אוניברסיטת תל-אביב, הפקולטה להנדסה

פרויקט בקורס: מבנה המחשב 0512.4400

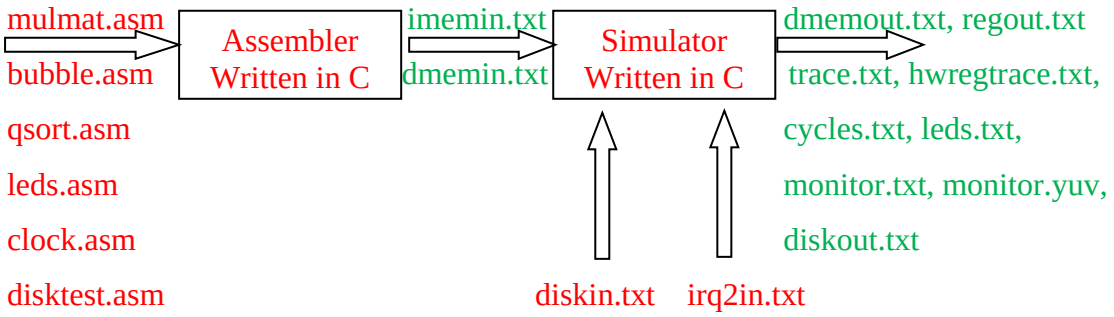
שנת הלימודים תשפ"א, סמסטר א'

בפרויקט נתרגל את נושאי שפת המחשב, קלט/פלט, וכמו כן נתרגל את יכולות התכנות שלנו בשפת סי. נממש אסמבלר וסימולטור (תוכניות נפרדות), ונכתוב תוכניות בשפת אסמבלי עבור מעבד RISC בשם SIMP, אשר דומה למעבד MIPS אבל פשוט ממנו.

הסימולטור יסמלץ את מעבד ה- SIMP, וכמו כן מספר התקני קלט/פלט: נורות, מסך מחשב, ודיסק קשיח. המעבד עובד בתדר של 1024 הרץ – מריץ 1024 מחזורי שעון בשנייה. הוראות אשר אינן משתמשות בקבוע רצות במחזור שעון בודד, ואילו הוראות אשר משתמשות בקבוע רצות בשני מחזורי שעון.

שימו לב: הסימולטור מסמלץ מעבד "איטי" שמריץ רק 1024 מחזורי שעון בשנייה אבל אין צורך להאט את זמן הריצה האמיתי של הסימולטור על המחשב שלכם לקצב של מעבד ה- SIMP -- הסימולטור עצמו רץ על המעבד של המחשב האישי שלכם שעובד בתדר של גיגהרצים, ויכול לרוץ מאוד מהר ולסמלץ הרבה יותר מ- 1024 מחזורי שעון מסומלצים בשנייה של זמן "אמיתי" כפי שנמדד ע"י שעון יד למשל, חיצוני למחשב.

הדיאגרמה הבאה ממחישה את הפרויקט:



החלקים שאותם תכתבו בפרויקט ידנית מסומנים בצבע אדום, ואילו קבצי פלט שייוצרו אוטומטית ע"י תוכנות האסמבלר והסימולטור שתכתבו מסומנים בצבע ירוק.

רגיסטרים

מעבד SIMP מכיל 16 רגיסטרים, שכל אחד מהם 32 ברוחב ביטים. שמות הרגיסטרים, מספרם, ותפקיד כל אחד מהם בהתאם ל- calling conventions, נתונים בטבלה הבאה:

Register Number	Register Name	Purpose
0	$zero	Constant zero
1	$imm	Sign extended immediate
2	$v0	Result value
3	$a0	Argument register
4	$a1	Argument register
5	$t0	Temporary register
6	$t1	Temporary register
7	$t2	Temporary register
8	$t3	Temporary register
9	$s0	Saved register
10	$s1	Saved register
11	$s2	Saved register
12	$gp	Global pointer (static data)
13	$sp	Stack pointer
14	$fp	Frame Pointer
15	$ra	Return address

שמות הרגיסטרים ותפקידם דומים למה שראינו בהרצאה ובתירגולים עבור מעבד MIPS, בהבדל אחד: רגיסטר מספר 1, $imm, 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 ל- $zero לא משנות את ערכו.

