

האוניברסיטה הפתוחה

20465

מעבדה בתכנות מערכות

חוברת הקורס – סתיו 2024א

כתבה: מיכל אבימור

אוקטובר 2023 – סמסטר סתיו – תשפ"ד

פנימי – לא להפצה.

© כל הזכויות שמורות לאוניברסיטה הפתוחה.

תוכן העניינים

א	אל הסטודנט
ג	1. לוח זמנים ופעילויות
ה	2. תיאור המטלות
ו	3. התנאים לקבלת נקודות זכות
1	ממ"ן 11
3	ממ"ן 12
5	ממ"ן 22
13	ממ"ן 23
15	ממ"ן 14

אל הסטודנט,

אני מקדמת את פניך בברכה, עם הצטרפותך אל הלומדים בקורס "מעבדה בתכנות מערכות". בחוברת זו תמצא את הדרישות לקבלת נקודות זכות בקורס, לוח הזמנים ומטלות הקורס.

לקורס קיים אתר באינטרנט בו תמצאו חומרי למידה נוספים, אותם מפרסם/מת מרכז/ת ההוראה. בנוסף, האתר מהווה עבורכם ערוץ תקשורת עם צוות ההוראה ועם סטודנטים אחרים בקורס. פרטים על למידה מתוקשבת ואתר הקורס, תמצאו באתר שה"ם בכתובת:

<http://telem.openu.ac.il>

מידע על שירותי ספרייה ומקורות מידע שהאוניברסיטה מעמידה לרשותכם, תמצאו באתר הספרייה באינטרנט www.openu.ac.il/Library.

קורס זה הינו קורס מתוקשב. מידע על אופן ההשתתפות בתקשוב ישלח לכל סטודנט באופן אישי. ניתן להפנות שאלות בנושאי חומר הלימוד, והממ"נים לקבוצת הדיון של הקורס. בנוסף יופיעו שם הודעות ועדכונים מצוות הקורס. כניסה תכופה לאתר הקורס ולקבוצת הדיון שלה, מאפשרת לך להתעדכן בכל המידע, ההבהרות וכו' במסגרת הקורס.

ניתן לפנות אלי בשעות הייעוץ שלי (יפורסמו בהמשך באתר) או מחוץ לשעות הקבלה, באמצעות email, לכתובת: michav@openu.ac.il, ואשתדל לענות בהקדם.

- שאילתא - לפניות בנושאים אקדמיים שונים כגון מועדי בחינה מעבר לטווח זכאות ועוד, אנא עשו שימוש מסודר במערכת הפניות דרך שאילתא. לחצו על הכפתור פניה חדשה ואחר כך לימודים אקדמיים < משימות אקדמיות, ובשדה פניות סטודנטים: השלמת בחינות בקורס. המערכת תומכת גם בבקשות מנהלה שונות ומגוונות.

לתשומת לב הסטודנטים הלומדים בחו"ל:

למרות הריחוק הפיסי הגדול, נשתדל לשמור אתכם על קשרים הדוקים ולעמוד לרשותכם ככל האפשר.

הפרטים החיוניים על הקורס נכללים בחוברת הקורס וכן באתר הקורס. מומלץ מאוד להשתמש באתר הקורס ובכל אמצעי העזר שבו וכמובן לפנות אלינו במידת הצורך.

אני מאחלת לך לימוד פורה ומהנה.

בברכה,

מיכל אבימור
מרכזת ההוראה בקורס.

1. לוח זמנים ופעילויות (מס' קורס 20465 /א/2024)

שבוע הלימוד	תאריכי שבוע הלימוד	יחידת הלימוד המומלצת	מפגשי ההנחיה*	תאריך אחרון למשלוח הממ"ן (למנחה)
1	27.10.2023-22.10.2023	ספר C פרקים 1-2-3	מפגש ראשון	
2	03.11.2023-29.10.2023	ספר C פרקים 1-2-3		
3	10.11.2023-5.11.2023	ספר C פרק 4	מפגש שני	
4	17.11.2023-12.11.2023	ספר C פרק 4		
5	24.11.2023-19.11.2023	ספר C פרק 5	מפגש שלישי	ממ"ן 11 19.11.2023
6	01.12.2023-26.11.2023	ספר C פרק 5		
7	08.12.2023-03.12.2023 (ו חנוכה)	ספר C פרק 6	מפגש רביעי	
8	15.12.2023-10.12.2023 (א-ו חנוכה)	ספר C פרק 6		

* התאריכים המדויקים של המפגשים הקבוצתיים מופיעים ב"לוח מפגשים ומנחים".

