

# Δίκτυα Υπολογιστών



---

## Δίκτυα υπολογιστών και το Διαδίκτυο

### *Επιδόσεις*

---

Κ. Βασιλάκης



# Περίγραμμα – ενότητες που εξετάζονται

- Τι είναι το διαδίκτυο
  - Στοιχεία που το συνθέτουν
  - Τρόποι παροχής υπηρεσιών
  - Τι είναι τα πρωτόκολλα
- Τα άκρα του δικτύου,
  - Δίκτυα πρόσβασης,
  - Φυσικά μέσα
- Ο πυρήνας του δικτύου
  - Μεταγωγή πακέτου
  - Μεταγωγή κυκλώματος
  - Δομή του διαδικτύου
- **Δυσκολίες στη μεταφορά**
  - **Καθυστερήσεις,**
  - **Απώλειες,**
  - **Διεκπεραιωτική ικανότητα**
- Επίπεδα πρωτοκόλλων
  - Διαστρωμάτωση
  - Το μοντέλο OSI
- Ιστορία



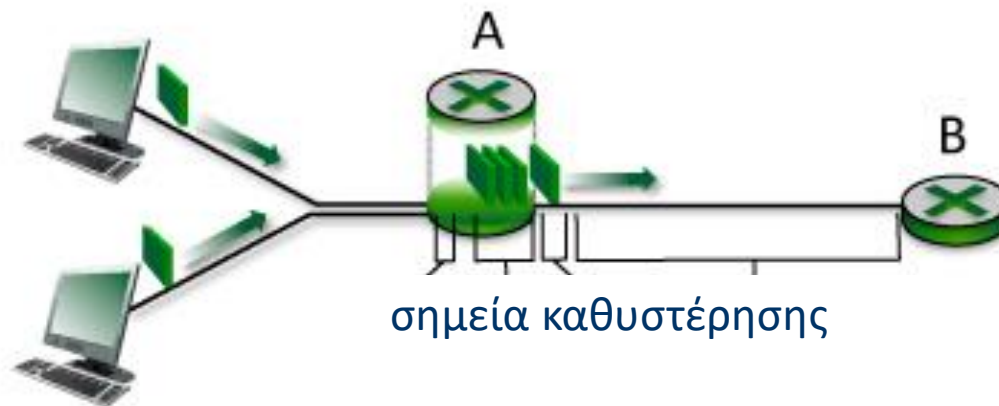
# Δεν υπάρχουν ιδανικές συνθήκες μετάδοσης

- Ανέφικτος στόχος: μεταφορά δεδομένων χωρίς
  - καθυστερήσεις και
  - απώλειες
- Καθυστερήσεις – απώλειες –περιορισμοί οφείλονται:
  - Στους τρόπους λειτουργίας και στα χαρακτηριστικά των τερματικών συστήματα και των συσκευών επικοινωνίας.
  - Σε φυσικούς νόμους που διέπουν τα μέσα μετάδοσης.
- Φυσικά, η απόδοση των εφαρμογών επηρεάζεται από τις δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά τη μεταφορά δεδομένων.
- Διεκπεραιωτική ικανότητα: η ποσότητα δεδομένων που μπορούν να μεταφερθούν ανά μονάδα χρόνου (πχ ανά δευτερόλεπτο).
- Η αντιμετώπιση θεμάτων καθυστερήσεων, απωλειών και των περιορισμών της *διακπεραιωτικής ικανότητας* των δικτύων είναι ακόμη ένα ανοικτό ερευνητικό θέμα.



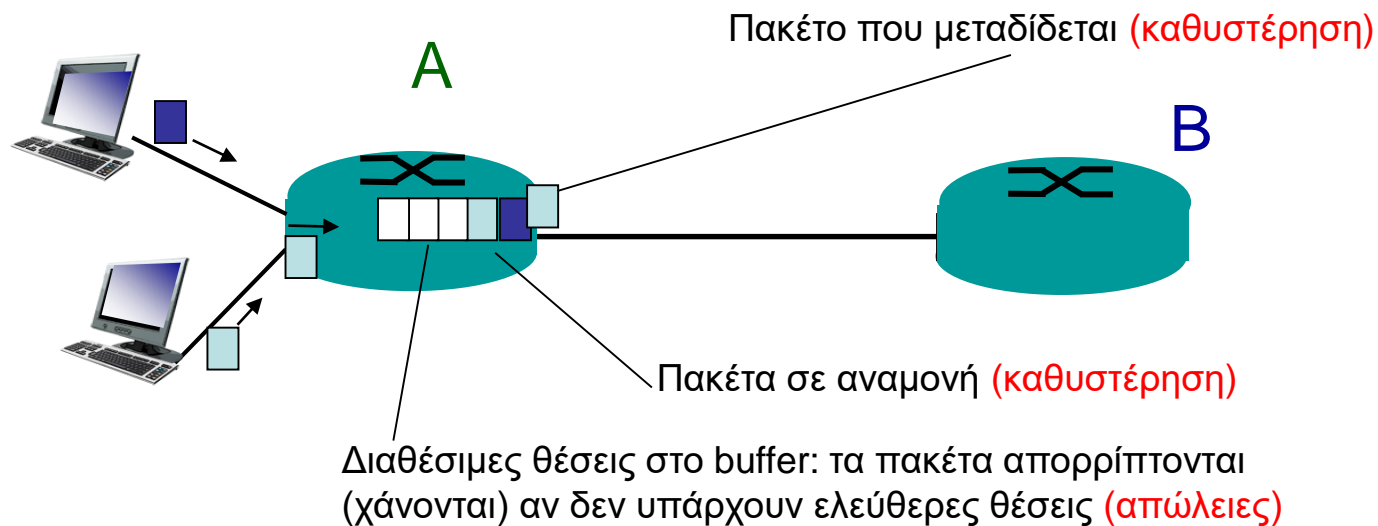
# Δίκτυα μεταγωγής πακέτων: καθυστερήσεις

- Ένα πακέτο ξεκινά από ένα host (προέλευση), περνά μια σειρά συσκευών επικοινωνίας για να καταλήξει σ' ένα άλλο host (προορισμός).
- Στη διαδρομή του αυτή ένα πακέτο υπόκειται σε διάφορους τύπους καθυστερήσεων ή και μπορεί να χαθεί (απώλεια).
- Ποιες καθυστερήσεις λαμβάνουν χώρα σε ένα κόμβο στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων?
- Στο παράδειγμα μας θα μελετήσουμε τι συμβαίνει κατά τη μεταφορά ενός πακέτου από ένα κόμβο A σε ένα γειτονικό B.

