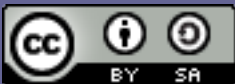


Παραλληλισμός σε επίπεδο εντολών

(Pipelining και άλλες τεχνικές αύξησης απόδοσης)

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

Μ.Στεφανιδάκης

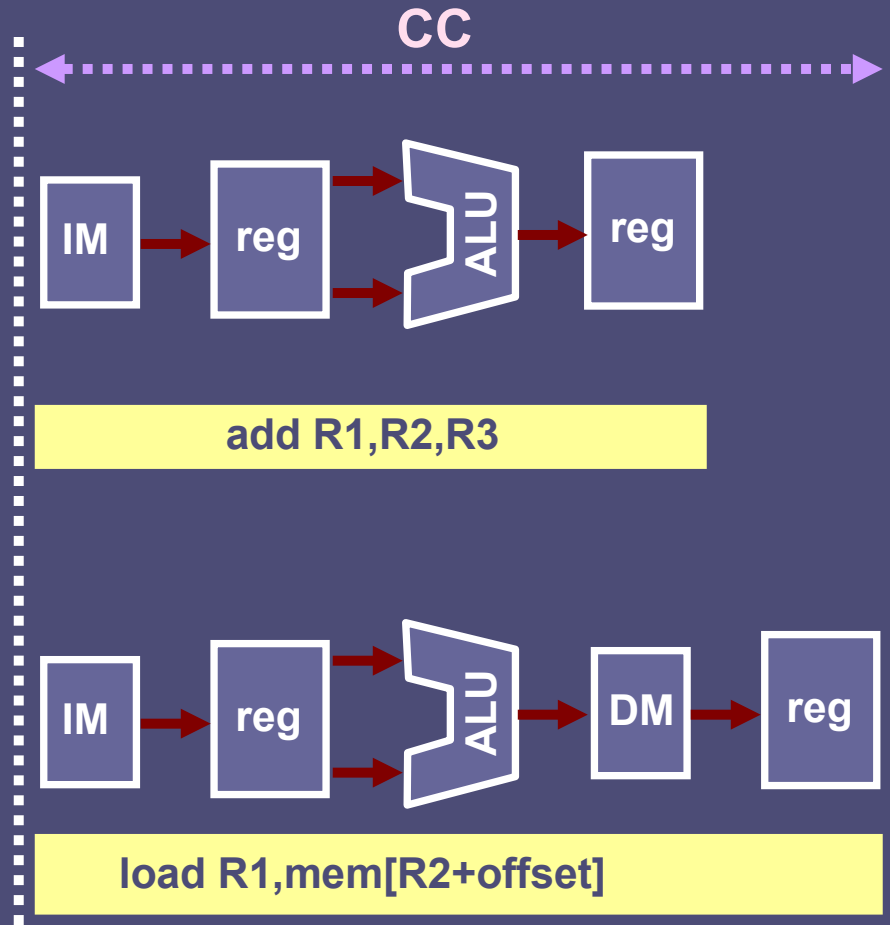


