

מטלת מנחה (ממ"ן) 14

הקורס : 20465 - מעבדה בתכנות מערכות

חומר הלימוד למטלה : פרויקט גמר

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

סמסטר : 2024 מועד אחרון להגשה : 17.03.2024

קיימות שתי חלופות להגשת מטלות:

- שליחת מטלות באמצעות מערכת המטלות המקוונת באתר הבית של הקורס
 - שליחת מטלות באמצעות דואר אלקטרוני - באישור המנחה בלבד
- 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 אונוטו.
 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.

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 הגישה 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 ותייעוד ברמה טובה, כמתואר לעיל, אשר משקלם המשותף מגיע עד לכ- 40% ממשקל הפרויקט.

מותר להשתמש בפרויקט בכל מגוון הספריות הסטנדרטיות של שפת C, אבל אין להשתמש בספריות חיצוניות אחרות.

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), אוגרים (רגיסטרים) 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 14 סיביות. הסיבית הכי פחות משמעותית תצוין כסיבית מס' 0, והסיבית המשמעותית ביותר כמס' 13. 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 4096 תאים, בכתובות 0-4095 (בבסיס עשרוני), וכל תא הוא בגודל של 14 סיביות. לתא בזיכרון נקרא גם בשם "מילה". הסיביות בכל מילה ממוספרות כמו ברגיסטר.

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

מבנה הוראת מכונה:

כל הוראת מכונה מקודדת למספר מילות זיכרון רצופות, **החל ממילה אחת ועד למקסימום חמש מילים**, בהתאם לשיטות המיעון בהן נעשה שימוש (ראו בהמשך).

בקובץ הפלט המכיל את קוד המכונה שבונה האסמבלר, כל מילה תקודד בבסיס 4 "מוצפן" המוגדר כדלקמן (ראו הסברים ודוגמאות בהמשך):

3	2	1	0
!	%	#	*
בסיס 4 רגיל	בסיס 4 מוצפן		

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

13 12 11 10	9 8 7 6	5 4	3 2	1 0
לא בשימוש	opcode	מיעון אופרנד מקור	מיעון אופרנד יעד	A,R,E

סיביות 0-1 (השדה 'A,R,E'):

במילה הראשונה של הוראה, סיביות אלה תמיד מאופסות (00).

השדה 'A,R,E' מתווסף לכל אחת מהמילים בקידוד ההוראה (ראו פירוט שיטות המיעון).
שדה זה מציין מהו סוג הקידוד של המילה: קידוד מוחלט (Absolute), חיצוני (External) או ניתן להזזה (Relocatable).
הערך 00 משמעו שקידוד המילה הוא **מוחלט** (ואינו מצריך שינוי בשלבי הקישור והטעינה).
הערך 01 משמעו שהקידוד הוא של **כתובת חיצונית** (ומצריך שינוי בשלבי הקישור והטעינה).
הערך 10 משמעו שהקידוד הוא של **כתובת פנימית הניתנת להזזה** (ומצריך שינוי בקישור ובטעינה).
ראו הסבר נוסף על סיביות אלה בהמשך.

סיביות 2-3: מקודדות את מספרה של שיטת המיעון של אופרנד היעד (destination operand).
אם אין בהוראה אופרנד יעד, ערכן של סיביות אלה הוא 0.

סיביות 4-5: מקודדות את מספרה של שיטת המיעון של אופרנד המקור (source operand).
אם אין בהוראה אופרנד מקור, ערכן של סיביות אלה הוא 0.

סיביות 6-9: במילה הראשונה של ההוראה סיביות אלה מהוות את **קוד-הפעולה** (opcode). כל opcode מיוצג בשפת אסמבלי באופן סימבולי על ידי **שם-פעולה**.

בשפה שלנו יש 16 קודי פעולה והם:

שם הפעולה	קוד הפעולה (בבסיס עשרוני)
mov	0
cmp	1
add	2
sub	3
not	4
clr	5
lea	6
inc	7
dec	8
jmp	9
bne	10
red	11
prn	12
jsr	13
rts	14
hlt	15

שמות הפעולות נכתבים תמיד באותיות קטנות. פרוט המשמעות של הפעולות יבוא בהמשך.

סיביות 10-13: אינן בשימוש וערכן הוא 0.

שיטות מיעון:

בשפה שלנו קיימות ארבע שיטות מיעון, שמסומנות במספרים 0,1,2,3.
השימוש בשיטות מיעון מצריך קידוד של מילות-מידע נוספות בקוד המכונה של ההוראה.
אם בפקודה יש אופרנד אחד, תהיה מילת מידע אחת נוספת. אם בפקודה יש שני אופרנדים, ייתכנו שתי מילות-מידע נוספות, או מילת-מידע אחת המשותפת לשני האופרנדים, תלוי בשיטות

המיעון בהן נעשה שימוש (ראו מפרט בהמשך). כאשר בקידוד הפקודה יש שתי מילות-מידע נוספות, אזי מילת-המידע הראשונה מתייחסת לאופרנד המקור, והשנייה מתייחסת לאופרנד היעד.

בכל מילת-מידע נוספת, סיביות 0-1 הן השדה A,R,E.

