תורת הקומפילציה
תרגיל 5

ההגשה בזוגות בלבד.

שאלות בנוגע לתרגיל ניתן לשלוח במייל אל silex@cs.technion.ac.il

לתרגיל יפתח דף FAQ באתר הקורס. יש להתעדכן בו. הנחיות והבהרות שיופיעו בדף ה-FAQ עד יומיים לפני הגשת התרגיל מחייבות. שאלות המופיעות בדף ה-FAQ לא יענו.

התרגיל ייבדק בבדיקה אוטומטית. **הקפידו למלא אחר ההוראות במדויק.**

1. כללי

בתרגיל זה עליכם לממש תרגום לאסמבלי לשפת FanC שהכרתן בתרגיל בית 3. תחביר השפה הוא כפי שהכרתם ומימשתם בתרגיל בית 3. בתרגיל תממשו בין השאר את רשומת ההפעלה של הפונקציות, ואת מבני הבקרה (אותם תממשו בשיטת **backpatching**).

2. MIPS

בתרגיל תשתמשו בשפת האסמבלי MIPS עבור הסימולטור Spim. השפה מכילה רגיסטרים, פעולות אריתמטיות בין רגיסטרים, קפיצות מותנות ולא מותנות, וקריאות מערכת. ניתן למצוא מפרט מלא של השפה כאן: http://www.egr.unlv.edu/~ed/MIPStextSMv11.pdf

תוכלו לדבג את קוד האסמבלי שאתם מייצרים על ידי הדיבאגר של QtSpim – אשר מציע GUI. גרסאות ווינדוס, לינוקס ומאק שלו מצורפות לתרגיל, יחד עם גרסת Spim עבור לינוקס, אשר מריצה ישירות אסמבלי של MIPS, והוא ישמש בפועל להרצת הקוד הנוצר. ראו הערות נוספות ב-FAQ.

א. פקודות אפשריות

בשפת MIPS יש מספר גדול מאוד של פקודות. בתרגיל תרצו להשתמש בפקודות המדמות את שפת הרביעיות שנלמדה בתרגול. להלן הפקודות שתרצו להשתמש בהן.

1. טעינה לרגיסטר: lw, li ו-la
2. שמירת תוכן רגיסטר: sw
3. פעולות חשבוניות: addu, subu, mul, div, move
4. קפיצות מותנות: beq, blt, ble, bgt, bge, bne
5. קפיצה לא מותנית: j
6. קפיצה לא מותנית המעדכנת את $ra: jal
7. פקודה ריקה: nop

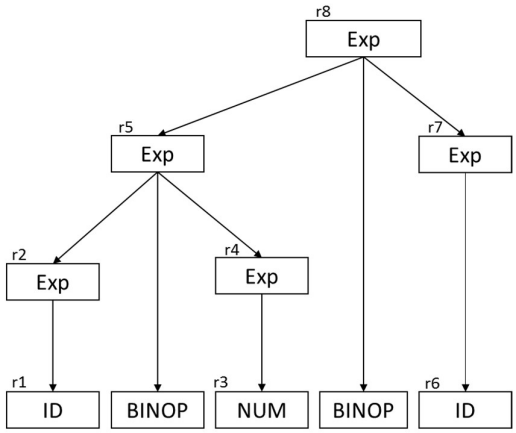
תוכלו למצוא תיעוד של כולן במדריך MIPS לעיל.

במידה ותרצו להשתמש בפקודות נוספות - מותר להשתמש בכל מה ש-Spim מסוגל להריץ (יש לבדוק את עצמכם עם הגרסה המצורפת לתרגיל, 9.1.18, ולא באף גרסה אחרת).