Επανάληψη: Απόδοση (Κ)ΜΕ

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

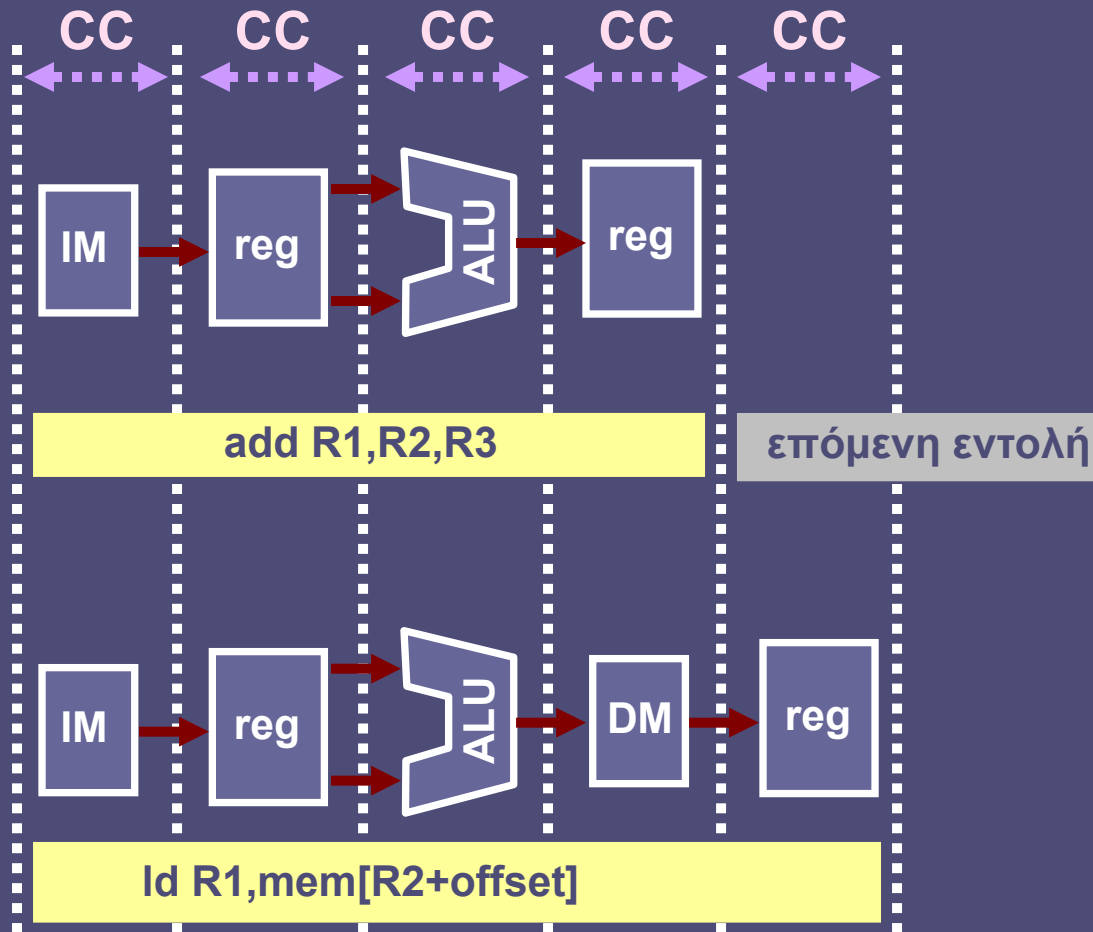
$$\text{ExecTime} = \text{IC} \times \text{CPI} \times \text{CC}$$

ΚΜΕ ενός κύκλου (single-cycle)



