

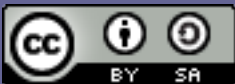
Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών
2023-24

Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας

(Σχεδιασμός μιας απλής ΚΜΕ)

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

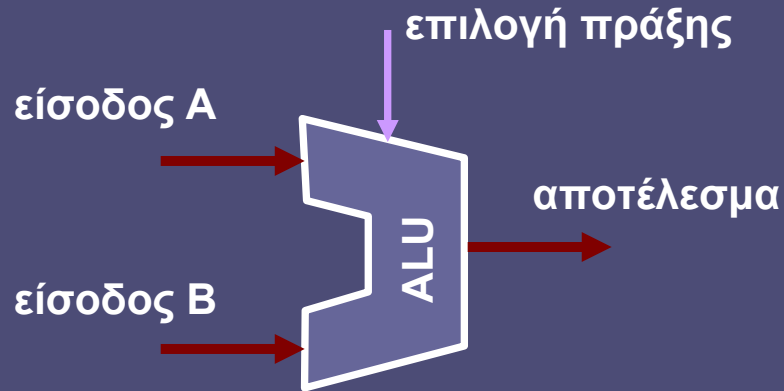
Μ.Στεφανιδάκης



Σχεδιασμός μιας απλής ΚΜΕ

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

Εκτέλεση πράξεων: 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)

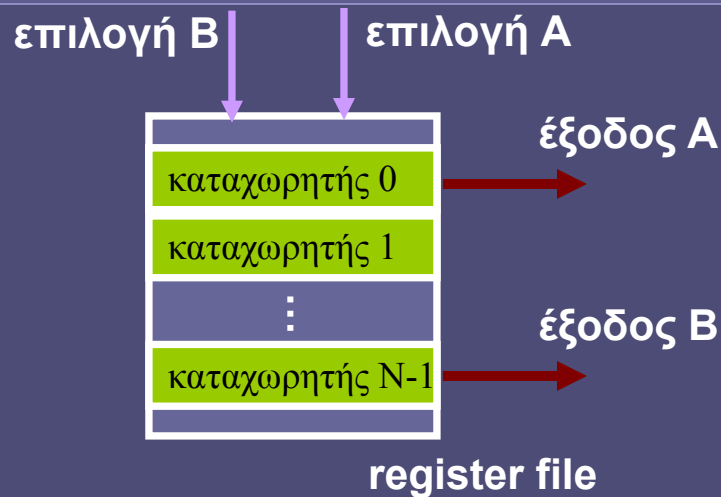
Εντολές για αριθμητικές – λογικές πράξεις



$$Rz \leftarrow Rx \text{ op } Ry$$

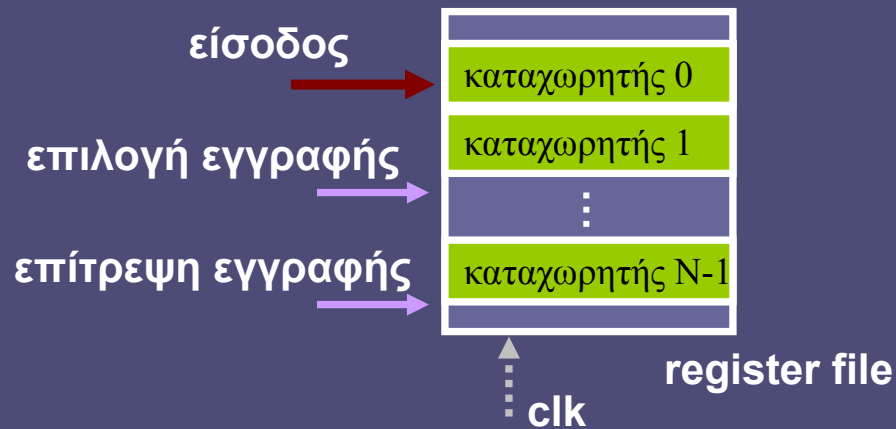
- Σε κάθε εκτέλεση εντολής
 - Ανάγνωση από 2 καταχωρητές
 - Εγγραφή σε 1 καταχωρητή
- Ίδια ροή δεδομένων
 - Διαφορετική επιλεγόμενη πράξη

Συστοιχία καταχωρητών (register file)



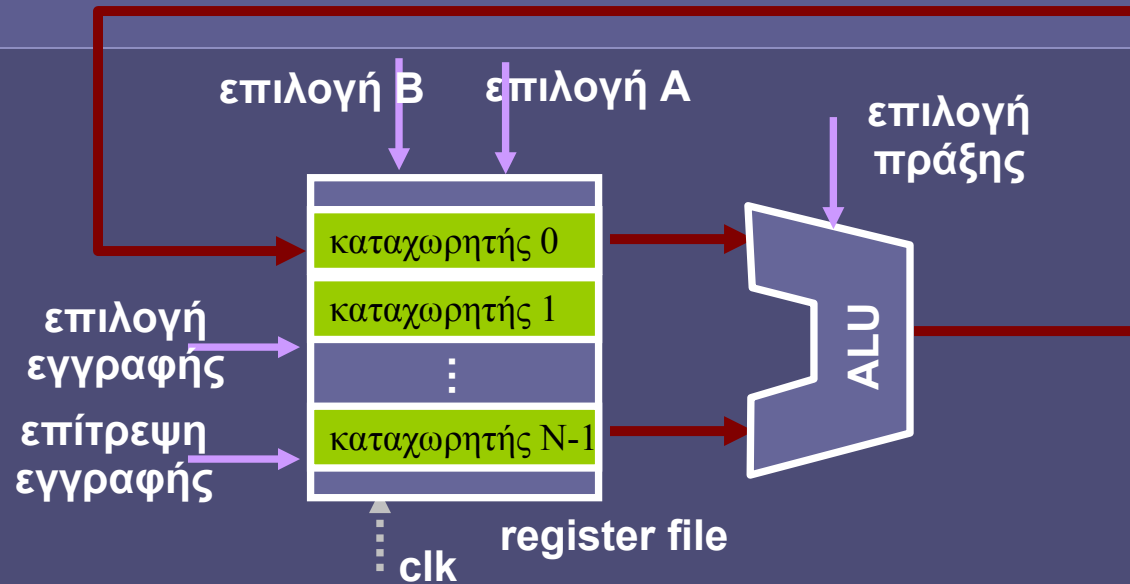
- Λειτουργία ανάγνωσης
 - Σήματα ελέγχου **επιλογή A** και **επιλογή B**
 - Ο αριθμός των καταχωρητών το περιεχόμενο των οποίων θα εμφανιστεί στην **έξοδο A** και **έξοδο B** αντίστοιχα