לוח זמנים ופעילויות - המשך

שבוע הלימוד	תאריכי שבוע הלימוד	יחידת הלימוד המומלצת	מפגשי ההנחיה*	תאריך אחרון למשלוח הממ"ן (למנחה)
9	22.12.2023-17.12.2023	ספר C פרק 6,7	מפגש חמישי	ממ"ן 12 17.12.2023
10	29.12.2023-24.12.2023	ספר C פרק 7		
11	05.01.2024-31.12.2023	ספר C פרק 7	מפגש שישי	
12	12.01.2024-07.01.2024	ספר C פרק 8 + פרויקט		ממ"ן 22 07.01.2024
13	19.01.2024-14.01.2024	פרויקט וחזרה	מפגש שביעי	
14	26.01.2024-21.01.2024	פרויקט וחזרה	מפגש שמיני	ממ"ן 23 21.01.2024 ממ"ן 14** 17.03.2024

מועדי בחינות הגמר יפורסמו בנפרד

* התאריכים המדויקים של המפגשים הקבוצתיים מופיעים ב"לוח מפגשים ומנחים".

** לא תינתן דחייה בהגשת הפרויקט (ממ"ן 14), פרט למקרים חריגים של מילואים או אשפוז, במקרים אלו יש לתאם את מועד ההגשה מראש עם מנחה הקבוצה.

2. תיאור המטלות

על מנת לתרגל את החומר הנלמד ולבדוק את ידיעותיך, עליך לפתור את המטלות המצויות בחוברת המטלות.

רוב המטלות בקורס זה הן **מטלות חובה**, והן בעיקרן תוכניות מחשב. שתי מטלות הן רשות. להלן מספרי המטלות ומשקליהן:

ממ"ן	משקל	פרקים
11	4 (ממ"ן חובה)	3,2,1
12	5 (ממ"ן חובה)	5,4
22	8 (ממ"ן רשות)	6,5,4
23	12 (ממ"ן רשות)	8,7,6
14	61 (ממ"ן חובה)	פרויקט גמר

עליך להגיש במהלך הקורס את כל מטלות החובה. את התשובות לממ"נים יש להגיש באמצעות מערכת המטלות (במקרים מיוחדים ניתן להגיש את המטלות באמצעות הדואר או הגשה ישירה למנחה במפגשי ההנחיה. במקרה כזה יש לתאם את הדבר עם הבודק).

יש להגיש את קבצי המקור (.h, .c), קבצי ההרצה, קבצי הסביבה המתאימים (כולל קבצי MAKEFILE), קבצי קלט וקבצי פלט (או צילומי מסך, אם לא נדרשו הקבצים הנ"ל).

הנחיות לכתיבת מטלות וניקודן

ניקוד המטלות יעשה לפי המשקלים הבאים:

א. ריצה - 20%
התכנית עובדת על פי הדרישות בתרגיל, תוך השגת כל המטרות שהוגדרו. התכנית עוברת קומפילציה ללא הערות.

ב. תיעוד - 20%

התיעוד ייכתב בתוך הקוד. אין להוסיף הערות בקבצים נפרדים.

התיעוד יכלול:

- הערה בראש תכנית שתכלול תיאור תמציתי של מטרות התכנית, כיצד מושגת מטרה זו, תיאור המודלים והאלגוריתם, קלט/פלט וכל הנחה שהנכם מניחים.
- לכל מציג (אב-טיפוס) prototype של פונקציה (בקובץ ה-header הצמוד לקוד), יוצמד תיאור של קלט/פלט, ופעולת הפונקציה. **מטרה:** זהו קובץ היצוא ועל כן עליו להסביר למי שאין לו גישה לקוד איך עליו להשתמש בפונקציה.
- לפני הכותרת (header) של כל פונקציה יבוא תיאור של פעולתה, הנחות ואלגוריתם.

מטרה : התיעוד לפני כל פונקציה נועד לתת היכרות ראשונית, לפעולת הפונקציה, תוך פירוט כיצד הפונקציה עושה זאת. תיעוד זה אמור לאפשר לקורא את הקוד (שלא כתב את הקוד), להבין את הקוד.