זיכרונות הוראות ונתונים

זיכרון ההוראות הינו ברוחב 20 סיביות ובעומק 1024 שורות. רגיסטר ה- PC לכן הינו ברוחב 10 ביטים, והוראות עוקבות מקדמות את PC באחד במידה וההוראה מקודדת בשורה בודדת, או בשניים במידה וההוראה מקודדת בשתי שורות.

זיכרון הנתונים הינו ברוחב 32 ביטים ובעומק 4096 שורות. הכתובת לזיכרון הנתונים היא לכן ברוחב 12 ביטים. בניגוד למעבד MIPS, למעבד SIMP אין תמיכה ב- byte או ב- short. כל גישה לזיכרון הנתונים קוראת או כותבת מילה ברוחב 32 ביטים.

סט ההוראות וקידודם

למעבד SIMP יש שני פורמטים לקידוד ההוראות:

הפורמט הראשון הינו בשימוש עבור הוראות שאין בהן שימוש בשדה הקבוע. הוראות אלו מקודדות בשורה אחת בזיכרון ההוראות לפי חלוקת הביטים הבאה:

19:12	11:8	7:4	3:0
Opcode	rd	rs	rt

הוראות אשר משתמשות בקבוע מקודדות בשתי שורות בזיכרון ההוראות, כאשר השורה הראשונה זהה לפורמט הראשון, ובשורה השנייה מופיע הקבוע באופן הבא:

19:12	11:8	7:4	3:0
Opcode	rd	rs	rt
immediate (20 bits)			

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

Opcode Number	Name	Meaning
0	add	R[rd] = R[rs] + R[rt]
1	sub	R[rd] = R[rs] – R[rt]
2	and	R[rd] = R[rs] & R[rt]
3	or	R[rd] = R[rs] | R[rt]
4	xor	R[rd] = R[rs] ^ R[rt]
5	mul	R[rd] = R[rs] * R[rt]
6	sll	R[rd] = R[rs] << R[rt]
7	sra	R[rd] = R[rs] >> R[rt], arithmetic shift with sign extension
8	srl	R[rd] = R[rs] >> R[rt], logical shift
9	beq	if (R[rs] == R[rt]) pc = R[rd][low bits 9:0]
10	bne	if (R[rs] != R[rt]) pc = R[rd] [low bits 9:0]
11	blt	if (R[rs] < R[rt]) pc = R[rd] [low bits 9:0]
12	bgt	if (R[rs] > R[rt]) pc = R[rd] [low bits 9:0]
13	ble	if (R[rs] <= R[rt]) pc = R[rd] [low bits 9:0]

14	bge	if (R[rs] >= R[rt]) pc = R[rd] [low bits 9:0]
15	jal	R[15] = next instruction address, pc = R[rd][9:0]
16	lw	R[rd] = DMEM[R[rs]+R[rt]]
17	sw	DMEM[R[rs]+R[rt]] = R[rd]
18	reti	PC = IORegister[7]
19	in	R[rd] = IORegister[R[rs] + R[rt]]
20	out	IORegister [R[rs]+R[rt]] = R[rd]
21	halt	Halt execution, exit simulator

קלט/פלט

המעבד תומך בקלט/פלט באמצעות הוראות in ו- out הניגשות למערך "רגיסטרי חומרה" כמפורט בטבלה מטה. הערכים ההתחלתיים של רגיסטרי החומרה ביציאה מריסט הם 0.