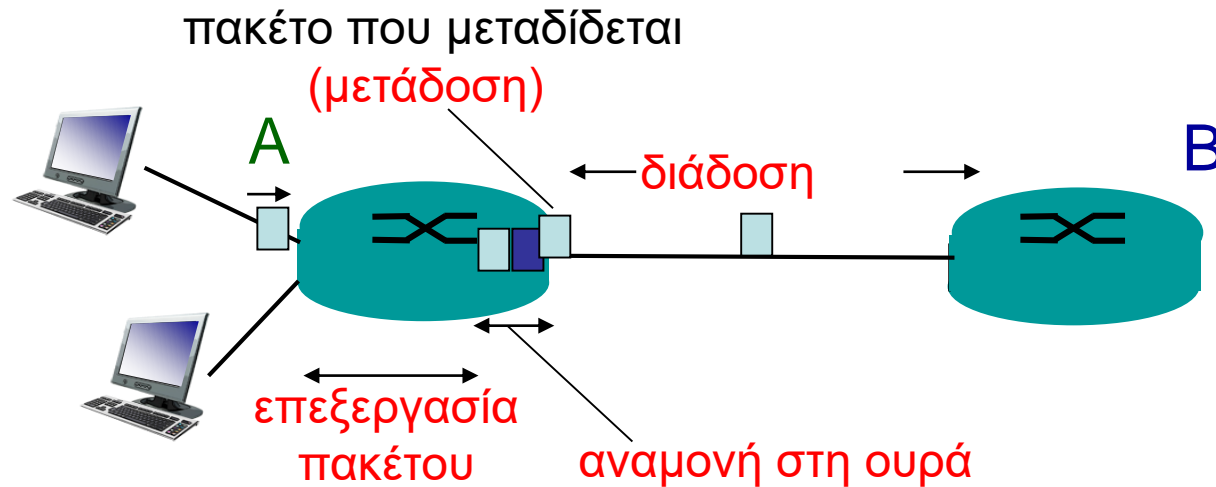


# Που οφείλονται οι απώλειες πακέτων

- Στους δρομολογητές τα πακέτα περιμένουν σε ουρές *ενταμιευτών* (*buffers*).
- Αυτό συμβαίνει όταν ο ρυθμός άφιξης των πακέτων υπερβαίνει τη χωρητικότητα της εξερχόμενης ζεύξης.
- Ένα πακέτο που βρίσκεται σ' ένα ενταμιευτή, περιμένει τη σειρά του για να μεταδοθεί (αναμονή σημαίνει καθυστέρηση).
- Αν όμως δεν υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες θέσεις στους ενταμιευτές, τα πακέτα απορρίπτονται (*απώλεια πακέτων*).



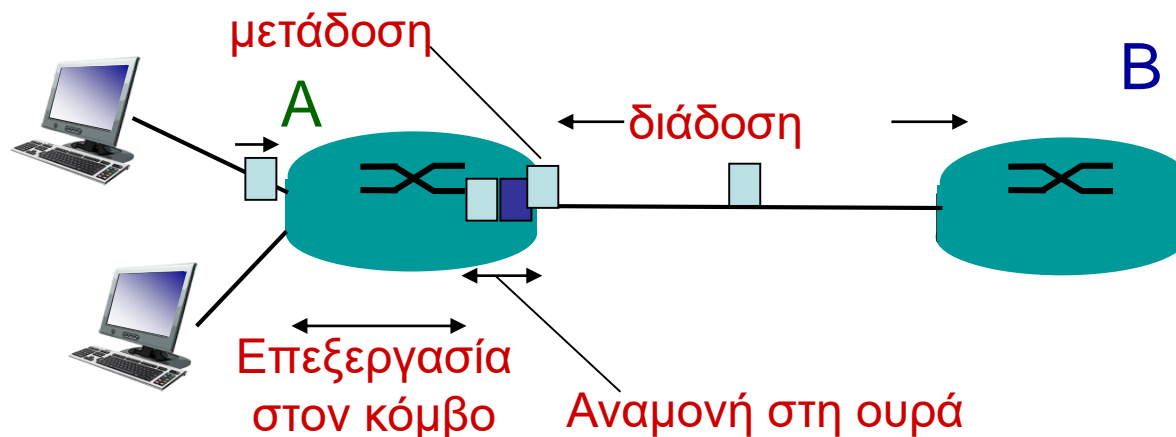
# Τέσσερις πηγές καθυστέρησης σ' ένα κόμβο



- Τέσσερις κύριες πηγές καθυστέρησης. Χρόνοι για:
  - *επεξεργασία* (*processing*) του πακέτου στον κόμβο -  $d_{proc}$
  - *αναμονή* στη ουρά (*queuing*) -  $d_{queue}$
  - *προώθηση* του πακέτου στην εξερχόμενη ζεύξη (μετάδοση, *transmission*) -  $d_{trans}$
  - *διάδοση* (*propagation*) του πακέτου στο φυσικό μέσο μεταφοράς -  $d_{prop}$



# Συνολική καθυστέρηση σ' ένα κόμβο



- Η συνολική καθυστέρηση στο κόμβο ( $d_{nodal}$ ) δίδεται από τον τύπο:

$$d_{nodal} = d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}$$

- Η συνεισφορά κάθε συστατικού του τύπου ποικίλει, από αμελητέα έως πολύ σημαντική και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:
  - *τους ρυθμούς μετάδοσης των ζεύξεων, τις αποστάσεις, τις δυνατότητες των συσκευών κλπ.*



# Καθυστέρηση επεξεργασίας στο κόμβο

## *Nodal processing delay* ( $d_{proc}$ )

- Χρόνος που απαιτείται για να εξεταστεί κεφαλίδα του πακέτου και η διεύθυνση του κόμβου-παραλήπτη, ώστε να προσδιοριστεί ο επόμενος κόμβος και η εξερχόμενη ζεύξη.
- Επίσης, χρόνος που απαιτείται για τον έλεγχο των σφαλμάτων επιπέδου bit μέσα στο πακέτο.
- Ένας δρομολογητής εξετάζει ένα πακέτο κάθε φορά. Αν τα πακέτα έρχονται πιο γρήγορα απ' ότι μπορεί να εξετάσει ο δρομολογητής, τότε οδηγούνται σε ένα ενταμιευτή (ουρά).
- Η καθυστέρηση επεξεργασίας εξαρτάται από τις δυνατότητες της συσκευής που κάνει αυτή τη επεξεργασία (πχ δρομολογητής).
- Οι καθυστερήσεις επεξεργασίας στους σύγχρονους δρομολογητές είναι της τάξης των *microsecs* ( $\mu s$ ,  $10^{-6}secs$ ) ή και λιγότερο.
- Μετά τη διαδικασία της επεξεργασίας το πακέτο κατευθύνεται στη ουρά αναμονής της ζεύξης που επιλέχθηκε για αποστολή.





# Καθυστέρηση ουράς (Queuing Delay)

## Queuing Delay ( $d_{queue}$ )

- Χρόνος αναμονής στο ενταμιευτή (buffer) της εξερχόμενης ζεύξης.
- Εξαρτάται από τον *αριθμό των πακέτων* που βρίσκονται ήδη στη ουρά και περιμένουν να μεταδοθούν (*βαθμός συμφόρησης* του δρομολογητή).
- Αν δεν προηγείται κάποιο πακέτο, τότε ο χρόνος αναμονής είναι μηδενικός.
- Η μέγιστη καθυστέρηση αναμονής είναι *ανάλογη με το μέγεθος* του ενταμιευτή.
- Ο αναμενόμενος αριθμός των πακέτων στη ουρά είναι συνάρτηση της *έντασης* και της *φύσης της κίνησης* που φτάνει στο δρομολογητή και είναι δύσκολο να υπολογιστεί (θα αναφερθούμε στο πρόβλημα στις επόμενες διαφάνειες).
- Οι καθυστερήσεις είναι της τάξης των *microsecs* ( $\mu\text{s}$ ,  $10^{-6}\text{secs}$ ) έως *millisecs* ( $\text{ms}$ ,  $10^{-3}\text{secs}$ ).



