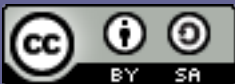


Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

(Pipelining και άλλες τεχνικές αύξησης απόδοσης)

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

Μ.Στεφανιδάκης

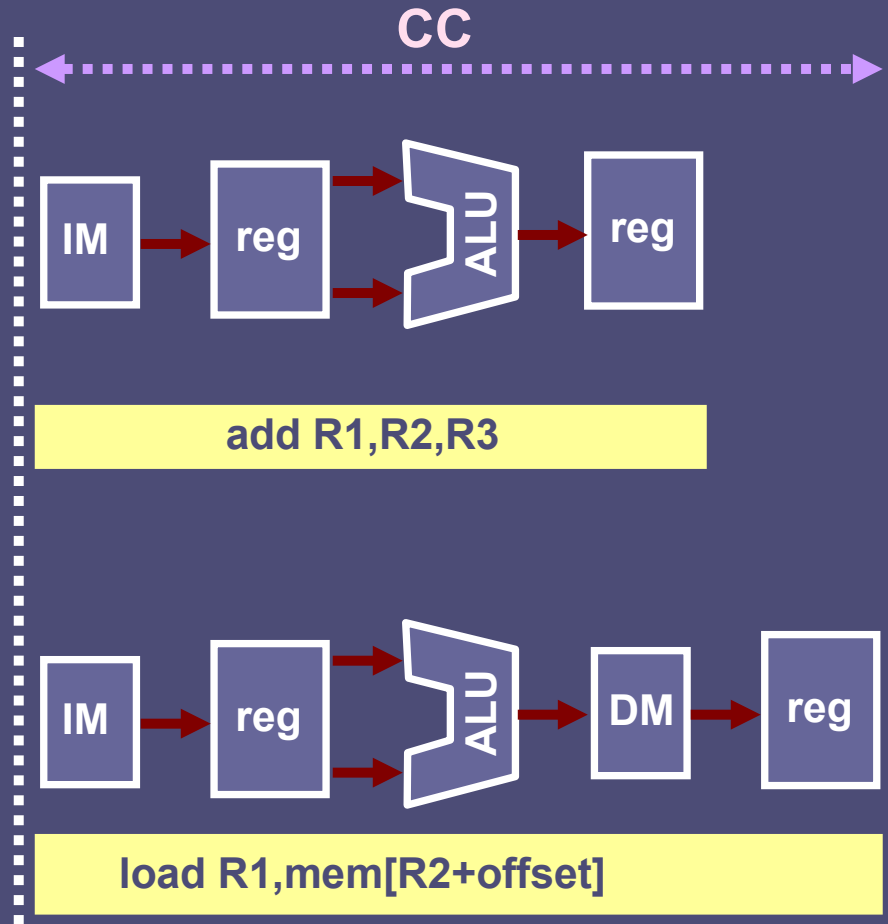


Επανάληψη: Απόδοση (Κ)ΜΕ

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

