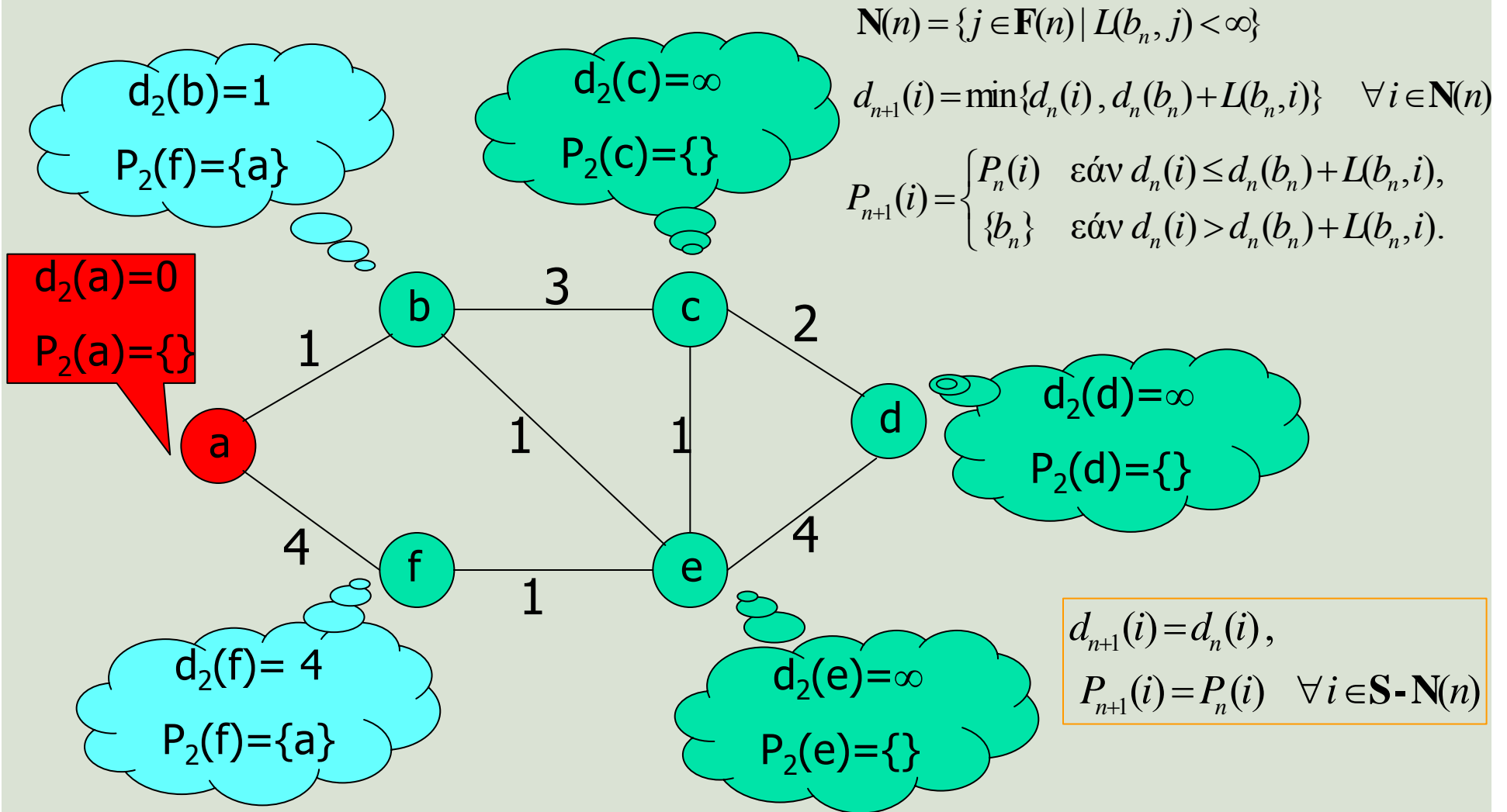
$$\mathbf{U}(n+1) = \mathbf{U}(n) \cup \{b_{n+1}\} \text{ και } \mathbf{F}(n+1) = \mathbf{S} - \mathbf{U}(n+1)$$

$$n = n + 1$$

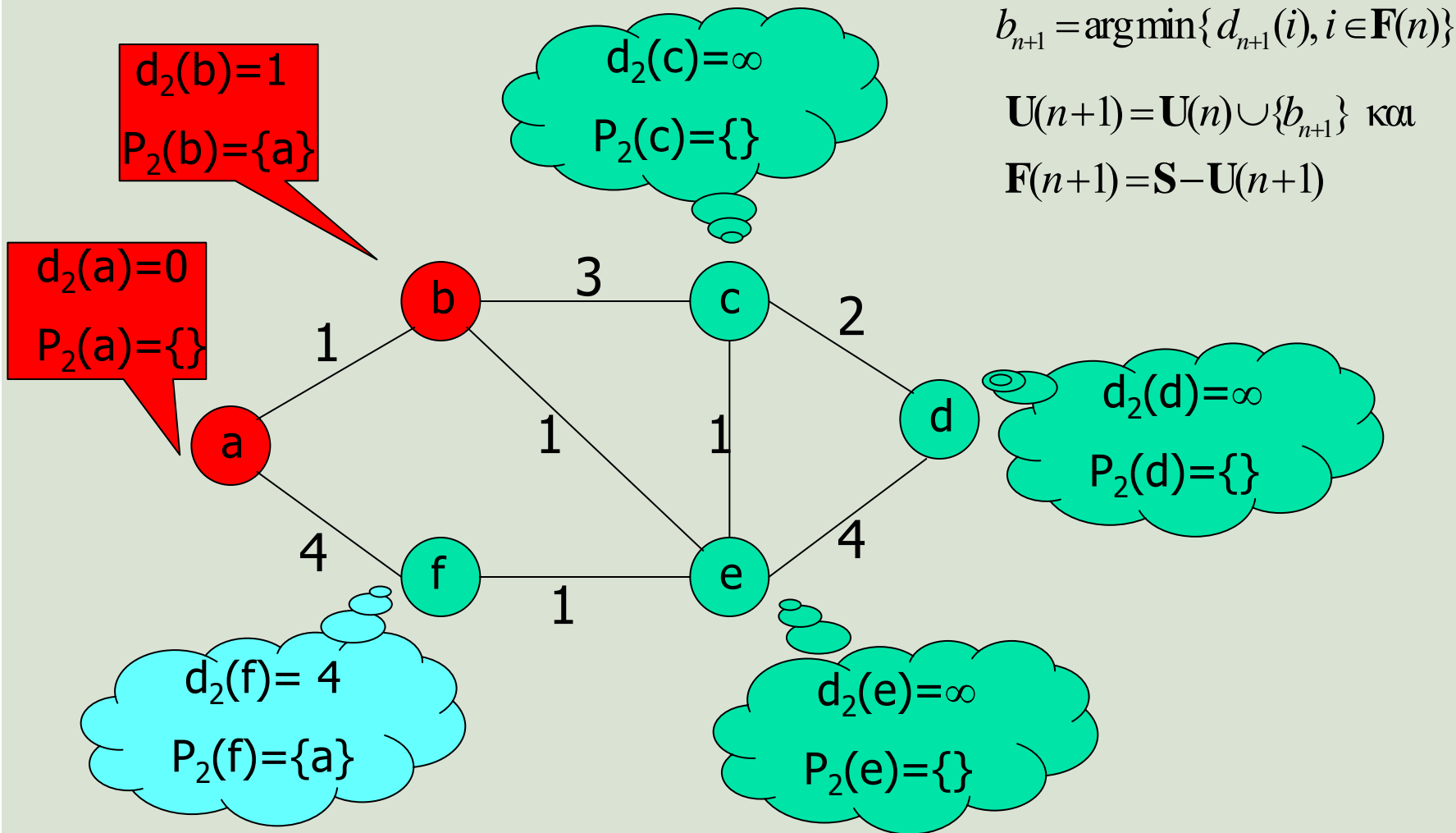
Αρχικοποίηση (n=1)



(n=1)



(n=1)

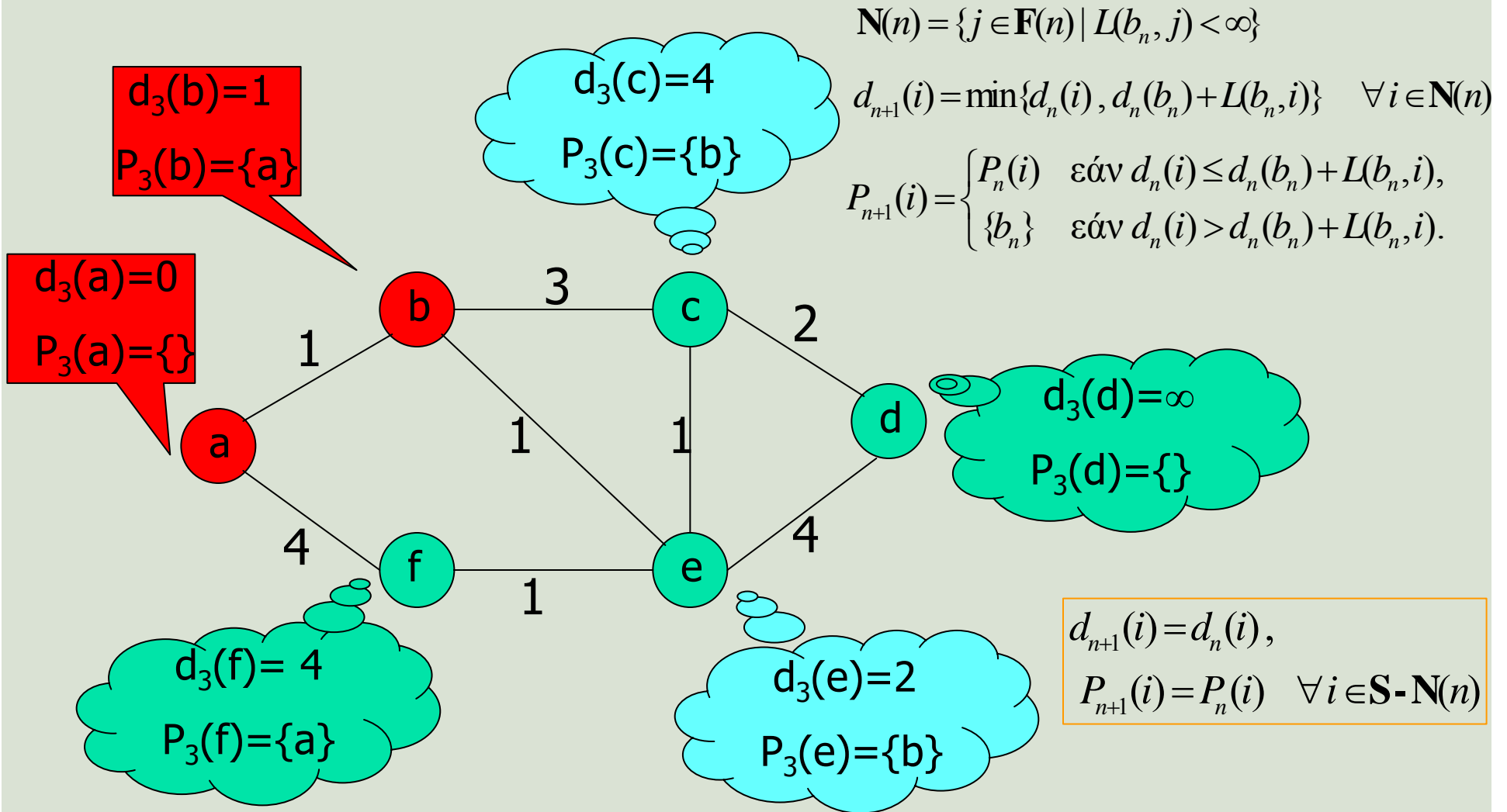


$$b_{n+1} = \operatorname{argmin}\{d_{n+1}(i), i \in \mathbf{F}(n)\}$$

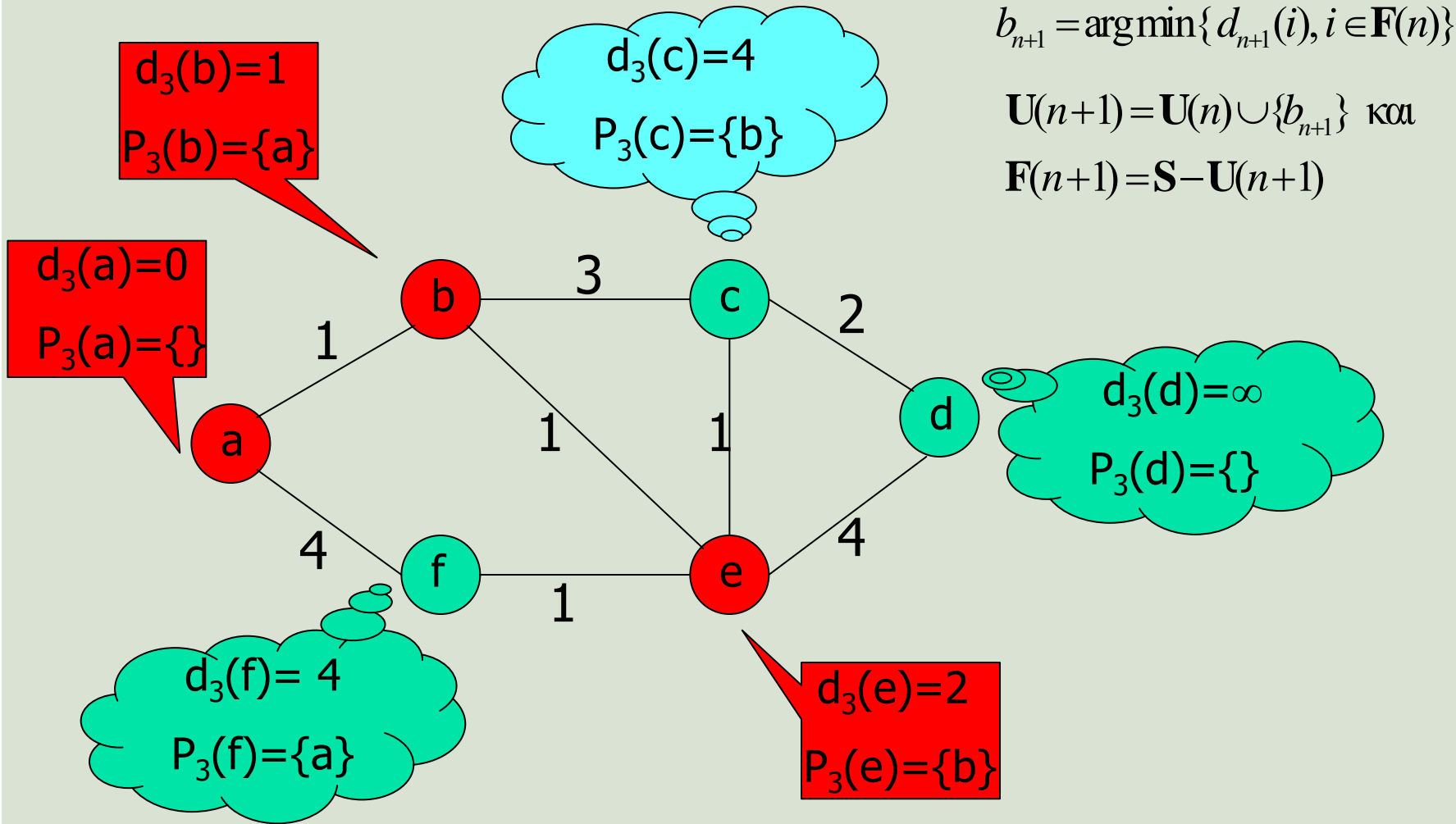
$$\mathbf{U}(n+1) = \mathbf{U}(n) \cup \{b_{n+1}\} \text{ και}$$

