Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών

2024-25

Απόδοση ΚΜΕ

(Μέτρηση και τεχνικές βελτίωσης απόδοσης)

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

Μ.Στεφανιδάκης

Απόδοση (Κεντρικής) Μονάδας Επεξεργασίας

- Απόδοση υπολογιστικού συστήματος
  - Η απόδοση εξαρτάται από όλα τα επιμέρους τμήματα του συστήματος
    - Υλικό και λογισμικό
- Απόδοση (Κεντρικής) Μονάδας Επεξεργασίας
  - Πόσο γρήγορα εκτελείται ένα πρόγραμμα;
  - Πώς επηρεάζει η αρχιτεκτονική της (Κ)ΜΕ την απόδοση;
    - Πόσο γρηγορότερα εκτελείται ένα πρόγραμμα μετά από μια αρχιτεκτονική αλλαγή;

Χρόνος απόκρισης – Ρυθμός Ολοκλήρωσης

- Χρόνος απόκρισης (response time)
  - Συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση των εργασιών ενός προγράμματος (από την έναρξη μέχρι τη λήξη)
- Ρυθμός ολοκλήρωσης (throughput)
  - Ρυθμός ολοκλήρωσης έργου σε συγκεκριμένο χρόνο
- Τα δύο μεγέθη είναι αλληλένδετα
  - Συνήθως η βελτίωση του ενός επιδρά θετικά και στο άλλο

Χρόνος Εκτέλεσης (Execution Time)

- Χρόνος εκτέλεσης στην (Κ)ΜΕ
  - Ο χρόνος για τον οποίο η ΚΜΕ εκτελεί εντολές του προγράμματος
    - Όχι χρόνος για αναμονή Ε/Ε ή για άλλες διεργασίες
- Συνιστώσες
  - Χρόνος προγράμματος χρήστη
    - Για το πρόγραμμα καθεαυτό
  - Χρόνος συστήματος
    - Λειτουργίες ΛΣ για την εξυπηρέτηση του προγράμματος

Εκτέλεση προγράμματος

- Χρόνος εκτέλεσης ενός προγράμματος (execution time)
  - Αύξηση απόδοσης ⇔ Μείωση χρόνου εκτέλεσης
  - Εκτέλεση σε έναν υπολογιστή Χ:

$$\text{Απόδοση(X)} = \frac{1}{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(X)}}$$

Σύγκριση εκτέλεσης σε δύο συστήματα

- Συγκρίνοντας αποδόσεις για την εκτέλεση του ίδιου προγράμματος
  - Έστω υπολογιστές Χ και Υ
  - Εάν:

Απόδοση(Χ) > Απόδοση(Υ)

  - Τότε (και αντίστροφα):

Χρόνος Εκτέλεσης(Χ) < Χρόνος Εκτέλεσης(Υ)

Σύγκριση εκτέλεσης σε δύο συστήματα

- Υπολογισμός του λόγου των χρόνων εκτέλεσης
  - Όταν σε υπολογιστές X και Y για το ίδιο πρόγραμμα είναι:

$$\frac{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(Y)}}{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(X)}} = n$$

  - Τότε:

Ο X είναι *n* φορές γρηγορότερος από τον Y

- Παράδειγμα
  - Ο X εκτελεί ένα πρόγραμμα σε 10 sec και ο Y σε 15 sec. Πόσο πιο γρήγορος είναι ο X;

Σύγκριση εκτέλεσης σε δύο συστήματα

- Υπολογισμός του λόγου των χρόνων εκτέλεσης
  - Όταν σε υπολογιστές X και Y για το ίδιο πρόγραμμα είναι:

$$\frac{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(Y)}}{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(X)}} = n$$

  - Τότε:

Ο X είναι *n* φορές γρηγορότερος από τον Y

- Παράδειγμα
  - Ο X εκτελεί ένα πρόγραμμα σε 10 sec και ο Y σε 15 sec. Πόσο πιο γρήγορος είναι ο X;
    - Ο X είναι 1.5 φορές γρηγορότερος

$$\frac{\text{15 sec}}{\text{10 sec}} = 1{,}5$$

Βασικά μεγέθη μέτρησης χρόνου εκτέλεσης

- Κύκλος ρολογιού (περίοδος)
  - Clock Cycle (CC)
    - Η διάρκεια ενός κύκλου ρολογιού (περίοδος ρολογιού) κατά τον οποίο η ΚΜΕ εκτελεί τις μικρότερες βασικές λειτουργίες
    - Απόλυτα σταθερό μέγεθος
- Ρολόι (clock)
  - Περιοδικό σήμα (εναλλάσσεται συνεχώς μεταξύ 0 και 1)
  - Ο παλμός κάθε υπολογιστικού συστήματος, συγχρονίζει τις λειτουργίες του συστήματος

