Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών

2023-24

Ιεραρχίες Μνήμης (Ι)

(τεχνολογίες κύριας μνήμης και εισαγωγή στις κρυφές μνήμες)

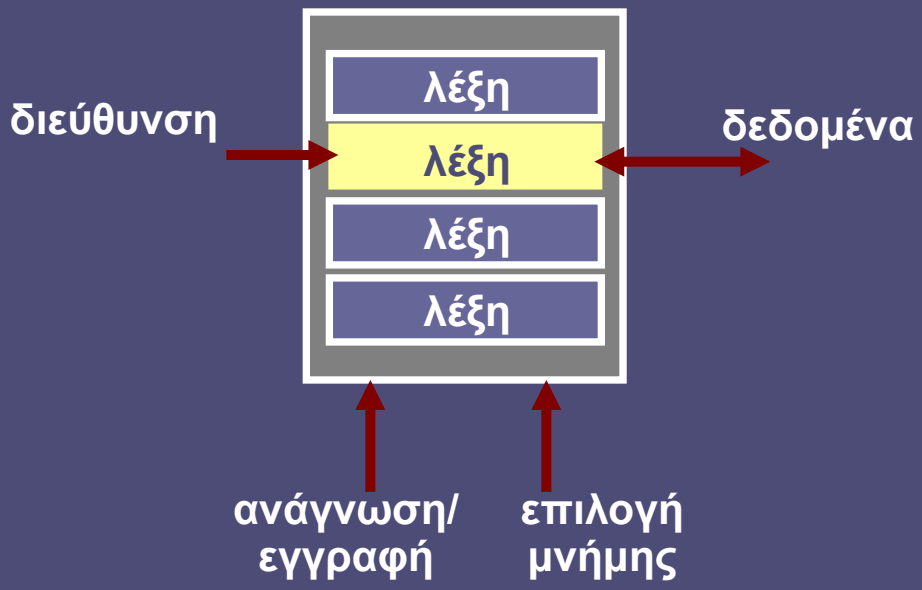
http://mixstef.github.io/courses/comparch/

Μ.Στεφανιδάκης

Τεχνολογίες Κύριας Μνήμης

- Στους πρώτους υπολογιστές
  - Ιστορικά, η κατασκευή κύριας μνήμης ήταν πολύ πιο δύσκολη από την κατασκευή των πρώτων υπολογιστικών κυκλωμάτων
- 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")

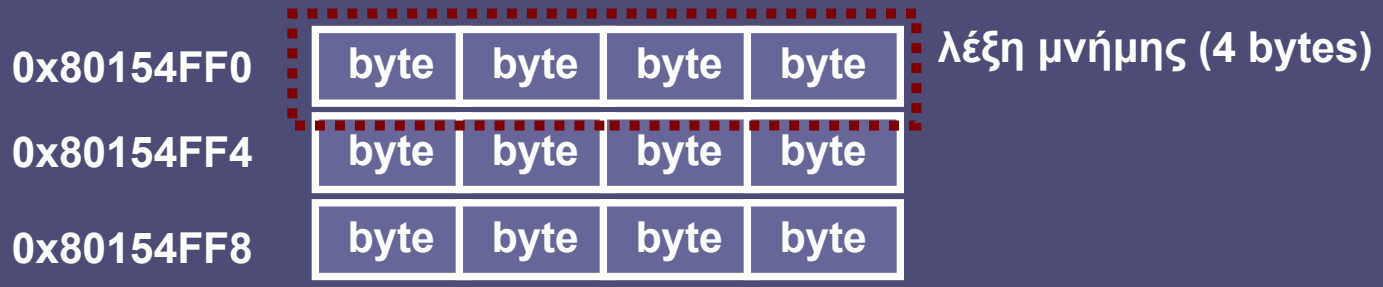
Το μοντέλο της Μνήμης Τυχαίας Προσπέλασης



