

Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών
2021-22

Τεχνολογίες Κύριας Μνήμης

(και η ανάγκη για χρήση ιεραρχιών μνήμης)

<http://mixstef.github.io/courses/comparch/>

Μ.Στεφανιδάκης



Τεχνολογίες Κύριας Μνήμης

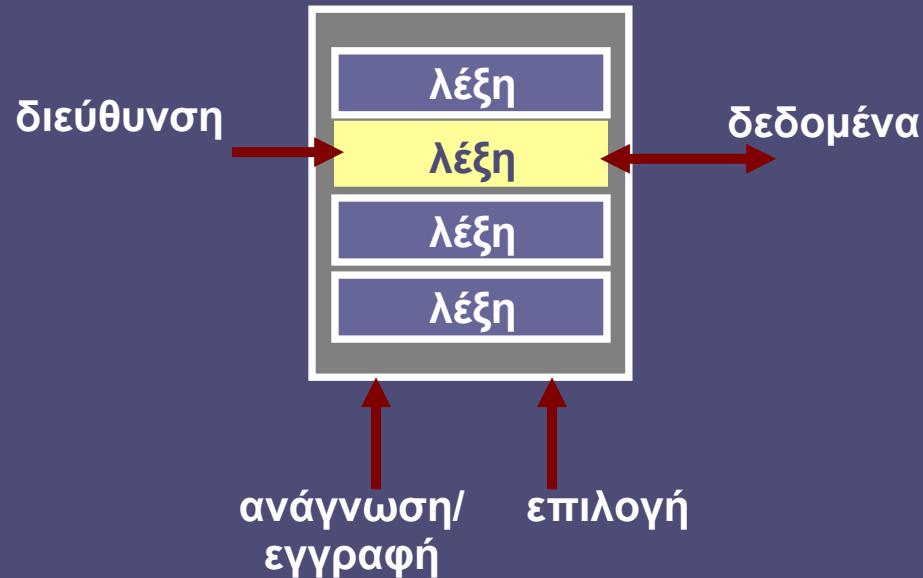
- Κύρια Μνήμη

- **Στους πρώτους υπολογιστές**
 - Ιστορικά, η κατασκευή κύριας μνήμης ήταν **πολύ πιο δύσκολη** από την κατασκευή των πρώτων υπολογιστών!
- **Αρχικές τεχνολογίες**
 - Flip-flop με λυχνίες κενού
 - Γραμμές καθυστέρησης υδραργύρου κ.ο.κ
- **Μαγνητικές μνήμες (core memories - 1950)**
 - Η πρώτη αξιόπιστη και σχετικά φθηνή τεχνολογία RAM
 - Κυριάρχησε για 20 περίπου χρόνια
- **Ημιαγωγικές μνήμες (Intel – 1970)**
 - Η αρχή: 1Kbit DRAM (“core killer”)

Το μοντέλο της Μνήμης Τυχαίας Προσπέλασης

- Κύρια Μνήμη
- RAM

- Η λέξη είναι η μικρότερη προσπελάσιμη ομάδα bits.
- Το εύρος των μεταφερόμενων δεδομένων σε κάθε ανάγνωση ή εγγραφή ισούται με το εύρος της λέξης μνήμης



- Random Access Memory (RAM)
 - Λέξη μνήμης (**word**) με εύρος **M** bits
 - Διεύθυνση (**address**) επιλογής λέξης, **N** bits
 - Μέγεθος (χωρητικότητα) μνήμης **$2^N \times M$** bits

