

Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών
2025-26

Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας

(Σχεδιασμός μιας απλής ΚΜΕ)

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

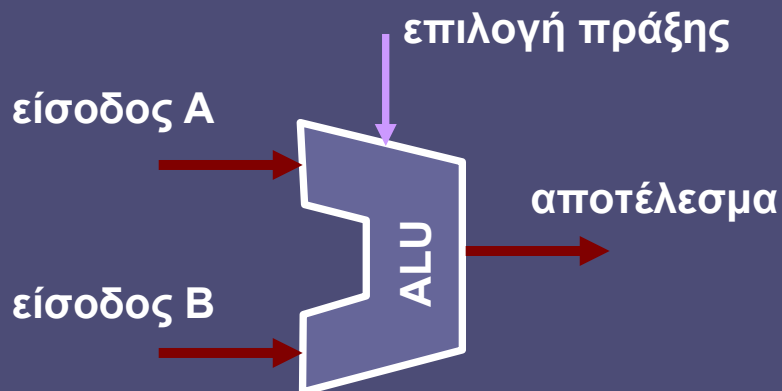
Μ.Στεφανιδάκης



Σχεδιασμός μιας απλής ΚΜΕ

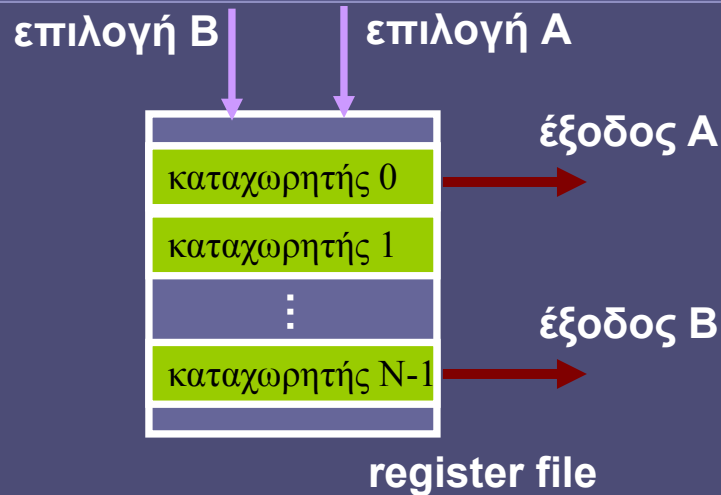
- Μοντέλο load-store (τύπου RISC)
 - Εντολές σταθερού μήκους
- Βασικές κατηγορίες εντολών μηχανής
 - Αριθμητικές-λογικές πράξεις
 - Εντολές διακλάδωσης
 - Ανάγνωση-εγγραφή από/στη μνήμη
- N καταχωρητές γενικού σκοπού
- Απλουστευμένο μοντέλο μνήμης
 - Ως διεπαφή (interface) που δέχεται διεύθυνση και επιστρέφει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

Εκτέλεση πράξεων: ΑΛΜ



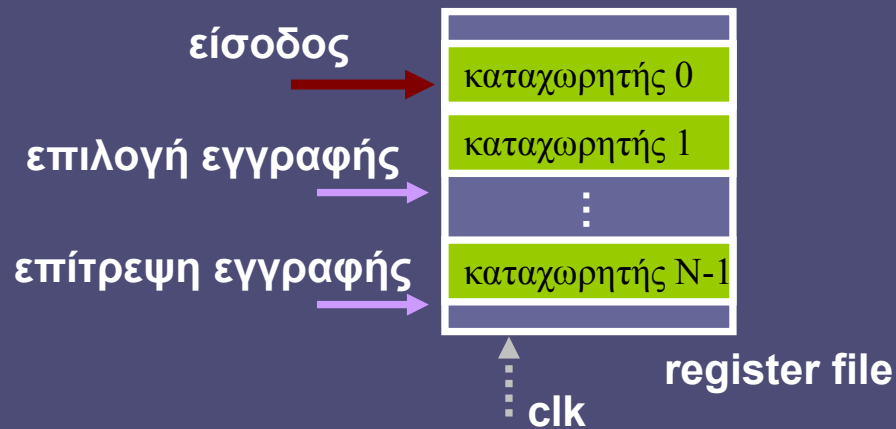
- Αριθμητική – Λογική Μονάδα (ΑΛΜ)
 - Arithmetic – Logic Unit (ALU)
 - Εκτέλεση αριθμητικών και λογικών πράξεων
 - Εκτέλεση συγκρίσεων (για διακλάδωση υπό συνθήκη)
 - Υπολογισμός διευθύνσεων (για προσπέλαση μνήμης)

Συστοιχία καταχωρητών (register file)



- **Λειτουργία ανάγνωσης**
 - Παρέχει τη μία ή και τις δύο εισόδους στην ΑΛΜ
 - Ανάλογα με το είδος της εντολής μηχανής
 - Σήματα ελέγχου «επιλογή A» και «επιλογή B»
 - Περιέχουν τον **αριθμό** (διεύθυνση) των καταχωρητών το περιεχόμενο των οποίων θα εμφανιστεί στην **έξοδο A** και **έξοδο B** αντίστοιχα

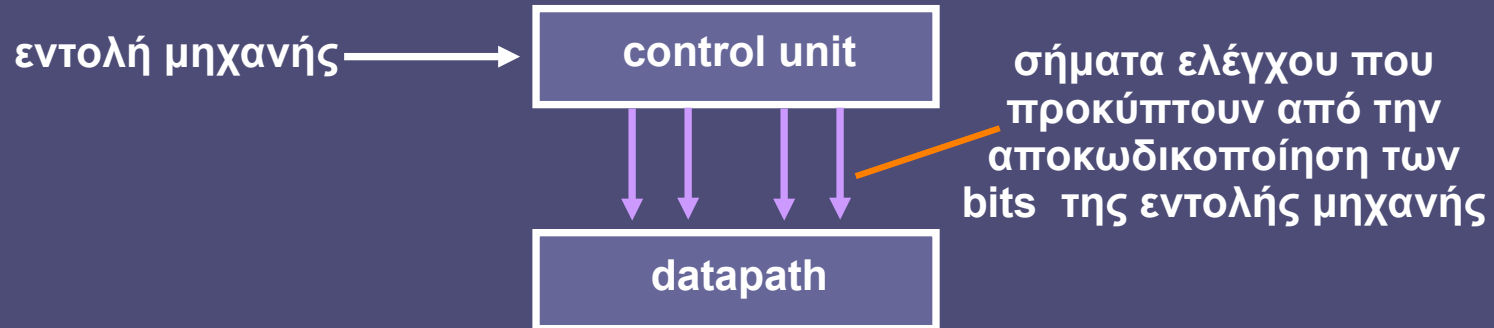
Συστοιχία καταχωρητών (register file)



- **Λειτουργία εγγραφής**

- Αποθήκευση του **αποτελέσματος** μιας εντολής (αν υπάρχει)
- Αποθήκευση της **εισόδου** στη θετική ακμή του **clk**
 - Στον καταχωρητή που ορίζει η «**επιλογή εγγραφής**», εάν το επιτρέπει η «**επίτρεψη εγγραφής**»