Βασικά μεγέθη μέτρησης χρόνου εκτέλεσης (2)

- Κύκλοι ρολογιού ανά εντολή
  - Clocks Per Instruction (CPI)
    - Οι απαιτούμενοι κύκλοι ρολογιού για την ολοκλήρωση μιας εντολής
    - Ενδεχομένως διαφορετικό μέγεθος ανά τύπο εντολής
    - Σε προσεγγιστικούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται ένα μέσο CPI
    - Σε λεπτομερείς υπολογισμούς χρησιμοποιούνται μεγέθη από προσομοιώσεις ή μετρήσεις μέσω μετροπρογραμμάτων
- Αριθμός εντολών
  - Instruction Count (IC)
    - Ο αριθμός των εντολών ενός προγράμματος

Χρόνος εκτέλεσης στην (Κ)ΜΕ

- Χρόνος Εκτέλεσης για ένα πρόγραμμα

- Τι μπορεί να κάνει ο σχεδιαστής ΚΜΕ για να βελτιώσει την απόδοση;
  - Να μειώσει τον κύκλο ρολογιού (CC)
  - Να μειώσει τον αριθμό κύκλων ανά εντολή (CPI)
  - Ο αριθμός εντολών δεν αλλάζει (παραμένει το ίδιο πρόγραμμα)

Παράδειγμα

Τύπος εντολής	A	B	C
CPI	1	2	3

Ακολουθία κώδικα	A	B	C
1	2	1	2
2	4	1	1

[Patterson-Hennessy "Computer Organization and Design", 3rd ed]

- Έχουμε να διαλέξουμε μεταξύ 2 ακολουθιών εντολών (1 και 2)
  - Ποια ακολουθία εκτελεί τις περισσότερες εντολές;
  - Ποια είναι ταχύτερη;
  - Ποιο το μέσο CPI σε κάθε περίπτωση;

Παράδειγμα

Τύπος εντολής	A	B	C
CPI	1	2	3

Ακολουθία κώδικα	A	B	C
1	2	1	2
2	4	1	1

[Patterson-Hennessy "Computer Organization and Design", 3rd ed]

- Έχουμε να διαλέξουμε μεταξύ 2 ακολουθιών εντολών (1 και 2)
  - Ποια ακολουθία εκτελεί τις περισσότερες εντολές;
  - Ποια είναι ταχύτερη;
  - Ποιο το μέσο CPI σε κάθε περίπτωση;

1η: 2+1+2 = 5
2η: 4+1+1 = 6

Παράδειγμα

Τύπος εντολής	A	B	C
CPI	1	2	3

Ακολουθία κώδικα	A	B	C
1	2	1	2
2	4	1	1

[Patterson-Hennessy "Computer Organization and Design", 3rd ed]

- Έχουμε να διαλέξουμε μεταξύ 2 ακολουθιών εντολών (1 και 2)
  - Ποια ακολουθία εκτελεί τις περισσότερες εντολές;
  - Ποια είναι ταχύτερη;
  - Ποιο το μέσο CPI σε κάθε περίπτωση;

1η: 2+1+2 = 5

2η: 4+1+1 = 6

κύκλοι ρολογιού $= \Sigma(CPI_i * IC_i)$

1η: 2*1+1*2+2*3 = 10

2η: 4*1+1*2+1*3 = 9

Παράδειγμα

Τύπος εντολής	A	B	C
CPI	1	2	3

Ακολουθία κώδικα	A	B	C
1	2	1	2
2	4	1	1

[Patterson-Hennessy "Computer Organization and Design", 3rd ed]

- Έχουμε να διαλέξουμε μεταξύ 2 ακολουθιών εντολών (1 και 2)
  - Ποια ακολουθία εκτελεί τις περισσότερες εντολές;
  - Ποια είναι ταχύτερη;
  - Ποιο το μέσο CPI σε κάθε περίπτωση;

