

## Απόδοση ΚΜΕ

(Μέτρηση και τεχνικές βελτίωσης απόδοσης)

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



Μ.Στεφανιδάκης

## Απόδοση (Κεντρικής) Μονάδας Επεξεργασίας

### • Απόδοση ΚΜΕ

- 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

### • Απόδοση ΚΜΕ

- 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)

### • Απόδοση ΚΜΕ

- 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 προγραμμάτων

### • Απόδοση ΚΜΕ

- Χρόνος εκτέλεσης (execution time)
  - Αύξηση απόδοσης  $\Leftrightarrow$  Μείωση χρόνου εκτέλεσης

- Για υπολογιστή X:

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

## Συγκρίνοντας δύο υπολογιστές

### • Απόδοση ΚΜΕ

- Συγκρίνοντας αποδόσεις
  - Έστω υπολογιστές X και Y
  - Εάν:

$$\text{Απόδοση}(X) > \text{Απόδοση}(Y)$$

- Τότε (και αντίστροφα):

$$\text{Χρόνος Εκτέλεσης}(X) < \text{Χρόνος Εκτέλεσης}(Y)$$

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

**Ο X είναι n φορές γρηγορότερος από τον Y**

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

## Βασικά μεγέθη μέτρησης χρόνου εκτέλεσης

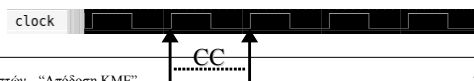
### • Απόδοση ΚΜΕ

- 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

### • Απόδοση ΚΜΕ

### 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

### • Απόδοση ΚΜΕ

- Χρόνος Εκτέλεσης για ένα πρόγραμμα

$$\text{ExecTime} = \text{IC} \times \text{CPI} \times \text{CC}$$

κύκλοι ρολογιού  
συνολικού προγράμματος

- 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

## Παράδειγμα

### • Απόδοση ΚΜΕ

Τύπος εντολής	A	B	C
CPI	1	2	3

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

- Επιλογή μεταξύ 2 ακολουθιών εντολών
  - Ποια ακολουθία εκτελεί τις περισσότερες εντολές;
  - Ποια είναι ταχύτερη;
  - Ποιο το μέσο CPI σε κάθε περίπτωση;

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

## Συσχέτιση με λογισμικό

### • Απόδοση ΚΜΕ

- Αλγόριθμος**
  - Καθορίζει το IC
  - Ενδεχομένως καθορίζει το CPI, ευνόοντας 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

!

Το υλικό (ISA) καθορίζει και τα τρία μεγέθη (IC, CPI και CC)

## Μετροπρογράμματα

### • Απόδοση ΚΜΕ

- 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 ανόμιες κλάσεις
    - PCs, servers, embedded systems...

## Ο “νόμος” του Amdahl

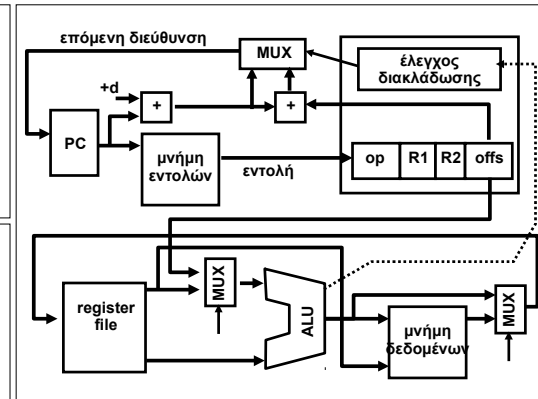
### • Απόδοση ΚΜΕ

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;

- “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 χρήση του νέου χαρακτηριστικού εμποδίζει να επιτύχουμε την «τέλεια» απόδοση

## ΚΜΕ ενός κύκλου (single-cycle)

### • Απόδοση ΚΜΕ • ΚΜΕ ενός κύκλου



## ΚΜΕ ενός κύκλου (single-cycle)

### • Απόδοση ΚΜΕ • ΚΜΕ ενός κύκλου

- **CPI = 1**
  - Σε κάθε έναν κύκλο ρολογιού ολοκληρώνεται μια εντολή ή
  - κάθε εντολή απαιτεί έναν κύκλο ρολογιού
- Πόσο πρέπει να είναι το CC;
- Ίσο με τη διάρκεια της μεγαλύτερης λειτουργίας
- Μη αποδοτικό σχήμα
- Όλες οι εντολές δεν απαιτούν τον ίδιο χρόνο

## Υποθετικό παράδειγμα

### • Απόδοση ΚΜΕ • 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

- CC πρέπει να είναι 600 ps (single cycle CPU)
  - Αν ήταν δυνατή η χρήση με μεταβλητό CC (προσοχή: πρακτικά αδύνατο!)
  - Ποια η βελτίωση της απόδοσης;
  - 25% ανάγνωση, 10% εγγραφή, 45% αριθμητικές, 20% διακλάδωσης