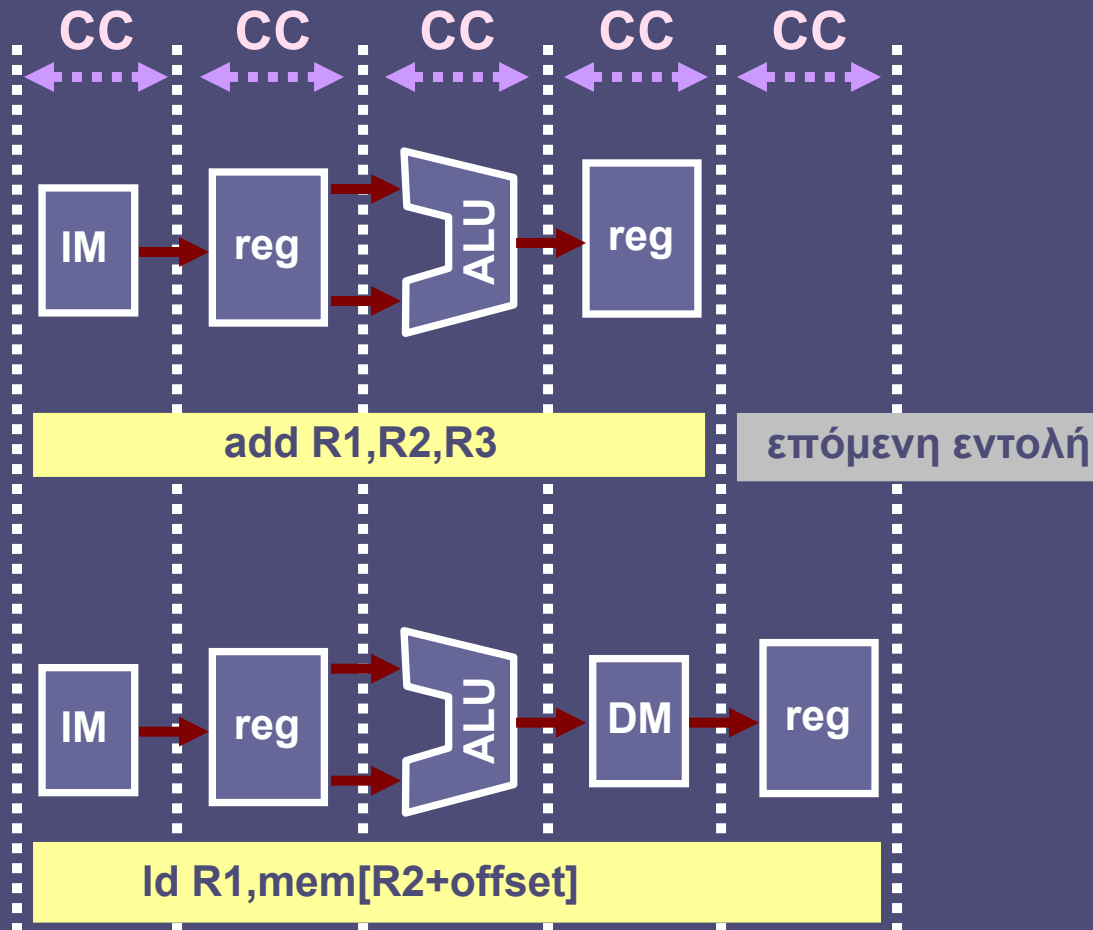
$$\text{ExecTime} = \text{IC} \times \text{CPI} \times \text{CC}$$

ΚΜΕ ενός κύκλου (single-cycle)



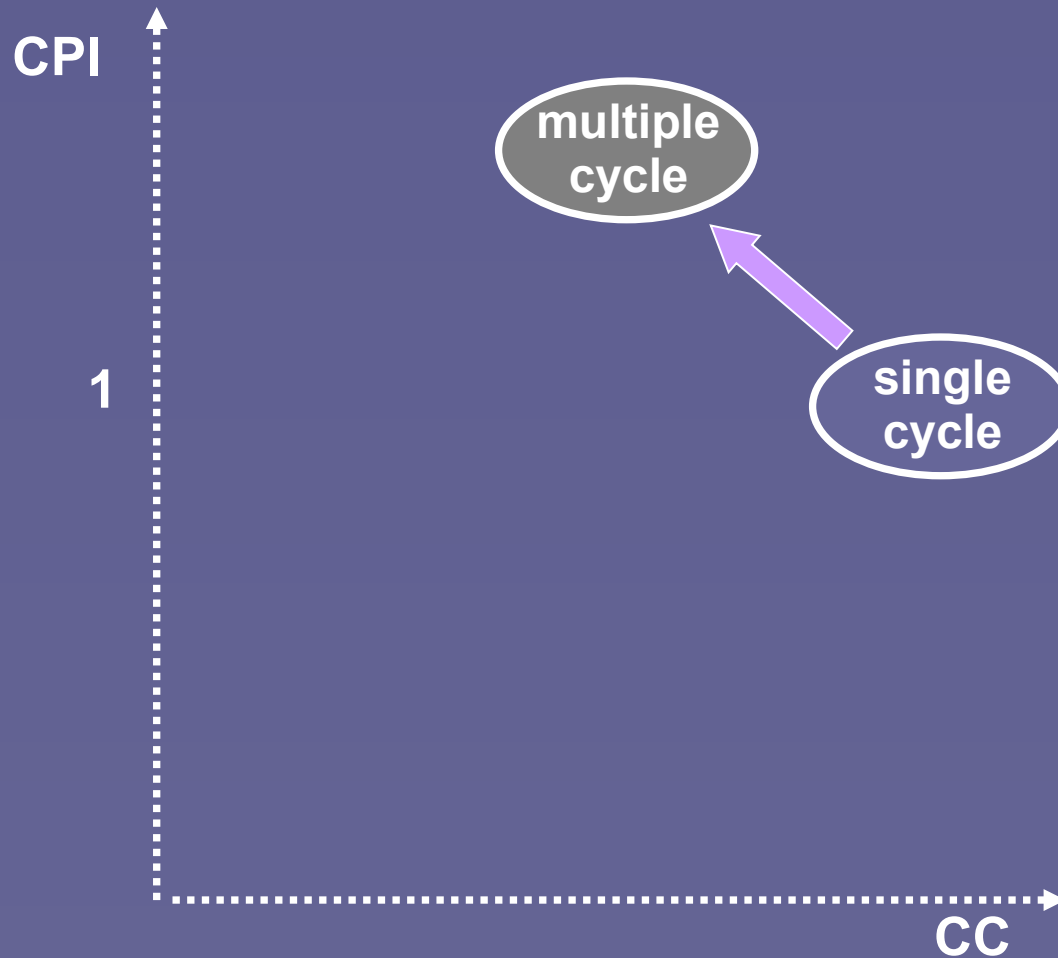
Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε έναν κύκλο ρολογιού
 $CPI = 1$
CC = διάρκεια αργότερης εντολής

ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων (multi-cycle)

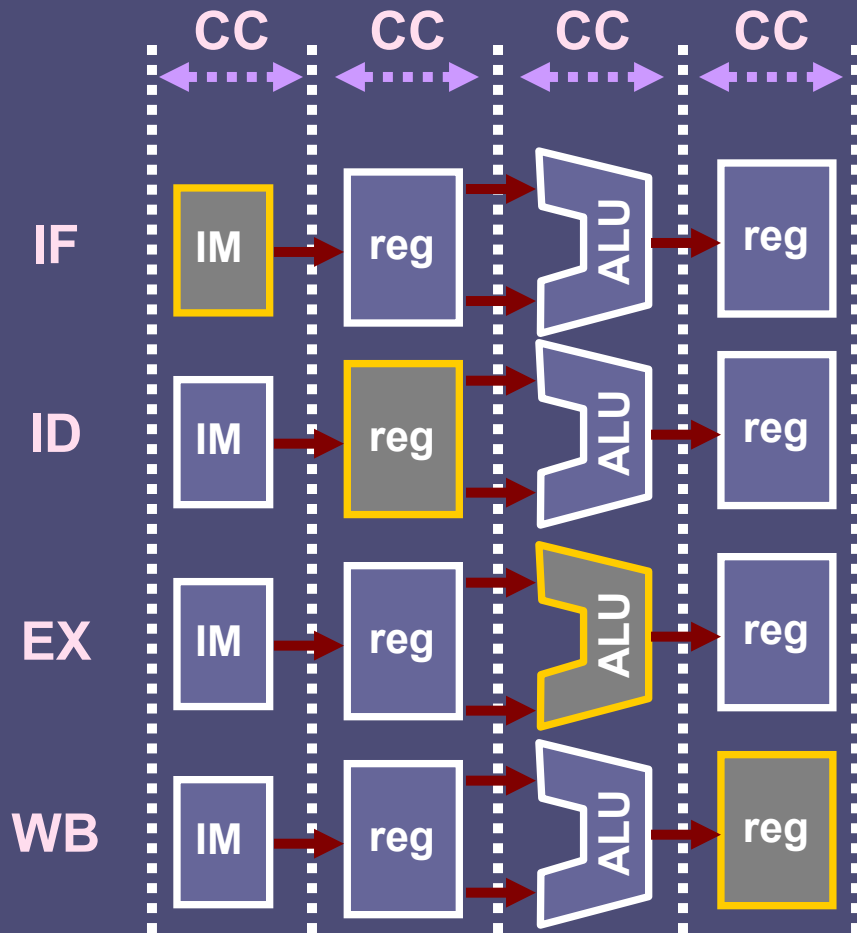


Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε μεταβλητό αριθμό βημάτων (κύκλων ρολογιού)
CPI > 1
CC = διάρκεια αργότερου βήματος