$$\mathbf{F}(n+1) = \mathbf{S} - \mathbf{U}(n+1)$$

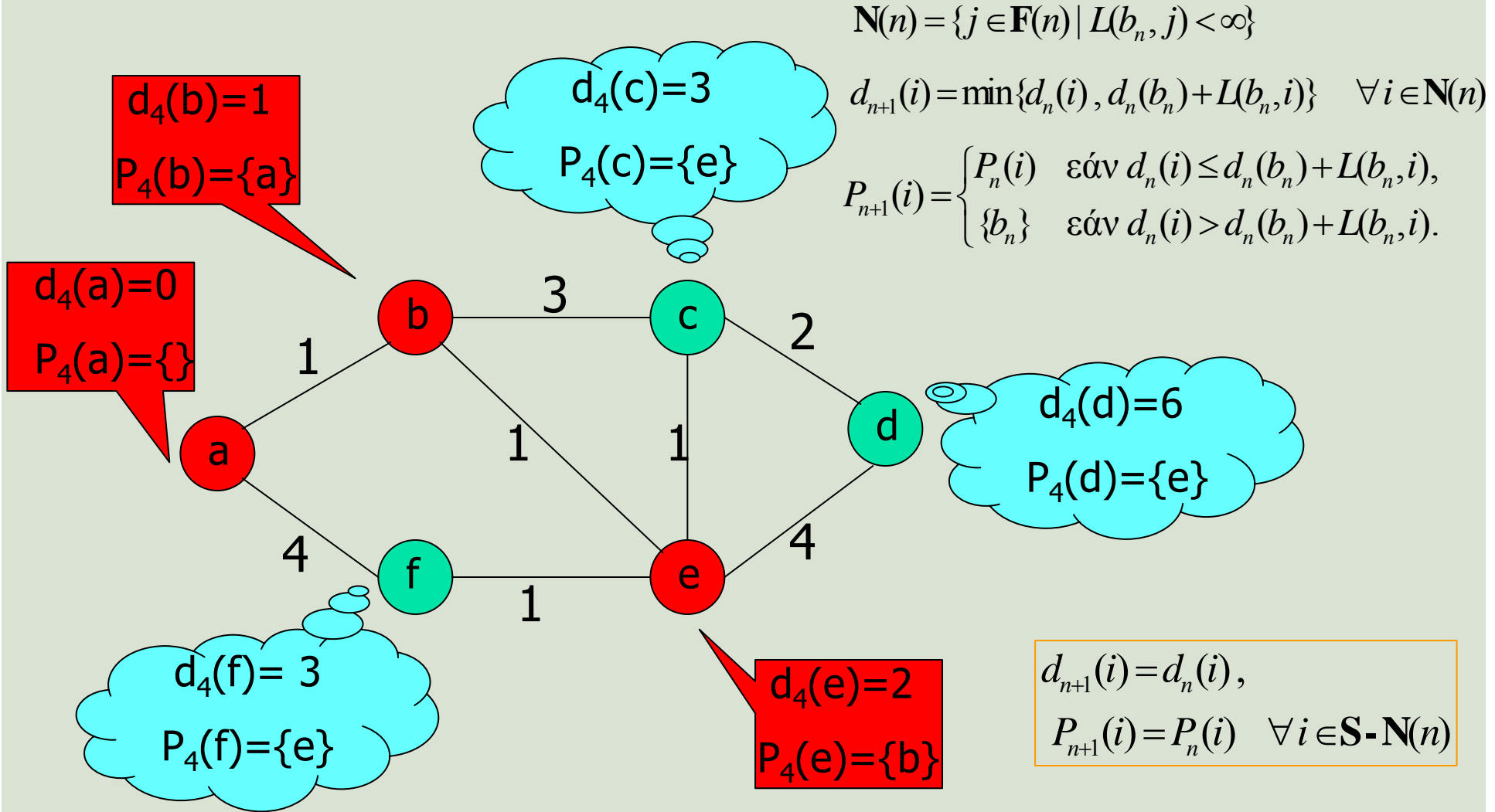
(n=2)



(n=2)



(n=3)



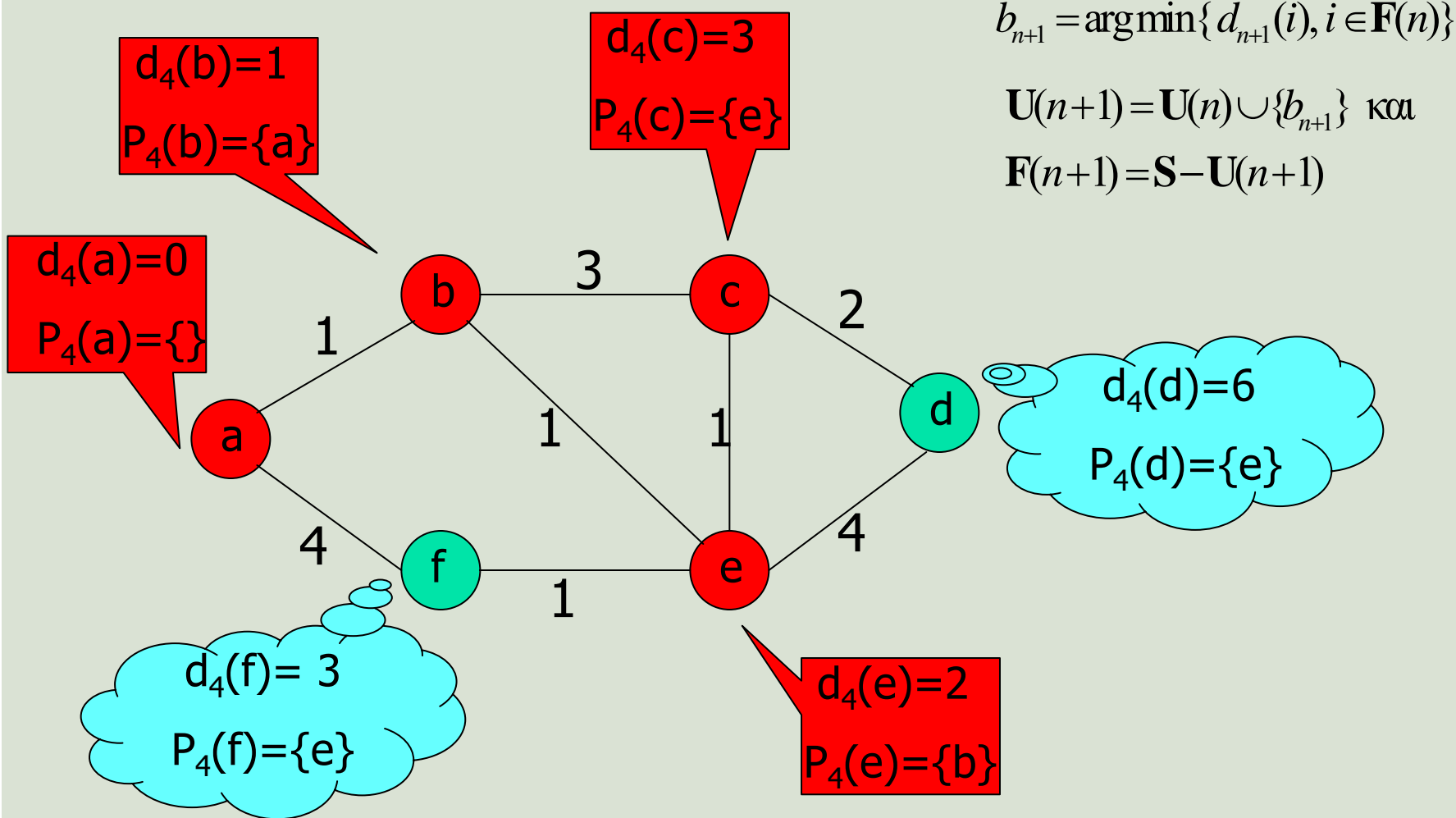
$$\mathbf{N}(n) = \{j \in \mathbf{F}(n) \mid L(b_n, j) < \infty\}$$

$$d_{n+1}(i) = \min\{d_n(i), d_n(b_n) + L(b_n, i)\} \quad \forall i \in \mathbf{N}(n)$$

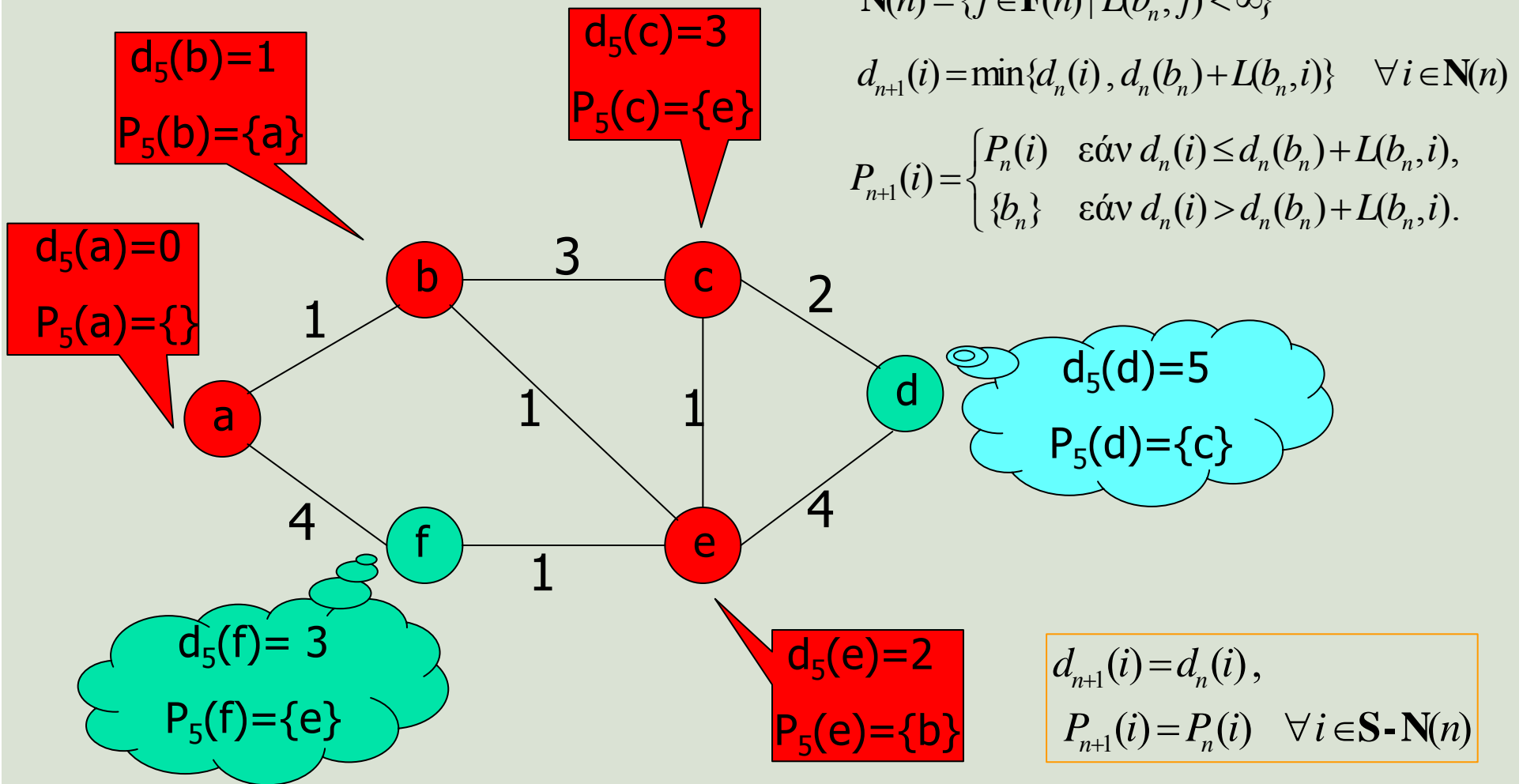
$$P_{n+1}(i) = \begin{cases} P_n(i) & \text{εάν } d_n(i) \leq d_n(b_n) + L(b_n, i), \\ \{b_n\} & \text{εάν } d_n(i) > d_n(b_n) + L(b_n, i). \end{cases}$$

$$\begin{aligned} d_{n+1}(i) &= d_n(i), \\ P_{n+1}(i) &= P_n(i) \quad \forall i \in \mathbf{S} - \mathbf{N}(n) \end{aligned}$$

