

HMY 314 – Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Ηλεκτρονικών Υπολογιστών
Χειμερινό Εξάμηνο 2023

Διδάσκουσα: Δρ. Μαρία Μιχαήλ (Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΗΜΜΥ)
Βοηθός διδασκαλίας: Γιώργος Κωνσταντινίδης

Ημερομηνία Ανακοίνωσης: 22.11.2023

Ημερομηνία Εξέτασης: 21.12.2023

Εργαστηριακή Άσκηση 5
Υλοποίηση προσομοιωτή κρυφής μνήμης (cache)

Περιγραφή Εργαστηριακής Άσκησης 5:

Σκοπός της άσκησης αυτής είναι η υλοποίηση ενός προσομοιωτή (simulator) κρυφής μνήμης (cache) σε γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου. Συγκεκριμένα, πρέπει να υλοποιήσετε έναν προσομοιωτή κρυφής μνήμης που θα δέχεται σαν είσοδο μια ακολουθία (sequence) διευθύνσεων μνήμης (memory addresses) και θα πρέπει να υλοποιεί ολόκληρη τη λειτουργία της κρυφής μνήμης. Ο προσομοιωτής πρέπει να υποστηρίζει κρυφή μνήμη οποιουδήποτε μεγέθους και οποιουδήποτε τύπου, δηλ. άμεσης απεικόνισης, συσχετιστικής συνόλου N δρόμων, και πλήρως συσχετιστικής (direct-mapped, N-way set-associative, fully-associative).

Λειτουργία προσομοιωτή, είσοδοι (inputs), και έξοδοι (outputs):

Ο προσομοιωτής της κρυφής μνήμης πρέπει να έχει την εξής λειτουργικότητα:

(1) Να δέχεται σαν **είσοδο** (input) ένα αρχείο που θα περιέχει **διευθύνσεις μνήμης**. Οι διευθύνσεις θα δίνονται σε δεκαδική μορφή (decimal). Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει μια διεύθυνση μνήμης είναι $2^{64}-1$, δηλ. οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιούνται στον προσομοιωτή σας για αποθήκευση διευθύνσεων μνήμης πρέπει να είναι μη προσημασμένες μεγέθους $64^{ωv}$ bits (**64-bit unsigned integers**).

(2) Να δέχεται σαν **είσοδο** (input) από τον χρήστη το **μέγεθος** της κρυφής μνήμης (**σε αριθμό blocks**) και τον **τύπο** της κρυφής μνήμης: **direct-mapped (DM)**, **set-associative (SA)**, ή **fully associative (FA)**. Για τον τύπο set-associative (SA), ο χρήστης πρέπει να δίνει σαν επιπλέον είσοδο (input) τον **αριθμό των δρόμων (ways)** σε κάθε σύνολο (set) της κρυφής μνήμης. Για παράδειγμα, ο αριθμός των δρόμων σε κάθε σύνολο μιας κρυφής μνήμης 4-way set-associative είναι 4.

(3) Για τους τύπους κρυφής μνήμης set-associative (SA) και fully associative (FA), να δέχεται σαν είσοδο (input) από τον χρήστη την **πολιτική αντικατάστασης block (block replacement policy)**. Ο προσομοιωτής πρέπει να υποστηρίζει δυο τέτοιες πολιτικές αντικατάστασης: (α) **Least-Recently Used (LRU)** και (β) **Static Re-Reference Interval Prediction (SRRIP)** (βλέπε επιπρόσθετο PDF αρχείο που είναι αναρτημένο στο Blackboard για τις λεπτομέρειες λειτουργίας του μηχανισμού SRRIP). Για την πολιτική SRRIP, ο προσομοιωτής πρέπει να δέχεται σαν **είσοδο** (input) και το μέγεθος σε bits του **Re-Reference Prediction Value (RRPV)**, δηλ., την τιμή της μεταβλητής **M**.

(4) Ο προσομοιωτής πρέπει να διαβάσει διαδοχικά όλες τις διευθύνσεις μνήμης που εμπεριέχονται στο αρχείο εισόδου (βλέπε σημείο (1) πιο πάνω), τη μια μετά την άλλη, και να προσομοιώνει την ανάλογη λειτουργία της κρυφής μνήμης.

