

מטלת מנחה (ממ"ן) 14

הקורס : 20465 - מעבדה בתכנות מערכות

חומר הלימוד למטלה : פרויקט גמר

מספר השאלות : 1 משקל המטלה : 61 נקודות (חובה)

סמסטר : 2025ב' מועד אחרון להגשה : 12.08.2025

קיימת אפשרות אחת להגשת המטלה:

שליחה באמצעות מערכת המטלות המקוונת באתר הבית של הקורס

הסבר מפורט ב"נוהל הגשת מטלות מנחה"

אחת המטרות העיקריות של הקורס "20465 - מעבדה בתכנות מערכות" היא לאפשר ללומדים בקורס להתנסות בכתיבת פרויקט תוכנה גדול, אשר יחקה את פעולתה של אחת מתוכניות המערכת השכיחות.

עליכם לכתוב תוכנת אסמבלר, עבור שפת אסמבלי שתוגדר בהמשך. הפרויקט ייכתב בשפת C.

עליכם להגיש את הפריטים הבאים :

1. קבצי המקור של התוכנית שכתבתם (קבצים בעלי סיומת c או h).
 2. קובץ הרצה (מקומפל ומקושר) עבור מערכת אובונטו.
 3. קובץ makefile. הקימפול חייב להיות עם הקומפיילר gcc והדגלים : -Wall -ansi -pedantic. יש לנפות את כל ההודעות שמוציא הקומפיילר, כך שהתוכנית תתקמפל ללא כל הערות או אזהרות.
 4. דוגמאות הרצה (קלט ופלט) :
- א.** קבצי קלט בשפת אסמבלי, וקבצי הפלט שנוצרו מהפעלת האסמבלר על קבצי קלט אלה. יש להדגים שימוש במגוון הפעולות וטיפוסי הנתונים של שפת האסמבלי.
- ב.** קבצי קלט בשפת אסמבלי המדגימים מגוון רחב של סוגי שגיאות אסמבלי (ולכן לא נוצרים קבצי פלט), ותדפיסי המסך המראים את הודעות השגיאה שמוציא האסמבלר.
- יש להגיש לפחות 3 קבצי קלט ו-3 קבצי פלט ותדפיסי מסך המייצגים מצבים שונים (תקינים ושגיאות)

בשל גודל הפרויקט, עליכם לחלק את התוכנית למספר קבצי מקור, לפי משימות. יש להקפיד שקוד המקור של התוכנית יעמוד בקריטריונים של בהירות, קריאות וכתיבה נאה ומובנית.

נזכיר מספר היבטים חשובים של כתיבת קוד טוב :

1. הפשטה של מבני הנתונים : רצוי (ככל האפשר) להפריד בין הגישת למבני הנתונים לבין המימוש של מבני הנתונים. כך, למשל, בעת כתיבת פונקציות לטיפול בטבלה, אין זה מעניינם של המשתמשים בפונקציות אלה, האם הטבלה ממומשת באמצעות מערך או באמצעות רשימה מקושרת.
2. קריאות הקוד : יש להשתמש בשמות משמעותיים למשתנים ופונקציות. יש לערוך את הקוד באופן מסודר : הזחות עקביות, שורות ריקות להפרדה בין קטעי קוד, וכד'.

3. תיעוד: יש להכניס בקבצי המקור תיעוד תמציתי וברור, שיסביר את תפקידה של כל פונקציה (באמצעות הערות כותרת לכל פונקציה). כמו כן יש להסביר את תפקידם של משתנים חשובים. כמו כן, יש להכניס הערות ברמת פירוט טובה בכל הקוד.

הערה: תוכנית "עובדת", דהיינו תוכנית שמבצעת את כל הדרוש ממנה, אינה לכשעצמה ערובה לציון גבוה. כדי לקבל ציון גבוה, על התוכנית לעמוד בקריטריונים של כתיבה ותיעוד ברמה טובה, כמתואר לעיל, אשר משקלם המשותף מגיע עד לכ- 40% ממשקל הפרויקט.

על המטלה להיות **מקורית לחלוטין**: אין להיעזר בספריות חיצוניות מלבד הספריות הסטנדרטיות, וכמובן לא בקוד ולא בחלקי קוד הנמצאים ברשת, במקור חיצוני וכו'.

מומלץ לעבוד בזוגות. אין לעבוד בצוותים גדולים יותר. **פרויקט שיוגש על ידי שלשה או יותר, לא ייבדק ולא יקבל ציון.** חובה שסטודנטים, הבוחרים להגיש יחד את הפרויקט, יהיו **שייכים לאותה קבוצת הנחיה.** הציון יהיה זהה לשני הסטודנטים.

מומלץ לקרוא את הגדרת הפרויקט פעם ראשונה ברצף, לקבלת תמונה כללית לגבי הנדרש, ורק לאחר מכן לקרוא שוב בצורה מעמיקה יותר.

רקע כללי ומטרת הפרויקט

כידוע, קיימות שפות תכנות רבות, ומספר גדול של תוכניות, הכתובות בשפות שונות, עשויות לרוץ באותו מחשב עצמו. כיצד "מכיר" המחשב כל כך הרבה שפות? התשובה פשוטה: המחשב מכיר למעשה שפה אחת בלבד: הוראות ונתונים הכתובים בקוד בינארי. קוד זה מאוחסן בגוש בזיכרון, ונראה כמו רצף של ספרות בינאריות. יחידת העיבוד המרכזית - היע"מ (CPU) - יודעת לפרק את הרצף הזה לקטעים קטנים בעלי משמעות: הוראות, מענים ונתונים.

למעשה, זיכרון המחשב כולו הוא אוסף של סיביות, שנוהגים לראותן כמקובצות ליחידות בעלות אורך קבוע (בתים, מילים). לא ניתן להבחין, בעין שאינה מיומנת, בהבדל פיסי כלשהו בין אותו חלק בזיכרון שבו נמצאת תוכנית לבין שאר הזיכרון.

יחידת העיבוד המרכזית (היע"מ) יכולה לבצע מגוון פעולות פשוטות, הנקראות **הוראות מכונה**, ולשם כך היא משתמשת ברגיסטרים (registers) הקיימים בתוך היע"מ, ובזיכרון המחשב. דוגמאות: העברת מספר מתא בזיכרון לרגיסטר ביע"מ או בחזרה, הוספת 1 למספר הנמצא ברגיסטר, בדיקה האם מספר המאוחסן ברגיסטר שווה לאפס, חיבור וחסור בין שני רגיסטרים, וכד'.

הוראות המכונה ושילובים שלהן הן המרכיבות תוכנית כפי שהיא טעונה לזיכרון בזמן ריצתה. כל תוכנית מקור (התוכנית כפי שנכתבה בידי המתכנת), תתורגם בסופו של דבר באמצעות תוכנה מיוחדת לצורה סופית זו.

היע"מ יודע לבצע קוד שנמצא בפורמט של **שפת מכונה**. זהו רצף של ביטים, המהווים קידוד בינארי של סדרת הוראות המכונה המרכיבות את התוכנית. קוד כזה אינו קריא למשתמש, ולכן לא נוה לקודד (או לקרוא) תוכניות ישירות בשפת מכונה. **שפת אסמבלי** (assembly language) היא שפת תכנות מאפשרת לייצג את הוראות המכונה בצורה סימבולית קלה ונוחה יותר לשימוש. כמובן שיש צורך לתרגם את הייצוג הסימבולי לקוד בשפת מכונה, כדי שהתוכנית תוכל לרוץ במחשב. תרגום זה נעשה באמצעות כלי שנקרא **אסמבלר** (assembler).

כידוע, לכל שפת תכנות עילית יש מהדר (compiler), או מפרש (interpreter), המתרגם תוכניות מקור לשפת מכונה. האסמבלר משמש בתפקיד דומה עבור שפת אסמבלי.

לכל מודל של יע"מ (כלומר לכל אירגון של מחשב) יש שפת מכונה ייעודית משלו, ובהתאם גם שפת אסמבלי ייעודית משלו. לפיכך, גם האסמבלר (כלי התרגום) הוא ייעודי ושונה לכל יע"מ.

תפקידו של האסמבלר הוא לבנות קובץ המכיל קוד מכונה, מקובץ נתון של תוכנית הכתובה בשפת אסמבלי. זהו השלב הראשון במסלול אותו עוברת התוכנית, עד לקבלת קוד המוכן לריצה על חומרת המחשב. השלבים הבאים הם קישור (linkage) וטעינה (loading), אך בהם לא נעסוק בממ"ן זה.

המשימה בפרויקט זה היא לכתוב אסמבלר (כלומר תוכנית המתרגמת לשפת מכונה), עבור שפת אסמבלי שנגדיר כאן במיוחד לצורך הפרויקט.

לתשומת לב: בהסברים הכלליים על אופן עבודת תוכנת האסמבלר, תהיה מדי פעם התייחסות גם לעבודת שלבי הקישור והטעינה. התייחסויות אלה נועדו על מנת לאפשר לכם להבין את המשך תהליך העיבוד של הפלט של תוכנת האסמבלר. אין לטעות: עליכם לכתוב את תוכנית האסמבלר בלבד. אין לכתוב את תוכניות הקישור והטעינה!!!

המחשב הדמיוני ושפת האסמבלי

נגדיר עתה את שפת האסמבלי ואת מודל המחשב הדמיוני, עבור פרויקט זה.

הערה: תיאור מודל המחשב להלן הוא חלקי בלבד, ככל שנחוץ לביצוע המשימות בפרויקט.

"חומרה":

המחשב בפרויקט מורכב ממעבד CPU (יע"מ - יחידת עיבוד מרכזית), רגיסטרים (אוגרים) וזיכרון RAM. חלק מהזיכרון משמש גם כמחסנית (stack).

למעבד 8 רגיסטרים כלליים, בשמות: r0, r1, r2, r3, r4, r5, r6, r7. גודלו של כל רגיסטר הוא 10 סיביות. הסיבית הכי פחות משמעותית תצוין כסיבית מס' 0, והסיבית המשמעותית ביותר כמס' 9. שמות הרגיסטרים נכתבים תמיד עם אות 'r' קטנה.

כמו כן יש במעבד רגיסטר בשם PSW (program status word), המכיל מספר דגלים המאפיינים את מצב הפעילות במעבד בכל רגע נתון. ראו בהמשך, בתיאור הוראות המכונה, הסברים לגבי השימוש בדגלים אלו.

גודל הזיכרון הוא 256 תאים, בכתובות 0-255 (בבסיס עשרוני), וכל תא הוא בגודל של 10 סיביות. לתא בזיכרון נקרא גם בשם "מילה". הסיביות בכל מילה ממוספרות כמו ברגיסטר.

מחשב זה עובד רק עם מספרים שלמים חיוביים ושיליים. אין תמיכה במספרים ממשיים. האריתמטיקה נעשית בשיטת המשלים ל-2 (2's complement). במחשב זה יש תמיכה בתווים (characters), המיוצגים בקוד ascii.

מבנה הוראת מכונה:

כל הוראת מכונה במודל שלנו מורכבת מפעולה ואופרנדים. מספר האופרנדים הוא בין 0 ל-2, בהתאם לסוג הפעולה. מבחינת התפקיד של כל אופרנד, נבחין בין אופרנד מקור (source) ואופרנד יעד (destination).

כל הוראת מכונה מקודדת למספר מילות זיכרון רצופות, החל ממילה אחת ועד למקסימום חמש מילים, בהתאם לשיטת המיעון בה נתון כל אופרנד (ראו פרטים בהמשך).

בקובץ הפלט המכיל את קוד המכונה שבונה האסמבלר, כל מילה תקודד בבסיס הקסאדצימלי (ראו פרטים לגבי קבצי פלט בהמשך).