Συστοιχία καταχωρητών (register file)



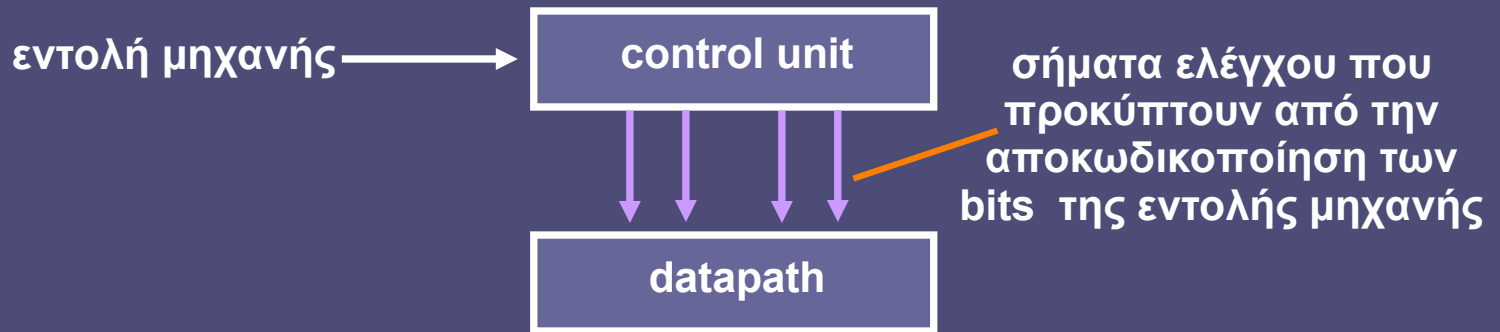
- Λειτουργία εγγραφής
 - Αποθήκευση της **εισόδου** στη θετική ακμή του **clk**
 - Στον καταχωρητή που ορίζει η **επιλογή εγγραφής**, εάν το επιτρέπει η **επίτρεψη εγγραφής**

Ένα απλό μονοπάτι δεδομένων (datapath)



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

Η μονάδα ελέγχου (control unit)



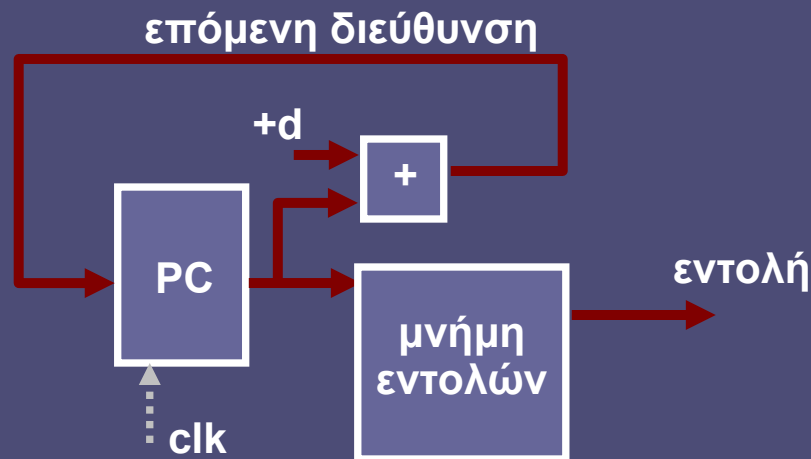
- Αποκωδικοποίηση bits της εντολής
 - Επιλογή καταχωρητών προέλευσης δεδομένων
 - Επιλογή καταχωρητή αποθήκευσης αποτελέσματος
 - Επιλογή λειτουργίας ALU
 - Το δυσκολότερο στη σχεδίαση τμήμα της ΚΜΕ

Η «μνήμη εντολών»