(5) Στη συγκεκριμένη αυτή εργαστηριακή άσκηση, **δεν μας απασχολούν** (δηλαδή αγνοούμε) τα **ΔΕΔΟΜΕΝΑ (data)** και οι **ΕΤΙΚΕΤΕΣ (tags)** που αντιστοιχούν στην κάθε διεύθυνση μνήμης. Ο προσομοιωτής σας θα ασχολείται μόνο με τις **ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ μνήμης (memory addresses)**.

(6) Υποθέστε ότι το κάθε block στην κρυφή μνήμη έχει μέγεθος μιας λέξης (word), δηλ. υποστηρίζουμε **single-word blocks**.

(7) Μια εκτέλεση του προσομοιωτή τελειώνει όταν διαβαστούν όλες οι διευθύνσεις μνήμης σε μια συγκεκριμένη ακολουθία διευθύνσεων και ολοκληρωθεί η λειτουργία της κρυφής μνήμης που αφορά στις συγκεκριμένες διευθύνσεις. Στο τέλος κάθε εκτέλεσης, ο προσομοιωτής πρέπει να παράγει **αρχείο εξόδου** (output file) με τις **πληροφορίες** που φαίνονται στο Διάγραμμα 1 πιο κάτω. Το Διάγραμμα 1 αναφέρεται σε μια 4-way set-associative κρυφή μνήμη χωρητικότητας $64^{ωv}$ blocks (δηλ. 16 σύνολα/sets των $4^{ωv}$ δρόμων/ways) μετά την εκτέλεση της εξής ακολουθίας διευθύνσεων μνήμης: 0, 1, 2, 10, 12, 14, 16, 18, 26, 42.

Cache Contents: LRU replacement policy;

Set#	64 Block, 4 -way set-associative cache			
0	0	16	-	-
1	1	-	-	-
2	2	18	-	-
3	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	-	-	-	-
7	-	-	-	-
8	-	-	-	-
9	-	-	-	-
10	10	26	42	-
11	-	-	-	-
12	12	-	-	-
13	-	-	-	-
14	14	-	-	-
15	-	-	-	-

Διάγραμμα 1. Μερικές από τις πληροφορίες που πρέπει να εκτυπώνονται μέσα σε αρχείο εξόδου μετά την ολοκλήρωση της λειτουργίας του προσομοιωτή.

(8) Στα πλαίσια της εργαστηριακής αυτής άσκησης, θα σας δοθεί ένας αριθμός από αρχεία εισόδου (input files), με μια διαφορετική ακολουθία διευθύνσεων μνήμης στο κάθε αρχείο. Για κάθε αρχείο εισόδου, ο προσομοιωτής σας θα πρέπει να διαβάσει όλες τις διευθύνσεις και – στο τέλος της εκτέλεσης της λειτουργίας του – θα δημιουργήσει ένα αρχείο εξόδου (output file) που θα περιέχει τις πληροφορίες που φαίνονται στο Διάγραμμα 1 και κάποια επιπλέον στατιστικά. Συγκεκριμένα, το αρχείο εξόδου (ένα για κάθε αρχείο εισόδου) πρέπει να περιέχει τα εξής:

- I. **Όλα τα περιεχόμενα (διευθύνσεις μνήμης) της κρυφής μνήμης**, δηλ., τα περιεχόμενα του κάθε συνόλου (set) και του κάθε δρόμου (way).
- II. Τα ακόλουθα **6 στατιστικά στοιχεία**: (1) **Total Number of Cache Queries**, (2) **Total Number of Unique Addresses**, (3) **Total Number of Misses**, (4) **Total Number of Hits**, (5) **Miss Rate**, (6) και **Hit Rate**.

