

Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

(Pipelining και άλλες τεχνικές αύξησης απόδοσης)

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

Μ.Στεφανιδάκης



Επανάληψη: Απόδοση (Κ)ΜΕ

- Απόδοση ΚΜΕ

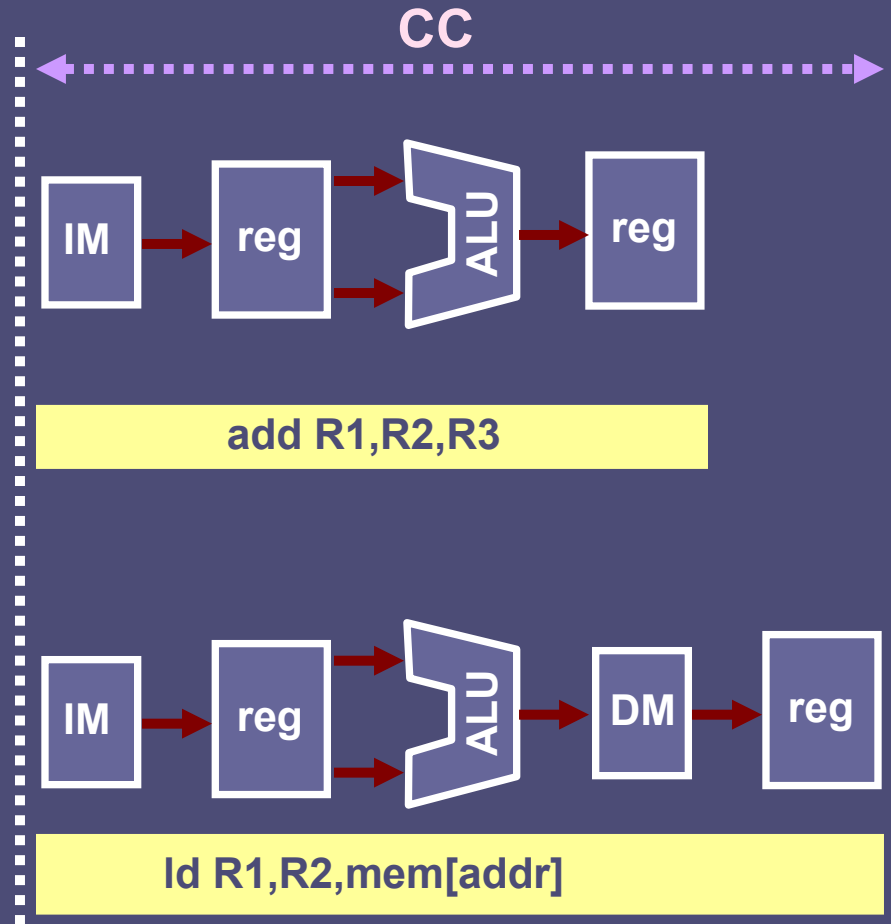
- Υπολογιστικό σύστημα
 - Η απόδοση εξαρτάται από **όλα** τα επιμέρους τμήματά του
 - Υλικό και λογισμικό
- (Κεντρική) Μονάδα Επεξεργασίας
 - Πόσο γρήγορα εκτελείται ένα πρόγραμμα;

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

ΚΜΕ ενός κύκλου (single-cycle)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου

Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε έναν κύκλο ρολογιού
 $CPI = 1$
 $CC =$ διάρκεια αργότερης εντολής



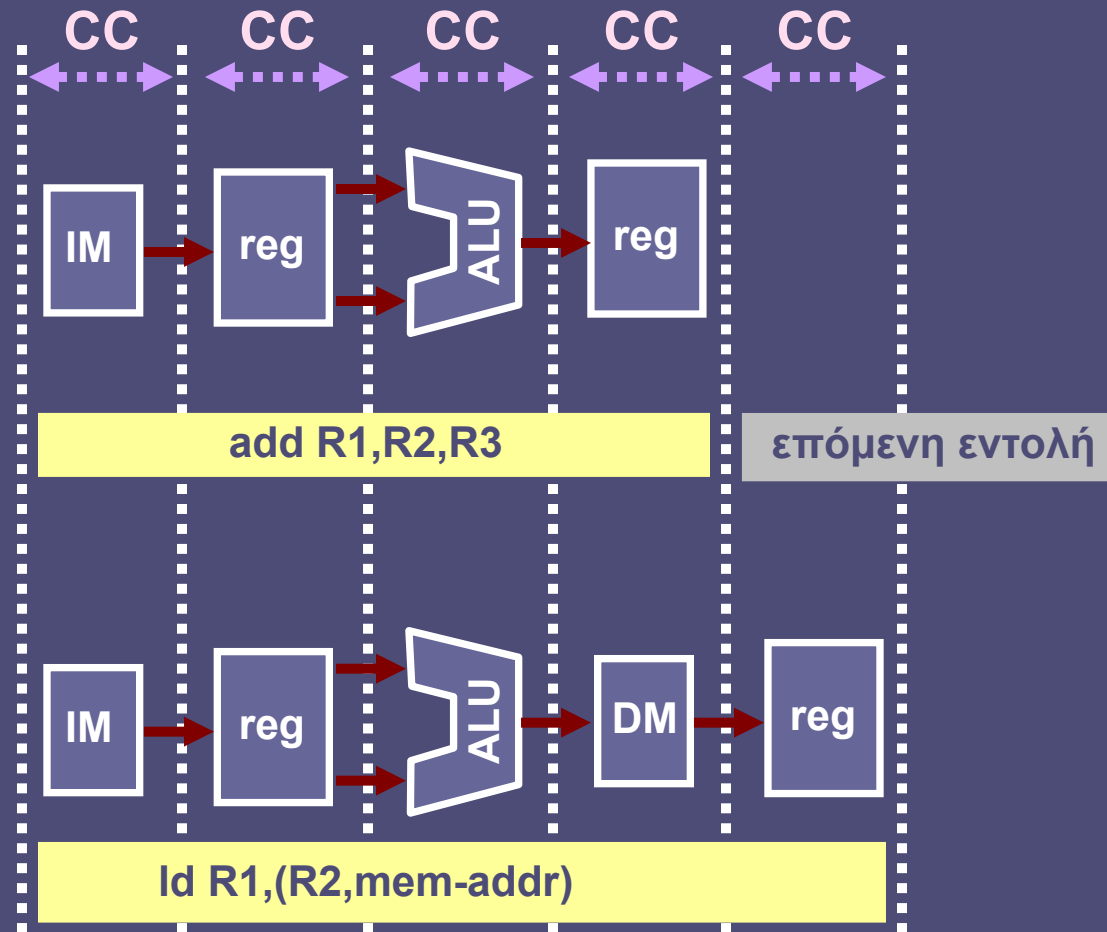
ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων (multi-cycle)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε μεταβλητό αριθμό βημάτων (κύκλων ρολογιού)