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

Η διεύθυνση της επόμενης εντολής



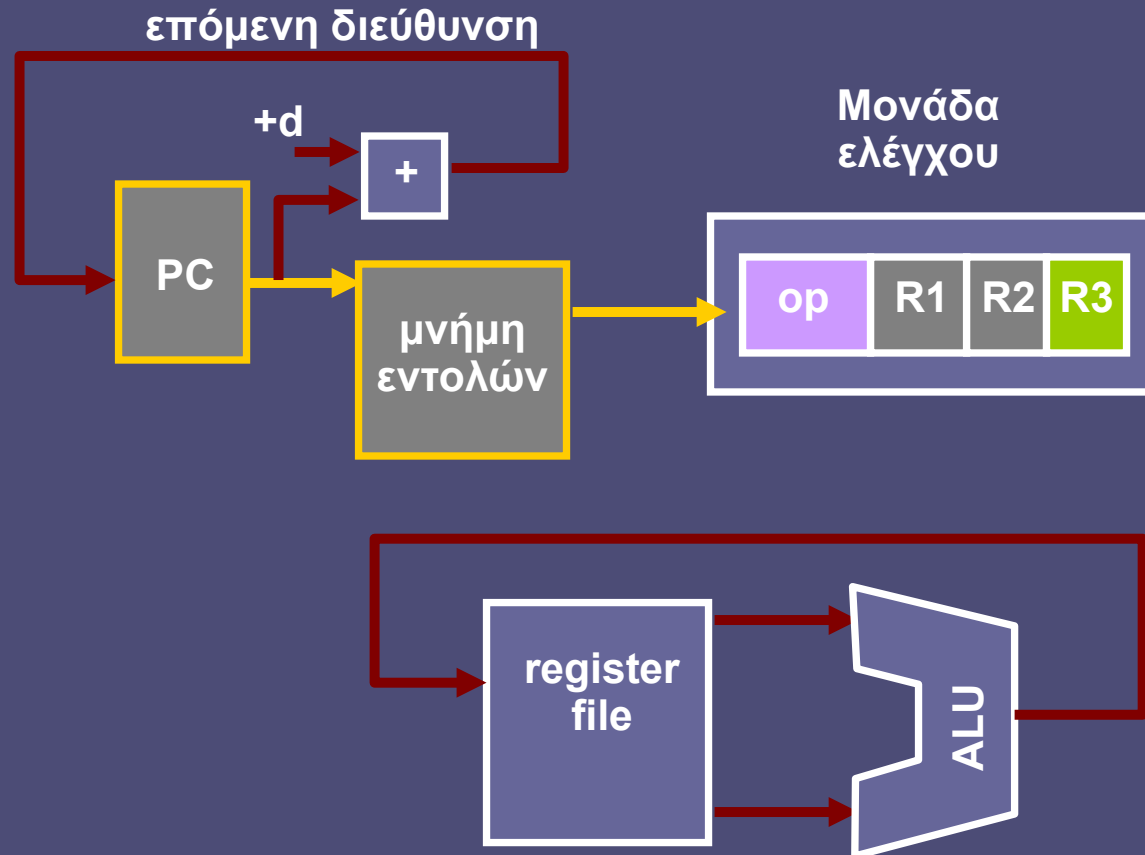
- **Program Counter (PC)**

- Περιέχει τη διεύθυνση στη μνήμη της επόμενης εντολής
- Αυξάνεται κατά την εκτέλεση κάθε εντολής
- Επόμενη διεύθυνση = τρέχουσα + d
 - d = μήκος σε bytes κάθε εντολής
 - Οι εντολές έχουν σταθερό μήκος

Ο κύκλος μηχανής

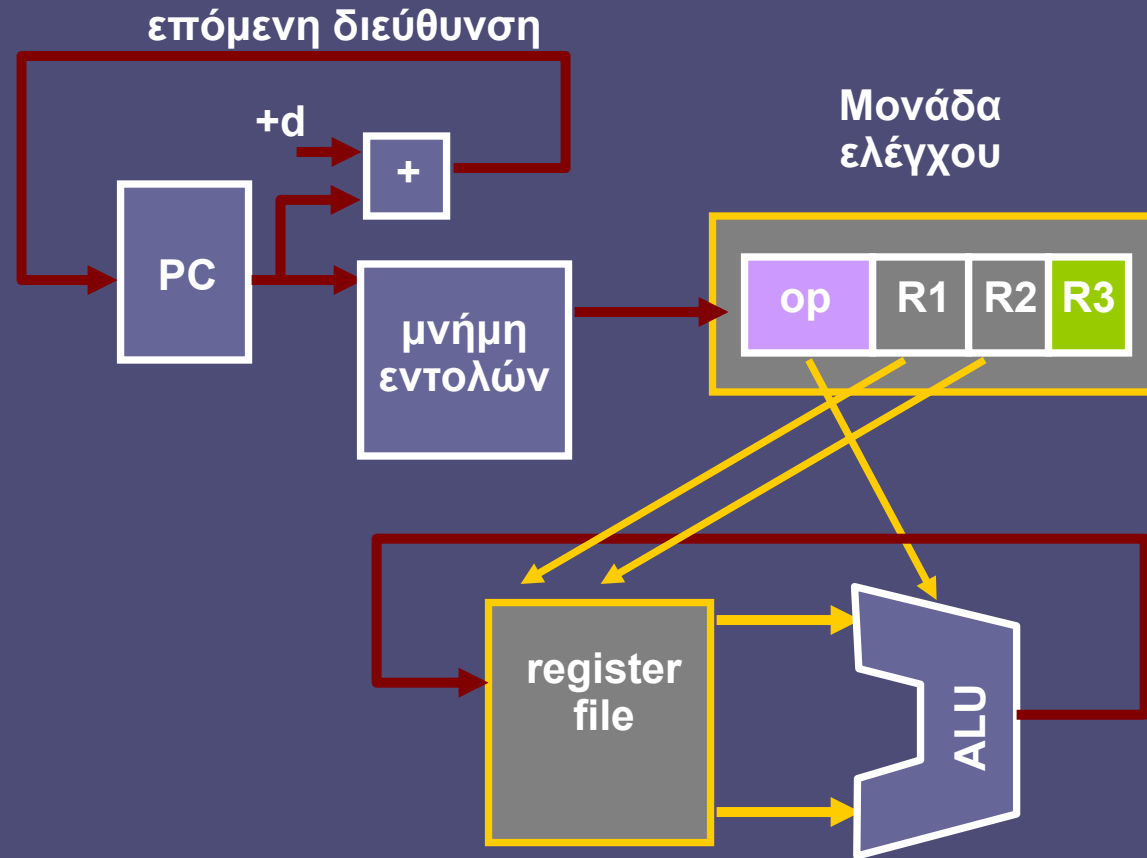
- Στάδια εκτέλεσης εντολής
 - **Instruction Fetch (IF)**
 - Ανάκτηση εντολής προς εκτέλεση
 - **Instruction Decode (ID)**
 - Επιλογή δεδομένων και λειτουργιών ανάλογα με εντολή
 - **Execute (EX)**
 - Εκτέλεση υπολογισμού στην ΑΛΜ
 - **Data Memory Access (DM)**
 - Προσπέλαση μνήμης δεδομένων
 - **Write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

Instruction Fetch (IF): Ανάκληση (όλες οι κατηγορίες εντολών)