Η μονάδα ελέγχου (control unit)



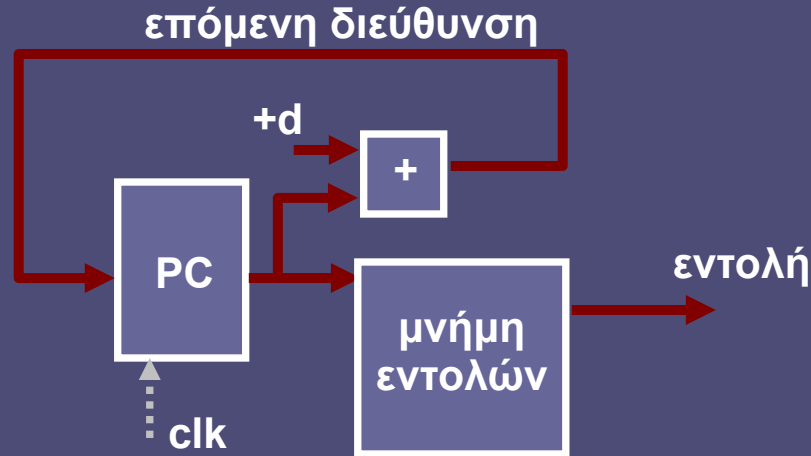
- **Αποκωδικοποίηση bits της εντολής**
 - Π.χ. για τις εντολές αριθμητικών – λογικών πράξεων:
 - Επιλογή καταχωρητών προέλευσης δεδομένων
 - Επιλογή καταχωρητή αποθήκευσης αποτελέσματος
 - Επιλογή λειτουργίας ΑΛΜ

Η «μνήμη εντολών»



- Μια χρήσιμη αφαίρεση, αντιπροσωπεύει μια ιεραρχία μνήμης
 - Από την κρυφή μνήμη 1^{ου} επιπέδου μέχρι την κύρια μνήμη
 - Στην πραγματικότητα **δεν είναι πάντα 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 = διεύθυνση τρέχουσας εντολής + d**
 - d = μήκος σε bytes τρέχουσας εντολής
 - Στο παράδειγμά μας οι εντολές έχουν σταθερό μήκος

Ο κύκλος μηχανής της ΚΜΕ

- Στάδια εκτέλεσης κάθε εντολής μηχανής
 - **Instruction Fetch (IF)**
 - Ανάκτηση εντολής προς εκτέλεση, ενημέρωση program counter
 - **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

Εντολές για αριθμητικές – λογικές πράξεις



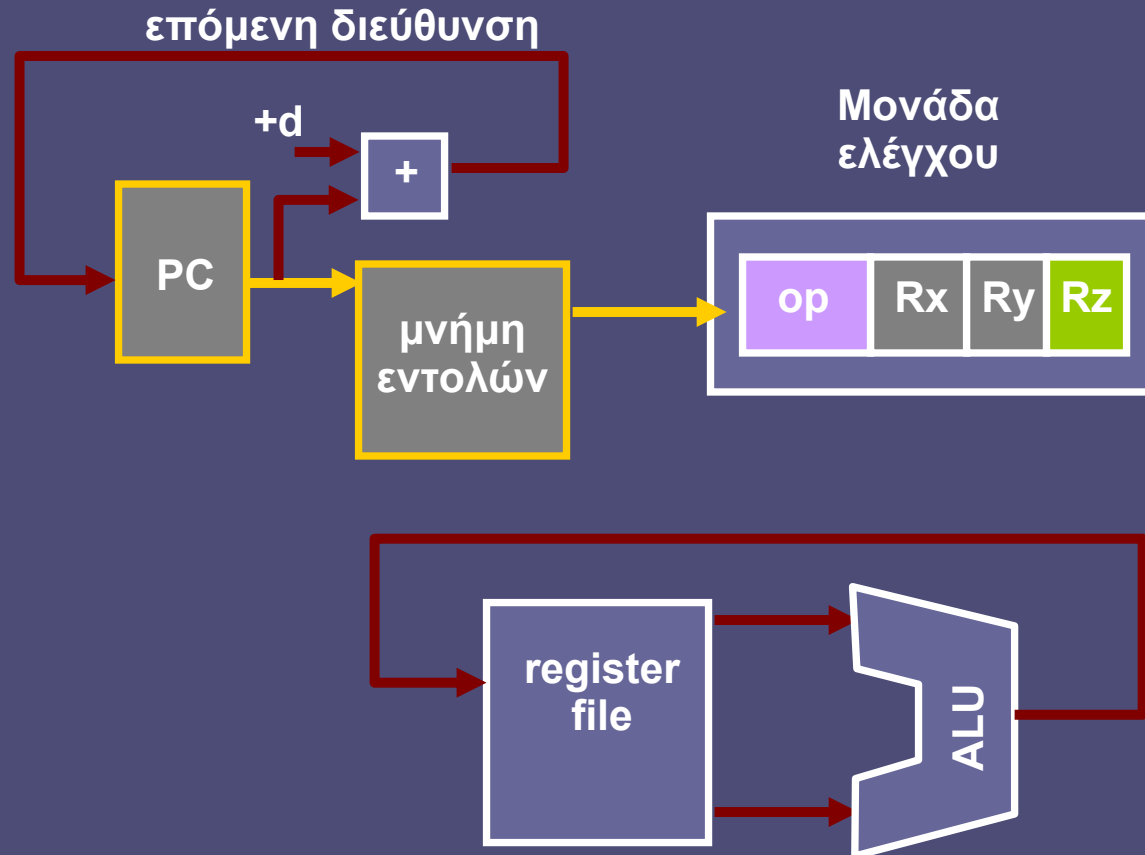
$$Rz \leftarrow Rx \text{ op } Ry$$

- Σε κάθε εκτέλεση εντολής
 - Ανάγνωση πηγών από δύο καταχωρητές
 - Εκτέλεση επιλεγμένης πράξης
 - Εγγραφή αποτελέσματος σε έναν καταχωρητή
- Ίδια ροή δεδομένων
 - Διαφορετική επιλεγόμενη πράξη