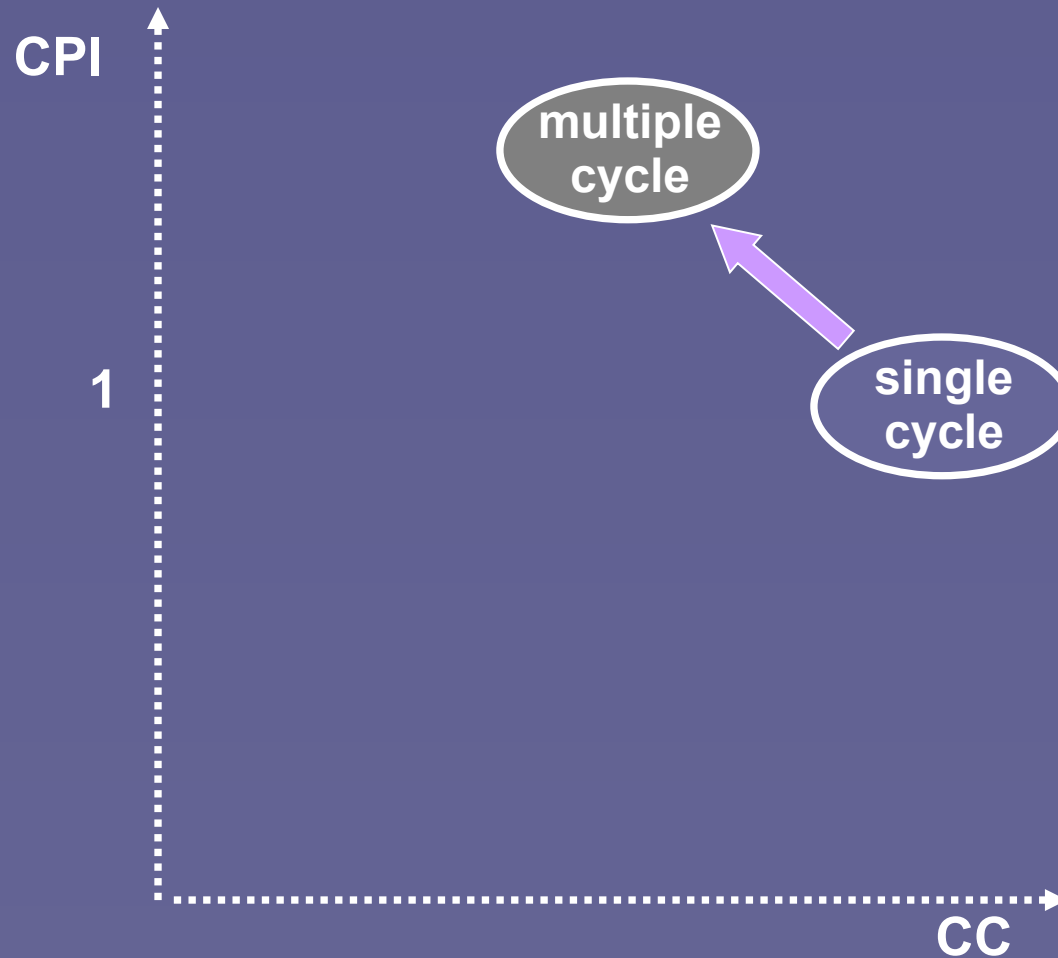
$CPI > 1$

CC = διάρκεια αργότερου βήματος



Απόδοση ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

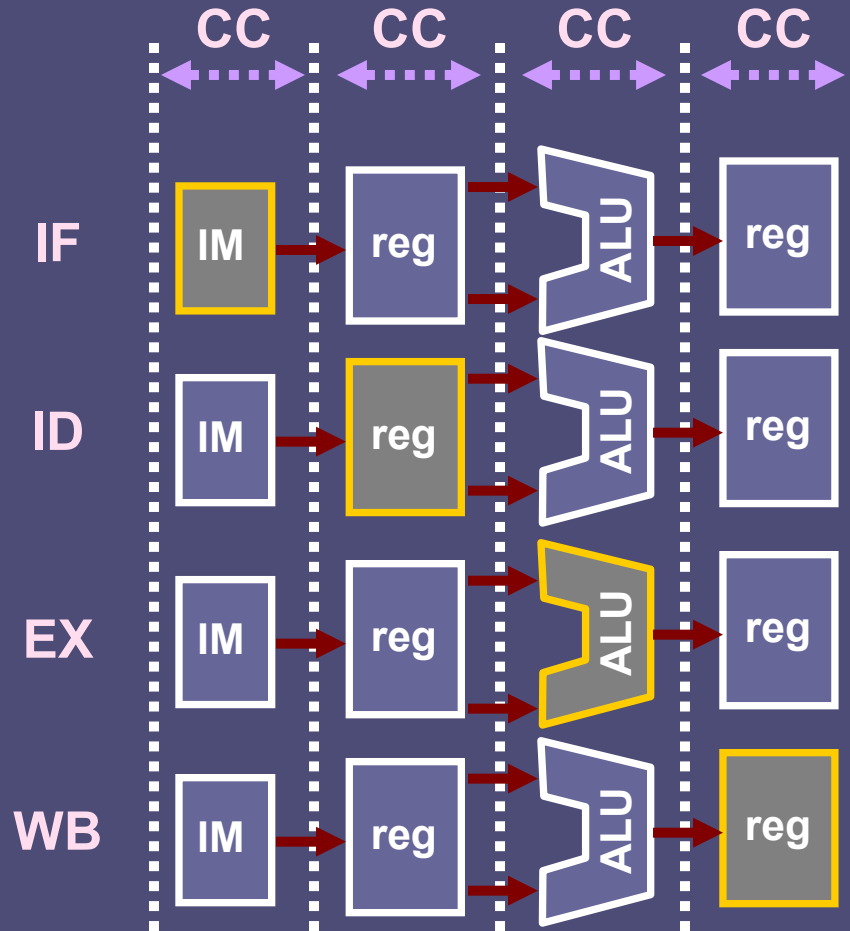
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