Διευθυνσιοδότηση μνήμης RAM

- Κύρια Μνήμη
- RAM

0x80154FF0

byte

byte

byte

byte

Λέξη μνήμης

0x80154FF4

byte

byte

byte

byte

0x80154FF8

byte

byte

byte

byte

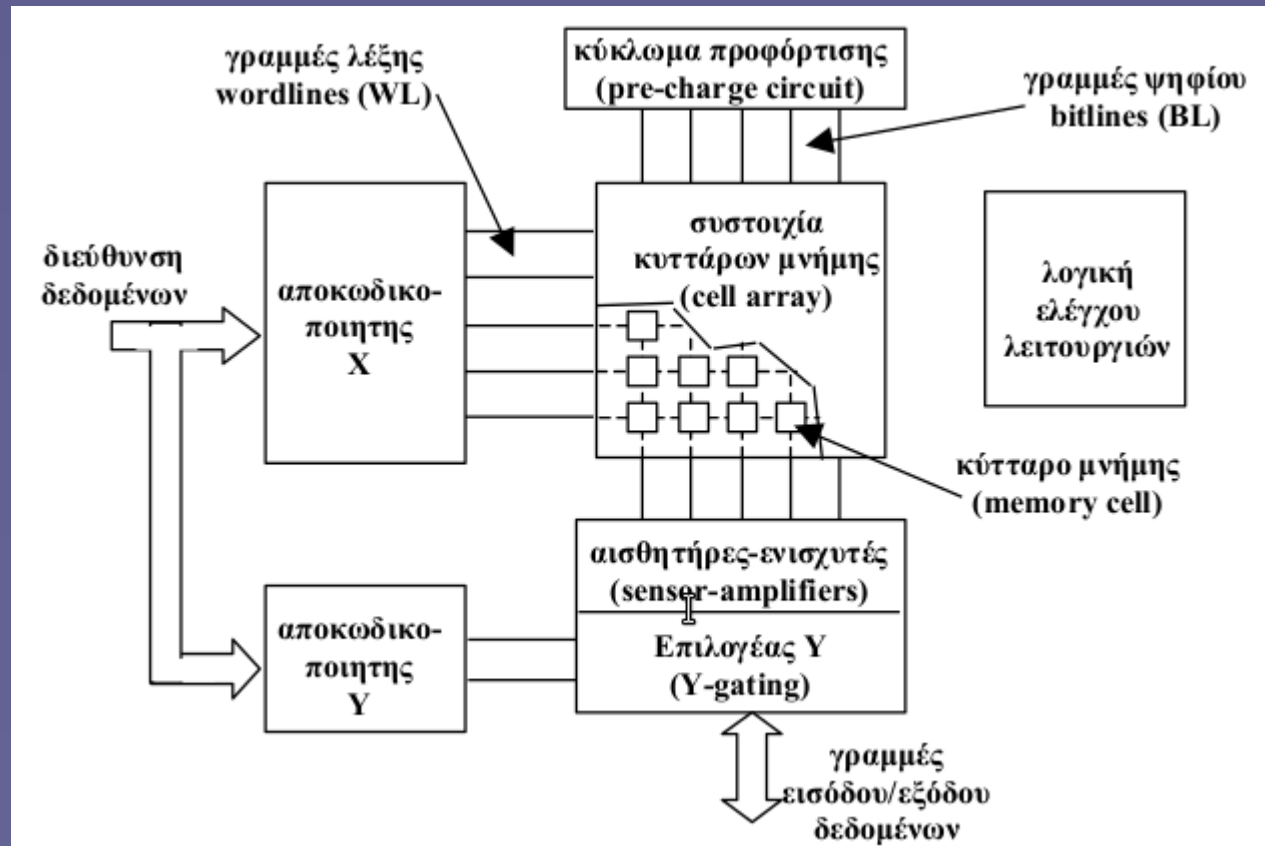
- Byte addressing
 - Οι διαδοχικές διευθύνσεις μνήμης αυξάνονται **ανά byte**
 - Ακόμα κι όταν η λέξη μνήμης έχει πολλαπλάσιο εύρος
 - Επεξεργαστές γενικού σκοπού
- Εναλλακτικά: word addressing
 - Οι διευθύνσεις αυξάνονται ανά **λέξη**
 - Υπερυπολογιστές ή ειδικοί επεξεργαστές ψηφιακών σημάτων – εδώ η προσπέλαση ανά byte είναι σπάνια

