



# ΔΙΚΤΥΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Στρώμα δικτύου στο  
Internet



# Παράδοση πακέτων IP

- Για να παραδοθεί ένα πακέτο IP εμπλέκονται δύο διαφορετικές διεργασίες:
  1. **Πρώθηση:** Πώς θα μεταφερθεί το πακέτο από τη διεπαφή εισόδου στη διεπαφή εξόδου;
  2. **Δρομολόγηση:** Πώς θα βρεθούν και εγκατασταθούν οι πίνακες δρομολόγησης;
- Η πρώθηση πρέπει να γίνει όσο το δυνατό γρηγορότερα:
  - Στους δρομολογητές η λειτουργία υποστηρίζεται από το υλικό
  - Στους υπολογιστές αποτελεί μέρος του λειτουργικού συστήματος
- Η δρομολόγηση είναι χρονικά λιγότερο κρίσιμη



# Αναλογία με μεταφορές

- *προώθηση*: μετακίνηση πακέτων από την είσοδο στην κατάλληλη έξοδο του δρομολογητή
- *δρομολόγηση*: προσδιορισμός της διαδρομής που θα ακολουθήσουν τα πακέτα από την πηγή στον προορισμό
  - Αλγόριθμοι δρομολόγησης

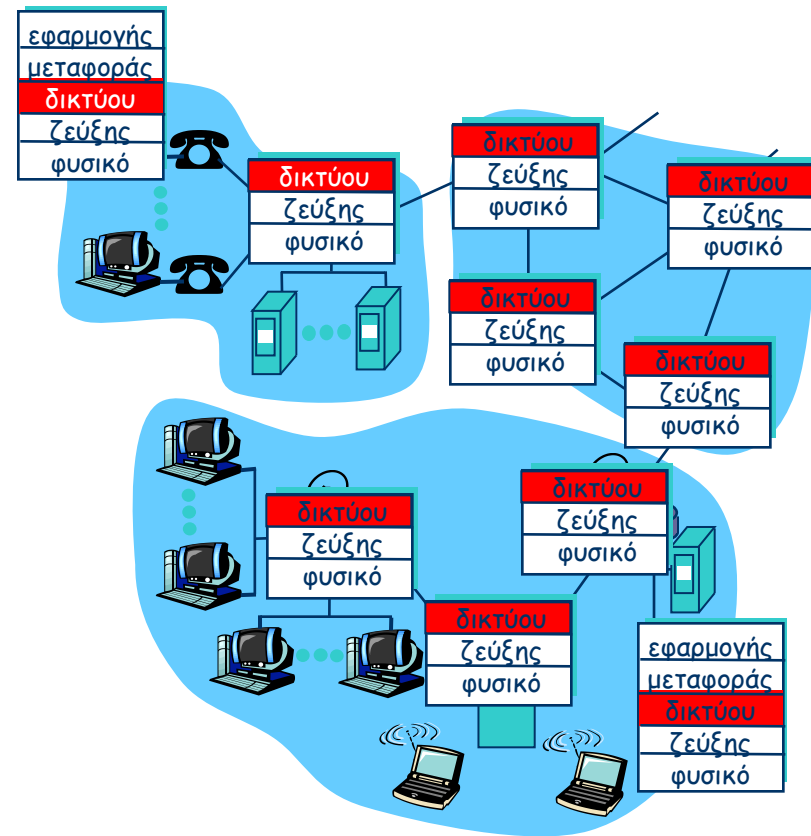
## αναλογία:

- *δρομολόγηση*: η διαδικασία σχεδιασμού του ταξιδιού από την αρχή στον προορισμό
- *προώθηση*: η διαδικασία διέλευσης από μια διασταύρωση



# Στρώμα δικτύου

- Μεταφέρει τεμάχια (στρώματος μεταφοράς) από τον host πηγή προς τον host προορισμό
- Η πλευρά αποστολής ενθυλακώνει τα τεμάχια σε πακέτα
- Η πλευρά λήψης παραδίδει τα τεμάχια στο στρώμα μεταφοράς
- Πρωτόκολλα στρώματος δικτύου υπάρχουν σε **κάθε host και δρομολογητή**
- Ο δρομολογητής εξετάζει την επικεφαλίδα κάθε πακέτου IP που διέρχεται από αυτόν





# ΔΙΚΤΥΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πρωτόκολλο IP



# Εισαγωγή

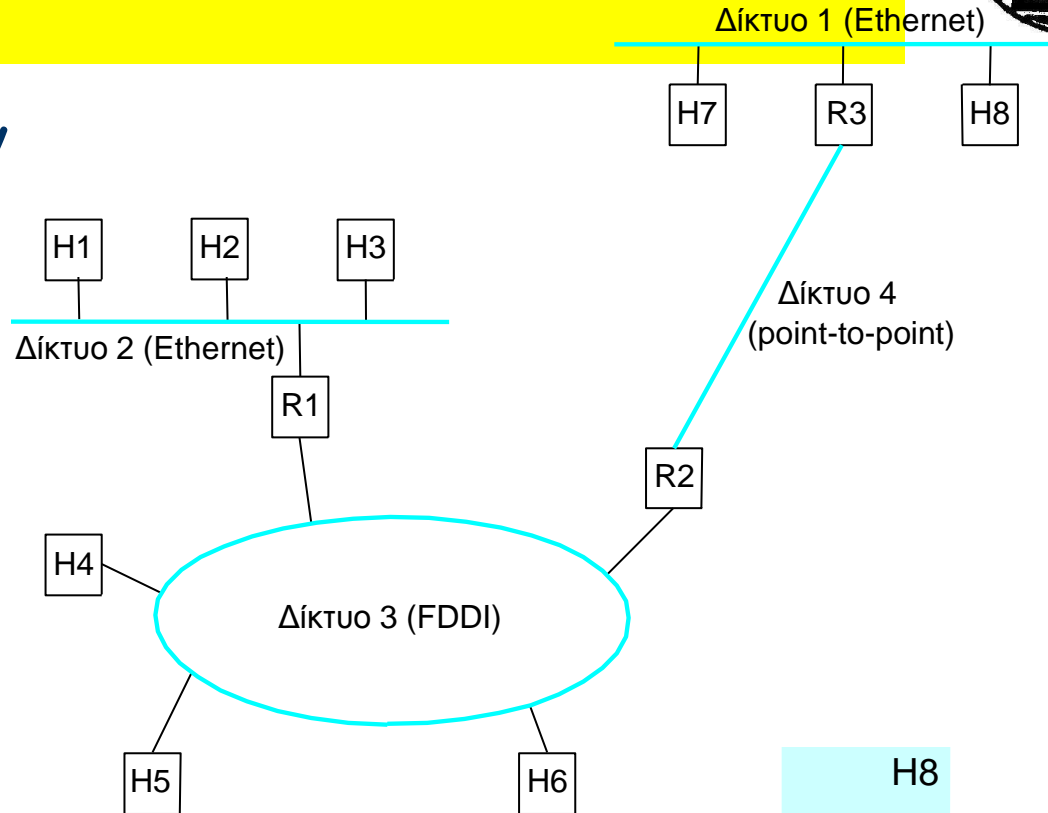
- Το IP (Internet Protocol) είναι το πρωτόκολλο του στρώματος δικτύου στο διαδίκτυο
- Η τρέχουσα έκδοση είναι η 4 (IPv4)
  - Ορίζεται στο RFC 791 (1981)
- Η νεώτερη έκδοση είναι η 6 (IPv6)
  - Ορίζεται στο RFC2460 (1998)
  - Την 6/6/2012 έγινε η παγκόσμια έναρξη
    - World Ipv6 Launch
- Τι έγινε η έκδοση 5:
  - Πειραματικό πρωτόκολλο Internet Stream Protocol (ST, ST-II, ST2+) της δεκαετίας '90 για εγγυημένη υπηρεσία από άκρο σε άκρο
  - Τα πακέτα του χρησιμοποιούσαν τον αριθμό 5 στην επικεφαλίδα IP