Πιθανότητα περαιτέρω βελτίωσης;

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων

Σε κάθε κύκλο, ένα μέρος της ΚΜΕ δεν χρησιμοποιείται!



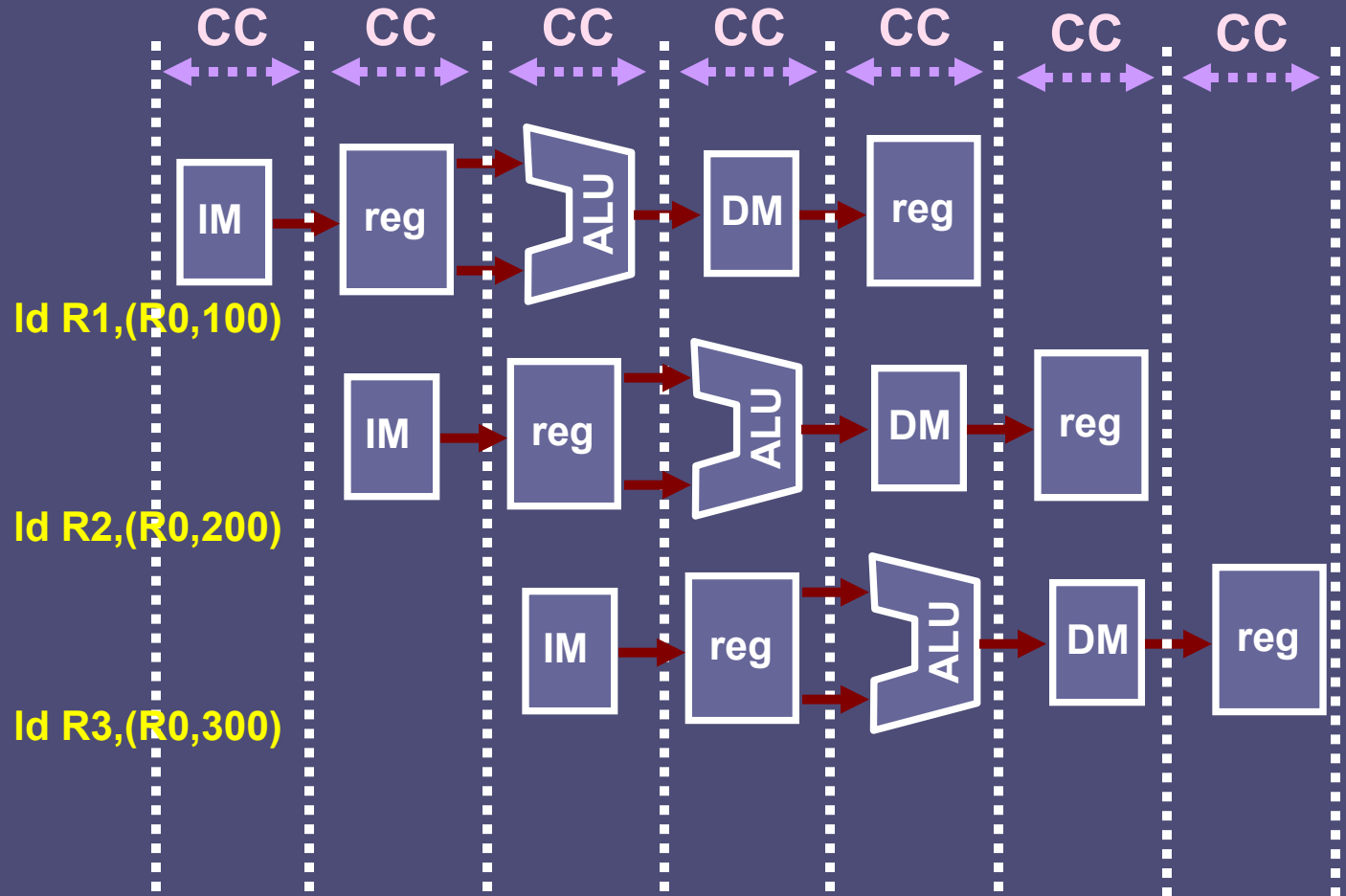
Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP

- **Instruction Level Parallelism (ILP)**
 - Παράλληλη (ταυτόχρονη) εκτέλεση μεταξύ εντολών
 - Δυναμικά στην ΚΜΕ
- **Η πιο κλασσική μορφή: Pipelining**
 - Επικάλυψη εκτέλεσης πολλαπλών εντολών
 - Την ίδια στιγμή
 - Βαθμίδες pipeline (μία ανά CC)
 - Βασικό στοιχείο αύξησης απόδοσης των επεξεργαστών
 - Στόχος
 - Να μειωθεί το CC, αλλά ταυτόχρονα
 - το CPI να παραμείνει 1

Αρχές τεχνικής pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining



•
;

Ποιος ο χρόνος
εκτέλεσης μιας
εντολής;

Κάθε πότε
ολοκληρώνεται
μια εντολή;

Απόδοση τεχνικής pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

- Χρόνος ολοκλήρωσης μιας εντολής (latency)
 - Όσο χρειάζεται η εντολή να διασχίσει το pipeline (ιδανικά $n * CC$, αν το pipeline έχει n βαθμίδες)
 - Δεν αλλάζει σε σχέση με την ΚΜΕ χωρίς pipeline: η μεμονωμένη εντολή **δεν εκτελείται ταχύτερα!**

Απόδοση τεχνικής pipelining

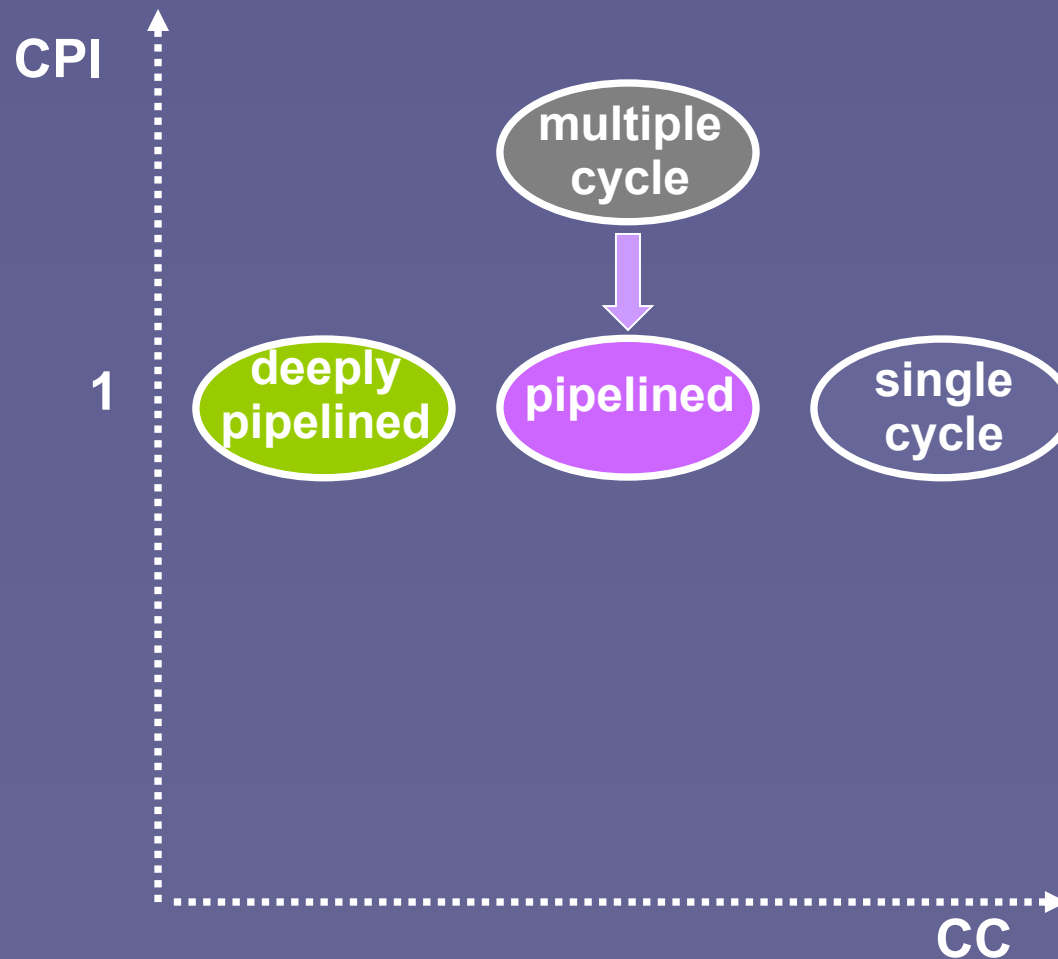
- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- **Pipelining**