Οργάνωση Μνήμης Τυχαίας Προσπέλασης

- Κύρια Μνήμη
- RAM

i

Οι μεγαλύτερες
μνήμες RAM
διαθέτουν
πολλαπλές
συστοιχίες
κυττάρων μνήμης



Ταχύτητα Προσπέλασης RAM

- Κύρια Μνήμη
- RAM

- **Access Time (χρόνος προσπέλασης)**
 - Ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση μιας αίτησης προς τη μνήμη RAM
 - Διαφορετικός για Ανάγνωση - Εγγραφή
- **Cycle Time (χρόνος κύκλου προσπέλασης)**
 - Ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος μεταξύ διαδοχικών αιτήσεων προς τη μνήμη RAM
 - Πρόβλεψη ενδιάμεσων λειτουργιών

Τύποι Μνήμης Τυχαίας Προσπέλασης

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- **SRAM**

Ο χρόνος προσπέλασης μιας μνήμης SRAM βρίσκεται μεταξύ 0,5 και 5 ns

- **Στατική Μνήμη RAM (SRAM)**
 - Κάθε bit αποθηκεύεται σε κύτταρο (“cell”) 6 τρανζίστορ
 - Ανάλογο ενός flip-flop
 - Διατήρηση bit όσο υπάρχει τροφοδοσία της μνήμης
- **Η προσπέλαση είναι γρήγορη αλλά:**
 - Μεγαλύτερο κόστος
 - Πολυπλοκότερο κύκλωμα
 - Δεν επιτρέπει μεγάλη ολοκλήρωση
 - Μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας
- **Χρησιμοποιείται στις κρυφές μνήμες (caches)**

Τύποι Μνήμης Τυχαίας Προσπέλασης

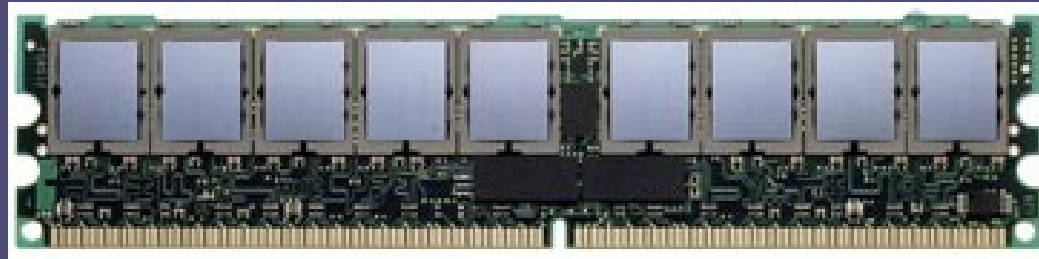
- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM

Ο χρόνος προσπέλασης μιας μνήμης DRAM βρίσκεται μεταξύ 50 και 70 ns

- **Δυναμική Μνήμη RAM (DRAM)**
 - Κάθε bit αποθηκεύεται ως φορτίο
 - Διατήρηση μόνο με συχνή **ανανέωση** του φορτίου
 - Κάθε 16 έως 128 ms (5% συνολικού χρόνου)
- **Απλούστερο κύκλωμα – μεγάλη ολοκλήρωση**
 - Πολύ μεγάλες χωρητικότητες (1 Gbit/chip και πλέον)
 - Η προσπέλαση είναι αργή
 - Αρχιτεκτονικές βελτιώσεις για αύξηση ρυθμού μεταφοράς δεδομένων
- **Χρησιμοποιείται για τη συγκρότηση της κύριας μνήμης όλων των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων**
 - Μνήμη = ασύγχρονη λειτουργία **αλλά**: προσθήκη ρολογιού για διασύνδεση με το υπόλοιπο σύστημα