Ο κύκλος μηχανής για αριθμητικές-λογικές πράξεις

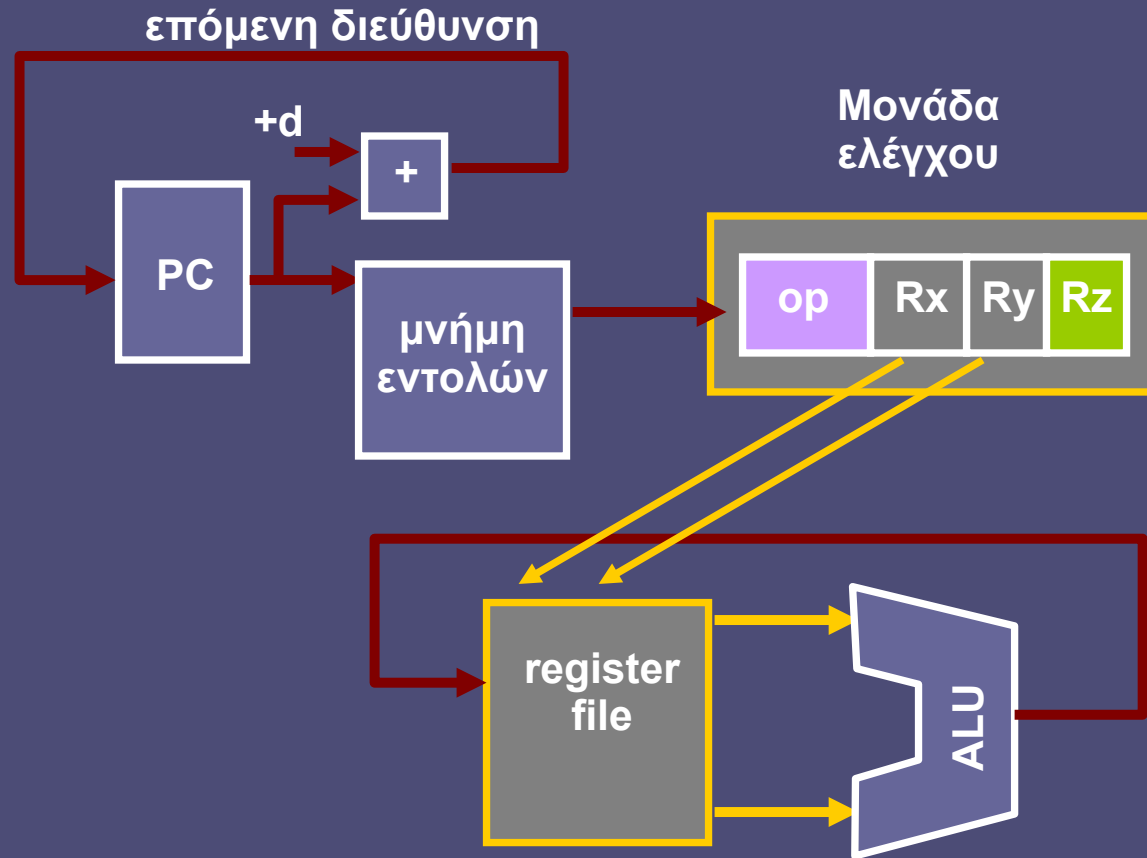
- $R_z \leftarrow R_x \text{ op } R_y$
 - **Instruction Fetch (IF)**
 - Ανάκτηση της εντολής από τη μνήμη εντολών
 - **Instruction Decode (ID)**
 - Επιλογή δεδομένων εισόδου (**R_x και R_y**) και πράξης (**op**)
 - **Execute (EX)**
 - Εκτέλεση πράξης (**$R_x \text{ op } R_y$**) στην ΑΛΜ
 - **Data Memory Access (DM)**
 - (δεν χρησιμοποιείται)
 - **Write Back (WB)**
 - Αποθήκευση αποτελέσματος πράξης στον καταχωρητή **R_z**

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



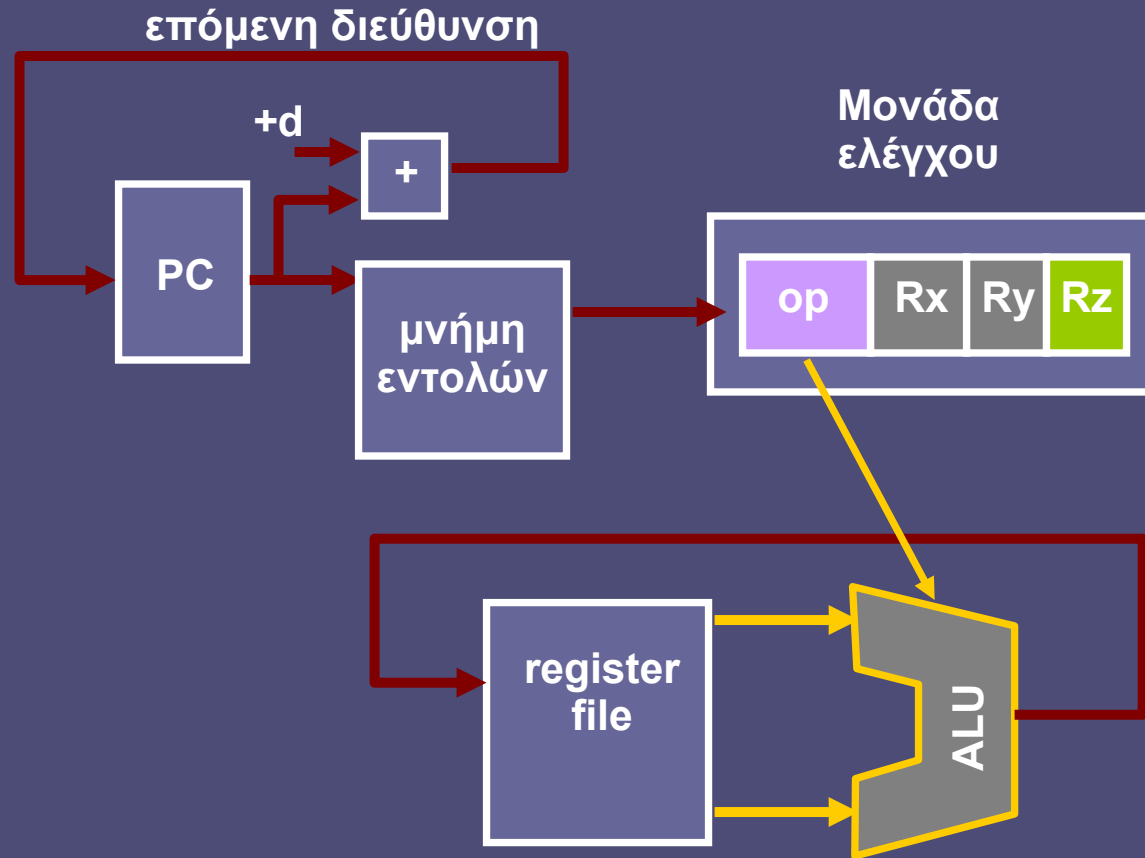
Ο Program Counter παρέχει τη διεύθυνση μνήμης από την οποία η επόμενη εντολή μηχανής εισάγεται στη μονάδα ελέγχου

