Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών

2022-23

Τεχνολογίες Κύριας Μνήμης

(και η ανάγκη για χρήση ιεραρχιών μνήμης)

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

Μ.Στεφανιδάκης

Τεχνολογίες Κύριας Μνήμης

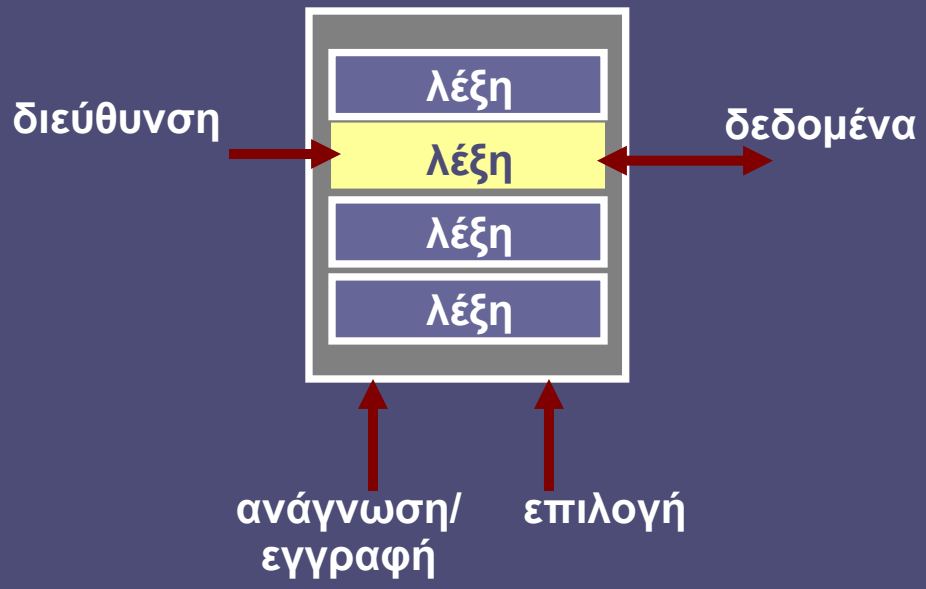
- Κύρια Μνήμη

- 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

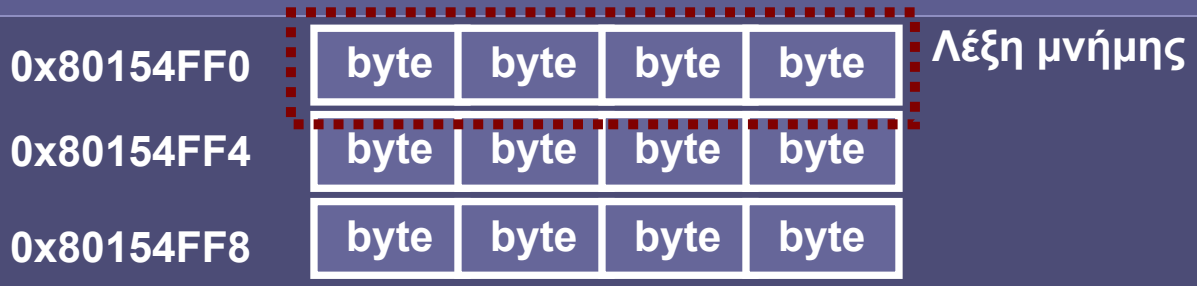
•Η λέξη είναι η μικρότερη προσπελάσιμη ομάδα bits (π.χ. ένα byte ή πολλαπλάσιά του).