IORegister Number	Name	number bits	Meaning
0	irq0enable	1	IRQ 0 enabled if set to 1, otherwise disabled.
1	irq1enable	1	IRQ 1 enabled if set to 1, otherwise disabled.
2	irq2enable	1	IRQ 2 enabled if set to 1, otherwise disabled.
3	irq0status	1	IRQ 0 status. Set to 1 when irq 0 is triggered.
4	irq1status	1	IRQ 1 status. Set to 1 when irq 1 is triggered.
5	irq2status	1	IRQ 2 status. Set to 1 when irq 2 is triggered.
6	irqhandler	12	PC of interrupt handler
7	irqreturn	12	PC of interrupt return address
8	clks	32	cyclic clock counter. Starts from 0 and increments every clock. After reaching 0xffffffff, the counter rolls back to 0.
9	leds	32	Connected to 32 output pins driving 32 leds. Led number i is on when leds[i] == 1, otherwise its off.
10	reserved	32	Reserved for future use
11	timerenable	1	1: timer enabled 0: timer disabled

12	timercurrent	32	current timer counter
13	timermax	32	max timer value
14	diskcmd	2	0 = no command 1 = read sector 2 = write sector
15	disksector	7	sector number, starting from 0.
16	diskbuffer	12	Memory address of a buffer containing the sector being read or written. Each 512 byte sector will be read/written using DMA in 128 words.
17	diskstatus	1	0 = free to receive new command 1 = busy handling a read/write commad
18	monitorcmd	1	0 = no command 1 = write pixel to monitor
19	monitorx	11	X coordinate of pixel (0 – 1279)
20	monitory	10	Y coordinate of pixel (0 – 719)
21	monitordata	8	Pixel luminance (gray) value (0 – 255)

פסיקות

מעבד SIMP תומך ב- 3 פסיקות: irq0, irq1, irq2.
פסיקה 0 משויכת לטיימר, וקוד האסמבלי יכול לתכנת כל כמה זמן הפסיקה תתרחש.

פסיקה 1 משויכת לדיסק הקשיח המסומלץ, באמצעותה הדיסק מודיע למעבד כאשר סיים לבצע הוראת קריאה או כתיבה.

פסיקה 2 מחוברת לקו חיצוני למעבד irq2. קובץ קלט לסימולטור קובע מתי הפסיקה מתרחשת.

במחזור השעון בו הפסיקה מתקבלת, מדליקים את אחד הרגיסטרים irq0status, irq1status, irq2status בהתאמה. אם מספר פסיקות מתקבלות באותו מחזור שעון, ידלקו בהתאמה מספר רגיסטרי סטטוס.

לפני בצוע כל הוראה, המעבד בודק את הסיגנל:

irq = (irq0enable & irq0status) | (irq1enable & irq1status) | (irq2enable & irq2status)

במידה ו- irq == 1, והמעבד לא נמצא כרגע בתוך שגרת הטיפול בפסיקה, המעבד קופץ לשגרת הטיפול בפסיקה שכתובתה בזיכרון נתונה ברגיסטר חומרה irqhandler. כלומר במחזור שעון זה מתבצעת ההוראה ב- PC = irqhandler במקום ב- PC המקורי . באותו מחזור שעון ה- PC המקורי נשמר לתוך רגיסטר חומרה irqreturn.

שימו לב: במידה והמעבד נמצא כרגע באמצע בצוע הוראה שמשתמשת בקבוע ולוקחת שני מחזורי שעון, המעבד קודם כל יסיים את ההוראה ויבדוק את סיגנל ה- irq רק בסיום ההוראה.

לעומת זאת במידה ו- irq == 1 והמעבד עדיין נמצא בתוך שגרת הטיפול בפסיקה קודמת (כלומר עדיין לא הריץ את הוראת ה- reti), המעבד יתעלם, לא יקפוץ וימשיך להריץ את הקוד כרגיל בתוך שגרת הפסיקה (כאשר המעבד יחזור מהפסיקה, הוא יבדוק שוב את irq ואם יהיה צורך יקפוץ שוב לשגרת הפסיקה).

קוד האסמבלי של שגרת הפסיקה יבדוק את הביטים של irqstatus, ולאחר טיפול מתאים בפסיקה יכבה את הביטים.

חזרה משגרת הפסיקה מתבצעת באמצעות הוראת reti, שתציב PC = irqreturn.

