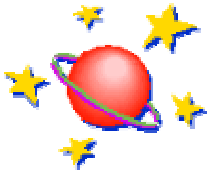


Ενότητα 6η: *Κίνδυνοι Ελέγχου*

Σκοπός **Ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι να παρουσιάσει τους κινδύνους ελέγχου και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των καθυστερήσεων που προκαλούν. Επίσης στην ενότητα αυτή εξετάζουμε την απόδοση του υπολογιστή DLX.**

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα **Όταν θα έχετε μελετήσει την ενότητα, θα είστε σε θέση:**

<u>να αναγνωρίζετε πότε προκύπτουν κίνδυνοι ελέγχου,</u>

<u>να χρησιμοποιείτε μεθόδους για την αντιμετώπιση των κινδύνων ελέγχου και τη μείωση των ποινών διακλάδωσης στη σωλήνωση,</u>

<u>να αναλύετε τις επιδόσεις των σχημάτων διακλάδωσης,</u>

<u>να αναφέρετε πώς επιτυγχάνεται η στατική πρόβλεψη διακλάδωσης.</u>

κίνδυνος ελέγχου, ποινή διακλάδωσης, διακλάδωση προώθησης, διακλάδωση οπισθοδρόμησης, σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης, ακυρωτική διακλάδωση

Πως προκύπτουν οι Κίνδυνοι Ελέγχου

Οι **κίνδυνοι ελέγχου** προκύπτουν σε έναν υπολογιστή με σωλήνωση όταν εκτελούνται εντολές διακλάδωσης με συνθήκη και γενικά από τη σωλήνωση των εντολών, οι οποίες μεταβάλλουν την τιμή του PC.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 1

Θυμάστε τον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η τιμή του PC όταν εκτελείται μια εντολή διακλάδωσης με συνθήκη;

- **Για περισσότερες λεπτομέρειες για τις εντολές διακλάδωσης με συνθήκη, θα ήταν καλό να ανατρέξετε στις σημειώσεις «Αρχιτεκτονική Υπολογιστών Ι» και συγκεκριμένα στο 2^{ο} κεφάλαιο «Αρχιτεκτονικές Συνόλου Εντολών».**
- **Για την εκτέλεση των εντολών διακλάδωσης με συνθήκη μπορείτε να ανατρέξετε στις σημειώσεις «Αρχιτεκτονική Υπολογιστών Ι» και συγκεκριμένα στο 3^{ο} κεφάλαιο «Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας».**
- **Να αναφέρετε τις τιμές που μπορεί να πάρει ο PC μετά την εκτέλεση μιας εντολής διακλάδωσης με συνθήκη και να προσδιορίσετε τις περιπτώσεις που ο PC λαμβάνει τις τιμές αυτές.**

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 1

Όταν εκτελείται μία εντολή διακλάδωσης με συνθήκη η τιμή του PC μπορεί να αλλάξει σε:

1)τρέχουσα τιμή συν 4 (PC + 4),
2)στη διεύθυνση στόχου διακλάδωσης.

Στην πρώτη περίπτωση ο PC παίρνει την τιμή αυτή όταν η συνθήκη διακλάδωσης δεν αληθεύει (διακλάδωση που δεν ακολουθείται). Επομένως προσδιορίζεται η διεύθυνση της επόμενης εντολής (PC + 4).
Στη δεύτερη περίπτωση η συνθήκη διακλάδωσης αληθεύει κι άρα εκτελείται η εντολή που βρίσκεται στη διεύθυνσης του στόχου διακλάδωσης (διακλάδωση που ακολουθείται).

Η πιο απλή λύση για να αντιμετωπίσουμε τις εντολές διακλάδωσης με συνθήκη είναι να καθυστερούμε τη σωλήνωση, αμέσως μόλις εντοπιστεί μια διακλάδωση, μέχρι να φτάσουμε στο στάδιο ΜΕΜ, στο οποίο θα καθοριστεί αν ολοκληρώνεται η εκτέλεση της εντολής διακλάδωσης. Προσέξτε όμως ότι είναι λάθος να καθυστερήσουμε τη σωλήνωση, αν δε γνωρίζουμε ότι η εντολή που ακολουθεί είναι σίγουρα διακλάδωση.

Επίσης ένα άλλο σημείο που αξίζει να τονίσουμε είναι το εξής:

- **Αν η εντολή διακλάδωσης με συνθήκη ακολουθείται, τότε το στάδιο IF της επόμενης εντολής πρέπει να επαναληφθεί μετά από την καθυστέρηση. Έτσι ο πρώτος κύκλος IF είναι ουσιαστικά μία καθυστέρηση, αφού ποτέ δεν εκτελεί μία χρήσιμη εργασία.**
- **Αν εντολή διακλάδωσης με συνθήκη δεν ακολουθείται, τότε η επανάληψη του σταδίου IF δεν είναι απαραίτητη γιατί έχει γίνει ανάκληση της σωστής εντολής.**

Στο σχήμα 1.6.1 που ακολουθεί, παρουσιάζουμε τη συμπεριφορά της σωλήνωσης όταν υπάρχει διακλάδωση με συνθήκη, η οποία ακολουθείται. Παρατηρήστε ότι η καθυστέρηση συμβαίνει μόνο μετά το στάδιο ID.

Εντολή Διακλάδωσης	IF	ID	EX	MEM	WB				
Branch successor		IF	**stall**	**stall**	IF	ID	EX	MEM	WB
Branch successor + 1						IF	ID	EX	MEM	WB
Branch successor + 2							IF	ID	EX	MEM
Branch successor + 3								IF	ID	EX
Branch successor + 4									IF	ID
Branch successor + 5										IF

Σχήμα 1.6.1 – Η συμπεριφορά της σωλήνωσης όταν υπάρχει εντολή διακλάδωσης με συνθήκη, η οποία ακολουθείται. Μία εντολή διακλάδωσης με συνθήκη προκαλεί καθυστέρηση τριών κύκλων στη σωλήνωση του υπολογιστή DLX: Ο ένας κύκλος είναι ένας επαναλαμβανόμενος κύκλος IF και οι άλλοι δύο κύκλοι είναι ανενεργοί. Η ανάκληση της εντολής που ακολουθεί τη διακλάδωση με συνθήκη γίνεται, αλλά αγνοείται, και η ανάκληση ξαναρχίζει μόλις ο στόχος της διακλάδωσης γίνεται γνωστός. Είναι προφανές ότι, αν δεν αληθεύει η συνθήκη της διακλάδωσης ο δεύτερος κύκλος IF για το διάδοχο I+1 της διακλάδωσης είναι περιττός.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 2

Να συγκρίνετε την απώλεια στην απόδοση για τη σωλήνωση του υπολογιστή DLX, όταν προκαλούνται κίνδυνοι ελέγχου και όταν προκαλούνται κίνδυνοι δεδομένων. Να αιτιολογήσετε την απάντησή σας. (Για την εύρεση της απόδοσης στις δύο αυτές περιπτώσεις δεν είναι απαραίτητο να υπολογίστε ή χρησιμοποιήσετε τους τύπους.)