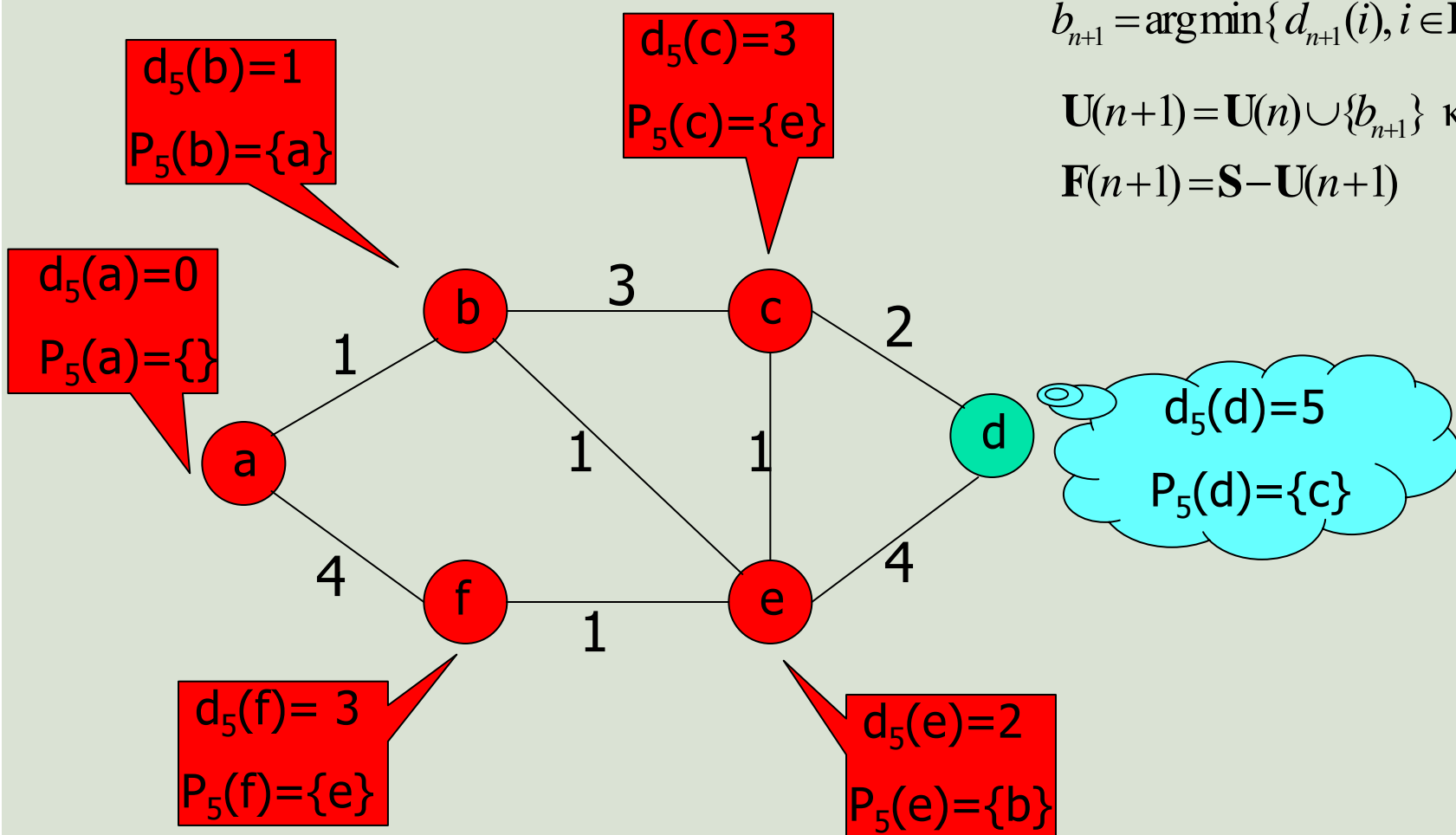
(n=3)



(n=4)



(n=4)

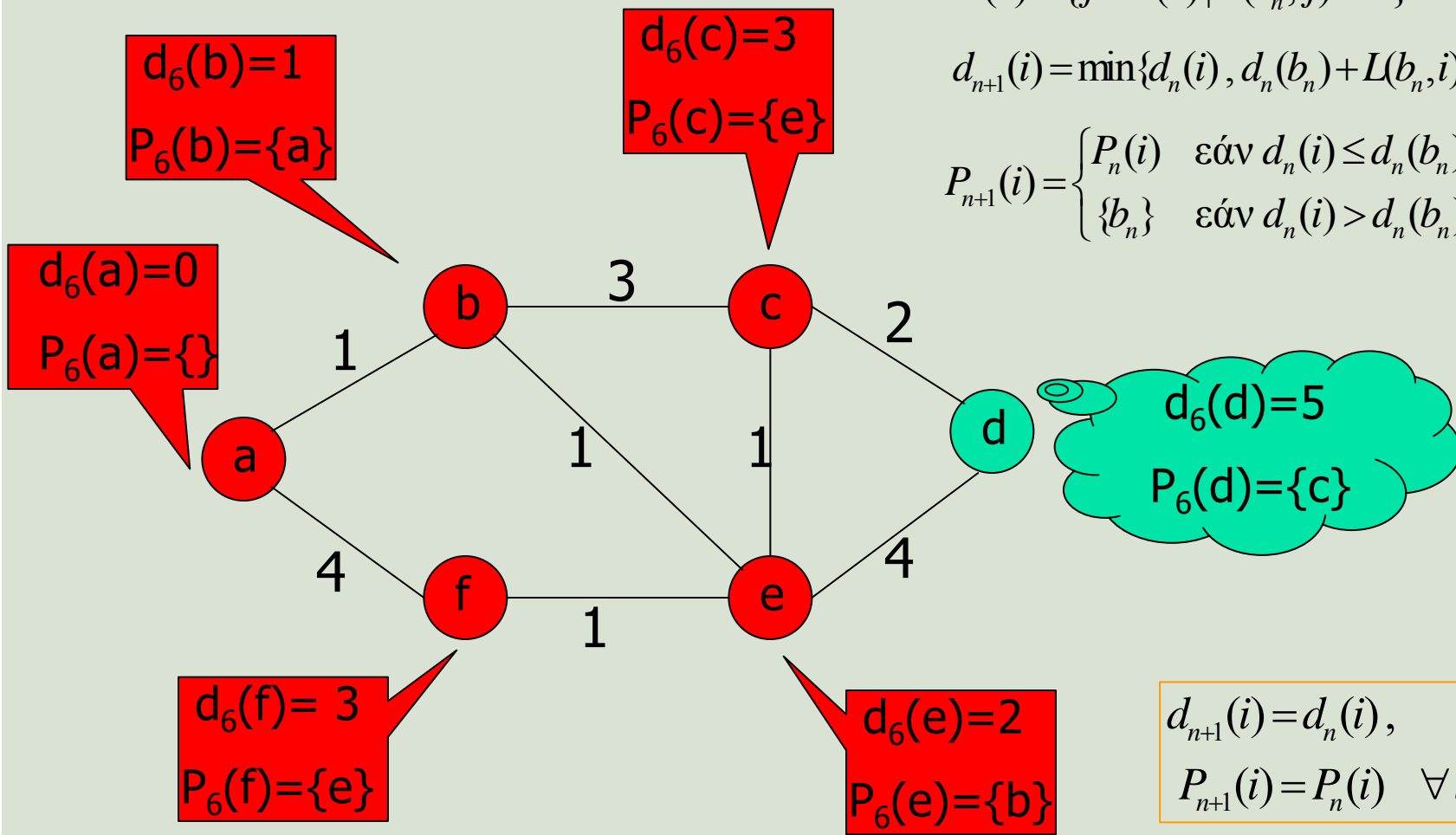


$$b_{n+1} = \operatorname{argmin}\{d_{n+1}(i), i \in \mathbf{F}(n)\}$$

$$\mathbf{U}(n+1) = \mathbf{U}(n) \cup \{b_{n+1}\} \text{ και}$$

$$\mathbf{F}(n+1) = \mathbf{S} - \mathbf{U}(n+1)$$

(n=5)



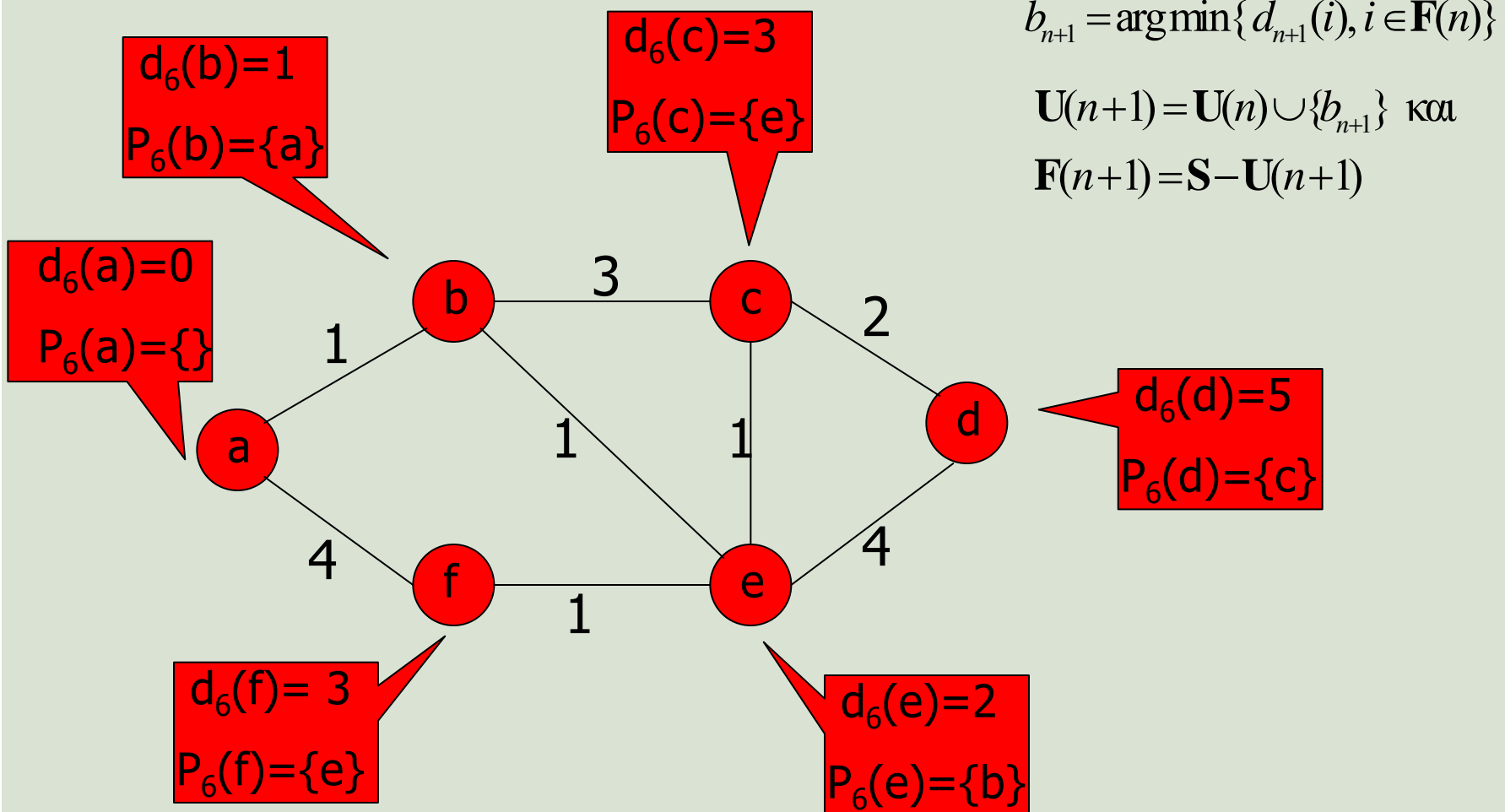
$$\mathbf{N}(n) = \{j \in \mathbf{F}(n) \mid L(b_n, j) < \infty\}$$

$$d_{n+1}(i) = \min\{d_n(i), d_n(b_n) + L(b_n, i)\} \quad \forall i \in \mathbf{N}(n)$$

$$P_{n+1}(i) = \begin{cases} P_n(i) & \text{εάν } d_n(i) \leq d_n(b_n) + L(b_n, i), \\ \{b_n\} & \text{εάν } d_n(i) > d_n(b_n) + L(b_n, i). \end{cases}$$

$$\begin{aligned} d_{n+1}(i) &= d_n(i), \\ P_{n+1}(i) &= P_n(i) \quad \forall i \in \mathbf{S} - \mathbf{N}(n) \end{aligned}$$

(n=5)





Αλγόριθμος Dijkstra

Θ.δ.ο: ο αλγόριθμος παράγει τα συντομότερα μονοπάτια

- στη n -οστή επανάληψη έχει βρει τα συντομότερα μονοπάτια από τον a στους κόμβους του $U(n)$ και
- τα μονοπάτια αυτά έχουν μήκη $d_n(i)$ όπου $i \in U(n)$

Επαγωγή

- πρόταση αληθής για $n = 1$ (συντομότερο μονοπάτι από τον a στον a με μήκος 0)
- Έστω ότι η πρόταση είναι αληθής για την n -οστή επανάληψη
- Θ.δ.ο. αληθής και για την επανάληψη $n + 1$
 - απαγωγή σε άτοπο



Αλγόριθμος Dijkstra

- Έστω ότι υπάρχει ένα μονοπάτι από τον a στον $f := b_n + 1$ με μήκος αυστηρά μικρότερο από $d_{n+1}(f)$
- Έστω j ο τελευταίος κόμβος στο $U(n)$ κατά μήκος του μονοπατιού αυτού και έστω $m \leq n$ τέτοιο ώστε $b_m = j$
- έστω k ο επόμενος κόμβος κατά μήκος του μονοπατιού αυτού από τον a στον b_{n+1}
- Ισχύει $d_m(j) + L(j, k) = d_n(j) + L(j, k) = d_{n+1}(k) \geq d_{n+1}(f)$

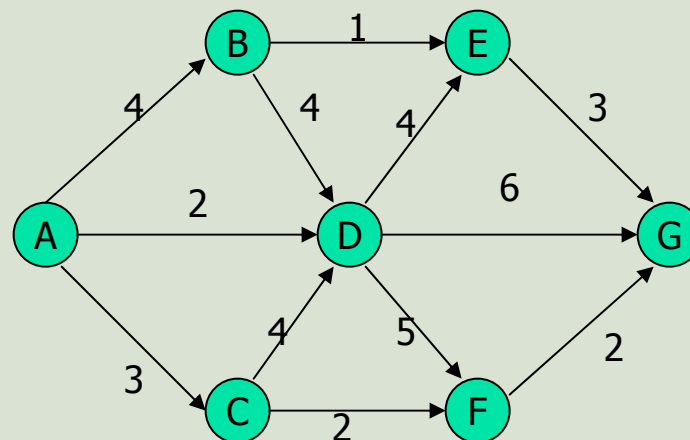
[αν δεν ίσχυε η ανισότητα τότε ο k θα είχε επιλεγεί πριν από τον f για να περιληφθεί στο $U(n)$]