טיימר

מעבד SIMP תומר בטיימר של 32 ביטים, המחובר לפסיקה irq0. הוא מאופשר כאשר timerenable = 1.
ערך מונה הטיימר הנוכחי שמור ברגיסטר חומרה timercurrent. בכל מחזור שעון שבו הטיימר מאופשר, רגיסטר timercurrent מקודם באחד.
במחזור השעון שבו timercurrent = timermax, מדליקים את irqstatus0. במחזור שעון זה במקום לקדם את timercurrent, מאפסים אותו חזרה לאפס.

דיסק קשיח

למעבד SIMP מחובר דיסק קשיח בגודל 64 קילובייט, המורכב מ- 128 סקטורים בגודל 512 בתים כל סקטור. הדיסק מחובר לפסיקה מספר 1, irq1, ומשתמש ב- DMA להעתקת הסקטור מהזיכרון לדיסק או להיפך.

תוכנו ההתחלתי של הדיסק הקשיח נתון בקובץ הקלט diskin.txt, ותוכן הדיסק בסיום הריצה ייכתב לקובץ diskout.txt.

לפני מתן הוראת קריאה או כתיבה של סקטור לדיסק הקשיח, קוד האסמבלי בודק שהדיסק פנוי לקבלת הוראה חדשה ע"י בדיקת רגיסטר חומרה diskstatus.

במידה והדיסק פנוי, כותבים לרגיסטר disksector את מספר הסקטור שרוצים לקרוא או לכתוב, ולרגיסטר diskbuffer את הכתובת בזיכרון. רק לאחר ששני רגיסטרים אלו מאותחלים, נותנים הוראת כתיבה או קריאה ע"י כתיבה לרגיסטר חומרה diskcmd.

זמן הטיפול של הדיסק בהוראת קריאה או כתיבה הוא 1024 מחזורי שעון. במהלך זמן זה יש להעתיק את תוכן הבפר לדיסק במידה והייתה כתיבה, או להיפך להעתיק את תוכן הסקטור לבפר אם הייתה קריאה.

כל עוד לא עברו 1024 מחזורי שעון מקבלת ההוראה, רגיסטר diskstatus יסמן שהדיסק עסוק.

לאחר 1024 מחזורי שעון, במקביל ישונו רגיסטר ה- diskcmd ו- diskstatus לערך 0, והדיסק יודיע על פסיקה ע"י הדלקת irqstatus1.

מסך מחשב

למעבד SIMP מחובר מוניטור מונוכרומטי ברזולוציה 352x288 פיקסלים. כל פיקסל מיוצג ע״י 8 ביטים שמייצגים את גוון האפור של הפיקסל (luminance) כאשר 0 מסמן צבע שחור, 255 צבע לבן, וכל מספר אחר בתחום מתאר גוון אפור בין שחור ללבן באופן לינארי.

במסך יש frame buffer פנימי בגודל 352x288 המכיל את ערכי הפיסקלים שכעת מוצגים על המסך. בתחילת העבודה כל הערכים מכילים אפס.

רגיסטר monitorx מכיל את קואורדינטת ה- X של הפיקסל שאותו המעבד רוצה לכתוב.
X=0 הינו הפיקסל השמאלי, ו- X=351 הפיקסל הימני.

רגיסטר monitory מכיל את קואורדינטת ה- Y של הפיקסל שאותו המעבד רוצה לכתוב.
Y=0 הינו הפיקסל העליון, ו- Y=287 הפיקסל התחתון.

רגיסטר monitordata מכיל ערך הפיקסל שאותו המעבד רוצה לכתוב.

רגיסטר monitorcmd משמש עבור כתיבה של פיקסל. במחזור השעון שבו יש כתיבה monitorcmd=1 באמצעות הוראת out, מתבצע עדכון של הפיסקל שתוכנו ברגיסטר monitordata על המסך.
קריאה מרגיסטר monitorcmd באמצעות הוראת in תחזיר את הערך 0.