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

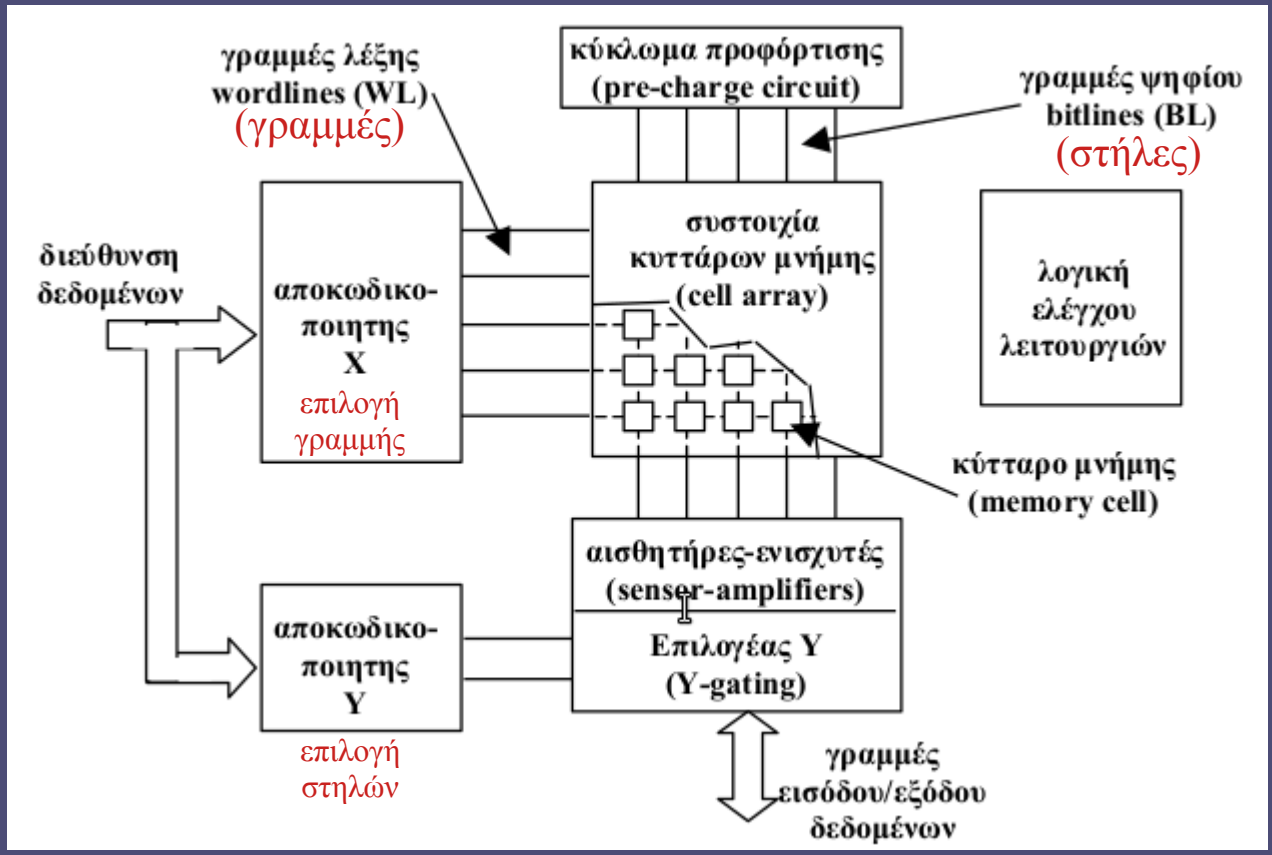
Η λέξη είναι η μικρότερη προσπελάσιμη ομάδα bits (π.χ. ένα byte ή πολλαπλάσιά του).

Διευθυνσιοδότηση μνήμης 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)



- Οι τρέχουσες μνήμες RAM διαθέτουν πολλαπλές (π.χ. 8) συστοιχίες κυττάρων μνήμης (banks)

Ταχύτητα Προσπέλασης RAM

- **Access Time (χρόνος προσπέλασης)**
  - Ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση μιας αίτησης προς τη μνήμη RAM
    - Συχνά διαφορετικός για Ανάγνωση - Εγγραφή
- **Cycle Time (χρόνος κύκλου προσπέλασης)**
  - Ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος μεταξύ διαδοχικών αιτήσεων προς τη μνήμη RAM
    - Προσθήκη χρόνου για ενδιάμεσες λειτουργίες (προετοιμασία για την επόμενη προσπέλαση)