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 2

Οι κίνδυνοι ελέγχου μπορούν να προκαλέσουν μεγαλύτερη απώλεια απόδοσης για τη σωλήνωση του υπολογιστή DLX από ότι οι κίνδυνοι δεδομένων. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κίνδυνοι ελέγχου προκαλούν καθυστέρηση κατά τρεις κύκλους ρολογιού. Σε αντίθεση, οι κίνδυνοι δεδομένων προκαλούν συνήθως μικρότερη καθυστέρηση, ίση με έναν κύκλο ρολογιού.

Πώς μπορούμε να μειώσουμε τις επιπτώσεις της διακλάδωσης με συνθήκη

Όπως τονίσαμε παραπάνω, εξαιτίας της διακλάδωσης έχουμε καθυστέρηση κατά τρεις κύκλους ρολογιού. Αυτό όμως είναι αρκετά μεγάλη απώλεια. Θεωρήστε συχνότητα διακλάδωσης 30% και ιδανικό CPI ίσο με 1. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση η μηχανή με καθυστερήσεις διακλαδώσεων, επιτυγχάνει μόνο τη μισή ιδανική αύξηση ταχύτητας από τη σωλήνωση. Η καθυστέρηση αυτή ονομάζεται **ποινή διακλάδωσης.**

Συνειδητοποιούμε, δηλαδή, ότι είναι εξαιρετικά σημαντικό να μειώσουμε την ποινή διακλάδωσης. Ο αριθμός των κύκλων ρολογιού σε μια καθυστέρηση διακλάδωσης μπορεί να μειωθεί με δύο βήματα. Πρέπει **και τα δύο** αυτά βήματα να γίνουν όσο πιο νωρίς γίνεται μέσα στη σωλήνωση:

1. Ανακάλυψε νωρίτερα στη σωλήνωση, αν η διακλάδωση έχει ακολουθηθεί ή όχι, δηλαδή αν η συνθήκη διακλάδωσης επαληθεύεται ή όχι.

2. Υπολόγισε τη διεύθυνση στόχου διακλάδωσης πιο νωρίς.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 3

Θυμάστε τον τρόπο με τον οποίο εκτελούνται οι εντολές BEQZ και BNEZ στη σωλήνωση; Για περισσότερες λεπτομέρειες για την εκτέλεση των εντολών διακλάδωσης με συνθήκη BEQZ και BNEZ, καλό θα ήταν να ανατρέξετε στην 1η ενότητα του κεφαλαίου: «Η Σωλήνωση Υπολογιστών».

Στον υπολογιστή DLX, οι διακλαδώσεις (BEQZ και BNEZ) απαιτούν έλεγχο ενός καταχωρητή για το αν είναι ίσος με το μηδέν ή αν δεν είναι αντίστοιχα. Έτσι, είναι δυνατό να ολοκληρώσουμε αυτή την απόφαση μέχρι το τέλος του σταδίου ID, μεταφέροντας τον έλεγχο της ισότητας με το μηδέν σε αυτό το στάδιο.
Για να καταφέρουμε να υπολογίσουμε τη διεύθυνση στόχου της διακλάδωσης κατά τη διάρκεια του σταδίου ID, είναι αναγκαίο να έχουμε έναν ξεχωριστό αθροιστή, αφού η κύρια ALU, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για αυτό τον σκοπό μέχρι στιγμής, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί νωρίτερα από το στάδιο EX.

Στάδια	Εντολή διακλάδωσης
IF	IF/ID.IR ← Mem[PC]; IF/ID.NPC,PC ← (if ID/EX.cond {ID/EX.NPC} else {PC+4});
ID	ID/EX.A ← Regs[IF/ID.IR$_{6..10}$]; ID/EX.B ← Regs[IF/ID.IR$_{11..15}$]; ID/EX.NPC ← IF/ID.NPC + (IR$_{16}$)^{16}##IR$_{16..31}$; ID/EX.IR ← IF/ID.IR ID/EX.cond ← (Regs[IF/ID.IR$_{6..10}$] op 0); ID/EX.Imm ← (IR$_{16}$)^{16}##IR$_{16..31}$
EX	
MEM	
WB	

Σχήμα 1.6.2 - Αναθεωρημένη δομή της σωλήνωσης. Χρησιμοποιεί ένα ξεχωριστό κύκλωμα πρόσθεσης για να υπολογίσει τη διεύθυνση στόχου διακλάδωσης κατά τη διάρκεια του σταδίου ID. Οι λειτουργίες οι οποίες είναι καινούργιες ή έχουν αλλάξει είναι με έντονα γράμματα. Επειδή η πρόσθεση της διεύθυνσης στόχου διακλάδωσης πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια του σταδίου ID, αυτό θα γίνεται για όλες τις εντολές. Η συνθήκη διακλάδωσης (Regs[IF/ID.IR6..10] op 0) θα γίνεται επίσης για όλες τις εντολές. Η επιλογή της τιμής του PC εξακολουθεί να πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια του σταδίου IF, αλλά τώρα χρησιμοποιεί τιμές από τον καταχωρητή σωλήνωσης ID/EX, κι όχι από τον EX/MEM. Από τη στιγμή που η τιμή του πεδίου cond τίθεται στο 0, εκτός κι αν η εντολή στο στάδιο ID είναι μία εντολή διακλάδωσης με συνθήκη που ακολουθείται, ο υπολογιστής πρέπει να αποκωδικοποιήσει την εντολή πριν το τέλος του σταδίου ID. Επειδή η διακλάδωση έχει τελειώσει μέχρι το τέλος του σταδίου ID, τα στάδια EX, MEM, WB δε χρησιμοποιούνται στις διακλαδώσεις. Μία επιπρόσθετη δυσκολία προκύπτει από τις εντολές μεταπήδησης, οι οποίες έχουν μεγαλύτερη μετατόπιση από τις διακλαδώσεις με συνθήκη. Μπορούμε να αντιμετωπίσουμε αυτή τη δυσκολία, χρησιμοποιώντας ένα επιπλέον κύκλωμα πρόσθεσης, το οποίο αθροίζει την τιμή του PC και τα χαμηλότερα 26 bits του καταχωρητή IR.