סימולטור

הסימולטור מסמלץ את לולאת ה- fetch-decode-execute. בתחילת הריצה PC=0. בכל איטרצייה מביאים את ההוראה הבאה בכתובת ה- PC, מפענחים את ההוראה בהתאם לקידוד, מעדכנים את רגיסטר אחד ע״י בצוע sign extension לשדה ה- immediate, ואח״כ מבצעים את ההוראה. בסיום ההוראה מעדכנים את PC לערך PC+1 במידה ולא היה שימוש בקבוע, או PC+2 במידה והיה שימוש בקבוע, אלא אם כן בצענו הוראת קפיצה שמעדכנת את ה- PC לערך אחר. סיום הריצה ויציאה מהסימולטור מתבצע כאשר מבצעים את הוראת ה- HALT.

הסימולטור יכתב בשפת C ויקומפל לתוך command line application אשר מקבל 13 command line parameters לפי שורת ההרצה הבאה:

sim.exe imemin.txt dmemin.txt diskin.txt irq2in.txt dmemout.txt regout.txt trace.txt hwregtrace.txt cycles.txt leds.txt monitor.txt monitor.yuv diskout.txt

הקובץ **imemin.txt** הינו קובץ קלט בפורמט טקסט אשר מכיל את תוכן זיכרון ההוראות בתחילת הריצה. כל שורה בקובץ מכילה תוכן שורה בזיכרון ההוראות, החל מכתובת אפס, בפורמט של 5 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 **dmemin.txt** הינו קובץ קלט בפורמט טקסט אשר מכיל את תוכן זיכרון הנתונים בתחילת הריצה. כל שורה בקובץ מכילה תוכן שורה בזיכרון הנתונים, החל מכתובת אפס, בפורמט של 8 ספרות הקסאדצימליות. במידה ומספר השורות בקובץ קטן מ- 4096, ההנחה הינה ששאר הזיכרון מעל הכתובת האחרונה שאותחלה בקובץ, מאופס. ניתן להניח שקובץ הקלט תקין.

הקובץ **diskin.txt** הינו קובץ קלט, באותו פורמט כמו dmemin.txt, שמכיל את תוכן הדיסק הקשיח בתחילת הריצה.

הקובץ **irq2in.txt** הינו קובץ קלט, המכיל את מספרי מחזורי השעון שבהם קו הפסיקה החיצוני irq2 עלה ל- 1, כל מחזור שעון כזה בשורה נפרדת בסדר עולה. הקו כל פעם עולה ל- 1 למחזור שעון בודד ואז יורד חזרה לאפס (אלא אם כן מופיעה שורה נוספת בקובץ עבור מחזור השעון הבא).

ארבעת קבצי הקלט צריכים להיות קיימים אפילו אם בקוד שלכם אין בהם שימוש (לדוגמא גם עבור קוד אסמבלי שאינו משתמש בדיסק הקשיח יהיה קיים קובץ קלט diskin.txt, כאשר מותר גם להשאיר את תוכנו ריק).

הקובץ **dmemout.txt** הינו קובץ פלט, באותו פורמט כמו dmemin.txt, שמכיל את תוכן זיכרון הנתונים בסיום הריצה.

הקובץ **regout.txt** הינו קובץ פלט, שמכיל את תוכן הרגיסטרים R2-R15 בסיום הריצה (שימו לב שאין להדפיס את הקבועים R0 ו- R1). כל שורה תיכתב באותו פורמט כמו שורה ב- dmemin.txt, 8 ספרות הקסאדצימליות.

הקובץ **trace.txt** הינו קובץ פלט, המכיל שורת טקסט עבור כל הוראה שבוצעה ע״י המעבד בפורמט הבא:

PC INST R0 R1 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10 R11 R12 R13 R14 R15

כל שדה מודפס בספרות הקסאדצימליות. ה- PC הינו ה- Program Counter של ההוראה ומודפס ב- 3 ספרות הקסאדצימליות, ה- INST הינו קידוד ההוראה כפי שנקרא מהזיכרון, ומודפס ב- 5 ספרות הקסאדצימליות. ואח"כ יש את תוכן הרגיסטרים **לפני** ביצוע ההוראה (כלומר את תוצאת הביצוע ניתן לראות רק ברגיסטרים של השורה הבאה), כאשר כל רגיסטר מודפס ב- 8 ספרות הקסאדצימליות.