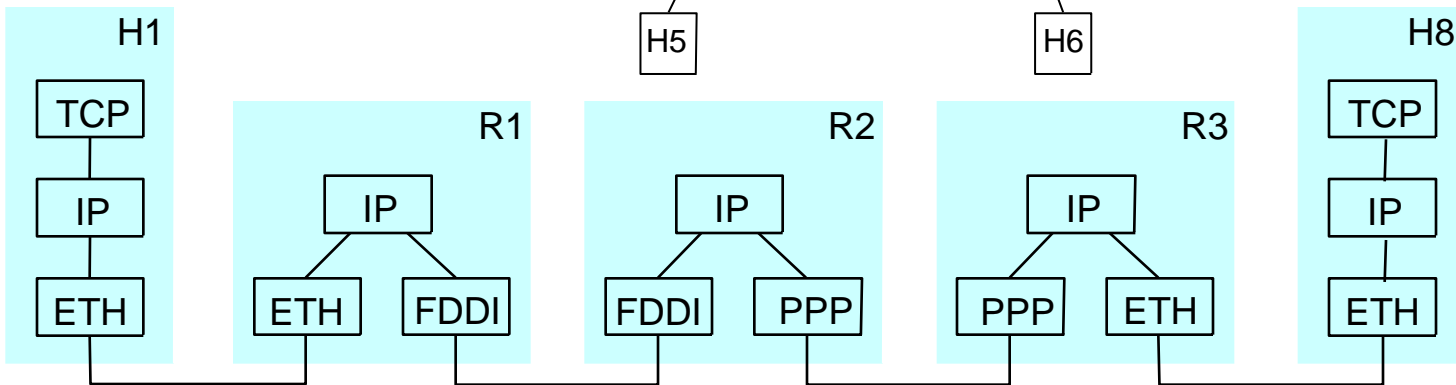
# IP Internet



- Σειρά δικτύων



- Πρωτόκολλα





# Internet Protocol (IP)

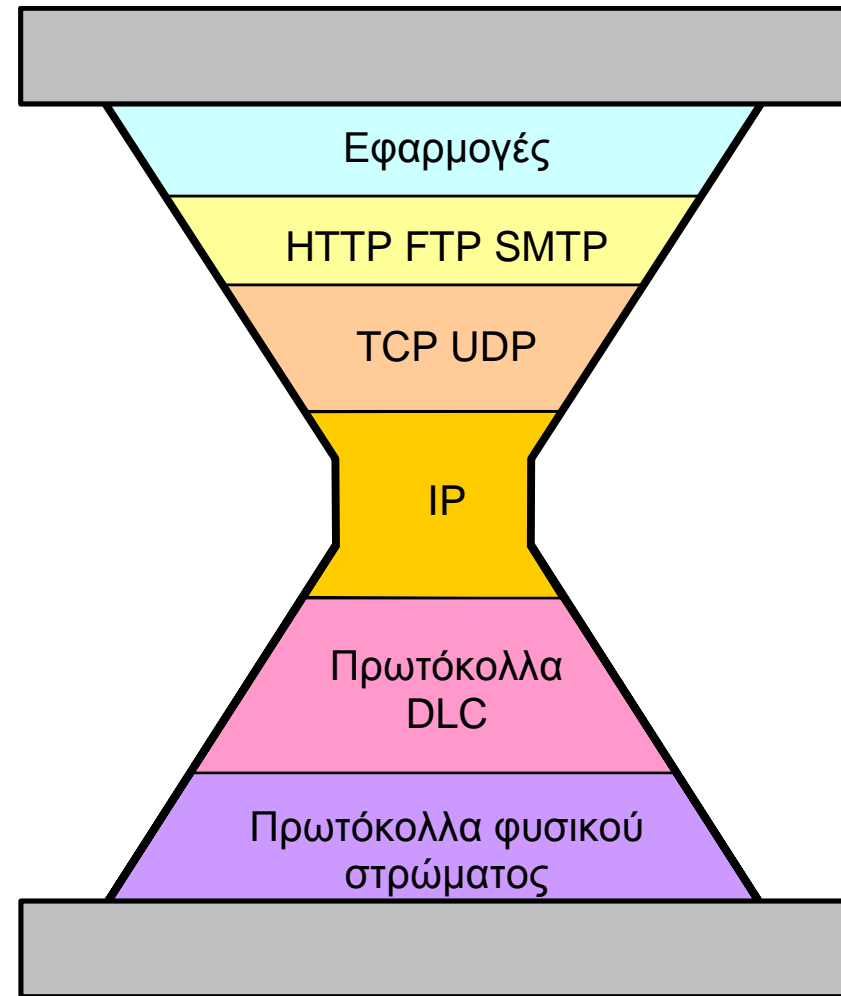


- Το IP είναι το ανώτερο στρώμα πρωτοκόλλου που υλοποιείται τόσο στους υπολογιστές όσο και στους δρομολογητές



# IP: Η στενωπός της κλεψύδρας

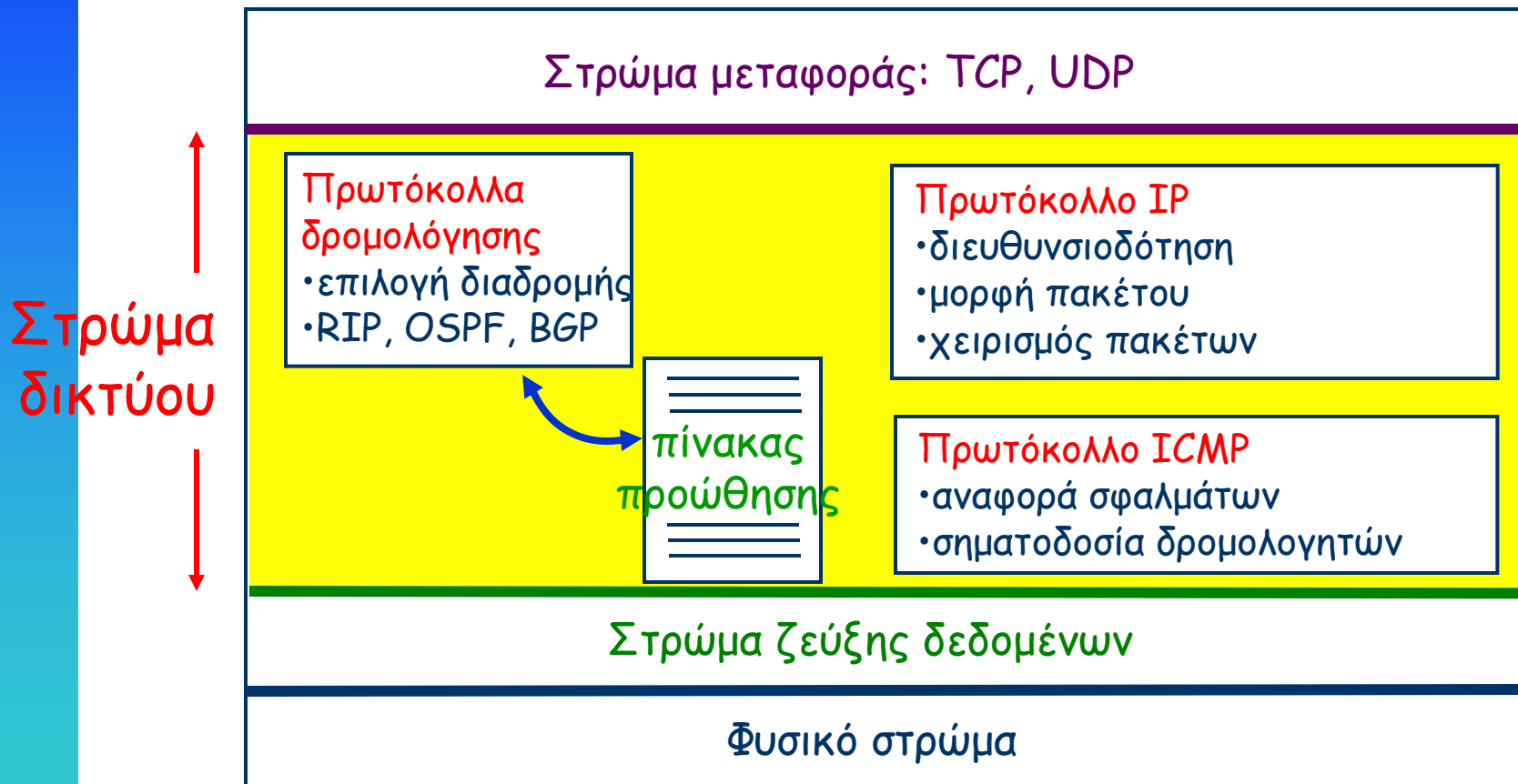
- Το IP βρίσκεται στη μέση της αρχιτεκτονικής των πρωτοκόλλων του Διαδικτύου
  - Πολλά πρωτόκολλα ανωτέρων επιπέδων
  - Πολλά πρωτόκολλα κατωτέρων επιπέδων
  - Μόνο ένα πρωτόκολλο στο στρώμα δικτύου



# Το στρώμα δικτύου στο Internet



Λειτουργίες των host και των δρομολογητών στο στρώμα δικτύου:

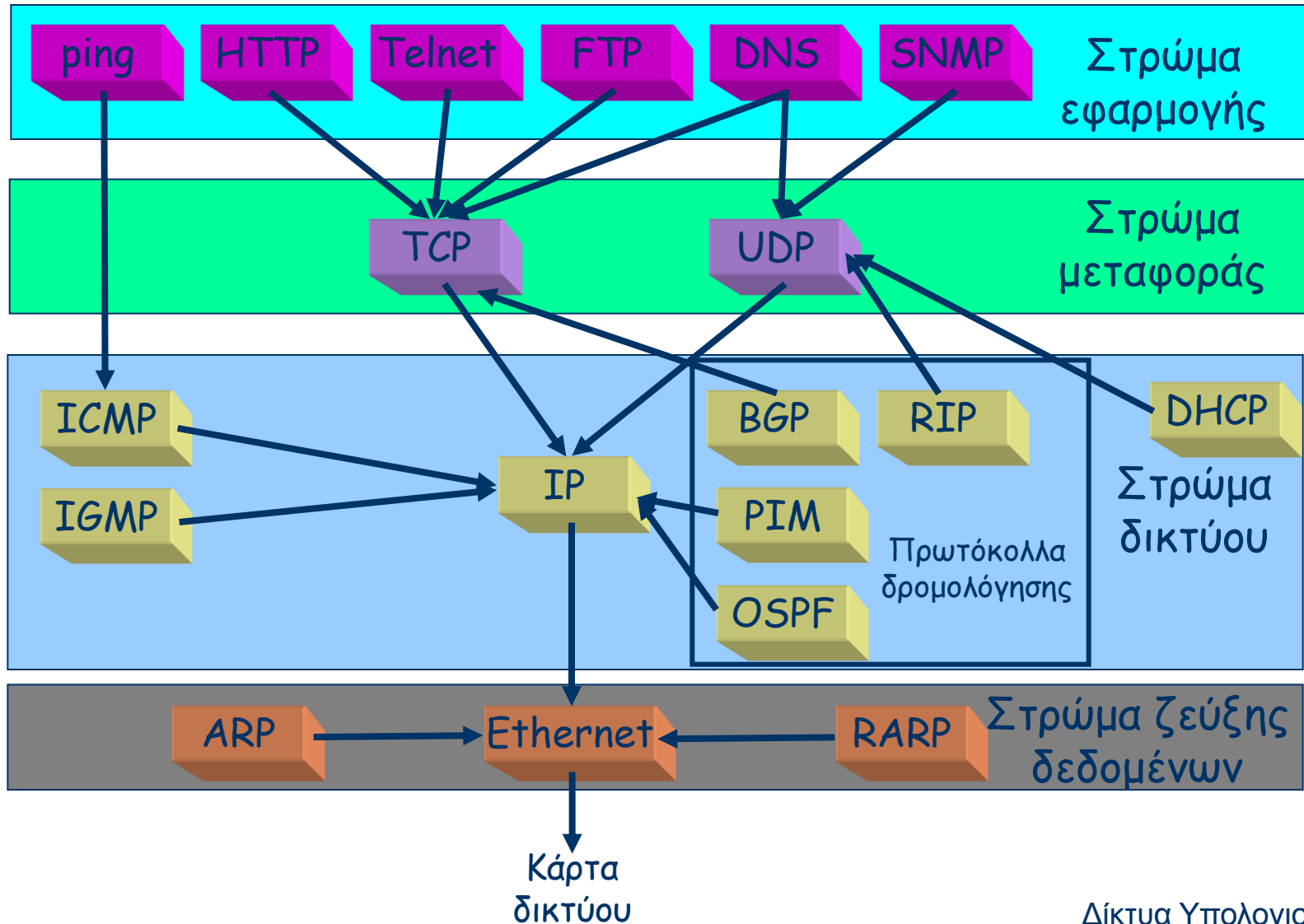


# Πρωτόκολλα στρώματος δικτύου στο Internet



- Το IP χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων
- Το Internet έχει αρκετά πρωτόκολλα ελέγχου στο στρώμα δικτύου
  - ICMP, IGMP, BOOTP, DHCP
- Η δρομολόγηση ακολουθεί πρωτόκολλα όπως:
  - RIP, OSPF, RIM, BGP (μπορεί να λειτουργούν ως πρωτόκολλα εφαρμογής, δηλ., πάνω από το στρώμα μεταφοράς)
- Για την επίλυση διευθύνσεων
  - ARP, RARP (λογικά τοποθετούνται στο στρώμα ζεύξης δεδομένων)

# Αντιστοιχία στρωμάτων OSI και πρωτοκόλλων σουίτας TCP/IP





Υπηρεσίες που  
προσφέρει το ΙΡ

# Υπηρεσία IP



- Η παρεχόμενη υπηρεσία είναι **ελάχιστη**
- Το πρωτόκολλο IP παρέχει **αναξιόπιστη (unreliable)** και **χωρίς σύνδεση (connectionless)** υπηρεσία **"δεδομενογραμμάτων" (datagram)**
- Το IP δεν εγγυάται ότι το προς μετάδοση πακέτο θα παραδοθεί, αλλά ότι θα **προσπαθήσει για το καλύτερο (best effort)**



# Μοντέλο υπηρεσίας IP

- **Αναξιόπιστη:**
  - δεν προσπαθεί να επανακτήσει τα χαμένα πακέτα
- **Χωρίς σύνδεση:**
  - κάθε δεδομένογραμμα έχει την τύχη του
  - δρομολογείται ανεξάρτητα (περιέχει διεύθυνση παράδοσης)
  - το IP δεν αντιλαμβάνεται τη λογική σειρά αποστολής
- **Προσπάθεια για το καλύτερο:**
  - το IP δεν εγγυάται τίποτα για την υπηρεσία (καμία εγγύηση για διέλευση, καθυστέρηση, ...)





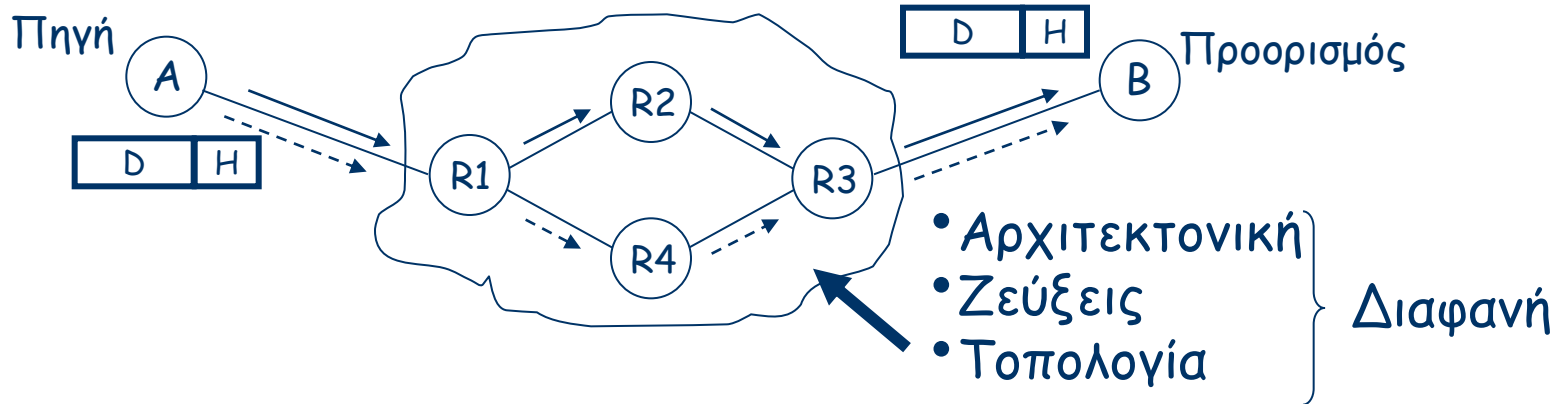
# Μοντέλο υπηρεσίας IP

- ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ:
  - Απώλειες πακέτων
  - Παράδοση εκτός σειράς
  - Αντίγραφα πακέτων
  - Καθυστερημένη παράδοση
- Τα πρωτόκολλα ανωτέρων στρωμάτων θα ασχοληθούν με αυτά



# Internet Protocol (IP)

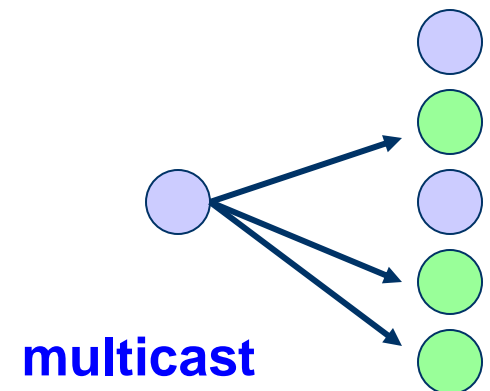
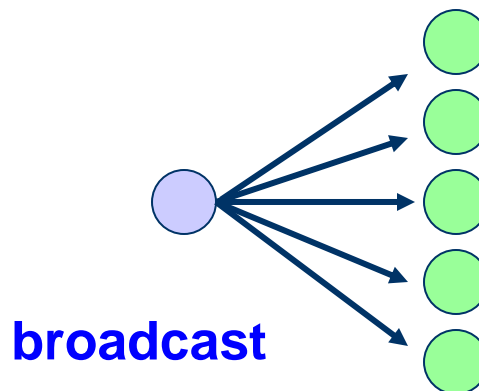
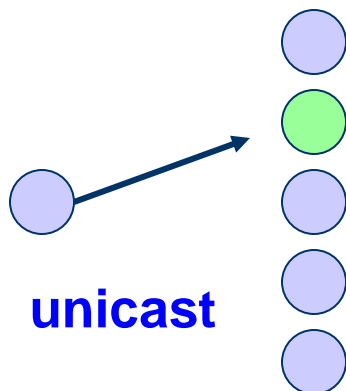
- Χαρακτηριστικά
  - **connectionless**: παράδοση εκτός σειράς
  - **unreliable**: μπορεί να χάσει πακέτα ...
  - **best effort**: ... μόνο εάν είναι ανάγκη
  - **datagram**: τα καθένα δρομολογείται ξεχωριστά



# Υπηρεσία IP



- Το IP υποστηρίζει υπηρεσίες:
  - ένας-προς-ένα (unicast)
  - ένας-προς-όλους (εκπομπή, broadcast)
  - ένας-προς-πολλούς (πολλαπλή διανομή, multicast)
- Η πολλαπλή διανομή IP υποστηρίζει και υπηρεσία πολλοί-προς-πολλούς
- Η πολλαπλή διανομή IP απαιτεί και άλλα πρωτόκολλα (IGMP, δρομολόγηση πολλαπλής διανομής)