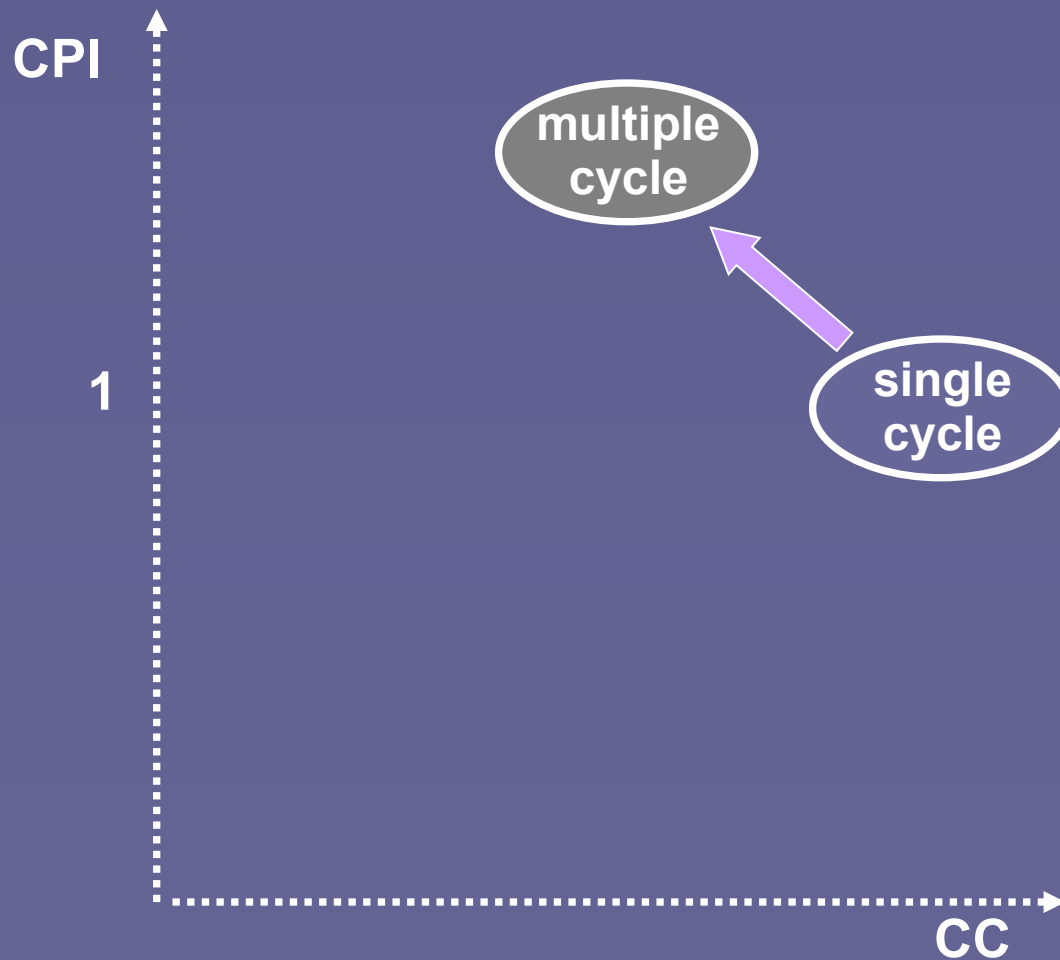
Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε έναν κύκλο ρολογιού
CPI = 1
CC = διάρκεια αργότερης εντολής

ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων (multi-cycle)



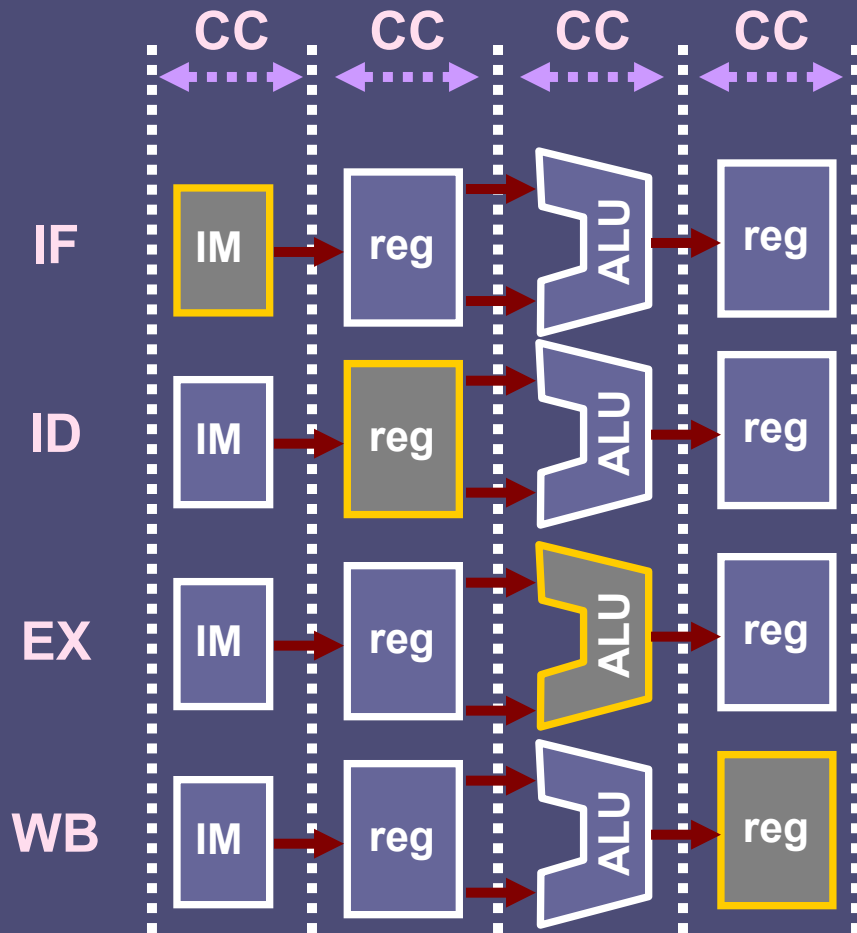
Κάθε εντολή ολοκληρώνεται σε μεταβλητό αριθμό βημάτων (κύκλων ρολογιού)
CPI > 1
CC = διάρκεια αργότερου βήματος