Απόδοση ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



Πιθανότητα περαιτέρω βελτίωσης;

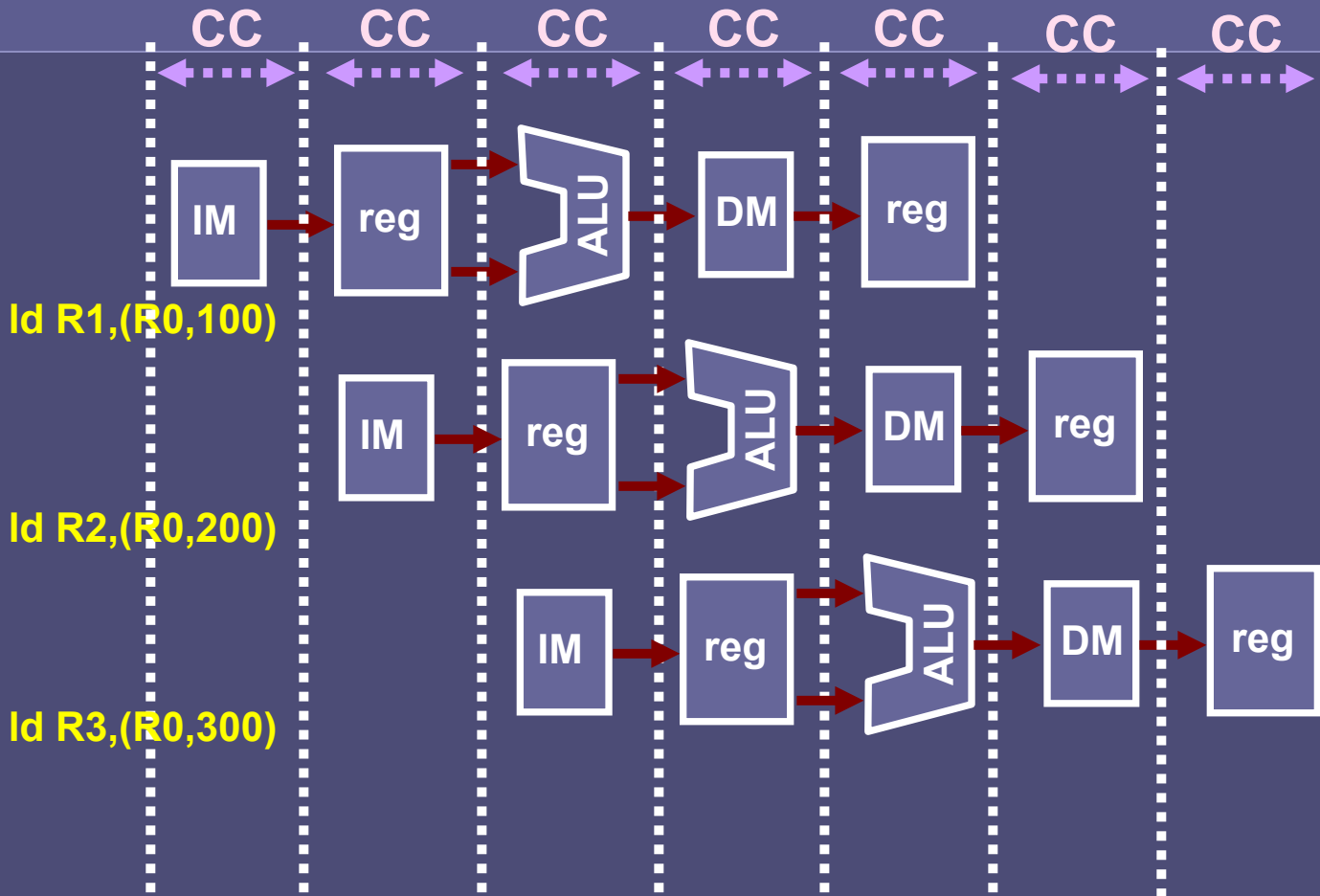


Σε κάθε κύκλο ρολογιού, ένα μέρος της ΚΜΕ δεν χρησιμοποιείται!

Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

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

Αρχές τεχνικής pipelining



- Ποιος ο χρόνος εκτέλεσης μιας εντολής;
- Κάθε πότε ολοκληρώνεται μια εντολή;

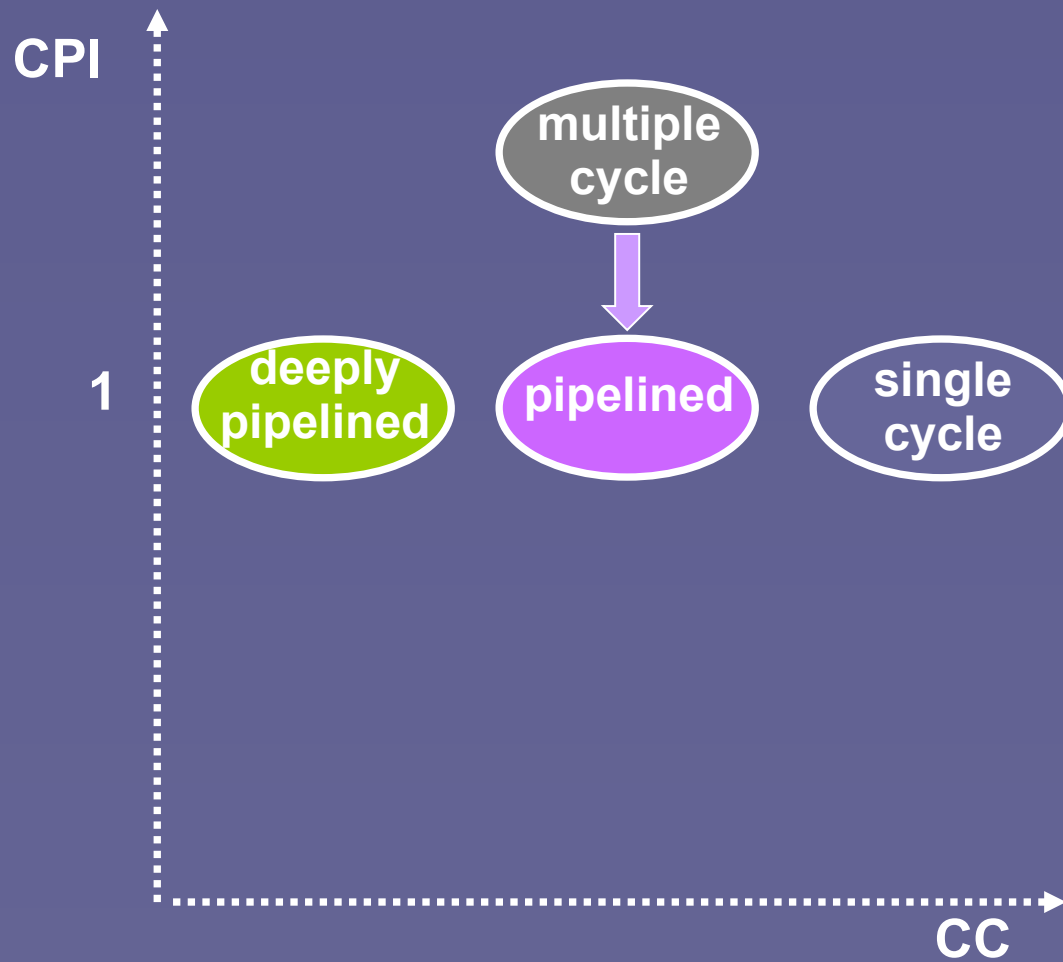
Απόδοση τεχνικής pipelining

- Χρόνος ολοκλήρωσης μιας εντολής (latency)
 - Όσο χρειάζεται η εντολή να διασχίσει το pipeline (ιδανικά $n * CC$, αν το pipeline έχει n βαθμίδες)
 - Στο απλό pipeline που μελετάμε κάθε εντολή διασχίζει όλες τις βαθμίδες – ακόμα κι αν δεν χρησιμοποιεί κάποια βαθμίδα
 - Δεν αλλάζει σε σχέση με την ΚΜΕ χωρίς pipeline: η μεμονωμένη εντολή **δεν εκτελείται ταχύτερα!**

