

Σχεδίαση μονάδας ελέγχου επεξεργαστή

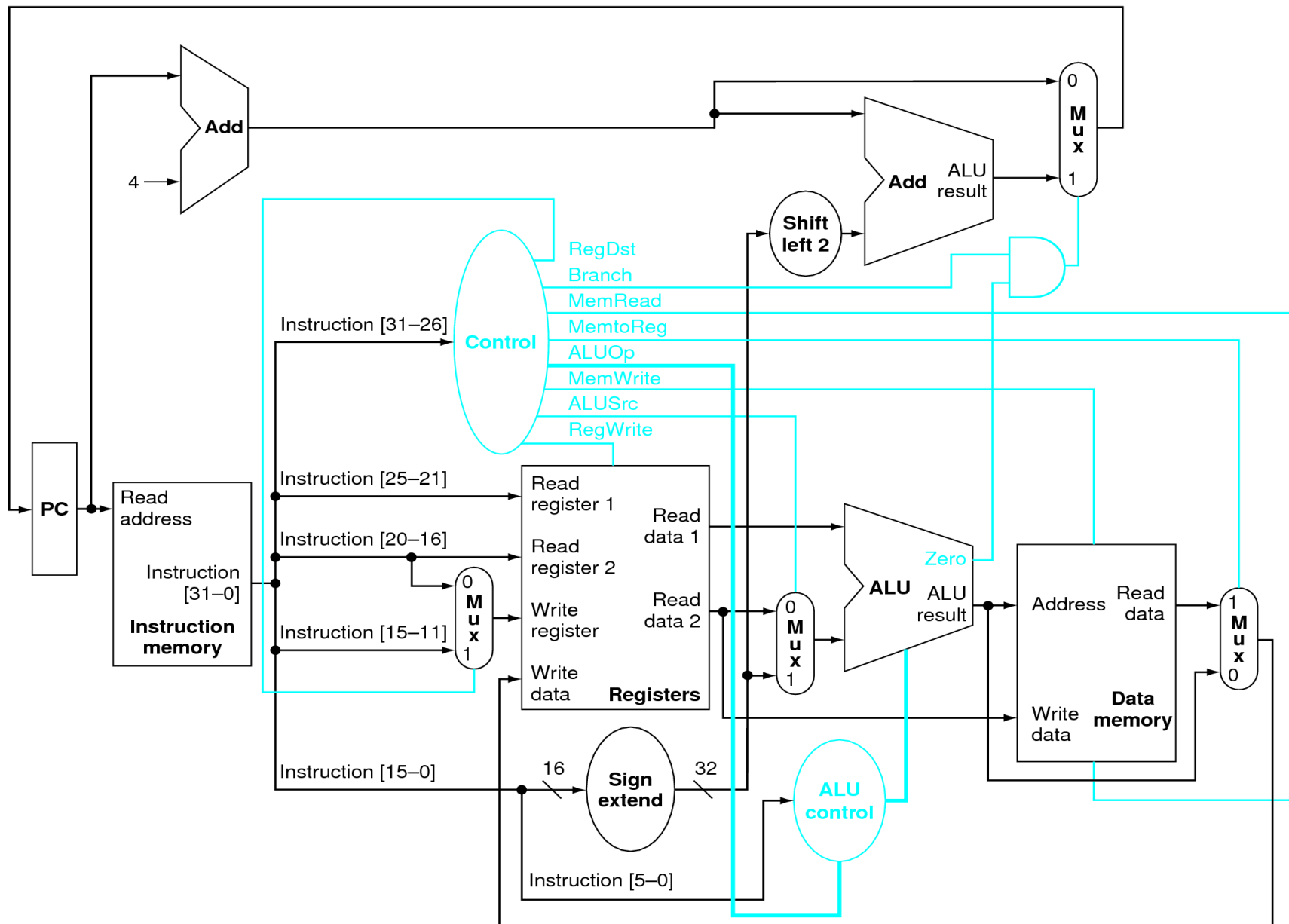
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών
5ο εξάμηνο ΣΗΜΜΥ

ακ. έτος: 2009-2010

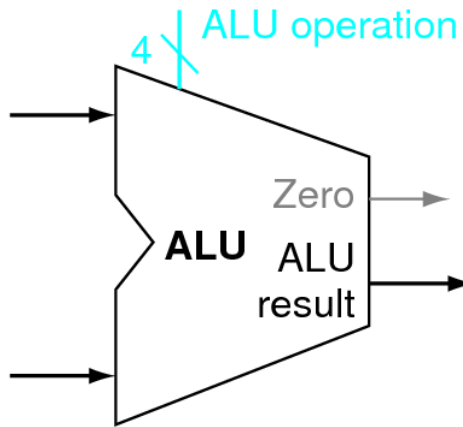
Νεκτάριος Κοζύρης
nkoziris@cslab.ece.ntua.gr

<http://www.cslab.ece.ntua.gr/courses/comparch/>

Datapath ενός κύκλου με τη μονάδα ελέγχου



Έλεγχος ALU



Γραμμές ελέγχου ALU	Λειτουργία
0000	AND
0001	OR
0010	add
0110	subtract
0111	set on less than
1100	NOR

Opcode	ALUOp	Λειτουργία εντολής	Πεδίο funct	Επιθυμητή ενέργεια ALU	Είσοδος ελέγχου ALU
LW	00	load word	XXXXXX	add	0010
SW	00	store word	XXXXXX	add	0010
Branch equal	01	branch equal	XXXXXX	subtract	0110
R-Type	10	add	100000	add	0010
R-Type	10	subtract	100010	subtract	0110
R-Type	10	AND	100100	AND	0000
R-Type	10	OR	100101	OR	0001
R-Type	10	set on less than	101010	set on less than	0111

Πίνακας αληθείας για τα τέσσερα bit ελέγχου της ALU

ALUOp		Πεδίο funct						Λειτουργία
ALUOp1	ALUOp0	F5	F4	F3	F2	F1	F0	
0	0	X	X	X	X	X	X	0010
X	1	X	X	X	X	X	X	0110
1	X	X	X	0	0	0	0	0010
1	X	X	X	0	0	1	0	0110
1	X	X	X	0	1	0	0	0000
1	X	X	X	0	1	0	1	0001
1	X	X	X	1	0	1	0	0111

- *Είσοδοι*: ALUOp, πεδίο κωδικού συνάρτησης (funct)
- *Έξοδος*: τέσσερα bit ελέγχου της ALU
- Χρήση *αδιάφορων όρων* (don't care terms): X στον πίνακα αληθείας
- Από τον πίνακα αληθείας η συνάρτηση ελέγχου μπορεί να βελτιστοποιηθεί και να μετατραπεί σε λογικές πύλες *μηχανικά*

Τα σήματα ελέγχου ενός bit και το αποτέλεσμα τους

Όνομα σήματος	Αποτέλεσμα όταν είναι απενεργοποιημένο	Αποτέλεσμα όταν είναι ενεργοποιημένο
RegDst	Ο αριθμός καταχωρητή προορισμού για τον καταχωρητή εγγραφής προέρχεται από το πεδίο rt (bit 20:16)	Ο αριθμός καταχωρητή προορισμού για τον καταχωρητή εγγραφής προέρχεται από το πεδίο rd (bit 15:11)
RegWrite	Κανένα	Στον καταχωρητή στην είσοδο καταχωρητή εγγραφής γράφεται η πμή που δίνεται στην είσοδο δεδομένων εγγραφής
ALUSrc	Ο δεύτερος τελεστέος της ALU προέρχεται από τη δεύτερη έξοδο του αρχείου καταχωρητών (Δεδομένα ανάγνωσης 2)	Ο δεύτερος τελεστέος της ALU είναι τα κατώτερα 16 bit της εντολής αφού υποστούν επέκταση προσήμου
PCSrc	Ο PC αντικαθίσταται από την έξοδο του αθροιστή που υπολογίζει την πμή $PC + 4$	Ο PC αντικαθίσταται από την έξοδο του αθροιστή που υπολογίζει τον προορισμό της διακλάδωσης

Τα σήματα ελέγχου ενός bit και το αποτέλεσμά τους (2)

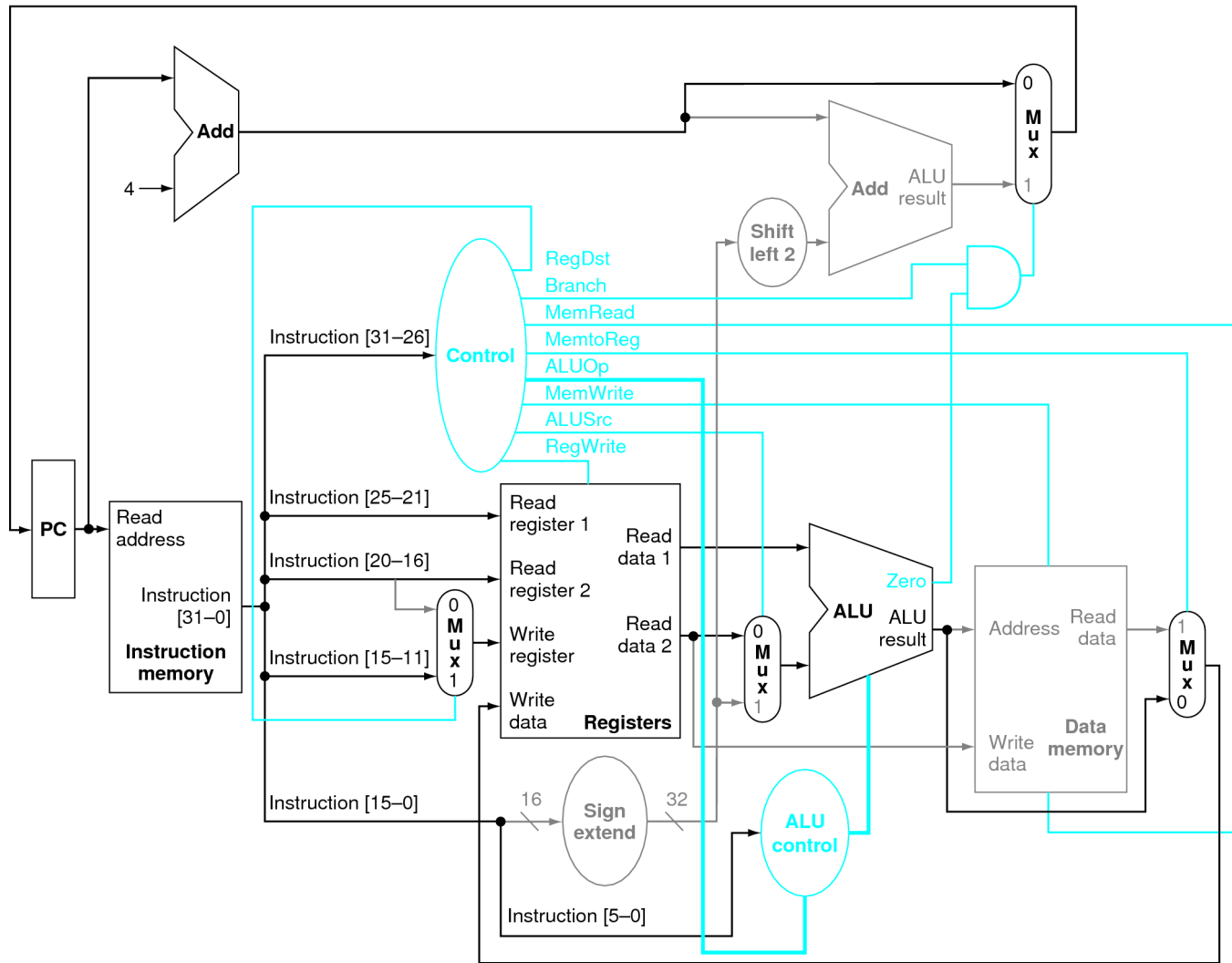
Όνομα σήματος	Αποτέλεσμα όταν είναι απενεργοποιημένο	Αποτέλεσμα όταν είναι ενεργοποιημένο
MemRead	Κανένα	Τα περιεχόμενα της μνήμης δεδομένων που καθορίζονται από την είσοδο διεύθυνσης τοποθετούνται στην έξοδο δεδομένων ανάγνωσης
MemWrite	Κανένα	Τα περιεχόμενα της μνήμης δεδομένων που καθορίζονται από την είσοδο διεύθυνσης αντικαθίστανται από την τιμή στην είσοδο δεδομένων εγγραφής
MemtoReg	Η τιμή που παρέχεται στην είσοδο δεδομένων εγγραφής των καταχωρητών προέρχεται από την ALU	Η τιμή που παρέχεται στην είσοδο δεδομένων εγγραφής των καταχωρητών προέρχεται από τη μνήμη δεδομένων

Σήματα ελέγχου συναρτήσεων του πεδίου opcode της εντολής

Από τους προηγούμενους πίνακες προκύπτουν οι τιμές που πρέπει να παίρνουν τα σήματα ελέγχου για κάθε κωδικό λειτουργίας (πεδίο opcode της εντολής)

Εντολή	RegDst	ALUSrc	MemtoReg	RegWrite	MemRead	MemWrite	Branch	ALUOp1	ALUOp0
R-Type	1	0	0	1	0	0	0	1	0
lw	0	1	1	1	1	0	0	0	0
sw	X	1	X	0	0	1	0	0	0
beq	X	0	X	0	0	0	1	0	1