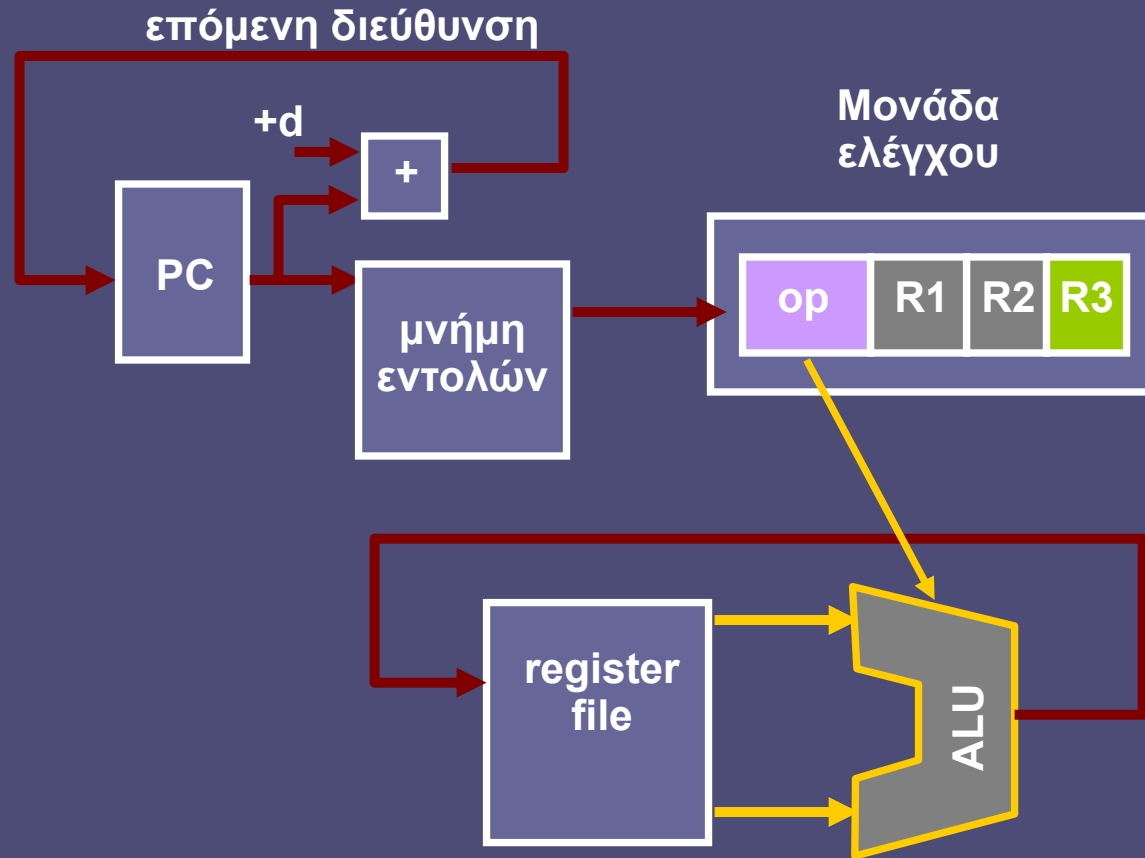
Ο Program Counter παρέχει τη διεύθυνση μνήμης από την οποία η επόμενη εντολή μηχανής εισάγεται στη μονάδα ελέγχου

Instruction Decode (ID): Αποκωδικοποίηση (αριθμητικές – λογικές πράξεις)



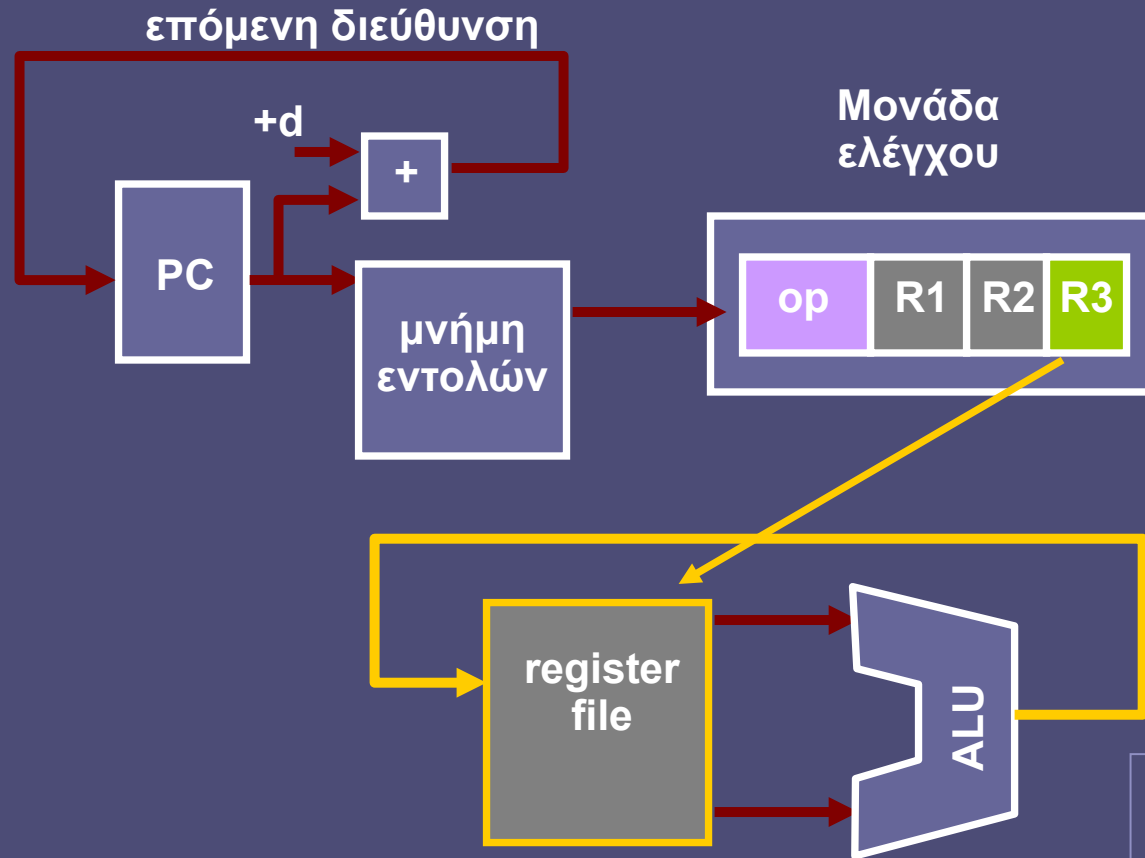
Σύμφωνα με τα bits της εντολής, επιλέγονται οι καταχωρητές που θα παρέχουν τα δεδομένα εισόδου στην πράξη και το είδος της πράξης

Execute (EX): Εκτέλεση (αριθμητικές – λογικές πράξεις)



Η επιλεγμένη πράξη εκτελείται στην αριθμητική – λογική μονάδα

Write Back (WB): Αποθήκευση (αριθμητικές – λογικές πράξεις)



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

Το αποτέλεσμα αποθηκεύεται στον καταχωρητή που επιλέγουν τα bits της εντολής

Εντολές διακλάδωσης (branch ή jump)