Απόδοση τεχνικής pipelining

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

Απόδοση ιδανικού pipeline



deep pipeline:
pipeline με πάρα
πολλές βαθμίδες
και πολύ
μικρότερο CC

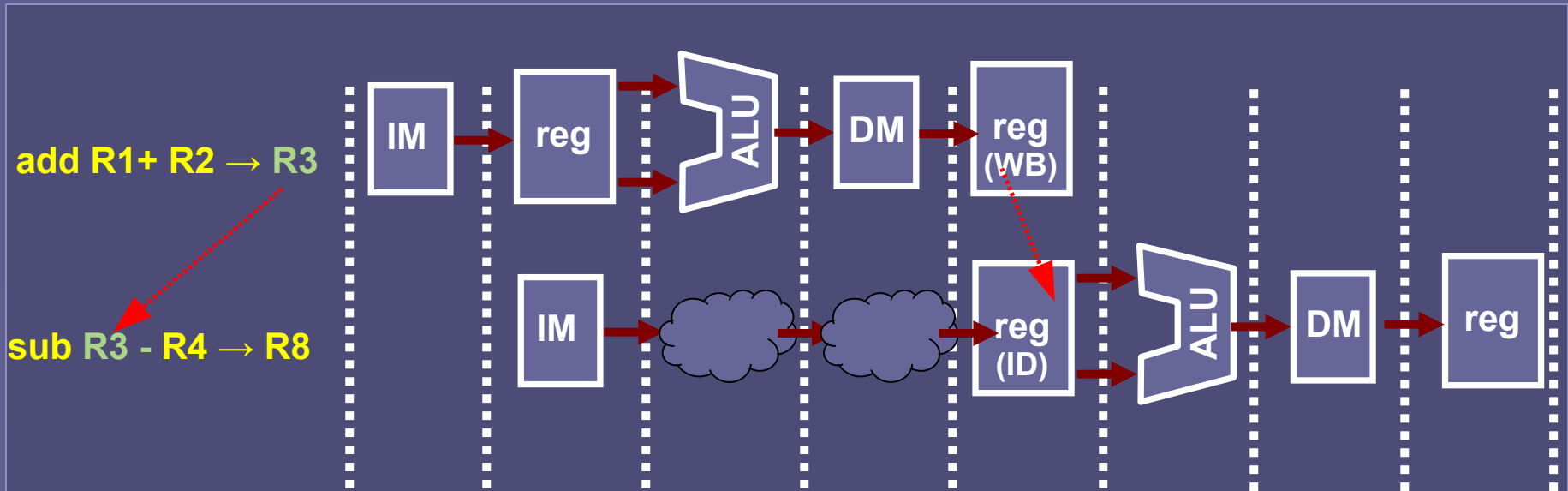
Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

- **Αδυναμία χρήσης μιας βαθμίδας**
 - Structural hazards
 - Η βαθμίδα χρησιμοποιείται από άλλη εντολή
 - Αποφεύγεται με σωστή σχεδίαση και πρόσθετες μονάδες, π.χ.
 - Στη συστοιχία καταχωρητών (register file) στον ίδιο κύκλο ρολογιού μια εντολή μπορεί να γράφει (WB, στην αρχή του κύκλου ρολογιού) και μια άλλη εντολή να διαβάζει (ID, στο τέλος του κύκλου ρολογιού)
 - Εντολές και δεδομένα προέρχονται από διαφορετικές κρυφές μνήμες: ταυτόχρονη ανάκληση εντολής (IF) και ανάγνωση ή εγγραφή δεδομένων από άλλη εντολή (DM)
 - Η ενημέρωση του PC γίνεται από ξεχωριστό κύκλωμα και όχι στην ALU: ταυτόχρονη φάση ανάκλησης (IF) με εκτέλεση άλλης εντολής (EX)

Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

- **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
 - Σε ορισμένες περιπτώσεις η καθυστέρηση (stall) του pipeline είναι αναπόφευκτη
 - Αυτό έχει ως συνέπεια την καθυστέρηση **και των εντολών που έπονται**