1η: 2+1+2 = 5

2η: 4+1+1 = 6

κύκλοι ρολογιού $= \Sigma(CPI_i * IC_i)$

1η: 2*1+1*2+2*3 = 10

2η: 4*1+1*2+1*3 = 9

κύκλοι/εντολές

1η: 10/5 = 2

2η: 9/6 = 1.5

Συσχέτιση με λογισμικό

- Ενώ το υλικό και η αρχιτεκτονική συνόλου εντολών (ISA) καθορίζει και τα τρία μεγέθη (IC, CPI και CC), τι συμβαίνει με το λογισμικό;

- Αλγόριθμος
  - Καθορίζει το IC
  - Ενδεχομένως καθορίζει το CPI, ευνοώντας ορισμένους τύπους εντολών (π.χ. κινητής υποδιαστολής)

- Γλώσσα προγραμματισμού - Μεταγλωττιστής
  - Καθορίζει το IC (μετάφραση εντολών υψηλού επιπέδου)
  - Καθορίζει το CPI απαιτώντας/χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους τύπους εντολών

Μετροπρογράμματα

- **Benchmarks**
  - Για τη μέτρηση της απόδοσης
  - Και τη σύγκριση μεταξύ υπολογιστών
  - Θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές εφαρμογές
  - Υπό ρεαλιστικές συνθήκες εκτέλεσης και δεδομένα εισόδου
  - Χωρίς “εσωτερικές” ειδικές βελτιστοποιήσεις
  - Δυνατότητα επανάληψης μέτρησης
  - Διαφορετικά για ανόμοιες κλάσεις υπολογιστών
    - PCs, servers, embedded systems…

Ο «νόμος» του Amdahl

- «Η βελτίωση της συνολικής απόδοσης ενός συστήματος μέσω της εισαγωγής ενός νέου χαρακτηριστικού, περιορίζεται από το βαθμό χρήσης αυτού του νέου χαρακτηριστικού»
- Ερμηνεία – συνέπειες
  - Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες περιπτώσεις πρέπει να είναι γρήγορες
  - Δεν ωφελεί η βελτιστοποίηση των σπάνιων περιπτώσεων
  - Η μη πλήρης χρήση του νέου χαρακτηριστικού βελτίωσης εμποδίζει να επιτύχουμε την «τέλεια» απόδοση
    - Ακόμα κι όταν το ποσοστό μη χρήσης είναι ελάχιστο

Ο «νόμος» του Amdahl – Παράδειγμα

- Ένα πρόγραμμα τρέχει για 100 sec σε έναν υπολογιστή και εκτελεί πολλαπλασιασμούς για 80 sec. Πόσο πρέπει να βελτιώσω τη ταχύτητα του πολλαπλασιασμού για να πενταπλασιάσω τη συνολική απόδοση;

Ο «νόμος» του Amdahl – Παράδειγμα

- Ένα πρόγραμμα τρέχει για 100 sec σε έναν υπολογιστή και εκτελεί πολλαπλασιασμούς για 80 sec. Πόσο πρέπει να βελτιώσω τη ταχύτητα του πολλαπλασιασμού για να πενταπλασιάσω τη συνολική απόδοση;
  - Το πρόγραμμα εκτελεί 80 sec πολλαπλασιασμούς και 20 sec άλλες πράξεις
  - Για να πενταπλασιαστεί η συνολική απόδοση, ο λόγος των χρόνων εκτέλεσης (παλιό/νέο) θα πρέπει να είναι 5
  - Έστω ότι το κύκλωμα πολλαπλασιασμού γίνεται n φορές ταχύτερο. Οι πολλαπλασιασμοί τότε θα εκτελούνται σε 80/n sec

Ο «νόμος» του Amdahl – Παράδειγμα

- Ένα πρόγραμμα τρέχει για 100 sec σε έναν υπολογιστή και εκτελεί πολλαπλασιασμούς για 80 sec. Πόσο πρέπει να βελτιώσω τη ταχύτητα του πολλαπλασιασμού για να πενταπλασιάσω τη συνολική απόδοση;
  - Το πρόγραμμα εκτελεί 80 sec πολλαπλασιασμούς και 20 sec άλλες πράξεις
  - Για να πενταπλασιαστεί η συνολική απόδοση, ο λόγος των χρόνων εκτέλεσης (παλιό/νέο) θα πρέπει να είναι 5
  - Έστω ότι το κύκλωμα πολλαπλασιασμού γίνεται n φορές ταχύτερο. Οι πολλαπλασιασμοί τότε θα εκτελούνται σε 80/n sec

$$\frac{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(παλιό)}}{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(νέο)}} = \frac{\text{100 sec}}{\text{80/n + 20 sec}} = 5$$

υπάρχει λύση για το n;