בשדה R0 יש לכתוב 8 אפסים. בשדה R1 יש לכתוב את תוכן ה- Immediate שנקרא מתוך ההוראה, לאחר ביצוע sign extension ל- 32 סיביות. למשל אם כל 20 הביטים בקבוע היו כולם אחדים, אז נכתוב עבור R1 את הערך FFFFFFFF.

הקובץ **hwregtrace.txt** הינו קובץ פלט, המכיל שורת טקסט עבור כל קריאה או כתיבה לרגיסטר חומרה (באמצעות הוראות in ו- out) בפורמט הבא:

CYCLE READ/WRITE NAME DATA

כאשר השדה CYCLE הוא מספר מחזור השעון בדצימאלי.

השדה הבא מכיל READ או WRITE בהתאם להאם קוראים או כותבים לרגיסטר החומרה.

השדה NAME מכיל את שם רגיסטר החומרה כפי שמופיע בטבלה.

השדה DATA מכיל את הערך שנכתב או נקרא ב- 8 ספרות הקסאדצימליות.

הקובץ **cycles.txt** הינו קובץ פלט, שמכיל שתי שורות: שורה ראשונה מכילה את זמן הריצה הכולל במחזורי שעון, ושורה שנייה מכילה את מספר הוראות האסמבלי שבוצעו.

הקובץ **leds.txt** מכיל את סטטוס 32 הנורות. בכל מחזור שעון שאחת הנורות משתנה (נדלקת או נכבית), כותבים שורה עם שני מספרים ורווח ביניהם: המספר השמאלי הינו מחזור השעון, בדצימאלי, והמספר הימני מצב כל 32 הנורות ב- 8 ספרות הקסאדצימליות.

הקובץ **monitor.txt** מכיל את ערכי הפיסקלים שבמסך בסיום הריצה. כל שורה מכילה ערך פיסקל בודד (8 ביטים) בשתי ספרות הקסאדצימליות, כאשר סריקת המסך היא מלמעלה למטה, ומשמאל לימין. לדוגמא השורה הראשונה בקובץ מכילה את ערך הפיקסל בצד שמאל למעלה, והשורה האחרונה את הפיקסל בצד ימין למטה.

הקובץ **monitor.yuv** הינו קובץ בינארי אשר מכיל את אותו דאטא כמו monitor.txt, וניתן להציגו על המסך באמצעות התוכנה yuvplayer:

https://github.com/Tee0125/yuvplayer

כאשר בפרמטרים בוחרים size = 352x288 ו- color = Y.

הקובץ **diskout.txt** הינו קובץ פלט, באותו פורמט כמו memin.txt, שמכיל את תוכן הדיסק הקשיח בסיום הריצה.

האסמבלר

כדי שיהיה נוח לתכנת את המעבד וליצור את תמונות זיכרונות ההוראות והנתונים בקבצים imemin.txt ו- dmemin.txt, נכתוב בפרויקט גם את תוכנית האסמבלר. האסמבלר יכתב בשפת סי, ויתרגם את תוכנית האסמבלי שכתובה בטקסט בשפת אסמבלי, לשפת המכונה. ניתן להניח שקובץ הקלט תקין.

בדומה לסימולטור, האסמבלר הינו command line application עם שורת ההרצה הבאה:

asm.exe program.asm imem.txt dmem.txt

קובץ הקלט program.asm מכיל את תוכנית האסמבלי, וקבצי הפלט imem.txt , dmem.txt מכילים את תמונות זיכרונות ההוראות והנתונים. קבצי הפלט של האסמבלר משמשים אח"כ כקבצי הקלט של הסימולטור.

