

# Αρχιτεκτονική Υπολογιστών



Γιώργος Δημητρίου

Ενότητα 3<sup>η</sup>: Μερική Επικάλυψη

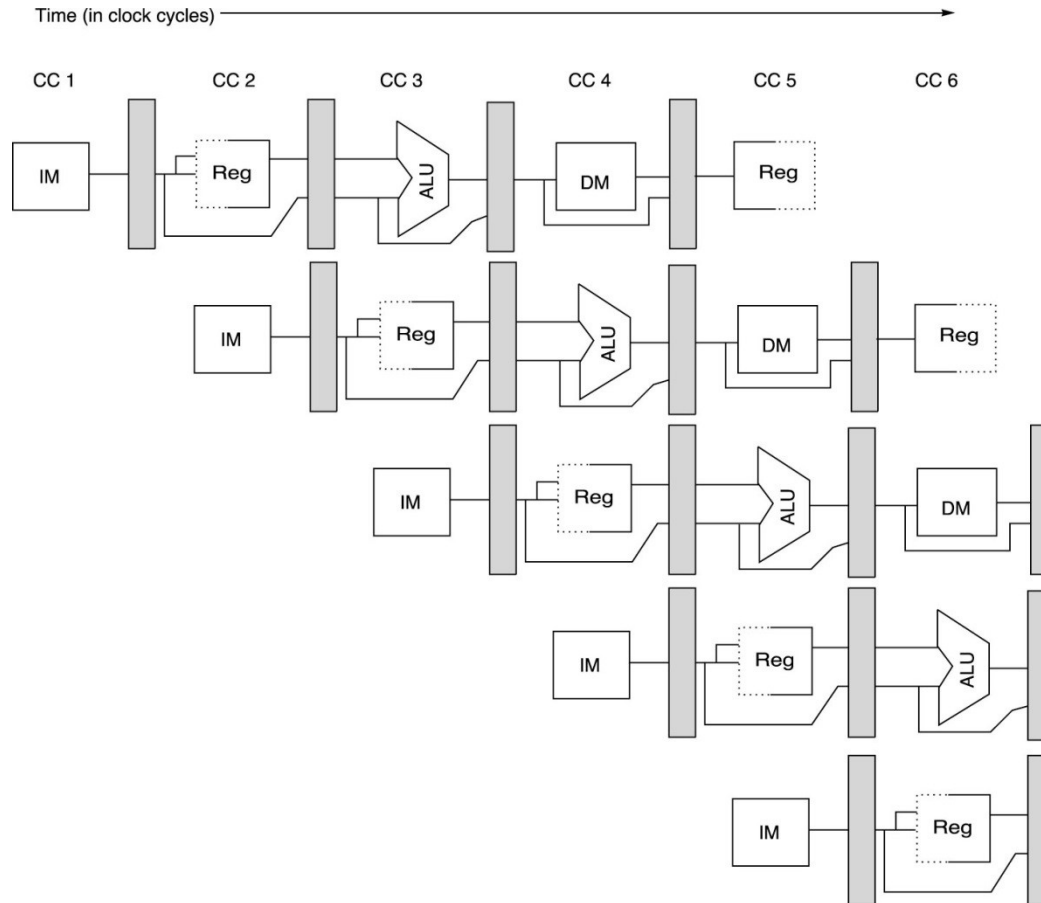
# Μερική Επικάλυψη

- Μηχανισμός μερικής επικάλυψης εντολών
  - Εξαρτήσεις → Κίνδυνοι (hazards)
  - Παροχέτευση
  - Πρόβλεψη διακλαδώσεων
- Μερική επικάλυψη σε μονάδες εκτέλεσης
  - Επαναχρησιμοποίηση υπομονάδων
  - Χρόνος ολοκλήρωσης μιας εκτέλεσης
  - Ρυθμός επανάληψης διαδοχικών εκτελέσεων

# Επικάλυψη Εντολών

- Διαχωρισμός σε φάσεις ίσης διάρκειας που υλοποιούνται σε υπομονάδες του επεξεργαστή
- Εισαγωγή απαιτούμενων καταχωρητών μεταξύ των υπομονάδων διαδοχικών φάσεων (βαθμίδων)
- Αντιμετώπιση κινδύνων
- Υποστήριξη μηχανισμού παγώματος

# Επικάλυψη RISC 5 Φάσεων



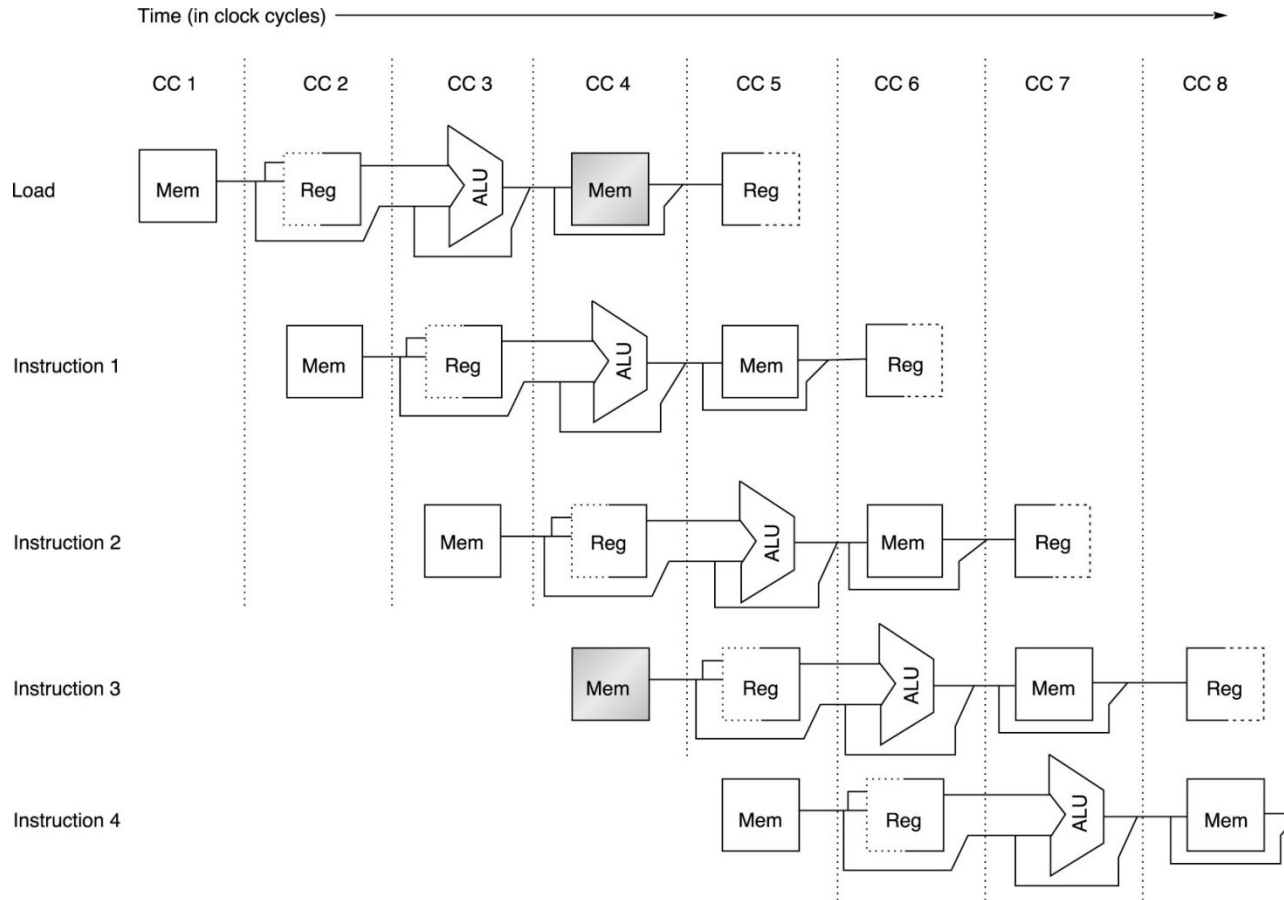
# Απόδοση Επικάλυψης

- Βελτίωση στο χρόνο ολοκλήρωσης μιας εντολής; Όχι! (Το αντίθετο πιο πιθανό!)
- Ρυθμός ολοκλήρωσης εντολών
- Επιτάχυνση ρυθμού ολοκλήρωσης εντολών
- Ιδανική απόδοση μερικής επικάλυψης σε μια συγκεκριμένη αρχιτεκτονική

