

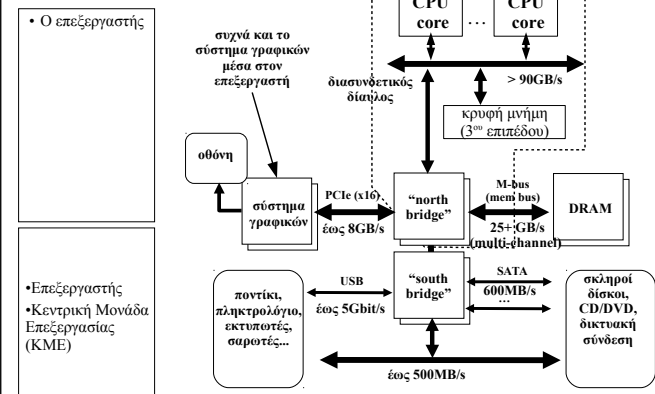
Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (Σχεδιασμός και λειτουργία μιας απλής ΚΜΕ)

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



Μ.Στεφανιδάκης

Η υπολογιστική μηχανή: ο επεξεργαστής



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

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”
 - Στην ίδια συσκευασία (chip) σήμερα:
 - Κρυφή Μνήμη (1^ο, 2^ο ή και 3^ο επιπέδου)
 - Ελεγκτές E/E (ένα μέρος αυτών)
 - Σύστημα Γραφικών (προαιρετικά)

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

3

Σχεδιασμός μιας απλής ΚΜΕ

- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ

Παραδοχές

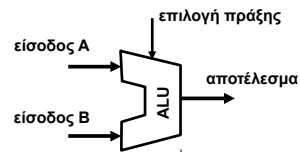
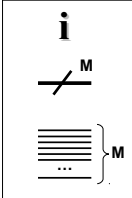
- Μοντέλο load-store (τύπου RISC)
 - Εντολές σταθερού μήκους
- Βασικές κατηγορίες εντολών
 - Αριθμητικές-λογικές πράξεις
 - Ανάγνωση-εγγραφή από/στη μνήμη
 - Εντολές διακλάδωσης
- N καταχωρητές γενικού σκοπού
- Απλουστευμένο μοντέλο μνήμης
 - Ως “κουτί” που δέχεται διευθύνσεις και επιστρέφει δεδομένα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

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

4

Εκτέλεση πράξεων: ΑΛΜ

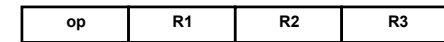
- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ



- 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



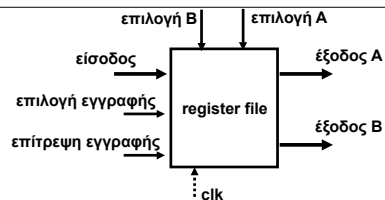
$R3 \leftarrow R1 \text{ op } R2$

- 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

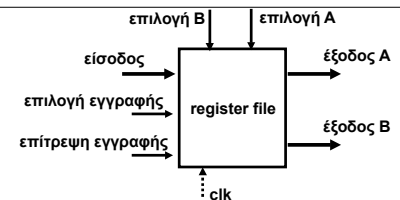
! Τα σήματα στο σχήμα αυτό (και στα επόμενα) αποτελούνται από πολλά bits το καθένα!



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

Συστοιχία καταχωρητών (register file)

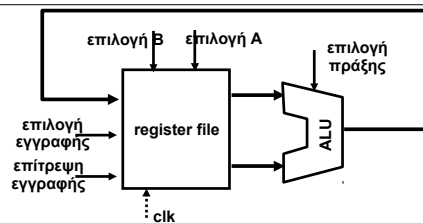
- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές



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

;

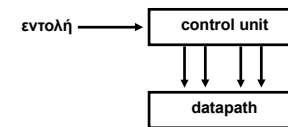
Ποιος οδηγεί τα σήματα ελέγχου;

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

;

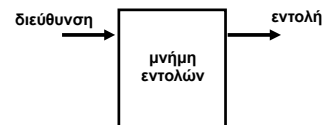
Από πού προέρχονται οι εντολές;

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

10

Η “μνήμη εντολών”

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



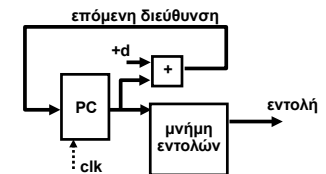
- Μια χρήσιμη αφαίρεση
 - Στην πραγματικότητα
 - Αντιπροσωπεύει μια ιεραρχία μνήμης
 - Από την κρυφή μνήμη 1^{ου} επιπέδου μέχρι την κύρια μνήμη
 - Πιθανόν να μην είναι δυνατή η ανάκτηση εντολής σε κάθε έναν κύκλο ρολογιού

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
- KME
- AΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές

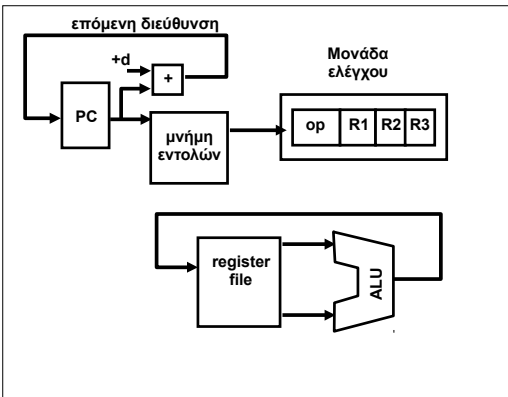
;

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 AΛΜ
 - **Data Memory Access (DM)**
 - Προσπέλαση μνήμης δεδομένων
 - **Write Back (WB)**
 - Αποθήκευση αποτελεσμάτων σε καταχωρητή

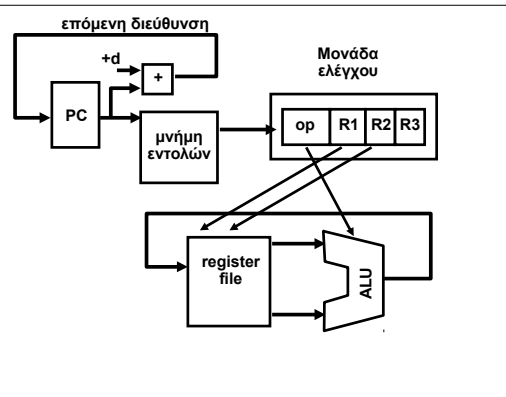
Instruction Fetch (IF)

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



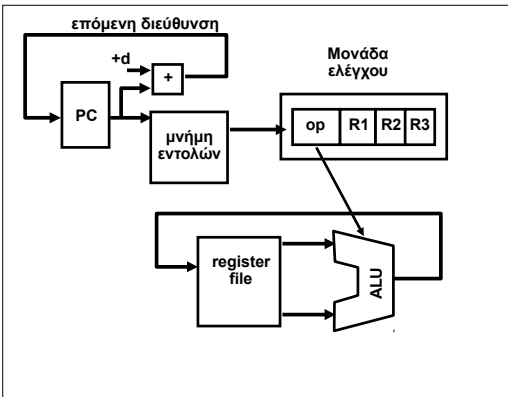
Instruction Decode (ID)

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



Execute (EX)

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

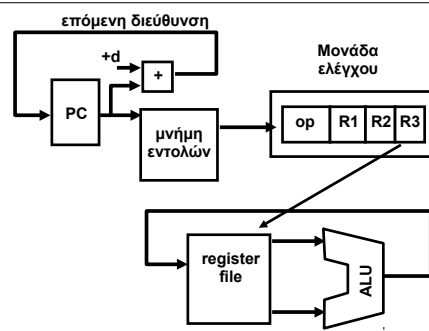


Write Back (WB)

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

;

Τι πρέπει να αλλάξει για την χρήση μιας σταθεράς στις πράξεις;



Εντολές διακλάδωσης (branch ή jump)

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

Παράδειγμα

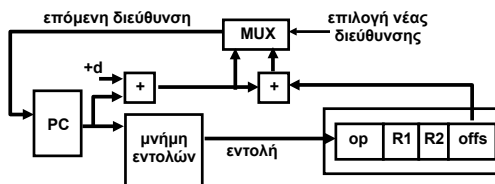
beq	R1	R2	offset
-----	----	----	--------

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

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

Διακλαδώσεις και ενημέρωση PC

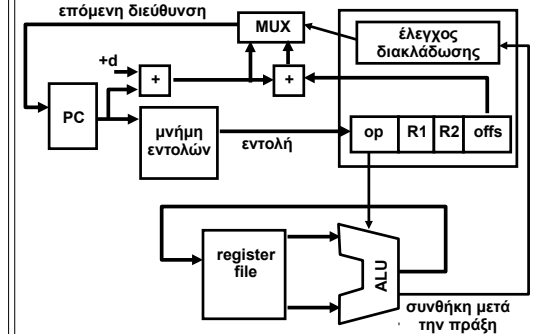
- Ο επεξεργαστής
- ΚΜΕ
- ΑΛΜ
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις



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

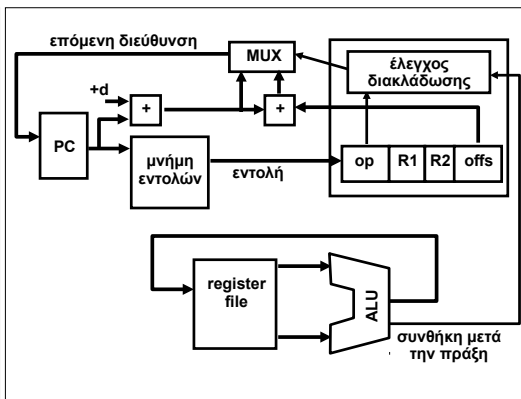
Execute (EX)