Λειτουργία datapath για εντολή τύπου R

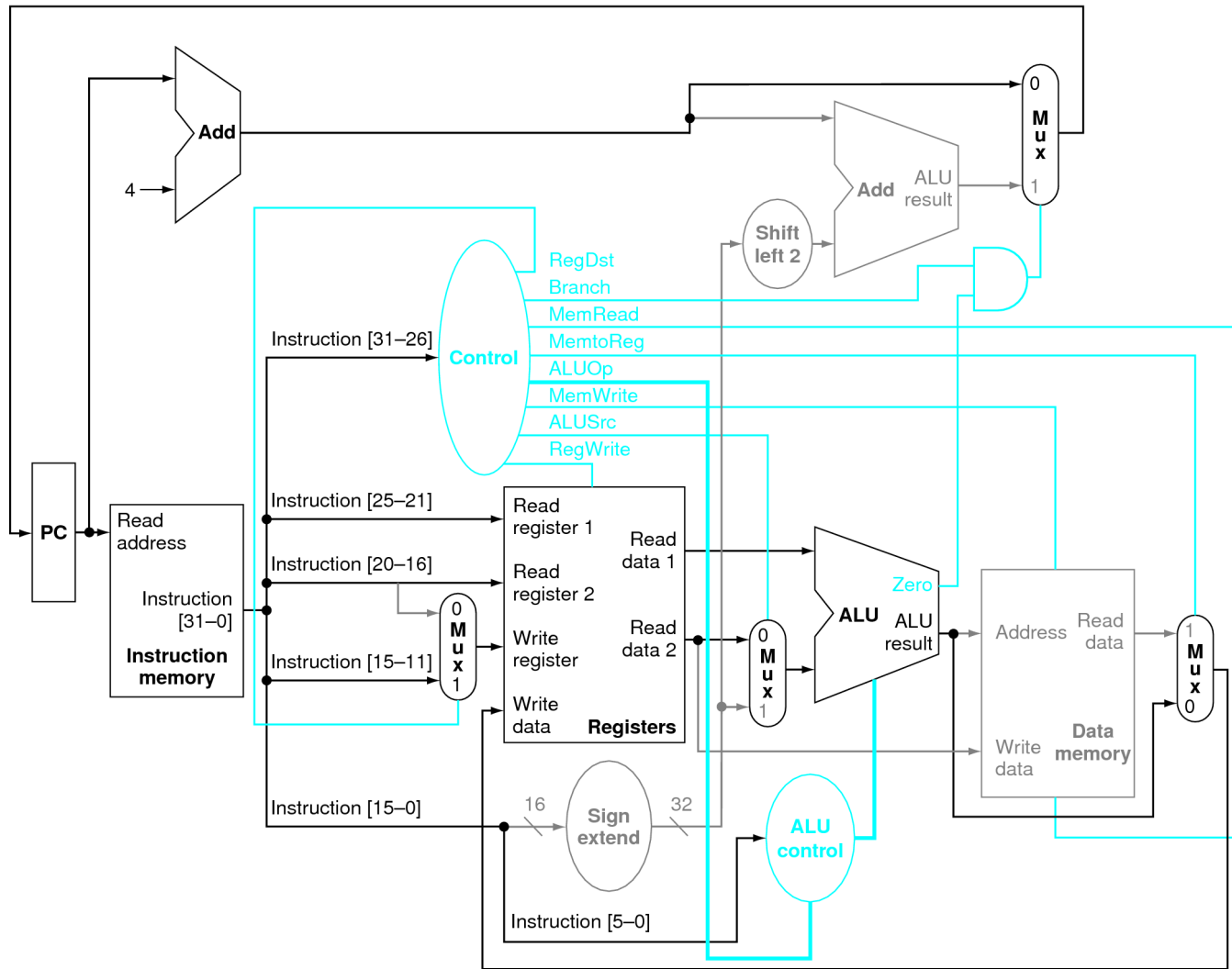


add \$t1,\$t2,\$t3

1. Η εντολή προσκομίζεται και ο PC αυξάνεται

2. Οι καταχωρητές \$t2 και \$t3 διαβάζονται από το αρχείο καταχωρητών και η κύρια μονάδα ελέγχου υπολογίζει τις τιμές των γραμμών ελέγχου

Λειτουργία datapath για εντολή τύπου R (2)

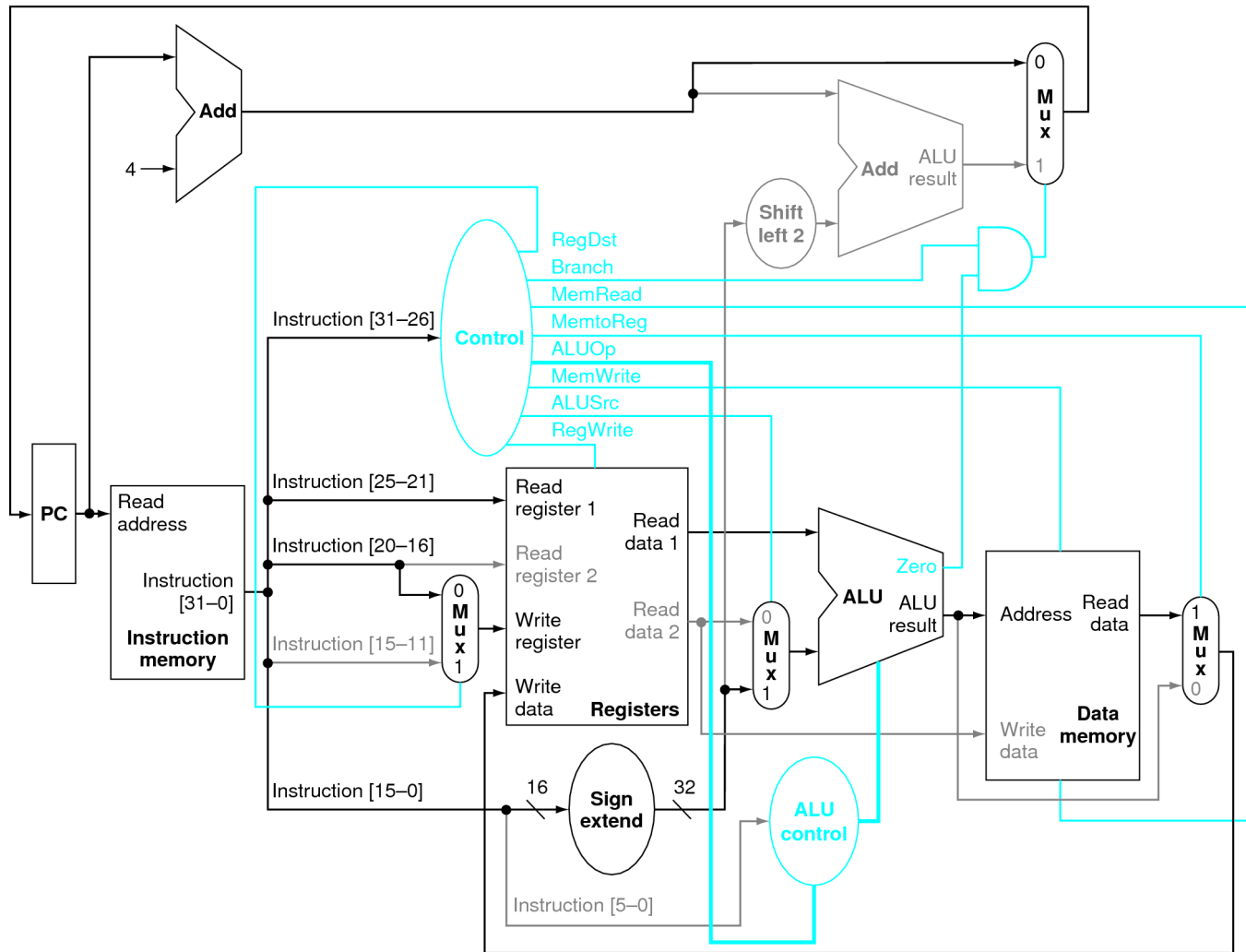


add \$t1,\$t2,\$t3

3. Η ALU επενεργεί στα δεδομένα χρησιμοποιώντας το πεδίο funct

4. Το αποτέλεσμα από την ALU γράφεται στο αρχείο καταχωρητών επιλέγοντας τον \$t1 μέσω των bit 15:11 της εντολής

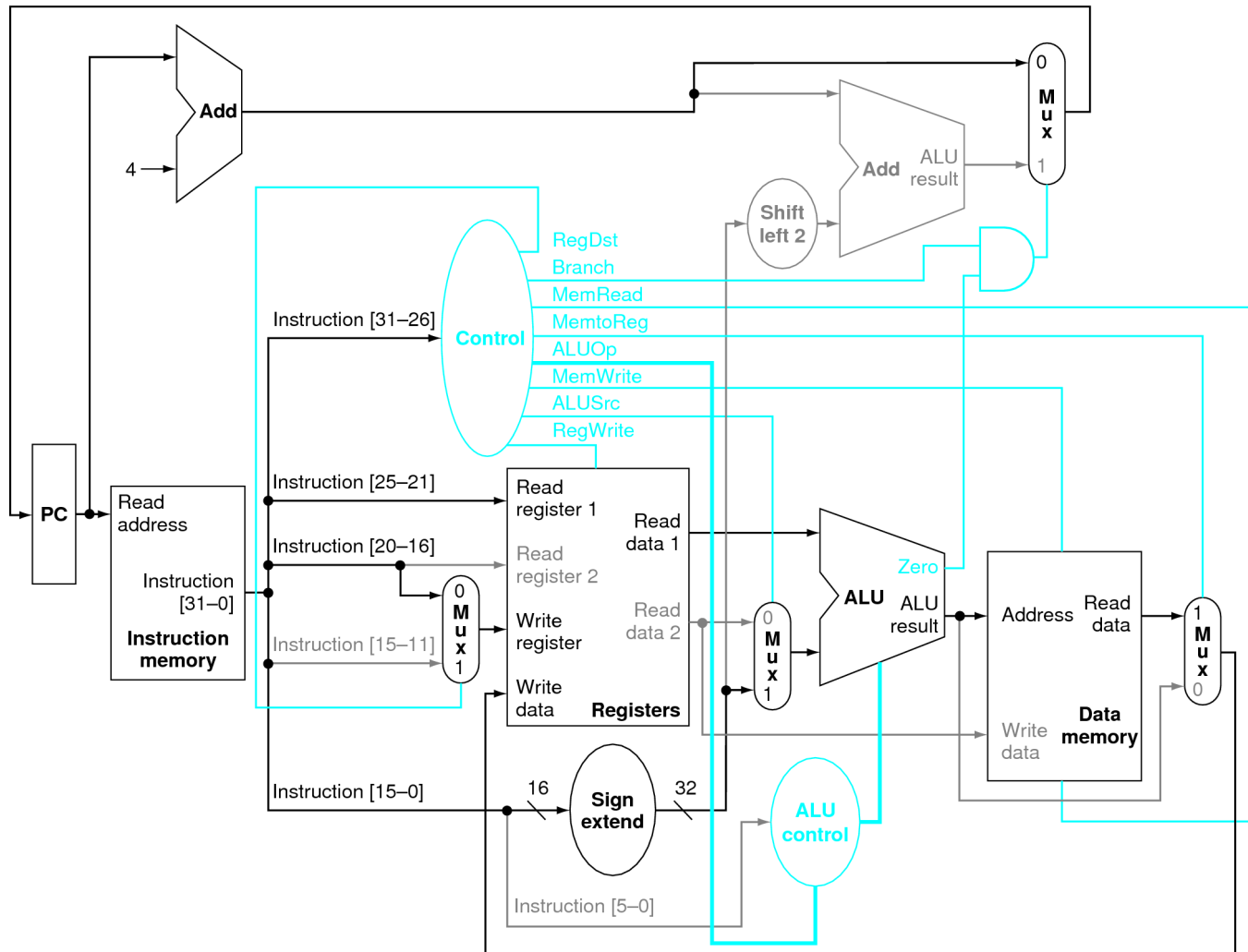
Λειτουργία datapath για εντολή load



lw \$t1, offset(\$t2)

1. Η εντολή προσκομίζεται και ο PC αυξάνεται
2. Ο καταχωρητής \$t2 διαβάζεται από το αρχείο καταχωρητών και η κύρια μονάδα ελέγχου υπολογίζει τις τιμές των γραμμών ελέγχου
3. Η ALU υπολογίζει το άθροισμα της τιμής που διαβάστηκε και τα κατώτερα 16 bit της εντολής (offset) που έχουν υποστεί επέκταση προσήμου

Λειτουργία datapath για εντολή load (2)