4) לכל משתנה יהיה שם משמעותי ויוצמד אליו תיעוד לגבי תפקודו בתכנית. i,j,k - משמשים בד"כ כשמות אינדקסים ואין צורך לתעד אותם.

5) לא יופיעו "מספרי קסם" בגוף התכנית למעט 0,1 לאיתחול משתני לולאות. יש להשתמש בקבועים בעלי שמות משמעותיים שיכתבו באותיות גדולות, ויתועדו בשלב ההגדרה. כל טיפוס מורכב יוגדר כ- typedef ויתועד. נהוג לקרוא לטיפוסים מורכבים בשמות משמעותיים ולהשתמש באותיות גדולות.

6) יש להשתמש בשמות משמעותיים ל: פונקציות, מקרואים, משתנים, קבועים, הגדרת טיפוסים וקבצים.

7) יש להקפיד על קריאות ובהירות תוך שימוש באינדנטציה (היסח) מסודרת ואחידה.

ג. תכנות - 40%

יש להקפיד על כתיבה מסודרת ומודולרית של קוד :

- חלוקה לקבצים - כשלכל קובץ מוצמד קובץ header אם צריך (כאשר נדרש בתרגיל).

- חלוקה לפונקציות.

- שימוש במקרואים.

- שימוש נכון ב-MAKEFILE, (במיוחד כאשר אתם נדרשים לחלק את התוכנית למספר קבצים, במסגרת הממ"ן).

- הסתרת אינפורמציה - ושימוש בהפשטת מידע.

- הימנעות ככל שניתן משימוש במשתנים גלובליים.

- שימוש מירבי ונכון במלוא הכלים שמעמידה השפה לרשותכם.

- קוד אלגנטי ולא מסורבל.

ד. יעילות התכנית והתרשמות כללית - 20%

המשקלים הנ"ל מהווים קו מנחה לחלוקת הנקודות. מובן שתהיה התייחסות לכל תכנית לגופה, בהתאם למידת המורכבות של התרגיל.

ינתנו קנסות במיקרים הבאים :

- אי הגשת קבצי סביבה - MAKEFILE – 20 נקודות.
- עבור אותם ממ"נים בהם מוגדר שם קובץ, פונקציה, או פרמטר, שימוש בשם שונה מזה המוגדר בממ"ן – 10 נקודות.

לתשומת לבך : חל איסור מוחלט של הכנה משותפת של מטלות או העתקת מטלות. תלמיד שייתפס באחד מאיסורים אלה ייענש בהתאם לנאמר בתקנון המשמעת נספח 1 בידיעון של האו"פ. רק את ממ"ן 14 מותר להגשה בזוגות (לא ניתן להגיש בשלושות!), כאשר שני הסטודנטים המגישים שיכים לאותה קבוצת לימוד.

3. התנאים לקבלת נקודות זכות בקורס

- א. להגיש את מטלות החובה בקורס (11, 12) וכן את פרויקט הגמר (14).
- ב. ציון של לפחות 60 נקודות בבחינת הגמר ובפרויקט הגמר.
- ג. ציון סופי בקורס של 60 נקודות לפחות.

לתשומת לבכם!

כדי לעודדכם להגיש לבדיקה מספר רב של מטלות הנהגנו את ההקלה שלהלן:

אם הגשתם מטלות מעל למשקל המינימלי הנדרש בקורס, **המטלות** בציון הנמוך ביותר, שציוניהן נמוכים מציון הבחינה (**עד שתי מטלות**), לא יילקחו בחשבון בעת שקלול הציון הסופי.

זאת בתנאי שמטלות אלה **אינן חלק מדרישות החובה בקורס** ושהמשקל הצבור של המטלות האחרות שהוגשו, מגיע למינימום הנדרש.

זכרו! ציון סופי מחושב רק לסטודנטים שעברו את בחינת הגמר והפרויקט בציון 60 ומעלה והגישו מטלות כנדרש באותו קורס.