בכל סוגי הוראות המכונה, המבנה של המילה הראשונה תמיד זהה. מבנה המילה הראשונה בהוראה הוא כדלהלן:

9 8 7 6	5 4	3 2	1 0
opcode	מיעון אופרנד מקור	מיעון אופרנד יעד	E,R,A

קידוד כל מילה בקוד המכונה ייעשה בבסיס 4 "ייחודי" המוגדר כדלקמן: ארבע הספרות הן: a,b,c,d (כאשר a שקול ל-0, b ל-1, c ל-2, d ל-3). קידוד של מילה בגודל 10 סיביות בבסיס 4 מורכב מחמש ספרות (עם ספרות a מובילות לפי הצורך).

סיביות 9-6 במילה הראשונה של הפקודה מהוות את קוד ההוראה (opcode). בשפה שלנו יש 16 קודי הוראה והם:

הקוד בבסיס דצימלי (10)	פעולה
0	mov
1	cmp
2	add
3	sub
4	not
5	clr
6	lea
7	inc
8	dec
9	jmp
10	bne
11	red
12	prn
13	jsr
14	rts
15	stop

ההוראות נכתבות תמיד באותיות קטנות. פרוט משמעות ההוראות יבוא בהמשך.

סיביות 0-1 (A,R,E)

סיביות אלה מראות את סוג הקידוד, האם הוא מוחלט (Absolute), חיצוני (External) או מצריך מיקום מחדש (Relocatable).

ערך של 00 משמעו שהקידוד הוא מוחלט.
 ערך של 01 משמעו שהקידוד הוא חיצוני.
 ערך של 10 משמעו שהקידוד מצריך מיקום מחדש.

סיביות אלה מתווספות רק לקידודים של הוראות (לא של נתונים), והן מתווספות גם לכל המילים הנוספות שיש לקידודים אלה.

סיביות 2-3 מקודדות את מספרה של שיטת המיעון של אופרנד היעד (destination operand).

סיביות 4-5 מקודדות את מספרה של שיטת המיעון של אופרנד המקור (source operand).

בשפה שלנו קיימות ארבע שיטות מיעון, שמספרן הוא בין 0 ל-3.

השימוש בשיטות מיעון מצריך קידוד של מילות-מידע נוספות בהוראה, לכל היותר שתי מילים נוספות לכל אופרנד. אם שיטת המיעון של רק אחד משני האופרנדים דורשת מילות מידע נוספות, אזי מילות המידע הנוספות מתייחסות לאופרנד זה. אם שיטות המיעון של שני האופרנדים דורשות מילות-מידע נוספות, אזי מילות-המידע הנוספות הראשונות מתייחסות לאופרנד המקור ומילות-המידע הנוספות האחרונות מתייחסות לאופרנד היעד.

ארבע שיטות המיעון הקיימות במכונה שלנו הן:

מספר	שיטת המיעון	תוכן מילת המידע הנוספת	אופן כתבת האופרנד	דוגמה
0	מיעון מידי	המילה הנוספת של ההוראה מכילה את האופרנד עצמו, שהוא מספר המיוצג ב-8 סיביות, אליהם מתווספות זוג סיביות של שדה A,R,E	האופרנד מתחיל בתו # ולאחריו ובצמוד אליו מופיע מספר שלם בבסיס עשרוני	mov #-1,r2 בדוגמה זו האופרנד הראשון של הפקודה נתון בשיטת מיעון מידי. הפקודה כותבת את הערך 1- לתוך אוגר r2
1	מיעון ישיר	המילה הנוספת של ההוראה מכילה מען של מילה בזיכרון. מילה זו בזיכרון הינה האופרנד. המען מיוצג ב-8 סיביות אליהן מתווספות זוג סיביות של שדה A,R,E	האופרנד הינו תווית שהוצהרה או תוצהר בהמשך הקובץ. ההצהרה נעשית על ידי כתיבת תווית בקובץ המקור (בהנחיית 'data' או 'string' או '.mat', או בתחילת הוראה של התוכנית), או על ידי אופרנד של הנחית 'extern'	dec x בדוגמה זו, תוכן המילה שבכתובת x בזיכרון (ה"משתנה" x) מוקטן ב-1.
2	מיעון גישה למטריצה	בשיטת מיעון זו משתתפים שני אוגרים ותווית. בזמן ביצוע ההוראה, המעבד יפנה למטריצה (המצוינת ע"י התווית), לתא (בגודל מילה) הנמצא באינדקסים (שורה ועמודה) המצוינים ע"י האוגרים. בשיטת מיעון זו יש 2 מילות מידע נוספות בקוד ההוראה. המילה הנוספת הראשונה היא כתובת התחלת המטריצה (מצוין ע"י התווית). והמילה הנוספת השניה תכיל את האינדקסים באופן הבא: ארבע הסיביות 6-9 מקודדים את מספר האוגר המכיל את אינדקס השורה, וארבע הסיביות 2-5 מקודדים את מספר האוגר המכיל את אינדקס העמודה. האינדקסים מתחילים ב-0. לייצוג זה מתווספות זוג סיביות של שדה A,R,E.	האופרנד מורכב משם של תוית המציינת מטריצה, ולאחריה שורה ועמודה במטריצה המצוינים ע"י אוגרים בלבד, ורשומים כל אחד בסוגריים מרובעות.	add #4, a[r2][r5] בדוגמה זו, הפקודה מוסיפה את הערך 4 לתא במטריצה שנמצאת בתווית a. התא הוא בשורה המצוינת ע"י תוכן האוגר r2 ובעמודה המצוינת ע"י תוכן האוגר r5
3	מיעון אוגר ישיר	האופרנד הוא אוגר. אם האוגר משמש כאופרנד יעד, מילה נוספת של הפקודה תכיל בארבע הסיביות 2-5 את מספרו של האוגר. אם האוגר משמש כאופרנד מקור, הוא יקודד במילה נוספת שתכיל בששת הסיביות 6-9 את מספרו של האוגר. אם בפקודה יש שני אופרנדים ושניהם אוגרים, הם יחלקו מילה נוספת אחת משותפת. כאשר הסיביות 2-5 הן עבור אוגר היעד, והסיביות	האופרנד הינו שם של אוגר.	mov r1,r2 בדוגמה זו, אופרנד המקור הוא האוגר r1, ואופרנד היעד הוא האוגר r2. הפקודה מעתיקה את תוכן אוגר r1 לתוך אוגר r2. בדוגמה זו שני האופרנדים יקודדו למילה משותפת.

		6-9 הן עבור אוגר המקור. לייצוג זה מתווספות זוג סיביות של שדה A,R,E. סיביות שאינן בשימוש יכילו 0.		
--	--	---	--	--

הערה: מותר להתייחס לתווית עוד לפני שמצהירים עליה, בתנאי שהיא אכן מוצהרת במקום כלשהו בקובץ.

מפרט הוראות המכונה:

בתיאור הוראות המכונה נשתמש במונח **PC** (קיצור של **"Program Counter"**). זהו רגיסטר פנימי של המעבד (לא רגיסטר כללי), שמכיל בכל רגע נתון את כתובת הזיכרון בה נמצאת **ההוראה הנוכחית שמתבצעת** (הכוונה תמיד לכתובת המילה הראשונה של ההוראה).

הוראות המכונה מתחלקות לשלוש קבוצות, לפי מספר האופרנדים הדרוש לפעולה.

קבוצת ההוראות הראשונה:

אלו הן הוראות הדורשות שני אופרנדים.

ההוראות השייכות לקבוצה זו הן: `mov, cmp, add, sub, lea`.

הוראה	opcode	הפעולה המתבצעת	דוגמה	הסבר הדוגמה
mov	0	מבצעת העתקה של תוכן אופרנד המקור (האופרנד הראשון) אל אופרנד היעד (האופרנד השני).	<code>mov A, r1</code>	העתק את תוכן המשתנה A (המילה שבכתובת A בזיכרון) אל רגיסטר r1.
cmp	1	מבצעת השוואה בין שני האופרנדים. ערך אופרנד היעד (השני) מופחת מערך אופרנד המקור (הראשון), ללא שמירת תוצאת החיסור. פעולת החיסור מעדכנת דגל בשם Z ("דגל האפס") ברגיסטר הסטטוס (PSW).	<code>cmp A, r1</code>	אם תוכן המשתנה A זהה לתוכנו של רגיסטר r1 אזי הדגל Z ("דגל האפס") ברגיסטר הסטטוס (PSW) יודלק, אחרת הדגל יאופס.
add	2	אופרנד היעד (השני) מקבל את תוצאת החיבור של אופרנד המקור (הראשון) והיעד (השני).	<code>add A, r0</code>	רגיסטר r0 מקבל את תוצאת החיבור של תוכן המשתנה A ותוכנו הנוכחי של r0.
sub	3	אופרנד היעד (השני) מקבל את תוצאת החיסור של אופרנד המקור (הראשון) מאופרנד היעד (השני).	<code>sub #3, r1</code>	רגיסטר r1 מקבל את תוצאת החיסור של הקבוע 3 מתוכנו הנוכחי של הרגיסטר r1.
lea	6	lea הוא קיצור (ראשי תיבות) של load effective address. זו מציבה את המען בזיכרון המיוצג על ידי התווית שבאופרנד הראשון (המקור), אל אופרנד היעד (האופרנד השני).	<code>lea HELLO, r1</code>	המען שמייצגת התווית HELLO מוצב לרגיסטר r1.

קבוצת ההוראות השניה:

אלו הן ההוראות הדורשות אופרנד אחד בלבד. אופן הקידוד של האופרנד הוא כמו של אופרנד היעד בפקודה עם שני אופרנדים. השדות של אופרנד המקור (סיביות 4-5) במילה הראשונה בקידוד ההוראה אינם בשימוש, ולפיכך יהיו מאופסים.

ההוראות השייכות לקבוצה זו הן: clr, not, inc, dec, jmp, bne, jsr, red, prn

הוראה	opcode	הפעולה המתבצעת	דוגמה	הסבר הדוגמה
clr	5	איפוס תוכן האופרנד	clr r2	הרגיסטר r2 מקבל את הערך 0.
not	4	היפוך ערכי הסיביות באופרנד (כל סיבית שערכה 0 תהפוך ל-1 ולהיפך: 1 ל-0).	not r2	כל ביט ברגיסטר r2 מתהפך.
inc	7	הגדלת תוכן האופרנד באחד.	inc r2	תוכן הרגיסטר r2 מוגדל ב-1.
dec	8	הקטנת תוכן האופרנד באחד.	dec Count	תוכן המשתנה Count מוקטן ב-1.
jmp	9	קפיצה (הסתעפות) בלתי מותנית אל ההוראה שנמצאת במען המיוצג על ידי האופרנד. כלומר, כתוצאה מביצוע ההוראה, מצביע התוכנית (PC) מקבל את ערך אופרנד היעד.	jmp Line	PC ← Line
bne	10	bne הוא קיצור (ראשי תיבות) של: branch if not equal (to zero). זוהי הוראת הסתעפות מותנית. אם ערכו של הדגל Z ברגיסטר הסטטוס (PSW) הינו 0, אזי מצביע התוכנית (PC) מקבל את יעד הקפיצה. כזכור, הדגל Z נקבע באמצעות הוראת cmp.	bne Line	אם ערך הדגל Z ברגיסטר הסטטוס (PSW) הוא 0, אזי PC ← Line
jsr	13	קריאה לשגרה (סברוטינה). כתובת ההוראה שאחרי הוראת jsr הנוכחית (PC+2) נדחפת לתוך המחסנית שבזיכרון המחשב, ומצביע התוכנית (PC) מקבל את כתובת השגרה. הערה: חזרה מהשגרה מתבצעת באמצעות הוראת rts, תוך שימוש בכתובת שבמחסנית.	jsr SUBR	push(PC+2) PC ← address(SUBR) מצביע התוכנית יקבל את כתובת התווית SUBR, ולפיכך, ההוראה הבאה שתתבצע תהיה במען SUBR. כתובת החזרה מהשגרה נשמרת במחסנית.
red	11	קריאה של תו מהקלט הסטנדרטי (stdin) אל האופרנד.	red r1	קוד ה-ascii של התו הנקרא מהקלט ייכנס לרגיסטר r1.
prn	12	הדפסת התו הנמצא באופרנד, אל הפלט הסטנדרטי (stdout).	prn r1	יודפס לפלט התו (קוד ascii) הנמצא ברגיסטר r1

קבוצת ההוראות השלישית:

אלו הן ההוראות ללא אופרנדים. קידוד ההוראה מורכב ממילה אחת בלבד. השדות של אופרנד המקור ושל אופרנד היעד (סיביות 2-5) במילה הראשונה של קידוד ההוראה אינם בשימוש, ולפיכך יהיו מאופסים.