άτοπο

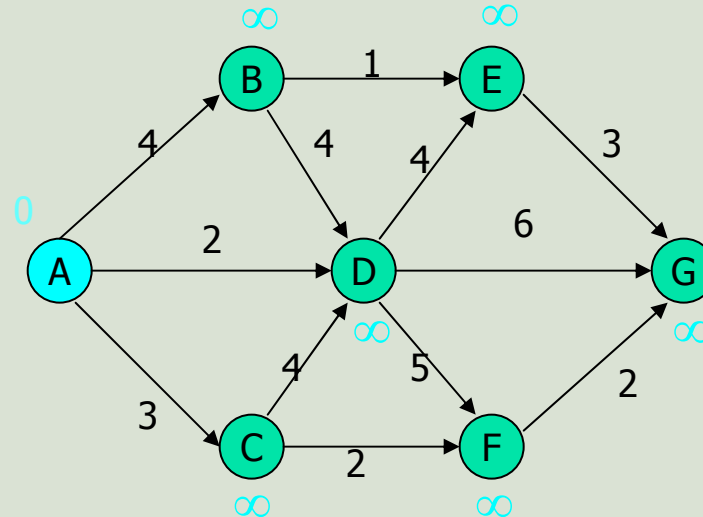


Παράδειγμα

Εύρεση του συντομότερου μονοπατιού από τον κόμβο A προς κάθε άλλο κόμβο

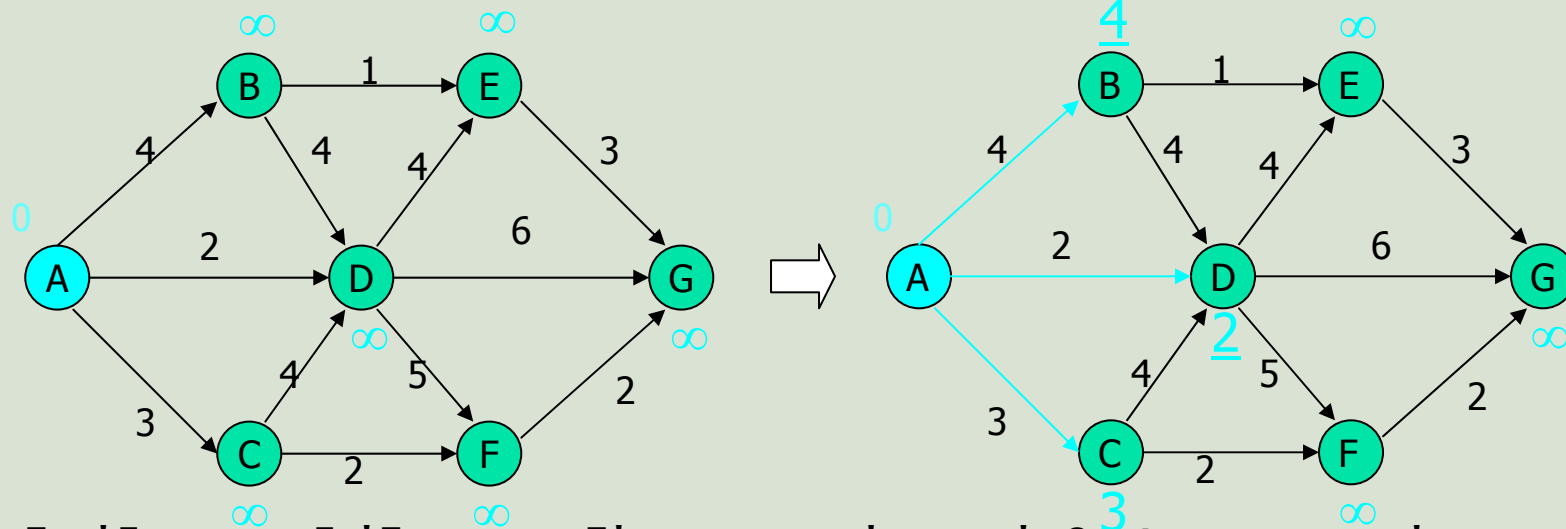


Παράδειγμα



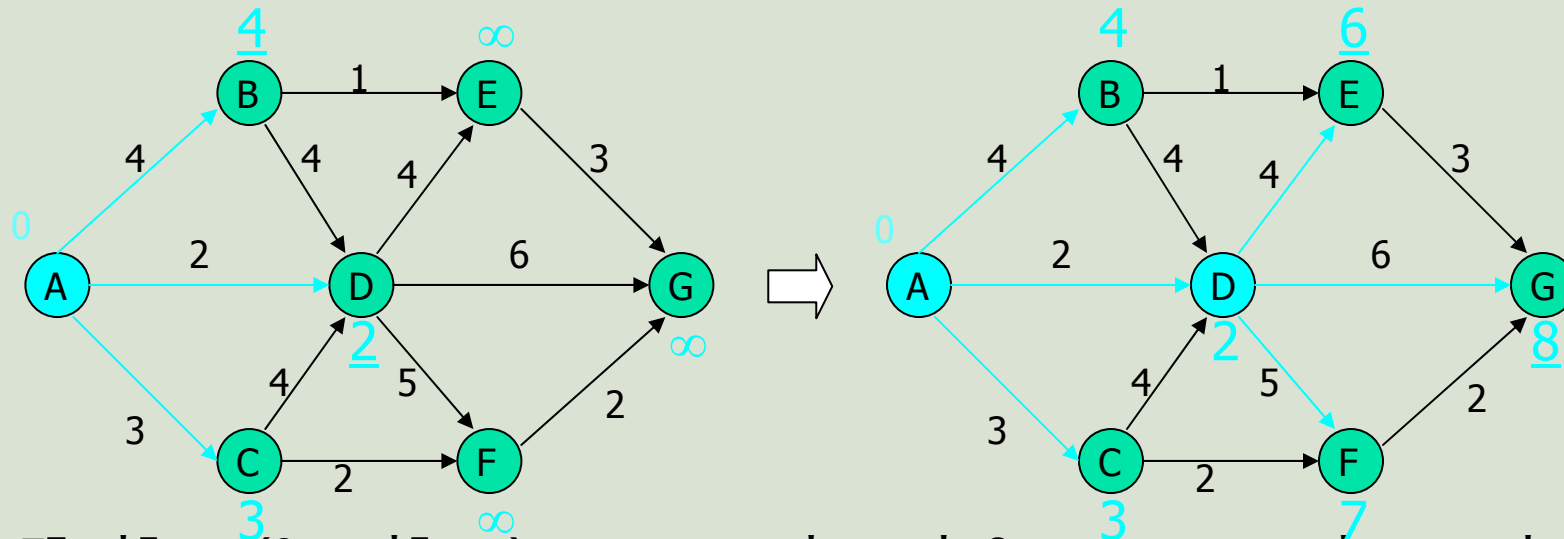
- Ο αλγόριθμος ξεκινά από τον κόμβο A (πηγή)
 - δίπλα σε κάθε κόμβο σημειώνεται μία εκτιμώμενη απόσταση από τον A προς τον κόμβο ($= \infty$, εκτός από αυτήν του κόμβου A ($= 0$))
 - Ο κόμβος A σκιάζεται \Leftrightarrow έχει την ελάχιστη εκτιμώμενη απόσταση από την πηγή (κόμβος A) \Leftrightarrow το ελαχίστου μήκους μονοπάτι προς αυτόν έχει καθορισθεί (\Leftrightarrow έχει σηκωθεί από το πάτωμα)

Παράδειγμα



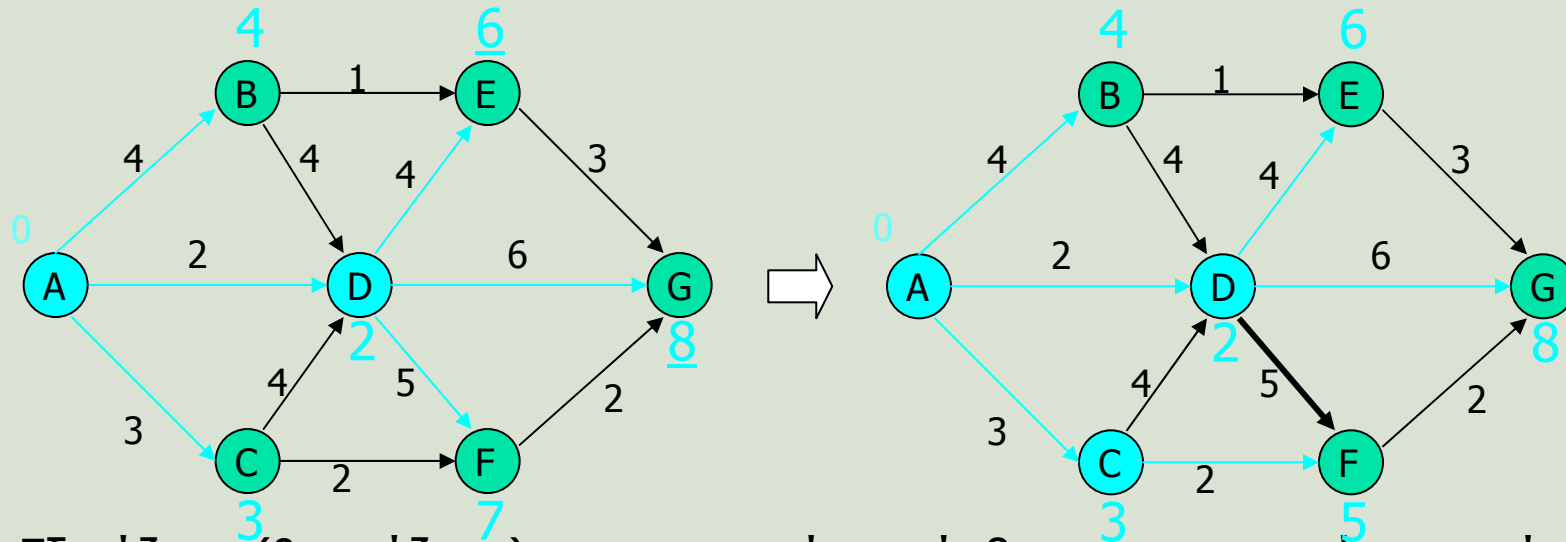
- εξετάζονται οι ζεύξεις που εξέρχονται από τον κόμβο A και ενημερώνονται οι εκτιμήσεις των κόμβων που μετέχουν στις ζεύξεις (νέες εκτιμήσεις → __)
- σημειώνονται οι ζεύξεις που οδηγούν σε μείωση των εκτιμήσεων ως παρούσες υποψήφιες για το συντομότερο μονοπάτι προς τους αντίστοιχους κόμβους (ενδεχομένως «ακυρώνονται» κάποιες προηγούμενα υποψήφιες ζεύξεις)

Παράδειγμα



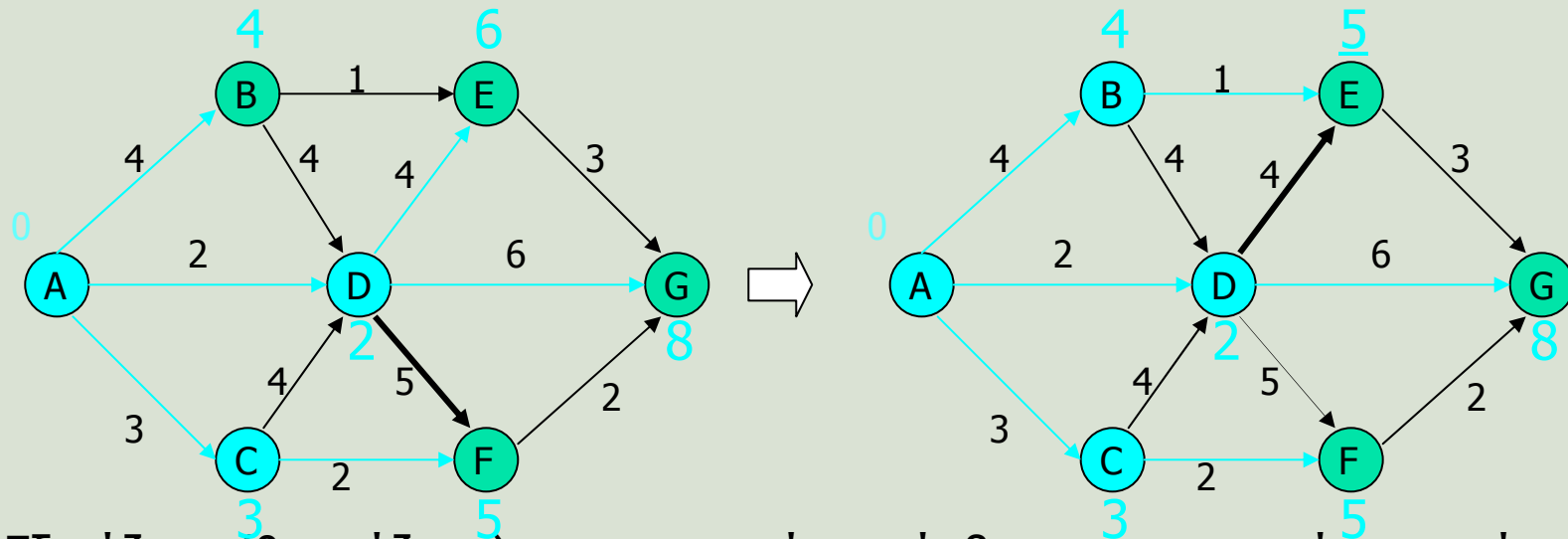
- Εξετάζεται (& σκιάζεται) ο μη-σκιασμένος κόμβος με την παρούσα μικρότερη εκτίμηση (κόμβος D)
 - εξετάζονται οι ζεύξεις που εξέρχονται από τον κόμβο αυτό και ενημερώνονται οι εκτιμήσεις των κόμβων που μετέχουν στις ζεύξεις (νέες εκτιμήσεις → __)
 - σημειώνονται οι ζεύξεις που οδηγούν σε μείωση των εκτιμήσεων ως παρούσες υποψήφιες για το συντομότερο μονοπάτι προς τους αντ. κόμβους (ενδεχομένως «ακυρώνονται» κάποιες προηγούμενα υποψήφιες ζεύξεις)