Τύποι Μνήμης Τυχαίας Προσπέλασης

- Στατική Μνήμη RAM (SRAM)
  - Κάθε bit αποθηκεύεται σε κύτταρο (“cell”) 6 τρανζίστορ
  - Διατήρηση bit όσο υπάρχει τροφοδοσία της μνήμης
- Η προσπέλαση είναι γρήγορη
  - Ο χρόνος προσπέλασης μιας μνήμης SRAM βρίσκεται μεταξύ 0,5 και 5 ns
- Αλλά:
  - Πολυπλοκότερο κύκλωμα
  - Δεν επιτρέπει μεγάλη ολοκλήρωση
  - Μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας
- Χρησιμοποιείται στις κρυφές μνήμες (caches)

Τύποι Μνήμης Τυχαίας Προσπέλασης

- 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 μεγαλύτερες)
  - Η προσπέλαση είναι αργή
  - Ο χρόνος προσπέλασης μιας μνήμης DRAM βρίσκεται μεταξύ 50 και 70 ns
    - Αρχιτεκτονικές βελτιώσεις για την αύξηση του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων
- Χρησιμοποιείται για τη συγκρότηση της κύριας μνήμης

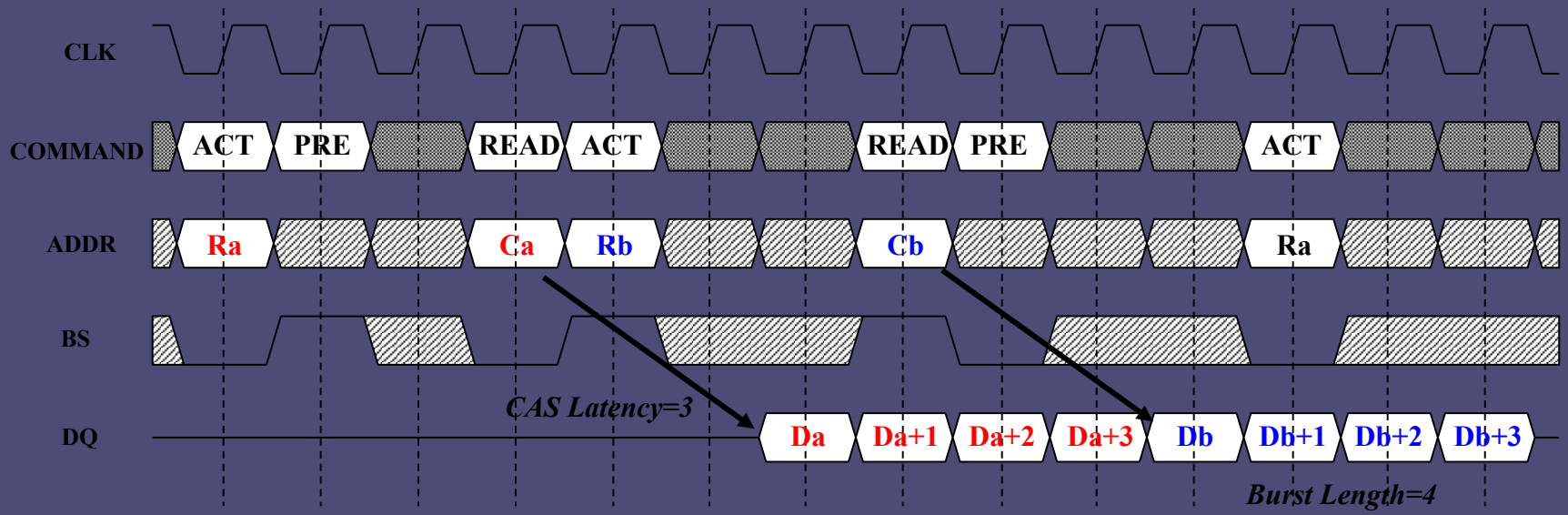
Βασικές λειτουργίες DRAM

- 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
  - Refresh, ρυθμίσεις (μέγεθος μεταφοράς, αρχικοποίηση σημάτων κλπ)