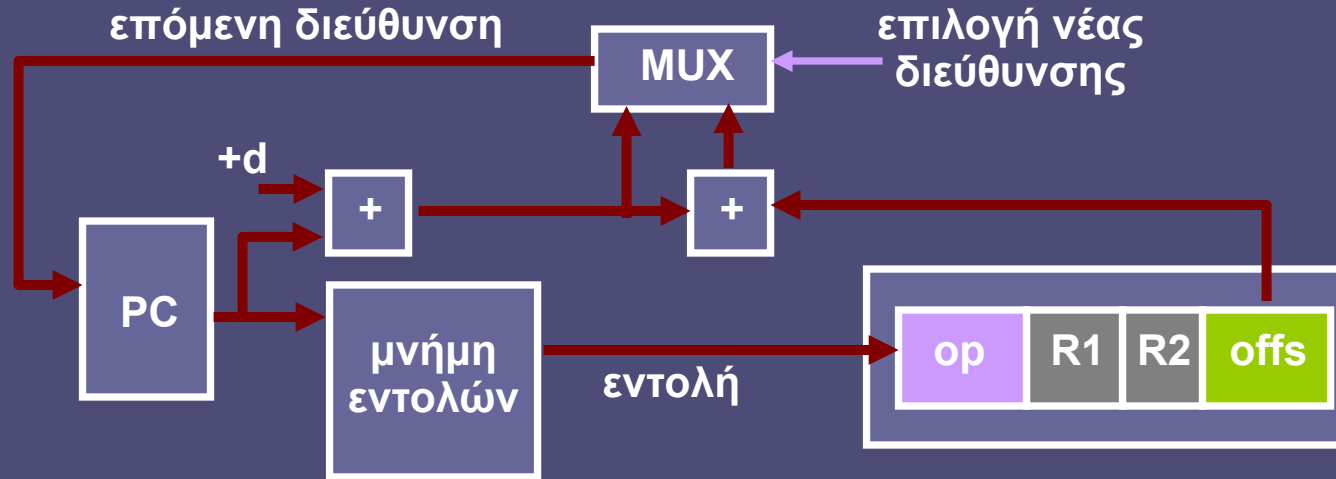
- Παράδειγμα



if Rx == Ry then PC ← PC + offset
“branch if equal”

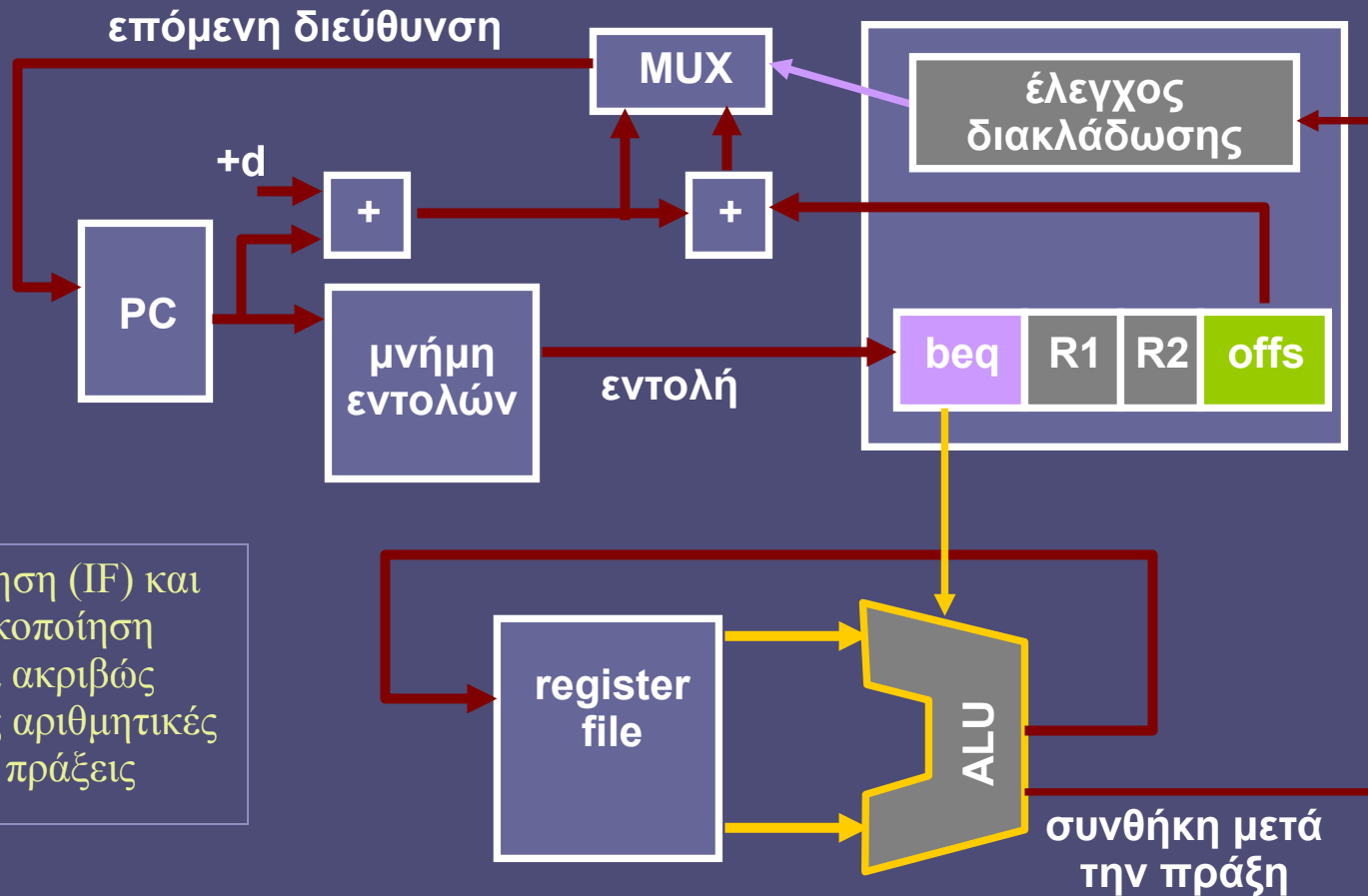
- Διακλάδωση υπό συνθήκη
 - Βασισμένο σε αποτέλεσμα πράξης ΑΛΜ
- Σχετική διεύθυνση
 - Πρόσθεση σταθεράς (\pm offset) στην τρέχουσα διεύθυνση
- Υπολογισμός συνθήκης και διακλάδωση στην ίδια εντολή

Διακλαδώσεις και ενημέρωση PC



- **Επιλογή νέας (επόμενης) διεύθυνσης**
 - Η διακλάδωση δεν εκτελείται: $PC = PC + d$
 - Η διακλάδωση εκτελείται: $PC = PC + d + \text{offset}$