Τμήματα (modules) μνήμης DRAM

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- **DRAM**



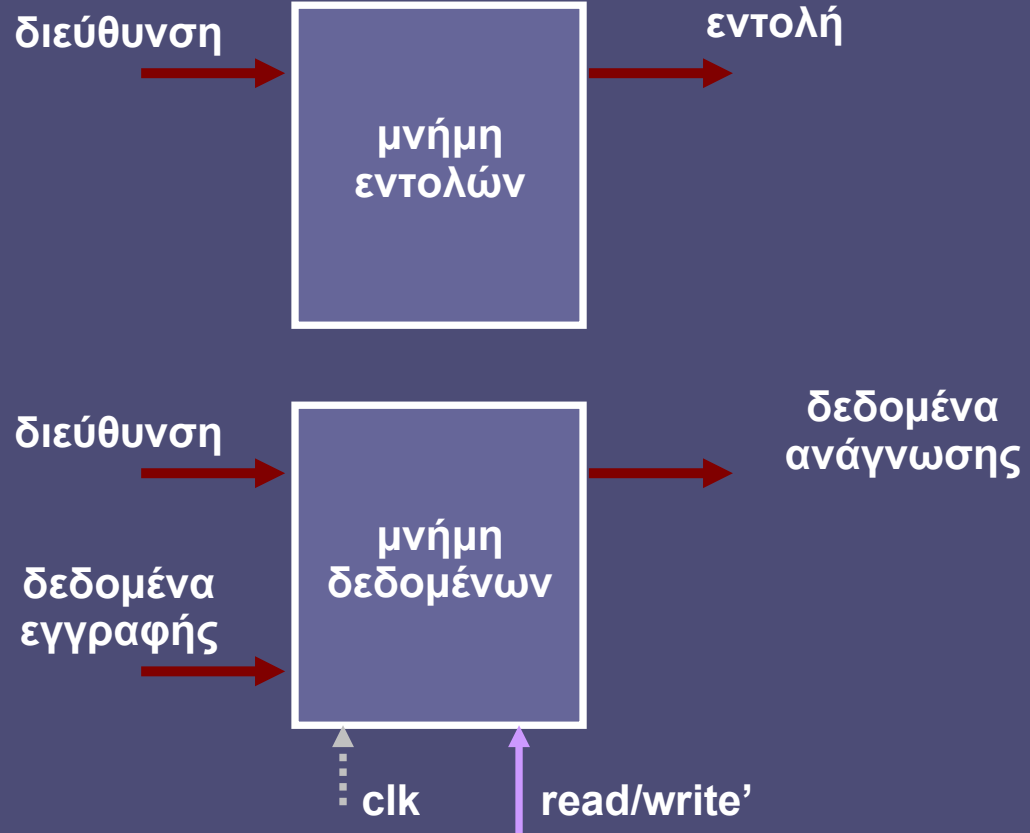
- 64 - 72 bits δεδομένων (χωρητικότητα έως 4GB)
- Μεταφορά δεδομένων στις 2 ακμές ρολογιού
 - Double Data Rate (DDR) RAM
- Σήματα ανίχνευσης και αναγνώρισης
- Διατάξεις βελτίωσης ηλεκτρικών χαρακτηριστικών σημάτων
- Ρυθμός μεταφοράς $> 8.5\text{GB/s}$

Η «ιδανική μνήμη»

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης

•
;

Πόσο απέχει η
ιδανική εικόνα από
την
πραγματικότητα;



- Ολοκλήρωση ανάγνωσης-εγγραφής σε έναν κύκλο ρολογιού...