Επικοινωνία με τη μνήμη DRAM

- Η βασική λειτουργία της μνήμης είναι ασύγχρονη
  - Η ανάγνωση και εγγραφή ολοκληρώνεται μετά από συγκεκριμένο χρόνο ανάλογα με την τεχνολογία της μνήμης
- Προσθήκη σημάτων ρολογιού για συγχρονισμό μεταφοράς δεδομένων
  - CLK : συγχρονίζει τα σήματα ελέγχου και διεύθυνσης (από ελεγκτή μνήμης)
  - Ξεχωριστό σήμα (strobe) DQS συγχρονίζει τη μεταφορά των δεδομένων (DQ)
    - Οδηγείται από τον ελεγκτή μνήμης (εγγραφή) ή τη μνήμη (ανάγνωση)
    - Μνήμες DDR: μεταφορά και στις δύο ακμές DQS (double-data rate)
- Πρότυπα
  - DDRx (x = 3,4,5…) για επικοινωνία με ξεχωριστά modules μνήμης
  - HBM για μνήμες που βρίσκονται μέσα στο τσιπ του επεξεργαστή

Παράδειγμα ανάγνωσης από DRAM

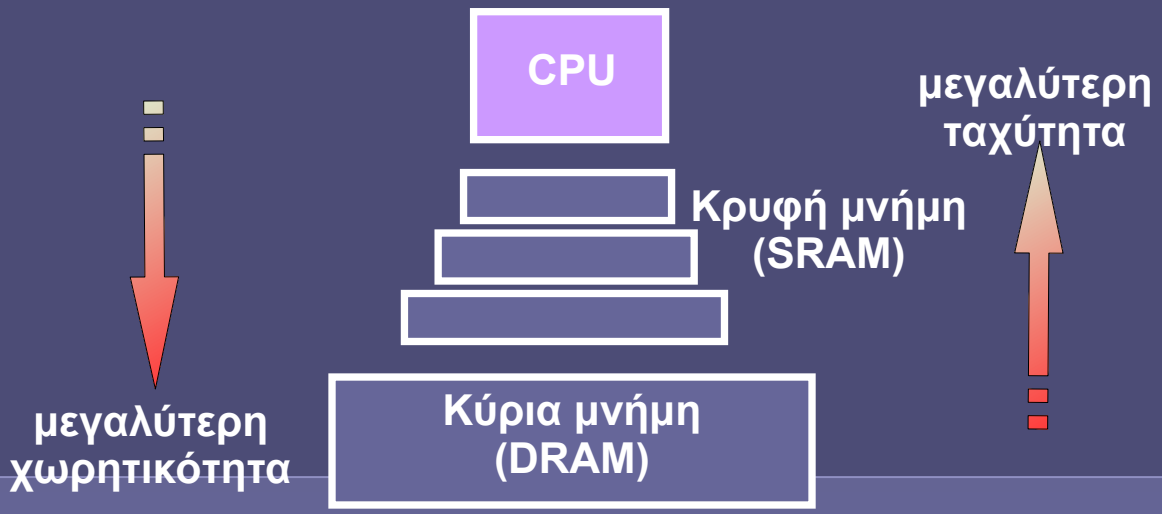


Απαιτήσεις από το σύστημα μνήμης

- Παράδειγμα: ένας επεξεργαστικός πυρήνας
  - με ρολόι 3 GHz
  - και έναρξη εκτέλεσης έως και 8 εντολών ανά κύκλο
  - απαιτεί από τη μνήμη 24G εντολές/sec
  - Τι συμβαίνει σε συστήματα με πολλούς πυρήνες;
- Η «ιδανική μνήμη» θα έπρεπε να είναι
  - Πολύ γρήγορη
  - Πολύ φθηνή
  - Με πολύ μεγάλη χωρητικότητα
    - Ιδιαίτερα χρήσιμη στις σημερινές εφαρμογές AI

Ιεραρχίες Μνήμης

- Προσέγγιση της ιδανικής μνήμης
  - Ο επεξεργαστής να βλέπει "μνήμη" με την ταχύτητα του υψηλότερου επιπέδου και το μέγεθος του χαμηλότερου επιπέδου
- Η ιεραρχία μνήμης εκμεταλλεύεται την αρχή της τοπικότητας
  - Για να γεφυρώσει το χάσμα απόδοσης μεταξύ επεξεργαστών και μνημών