Παράδειγμα



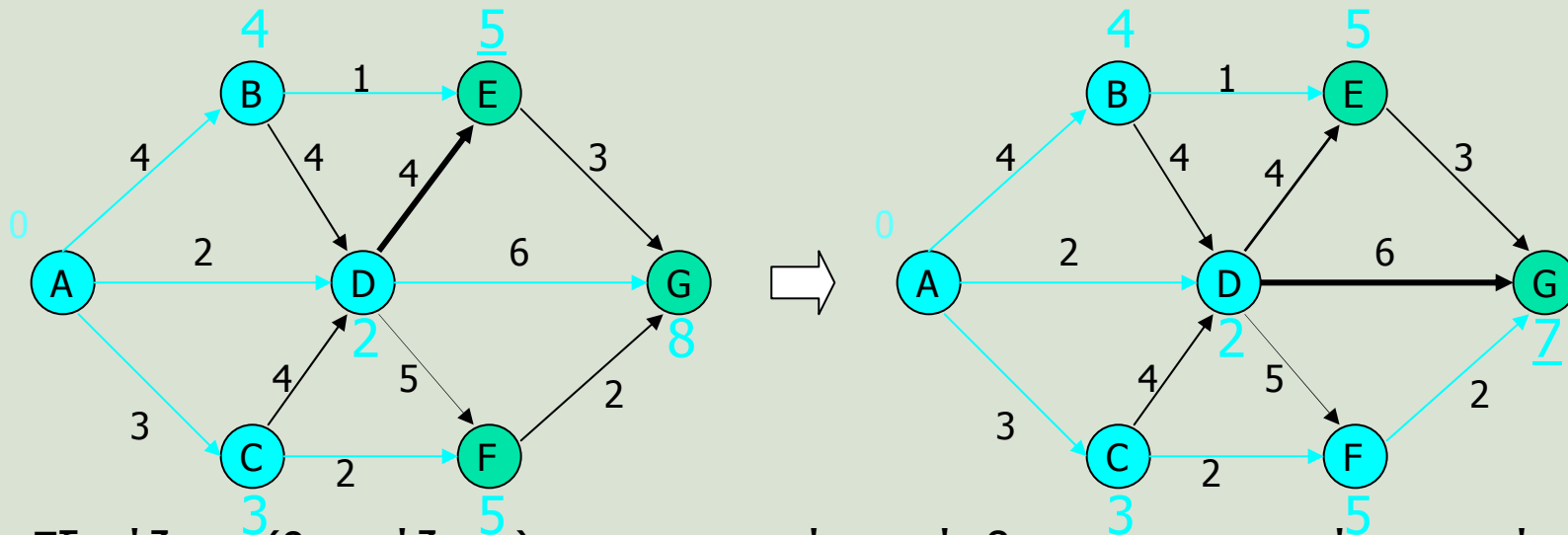
- Εξετάζεται (& σκιάζεται) ο μη-σκιασμένος κόμβος με την παρούσα μικρότερη εκτίμηση (κόμβος C)
 - εξετάζονται οι ζεύξεις που εξέρχονται από τον κόμβο αυτό και ενημερώνονται οι εκτιμήσεις των κόμβων που μετέχουν στις ζεύξεις (νέες εκτιμήσεις → __)
 - σημειώνονται οι ζεύξεις που οδηγούν σε μείωση των εκτιμήσεων ως παρούσες υποψήφιες για το συντομότερο μονοπάτι προς τους αντ. κόμβους («ακυρώνεται» η ζεύξη DF, η CF οδηγεί σε μείωση της εκτίμησης)

Παράδειγμα



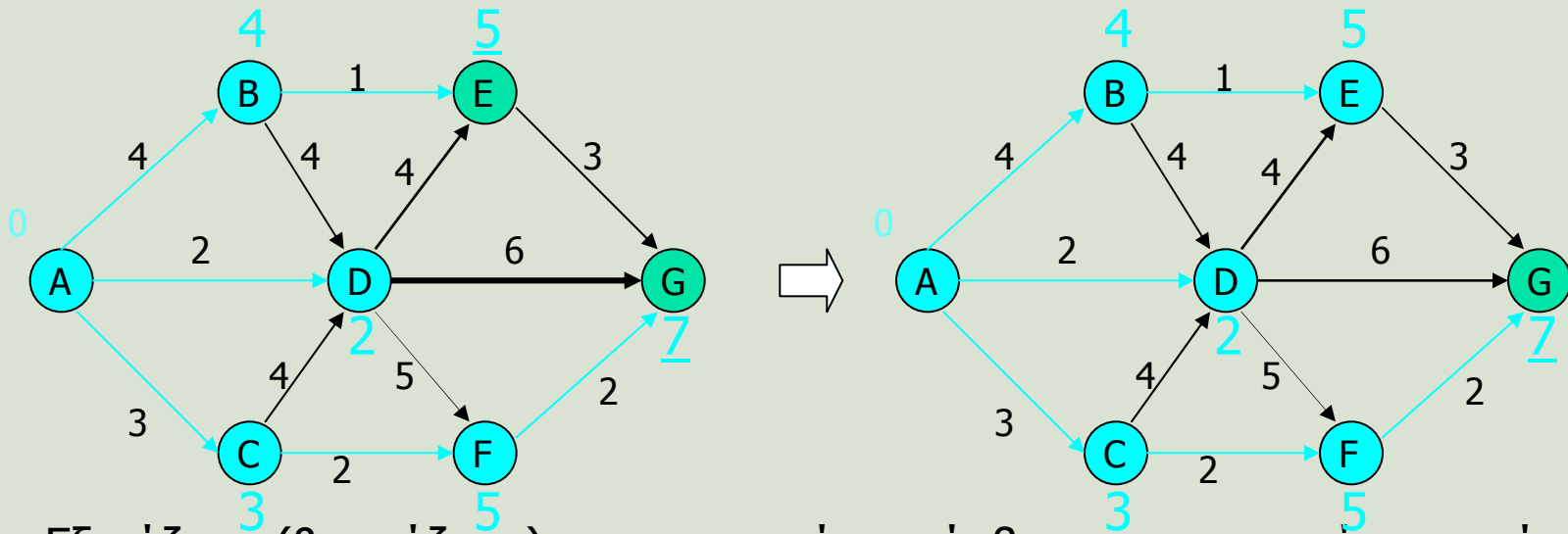
- Εξετάζεται (& σκιάζεται) ο μη-σκιασμένος κόμβος με την παρούσα μικρότερη εκτίμηση (κόμβος B)
 - εξετάζονται οι ζεύξεις που εξέρχονται από τον κόμβο αυτό και ενημερώνονται οι εκτιμήσεις των κόμβων που μετέχουν στις ζεύξεις (νέες εκτιμήσεις → __)
 - σημειώνονται οι ζεύξεις που οδηγούν σε μείωση των εκτιμήσεων ως παρούσες υποψήφιες για το συντομότερο μονοπάτι προς τους αντ. κόμβους («ακυρώνεται» η ζεύξη DE, η BE οδηγεί σε μείωση της εκτίμησης)

Παράδειγμα



- Εξετάζεται (& σκιάζεται) ο μη-σκιασμένος κόμβος με την παρούσα μικρότερη εκτίμηση (κόμβος E ή κόμβος F, έστω ο F)
 - εξετάζονται οι ζεύξεις που εξέρχονται από τον κόμβο αυτό και ενημερώνονται οι εκτιμήσεις των κόμβων που μετέχουν στις ζεύξεις (νέες εκτιμήσεις → __)
 - σημειώνονται οι ζεύξεις που οδηγούν σε μείωση των εκτιμήσεων ως παρούσες υποψήφιες για το συντομότερο μονοπάτι προς τους αντ. κόμβους («ακυρώνεται» η ζεύξη DG, η FG οδηγεί σε μείωση της εκτίμησης)

Παράδειγμα



- Εξετάζεται (& σκιάζεται) ο μη-σκιασμένος κόμβος με την παρούσα μικρότερη εκτίμηση (κόμβος E)
 - εξετάζονται οι ζεύξεις που εξέρχονται από τον κόμβο αυτό και ενημερώνονται οι εκτιμήσεις των κόμβων που μετέχουν στις ζεύξεις (νέες εκτιμήσεις → __)
 - σημειώνονται οι ζεύξεις που οδηγούν σε μείωση των εκτιμήσεων ως παρούσες υποψήφιες για το συντομότερο μονοπάτι προς τους αντ. κόμβους (ενδεχομένως «ακυρώνονται» κάποιες προηγούμενα υποψήφιες ζεύξεις)



Αλγόριθμος Bellman-Ford

- κατανεμημένος αλγόριθμος: οι δρομολογητές έχουν διαφορετικές και ελλιπείς πληροφορίες για το γράφημα
- Σε κάθε βήμα ένας κόμβος
 - υπολογίζει μία εκτίμηση της ελάχιστης απόστασής του από τον προορισμό
 - γνωστοποιεί την εκτίμηση αυτή στους γείτονές του

Περιγραφή

- **S**: σύνολο από N κόμβους
- $\{L(i, j), i, j \in S\}$ ($L(i, j) = \infty$ εάν δεν υπάρχει ζεύξη από τον i στον j)

Εύρεση συντομότερων μονοπατιών προς έναν προορισμό $D \in S$

- Υποθέσεις:
 - όλα τα βήματα είναι συγχρονισμένα
 - οι ζεύξεις είναι αμφίδρομες (αν $L(i, j) < \infty$, τότε $L(j, i) < \infty, \forall i, j$)

[ο αλγόριθμος εκτελείται σωστά και χωρίς τις υποθέσεις αυτές]

Αλγόριθμος Bellman-Ford

- Έστω $x_n(i)$: εκτίμηση της απόστασης του i από τον D στο βήμα n
- Στο βήμα 0
 - ο κόμβος i έχει τις εκτιμήσεις $x_0(i) = \infty \quad \forall i \in \mathbf{S}, i \neq D$ και $x_0(D) = 0$
 - οι κόμβοι γνωστοποιούν τις εκτιμήσεις αυτές στους γείτονές τους
- Στο βήμα $n + 1$ ο κόμβος $k \in \mathbf{S}, k \neq D$ εξετάζει τα μηνύματα τα οποία έλαβε από τους γείτονές του στο προηγούμενο βήμα n και

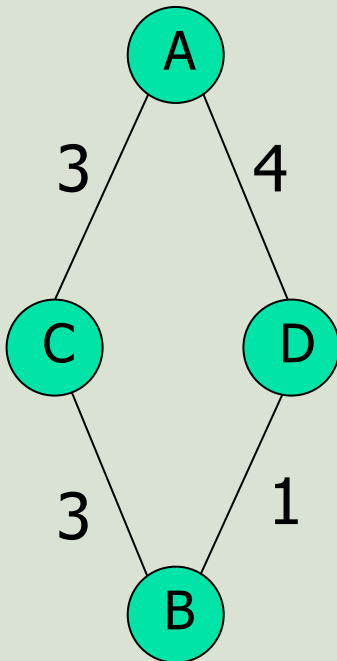
- ενημερώνει την εκτίμησή του για την απόστασή του από τον D με

$$x_{n+1}(k) = \min \{L(i, j) + x_n(j), j \in \mathbf{S}\} \quad k \in \mathbf{S}, k \neq D$$

$N - 1$ εξισώσεις που υπολογίζονται παράλληλα από $N - 1$ κόμβους και παράγεται το επόμενο σύνολο εκτιμήσεων $\{x_{n+1}(k), k \in \mathbf{S}, k \neq D\}$

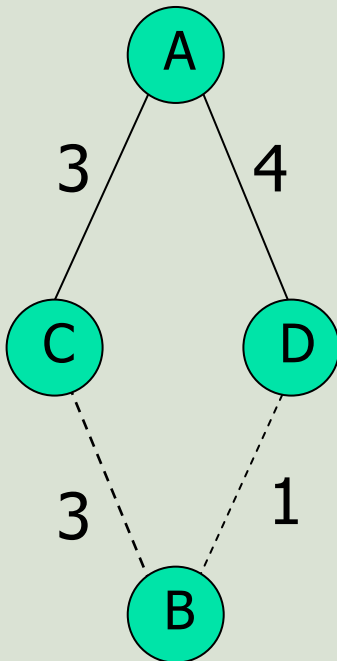
- γνωστοποιεί τις νέες εκτιμήσεις στους γείτονές του

Παράδειγμα



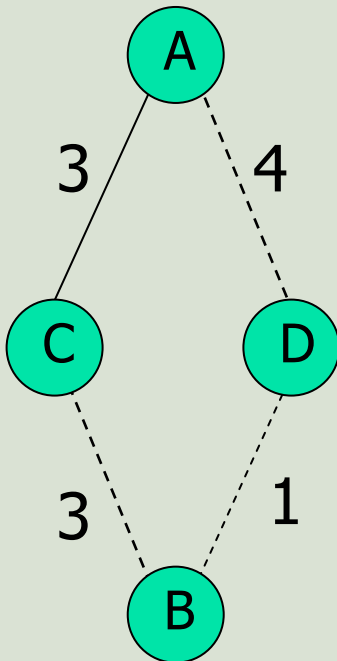
- Εύρεση συντομότερων μονοπατιών από όλους τους κόμβους προς τον κόμβο B
- $x_0(A) = x_0(C) = x_0(D) = \infty$ $x_0(B) = 0$
- ο B πληροφορεί τους γείτονές του (C, D) για την ελάχιστη απόστασή του από τον προορισμό (B)

Παράδειγμα



- Εύρεση συντομότερων μονοπατιών από όλους τους κόμβους προς τον κόμβο B
- $x_0(A) = x_0(C) = x_0(D) = \infty$ $x_0(B) = 0$
- ο B πληροφορεί τους γείτονές του (C, D) για την ελάχιστη απόστασή του από τον προορισμό (B)
- οι C και D ενημερώνουν τις εκτιμήσεις τους για την ελάχιστη απόστασή τους από τον B
 $x_1(C) = 3$, $x_1(D) = 1$
- οι C και D πληροφορούν τους γείτονές τους (A) για την ελάχιστη απόστασή τους από τον B

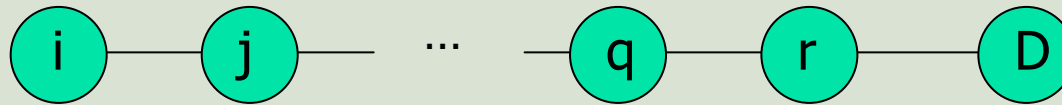
Παράδειγμα



- Εύρεση συντομότερων μονοπατιών από όλους τους κόμβους προς τον κόμβο B
- $x_0(A) = x_0(C) = x_0(D) = \infty$ $x_0(B) = 0$
- ο B πληροφορεί τους γείτονές του (C, D) για την ελάχιστη απόστασή του από τον προορισμό (B)
- οι C και D ενημερώνουν τις εκτιμήσεις τους για την ελάχιστη απόστασή τους από τον B
 $x_1(C) = 3$, $x_1(D) = 1$
- οι C και D πληροφορούν τους γείτονές τους (A) για την ελάχιστη απόστασή τους από τον B
- ο A ενημερώνει την εκτίμησή του για την ελάχιστη απόστασή του από τον B
- $x_2(A) = \min \{L(A,C) + x_1(C), L(A,D) + x_1(D)\}$
 $= \min \{3+3, 4+1\} = 5$