- **Ρυθμός ολοκλήρωσης εντολών**

- Σε κάθε έναν κύκλο ρολογιού ολοκληρώνεται μια εντολή ($CPI = 1$)
 - Και μια νέα ξεκινά την εκτέλεσή της
- Η ιδανική περίπτωση...αλλά:
 - Απόδοση συστήματος μνήμης - αποκωδικοποίηση εντολών;
 - Ανάγκη ταυτόχρονης χρήσης ίδιων βαθμίδων pipeline από διαφορετικές εντολές;
 - Αλληλεξαρτήσεις δεδομένων εντολών;
 - Διακλαδώσεις;

Απόδοση ιδανικού pipeline

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- **Pipelining**



Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

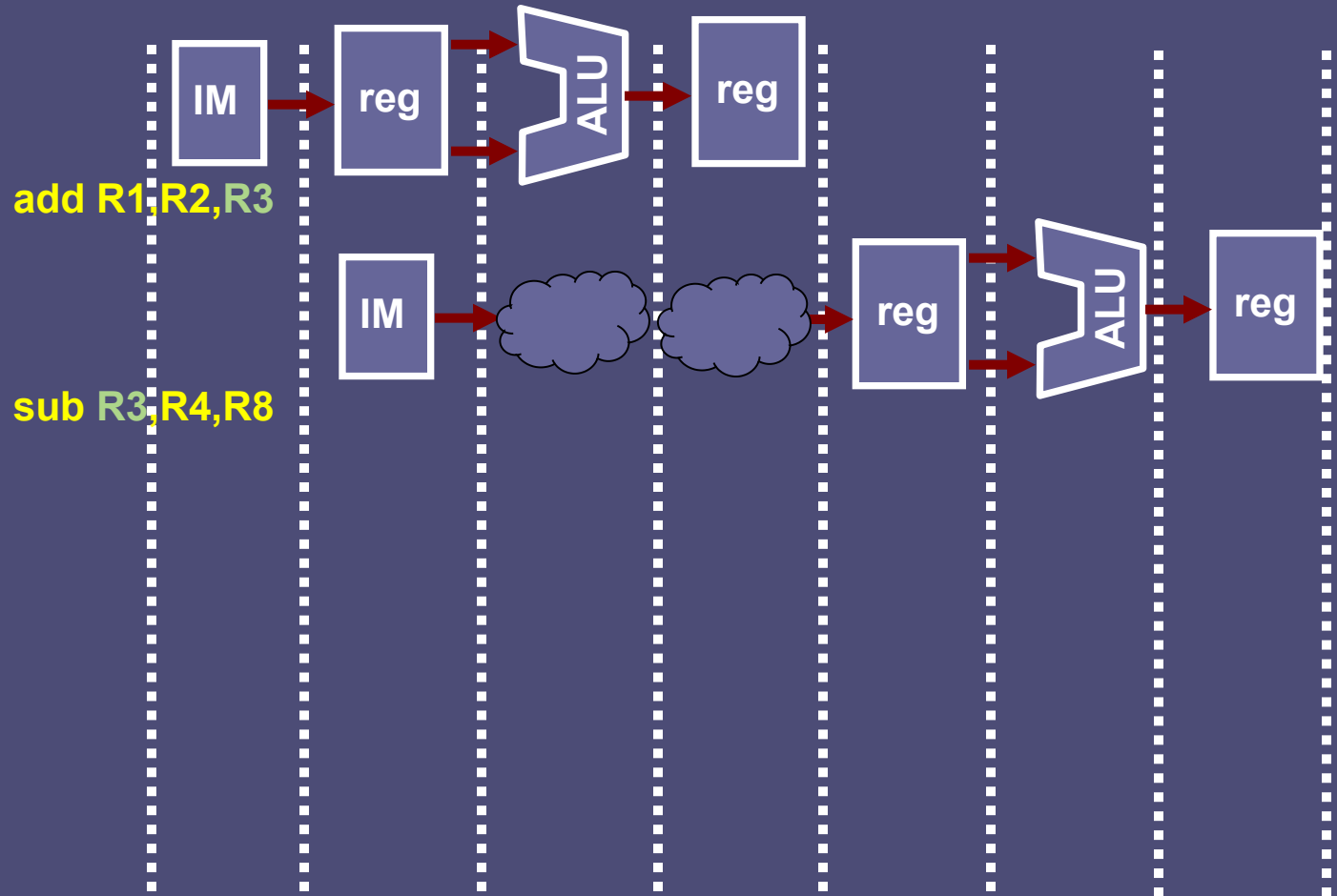
- **Αδυναμία χρήσης μιας βαθμίδας**
 - Structural hazards
 - Η βαθμίδα χρησιμοποιείται από άλλη εντολή
 - Αποφεύγεται με σωστή σχεδίαση και πρόσθετες μονάδες
- **Αλληλεξαρτήσεις δεδομένων**
 - Data hazards
 - Τα αναγκαία δεδομένα για την εκτέλεση μιας εντολής δεν είναι διαθέσιμα
 - Υπολογίζονται από προηγούμενη εντολή
 - Αντιμετωπίζεται (εν μέρει) με πρόσθετο υλικό
 - Μηχανισμός forwarding - bypassing

