

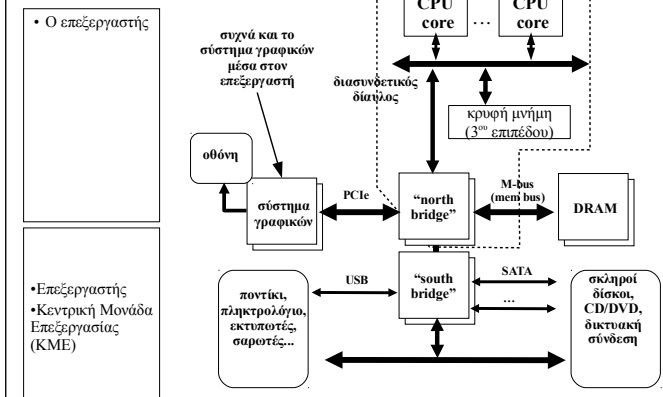
## Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (Σχεδιασμός και λειτουργία μιας απλής ΚΜΕ)

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



Μ.Στεφανιδάκης

## Η υπολογιστική μηχανή: ο επεξεργαστής



2

## Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (ΚΜΕ)

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ

- (Μικρο)επεξεργαστής
  - Ψηφιακό σύστημα που εκτελεί υπολογισμούς σε πολλαπλά βήματα
- Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας
  - Παλαιότερα: συνώνυμο του "επεξεργαστή"
  - Σήμερα: ο πυρήνας (core)
  - Στην ίδια συσκευασία (chip):
    - Κρυφή Μνήμη (1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> επιπέδου)
    - Ελεγκτές E/E (ένα μέρος αυτών)
    - Σύστημα Γραφικών (προαιρετικά)

## Σχεδιασμός μιας απλής ΚΜΕ

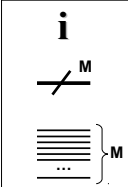
- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ

- Παραδοχές
  - Μοντέλο load-store (τύπου RISC)
    - Εντολές σταθερού μήκους
  - Βασικές κατηγορίες εντολών
    - Αριθμητικές-λογικές πράξεις
    - Ανάγνωση-εγγραφή από/στη μνήμη
    - Εντολές διακλάδωσης
  - N καταχωρητές γενικού σκοπού
  - Απλουστευμένο μοντέλο μνήμης
    - Ως «κουτί» που δέχεται διεύθυνση και επιστρέφει δεδομένα και εντολές
    - Αντιπροσωπεύει στην πραγματικότητα μια ιεραρχία μνήμης

**i**  
Όλες οι σύγχρονες ΚΜΕ είναι πολύπλοκες!

## Εκτέλεση πράξεων: ΑΛΜ

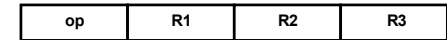
- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ



- Αριθμητική-Λογική Μονάδα (ΑΛΜ)
  - Arithmetic-Logic Unit (ALU)
    - Εκτέλεση αριθμητικών και λογικών πράξεων
    - Εκτέλεση συγκρίσεων (για διακλάδωση υπό συνθήκη)
    - Υπολογισμός διευθύνσεων (για προσπέλαση μνήμης)

## Εντολές για αριθμητικές – λογικές πράξεις

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ

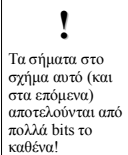


$R3 \leftarrow R1 \text{ op } R2$

- Σε κάθε εκτέλεση εντολής
  - Ανάγνωση από 2 καταχωρητές
  - Εγγραφή σε 1 καταχωρητή
- Ίδια ροή δεδομένων
  - διαφορετική επιλεγόμενη πράξη

## Συστοιχία καταχωρητών (register file)

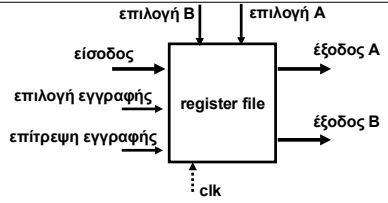
- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές



- Ανάγνωση: Επιλογή A και Επιλογή B
  - Ποιων καταχωρητών το περιεχόμενο θα εμφανιστεί στην αντίστοιχη έξοδο

## Συστοιχία καταχωρητών (register file)

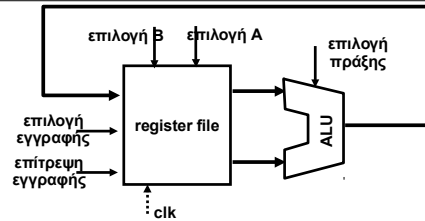
- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές



- Εγγραφή: στη θετική ακμή του clk
  - Στον καταχωρητή που ορίζει η επιλογή εγγραφής, εάν το επιτρέπει η επιλογή εγγραφής