ההוראות השייכות לקבוצה זו הן: rts, stop.

הוראה	opcode	הפעולה המתבצעת	דוגמה	הסבר הדוגמה
rts	14	מתבצעת חזרה משיגרה. הערך שבראש המחסנית של המחשב מוצא מן המחסנית, ומוכנס למצביע התוכנית (PC). <u>הערה</u> : ערך זה נכנס למחסנית בקריאה לשגרה ע"י הוראת jsr	rts	$PC \leftarrow pop()$ ההוראה הבאה שתבצע תהיה זו שאחרי הוראת jsr שקראה לשגרה.
stop	15	עצירת ריצת התוכנית.	stop	התוכנית עוצרת מיידית.

מבנה שפת האסמבלי:

תכנית בשפת אסמבלי בנויה ממאקרואים וממשפטים (statements).

מאקרואים:

מאקרואים הם קטעי קוד הכוללים בתוכם משפטים. בתוכנית ניתן להגדיר מאקרו ולהשתמש בו במקומות שונים בתוכנית. השימוש במאקרו ממקום מסוים בתוכנית יגרום לפרישת המאקרו לאותו מקום.

הגדרת מאקרו נעשית באופן הבא: (בדוגמה שם המאקרו הוא a_mc)

```
macro a_mc
    inc r2
    mov A,r1
macroend
```

שימוש במאקרו הוא פשוט אזכור שמו. למשל, אם בתוכנית במקום כלשהו כתוב:

```
.
.
a_mc
.
a_mc
.
```

בדוגמה זו, השתמשנו פעמיים במאקרו a_mc, התוכנית לאחר פרישת המאקרו תיראה כך:

```
.
.
inc r2
mov A,r1
.
inc r2
mov A,r1
.
```


התוכנית לאחר פרישת המאקרו היא התוכנית שהאסמבלר אמור לתרגם.

הנחות והנחיות לגבי מאקרו:

- אין במערכת הגדרות מאקרו מקוננות (אין צורך לבדוק זאת).
- שם של הוראה או הנחיה לא יכול להיות שם של מאקרו (יש לבדוק זאת).
- ניתן להניח שלכל שורת מאקרו בקוד המקור קיימת סגירה עם שורת macroend (אין צורך לבדוק זאת).
- הגדרת מאקרו תהיה תמיד לפני הקריאה למאקרו (אין צורך לבדוק זאת).
- נדרש שהקדם-אסמבלר ייצור קובץ עם הקוד המורחב הכולל פרישה של המאקרו (הרחבה של קובץ המקור המתואר בהמשך). "קובץ המקור המורחב" הוא "קובץ מקור" לאחר פרישת המאקרו, לעומת "קובץ מקור ראשוני" שהוא קובץ הקלט למערכת, כולל הגדרת המאקרואים.

לסיכום, במאקרו יש לבדוק:

- (1) שם המאקרו תקין (אינו שם הוראה וכדומה)
 - (2) בשורת ההגדרה ובשורת הסיום אין תווים נוספים
- אם נמצאה שגיאה בשלב פרישת המאקרו - אי אפשר לעבור לשלבים הבאים:
יש לעצור להודיע על השגיאות ולעבור לקובץ המקור הבא (אם קיים).
הערה: שגיאות בגוף המאקרו (אם יש) מגלים בשלבים הבאים.

משפטים:

קובץ מקור בשפת אסמבלי מורכב משורות המכילות משפטים של השפה, כאשר כל משפט מופיע בשורה נפרדת. כלומר, ההפרדה בין משפט למשפט בקובץ המקור הינה באמצעות התו 'n' (שורה חדשה).

אורכה של שורה בקובץ המקור הוא 80 תווים לכל היותר (לא כולל התו n). אם השורה ארוכה מ-80 תווים, יש לדווח על שגיאה.

יש ארבעה סוגי משפטים (שורות בקובץ המקור) בשפת אסמבלי, והם:

סוג המשפט	הסבר כללי
משפט ריק	זוהי שורה המכילה אך ורק תווים לבנים (whitespace), כלומר רק את התווים ' ' ו- '\t' (רווחים וטאבים). ייתכן ובשורה אין אף תו (למעט התו n), כלומר השורה ריקה.
משפט הערה	זוהי שורה בה התו הראשון הינו ';' (נקודה פסיק). על האסמבלר להתעלם לחלוטין משורה זו.
משפט הנחיה	זהו משפט המנחה את האסמבלר מה עליו לעשות כשהוא פועל על תכנית המקור. יש מספר סוגים של משפטי הנחיה. משפט הנחיה עשוי לגרום להקצאת זיכרון ואתחול משתנים של התכנית, אך הוא אינו מייצר קידוד של הוראות מכונה המיועדות לביצוע בעת ריצת התכנית.
משפט הוראה	זהו משפט המייצר קידוד של הוראות מכונה לביצוע בעת ריצת התכנית. המשפט מורכב משם של הוראה שעל המעבד לבצע, ותיאור האופרנדים של ההוראה.

כעת נפרט יותר לגבי סוגי המשפטים השונים.

משפט הנחיה:

משפט הנחיה הוא בעל המבנה הבא:

בתחילת המשפט יכולה להופיע הגדרה של תווית (label). לתווית יש תחביר חוקי, שיתואר בהמשך. התווית היא אופציונלית.

לאחר מכן מופיע שם ההנחיה. לאחר שם ההנחיה יופיעו פרמטרים (מספר הפרמטרים בהתאם להנחיה). שם של הנחיה מתחיל בתו ' ' (נקודה) ולאחריו תווים באותיות קטנות (lower case) בלבד.

יש לשים לב: למילים בקוד המכונה הנוצרות ממשפט הנחיה לא מצורף השדה A,R,E, והקידוד ממלא את כל הסיביות של המילה.

יש ארבעה סוגים של משפטי הנחיה, והם:

1. ההנחיה 'data'.

הפרמטרים של ההנחיה 'data' הם מספרים שלמים חוקיים (אחד או יותר) המופרדים על ידי התו ',', (פסיק). לדוגמה:

data 7, -57, +17, 9

יש לשים לב שהפסיקים אינם חייבים להיות צמודים למספרים. בין מספר לפסיק ובין פסיק למספר יכולים להופיע רווחים וטאבים בכל כמות (או בכלל לא), אולם הפסיק חייב להופיע בין המספרים. כמו כן, אסור שיופיע יותר מפסיק אחד בין שני מספרים, וגם לא פסיק אחרי המספר האחרון או לפני המספר הראשון.

המשפט 'data' מנחה את האסמבלר להקצות מקום בתמונת הנתונים (data image), אשר בו יאוחסנו הערכים של הפרמטרים, ולקדם את מונה הנתונים, בהתאם למספר הערכים. אם בהנחית data מוגדרת תווית, אזי תווית זו מקבלת את ערך מונה הנתונים (לפני הקידום), ומוכנסת אל טבלת הסמלים. דבר זה מאפשר להתייחס אל מקום מסוים בתמונת הנתונים דרך שם התווית (למעשה, זוהי דרך להגדיר שם של משתנה).

כלומר אם נכתוב:

XYZ: data 7, -57, +17, 9

אזי יוקצו בתמונת הנתונים ארבע מילים רצופות שיכילו את המספרים שמופיעים בהנחיה. התווית XYZ מזוהה עם כתובת המילה הראשונה.

אם נכתוב בתכנית את ההוראה:

mov XYZ, r1

אזי בזמן ריצת התכנית יוכנס לרגיסטר r1 הערך 7.

ואילו ההוראה:

lea XYZ, r1

תכניס לרגיסטר r1 את ערך התווית XYZ (כלומר הכתובת בזיכרון בה מאוחסן הערך 7).

2. ההנחיה 'string'.

להנחיה 'string' פרמטר אחד, שהוא מחרוזת חוקית. תווי המחרוזת מקודדים לפי ערכי ה-ascii המתאימים, ומוכנסים אל תמונת הנתונים לפי סדרם, כל תו במילה נפרדת. בסוף המחרוזת יתווסף התו '\0' (הערך המספרי 0), המסמן את סוף המחרוזת. מונה הנתונים של האסמבלר יקודם בהתאם לאורך המחרוזת (בתוספת מקום אחד עבור התו המסיים). אם בשורת ההנחיה מוגדרת תווית, אזי תווית זו מקבלת את ערך מונה הנתונים (לפני הקידום) ומוכנסת אל טבלת הסמלים, בדומה למה שנעשה עבור 'data' (כלומר ערך התווית יהיה הכתובת בזיכרון שבה מתחילה המחרוזת).

לדוגמה, ההנחיה:

STR: .string "abcdef"

מקצה בתמונת הנתונים רצף של 7 מילים, ומאתחלת את המילים לקודי ה-ascii של התווים לפי הסדר במחרוזת, ולאחריהם הערך 0 לסימון סוף מחרוזת. התווית STR מזוהה עם כתובת התחלת המחרוזת.

3. '.mat'

משפט הנחיה זה מקצה מטריצה. למשפט הנחיה '.mat' המבנה הבא:

MAT8: .mat [2][3]

MAT5: .mat [2][2] 4,-5,7,9

בדוגמא הראשונה מקצים מטריצה בשם MAT8 שגודלה 2 שורות ו-3 עמודות והיא אינה מאותחלת בערכים (אבל כן צורכת מקום בתמונת הנתונים).

בדוגמא השניה מקצים מטריצה בשם MAT5 בגודל 2 שורות ו-2 עמודות, המאותחלת לערכים המפורטים. הערכים לאתחול רשומים משמאל לימין לפי סדר השורות. מטריצה תכיל רק מספרים שלמים.

4. ההנחיה '.entry'

להנחיה '.entry' פרמטר והוא שם של תווית המוגדרת בקובץ המקור הנוכחי (כלומר תווית שמקבלת את ערכה בקובץ זה). מטרת ההנחיה entry. היא לאפיין את התווית הזו באופן שיאפשר לקוד אסמבלי הנמצא בקבצי מקור אחרים להשתמש בה (כאופרנד של הוראה).

לדוגמה, השורות:

```
.entry    HELLO
HELLO:    add     #1, r1
.....
```

מודיעות לאסמבלר שאפשר להתייחס בקובץ אחר לתווית HELLO המוגדרת בקובץ הנוכחי.

לתשומת לב: תווית המוגדרת בתחילת שורת entry. הינה חסרת משמעות והאסמבלר **מתעלם** מתווית זו (אפשר שהאסמבלר יוציא הודעת אזהרה).

5. ההנחיה '.extern'

להנחיה '.extern' פרמטר והוא שם של תווית שאינה מוגדרת בקובץ המקור הנוכחי. מטרת ההוראה היא להודיע לאסמבלר כי התווית מוגדרת בקובץ מקור אחר, וכי קוד האסמבלר בקובץ הנוכחי עושה בתווית שימוש.

נשים לב כי הנחיה זו תואמת להנחית '.entry' המופיעה בקובץ בו מוגדרת התווית. בשלב הקישור תתבצע התאמה בין ערך התווית, כפי שנקבע בקוד המכונה של הקובץ שהגדיר את התווית, לבין קידוד ההוראות המשתמשות בתווית בקבצים אחרים (שלב הקישור אינו רלוונטי לממ"ן זה).

לדוגמה, משפט ההנחיה '.extern' התואם למשפט ההנחיה '.entry' מהדוגמה הקודמת יהיה:

```
.extern    HELLO
```

הערה: לא ניתן להגדיר באותו הקובץ את אותה התווית גם כ-entry וגם כ-extern (בדוגמאות לעיל, התווית HELLO). במקרה כזה יש להודיע על שגיאה.