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

Διευθυνσιοδότηση μνήμης RAM

- Κύρια Μνήμη
- RAM



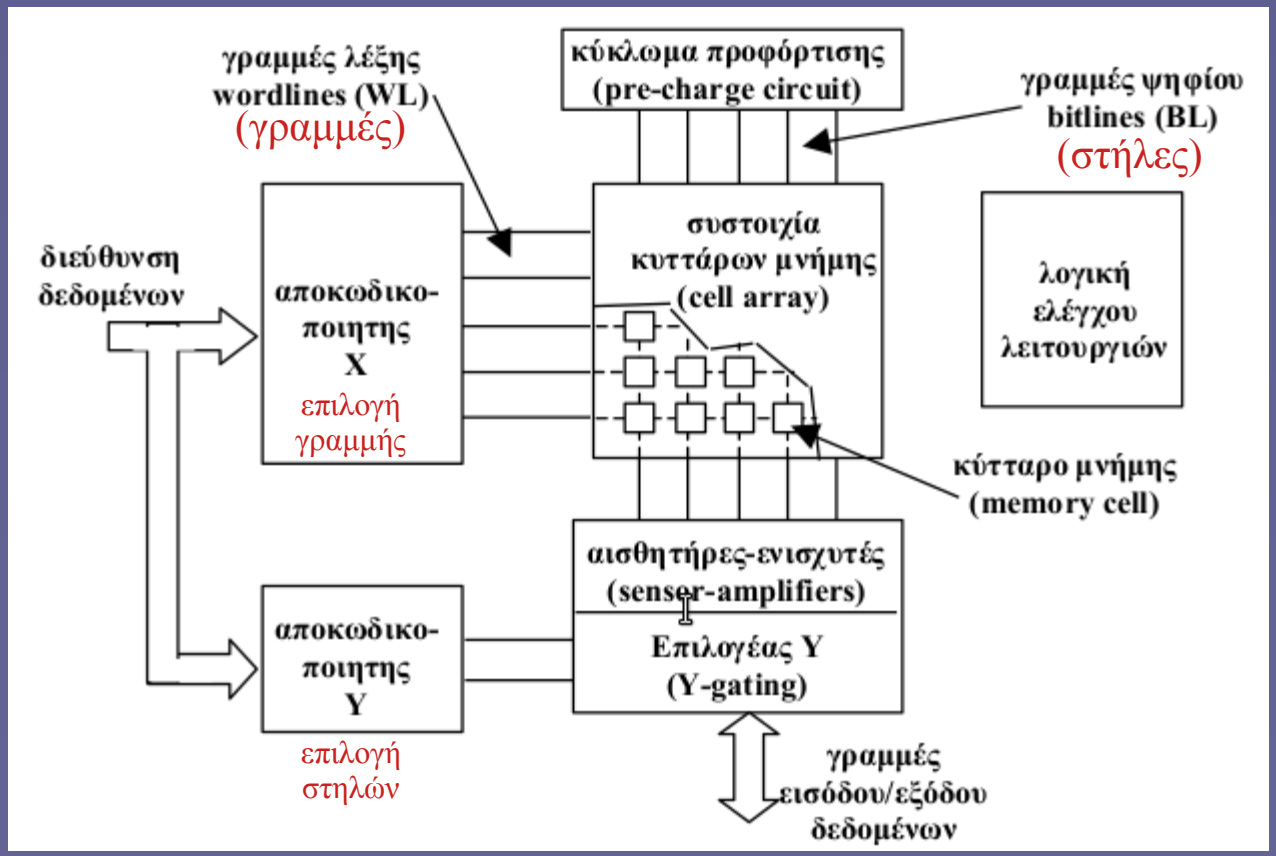
- Byte addressing
  - Οι διαδοχικές διευθύνσεις μνήμης αυξάνονται ανά byte
  - Ακόμα κι όταν η λέξη μνήμης έχει πολλαπλάσιο εύρος
  - Επεξεργαστές γενικού σκοπού
- Εναλλακτικά: word addressing
  - Οι διευθύνσεις αυξάνονται ανά λέξη
  - Υπερυπολογιστές ή ειδικοί επεξεργαστές ψηφιακών σημάτων – εδώ η προσπέλαση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

Οργάνωση Μνήμης Τυχαίας Προσπέλασης (RAM)

- Κύρια Μνήμη
- RAM

i

Οι τρέχουσες 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 (προετοιμασία για την επόμενη προσπέλαση)

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
  - Διατήρηση bit όσο υπάρχει τροφοδοσία της μνήμης
- **Η προσπέλαση είναι γρήγορη αλλά:**
  - 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
- Απλούστερο κύκλωμα – μεγάλη ολοκλήρωση
  - Πολύ μεγάλες χωρητικότητες (1Gbit/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

