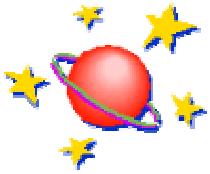


Ενότητα 3η: *Η Μεγαλύτερη δυσκολία της σωλήνωσης - Κίνδυνοι της σωλήνωσης*

Σκοπός **Ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι να παρουσιάσει τα είδη των κινδύνων που εμφανίζονται στη σωλήνωση και την επιρροή αυτών στην απόδοση της σωλήνωσης. Ειδικότερα, θα ασχοληθούμε με τους κατασκευαστικούς κινδύνους, πότε αυτοί εμφανίζονται και με ποιον τρόπο αντιμετωπίζονται. Τέλος, θα εισάγουμε την έννοια της φυσαλίδας σωλήνωσης.**

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

<u>να ορίζετε την έννοια του κινδύνου της σωλήνωσης,</u>

<u>να υπολογίζετε την απόδοση της σωλήνωσης όταν υπάρχουν καθυστερήσεις,</u>

<u>να περιγράφετε τους κατασκευαστικούς κινδύνους στη σωλήνωση και τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζονται.</u>

κίνδυνος σωλήνωσης, βάθος σωλήνωσης, κατασκευαστικός κίνδυνος σωλήνωσης, φυσαλίδα σωλήνωσης

Κίνδυνος της σωλήνωσης

Ορίζουμε ως **κίνδυνο της σωλήνωσης** την κατάσταση η οποία εμποδίζει ένα στάδιο της επόμενης εντολής, από την ακολουθία εντολών, να εκτελεστεί στον καθορισμένο κύκλο ρολογιού. Κατά συνέπεια έχουμε μείωση της απόδοσης της σωλήνωσης, αφού οι κίνδυνοι μπορεί να μας αναγκάσουν να καθυστερήσουμε τη σωλήνωση.

Χωρίζουμε τους κινδύνους σε:

- Κατασκευαστικούς κινδύνους.
- Κινδύνους δεδομένων.
- Κινδύνους ελέγχου.

Προσπαθώντας να εξαλείψουμε τους κινδύνους, κάποιες εντολές συνεχίζουν, ενώ κάποιες άλλες πρέπει να καθυστερήσουν. Όταν μια εντολή καθυστερεί, τότε ισχύουν οι ακόλουθοι δύο κανόνες:

- οι εντολές που ακολουθούν αυτή την εντολή, επίσης καθυστερούν
- οι εντολές που έχουν προηγηθεί αυτής της εντολής συνεχίζουν κανονικά στη σωλήνωση

Απόδοση σωληνώσεων με καθυστερήσεις

Ο τύπος (1) είναι γενικός τύπος και ισχύει για κάθε περίπτωση.

$$\textbf{Επιτάχυνση λόγω σωλήνωσης} = \frac{\text{Μέσος χρόνος εκτέλεσης εντολής χωρίς σωλήνωση}}{\text{Μέσος χρόνος εκτέλεσης εντολής με σωλήνωση}}$$

$$= \frac{\text{CPI χωρίς σωλήνωση} * \text{κύκλος ρολογιού χωρίς σωλήνωση}}{\text{CPI με σωλήνωση} * \text{κύκλος ρολογιού με σωλήνωση}}$$

$$= \frac{\textbf{CPI χωρίς σωλήνωση}}{\textbf{CPI με σωλήνωση}} * \frac{\textbf{Κύκλος ρολογιού χωρίς σωλήνωση}}{\textbf{Κύκλος ρολογιού με σωλήνωση}}$$

(Τύπος 1)

Σύμφωνα με τον τύπο 1 η επιτάχυνση της σωλήνωσης μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους:

- **Ελάττωση του CPI.**
- **Ελάττωση της διάρκειας του κύκλου ρολογιού.**

Επομένως θα εξετάσουμε τη σωλήνωση και τις επιδράσεις της στην επιτάχυνση του υπολογιστή που εφαρμόζεται και από τις δύο αυτές πλευρές.