# Η επικεφαλίδα IP

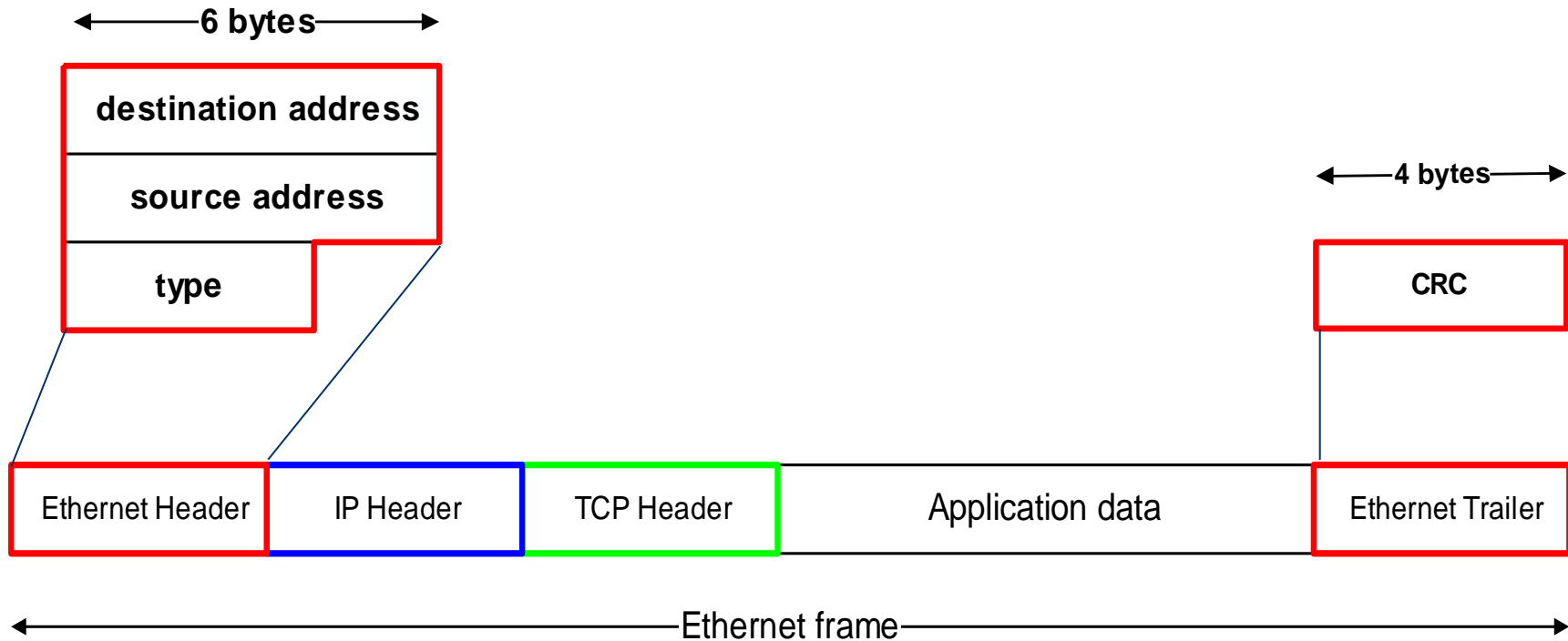
# Η επικεφαλίδα του IP version 4



0	4	8	16	19	24	31
Version	IHL	DS/ECN	Total Length			
Identification			Flags	Fragment Offset		
Time to Live		Protocol	Header Checksum			
Source IP Address						
Destination IP Address						
Options					Padding	

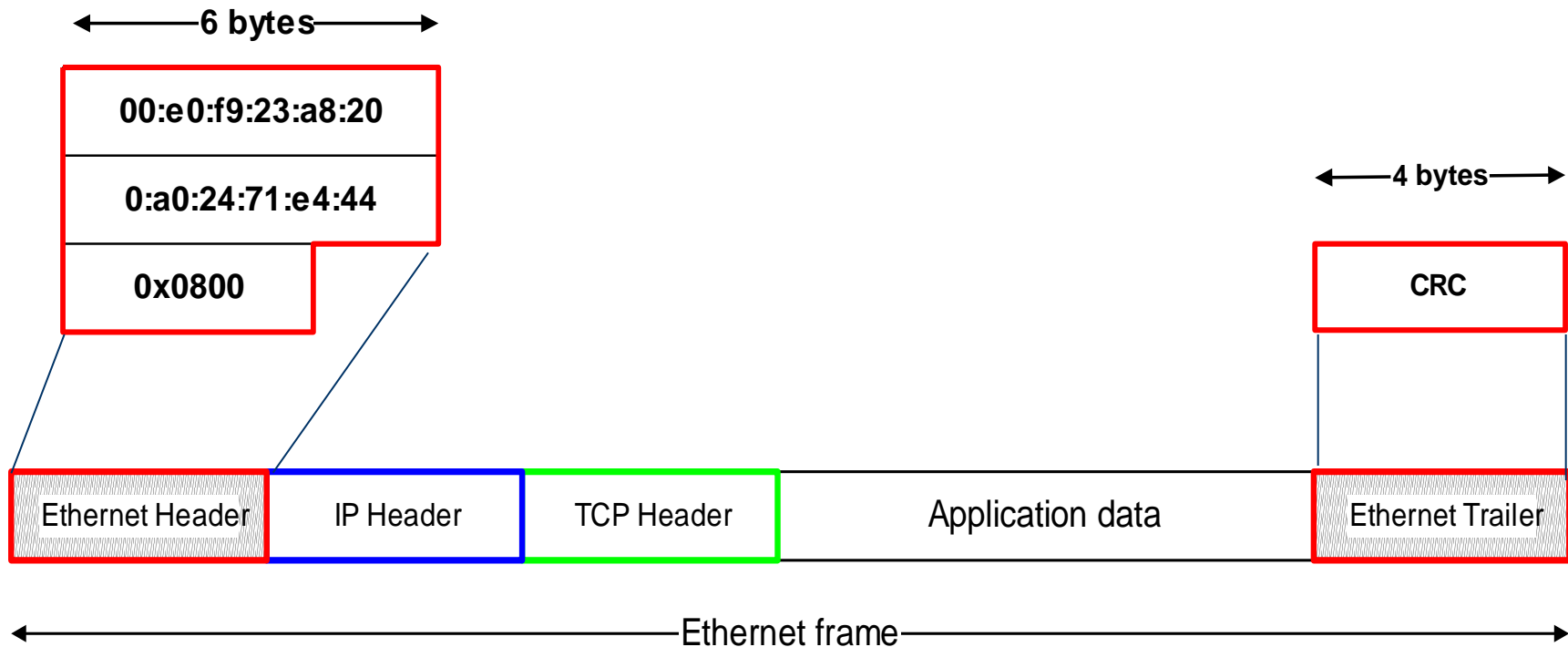


# Παράδειγμα ενθυλάκωσης (1)



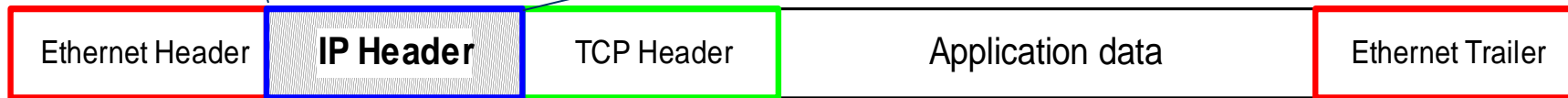
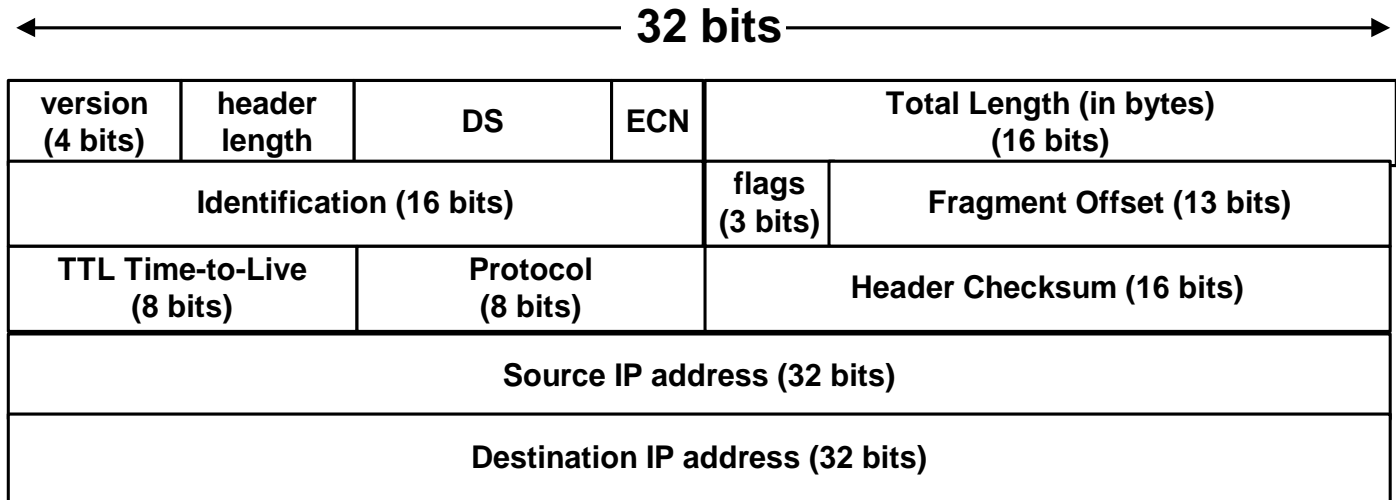


