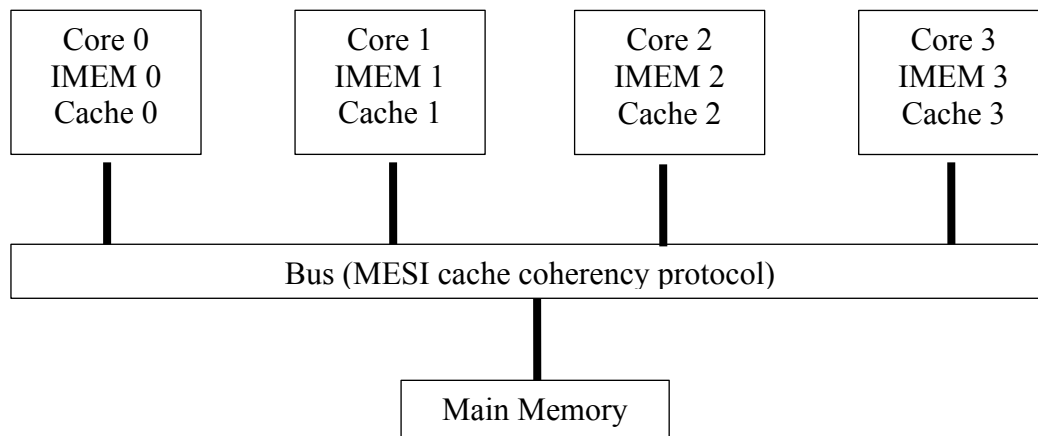


אוניברסיטת תל-אביב, הפקולטה להנדסה

פרויקט בקורס: ארכיטקטורה של מחשבים 0512.4461

שנת הלימודים תשפ"ו, סמסטר א'

בפרויקט נממש סימולטור של מעבד הכולל 4 ליבות אשר רצות במקביל:



כל ליבה הינה מצונררת, כוללת זיכרון הוראות SRAM פרטי, ומטמון נתונים פרטי. הליבות מחוברות באמצעות BUS העובד בפרוטוקול קוהרנטיות MESI לזיכרון ראשי משותף.

רגיסטרים

כל ליבה מכילה 16 רגיסטרים, שכל אחד מהם ברוחב 32 ביטים. רגיסטר מספר 1 הינו רגיסטר מיוחד שלא ניתן לכתוב אליו, ותמיד מכיל את שדה ה-immediate, לאחר בצוע sign extension, כפי שקודד בהוראת האסמבלי. הוא מתעדכן עבור כל הוראה כחלק מפענוח ההוראה. רגיסטר 0 הינו זהותית אפס. הוראות אשר כותבות לרגיסטר 0 לא משנות את ערכו.

זיכרון הוראות

לכל ליבה זיכרון הוראות SRAM פרטי ברוחב 32 סיביות ובעומק 1024 שורות. רגיסטר ה-PC לכן הינו ברוחב 10 ביטים, והוראות עוקבות מקדמות את PC באחד.

צנרת

בכל ליבה יש שימוש ב-delay slot, והצנרת כוללת 5 שלבים:

Fetch	Decode	Execute	Mem	Write Back
-------	--------	---------	-----	------------

אין שימוש במעקפים.

בניגוד לצנרת מיפס שלמדנו, אין שימוש בחצאי מחזורי שעון בגישה למערך הרגיסטרים אלא במחזור שעון שלם. בכל מחזור שעון ניתן לבצע שלוש קריאות ממערך הרגיסטרים + כתיבה במקביל, אבל את הדאטא שכותבים במחזור שעון מסוים נקבל בקריאה רק במחזור השעון הבא.

Branch Resolution מתבצע בשלב הפענוח.

ההוראות נקראות מזיכרון הוראות SRAM פנימי לליבה במחזור שעון בודד.

פיתרון Data Hazards בין הוראות מתבצע ע"י Stall של ההוראה התלויה בשלב הפענוח.