Αλγόριθμος Bellman-Ford

- ο αλγόριθμος συγκλίνει στις σωστές εκτιμήσεις σε πεπερασμένο χρόνο
 $\exists m < \infty: \forall n \geq m, x_n(i)$ είναι η ελάχιστη απόσταση από τον i στον $D, \forall i \in \mathbf{S}$



- έστω κόμβος $i \neq D$ και έστω n μονοπάτι από τον i στον D με $n \geq 1$ ζεύξεις
- στο βήμα 1: ο r λαμβάνει μήνυμα από τον D και $x_1(r) = L(r,D)$
- Στο βήμα 2: ο q λαμβάνει μήνυμα (τουλάχιστον) από τον $r \Rightarrow x_2(q) \leq L(r,D) + L(q,r)$
- ...
- Στο βήμα n : $x_n(i) =$ ελάχιστο των μηκών των μονοπατιών με έως n ζεύξεις από τον i στον D
- το συντομότερο μονοπάτι από τον i στον D είναι ελεύθερο βρόχων
 \Rightarrow η εκτίμηση του i παίρνει την τιμή της ελάχιστης απόστασης από τον i στον D το πολύ μετά από $m(i)$ βήματα
 $m(i)$: μέγιστο μήκος ενός μονοπατιού ελεύθερου βρόχων από τον i στον D
 \Rightarrow ο αλγόριθμος συγκλίνει το πολύ σε m βήματα, $m = \max\{m(i), i \in \mathbf{S}\}$

Αλγόριθμος Bellman-Ford

- ο αλγόριθμος συγκλίνει για αυθαίρετες μη αρνητικές αρχικές εκτιμήσεις $x_0(i)$, $i \in \mathbf{S}$ με $x_0(D) = 0$
- Έστω ότι ο αλγόριθμος αρχίζει με αρχικές εκτιμήσεις $x_0(i) = 0$ για κάθε $i \in \mathbf{S}$
- έστω $\{y_n(i), i \in \mathbf{S}\}$ τις εκτιμήσεις που προκύπτουν από τις αρχικές αυτές τιμές

$$y_n(i) \leq y_{n+1}(i), i \in \mathbf{S}, n \geq 0$$

- με επαγωγή στο n επαληθεύεται:

$$y_n(i) \leq x_n(i), i \in \mathbf{S}, n \geq 0.$$

- $\forall i \in \mathbf{S}$

- $x_n(i)$ συγκλίνει στην ελάχιστη απόσταση $L(i)$ από τον i στον D σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων $\Rightarrow y_n(i)$ συγκλίνει
- έστω $V(i)$ το όριο του $y_n(i)$, $n \rightarrow \infty$.

$$y_{n+1}(k) = \min \{L(i, j) + y_n(j), j \in \mathbf{S}\} \Rightarrow V(i) = \min \{L(i, j) + V(j), j \in \mathbf{S}\}$$

- $V(D) = 0 \Rightarrow V(i) = L(i)$



Αλγόριθμος Bellman-Ford

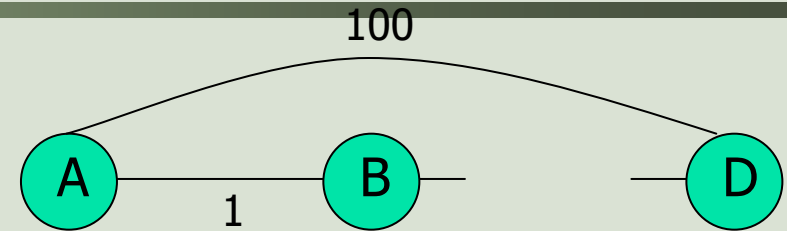
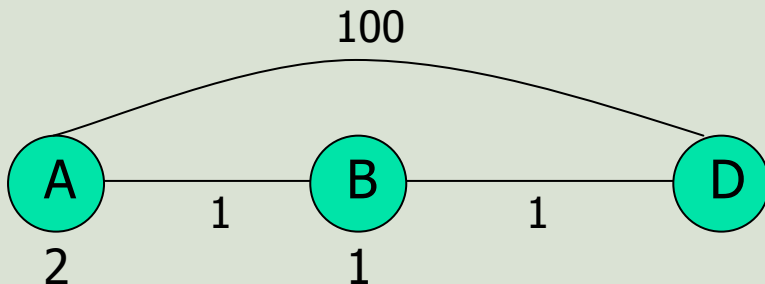
- για αυθαίρετες (μη αρνητικές) εκτιμήσεις $x_0(i)$ με $x_0(D) = 0$
έστω $\{z_n(i), i \in S\}$ οι εκτιμήσεις που προκύπτουν από τις αρχικές αυτές τιμές
- με επαγωγή στο n επαληθεύεται: $y_n(i) \leq z_n(i) \leq x_n(i), i \in S, n \geq 0.$
- $x_n(i)$ και $y_n(i)$ συγκλίνουν στο $L(i) \Rightarrow z_n(i)$ συγκλίνει στο $L(i)$

\Rightarrow Προσαρμογή:

- έστω ότι οι εκτιμήσεις έχουν λάβει κάποιες τιμές
- η κατάσταση στο δίκτυο αλλάζει (διαφορετικά μήκη ζεύξεων)
- οι εκτιμήσεις θα συγκλίνουν στις νέες ελάχιστες αποστάσεις

Αλγόριθμος Bellman-Ford - Αργή Σύγκλιση

- η σύγκλιση μπορεί να είναι πολύ αργή
- προορισμός D
- $L(A, B) = L(B, D) = 1, L(A, D) = 100$
- η ζεύξη (B, D) τίθεται εκτός λειτουργίας



2	$2+1=3, \rightarrow A$
$3+1=4, \rightarrow B$	3
4	$4+1=5, \rightarrow A$
$5+1=6, \rightarrow B$	5
6	$6+1=7, \rightarrow A$
...	...
$97+1=98, \rightarrow B$	97
98	$98+1=99, \rightarrow A$
$99+1=100, \rightarrow B$	99
100	$100+1=101, \rightarrow A$
100	101

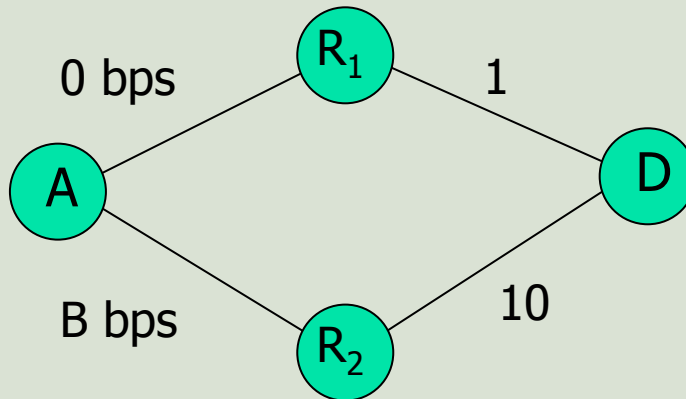
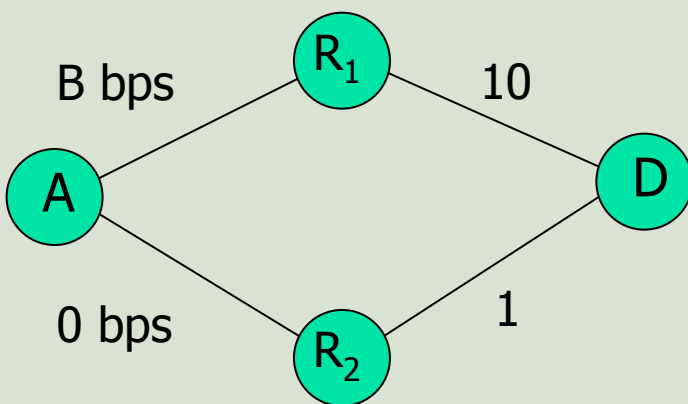
Αλγόριθμος Bellman-Ford - Ταλαντώσεις

Ο αλγόριθμος Bellman-Ford ενδέχεται να οδηγήσει σε ταλαντώσεις

Παράδειγμα:

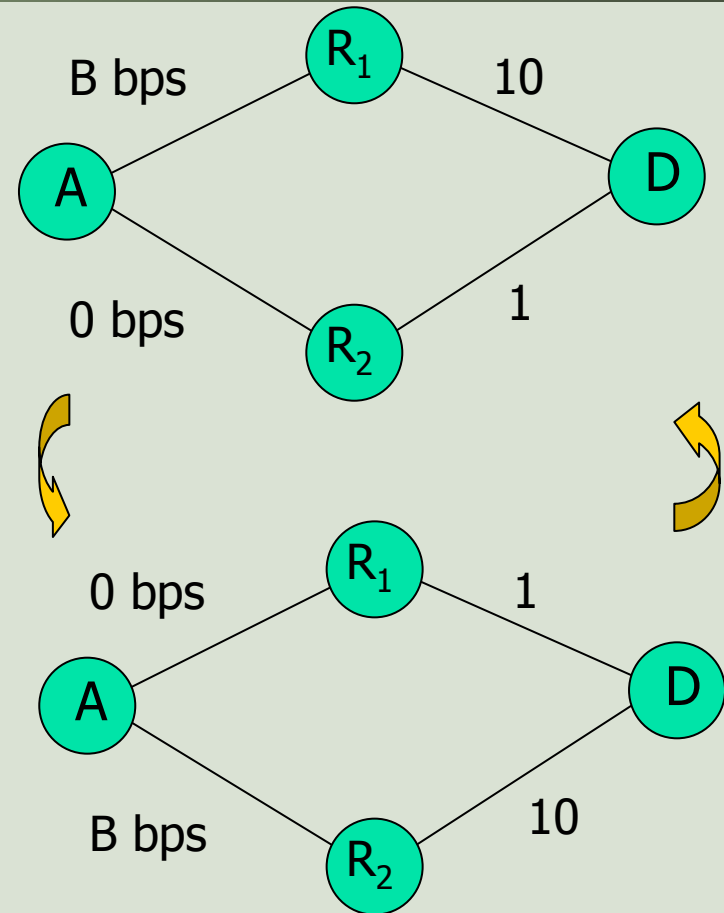
- Ο κόμβος A έχει να στείλει στον D B bps
- έστω ότι η καθυστέρηση στις ζεύξεις (R1, D) και (R2, D) είναι ίση με:
 - 1 όταν σχεδόν καθόλου κίνηση δε στέλνεται (χρόνος διάδοσης=1*)
 - 10 όταν η ζεύξη μεταφέρει B bps

[θεωρούνται αμελητέες οι καθυστερήσεις στις ζεύξεις (A, R1) και (A, R2)]



Αλγόριθμος Bellman-Ford - Ταλαντώσεις

- έστω ότι αρχικά ο A στέλνει όλη την κίνηση μέσω του R1
 - ⇒ καθυστέρηση στη (R1, D) = 10, καθυστέρηση στη (R2, D) = 1
- R₁, R₂ γνωστοποιούν τις καθυστ. στον A
 - ⇒ προτιμώμενο μονοπάτι μέσω του R2
- Ο A στέλνει όλη την κίνησή στον R2
 - ⇒ καθυστέρηση στη (R1, D) = 1, καθυστέρηση στη (R2, D) = 10
- R₁, R₂ γνωστοποιούν τις καθυστ. στον A
-
- ⇒ ταλάντωση μεταξύ δύο καταστάσεων
- Εναλλακτικά: ο A στέλνει τη μισή κίνησή στον R1 και την άλλη μισή στον R2
 - προσεγγίζεται αν ο A μετατοπίζει μικρό ποσοστό της κίνησής σε κάθε επανάληψη
 - όμως ο αλγόριθμος καθίσταται βραδύτερος στην περίπτωση που κάποιες ζεύξεις τεθούν εκτός λειτουργίας



Δένδρο Επικάλυψης - Αλγόριθμος του Prim

- **S**: σύνολο από N κόμβους
- $\{L(i, j), i, j \in S\}$ ($L(i, j) = \infty$ εάν δεν υπάρχει ζεύξη από τον i στον j)
- πλήρως αμφίδρομες ζεύξεις ($L(i, j) = L(j, i)$)

Σε ένα γράφημα $\{S, L\}$, ένα δένδρο επικάλυψης είναι ένα υπογράφημα το οποίο διασχίζει όλους τους κόμβους στο S και δεν περιέχει βρόχους

Ένα ελάχιστο δένδρο επικάλυψης είναι ένα δένδρο επικάλυψης με το ελάχιστο άθροισμα μηκών ζεύξεων (γενικά, όχι μοναδικό)

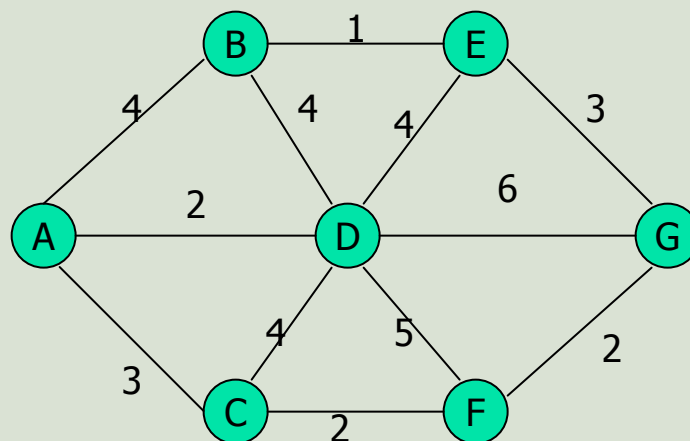
Αλγόριθμος ελαχίστου δένδρου επικάλυψης του Prim

- Ο αλγόριθμος ξεκινά με την επιλογή ενός αυθαίρετου κόμβου i_0
- Σε κάθε βήμα προσαρτά τον πλησιέστερο κόμβο στο δένδρο το οποίο έχει κατασκευάσει έως τότε