# Επικεφαλίδα Ethernet για πακέτο IP





# Παράδειγμα ενθυλάκωσης (2)

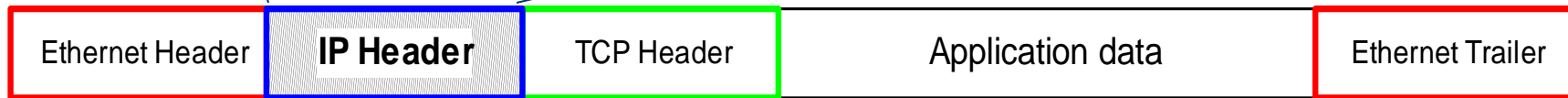
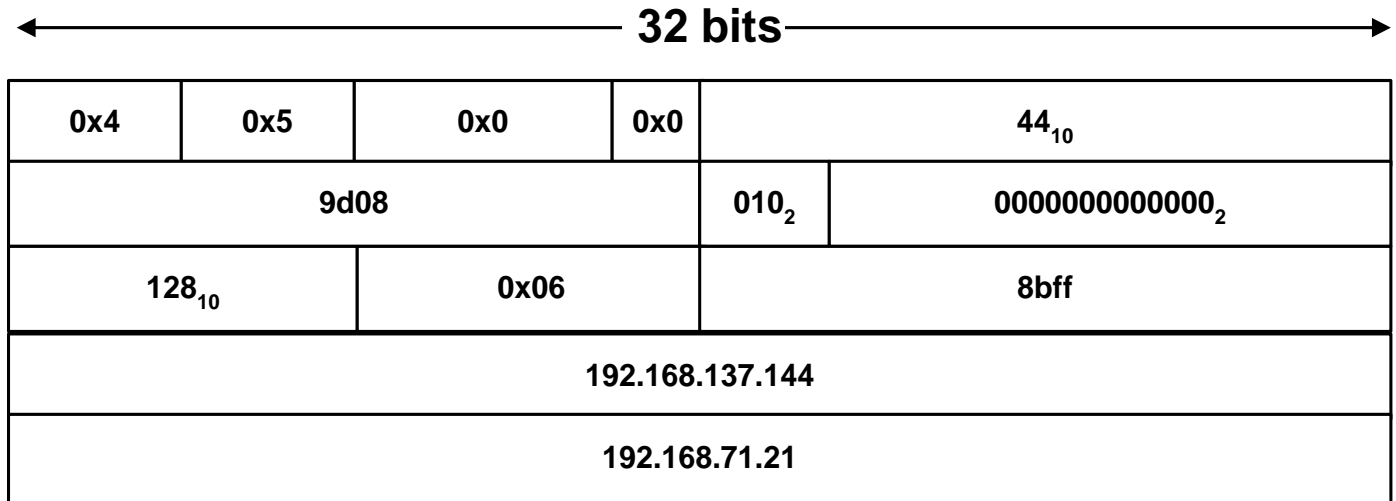


← Ethernet frame →





# Επικεφαλίδα IP



← Ethernet frame →



# Μετάδοση του πακέτου IP

- Με ποια σειρά μεταδίδονται τα byte του πακέτου IP;
- Η μετάδοση είναι γραμμή προς γραμμή
- Για κάθε γραμμή:
  - 1. πρώτα μεταδίδονται τα bit 0-7
  - 2. μετά μεταδίδονται τα bit 8-15
  - 3. μετά μεταδίδονται τα bit 16-23
  - 4. μετά μεταδίδονται τα bit 24-31
- Αυτό αποκαλείται διάταξη byte δικτύου (**network byte order**) ή **big endian** ordering
- Πολλοί υπολογιστές αποθηκεύουν τους ακέραιους σε μορφή **little endian**



# Big endian ή little endian

- Σύμβαση για τον τρόπο αποθήκευσης λέξεων με πολλά byte
- Π.χ. ένας ακέραιος των 4 byte
  - Byte3 Byte2 Byte1 Byte0

## Little Endian

Αποθηκεύει το κατώτερης τάξης byte στη μικρότερη διεύθυνση μνήμης και το μεγαλύτερης τάξης byte στη μεγαλύτερη διεύθυνση

Base Address+0	Byte0
Base Address+1	Byte1
Base Address+2	Byte2
Base Address+3	Byte3

Επεξεργαστές Intel

## Big Endian

Αποθηκεύει το ανώτερης τάξης byte στη μικρότερη διεύθυνση μνήμης και το κατώτερης τάξης byte στη μεγαλύτερη διεύθυνση

Base Address+0	Byte3
Base Address+1	Byte2
Base Address+2	Byte1
Base Address+3	Byte0

Επεξεργαστές Motorola



# Πεδία πακέτου IP (1)

- Έκδοση
  - Η τρέχουσα 4, ήταν 5 για το ST II, για το IP v6 είναι 6
- Internet header length (IHL)
  - Μήκος της επικεφαλίδας σε λέξεις των 32 bit
  - Περιλαμβανομένων των προαιρετικών επιλογών (το πολύ 60 byte)
  - Συνήθως 5 (20 byte) όταν δεν υπάρχουν επιλογές
- DS/ECN (Differentiated Services/Explicit Congestion Notification)
  - Καθορίζει τον τρόπο χειρισμού των πακέτων κατά τη διάβασή τους μέσω του δικτύου. Παλαιότερα αποκαλούνταν TOS (Type of Service). Ο ρόλος του άλλαξε, αλλά υπάρχει συμβατότητα προς τα πίσω
- Συνολικό μήκος (Total length)
  - του πακέτου σε byte (min 20, max 65.535)



# Τύπος υπηρεσίας (TOS)

- Προτεραιότητα (Precedence)
  - 8 επίπεδα (3 bit)
- Καθυστέρηση (Delay)
  - Κανονική ή χαμηλή (1 bit)
- Διέλευση (Throughput)
  - Κανονική ή υψηλή (1 bit)
- Αξιοπιστία (Reliability)
  - Κανονική ή υψηλή (1 bit)
- Αχρησιμοποίητο (2 bit)
- Οι δρομολογητές συνήθως τα αγνοούσαν

# Διαφοροποιημένες υπηρεσίες (Differentiated Services - DS)



- Κωδικό σημείο (Codepoint ή DSCP)
  - 64 κωδικοί (6 bit): τα bit από μόνα τους δεν σημαίνουν τίποτα
  - προσδιορίζει το επίπεδο υπηρεσίας
    - 'xxx000' συμβατότητα με τα παλιά (προτεραιότητα 5 ή 6 για μηνύματα δρομολόγησης)
    - 'xxxxx0' τυποποιημένες χρήσεις από IETF
    - 'xxxx11' προς πειραματισμό
    - 'xxxx01' προσωρινά προς πειραματισμό
- Ένδειξη συμφόρησης (Explicit Congestion Notification - ECN)
  - 2 bit (codepoints) στην επικεφαλίδα IP (ECT, CE) + 2 bit στην επικεφαλίδα TCP:
  - νέος μηχανισμός ανάδρασης για το TCP
    - '00' not-ECT (ECN Capable Transport)
    - '11' CE (Congestion Experienced)
    - '01' ECT (1)
    - '10' ECT (0)



# Πεδία πακέτου IP (2)

- Ταυτότητα (Identification)
  - Μοναδική ταυτότητα πακέτου ανά host
  - Αυξάνει κάθε φορά που μεταδίδεται ένα πακέτο
  - Τίθεται από τον αποστολέα
  - Αντιγράφεται σε κάθε θραύσμα (όταν γίνεται θρυμματισμός)
  - Απαιτείται για τη συναρμολόγηση και αναφορά λαθών
- Σημαίες (Flags)
  - Το πρώτο bit είναι πάντα 0
  - Don't fragment bit (εάν τεθεί, τα δεδομένα δεν μπορούν να θρυμματισθούν)
  - More fragments bit (εάν τεθεί, ακολουθούν και άλλα, αλλιώς είναι το τελευταίο)
- Θέση θραύσματος (Fragmentation offset)
  - Θέση του θραύσματος εντός του αρχικού πακέτου (0 εάν δεν έχει θρυμματισθεί) σε **οκτάδες** byte

Θα επανέλθουμε → Θρυμματισμός, συναρμολόγηση



# Πεδία πακέτου IP (3)

- Χρόνος ζωής (Time to live)
  - Μέγιστος αριθμός βημάτων μέχρι τον προορισμό
  - Η αρχική τίθεται από τον αποστολέα
  - Μειώνεται κατά ένα σε κάθε δρομολογητή
  - Εάν φτάσει το μηδέν το πακέτο απορρίπτεται
  - Μειώνεται κατά ένα, εάν το πακέτο καθυστερήσει στο δρομολογητή περισσότερο από 1 sec