לתשומת לב: תווית המוגדרת בתחילת שורת extern. הינה חסרת משמעות והאסמבלר מתעלם מתווית זו (אפשר שהאסמבלר יוציא הודעת אזהרה).

משפט הוראה:

משפט הוראה מורכב מהחלקים הבאים:

1. תווית אופציונלית.
2. שם הפעולה.
3. אופרנדים, בהתאם לסוג הפעולה (בין 0 ל-2 אופרנדים).

אם מוגדרת תווית בשורת ההוראה, אזי היא תוכנס אל טבלת הסמלים. ערך התווית יהיה מען המילה הראשונה של ההוראה בתוך תמונת הקוד שבונה האסמבלר.

שם הפעולה תמיד באותיות קטנות (lower case), והוא אחת מ-16 הפעולות שפורטו לעיל.

לאחר שם הפעולה יופיעו האופרנדים, בהתאם לסוג הפעולה. יש להפריד בין שם הפעולה לבין האופרנד הראשון באמצעות רווחים ו/או טאבים (אחד או יותר).

כאשר יש שני אופרנדים, האופרנדים מופרדים זה מזה בתו ' ', (פסיק). בדומה להנחיה 'data', **לא חייבת להיות הצמדה של האופרנדים לפסיק**. כל כמות של רווחים ו/או טאבים משני צידי הפסיק היא חוקית.

למשפט הוראה עם שני אופרנדים המבנה הבא:

label: opcode source-operand, target-operand

לדוגמה:

HELLO: add r7, B

למשפט הוראה עם אופרנד אחד המבנה הבא:

label: opcode target-operand

לדוגמה:

HELLO: bne XYZ

למשפט הוראה ללא אופרנדים המבנה הבא:

label: opcode

לדוגמה:

END: stop

אפיון השדות במשפטים של שפת האסמבלי

תווית:

בתיאור שיטות המיעון למעלה הסברנו כי תווית היא ייצוג סימבולי של כתובת בזיכרון. נרחיב כאן את ההסבר:

תווית היא למעשה סמל שמוגדר בתחילת משפט הוראה, או בתחילת הנחיית data או string. תווית חוקית מתחילה באות אלפביתית (גדולה או קטנה), ולאחריה סדרה כלשהי של אותיות אלפביתיות (גדולות או קטנות) ו/או ספרות. האורך המקסימלי של תווית הוא 30 תווים.

הגדרה של תווית מסתיימת בתו ' : ' (נקודתיים). תו זה אינו מהווה חלק מהתווית, אלא רק סימן המציין את סוף ההגדרה. התו ' : ' חייב להיות צמוד לתווית (ללא רווחים).

אסור שאותה תווית תוגדר יותר מפעם אחת (כמובן בשורות שונות). אותיות קטנות וגדולות נחשבות שונות זו מזו.

לדוגמה, התוויות המוגדרות להלן הן תוויות חוקיות.

hEllo:

x:

He78902:

לתשומת לב : מילים שמורות של שפת האסמבלי (כלומר שם של פעולה או הנחיה, או שם של רגיסטר) אינן יכולות לשמש גם כשם של תווית. כמו כן, אסור שאותו סמל ישמש הן כתווית והן כשם של מאקרו (יש לבדוק זאת).

התווית מקבלת את ערכה בהתאם להקשר בו היא מוגדרת. תווית המוגדרת בהנחיות `data`, `string`, `mat` ' תקבל את ערך מונה הנתונים (`data counter`) הנוכחי, בעוד שתווית המוגדרת בשורת הוראה תקבל את ערך מונה ההוראות (`instruction counter`) הנוכחי.

לתשומת לב : מותר במשפט הוראה להשתמש באופרנד שהוא סמל שאינו מוגדר כתווית בקובץ הנוכחי, כל עוד הסמל מאופיין כחיצוני (באמצעות הנחיית `extern`. כלשהי בקובץ הנוכחי).

מספר :

מספר חוקי מתחיל בסימן אופציונלי : ' - ' או ' + ' ולאחריו סדרה כלשהי של ספרות בבסיס עשרוני. לדוגמה : `76, -5, +123` הם מספרים חוקיים. אין תמיכה בשפת האסמבלי שלנו בייצוג בבסיס אחר מאשר עשרוני, ואין תמיכה במספרים שאינם שלמים.

מחרוזת :

מחרוזת חוקית היא סדרת תווי `ascii` נראים (שניתנים להדפסה), המוקפים במרכאות כפולות (המרכאות אינן נחשבות חלק מהמחרוזת). דוגמה למחרוזת חוקית : `"hello world"`.

סימון המילים בקוד המכונה באמצעות המאפיין "A,R,E"

בכל מילה בקוד המכונה של הוראה (לא של נתונים), האסמבלר מכניס מידע עבור תהליך הקישור והטעינה. זה השדה `A,R,E`. המידע ישמש לתיקונים בקוד בכל פעם שייטען לזיכרון לצורך הרצה. האסמבלר בונה מלכתחילה קוד שמיועד לטעינה החל מכתובת ההתחלה. התיקונים יאפשרו לטעון את הקוד בכל פעם למקום אחר, בלי צורך לחזור על תהליך האסמבלי.

שלוש הסיביות בשדה `A,R,E` יכילו ערכים בינאריים כפי שהוסבר בתיאור שיטות המיעון. המשמעות של כל ערך מפורטת להלן.

האות 'A' (קיצור של `absolute`) באה לציין שתוכן המילה אינו תלוי במקום בזיכרון בו ייטען בפועל קוד המכונה של התכנית בעת ביצועה (למשל מילה המכילה אופרנד מיידית).

האות 'R' (קיצור של `relocatable`) באה לציין שתוכן המילה תלוי במקום בזיכרון בו ייטען בפועל קוד המכונה של התכנית בעת ביצועה (למשל מילה המכילה כתובת של תווית המוגדרת בקובץ המקור).

האות 'E' (קיצור של `external`) באה לציין שתוכן המילה תלוי בערכו של סמל חיצוני (`external`) (למשל מילה המכילה כתובת של תווית חיצונית, כלומר תווית שאינה מוגדרת בקובץ המקור).

כאשר האסמבלר מקבל קלט תוכנית בשפת אסמבלי, עליו לטפל תחילה בפרישת המאקרואים, ורק לאחר מכן לעבור על התוכנית אליה נפרשו המאקרואים. כלומר, פרישת המאקרואים תעשה בשלב "קדם אסמבלר", לפני שלב האסמבלר (המתואר בהמשך).

אם התכנית אינה מכילה מאקרו, תוכנית הפרישה תהיה זהה לתכנית המקור.

דוגמה לשלב קדם אסמבלר. האסמבלר מקבל את התוכנית הבאה בשפת אסמבלי:

```
MAIN:      mov     M1[r2][r7],LENGTH
           add     r2,STR
LOOP:      jmp     END
           prn     #-5
           macro a_mc
           mov     M1[r3][r3],r3
           bne     LOOP
           macroend
           sub     r1, r4
           inc     K

           a_mc
END:        stop
STR:        .string "abcdef"
LENGTH:    .data   6,-9,15
K:          .data   22
M1:        .mat    [2][2] 1,2,3,4
```

תחילה האסמבלר עובר על התוכנית ופורש את כל המאקרואים הקיימים בה. רק אם תהליך זה מסתיים בהצלחה, ניתן לעבור לשלב הבא. אחרת, יש להציג את השגיאות ולא לייצר קבצים. בדוגמה זו, התוכנית לאחר פרישת המאקרו תיראה כך:

```
MAIN:      mov     M1[r2][r7],LENGTH
           add     r2,STR
LOOP:      jmp     END
           prn     #-5
           sub     r1, r4
           inc     K

           mov     M1[r3][r3],r3
           bne     LOOP
END:        stop
STR:        .string "abcdef"
LENGTH:    .data   6,-9,15
K:          .data   22
M1:        .mat    [2][2] 1,2,3,4
```

קוד התכנית, לאחר הפרישה, ישמר בקובץ חדש, כפי שיוסבר בהמשך.

אלגוריתם שלדי של קדם האסמבלר

נציג להלן אלגוריתם שלדי לתהליך קדם האסמבלר. לתשומת לב: אין חובה להשתמש דווקא באלגוריתם זה:

1. קרא את השורה הבאה מקובץ המקור. אם נגמר הקובץ, עבור ל- 9 (סיום).
2. האם השדה הראשון הוא שם מאקרו המופיע בטבלת המאקרו (כגון a_mc)? אם כן, החלף את שם המאקרו והעתק במקומו את כל השורות המתאימות מהטבלה לקובץ, חזור ל- 1. אחרת, המשך.
3. האם השדה הראשון הוא "mcro" (התחלת הגדרת מאקרו)? אם לא, עבור ל- 6.
4. הדלק דגל "יש mcro".
5. (קיימת הגדרת מאקרו) הכנס לטבלת שורות מאקרו את שם המאקרו (לדוגמה a_mc).
6. קרא את השורה הבאה מקובץ המקור. אם נגמר קובץ המקור, עבור ל- 9 (סיום).
אם דגל "יש mcro" דולק ולא זוהתה תווית mcroend הכנס את השורה לטבלת המאקרו ומחק את השורה הנ"ל מהקובץ. אחרת (לא מאקרו) חזור ל- 1.
7. האם זוהתה תווית mcroend? אם כן, מחק את התווית מהקובץ והמשך. אם לא, חזור ל- 6.
8. כבה דגל "יש mcro". חזור ל- 1. (סיום שמירת הגדרת מאקרו).
9. סיום: שמירת קובץ מאקרו פרוש.

אסמבלר עם שני מעברים

במעבר הראשון של האסמבלר, יש לזהות את הסמלים (תוויות) המופיעים בתוכנית, ולתת לכל סמל ערך מספרי שהוא המען בזיכרון שהסמל מייצג. במעבר השני, באמצעות ערכי הסמלים, וכן קודי-הפעולה ומספרי הרגיסטרים, בונים את קוד המכונה.

עליו להחליף את שמות הפעולות בקוד הבינארי השקול להם במודל המחשב שהגדרנו.

כמו כן, על האסמבלר להחליף את כל הסמלים (למשל MAIN, LOOP) במענים של המקומות בזיכרון שם נמצאים כל נתון או הוראה בהתאמה.

נניח שקטע הקוד לעיל (הוראות ונתונים) ייטען בזיכרון החל ממען 100 (בבסיס 10). במקרה זה נקבל את ה"תרגום" הבא:

לתשומת לב: המקפים המופיעים בקידוד הבינארי הם רק לצורך הדגשת ההפרדה בין השדות השונים בקידוד ונועדו לשם המחשה בלבד.

Label	Decimal Address	Base 4 Address	Instruction	Operands	Binary machine code
MAIN:	0100	1210	mov	M1[r2][r7],LENGTH	0000-10-01-00
	0101	1211		כתובת של M1	10000101-10
	0102	1212		קידוד אוגרי האינדקסים במטריצה	0010-0111-00
	0103	1213		כתובת של LENGTH	10000001-10
	0104	1220	add	r2, STR	0010-11-01-00
	0105	1221		קידוד מספר האוגר	0010-0000-00
	0106	1222		כתובת של STR	01111010-10
LOOP:	0107	1223	jmp	END	1001-00-01-00
	0108	1230		כתובת של END	01111001-10
	0109	1231	prn	#-5	1100-00-00-00

	0110	1232		המספר 5-	1111011-00
	0111	1233	sub	r1,r4	0011-11-11-00
	0112	1300		קידודי מספרי האוגרים	0001-0100-00
	0113	1301	inc	K	0111-00-01-00
	0114	1302		כתובת של K	10000100-10
	0115	1303	mov	M1[r3][r3],r3	0000-10-11-00
	0116	1310		כתובת של M1	10000101-10
	0117	1311		קידוד אוגרי האינדקסים במטריצה	0011-0011-00
	0118	1312		קידוד מספר האוגר של היעד	0000-0011-00
	0119	1313	bne	LOOP	1010-00-01-00
	0120	1320		כתובת של LOOP	01101011-10
END:	0121	1321	stop		1111-00-00-00
STR:	0122	1322	.string	"abcdef"	0001100001
	0123	1323			0001100010
	0124	1330			0001100011
	0125	1331			0001100100
	0126	1332			0001100101
	0127	1333			0001100110
	0128	2000			0000000000
LENGTH:	0129	2001	.data	6,-9,15	0000000110
	0130	2002			1111110111
	0131	2003			0000001111
K:	0132	2010	.data	22	0000010110
M1	0133	2011	.mat	[2][2] 1,2,3,4	0000000001
	0134	2012			0000000010
	0135	2013			0000000011
	0136	2020			0000000100

האסמבלר מחזיק טבלה שבה רשומים כל שמות הפעולה של ההוראות והקודים הבינאריים המתאימים להם, ולכן שמות הפעולות ניתנים להמרה לבינארי בקלות. כאשר נקרא שם פעולה, אפשר פשוט לעיין בטבלה ולמצוא את הקוד הבינארי.