# Καθυστέρηση μετάδοσης

## Transmission Delay ( $d_{trans}$ )

- Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ωθήσει ο δρομολογητής το σύνολο των bits του πακέτου στη ζεύξη.
- Καθυστέρηση που προκαλείται από το ρυθμό μετάδοσης της ζεύξης. Θυμηθείτε:
  - είναι ανάλογος του μήκους  $L$  του πακέτου (σε bits),
  - αντιστρόφως του ρυθμού μετάδοσης  $R$  της ζεύξης (σε bps).
  - ο τύπος είναι:  $d_{trans} = L/R$ .
- *Δεν εξαρτάται από την απόσταση* μεταξύ των δύο κόμβων (καθυστέρηση διάδοσης).
- Υποθέτουμε ότι η μετάδοση των πακέτων γίνεται με βάση τη σειρά προσέλευσης (*first-come-first-served*).
- Οι καθυστερήσεις είναι της τάξης των *microsecs* έως *millisecs*.
- Σημαντική καθυστέρηση όταν έχουμε ζεύξεις χαμηλού ρυθμού.



# Καθυστέρηση διάδοσης

## Propagation delay ( $d_{prop}$ )

- Είναι ο χρόνος που απαιτείται για την *διάδοση* των bits από την αρχή της ζεύξης στον δρομολογητή προέλευσης προς τον δρομολογητή προορισμού.
- Τα bits διαδίδονται με την ταχύτητα  $s$  διάδοσης της ζεύξης, η οποία είναι της τάξης  $2 \cdot 10^8 m/s$  έως  $3 \cdot 10^8 m/s$  ανάλογα με το μέσο μετάδοσης.
- Αν  $d$  είναι το μήκος της φυσική ζεύξης, τότε η καθυστέρηση είναι:

$$d_{prop} = d/s$$

- Όταν και το τελευταίο bit του πακέτου φτάσει στο δρομολογητή προορισμού, αποθηκεύεται όλο το πακέτο και συνεχίζεται η διαδικασία προώθησης στον επόμενο κόμβο.
- Οι καθυστερήσεις είναι της τάξης των *milliseconds*.

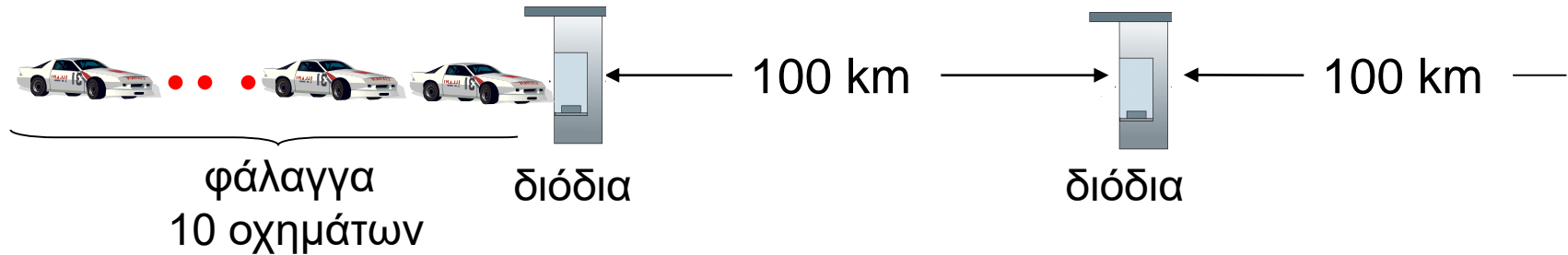


# Σύγκριση καθυστερήσεων μετάδοσης και διάδοσης

- Η καθυστέρηση μετάδοσης είναι διαφορετική από αυτή της καθυστέρησης διάδοσης.
- Καθυστέρηση μετάδοσης:
  - ο χρόνος που απαιτείται για την προώθηση του πακέτου,
  - είναι συνάρτηση του μήκους του πακέτου και του ρυθμού μετάδοσης,
  - δεν εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- Καθυστέρηση διάδοσης:
  - ο χρόνος που απαιτείται για να διαδοθεί ένα bit από τον ένα κόμβο στο άλλο,
  - είναι συνάρτηση της απόστασης και της ταχύτητας του μέσου μεταφοράς,
  - δεν εξαρτάται από το μήκος του πακέτου, ούτε το ρυθμό μετάδοσης της ζεύξης.



# Αναλογία φάλαγγα οχημάτων

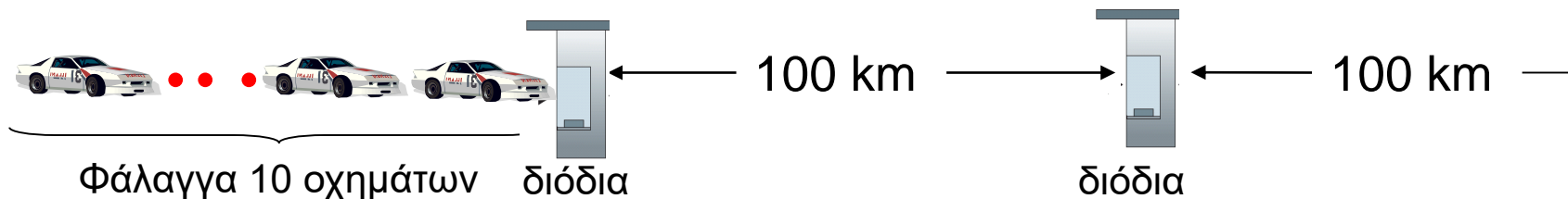


- Τα οχήματα (δηλ. bits) κινούνται (δηλ. διαδίδονται) με ταχύτητα  $100 \text{ km/h}$
- Χρόνος που απαιτείται στα διόδια για εξυπηρέτηση κάθε οχήματος:  $12 \text{ sec}$  (δηλ. χρόνος μετάδοσης ενός bit)
- Όταν το 1<sup>ο</sup> αυτοκίνητο φτάσει στα διόδια περιμένει μέχρι να φτάσουν όλα.
- Αναλογίες: όχημα  $\sim$  bit , φάλαγγα  $\sim$  πακέτο
- **Πόσος χρόνος απαιτείται για να φτάσει η φάλαγγα στα 2<sup>α</sup> διόδια;**
  - Συνολικός χρόνος διέλευσης όλων των οχημάτων από τα διόδια:  $120 \text{ sec}$  ( $12 \text{ sec} * 10 = 120 \text{ sec} - 2 \text{ mins}$ )
  - Χρόνος διαδρομής από τα πρώτα διόδια στα δεύτερα:  $1 \text{ h}$  ( $100 \text{ km} / 100 \text{ km/h}$ )

**Απάντηση: 62mins**



# Αναλογία φάλαγγα οχημάτων (περισσότερα)



- Αν υποθέσουμε ότι:
  - τα οχήματα κινούνται (διαδίδονται) με ταχύτητα  $1000 \text{ km/h}$  και
  - ο χρόνος που απαιτείται στα διόδια για κάθε όχημα:  $1 \text{ min}$
- Τότε έχουμε:
  - Συνολικό χρόνο διέλευσης όλων των οχημάτων από τα διόδια:  $10 \text{ min}$  ( $1 \text{ min} * 10 = 10 \text{ min}$ )
  - Χρόνο διαδρομής από τα πρώτα διόδια στα δεύτερα:  $6 \text{ min}$  ( $100 \text{ km} / 1000 \text{ km/h} = 0.1 \text{ h} = 6 \text{ min}$ )
- Σε 7 λεπτά το 1<sup>ο</sup> αυτοκίνητο θα έχει φτάσει στα δευτέρα διόδια, ενώ στο πρώτο θα περιμένουν ακόμα 3 αυτοκίνητα.
- Δηλαδή, το 1<sup>ο</sup> bit μπορεί να έχει φτάσει (διαδοθεί), ενώ δεν θα έχει μεταδοθεί πλήρως το πακέτο...