Υπάρχουν υπολογιστές οι οποίοι έχουν ξεχωριστά στάδια για την αποκωδικοποίηση και την ανάκληση καταχωρητών. Στην περίπτωση αυτή, είναι πιθανό να υπάρχει μία καθυστέρηση διακλάδωσης, ίση τουλάχιστον με ένα κύκλο ρολογιού. Αν η καθυστέρηση διακλάδωσης δεν ξεπεραστεί, τότε γίνεται ποινή διακλάδωσης. Μάλιστα όσο πιο βαθιά είναι η σωλήνωση, τόσο χειρότερη είναι η ποινή διακλάδωσης σε κύκλους ρολογιού.

Οι συνέπειες στην απόδοση, που έχει μία μεγαλύτερης διάρκειας ποινή διακλάδωσης, εξαρτάται από το ολικό CPI του υπολογιστή. Ένας υπολογιστής με υψηλό CPI αντέχει να έχει πιο ακριβές διακλαδώσεις γιατί το ποσοστό της απόδοσης του υπολογιστή που θα χαθεί από τις διακλαδώσεις είναι λιγότερο.

Συμπεριφορά διακλάδωσης σε προγράμματα

Οι διακλαδώσεις με συνθήκη χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη διεύθυνση του στόχου διακλάδωσης:

- Σε διακλαδώσεις όπου ο στόχος διακλάδωσης βρίσκεται σε μεγαλύτερη διεύθυνση από τη διεύθυνση της εντολής διακλάδωσης **(διακλαδώσεις προώθησης)**

- Σε διακλαδώσεις όπου ο στόχος διακλάδωσης βρίσκεται σε μικρότερη διεύθυνση από τη διεύθυνση της εντολής διακλάδωσης **(διακλαδώσεις οπισθοδρόμησης).**

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 4

Μπορείτε να εκτιμήσετε ποια από τις δύο κατηγορίες διακλάδωσης με συνθήκη (διακλαδώσεις προώθησης, διακλαδώσεις οπισθοδρόμησης), έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα ακολούθησης σε ένα πρόγραμμα; Να αιτιολογήσετε την απάντησή σας.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 4

Η πιθανότητα ακολούθησης μίας διακλάδωσης οπισθοδρόμησης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή μίας διακλάδωσης προώθησης. Αυτό συμβαίνει επειδή στα προγράμματα οι διακλαδώσεις οπισθοδρόμησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία βρόχων επανάληψης, όπου ο στόχος διακλάδωσης βρίσκεται σε μικρότερη διεύθυνση από αυτή της εντολής διακλάδωσης με συνθήκη.

Πραγματικά, στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι:

1)το 60% των διακλαδώσεων προώθησης ακολουθούνται κατά μέσο όρο

και

2)το 85% των διακλαδώσεων οπισθοδρόμησης ακολουθούνται κατά μέσο όρο.

Επομένως η πιθανότητα ακολούθησης μίας διακλάδωσης οπισθοδρόμησης είναι μεγαλύτερη από αυτή μίας διακλάδωσης προώθησης.

Μειώνοντας τις ποινές διακλάδωσης σωλήνωσης

Για την αντιμετώπιση των καθυστερήσεων διακλάδωσης στη σωλήνωση έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι. Στη συνέχεια αναφέρουμε τέσσερα σχήματα χρόνου μεταγλώττισης για το σκοπό αυτό.

1. Ο πιο απλός τρόπος είναι να καθυστερήσουμε τη σωλήνωση έως ότου γίνει γνωστό αν αληθεύει η συνθήκη διακλάδωσης και βρεθεί η διεύθυνση στόχου διακλάδωσης. Το σχήμα αυτό είναι αρκετά απλό σε ό,τι αφορά το υλικό και το λογισμικό και απεικονίζεται στο σχήμα 1.6.1.
2. Ένα άλλο σχήμα είναι να προβλέψουμε ότι η διακλάδωση με συνθήκη δεν πρόκειται να ακολουθηθεί, επιτρέποντας απλά στο υλικό να συνεχίσει σα να μην εκτελέστηκε η διακλάδωση. Στη σωλήνωση του DLX υπολογιστή, η μέθοδος αυτή ονομάζεται **πρόβλεψη μη ακολούθησης**. Υλοποιείται με την ανάκληση εντολών, σαν να ήταν η διακλάδωση μια απλή εντολή. Το σχήμα αυτό είναι λίγο πιο πολύπλοκο, αλλά καλύτερο σε επιδόσεις από το προηγούμενο.

Προσέξτε όμως ότι στην τεχνική αυτή, η κατάσταση του υπολογιστή δεν πρέπει να αλλάξει μέχρι να γίνει οριστικά γνωστό το αποτέλεσμα της διακλάδωσης.

Αν ωστόσο η διακλάδωση ακολουθηθεί, πρέπει να θέσουμε την κληθείσα εντολή σε no-op και να ξαναρχίσουμε την ανάκληση από τη διεύθυνση του στόχου διακλάδωσης. Στο Σχήμα 1.6.3 παρουσιάζουμε και τις δύο αυτές καταστάσεις.

Εντολή διακλάδωσης που δεν ακολουθείται	IF	ID	EX	MEM	WB				
Εντολή i + 1		IF	ID	EX	MEM	WB			
Εντολή i + 2			IF	ID	EX	MEM	WB		
Εντολή i + 3				IF	ID	EX	MEM	WB	
Εντολή i + 4					IF	ID	EX	MEM	WB

Εντολή διακλάδωσης που ακολουθείται	IF	ID	EX	MEM	WB				
Εντολή i + 1		IF	stall	stall	stall	stall			
Στόχος διακλάδωσης			IF	ID	EX	MEM	WB		
Στόχος διακλάδωσης + 1				IF	ID	EX	MEM	WB	
Στόχος διακλάδωσης + 2					IF	ID	EX	MEM	WB

Σχήμα 1.6.3 - Το σχήμα πρόβλεψης μη ακολούθησης και η ακολουθία σωλήνωσης όταν η διακλάδωση δεν ακολουθείται (στο πάνω σχήμα) και όταν ακολουθείται (στο κάτω σχήμα). Όταν η διακλάδωση δεν ακολουθείται, γεγονός που καθορίζεται κατά τη διάρκεια του σταδίου ID, έχουμε καλέσει τη σωστή εντολή και απλώς συνεχίζουμε. Αν η διακλάδωση ακολουθείται τότε ξαναρχίζουμε την ανάκληση από το στόχο διακλάδωσης. Αυτό προκαλεί όλες τις εντολές, που ακολουθούν τη διακλάδωση, να καθυστερούν ένα κύκλο.