(9) Τα αρχεία εξόδου που θα παραχθούν από τον προσομοιωτή σας (βλέπε το σημείο (8) πιο πάνω) θα παραδοθούν στον διδάσκοντα ή στον βοηθό του εργαστηρίου στο τέλος της εξέτασης του εργαστηρίου για να χρησιμοποιηθούν στη βαθμολόγηση της εργαστηριακής άσκησης. Σημειώνεται ότι **η βαθμολογία θα βασιστεί αποκλειστικά και μόνο στα περιεχόμενα των αρχείων εξόδου του προσομοιωτή σας.**

Σημειώσεις:

(α) Οι διευθύνσεις μνήμης μπορούν να πάρουν **οποιαδήποτε τιμή** από το 0 μέχρι και το 4,294,967,295, δηλ. οι τιμές **δεν** πρέπει αναγκαστικά να είναι πολλαπλάσια του 4.

(β) Όταν η κρυφή μνήμη είναι συσχετιστική συνόλου N δρόμων (**N-way set-associative**), **ο προσομοιωτής πρέπει πάντοτε να συμπληρώνει το κάθε σύνολο (set) από αριστερά προς δεξιά** (υποθέτοντας ότι **η κρυφή μνήμη αναπαρίσταται σαν πίνακας δύο διαστάσεων**, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1), έτσι ώστε, εάν υπάρχουν άδειοι δρόμοι (ways) σε ένα σύνολο, αυτοί να είναι πάντοτε στη δεξιά πλευρά του συνόλου (set). Για παράδειγμα, στο Διάγραμμα 1 πιο πάνω, η διεύθυνση μνήμης 10 μπήκε πρώτη στον πιο αριστερό δρόμο του συνόλου 10, η διεύθυνση 26 μπήκε αργότερα στον δεύτερο-από-αριστερά δρόμο του συνόλου 10, και η διεύθυνση 42 στον τρίτο-από-αριστερά δρόμο. Προσέξτε ότι ο πίνακας που θα αναπαριστά τη συσχετιστική κρυφή μνήμη συνόλου N δρόμων θα είναι της μορφής:

(Συνολικός αριθμός συνόλων στην κρ. μνήμη) × (Συνολικός αριθμός δρόμων σε κάθε σύνολο)

(γ) Παρόμοια με το σημείο (β) πιο πάνω, όταν η κρυφή μνήμη είναι πλήρως συσχετιστική (**fully-associative**), **ο προσομοιωτής πρέπει πάντοτε να συμπληρώνει την κρυφή μνήμη από αριστερά προς δεξιά**, υποθέτοντας αυτή τη φορά ότι η κρυφή μνήμη αναπαρίσταται σαν **πίνακας με μια σειρά και όσες στήλες είναι το μέγεθος της κρυφής μνήμης** (σε αριθμό blocks). Δηλαδή, ο πίνακας που θα αναπαριστά την πλήρως συσχετιστική κρυφή μνήμη θα είναι της μορφής:

1 × (Μέγεθος κρυφής μνήμης σε αριθμό blocks)

(δ) Όταν η κρυφή μνήμη είναι άμεσης απεικόνισης (**direct-mapped**), ο προσομοιωτής πρέπει να αναπαριστά την κρυφή μνήμη σαν **πίνακα με μια στήλη και όσες σειρές είναι το μέγεθος της κρυφής μνήμης** (σε αριθμό blocks). Δηλαδή, ο πίνακας που θα αναπαριστά την κρυφή μνήμη άμεσης απεικόνισης θα είναι της μορφής:

(Μέγεθος κρυφής μνήμης σε αριθμό blocks) × 1

(ε) Όλες οι λεπτομέρειες της λειτουργίας της κρυφής μνήμης περιγράφονται στις σημειώσεις (διαφάνειες) των μαθημάτων HMY 212 και HMY 312, και στο βιβλίο

- D. A. Patterson and J. L. Hennessy, *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*, Morgan Kaufmann, 5th Edition, 2013, ISBN-13: 978-0124077263.

Συνιστάται οι φοιτητές να ανατρέξουν στα προαναφερθέντα για να φρεσκάρουν τις γνώσεις τους γύρω από τη λειτουργία της κρυφής μνήμης. Για υπενθύμιση των φοιτητών, ο διδάσκοντας θα επαναλάβει εν συντομία τις λεπτομέρειες λειτουργίας της κρυφής μνήμης σε διάλεξη που θα πραγματοποιηθεί στα πλαίσια του εργαστηρίου του HMY 314.