Εξετάζουμε τη σωλήνωση από την πλευρά της ελάττωσης του CPI:

CPI με σωλήνωση = Ιδανικό CPI + αριθμός κύκλων ρολογιού καθυστέρησης ανά εντολή της σωλήνωσης
= 1 + αριθμός κύκλων καθυστέρησης ανά εντολή λόγω σωλήνωσης **(1α)**

(Το ιδανικό CPI για τον σωληνωμένο υπολογιστή είναι σχεδόν πάντα ίσο με 1.)

Αν αγνοήσουμε τη χρονική επιβάρυνση, λόγω σωλήνωσης, στον κύκλο ρολογιού και υποθέσουμε ότι όλα τα τμήματα εκτελούνται σε ίδιο χρόνο, τότε:

$$\textbf{Αύξηση της ταχύτητας} = \frac{\textbf{CPI χωρίς σωλήνωση}}{\textbf{1 + αριθμός κύκλων καθυστέρησης ανά εντολή λόγω σωλήνωσης}}$$

(Τύπος 2)

Μια σημαντική περίπτωση είναι όταν όλες οι εντολές χρειάζονται τον ίδιο αριθμό κύκλων, ο οποίος πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των σταδίων της σωλήνωσης. Σε αυτή την περίπτωση, ο αριθμός των σταδίων της σωλήνωσης ονομάζεται **βάθος της σωλήνωσης.**

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 1

Να συγκρίνετε το βάθος της σωλήνωσης με την τιμή του CPI σε έναν υπολογιστή χωρίς σωλήνωση. Μπορείτε να αντικαταστήσετε την τιμή του CPI στον τύπο (2) έτσι ώστε να περιλαμβάνει και το βάθος της σωλήνωσης; Να αιτιολογήσετε την απάντησή σας.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 1

Η τιμή του CPI χωρίς σωλήνωση είναι ίση με το βάθος της σωλήνωσης. Αυτό ισχύει επειδή όλες οι εντολές στην περίπτωση του σωληνωμένου υπολογιστή, χρειάζονται τον ίδιο αριθμό κύκλων ρολογιού. Ο αριθμός των κύκλων ρολογιού είναι ίσος με αυτόν που απαιτείται για την εκτέλεση μιας εντολής σε έναν υπολογιστή χωρίς σωλήνωση. Επομένως:

CPI χωρίς σωλήνωση = Βάθος σωλήνωσης

Αν αντικαταστήσουμε στον τύπο (2) έχουμε:

Αύξηση της ταχύτητας =

$$= \frac{\text{Βάθος σωλήνωσης}}{1 + \text{κύκλος ρολογιού καθυστέρησης ανά εντολή λόγω σωλήνωσης}}$$

(Τύπος 3)

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 2

Μπορείτε να εξηγήσετε πως επηρεάζεται η απόδοση όταν δεν υπάρχουν καθυστερήσεις στη σωλήνωση; Η απόδοση αυτή σχετίζεται με το βάθος της σωλήνωσης; Να αιτιολογήσετε την απάντησή σας.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 2

Αν δεν υπάρχουν καθυστερήσεις στη σωλήνωση, τότε η σωλήνωση μπορεί να επιφέρει βελτίωση της απόδοσης, δηλαδή αύξησης της ταχύτητας με την οποία εκτελούνται οι εντολές από τον υπολογιστή. Όπως φαίνεται από τον τύπο (3), η αύξηση της ταχύτητας και κατ' επέκταση της απόδοσης είναι ανάλογη του βάθους της σωλήνωσης.