במקרה של החטאה במטמון הנתונים, מתבצע Stall של ההוראה שפנתה למטמון בשלב ה-Mem.

מטמון נתונים

בכל ליבה יש מטמון נתונים במיפוי ישיר בגודל 512 מילים. זמן הפגיעה במטמון הינו מחזור שעון בודד, גודל הבלוק הינו 8 מילים, ומדיניות הכתיבה הינה write back, write allocate. המטמון ממומש באמצעות שני זכרונות SRAM: הזיכרון הראשון, DSRAM, הינו ברוחב 32 ביטים ובעומק 512 מילים, ומכיל את הדאטא השמור במטמון.

הזיכרון השני, TSRAM, מכיל 64 שורות, כאשר כל שורה מכילה עבור כל בלוק במטמון את התג ואת מצב פרוטוקול הקוהרנטיות MESI:

13:12	11:0
MESI (0: Invalid, 1: Shared, 2: Exclusive, 3: Modified)	Tag

בתחילת הריצה זכרונות ה- DSRAM ו- TSRAM מאופסים.

זכרון ראשי ו- MESI BUS

הגישה לנתונים הינה למילים בלבד (אין תמיכה בבתים). מרחב כתובות הנתונים הינו 20 ביטים, וגודל הזיכרון הראשי הינו 2 בחזקת 20 מילים.
ה- BUS בין הליבות לזיכרון הראשי מכיל את הקווים הבאים:

bus_origid	3 bits	Originator of this transaction 0: core 0 1: core 1 2: core 2 3: core 3 4: main memory
bus_cmd	2 bits	0: no command 1: BusRd 2: BusRdX 3: Flush
bus_addr	20 bits	word address
bus_data	32 bits	word data
bus_shared	1 bit	Set to 1 when answering a BusRd transaction if any of the cores has the data in the cache, otherwise set to 0.

בכל מחזור שעון על קווי הבס יש טראנסקציה בודדת. במידה ומספר מטמונים רוצים לפנות לבס, מתבצעת ארביטרציה הוגנת בשיטת Round-Robin (הליבה האחרונה שקיבלה גישה היא כעת בעדיפות אחרונה). לא תינתן גישה לבס לליבה מסויימת כל עוד הבס תפוס או כל עוד טראנסקציה קודמת מסוג BusRd או BusRdX לא הסתיימה ע"י טראנסקציית Flush.

מי שיוצר את הטראנסקציה וכותב לקווי הבס במחזור שעון זה (ליבה או הזיכרון הראשי) ממלא קוד בקו ה- bus_origid.

הוראות BusRd ו-BusRdX מעבירות כפרמטר את כתובת המילה בזיכרון הראשי. במידה והדאטא עדכני בזיכרון הראשי, הזיכרון הראשי יחזיר את הבלוק שכולל את המילה באמצעות הוראות Flush. המילה הראשונה בבלוק תוחזר בהשהייה של 16 מחזורי שעון לאחר קבלת הוראת הקריאה, ושאר המילים בבלוק במחזורי שעון עוקבים. הדאטא יוחזר בקווי ה-bus_data, וכתובת המילה בזיכרון הראשי ב-bus_addr.

עבור BusRd, במתן ההוראה לבס, bus_shared מאותחל לאפס. כחלק ממנגנון ה-Snooping כל מטמון בכל ליבה בודק האם יש פגיעה, ואם כן מעלה את קו ה-bus_shared ל-1. כאשר הדאטא חוזר, בהסתמך על קו ה-bus_shared, מצב הפרוטוקול יקבע כ-Exclusive או Shared.

במידה והדאטא העדכני נמצא במטמון של ליבה אחרת במצב Modified, ליבה זו תחזיר את הבלוק באמצעות הוראות Flush והזיכרון הראשי יתעדכן במקביל.