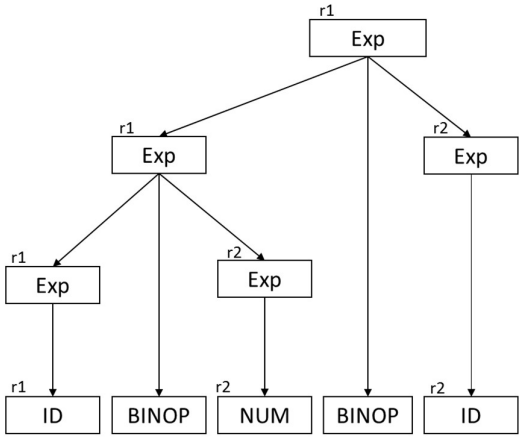
ב. רגיסטרים זמניים

שימו לב כי ב-MIPS אין משתנים זמניים ולכן העבודה עם ביטויים מספריים בתרגיל תהיה ברגיסטרים. בתור רגיסטרים זמניים לפעולות ניתן להשתמש בכל הרגיסטרים שאינם שמורים למטרות אחרות - $t0-$t7, $s0-$s7, ו-$t8-t9 (שהם שמות נוספים לרגיסטרים $8-$25). אין צורך לבצע אלגוריתמים מתקדמים של הקצאת רגיסטרים, אבל עליכם להיות חסכוניים וסבירים. מומלץ לעבוד כך שכל הרגיסטרים המחזיקים תוצאות חישוב הם caller-save, ללא תלות באיך הם מוגדרים ב-ABI של MIPS.

מספר הרגיסטרים המקסימלי שאפשר להקצות לעץ ביטוי הוא כמספר הצמתים בעץ, כך:



עם זאת, לשם המימוש **החסכוני** עליכם <u>למחזר</u> רגיסטרים ברגע שאינם נחוצים יותר. במימוש החסכוני יש להשתמש ברגיסטר של אחד הבנים בתור רגיסטר המטרה, וברגע שהחישוב בוצע יש למחזר את כל הרגיסטרים שהחזיקו ביטויים זמניים פרט לזה שכעת מחזיק את התוצאה. בשיטה זו מספר הרגיסטרים יהיה חסום ב-$h(k-1)+1$, כאשר h הוא גובה העץ ו-k הוא מספר תתי-הביטויים המקסימלי של צומת. המימוש החסכוני עבור העץ הקודם יראה כך:



הביטויים שתידרשו לטפל בהם גדולים מדי בשביל שיטת ההקצאה הנאיבית. תוכלו להניח שלא תקבלו ביטוי שידרוש יותר מ-15 רגיסטרים בהקצאה חסכונית, אבל עליכם לטפל **בכל** ביטוי עד גודל זה. מומלץ מאוד שלא לנסות לבצע אופטימיזציות נוספות מעבר לדרוש.

אין להשתמש ברגיסטרים לאחסון ערכי ביטויים בוליאניים בזמן שערוך הביטוי (דרישה זו תובהר בפרק הסמנטיקה).

ג. לייבלים (תוויות קפיצה)

ב-MIPS יעדים של קפיצות מיוצגים בתור לייבלים: מחרוזות אלפאנומריות (+ קו תחתון) שאחריהן מופיעות נקודותיים, כך:

```
label_42:
lw $t6,0($sp)
```

קפיצה אל label_42 תקפוץ אל הפקודה שנמצאת שורה אחריה – במקרה הזה, lw. בעת הטעינה לסימולטור SPIM הקפיצות יתורגמו לקפיצות לכתובות של פקודות, כמו הקפיצות בשפת הביניים שראינו בשיעור. את הלייבלים בפקודות קפיצה של מבני בקרה יש לייצר ולהשלים בשיטת backpatching כפי שנלמד בשיעור. נתונה לכן המחלקה CodeBuffer בקובץ bp.hpp עם מימוש של באפר ופונקציה המבצעת backpatching. נמצאת בה הפונקציה genLabel() הכותבת לייבל חדש לבאפר ומחזירה אותו. אין חובה להשתמש בה, ניתן לנהל את הלייבלים שלכם בעצמכם. אפשר להשתמש בפונקציית bp המבצעת backpatching עם כל לייבל שתבחרו. כמו כן, ניתן לכתוב לבאפר גם לייבלים אחרים.