Η πραγματική εικόνα

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης

•

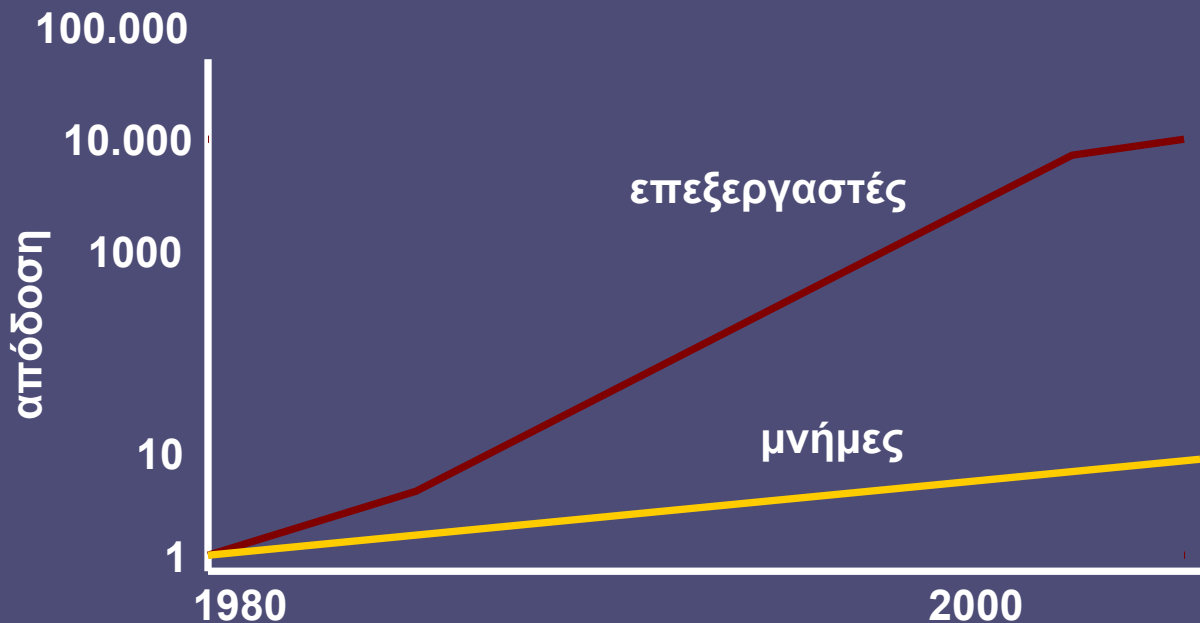
;

Η ιδανική μνήμη είναι πρακτικά αδύνατο να υλοποιηθεί. Ποια η πιθανή λύση;

- Ένας σύγχρονος επεξεργαστικός πυρήνας
 - με ρολόι 3 GHz
 - και έναρξη εκτέλεσης έως και 8 εντολών ανά κύκλο
 - απαιτεί από τη μνήμη 24G εντολές/sec
- Η «ιδανική μνήμη» θα έπρεπε να είναι
 - Πολύ γρήγορη
 - Πολύ φθηνή
 - Με πολύ μεγάλη χωρητικότητα

Το χάσμα απόδοσης μεταξύ επεξεργαστή-μνήμης

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης



Οι μνήμες ακολουθούν τον νόμο του Moore στην αύξηση της χωρητικότητάς τους, όχι όμως και στην απόδοση

- Επεξεργαστές: αύξηση απόδοσης 35%-55% /έτος
- Μνήμες: αύξηση απόδοσης 7% /έτος

[Patterson-Hennessy]

Η αρχή της τοπικότητας

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης

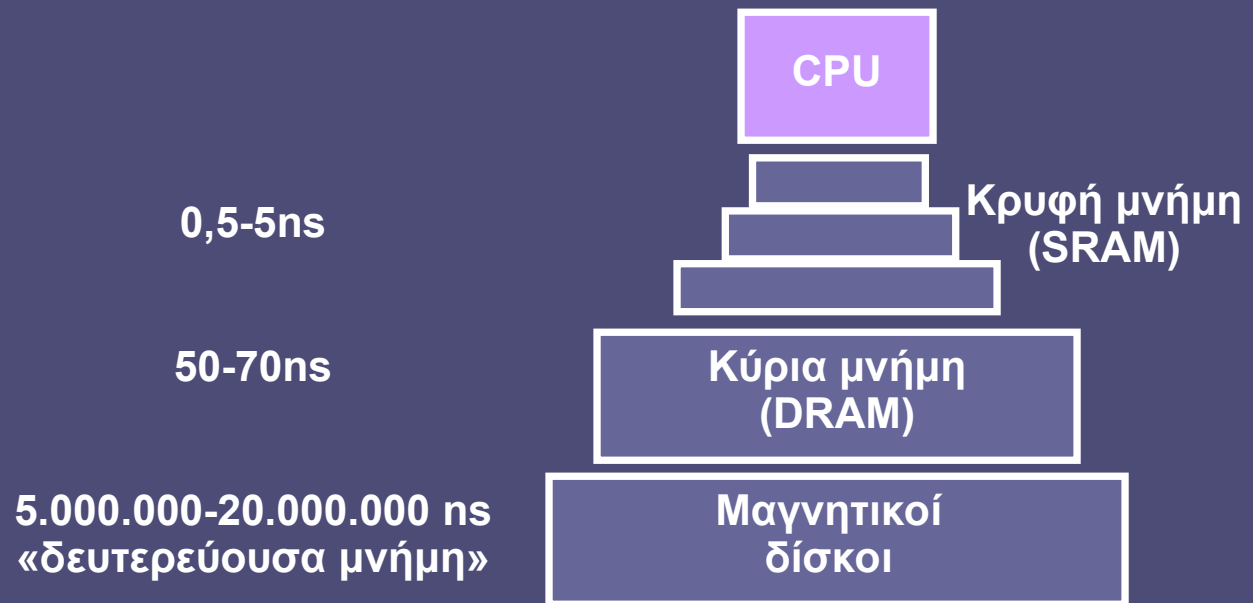
“ένα πρόγραμμα εκτελεί το 90% των εντολών του μέσα στο 10% του κώδικά του”

