



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
www.cslab.ece.ntua.gr

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ (5^ο εξάμηνο)

ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ (ΙΟΥΛΙΟΣ 2007)

ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ: 2 ΩΡΕΣ 30 ΛΕΠΤΑ

Οι εξετάσεις θα πραγματοποιηθούν ΧΩΡΙΣ την παρουσία βιβλίων, βοηθημάτων ή άλλου είδους σημειώσεων. Το μόνο που επιτρέπεται να έχετε μαζί σας είναι ένα φύλλο A4 στο οποίο μπορείτε να έχετε γράψει ό,τι έχετε κρίνει πιο σημαντικό για το μάθημα και θέλετε να το έχετε ως βοήθημά σας. Απαγορεύεται η ανταλλαγή οποιουδήποτε αντικειμένου κατά την ώρα της εξέτασης, ούτε και των φύλλων A4 που είναι ατομικά.

Καλή Επιτυχία!

Θέμα 1^ο (30%):

Εξετάζουμε την εκτέλεση του εξής κώδικα:

Rep:

```
lw $8,1000($2)
add $8,$8,$5
sw $8,2000($2)
sub $2,$2,$6
sub $3,$3,$1
bne $3,$0, Rep
```

Exit:

Υποθέτουμε ότι έχουμε αρχιτεκτονική σωλήνωσης (pipelining) 5 σταδίων (IF ID EX MEM WB). Έστω ότι η αρχική τιμή του \$3 είναι 1000 και του \$1 είναι 10, και ότι όλες οι αναφορές στη μνήμη ικανοποιούνται από την κρυφή μνήμη σε 1 κύκλο (δεν υπάρχουν δηλαδή αστοχίες).

α) Αρχικά, υποθέτουμε ότι η αρχιτεκτονική σωλήνωσης δε διαθέτει σχήμα προώθησης (forwarding). Επίσης, η εγγραφή σε κάποιον καταχωρητή γίνεται στο πρώτο μισό ενός κύκλου, ενώ η ανάγνωση από τον ίδιον καταχωρητή στο δεύτερο μισό του ίδιου κύκλου. Επιπλέον, η ενημέρωση του μετρητή προγράμματος κατά την εκτέλεση μιας εντολής διακλάδωσης γίνεται στο στάδιο MEM, και για να γίνει η διακλάδωση πρέπει να “καθαριστεί” (flush) το pipeline.

Για την 1^η επανάληψη του παραπάνω βρόχου, μέχρι και το load της 2^{ης} επανάληψης, χρησιμοποιείστε ένα διάγραμμα χρονισμού όπως αυτό που παρουσιάζεται στη συνέχεια, για να (2α1) δείξετε τα διάφορα στάδια του pipeline από τα οποία διέρχονται οι εντολές σε αυτό το διάστημα εκτέλεσης. (2α2) Υποδείξτε και εξηγήστε τους πιθανούς κινδύνους (hazards) που μπορούν να προκύψουν κατά την εκτέλεση, καθώς και τον τρόπο με τον οποίον αυτοί αντιμετωπίζονται. (2α3) Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο παραπάνω βρόχος (για όλες τις επαναλήψεις του, όχι μόνο για την 1η);

β) Για την ίδια ακολουθία εντολών, (2β1) δείξτε και εξηγήστε όπως και πριν, τον χρονισμό του pipeline, θεωρώντας όμως τώρα ότι υπάρχει σχήμα προώθησης. Θεωρείστε ότι οι αποφάσεις για τις

διακλαδώσεις (ενημέρωση PC) λαμβάνονται στο στάδιο MEM. (2β2) Πόσοι κύκλοι απαιτούνται συνολικά για να ολοκληρωθεί ο βρόχος;

| Κύκλος | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | ... |
|----------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Εντολή 1 | IF | ID | EX | MEM | WB | | | |
| Εντολή 2 | | IF | ID | EX | MEM | WB | | |
| Εντολή 3 | | | ... | ... | ... | ... | ... | |
| ... | | | | | | | | |

Παράδειγμα Διαγράμματος Χρονισμού

γ) Έστω ότι επιθυμούμε να έχουμε τη δυνατότητα απευθείας προσπέλασης στη μνήμη από τις αριθμητικές εντολές. Με άλλα λόγια, επιτρέπουμε στον έναν από τους τελεστές προέλευσης (source operands) μιας αριθμητικής εντολής να είναι αναφορά σε μια θέση μνήμης. (2γ1) Πώς θα ξαναγράφατε τον αρχικό κώδικα σύμφωνα με αυτή την προσθήκη; (2γ2) Γιατί θα ήταν δύσκολο να προσθέσουμε αυτό τον τρόπο διευθυνσιοδότησης στην αρχιτεκτονική σωλήνωσης 5 σταδίων, και τι συνέπειες θα είχε η προσθήκη αυτή στο σχεδιασμό της σωλήνωσης; Ποιες θα ήταν οι συνέπειες όσον αφορά την καθυστέρηση ολοκλήρωσης (latency) και τον ρυθμό ολοκλήρωσης (throughput) των εντολών;

Θέμα 2° (30%):