## Ένα απλό μονοπάτι δεδομένων (datapath)

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath



- Εκτέλεση μιας εντολής ανά κύκλο ρολογιού
- **Ανάγνωση και εγγραφή στον ίδιο κύκλο;**
  - Ναι, η ανάγνωση θα δώσει το αποτέλεσμα της εγγραφής του προηγούμενου κύκλου
  - Ενώ η εγγραφή θα είναι διαθέσιμη για ανάγνωση στον επόμενο κύκλο

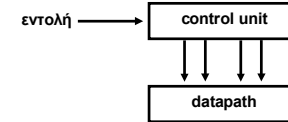
;  
Ποιος οδηγεί τα  
σήματα ελέγχου;

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

9

## Η μονάδα ελέγχου (control unit)

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου



- Αποκωδικοποίηση bits της εντολής
  - Επιλογή καταχωρητών προέλευσης δεδομένων
  - Επιλογή καταχωρητή αποθήκευσης αποτελέσματος
  - Επιλογή λειτουργίας ΑΛΜ
  - Το δυσκολότερο στη σχεδίαση τμήμα της ΚΜΕ

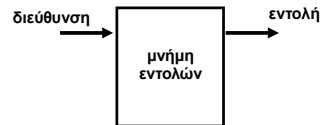
;  
Από πού  
προέρχονται οι  
εντολές;

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

10

## Η «μνήμη εντολών»

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές



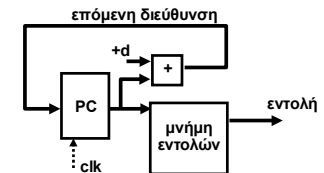
- Μια χρήσιμη αφαίρεση
  - Στην πραγματικότητα
    - Αντιπροσωπεύει μια ιεραρχία μνήμης
    - Από την κρυφή μνήμη 1<sup>η</sup> επιπέδου μέχρι την κύρια μνήμη
    - Πιθανόν να μην είναι δυνατή η ανάκτηση εντολής σε κάθε έναν κύκλο ρολογιού

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

11

## Η διεύθυνση της επόμενης εντολής

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές



- Program Counter (PC)
  - Περιέχει τη διεύθυνση στη μνήμη της επόμενης εντολής
    - Αυξάνεται κατά την εκτέλεση κάθε εντολής
    - Επόμενη διεύθυνση = τρέχουσα + d

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

12

## Ο κύκλος μηχανής

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές

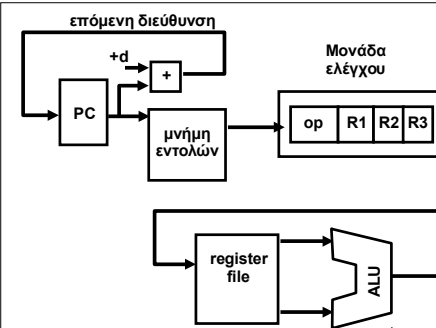
;

Ποια στάδια χρησιμοποιούν οι εντολές για αριθμητικές και λογικές πράξεις;

- **Στάδια εκτέλεσης εντολής**
  - **Instruction Fetch (IF)**
    - Ανάκτηση εντολής προς εκτέλεση
  - **Instruction Decode (ID)**
    - Επιλογή δεδομένων και λειτουργιών ανάλογα με εντολή
  - **Execute (EX)**
    - Εκτέλεση υπολογισμού στην ΑΛΜ
  - **Data Memory Access (DM)**
    - Προσπέλαση μνήμης δεδομένων
  - **Write Back (WB)**
    - Αποθήκευση αποτελεσμάτων σε καταχωρητή

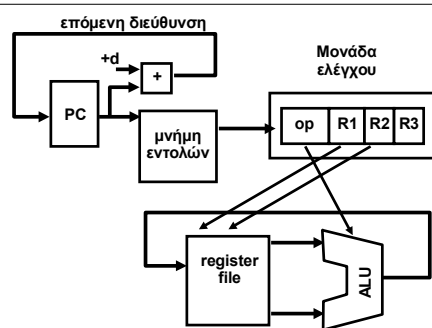
## Instruction Fetch (IF)

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές



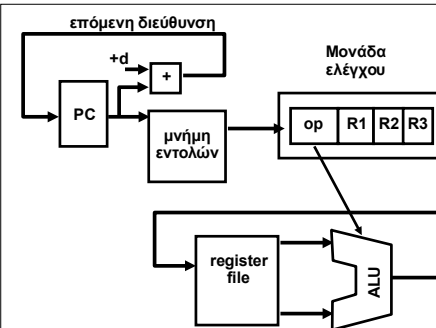
## Instruction Decode (ID)