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



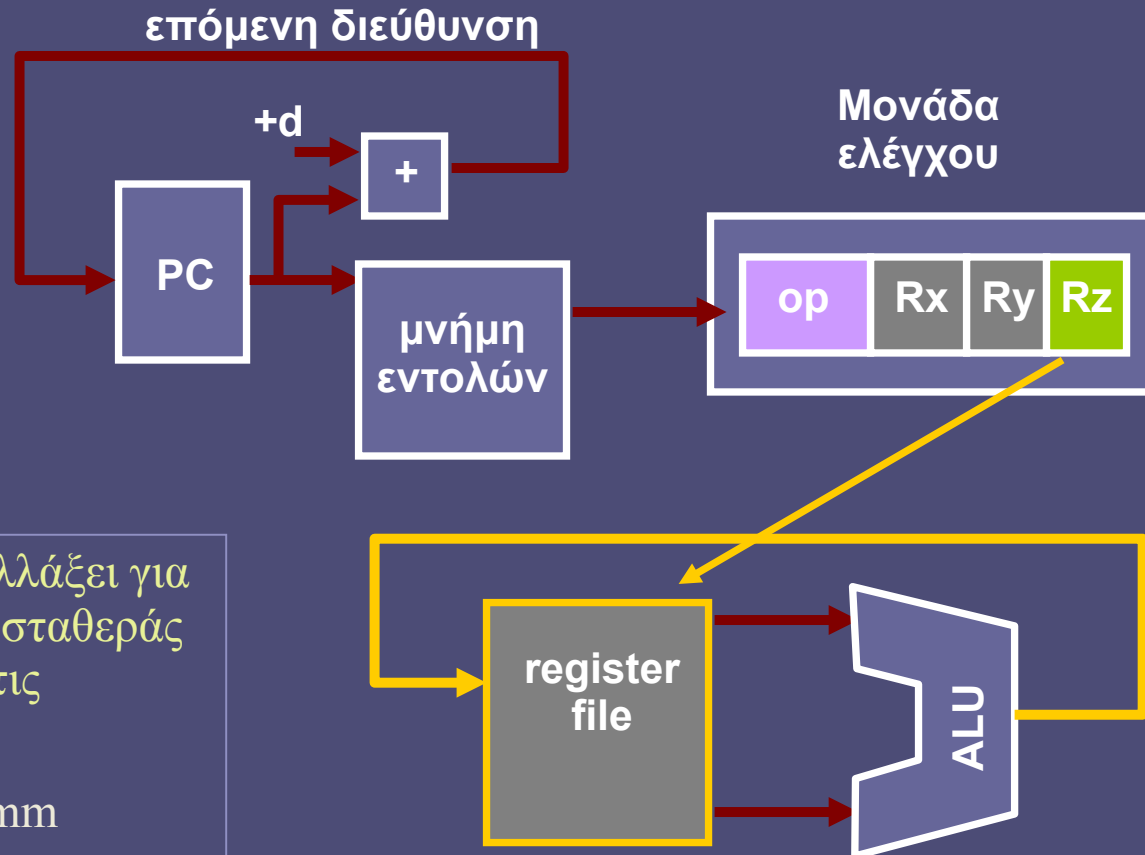
Σύμφωνα με τα bits της εντολής, επιλέγονται οι καταχωρητές (Rx, Ry) που θα παρέχουν τα δεδομένα εισόδου στην πράξη

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



Η επιλεγμένη πράξη (op) εκτελείται στην αριθμητική – λογική μονάδα

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



Τι πρέπει να αλλάξει για τη χρήση μιας σταθεράς (immediate) στις πράξεις;

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

Το αποτέλεσμα αποθηκεύεται στον καταχωρητή προορισμού (Rz) που επιλέγουν τα bits της εντολής

Εντολές διακλάδωσης (branch ή jump)



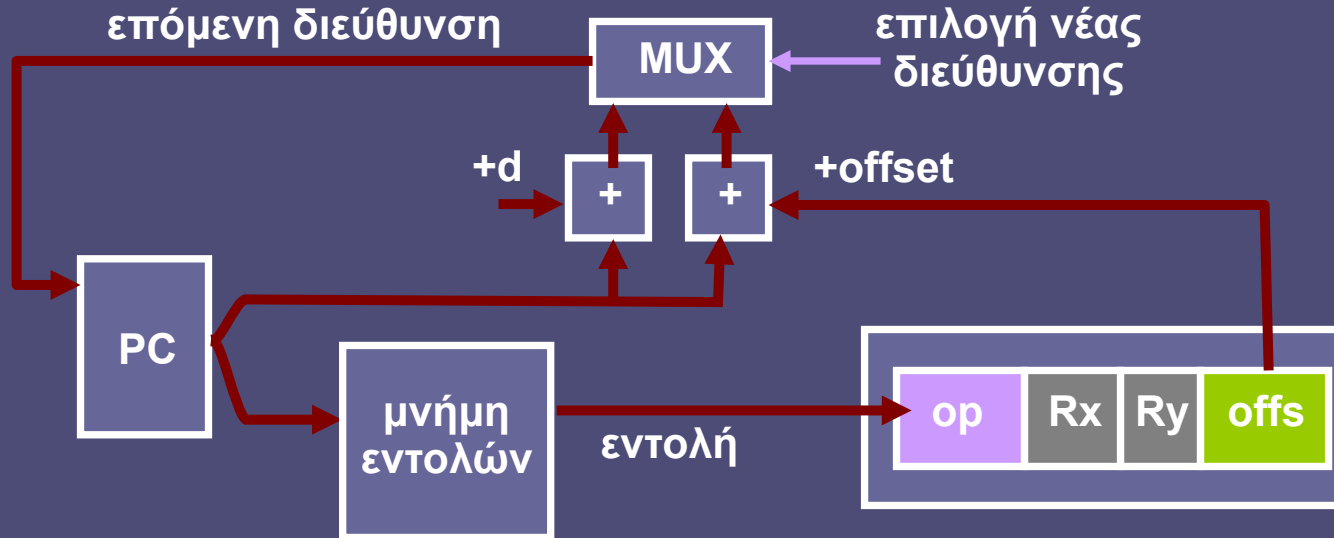
if $Rx == Ry$ then $PC \leftarrow PC + offset$
“branch if
equal”

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

Ο κύκλος μηχανής για εντολές διακλάδωσης

- if $R_x == R_y$ then $PC \leftarrow PC + \text{offset}$
 - **Instruction Fetch (IF)**
 - Ανάκτηση της εντολής από τη μνήμη εντολών
 - **Instruction Decode (ID)**
 - Επιλογή δεδομένων εισόδου (R_x και R_y)
 - **Execute (EX)**
 - Εκτέλεση πράξης αφαίρεσης ($R_x - R_y$) στην ΑΛΜ
 - **Data Memory Access (DM)**
 - Η φάση αυτή χρησιμοποιείται για την προσθήκη του **offset** στον PC εάν ισχύει η ζητούμενη συνθήκη (π.χ. $==$)
 - **Write Back (WB)**
 - (δεν χρησιμοποιείται)