Απόδοση ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων



Η απόδοση της ΚΜΕ πολλαπλών κύκλων εξαρτάται από το πόσο ισοζυγισμένες είναι χρονικά οι βαθμίδες

Πιθανότητα περαιτέρω βελτίωσης;

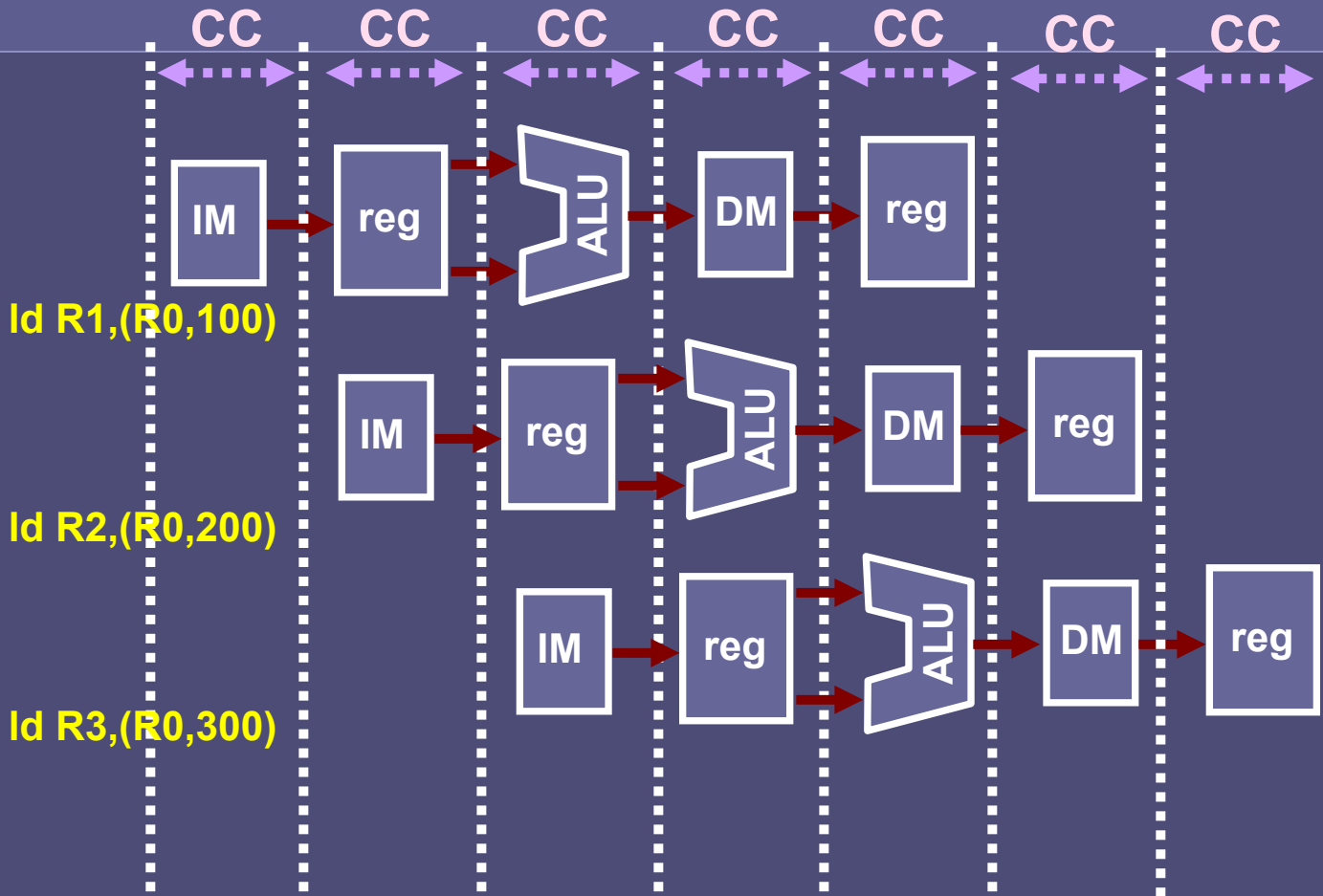


Σε κάθε κύκλο ρολογιού, ένα μέρος της ΚΜΕ δεν χρησιμοποιείται!

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;