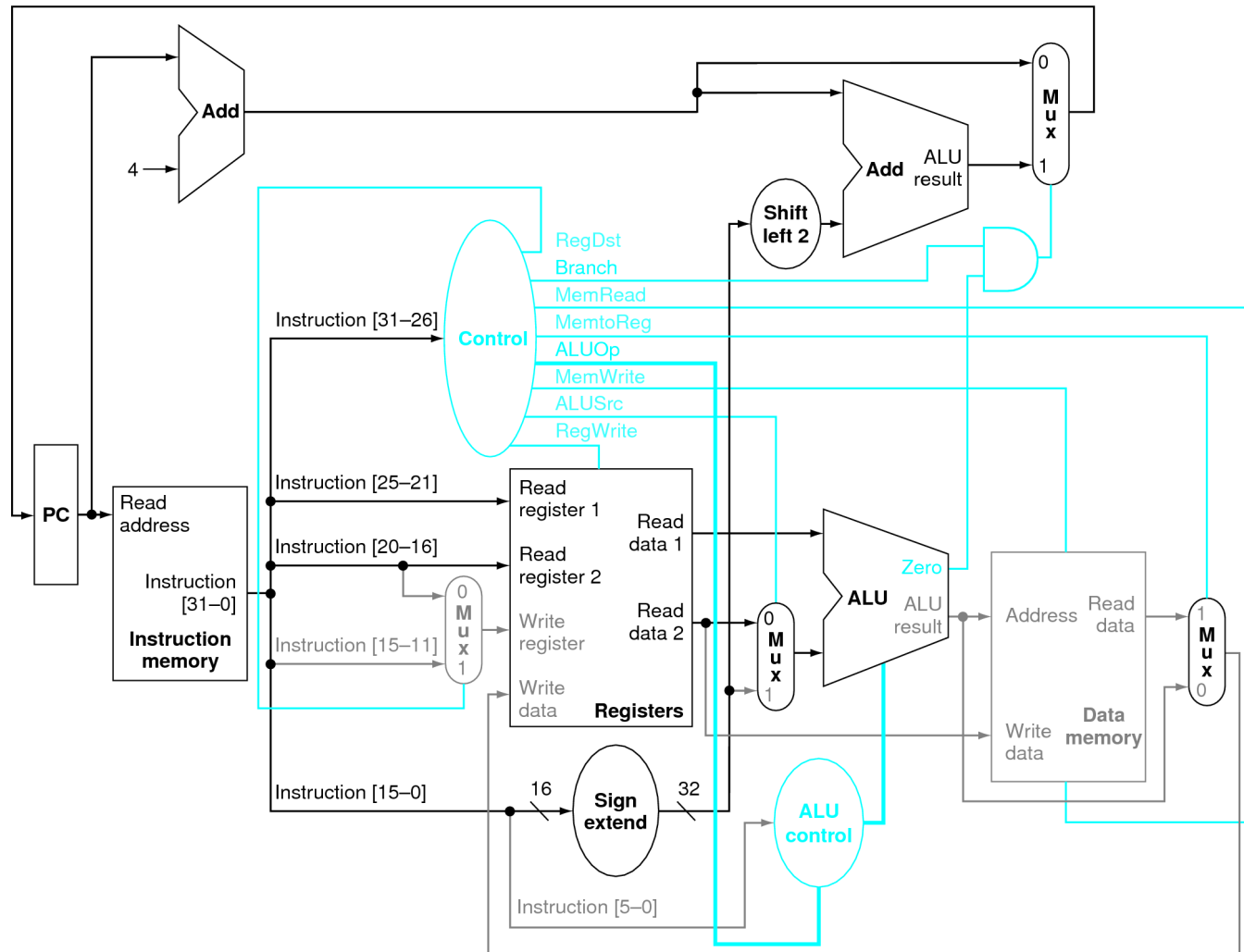


`lw $t1, offset($t2)`

4. Το άθροισμα χρησιμοποιείται ως διεύθυνση για τη μνήμη δεδομένων

5. Τα δεδομένα από τη μνήμη γράφονται στο αρχείο καταχωρητών επιλέγοντας τον \$t1 μέσω των bit 20:16 της εντολής

Λειτουργία datapath για εντολή **branch equal**

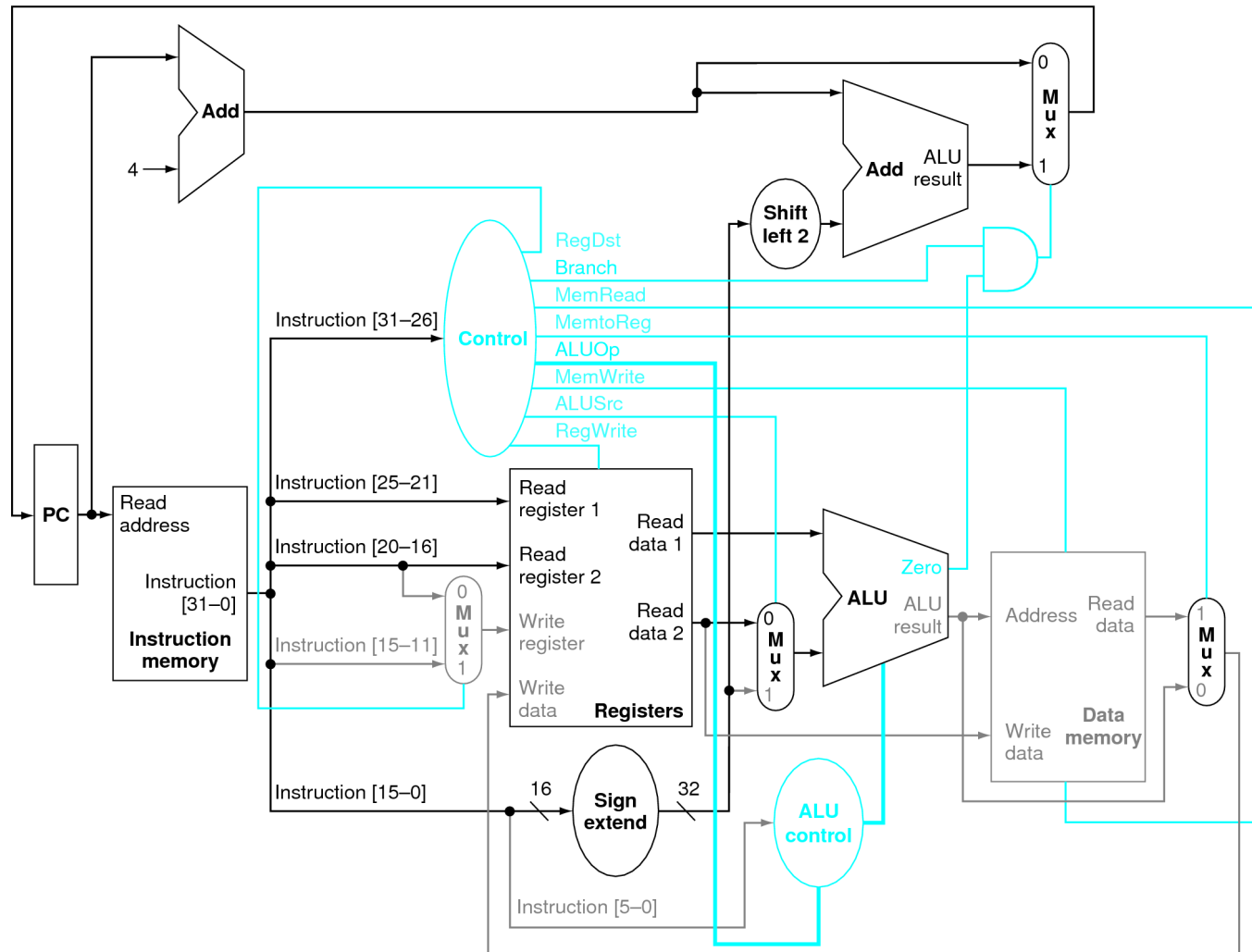


beq \$t1,\$t2,offset

1. Η εντολή προσκομίζεται και ο PC αυξάνεται

2. Οι καταχωρητές \$t1 και \$t2 διαβάζονται από το αρχείο καταχωρητών και η κύρια μονάδα ελέγχου υπολογίζει τις τιμές των γραμμών ελέγχου

Λειτουργία datapath για εντολή branch equal (2)



`beq $t1,$t2,offset`

3. Η ALU εκτελεί αφαίρεση των δεδομένων. Η τιμή PC + 4 προστίθεται στα κατώτερα 16 bit της εντολής (offset) που έχουν υποστεί επέκταση προσήμου και αριστερή ολίσθηση κατά 2 θέσεις. Το αποτέλεσμα είναι η διεύθυνση προορισμού της διακλάδωσης

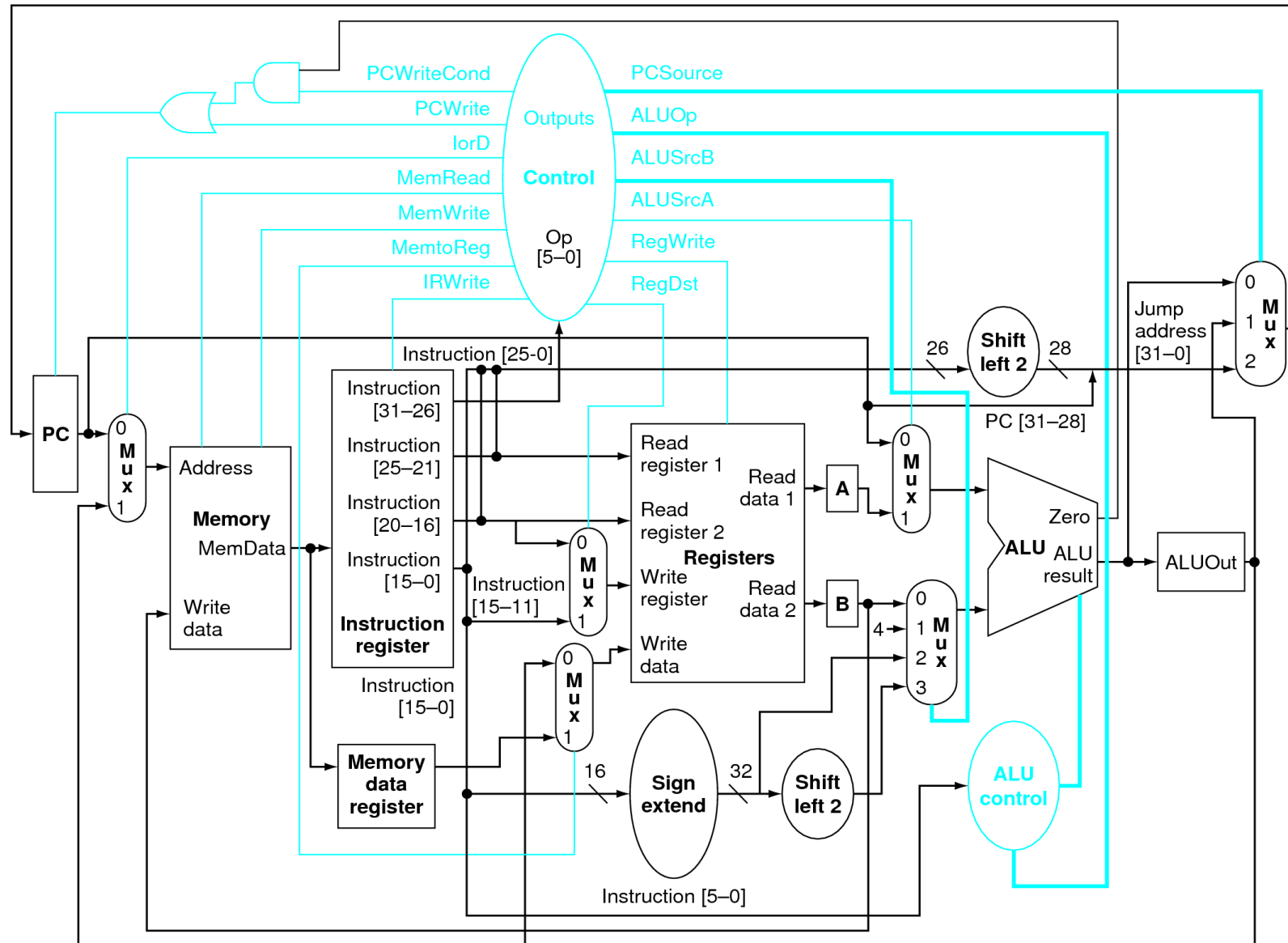
4. Το αποτέλεσμα Zero από την ALU χρησιμοποιείται για να αποφασιστεί η τιμή που θα αποθηκευτεί στον PC

Συνάρτηση ελέγχου της υλοποίησης ενός κύκλου

Είσοδος ή έξοδος	Όνομα σήματος	R-Type	lw	sw	beq
Είσοδοι	Op5	0	1	1	0
	Op4	0	0	0	0
	Op3	0	0	1	0
	Op2	0	0	0	1
	Op1	0	1	1	0
	Op0	0	1	1	0
Έξοδοι	RegDst	1	0	X	X
	ALUSrc	0	1	1	0
	MemtoReg	0	1	X	X
	RegWrite	1	1	0	0
	MemRead	0	1	0	0
	MemWrite	0	0	1	0
	Branch	0	0	0	1
	ALUOp1	1	0	0	0
	ALUOp0	0	0	0	1

Από αυτό τον πίνακα αληθείας μπορούμε να υλοποιήσουμε απευθείας με πύλες τη συνάρτηση ελέγχου

Datapath πολλών κύκλων με τη μονάδα ελέγχου



Ενέργειες των σημάτων ελέγχου 1 bit

Όνομα σήματος	Αποτέλεσμα όταν είναι απενεργοποιημένο	Αποτέλεσμα όταν είναι ενεργοποιημένο
RegDst	Ο αριθμός προορισμού του αρχείου καταχωρητών για τον καταχωρητή εγγραφής προέρχεται από το πεδίο rt	Ο αριθμός προορισμού του αρχείου καταχωρητών για τον καταχωρητή εγγραφής προέρχεται από το πεδίο rd
RegWrite	Κανένα	Στον καταχωρητή γενικού σκοπού που επιλέγεται από τον αριθμό του καταχωρητή εγγραφής γράφεται η τιμή της εισόδου δεδομένων εγγραφής
ALUSrcA	Ο πρώτος τελεστής της ALU είναι ο PC	Ο πρώτος τελεστής της ALU προέρχεται από τον καταχωρητή A
MemRead	Κανένα	Τα περιεχόμενα της μνήμης δεδομένων που καθορίζονται από την είσοδο διεύθυνσης τοποθετούνται στην έξοδο δεδομένων μνήμης
MemWrite	Κανένα	Τα περιεχόμενα της μνήμης δεδομένων που καθορίζονται από την είσοδο διεύθυνσης αντικαθίστανται από την τιμή στην είσοδο δεδομένων εγγραφής