I. גוף הפונקציה כיעד קפיצה

שימו לב שבעוד שניתן להשלים כתובות קפיצה לפונקציות על ידי backpatching, אין צורך בכך מכיוון שיעד הקפיצה ידוע מראש: אם התכנית תקינה אזי הפונקציה קיימת ולכן יהיה עבורה לייבל, ומכיוון ששם הפונקציה הוא ייחודי, אפשר לייצר לייבל ששמו ידוע מראש. כלומר, אפשר לקבוע את יעד הקפיצה בקפיצה לפונקציה ללא שימוש ב-backpatching.

II. עבודה עם המחלקה CodeBuffer

לצורך העבודה עם באפר הקוד נתונה לכם מחלקה CodeBuffer בקובץ bp.hpp. במחלקה תוכלו למצוא מתודות לעבודה עם באפר קוד וביצוע backpatching, ומתודה שמדפיסה את באפר הקוד ל-stdout.

המחלקה מממשת את הפונקציות emit, makelist ו-merge בהן ניתן להשתמש כפי שראיתן בתרגולים 7 ו-8.

הפונקציות מטפלות ברשימת כתובות בבאפר הקוד. ניתן להשתמש בכתובות אלה לצורך דיבוג הבאפר.
שימו לב, ערך החזרה של הפונקציה emit הוא הכתובת אליה כתבתם. זו הכתובת בה עליכם להשתמש לצורך backpatching. לדוגמא, פקודת הקוד הבאה הינה חוקית:

```
CodeBuffer::makelist(CodeBuffer::instance().emit("j "));
```

שימו לב כי **בשונה משפת הביניים התיאורטית שלמדתם בשיעור**, ישנה הפרדה בין מיקום בבאפר בו יבוצע backpatching (הערך המוחזר על ידי emit) וכתובת אליה תתבצע קפיצה (לייבל). השפה התיאורטית מניחה כי פקודות נכתבות לבאפר הקוד לאותו המקום בו ייכתבו בזיכרון, ולכן אותה הצבעה לפקודה יכולה לשמש גם כמצביע לפקודה בבאפר שיש לבצע עליה backpatching וגם כיעד קפיצה. בתכנית MIPS, לעומת זאת, הכתובות בזיכרון של פקודות – כלומר, הכתובת אליה יש לקפוץ כדי להגיע לפקודה מסויימת – ייקבעו רק כאשר האסמבלי יקומפל לשפת מכונה. לכן יעדי קפיצה מסומנים על ידי לייבלים טקסטואליים, אשר יהפכו לכתובת בזיכרון בזמן התרגום לשפת מכונה, בעוד שהמיקום של פקודות לצורך ביצוע backpatching מסומן על ידי מיקומים בתוך ה-CodeBuffer ומוחזר על ידי emit.

ד. דאטה

תכנית MIPS נחלקת לאזור text ואזור data. בעוד שקוד האסמבלי שתייצרו שייך לאזור ה-text, כמו גם המימוש של הפונקציות print ו-printi, אזור ה-data מיועד לשמירת ערכים שיש לטעון לזיכרון כדי להשתמש בהם אחר כך. באזור זה ניתן לשמור ליטרל מחרוזת (ראו דוגמאות במדריך MIPS).

המחלקה CodeBuffer מכילה מתודה להדפסת באפר הקוד בתוספת הצהרה על אזור text, ומכילה בנוסף לכך גם שתי מתודות לטיפול באיזור ה-data: המתודה emitData כותבת שורות לבאפר נפרד, והמתודה printDataBuffer מדפיסה את תוכן הבאפר הנפרד בתוספת הצהרה על אזור data. מומלץ להשתמש בהן.

3. מחסנית

בתרגיל תידרשו לנהל את המחסנית עם רשומות ההפעלה של הפונקציות הנקראות. לשם כך יש להשתמש ברגיסטר $fp להצביע לראש הפריים הנוכחי וברגיסטר $sp כדי להצביע לראש המחסנית (הרגיטסר $sp יאותחל אוטומטית להצביע לראש המחסנית בתחילת התכנית).