# Ένταση κίνησης

- Ιδιαιτερότητα: η καθυστέρηση ουράς μπορεί να διαφέρει από πακέτο σε πακέτο.
- Πότε η καθυστέρηση ουράς είναι μεγάλη και πότε αμελητέα;
- Εξαρτάται από:
  - Το *ρυθμό μετάδοσης*  $R$  της ζεύξης και
  - Τη *φύση της κίνησης* (π.χ. περιοδικά ή σε ριπές)
- Έστω  $a$  ο μέσος ρυθμός άφιξης των πακέτων στη ουρά.
- Αν κάθε πακέτο έχει  $L$  bits τότε ο *ρυθμός άφιξης των bits* στην ουρά είναι  $aL$  bits/sec.
- Ο λόγος  $L a / R$  καλείται *ένταση κίνησης (traffic intensity)*
  - $R$ : ρυθμός μετάδοσης  $R$  της ζεύξης
- Η ένταση κίνησης παίζει σημαντικό ρόλο στη εκτίμηση της καθυστέρησης ουράς (μικρή ή μεγάλη).



# Ένταση κίνησης και χρόνος αναμονής στη ουρά

- $La/R > 1$ : η ουρά αυξάνεται χωρίς όριο (φτάνουν περισσότερα πακέτα απ' όσα μπορούν να εξυπηρετηθούν). Τείνει στο άπειρο. Πρέπει να αποφεύγεται.
- $La/R \leq 1$ : παίζει ρόλο η φύση της αφικνούμενης κίνησης.
- $La/R \sim 0$ : η μέση καθυστέρηση αναμονής είναι αμελητέα.

$La/R \sim 0$



$La/R > 1$





## Τι γίνεται όταν ένταση κίνησης $\leq 1$ ( $La/R \leq 1$ )

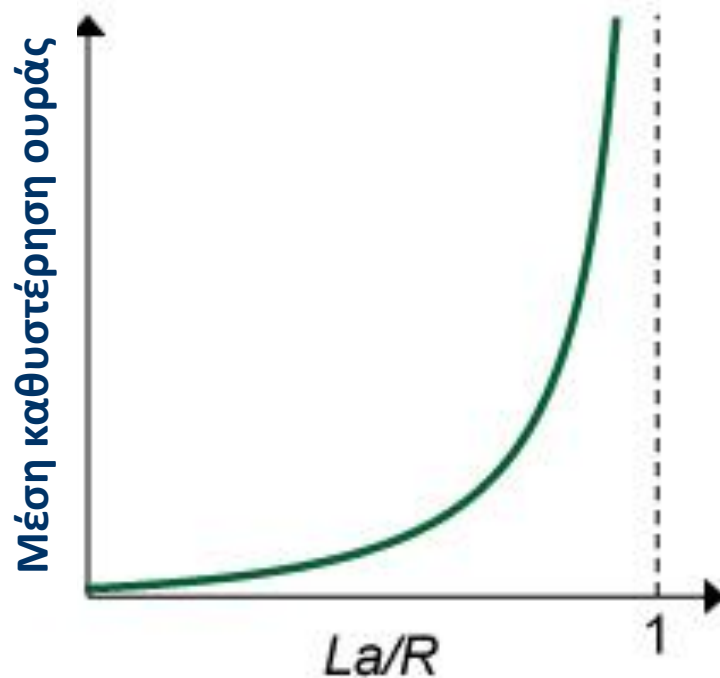
- Αν τα πακέτα φτάνουν κάθε  $L/R$  secs δεν υπάρχει ουρά και κάθε πακέτο μεταδίδεται άμεσα.
- Αν τα πακέτα φτάνουν *σε ριπές* (bursts) αλλά περιοδικά, θα έχουμε σημαντική μέση καθυστέρηση ουράς.
- Παράδειγμα: Έστω ότι  $N$  πακέτα φτάνουν ταυτόχρονα κάθε  $(L/R)/N$  secs,
  - τότε το 1<sup>ο</sup> πακέτο δεν έχει καθυστέρηση ουράς
  - το 2<sup>ο</sup> θα μεταδοθεί μετά από  $L/R$  secs
  - το 3<sup>ο</sup> μετά από  $2L/R$  secs
  - Και  $N$ -οστό μετά από  $(N-1)L/R$ .
- Η μέση καθυστέρηση ουράς για  $N$  πακέτα υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Ave\_}d_{\text{queue}} &= [0 + L/R + 2L/R + \dots + (N-1)L/R]/N \\ &= L/NR[1 + 2 + \dots + (N-1)] \\ &= (L/NR) (N-1) N/2 \\ &= (N-1)L/2R \end{aligned}$$



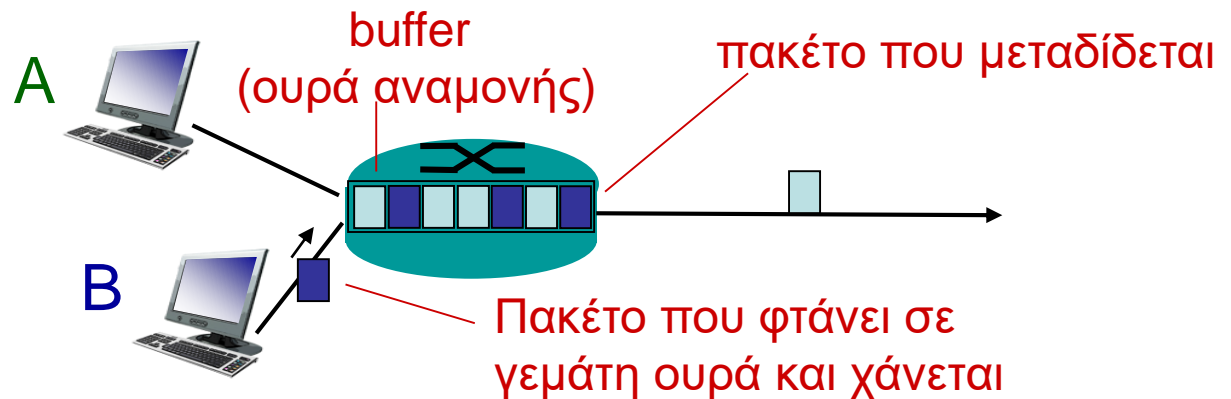
# Εξάρτηση έντασης κίνησης & μέσης καθυστέρηση ουράς

- Στη πραγματικότητα ο ρυθμός άφιξης των πακέτων είναι *τυχαίος* και η ένταση κίνησης δεν επαρκεί για τον χαρακτηρισμό της καθυστέρησης.
- Το διπλανό γράφημα απεικονίζει τη ποιοτική εξάρτηση της μέσης καθυστέρησης ουράς από την ένταση κίνησης.
- Σημαντικό χαρακτηριστικό: καθώς η ένταση προσεγγίζει το 1, η μέση καθυστέρηση ουράς αυξάνεται πολύ γρήγορα.