כדי לבצע המרה לבינארי של אופרנדים שכתובים בשיטות מיעון המשתמשות בסמלים (תוויות), יש צורך לבנות טבלה המכילה את ערכי כל הסמלים. אולם בהבדל מהקודים של הפעולות, הידועים מראש, הרי המענים בזיכרון עבור הסמלים שבשימוש התוכנית אינם ידועים, עד אשר תוכנית המקור נסרקה כולה ונתגלו כל הגדרות הסמלים.

למשל, בקוד לעיל, האסמבלר אינו יכול לדעת שהסמל END משויך למען 121 (עשרוני), אלא רק לאחר שנקראו כל שורות התכנית.

לכן מפרידים את הטיפול של האסמבלר בסמלים לשני שלבים. בשלב הראשון בונים טבלה של כל הסמלים, עם הערכים המספריים המשווים להם, ובשלב השני מחליפים את כל הסמלים, המופיעים באופרנדים של ההוראות התוכנית, בערכיהם המספריים. הביצוע של שני שלבים אלה כרוך בשתי סריקות (הנקראות "מעברים") של קובץ המקור.

במעבר הראשון נבנית טבלת סמלים בזיכרון, ובה לכל סמל שבתוכנית המקור משויך ערך מספרי, שהוא מען בזיכרון. בדוגמה לעיל, טבלת הסמלים לאחר מעבר ראשון היא:

ערך (בבסיס עשרוני)	סמל
100	MAIN
107	LOOP
121	END
122	STR
129	LENGTH
132	K
133	M1

במעבר השני נעשית ההמרה של קוד המקור לקוד מכונה. בתחילת המעבר השני צריכים הערכים של הסמלים להיות כבר ידועים.

לתשומת לב: תפקיד האסמבלר, על שני המעברים שלו, לתרגם קובץ מקור לקוד בשפת מכונה. בגמר פעולת האסמבלר, התכנית טרם מוכנה לטעינה לזיכרון לצורך ביצוע. קוד המכונה חייב לעבור לשלבי הקישור/טעינה, ורק לאחר מכן לשלב הביצוע (שלבים אלה אינם חלק מהממ"ן).

המעבר הראשון

במעבר הראשון נדרשים כללים כדי לקבוע איזה מען ישויד לכל סמל. העיקרון הבסיסי הוא לספור את המקומות בזיכרון, אותם תופסות ההוראות. אם כל הוראה תיטען בזיכרון למקום העוקב להוראה הקודמת, תציין ספירה כזאת את מען ההוראה הבאה. הספירה נעשית על ידי האסמבלר ומוחזקת במונה ההוראות (IC). ערכו ההתחלתי של IC הוא 100 (עשרוני), ולכן קוד המכונה של ההוראה הראשונה נבנה כך שייטען לזיכרון החל ממען 100. ה-IC מתעדכן בכל שורת הוראה המקצה מקום בזיכרון. לאחר שהאסמבלר קובע מהו אורך ההוראה, ה-IC מוגדל במספר התאים (מילים) הנתפסים על ידי ההוראה, וכך הוא מצביע על התא הפנוי הבא.

כאמור, כדי לקודד את ההוראות בשפת מכונה, מחזיק האסמבלר טבלה, שיש בה קוד מתאים לכל שם פעולה. בזמן התרגום מחליף האסמבלר כל שם פעולה בקוד שלה, וכן כל אופרנד מוחלף בקידוד מתאים, אך פעולת החלפה זו אינה כה פשוטה. ההוראות משתמשות בשיטות מיעון מגוונות לאופרנדים. אותה פעולה יכולה לקבל משמעויות שונות, בכל אחת משיטות המיעון, ולכן יתאימו לה קידודים שונים לפי שיטות המיעון. לדוגמה, פעולת ההזזה mov יכולה להתייחס להעתקת תוכן תא זיכרון לרגיסטר, או להעתקת תוכן רגיסטר לרגיסטר אחר, וכן הלאה. לכל אפשרות כזאת של mov עשוי להתאים קידוד שונה.

על האסמבלר לסרוק את שורת ההוראה בשלמותה, ולהחליט לגבי הקידוד לפי האופרנדים. בדרך כלל מתחלק הקידוד לשדה של שם הפעולה, ושדות נוספים המכילים מידע לגבי שיטות המיעון. כל השדות ביחד דורשים מילה אחת או יותר בקוד המכונה.

כאשר נתקל האסמבלר בתווית המופיעה בתחילת השורה, הוא יודע שלפניו הגדרה של תווית, ואז הוא משייך לה מען – תוכנו הנוכחי של ה-IC. כך מקבלות כל התוויות את מעניהן בעת ההגדרה. תוויות אלה מוכנסות לטבלת הסמלים, המכילה בנוסף לשם התווית גם את המען ומאפיינים נוספים. כאשר תהיה התייחסות לתווית באופרנד של הוראה כלשהי, יוכל האסמבלר לשלוף את המען המתאים מטבלת הסמלים.

הוראה יכולה להתייחס גם לסמל שטרם הוגדר עד כה בתכנית, אלא יוגדר רק בהמשך התכנית. להלן לדוגמה, הוראת הסתעפות למען שמוגדר על ידי התווית A שמופיעה רק בהמשך הקוד:

```
bne    A
.
.
.
A:     .....
```

כאשר מגיע האסמבלר לשורת ההסתעפות (bne A), הוא טרם נתקל בהגדרת התווית A וכמובן לא יודע את המען המשויד לתווית. לכן האסמבלר לא יכול לבנות את הקידוד הבינארי של האופרנד A. נראה בהמשך כיצד נפתרת בעיה זו.

בכל מקרה, תמיד אפשר לבנות במעבר הראשון את הקידוד הבינארי המלא של המילה הראשונה של כל הוראה, את הקידוד הבינארי של מילת-המידע הנוספת של אופרנד מידי, או רגיסטר, וכן את הקידוד הבינארי של כל הנתונים (המתקבלים מההנחיות data, string, mat).

המעבר השני

ראינו שבמעבר הראשון, האסמבלר אינו יכול לבנות את קוד המכונה של אופרנדים המשתמשים בסמלים שעדיין לא הוגדרו. רק לאחר שהאסמבלר עבר על כל התכנית, כך שכל הסמלים נכנסו כבר לטבלת הסמלים, יכול האסמבלר להשלים את קוד המכונה של כל האופרנדים.

לשם כך מבצע האסמבלר מעבר נוסף (מעבר שני) על כל קובץ המקור, ומעדכן את קוד המכונה של האופרנדים המשתמשים בסמלים, באמצעות ערכי הסמלים מטבלת הסמלים.

בסוף המעבר השני, תהיה התוכנית מתורגמת בשלמותה לקוד מכונה.

הפרדת הוראות ונתונים

בתכנית מבחינים בשני סוגים של תוכן: הוראות ונתונים. יש לארגן את קוד המכונה כך שתהיה הפרדה בין הנתונים וההוראות. הפרדת ההוראות והנתונים לקטעים שונים בזיכרון היא שיטה עדיפה על פני הצמדה של הגדרות הנתונים להוראות המשתמשות בהן.

אחת הסכנות הטמונות באי הפרדת ההוראות מהנתונים היא, שלפעמים עלול המעבד, בעקבות שגיאה לוגית בתכנית, לנסות "לבצע" את הנתונים כאילו היו הוראות חוקיות. למשל, שגיאה שיכולה לגרום תופעה כזו הסתעפות לא נכונה. התכנית כמובן לא תעבוד נכון, אך לרוב הנזק הוא יותר חמור, כי נוצרת חריגת חומרה ברגע שהמעבד מבצע פעולה שאינה חוקית.

האסמבלר שלנו חייב להפריד, בקוד המכונה שהוא מייצר, בין קטע הנתונים לקטע ההוראות. **כלומר בקובץ הפלט (בקוד המכונה) תהיה הפרדה של הוראות ונתונים לשני קטעים נפרדים, ואילו בקובץ הקלט אין חובה שתהיה הפרדה כזו.** בהמשך מתואר אלגוריתם של האסמבלר, ובו פרטים כיצד לבצע את ההפרדה.

גילוי שגיאות בתכנית המקור

הנחת המטלה היא שאין שגיאות בהגדרות המאקרו, ולכן שלב קדם האסמבלר אינו מכיל שלב גילוי שגיאות. אין גם צורך לבדוק שגיאות בפתיחת / סגירת המאקרו (למשל אם המאקרו לא מסתיים – ניתן להניח שהני"ל תקין). לעומת זאת, האסמבלר אמור לגלות ולדווח על שגיאות בתחביר של תוכנית המקור, כגון פעולה שאינה קיימת, מספר אופרנדים שגוי, סוג אופרנד שאינו מתאים לפעולה, שם רגיסטר לא קיים, ועוד שגיאות אחרות. כמו כן מוודא האסמבלר שכל סמל מוגדר פעם אחת בדיוק.

מכאן, שכל שגיאה המתגלה על ידי האסמבלר נגרמת (בדרך כלל) על ידי שורת קלט מסוימת.

לדוגמה, אם מופיעים שני אופרנדים בהוראה שאמור להיות בה רק אופרנד יחיד, האסמבלר ייתן הודעת שגיאה בנוסח "יותר מדי אופרנדים".

הערה: אם יש שגיאה בקוד האסמבלר בגוף מאקרו, הרי שגיאה זו יכולה להופיע ולהתגלות שוב ושוב, בכל מקום בו נפרש המאקרו. נשים לב שכאשר האסמבלר בודק שגיאות, כבר לא ניתן לזהות שזה קוד שנפרש ממאקרו, כך שלא ניתן לחסוך גילויי שגיאה כפולים.

האסמבלר ידפיס את הודעות השגיאה אל הפלט הסטנדרטי stdout. בכל הודעת שגיאה יש לציין גם את מספר השורה בקובץ המקור בה זוהתה השגיאה (מניין השורות בקובץ מתחיל ב-1).

לתשומת לב: האסמבלר אינו עוצר את פעולתו אחרי שנמצאה השגיאה הראשונה, אלא ממשיך לעבור על הקלט כדי לגלות שגיאות נוספות, ככל שישנן. כמובן שאין כל טעם לייצר את קבצי הפלט אם נתגלו שגיאות (ממילא אי אפשר להשלים את קוד המכונה).