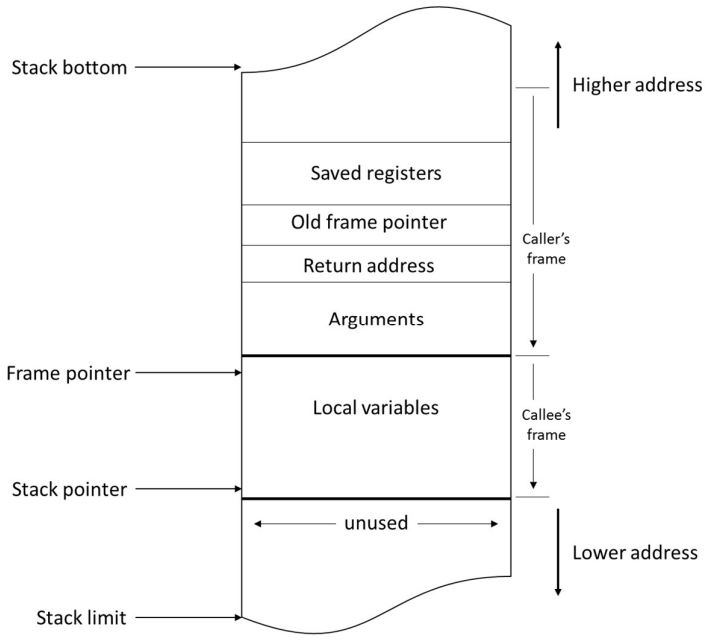
התרשים המופיע מטה הוא בגדר המלצה, ניתן לסדר את הרכיבים ברשומת ההפעלה בכל סדר שנוח לכם כל עוד אתם מצליחים לשחזר אותם בצורה נכונה.

האחסון של $fp הישן ו-$ra (כתובת החזרה, return address) נועדו לאפשר למחסנית לקפוץ בחזרה אל הקוד וראש רשומת ההפעלה של הפונקציה הקודמת, גם אחרי שתיקרא פונקציה נוספת – כפי שנלמד בשיעור. האחסון של כל הרגיסטרים שהיו בשימוש בזמן הקריאה לפונקציה נועד לאפשר לחישוב להמשיך מאותה הנקודה ברגע שקריאת הפונקציה תסתיים.

את המשתנים והפרמטרים לפונקציות יש לאחסן במחסנית, לפי ה-offsets שחושבו בתרגיל 3.

מומלץ לשמור כל משתנה, ללא תלות בטיפוסו, ב-4 בתים במחסנית (כגודל רגיסטר), ולהתייחס ל-struct כסכום הטיפוסים המרכיבים אותו. ניתן להיעזר בדוגמאות לניהול המחסנית במדריך MIPS.

מומלץ להתייחס לכל הרגיסטרים כרגיסטרים שהאחריות לגבותם היא בידי ה-caller. שימו לב כי הדבר אומר שיגובו רק הרגיסטרים שנמצאים בשימוש.



רשומת הפעלה: הצעת הגשה

4. סמנטיקה

יש לממש את ביצוע כל ה-statements בפונקציה ברצף בסדר בו הוגדרו. הסמנטיקה של ביטויים אריתמטיים ושל קריאות לפונקציות מוגדרת כמו הסמנטיקה שלהם בשפת C. ההרצה תתחיל בפונקציה main, ותסתיים כשהקריאה החיצונית ביותר לפונקציה main חוזרת. עבור מבני הבקרה יש להשתמש ב-backpatching. ניתן להיעזר בדוגמאות מהתרגולים.

א. משתנים

I. אתחול משתנים

יש לאתחל את כל המשתנים בתכנית כך שיכילו ערך ברירת מחדל במידה ולא הוצב לתוכם ערך.

הטיפוסים המספריים יאותחלו ל-0.
הטיפוס הבוליאני יאותחל ל-false.
כל struct יאותחל על ידי אתחול האיברים המרכיבים את ה-struct, כל איבר בהתאם לטיפוסו.