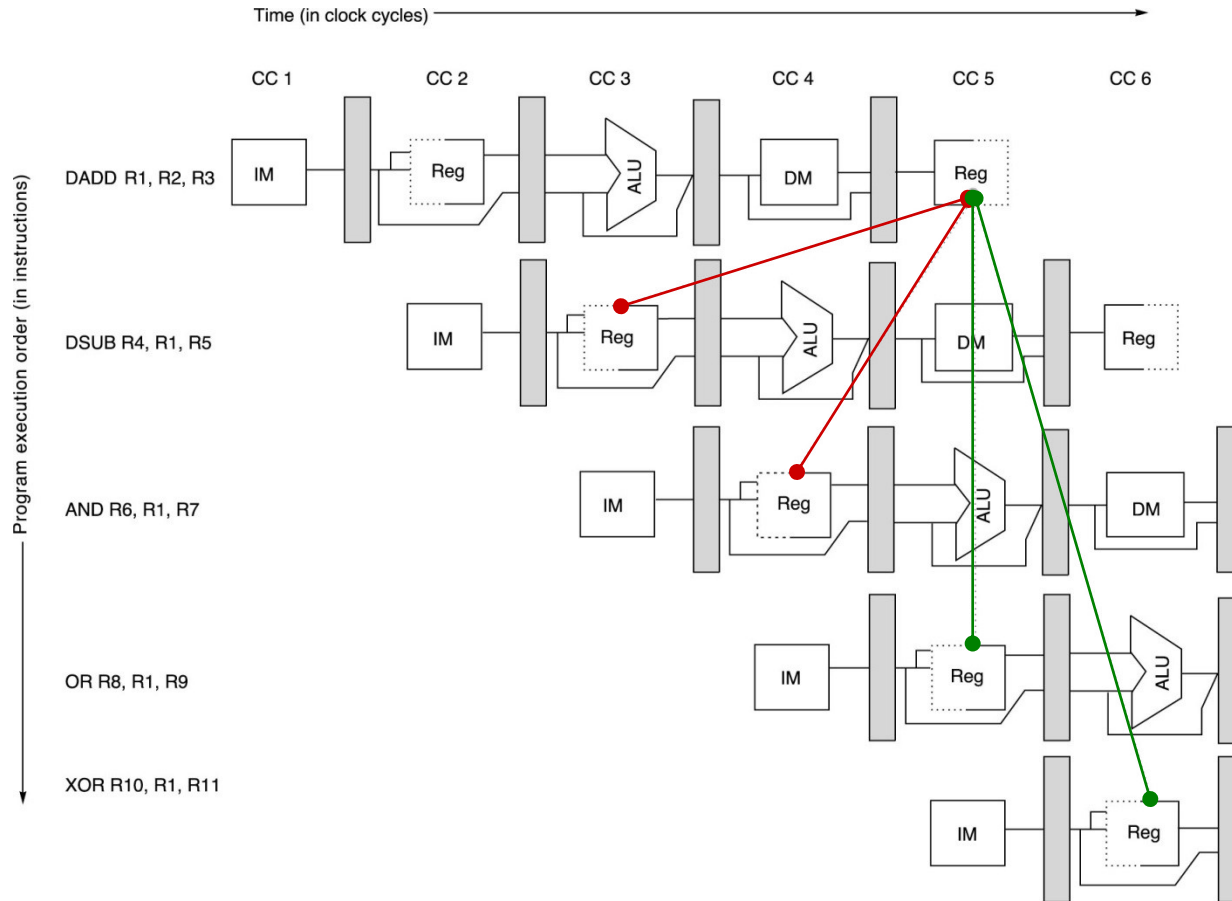
# Κίνδυνοι Επικάλυψης

- Κίνδυνοι από δομικές εξαρτήσεις (structural hazards)
- Κίνδυνοι εξαρτήσεων από δεδομένα (data hazards)
- Κίνδυνοι από διαδικασιακές εξαρτήσεις (control hazards)
- Αντιμετώπιση κινδύνων με πάγωμα του μηχανισμού επικάλυψης