ΚΜΕ ενός κύκλου (single-cycle)

- Στο προηγούμενο μάθημα είδαμε μια απλή ΚΜΕ με CPI ίσο με 1
  - Σε κάθε έναν κύκλο ρολογιού ολοκληρώνεται μια εντολή ή αλλιώς:
    - κάθε εντολή απαιτεί έναν κύκλο ρολογιού
- Πόσο πρέπει να είναι το CC;
  - Ίσο με τη διάρκεια της μεγαλύτερης λειτουργίας
    - Της πιο χρονοβόρας εντολής μηχανής
  - Μη αποδοτικό σχήμα
    - Όλες οι εντολές μηχανής δεν απαιτούν τον ίδιο χρόνο

Υποθετικό παράδειγμα σε ΚΜΕ ενός κύκλου

Εντολή	IF	ID	EX	DM	WB	Σύνολο
Αριθμητική	200	50	100	0	50	**400 ps**
Διακλάδωση	200	50	100	0	0	**350 ps**
Ανάγνωση μνήμης	200	50	100	200	50	**600 ps**
Εγγραφή μνήμης	200	50	100	200	0	**550 ps**

[Patterson-Hennessy "Computer Organization and Design", 3rd ed]

- Για να μπορεί να ολοκληρωθεί κάθε είδος εντολών το CC θα πρέπει να είναι 600 ps
  - Ποια η βελτίωση της απόδοσης αν ήταν δυνατή η χρήση μεταβλητού CC; (προσοχή: αυτό είναι πρακτικά αδύνατο!)
  - Θεωρείστε ότι το πρόγραμμα έχει τους εξής τύπους εντολών: 25% ανάγνωσης, 10% εγγραφής, 45% αριθμητικές, 20% διακλάδωσης

Υποθετικό παράδειγμα σε ΚΜΕ ενός κύκλου

Εντολή	IF	ID	EX	DM	WB	Σύνολο
Αριθμητική	200	50	100	0	50	**400 ps**
Διακλάδωση	200	50	100	0	0	**350 ps**
Ανάγνωση μνήμης	200	50	100	200	50	**600 ps**
Εγγραφή μνήμης	200	50	100	200	0	**550 ps**

25% ανάγνωσης, 10% εγγραφής, 45% αριθμητικές, 20% διακλάδωσης

- Και στις δύο περιπτώσεις είναι ίδιος ο αριθμός εντολών (IC) και ο αριθμός κύκλων ρολογιού ανά εντολή (CPI=1)
- Συνεπώς η απόδοση υπολογίζεται μόνο από τον λόγο των CC:

$$\frac{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(παλιό)}}{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(νέο)}} = \frac{\text{CC(παλιό)}}{\text{CC(νέο)}} = \frac{\text{600ps}}{\text{CC(νέο)}}$$

πώς υπολογίζεται;

Υποθετικό παράδειγμα σε ΚΜΕ ενός κύκλου

Εντολή	IF	ID	EX	DM	WB	Σύνολο
Αριθμητική	200	50	100	0	50	**400 ps**
Διακλάδωση	200	50	100	0	0	**350 ps**
Ανάγνωση μνήμης	200	50	100	200	50	**600 ps**
Εγγραφή μνήμης	200	50	100	200	0	**550 ps**