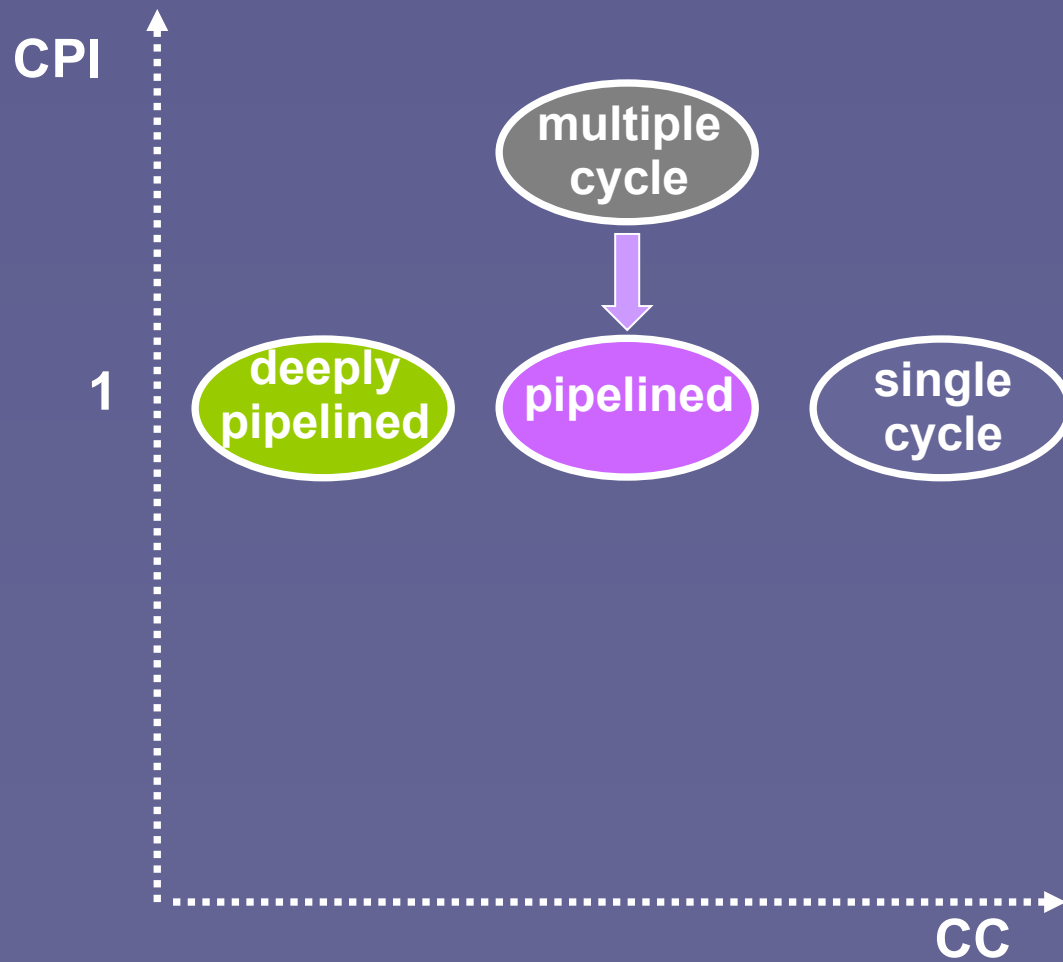
Απόδοση τεχνικής pipelining

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

Απόδοση τεχνικής pipelining (2)

- **Ρυθμός ολοκλήρωσης εντολών**
 - Σε κάθε έναν κύκλο ρολογιού ιδανικά ολοκληρώνεται μια εντολή
 - $CPI = 1$
 - Και μια νέα εντολή ξεκινά την εκτέλεσή της
 - Η **ιδανική** περίπτωση...αλλά:
 - Απόδοση συστήματος μνήμης - αποκωδικοποίησης εντολών;
 - Πόσο σύνθετο είναι το σύνολο εντολών και η αποκωδικοποίησή του;
 - Για ποιες εντολές τα δεδομένα εισόδου/εξόδου στις πράξεις προέρχονται από τη μνήμη;
 - 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