Αλγόριθμος του Prim

Παράδειγμα

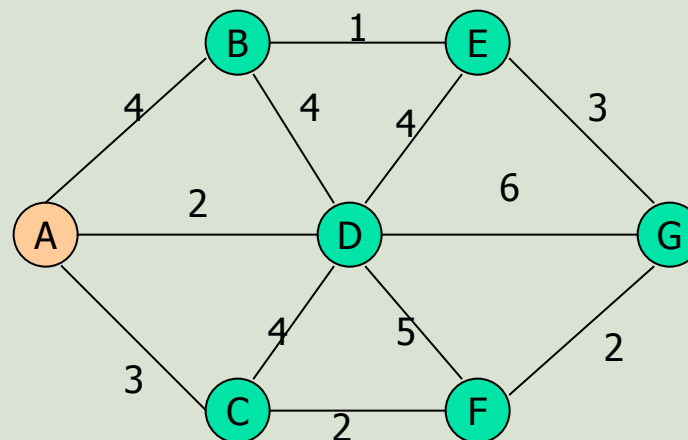




Αλγόριθμος του Prim

Παράδειγμα

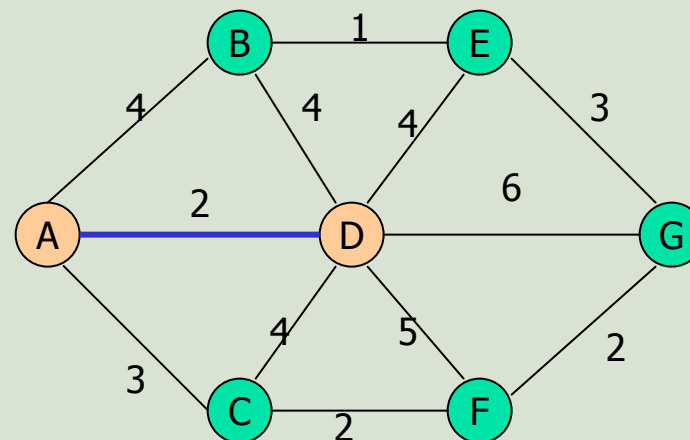
Έστω $i_0 \rightarrow A$





Αλγόριθμος του Prim

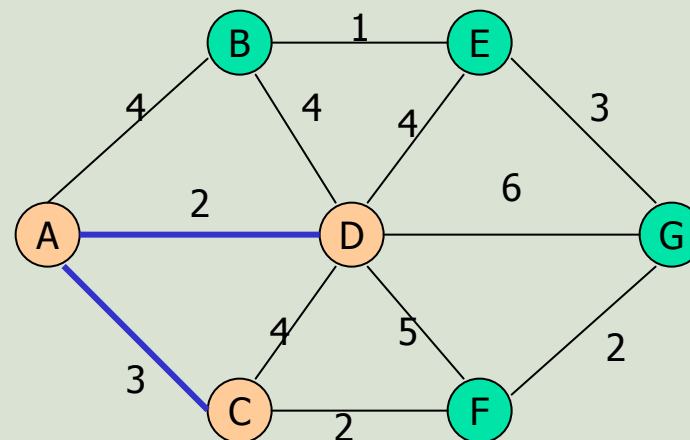
Παράδειγμα





Αλγόριθμος του Prim

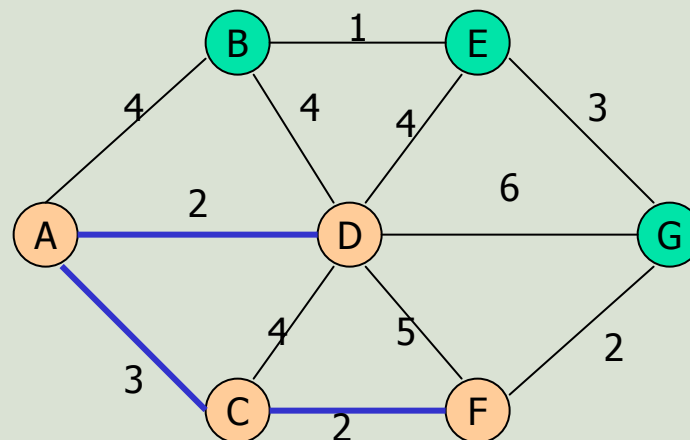
Παράδειγμα





Αλγόριθμος του Prim

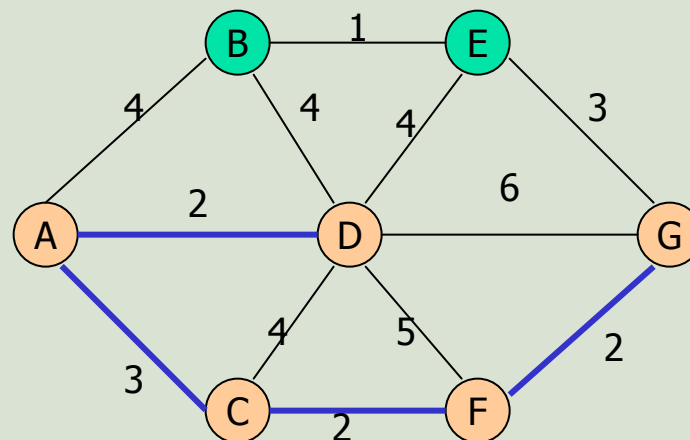
Παράδειγμα





Αλγόριθμος του Prim

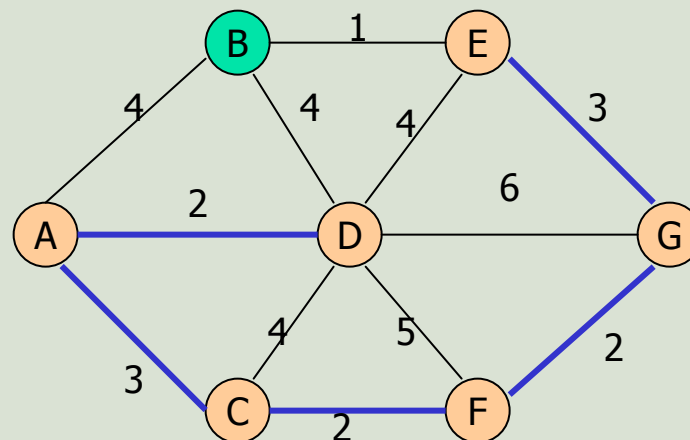
Παράδειγμα





Αλγόριθμος του Prim

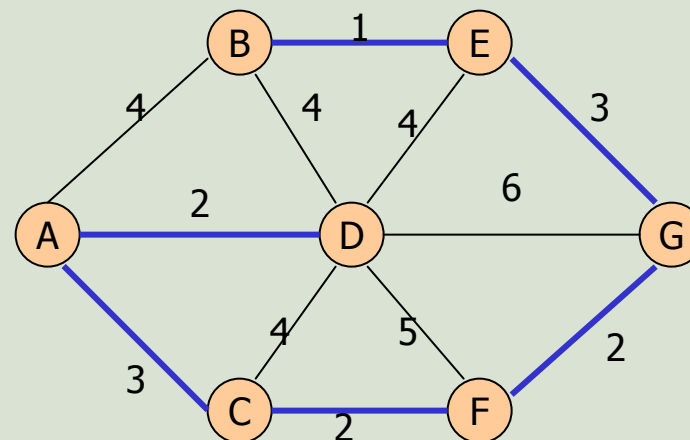
Παράδειγμα





Αλγόριθμος του Prim

Παράδειγμα





Αλγόριθμος του Prim - Ανάλυση

Ένα δένδρο επικάλυψης **T** είναι ελάχιστο \Leftrightarrow περιέχει τη μικρότερη ζεύξη κάθε συνόλου τομής

η συνθήκη είναι αναγκαία

(Ένα δένδρο επικάλυψης **T** είναι ελάχιστο \Rightarrow περιέχει τη μικρότερη ζεύξη κάθε συνόλου τομής)

- το **T** είναι δένδρο επικάλυψης \Rightarrow περιέχει τουλάχιστον μία ζεύξη σε κάθε σύνολο τομής
- Εάν δεν περιέχει τη μικρότερη ζεύξη σε κάποιο σύνολο τομής, τότε το δένδρο μπορεί να γίνει μικρότερο αντικαθιστώντας μία ζεύξη του **T** σε εκείνο το σύνολο τομής με τη μικρότερη

Αλγόριθμος του Prim - Ανάλυση

η συνθήκη είναι ικανή

(το **T** περιέχει τη μικρότερη ζεύξη κάθε συνόλου τομής \Rightarrow είναι ελάχιστο)

- Έστω ότι κάποιο άλλο δένδρο **T'** είναι το ελάχιστο δένδρο επικάλυψης
- \Rightarrow Στο **T'** ανήκει τουλάχιστον μια ζεύξη (έστω **L**) που δεν ανήκει στο **T**
- Απομακρύνοντας την **L** από το **T'** το σύνολο των κόμβων χωρίζεται σε δύο υποσύνολα **A** και **B** (όλοι οι κόμβοι στα **A** και **B** παραμένουν συνδεδεμένοι από το **T'**)
- οι ζεύξεις που ενώνουν 1 κόμβο του **A** και 1 του **B** συγκροτούν ένα σύνολο τομής
- Εξ υποθέσεως, το **T** περιέχει τη μικρότερη ζεύξη **L'** σε αυτό το σύνολο τομής
- αν η **L'** είναι μικρότερη από την **L**, τότε με αντικατάσταση της **L** από την **L'** στο **T'** σχηματίζεται ένα μικρότερο δένδρο (άτοπο)



Διατερματική Μετάδοση

- το επίπεδο δικτύου υλοποιεί τη διατερματική παράδοση των πακέτων
- το επίπεδο μεταφοράς επιβλέπει δύο στοιχεία αυτής της παράδοσης
 - έλεγχο σφαλμάτων
 - έλεγχο συμφόρησης / ροής
- Έλεγχος ροής: διαδικασία που χρησιμοποιεί η πηγή για να ρυθμίζει το ρυθμό μετάδοσης της ώστε να μην υπερφορτώνει το δέκτη
[Στο TCP, ο δέκτης γνωστοποιεί στην πηγή τον αριθμό των πακέτων που είναι σε θέση να δεχθεί]
- Έλεγχος συμφόρησης : μηχανισμός που χρησιμοποιούν οι πηγές για να περιορίσουν τη συμφόρηση στους κόμβους του δικτύου
[Στο TCP, οι πηγές χρησιμοποιούν τις καθυστερήσεις των επιβεβαιώσεων ως ενδείξεις συμφόρησης και προσαρμόζουν ανάλογα το μέγεθος του παραθύρου του πρωτοκόλλου επαναμετάδοσης]
- Τα σφάλματα κατά την παράδοση των πακέτων οφείλονται
 - σφάλματα μετάδοσης που αλλοιώνουν τα πακέτα
 - απόρριψη πακέτων από το δρομολογητή όταν ο καταχωρητής του είναι γεμάτος



Selective Repeat Protocol – SRP (Πρωτόκολλο επιλεκτικής επανάληψης)

- επαναμεταδίδει μόνο τα πακέτα που δε φτάνουν σωστά στον προορισμό
- υλοποιείται από τους υπολογιστές στην πηγή και τον προορισμό
- ο προορισμός στέλνει μία επιβεβαίωση για κάθε σωστό πακέτο που λαμβάνει
- όταν η πηγή στέλνει ένα πακέτο, ξεκινά ένα χρονομετρητή
- η πηγή υποθέτει ότι το πακέτο δεν έφτασε σωστά αν η επιβεβαίωση δεν επιστρέψει μέσα σε συγκεκριμένο χρόνο [*προθεσμία (timeout)*] και επαναμεταδίδει το πακέτο



Selective Repeat Protocol – SRP (Πρωτόκολλο επιλεκτικής επανάληψης)

η πηγή

- χρησιμοποιεί ένα μέγεθος παραθύρου W
- στέλνει τα πακέτα $1, 2, \dots, W$ και περιμένει να επιστρέψει η επιβεβαίωση του πακέτου 1 πριν να στείλει το πακέτο $W + 1$
- αν όλα πάνε καλά λαμβάνει τις επιβεβαιώσεις πριν από τη λήξη της προθεσμίας και συνεχίζει να μεταδίδει
- αν μια επιβεβαίωση δε φτάσει πριν από τη λήξη της προθεσμίας, η πηγή επαναμεταδίδει αυτό το πακέτο

ο προορισμός

- στέλνει επιβεβαίωση με αριθμό ακολουθίας $K + 1$ εάν έχει λάβει τα πακέτα $1, 2, \dots, K$ αλλά δεν έχει λάβει το $K + 1$
- παραδίδει τα πακέτα $1, 2, \dots, K$ που έλαβε στη σωστή σειρά και
- αποθηκεύει τα πακέτα $K + 2, K + 3, K + 4$ για να τα παραδώσει αφού έρθει το πακέτο $K + 1$



Selective Repeat Protocol – SRP (Πρωτόκολλο επιλεκτικής επανάληψης)

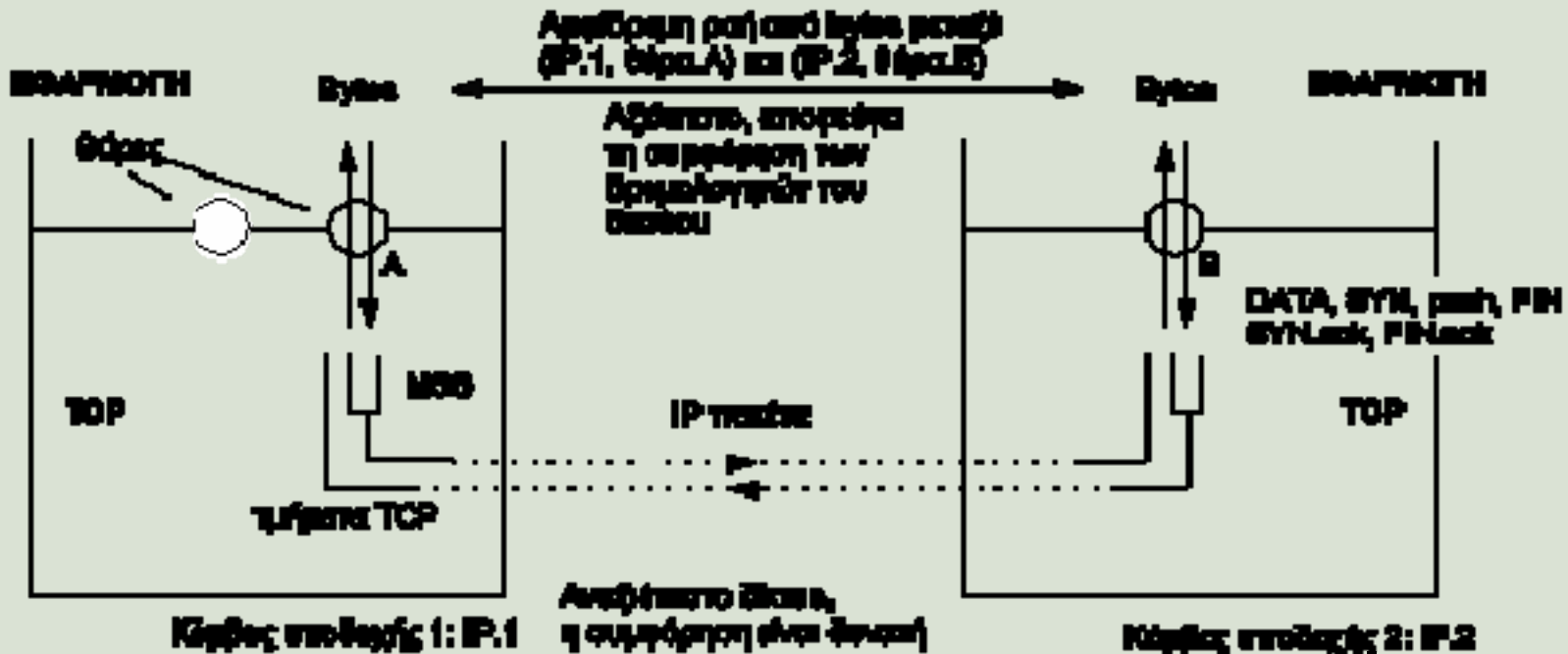
μηχανισμός γρήγορης επαναμετάδοσης (fast retransmit)