3. Το επόμενο σχήμα είναι η πρόβλεψη ότι η διακλάδωση ακολουθείται. Στη συνέχεια, κι ενώ η διακλάδωση έχει αποκωδικοποιηθεί και υπολογιστεί η

διεύθυνση του στόχου, υποθέτουμε ότι η διακλάδωση ακολουθείται και αρχίζουμε να καλούμε και να εκτελούμε το στόχο. Η μέθοδος αυτή συνιστάται για υπολογιστές στους οποίους ο στόχος διακλάδωσης γίνεται γνωστός πριν από το αποτέλεσμα της διακλάδωσης.

4. Υπάρχουν υπολογιστές που έχουν χρησιμοποιήσει την τεχνική της καθυστέρησης διακλάδωσης. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές μικροπρογραμματιζόμενες μονάδες ελέγχου. Σε μια καθυστέρηση διακλάδωσης, ο κύκλος εκτέλεσης με μια καθυστέρηση διακλάδωσης μήκους n είναι:

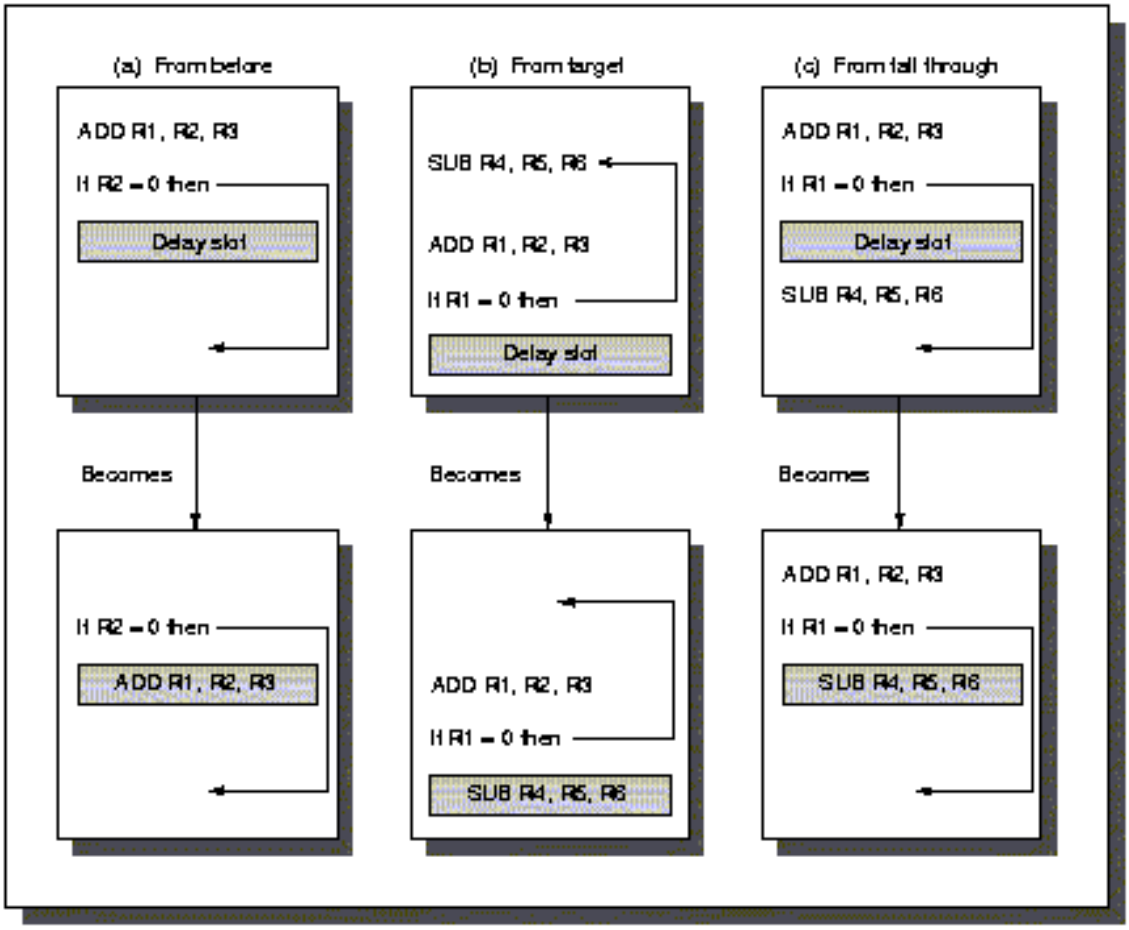
εντολή διακλάδωσης
διαδοχική επόμενη εντολή 1
διαδοχική επόμενη εντολή 2
. . .
διαδοχική επόμενη εντολή n
στόχος διακλάδωσης αν η διακλάδωση ακολουθείται

Οι διαδοχικές επόμενες εντολές βρίσκονται στη **σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης**. Οι εντολές αυτές εκτελούνται είτε η διακλάδωση ακολουθείται είτε όχι. Στο σχήμα 1.6.4 φαίνεται η συμπεριφορά της σωλήνωσης στον DLX υπολογιστή για την περίπτωση αυτή, ενώ το σχήμα 1.6.5 δείχνει τους τρεις τρόπους με τους οποίους μια καθυστέρηση διακλάδωσης μπορεί να προγραμματιστεί.

