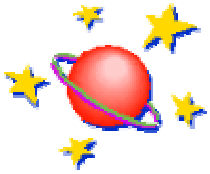


Ενότητα 4η: *Κίνδυνοι δεδομένων*

Σκοπός **Ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι να παρουσιάσει τους κινδύνους δεδομένων. Αναλυτικότερα θα δούμε πότε εμφανίζονται οι κίνδυνοι δεδομένων, με ποιον τρόπο ταξινομούνται και πώς μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε τις καθυστερήσεις με την τεχνική της προώθησης.**

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

<u>να αναγνωρίζετε πότε προκαλείται κίνδυνος δεδομένων,</u>

<u>να ελαχιστοποιείτε τις καθυστερήσεις λόγω των κινδύνων δεδομένων, μέσω της τεχνικής της προώθησης,</u>

<u>να ταξινομείτε τους κινδύνους δεδομένων.</u>

κίνδυνος δεδομένων, προώθηση

Πότε προκαλείται Κίνδυνος Δεδομένων

Όπως έχουμε ήδη δει, στη σωλήνωση διαφορετικά στάδια διαφορετικών εντολών εκτελούνται στον ίδιο κύκλο ρολογιού. Στο παράδειγμα που ακολουθεί, όλες οι εντολές που ακολουθούν την εντολή ADD χρησιμοποιούν τον καταχωρητή R1. Για παράδειγμα το στάδιο WB της εντολής ADD όπου χρησιμοποιείται ο R1, εκτελείται στον ίδιο κύκλο ρολογιού με το στάδιο ID της εντολής SUB, όπου χρησιμοποιείται επίσης ο R1. Το γεγονός αυτό όμως μπορεί να προκαλέσει κάποια προβλήματα σε ό,τι αφορά τη σειρά με την οποία θα έπρεπε να γίνονται οι προσβάσεις στους τελεστέους για ανάγνωση ή εγγραφή. Κατά συνέπεια ένας τελεστέος μπορεί, για παράδειγμα, να διαβάζεται πριν η τιμή του να έχει ενημερωθεί. Στις περιπτώσεις αυτές προκαλείται ένας κίνδυνος δεδομένων.