Ιεραρχία μνήμης και τοπικότητα

- Χρονική Τοπικότητα
  - Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, είναι πολύ πιθανό να προσπελαστεί ξανά στο άμεσο μέλλον
    - Παράδειγμα: οι εντολές ενός βρόχου (loop)
- Εφαρμογή:
  - Δεδομένα και εντολές που χρησιμοποιήθηκαν πρόσφατα βρίσκονται ήδη κοντύτερα στον επεξεργαστή (π.χ. στην κρυφή μνήμη)
    - θα προσπελαστούν πολύ γρηγορότερα την επόμενη φορά

Ιεραρχία μνήμης και τοπικότητα

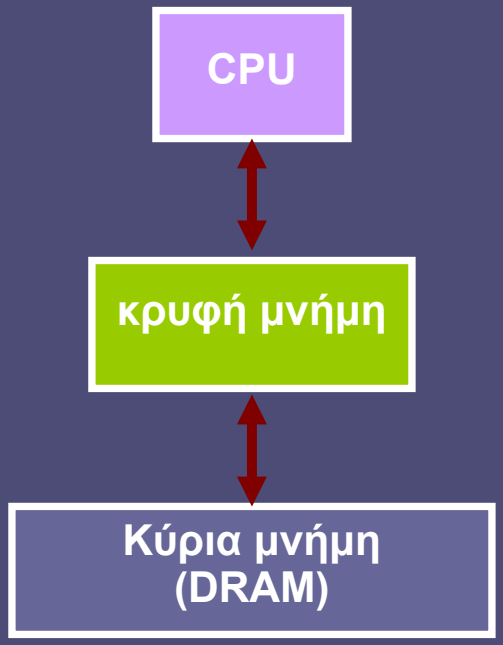
- Χωρική Τοπικότητα
  - Εάν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, είναι πολύ πιθανό να προσπελαστούν και οι γειτονικές θέσεις στο άμεσο μέλλον
    - Εντολές προγραμμάτων, δεδομένα σε πίνακες κλπ
- Εφαρμογή:
  - Όταν προσπελαστεί μια θέση μνήμης, μεταφέρονται και οι διπλανές της λέξεις στην κρυφή μνήμη
    - Γρηγορότερη προσπέλαση όταν θα ζητηθούν και αυτές

Κρυφές μνήμες

- Σημαντικό τμήμα στην ιεραρχία μνήμης
- Εξέλιξη συστημάτων κρυφής μνήμης
  - 1962: οι πρώτες ιεραρχίες μνήμης (Atlas computer)
    - Όχι όμως κρυφή μνήμη
  - 1965: η πρώτη περιγραφή κρυφής μνήμης (Wilkes)
    - Ο πρώτος υπολογιστής με κρυφή μνήμη (IBM 360/85)
  - 1968: η πρώτη χρησιμοποίηση του όρου "cache memory"
  - Στη συνέχεια:
    - Πολλαπλά επίπεδα κρυφής μνήμης (L1, L2, L3...)
    - Βελτιωμένες αρχιτεκτονικές κρυφής μνήμης