# Απώλειες πακέτων

- Στην πραγματικότητα οι ενταμιευτές (buffers) έχουν περιορισμένη μνήμη και συνεπώς οι ουρές έχουν πεπερασμένη χωρητικότητα.
- Όταν ένα πακέτο φτάσει σε μια γεμάτη ουρά, τότε αυτό απορρίπτεται (packet loss –χάνεται) - **Υπερχείλιση**.
- Ανάλογα με τη πολιτική που εφαρμόζεται ένα χαμένο πακέτο μπορεί να μεταδοθεί ξανά, είτε από το προηγούμενο στη σειρά κόμβο, είτε από τον κόμβο αποστολής ή να αγνοηθεί.
- Η απόδοση ενός κόμβου εξαρτάται από τη πιθανότητα απώλειας πακέτων.



# Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο

- Στη πραγματικότητα μεταξύ ενός κόμβου αποστολέα και ενός κόμβου παραλήπτη μεσολαβούν διάφοροι ενδιάμεσοι δρομολογητές και όχι ένας μόνο.
- Αν έχουμε  $N-1$  δρομολογητές μεταξύ αποστολέα-παραλήπτη τότε θα υπάρχουν  $N$  ζεύξεις. Αν υποθέσουμε ότι οι ενδιάμεσες ζεύξεις έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, οι ενδιάμεσοι δρομολογητές παρουσιάζουν τις ίδιες καθυστερήσεις και ότι δεν υπάρχουν συμφορήσεις, τότε η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, δίδεται από τον τύπο:

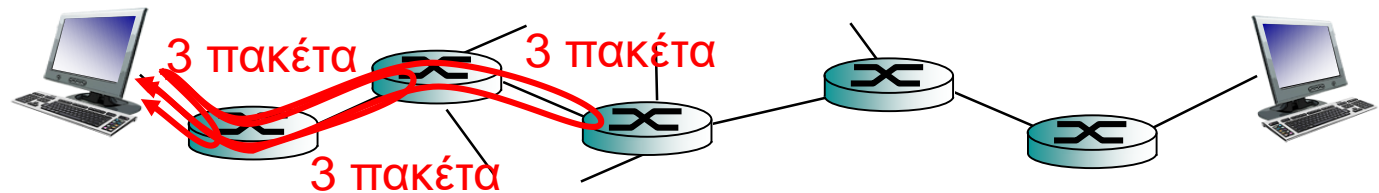
$$D_{\text{end-end}} = N (d_{\text{proc}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}})$$

- Όμως, στα υφιστάμενα δίκτυα έχουμε ετερογενείς καθυστερήσεις στους κόμβους και οι καθυστερήσεις ουράς είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν.



# Μετρήσεις καθυστέρησης στο Διαδίκτυο

- Πως μπορούμε να δούμε έμπρακτα τις καθυστερήσεις στο διαδίκτυο;
- Το λογισμικό **traceroute** μας δίνει τη δυνατότητα να δούμε τις μετρήσεις καθυστέρησης από τον κόμβο αποστολής προς κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή μιας διαδρομής προς τον κόμβο προορισμού.
  - Για κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή  $i$ , το traceroute:
    - Στέλνει 3 ειδικά πακέτα που θα φτάσουν στον ενδιάμεσο δρομολογητή στη διαδρομή προς τον αποδέκτη.
    - Ο ενδιάμεσος δρομολογητής  $i$  θα επιστρέψει τα πακέτα στο αποστολέα.
    - Ο αποστολέας (traceroute) μετρά τα χρονικά διαστήματα από την μετάδοση μέχρι την παραλαβή.



# Παράδειγμα μετρήσεων με το traceroute

## ■ traceroute: gaia.cs.umass.edu to www.eurecom.fr

3 μετρήσεις καθυστέρησης από  
gaia.cs.umass.edu προς cs-gw.cs.umass.edu

1	cs-gw (128.119.240.254)	1 ms	1 ms	2 ms
2	border1-rt-fa5-1-0.gw.umass.edu (128.119.3.145)	1 ms	1 ms	2 ms
3	cht-vbns.gw.umass.edu (128.119.3.130)	6 ms	5 ms	5 ms
4	jn1-at1-0-0-19.wor.vbns.net (204.147.132.129)	16 ms	11 ms	13 ms
5	jn1-so7-0-0-0.wae.vbns.net (204.147.136.136)	21 ms	18 ms	18 ms
6	abilene-vbns.abilene.ucaid.edu (198.32.11.9)	22 ms	18 ms	22 ms
7	nycm-wash.abilene.ucaid.edu (198.32.8.46)	22 ms	22 ms	22 ms
8	62.40.103.253 (62.40.103.253)	104 ms	109 ms	106 ms
9	de2-1.de1.de.geant.net (62.40.96.129)	109 ms	102 ms	104 ms
10	de.fr1.fr.geant.net (62.40.96.50)	113 ms	121 ms	114 ms
11	renater-gw.fr1.fr.geant.net (62.40.103.54)	112 ms	114 ms	112 ms
12	nio-n2.cssi.renater.fr (193.51.206.13)	111 ms	114 ms	116 ms
13	nice.cssi.renater.fr (195.220.98.102)	123 ms	125 ms	124 ms
14	r3t2-nice.cssi.renater.fr (195.220.98.110)	126 ms	126 ms	124 ms
15	eurecom-valbonne.r3t2.ft.net (193.48.50.54)	135 ms	128 ms	133 ms
16	194.214.211.25 (194.214.211.25)	126 ms	128 ms	126 ms
17	* * *			
18	* * *			
19	fantasia.eurecom.fr (193.55.113.142)	132 ms	128 ms	136 ms

υπερατλαντική  
ζεύξη

\* Δεν υπήρξε απάντηση (χαμένα πακέτα, μη απόκριση δρομολογητή)