Βασική λειτουργία DRAM

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM

- ACTIVATE
  - Επιλογή γραμμής (row) για ανάγνωση ή εγγραφή μέσω μέρους της διεύθυνσης
- READ/WRITE
  - Επιλογή στηλών (column) για ανάγνωση ή εγγραφή μέσω της υπόλοιπης διεύθυνσης
- PRECHARGE
  - Επιλογή συστοιχίας (bank) για προφόρτιση πριν την επόμενη ανάγνωση ή εγγραφή
- Λοιπές λειτουργίες
  - Καταχωρητές ελέγχου για αποθήκευση ρυθμίσεων

Επικοινωνία με τη μνήμη DRAM

- Κύρια Μνήμη
- RAM
- SRAM
- DRAM

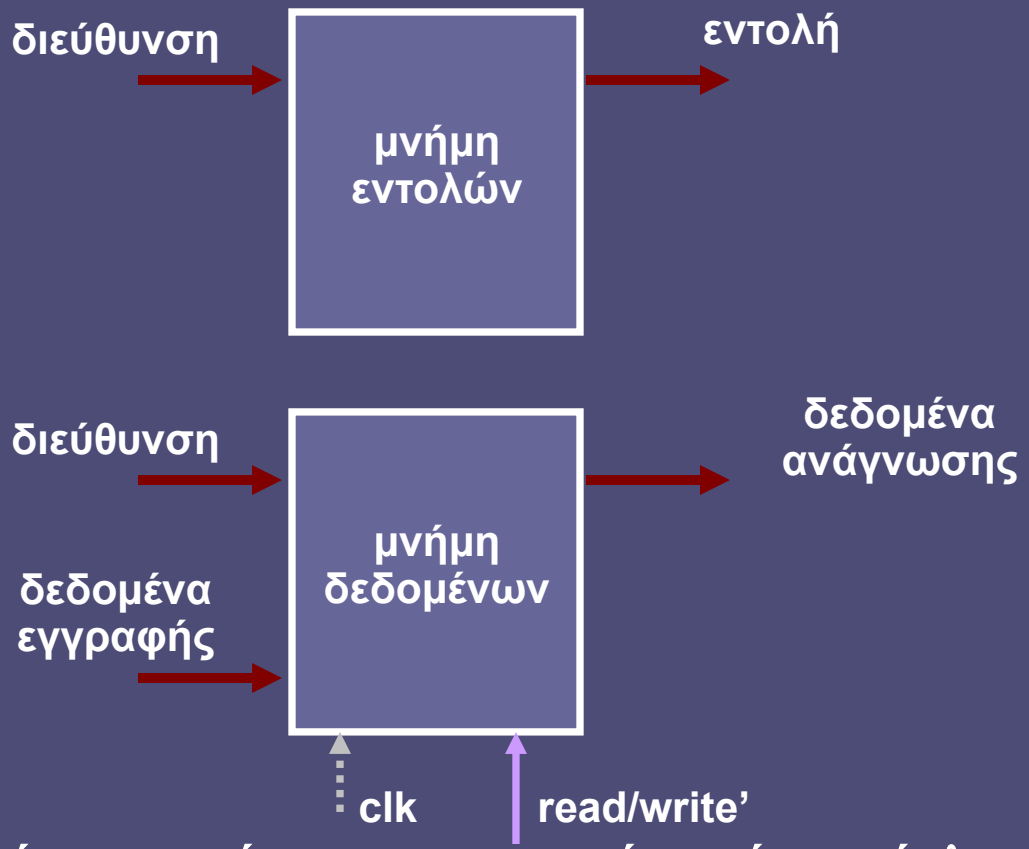
- Η βασική λειτουργία της μνήμης είναι ασύγχρονη
  - Η ανάγνωση και εγγραφή ολοκληρώνεται μετά από συγκεκριμένο χρόνο
- Προσθήκη ρολογιού για συγχρονισμό μεταφοράς με το υπόλοιπο σύστημα
  - Διαφορικό σήμα (ζεύγος αντίστροφων σημάτων)
  - Συγχρονίζει τα σήματα ελέγχου και διεύθυνσης
  - Ξεχωριστό διαφορικό σήμα (strobe) DQS συγχρονίζει τη μεταφορά των δεδομένων DQ
    - DQ και DQS από τον ίδιο αποστολέα
    - Μεταφορά και στις δύο ακμές DQS (double-data rate)
- Πρότυπα DDRx (x = 3, 4, 5…) για επικοινωνία με ξεχωριστά modules μνήμης
- Πρότυπα HBM για μνήμες που βρίσκονται μέσα στο τσιπ του επεξεργαστή