סט ההוראות וקידודם

לכל ליבה יש פורמט אחיד לקידוד ההוראות לפי חלוקת הביטים הבאה:

11:0	15:12	19:16	23:20	31:24
immediate	rt	rs	rd	Opcode

:האופקודים הנתמכים ע"י המעבד ומשמעות כל הוראה נתונים בטבלה הבאה

Meaning	Name	Opcode Number
$R[rd] = R[rs] + R[rt]$	add	0
$R[rd] = R[rs] - R[rt]$	sub	1
$R[rd] = R[rs] \& R[rt]$	and	2
$R[rd] = R[rs] R[rt]$	or	3
$R[rd] = R[rs] \wedge R[rt]$	xor	4
$R[rd] = R[rs] * R[rt]$	mul	5
$R[rd] = R[rs] \ll R[rt]$	sll	6

$R[rd] = R[rs] \gg R[rt]$, arithmetic shift with sign extension	sra	7
$R[rd] = R[rs] \gg R[rt]$, logical shift	srl	8
if ($R[rs] == R[rt]$) $pc = R[rd][\text{low bits } 9:0]$	beq	9
if ($R[rs] \neq R[rt]$) $pc = R[rd][\text{low bits } 9:0]$	bne	10
if ($R[rs] < R[rt]$) $pc = R[rd][\text{low bits } 9:0]$	blt	11
if ($R[rs] > R[rt]$) $pc = R[rd][\text{low bits } 9:0]$	bgt	12
if ($R[rs] \leq R[rt]$) $pc = R[rd][\text{low bits } 9:0]$	ble	13
if ($R[rs] \geq R[rt]$) $pc = R[rd][\text{low bits } 9:0]$	bge	14
$R[15] = \text{next instruction address}$, $pc = R[rd][9:0]$	jal	15
$R[rd] = \text{MEM}[R[rs]+R[rt]]$	lw	16
$\text{MEM}[R[rs]+R[rt]] = R[rd]$	sw	17
Halt this core Exit simulator when all cores reached halt and the pipelines are empty	halt	20

סימולטור

הסימולטור מסמלץ את צנרות הליבות, המטמונים, והזיכרון הראשי. בתחילת הריצה כל ליבה מתחילה לרוץ החל מ- PC=0. סיום הריצה ויציאה מהסימולטור מתבצע כאשר כל הליבות בצעו את הוראת ה- HALT והצנרות התרוקנו. הסימולטור יכתב בשפת C ויקומפל לתוך command line application אשר מקבל 27 command line parameters לפי שורת ההרצה הבאה:

```
sim.exe imem0.txt imem1.txt imem2.txt imem3.txt memin.txt memout.txt  
regout0.txt regout1.txt regout2.txt regout3.txt core0trace.txt core1trace.txt  
core2trace.txt core3trace.txt bustrace.txt dsram0.txt dsram1.txt dsram2.txt  
dsram3.txt tsram0.txt tsram1.txt tsram2.txt tsram3.txt stats0.txt stats1.txt  
stats2.txt stats3.txt
```

בנוסף יש לתמוך גם בהרצת sim.exe ללא פרמטרים, ואז שמות הקבצים נלקחים כ- default לפי השמות לעיל, מאותה ספרייה שבה נמצא הקובץ sim.exe.

הקבצים imem0.txt – imem3.txt הינם קבצי קלט בפורמט טקסט אשר כל אחד מהם מכיל את תוכן זיכרון ההוראות של הליבה המתאימה בתחילת הריצה. כל שורה בקובץ מכילה תוכן שורה בזיכרון ההוראות, החל מכתובת אפס, בפורמט של 8 ספרות הקסאדצימליות. במידה ומספר השורות בקובץ קטן מ- 1024, ההנחה הינה ששאר הזיכרון מעל הכתובת האחרונה שאותחלה בקובץ, מאופס. ניתן להניח שקובץ הקלט תקין.