להלן תיאור שיטות המיעון במכונה שלנו:

ערך	שיטת מיעון	תוכן המילה נוספת	אופן הכתיבה	דוגמה
0	מיעון מיידי	מילת-מידע נוספת של ההוראה מכילה את האופרנד עצמו, שהוא מספר שלם בשיטת המשלים ל-2, המיוצג ברוחב של 12 סיביות, אליהן מתווספות זוג סיביות של השדה A,R,E (הערך של שדה זה הוא תמיד 00 עבור מיעון מיידי).	האופרנד מתחיל בתו # ולאחריו ובצמוד אליו מופיע מספר שלם בבסיס עשרוני. יש גם אפשרות שבמקום המספר יופיע שם של קבוע שהוגדר בתכנית על ידי define (ראו פרטים בהמשך).	<p>mov #-1,r2</p> <p>בדוגמה זו האופרנד הראשון של הפקודה נתון בשיטת מיעון מיידי. ההוראה כותבת את הערך 1- אל אוגר r2</p> <p>דוגמה נוספת: נתונה הגדרת הקבוע: define size = 8</p> <p>אזי בהוראה: mov #size, r1</p> <p>האופרנד הראשון הוא מיידי, כאשר המספר 8 מיוצג באמצעות השם הקבוע size. ההוראה כותבת את הערך 8 אל אוגר r1</p>
1	מיעון ישיר	מילת-מידע נוספת של ההוראה מכילה כתובת של מילה בזיכרון. מילה זו בזיכרון היא האופרנד. הכתובת מיוצגת כמספר ללא סימן ברוחב של 12 סיביות, אליהן מתווספות זוג סיביות של השדה A,R,E (הערך של שדה זה הוא 01 או 10, תלוי בסוג הכתובת - חיצונית או פנימית).	האופרנד הוא <u>תווית</u> שכבר הוצהרה או שתוצהר בהמשך הקובץ. ההצהרה נעשית על ידי כתיבת תווית בתחילת הנחית 'data' או 'string', או בתחילת הוראה של התוכנית, או באמצעות אופרנד של הנחית 'extern'.	<p>נתונה ההגדרה: x: .data 23</p> <p>אזי ההוראה: dec x</p> <p>מקטינה ב-1 את תוכן המילה שבכתובת x בזיכרון (ה"משתנה" x).</p>

ערך	שיטת מיעון	תוכן המילה נוספת	אופן הכתיבה	דוגמה
2	מיעון אינדקס קבוע	<p>שיטת מיעון זו משמשת לגישה לאיבר במערך לפי אינדקס. המערך נמצא בזיכרון. כל איבר במערך הוא בגודל מילה.</p> <p>בשיטת מיעון זו קיימות בקידוד ההוראה שתי מילות-מידע נוספות. המילה הנוספת הראשונה מכילה את כתובת התחלת המערך. המילה הנוספת השנייה מכילה את האינדקס של האיבר במערך אליו יש לגשת.</p> <p>הערכים בשתי מילות-המידע הנוספות מיוצגים ברוחב 12 סיביות, אליהן מתווספות זוג סיביות של השדה A,R,E (הערך של שדה זה במילת-המידע הראשונה הוא כמו במיעון ישיר, ובמילת-המידע השניה כמו במיעון מיידי).</p>	<p>האופרנד מורכב מתווית המציינת את כתובת התחלת המערך, ולאחריה בסוגריים מרובעים האינדקס במערך אליו רוצים לפנות.</p> <p>האינדקס יכול להינתן ע"י קבוע מספרי שהוגדר בעזרת define. (יוסבר בהמשך). האינדקסים במערך מתחילים מ-0.</p>	<p>נתונה ההגדרה : x: .data 23,25,19,30</p> <p>אזי ההוראה : mov x[2],r2</p> <p>תעתיק את המספר 19 הנמצא באינדקס 2 במערך x אל הרגיסטר r2.</p> <p>דוגמה נוספת : נתונה הגדרת המערך x לעיל, וכן הגדרת הקבוע : define k=1</p> <p>אזי ההוראה : mov r2,x[k]</p> <p>תעתיק את תוכן הרגיסטר r2 אל המילה באינדקס 1 במערך x (נדרס התוכן הקודם 25).</p>
3	מיעון רגיסטר ישיר	<p>האופרנד הוא רגיסטר. אם הרגיסטר משמש כאופרנד יעד, מילת-מידע נוספת של הפקודה תקודד בסיביות 2-4 את מספרו של הרגיסטר. ואילו אם הרגיסטר משמש כאופרנד מקור, מספר הרגיסטר יקודד בסיביות 5-7 של מילת-המידע.</p> <p>אם בפקודה יש שני אופרנדים ושניהם בשיטת מיעון רגיסטר ישיר, הם יחלקו מילת-מידע אחת משותפת, כאשר הסיביות 2-4 הן עבור רגיסטר היעד, והסיביות 5-7 הן עבור רגיסטר המקור.</p> <p>למילת-המידע מתווספות זוג סיביות של השדה A,R,E (הערך של שדה זה הוא תמיד 00 עבור מיעון רגיסטר ישיר).</p> <p>סיביות אחרות במילת-המידע שאינן בשימוש יכילו 0.</p>	<p>האופרנד הוא שם של רגיסטר.</p>	<p>mov r1,r2</p> <p>בדוגמה זו, ההוראה מעתיקה את תוכן רגיסטר r1 אל רגיסטר r2.</p> <p>בדוגמה זו, שני האופרנדים הם בשיטת מיעון רגיסטר ישיר, ולכן יחלקו מילת-מידע נוספת אחת משותפת.</p>

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 הנדרשים לפעולה.