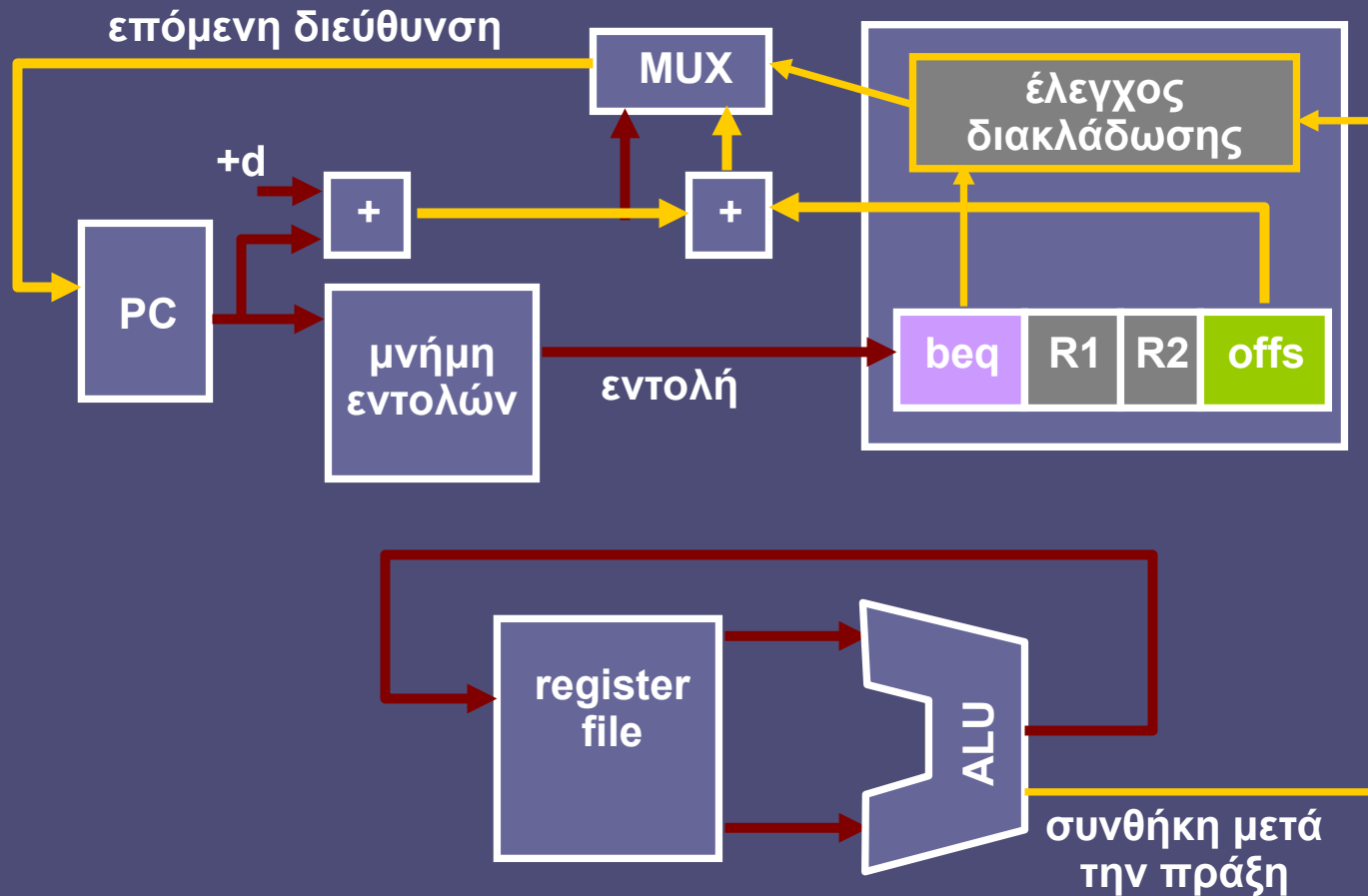
Execute (EX) (διακλαδώσεις)



Η Ανάκληση (IF) και Αποκωδικοποίηση (ID) είναι ακριβώς όπως στις αριθμητικές – λογικές πράξεις

Η Αριθμητική – Λογική Μονάδα εκτελεί πράξη σύγκρισης (αφαίρεση) μεταξύ των R1 και R2. Παράγεται η συνθήκη μετά την πράξη (π.χ. «μηδενικό αποτέλεσμα»)

Ενημέρωση PC στη φάση “DM” (διακλαδώσεις)



Σύμφωνα με τη συνθήκη μετά την εκτέλεση και τη σύγκριση που καθορίζει η εντολή (π.χ. ==) στον Program Counter προστίθεται ή όχι το offset

Εντολές προσπέλασης μνήμης (load-store)