Εξετάζουμε τη σωλήνωση από την πλευρά της ελάττωσης της διάρκειας του κύκλου ρολογιού:

Υποθέτουμε ότι το CPI ενός υπολογιστή χωρίς σωλήνωση είναι 1. Τότε έχουμε από τους τύπους (1) και (2):

$$\text{Αύξηση της ταχύτητας} = \frac{1}{1 + \text{κύκλος ρολογιού καθυστέρησης ανά εντολή λόγω σωλήνωσης}} * \frac{\text{Κύκλος ρολογιού χωρίς σωλήνωση}}{\text{Κύκλος ρολογιού με σωλήνωση}}$$

(Τύπος 4)

Όταν τα στάδια της σωλήνωσης :

- είναι τέλεια ισορροπημένα και
- δεν υπάρχει χρονική επιβάρυνση, τότε:

$$\text{Κύκλος ρολογιού με σωλήνωση} = \frac{\text{Κύκλος ρολογιού χωρίς σωλήνωση}}{\text{Βάθος σωλήνωσης}}$$

Επομένως : $$\text{Βάθος σωλήνωσης} = \frac{\text{Κύκλος ρολογιού χωρίς σωλήνωση}}{\text{Κύκλος ρολογιού με σωλήνωση}}$$

Έτσι ο τύπος (4) λόγω του προηγούμενου τύπου γίνεται:

$$\text{Αύξηση της ταχύτητας λόγω σωλήνωσης} = \frac{1}{1 + \text{κύκλοι καθυστέρησης σωλήνωσης ανά εντολή}}*$$

* Βάθος σωλήνωσης

(Τύπος 5)

Παρατηρήστε ότι αν δεν υπάρχουν καθυστερήσεις, η επιτάχυνση είναι ίση με τον αριθμό των σταδίων της σωλήνωσης.

Κατασκευαστικοί Κίνδυνοι

Οι κατασκευαστικοί κίνδυνοι προκαλούνται όταν δύο στάδια δύο διαφορετικών εντολών, που βρίσκονται μέσα στη σωλήνωση, χρειάζονται τον ίδιο πόρο (κύκλωμα) του υπολογιστή στον ίδιο κύκλο ρολογιού.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 3

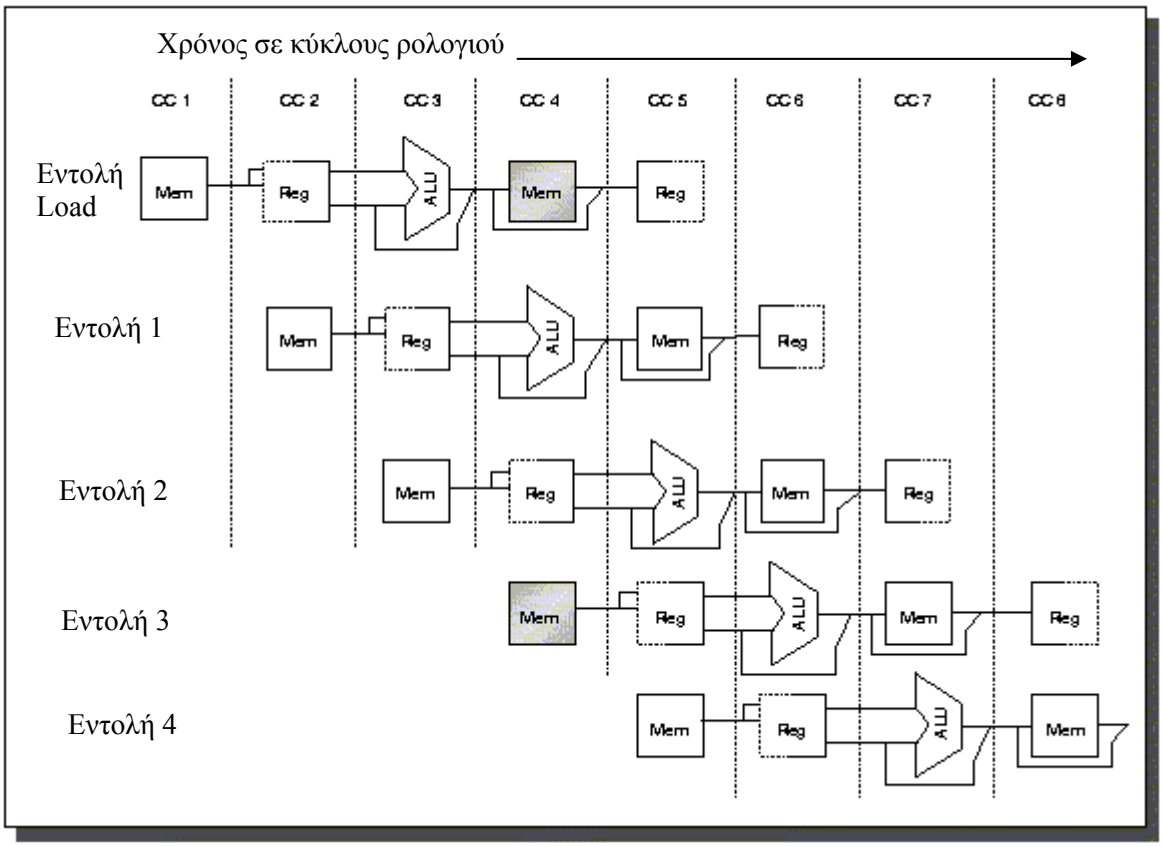
Μπορείτε να περιγράψετε ένα παράδειγμα εμφάνισης κατασκευαστικού κινδύνου; Να εξηγήσετε το λόγο για τον οποίο θεωρείτε ότι στην περίπτωση αυτή θα προκληθεί κατασκευαστικός κίνδυνος.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 3