Παράδειγμα

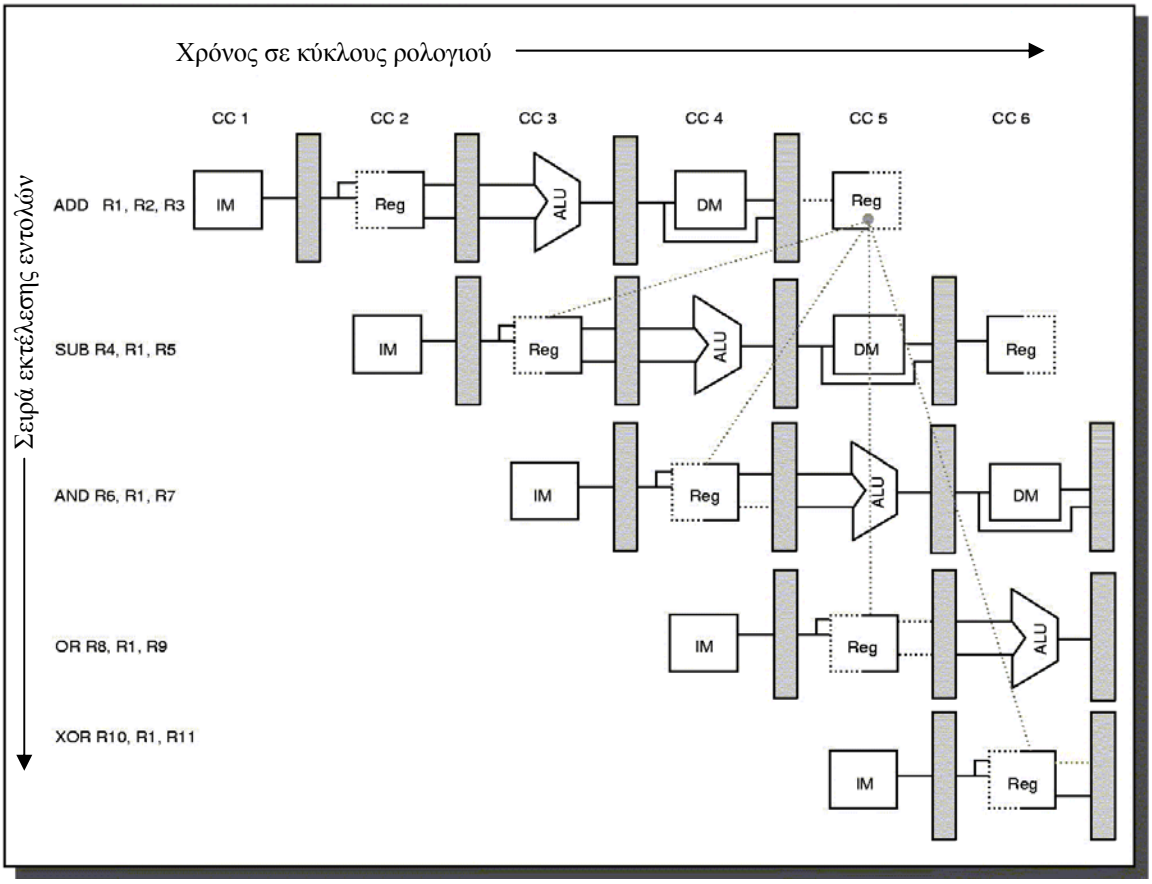
Έστω ότι έχουμε το παρακάτω τμήμα κώδικα ακολουθίας εντολών με σωλήνωση:

```
ADD   R1, R2, R3
SUB   R4, R5, R1
AND   R6, R1, R7
OR    R8, R1, R9
XOR   R10, R1, R11
```

Παρατηρήστε ότι στην παραπάνω ακολουθία εντολών χρησιμοποιούμε τον καταχωρητή R1 σε όλες τις εντολές. Ξεκινώντας όμως με την εντολή ADD, οι υπόλοιπες εντολές χρησιμοποιούν το αποτέλεσμα της. Το σχήμα 1.4.1 απεικονίζει την εκτέλεση των εντολών.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 1

Αφού παρατηρήσετε προσεκτικά το παρακάτω σχήμα (1.4.1), να προσδιορίσετε τα σημεία εκείνα στα οποία μπορεί να παρουσιαστεί κίνδυνος δεδομένων.



Σχήμα 1.4.1 – Κίνδυνος δεδομένων. Η χρήση του αποτελέσματος της εντολής ADD στις επόμενες τρεις εντολές προκαλεί ένα κίνδυνο δεδομένων, αφού ο καταχωρητής παίρνει τη νέα τιμή στο στάδιο WB.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 1

Στο σχήμα βλέπουμε ότι στην εντολή ADD γίνεται εγγραφή της τιμής του R1 στο στάδιο WB της σωλήνωσης (5^{ος} κύκλος ρολογιού), αλλά η εντολή SUB διαβάζει την τιμή του R1 ενώ βρίσκεται στο στάδιο ID (3^{ος} κύκλος ρολογιού). Αν δεν προσέξουμε και επιτρέψουμε στην εντολή SUB να εκτελεστεί χωρίς κάποια καθυστέρηση, τότε η εντολή αυτή θα διαβάσει λάθος δεδομένα. Δηλαδή, αντί να διαβάσει την νέα τιμή του καταχωρητή R1, που υπολογίστηκε στην εντολή ADD, θα διαβάσει την τιμή που είχε πριν από την εντολή ADD. Επομένως αν δεν υπάρξει καθυστέρηση θα εμφανιστεί κίνδυνος δεδομένων στην εντολή SUB.