Εντολή διακλάδωσης που δεν ακολουθείται	IF	ID	EX	MEM	WB				
Εντολή σχισμής διακλάδωσης (i + 1)		IF	ID	EX	MEM	WB			
Εντολή i + 2			IF	ID	EX	MEM	WB		
Εντολή i + 3				IF	ID	EX	MEM	WB	
Εντολή i + 4					IF	ID	EX	MEM	WB

Εντολή διακλάδωσης που ακολουθείται	IF	ID	EX	MEM	WB				
Εντολή σχισμής Διακλάδωσης (i + 1)		IF	ID	EX	MEM	WB			
Στόχος διακλάδωσης			IF	ID	EX	MEM	WB		
Στόχος διακλάδωσης + 1				IF	ID	EX	MEM	WB	
Στόχος διακλάδωσης + 2					IF	ID	EX	MEM	WB

Σχήμα 1.6.4 - Η συμπεριφορά μιας καθυστερημένης διακλάδωσης είναι ίδια είτε η διακλάδωση ακολουθείται είτε όχι. Οι εντολές στη σχισμή καθυστέρησης εκτελούνται. Αν η διακλάδωση δεν ακολουθείται, η εκτέλεση συνεχίζεται με την εντολή που ακολουθεί την εντολή καθυστέρησης διακλάδωσης . Αν η διακλάδωση ακολουθείται, η εκτέλεση συνεχίζεται στο στόχο της διακλάδωσης. Συνήθως απαγορεύεται να τοποθετηθεί στη σχισμή άλλη εντολή διακλάδωσης γιατί προκύπτει σύγχυση.



Σχήμα 1.6.5 - Προγραμματισμός της σχισμής καθυστέρησης διακλάδωσης. Το πάνω σχήμα σε κάθε ζευγάρι δείχνει τον κώδικα πριν τον προγραμματισμό και το κάτω σχήμα δείχνει τον προγραμματισμένο κώδικα. Στο (a) η σχισμή καθυστέρησης προγραμματίζεται με μια ανεξάρτητη εντολή πριν τη διακλάδωση. Αυτή είναι η καλύτερη επιλογή. Οι στρατηγικές (b) και (c) χρησιμοποιούνται όταν η (a) είναι αδύνατη. Στις ακολουθίες κώδικα για τις (b) και (c) η χρήση του καταχωρητή R1 στη συνθήκη διακλάδωσης εμποδίζει την εντολή ADD(της οποίας προορισμός είναι ο R1) να μετακινηθεί μετά τη διακλάδωση. Στο (b) η σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης προγραμματίζεται από το στόχο διακλάδωσης. Συνήθως η εντολή στόχου θα χρειαστεί να αντιγραφεί γιατί μπορεί να προσεγγιστεί από ένα άλλο μονοπάτι. Η στρατηγική (b) προτιμάται όταν η διακλάδωση έχει υψηλή πιθανότητα να ακολουθηθεί, όπως μια διακλάδωση βρόχου. Τέλος, η διακλάδωση μπορεί να προγραμματιστεί από το τμήμα κώδικα που βρίσκεται ανάμεσα (fall through) στην εντολή διακλάδωσης και στο στόχο διακλάδωσης.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 5

- **Να αναφέρετε τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση των καθυστερήσεων διακλάδωσης και τη μείωση των ποινών διακλάδωσης.**
- **Μπορείτε να σχεδιάσετε τα τέσσερα σχήματα χρόνου μεταγλώττισης;**

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 6

Για κάθε ένα από τα σχήματα προγραμματισμού διακλάδωσης υπάρχουν και διαφορετικοί περιορισμοί, οι οποίοι μας επιτρέπουν να επιλέγουμε κάθε φορά την μέθοδο που θα ακολουθήσουμε. Μπορείτε να εκτιμήσετε από πού προκύπτουν αυτοί οι περιορισμοί;

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 6

Οι περιορισμοί σύμφωνα με τους οποίους επιλέγουμε τη μέθοδο που θα ακολουθήσουμε είναι:

- **Η ικανότητά μας να προβλέψουμε σε χρόνο μεταγλώττισης αν μια διακλάδωση είναι πιθανόν να ακολουθηθεί ή όχι.**
- **Οι περιορισμοί στις εντολές που είναι προγραμματισμένες σε σχισμές καθυστέρησης. Για παράδειγμα στις σχισμές διακλάδωσης δεν πρέπει να υπάρχει άλλη εντολή διακλάδωσης με συνθήκη, γιατί τότε θα προκληθεί σύγχυση.**

Παρουσιάζουμε τους περιορισμούς αυτούς συνοπτικά μαζί με τις καταστάσεις στις οποίες επικρατούν στο σχήμα 1.6.6 που ακολουθεί.

Στρατηγική Προγραμματισμού	**Απαιτήσεις**	**Πότε βελτιώνεται η απόδοση**
(α) Από πριν τη διακλάδωση	Η διακλάδωση δεν πρέπει να εξαρτάται από τις εντολές που επαναπρογραμματίζονται.	Πάντα
(β) Από το στόχο	Πρέπει να είναι σωστή η εκτέλεση των επαναπρογραμματιζόμενων εντολών, αν η διακλάδωση δεν πρόκειται να ακολουθηθεί. Μπορεί να χρειαστεί να διπλασιάσουμε τις εντολές.	Όταν η διακλάδωση ακολουθείται. Μπορεί να μεγαλώσει το πρόγραμμα αν οι εντολές διπλασιαστούν.
(γ) Από ενδιάμεσα	Πρέπει να είναι σωστή η εκτέλεση των εντολών, αν η διακλάδωση ακολουθείται.	Όταν η διακλάδωση δεν ακολουθείται.

Σχήμα 1.6.6 - Σχήματα προγραμματισμού καθυστερημένων διακλαδώσεων και οι απαιτήσεις τους. Η προέλευση της εντολής, που προγραμματίζεται στη σχισμή καθυστέρησης, καθορίζει τη στρατηγική προγραμματισμού. Ο μεταγλωττιστής εξετάζει τις εντολές που θα προγραμματίσουν τη σχισμή καθυστέρησης. Όταν η σχισμή δεν μπορεί να προγραμματιστεί, γεμίζει με εντολές no-op. Στη στρατηγική (β), αν ο στόχος διακλάδωσης

είναι επίσης προσβάσιμος από ένα άλλο σημείο του προγράμματος – όπως αν ήταν η πρώτη εντολή του βρόχου – η εντολή στόχου πρέπει να αντιγραφεί κι όχι απλά να μετακινηθεί.

Για να βελτιωθεί η ικανότητα του μεταγλωττιστή να γεμίζει τη σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης, οι πιο πολλοί υπολογιστές με διακλαδώσεις με συνθήκη έχουν εισάγει μια ακυρωτική διακλάδωση.