25% ανάγνωσης, 10% εγγραφής, 45% αριθμητικές, 20% διακλάδωσης

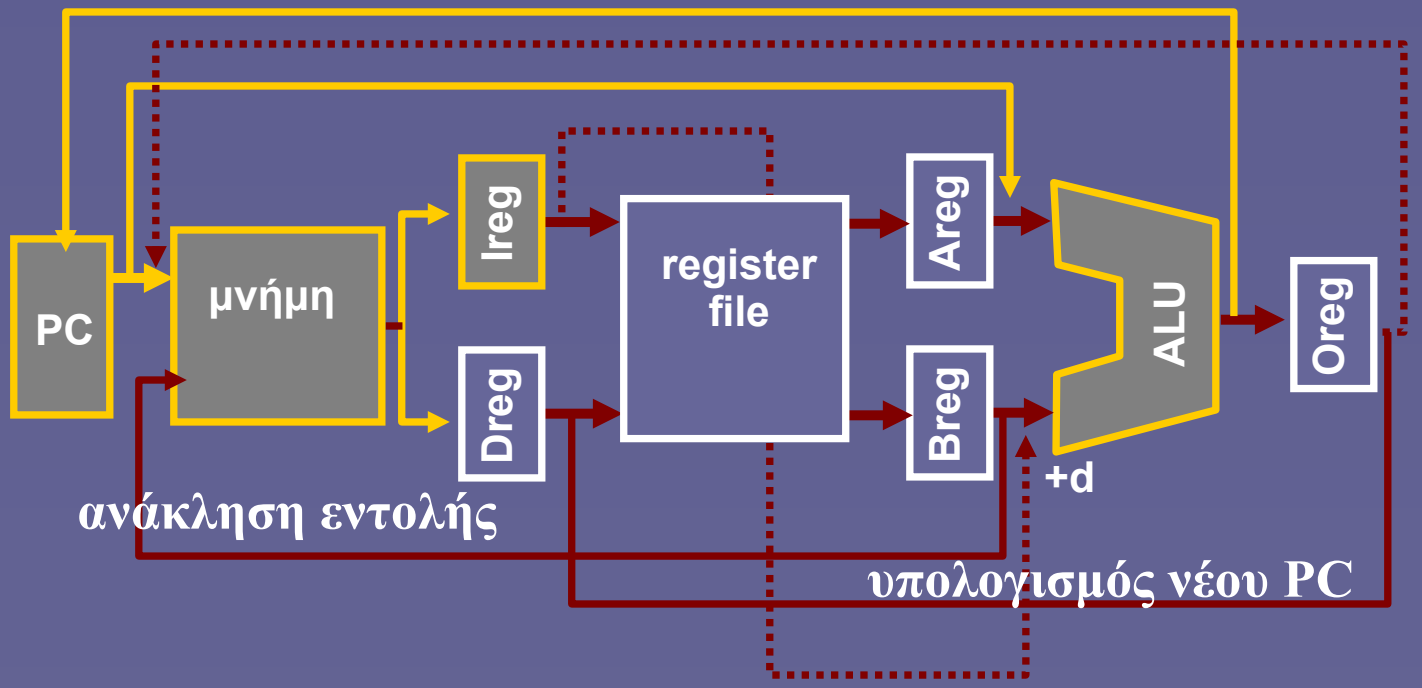
- CC(νέο) = σταθμισμένος μέσος όρος CC ανά τύπο εντολής, ανάλογα με τη συχνότητα εμφάνισης του τύπου εντολών =
  0,45*400 + 0,2*350 + 0,25*600 + 0,1*550 = 455ps

$$\frac{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(παλιό)}}{\text{Χρόνος Εκτέλεσης(νέο)}} = \frac{\text{CC(παλιό)}}{\text{CC(νέο)}} = \frac{600\text{ps}}{455\text{ps}} = 1{,}32$$

ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων (multi-cycle)