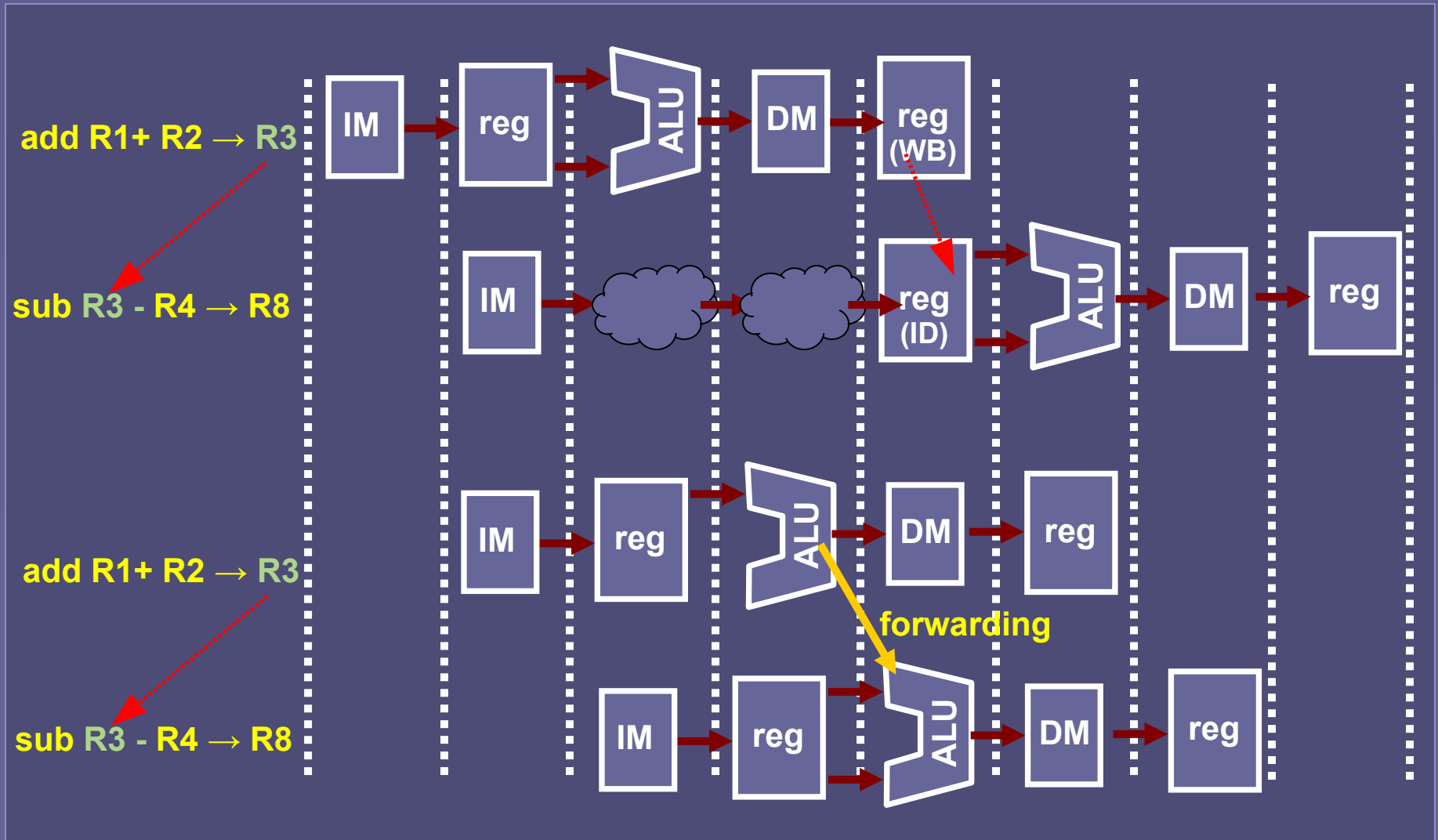
Καθυστέρηση (pipeline stall)



▪ Pipeline bubbles

- Τεχνική υλοποίησης της καθυστέρησης
- Απενεργοποιείται η ανάκληση νέων εντολών (ο PC «παγώνει»)
- Η εντολή που δεν μπορεί να εκτελεστεί μετατρέπεται σε nop (no operation) και διασχίζει το pipeline χωρίς να εκτελείται τίποτα έως ότου να είναι δυνατή η συνέχισή της