הטבלה הבאה מפרטת מהן שיטות המיעון החוקיות, עבור אופרנד המקור ואופרנד היעד של ההוראות השונות הקיימות בשפה הנתונה:

Opcode	שם ההוראה	שיטות מיעון חוקיות עבור אופרנד המקור	שיטות מיעון חוקיות עבור אופרנד היעד
0	mov	0,1,2,3	1,2,3
1	cmp	0,1,2,3	0,1,2,3
2	add	0,1,2,3	1,2,3
3	sub	0,1,2,3	1,2,3
4	lea	1,2	1,2,3
5	clr	אין אופרנד מקור	1,2,3
6	not	אין אופרנד מקור	1,2,3
7	inc	אין אופרנד מקור	1,2,3
8	dec	אין אופרנד מקור	1,2,3
9	jmp	אין אופרנד מקור	1,2,3
10	bne	אין אופרנד מקור	1,2,3
11	jsr	אין אופרנד מקור	1,2,3
12	red	אין אופרנד מקור	1,2,3
13	prn	אין אופרנד מקור	0,1,2,3
14	rts	אין אופרנד מקור	אין אופרנד יעד
15	stop	אין אופרנד מקור	אין אופרנד יעד

אלגוריתם שלדי של האסמבלר

לחידוד ההבנה של תהליך העבודה של האסמבלר, נציג להלן אלגוריתם שלדי למעבר הראשון ולמעבר השני. לתשומת לב: אין חובה להשתמש דווקא באלגוריתם זה.

אנו מחלקים את קוד המכונה לשני אזורים, אזור ההוראות (code) ואזור הנתונים (data). לכל אזור יש מונה משלו, ונסמנם IC (מונה ההוראות - Instruction-Counter) ו-DC (מונה הנתונים - Data-Counter). נבנה את קוד המכונה כך שיתאים לטעינה לזיכרון **החל מכתובת 0**.

בכל מעבר מתחילים לקרוא את קובץ המקור מהתחלה.

מעבר ראשון

1. אתחל $DC \leftarrow 0$, $IC \leftarrow 0$.
2. קרא את השורה הבאה מקובץ המקור. אם נגמר קובץ המקור, עבור ל-17.
3. האם השדה הראשון בשורה הוא סמל? אם לא, עבור ל-5.
4. הדלק דגל "יש הגדרת סמל".
5. האם זוהי הנחיה לאחסון נתונים, כלומר, האם הנחית data או string? אם לא, עבור ל-8.
6. אם יש הגדרת סמל (תווית), הכנס אותו לטבלת הסמלים עם המאפיין data. ערכו יהיה DC. (אם הסמל כבר נמצא בטבלה יש להודיע על שגיאה).
7. זהה את סוג הנתונים, קודד אותם בזיכרון, ועדכן את מונה הנתונים DC בהתאם לאורכם. חזור ל-2.
8. האם זו הנחית extern או הנחית entry? אם לא, עבור ל-11.
9. אם זוהי הנחית entry. חזור ל-2 (ההנחיה תטופל במעבר השני).
10. אם זו הנחית extern, הכנס את הסמל המופיע כאופרנד של ההנחיה לתוך טבלת הסמלים עם הערך 0, ועם המאפיין external. חזור ל-2.
11. זוהי שורת הוראה. אם יש הגדרת סמל, הכנס אותו לטבלת הסמלים עם המאפיין code. ערכו של הסמל יהיה IC (אם הסמל כבר נמצא בטבלה יש להודיע על שגיאה).
12. חפש את שם הפעולה בטבלת שמות הפעולות, ואם לא נמצא, אז הודע על שגיאה בשם ההוראה.

13. נתח את מבנה האופרנדים של ההוראה, וחשב מהו מספר המילים הכולל שתופסת ההוראה בקוד המכונה (נקרא למספר זה L).
14. בנה כעת את הקוד הבינארי של המילה הראשונה של ההוראה, ושל כל מילת-מידע נוספת המקודדת אופרנד במיעון מידי.
15. שמור את הערכים IC ו-L יחד עם נתוני קוד המכונה של ההוראה.
16. עדכן $IC \leftarrow IC + L$, וחזור ל-2.
17. קובץ המקור נקרא בשלמותו. אם נמצאו שגיאות במעבר הראשון, עצור כאן.
18. שמור את הערכים הסופיים של IC ושל DC (נקרא להם ICF ו-DCF). נשתמש בהם לבניית קבצי הפלט, אחרי המעבר השני.
19. עדכן בטבלת הסמלים את ערכו של כל סמל המאופיין ב- data, ע"י הוספת הערך ICF (ראו הסבר לכך בהמשך).
20. התחל מעבר שני.

מעבר שני

1. קרא את השורה הבאה מקובץ המקור. אם נגמר קובץ המקור, עבור ל-7.
2. אם השדה הראשון בשורה הוא סמל (תווית), דלג עליו.
3. האם זוהי הנחית data או string או mat. extern ? אם כן, חזור ל-1.
4. האם זוהי הנחית entry ? אם לא, עבור ל-6.
5. הוסף בטבלת הסמלים את המאפיין entry למאפיין הסמל המופיע כאופרנד של ההנחיה (אם הסמל לא נמצא בטבלת הסמלים, יש להודיע על שגיאה). חזור ל-1.
6. השלם את הקידוד הבינארי של מילות-המידע של האופרנדים, בהתאם לשיטות המיעון שבשימוש. לכל אופרנד בקוד המקור המכיל סמל, מצא את ערכו של הסמל בטבלת הסמלים (אם הסמל לא נמצא בטבלה, יש להודיע על שגיאה). אם הסמל מאופיין external, הוסף את כתובת מילת-המידע הרלוונטית לרשימת מילות-מידע שמתייחסות לסמל חיצוני. לפי הצורך, לחישוב הקידוד והכתובות, אפשר להיעזר בערכים IC ו-L של ההוראה, כפי שנשמרו במעבר הראשון. חזור ל-1.
7. קובץ המקור נקרא בשלמותו. אם נמצאו שגיאות במעבר השני, עצור כאן.
8. בנה את קבצי הפלט (פרטים נוספים בהמשך).

נפעיל אלגוריתם זה על תוכנית הדוגמה שראינו למעלה (**לאחר שלב פרישת המאקרואים**), ונציג את הקוד הבינארי שמתקבל במעבר ראשון ובמעבר שני. להלן שוב תכנית הדוגמה:

```

MAIN:      mov     M1[r2][r7],LENGTH
           add     r2,STR
LOOP:      jmp     END
           prn     #-5
           sub     r1, r4
           inc     K

           mov     M1[r3][r3],r3
           bne     LOOP
END:       stop
STR:       .string "abcdef"
LENGTH:    .data   6,-9,15
K:         .data   22
M1:        .mat    [2][2] 1,2,3,4

```

נבצע עתה מעבר ראשון על הקוד הנתון. נבנה את טבלת הסמלים. כמו כן, נבצע במעבר זה גם את קידוד כל הנתונים, וקידוד המילה הראשונה של כל הוראה. כמו כן, נקודד מילות-מידע נוספות של כל הוראה, ככל שקידוד זה אינו תלוי בערך של סמל. את החלקים שעדיין לא מתורגמים במעבר זה, נשאיר כמות שהם (מסומנים ב- ? בדוגמה להלן). נניח שהקוד ייטען החל מהמען 100 (בבסיס 10).

Label	Decimal Address	Base 4 Address	instruction	Operands	Binary machine code
MAIN:	0100	1210	mov	M1[r2][r7],LENGTH	0000-10-01-00
	0101	1211		כתובת של M1	?
	0102	1212		קידוד אוגרי האינדקסים במטריצה	0010-0111-00
	0103	1213		כתובת של LENGTH	?
	0104	1220	add	r2, STR	0010-11-01-00
	0105	1221		קידוד מספר האוגר	0010-0000-00
	0106	1222		כתובת של STR	?
LOOP:	0107	1223	jmp	END	1001-00-01-00
	0108	1230		כתובת של END	?
	0109	1231	prn	#-5	1100-00-00-00
	0110	1232		המספר -5	11111011-00
	0111	1233	sub	r1,r4	0011-11-11-00
	0112	1300		קידודי מספרי האוגרים	0001-0100-00
	0113	1301	inc	K	0111-00-01-00
	0114	1302		כתובת של K	?
	0115	1303	mov	M1[r3][r3],r3	0000-10-11-00
	0116	1310		כתובת של M1	?
	0117	1311		קידוד אוגרי האינדקסים במטריצה	0011-0011-00
	0118	1312		קידוד מספר האוגר של היעד	0000-0011-00
	0119	1313	bne	LOOP	1010-00-01-00
	0120	1320		כתובת של LOOP	?
END:	0121	1321	stop		1111-00-00-00
STR:	0122	1322	.string	"abcdef"	0001100001
	0123	1323			0001100010
	0124	1330			0001100011
	0125	1331			0001100100
	0126	1332			0001100101
	0127	1333			0001100110
	0128	2000			0000000000
	0129	2001	.data	6,-9,15	0000000110
LENGTH:	0130	2002			1111110111
	0131	2003			0000001111
K:	0132	2010	.data	22	0000010110
M1	0133	2011	.mat	[2][2] 1,2,3,4	0000000001
	0134	2012			0000000010
	0135	2013			0000000011
	0136	2020			0000000100

טבלת הסמלים אחרי המעבר ראשון היא :

איפיון הסמל	ערך (בבסיס עשרוני)	סמל
code	100	MAIN
code	107	LOOP
code	121	END
data	122	STR
data	129	LENGTH
data	132	K
	133	M1

נבצע עתה את המעבר השני. נשלים באמצעות טבלת הסמלים את הקידוד החסר במילים המסומנות "?".
הקוד הבינארי בצורתו הסופית כאן זהה לקוד שהוצג בתחילת הנושא "אסמבלר עם שני מעברים".

הערה: כאמור, האסמבלר בונה קוד מכונה כך שיתאים לטעינה לזיכרון החל מכתובת 100 (עשרוני).
אם הטעינה בפועל (לצורך הרצת התוכנית) תהיה לכתובת אחרת, יידרשו תיקונים בקוד הבינארי
בשלב הטעינה, שיוכנסו בעזרת מידע נוסף שהאסמבלר מכין בקבצי הפלט (ראו בהמשך).

Label	Decimal Address	Base 4 Address	Command	Operands	Binary machine code
MAIN:	0100	1210	mov	M1[r2][r7],LENGTH	0000-10-01-00
	0101	1211		כתובת של M1	10000101-10
	0102	1212		קידוד אוגרי האינדקסים במטריצה	0010-0111-00
	0103	1213		כתובת של LENGTH	10000001-10
	0104	1220	add	r2, STR	0010-11-01-00
	0105	1221		קידוד מספר האוגר	0010-0000-00
	0106	1222		כתובת של STR	01111010-10
LOOP:	0107	1223	jmp	END	1001-00-01-00
	0108	1230		כתובת של END	01111001-10
	0109	1231	prn	#-5	1100-00-00-00
	0110	1232		המספר -5	11111011-00
	0111	1233	sub	r1,r4	0011-11-11-00
	0112	1300		קידודי מספרי האוגרים	0001-0100-00
	0113	1301	inc	K	0111-00-01-00
	0114	1302		כתובת של K	10000100-10
	0115	1303	mov	M1[r3][r3],r3	0000-10-11-00
	0116	1310		כתובת של M1	10000101-10
	0117	1311		קידוד אוגרי האינדקסים במטריצה	0011-0011-00
	0118	1312		קידוד מספר האוגר של היעד	0000-0011-00
	0119	1313	bne	LOOP	1010-00-01-00
	0120	1320		כתובת של LOOP	01101011-10
END:	0121	1321	stop		1111-00-00-00
STR:	0122	1322	.string	"abcdef"	0001100001
	0123	1323			0001100010
	0124	1330			0001100011
	0125	1331			0001100100
	0126	1332			0001100101
	0127	1333			0001100110
	0128	2000			0000000000
LENGTH:	0129	2001	.data	6,-9,15	0000000110
	0130	2002			1111110111
	0131	2003			0000001111
K:	0132	2010	.data	22	0000010110
M1	0133	2011	.mat	[2][2] 1,2,3,4	0000000001
	0134	2012			0000000010
	0135	2013			0000000011
	0136	2020			0000000100

בסוף המעבר השני, אם לא נתגלו שגיאות, האסמבלר בונה את קבצי הפלט (ראו בהמשך), שמכילים את הקוד הבינארי ומידע נוסף עבור שלבי הקישור והטעינה.

כאמור, שלבי הקישור והטעינה אינם למימוש בפרויקט זה, ולא נדון בהם כאן.