- **Χρονική Τοπικότητα**
 - Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, είναι πολύ πιθανό να προσπελαστεί ξανά στο άμεσο μέλλον
 - Π.χ. για εντολές ενός βρόχου (loop)
- **Χωρική Τοπικότητα**
 - Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, είναι πολύ πιθανό να προσπελαστούν και οι γειτονικές θέσεις στο άμεσο μέλλον
 - Εντολές προγραμμάτων
 - Δεδομένα σε πίνακες κλπ

Ιεραρχίες Μνήμης

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης

- **Πολλαπλά επίπεδα μνήμης**
 - Διαφορετικής τεχνολογίας
 - Με διαφορετική ταχύτητα και μέγεθος
 - Γρηγορότερη μνήμη κοντά στον επεξεργαστή

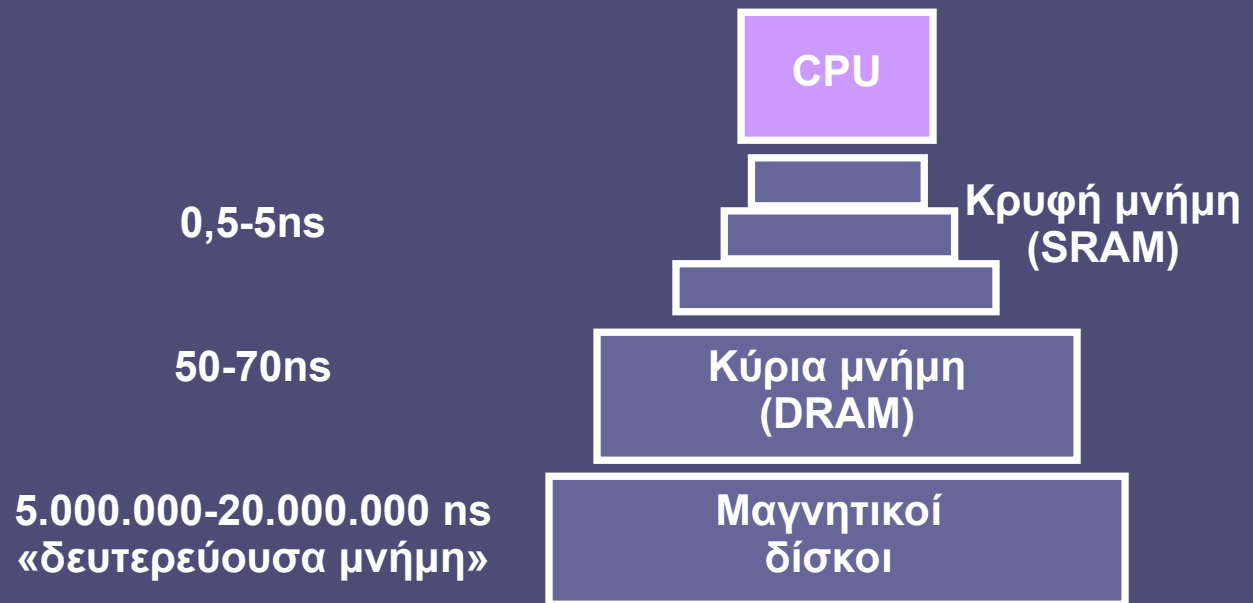


Και οι δικτυακές τοποθεσίες μπορούν να θεωρηθούν μέρος της ιεραρχίας μνήμης (το χαμηλότερο)