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

## ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων (multi-cycle)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

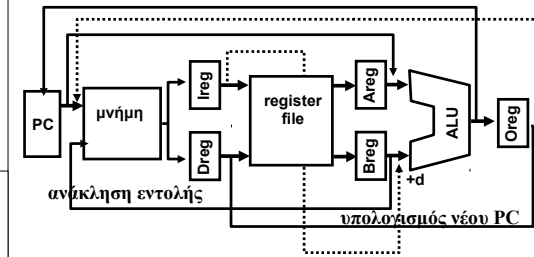
- $CPI > 1$ 
  - Κάθε εντολή χωρίζεται σε έναν μεταβλητό αριθμό βημάτων
  - Κάθε βήμα απαιτεί έναν κύκλο ρολογιού
- Πόσο πρέπει να είναι το CC;
- Ίσο με τη διάρκεια ολοκλήρωσης του μεγαλύτερου βήματος
- Καταχωρητές για τη συγκράτηση αποτελεσμάτων μεταξύ βημάτων
- Μέρη της ΚΜΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περισσότερες από μία φορές κατά την εκτέλεση μιας εντολής

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Απόδοση ΚΜΕ”

17

## Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα IF)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



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

!

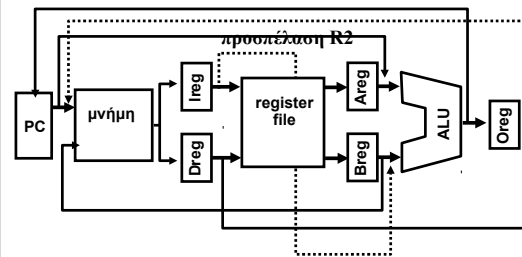
Η εντολή load απαιτεί τα περισσότερα βήματα (κύκλους ρολογιού) για να εκτελεστεί

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Απόδοση ΚΜΕ”

18

## Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα ID)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



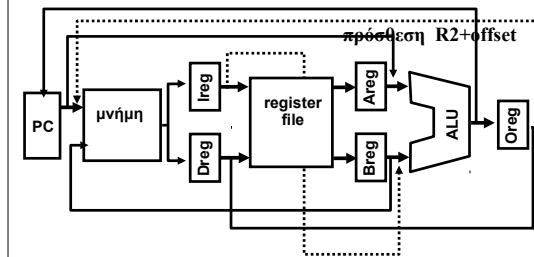
$R1 \leftarrow \text{mem}[R2 + \text{offset}]$

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Απόδοση ΚΜΕ”

19

## Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα EX)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



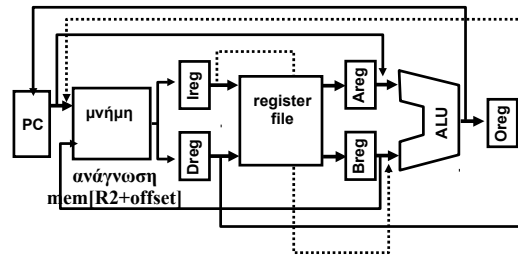
$R1 \leftarrow \text{mem}[R2 + \text{offset}]$

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Απόδοση ΚΜΕ”

20

## Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα DM)

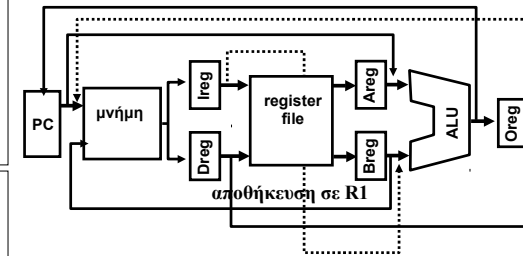
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



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

## Παράδειγμα: Εντολή load (βήμα WB)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



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

;

Σε κάθε βήμα, μερικά τμήματα μένουν ανενεργά. Πώς θα μπορούσαμε να τα εκμεταλλευτούμε;

## Μονάδα Ελέγχου ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

- Πολυπλοκότητα σημάτων ελέγχου
  - Δημιουργία σημάτων σε κάθε βήμα εκτέλεσης
  - Ανάλογα με το είδος της εντολής
    - Διατήρηση προηγούμενης κατάστασης
- Μέθοδοι υλοποίησης
  - Αυτόματα πεπερασμένων καταστάσεων
    - Ακολουθιακά λογικά κυκλώματα
    - 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

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

- Πλεονεκτήματα
  - Δεν απαιτείται ο μέγιστος χρόνος 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
- Σήμερα
  - Οι ΚΜΕ υψηλής απόδοσης χρησιμοποιούν πρόσθετες τεχνικές παραλληλισμού σε επίπεδο εντολών (instruction level parallelism – ILP)
    - (στο επόμενο μάθημα...)