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές



## Execute (EX)

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές

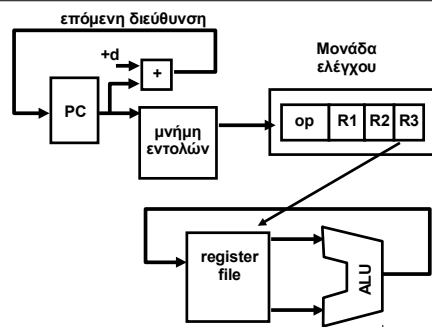


## Write Back (WB)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- ALM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές

;

Τι πρέπει να αλλάξει για την χρήση μιας σταθεράς στις πράξεις



## Εντολές διακλάδωσης (branch ή jump)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- ALM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις

### Παράδειγμα

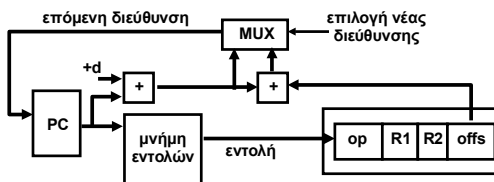
beq	R1	R2	offset
-----	----	----	--------

if R1 == R2 then PC ← PC + offset  
“branch if equal”

- Διακλάδωση υπό συνθήκη
  - Βασισμένο σε αποτέλεσμα πράξης ALM
- Σχετική διεύθυνση
- Παραδοχή: υπολογισμός συνθήκης και διακλάδωση στην ίδια εντολή

## Διακλαδώσεις και ενημέρωση PC

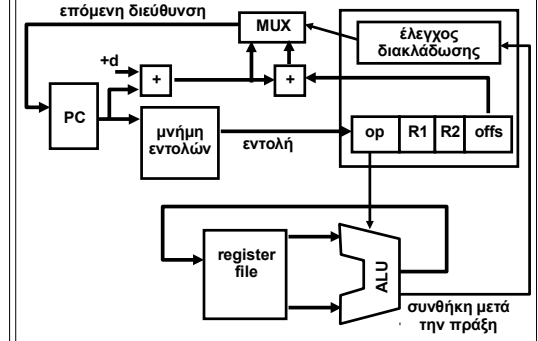
- Ο επεξεργαστής
- KME
- ALM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις



- Επιλογή νέας (επόμενης) διεύθυνσης
  - Η νέα τιμή του PC
  - Από τη μονάδα ελέγχου
  - Σύμφωνα με τιμές από πράξη στην ALM
    - Π.χ. σύγκριση 2 καταχωρητών (αφαίρεση τιμών τους)

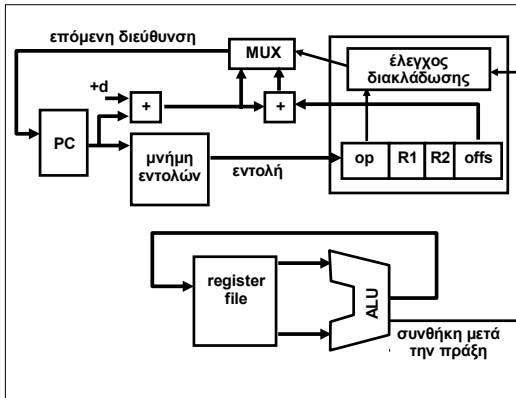
## Execute (EX)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- ALM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις



## Ενημέρωση PC (“DM”)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- ALM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

21

## Εντολές προσπέλασης μνήμης (load-store)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- ALM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσπέλαση μνήμης

### Παράδειγμα

load	R1	R2	offset
------	----	----	--------

$$R1 \leftarrow \text{mem}[R2 + \text{offset}]$$

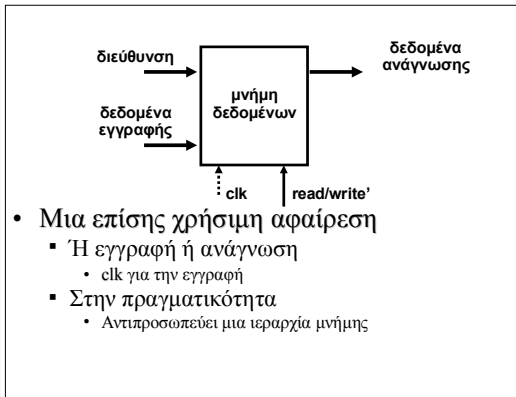
- Μόνο οι εντολές load και store προσπελαίνουν τη μνήμη δεδομένων
- Η διεύθυνση μνήμης παράγεται από την ALM
  - Ως άθροισμα περιεχομένου καταχωρητή + σταθεράς (offset)