מטלת מנחה (ממ"ן) 11

הקורס: 20465 - מעבדה בתכנות מערכות

חומר הלימוד למטלה: פרקים 1,2,3

מספר השאלות: 2 משקל המטלה: 4 נקודות (חובה)

סמסטר: 2024' מועד אחרון להגשה: 19.11.2023

אופן ההגשת המטלות:

שליחת מטלות באמצעות מערכת המטלות המקוונת באתר הבית של הקורס
הסבר מפורט ב"נוהל הגשת מטלות מנחה"

יש לקמפל עם דגלים מקסימליים, לקבלת כל האזהרות: `Wall-ansi-pedantic`. יש להגיש את קבצי המקור `.c` (רק אם קיימים), קבצי ההרצה (את קבצי `.o` אין צורך לצרף), קבצי הסביבה המתאימים (כולל קבצי `makefile`), וכן קבצי קלט ותדפיסי מסך או קבצי פלט (לפי ההנחיות במטלה/במפגש/באתר).

הקבצים של כל תוכנית יהיו בתיקיה נפרדת. נדרש ששם התיקיה ושם הקובץ לריצה יהיו כשם הקובץ המכיל את הפונקציה `main`, ללא הסיומת `.c`.

יש להגיש תכניות מלאות (בין השאר מכילות `main`), הניתנות להידור והרצה, ומאפשרות בדיקה של כל התוצאות המגוונות של הריצה ללא צורך בשינויים כלשהם בקוד המקור של התוכנית. את המטלה יש להגיש בקובץ `.zip`.

חשוב מאוד:

- אופן הגשת המטלה והקבצים הנדרשים להגשה מופיעים כאן וכן בעמודים ה-ז בסעיף תיאור המטלות. במקרה של הנחיה שונה בפורום, יש לוודא את הנושא עם מנחה הקבוצה.
- לאחר ההגשה, יש להוריד את המטלה משרת האו"פ למחשב האישי, ולבדוק שהקבצים אכן הועלו למערכת באופן תקין.

שאלה 1 (תכנית ראשית בקובץ `doll.c`) (50 נקודות)

עליכם לכתב תוכנית הקולטת מהקלט הסטנדרטי, רשימה של מספרים ממשיים, שהראשון בהם הוא השער היציג של הדולר, ביום הרצת התוכנית. הערכים הבאים אחריו הם ייצוגים של סכומי כסף בדולרים.

על התוכנית לעבור על הקלט, עד לסיומו, ולהדפיס בפורמט של טבלה: עבור כל ערך דולרי את הערך השקלי השקול.

בשורה התחתונה של הטבלה יש להדפיס את סכום סך הכל הדולרים וסכום סך הכל השקלים שהדפסנו.

לדוגמה : עבור הקלט (משמאל לימין) :

3.58 12 11.50 3.20 4.10

שער הדולר הוא 3.58 ועל התוכנית להדפיס את הטבלה הבאה :

\$	IS
12.00	42.96
11.50	41.17
3.20	11.46
4.10	14.68
30.80	110.27

הערות : 1. לצורך קריאת הנתונים מהקלט ניתן להשתמש בפונקציית scanf .

2. במטלה זו ניתן להניח נכונות הקלט (אין צורך לבדוק תקינות).

הנחיות נוספות :

הקלט לתוכנית הוא מ-stdin, ויכול להגיע מהמקלדת או מקובץ (באמצעות redirection בעת הפעלת התוכנית). לנוחיותכם, הכינו מספר קבצי קלט והשתמשו בהם שוב ושוב לדיבוג התוכנית.

חובה לצרף להגשה הרצות בדיקה (אחת או יותר), המדגימות את פעולת התכנית על מגוון קלטים. יש להגיש תדפיסי מסך של כל ההרצות וכן את קבצי הקלט.

שאלה 2 (תכנית ראשית בקובץ my_cos.c) (50 נקודות)

הטור לחישוב קוסינוס הוא :

$$\sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i x^{2i} / (2i)!$$

הטור יראה כך :

$$1 - x^2 / 2! + x^4 / 4! - x^6 / 6! + \dots$$

עליכם לכתוב פונקציה double my_cos(double), המשתמשת בטור הנ"ל לחישוב הקוסינוס עד לדיוק 1.0e-6. כלומר עד אשר גודל האיבר הבא בסכום ירד מתחת לערך זה.

עליכם לכתוב תכנית ראשית main, הקולטת ערך double, ומדפיסה את תוצאת החישוב של my_cos, וכן את התוצאה של פונקציית cos מהספרייה הסטנדרטית.