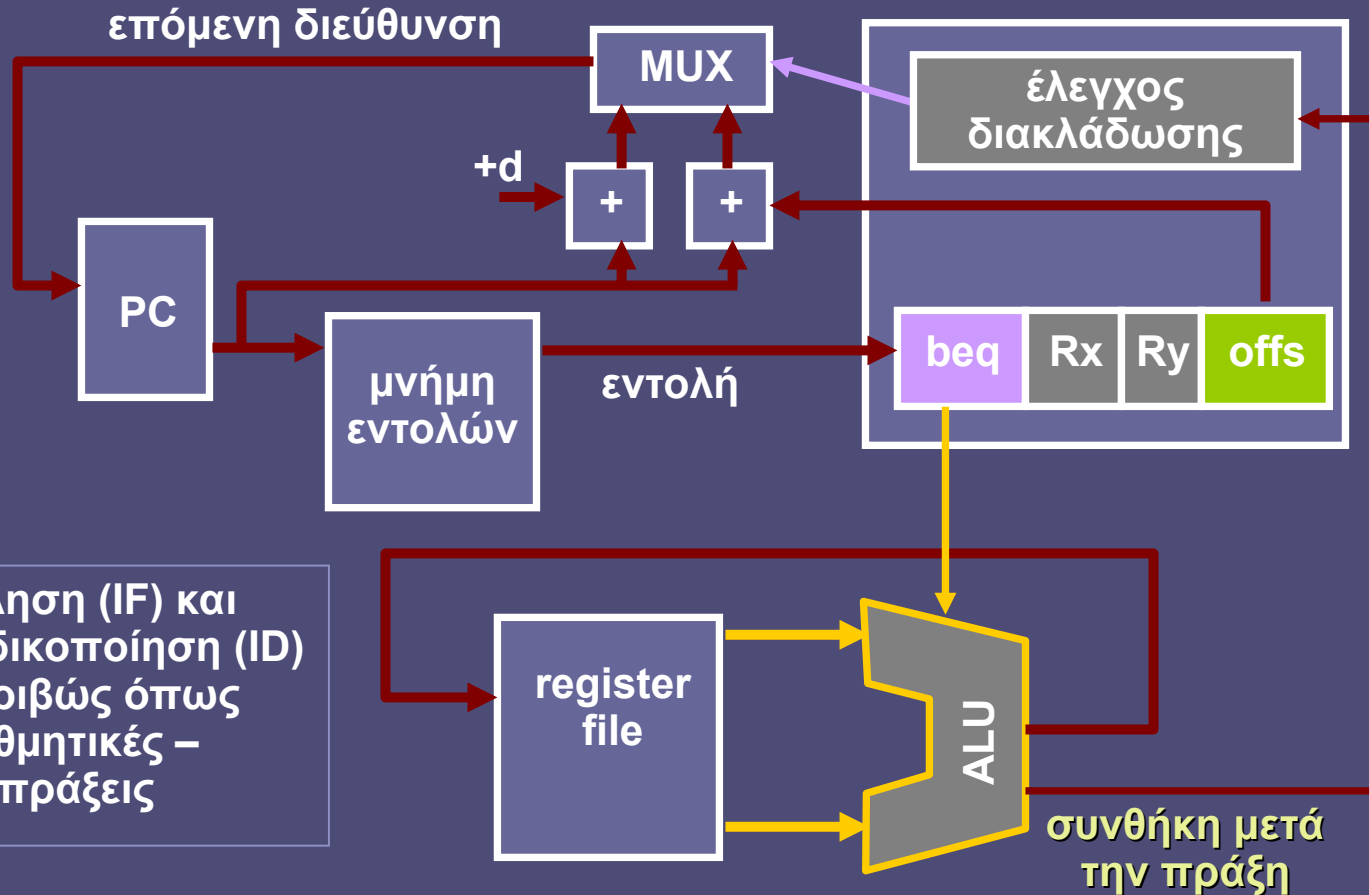
Διακλαδώσεις και ενημέρωση PC



- **Επιλογή νέας (επόμενης) διεύθυνσης**
 - Όταν η διακλάδωση **δεν εκτελείται**: $\text{new PC} \leftarrow \text{PC} + d$
 - Όταν η διακλάδωση **εκτελείται**: $\text{new PC} \leftarrow \text{PC} + \text{offset}$

Execute (EX)

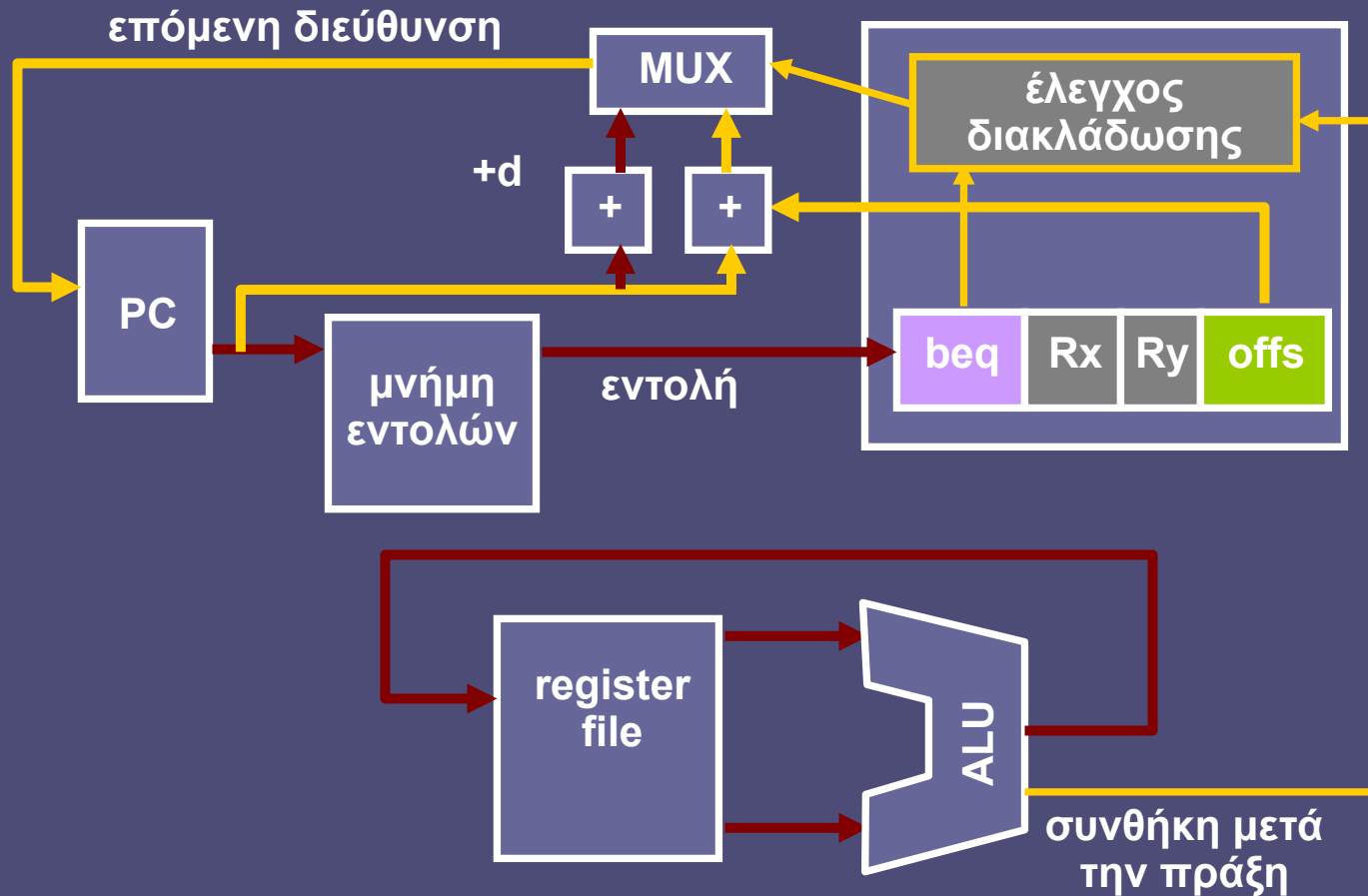
(διακλαδώσεις)