Υπάρχει περίπτωση ένας υπολογιστής να έχει μόνο μία θύρα εγγραφής για το αρχείο καταχωρητών. Στην περίπτωση που δύο εντολές θέλουν να εκτελέσουν εγγραφή στο αρχείο καταχωρητών στον ίδιο κύκλο ρολογιού, εμφανίζεται κατασκευαστικός κίνδυνος. Ο κίνδυνος αυτός εμφανίζεται λόγω του ότι δύο διαφορετικές εντολές χρειάζονται το ίδιο κύκλωμα (την θύρα του αρχείου καταχωρητών), στον ίδιο κύκλο ρολογιού.

Αν μία ακολουθία εντολών συναντήσει κατασκευαστικό κίνδυνο, τότε η σωλήνωση θα καθυστερήσει μία από τις εντολές, μέχρι τη στιγμή που ο ζητούμενος πόρος θα είναι διαθέσιμος. Αυτού του είδους οι καθυστερήσεις θα προκαλέσουν αύξηση του CPI (κύκλοι ρολογιού ανά εντολή), μεταβάλλοντάς το από την ιδανική τιμή του, η οποία συνήθως είναι 1.

Υπάρχουν υπολογιστές που μοιράζονται μία μοναδική μνήμη για δεδομένα και εντολές. Αν ένα στάδιο μιας εντολής κάνει αναφορά στη μνήμη (π.χ. η εντολή load), θα έρθει σε σύγκρουση με κάποιο στάδιο μιας επόμενης εντολής, το οποίο κάνει αναφορά στην μνήμη για ανάκληση εντολής (παρατηρήστε το σχήμα 1.3.1).



Σχήμα 1.3.1 - Μία μηχανή με μόνο μία θύρα μνήμης θα δημιουργεί μια σύγκρουση οποτεδήποτε λαμβάνει χώρα μία αναφορά στη μνήμη. Η εντολή load χρησιμοποιεί τη μνήμη για πρόσβαση σε δεδομένα και την ίδια στιγμή η εντολή 3 θέλει να κάνει ανάκληση μιας εντολής από τη μνήμη.