Forwarding - bypassing

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining



Pipeline bubbles



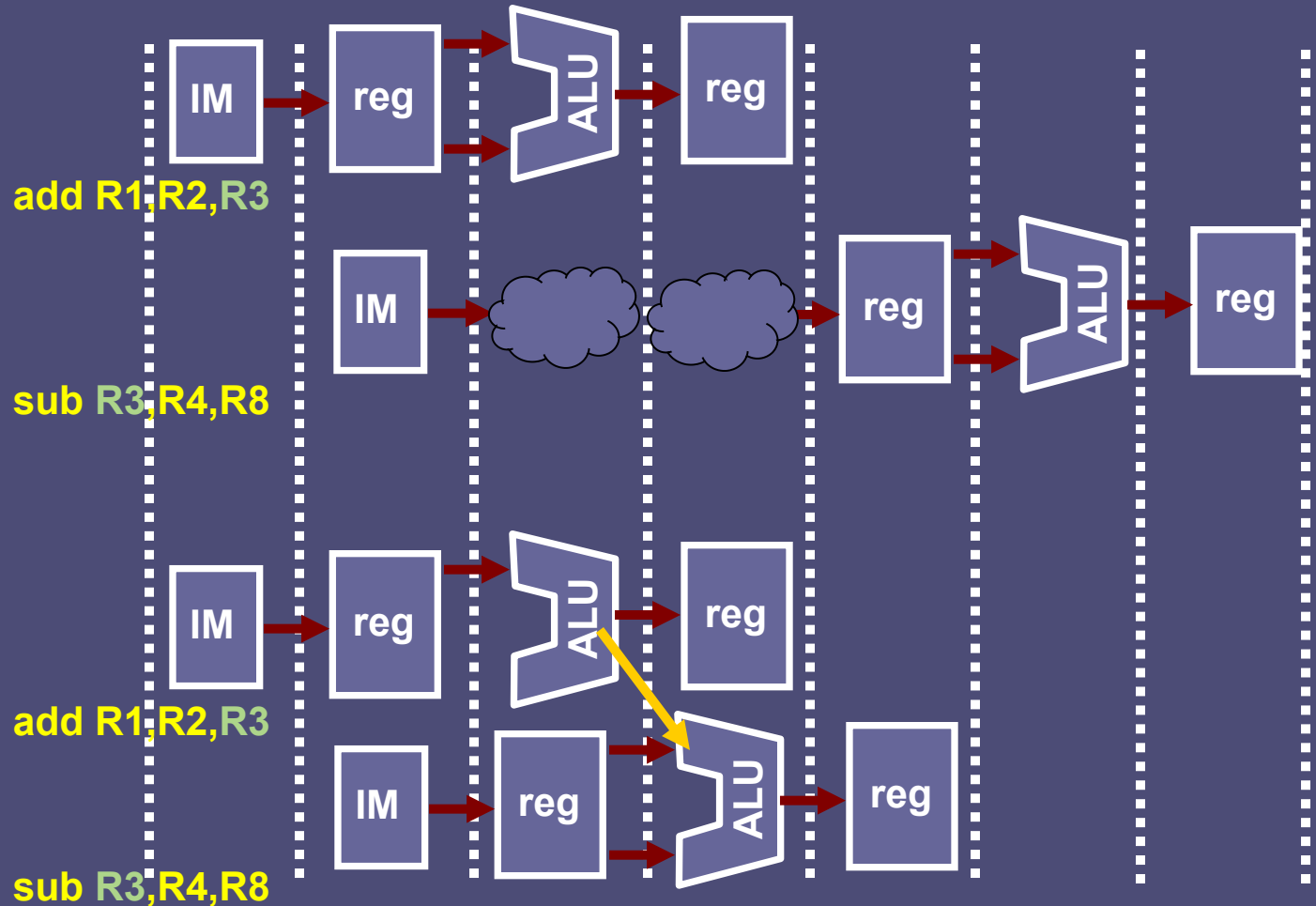
Forwarding - bypassing

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining



Pipeline **bubbles**

Δεν αποφεύγονται
πάντοτε!



Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining

- Διακλαδώσεις
 - Control (branch) hazards
 - Όταν η διακλάδωση πραγματοποιείται, η ροή της εκτέλεσης αλλάζει
 - Μεταπήδηση σε άλλη θέση του προγράμματος κι όχι στην επόμενη εντολή
 - Οι επόμενες εντολές που τυχόν έχουν μπει στο pipeline μετά την εντολή διακλάδωσης δεν θα είναι εκείνες που πρέπει
 - Η διακλάδωση αποφασίζεται συνήθως αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της αποκωδικοποίησης (ID)
 - Συνεπώς μία τουλάχιστον επόμενη εντολή θα έχει προλάβει να μπει στο pipeline πριν την απόφαση διακλάδωσης

Αντιμετώπιση control hazards

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- **Pipelining**

- **Πρόβλεψη διακλαδώσεων**

- Δυναμικές μέθοδοι στο υλικό του επεξεργαστή (διατήρηση ιστορίας προηγούμενων διακλαδώσεων)
- Συσχέτιση με αποφάσεις για άλλες διακλαδώσεις
- σήμερα: >90% σωστές προβλέψεις

- **Σε περίπτωση λάθους πρόβλεψης**

- Απόρριψη όλων των λανθασμένων εντολών στο pipeline
- Χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψη τα αποτελέσματά τους