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



Ενημέρωση PC (“DM”)

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



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

21

Εντολές προσπέλασης μνήμης (load-store)

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

Παράδειγμα

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

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

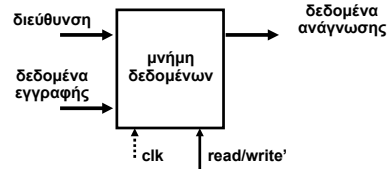
- Μόνο οι εντολές load και store προσπελαίνουν τη μνήμη δεδομένων
- Η διεύθυνση μνήμης παράγεται από την AΛΜ
 - Ως άθροισμα περιεχομένου καταχωρητή + σταθεράς (offset)

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

22

Η “μνήμη δεδομένων”

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



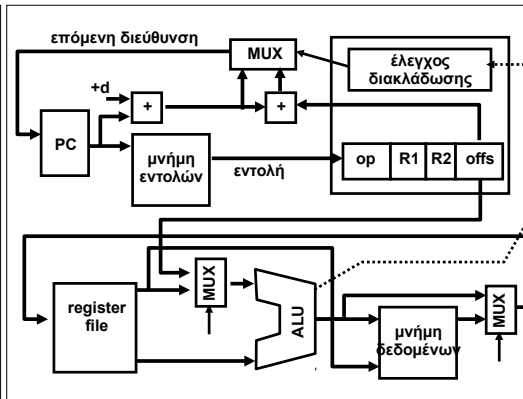
- Μια επίσης χρήσιμη αφαίρεση
 - Η εγγραφή ή ανάγνωση
 - clk για την εγγραφή
 - Στην πραγματικότητα
 - Αντιπροσωπεύει μια ιεραρχία μνήμης

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

23

Προσπέλαση μνήμης δεδομένων

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

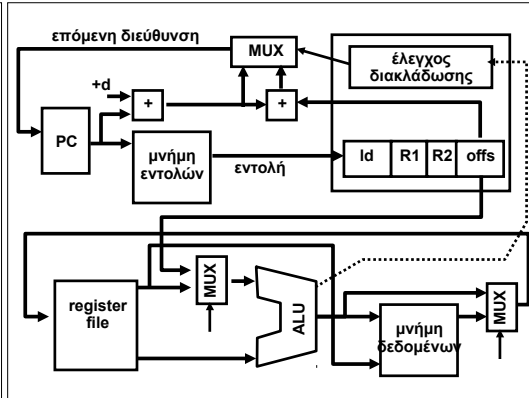


Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

24

Execute (EX)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- AAM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσέλαση μνήμης

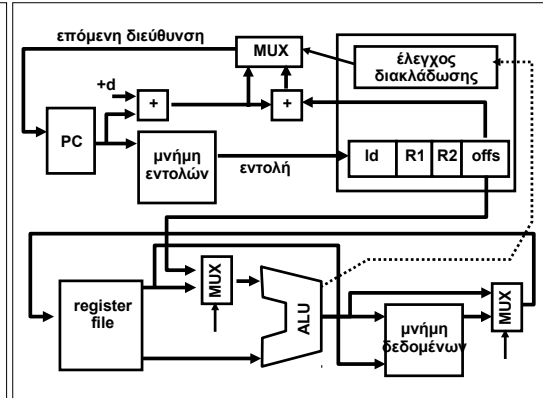


Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

25

Data Memory Access (DM)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- AAM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσέλαση μνήμης

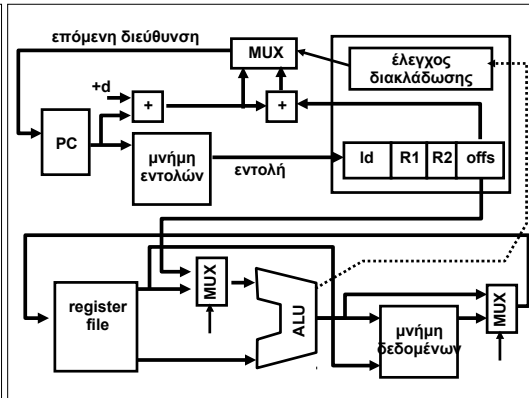


Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

26

Write Back (WB)

- Ο επεξεργαστής
- KME
- AAM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσέλαση μνήμης



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας”

27

Σύνοψη λειτουργίας KME

- Ο επεξεργαστής
- KME
- AAM
- Καταχωρητές
- Datapath
- Μονάδα Ελέγχου
- Εντολές
- Διακλαδώσεις
- Προσέλαση 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