קבוצת ההוראות הראשונה:

אלו הן הוראות המקבלות שני אופרנדים.

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

הוראה	הסבר הפעולה	דוגמה	הסבר הדוגמה
mov	מבצעת העתקה של האופרנד הראשון, אופרנד המקור (source) אל האופרנד השני, אופרנד היעד (destination) (בהתאם לשיטת המיעון).	mov A, r1	העתק את תוכן המשתנה A (המילה שבכתובת A בזיכרון) אל רגיסטר r1.
cmp	מבצעת "השוואה" בין שני האופרנדים שלה. אופן ההשוואה: תוכן אופרנד היעד (השני) מופחת מתוכן אופרנד המקור (הראשון), ללא שמירת תוצאת החיסור. פעולת החיסור מעדכנת דגל בשם Z ("דגל האפס") ברגיסטר הסטטוס (PSW).	cmp A, r1	אם תוכן המשתנה A זהה לתוכנו של רגיסטר r1 אזי דגל האפס, Z, ברגיסטר הסטטוס (PSW) יודלק, אחרת הדגל יאופס.
add	אופרנד היעד (השני) מקבל את תוצאת החיבור של אופרנד המקור (הראשון) והיעד (השני).	add A, r0	רגיסטר r0 מקבל את תוצאת החיבור של תוכן המשתנה A ותוכנו הנוכחי של r0.
sub	אופרנד היעד (השני) מקבל את תוצאת החיסור של אופרנד המקור (הראשון) מאופרנד היעד (השני).	sub #3, r1	רגיסטר r1 מקבל את תוצאת החיסור של הערך 3 מתוכנו הנוכחי של הרגיסטר r1.
lea	lea הוא קיצור (ראשי תיבות) של load effective address. פעולה זו מציבה את המען בזיכרון המיוצג על ידי התווית שבאופרנד הראשון (המקור), אל אופרנד היעד (האופרנד השני).	lea HELLO, r1	המען שמייצגת התווית HELLO מוצב לרגיסטר r1.

קבוצת ההוראות השנייה:

אלו הן הוראות הדורשות אופרנד אחד בלבד. אופן הקידוד של האופרנד הוא כמו של אופרנד היעד בפקודה עם שני אופרנדים. במקרה זה, השדה של אופרנד המקור (סיביות 4-5) במילה הראשונה בקידוד ההוראה הינו חסר משמעות, ולפיכך יכול 00.

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

הוראה	הסבר הפעולה	דוגמה	הסבר הדוגמה
not	היפוך ערכי הסיביות באופרנד (כל סיבית שערכה 0 תהפוך ל-1 ולהיפך: 1 ל-0).	not r2	$r2 \leftarrow \text{not } r2$
clr	איפוס תוכן האופרנד.	clr r2	$r2 \leftarrow 0$
inc	הגדלת תוכן האופרנד באחד.	inc r2	$r2 \leftarrow r2 + 1$
dec	הקטנת תוכן האופרנד באחד.	dec C	$C \leftarrow C - 1$

הוראה	הסבר הפעולה	דוגמה	הסבר הדוגמה
jmp	קפיצה (הסתעפות) בלתי מותנית אל ההוראה שנמצאת במען המיוצג על ידי האופרנד. כלומר, בעת ביצוע ההוראה, מצביע התוכנית (PC) יקבל את ערך אופרנד היעד.	jmp LINE	PC ← LINE מצביע התוכנית מקבל את המען המיוצג על ידי התווית LINE, ולפיכך הפקודה הבאה שתבצע תהיה במען זה.
bne	bne הוא קיצור (ראשי תיבות) של: branch if not equal (to zero). זוהי הוראת הסתעפות מותנית. מצביע התוכנית (PC) יקבל את ערך אופרנד היעד אם ערכו של הדגל Z ברגיסטר הסטטוס (PSW) הינו 0. כזכור, הדגל Z נקבע בפקודת cmp.	bne LINE	אם ערך הדגל Z ברגיסטר הסטטוס (PSW) הינו 0, אזי: PC ← LINE
red	קריאה של תו מהקלט הסטנדרטי (stdin) אל האופרנד.	red r1	קוד ה-ascii של התו הנקרא מהקלט ייכנס לרגיסטר r1.
prn	הדפסת התו הנמצא באופרנד, אל הפלט הסטנדרטי (stdout).	prn r1	התו אשר קוד ה-ascii שלו נמצא ברגיסטר r1 יודפס לפלט הסטנדרטי.
jsr	קריאה לשגרה (סברוטניה), מצביע התוכנית (PC) הנוכחי נדחף לתוך המחסנית שבזיכרון המחשב, והאופרנד מוכנס ל-PC.	jsr FUNC	push(PC) PC ← FUNC

קבוצת ההוראות השלישית:

אלו הן הוראות ללא אופרנדים. קידוד ההוראה מורכב ממילה אחת בלבד. השדות של אופרנד המקור ושל אופרנד היעד במילה הראשונה של ההוראה אינם בשימוש, ולפיכך יהיו מאופסים.