# Κίνδυνοι Δομικών Εξαρτήσεων

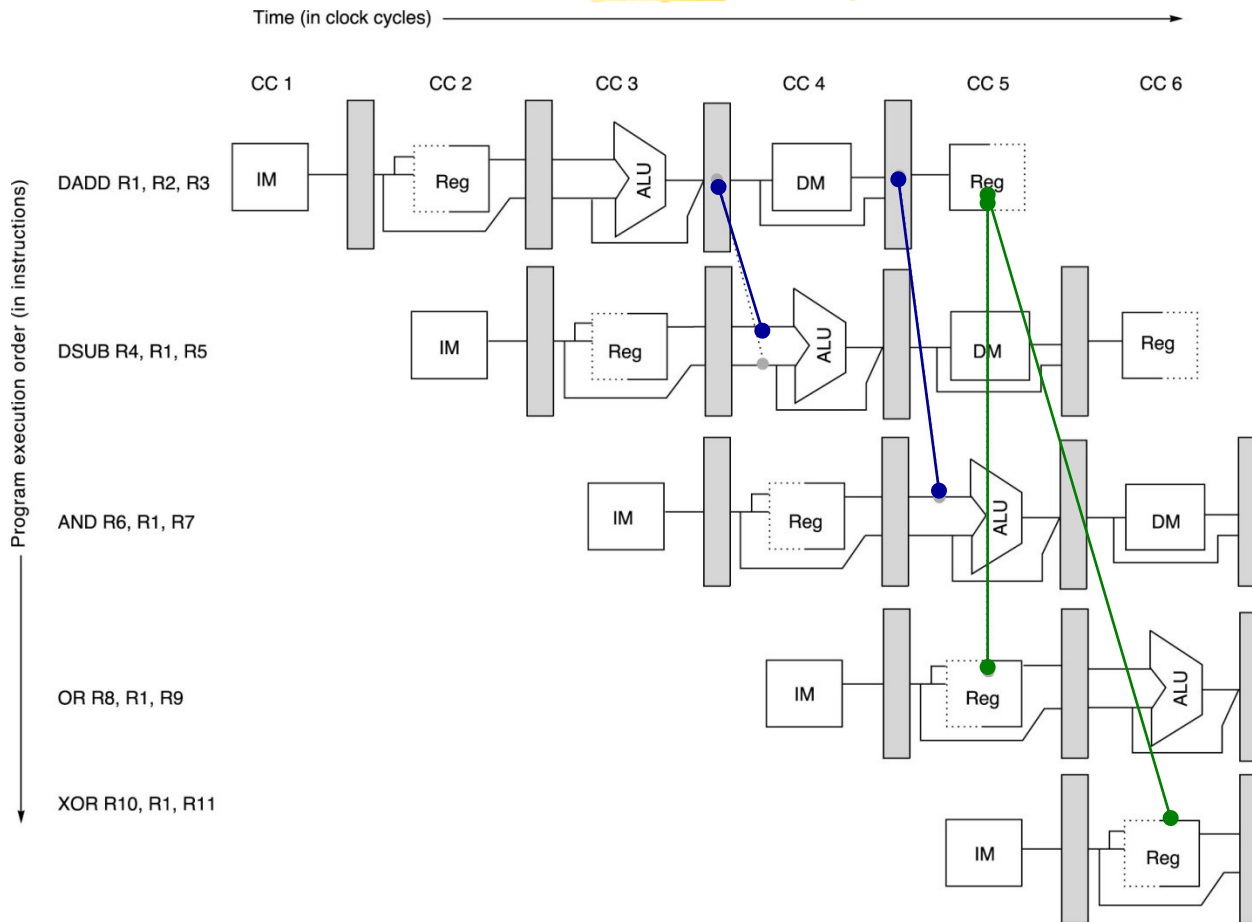


# Κίνδυνοι Εξαρτήσεων από Δεδομένα

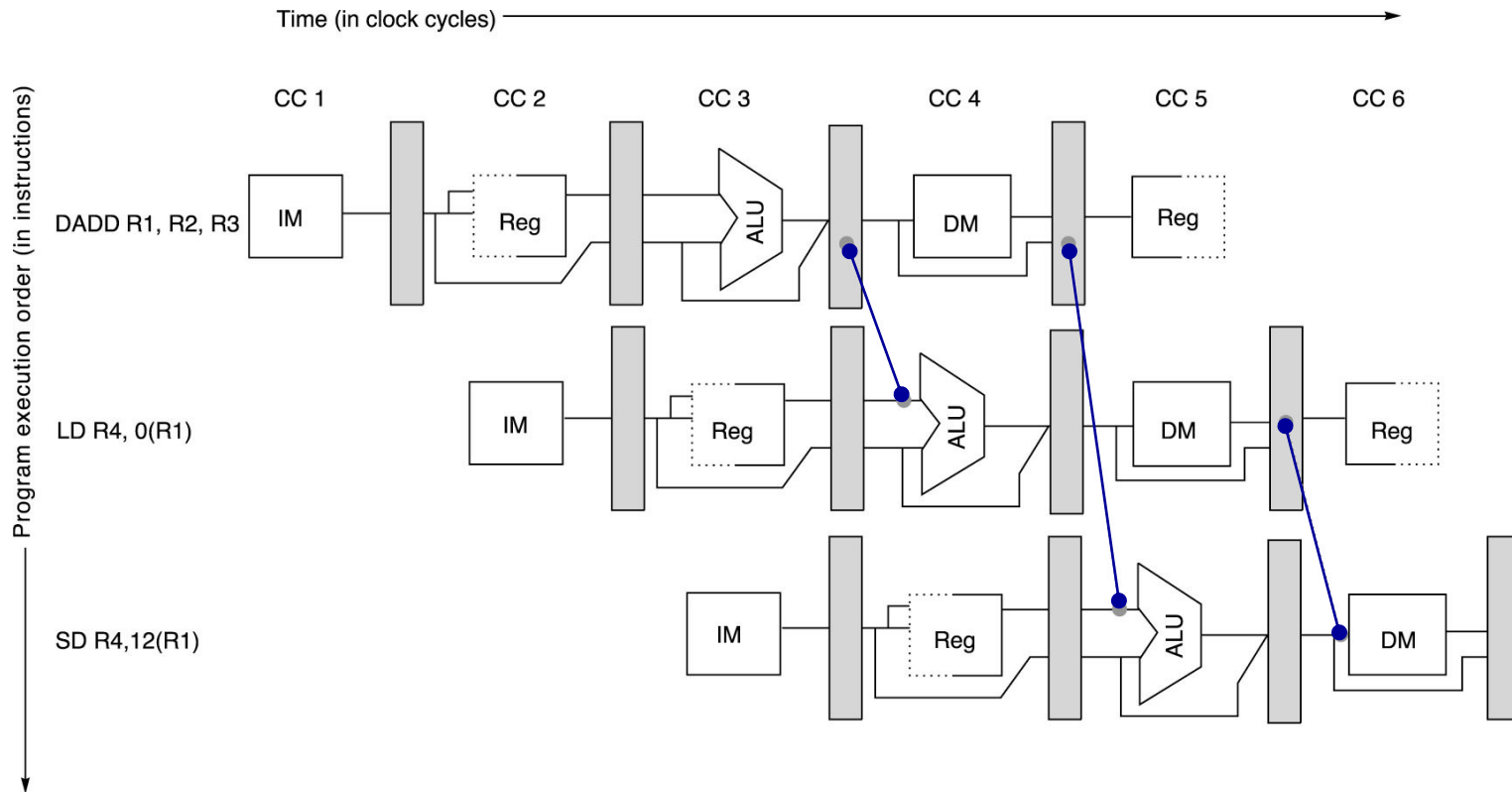




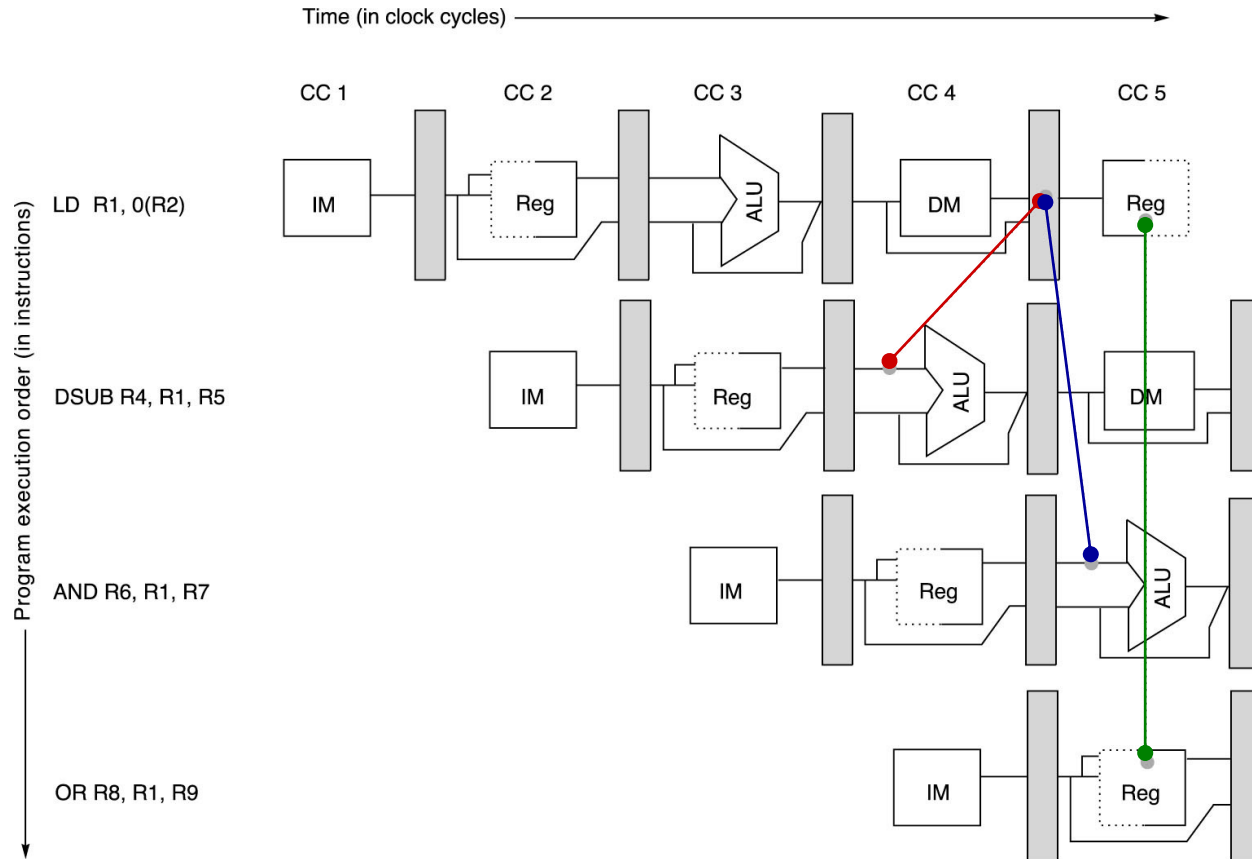
# Παροχέτευση



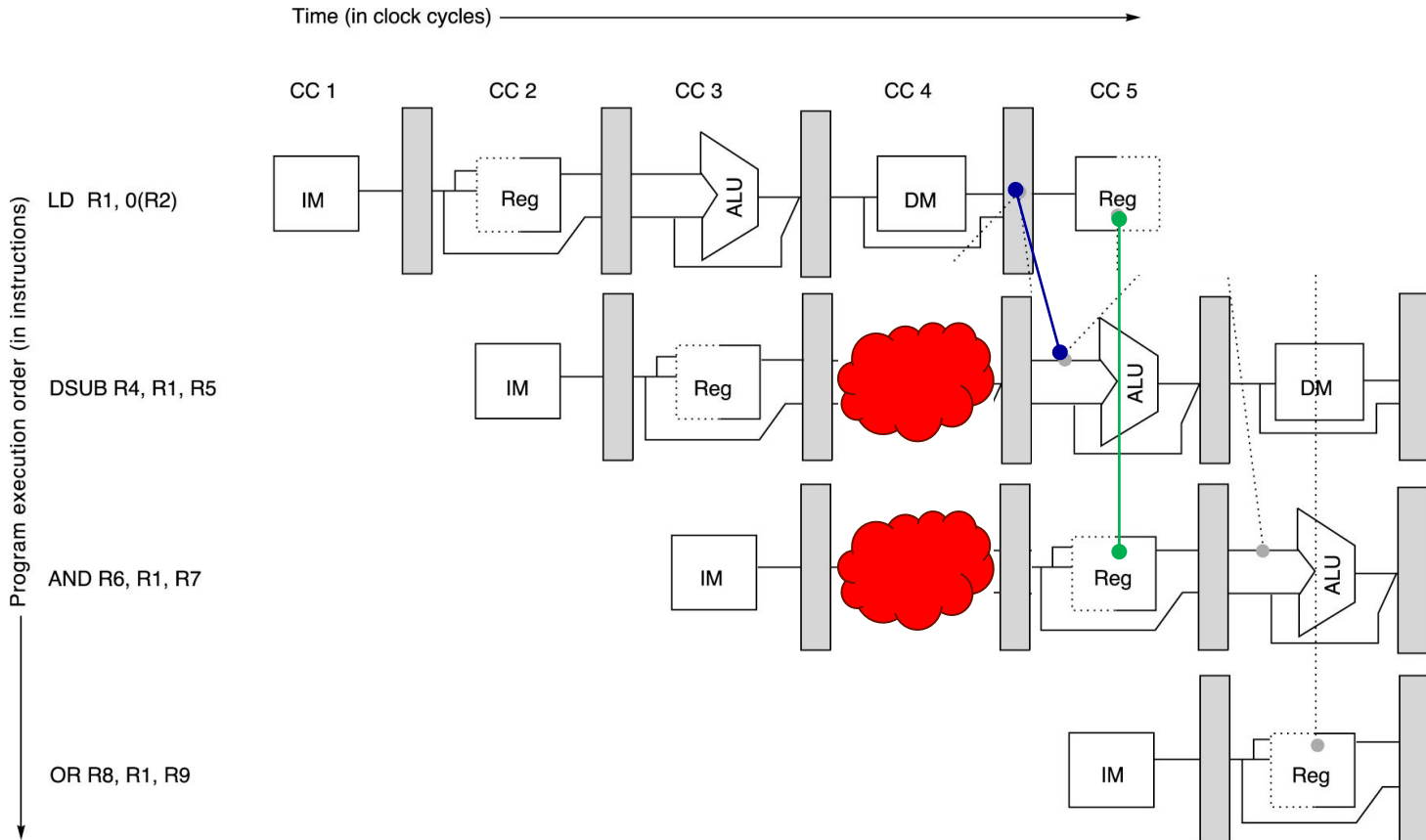
# Επιτυχημένη Παροχέτευση



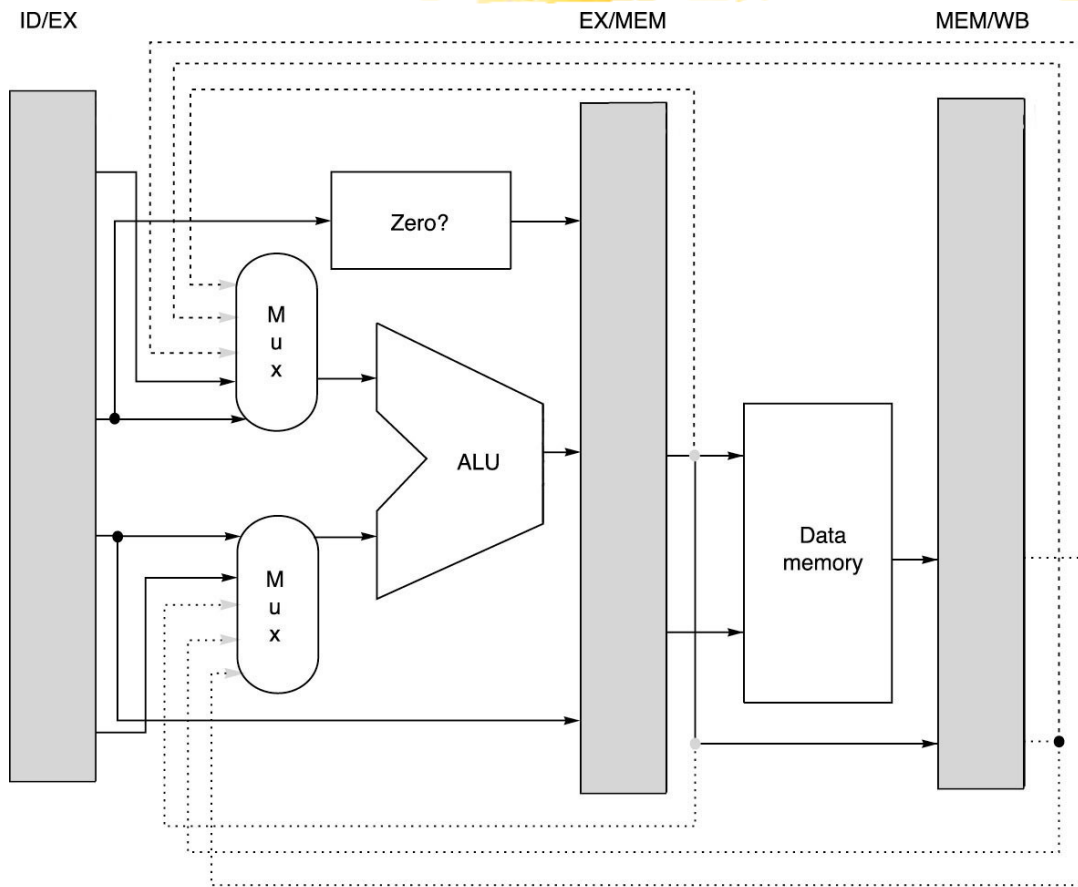
# Αποτυχημένη Παροχέτευση



# Πάγωμα



# Παροχέτευση ALU MIPS



# Υλοποίηση Παροχέτευσης

- Προσθέτουμε επιλογές των εισόδων της ΑΛΜ από τους καταχωρητές των φάσεων εκτέλεσης και προσπέλασης μνήμης
- Παράδειγμα:

$MUXA = 00$  : Επέλεξε πρώτη είσοδο από το ΦΚ

$MUXA = 01$  : Επέλεξε πρώτη είσοδο από την ΑΛΜ

$MUXA = 10$  : Επέλεξε πρώτη είσοδο από τη μνήμη