Η εντολή SUB δεν είναι η μόνη που επηρεάζεται από αυτόν τον κίνδυνο. Μετά από αυτή ακολουθεί η εντολή AND, η οποία αντιμετωπίζει και αυτή τον ίδιο κίνδυνο, δηλαδή την ανάγνωση τις τιμής του καταχωρητή R1 πριν γίνει η εγγραφή της νέας τιμής από την εντολή ADD. Τον ίδιο κίνδυνο μπορεί να αντιμετωπίσει και η εντολή OR(όπως θα δούμε παρακάτω, η εντολή αυτή μπορεί να αποφύγει τον κίνδυνο, με την υλοποίηση της τεχνικής της προώθησης). Στη συνέχεια η εντολή XOR μπορεί να λειτουργήσει κανονικά, αφού η εντολή ADD έχει ήδη τελειώσει με το στάδιο WB και ο καταχωρητής R1 θα έχει λάβει τη νέα του τιμή.

Ταξινόμηση των κινδύνων δεδομένων

Ένας κίνδυνος δεδομένων δημιουργείται όταν υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των εντολών, οι οποίες είναι τόσο κοντά, ώστε η επικάλυψη που προέρχεται από τη σωλήνωση να αλλάζει τη σειρά πρόσβασης σε έναν τελεστέο.

Οι κίνδυνοι δεδομένων μπορούν να ταξινομηθούν σε μία από τις τρεις επόμενες κατηγορίες, ανάλογα με τη σειρά των αναγνώσεων και των εγγραφών στις εντολές.
Έστω ότι έχουμε δύο διαδοχικές εντολές τις i και j (πρώτα την i και μετά την j).

- **RAW** (Read After Write – ανάγνωση μετά από εγγραφή).
Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι κίνδυνοι που συμβαίνουν όταν η εντολή j προσπαθεί να διαβάσει έναν πηγαίο τελεστέο προτού η εντολή i ενημερώσει την τιμή του τελεστέου. Στην περίπτωση αυτή η εντολή j παίρνει την παλιά τιμή που είναι λάθος.

- **WAW** (Write After Write – εγγραφή μετά από εγγραφή).
Ο κίνδυνος αυτός εμφανίζεται όταν η εντολή j προσπαθεί να γράψει σε έναν τελεστέο προορισμού πριν αυτός ενημερωθεί από την εντολή i. Αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης είναι να γίνονται με λάθος σειρά οι εγγραφές, αφήνοντας στον προορισμό την τιμή που γράφτηκε από την i και όχι αυτή που γράφτηκε από τη j, όπως θα ήταν και το σωστό.

- **WAR** (Write After Read –εγγραφή μετά από ανάγνωση).
Οι κίνδυνοι αυτοί παρατηρούνται όταν η εντολή j προσπαθεί να γράψει σε ένα τελεστέο προορισμού πριν προλάβει η εντολή i να τον διαβάσει, με αποτέλεσμα η εντολή i να παίρνει λάθος τη νέα τιμή.

- **RAR** (Read After Read – ανάγνωση μετά από ανάγνωση)
Ο RAR δεν είναι κίνδυνος.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 2

Μπορείτε να αναφέρετε τις κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται οι κίνδυνοι δεδομένων; Να συγκρίνετε την απάντησή σας με την ενότητα: «Ταξινόμηση κινδύνων δεδομένων».