II. גישה למשתנים

כאשר מתבצעת פניה בתוך ביטוי למשתנה מטיפוס פשוט, יש לייצר קוד הטוען מן המחסנית את הערך האחרון שנשמר עבור המשתנה. כאשר מתבצעת השמה לתוך משתנה, יש לייצר קוד הכותב למחסנית את ערך הביטוי במשפט ההשמה.

III. גישה לstructים

השמה לתוך איבר יחיד מבין איברי ה-struct תדרוס את הערך של אותו איבר בלבד מתוך ה-struct. בהשמה של struct אחד לstruct אחר, תתבצע העתקה של כל איברי ה-struct המקורי אל ה-struct החדש, קרי כתיבתם למיקום במחסנית המיועד ל-struct המטרה.

כאשר מתבצעת פניה לאיבר ב-struct, יש לייצר קוד הטוען מהמחסנית את תוכן האיבר הבודד ב-struct.

ב. ביטויים חשבוניים

יש לממש פעולות חשבוניות לפי הסמנטיקה של שפת C.

הטיפוס המספרי int הינו signed, כלומר מחזיק מספרים חיוביים ושליליים.
הטיפוס המספרי byte הינו unsigned, כלומר מחזיק מספרים אי-שליליים בלבד.

חילוק יהיה חילוק שלמים.

השוואות רלציוניות בין שני טיפוסים מספריים שונים יתייחסו לערכים המספריים עצמם (כלומר, כאילו הערך הנמצא ב-byte מוחזק על ידי int). לכן, למשל, הביטוי

```
8b == 8
```

יחזיר אמת.

יש לממש שגיאת חלוקה באפס. במידה ועומדת להתבצע חלוקה באפס, תדפיס התכנית

```
"Error division by zero\n"
```

ותסיים את ריצתה.

ו. גלישה נומרית

יש לדאוג שתתבצע גלישה מסודרת של ערכים נומריים במידה ופעולה חשבונית חורגת (מלמעלה או מלמטה) מהערכים המותרים לטיפוס.

טווח הערכים המותר ל-int הוא 0-0xffffffff (כך שf0x7fffffff-0 חיוביים ו0x80000000-0xffffffff שליליים). גלישה נומרית עבור int אמורה לעבוד באופן אוטומטי במידה ומימשתם את התרגיל לפי ההנחיות (כלומר, תתקבל תמיד תוצאה בטווח הערכים המותר, ללא שגיאה).

טווח הערכים המותר ל-byte הוא 0-255. יש לוודא כי גם תוצאת פעולה חשבונית מסוג byte תניב תמיד ערך בטווח הערכים המותר, על ידי truncation של התוצאה (איפוס הביטים הגבוהים בתוצאה).

ג. ביטויים בוליאניים

יש לממש עבור ביטויים בוליאניים short-circuit evaluation, באופן הזהה לשפת C: במידה וניתן לקבוע בשלב מסוים בביטוי בוליאני את תוצאתו, אין להמשיך לחשב חלקים נוספים שלו. כך למשל בהינתן הפונקציה printfoo:

```
bool printfoo() {
      printi(1);
      return true;
}
```

והביטוי הבוליאני:

```
true or printfoo()
```

לא יודפס דבר בעת שערוך הביטוי.

בנוסף, **אין להשתמש ברגיסטרים לתוצאות או תוצאות ביניים של ביטויים בוליאניים**. יש לתרגם אותם לסדרת קפיצות כפי שנלמד בתרגול. במידה והביטוי הבוליאני הוא ה-Exp במשפט השמה למשתנה או ברשימת פרמטרים לפונקציה, יש להשתמש רק ברגיסטר אחד לתוצאה הסופית כמשתנה ביניים לצורך ביצוע sw (שמירה לזיכרון).