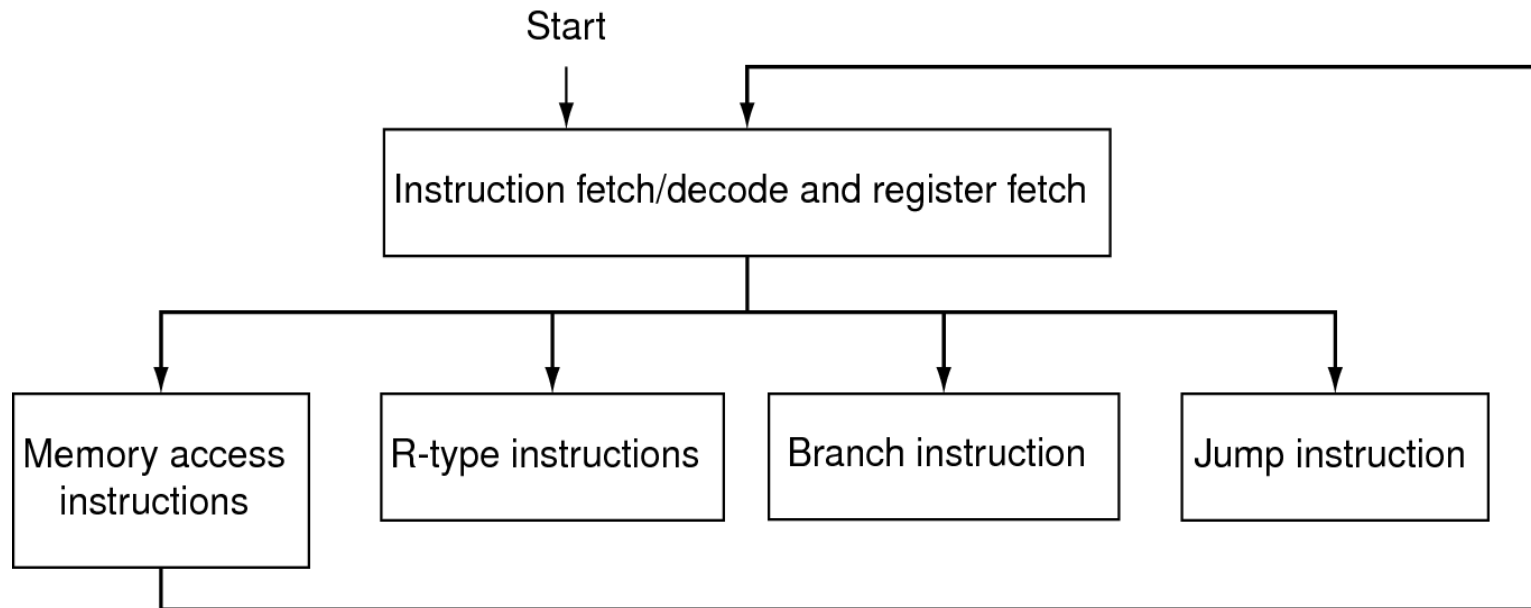
Ενέργειες των σημάτων ελέγχου 1 bit (2)

Όνομα σήματος	Αποτέλεσμα όταν είναι απενεργοποιημένο	Αποτέλεσμα όταν είναι ενεργοποιημένο
MemtoReg	Η τιμή που παρέχεται στην είσοδο δεδομένων εγγραφής των καταχωρητών προέρχεται από την ALU	Η τιμή που παρέχεται στην είσοδο δεδομένων εγγραφής των καταχωρητών προέρχεται από τον καταχωρητή δεδομένων μνήμης
lrd	Ο PC χρησιμοποιείται για να δώσει τη διεύθυνση στη μονάδα μνήμης	Ο ALUOut χρησιμοποιείται για να δώσει τη διεύθυνση στη μονάδα μνήμης
IRWrite	Κανένα	Η έξοδος της μνήμης γράφεται στον καταχωρητή εντολής
PCWrite	Κανένα	Γίνεται εγγραφή στον PC. Η προέλευση ελέγχεται από το PCSrc
PCWriteCond	Κανένα	Γίνεται εγγραφή στον PC αν η έξοδος Zero από την ALU είναι επίσης ενεργός

Ενέργειες των σημάτων ελέγχου 2 bit

Όνομα σήματος	Τιμή (δυαδική)	Αποτέλεσμα
ALUOp	00	Η ALU εκτελεί μια πράξη πρόσθεσης
	01	Η ALU εκτελεί μια πράξη αφαίρεσης
	10	Το πεδίο funct της εντολής καθορίζει την πράξη της ALU
ALUSrcB	00	Η δεύτερη είσοδος της ALU προέρχεται από τον καταχωρητή B
	01	Η δεύτερη είσοδος της ALU είναι η σταθερά 4
	10	Η δεύτερη είσοδος της ALU είναι τα χαμηλότερα 16 bit του καταχωρητή εντολής αφού έχουν υποστεί επέκταση προσήμου
	11	Η δεύτερη είσοδος της ALU είναι τα χαμηλότερα 16 bit του καταχωρητή εντολής αφού έχουν υποστεί επέκταση προσήμου και αριστερή ολίσθηση κατά 2 bit
PCSource	00	Η έξοδος της ALU ($PC + 4$) πηγαίνει στον PC για εγγραφή
	01	Τα περιεχόμενα του ALU (η διεύθυνση προορισμού διακλάδωσης) πηγαίνουν στον PC για εγγραφή
	10	Η διεύθυνση προορισμού άλματος (εντολή[25:0] μετά από αριστερή ολίσθηση κατά 2 bit και συνένωση με το $PC + 4$ [31:28]) πηγαίνει στον PC για εγγραφή

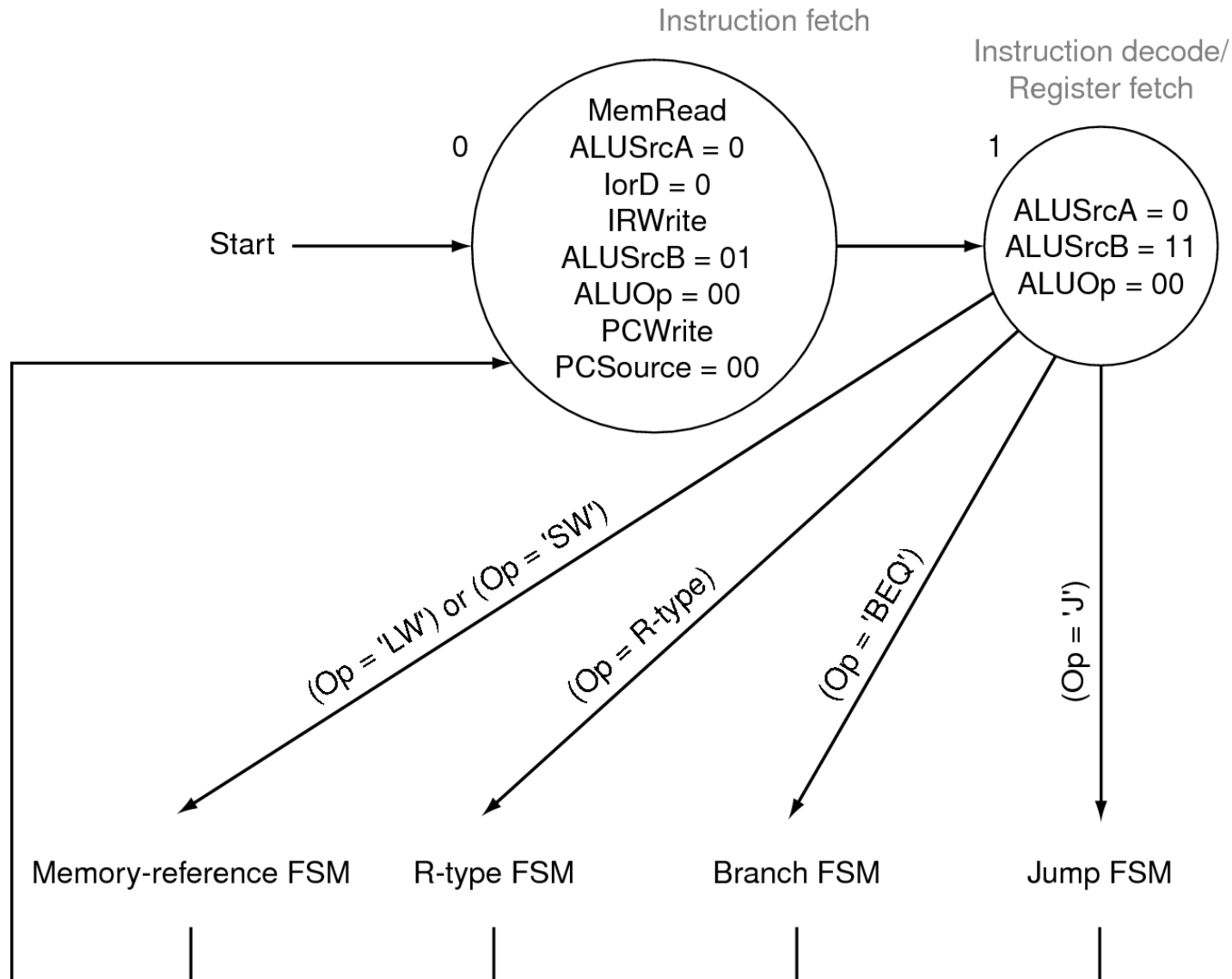
Υλοποίηση μονάδας ελέγχου με FSM



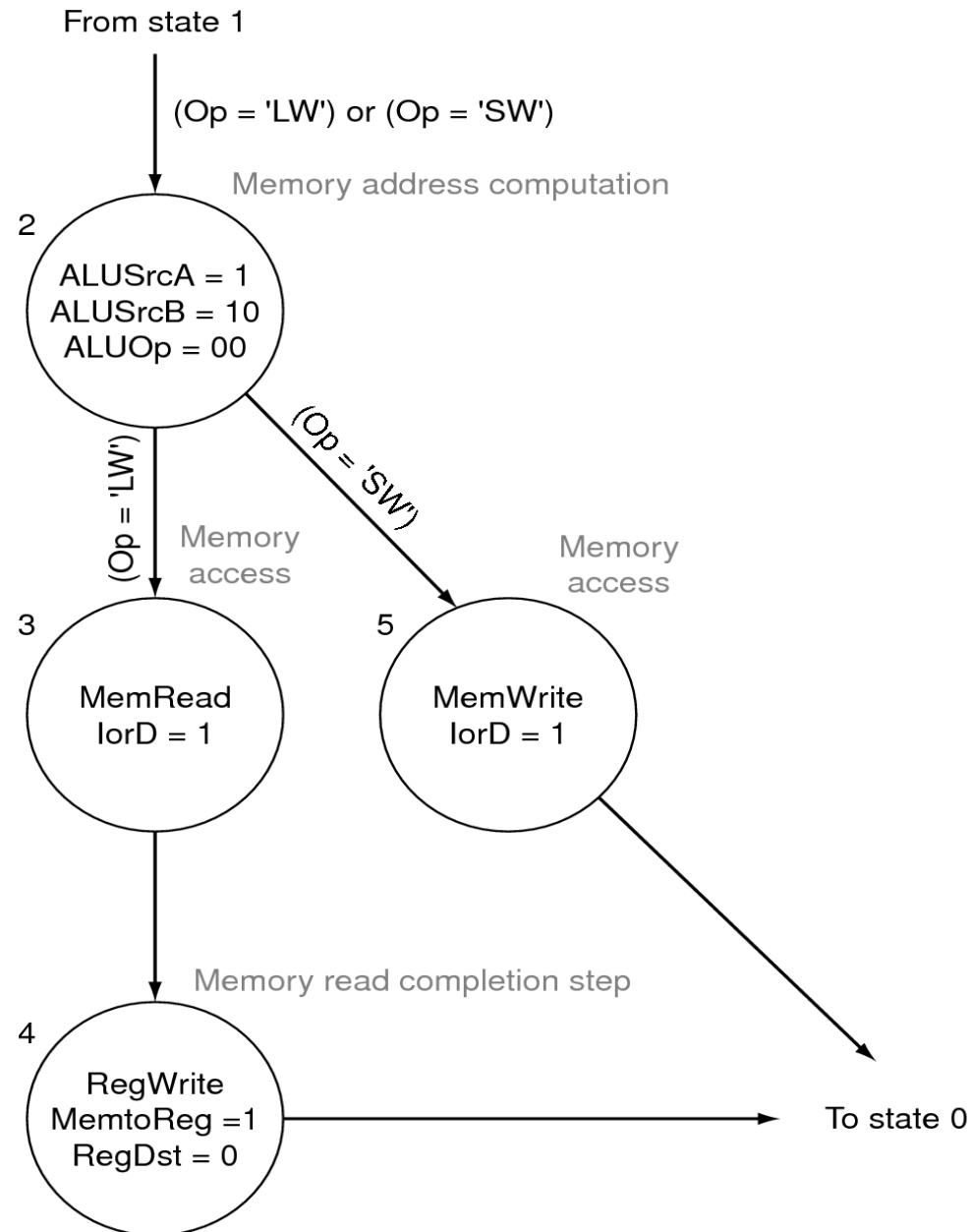
Μηχανή πεπερασμένης κατάστασης (FSM - Finite State Machine):