קבצי קלט ופלט של האסמבלר

בהפעלה של האסמבלר, יש להעביר אליו באמצעות ארגומנטים של שורת הפקודה (command line arguments) רשימה של שמות קבצי מקור (אחד או יותר). אלו הם קבצי טקסט, ובהם תוכניות בתחביר של שפת האסמבלי שהוגדרה בממ"ן זה.

האסמבלר פועל על כל קובץ מקור בנפרד, ויוצר עבורו קבצי פלט כדלקמן:

- קובץ `am`, המכיל את קובץ המקור לאחר שלב קדם האסמבלר (לאחר פרישת המאקרואים)
- קובץ `object`, המכיל את קוד המכונה.
- קובץ `externals`, ובו פרטים על כל המקומות (הכתובות) בקוד המכונה בהם יש מילת-מידע שמקודדת ערך של סמל שהוצהר כחיצוני (סמל שהופיע כאופרנד של הנחיית `extern`, ומאופיין בטבלת הסמלים כ- `external`).
- קובץ `entries`, ובו פרטים על כל סמל שמוצהר כנקודת כניסה (סמל שהופיע כאופרנד של הנחיית `entry`, ומאופיין בטבלת הסמלים כ- `entry`).

אם אין בקובץ המקור אף הנחיית `extern`, האסמבלר לא יוצר את קובץ הפלט מסוג `externals`.
אם אין בקובץ המקור אף הנחיית `entry`, האסמבלר לא יוצר את קובץ הפלט מסוג `entries`.

שמות קבצי המקור חייבים להיות עם הסיומת `“.as”`. למשל, השמות `x.as`, `y.as`, ו-`hello.as` הם שמות חוקיים. העברת שמות הקבצים הללו כארגומנטים לאסמבלר נעשית ללא ציון הסיומת.

לדוגמה: נניח שתוכנית האסמבלר שלנו נקראת `assembler`, אזי שורת הפקודה הבאה:

```
assembler x y hello
```

תריץ את האסמבלר על הקבצים: `x.as, y.as, hello.as`.

שמות קבצי הפלט מבוססים על שם קובץ הקלט, כפי שהופיע בשורת הפקודה, בתוספת סיומת מתאימה: הסיומת `“.am”` עבור קובץ לאחר פרישת מאקרו, הסיומת `“.ob”` עבור קובץ ה-`object`, הסיומת `“.ent”` עבור קובץ ה-`entries`, והסיומת `“.ext”` עבור קובץ ה-`externals`.

לדוגמה, בהפעלת האסמבלר באמצעות שורת הפקודה: `assembler x` ייווצר קובץ פלט `x.ob`, וכן קבצי פלט `x.ent` ו-`x.ext` ככל שיש הנחיות `entry` או `extern`. בקובץ המקור. אם אין מאקרו בקובץ המקור, אזי קובץ `“.am”` יהיה זהה לקובץ `“.as”`.

אופן פעולת האסמבלר

נרחיב כאן על אופן פעולת האסמבלר, בנוסף לאלגוריתם השלדי שניתן לעיל.

האסמבלר מחזיק שני מערכים, שייקראו להלן מערך ההוראות ומערך הנתונים. מערכים אלו נותנים למעשה תמונה של זיכרון המכונה (גודל כל כניסה במערך זהה לגודלה של מילת מכונה (בסיביות). במערך ההוראות מכניס האסמבלר את הקידוד של הוראות המכונה שנקראו במהלך המעבר על קובץ המקור. במערך הנתונים מכניס האסמבלר את קידוד הנתונים שנקראו מקובץ המקור (שורות מסוג `data`, `string`).

לאסמבלר יש שני מונים: מונה ההוראות (IC) ומונה הנתונים (DC). מונים אלו מצביעים על המקום הבא הפנוי במערכים לעיל, בהתאמה. כשמתחיל האסמבלר לעבור על קובץ מקור, שני מונים אלו מקבלים ערך התחלתי.

בנוסף יש לאסמבלר טבלה, אשר בה נאספות כל התוויות בהן נתקל האסמבלר במהלך המעבר על הקובץ. לטבלה זו קוראים טבלת סמלים (`symbol-table`). לכל סמל (תווית) נשמרים שמו, ערכו, ומאפיינים שונים שצוינו קודם, כגון המיקום (`code` או `data`), או אופן העדכון (למשל `external`).

האסמבלר קורא את קובץ המקור שורה אחר שורה, מחליט מהו סוג השורה (הערה, הוראה, הנחיה, או שורה ריקה) ופועל בהתאם.

1. שורה ריקה או שורת הערה : האסמבלר מתעלם מהשורה ועובר לשורה הבאה.

2. שורת הוראה :

האסמבלר מוצא מהי הפעולה, ומהן שיטות המיעון של האופרנדים. (מספר האופרנדים אותם הוא מחפש נקבע בהתאם להוראה אותה הוא מוצא).

אם האסמבלר מוצא בשורת ההוראה גם הגדרה של תווית, אזי התווית מוכנסת אל טבלת הסמלים. ערך התווית הוא IC, והמאפיין הוא code.

האסמבלר קובע לכל אופרנד את ערכו באופן הבא :

- אם זה רגיסטר – האופרנד הוא מספר הרגיסטר.
 - אם זו תווית (מיעון ישיר) – האופרנד הוא ערך התווית כפי שמופיע בטבלת הסמלים (ייתכן והסמל טרם נמצא בטבלת הסמלים).
 - אם זה התו # ואחריו מספר – האופרנד הוא המספר עצמו.
 - אם זו שיטת מיעון אחרת – ערכו של האופרנד נקבע לפי המפרט של שיטת המיעון (ראו תיאור שיטות המיעון לעיל)
- קביעת שיטת המיעון נעשית בהתאם לתחביר של האופרנד, כפי שהוסבר לעיל בהגדרת שיטות המיעון. למשל, מספר מציין מיעון מיידי, תווית מציינת מיעון ישיר וכד'.
לאחר שהאסמבלר ניתח את השורה והחליט לגבי הפעולה, שיטת מיעון אופרנד המקור (אם יש), ושיטת מיעון אופרנד היעד (אם יש), הוא פועל באופן הבא :

אם זוהי פעולה בעלת שני אופרנדים, אזי האסמבלר מכניס למערך ההוראות, במקום עליו מצביע מונה ההוראות IC, את קוד המילה הראשונה של ההוראה (בשיטת הייצוג של הוראות המכונה כפי שתואר קודם לכן). מילה זו מכילה את קוד הפעולה, ואת שיטות המיעון. בנוסף "משריין" האסמבלר מקום במערך עבור המילים הנוספות הנדרשות עבור הוראה זו, ומגדיל את מונה ההוראות בהתאם. אם אחד או שני האופרנדים הם בשיטת מיעון רגיסטר או מיידי, האסמבלר מקודד כעת את המילים הנוספות הרלוונטיות במערך ההוראות.

אם זוהי פעולה בעלת אופרנד אחד בלבד, כלומר אין אופרנד מקור, אזי הקידוד הינו זהה לעיל, פרט לסיביות של שיטת המיעון של אופרנד המקור במילה הראשונה, אשר יכילו תמיד 0, מכיוון שאינן רלוונטיות לפעולה.

אם זוהי פעולה ללא אופרנדים אזי תקודד רק המילה הראשונה (והיחידה). הסיביות של שיטות המיעון של האופרנדים יכילו 0.

אם בשורת ההוראה קיימת תווית, אזי התווית מוכנסת אל טבלת הסמלים תחת השם המתאים, ערך התווית הוא ערך מונה ההוראות לפני קידוד ההוראה.

3. שורת הנחיה :

כאשר האסמבלר קורא בקובץ המקור שורת הנחיה, הוא פועל בהתאם לסוג ההנחיה, באופן הבא :

I. 'data'.

האסמבלר קורא את רשימת המספרים, המופיעה לאחר 'data', מכניס כל מספר אל מערך הנתונים, ומקדם את מצביע הנתונים DC באחד עבור כל מספר שהוכנס.

אם בשורה 'data' יש תווית, אזי תווית זו מוכנסת לטבלת הסמלים. היא מקבלת את הערך של מונה הנתונים DC שלפני הכנסת המספרים למערך הנתונים. כן מסומן שהגדרה ניתנה בחלק הנתונים.

II. 'mat'.

האסמבלר קורא את רשימת המספרים של איתחול המטריצה (אם ישנו), מכניס כל מספר שנקרא אל מערך הנתונים, ומקדם את מצביע הנתונים באחד עבור כל מספר שהוכנס. אם המטריצה אינה מאותחלת בערכים, יוקצו תאים במערך בהתאם לגודל המטריצה, והם יאותחלו ל-0.

הטיפול בתווית המופיעה בשורה, זהה לטיפול הנעשה בהנחיה 'data'.

III. 'string'.

הטיפול ב-'string' דומה ל-'data', אלא שקודי ה-ascii של התווים הם אלו המוכנסים אל מערך הנתונים (כל תו בכניסה נפרדת). לאחר מכן מוכנס הערך 0 (המציין סוף מחרוזת) אל מערך הנתונים. מונה הנתונים מקודם באורך המחרוזת + 1 (גם האפס בסוף המחרוזת תופס מקום).

הטיפול בתווית המוגדרת בשורה זו זהה לטיפול הנעשה בהנחיה 'data'.

IV. 'entry'.

זוהי בקשה לאסמבלר להכניס את התווית המופיעה כאופרנד של 'entry' אל קובץ ה-entries. האסמבלר רושם את הבקשה ובסיום העבודה, התווית הנ"ל תירשם בקובץ ה-entries.

V. 'extern'.

זוהי הצהרה על סמל (תווית) המוגדר בקובץ אחר, ואשר קטע האסמבלי בקובץ הנוכחי עושה בו שימוש. האסמבלר מכניס את הסמל אל טבלת הסמלים. ערכו הוא 0 (הערך האמיתי לא ידוע, וייקבע רק בשלב הקישור), וטיפוסו הוא external. לא ידוע באיזה קובץ נמצאת הגדרת הסמל (וגם אין זה משנה עבור האסמבלר).

יש לשים לב: בהוראה או בהנחיה אפשר להשתמש בשם של סמל אשר ההצהרה עליו ניתנת בהמשך הקובץ (אם באופן ישיר על ידי הגדרת תווית, ואם באופן עקיף על ידי הנחית extern).

בסוף המעבר הראשון, האסמבלר מעדכן בטבלת הסמלים כל סמל המאופיין כ- data, על ידי הוספת IC+100 (עשרוני) לערכו של הסמל. הסיבה לכך היא שבתמונה הכוללת של קוד המכונה, הנתונים מופרדים מההוראות, וכל הנתונים נדרשים להופיע אחרי כל ההוראות. סמל מסוג data הוא למעשה תווית באזור הנתונים, והעדכון מוסיף לערך הסמל (כלומר לכתובתו בזיכרון) את האורך הכולל של קידוד כל ההוראות, בתוספת כתובת התחלת הטעינה של הקוד, שהיא 100.

טבלת הסמלים מכילה כעת את כל הערכים הנחוצים להשלמת הקידוד (למעט ערכים של סמלים חיצוניים).

במעבר השני, האסמבלר מקודד באמצעות טבלת הסמלים את כל המילים במערך ההוראות שטרם קודדו במעבר הראשון. אלו הן מילים שצריכות להכיל כתובות של תוויות.

פורמט קובץ ה-object

קובץ זה מכיל את תמונת הזיכרון של קוד המכונה, בשני חלקים: תמונת ההוראות ראשונה, ואחריה ובצמוד תמונת הנתונים.

כזכור, האסמבלר מקודד את ההוראות כך שתמונת ההוראות תתאים לטעינה החל מכתובת 100 (עשרוני) בזיכרון. נשים לב שרק בסוף המעבר הראשון יודעים מהו הגודל הכולל של תמונת ההוראות. מכיוון שתמונת הנתונים נמצאת אחרי תמונת ההוראות, גודל תמונת ההוראות משפיע על הכתובות בתמונת הנתונים. זו הסיבה שבגללה היה צורך לעדכן בטבלת הסמלים, בסוף המעבר הראשון, את ערכי הסמלים המאופיינים כ-data (כזכור, בצעד 19 הוספנו לכל סמל כזה את הערך ICF). במעבר השני, בהשלמת הקידוד של מילות-המידע, משתמשים בערכים המעודכנים של הסמלים, המותאמים למבנה המלא והסופי של תמונת הזיכרון.