- Αν ο προορισμός λάβει τα πακέτα $1, 2, \dots, K, K + 2, K + 3, K + 4$
- στέλνει τις επιβεβαιώσεις $2, 3, \dots, K + 1, K + 1, K + 1, K + 1$
[επαναλαμβανόμενες επιβεβαιώσεις (duplicate acknowledgments)]
- Αν η η πηγή δει τρεις όμοιες επιβεβαιώσεις υποθέτει ότι το πακέτο $K + 1$ έχει χαθεί και το επαναμεταδίδει χωρίς να περιμένει να εκπνεύσει η προθεσμία



- υλοποιεί μία (εικονική)
πλήρως αμφίδρομη ζεύξη μεταφοράς bytes
ανάμεσα σε δύο τερματικούς υπολογιστές
- η ροή των bytes είναι **ελεύθερη σφαλμάτων** (χρήση SRP)
- οι συνδέσεις TCP διαφοροποιούνται με βάση τον αριθμό θύρας (port number)
(π.χ. η διεργασία του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου παρακολουθεί τη θύρα 25)
- αντιμετώπιση του TCP σαν να εγκαθιδρύει δύο συνδέσεις:
πελάτης → εξυπηρετητής εξυπηρετητής → πελάτης
- τυπικά βήματα σε μία σύνδεση TCP:
 1. Ο πελάτης ξεκινά μία αμφίδρομη σύνδεση με τον εξυπηρ και ζητά ένα έγγραφο
 2. Ο εξυπηρετητής στέλνει το έγγραφο στον πελάτη
 3. Ο εξυπηρετητής κλείνει τη σύνδεση προς τον πελάτη
 4. Ο πελάτης κλείνει τη σύνδεση προς τον εξυπηρετητή

Transmission Control Protocol – TCP (πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης)



Ο καταχωρητής έχει μέγεθος MSS Maximum Segment Size

- καθορίζεται κατά την έναρξη της σύνδεσης ή έχει προεπιλεγμένη τιμή (π.χ. 1460 bytes για ένα δίκτυο Ethernet)
- Η πηγή μπορεί να εκδώσει μία εντολή προώθησης (PUSH) στο TCP (ώστε να αποφύγει να περιμένει μέχρι να γεμίσει ο καταχωρητής) ⇒ όσα bytes υπάρχουν στον καταχωρητή τοποθετούνται σε ένα τμήμα που παραδίδεται στο IP



TCP – Έναρξη σύνδεσης

βασίζεται σε μία χειραψία τριών βημάτων (three-way handshake)*

- Ο πελάτης ζητά μία σύνδεση με τον εξυπηρετητή, καθορίζοντας
 - τη διεύθυνση IP και τον αριθμό θύρας του
 - τη διεύθυνση IP και τον αριθμό θύρας του εξυπηρετητή
 - τον αρχικό αριθμό ακολουθίας της σύνδεσης
 - (με βάση έναν ορολογιοδηγούμενο καταχωρητή (clock-register) που διαθέτει)
- Ο εξυπηρετητής στέλνει πίσω στον πελάτη μία επιβεβαίωση με
 - τις ίδιες διευθύνσεις
 - τους ίδιους αριθμούς θύρας
 - Τον ίδιο αριθμό ακολουθίας
- Ο πελάτης στέλνει το 1ο πακέτο δεδομένων με τον αρχικό αριθμό ακολουθίας

*αποτρέπει τη δημιουργία σύγχυσης από την ενδεχόμενη άφιξη άσχετων, καθυστερημένων πακέτων (τέτοια πακέτα δεν θα είχαν τους ίδιους αριθμούς ακολουθίας)



TCP – Έναρξη σύνδεσης

- Εάν η έναρξη της σύνδεσης δεν επιβεβαιωθεί εγκαίρως
 - ο πελάτης ξαναπροσπαθεί μετά από 6 δευτερόλεπτα
 - αν αποτύχει, προσπαθεί τρεις φορές ακόμη (κάθε 24 δευτερόλεπτα)
 - μετά παραιτείται από την προσπάθεια
- Το πρωτόκολλο επιλεκτικής επανάληψης επιβλέπει τη μεταφορά των δεδομένων

Κλείσιμο σύνδεσης

- Μία χειραψία δύο βημάτων (two-way handshake) κλείνει κάθε ήμισυ της σύνδεσης:
 - “Κλείνω τη σύνδεσή μου προς εσένα”
 - ακολουθεί μία επιβεβαίωση
- Αφού ο εξυπηρετητής στείλει την επιβεβαίωση της λήξης, παραμένει ανοικτός για κάποιο διάστημα
(«βεβαιώνεται» ότι ο πελάτης έλαβε την επιβεβαίωση και δεν έστειλε ξανά μήνυμα λήξης)

Τυπική ακολουθία μεταφορών στο TCP





Επικεφαλίδα TCP

[*S.port* | *D.port* | *Seq* | *Ack* | *FLAG* | *Window* | *CKS* | *URG*]

S.port , *D.port* : αριθμοί θύρας της πηγής και του προορισμού

Seq : αριθμός ακολουθίας του πρώτου byte στο πακέτο

- η πηγή αριθμεί διαδοχικά τα bytes τα οποία στέλνει (μέσα στη ροή από bytes)
- σκοπός είναι να μην εκληφθεί εσφαλμένα ως πακέτο της παρούσας ανοικτής σύνδεσης ένα καθυστερημένο πακέτο προηγούμενης σύνδεσης
- ο αρχικός αριθμό ακολουθίας καθορίζεται από έναν ορολογιοδηγούμενο αριθμητή
- η αρίθμηση των πακέτων ξαναρχίζει από τον ίδιο αρχικό αριθμό ακολουθίας μετά από χρονικό διάστημα > μέγιστο χρόνο ζωής ενός πακέτου στο δίκτυο



Επικεφαλίδα TCP

[*S.port* | *D.port* | *Seq* | *Ack* | *FLAG* | *Window* | *CKS* | *URG*]

Ack : αριθμός ακολουθίας του επόμενου byte που περιμένει ο προορισμός

- έχει λάβει όλα τα bytes με αριθμούς ακολουθίας έως $Ack - 1$
- δεν έχει λάβει το επόμενο byte Ack

(ενδέχεται να έχει λάβει bytes με αριθμούς ακολουθίας μεγαλύτερους από $Ack + 1$)

Window : μέγεθος παραθύρου που είναι διατεθειμένος να αποδεχθεί ο προορισμός

- παράθυρο που χρησιμοποιεί η πηγή για το πρωτόκολλο επιλεκτικής επανάληψης
= $\min \{Window, W \text{ αλγόριθμου αργής εκκίνησης και αποφυγής συμφόρησης}\}$

CKS : άθροισμα ελέγχου

- υπολογίζεται από την πηγή σε ολόκληρο το TCP πακέτο

URG : δείκτης που υποδεικνύει το τελευταίο επείγον byte στη ροή



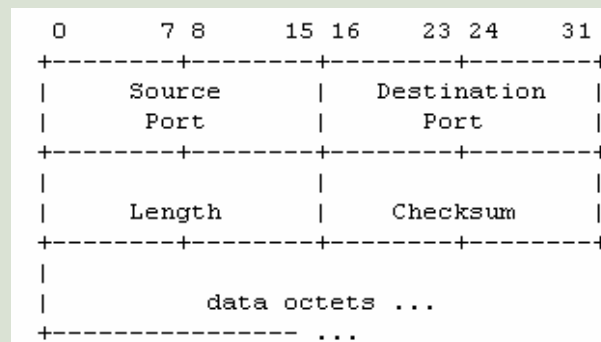
Επικεφαλίδα TCP

[*S.port* | *D.port* | *Seq* | *Ack* | *FLAG* | *Window* | *CKS* | *URG*]

τιμή σημαίας	⇒ το πακέτο είναι
<i>FLAG</i> = SYN	η έναρξη μίας σύνδεσης
<i>FLAG</i> = SYN.ack	η επιβεβαίωση της έναρξης μίας σύνδεσης
<i>FLAG</i> = Urgent	ένα επείγον πακέτο
<i>FLAG</i> = PUSH	μία εντολή προώθησης
<i>FLAG</i> = FIN	η λήξη μίας σύνδεσης
<i>FLAG</i> = FIN.ack	η επιβεβαίωση της λήξης μίας σύνδεσης
<i>FLAG</i> = reset	μία επαναρύθμιση (reset) (εξαναγκάζει τον τερματισμό μίας σύνδεσης)

User Datagram Protocol – UDP (πρωτόκολλο αυτοδύναμων πακέτων χρήστη)

- προσθέτει στις δυνατότητες του IP:
 - πολυπλεξία
(χρήση αριθμού θύρας (16 bits) για τη διάκριση των διεργασιών της πηγής και του προορισμού)
 - ανίχνευση σφαλμάτων
- Σε αντίθεση με το TCP (ΔΕΝ)
 - δεν χρησιμοποιεί επιβεβαιώσεις
 - δεν επαναμεταδίδει τα εσφαλμένα πακέτα
 - δεν ελέγχει τη ροή των δεδομένων
- επικεφαλίδα UDP





Πρωτόκολλα Ζεύξης

- ❑ Serial Line IP – SLIP (πρωτόκολλο Internet σειριακής γραμμής)
 - ❑ Point-to-Point Protocol – PPP (πρωτόκολλο σημείου προς σημείο)
- επιτρέπουν τη μεταφορά πακέτων IP μέσω μίας ζεύξης σημείου προς σημείο (τυπικά, τηλεφωνική γραμμή & modems)

Serial Line IP - SLIP (πρωτόκολλο Internet σειριακής γραμμής)

- ❑ τα πλαίσια του SLIP
 - δεν έχουν πεδίο που να προσδιορίζει το είδος του πλαισίου (η ζεύξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για το συγκεκριμένο πρωτόκολλο)
 - δεν έχουν πεδίο ανίχνευσης σφαλμάτων (τα σφάλματα ελέγχονται από τα ανώτερα επίπεδα ή με πλαισίωση γραμμής)
- ❑ συμπιεσμένο SLIP (Compressed SLIP - CSLIP)
 - αποφεύγει την επανάληψη των επικεφαλίδων
 - διατηρεί πληροφορίες για την κατάσταση έως και 16 συνδέσεων TCP
 - μεταδίδει μόνο τις αλλαγές στα πεδία των επικεφαλίδων που αλλάζουν στα επακόλουθα πακέτα μίας δεδομένης σύνδεσης TCP



Serial Line IP - SLIP (πρωτόκολλο Internet σειριακής γραμμής)

ο αποστολέας

- αρχίζει και τελειώνει κάθε IP πακέτο με έναν ειδικό χαρακτήρα ASCII 0xc0 (END)
- αν ένα byte του πακέτου IP = END το αντικαθιστά με ESC END (ESC = 0xdb)
- αν ένα byte του πακέτου IP = ESC το αντικαθιστά με 0xdb και 0xdd

ο παραλήπτης

- όταν δει το πρώτο END ανιχνεύει την αρχή του πακέτου IP
- όταν δει το ESC παραλείπει το byte αυτό, ελέγχει το επόμενο byte
 - αν το επόμενο byte = END \Rightarrow αυτό το END είναι ένα byte του πακέτου IP
 - αν το επόμενο byte = 0xdd \Rightarrow μέσα στο IP πακέτο υπήρχε ένα byte 0xdb



Point-to-Point Protocol – PPP (πρωτόκολλο σημείου προς σημείο)

(αντικαθιστά το SLIP σε πολλές ζεύξεις σημείου προς σημείο)

- Η ζεύξη μπορεί να είναι
 - ασύγχρονη (μεταδίδει ένα χαρακτήρα ASCII κάθε φορά)
 - σύγχρονη (μεταδίδει μεγάλα πακέτα)
- επιτρέπει στις δύο συσκευές να διαπραγματεύονται επιλογές όπως
 - να αποφασίζουν ποιο πρωτόκολλο θα χρησιμοποιηθεί στη ζεύξη
 - να συμφωνούν εάν θα χρησιμοποιηθεί συμπίεση των επικεφαλίδων
- τα πακέτα του PPP περιέχουν πεδίο ανίχνευσης σφαλμάτων (CRC των 2 bytes)



IPv6

Σχεδιάστηκε για να διορθώσει ορισμένες αδυναμίες του IPv4:

- Οι διευθύνσεις των 32 bits κινδυνεύουν να εξαντληθούν (το IPv6 χρησιμοποιεί διευθύνσεις των 128 bits)
- Το IPv4 έχει ανεπαρκή έλεγχο της ποιότητας υπηρεσίας που παρέχει
- Το IPv4 δεν έχει ενσωματωμένους μηχανισμούς ασφάλειας

- Η επικεφαλίδα των πακέτων IPv6 αποτελείται από
 - μία βασική επικεφαλίδα (40 bytes)
 - (ενδεχόμενες) επικεφαλίδες επέκτασης που ακολουθούν