Σκοπός της Ιεραρχίας Μνήμης

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης

- Προσέγγιση της ιδανικής μνήμης
 - Ο επεξεργαστής να βλέπει “μνήμη”
 - Με την ταχύτητα του υψηλότερου επιπέδου
 - Και το μέγεθος του χαμηλότερου



Για να επιτύχει τον σκοπό της η ιεραρχία μνήμης εκμεταλλεύεται την αρχή της **τοπικότητας**

Αποθήκευση δεδομένων στην Ιεραρχία Μνήμης

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης

- **Αποθήκευση δεδομένων**
 - Τα υψηλότερα επίπεδα είναι υποσύνολα των χαμηλότερων
 - Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται τελικά στο χαμηλότερο επίπεδο
- **Μεταφορά δεδομένων**
 - Αντιγραφή από επίπεδο σε επίπεδο
 - Το ελάχιστο σύνολο δεδομένων που μεταφέρεται μεταξύ δύο επιπέδων ονομάζεται **μπλοκ**
 - Πολλαπλά bytes

Αναζήτηση δεδομένων στην Ιεραρχία Μνήμης

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης

- **Αναζήτηση δεδομένων**
 - Ο επεξεργαστής ζητά **πάντοτε** τα δεδομένα από το κοντινότερο σε αυτόν επίπεδο
 - Τα δεδομένα υπάρχουν στο επίπεδο αυτό: **hit**
 - Τα δεδομένα δεν βρίσκονται στο επίπεδο αυτό: **miss**
 - Η αίτηση προωθείται στο επόμενο (χαμηλότερο) επίπεδο
 - Και το μπλοκ που περιέχει τα δεδομένα αντιγράφεται στο ανώτερο επίπεδο

Μετρήσεις απόδοσης στην Ιεραρχία Μνήμης

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης

- **Hit Rate**

- Ποσοστό προσπελάσεων μνήμης, όπου τα δεδομένα βρίσκονται στο ανώτερο επίπεδο

- **Miss Rate**

- Ποσοστό προσπελάσεων μνήμης, όπου τα δεδομένα δεν βρίσκονται στο ανώτερο επίπεδο
 - (1-hit rate)

- **Hit Time**

- Ο χρόνος για την προσπέλαση δεδομένων σε hit

- **Miss Penalty**

- Ο χρόνος για την προσπέλαση, μεταφορά και τοποθέτηση των δεδομένων miss από το χαμηλότερο στο ανώτερο επίπεδο

Εισαγωγή στις κρυφές μνήμες (caches)

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης
- Κρυφές Μνήμες

- **Κρυφή μνήμη**
 - Μεταξύ του επεξεργαστή και της κύριας μνήμης
 - Εμφάνιση στη δεκαετία του 60
 - Σήμερα δεν υπάρχει υπολογιστικό σύστημα χωρίς κρυφή μνήμη
- **Αποθήκευση δεδομένων στην κρυφή μνήμη**
 - Όχι ανά λέξη μνήμης ή ανά byte...
 - ...αλλά ανά **μπλοκ** (64-512bits)
 - Μεταφορά δεδομένων από την κύρια προς την κρυφή μνήμη σε **ριπές (bursts)**
 - Το σύστημα κύριας μνήμης έχει βελτιστοποιηθεί αρχιτεκτονικά για αυτού του τύπου τις μεταφορές

Θέματα κρυφών μνημών

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM
- Ιεραρχίες Μνήμης
- Κρυφές Μνήμες

- Πού αποθηκεύεται ένα μπλοκ στην κρυφή μνήμη;
- Πώς εντοπίζεται ένα μπλοκ στην κρυφή μνήμη;
- Ποιο μπλοκ θα αντικατασταθεί όταν χρειαστεί;
- Τι συμβαίνει στην εγγραφή νέων δεδομένων;
- Πώς υπολογίζεται η απόδοση της ιεραρχίας μνήμης;

(στο επόμενο μάθημα..)