Forwarding - bypassing



Δυσκολίες στην εφαρμογή του 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

- **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

- **Interrupts - Exceptions**

- Ποια εντολή στο pipeline προκάλεσε τη διακοπή;

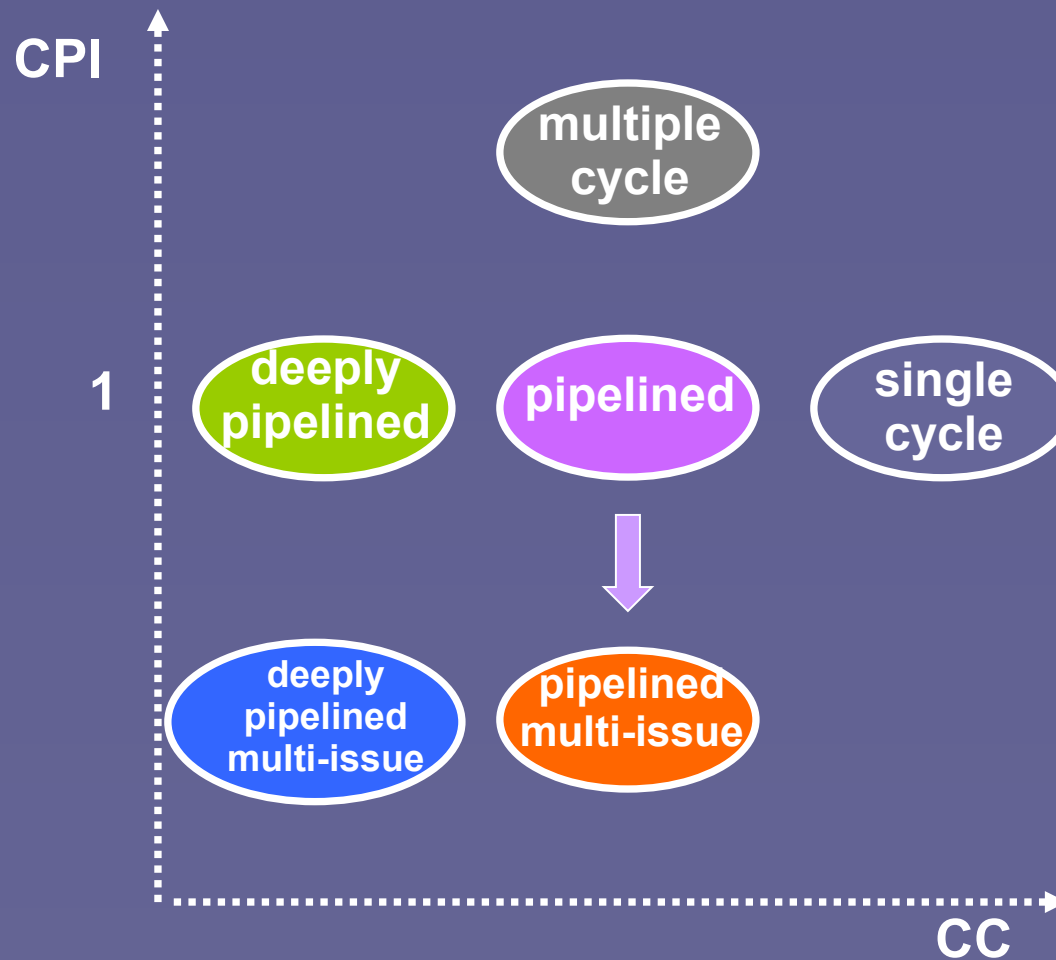
- **Διαδικασία**

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

Ακόμα μεγαλύτερος βαθμός 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 μεταγωγτιστής αποφασίζει κατά κύριο λόγο ποιες εντολές θα εκτελεστούν ταυτόχρονα
 - Δυναμική πολλαπλή εκτέλεση
 - Οι αποφάσεις εκτέλεσης λαμβάνονται από την ΚΜΕ

Απόδοση multiple-issue επεξεργαστών



Είδη multiple-issue επεξεργαστών

- **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

Είδη multiple-issue επεξεργαστών

- **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

- **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