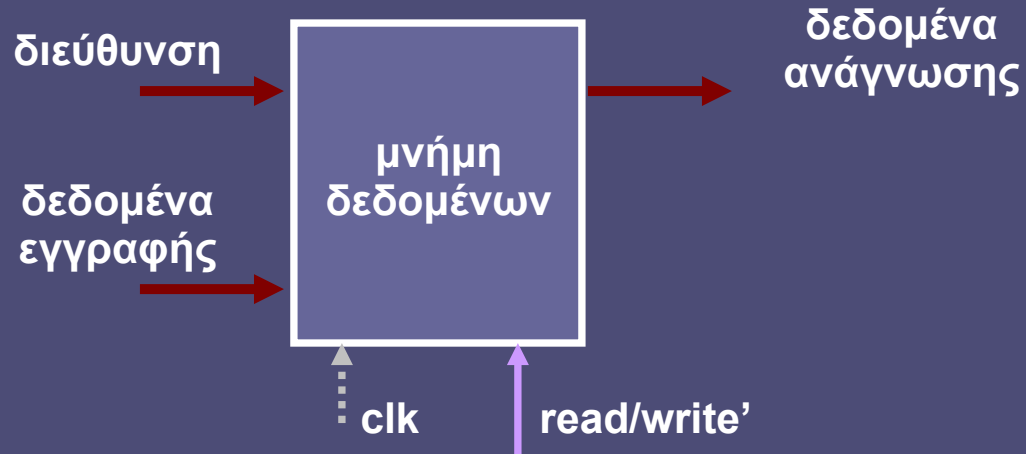
- Παράδειγμα



$Rx \leftarrow \text{mem}[Ry + \text{offset}]$

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

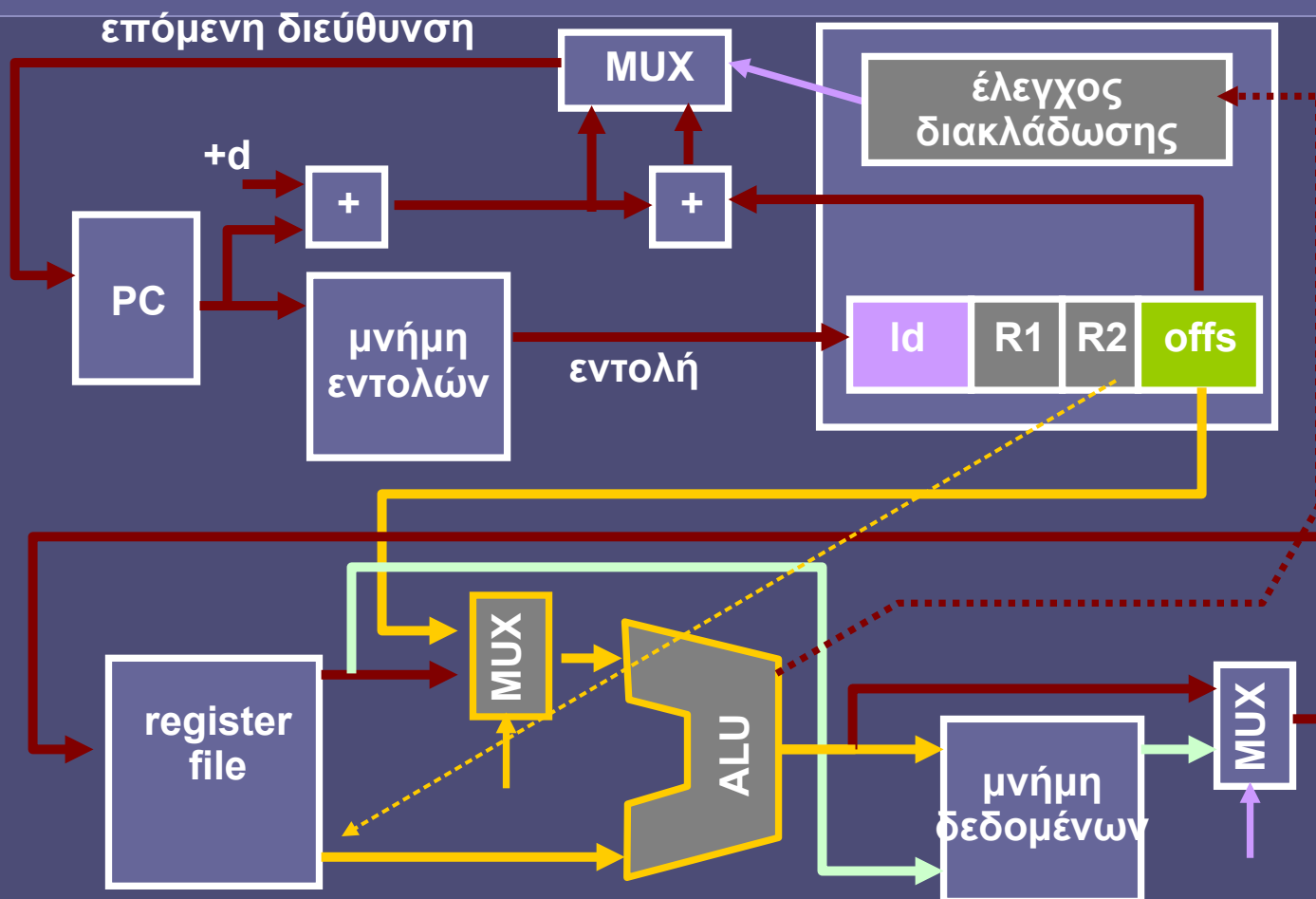
Η «μνήμη δεδομένων»



- Μια επίσης χρήσιμη αφαίρεση, στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει μια ιεραρχία μνήμης
 - Για εγγραφή ή ανάγνωση
 - **clk** για την εγγραφή

Execute (EX)

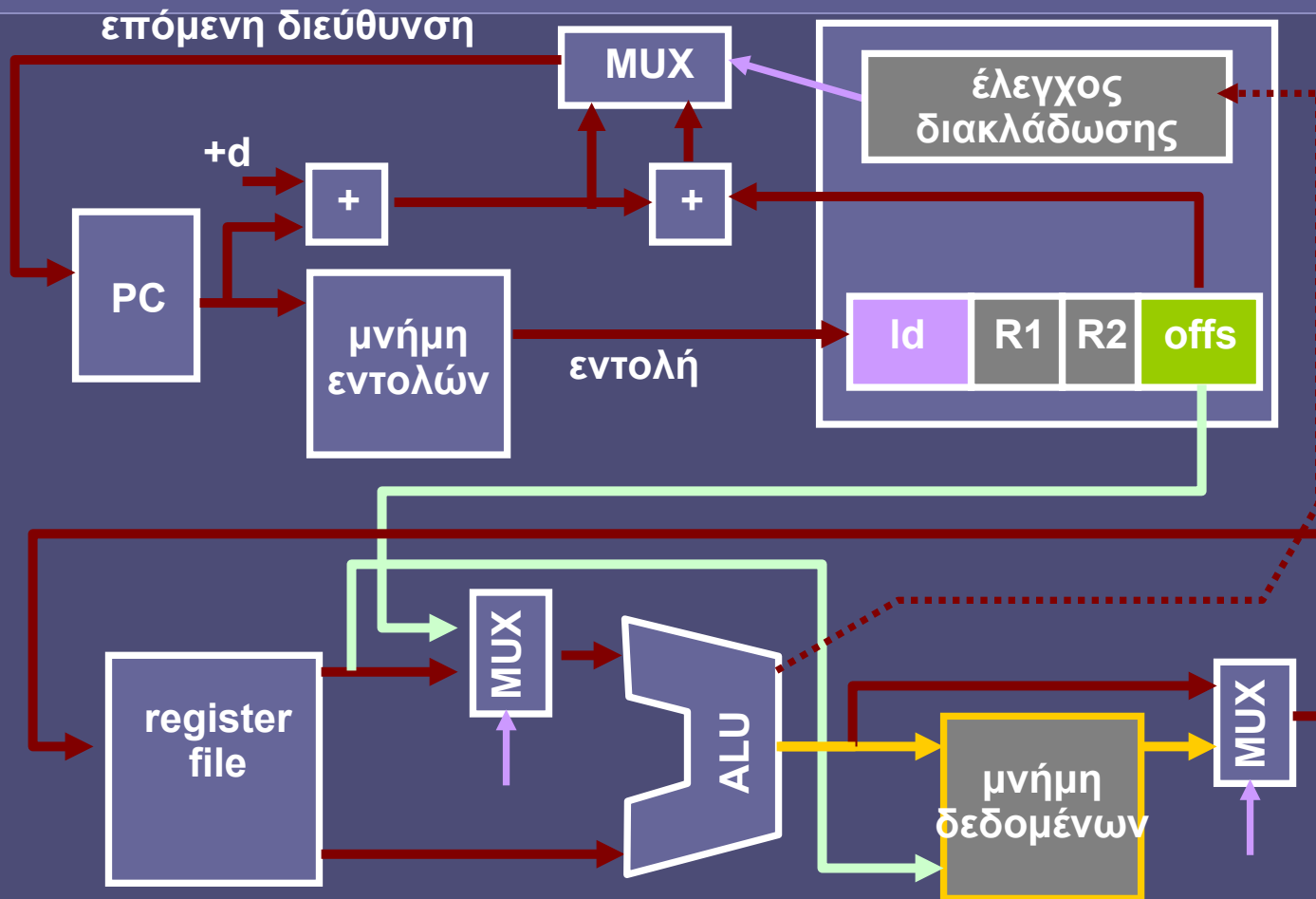
(ανάγνωση από μνήμη – load)