- *Σύνολο καταστάσεων*: κάθε κατάσταση ορίζει ένα σύνολο εξόδων που ενεργοποιούνται όταν η μηχανή είναι σε αυτή την κατάσταση (όσες δεν είναι ρητά ενεργοποιημένες, είναι απενεργοποιημένες)
- *Συνάρτηση επόμενης κατάστασης*: απεικονίζει την τρέχουσα κατάσταση και τις εισόδους σε μια νέα κατάσταση

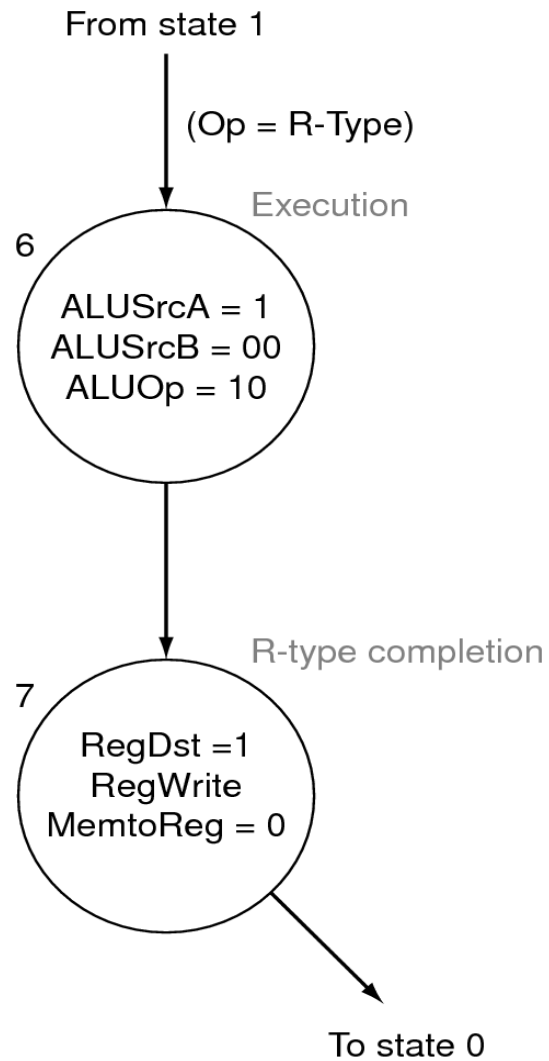
Instruction fetch/decode, register fetch