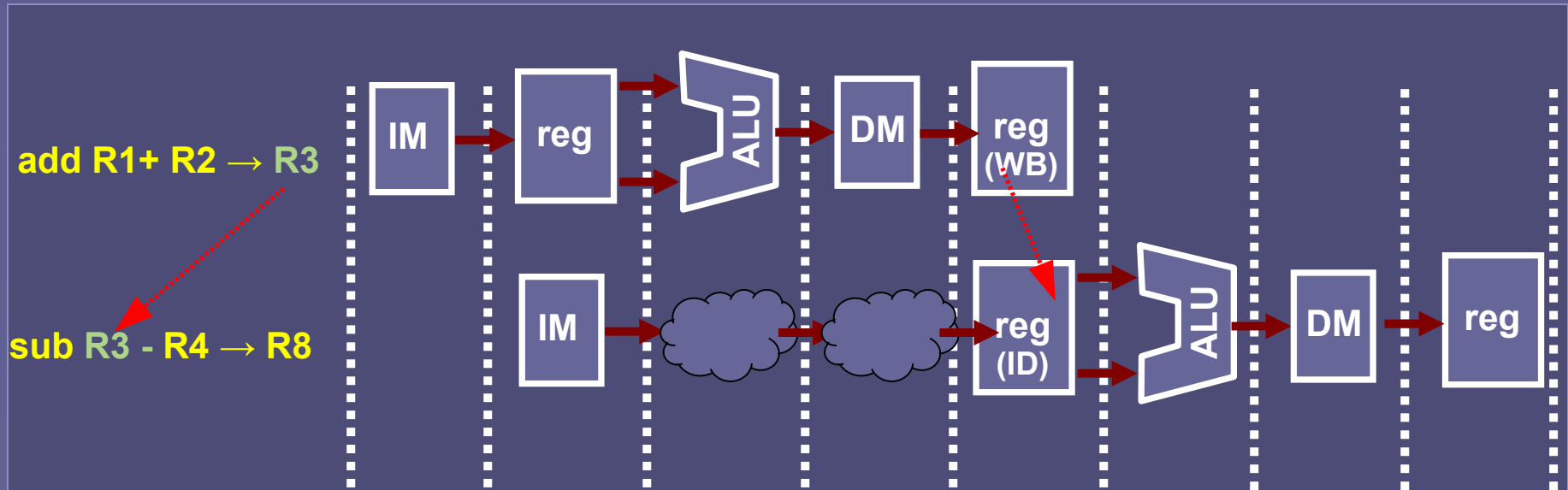
Δυσκολίες στην εφαρμογή του pipelining

- **