Απλό μοντέλο ιεραρχίας μνήμης

Η διαχείριση της κρυφής μνήμης γίνεται «αυτόματα» από το υλικό



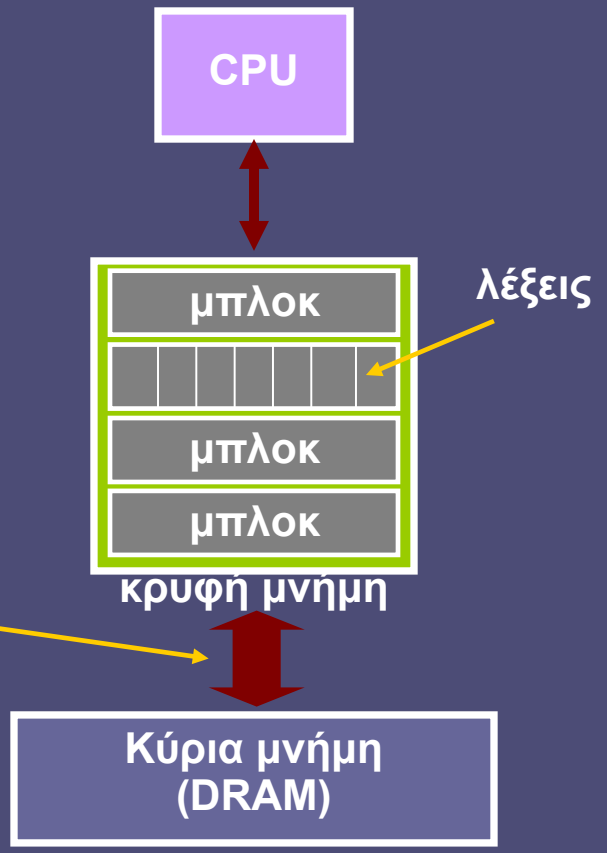
- Οι αρχές λειτουργίας της απλής ιεραρχίας μπορούν να επεκταθούν σε πολλαπλά επίπεδα (κρυφή μνήμη L1, L2, L3…)

Αποθήκευση δεδομένων στην Ιεραρχία Μνήμης

- Αποθήκευση δεδομένων
  - Τα υψηλότερα επίπεδα της ιεραρχίας μνήμης (πιο κοντά στις ΚΜΕ) είναι υποσύνολα των χαμηλότερων
  - Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται τελικά στο χαμηλότερο επίπεδο (κύρια μνήμη)
- Μεταφορά δεδομένων
  - Αντιγραφή από επίπεδο σε επίπεδο
  - Το ελάχιστο σύνολο δεδομένων που μεταφέρεται μεταξύ δύο επιπέδων ονομάζεται μπλοκ
    - Πολλαπλά bytes (πολλές λέξεις μαζί)

Μπλοκ (γραμμές) κρυφής μνήμης

- Για την εκμετάλλευση της χωρικής τοπικότητας
- Όταν πρέπει να μεταφερθεί μια λέξη, μεταφέρεται το μπλοκ που την περιέχει
- Το σύστημα κύριας μνήμης έχει βελτιστοποιηθεί αρχιτεκτονικά για μεταφορές μπλοκ
- Οι σημερινοί επεξεργαστές διαθέτουν κρυφές μνήμες με μέγεθος μπλοκ ίσο με 64 bytes



Αναζήτηση δεδομένων στην Ιεραρχία Μνήμης

- Αναζήτηση δεδομένων
  - Η μονάδα επεξεργασίας ζητά **πάντοτε** τα δεδομένα/εντολές από το κοντινότερο σε αυτήν επίπεδο (κρυφή μνήμη)
  - Τα δεδομένα υπάρχουν στην κρυφή μνήμη: **hit**
    - Τα δεδομένα επιστρέφονται γρήγορα στη μονάδα επεξεργασίας
  - Τα δεδομένα δεν βρίσκονται στην κρυφή μνήμη: **miss**
    - Η αίτηση προωθείται στο επόμενο (χαμηλότερο) επίπεδο (κύρια μνήμη)
    - Το **μπλοκ** που περιέχει τα δεδομένα **αντιγράφεται** στην κρυφή μνήμη
    - Και τα δεδομένα που ζητήθηκαν επιστρέφονται στη μονάδα επεξεργασίας

Τι δημιουργεί cache misses;

- Η πρώτη φορά προσπέλασης ενός μπλοκ
  - Όταν ζητούνται από τη μονάδα επεξεργασίας μπλοκ που δεν βρέθηκαν ποτέ μέχρι τώρα στην κρυφή μνήμη
- Λόγω της πεπερασμένης χωρητικότητας της κρυφής μνήμης
  - Η κρυφή μνήμη δεν χωράει όλα τα μπλοκ ταυτόχρονα
  - Μπλοκ που τοποθετούνται στην ίδια θέση στην κρυφή μνήμη, συναγωνίζονται για τη θέση αυτή
    - Ένα νέο μπλοκ όταν τοποθετηθεί στην κρυφή μνήμη εκτοπίζει ένα προηγούμενο διαφορετικό μπλοκ που βρισκόταν στην ίδια θέση

Θέματα κρυφών μνημών

- 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..)