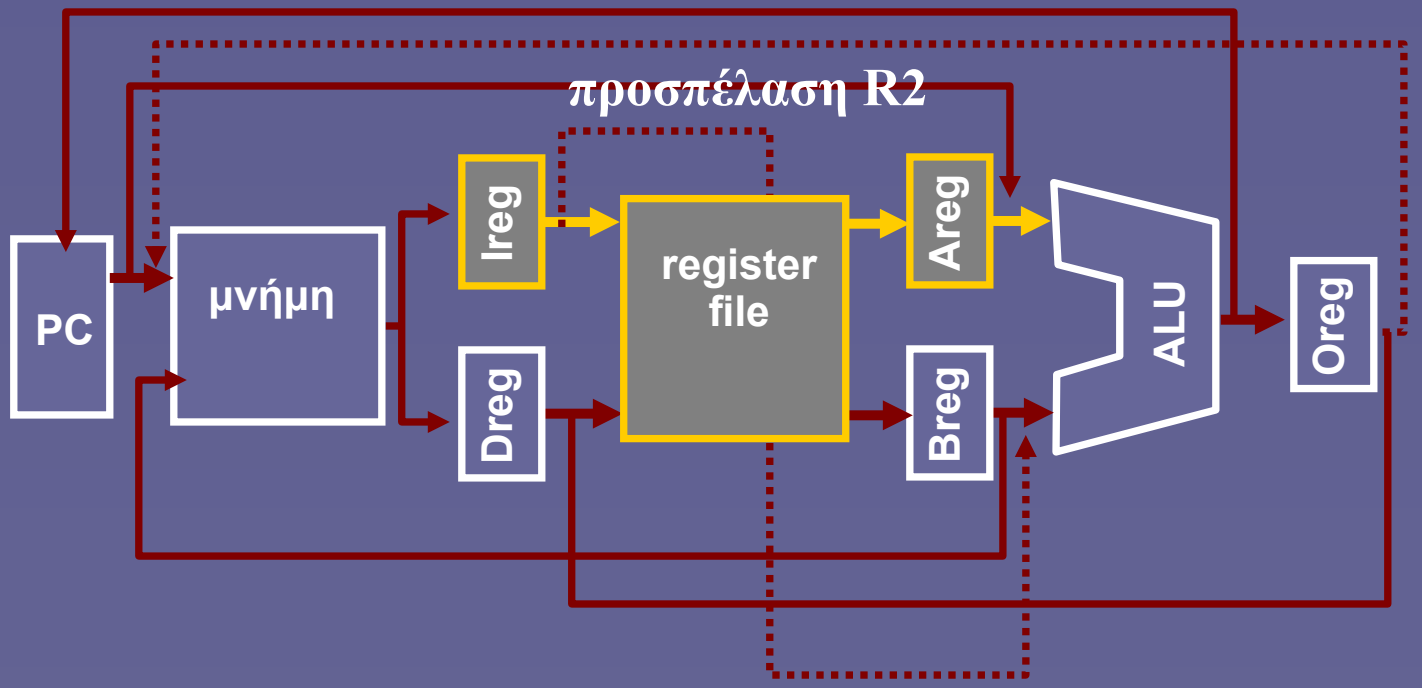
- CPI > 1
  - Κάθε εντολή μηχανής χωρίζεται σε έναν αριθμό βημάτων
    - Διαφορετικός αριθμός βημάτων για κάθε τύπο εντολών
  - Κάθε βήμα απαιτεί έναν κύκλο ρολογιού
- Πόση πρέπει να είναι η περίοδος του ρολογιού (CC);
  - Ίση με τη διάρκεια ολοκλήρωσης του μεγαλύτερου βήματος
- Καταχωρητές για τη συγκράτηση αποτελεσμάτων μεταξύ βημάτων
- Κάποια μέρη της ΚΜΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μία φορές κατά την εκτέλεση μιας εντολής

Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα IF)



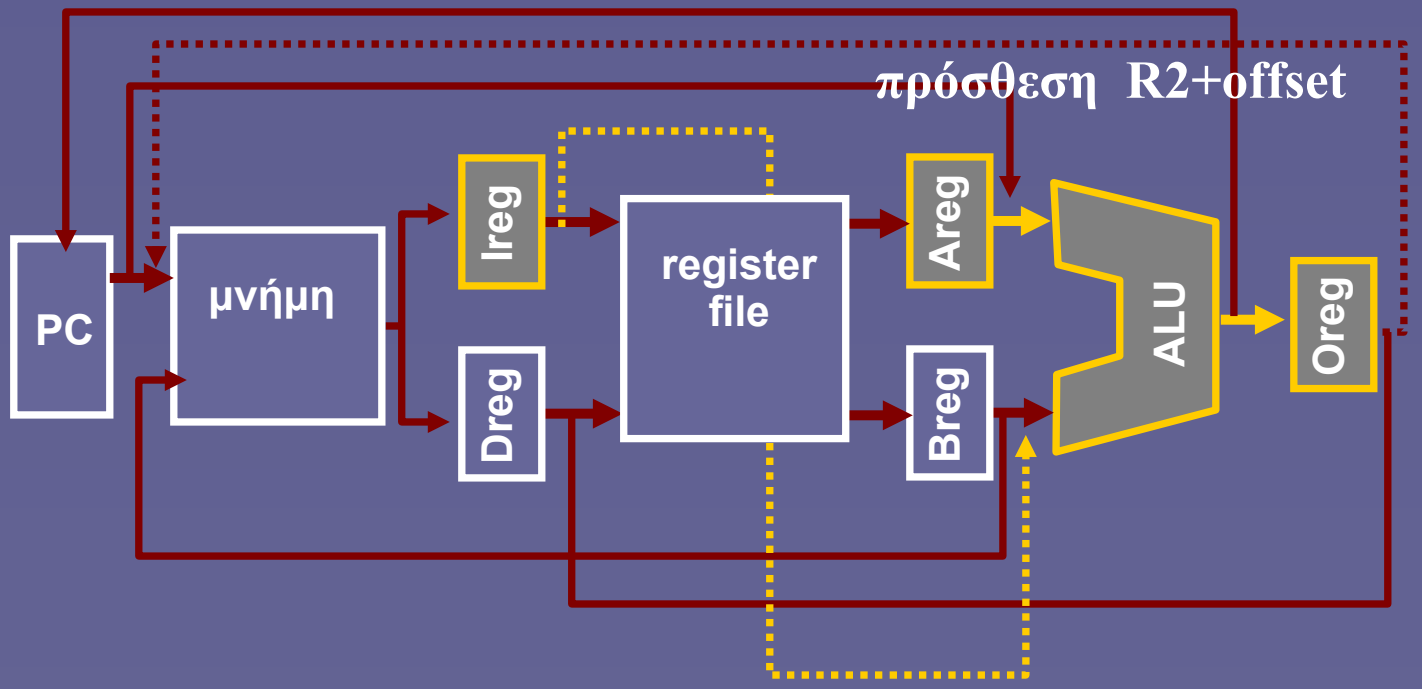
R1 ← mem[R2 + offset]

Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα ID)



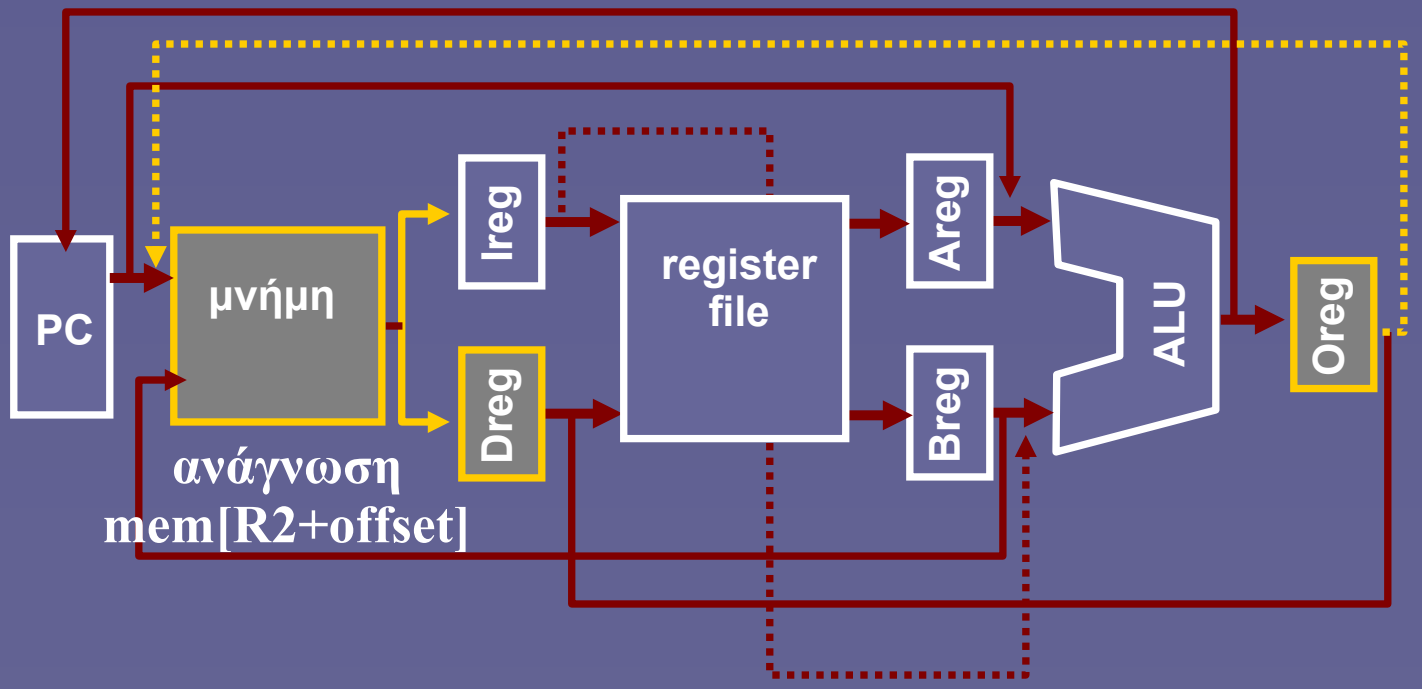
R1 ← mem[R2 + offset]

Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα EX)