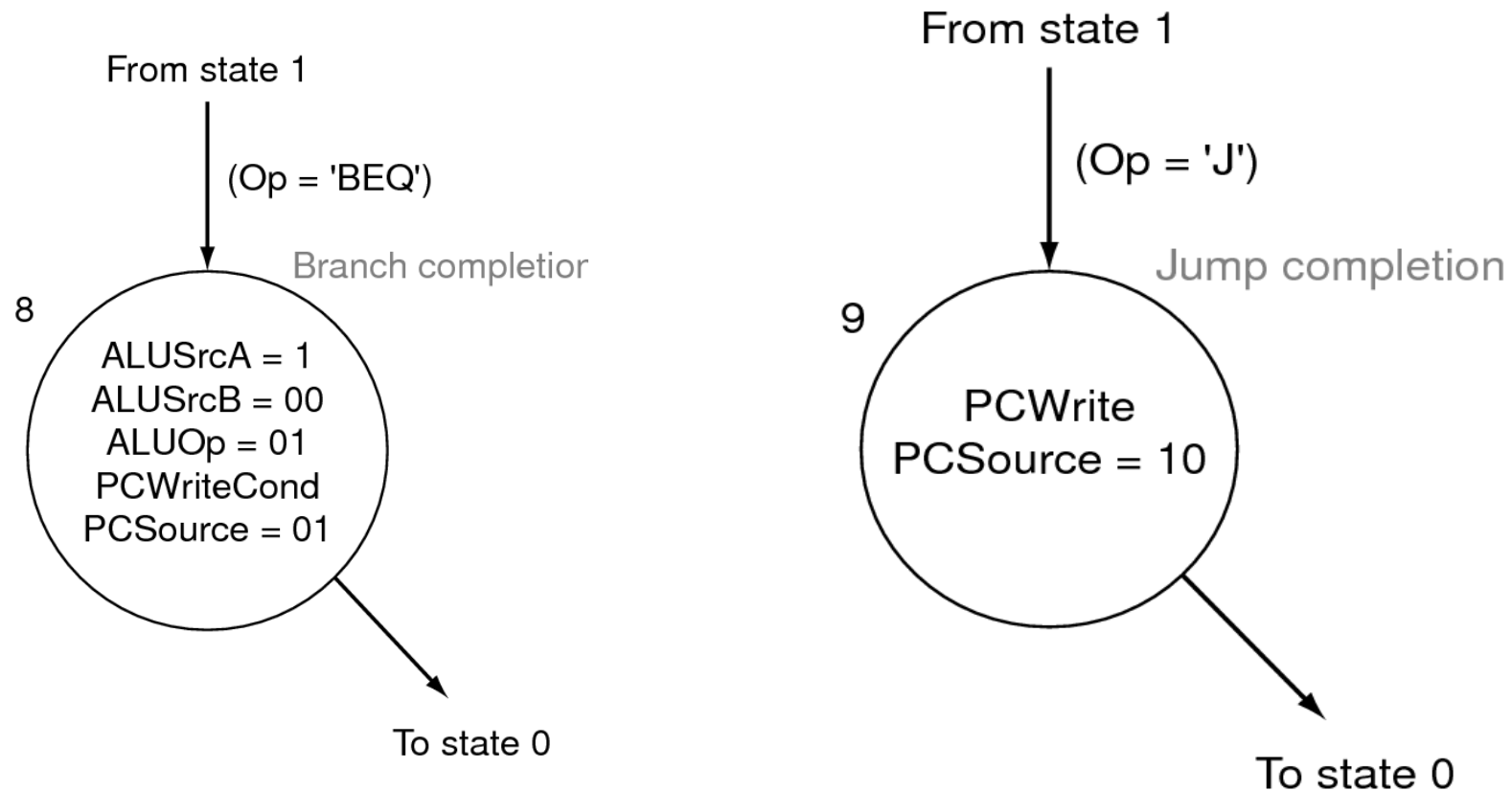
FSM για εντολές αναφοράς στη μνήμη



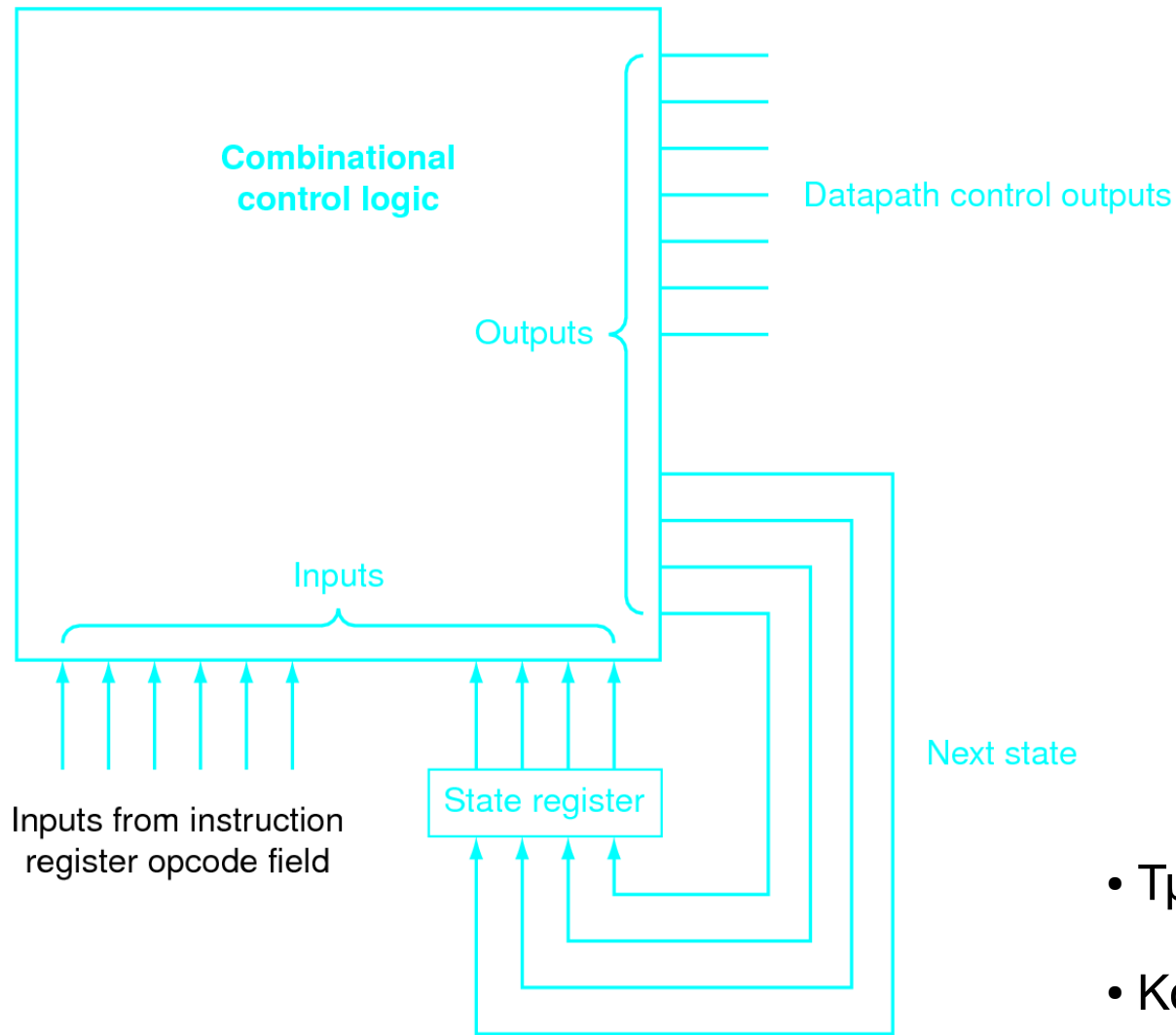
FSM για εντολές τύπου R



FSM για εντολές διακλάδωσης και άλματος

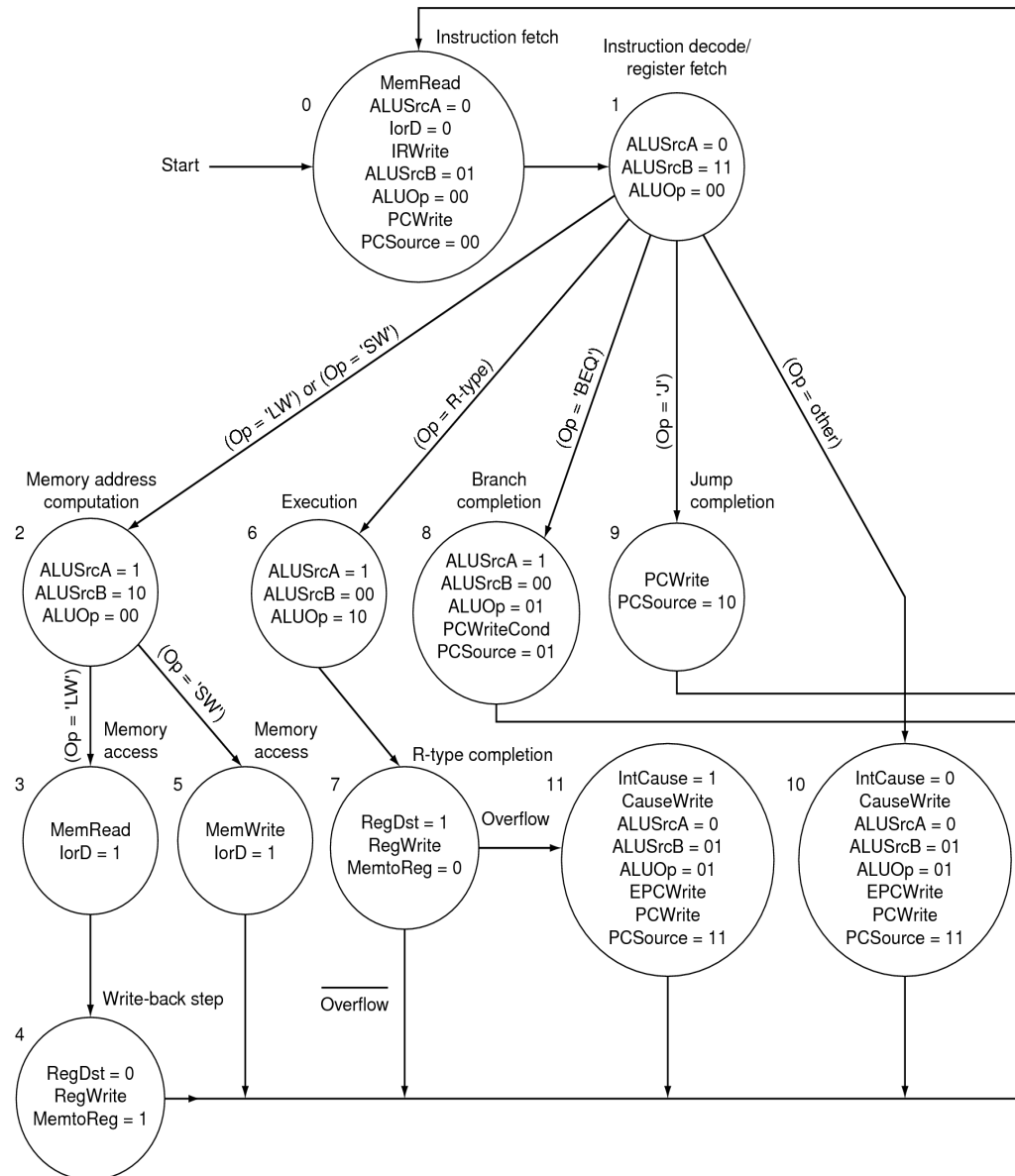


Υλοποίηση FSM

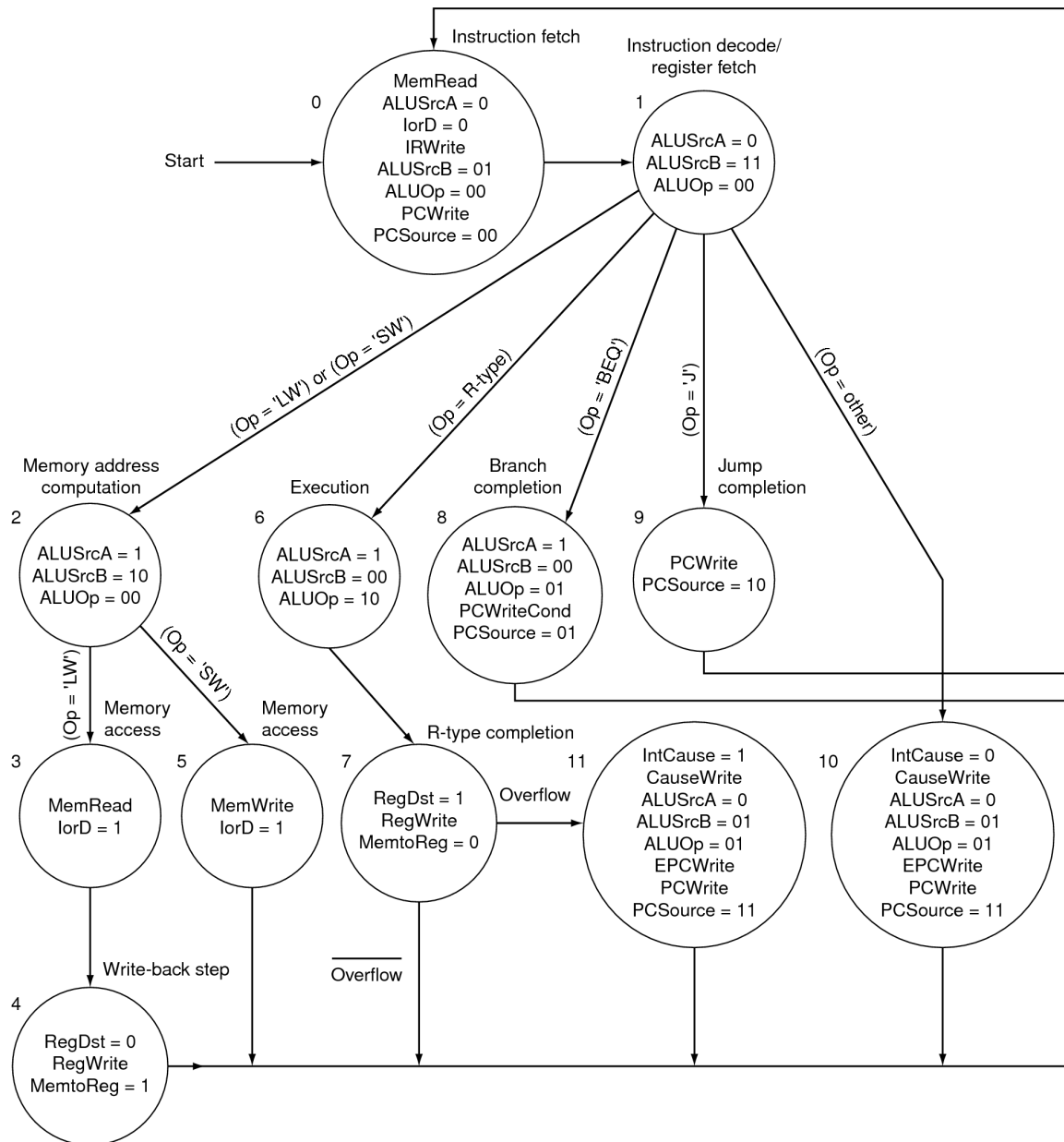


- Τμήμα συνδυαστικής λογικής
- Καταχωρητής που αποθηκεύει την τρέχουσα κατάσταση

Πλήρης μονάδα ελέγχου FSM για datapath πολλών κύκλων



FSM με προσθήκες για το χειρισμό της ανίχνευσης εξαιρέσεων



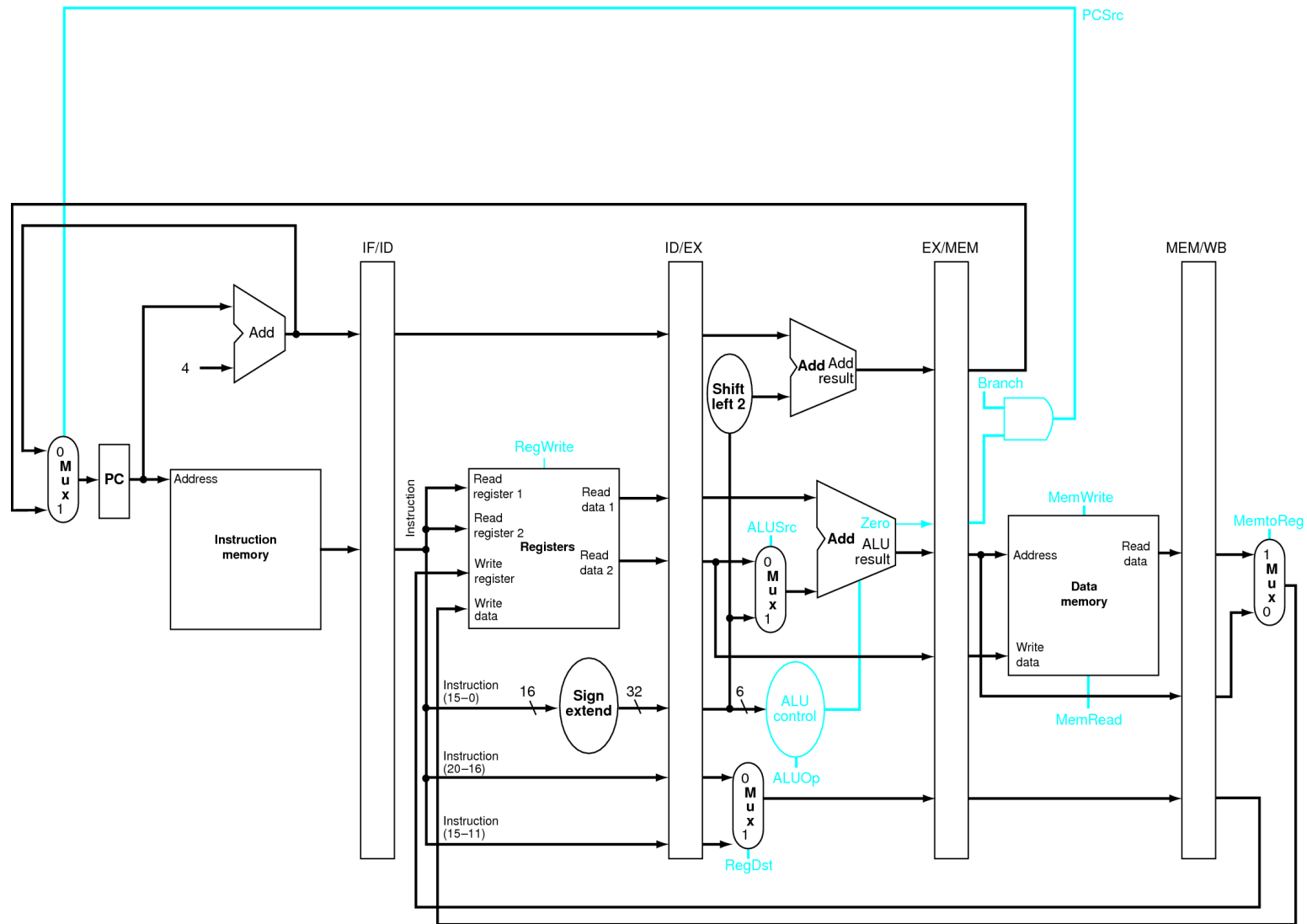
Προσθήκες

- EPC: 32-bit καταχωρητής, κρατά τη διεύθυνση της εντολής που επηρεάζεται
- Cause: καταχωρητής που καταγράφει την αιτία της εξαίρεσης
- Νέα σήματα ελέγχου: EPCWrite, CauseWrite (εγγραφή στους EPC, Cause)
- PCSource=11: $PC \leftarrow$ σημείο εισόδου λειτουργικού συστήματος για το χειρισμό της εξαίρεσης

Εξαιρέσεις που ανιχνεύονται:

- Μη ορισμένη εντολή (Cause=0)
- Αριθμητική υπερχείλιση (Cause=1)

Μονάδα ελέγχου pipeline



Το pipeline με προσδιορισμένα τα σήματα ελέγχου

Τα σήματα ελέγχου και το αποτέλεσμα τους

Όνομα σήματος	Αποτέλεσμα όταν είναι απενεργοποιημένο	Αποτέλεσμα όταν είναι ενεργοποιημένο
RegDst	Ο αριθμός καταχωρητή προορισμού για τον καταχωρητή εγγραφής προέρχεται από το πεδίο rt (bit 20:16)	Ο αριθμός καταχωρητή προορισμού για τον καταχωρητή εγγραφής προέρχεται από το πεδίο rd (bit 15:11)
RegWrite	Κανένα	Στον καταχωρητή στην είσοδο καταχωρητή εγγραφής γράφεται η τιμή που δίνεται στην είσοδο δεδομένων εγγραφής
ALUSrc	Ο δεύτερος τελεστής της ALU προέρχεται από τη δεύτερη έξοδο του αρχείου καταχωρητών (Δεδομένα ανάγνωσης 2)	Ο δεύτερος τελεστής της ALU είναι τα κατώτερα 16 bit της εντολής αφού υποστούν επέκταση προσήμου
PCSrc	Ο PC αντικαθίσταται από την έξοδο του αθροιστή που υπολογίζει την τιμή $PC + 4$	Ο PC αντικαθίσταται από την έξοδο του αθροιστή που υπολογίζει τον προορισμό της διακλάδωσης

Τα σήματα ελέγχου και το αποτέλεσμα τους (2)

Όνομα σήματος	Αποτέλεσμα όταν είναι απενεργοποιημένο	Αποτέλεσμα όταν είναι ενεργοποιημένο
MemRead	Κανένα	Τα περιεχόμενα της μνήμης δεδομένων που καθορίζονται από την είσοδο διεύθυνσης τοποθετούνται στην έξοδο δεδομένων ανάγνωσης
MemWrite	Κανένα	Τα περιεχόμενα της μνήμης δεδομένων που καθορίζονται από την είσοδο διεύθυνσης αντικαθίστανται από την πμή στην είσοδο δεδομένων εγγραφής
MemtoReg	Η πμή που παρέχεται στην είσοδο δεδομένων εγγραφής των καταχωρητών προέρχεται από την ALU	Η πμή που παρέχεται στην είσοδο δεδομένων εγγραφής των καταχωρητών προέρχεται από τη μνήμη δεδομένων

- Τα σήματα ελέγχου έχουν την ίδια λειτουργία όπως και στην υλοποίηση ενός κύκλου
- Το σήμα ALUOp και η υλοποίηση του ελέγχου της ALU είναι επίσης όπως στην υλοποίηση ενός κύκλου
- Δεν χρειάζονται σήματα εγγραφής για τον PC και για τους καταχωρητές του pipeline, αφού γίνεται εγγραφή σε κάθε κύκλο