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

- 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
  - Ιδιαίτερα χρήσιμη στις σημερινές εφαρμογές AI

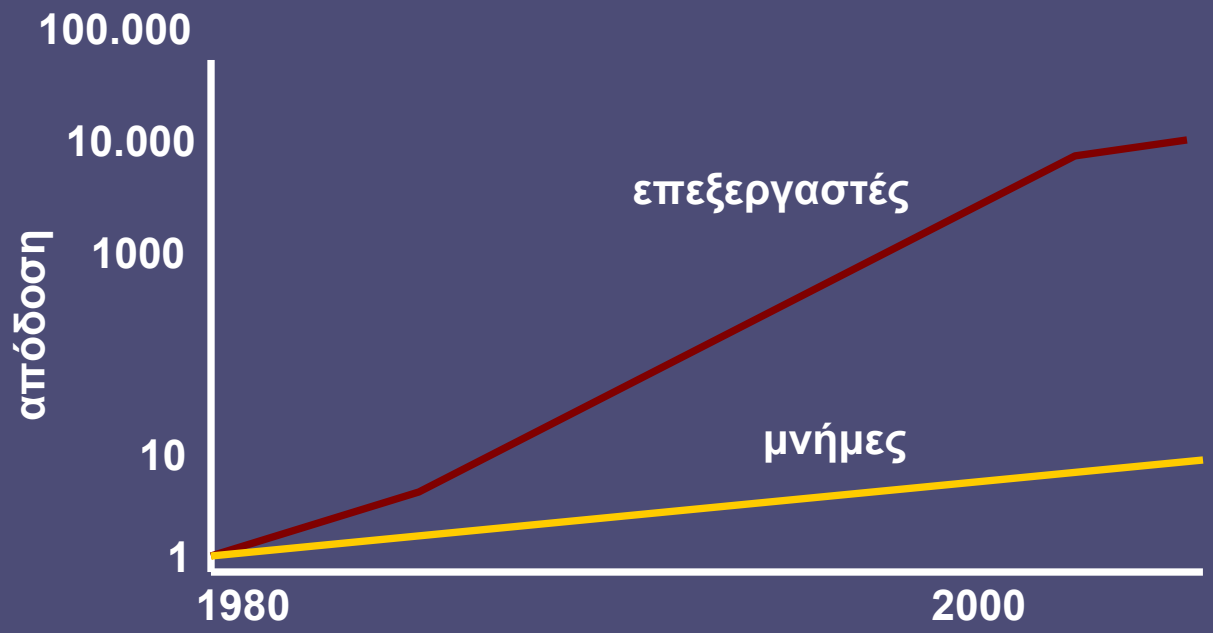
;

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

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"