Στη φάση της Εκτέλεσης (EX) προστίθεται η σταθερά (offset) στο περιεχόμενο του R2 για τον σχηματισμό της διεύθυνσης ανάγνωσης

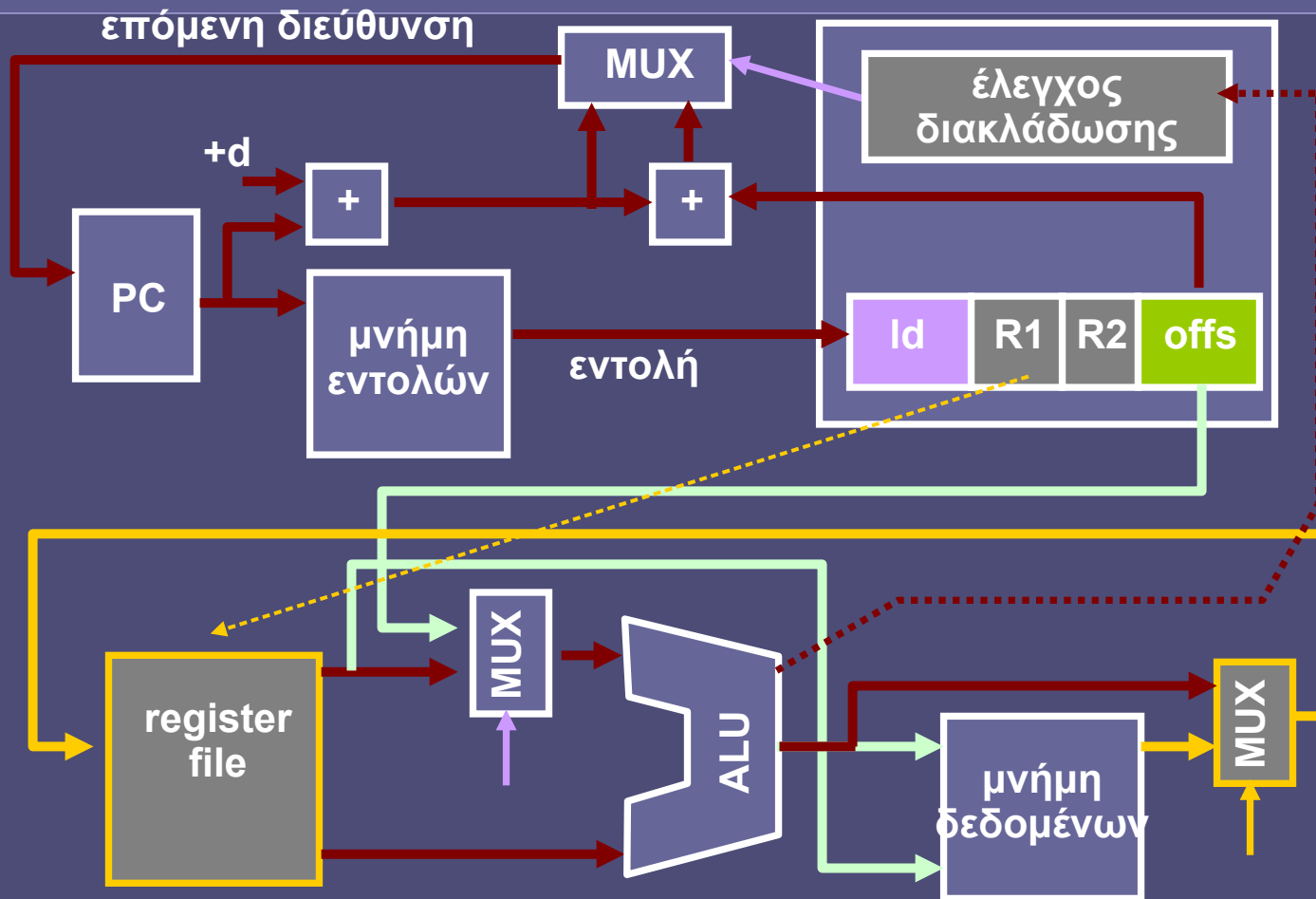
Data Memory Access (DM)

(ανάγνωση από μνήμη – load)



Ανάγνωση από τη μνήμη δεδομένων στη διεύθυνση που υπολογίστηκε πιο πριν

Write Back (WB)



Τα δεδομένα από τη μνήμη αποθηκεύονται στον καταχωρητή R1

Σύνοψη λειτουργίας της απλής ΚΜΕ

- Στο σημερινό παράδειγμα ΚΜΕ είναι
 - Κύκλοι ρολογιού ανά εντολή (Clocks per Instruction – CPI) = 1
 - Κάθε εντολή μηχανής εκτελείται σε έναν κύκλο ρολογιού
- Ο κύκλος (περίοδος) ρολογιού (Clock Cycle – CC) εξαρτάται από την πιο χρονοβόρα εντολή
 - Όχι αποδοτικό σχήμα
- Υπάρχει τεχνική για βελτίωση της απόδοσης;
 - (στο επόμενο μάθημα)