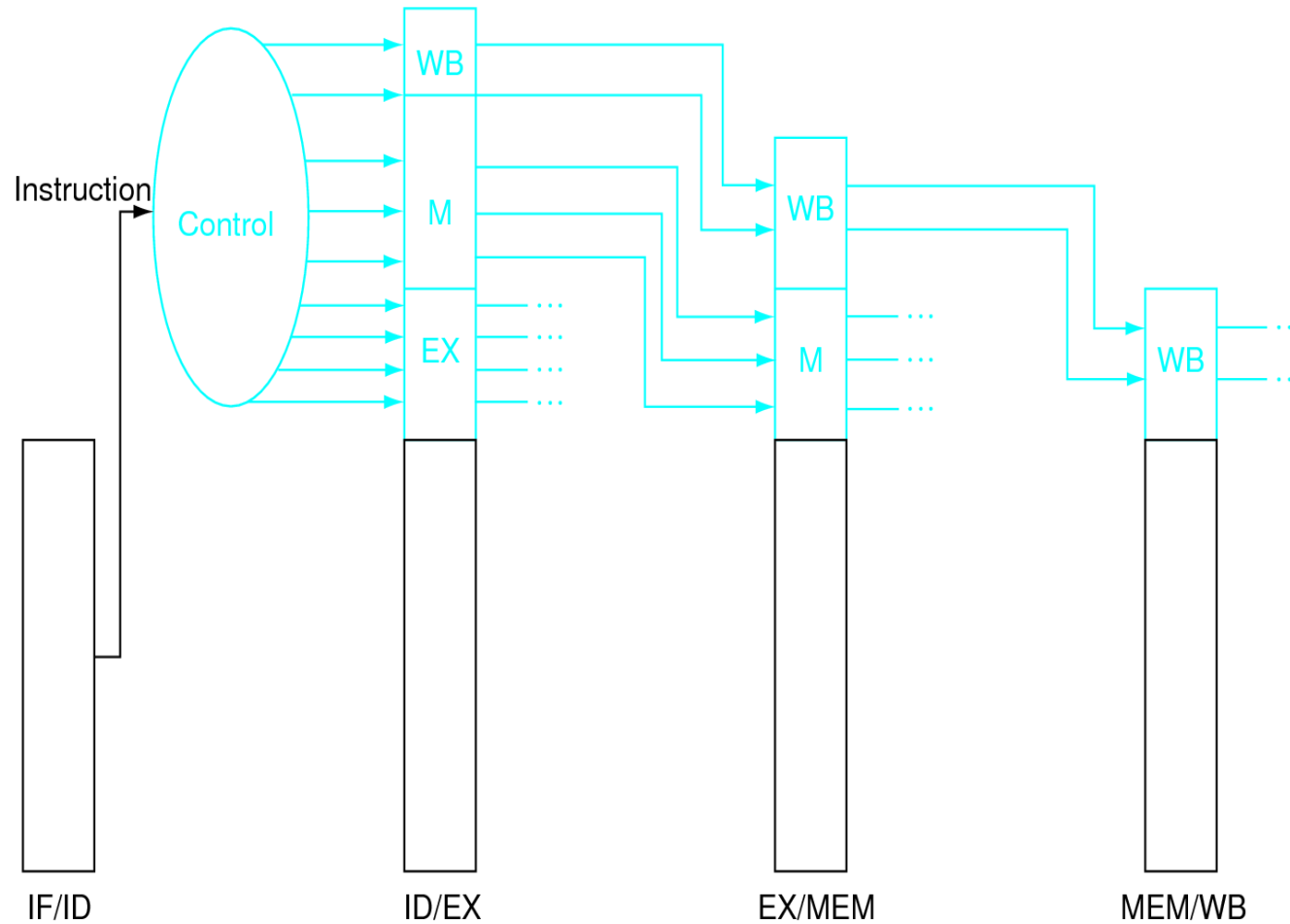
Γραμμές ελέγχου pipeline

Εντολή	Γραμμές ελέγχου σταδίου EX				Γραμμές ελέγχου σταδίου MEM			Γραμμές ελέγχου σταδίου WB	
	RegDst	ALUOp1	ALUOp0	ALUSrc	MemRead	MemWrite	Branch	MemtoReg	RegWrite
R-Type	1	1	0	0	0	0	0	0	1
lw	0	0	0	1	1	0	0	1	1
sw	X	0	0	1	0	1	0	X	0
beq	X	0	1	0	0	0	1	X	0

Όπως στην υλοποίηση ενός κύκλου, αλλά εδώ χωρίζονται σε ομάδες ανάλογα με τα στάδια του pipeline:

- IF: τα σήματα ελέγχου για την ανάγνωση της μνήμης εντολών και την εγγραφή του PC είναι πάντα ενεργοποιημένα, άρα δεν χρειάζονται γραμμές ελέγχου
- ID: όμοιες λειτουργίες σε κάθε κύκλο, δε χρειάζονται γραμμές ελέγχου
- EX: RegDst, ALUOp, ALUSrc
- MEM: Branch, MemRead, MemWrite
- WB: MemtoReg, RegWrite

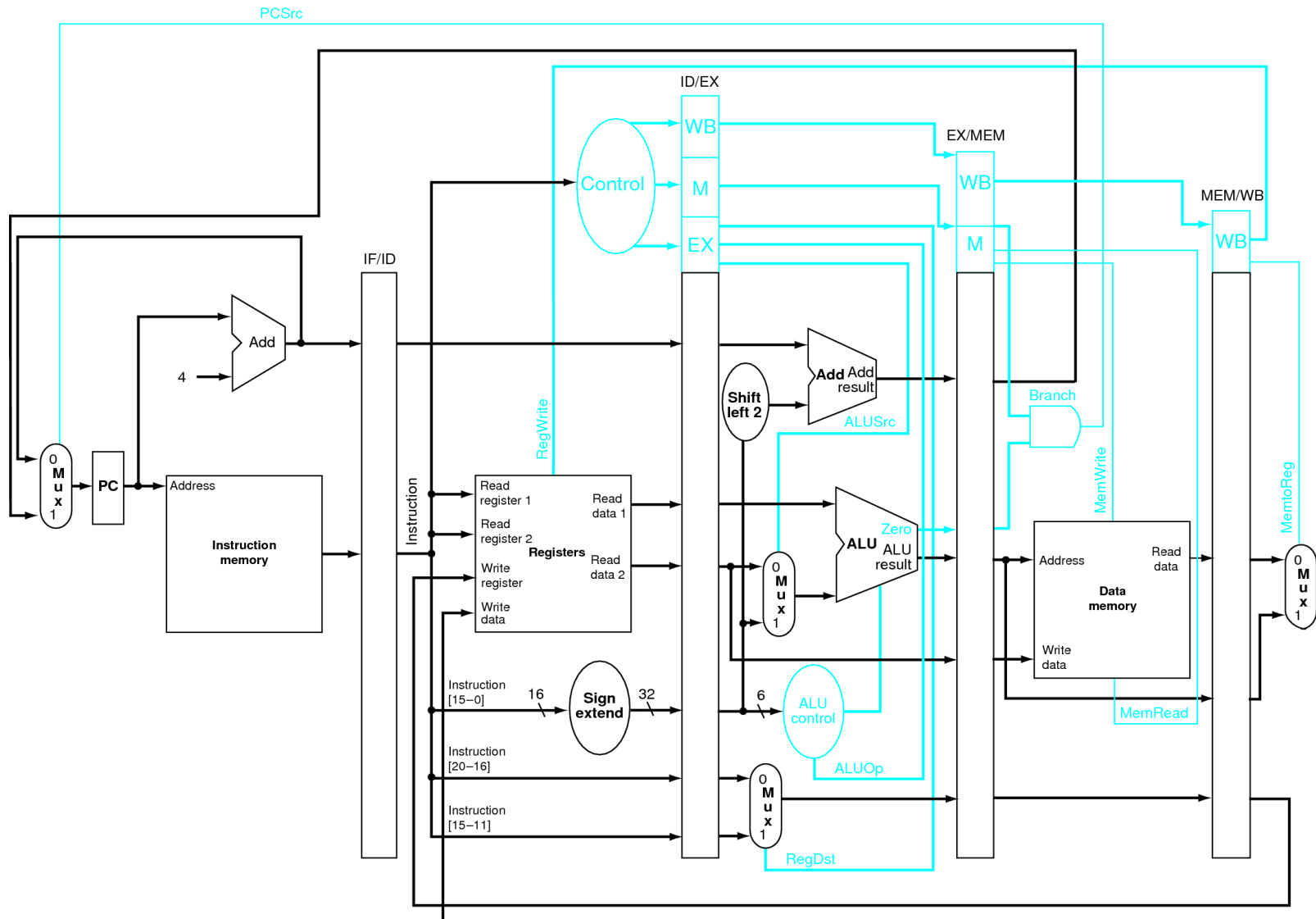
Υλοποίηση ελέγχου pipeline



Απλούστερος τρόπος υλοποίησης:

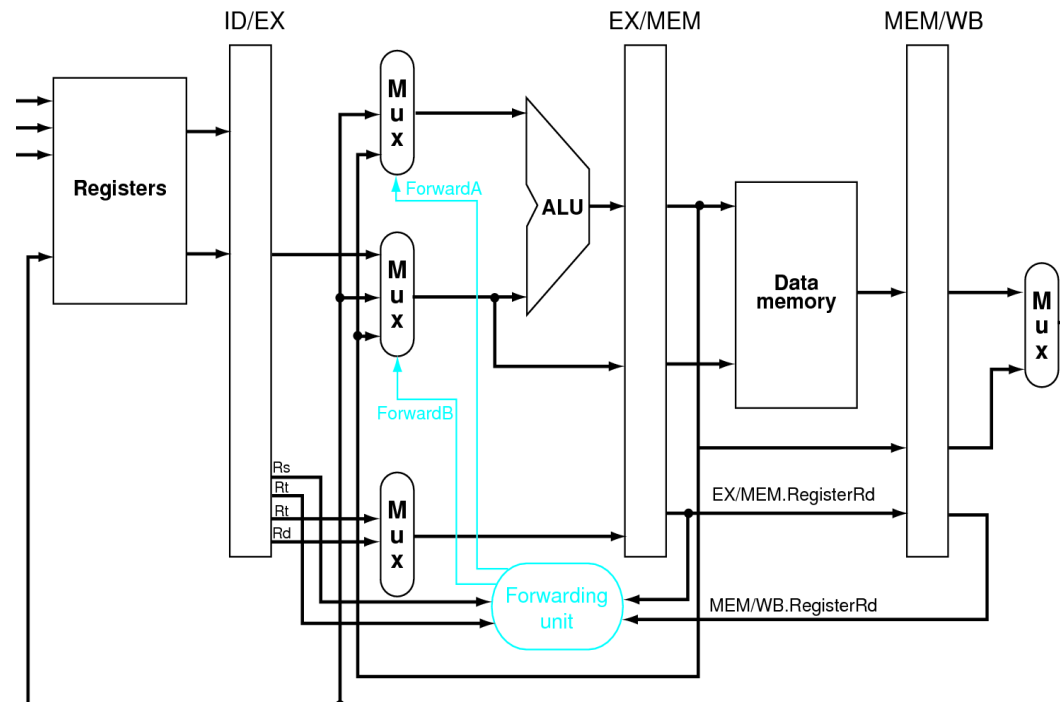
- επέκταση των καταχωρητών του pipeline ώστε να περιλαμβάνουν πληροφορίες ελέγχου
- δημιουργία των σημάτων στο στάδιο ID

Datapath με τις γραμμές ελέγχου συνδεδεμένες στα τμήματα ελέγχου των καταχωρητών του pipeline

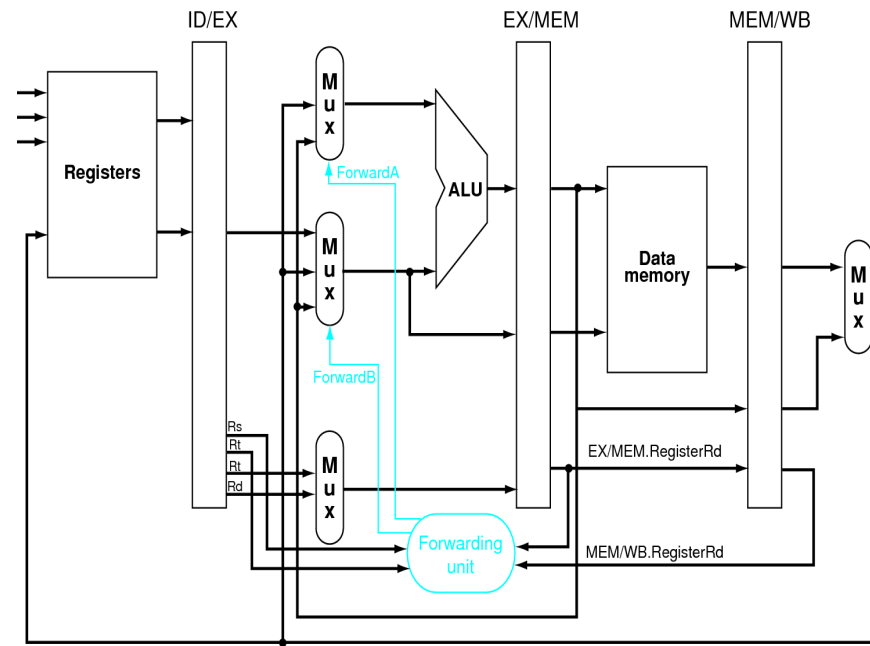


Προσθήκη προώθησης (forwarding)

Έλεγχος πολυπλέκτη	Προέλευση	Ερμηνεία
ForwardA=00	ID/EX	Ο πρώτος τελεστής της ALU προέρχεται από το αρχείο καταχωρητών
ForwardA=10	EX/MEM	Ο πρώτος τελεστής της ALU προωθείται από το προηγούμενο αποτέλεσμα της ALU
ForwardA=01	MEM/WB	Ο πρώτος τελεστής της ALU προωθείται από τη μνήμη δεδομένων ή από ένα προηγούμενο αποτέλεσμα της ALU
ForwardB=00	ID/EX	Ο δεύτερος τελεστής της ALU προέρχεται από το αρχείο καταχωρητών
ForwardB=10	EX/MEM	Ο δεύτερος τελεστής της ALU προωθείται από το προηγούμενο αποτέλεσμα της ALU
ForwardB=01	MEM/WB	Ο δεύτερος τελεστής της ALU προωθείται από τη μνήμη δεδομένων ή από ένα προηγούμενο αποτέλεσμα της ALU



Προσθήκη προώθησης (forwarding) (2)



Συνθήκες για την ανίχνευση κινδύνων

Κίνδυνος EX

if (EX/MEM.RegWrite
and (EX/MEM.RegisterRd $\neq$ 0)
and (EX/MEM.RegisterRd = ID/EX.RegisterRs))
ForwardA=10

if (EX/MEM.RegWrite
and (EX/MEM.RegisterRd $\neq$ 0)
and (EX/MEM.RegisterRd = ID/EX.RegisterRt))
ForwardB=10