$MUXB = 00$  : Επέλεξε δεύτερη είσοδο από το ΦΚ

$MUXB = 01$  : Επέλεξε δεύτερη είσοδο από την ΑΛΜ

$MUXB = 10$  : Επέλεξε δεύτερη είσοδο από τη μνήμη

# Ανίχνευση Κινδύνου

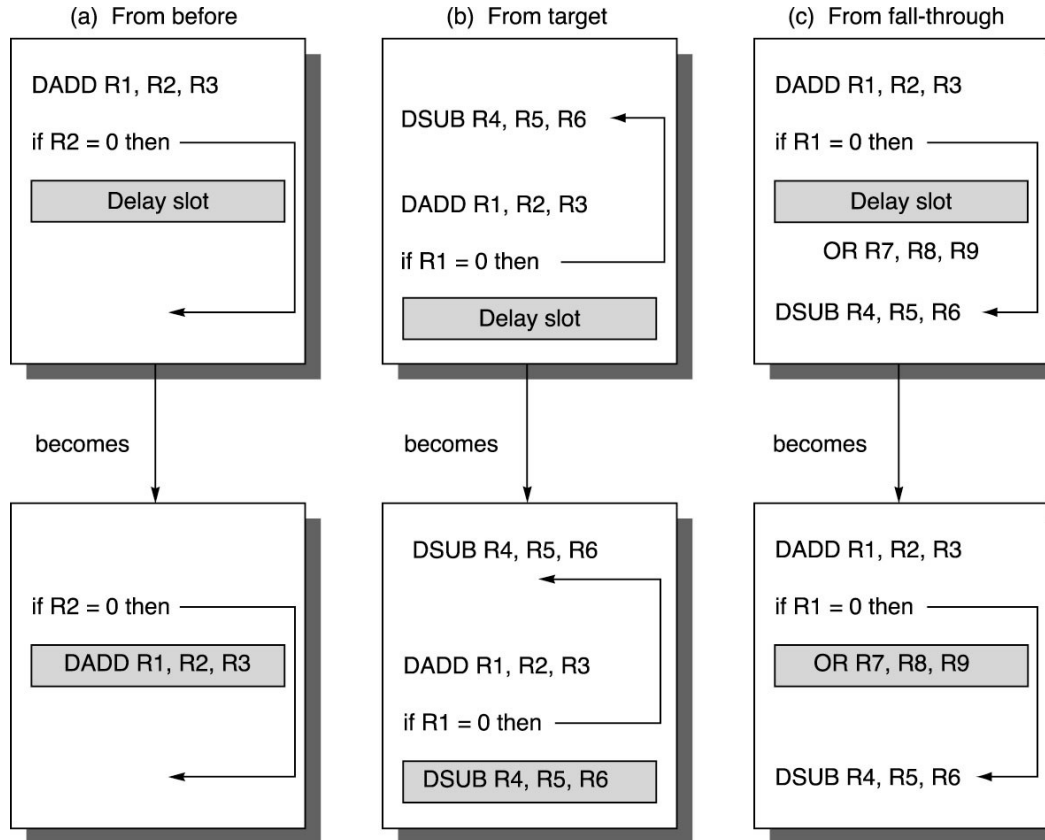
- Παράδειγμα κινδύνου μεταξύ φάσεων αποκωδικοποίησης και εκτέλεσης:  
ΕΑΝ η εντολή στη φάση εκτέλεσης έχει έξοδο,  
ΚΑΙ το τελούμενο εξόδου της είναι αποδεκτός καταχωρητής,  
ΚΑΙ η εντολή στη φάση αποκωδικοποίησης έχει είσοδο,  
ΚΑΙ το τελούμενο εισόδου αυτής είναι αποδεκτός καταχωρητής,  
ΚΑΙ οι παραπάνω καταχωρητές ταυτίζονται,  
ΤΟΤΕ έχουμε κίνδυνο μεταξύ των εντολών!
- Για πιο μακρινούς κινδύνους ελέγχουμε μήπως υπάρχει και κοντινότερος κίνδυνος!