ד. קריאה לפונקציה

בעת קריאה ל-Call, ישוערכו קודם כל הארגומנטים של הפונקציה לפי הסדר (משמאל לימין) ויועברו לפונקציה הנקראת דרך המחסנית. סדר הפרמטרים יהיה לפי ה-offsets שחושבו להם בפונקציה הנקראת בתרגיל 3. כל המשתנים, כולל struct-ים, יועברו by value ולא by reference, כלומר יווצר על המחסנית העתק שלהם לשימוש הפונקציה הנקראת. קוד הפונקציה יקרא על ידי קפיצה אל הקוד שלה. בסוף ביצוע הפונקציה תבוצע קפיצה בחזרה לקוד הקורא. סוף הפונקציה הוא סוף רצף הפקודות בבלוק של הפונקציה, גם אם אינו כולל אף פקודת return. (יש להשתמש ב-jal כדי לקפוץ לקוד הפונקציה, מה שישמור את הכתובת אליה יש לחזור ב-$ra).

במידה והפונקציה מחזירה ערך, מומלץ להחזיר אותו ב-$v0 אך ניתן גם להחזירו במקום מוסכם מראש ברשומת ההפעלה, והקוד הקורא יוכל לקרוא אותו משם.

ה. משפט if

בראשית ביצוע משפט if משוערך התנאי הבוליאני Exp. במידה וערכו true, יבוצע ה-Statement בענף הראשון, ואחריו ה-Statement שנמצא בקוד אחרי ה-if. במידה וערכו false, יבוצע ה-Statement בענף השני, ואחריו ה-Statement שנמצא בקוד אחרי ה-if.

התנאי הבוליאני עשוי לכלול ביטויים מורכבים, לפי המוגדר בתרגיל 3.

ו. משפט while

בראשית ביצוע משפט while משוערך התנאי הבוליאני Exp. במידה וערכו true, יבוצע ה-Statement, והריצה תחזור לשערוך של Exp. במידה וערכו false, יבוצע ה-Statement שנמצא בקוד אחרי ה-while.

התנאי הבוליאני עשוי לכלול ביטויים מורכבים, לפי המוגדר בתרגיל 3.

ז. משפט break

ביצוע משפט break בגוף לולאה יגרום לכך שהמשפט הבא שיתבצע הוא המשפט הבא אחרי הלולאה הפנימית ביותר בתוכה ה-break מופיע.

ח. משפט continue

ביצוע משפט continue בגוף לולאה יגרום לקפיצה לתנאי הלולאה הפנימית ביותר בה ה-continue. תנאי הלולאה ייבדק ובמידה והתנאי מתקיים, המשפט הבא שיתבצע הוא המשפט הראשון בתוך אותה לולאה. אחרת הוא המשפט הבא אחרי לולאה זו.

ט. משפט return

במידה וזהו משפט return Exp, ראשית ישוערך Exp וישמר ברגיסטר $v0 או במקום המתאים במחסנית.

הפקודה הבאה שתבוצע אחרי return היא הפקודה הבאה אחרי ה-call בפונקציה הקוראת. במידה והפונקציה הנוכחית היא main, קריאה ל-return תסיים את התכנית.

5. פונקציות פלט

קיימות שתי פונקציות פלט בשפת FanC. הראשונה מקבלת פרמטרים מספריים, והשנייה פרמטר מחרוזת. עליכן לכלול את המימוש שלהן בקוד האסמבלי שתייצרו. להלן מימושים מומלצים לשתי הפונקציות, הקוראים את הארגומנטים מהמחסנית. ניתן לשנות אותן כל עוד האפקט זהה.

הפונקציה printi:

```
lw $a0,0($sp)
li $v0,1
syscall
jr $ra
```

הפונקציה print:

```
lw $a0,0($sp)
li $v0,4
syscall
jr $ra
```

6. טיפול בשגיאות

תרגיל זה מתמקד בייצור קוד אסמבלי ולא מוסיף שגיאות קומפילציה מעבר לאלה שהופיעו בתרגיל 3. יש לדאוג שהקוד המיוצר ייטפל בשגיאת חלוקה באפס שהוזכרה בפרק הסמנטיקה.

7. קלט ופלט המנתח

קובץ ההרצה של המנתח יקבל את הקלט מ-stdin.