Σε μία **ακυρωτική διακλάδωση**, η εντολή περιλαμβάνει την κατεύθυνση, η οποία είχε προβλεφθεί πως θα ακολουθήσει η διακλάδωση. Όταν η εντολή διακλάδωσης με συνθήκη συμπεριφέρεται όπως είχε προβλεφθεί, η εντολή στη σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης απλά εκτελείται, όπως θα είχε κάνει σε μια καθυστέρηση διακλάδωσης. Όταν η διακλάδωση προβλέπεται λανθασμένα, η εντολή στη σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης τίθεται σε μια εντολή no-op. Στο σχήμα 1.6.7 φαίνεται η συμπεριφορά και για τις δύο περιπτώσεις.

Εντολή διακλάδωσης που δεν ακολουθείται	IF	ID	EX	MEM	WB				
Εντολή σχισμής διακλάδωσης (i + 1)		IF	ID	idle	idle	idle			
Εντολή i + 2			IF	ID	EX	MEM	WB		
Εντολή i + 3				IF	ID	EX	MEM	WB	
Εντολή i + 4					IF	ID	EX	MEM	WB

Εντολή διακλάδωσης που ακολουθείται	IF	ID	EX	MEM	WB				
Εντολή σχισμής διακλάδωσης (i + 1)		IF	ID	EX	MEM	WB			
Στόχος διακλάδωσης			IF	ID	EX	MEM	WB		
Εντολή διακλάδωσης + 1				IF	ID	EX	MEM	WB	
Εντολή διακλάδωσης + 2					IF	ID	EX	MEM	WB

Σχήμα 1.6.7 - Η συμπεριφορά μιας ακυρωτικής διακλάδωσης με πρόβλεψη ακολούθησης εξαρτάται από το αν η διακλάδωση με συνθήκη ακολουθείται ή όχι. Η εντολή στη σχισμή καθυστέρησης εκτελείται μόνο αν η διακλάδωση ακολουθείται, διαφορετικά μετατρέπεται σε no-op.

Οι ακυρωτικές διακλαδώσεις έχουν το πλεονέκτημα ότι εξαλείφουν τις απαιτήσεις για την εντολή που τοποθετείται στη σχισμή καθυστέρησης, ενεργοποιώντας το μεταγλωττιστή ως προς τη χρήση των προγραμματιστικών μεθόδων (b) και (c) του σχήματος 1.6.5, παραβιάζοντας όμως τις απαιτήσεις που φαίνονται στο σχήμα 1.6.6 για τις αντίστοιχες μεθόδους.

Οι πιο πολλοί υπολογιστές με ακυρωτικές διακλαδώσεις διαθέτουν μία ακυρωτική και μία μη ακυρωτική φόρμα. Όμως, παρόλο που ο σχεδιασμός αυτός έχει πολλά πλεονεκτήματα, δεν επιτρέπει τη χρήση της προγραμματιστικής μεθόδου (c), εκτός και αν πληρούνται οι προϋποθέσεις του σχήματος 1.6.6.

Εξαιτίας των καθυστερήσεων διακλάδωσης, έχουμε ένα επιπλέον κόστος σε υλικό. Για μια καθυστερημένη διακλάδωση ενός κύκλου, η μόνη περίπτωση που υπάρχει στην πράξη, χρειάζεται ένας επιπλέον PC.

Αν η διακλάδωση έχει ακολουθηθεί, τότε η εντολή στη σχισμή καθυστέρησης και ο στόχος της διακλάδωσης έχουν διευθύνσεις που δε βρίσκονται στη σειρά. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται να σώσουμε τις τιμές του PC και των δύο εντολών και να τους επαναφέρουμε μετά τη διακοπή, για να ξαναρχίσει η σωλήνωση.

Οι τιμές του PC και των δύο εντολών μπορούν να κρατηθούν στους καταχωρητές σωλήνωσης και να περάσουν μαζί με την εντολή. Με τον τρόπο αυτό, το σώσιμο και η επαναφορά τους γίνονται ευκολότερα. Για αυτό χρειάζεται και ο επιπλέον PC που αναφέραμε προηγουμένως.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 7

- **Να εξηγήσετε σε 10 περίπου γραμμές τι είναι η ακυρωτική διακλάδωση και το λόγο για τον οποίο πολλοί υπολογιστές χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική.**
- **Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση της ακυρωτική διακλάδωσης;**

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 7

- **Η ακυρωτική διακλάδωση είναι μια τεχνική που έχουν εισάγει οι πιο πολλοί υπολογιστές με διακλαδώσεις με συνθήκη, για να βελτιωθεί η ικανότητα του μεταγλωττιστή να γεμίζει τη σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης. Σε μία ακυρωτική διακλάδωση, η εντολή περιλαμβάνει την κατεύθυνση, η οποία είχε προβλεφθεί πως θα ακολουθήσει η διακλάδωση. Όταν η εντολή διακλάδωσης με συνθήκη συμπεριφέρεται όπως είχε προβλεφθεί, η εντολή στη σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης απλά εκτελείται, όπως θα είχε κάνει σε μια καθυστέρηση διακλάδωσης. Όταν η διακλάδωση προβλέπεται λανθασμένα, η εντολή στη σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης τίθεται σε μια εντολή no-op.**
- **Οι ακυρωτικές διακλαδώσεις έχουν το πλεονέκτημα ότι εξαλείφουν τις απαιτήσεις για την εντολή που τοποθετείται στη σχισμή καθυστέρησης, ενεργοποιώντας το μεταγλωττιστή ως προς τη χρήση των προγραμματιστικών μεθόδων «από το στόχο» και «από ενδιάμεσα», παραβιάζοντας όμως τις απαιτήσεις των αντίστοιχων μεθόδων. Οι πιο πολλοί υπολογιστές με ακυρωτικές διακλαδώσεις διαθέτουν μια ακυρωτική και μια μη ακυρωτική φόρμα. Όμως, παρόλο που ο σχεδιασμός αυτός έχει πολλά πλεονεκτήματα, δεν επιτρέπει τη χρήση της προγραμματιστικής μεθόδου «από ενδιάμεσα», εκτός και αν πληρούνται οι προϋποθέσεις του σχήματος 1.6.6.**

Επιδόσεις Σχημάτων Διακλάδωσης

Θεωρούμε ότι το ιδανικό CPI είναι 1. Τότε η αύξηση ταχύτητας σωλήνωσης είναι:

$$\text{Αύξηση ταχύτητας σωλήνωσης} = \frac{\text{Βάθος σωλήνωσης}}{(1 + \text{κύκλοι καθυστερήσεων σωλήνωσης από διακλαδώσεις})}$$

(Τύπος 1)

Όμως ισχύει ότι:
κύκλοι καθυστερήσεων σωλήνωσης από διακλαδώσεις =
=(συχνότητα διακλάδωσης) * (ποινή διακλάδωσης)

Έτσι έχουμε:

$$\text{Αύξηση ταχύτητας σωλήνωσης} = \frac{\text{Βάθος σωλήνωσης}}{(1 + \text{συχνότητα διακλάδωσης} * \text{ποινή διακλάδωσης})}$$

(Τύπος 2)

Το σχήμα 1.6.8 δείχνει διάφορες επιλογές υλικού για το χειρισμό διακλαδώσεων στην σωλήνωση του υπολογιστή DLX.