# Χρόνος ζωής πακέτων IP



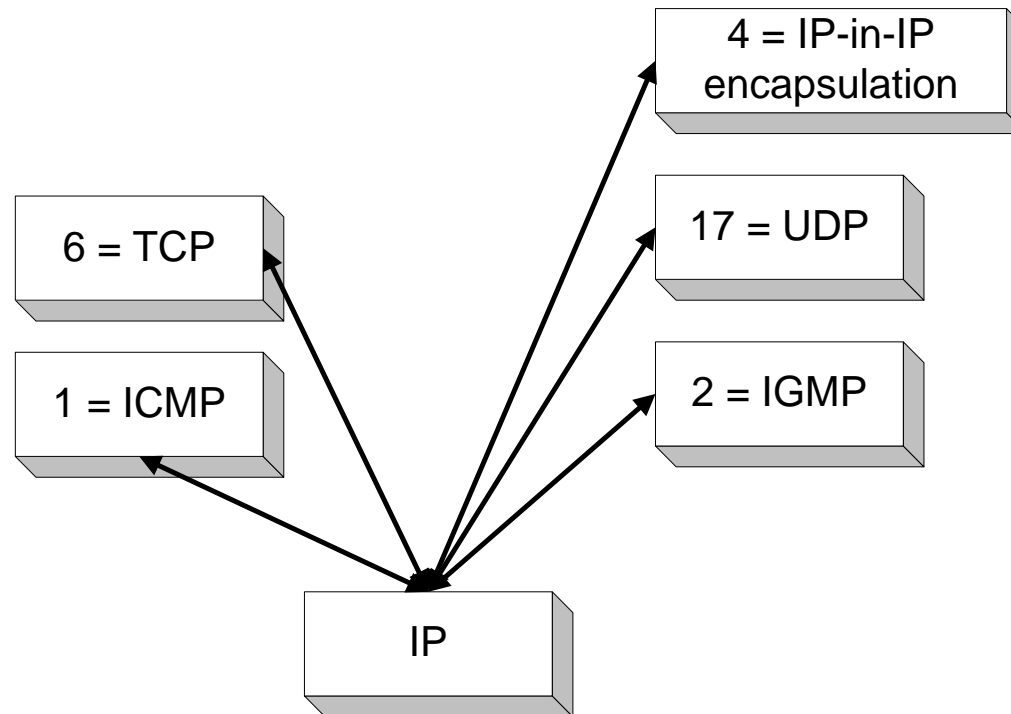
- Τα πακέτα μπορεί να περιφέρονται αενάως
  - Καταναλώνονται πόροι
  - Το πρωτόκολλο μεταφοράς δεν μπορεί να περιμένει αιωνίως
- Τα πακέτα IP έχουν πεπερασμένο χρόνο ζωής
  - Πεδίο TTL προλαμβάνει τα "αθάνατα" πακέτα, που τριγυρνούν αενάως
  - Μόλις λήξει το πακέτο απορρίπτεται (δεν προωθείται)



# Πεδία πακέτου IP (4)

- Πρωτόκολλο (Protocol)

- Υποδεικνύει τον τύπο πρωτοκόλλου που περιλαμβάνεται στο πακέτο
- Σημείωση: μπορεί να δείχνει IP!





# Πεδία πακέτου IP (5)

- Άθροισμα ελέγχου επικεφαλίδας (Header checksum)
  - Προστατεύει την επικεφαλίδα, δεν καλύπτει τα δεδομένα
  - **Αλλάζει καθώς το πακέτο προχωρά, επειδή το TTL μειώνεται**
  - Επανελέγχεται και επανυπολογίζεται σε κάθε δρομολογητή
  - Άθροισμα συμπληρώματος ως προς ένα (16 bit) όλων των λέξεων 16 bit της επικεφαλίδας
  - Ο υπολογισμός ξεκινά με την τιμή 0



# Πεδία πακέτου IP (6)

- Διεύθυνση πηγής (Source address)
  - Δεν αλλάζει κατά τη δρομολόγηση
  - Δεν γίνεται έλεγχος αυθεντικότητας
- Διεύθυνση προορισμού (Destination address)
  - Δεν αλλάζει συνήθως κατά τη δρομολόγηση
  - Αλλάζει σε περίπτωση δρομολόγησης πηγής

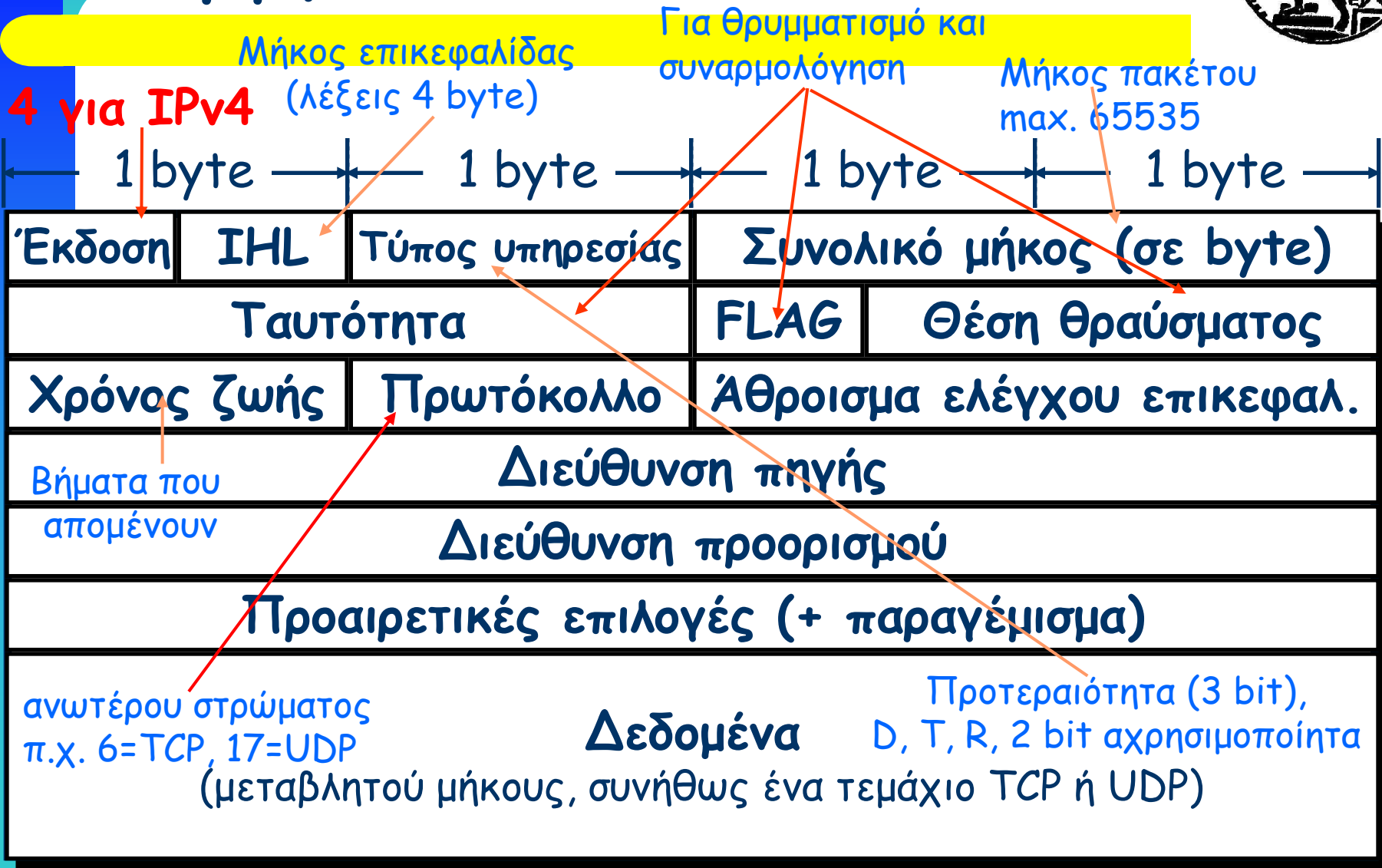


# Πεδία πακέτου IP (7)

- Προαιρετικές επιλογές (Option data)
  - Ειδικά πακέτα που δεν ακολουθούν το "fast path" των δρομολογητών
  - Χρησιμοποιούνται σπανίως
  - Αντιγράφονται εν γένει κατά τον θρυμματισμό
- Παραγέμισμα (Padding)
  - των επιλογών για να συμπληρωθούν πολλαπλάσια του 4
- Δεδομένα (User data)
  - για το πρωτόκολλο ανωτέρου στρώματος
  - ακέραιος αριθμός byte
  - Μαχ μήκος πακέτου (περιλαμβανομένης της επικεφαλίδας)  
65.535 byte