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

Η ΑΛΜ εκτελεί πράξη σύγκρισης (**αφαίρεση**) μεταξύ των τιμών των **Rx** και **Ry**. Παράγεται η ανάλογη **συνθήκη** (>, <, = κλπ του μηδενός)

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**

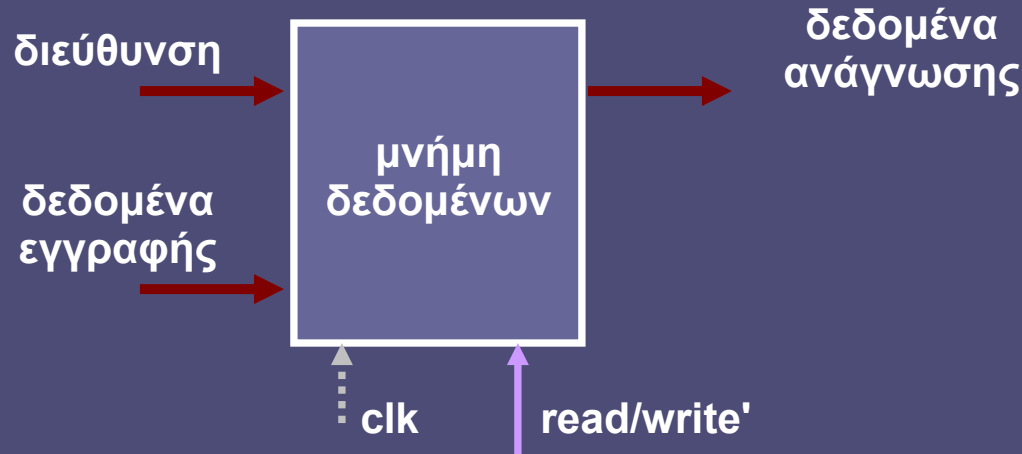
Εντολές προσπέλασης μνήμης (load)



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

- Μόνο οι εντολές load και store προσπελαύνουν τη μνήμη δεδομένων για ανάγνωση και εγγραφή αντίστοιχα
- Η τελική διεύθυνση μνήμης παράγεται από την ΑΛΜ
 - Ως άθροισμα περιεχομένου καταχωρητή + σταθεράς (offset)

Η «μνήμη δεδομένων»



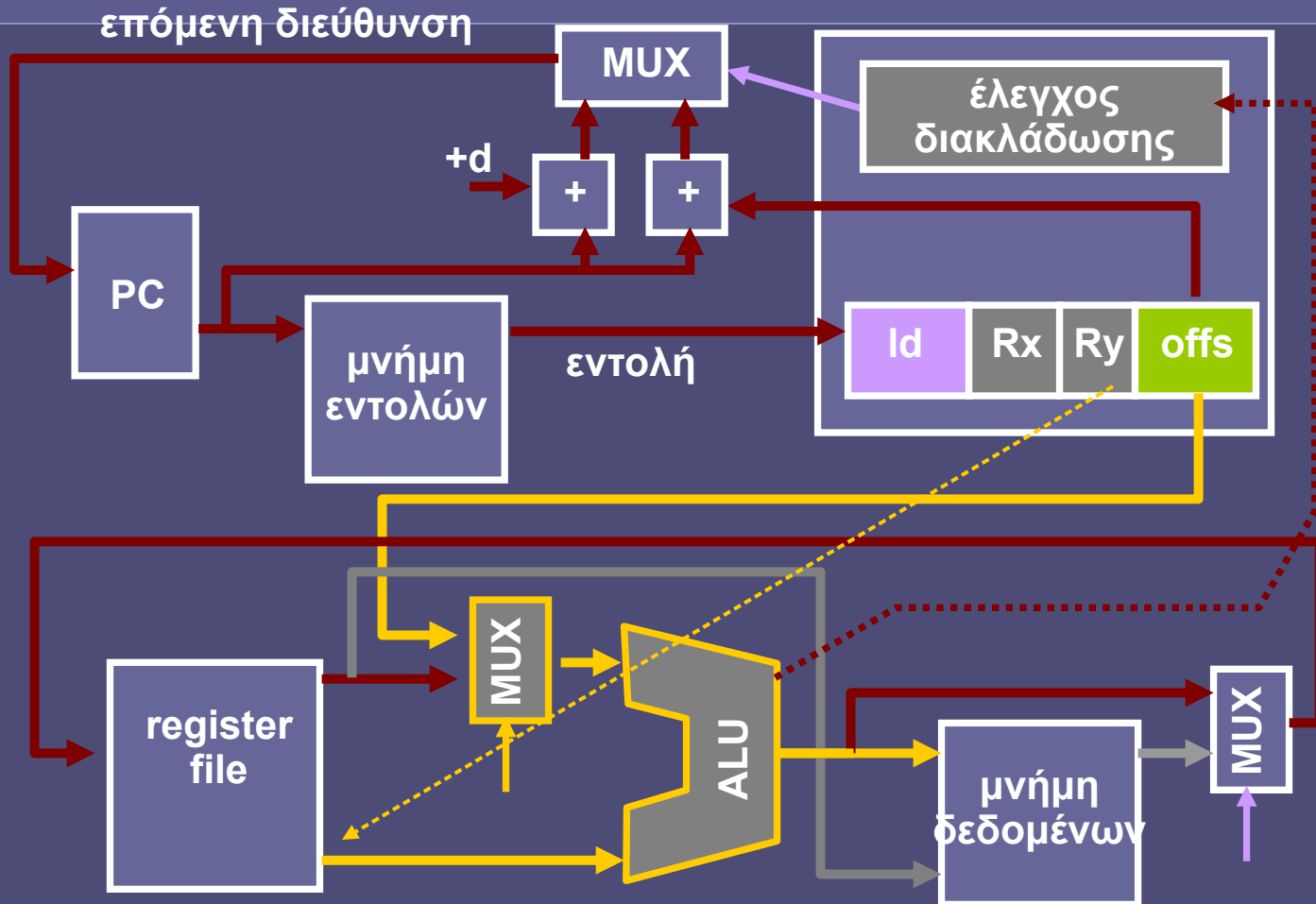
- Μια επίσης χρήσιμη αφαίρεση, στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει μια ιεραρχία μνήμης
 - Για εγγραφή ή ανάγνωση (**read/write'**)
 - **clk** για την εγγραφή

Ο κύκλος μηχανής για την εντολή load

- $R_x \leftarrow \text{mem}[R_y + \text{offset}]$
 - **Instruction Fetch (IF)**
 - Ανάκτηση της εντολής από τη μνήμη εντολών
 - **Instruction Decode (ID)**
 - Επιλογή δεδομένων εισόδου (R_y , offset)
 - **Execute (EX)**
 - Εκτέλεση πράξης πρόσθεσης ($R_y + \text{offset}$) στην ΑΛΜ για τον υπολογισμό της διεύθυνσης μνήμης για ανάγνωση
 - **Data Memory Access (DM)**
 - **Ανάγνωση** από τη διεύθυνση μνήμης που υπολογίστηκε στο EX
 - **Write Back (WB)**
 - Αποθήκευση αποτελέσματος ανάγνωσης στον καταχωρητή R_x