# Δοκιμή στο [www.traceroute.org](http://www.traceroute.org)

- Traceroute από το Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο [gaia.cs.umass.edu](http://gaia.cs.umass.edu)

traceroute gaia.cs.umass.edu

traceroute to gaia.cs.umass.edu (128.119.245.12), 15 hops max, 52 byte packets

```
1 warp-srv.noc.ntua.gr (147.102.222.200) 0.573 ms * 0.330 ms
2 ntua-zogr-2-gw.kolettir.access-link.grnet.gr (62.217.96.176) 0.403 ms 0.405 ms 0.431 ms
3 eier-to-kolr-2.backbone.grnet.gr (62.217.100.67) 0.519 ms 0.551 ms 0.495 ms
4 grnet.mx2.ath.gr.geant.net (62.40.124.89) 0.536 ms 0.538 ms 0.571 ms
5 ae1.mx1.ath.gr.geant.net (62.40.112.215) 0.592 ms 0.578 ms 0.567 ms
6 ae2.mx1.mil2.it.geant.net (62.40.98.150) 33.338 ms 31.129 ms 33.331 ms
7 ae6.mx1.gen.ch.geant.net (62.40.98.112) 43.442 ms 45.676 ms 45.659 ms
8 ae1.mx1.fra.de.geant.net (62.40.98.109) 51.791 ms 51.800 ms 49.652 ms
9 ae1.mx1.ams.nl.geant.net (62.40.98.129) 56.307 ms 56.295 ms 58.546 ms
10 xe-0-3-0.102.rtr.newy32aoa.net.internet2.edu (198.71.45.236) 133.077 ms 145.315 ms
    130.771 ms
11 nox300gw1-vl-110-nox-i2.nox.org (192.5.89.221) 136.203 ms 136.157 ms 150.574 ms
12 nox300gw1-peer-nox-umass-192-5-89-102.nox.org (192.5.89.102) 140.096 ms 150.318
    ms 140.114 ms
13 core1-rt-xe-0-0-0.gw.umass.edu (192.80.83.101) 152.573 ms 162.607 ms 150.371 ms
14 lgrc-rt-106-8-po-10.gw.umass.edu (128.119.0.233) 138.081 ms 137.879 ms 140.288 ms
15 128.119.3.32 (128.119.3.32) 150.311 ms 137.976 ms 140.325 ms
```



# Άλλες καθυστερήσεις

- Τερματικών συστημάτων
  - Χαρακτηριστικά, απόδοση, τρόπος σύνδεσης.
- Εφαρμογών
  - Προαπαιτούμενες ενέργειες, ταχύτητα επεξεργασίας και άντλησης/καταγραφής δεδομένων.
- Παραδείγματα:
  - Καθυστέρηση για μετάδοση του πακέτου σε διαμοιραζόμενο μέσο.
  - Καθυστέρηση πακετοποίησης σε εφαρμογές διαδικτυακής τηλεφωνίας (κωδικοποίηση).
  - Συμπίεση δεδομένων.
  - Κρυπτογράφηση.
  - Αναζήτηση σε βάσεις δεδομένων.
  - κλπ.





# Διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput)

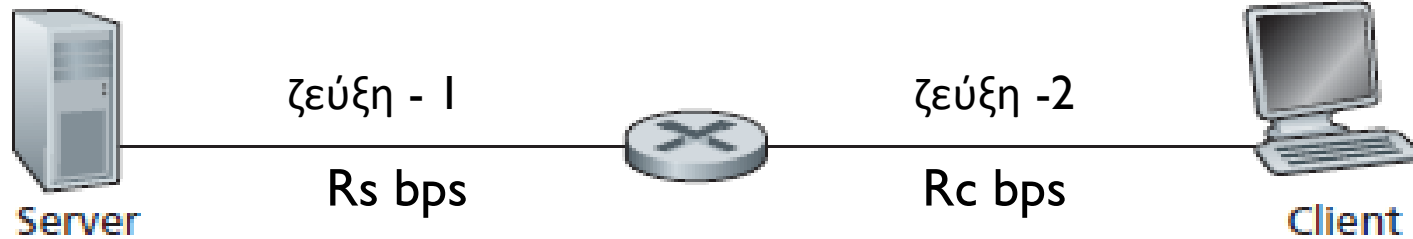
- Διεκπεραιωτική ικανότητα –*ρυθμαπόδοση*, throughput:  
*ο ρυθμός (bits/secs) στον οποίο τα bits μεταφέρονται μεταξύ αποστολέα-παραλήπτη*
- Πρόκειται για ένα κρίσιμο κριτήριο-μέτρο απόδοσης στα δίκτυα υπολογιστών.
- **Στιγμιαία** (instantaneous throughput):  
*Ο ρυθμός σε ένα συγκεκριμένο σημείο στο χρόνο*
- **Μέση** (average throughput):  
*Ο ρυθμός σε μια μεγάλη περίοδο χρόνου*
- Για ορισμένες εφαρμογές είναι επιθυμητό να έχουμε μικρή καθυστέρηση και στιγμιαία ρυθμαπόδοση > συγκεκριμένη τιμή.
- Για άλλες η καθυστέρηση δεν είναι κρίσιμη. Απλά είναι καλό να έχουμε την υψηλότερη δυνατή διεκπεραιωτική ικανότητα.



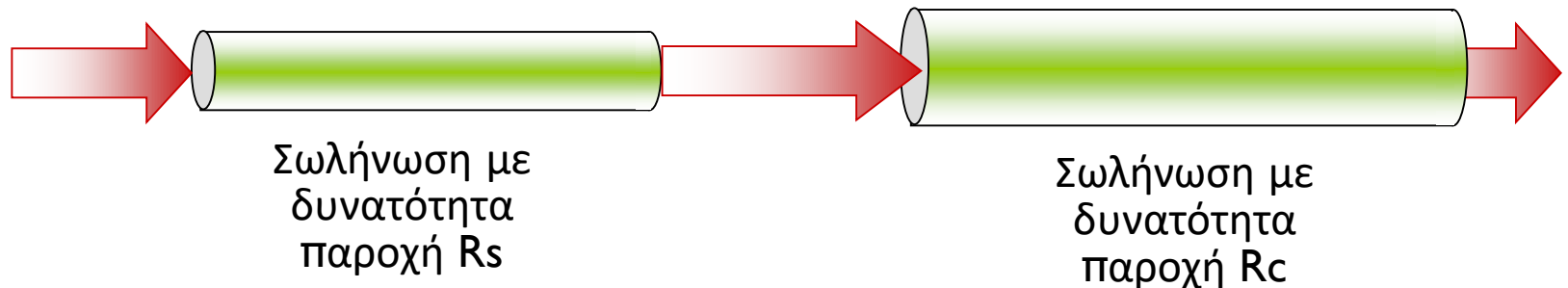
# Διεκπεραιωτική ικανότητα από άκρο σε άκρο

Ο server στέλνει  $R_s$  bps

Ο client λαμβάνει  $R_c$  bps

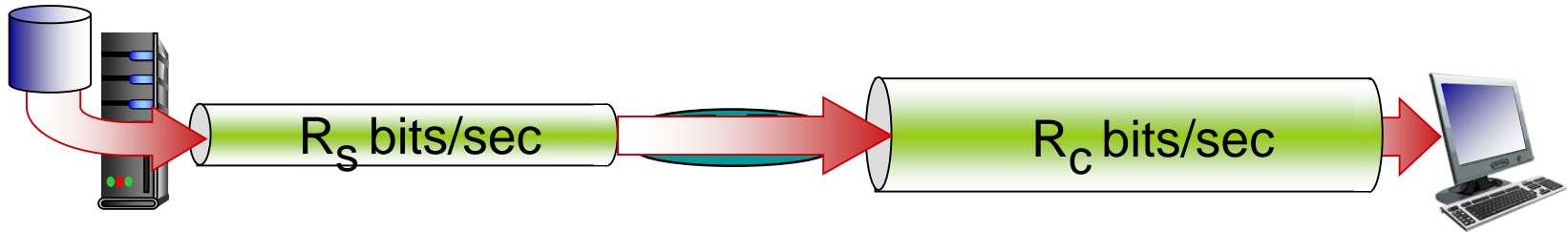


- $R_s, R_c$  : οι ταχύτητες των ζεύξεων 1 και 2.
- Ποια είναι η μέση διεκπεραιωτική ικανότητα από άκρο σε άκρο;
- Αναλογία με σωληνώσεις (ζεύξεις) και ρευστό (ροή bits):