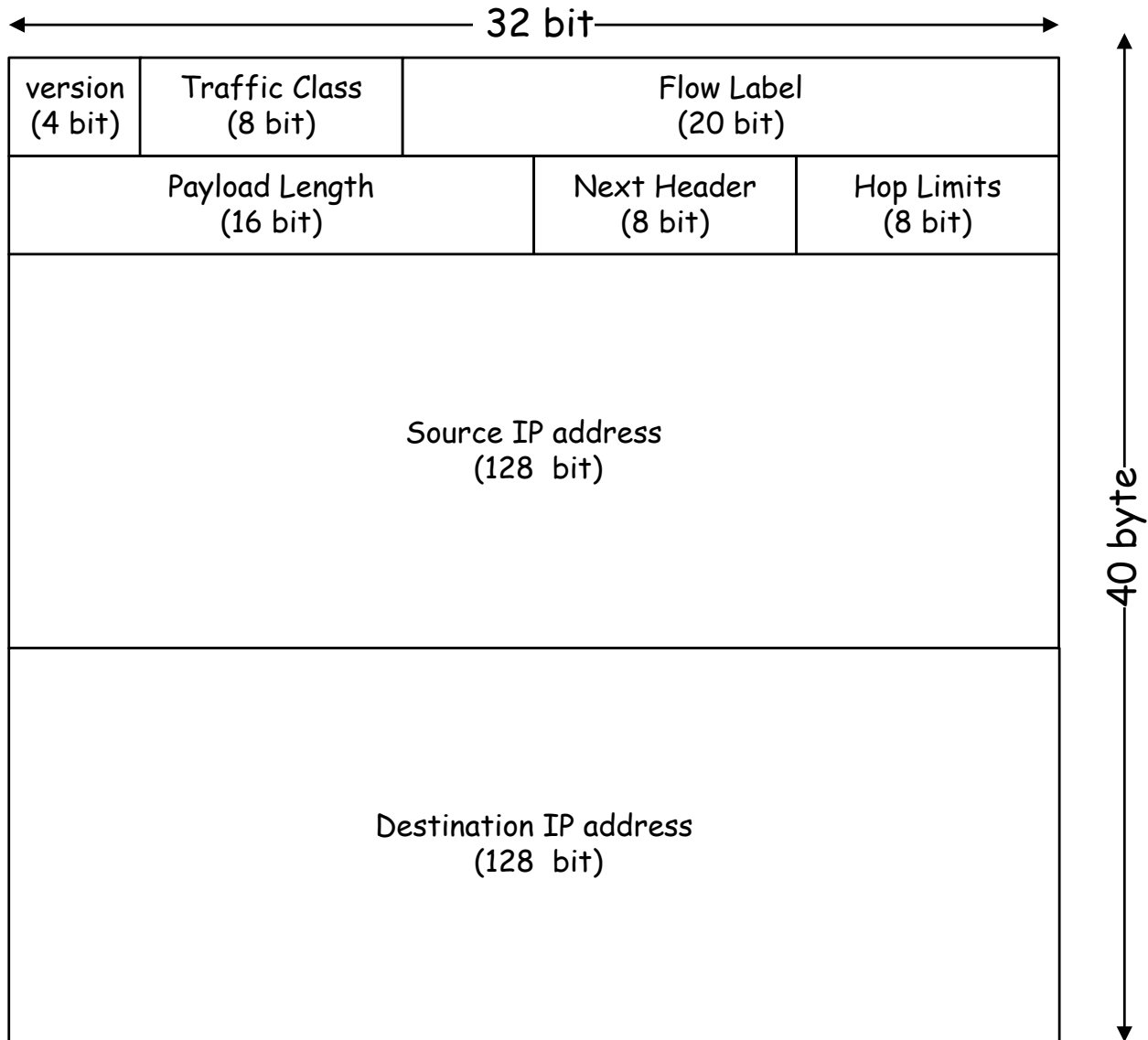


# Μορφή πακέτου IPv4





# Μορφή πακέτου IPv6





# Μορφή πακέτου IPv6

- Απλοποιημένη δομή επικεφαλίδων:
  - Η επικεφαλίδα έχει σταθερό μήκος
  - Δεν υπάρχει θρυμματισμός
  - Χωρίς πεδίο έλεγχου
- Αρκετές επικεφαλίδες έχουν παρόμοιο ρόλο:

IPv6
Version
Traffic class
Payload length
Next Header
Hop Limit

... παρόμοιες με ...

IPv4
Version
DiffServ
Total length
Protocol
TTL

- Flow label:
  - Διαχωρισμός ροών από την πηγή





# Προαιρετικά πεδία επικεφαλίδας IP



# Προαιρετικές επιλογές

- IHL: min 5 (20 byte), max 15 (60 byte), επομένως το πολύ 40 byte για προαιρετικές επιλογές
- Μήκος επιλογής (ανάλογα με τον κωδικό επιλογής)
  - Σταθερό ('0' End of List, '1' No operation για ευθυγράμμιση)
  - Μεταβλητό
- Το πεδίο κωδικού επιλογής περιέχει 3 υπο-πεδία
  - κωδικός επιλογής (1 byte)
    - Copy (1 bit): εάν τεθεί η επιλογή αντιγράφεται σε κάθε θραύσμα
    - Option class (2 bit): '00' έλεγχος, '10' μέτρηση, '01', '11' αχρησιμοποίητο
    - Option number (5 bit) αριθμός

Copy	Option Class	Option Number
------	--------------	---------------



# Προαιρετικές επιλογές

- **Ασφάλεια (Security)**
  - Καθορίζει το πόσο απόρρητο είναι το πακέτο (στρατιωτικές εφαρμογές)
- **Δρομολόγηση πηγής (Source routing)**
  - Δείχνει τη διαδρομή που θα ακολουθηθεί
- **Καταγραφή διαδρομής (Record Route)**
  - κάθε δρομολογητής επισυνάπτει την IP διεύθυνσή του
- **Χρονική σφραγίδα (Time stamp)**
  - κάθε δρομολογητής επισυνάπτει μαζί με την διεύθυνσή του και μια χρονική σφραγίδα



# Δρομολόγηση πηγής (Source routing)

- Αυστηρή (strict=9): δείχνει την ακριβή διαδρομή
- Χαλαρή (loose=3): δείχνει ενδιάμεσους κόμβους
- Η επικεφαλίδα περιέχει ένα δείκτη και μια λίστα διευθύνσεων IP που δείχνουν του ενδιάμεσους δρομολογητές
- Η IP διεύθυνση προορισμού αντικαθίσταται από την διεύθυνση IP της λίστας
- Ο δείκτης ενημερώνεται για την επόμενη διεύθυνση
- Το μέγεθος της επικεφαλίδας δεν αλλάζει

Code=131/137	Length	Pointer	IP addr of 1 <sup>st</sup> hop
	IP address of 1 <sup>st</sup> hop		IP addr of 2 <sup>nd</sup> hop
	IP address of 2 <sup>nd</sup> hop		...
	...		EOL



# Καταγραφή διαδρομής (Record route)

- Ο αποστολέας καθορίζει το μήκος της επικεφαλίδας IP και βάζει τον δείκτη να δείχνει την πρώτη άδεια θέση 4 byte
- Κάθε ενδιάμεσος θέτει την IP διεύθυνσή του στην άδεια θέση και αυξάνει τον δείκτη
- Εάν ο χώρος της επιλογής στην επικεφαλίδα γεμίσει, τα πακέτα απλώς προωθούνται
- Μόνο 40 byte διαθέσιμα, άρα καταγράφονται το πολύ 9 βήματα

Code=7	Length	Pointer	1 <sup>st</sup> IP address
		1 <sup>st</sup> IP address	2 <sup>nd</sup> IP address
		2 <sup>nd</sup> IP address	...
		...	EOL



# Χρονική σφραγίδα (Time stamp)

- Καταγράφει την άποψη των δρομολογητών για τον χρόνο και εάν ζητηθεί την IP διεύθυνσή τους
- Ο χρόνος σε msec από τα μεσάνυκτα UT
- Το πεδίο επιλογών περιλαμβάνει μετά τον δείκτη, overflow counter [4 bit] και flag [4 bit]
  - overflow: πλήθος δρομολογητών που δεν έγραψαν στην επικεφαλίδα λόγω έλλειψης χώρου
  - flag: '0' μόνο χρόνοι, '1' κόμβοι+χρόνοι, ή '3' χρόνοι για επιλεγμένους κόμβους

Code=68	Length	Pointer	Overflow	Flags
1 <sup>st</sup> IP address				
1 <sup>st</sup> time stamp				
...				



# Θρυμματισμός και συναρμολόγηση



# Θρυμματισμός και συναρμολόγηση στο IP

- Το μέγιστο μήκος πακέτου IP είναι 65.535 byte, αλλά συνήθως το πρωτόκολλο στρώματος ζεύξης δεδομένων επιβάλλει ένα κατά πολύ μικρότερο όριο
- Για παράδειγμα:
  - τα πλαίσια Ethernet έχουν μέγιστο μήκος δεδομένων 1500 byte  
→ πακέτα IP που ενθυλακώνονται σε πλαίσια Ethernet δε μπορεί να είναι μεγαλύτερα των 1500 byte
- Το όριο μέγιστου μεγέθους πακέτου IP, που επιβάλλει το πρωτόκολλο ζεύξης δεδομένων αποκαλείται **μέγιστη μονάδα μεταφοράς (MTU - maximum transmission unit)**
- διαφορετικοί τύποι ζεύξης δεδομένων, διαφορετικές MTU
  - Ethernet: 1500                      802.3: 1492                      802.5: 4464
  - FDDI: 4352                              ATM AAL5: 9180                      PPP: 296