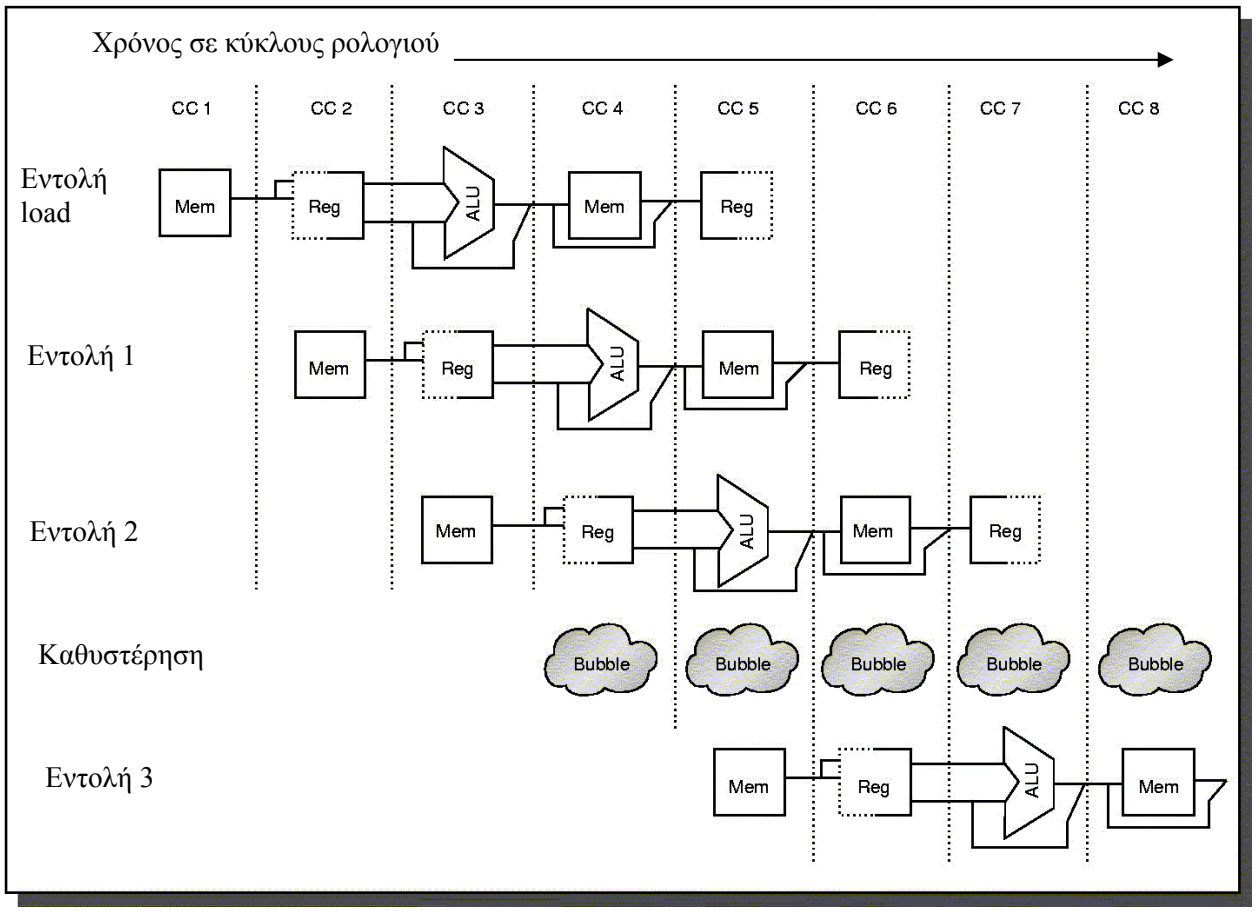
ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 4

Μπορείτε να εξηγήσετε τι θα πρέπει να συμβεί στη περίπτωση που περιγράφεται στο σχήμα 1.3.1, έτσι ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση;

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 4

Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να καθυστερήσει η σωλήνωση για έναν κύκλο ρολογιού, έτσι ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση. Έτσι θα ολοκληρωθεί η εντολή φόρτωσης και στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στη μνήμη για την ανάκληση της επόμενης εντολής.