את תכנית האסמבלי השלמה יש להדפיס ל-stdout (באמצעות הפונקציות המתאימות במחלקה CodeBuffer). הפלט ייבדק על ידי הפניה לקובץ של stdout ו-stderr והרצה על ידי סימולטור Spim.

8. הדרכה

כדאי לממש את התרגיל בסדר הבא:

1. פונקציות להקצאת ושחרור רגיסטרים מתוך pool הרגיסטרים האפשרי.
2. חישובים לביטויים אריתמטיים. התחילו מחישובים פשוטים והתקדמו לחישובים מורכבים יותר. בדקו אותם בעזרת הסימולטור.
3. חישובים לביטויים בוליאניים מורכבים. בדקו אותם בעזרת הסימולטור.
4. שמירת וקריאת משתנים במחסנית.
5. שמירת וקריאת איברים ב-struct במחסנית.
6. רצף של statements.
7. מבני בקרה.
8. קריאה לפונקציות הפלט.
9. קריאה לפונקציות.

מומלץ ליצור mips program template אליו תוכלו להעתיק קטעי קוד אסמבלי קצרים שיצרתן בשלבי עבודה מוקדמים. כך תוכלו להריץ ולבדוק את הקוד שאתם מייצרים בטרם יצרתם תכנית מלאה.

מומלץ להיעזר במבני הנתונים של stl. מומלץ לכתוב מחלקות למימוש פונקציונליות נחוצה. כדאי מאוד להיעזר בתבנית העיצוב singleton (design pattern).

9. הוראות הגשה

שימו לב כי קובץ ה-Makefile מאפשר שימוש ב-STL. אין לשנות את ה-Makefile.

יש להגיש קובץ אחד בשם ID1-ID2.zip, עם מספרי ת"ז של המגישים. על הקובץ להכיל:

- קובץ flex בשם scanner.lex המכיל את כללי הניתוח הלקסיקלי
- קובץ בשם parser.ypp המכיל את המנתח
- את כל הקבצים הנדרשים לבניית המנתח, <u>כולל *.output שסופקו כחלק מתרגיל 3 וקבצי *.bp שסופקו כחלק מתרגיל זה, אם השתמשתם בהם</u>.

בנוסף יש להקפיד שהקובץ לא יכיל:

- את קובץ ההרצה
- קבצי הפלט של flex ו-bison
- את קובץ Makefile שסופק כחלק מהתרגיל

יש לוודא כי בביצוע unzip לא נוצרת תיקיה נפרדת. **על המנתח להיבנות על השרת csl2 ללא שגיאות באמצעות קובץ Makefile שסופק עם התרגיל.** הפקודות הבאות יגרמו ליצירת קובץ ההרצה hw5:

```
unzip id1-id2.zip
cp path-to/Makefile .
make
```

פלט המנתח צריך להיות ניתן להרצה על ידי הסימולטור. כך למשל, יש לוודא כי תכניות הדוגמה באתר מייצרות פלט זהה לפלט הנדרש. ניתן לבדוק את עצמכם כך:

```
./hw5 < path-to/t1.in >& t1.il
cd path-to-spim/
./spim -file path-to/t1.il > t1.res
diff path-to/t1.res path-to/t1.out
```

יריץ את המנתח, ייצר קובץ אסמבלי, יריץ את spim עליו ללא שגיאות, ו-diff יחזיר 0.

הגשות שלא יעמדו בדרישות לעיל יקבלו ציון 0 ללא אפשרות לבדיקה חוזרת.

בדקו היטב שההגשה שלכם עומדת בדרישות הבסיסיות הללו לפני ההגשה עצמה. מומלץ לכתוב גם טסטים נוספים שיבדקו את נכונות המימוש עבור מבני הבקרה השונים.

שימו לב כי באתר מופיע script לבדיקה עצמית לפני ההגשה בשם selfcheck. תוכלו להשתמש בו על מנת לוודא כי ההגשה שלכם תקינה.

בתרגיל זה (כמו בתרגילים קודמים בקורס) ייבדקו העתקות. אנא כתבו את הקוד שלכם בעצמכם.

בהצלחה!