ההוראות השייכות לקבוצה זו הן: hlt, rts.

הוראה	הסבר הפעולה	דוגמה	הסבר הדוגמה
rts	חזרה משיגרה. הערך שנמצא בראש המחסנית של המחשב מוצא מן המחסנית, ומוכנס אל מצביע התוכנית (PC).	rts	PC ← pop()
hlt	עצירת ריצת התוכנית.	hlt	התכנית עוצרת

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 m_mcr)


```

mcr m_mcr
inc r2
mov A,r1
endmcr

```

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

```

.
.
.
m_mcr
.
.
m_mcr
.
.
.

```

בדוגמה זו, השתמשנו פעמיים במאקרו m_mcr, 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.
- ניתן להניח שלכל שורת מאקרו בקוד המקור קיימת סגירה עם שורת endmcr (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.

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).

יש חמישה 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.
משפט הגדרת קבוע	זהו משפט באמצעותו ניתן להגדיר שם סימבולי המייצג קבוע מספרי. במהלך קידוד התוכנית, בכל מקום בקוד בו מופיע השם, הוא יוחלף בקבוע המספרי. משפט זה לכשעצמו אינו מייצר קוד ואינו מקצה זיכרון.

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 מצורפות זוג סיביות A,R,E, והקידוד ממלא את כל 14 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. 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 :

```
HELLO: .entry 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).

4. 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 האסמבלי 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).

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: hlt

משפט הגדרת קבוע:

משפט הגדרת קבוע הוא בעל המבנה הבא :

.define קבוע-מספרי = שם-הקבוע

לדוגמה :

.define len = 4

.define init = -3

הרעיון הוא לייצג קבוע מספרי באמצעות שם סימבולי. בכל מקום בתוכנית בו מופיע שם של קבוע, האסמבלר יחליף בקידוד הפקודה לקוד מכונה את השם בקבוע המספרי אליו הוגדר.

המילה השמורה 'define'. נתונה באותיות קטנות בלבד. התחביר של שם הקבוע זהה לתחביר של תווית. אסור להגדיר את אותו שם קבוע יותר מפעם אחת. כמו כן אותו סמל לא יכול לשמש הן כשם של קבוע והן כתווית באותה תכנית. מילים שמורות של שפת האסמבלי (שם של רגיסטר, שם של הוראת מכונה או שם של הנחיה) אינן יכולות לשמש שם של קבוע. הקבוע המספרי הוא שלם בבסיס עשרוני. בין שם הקבוע לבין הקבוע המספרי מפריד התו '='. מותרים תווים לבנים בשני צידי התו.

הקבוע חייב להיות מוגדר לפני השימוש הראשון בו. אסור להגדיר תווית בשורה שהיא משפט הגדרת קבוע.

ניתן להשתמש בשם הקבוע בכל מקום בתכנית האסמבלי בו יכול להופיע קבוע מספרי, כלומר: **אינדקס בשיטת מיעון אינדקס ישיר, או ערך בשיטת מיעון מידי, או אופרנד של הנחית data.**

לדוגמה, בהינתן הגדרות הקבוע לעיל, אזי ההוראה :

mov x[len], r3

תעתיק את האיבר באינדקס 4 במערך x אל אוגר r3.

וההוראה :

mov #init, r2

תציב את הערך המידי 3- אל האוגר r2

כמו כן, ההנחיה :

.data len

תקצה מילה בזיכרון עם ערך התחלתי 4.

אפיון השדות במשפטים של שפת האסמבלי

תווית:

תווית היא 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 31 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 או של קבוע.

התווית מקבלת את ערכה בהתאם להקשר בו היא מוגדרת. תווית המוגדרת בהנחיות data, string, 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: 123, -5, 76. 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. זהו 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.

שתי הסיביות בשדה A,R,E יכילו את אחד הערכים הבינאריים: 00, 10, או 01. 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). במקרה זה שתי הסיביות הימניות יכילו את הערך 00.

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). במקרה זה שתי הסיביות הימניות יכילו את הערך 10.

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). במקרה זה שתי הסיביות הימניות יכילו את הערך 01.

כאשר האסמבלר מקבל כקלט 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:

```

.define sz = 2
MAIN:      mov    r3, LIST[sz]
LOOP:      jmp     L1
           mcr    m_mcr
           cmp    r3, #sz
           bne    END
           endmcr
           prn    #-5
           mov    STR[5], STR[2]
           sub    r1, r4
           m_mcr
L1:         inc    K
           bne    LOOP
END:        hlt
.define len = 4
STR:        .string "abcdef"
LIST: .data  6, -9, len
K:          .data  22

```

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