Στο σχήμα 1.3.2 βλέπουμε πως είναι το μονοπάτι δεδομένων της σωλήνωσης, η οποία καθυστερεί κατά ένα κύκλο ρολογιού.



Σχήμα 1.3.2 - Ο κατασκευαστικός κίνδυνος προκαλεί την εισαγωγή φυσαλίδων σωλήνωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι καμία εντολή δε θα ολοκληρωθεί κατά τη διάρκεια του 8ου κύκλου ρολογιού, όταν η εντολή 3 φυσιολογικά θα είχε ολοκληρωθεί. Η Εντολή 1 θεωρείται ότι δεν είναι εντολή φόρτωσης ή αποθήκευσης, έτσι ώστε να χρειάζεται τη μνήμη, διαφορετικά, η εντολή 3 δεν μπορεί να αρχίσει την εκτέλεσή της.

Επειδή μία καθυστέρηση κινείται μέσα στη σωλήνωση καταλαμβάνοντας χώρο, χωρίς όμως να πραγματοποιεί κάποια χρήσιμη εργασία, ονομάζουμε την καθυστέρηση **φυσαλίδα**. Στο σχήμα 1.3.3 παρουσιάζουμε το σχήμα 1.3.2 σχεδιασμένο με μία απλούστερη και πιο κατανοητή μορφή.

Αριθμός Εντολής	Κύκλοι Ρολογιού									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Εντολή φόρτωσης (LOAD)	**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**					
Εντολή I+1		**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**				
Εντολή I+2			**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**			
Εντολή I+3				**STALL**	**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**	
Εντολή I+4						**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**	**WB**
Εντολή I+5							**IF**	**ID**	**EX**	**MEM**
Εντολή I+6								**IF**	**ID**	**EX**

Σχήμα 1.3.3 - Μία σωλήνωση καθυστερεί λόγω κατασκευαστικού κίνδύνου, όπως για παράδειγμα μία εντολή φόρτωσης με μία θύρα μνήμης. Όπως φαίνεται εδώ, η εντολή φόρτωσης παίρνει έναν κύκλο από την εντολή I+3, προκαλώντας την καθυστέρηση της σωλήνωσης – καμία εντολή δεν αρχίζει στον 4ο κύκλο ρολογιού (που κανονικά θα άρχιζε η εντολή I+3). Επειδή η εντολή που ανακαλείται (δηλαδή η I+3) καθυστερεί, όλες οι άλλες εντολές στη σωλήνωση πριν την καθυστερημένη εντολή μπορούν να συνεχίσουν κανονικά. Ο κύκλος καθυστέρησης θα συνεχίσει να περνά μέσα στη σωλήνωση, έτσι ώστε καμία εντολή να μην ολοκληρωθεί στον 8ο κύκλο ρολογιού.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 5

Αν όλοι οι άλλοι παράγοντες είναι ίσοι, τότε ένας υπολογιστής χωρίς κατασκευαστικούς κινδύνους θα έχει πάντα χαμηλότερο CPI. Όμως παρ' όλα αυτά, εξακολουθούμε να επιτρέπουμε την εμφάνιση κάποιων κατασκευαστικών κινδύνων. Μπορείτε να αναφέρετε τους λόγους για τους οποίους δεν αποφεύγουμε πάντα την εμφάνιση κατασκευαστικών κινδύνων;

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 5

Ορισμένες φορές επιτρέπουμε την εμφάνιση κάποιων κατασκευαστικών κινδύνων. Αυτό συμβαίνει γιατί έτσι επιτυγχάνουμε:

- **μείωση του κόστους, αφού ο πολλαπλασιασμός όλων των λειτουργικών μονάδων, προκειμένου να μπορούν να αντιμετωπιστούν όλοι οι πιθανοί κατασκευαστικοί κίνδυνοι, είναι ιδιαίτερα δαπανηρός,**
- **απλούστευση του ελέγχου, αφού όσο περισσότερες λειτουργικές μονάδες έχουμε, τόσο αυξάνει ο αριθμός των κυκλωμάτων και κατά συνέπεια ο έλεγχος γίνεται πιο πολύπλοκος,**
- **μείωση της αδράνειας μιας λειτουργικής μονάδας.**