Σχήμα Προγραμμα-τισμού	**Ποινή διακλάδωσης ανά διακλάδωση που ακολουθείται**		**Ποινή διακλάδωσης ανά διακλάδωση που δεν ακολουθείται**	**Μέση ποινή διακλάδωσης ανά διακλάδωση**		**Αποτελεσματικότητα CPI ανά καθυστέρηση διακλάδωσης**	
	Integer	**FP**		**Integer**	**FP**	**Integer**	**FP**
Σωλήνωση με καθυστέρηση	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.17	1.15
Πρόβλεψη ακολούθησης	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.17	1.15
Πρόβλεψη μη ακολούθησης	0.62	0.70	1.00	0.69	0.74	1.12	1.11
Διακλάδωση καθυστέρησης	0.25	0.35	0.00	0.21	0.30	1.04	1.04

Σχήμα 1.6.8 - Ολικό κόστος μιας ποικιλίας σχημάτων διακλαδώσεων στη σωλήνωση του υπολογιστή DLX. Αυτά τα δεδομένα είναι για τη σωλήνωση του υπολογιστή DLX. Στον πίνακα φαίνονται οι ποινές ανά διακλάδωση και τα επακόλουθα CPI συμπεριλαμβάνοντας μόνο την επίδραση των καθυστερήσεων λόγω διακλάδωσης και θεωρώντας το CPI ίσο με 1.

Στατική Πρόβλεψη Διακλάδωσης. Χρήση Τεχνολογίας Μεταγλωττιστή

Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής καθυστέρησης διακλάδωσης εξαρτάται κατά ένα μέρος από το αν έχουμε προβλέψει σωστά ποιο δρόμο θα ακολουθήσει η σωλήνωση. Η δυνατότητα πρόβλεψης μιας διακλάδωσης σε χρόνο μεταγλωττιστή βοηθάει στον προγραμματισμό κινδύνων δεδομένων. Έστω ότι έχουμε τον παρακάτω κώδικα:

```
        LW      R1, 0 (R2)
        SUB     R1, R1, R3
        BEQZ    R1, L
        OR      R4, R5, R6
        …
L:      ADD     R7, R8, R9
```

Η εξάρτηση των εντολών SUB και BEQZ από την εντολή LW σημαίνει ότι θα χρειαστεί μια καθυστέρηση μετά από την LW.

Εστω ότι γνωρίζουμε ότι αυτή η διακλάδωση ακολουθείται σχεδόν πάντα και ότι η τιμή του R7 δε χρειαζόταν στην εντολή η οποία βρίσκεται μεταξύ της εντολής διακλάδωσης με συνθήκη και του στόχου διακλάδωσης.
Τότε θα μπορούσαμε να αυξήσουμε την ταχύτητα του προγράμματος μετακινώντας την εντολή: ADD R7, R8, R9 στη θέση μετά την εντολή LW.

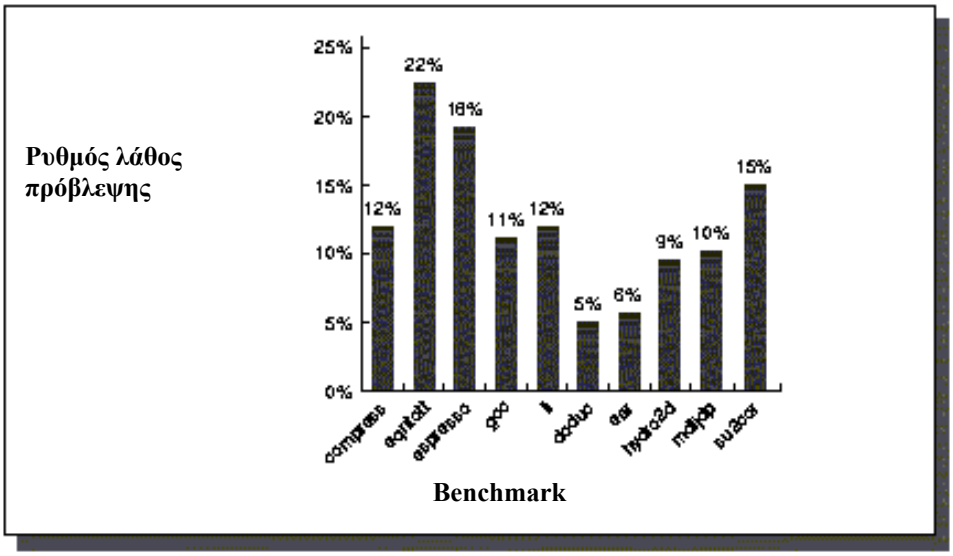
- Αν υποθέσουμε ότι γνωρίζουμε πως η διακλάδωση ακολουθείται σπάνια και ότι η τιμή του R4 δε χρειαζόταν στο μονοπάτι που ακολουθείται, τότε θα μπορούσαμε να μετακινήσουμε την εντολή OR στη θέση μετά την εντολή LW.

- Επιπρόσθετα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις παραπάνω πληροφορίες για να προγραμματίσουμε καλύτερα την καθυστέρηση διακλάδωσης, αφού ο τρόπος προγραμματισμού της καθυστέρησης εξαρτάται από τη γνώση της συμπεριφοράς της διακλάδωσης.

Για να καταφέρουμε να εφαρμόσουμε αυτές τις βελτιώσεις, χρειάζεται να προβλέψουμε στατικά τη διακλάδωση κατά το χρόνο μεταγλώττισης του προγράμματος. Υπάρχουν δυο βασικές μέθοδοι που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να προβλέψουμε στατικά τις διακλαδώσεις.

- Να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του προγράμματος και να χρησιμοποιήσουμε τις πληροφορίες που έχουμε συλλέξει από τις προηγούμενες φορές που έχουμε τρέξει το πρόγραμμα.