# Κίνδυνοι Διαδικασιακών Εξαρτήσεων

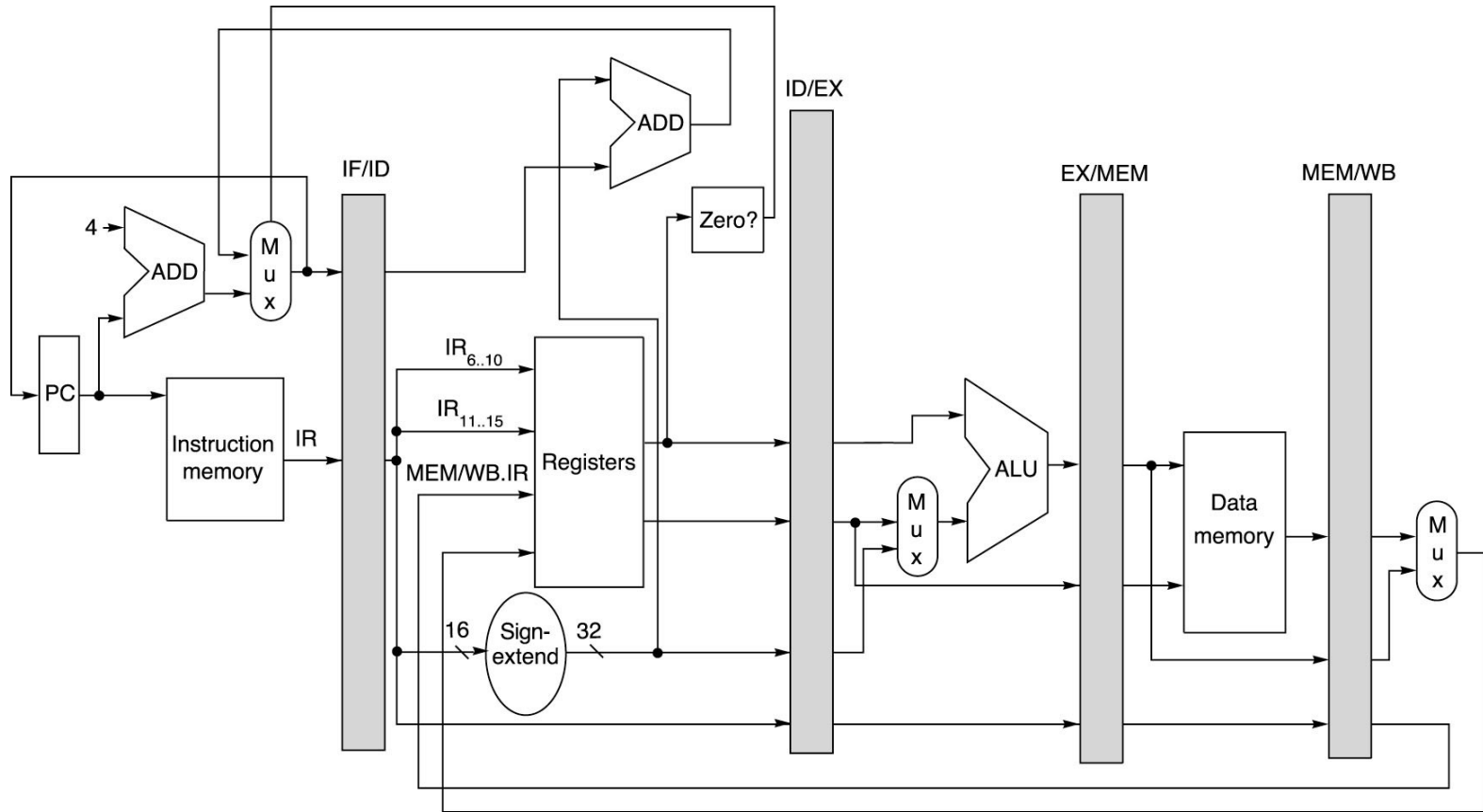
- Πάγωμα επικάλυψης μέχρι την εκτέλεση της διακλάδωσης
- Πρόβλεψη και εκκένωση (flush) της ΜΕΔ σε αποτυχία πρόβλεψης
  - Η κατάσταση του επεξεργαστή δεν αλλάζει πριν την εκτέλεση της διακλάδωσης
- Εκτέλεση στη φάση αποκωδικοποίησης
- Χρήση θέσεων καθυστέρησης (branch delay slots)



# Πλήρωση Θέσεων Καθυστέρησης



# Διακλάδωση MIPS



# Ειδικές Περιπτώσεις

- Διακοπή Ε/Ε
- Κλήση συστήματος
- Κατάσταση αναλυτικής εκτέλεσης (trace)
- Διακοπή χρήστη (breakpoint)
- Αριθμητική εξαίρεση
- Σφάλμα σελίδας
- Σφάλμα προσπέλασης μνήμης
- Παραβίαση προστασίας μνήμης
- Λανθασμένη λέξη εντολής
- Σφάλμα υλικού

# Κατηγοριοποίηση Ειδικών Περιπτώσεων

- Ασύγχρονα / Σύγχρονα σε σχέση με τον τρέχοντα κώδικα
- Όταν τις ζητάμε (user requested) / Αναγκαστικές (coerced)
- Αποτρεπτή (maskable) / Μη αποτρεπτή
- Μεταξύ διαδοχικών εντολών / Κατά την εκτέλεση μιας εντολής
- Με δυνατότητα επανόδου (resumable) / Χωρίς επάνοδο

# Αντιμετώπιση Ειδικών Περιπτώσεων

- Για δυνατότητα επανόδου ο μηχανισμός επικάλυψης σώζει την κατάστασή του ως εξής:
  - Εισαγωγή ειδικής εντολής (trap) στη φάση IF.
  - Ακύρωση αλλαγών από την εντολή στην οποία εμφανίστηκε η ειδική περίπτωση και από όσες την ακολουθούν (έως την ειδική εντολή).
  - Αποθήκευση της τιμής του PC από τη ρουτίνα χειρισμού ειδικών περιπτώσεων που αναλαμβάνει με την εκτέλεση της ειδικής εντολής.

# Ακριβείς/Μη Ακριβείς Ειδικές Περιπτώσεις

- Ακριβής αντιμετώπιση ειδικών περιπτώσεων:
  - οι εντολές που προηγούνται πρέπει να ολοκληρώνονται πριν την αντιμετώπιση της ειδικής περίπτωσης, ενώ
  - οι εντολές που ακολουθούν πρέπει να μπορούν να ξαναρχίσουν από την αρχή.
- Υποστήριξη από το υλικό ή το λογισμικό
- Χωρίς κάποιου είδους ακριβή αντιμετώπιση δε μπορεί να υπάρξει επάνοδος!