Θεωρήστε ένα σύστημα μνήμης με μία cache χωρητικότητας 1 MB δεδομένων, με cache line 4 λέξεων. Το μέγεθος της λέξης είναι 32 bits. Η μικρότερη μονάδα δεδομένων που μπορεί να διευθυνσιοδοτηθεί είναι το 1 byte, ενώ οι διευθύνσεις μνήμης έχουν εύρος 32 bit. Για κάθε μία από τις ακόλουθες περιπτώσεις οργάνωσης της cache:

- ευθείας αντιστοίχισης (direct mapped)
- συσχέτισης 2 δρόμων (2-way set associative)
- πλήρως συσχετιστική (fully associative)

α) (2α1) Υπολογίστε τον αριθμό των bits καθενός από τα επιμέρους πεδία στα οποία χωρίζεται μία διεύθυνση μνήμης σε μία τέτοια οργάνωση cache. (2α2) Παρουσιάστε ένα διάγραμμα που να δείχνει πώς διαχωρίζεται η διεύθυνση στα πεδία αυτά, και εξηγήστε τη σημασία του καθενός.

β) (2β1) Παρουσιάστε σε block διάγραμμα την cache, τα επιμέρους πεδία μιας διεύθυνσης, και τον τρόπο που διασυνδέονται μεταξύ τους ώστε να οδηγήσουν στην προσπέλαση (εγγραφή/ανάγνωση) δεδομένων της cache. Εξηγήστε εν συντομία τη σημασία της κάθε διασύνδεσης στη διαδικασία εύρεσης δεδομένων στην cache. Λάβετε υπόψη ότι κάθε cache line έχει ένα επιπλέον bit valid/invalid. (2β2) Τι ποσοστό του συνολικού μεγέθους της cache αφιερώνεται για τα bits του tag σε κάθε μία από τις περιπτώσεις;

Θέμα 3° (20%):

Δίνεται μια σειρά αναφορών σε διευθύνσεις λέξεων στη μνήμη ενός υπολογιστή: 3, 12, 33, 45, 13, 20, 2, 6, 32, 40, 27, 7, 8, 9, 25, 20. Υποθέτουμε ότι έχουμε κρυφή μνήμη με οργάνωση:

- i) απευθείας απεικόνισης (direct mapped) με 8 blocks, όπου κάθε block έχει μέγεθος μια λέξη (word),
- ii) απευθείας απεικόνισης (direct mapped), με 8 λέξεις (words) συνολικό μέγεθος cache, όπου κάθε block έχει μέγεθος δύο (2) λέξεις.
- iii) συνόλου συσχέτισης 2-δρόμων (2-way set associative) με συνολικό μέγεθος 16 λέξεις (words) όπου κάθε block έχει μέγεθος δύο (2) λέξεις (Υποθέστε LRU αλγόριθμο αντικατάστασης).

Δείξτε για τις παραπάνω περιπτώσεις οργάνωσης της κρυφής μνήμης, για κάθε αναφορά, αν είναι επιτυχής (hit) ή όχι (miss) καθώς και την τελικά περιεχόμενα της κρυφής μνήμης.

Θέμα 4° (20%):

Εξετάζουμε την εκτέλεση του εξής βρόχου:

```
for(j=0; j<8; j++)
  for(i=0; i<100; i++)
    x[i][j] = x[i][j]+1;
```

Ο πίνακας x περιέχει στοιχεία κινητής υποδιαστολής μονής ακρίβειας, μεγέθους 4 bytes το καθένα. Κάνουμε τις εξής υποθέσεις:

- Το πρόγραμμα εκτελείται σε έναν επεξεργαστή με μόνο ένα επίπεδο κρυφής μνήμης δεδομένων, η οποία αρχικά είναι άδεια. Η κρυφή μνήμη είναι πλήρως συσχετιστική (fully associative), αποτελείται από 10 blocks δεδομένων, και έχει LRU πολιτική αντικατάστασης. Το μέγεθος του block είναι 16 bytes.

- Υποθέτουμε ότι όλες οι μεταβλητές, πλην των στοιχείων του πίνακα x, μπορούν να αποθηκευτούν σε καταχωρητές του επεξεργαστή, οπότε οποιαδήποτε αναφορά σε αυτές δεν συνεπάγεται προσπέλαση στην κρυφή μνήμη.

- Ο πίνακας είναι αποθηκευμένος στην κύρια μνήμη κατά γραμμές. Επιπλέον, είναι “ευθυγραμμισμένος” ώστε το πρώτο στοιχείο του να απεικονίζεται στην αρχή μιας γραμμής της κρυφής μνήμης.

α) Βρείτε ποιες από τις αναφορές στα στοιχεία του πίνακα x για όλη την εκτέλεση του παραπάνω κώδικα καταλήγουν σε misses στην cache και ποιες σε hits.

β) Απαντήστε όπως και στο ερώτημα α, για την νέα βελτιστοποιημένη εκδοχή του βρόχου όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια:

```
for(i=0; i<100; j++)
  for(j=0; j<8; i++)
    x[i][j] = x[i][j]+1;
```