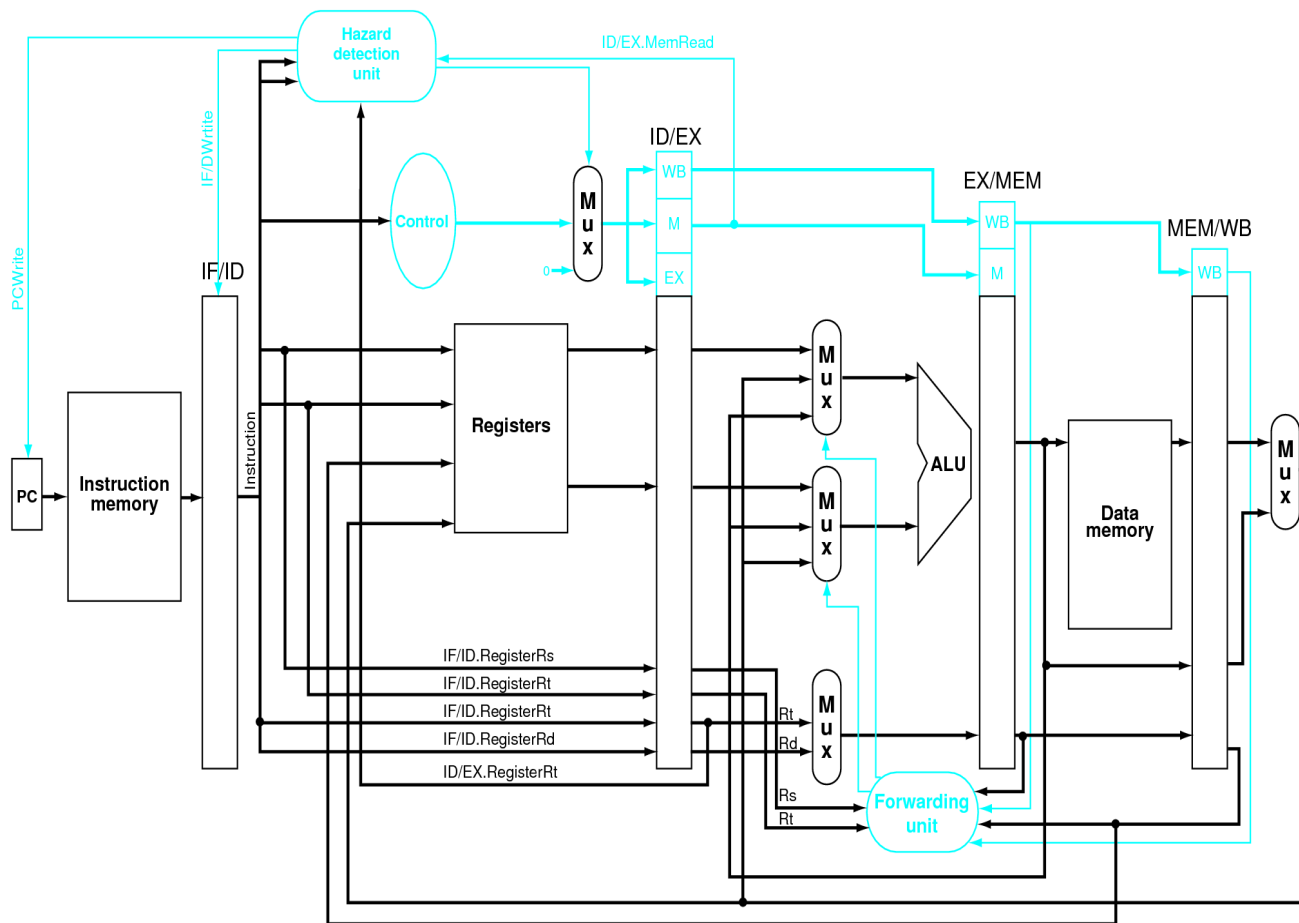
Κίνδυνος MEM

if (MEM/WB.RegWrite
and (MEM/WB.RegisterRd $\neq$ 0)
and (EX/MEM.RegisterRd $\neq$ ID/EX.RegisterRs)
and (MEM/WB.RegisterRd = ID/EX.RegisterRs))
ForwardA = 01

if (MEM/WB.RegWrite
and (MEM/WB.RegisterRd $\neq$ 0)
and (EX/MEM.RegisterRd $\neq$ ID/EX.RegisterRt)
and (MEM/WB.RegisterRd = ID/EX.RegisterRt))
ForwardB = 01

Προσθήκη μονάδας ανίχνευσης κινδύνου

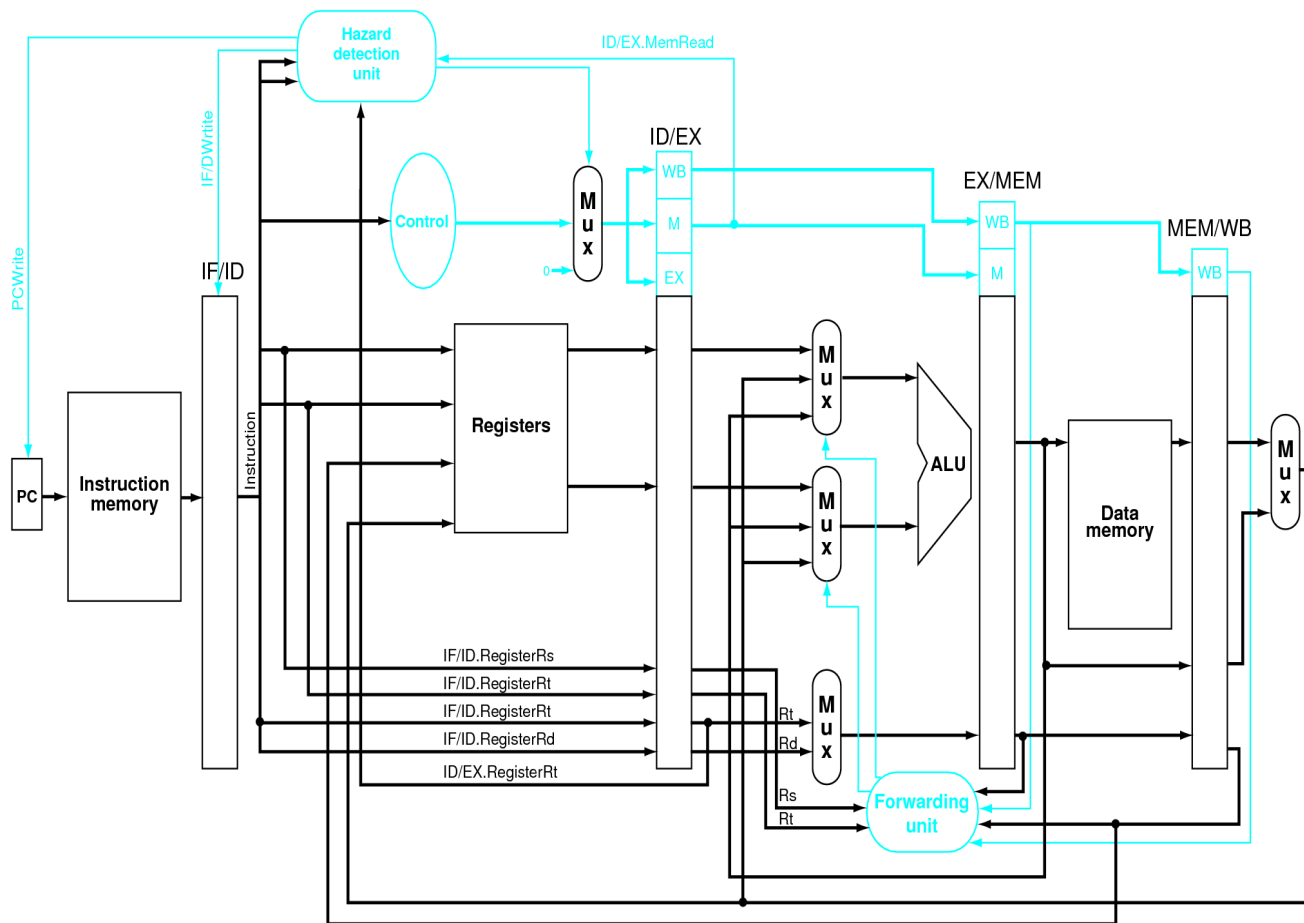
- *Κίνδυνος* : μια εντολή προσπαθεί να διαβάσει έναν καταχωρητή μετά από μια εντολή load που τον γράφει



- Συνθήκη ανίχνευσης κινδύνου:

if (ID/EX.MemRead and
((ID/EX.RegisterRt =
IF/ID.RegisterRs) or
(ID/EX.RegisterRt =
IF/ID.RegisterRt)))
stall

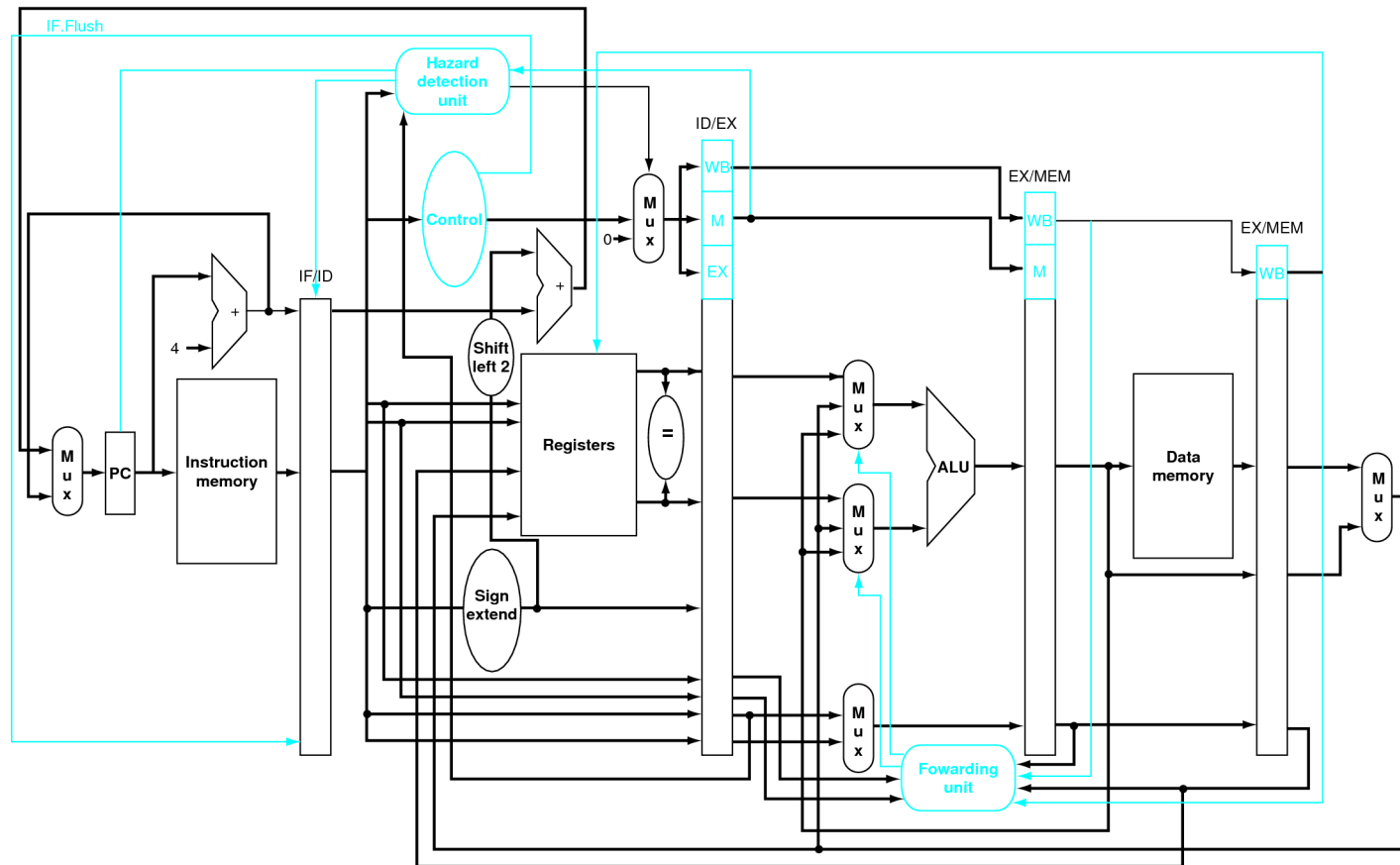
Προσθήκη μονάδας ανίχνευσης κινδύνου (2)



- Η μονάδα ανίχνευσης κινδύνου προστίθεται στο στάδιο ID

- Πώς γίνεται το *stall*;
→ όλα τα σήματα ελέγχου στο στάδιο EX γίνονται 0 (nop), και δε γίνεται εγγραφή στους PC, IF/ID, άρα καθυστερούνται έναν κύκλο οι εντολές στα στάδια IF και ID

Χειρισμός κινδύνων διακλάδωσης



- Πρόβλεψη μη ληφθείσας διακλάδωσης
- Αν τελικά η διακλάδωση συμβεί, οι εντολές που έχουν ξεκινήσει να εκτελούνται μετά τη διακλάδωση πρέπει να απορριφθούν (flush)
- Μετακίνηση της εκτέλεσης των διακλαδώσεων στο στάδιο ID → μείωση της καθυστέρησής τους, με κόστος σε υλικό και την πιο περίπλοκη προώθηση και ανίχνευση κινδύνων

Χειρισμός εξαιρέσεων

Προσθήκες

- Καταχωρητής Cause (αιτία της εξαίρεσης)
- Καταχωρητής EPC (διεύθυνση εντολής που προκάλεσε την εξαίρεση)
- Είσοδος 8000 0180_{hex} (αρχική διεύθυνση για να ξεκινήσει η προσκόμιση εντολών όταν συμβεί μια εξαίρεση)
- Το σήμα υπερχείλισης από την ALU είναι μια είσοδος στη μονάδα ελέγχου
- Σήματα για εκκένωση των σταδίων ID και EX