# Ακριβής Αντιμετώπιση Ειδικών Περιπτώσεων

LD:	IF	ID	EX	MEM	WB	
DADD:		IF	ID	EX	MEM	WB

- Τι γίνεται αν η πρώτη εντολή αποτύχει στη φάση MEM και η δεύτερη στη φάση EX;
- Τι γίνεται αν η πρώτη εντολή αποτύχει στη φάση MEM και η δεύτερη στη φάση IF;

# Μη Ακριβής Αντιμετώπιση Ειδικών Περιπτώσεων

- Η κατάσταση του επεξεργαστή πιθανά να είναι λανθασμένη μετά την ειδική περίπτωση
- Δεν επιτρέπεται όταν η ειδική περίπτωση έχει δυνατότητα επανόδου (πχ. σε σφάλμα σελίδας)
- Εύκολη και πιο γρήγορη εκτέλεση, ειδικά για εντολές από πολύπλοκο σετ εντολών



# Εκτέλεση Πολλαπλών Κύκλων

Εντολή	Κύκλος Μηχανής										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Mul.d F0,F4,F6	IF	ID	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	MEM	WB

- Χρόνος καθυστέρησης (latency)
  - ο χρόνος που πρέπει να μεσολαβήσει μέχρι μια άλλη εξαρτημένη από αυτήν εντολή
- Ρυθμός επανάληψης (repeat rate)
  - η συχνότητα με την οποία ξεκινούν εκτέλεση διαδοχικές παρόμοιες εντολές

# Προβλήματα Εκτέλεσης Πολλαπλών Κύκλων

- Πιθανοί κίνδυνοι δομικών εξαρτήσεων στη μονάδα εκτέλεσης
- Πιθανή ολοκλήρωση εκτός σειράς, με:
  - Κινδύνους δομικών εξαρτήσεων στο ΦΚ
  - Κινδύνους εξαρτήσεων από δεδομένα τύπου ΕΜΕ
- Συχνά παγώματα και πιο πολύπλοκος μηχανισμός παροχέτευσης
- Αντιμετώπιση ειδικών περιπτώσεων;

# Αποφυγή Δομικών Εξαρτήσεων στη Μονάδα Εκτέλεσης

- Επικάλυψη των φάσεων εκτέλεσης
  - ρυθμός επανάληψης = 1 εντολή ανά κύκλο μηχανής
- Αντιγραφή υπομονάδων
  - για να αποφευχτεί επαναχρησιμοποίησή τους
- Ισοστάθμιση χρόνου / κόστους
  - συχνότητα εμφάνισης της εντολής
  - βέλτιστος ρυθμός επανάληψης

# Βελτιστοποίηση Επικάλυψης στην Εκτέλεση

- Από τον αλγόριθμο εκτέλεσης της εντολής αντιστοιχίζουμε φάσεις σε υπομονάδες:
  - Πίνακας δέσμευσης (reservation table)

	1	2	3	4	5	6	7
A	X		X				X
B		X				X	
C					X		X
D				X			

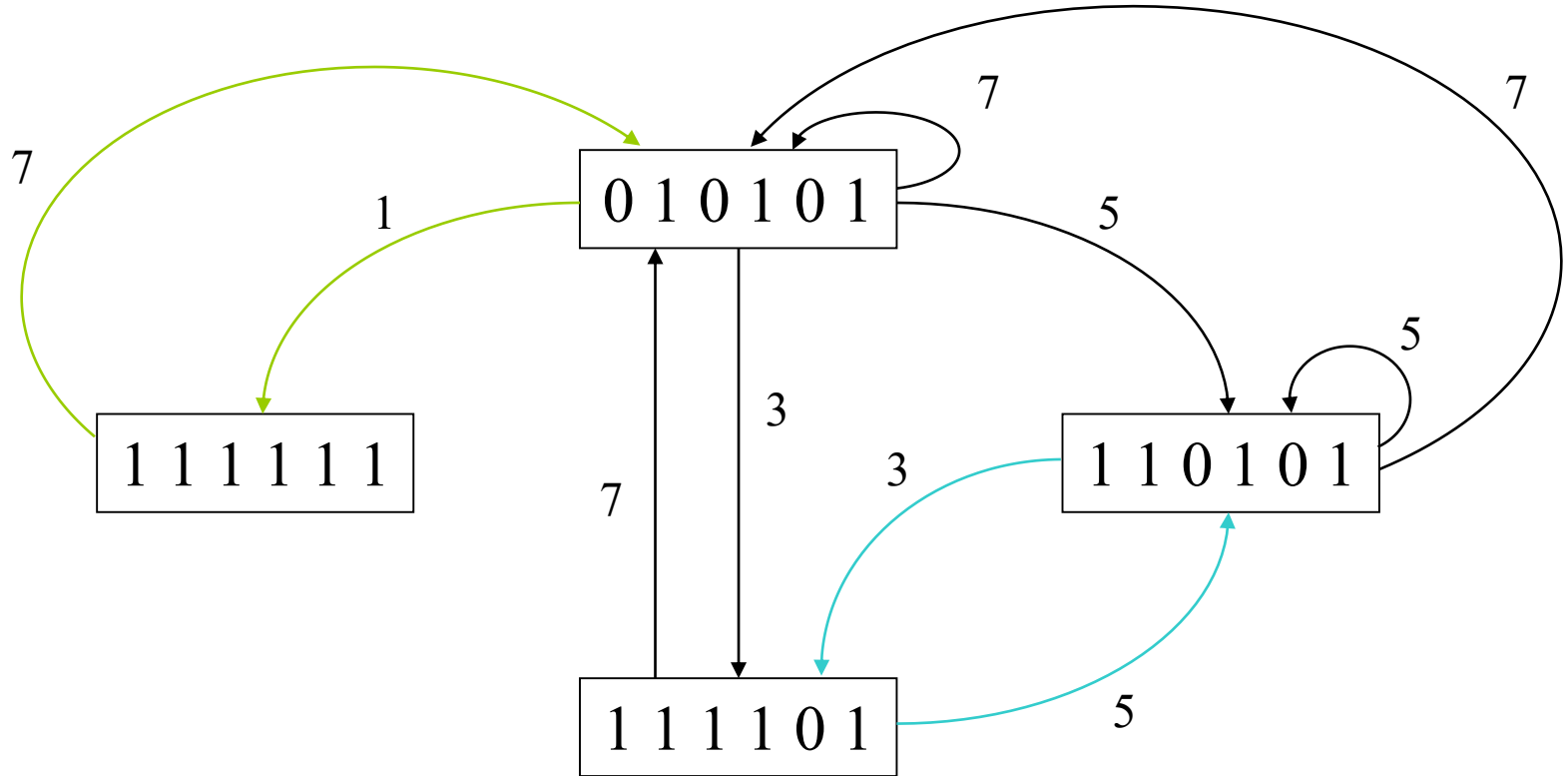
- Διάνυσμα σύγκρουσης (collision vector)

0	1	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---

# Διάγραμμα Καταστάσεων και Μέγιστος Ρυθμός Επανάληψης

- Αρχική κατάσταση = διάνυσμα σύγκρουσης
- Για ξεκίνημα εντολής  $v$  κύκλους αργότερα:
  - νέα κατάσταση = (διάνυσμα παρούσας κατάστασης  $\ll v$ ) OR διάνυσμα σύγκρουσης
  - σύνδεσε τις καταστάσεις με ετικέτα  $v$ , και τη νέα με την αρχική με ετικέτα  $N$
- Επανέλαβε για κάθε δυνατό  $v$  και κάθε νέα κατάσταση
- Βρες τον κύκλο με το μέγιστο ρυθμό επανάληψης

# Παράδειγμα



- Μέγιστος ρυθμός επανάληψης: 2 πράξεις σε 8cc ή  $1/4$

# Βελτίωση Μέγιστου Ρυθμού Επανάληψης

- Ο πίνακας δέσμευσης θέτει το άνω φράγμα στο ρυθμό επανάληψης
- Αν ο μέγιστος ρυθμός δε συμπίπτει με το άνω φράγμα:
  - Τοποθέτησε υπομονάδες καθυστέρησης (καταχωρητές) σε κατάλληλα σημεία της μονάδας, ώστε να πάρεις ένα νέο πίνακα δέσμευσης (μεγαλύτερου εύρους), ο οποίος να δίνει ρυθμό επανάληψης ίσο με το άνω φράγμα

# Παράδειγμα

- Άνω φράγμα ρυθμού επανάληψης: 1/3

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	X		X	F		F	FD	X
B		X			F	X		F
C					X		X	F
D				X			F	

- Η χρήση της υπομονάδας A την τρίτη φορά για κάθε πράξη πρέπει να καθυστερεί κατά 1 cc
- Εισαγωγή υπομονάδας καθυστέρησης μεταξύ B και A με κατάλληλο έλεγχο για τη χρήση της