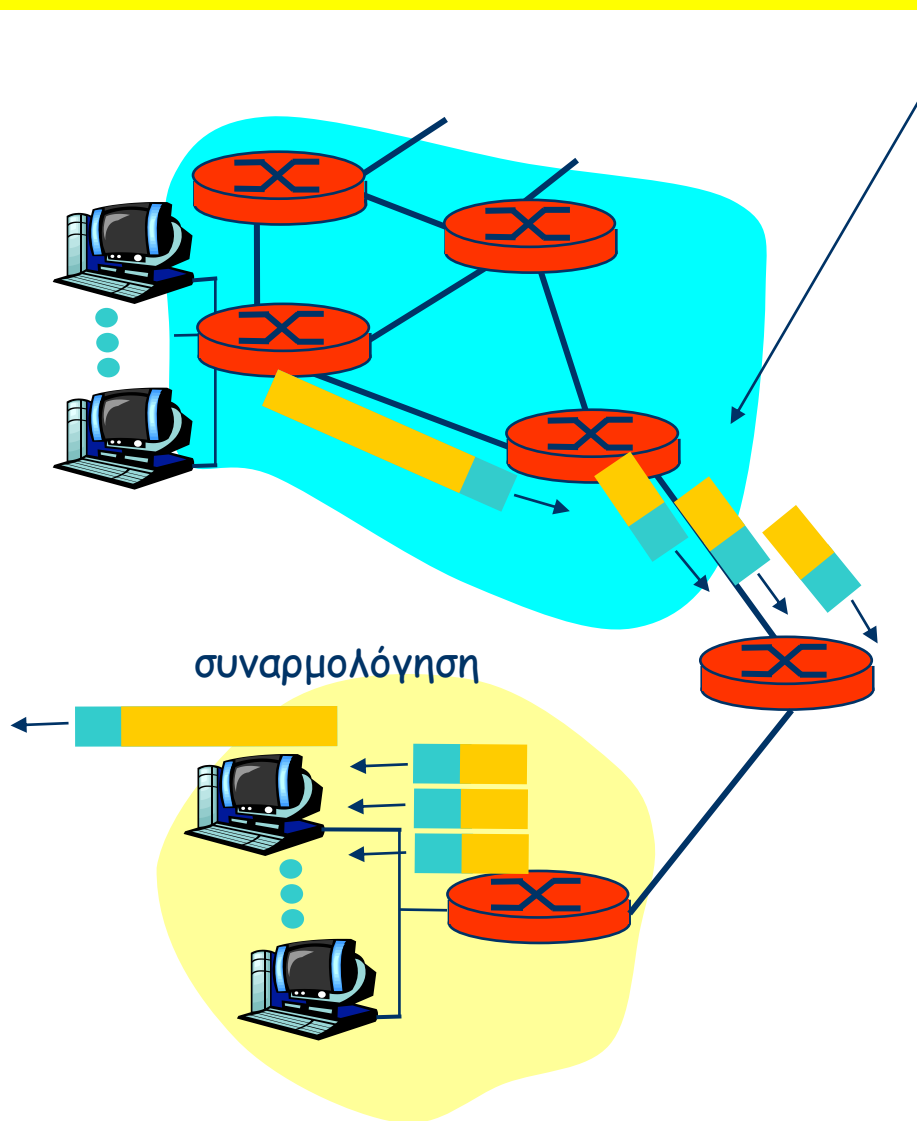


# Θρυμματισμός και συναρμολόγηση στο IP

- Τι συμβαίνει εάν το μέγεθος του πακέτου IP υπερβαίνει την MTU;
  - το πακέτο IP θρυμματίζεται σε μικρότερα κομμάτια
  - από ένα πακέτο προκύπτουν αρκετά κομμάτια
  - τα src, dest, id προσδιορίζουν το πακέτο
  - offset, length, more bit προσδιορίσουν τη σειρά των κομματιών
- Τι συμβαίνει εάν η διαδρομή περιλαμβάνει δίκτυα με διαφορετικές MTU;
  - ο θρυμματισμός μπορεί να γίνει στον είτε αποστολέα είτε στους ενδιάμεσους δρομολογητές
  - ένα πακέτο μπορεί να θρυμματισθεί πολλές φορές
  - η "συναρμολόγηση" του αρχικού πακέτου γίνεται μόνο στον τελικό προορισμό!!



# Θρυμματισμός και συναρμολόγηση στο IP



# Ποια πεδία εμπλέκονται στον Θρυμματισμό;



## Identification

- όταν το πακέτο θρυμματίζεται η τιμή της παραμένει η ίδια για όλα τα κομμάτια

## Flags

- DF = 1: το πακέτο δεν μπορεί να θρυμματισθεί και πρέπει να απορριφθεί εάν η MTU δεν επαρκεί
- MF = 1: αυτό το πακέτο είναι κομμάτι (θραύσμα) και ακολουθεί άλλο ένα κομμάτι

## Fragment offset

- θέση του πεδίου δεδομένων του τρέχοντος θραύσματος στο αρχικό πακέτο

## Total length

- Συνολικό μήκος του τρέχοντος θραύσματος



# Παράδειγμα Θρυμματισμού

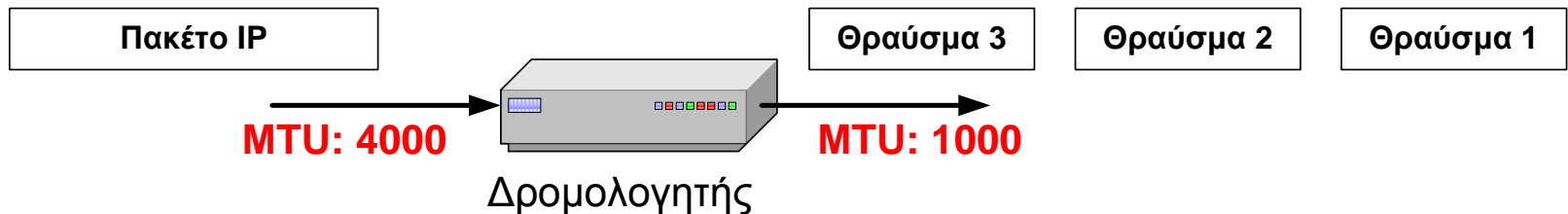
- Πακέτο μήκους 2400 byte πρέπει να θρυμματισθεί για να διέλθει από δίκτυο με MTU των 1000 byte

Header length: 20	Header length: 20	Header length: 20	Header length: 20
Total length: 2400	Total length: 448	Total length: 996	Total length: 996
Identification: 0xa428	Identification: 0xa428	Identification: 0xa428	Identification: 0xa428
DF flag: 0	DF flag: 0	DF flag: 0	DF flag: 0
MF flag: 0	MF flag: 0	MF flag: 1	MF flag: 1
Fragment offset: 0	Fragment offset: 244	Fragment offset: 122	fragment offset: 0

428 byte  
δεδομένων

offset =  
976/8

976 byte  
δεδομένων





# Προσδιορισμός μήκους Θραύσματος

- Θυμηθείτε ότι για το offset διατίθενται 13 bit και η θέση του θραύσματος μετριέται σε οκτάδες byte
- Επειδή στο παράδειγμα η επικεφαλίδα είναι 20 byte, απομένουν 980 byte για δεδομένα
- Ο μεγαλύτερος διαιρέσιμος με 8 αριθμός που είναι μικρότερος του 980 είναι ο 976. Άρα
  - το offset του πρώτου θραύσματος είναι 0 και το μήκος του πακέτου  $976+20=996$
  - το offset του δεύτερου θραύσματος είναι  $976/8=122$  και το μήκος του πακέτου 996, τέλος
  - το offset του τρίτου θραύσματος είναι  $122+122=244$  και το μήκος του πακέτου είναι  $428+20=448$ 
    - $2400-20-976-976=428$  τα δεδομένα που απομένουν από το αρχικό πακέτο μήκους 2400



## Θρυμματισμός και συναρμολόγηση στο IP

- Θρυμματισμός μόνο εάν είναι αναγκαίο (MTU < πακέτο)
- Αποφυγή θρυμματισμού από την πηγή
- Τα θραύσματα είναι αυθύπαρκτα πακέτα IP
- Τα θραύσματα μπορεί να (ξανα)θρυμματισθούν
- Η συναρμολόγηση γίνεται στον προορισμό, όχι στους ενδιάμεσους δρομολογητές
  - Ανεξάρτητη δρομολόγηση
  - Μειωμένες ανάγκες μνήμης



## Θρυμματισμός και συναρμολόγηση στο IP

- Χαμένα θραύσματα δεν αναζητούνται
  - Εάν χαθεί ένα, χάνεται και το πακέτο IP
  - Εκπνοή χρόνου αναμένοντας θραύσμα
- Ο χρόνος για συναρμολόγηση
  - καθορίζεται όταν ληφθεί το πρώτο κομμάτι
  - εάν λήξει προτού ληφθούν όλα, το πακέτο απορρίπτεται και στέλνεται μήνυμα ICMP στον αποστολέα
- Θρυμματισμός μπορεί να συμβεί οπουδήποτε το πακέτο είναι μεγαλύτερο από την MTU (ακόμα και για τοπική παράδοση)



# Θρυμματισμός και συναρμολόγηση στο IP

- Κάθε κόμβος του διαδικτύου πρέπει να είναι σε θέση να προωθεί πακέτα των 68 byte χωρίς θρυμματισμό
  - Η επικεφαλίδα μπορεί να είναι 60 byte και το ελάχιστο θραύσμα είναι 8 byte
- Κάθε host στο διαδίκτυο πρέπει να μπορεί να λαμβάνει πακέτα μέχρι 576 byte είτε ολόκληρα είτε μετά από συναρμολόγηση των θραυσμάτων
  - δεδομένα 512 byte + επικεφαλίδες 64 byte
- Συνίσταται οι host να στέλνουν πακέτα μεγαλύτερα των 576 byte μόνο εάν υπάρχει βεβαιότητα ότι ο παραλήπτης μπορεί να τα δεχθεί

version	header length	DS	ECN	total length (in bytes)			
Identification				0	D F	M F	Fragment offset
time-to-live (TTL)		protocol		header checksum			





# Αποφυγή Θρυμματισμού

- Για να αποφευχθεί ο θρυμματισμός, οι host ανακαλύπτουν την μικρότερη MTU (path MTU discovery)
- Path MTU είναι η ελάχιστη των MTU κατά μήκος της διαδρομής
- Εάν μήκος πακέτου < Path MTU, δεν έχουμε θρυμματισμό!
- Πώς γίνεται?
  - Στέλνοντας πακέτα διαφορετικών μεγεθών ώσπου να μην χρειάζεται θρυμματισμός κατά τη διαδρομή (DF=1 στην επικεφαλίδα IP)
  - **Εάν είναι δυνατό, το λέει το δίκτυο (ICMP)!**