Ελαχιστοποιώντας καθυστερήσεις λόγω κινδύνων δεδομένων μέσω προώθησης

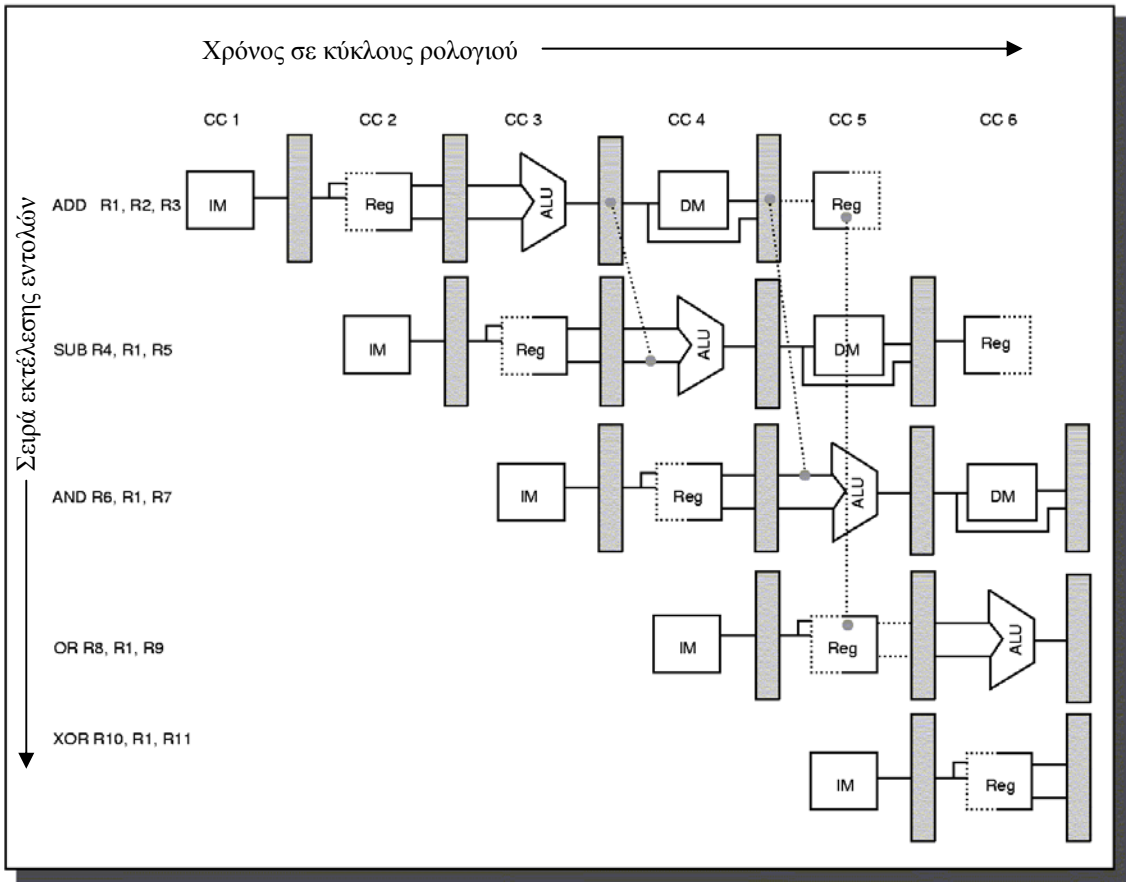
Μία τεχνική του υλικού, με την οποία μπορούμε να λύσουμε το πρόβλημα, που συναντήσαμε στο προηγούμενο παράδειγμα, είναι η **τεχνική της προώθησης**.
Επιστρέφοντας στο σχήμα 1.4.1 και στη ροή εντολών αυτού, μπορούμε να εξηγήσουμε την τεχνική της προώθησης. Βασίζεται στην παρατήρηση, ότι το αποτέλεσμα μπορεί να μεταφερθεί από το σημείο που η ADD το παράγει, δηλαδή στην έξοδο της ALU, στο σημείο που η εντολή SUB το χρειάζεται, δηλαδή στους μανταλωτές εισόδου της ALU, τότε μπορούμε να αποφύγουμε την ανάγκη για καθυστέρηση.

Αναλυτικότερα η προώθηση λειτουργεί ως εξής:

- Το αποτέλεσμα της ALU ανατροφοδοτείται πάντα στους μανταλωτές εισόδου της ALU.