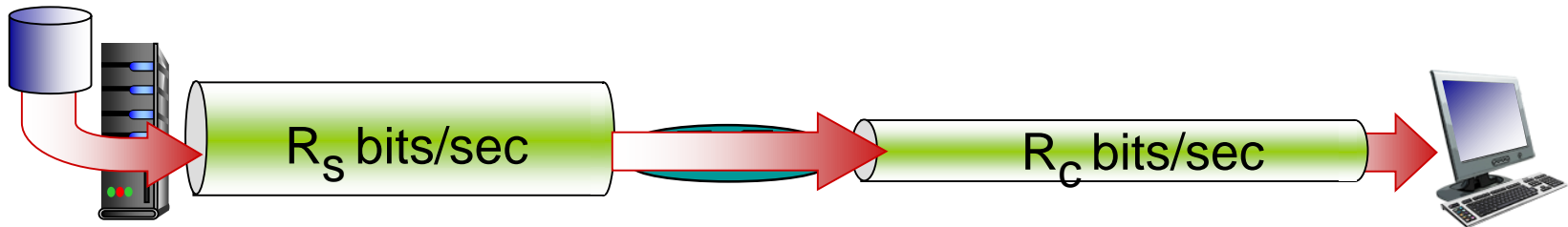


# Ζεύξη συμφόρησης (bottleneck link)

- Αν  $R_s < R_c$ : τότε η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι  $R_s$



- Αν  $R_c < R_s$ : τότε η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι  $R_c$



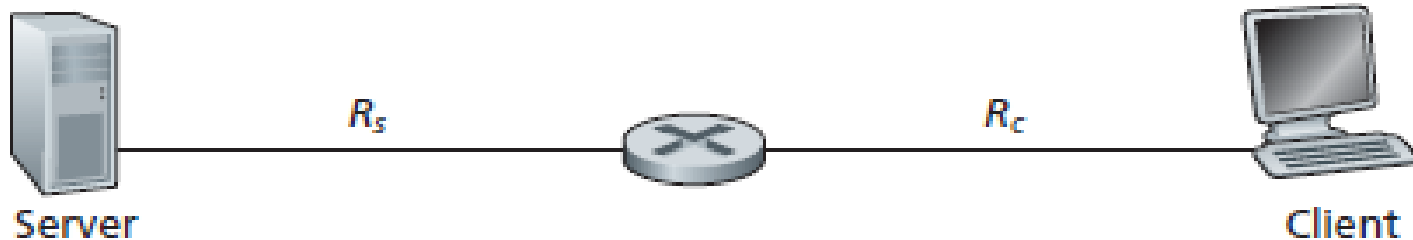
- Δηλαδή, η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι  $\min\{R_s, R_c\}$

## Ζεύξη συμφόρησης

Η ζεύξη σε ένα από άκρο-σε-άκρο μονοπάτι, η οποία περιορίζει την από άκρο-σε-άκρο διεκπεραιωτική ικανότητα.

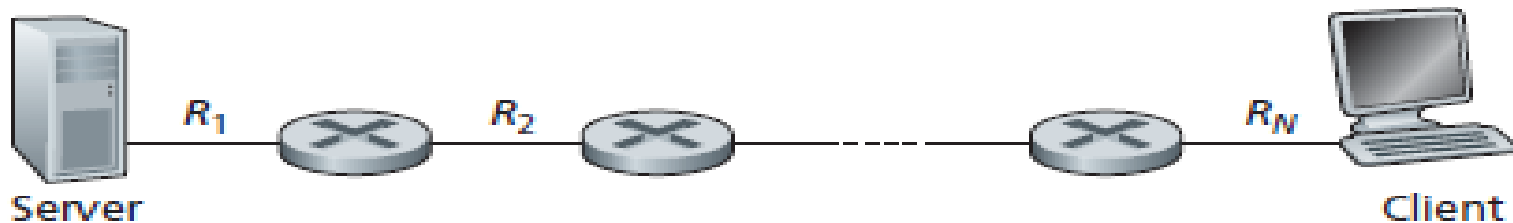


# Άσκηση με ζεύξη συμφόρησης



- Αν  $R_s=2\text{Mbps}$  και  $R_c=1\text{Mbps}$  πόσος χρόνος απαιτείται για να «κατεβάσει» ο πελάτης ένα αρχείο 4MByte από τον εξυπηρετητή;
- Η ζεύξη συμφόρησης είναι η  $R_c$  με 1Mbps ( $\min\{R_s, R_c\}$ )
- Ο χρόνος που απαιτείται είναι (1 Byte = 8bits):

$$T = 4\text{MByte} / 1\text{Mbps} = 32\text{Mbit} / 1\text{Mbps} = \mathbf{32\text{secs}}$$

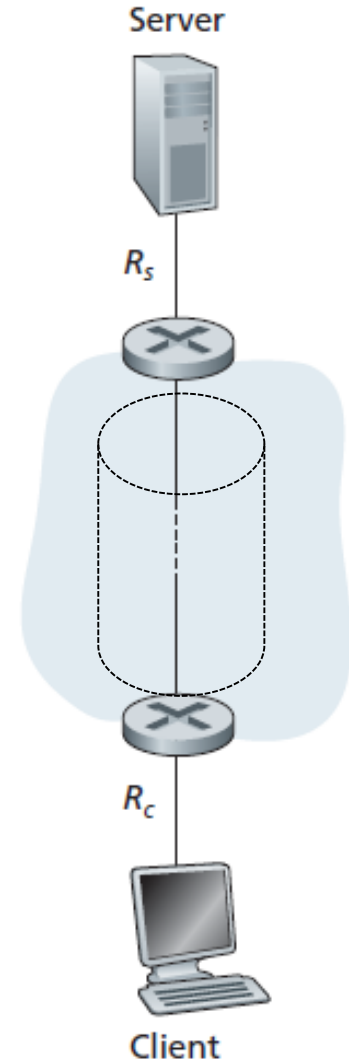


- Γενικά, η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι ο ρυθμός της ζεύξης συμφόρησης που είναι  $\mathbf{\min\{R_1, R_2, R_3, \dots, R_N\}}$