כעת האסמבלר יכול לכתוב את תמונת הזיכרון בשלמותה לתוך קובץ פלט (קובץ ה-object).

עקרונית, קובץ object מכיל את תמונת הזיכרון שתוארה כאן. קובץ object מורכב משורות של טקסט. השורה הראשונה מכילה שני מספרים: אורך כולל של קטע ההוראות (במילות זיכרון) ואורך כולל של קטע הנתונים (במילות זיכרון). השורות הבאות מתארות את תוכן הזיכרון. בכל שורה שני מספרים: כתובת של מילה בזיכרון, ותוכן המילה. כל המספרים בקובץ object הם בבסיס 4 "ייחודי" שהוגדר לעיל.

בהמשך מופיע קובץ object לדוגמא בשם ps.ob המתאים לקובץ המקור ps.as

עבור כל תא זיכרון המכיל הוראה (לא נתונים) מופיע בקובץ object מידע עבור תכנית הקישור. מידע זה ניתן ע"י 2 הסיביות הימניות של הקידוד (שדה ה-E,R,A)

האות 'A' (קיצור של absolute) מציינת שתוכן התא אינו תלוי במקום בזיכרון בו ייטען בפועל קוד המכונה של התכנית בזמן ביצועה למשל מילה המכילה אופרנד מידי).

האות 'R' (קיצור של relocatable) מציינת שתוכן התא כן תלוי במקום בזיכרון שבו ייטען בפועל קוד המכונה של התכנית בזמן ביצועה. לכן יש לעדכן את תוכן התא, בשלב הטעינה, על ידי הוספת היסט (Offset) מתאים (היסט זה הינו המען בו תטען המילה הראשונה של התכנית). במקרה כזה 2 הסיביות הימניות יכילו את הערך 10

האות 'E' (קיצור של external) מציינת שתוכן התא תלוי בערכו של סמל חיצוני (external), וכי רק בזמן הקישור ניתן יהיה להכניס לתא את הערך המתאים. במקרה כזה 2 הסיביות הימניות יכילו את הערך 01.

פורמט קובץ ה-entries

קובץ ה-entries בנוי משורות טקסט. כל שורה מכילה שם של סמל שהוגדר כ-entry ואת ערכו, כפי שנמצא בטבלת הסמלים. הערכים כולם בבסיס 4 הייחודי

M1: mat [2][2] 1,2,3,4
(ראו לדוגמה את הקובץ ps.ent המתאים לקובץ המקור ששמו ps.as).

פורמט קובץ ה-externals

קובץ ה-externals בנוי אף הוא משורות טקסט. כל שורה מכילה שם של סמל שהוגדר external, וכתובת בקוד המכונה בה יש קידוד של אופרנד המתייחס לסמל זה. כמובן שייתכן ויש מספר כתובות בקוד המכונה בהם מתייחסים לאותו סמל חיצוני. לכל התייחסות כזו תהיה שורה נפרדת בקובץ ה-externals. הכתובות מיוצגות בבסיס 4 הייחודי.

לתשומת לב: ייתכן ויש מספר כתובות בקוד המכונה בהן מילות-המידע מתייחסות לאותו סמל חיצוני. לכל כתובת כזו תהיה שורה נפרדת בקובץ ה-externals.

נדגים את קבצי הפלט שמייצר האסמבלר עבור קובץ מקור בשם ps.as.
התוכנית לאחר שלב פרישת המאקרו תיראה כך :

; file ps.as

```
.entry LOOP
.entry LENGTH
.extern L3
.extern W
MAIN:      mov     M1[r2][r7],W
           add     r2,STR
LOOP:      jmp     W
           prn     #-5
           sub     r1,r4
           inc     K

           mov     M1[r3][r3],r3
           bne     L3
END:       stop
STR:       .string "abcdef"
LENGTH:    .data   6,-9,15
K:         .data   22
M1:        .mat [2][2] 1,2,3,4
```

להלן טבלת הקידוד הבינארי המלא שמתקבל מקובץ המקור, כפי שנבנה במעבר הראשון והשני.

Label	Decimal Address	Base 4 Address	Instruction	Operands	Binary machine code
MAIN:	0100	1210	mov	M1[r2][r7],W	0000-10-01-00
	0101	1211		כתובת של M1	10000101-10
	0102	1212		קידוד אוגרי האינדקסים במטריצה	0010-0111-00
	0103	1213		כתובת של W (סמל חיצוני)	00000000-01
	0104	1220	add	r2, STR	0010-11-01-00
	0105	1221		קידוד מספר האוגר	0010-0000-00
	0106	1222		כתובת של STR	01111010-10
LOOP:	0107	1223	jmp	W	1001-00-01-00
	0108	1230		כתובת של W	00000000-01
	0109	1231	prn	#-5	1100-00-00-00
	0110	1232		המספר -5	11111011-00
	0111	1233	sub	r1,r4	0011-11-11-00
	0112	1300		קידודי מספרי האוגרים	0001-0100-00
	0113	1301	inc	K	0111-00-01-00
	0114	1302		כתובת של K	10000100-10
	0115	1303	mov	M1[r3][r3],r3	0000-10-11-00
	0116	1310		כתובת של M1	10000101-10
	0117	1311		קידוד אוגרי האינדקסים במטריצה	0011-0011-00
	0118	1312		קידוד מספר האוגר של היעד	0000-0011-00
	0119	1313	bne	L3	1010-00-01-00
	0120	1320		כתובת של L3 (סמל חיצוני)	00000000-10
END:	0121	1321	stop		1111-00-00-00

<i>STR:</i>	0122	1322	.string	"abcdef"	0001100001
	0123	1323			0001100010
	0124	1330			0001100011
	0125	1331			0001100100
	0126	1332			0001100101
	0127	1333			0001100110
	0128	2000			0000000000
<i>LENGTH:</i>	0129	2001	.data	6,-9,15	0000000110
	0130	2002			1111110111
	0131	2003			0000001111
<i>K:</i>	0132	2010	.data	22	0000010110
<i>MI</i>	0133	2011	.mat	[2][2] 1,2,3,4	0000000001
	0134	2012			0000000010
	0135	2013			0000000011
	0136	2020			0000000100

הקובץ ps.ob:

כל תוכן הקובץ מיוצג במספרים בבסיס 4 הייחודי.
הערה: שורת הכותרת אינה חלק מהקובץ, ונועדה להבהרה בלבד.

Base 4 address Base 4 code

bbc	dd
bcba	aacba
becb	cabbc
bcbe	acbda
becd	aaaab
bcca	acdba
bccb	acaaa
bccc	bdccc
bccd	cbaba
bcda	aaaab
bcdb	daaaa
bcde	ddcda
bced	addda
bdaa	abbba
bdab	bdaba
bdac	cabac
bdad	aacda
bdba	cabbc
bdbb	adada
bdbe	aaada
bdbd	ccaba
bdca	aaaab
bdeb	ddaaa
bdce	abcab
bdcd	abcac
bdda	abcad
bddb	abcba
bdde	abcbb
bddd	abcbe
caaa	aaaaa
caab	aaabc
caac	dddbd
caad	aaadd
caba	aabbc
cabb	aaaab
cabc	aaaac
cabd	aaaad
caca	aaaba

קובץ ps.ent:

LOOP	bccd
LENGTH	caab

קובץ ps.ext:

W	becd
W	bcda
L3	bdca

לתשומת לב: אם בקובץ המקור אין הנחיות extern. אזי לא ייווצר קובץ ext. בדומה, אם אין בקובץ המקור הנחיות entry, לא ייווצר קובץ ent. אין ליצור קובץ ext או ent שנשאר ריק. הערה: אין חשיבות לסדר השורות בקבצים מסוג ent או ext. כל שורה עומדת בפני עצמה.

סיכום והנחיות כלליות

- אורך התוכנית, הניתנת כקלט לאסמבלר אינו ידוע מראש, ולכן אורך התוכנית המתורגמת אינו אמור להיות צפוי מראש. אולם כדי להקל במימוש האסמבלר, ניתן להניח גודל מקסימלי. לפיכך יש אפשרות להשתמש במערכים לאחסון תמונת קוד המכונה בלבד. כל מבנה נתונים אחר (למשל טבלת הסמלים וטבלת המאקרו), יש לממש באופן יעיל וחסכוני (למשל באמצעות רשימה מקושרת והקצאת זיכרון דינאמי).
- השמות של קבצי הפלט צריכים להיות תואמים לשם קובץ הקלט, למעט הסימונים. למשל, אם קובץ הקלט הוא prog.as אזי קבצי הפלט שיווצרו הם: prog.ob, prog.ext, prog.ent
- מתכונת הפעלת האסמבלר צריכה להיות כפי הנדרש בממ"ן, ללא שינויים כלשהם. כלומר, ממשק המשתמש יהיה אך ורק באמצעות שורת הפקודה. בפרט, שמות קבצי המקור יועברו לתכנית האסמבלר כארגומנטים בשורת הפקודה. אין להוסיף תפריטי קלט אינטראקטיביים, חלונות גרפיים למיניהם, וכד'.
- יש להקפיד לחלק את מימוש האסמבלר למספר מודולים (קבצים בשפת C) לפי משימות. אין לרכז משימות מסוגים שונים במודול יחיד. מומלץ לחלק למודולים כגון: מעבר ראשון, מעבר שני, פונקציות עזר (למשל, תרגום לבסיס, ניתוח תחבירי של שורה), טבלת הסמלים, מפת הזיכרון, טבלאות קבועות (קודי הפעולה, שיטות המיעון החוקיות לכל פעולה, וכד').
- יש להקפיד ולתעד את המימוש באופן מלא וברור, באמצעות הערות מפורטות בקוד.
- יש לאפשר תווים לבנים עודפים בקובץ הקלט בשפת אסמבלי. למשל, אם בשורת הוראה יש שני אופרנדים המופרדים בפסיק, אזי לפני ואחרי הפסיק מותר שיהיו רווחים וטאבים בכל כמות. בדומה, גם לפני ואחרי שם הפעולה. מותרות גם שורות ריקות. האסמבלר יתעלם מתווים לבנים מיותרים (כלומר ידלג עליהם).
- הקלט (קוד האסמבלי) עלול להכיל שגיאות תחביריות. על האסמבלר לגלות ולדווח על כל השורות השגויות בקלט. אין לעצור את הטיפול בקובץ קלט לאחר גילוי השגיאה הראשונה. יש להדפיס למסך הודעות מפורטות ככל הניתן, כדי שאפשר יהיה להבין מה והיכן כל שגיאה. כמובן שאם קובץ קלט מכיל שגיאות, אין טעם להפיק עבורו את קבצי הפלט (ob, ext, ent).

תם ונשלם פרק ההסברים והגדרת הפרויקט.

בשאלות ניתן לפנות לקבוצת הדיון באתר הקורס, ואל המנחים בשעות הקבלה.

להזכירכם, מומלץ לכל אלה שטרם בדקו את התכנים באתר הקורס לעשות זאת. נשאלות באתר הרבה שאלות בנושא חומר הלימוד והממ"נים, והתשובות יכולות להועיל לכולם.

לתשומת לבכם:

- על המטלה להיות מקורית לגמרי: אין להיעזר בספריות חיצוניות מלבד הספריות הסטנדרטיות, וכמובן לא בקוד שמצאתם ברשת או קיבלתם בכל דרך. אין לשתף ברשת קוד ללא סיסמה. אלו הן עבירות משמעת.
- לא תינתן דחיה בהגשת הממ"ן, פרט למקרים חריגים במיוחד, כגון אישפוז ממושך. במקרים אלו יש לבקש ולקבל אישור מראש ממנחה הקבוצה.

ב ה צ ל ה !