- Αν το κύκλωμα προώθησης ανιχνεύσει ότι η προηγούμενη εντολή της ALU έχει ως καταχωρητή προορισμού, εκείνον ο οποίος αντιστοιχεί στον πηγαίο καταχωρητή της τρέχουσας λειτουργίας της ALU, ο λογικός έλεγχος επιλέγει το προωθημένο αποτέλεσμα ως είσοδο της ALU, αντί της τιμής που διαβάζεται από το αρχείο καταχωρητών.

Στο σχήμα 1.4.2 παρουσιάζουμε το προηγούμενο παράδειγμα του σχήματος 1.4.1, χρησιμοποιώντας την τεχνική της προώθησης. Τώρα η ακολουθία των εντολών μπορεί να εκτελεστεί χωρίς καθυστερήσεις.



Σχήμα 1.4.2 - Μια ομάδα εντολών που εξαρτώνται από το αποτέλεσμα της εντολής ADD χρησιμοποιούν την τεχνική της προώθησης για να αποφύγουν τον κίνδυνο δεδομένων. Οι είσοδοι για τις εντολές SUB και AND προωθούνται από τους καταχωρητές σωλήνωσης EX/MEM και MEM/WB αντίστοιχα, στην πρώτη είσοδο της ALU. Η εντολή OR λαμβάνει το αποτέλεσμα της με προώθηση μέσα από το αρχείο καταχωρητών. Αυτό πραγματοποιείται με την εγγραφή των καταχωρητών στο πρώτο μισό του κύκλου ρολογιού και με ανάγνωση των καταχωρητών στο δεύτερο μισό του κύκλου ρολογιού, όπως δείχνουν οι διακεκομμένες γραμμές στους καταχωρητές. Σημειώστε ότι το προωθημένο αποτέλεσμα μπορεί να πάει σε οποιαδήποτε είσοδο της ALU. Στην πραγματικότητα, και οι δύο είσοδοι της ALU μπορούν να χρησιμοποιούν προωθημένες εισόδους είτε από τον ίδιο καταχωρητή σωλήνωσης, είτε από διαφορετικούς καταχωρητές σωλήνωσης. Αυτό θα συνέβαινε για παράδειγμα, αν η εντολή ADD ήταν ADD R6, R1, R4.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

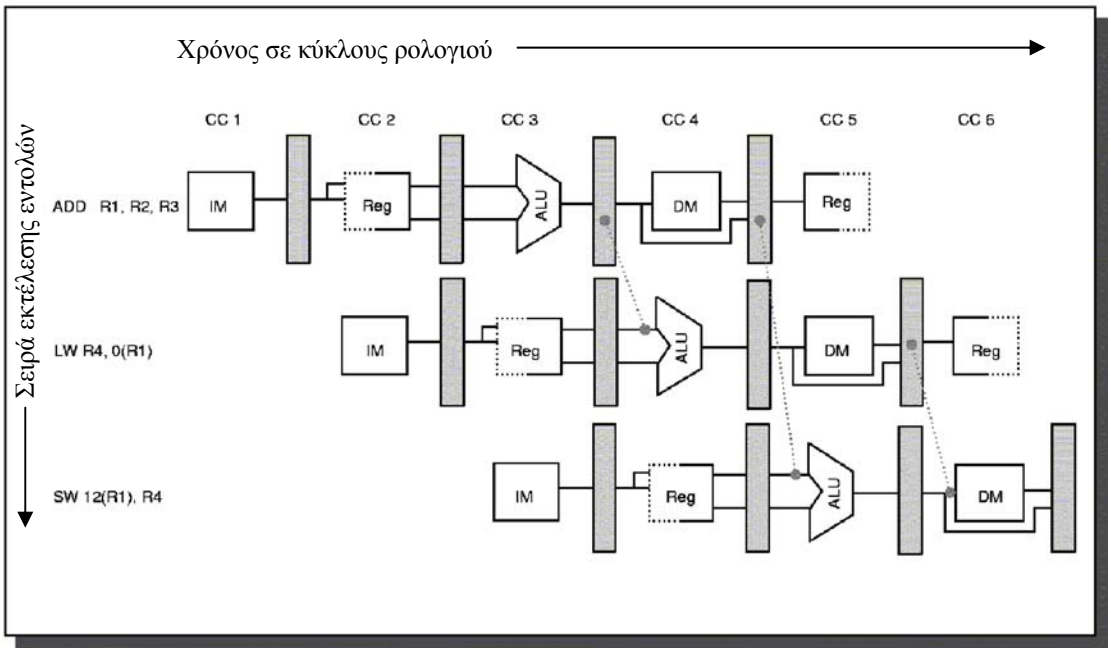
Έστω το παρακάτω τμήμα κώδικα ακολουθίας εντολών:

```
ADD   R1 , R2 , R3
LW    R4 , 0 (R1)
SW    12 (R1) , R4
```