# Ολοκλήρωση εκτός Σειράς

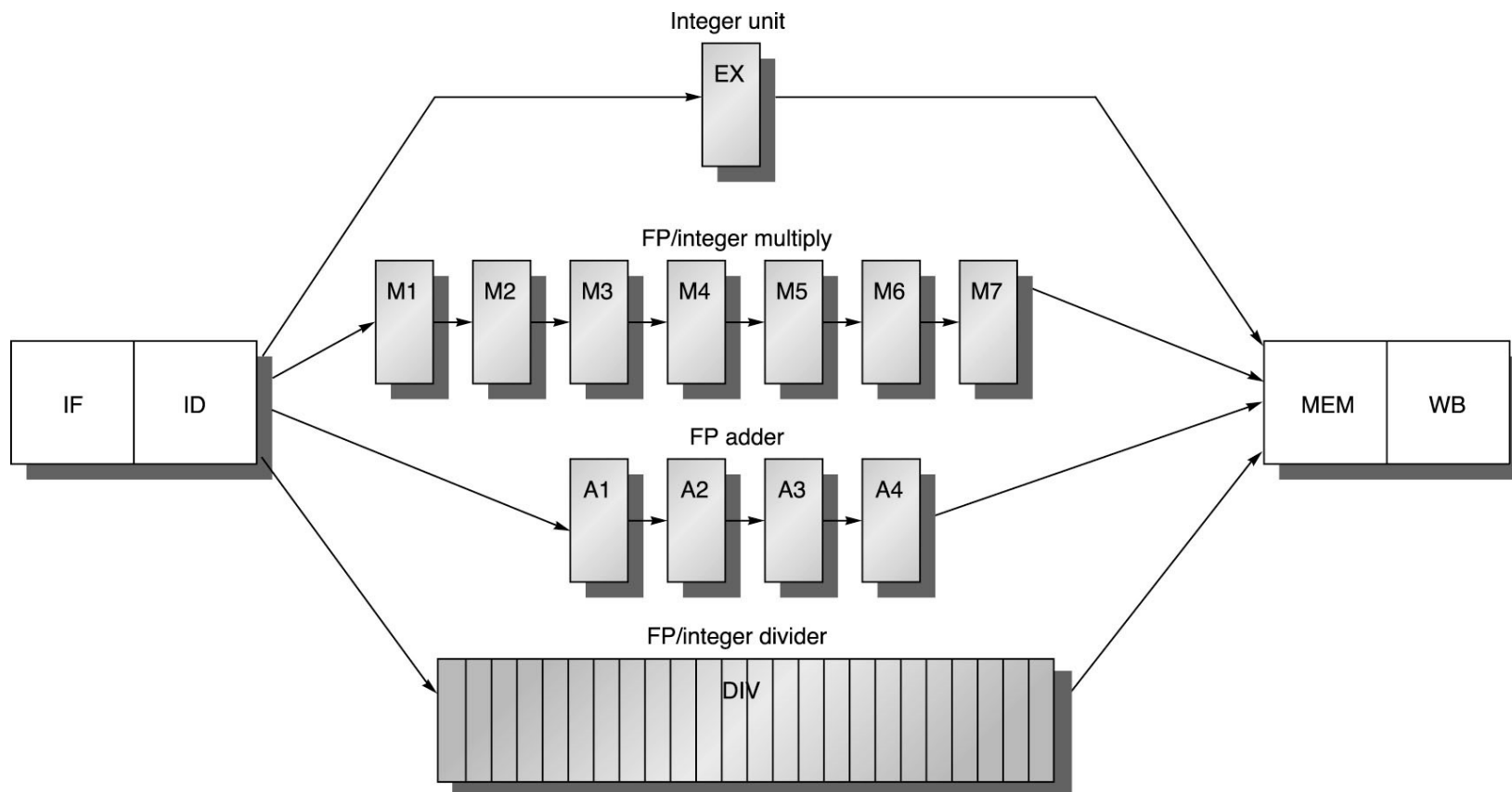
- Πάγωμα εντολών που ζητούν ταυτόχρονη εγγραφή στο ΦΚ
  - Ανίχνευση στη φάση ID: όλα τα παγώματα στην ίδια φάση
  - Ανίχνευση μόλις ζητηθεί ταυτόχρονη εγγραφή: πιο εύκολη
- Ανίχνευση εγγραφής στον ίδιο καταχωρητή
  - πάγωμα της εντολής που ακολουθεί
  - ακύρωση εγγραφής της πρώτης

# Ειδικές Περιπτώσεις στην Ολοκλήρωση εκτός Σειράς

DIV.D	F0, F2, F4
ADD.D	F10, F10, F8
SUB.D	F12, F12, F14

- Ανίχνευση πιθανής ειδικής περίπτωσης και περιορισμός στην επικάλυψη
- Χρήση χώρου εγγραφής (write buffer), όπου τοποθετούνται οι νέες τιμές καταχωρητών, μέχρι οι προηγούμενες εντολές να ολοκληρωθούν (history file, future file)
- Μη ακριβής αντιμετώπιση με συμπλήρωση ημιτελών εντολών

# Ενσωμάτωση Υπομονάδων Εκτέλεσης με/χωρίς Επικάλυψη

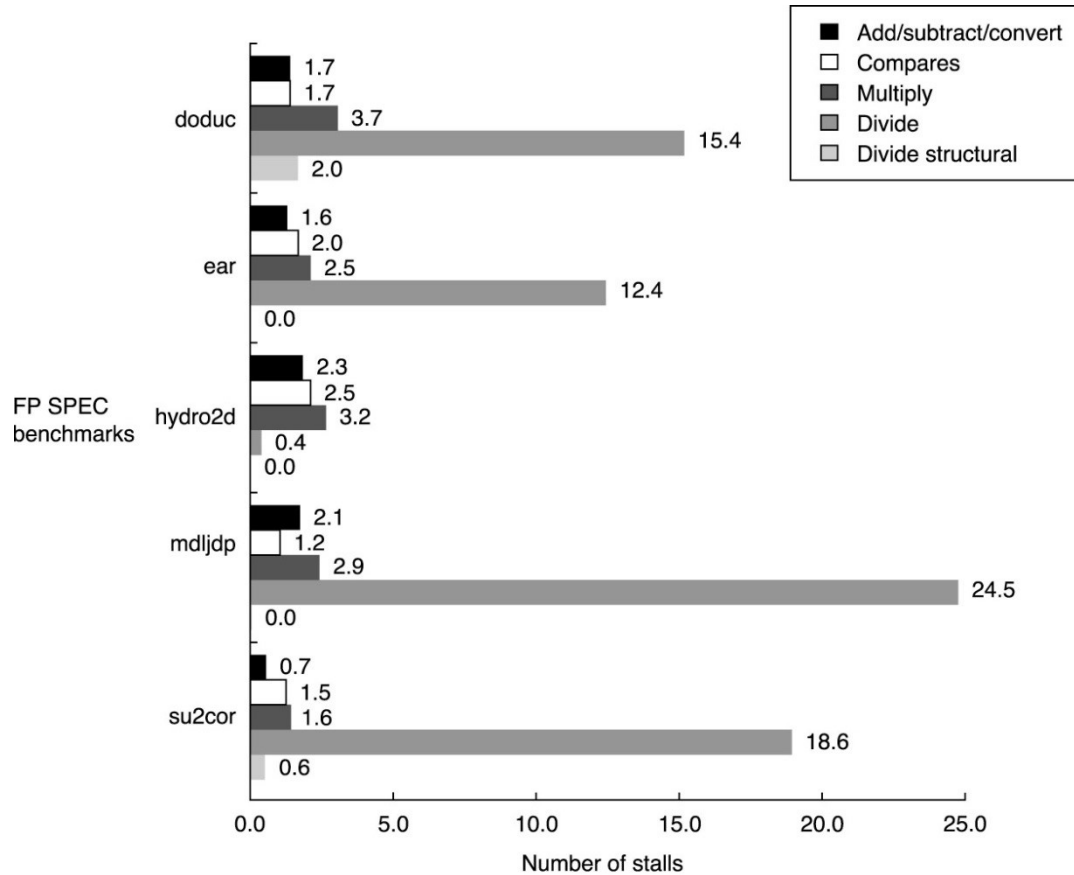


# Παράδειγμα

## Κύκλος Μηχανής

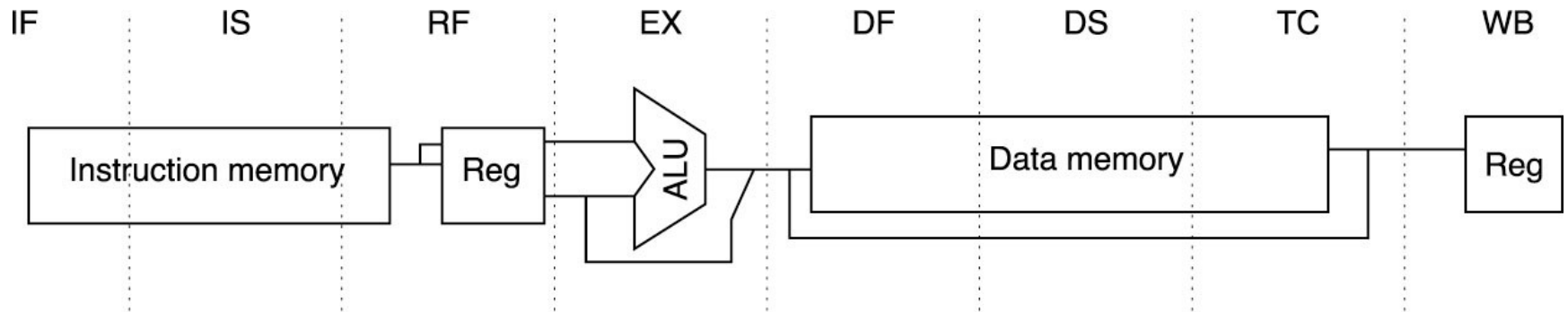
Εντολή	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
L.d F4,0(R2)	IF	ID	EX	MEM	WB												
Mul.d F0,F4,F6		IF	ID	X	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	MEM	WB				
Add.d F2,F0,F8			IF	X	ID	X	X	X	X	X	X	A1	A2	A3	A4	MEM	WB
S.d F2,0(R2)					IF	X	X	X	X	X	X	ID	EX	X	X	X	MEM