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**

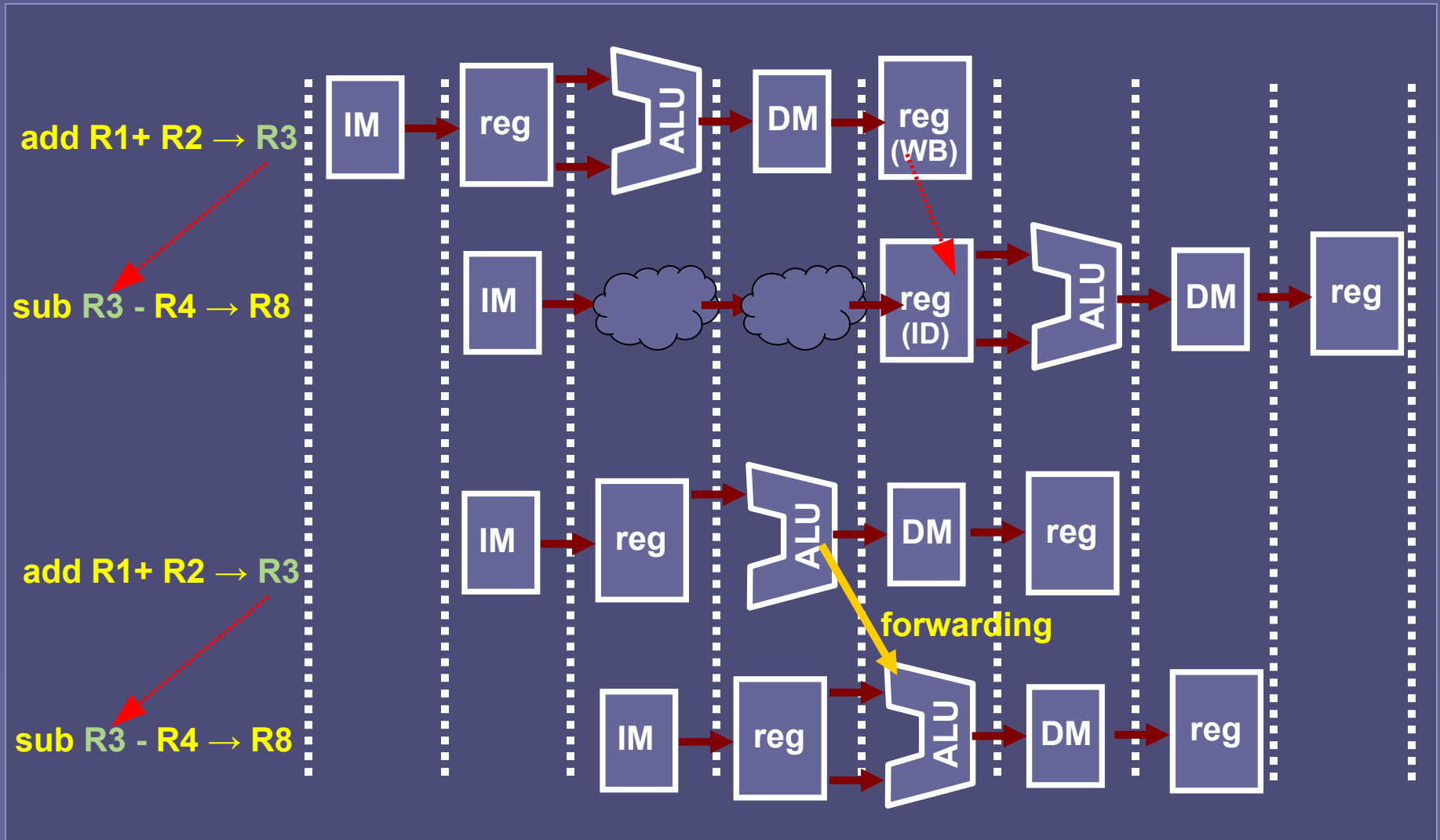
Καθυστέρηση (pipeline stall)