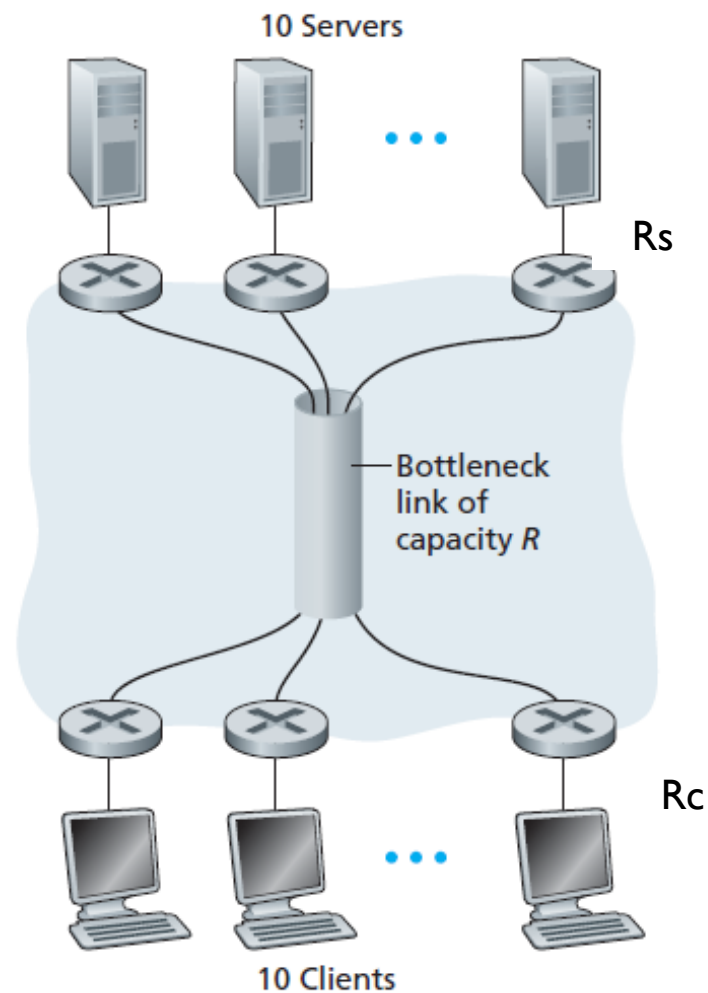
# Διεκπεραιωτική ικανότητα: τι γίνεται στο διαδίκτυο;

- Σήμερα οι ζεύξεις του πυρήνα του διαδικτύου έχουν πολύ ψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (over-provisioned).
- Στο σχήμα, υποθέτουμε ότι τα μόνα bits που στέλνονται στο διαδίκτυο είναι αυτά από το server στον client.
- Ο πυρήνας μοιάζει σαν ένα τεράστιο σωλήνα.
- Η διεκπεραιωτική ικανότητα είναι πάλι  $\min\{R_s, R_c\}$ .
- Περιοριστικός παράγοντας (συμφόρηση): συνήθως τα δίκτυα προσπέλασης.



## Διεκπεραιωτική ικανότητα στο διαδίκτυο: σενάριο-2

- 10 servers που στέλνουν με την ίδια ταχύτητα  $R_s$ .
- 10 clients που λαμβάνουν με την ίδια ταχύτητα  $R_c$ .
- 10 ταυτόχρονα «κατεβάσματα» (downloads).
- $R$ : ο ρυθμός της διαμοιραζόμενης ζεύξης στον πυρήνα.
- Ποια είναι η διεκπεραιωτική ικανότητα κάθε σύνδεσης;
- Απάντηση:  $\min (R_s, R_c, R/10)$
- Και πάλι στη πράξη συχνά η συμφόρηση οφείλεται στο  $R_c$  ή  $R_s$ .



10 συνδέσεις που «δίκαια» μοιράζονται τη ζεύξη συμφόρησης που έχει ρυθμό  $R$

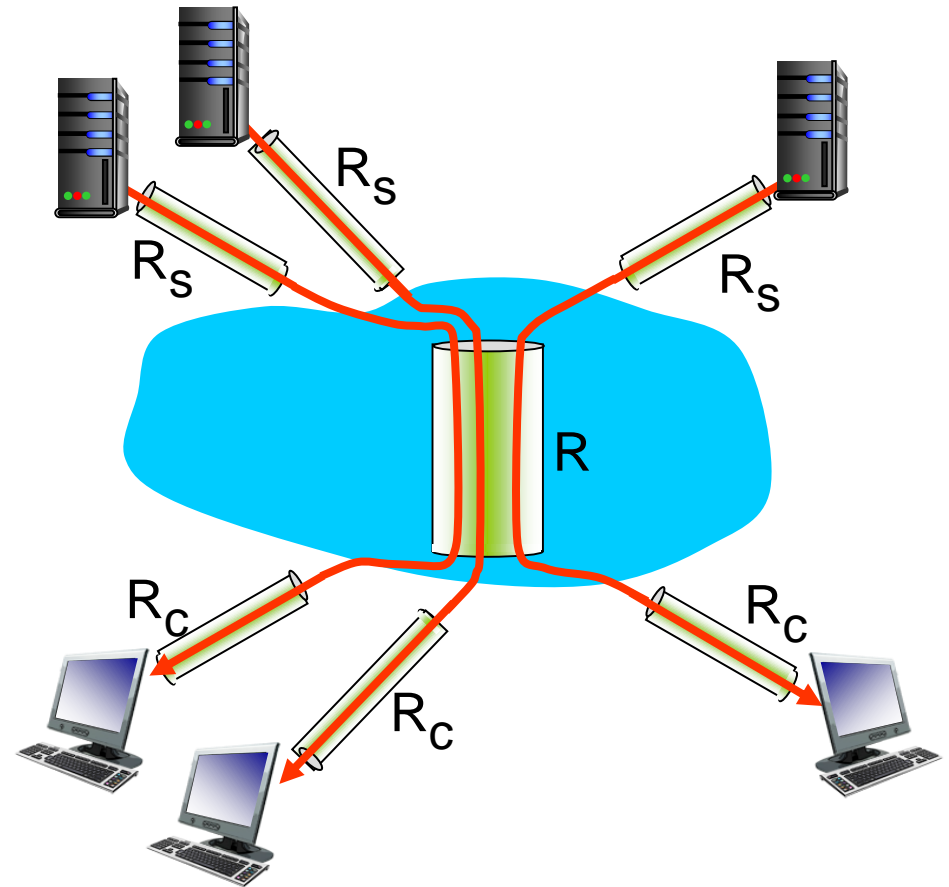


# Διεκπεραιωτική ικανότητα: παράδειγμα

- 10 servers που στέλνουν με την ίδια ταχύτητα  $R_s=2\text{Mbps}$
- 10 clients που λαμβάνουν με την ίδια ταχύτητα  $R_c=1\text{Mbps}$
- 10 ταυτόχρονα «κατεβάσματα»
- $R=5\text{ Mbps}$ : ο ρυθμός της διαμοιραζόμενης ζεύξης
- Ποια είναι η ζεύξη συμφόρησης;
- Απάντηση:

η διαμοιραζόμενη ζεύξη.

$(5\text{Mbps}/10 = 500\text{kbps})$



# Διεκαπεραιωτική ικανότητα: συμπεράσματα

- Ο ρυθμός (bits/secs) στον οποίο τα bits μεταφέρονται μεταξύ αποστολέα-παραλήπτη.
- Εξαρτάται από τους ρυθμούς των ζεύξεων όπου «ρέουν» τα δεδομένα.
- Εξαρτάται και από την παρεμβαλλόμενη κίνηση (σενάριο 2).
- Αν δεν υπάρχει άλλη κίνηση, υπολογίζεται κατά προσέγγιση ως ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης στη διαδρομή από την προέλευση στο προορισμό.
- Η ζεύξη που φέρει αυτό τον ελάχιστο ρυθμό ονομάζεται *ζεύξη συμφόρησης*.
- Οι ζεύξεις συμφόρησης συνήθως βρίσκονται στα δίκτυα προσπέλασης.