Μελετώντας την παραπάνω ακολουθία εντολών βλέπουμε ότι η εντολή LW εξαρτάται από την εντολή ADD εξαιτίας του καταχωρητή R1 το ίδιο κι η εντολή SW. Επίσης βλέπουμε ότι η εντολή SW εξαρτάται από την LW λόγω του καταχωρητή R4. Στο σχήμα 1.4.3 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η τεχνική της προώθησης πάνω στη συγκεκριμένη ακολουθία εντολών.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 3

Μπορείτε να σχεδιάσετε το σχήμα που απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η τεχνική της προώθησης, κατά την εκτέλεση της ακολουθίας εντολών του προηγούμενου παραδείγματος; Να συγκρίνετε το σχήμα που σχεδιάσατε με το σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 1.4.3).
(Υπόδειξη: Για τη σχεδίαση του σχήματος να βασιστείτε στο σχήμα 1.4.2. Καλό θα ήταν να μελετούσατε το συγκεκριμένο σχήμα άλλη μια φορά ώστε να κατανοήστε καλύτερα την τεχνική της προώθησης.)



Σχήμα 1.4.3 - Η εντολή αποθήκευσης απαιτεί έναν τελεστέο κατά τη διάρκεια του σταδίου MEM, και η προώθηση αυτού του τελεστέου απεικονίζεται σε αυτό το σχήμα. Το αποτέλεσμα της εντολής φόρτωσης προωθείται από την έξοδο της μνήμης μέσα στον καταχωρητή MEM/WB, στην είσοδο της μνήμης για να αποθηκευθεί. Επίσης, η έξοδος της ALU προωθείται στην είσοδο της ALU για τον υπολογισμό της διεύθυνσης της εντολής φόρτωσης αλλά και της εντολής αποθήκευσης. Αν η εντολή αποθήκευσης εξαρτιόταν από μία αμέσως προηγούμενη λειτουργία της ALU, τότε το αποτέλεσμα θα χρειαζόταν να προωθηθεί για να αποτραπεί μία καθυστέρηση.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 4