```

.define sz = 2
MAIN:      mov    r3, LIST[sz]
LOOP:      jmp     L1
           prn    #-5
           mov    STR[5], STR[2]
           sub    r1, r4
           cmp    r3, #sz
           bne    END
L1:         inc    K
           bne    LOOP
END:        hlt
.define len = 4
STR:        .string "abcdef"
LIST: .data  6, -9, len
K:          .data  22

```

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 m_mcr)? אם כן, החלף את שם המאקרו והעתק במקומו את כל השורות המתאימות מהטבלה לקובץ, חזור ל-1. אחרת, המשך.
3. האם השדה הראשון הוא "mcr" (התחלת הגדרת מאקרו)? אם לא, עבור ל-6.
4. הדלק דגל "mcr".
5. (קיימת הגדרת מאקרו) הכנס לטבלת שורות מאקרו את שם המאקרו (לדוגמה m_mcr).
6. קרא את השורה הבאה מקובץ המקור. אם נגמר קובץ המקור, עבור ל-9 (סיום).

- אם דגל "יש **mcr**" דולק ולא זוהתה תווית **endmcr** הכנס את השורה לטבלת המאקרו ומחק את השורה הנ"ל מהקובץ. אחרת (לא מאקרו) חזור ל 1.
7. האם זוהתה תווית **endmcr**? אם כן, מחק את התווית מהקובץ והמשך. אם לא, חזור ל- 6.
8. כבה דגל "יש **mcr**". 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 **mov, jmp, prn, sub, cmp, inc, bne, hlt** בקוד הבינארי השקול להם במודל המחשב שהגדרנו.

כמו כן, על האסמבלר להחליף את הסמלים **K, STR, LIST, L1, MAIN, LOOP, END** במענים של המקומות בזיכרון שם נמצאים כל נתון או הוראה בהתאמה.

בנוסף, על האסמבלר להחליף את שמות הקבועים שהוגדרו על ידי **define** (בדוגמה הקבועים הם **len** ו-**sz**), בקבועים המספריים שהם ערכי הקבועים בהתאמה, בכל מקום בו הם מופיעים.

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

Decimal Address	Source Code	Explanation	Binary Machine Code
0100 0101 0102 0103	MAIN: mov r3, LIST[sz]	First word of instruction Source register 3 Address of label LIST (integer array) Value of constant sz (index 2)	00000000111000 00000001100000 00001000010010 00000000001000
0104 0105	LOOP: jmp L1	Address of label L1	000010010000100 00000111100010
0106 0107	prn #-5	Immediate value -5	00001100000000 1111111101100
0108 0109 0110 0111 0112	mov STR[5], STR[2]	Address of label STR (string) Index 5 Address of label STR Index 2	00000000101000 00000111110010 000000000010100 00000111110010 00000000001000
0113 0114	sub r1, r4	Source register 1 and target register 4	00000011111100 00000000110000
0115 0116 0117	cmp r3, #sz	Source register 3 Value of constant sz (immediate #2)	00000001110000 00000001100000 00000000001000
0118 0119	bne END	Address of label END	00001010000100 00000111110010
0120 0121	L1: inc K	Address of label K (integer)	00000111000100 00001000011110
0122 0123	bne LOOP	Address of label LOOP	00001010000100 00000110100010
0124	END: hlt		00001111000000
0125	STR: .string "abcdef"	Ascii code 'a'	00000001100001
0126		Ascii code 'b'	00000001100010
0127		Ascii code 'c'	00000001100011
0128		Ascii code 'd'	00000001100100
0129		Ascii code 'e'	00000001100101

Decimal Address	Source Code	Explanation	Binary Machine Code
0130		Ascii code 'f'	00000001100110
0131		Ascii code '\0' (end of string)	00000000000000
0132	LIST: .data 6, -9, len	Integer 6 (first in array of 3 words)	000000000000110
0133		Integer -9	11111111110111
0134		Value of constant len (integer 4)	000000000000100
0135	K: .data 22	Integer 22 (single word)	00000000010110

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 124 (עשרוני), ושהסמל K משויך למען 135, 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 המשוויכים להם, ובשלב השני מחליפים את כל הסמלים, המופיעים באופרנדים של הוראות 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 או ערך קבוע, שהוגדר על ידי define. בדוגמה לעיל, טבלת הסמלים לאחר מעבר ראשון היא:

סמל	ערך (בבסיס עשרוני)
sz	2
MAIN	100
LOOP	104
L1	120
END	124
len	4
STR	125
LIST	132
K	135

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 ישויך 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 המשוך 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 מייד, או רגיסטר, וכן את הקידוד הבינארי של כל הנתונים (המתקבלים מההנחיות .data, .string).

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 מיצר, 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, 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 האסמבלי בגוף מאקרו, הרי שגיאה זו יכולה להופיע ולהתגלות שוב ושוב, בכל מקום בו נפרש המקארו. 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 של שיטות המיעון החוקיות, עבור אופרנד המקור ואופרנד היעד של ההוראות השונות הקיימות בשפה הנתונה:

שם פעולה	שיטות מיעון חוקיות עבור אופרנד מקור	שיטות מיעון חוקיות עבור אופרנד יעד
mov	0,1,2,3	1,2,3
cmp	0,1,2,3	0,1,2,3
add	0,1,2,3	1,2,3
sub	0,1,2,3	1,2,3
not	אין אופרנד מקור	1,2,3
clr	אין אופרנד מקור	1,2,3
lea	1,2	1,2,3
inc	אין אופרנד מקור	1,2,3
dec	אין אופרנד מקור	1,2,3
jmp	אין אופרנד מקור	1,3
bne	אין אופרנד מקור	1,3
red	אין אופרנד מקור	1,2,3
prn	אין אופרנד מקור	0,1,2,3
jsr	אין אופרנד מקור	1,3
rts	אין אופרנד מקור	אין אופרנד יעד
hlt	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 100.

כמו כן, נסמן ב-L את מספר המילים שתופס קוד המכונה של הוראה נתונה.

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-16.
3. האם זוהי הגדרת define (קבוע)? אם לא, עבור ל-5.
4. הכנס את שם הקבוע לטבלת הסמלים עם המאפיין mdefine. ערכו יהיה כפי שמופיע בהגדרה. (אם הסמל כבר נמצא בטבלה, יש להודיע על שגיאה). חזור ל-2.
5. האם השדה הראשון בשורה הוא סמל? אם לא, עבור ל-7.
6. הדלק דגל "יש הגדרת סמל".
7. האם זוהי הנחיה לאחסון נתונים, כלומר, האם הנחית data או string? אם לא, עבור ל-10.
8. אם יש הגדרת סמל (תוית), הכנס אותו לטבלת הסמלים עם המאפיין data. ערכו יהיה DC. (אם הסמל כבר נמצא בטבלה יש להודיע על שגיאה).
9. זהה את סוג הנתונים, קודד אותם בזיכרון, ועדכן את מונה הנתונים DC בהתאם לאורכם. אם זוהי הנחית data, ויש בה נתון שהוא סמל, בדוק שהסמל מופיע בטבלה עם המאפיין mdefine, והשתמש בערכו. (אם הסמל אינו בטבלה או לא מאופיין כ-mdefine, יש להודיע על שגיאה). חזור ל-2.
10. האם זו הנחית extern או הנחית entry? אם לא, עבור ל-12.
11. האם זוהי הנחית extern? אם כן, הכנס כל סמל (אחד או יותר) המופיע כאופרנד של ההנחיה לתוך טבלת הסמלים ללא ערך, עם המאפיין external. חזור ל-2.
12. אם יש הגדרת סמל, הכנס אותו לטבלת הסמלים עם המאפיין code. ערכו יהיה $IC+100$ (אם הסמל כבר נמצא בטבלה יש להודיע על שגיאה).
13. חפש את שם הפעולה בטבלת שמות הפעולות, ואם לא נמצא – הודע על שגיאה בשם ההוראה.
14. נתח את מבנה האופרנדים של ההוראה וחשב את L. בנה כעת את הקוד הבינארי של המילה הראשונה של ההוראה.
15. עדכן $IC \leftarrow IC + L$, וחזור ל-2.
16. קובץ המקור נקרא בשלמותו. אם נמצאו שגיאות במעבר הראשון, עצור כאן.
17. עדכן בטבלת הסמלים את ערכו של כל סמל המאופיין כ-data, ע"י הוספת הערך $IC+100$ (ראה הסבר בהמשך).
18. התחל מעבר שני.

מעבר שני

1. אתחל $IC \leftarrow 0$.
2. קרא את השורה הבאה מקובץ המקור. אם נגמר קובץ המקור, עבור ל-9.
3. אם השדה הראשון הוא סמל, דלג עליו.
4. האם זוהי הנחית data או string או extern? אם כן, חזור ל-2.
5. האם זוהי הנחית entry? אם לא, עבור ל-7.

6. סמן בטבלת הסמלים את הסמלים המתאימים במאפיין entry. חזור ל-2.
7. השלם את קידוד האופרנדים החל מהמילה השנייה בקוד הבינארי של ההוראה, בהתאם לשיטת המיעון. אם אופרנד מכיל סמל, מצא את הערך בטבלת הסמלים (אם הסמל לא נמצא בטבלה, יש להודיע על שגיאה).
8. עדכן $IC \leftarrow IC + L$, וחזור ל-2.
9. קובץ המקור נקרא בשלמותו. אם נמצאו שגיאות במעבר השני, עצור כאן.
10. 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.