- Να προβλέψουμε με βάση την κατεύθυνση διακλάδωσης, διαλέγοντας ως επιλεγμένες τις διακλαδώσεις προώθησης και ως μη επιλεγμένες τις διακλαδώσεις οπισθοδρόμησης.



Σχήμα 1.6.9 - Το ποσοστό λανθασμένης πρόβλεψης για τη μέθοδο της πρόβλεψης με βάση πληροφορίες από προηγούμενα τρεξίματα ποικίλει, αλλά γενικά είναι καλύτερο για προγράμματα FP που έχουν μέσο ποσοστό λανθασμένης πρόβλεψης 9% με μία παρέκκλιση του 4% σε σχέση με τα προγράμματα ακεραίων για τα οποία το μέσο ποσοστό είναι 15% με παρέκκλιση της τάξης του 5%. Οι πραγματικές επιδόσεις εξαρτώνται και από την ακρίβεια της πρόβλεψης και από τη συχνότητα της διακλάδωσης, που ποικίλει από 3% έως 24%.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 8

Έστω ο παρακάτω κώδικας:

```
SUB     R10, R4, R8
BEQZ    R1, name
AND     R12, R2, R5
OR      R13, R2, R6
ADD     R14, R4, R2
SLT     R15, R6, R7
……................................
name: LW    R4, 50(R7)
```

- **Μπορείτε να εξηγήσετε τι θα συμβεί στη σωλήνωση αν η διακλάδωση ακολουθείται και τι αν δεν ακολουθείται;**
- **Να σχεδιάσετε τα σχήματα και στις δύο περιπτώσεις, χρησιμοποιώντας το σχήμα πρόβλεψης μη ακολούθησης.**

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 8

Αν η διακλάδωση στη διεύθυνση name δεν ακολουθηθεί, όπως έχει προβλεφθεί, τότε οι εντολές προχωρούν κανονικά στη σωλήνωση σαν η εντολή διακλάδωσης να ήταν μία απλή εντολή.

SUB	**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**					
BEQZ		**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**				
AND			**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**			
OR				**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**		
ADD					**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**	
SLT						**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**
……										
LW										

Αν η διακλάδωση στη διεύθυνση name ακολουθηθεί τότε συμβαίνουν τα εξής:
Η εντολή BEQZ στο στάδιο ID, στον 3^{ο} κύκλο ρολογιού, καθορίζει ότι η διακλάδωση πρέπει να ακολουθηθεί κι έτσι σαν νέα τιμή του PC επιλέγεται η διεύθυνση name και ξεκινάει η ανάκληση της εντολής LW στον 4^{ο} κύκλο ρολογιού. Η εντολή AND ακυρώνεται.

SUB	**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**				
BEQZ		**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**			
AND			**IF**	**Α Κ Υ Ρ Ω Σ Η**					
LW				**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**	

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 9

Έστω ο ακόλουθος κώδικας:

```
        SUB   R1, R2, R3
        BNEZ  R3, N
        OR    R4, R5, R2
        ……................
N:      AND   R5, R3, R2
```

- **Αν εκτελεστεί ο παραπάνω κώδικας υπάρχει περίπτωση να εμφανιστεί κάποιος κίνδυνος;**
- **Τι είδος κίνδυνος είναι αυτός και σε ποιο σημείο του κώδικα εμφανίζεται;**
- **Να προτείνετε τρόπο αντιμετώπισης του κίνδυνου που πιθανόν προκύπτει.**

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 9

Κατά την εκτέλεση του προηράμματος προκύπτει κίνδυνος ελέγχου από την εντολή διακλάδωσης με συνθήκη. Για να αντιμετωπιστείο ο κίνδυνος σε αυτή την περίπτωση, μπορεί ο μεταγλωττιστής να προγραμματίσει τη σχισμή καθυστέρησης διακλάδωσης με την εντολή πριν από την εντολή BNEZ. Αυτό μπορεί να το κάνει επειδή δεν υπάρχει κίνδυνος δεδομένων μεταξύ της εντολής διακλάδωσης και της εντολή SUB.

Η εντολή SUB εκτελείται είτε η διακλάδωση ακολουθείται είτε όχι.

1) Αν δεν ακολουθείται η διακλάδωση, τότε η εκτέλεση συνεχίζεται με την εντολή που βρίσκεται μετά την εντολή καθυστέρησης, δηλαδή εκτελείται η εντολή OR.

BNEZ	**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**		
SUB		**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**	
OR			**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**

2) Αν η διακλάδωση ακολουθείται τότε η εκτέλεση του προγράμματος συνεχίζει από τον στόχο διακλάδωσης δηλαδή από την εντολή στη διεύθυνση N.

BNEZ	**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**		
SUB		**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**	
AND			**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**

Ανακεφαλαιώνοντας λοιπόν …

Ενα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της σωλήνωσης είναι οι κίνδυνοι ελέγχου. Αυτοί παρουσιάζονται όταν έχουμε να αντιμετωπίσουμε διακλάδωσης. Οι κίνδυνοι αυτοί προκαλούν καθυστερήσεις, οι οποίες αν δεν αντιμετωπιστούν εγκαίρως, μετατρέπονται σε ποινές διακλάδωσης.

Οι ποινές μειώνονται με τη χρήση 4 σχημάτων χρόνου μεταγλώττισης. Το πιο απλό είναι να καθυστερούμε τη σωλήνωση μέχρι να γίνει γνωστός ο στόχος της διακλάδωσης. Το δεύτερο είναι να προβλέψουμε ότι η διακλάδωση δεν ακολουθήθηκε, όποτε το υλικό συνεχίζει σα να μη συμβαίνει τίποτα. Το τρίτο σχήμα είναι να προβλέψουμε ότι η διακλάδωση ακολουθήθηκε. Το τελευταίο σχήμα ονομάζεται καθυστερημένη διακλάδωση και στηρίζεται στον επαναπρογραμματισμό των εντολών από τον μεταγλωττιστή.

Δύο είναι οι τρόποι πρόβλεψης συμπεριφοράς διακλάδωσης μέσα σε ένα πρόγραμμα. Ο ένας βασίζεται στην παρατήρηση της συμπεριφοράς της διακλάδωσης και ο άλλος προβλέπει βασισμένος στην επιλογή, ότι οι διακλαδώσεις προώθησης είναι εκείνες οι οποίες επιλέγονται.