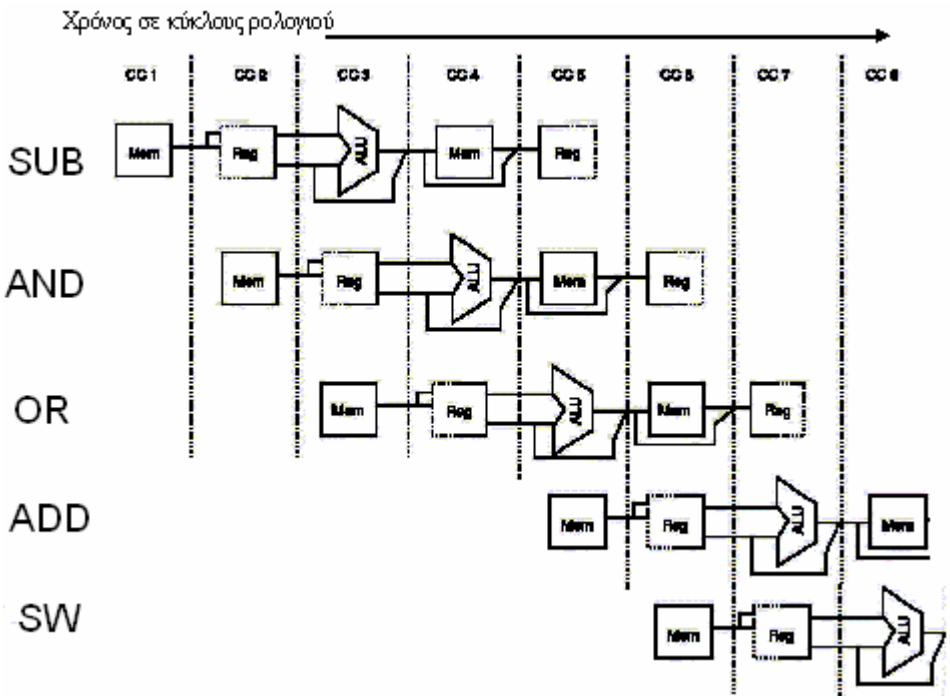
Έστω το ακόλουθο τμήμα κώδικα ακολουθίας εντολών:

SUB R2, R1, R3
AND R12, R2, R5
OR R13, R6, R2
ADD R14, R2, R2
SW 100(R2), R15

Να προσδιορίσετε τις εντολές στις οποίες μπορεί να προκύψει κίνδυνος δεδομένων και να προτείνετε τρόπο αντιμετώπισης αυτών των κινδύνων.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 4

Αρχικά κάνουμε ένα σχήμα με τις εντολές και τους κύκλους ρολογιού που θα εκτελούνταν αν δεν υπήρχε περίπτωση κινδύνου.



Στον 4° κύκλο ρολογιού το κύκλωμα προώθησης επιλέγει, για την εντολή AND, την τιμή από τον καταχωρητή σωλήνωσης EX/MEM αντί την τιμή από τον ID/EX και την προωθεί στην πάνω είσοδο της ALU. 'Ετσι παίρνει τη σωστή τιμή του καταχωρητή R2, δηλαδή εκείνη που προέκυψε από την εντολή SUB. Στον 4° κύκλο ρολογιού, η τιμή του καταχωρητή R2, από τον καταχωρητή σωλήνωσης EX/MEM έχει μεταφερθεί στον καταχωρητή σωλήνωσης MEM/WB.

Στον 5° κύκλο ρολογιού το κύκλωμα προώθησης επιλέγει την τιμή του καταχωρητή R2 από τον καταχωρητή σωλήνωσης MEM/WB, και την προωθεί στην κάτω είσοδο της ALU για την εντολή OR. Η εντολή ADD διαβάζει τον καταχωρητή R2, ο οποίος είναι ο καταχωρητής προορισμού της εντολής SUB, στο δεύτερο μισό του 5° κύκλου ρολογιού, οπότε κι η SUB, στο στάδιο WB, έχει γράψει το αποτέλεσμα ήδη από το πρώτο μισό του κύκλου στο αρχείο καταχωρητών. Η εντολή SW διαβάζει την τιμή του R2 κανονικά από το αρχείο καταχωρητών στον 6°κύκλο ρολογιού.

Ανακεφαλαιώνοντας λοιπόν …

Ένας κίνδυνος δεδομένων προκύπτει όταν υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των εντολών, οι οποίες είναι τόσο κοντά, ώστε η επικάλυψη που προέρχεται από τη σωλήνωση να αλλάζει τη σειρά πρόσβασης σε έναν τελεστέο.

Χωρίσαμε τους κινδύνους δεδομένων σε κινδύνους RAW, κινδύνους WAW και κινδύνους WAR.

Ο RAW κίνδυνος αντιμετωπίζεται με την τεχνική της προώθησης, σύμφωνα με την οποία το αποτέλεσμα μιας λειτουργικής μονάδας, προωθείται στην είσοδο μιας άλλης.