```
.define sz = 2
MAIN:      mov    r3, LIST[sz]
LOOP:      jmp     L1
           prn     #-5
           mov     STR[5], STR[2]
           sub     r1, r4
           cmp     r3, #sz
           bne     END
L1:         inc     K
           bne     LOOP
END:        hlt
.define len = 4
STR:        .string "abcdef"
LIST: .data    6, -9, len
K:          .data    22
```

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. את החלקים שעדיין לא מתורגמים במעבר זה, נשאיר כמות שהם (מסומנים ב- ? בדוגמה להלן).

אנו מניחים שהקוד ייטען לזיכרון החל מהמען 100 (בבסיס דצימאלי).

Decimal Address	Source Code	Explanation	Binary Machine Code
0100 0101 0102 0103	MAIN: mov r3, LIST[sz]	First word of instruction Source register 3 Address of label LIST (integer array) Value of sz (index 2)	00000000111000 00000001100000 ? 00000000001000
0104 0105	LOOP: jmp L1	Address of label L1	00001001000100 ?
0106 0107	prn #-5	Immediate value -5	00001100000000 11111111011100
0108 0109 0110 0111 0112	mov STR[5], STR[2]	Address of label STR (string) Index 5 Address of label STR Index 2	00000000101000 ? 00000000010100 ? 00000000001000
0113 0114	sub r1, r4	Source register 1 and target register 4	00000011111110 00000000110000
0115 0116 0117	cmp r3, #sz	Source register 3 Value of sz (immediate #2)	00000001110000 00000001100000 00000000001000
0118 0119	bne END	Address of label END	00001010000100 ?

Decimal Address	Source Code	Explanation	Binary Machine Code
0120 0121	L1: inc K	Address of label K (integer)	00000111000100 ?
0122 0123	bne LOOP	Address of label LOOP	00001010000100 ?
0124	END: hlt		00001111000000
0125	STR: .string "abcdef"	Ascii code 'a'	00000001100001
0126		Ascii code 'b'	00000001100010
0127		Ascii code 'c'	00000001100011
0128		Ascii code 'd'	00000001100100
0129		Ascii code 'e'	00000001100101
0130		Ascii code 'f'	00000001100110
0131		Ascii code '\0' (end of string)	00000000000000
0132 0133 0134	LIST: .data 6, -9, len	Integer 6 (first in array of 3 words) Integer -9 Value of len (integer 4)	00000000000110 1111111110111 00000000000100
0135	K: .data 22	Integer 22 (single word)	00000000010110

טבלת הסמלים:

סמל	מאפיינים	ערך (בבסיס עשרוני)
sz	mdefine	2
MAIN	code	100
LOOP	code	104
L1	code	120
END	code	124
len	mdefine	4
STR	data	125
LIST	data	132
K	data	135

נבצע עתה את המעבר השני. נשלים את הקידוד החסר באמצעות טבלת הסמלים, ונרשום את הקוד בצורתו הסופית:

Decimal Address	Source Code	Binary Machine Code
0100 0101 0102 0103	MAIN: mov r3, LIST[sz]	00000000111000 00000001100000 00001000010010 00000000001000
0104 0105	LOOP: jmp L1	00001001000100 00000111100010
0106 0107	prn #-5	00001100000000 11111111101100
0108 0109 0110 0111 0112	mov STR[5], STR[2]	00000000101000 00000111110010 00000000010100 00000111110010 00000000001000
0113 0114	sub r1, r4	00000011111100 00000000110000

Decimal Address	Source Code	Binary Machine Code
0115 0116 0117	cmp r3, #sz	00000001110000 00000001100000 00000000001000
0118 0119	bne END	00001010000100 00000111110010
0120 0121	L1: inc K	00000111000100 00001000011110
0122 0123	bne LOOP	00001010000100 00000110100010
0124	END: hlt	00001111000000
0125	STR: .string "abcdef"	00000001100001
0126		00000001100010
0127		00000001100011
0128		00000001100100
0129		00000001100101
0130		00000001100110
0131		00000000000000
0132 0133 0134	LIST: .data 6, -9, len	00000000000110 11111111110111 00000000000100
0135	K: .data 22	00000000010110

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: 14 סיביות). במערך ההוראות מכניס האסמבלר את הקידוד של ההוראות 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 מאופסים.

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 `mdescribe`), או אופן העדכון (`external` או `relocatable`).

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

1. שורה ריקה או שורת הערה: האסמבלר מתעלם מהשורה ועובר לשורה הבאה.
2. שורת קבוע: האסמבלר מכניס את שם הקבוע לטבלת הסמלים עם המאפיין `mdescribe`.
3. שורת הוראה:

האסמבלר מוצא מהי הפעולה, ומהן שיטות המיעון של האופרנדים. (מספר האופרנדים אותם הוא מחפש נקבע בהתאם להוראה אותה הוא מוצא). 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 או שם של קבוע `define` (מיעון מידי) – 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 מידי, 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 ההוראות המכונה כפי שתואר קודם לכן). מילה זו מכילה את קוד הפעולה, ואת שיטות המיעון. בנוסף "משריין" האסמבלר מקום במערך עבור המילים הנוספות הנדרשות עבור ההוראה 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 שאין רלוונטיות לפעולה.

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

4. 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. נשים לב שגם שם של קבוע define יכול לשמש במקום מספר.

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

בסוף המעבר הראשון, ערך התווית יעודכן בטבלת הסמלים על ידי הוספת ה-IC (כלומר הוספת האורך הכולל של קידוד כל ההוראות). הסיבה לכך היא שבתמונת קוד המכונה, הנתונים מופרדים מההוראות, וכל הנתונים יופיעו אחרי כל ההוראות (ראו תאור קבצי הפלט בהמשך).

II. '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'.

III. '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.

IV. '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 (שדה ה- A,R,E במילים אלה יהיה 10 או 01).

פורמט קובץ ה-object

האסמבלר בונה את תמונת זיכרון המכונה כך שקידוד ההוראה הראשונה מקובץ האסמבלי ייכנס למען 100 (בבסיס עשרוני) בזיכרון, קידוד ההוראה השנייה יכנס למען העוקב אחרי ההוראה הראשונה (תלוי במספר המילים של ההוראה הראשונה), וכך הלאה עד להוראה האחרונה.

מיד לאחר קידוד ההוראה האחרונה, מכניסים לתמונת הזיכרון את קידוד הנתונים שנבנו על ידי ההנחיות 'string'.data'. הנתונים יוכנסו בסדר בו הם מופיעים בקובץ המקור. אופרנד של הוראה שמתייחס לסמל שהוגדר באותו קובץ, יקודד כך שיצביע על המקום המתאים בתמונת הזיכרון שבונה האסמבלר.

נשים לב שהמשתנים מופיעים בתמונת הזיכרון אחרי ההוראות. זוהי הסיבה בגללה יש לעדכן בטבלת הסמלים, בסוף המעבר הראשון, את ערכי הסמלים המגדירים נתונים (סמלים מסוג .data).

עקרונית, קובץ object מכיל את תמונת הזיכרון שתוארה כאן. קובץ object מורכב משורות של טקסט כדלקמן:

השורה הראשונה בקובץ ה-object היא "כותרת", המכילה שני מספרים (בבסיס עשרוני): האורך הכולל של קטע ההוראות (במילות זיכרון) ואחרי האורך הכולל של קטע הנתונים (במילות זיכרון). בין שני המספרים יש רווח אחד.

השורות הבאות בקובץ מכילות את תמונת הזיכרון. בכל שורה שני ערכים: כתובת של מילה בזיכרון, ותוכן המילה. הכתובת תירשם בבסיס עשרוני בארבע ספרות (כולל אפסים מובילים). תוכן המילה יירשם בבסיס 4 "מוצפן" (ראה להלן) בשבע ספרות (כולל אפסים מובילים). בין שני הערכים בכל שורה יפריד רווח אחד.

בסיס 4 רגיל	0	1	2	3
בסיס 4 מוצפן	*	#	%	!

קובץ object לדוגמה, כפי שאמור להיבנות על ידי האסמבלר, נמצא בהמשך.

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 מיוצגים בבסיס עשרוני.

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 שיייתכן ויש מספר כתובות בקוד המכונה בהם מתייחסים לאותו סמל חיצוני. לכל התייחסות כזו תהיה שורה נפרדת בקובץ ה-externals. הכתובות מיוצגות בבסיס עשרוני.

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