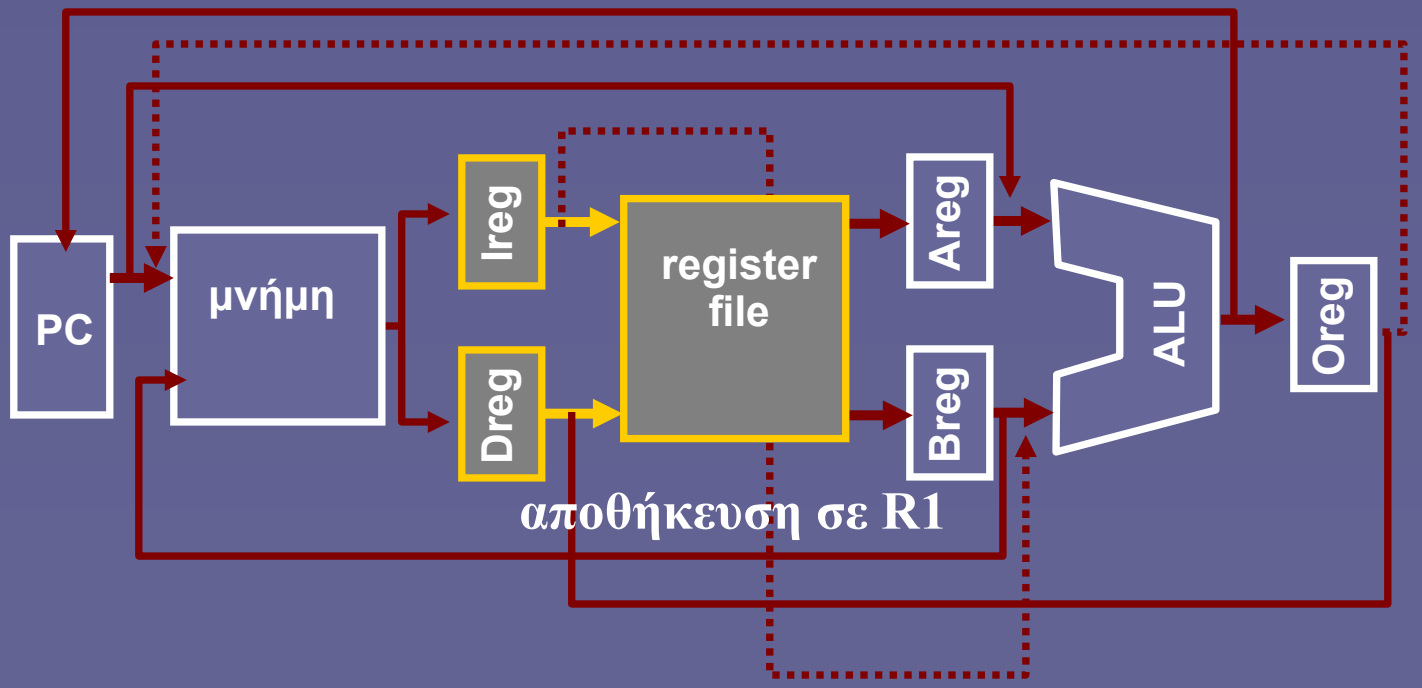
R1 ← mem[R2 + offset]

Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα DM)



R1 ← mem[R2 + offset]

Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα WB)



R1 ← mem[R2 + offset]

Μονάδα Ελέγχου ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

- Δημιουργία σημάτων σε κάθε βήμα εκτέλεσης μιας εντολής
- Μέθοδοι υλοποίησης
  - Αυτόματα πεπερασμένων καταστάσεων
    - Παραγωγή σημάτων ελέγχου ανάλογα με εισόδους και τρέχουσα κατάσταση
  - Μικροπρόγραμμα
    - Καθορισμός σημάτων μέσω μικροεντολών
    - Εσωτερικά στην ΚΜΕ
    - Για υλοποίηση σύνθετων εντολών με πολλά βήματα και πολλαπλά περάσματα από το datapath
    - Μερικές φορές είναι εγγράψιμο (updates, patches..)

Απόδοση ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

- Πλεονεκτήματα
  - Δεν απαιτείται ο χρόνος της πιο αργής εντολής για το CC
  - Μέρη της ΚΜΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολλαπλό τρόπο κατά την εκτέλεση μιας εντολής
- Μειονεκτήματα
  - Η μονάδα ελέγχου γίνεται πολυπλοκότερη
    - Η πολυπλοκότητα πιθανόν να ακυρώνει τα πλεονεκτήματα
  - Σε κάθε βήμα, μερικά τμήματα μένουν ανενεργά
    - Πώς θα μπορούσαμε να τα εκμεταλλευτούμε;
    - (στο επόμενο μάθημα...)