הקובץ memin.txt הינו קובץ קלט בפורמט טקסט אשר מכיל את תוכן הזיכרון הראשי בתחילת הריצה. כל שורה בקובץ מכילה תוכן שורה בזיכרון, החל מכתובת אפס, בפורמט של 8 ספרות הקסאדצימליות. במידה ומספר השורות בקובץ קטן מ- 2 בחזקת 20 ההנחה הינה ששאר הזיכרון מעל הכתובת האחרונה שאותחלה בקובץ, מאופס. ניתן להניח שקובץ הקלט תקין.

הקובץ memout.txt הינו קובץ פלט, באותו פורמט כמו memin.txt, שמכיל את תוכן הזיכרון הראשי בסיום הריצה.

הקבצים regout0.txt – regout3.txt הינם קבצי פלט, שמכילים את תוכן הרגיסטרים R2-R15 של הליבה המתאימה בסיום הריצה (שימו לב שאין להדפיס את הקבועים R0 ו- R1). כל שורה תיכתב באותו פורמט כמו שורה ב- 8, dmemin.txt ספרות הקסאדצימליות.

הקבצים **core0trace.txt – core3trace.txt** הינם קבצי פלט, המכילים מעקב אחר מצב הצנרת. עבור כל ליבה, בכל מחזור שעון שלפחות אחד מהשלבים בצנרת פעיל, תודפס שורת טסקט המציינת איזו הוראה נמצאת בכל שלב בצנרת, וכמו כן תוכן מערך הרגיסטרים בפורמט הבא:

CYCLE FETCH DECODE EXEC MEM WB R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10 R11
R12 R13 R14 R15

השדה CYCLE הינו מספר מחזור השעון ומודפס בבסיס דצימלי. השדות FETCH עד WB מכילים את ה-PC של ההוראה שנמצאת בשלב המתאים בצנרת ומודפסים ב-3 ספרות הקסאדצימליות. במידה ושלב הצנרת אינו פעיל (למשל בעת מילוי הצנרת או כאשר יש בועית בצנרת בשלב זה) יש להדפיס שלושה סימני מינוס (---).

אח"כ יש את תוכן מערך הרגיסטרים (החל מרגיסטר R2) בתחילת מחזור השעון (ה-Q של הפליפלופים, לא כולל שינויים במחזור שעון זה), כאשר כל רגיסטר מודפס ב-8 ספרות הקסאדצימליות.

הקובץ **bustrace.txt** הינו קובץ פלט, שמכיל את תוכן קווי ה-BUS בכל מחזור שעון שבו bus_cmd שונה מאפס בפורמט הבא:

CYCLE bus_origid bus_cmd bus_addr bus_data bus_shared

השדה CYCLE הינו מספר מחזור השעון ומודפס בבסיס דצימלי. שאר השדות מודפסות בהקסאדצימלי (שדות bus_origid, bus_shared, bus_cmd בספרה בודדת, bus_addr ב-5 ספרות ו-bus_data ב-8 ספרות).

הקבצים **dsram0.txt – dsram3.txt** הינם קבצי פלט, באותו פורמט כמו memin.txt, שכל אחד מהם מכיל את תוכן זיכרון ה-DSRAM של המטמון בליבה המתאימה בסיום הריצה, כאשר כל שורה מודפסת ב-8 ספרות הקסאדצימליות. הקבצים **tsram0.txt – tsram3.txt** הינם קבצי פלט, באותו פורמט כמו memin.txt, שכל אחד מהם מכיל את תוכן זיכרון ה-TSRAM של המטמון בליבה המתאימה בסיום הריצה, כאשר כל שורה מודפסת ב-8 ספרות הקסאדצימליות.