Παράδειγμα

Υποθέστε ότι οι εντολές με αναφορά στη μνήμη δεδομένων αποτελούν το 40% του συνόλου των εντολών, και το ιδανικό CPI του σωληνωμένου υπολογιστή αγνοώντας τον κατασκευαστικό κίνδυνο, είναι 1. Θεωρήστε ότι ο υπολογιστής με κατασκευαστικό κίνδυνο έχει ρυθμό ρολογιού 1.05 φορές μεγαλύτερο από το ρυθμό ρολογιού του υπολογιστή χωρίς κίνδυνο. Αδιαφορώντας για άλλες απώλειες της απόδοσης είναι η σωλήνωση με ή χωρίς κατασκευαστικό κίνδυνο ταχύτερη και κατά πόσο;

Απάντηση:

Ο μέσος χρόνος εκτέλεσης εντολών για τους δύο υπολογιστές είναι:

Μέσος χρόνος εκτέλεσης εντολών = CPI * Διάρκεια κύκλου ρολογιού (α)

Όταν δεν υπάρχουν καθυστερήσεις, δηλαδή CPI=1 η (α) γίνεται:

Μέσος χρόνος εκτέλεσης εντολών = Διάρκεια κύκλου ρολογιού (β)

Ενώ, για τον υπολογιστή με κατασκευαστικό κίνδυνο και με τη βοήθεια της σχέσης (1α) από τη θεωρία, η (α) γίνεται:

Μέσος χρόνος εκτέλεσης εντολών = CPI * Διάρκεια κύκλου ρολογιού =
= (1+0.4*1)* (Διάρκεια κύκλου ρολογιού / 1.05) =
= 1.3 * Διάρκεια κύκλου ρολογιού

Συμπεραίνουμε έτσι ότι ο υπολογιστής με κατασκευαστικό κίνδυνο είναι 1.3 φορές πιο αργός.

Ανακεφαλαιώνοντας λοιπόν …

Ο κίνδυνος της σωλήνωσης είναι μια κατάσταση, η οποία εμποδίζει ένα στάδιο μιας εντολής να εκτελεστεί στον καθορισμένο κύκλο ρολογιού. Έτσι προκαλείται μια καθυστέρηση στη σωλήνωση.

Χωρίζουμε τους κινδύνους σε κατασκευαστικούς κινδύνους, κινδύνους δεδομένων και κινδύνους ελέγχου.

Βασικό πλεονέκτημα της σωλήνωσης, είναι ότι επιτυγχάνει αύξηση της ταχύτητας εκτέλεσης ενός συνόλου εντολών ίση με τον αριθμό των σταδίων της σωλήνωσης. Αυτό όμως συμβαίνει μόνο όταν δεν υπάρχουν καθυστερήσεις.

Ο κατασκευαστικός κίνδυνος προκύπτει όταν δύο διαφορετικά στάδια δύο εντολών απαιτούν τον ίδιο πόρο της μηχανής, στον ίδιο κύκλο ρολογιού. Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο κίνδυνος γίνεται εισαγωγή φυσαλίδων στη σωλήνωση.

Η φυσαλίδα είναι μία καθυστέρηση, η οποία προχωράει μέσα στη σωλήνωση χωρίς να εκτελεί μία χρήσιμη εργασία.

Επιτρέπουμε την ύπαρξη μερικών κατασκευαστικών κινδύνων γιατί έτσι μειώνεται το κόστος για τη σχεδίαση μιας μηχανής, απλουστεύεται ο έλεγχος, καθώς επίσης ελαττώνεται η αδράνεια μιας λειτουργικής μονάδας.