Pipelining και διακοπές-σφάλματα

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- **Pipelining**

- **Interrupts - Exceptions**

- Ποια εντολή στο pipeline προκάλεσε τη διακοπή;

- **Διαδικασία**

- Διακοπή εκτέλεσης εντολής
 - Ολοκλήρωση προηγούμενων εντολών στο pipeline
 - Άδειασμα pipeline (flush) από τυχόν επόμενες εντολές
 - Μετάβαση σε προκαθορισμένη διεύθυνση
 - Καθορίζεται από το Λειτουργικό Σύστημα

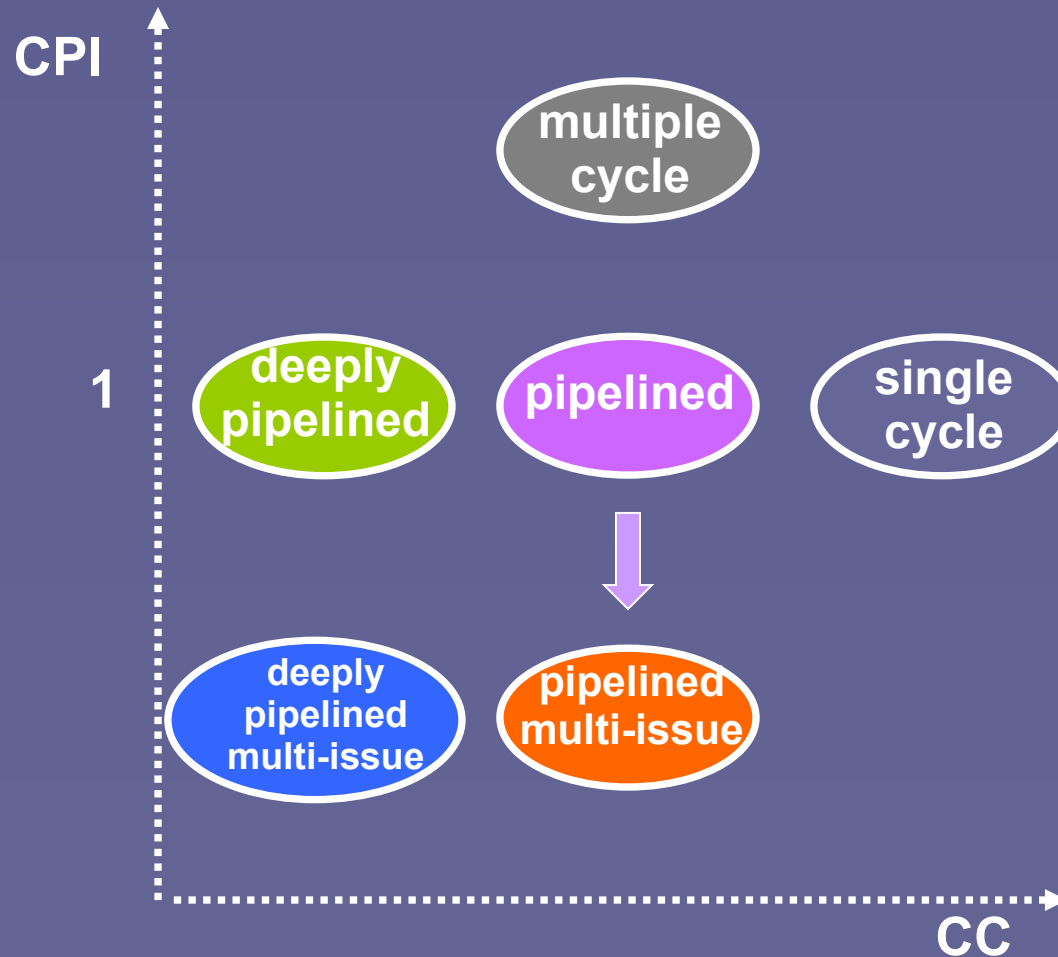
Ακόμα μεγαλύτερος βαθμός ILP

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

- **Ο στόχος: $CPI < 1$**
 - Η αλλιώς: ολοκλήρωση πολλών εντολών ανά κύκλο ρολογιού
 - Πολλαπλές βαθμίδες εκτέλεσης
 - Σε κάθε κύκλο ξεκινά η εκτέλεση **πολλαπλών** νέων εντολών
- **Πολλαπλή εκτέλεση (multiple-issue)**
 - Στατική πολλαπλή εκτέλεση
 - Ο μεταγλωττιστής αποφασίζει κατά κύριο λόγο ποιες εντολές θα εκτελεστούν ταυτόχρονα
 - Δυναμική πολλαπλή εκτέλεση
 - Οι αποφάσεις εκτέλεσης λαμβάνονται από την ΚΜΕ