כל שורת קוד בקובץ האסמבלי מכילה את כל 5 הפרמטרים בקידוד ההוראה, כאשר הפרמטר הראשון הינו האופקוד, והפרמטרים מופרדים ע"י סימני פסיק. לאחר הפרמטר האחרון מותר להוסיף את הסימן # והערה מצד ימין, לדוגמא:

```
add $t2, $t1, $t0, 0          # $t2 = $t1 + $t0
add $t1, $t1, $imm, 2         # $t1 = $t1 + 2
add $t1, $imm, $imm, 2        # $t1 = 2 + 2
```

בכל הוראה, יש שלוש אפשרויות עבור שדה ה- immediate:

- ניתן לשים שם מספר דצימלי, חיובי או שלילי.
- ניתן לשים מספר הקסאדצימלי שמתחיל ב- 0x ואז ספרות הקסאדצימליות.
- ניתן לשים שם סימבולי (שמתחיל באות). במקרה זה הכוונה ל- label, כאשר label מוגדר בקוד ע"י אותו השם ותוספת נקודותיים.

דוגמאות:

```
        bne $imm, $t0, $t1, L1          # if ($t0 != $t1) goto L1 (reg1 = address of L1)
        add $t2, $t2, $imm, 1           # $t2 = $t2 + 1 (reg1 = 1)
        beq $imm, $zero, $zero, L2      # unconditional jump to L2 (reg1 = address L2)
L1:
        sub $t2, $t2, $imm, 1           # $t2 = $t2 – 1 (reg1 = 1)
L2:
        add $t1, $zero, $imm, L3        # $t1 = address of L3 (reg1 = address L3)
        beq $t1, $zero, $zero, 0        # jump to the address specified in t1 (reg1 = 0)
L3:
```

```
        jal $imm, $zero, $zero, L4      # function call L4, save return addr in $ra
        halt $zero, $zero, $zero, 0     # halt execution
L4:
        beq $ra, $zero, $zero, 0        # return from function in address in $ra (reg1=0)
```

כדי לתמוך ב- labels האסמבלר מבצע שני מעברים על הקוד. במעבר הראשון זוכרים את הכתובות של כל ה- labels, ובמעבד השני בכל מקום שהיה שימוש ב- label בשדה ה- immediate, מחליפים אותו בכתובת ה- label בפועל כפי שחושב במעבר הראשון.

כמו כן שימו לב לשימוש ברגיסטר המיוחד $imm בהוראות השונות. למשל הוראת ה- beq בדוגמא קופצת במידה ואפס שווה לאפס. תנאי זה מתקיים תמיד ולכן זו בעצם שיטה לממש unconditional jump.

בנוסף להוראות הקוד, האסמבלר תומך בהוראה נוספת המאפשרת לקבוע תוכן של מילה 32 ישירות בתמונת זיכרון הנתונים.

.word address data

כאשר address הינו כתובת המילה ו- data תוכנה. כל אחד משני השדות יכול להיות בדצימלי, או הקסאדצימלי בתוספת 0x. למשל:

```
.word 256 1                 # set DMEM[256] = 1
.word 0x100 0x1234ABCD      # DMEM[0x100] = DMEM[256] = 0x1234ABCD
```

הנחות נוספות

ניתן להניח את ההנחות הבאות:

1. ניתן להניח שאורך השורה המקסימאלי בקבצי הקלט הוא 500.
2. ניתן להניח שאורך ה- label המקסימאלי הוא 50.
3. פורמט ה- label מתחיל באות, ואח"כ כל האותיות והמספרים מותרים.
4. צריך להתעלם מ- whitespaces כגון רווח או טאב. מותר שיהיו מספר רווחים או טאבים ועדיין הקלט נחשב תקין.
5. יש לתמוך בספרות הקסאדצימליות גם ב- lower case וגם upper case.
6. יש לעקוב אחרי שאלות, תשובות ועדכונים לפרויקט בפורום הקורס במודל.