▪ Pipeline bubbles

- 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) – ή και αργότερα...
 - 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;

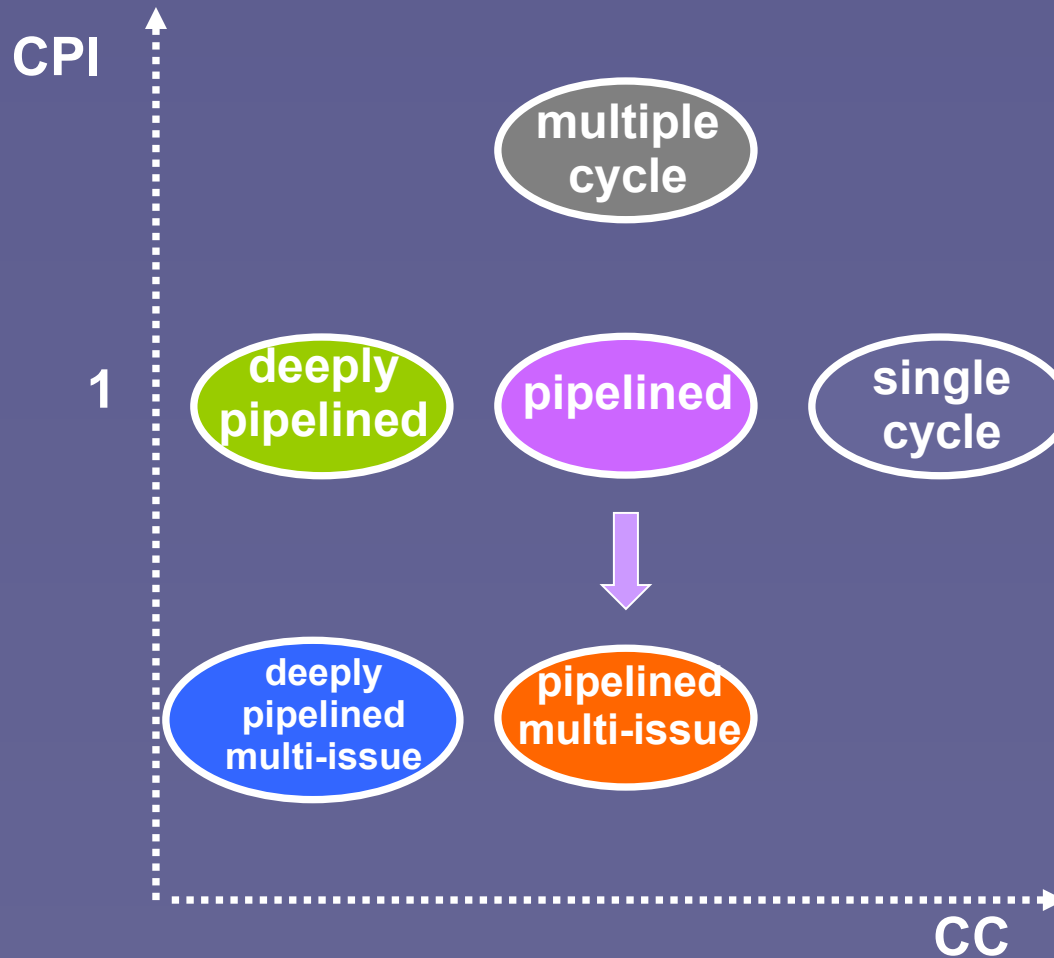
- **Διαδικασία**

- 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 παράλληλης εκτέλεσης εντολών 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