# Παγώματα σε Υπομονάδες Κινητής Υποδιαστολής MIPS



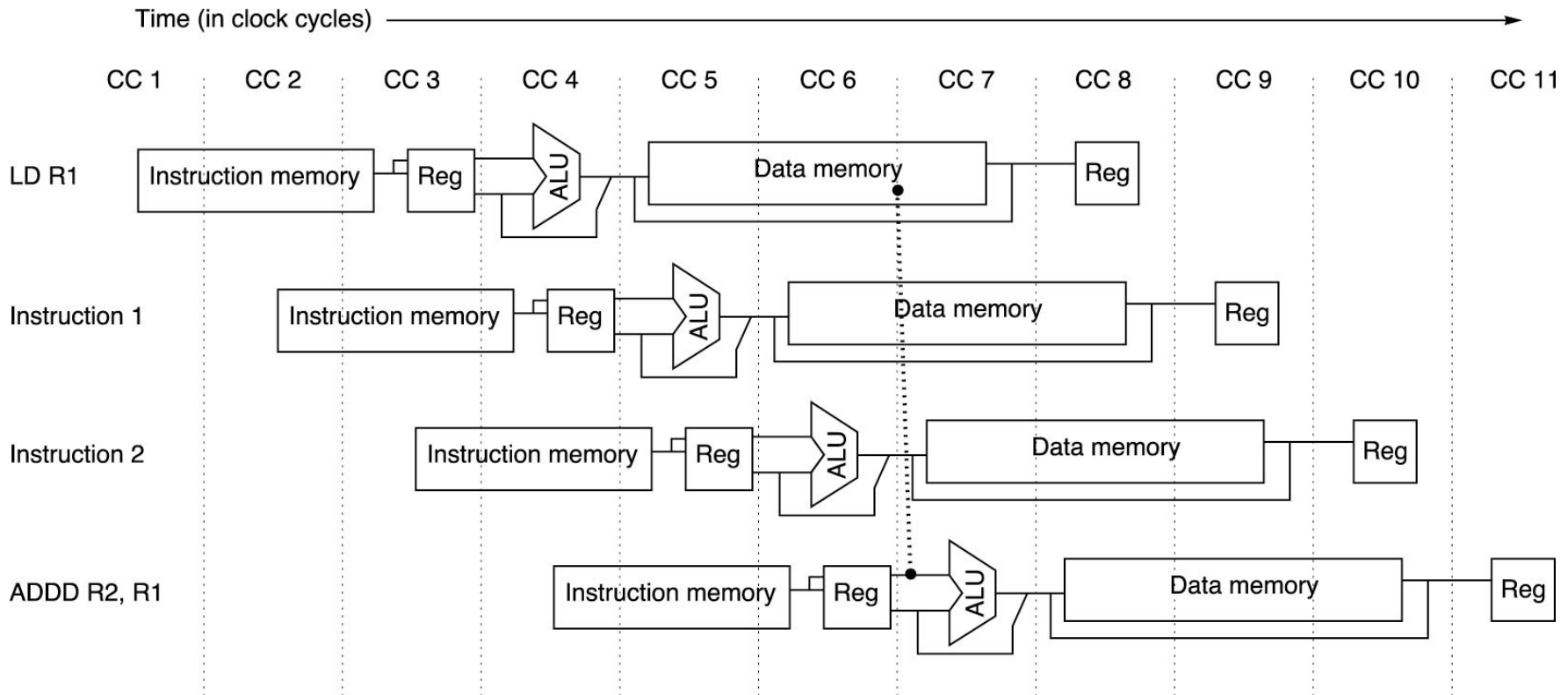
# Επικάλυψη στον MIPS R4000

- Superpipelining:

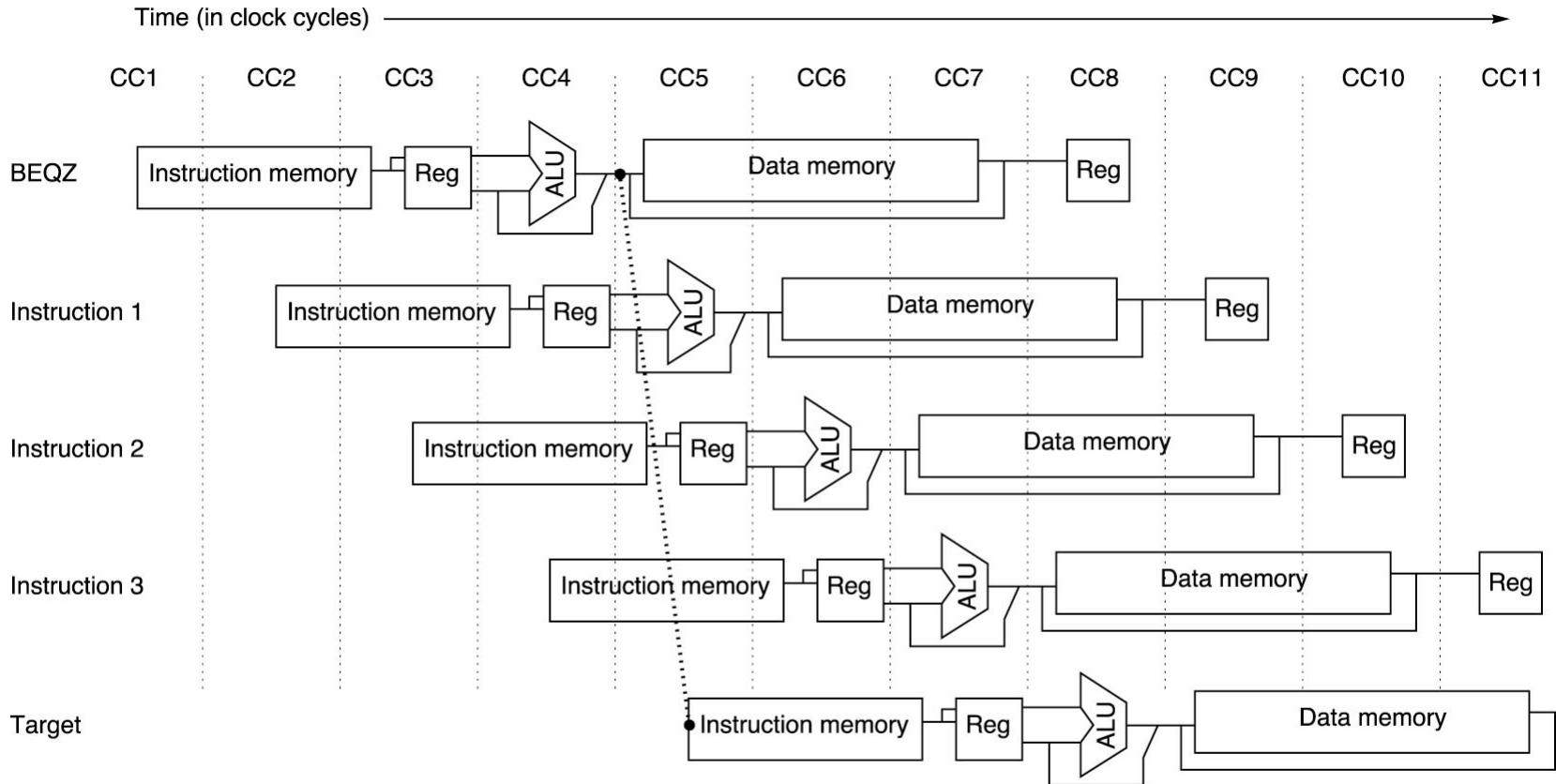


© 2003 Elsevier Science (USA). All rights reserved.

# Παροχέτευση στον R4000



# Διακλαδώσεις στον R4000





# Απόδοση Επικάλυψης στον R4000