```
; file ps.as
```

```
.entry LIST
```

```
.extern W
```

```
.define sz = 2
```

```
MAIN:      mov     r3, LIST[sz]
```

```

LOOP:      jmp    W
           prn    #-5
           mov    STR[5], STR[2]
           sub    r1, r4
           cmp    K, #sz
           bne    W
L1:         inc    L3
.entry LOOP
           bne    LOOP
END:        hlt
.define len = 4
STR:        .string "abcdef"
LIST:       .data  6, -9, len
K:          .data  22
.extern L3

```

להלן טבלת הקידוד המלא הבינארי שמתקבל מקובץ המקור, ולאחריה הפורמטים קבצי הפלט השונים.

Decimal Address	Source Code	Binary Machine Code
0100 0101 0102 0103	MAIN: mov r3, LIST[sz]	00000000111000 00000001100000 00001000010010 00000000001000
0104 0105	LOOP: jmp W	00001001000100 00000000000001
0106 0107	prn #-5	00001100000000 1111111101100
0108 0109 0110 0111 0112	mov STR[5], STR[2]	00000000101000 00000111110110 00000000010100 00000111110110 0000000001000
0113 0114	sub r1, r4	00000011111100 00000000110000
0115 0116 0117	cmp K, #sz	00000001010000 00001000011110 00000000001000
0118 0119	bne W	00001010000100 00000000000001
0120 0121	L1: inc L3	00000111000100 00000000000001
0122 0123	bne LOOP	00001010000100 00000110100010
0124	END: hlt	00001111000000
0125	STR: .string "abcdef"	00000001100001
0126		00000001100010
0127		00000001100011
0128		00000001100100
0129		00000001100101
0130		00000001100110
0131		00000000000000

Decimal Address	Source Code	Binary Machine Code
0132	LIST: .data 6, -9, len	00000000000110
0133		1111111110111
0134		00000000000100
0135	K: .data 22	00000000010110

להלן תוכן קבצי הפלט של הדוגמה.

הקובץ ps.ob:

```

25 11
0100  ****!%*
0101  ***#%**
0102  **%*#**%
0103  *****%*
0104  **%*##*
0105  *****#
0106  **!****
0107  !!!!!%!*
0108  ****%!*
0109  **#!!#%
0110  ****##*
0111  **#!!#%
0112  *****%*
0113  ***!!!*
0114  *****!
0115  ***##**
0116  **%*#!%
0117  *****#*
0118  **%*%*#*
0119  *****#
0120  **#!*#*
0121  *****#
0122  **%*%*#*
0123  **#%*%*%
0124  **!!***
0125  ***#%*#
0126  ***#%*%
0127  ***#%*!
0128  ***#%*#*
0129  ***#%*##
0130  ***#%*#%
0131  *****
0132  *****#%
0133  !!!!!#!
0134  *****#*
0135  ***#%*#%

```

הקובץ ps.ent:

כל המספרים בבסיס עשרוני

```

LOOP 0104
LIST 0132

```

הקובץ ps.ext:

כל המספרים בבסיס עשרוני

```

W      0105
W      0119
L3     0121

```