Απόδοση multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP



Είδη multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

- **Επεξεργαστές VLIW**

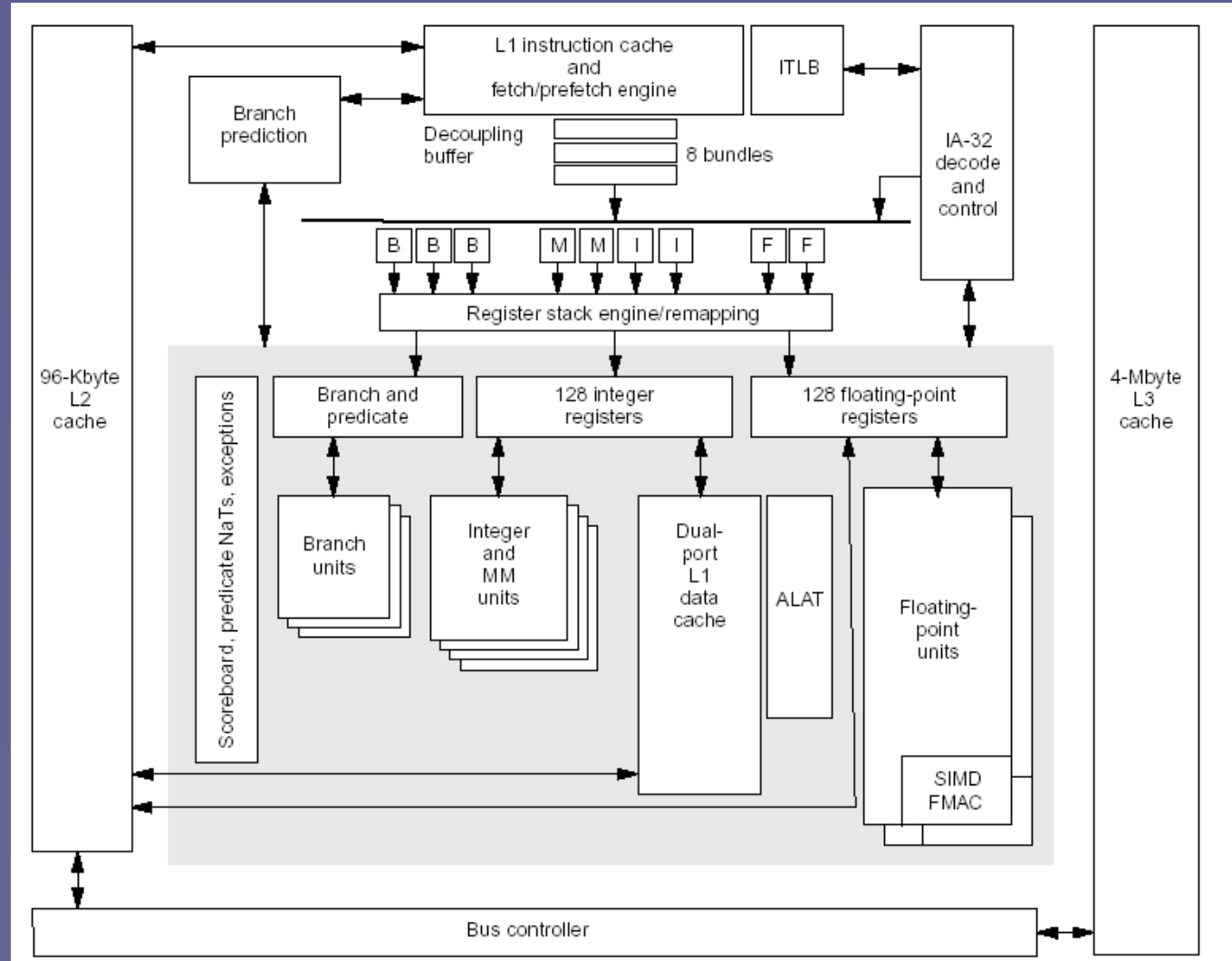
- Very Long Instruction Word
- Πακέτα πολλαπλών εντολών
 - Παράλληλη εκτέλεση
 - Δεν είναι δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί εντολών στο ίδιο πακέτο
- Ο μεταγλωττιστής συγκροτεί τα πακέτα εντολών
- Ελέγχει σε (μεγάλο βαθμό)
 - Αλληλεξαρτήσεις – αλληλουχίες εντολών
 - Πρόβλεψη διακλαδώσεων

Ιστορία: Intel Itanium processor (~2000)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

i

Η Intel είχε ονομάσει την αρχιτεκτονική αυτή **EPIC** (explicitly parallel instruction computer)



Είδη multiple-issue επεξεργαστών

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

- **Επεξεργαστές superscalar**
 - Ο επεξεργαστής ελέγχει σε κάθε κύκλο αν μπορεί να ξεκινήσει την εκτέλεση μιας ή περισσότερων εντολών
 - Πολλαπλές μονάδες εκτέλεσης
 - Δυναμική απόφαση ανάθεσης εντολών σε μονάδες
 - **Εκτέλεση εκτός σειράς (out-of-order execution)**
 - Ο κώδικας εκτελείται πάντα σωστά
 - Ανεξάρτητα από μεταγλώττιση
 - Intel IA-32/64 (Pentium και μετά), PowerPC...

Εικαζόμενη εκτέλεση

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

- **Speculative Execution**

- Κλειδί για την αύξηση του βαθμού παραλληλίας σε επίπεδο εντολών
 - Όταν προβλέπεται πολλαπλή ταυτόχρονη εκτέλεση εντολών
- Εκτέλεση εκτός σειράς
 - Επιτρέπεται η εκτέλεση επόμενων εντολών πριν την ολοκλήρωση της προηγούμενης εντολής
 - Προσωρινή αποθήκευση αποτελεσμάτων έως ότου να μην είναι πλέον εικαζόμενα
 - Διόρθωση λαθών πρόβλεψης διακλάδωσης

Ιστορία: IBM Power4 processor (2001)

- Απόδοση ΚΜΕ
- ΚΜΕ ενός κύκλου
- ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων
- ILP
- Pipelining
- Προχωρημένες τεχνικές ILP