דרישות הגשה

1. יש להגיש קובץ דוקומנטציה של הפרויקט, חיצוני לקוד, בפורמט pdf, בשם project1_id1_id2.pdf כאשר id1,id2 הם מספרי תעודת הזהות שלכם.
2. הפרויקט יכתב בשפת התכנות סי. האסמבלר והסימולטור הן תוכניות שונות, כל אחת תוגש בספרייה נפרדת, מתקמפלת ורצה בנפרד. <u>יש להקפיד שיהיו הערות בתוך הקוד המסבירות את פעולתו.</u>
3. יש להגיש את הקוד ב- visual studio בסביבת windows. בכל ספרייה 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 חמש תוכניות בדיקה שאתם תכתבו באסמבלי.
יש לכתוב את קוד האסמבלי תוך הקפדה על הקונבנציות המקובלות שראיתם בהרצאות ובתירגולים (מחסנית גודלת כלפי כתובות נמוכות, לשמור רגיסטרים שמורים למחסנית, להעביר פרמטרים לפונקצייה ב- $a, להחזיר ערך ב- $v, וכו׳).

<u>יש להקפיד שיהיו הערות בתוך קוד האסמבלי.</u>

יש להגיש שש תוכניות בדיקה:

א. תוכנית mulmat.asm, המבצעת כפל של שתי מטריצות בגודל 4x4. ערכי המטריצה הראשונה נמצאים בכתובות 0x100 עד 0x10F, המטריצה השנייה בכתובות 0x110 עד 0x11F, ומטריצה התוצאה תיכתב לכתובות 0x120 עד 0x12F. ניתן להניח שאין overflow בחישוב.
כל מטריצה מסודרת בזיכרון לפי סדר שורות עולה, וכל שורה משמאל לימין. למשל עבור המטריצה הראשונה, a_{11} יהיה בכתובת 0x100, a_{12} בכתובת 0x101, a_{21} בכתובת 0x104 וכך הלאה.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}$$

ב. תוכנית bubble.asm, הממשת מיון של מערך מספרים בסדר יורד ע״י שימוש באלגוריתם bubble sort. מערך המספרים שאותו יש למיין נמצא בתאים 1024-1039.

ג. תוכנית binom.asm, המחשבת את מקדם הבינום של ניוטון באופן רקורסיבי לפי האלגוריתם הבא. בתחילת הריצה n נתון בכתובת 0x100, k בכתובת 0x101, והתוצאה תיכתב לכתובת 0x102. ניתן להניח כי n מספיק קטן כך שאין overflow.

```
int binom(n, k)
{
        if (k == 0 || n == k)
                return 1;
        return binom(n-1, k-1) + binom(n-1, k)
}
```

ד. תוכנית leds.asm, שמדליקה את הנורות: תחילה נורה מספר 0, לאחר שנייה מדליקים בנוסף את נורה 1, וכך הלאה באופן מחזורי, כל שנייה מדליקים נורה נוספת. לאחר שכל הנורות דלוקות יוצאים מהתוכנית.

ה. תוכנית circle.asm, שמציירת על המסך עיגול ממורכז מלא בצבע לבן (כל הפיקסלים בהיקף ובתוך שטח העיגול דלוקים). מרכז העיגול יהיה בקואורדינטה (175,143), ורדיוס העיגול (בפיקסלים) נתון בתחילת הריצה בכתובת 0x100. ניתן להניח שהרדיוס קטן מספיק כך שכל העיגול נכנס במסך.

ו. תוכנית disktest.asm, שמחשבת את סקטור ה- XOR (בדומה למערך RAID) של ארבעת הסקטורים הראשונים שמספרם 0 עד 3, ורושמת את התוצאה בסקטור 4 (כל מילה בסקטור 4 היא XOR של 4 מילים באותו המיקום בסקטורים 0 עד 3).

5. את תוכניות הבדיקה יש להגיש בשש ספריות בשמות:

mulmat, bubble, binom, leds, clock, disktest

כל ספרייה תכיל 16 קבצים הכוללים עותק של קבצי ההרצה sim.exe, asm.exe וכמו כן את קבצי הקלט והפלט של ריצת תוכנית הבדיקה דרך האסמבלר והסימולטור. למשל בספרייה mulmat יהיו הקבצים הבאים:

sim.exe, asm.exe, mulmat.asm, imemin.txt, dmemin.txt, diskin.txt, irq2in.txt, dmemout.txt, regout.txt, trace.txt, hwregtrace.txt, cycles.txt, leds.txt, monitor.txt, monitor.yuv, diskout.txt