Execute (EX)

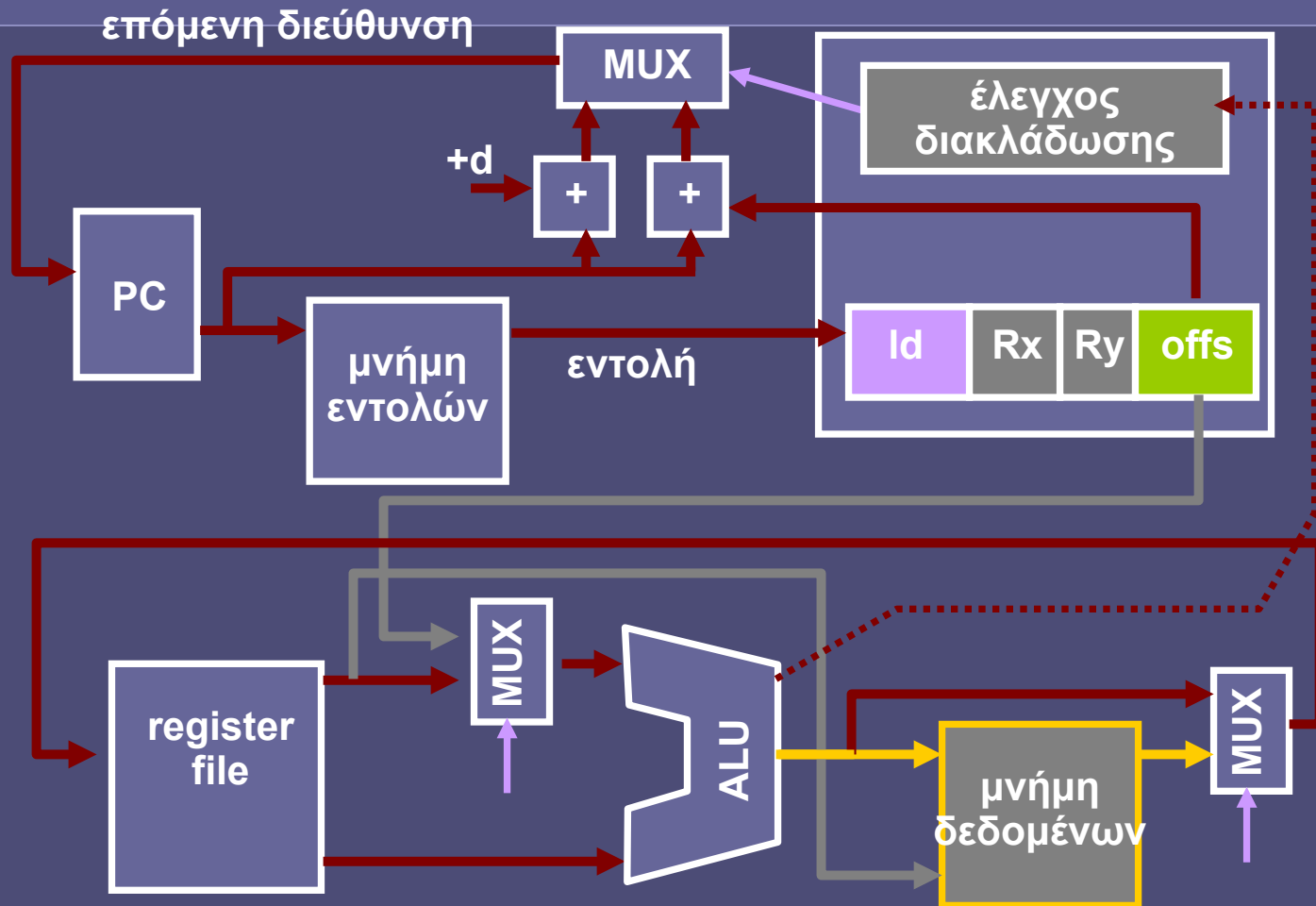
(ανάγνωση από μνήμη – load)



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

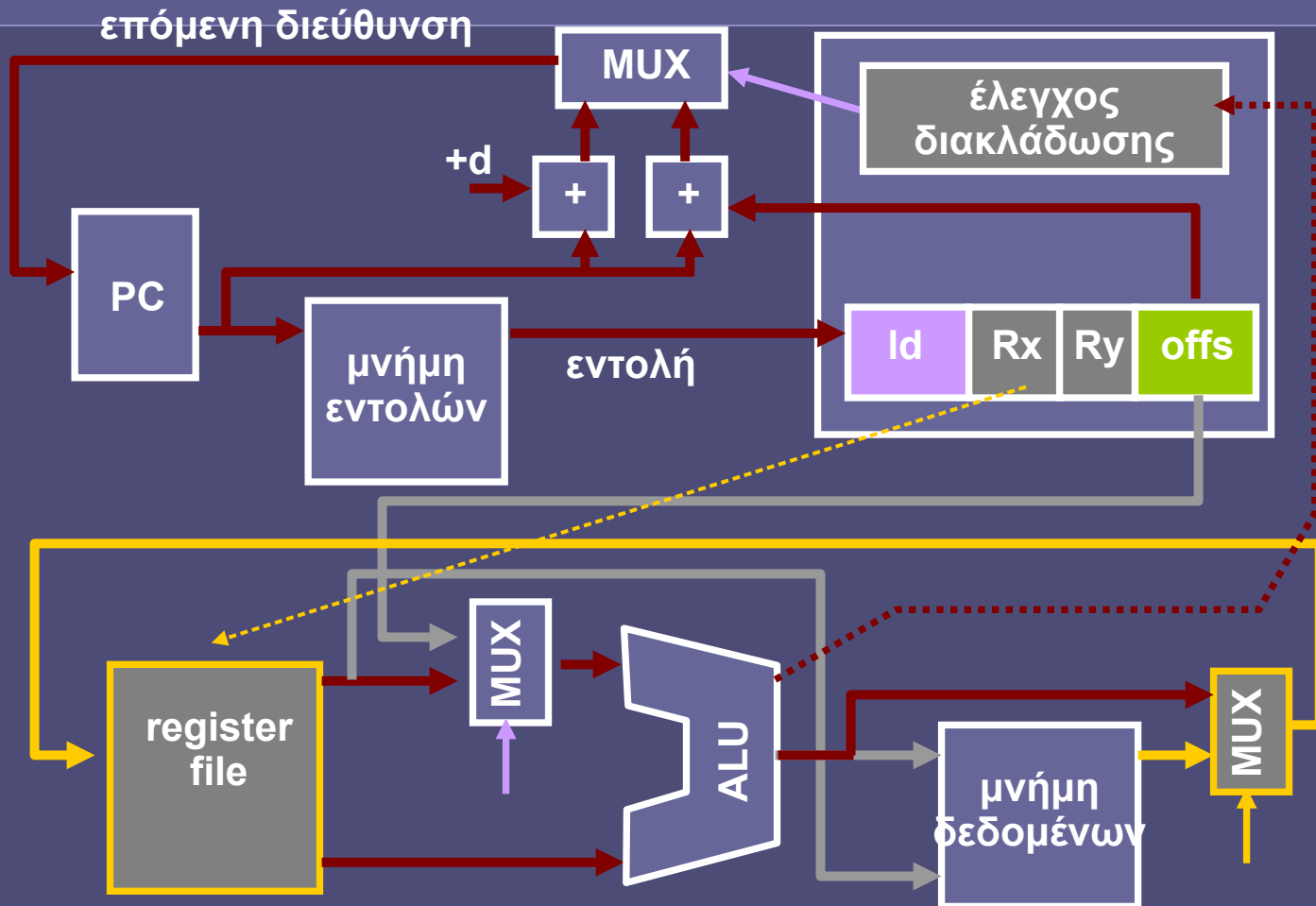
Data Memory Access (DM)