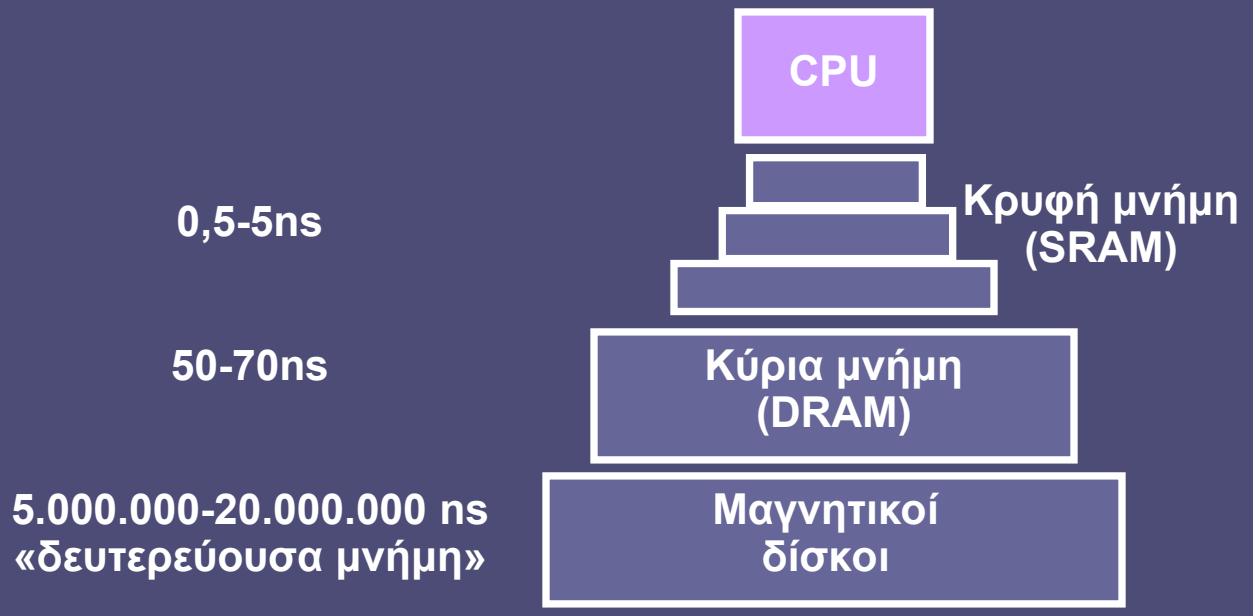
- **Χρονική Τοπικότητα**
  - Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, είναι πολύ πιθανό να προσπελαστεί ξανά στο άμεσο μέλλον
  - Π.χ. για εντολές ενός βρόχου (loop)
- **Χωρική Τοπικότητα**
  - Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, είναι πολύ πιθανό να προσπελαστούν και οι γειτονικές θέσεις στο άμεσο μέλλον
  -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

Ιεραρχίες Μνήμης

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

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

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

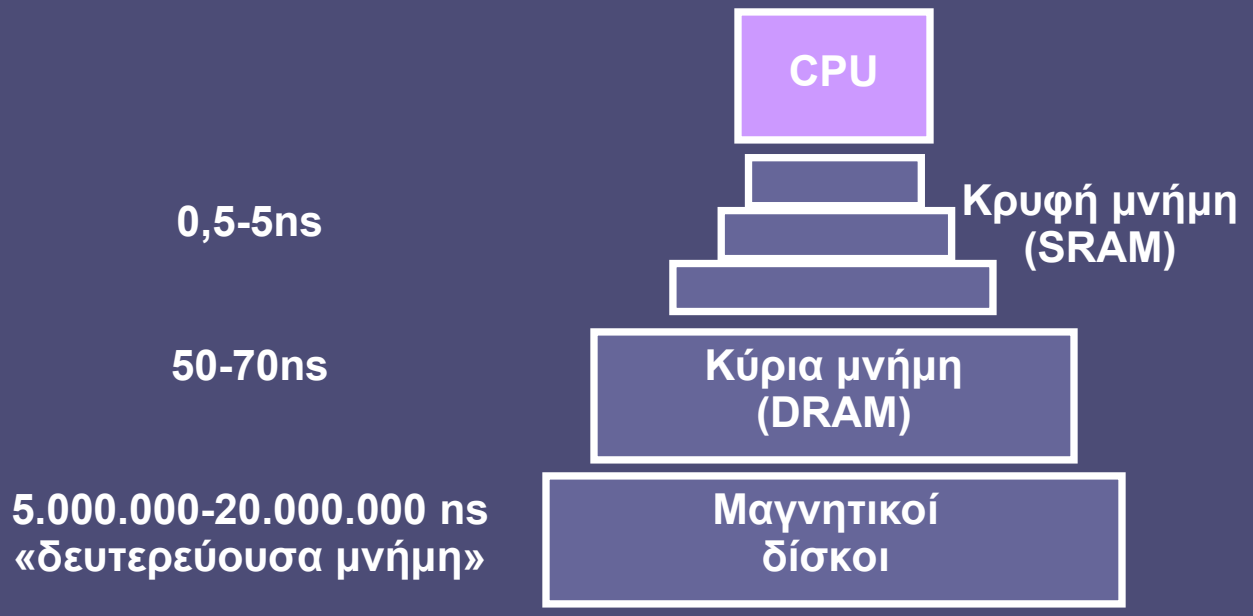


Σκοπός της Ιεραρχίας Μνήμης

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

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

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



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..)