הקבצים **stats0.txt – stats3.txt** הינם קבצי פלט, אשר מכילים סטטיסטיקות עבור כל ליבה. כל קובץ מכיל מספר שורות, כל שורה מכילה שם ומונה X בפורמט הבא, כאשר X דצימאלי:

row contents	explanation
cycles X	number of clock cycles the core was running till halt
instructions X	number of instructions executed
read_hit X	number of cache read hits
write_hit X	number of cache write hits
read_miss X	number of cache read misses
write_miss X	number of cache write misses
decode_stall X	number of cycles a pipeline stall was inserted in decode stage
mem_stall X	number of cycles a pipeline stall was inserted in mem stage

דרישות הגשה

1. יש להגיש קובץ דוקומנטציה של הפרויקט, חיצוני לקוד, בפורמט pdf, בשם project1_id1_id2_id3.pdf כאשר id1,id2,id3 הם מספרי תעודת הזהות שלכם.

2. הפרויקט יכתב בשפת התכנות סי. יש להקפיד שיהיו הערות בתוך הקוד המסבירות את פעולתו.

3. יש להגיש את הקוד ב- visual studio community edition בסביבת windows. יש להגיש את קובץ ה- solution, ולוודא שהקוד מתקמפל ורץ, כך שניתן יהיה לבנות אותו ע"י לחיצה על build solution. יש להגיש גם את ספריית ה- build כולל קובץ ה- executable הבנוי.

4. תוכניות בדיקה. הפרויקט שלכם יבדק בין השאר ע"י תוכניות בדיקה שלא תקבלו מראש, וגם ע"י תוכניות בדיקה שאתם תכתבו באסמבלי. יש להגיש שלוש תוכניות בדיקה:

א. תוכנית אשר רצה על 4 ליבות במקביל, כאשר כל ליבה מקדמת מונה בכתובת 0 בזיכרון הראשי (אשר מאותחל לאפס) 128 פעמים, אבל הקידום מתבצע בטור לפי סדר הליבות. כלומר: ליבה 0 מבצעת את הקידום הראשון, אח"כ ליבה 1 מבצעת את הקידום הבא, ואז ליבה 2, ואז ליבה 3, וחוזרים לליבה 0. בסיום הריצה יש לוודא כי

הערך בכתובת 0 (שאמור להיות 512) נכתב חזרה לזיכרון הראשי
(באמצעות אילוף conflict miss).

ב. תוכנית המבצעת כפל של שתי מטריצות בגודל 16×16 (כל איבר
במטריצת התוצאה הינו מכפלה סקלארית של שורה בעמודה), אשר
רצה על ליבה בודדת, ליבה מספר 0. ערכי המטריצה הראשונה
נמצאים בכתובות 0 עד $0xFF$ בזיכרון הראשי, והמטריצה השנייה
בכתובות $0x100$ עד $0x1FF$. מטריצת התוצאה תיכתב לכתובות $0x200$
עד $0x2FF$. כל מטריצה מסודרת בזיכרון כמו בשפת סי: ערכי שורה
ראשונה משמאל לימין, ואז עוברים לשורה הבאה וכך הלאה. ניתן
להניח שערכי המטריצות קטנים מספיק כך שלא יתרחש overflow.

ג. בצוע כפל של אותן המטריצות כמו בתוכנית בדיקה ב', אבל על כל 4
הליבות במקביל, כאשר כל ליבה מבצעת חלק מהחישוב. **ניתן ניקוד**
גבוה יותר לזמן ריצה כולל נמוך יותר.

5. את תוכניות הבדיקה יש להגיש בשלוש תתי-ספריות בשמות:

counter, mulserial, mulparallel

כל ספרייה תכיל 28 קבצים: את קובץ ההרצה sim.exe, את קבצי הקלט
הדרושים להרצה, וכמו כן את קבצי הפלט שקיבלתם:

sim.exe imem0.txt imem1.txt imem2.txt imem3.txt memin.txt memout.txt
regout0.txt regout1.txt regout2.txt regout3.txt core0trace.txt core1trace.txt
core2trace.txt core3trace.txt bustrace.txt dsram0.txt dsram1.txt dsram2.txt
dsram3.txt tsram0.txt tsram1.txt tsram2.txt tsram3.txt stats0.txt stats1.txt
stats2.txt stats3.txt