(ανάγνωση από μνήμη – load)



Ανάγνωση από τη μνήμη δεδομένων στη διεύθυνση που υπολογίστηκε στη φάση EX

Write Back (WB)



Τα δεδομένα από τη μνήμη αποθηκεύονται στον καταχωρητή **Rx**

Εντολές προσπέλασης μνήμης (store)



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

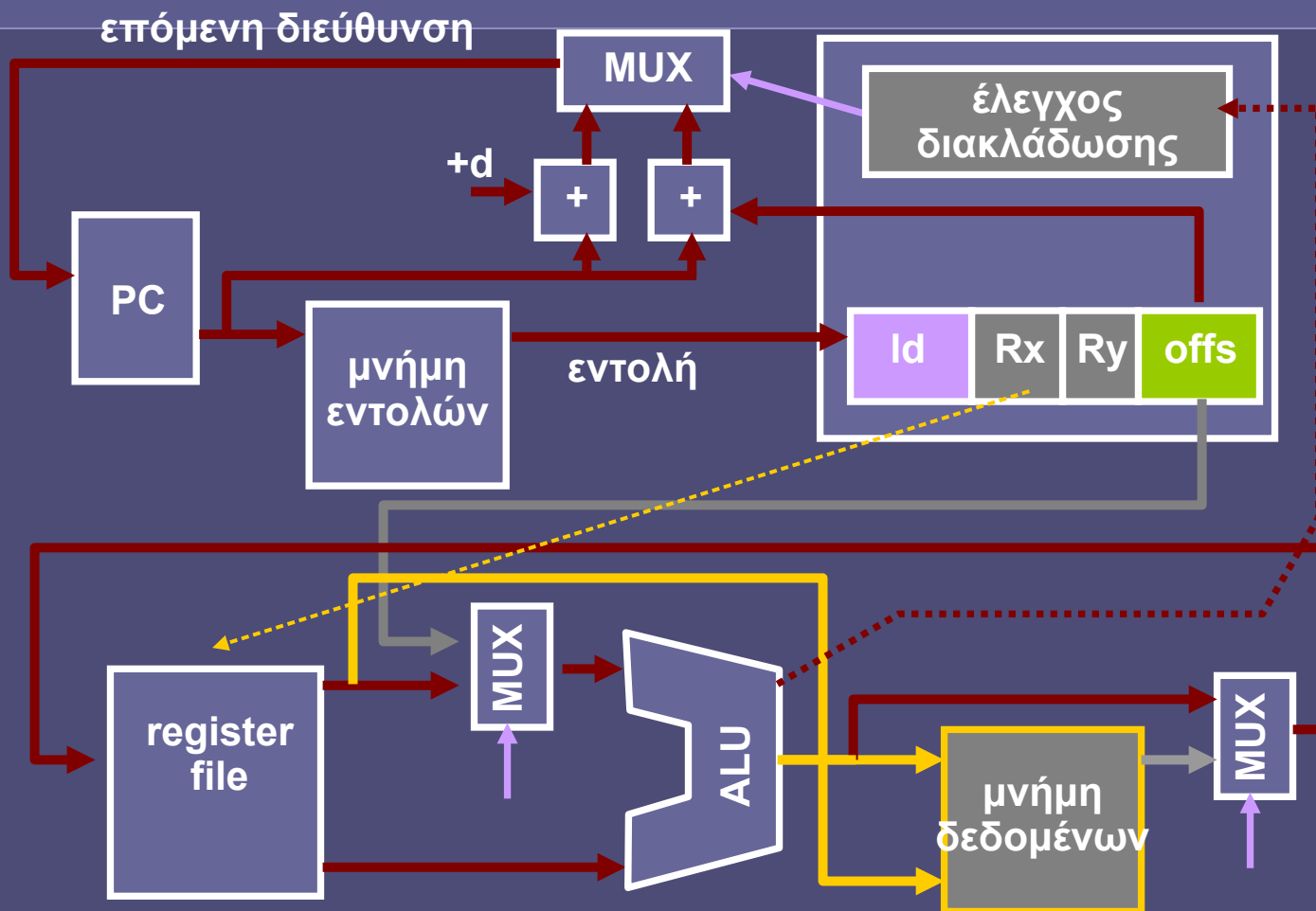
- Όπως και στην εντολή load, η τελική διεύθυνση μνήμης παράγεται από την ΑΛΜ
 - Ως άθροισμα περιεχομένου καταχωρητή + σταθεράς (offset)
- Η εντολή store δεν χρησιμοποιεί τη φάση Write Back (WB) του κύκλου μηχανής
 - Δεν υπάρχει «αποτέλεσμα» να αποθηκευτεί σε κάποιον καταχωρητή

Ο κύκλος μηχανής για την εντολή store

- $R_x \rightarrow \text{mem}[R_y + \text{offset}]$
 - **Instruction Fetch (IF)**
 - Ανάκτηση της εντολής από τη μνήμη εντολών
 - **Instruction Decode (ID)**
 - Επιλογή δεδομένων εισόδου (R_y , offset)
 - **Execute (EX)**
 - Εκτέλεση πράξης πρόσθεσης ($R_y + \text{offset}$) στην ΑΛΜ για τον υπολογισμό της διεύθυνσης μνήμης για εγγραφή
 - **Data Memory Access (DM)**
 - Εγγραφή της τιμής του R_x στη διεύθυνση μνήμης που υπολογίστηκε στο EX
 - **Write Back (WB)**
 - (δεν χρησιμοποιείται)

Data Memory Access (DM)

(εγγραφή στη μνήμη – store)



Εγγραφή του περιεχομένου του **Rx** στη μνήμη δεδομένων, στη διεύθυνση που υπολογίστηκε στη φάση EX

Σύνοψη λειτουργίας της απλής ΚΜΕ

- 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
 - Δεν εκτελούν όλες οι εντολές το σύνολο λειτουργιών (φάσεων) του κύκλου μηχανής
 - Οι «γρήγορες» εντολές τελειώνουν νωρίτερα
 - Αδράνεια της ΚΜΕ μέχρι να τελειώσει ο κύκλος ρολογιού
- Υπάρχουν τεχνικές για βελτίωση της απόδοσης;
 - (στα επόμενα μαθήματα)