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

22

## Η «μνήμη δεδομένων»

- Ο επεξεργαστής
- KME
- ALM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσπέλαση μνήμης



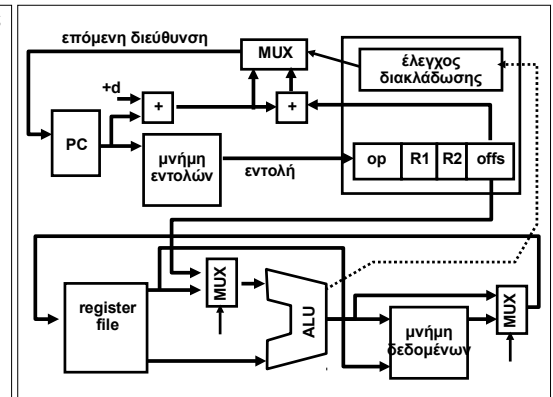
- Μια επίσης χρήσιμη αφαίρεση
  - Η εγγραφή ή ανάγνωση
    - clk για την εγγραφή
  - Στην πραγματικότητα
    - Αντιπροσωπεύει μια ιεραρχία μνήμης

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

23

## Προσπέλαση μνήμης δεδομένων

- Ο επεξεργαστής
- KME
- ALM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσπέλαση μνήμης

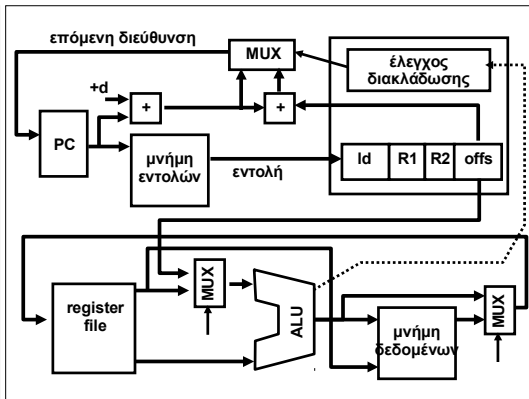


Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

24

## Execute (EX)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- AΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσπέλαση μνήμης

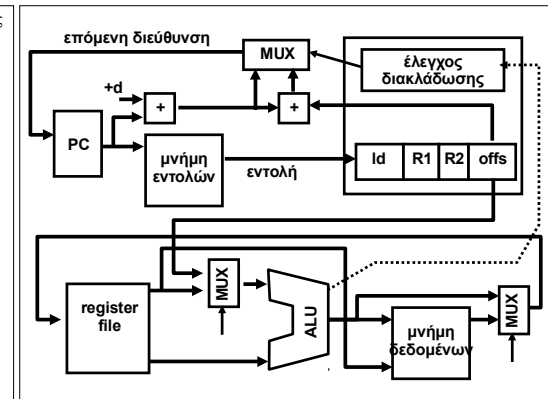


Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

25

## Data Memory Access (DM)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- AΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσπέλαση μνήμης

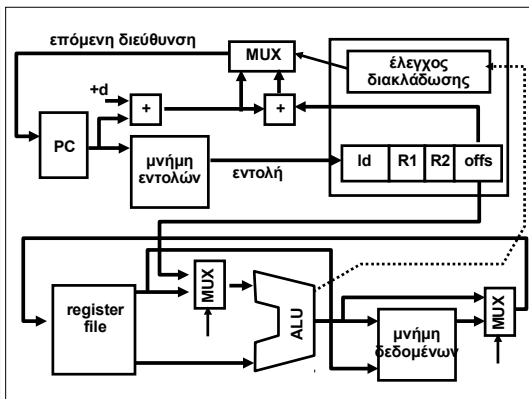


Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

26

## Write Back (WB)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- AΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσπέλαση μνήμης



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

27

## Σύνοψη λειτουργίας KME

- Ο επεξεργαστής
- KME
- AΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσπέλαση μνήμης
- Σύνοψη

- Κύκλοι ρολογιού ανά εντολή
  - Clocks per Instruction (CPI)
- Περίοδος κύκλου ρολογιού
  - Clock Cycle (Period) (CC)
- Στο σημερινό παράδειγμα KME
  - $CPI = 1$
  - CC σταθερό ανεξάρτητα από είδος εντολής
  - CC εξαρτάται από την πιο χρονοβόρα πράξη!
  - Όχι αποδοτικό σχήμα
  - Υπάρχει τεχνική για βελτίωση της απόδοσης:
    - (στο επόμενο μάθημα)

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

28