על התכנית להדפיס הודעת בקשה ידידותית לקלט. כמו כן יש להדפיס באופן נאה את הנתון/הנתונים כפי שנקלטו, וזאת לפני הקריאה לפונקציה.

חובה לצרף להגשה מספר הרצות בדיקה, המדגימות את פעולת התכנית על מגוון נתוני קלט.

לתשומת לבכם : לא תינתן דחיה בהגשת הממ"ן, פרט למקרים מיוחדים כגון מילואים או אשפוז.

במקרים אלו יש לבקש ולקבל אישור מראש ממנחה הקבוצה.

בהצלחה!

מטלת מנחה (ממ"ן) 12

הקורס: 20465 - מעבדה בתכנות מערכות

חומר הלימוד למטלה: פרקים 4,5

מספר השאלות: 1 משקל המטלה: 5 נקודות (חובה)

סמסטר: 2024' מועד אחרון להגשה: 17.12.2023

אופן הגשת המטלות:

שליחת מטלות באמצעות מערכת המטלות המקוונת באתר הבית של הקורס
הסבר מפורט ב"נוהל הגשת מטלות מנחה"

יש לקמפל עם דגלים מקסימליים, לקבלת כל האזהרות: Wall -ansi -pedantic. יש להגיש את קבצי המקור c. (h. רק אם קיימים), קבצי ההרצה (את קבצי o. אין צורך לצרף), קבצי הסביבה המתאימים (כולל קבצי makefile), וכן קבצי קלט ותדפיסי מסך או קבצי פלט (לפי ההנחיות במטלה/במפגש/באתר).

קבצי התוכנית יהיו בתיקיה. נדרש ששם התיקיה ושם הקובץ לריצה יהיו כשם הקובץ המכיל את הפונקציה main, ללא הסיומת c.

יש להגיש תכנית מלאה (בין השאר מכילה main), הניתנת להידור והרצה, ומאפשרת בדיקה של כל התוצאות המגוונות של הריצה ללא צורך בשינויים כלשהם בקוד המקור של התוכנית. את המטלה יש להגיש בקובץ zip.

לאחר ההגשה, יש להוריד את המטלה משרת האו"פ למחשב האישי, ולבדוק שהקבצים אכן הועלו למערכת באופן תקין.

שאלה 1 (תכנית ראשית בקובץ get_name.c)

עליכם לכתוב פונקציה בשם get_name, אשר אינה מקבלת פרמטרים, ומחזירה מחרוזת תווים. מטרת הפונקציה היא לבחור שם אקראי מתוך רשימה קבועה של 30 שמות, הנתונה במערך גלובלי. הפונקציה תחזיר את השם שבחרה.

כל שם ברשימה הוא מחרוזת תווים באורך מקסימלי של 20 תווים (לא כולל ה-0 המסיים). השם מורכב מאותיות האלפבית האנגלי בלבד, ואינו מכיל תווים לבנים (רווחים, טאבים, או שורה חדשה \n).

הפונקציה מחזירה שם (כלומר מחרוזת), ולא אינדקס של איבר ברשימת השמות.

לבחירה אקראית של שם מהרשימה, השתמשו בפונקציה rand מהספרייה הסטנדרטית `stdlib.h`.

בנוסף, עליכם לכתוב תכנית ראשית (הפונקציה `main`) שתקרא מהקלט 30 שמות, ותאתחל את רשימת השמות. לאחר מכן, התכנית הראשית תקרא 10 פעמים לפונקציה `get_name`. אחרי כל קריאה, התכנית תדפיס את השם האקראי שהחזירה הפונקציה.

לתשומת לב: על התכנית הראשית לבדוק שהשמות (המחרוזות) שהועברו בקלט שונים זה מזה. הבדיקה לא תבדיל בין אותיות אנגליות קטנות וגדולות. לדוגמה, השם "aba" והשם "aBa" ייחשבו כזהים. אם מתגלה כי שם כלשהו הועבר בקלט יותר מפעם אחת, התכנית תסתיים מיידית עם הודעת שגיאה מפורטת.

באפשרותכם לארגן את הקלט בכל צורה שתמצאו לנכון, למשל, כל שם בשורה נפרדת; או כמה שמות באותה שורה, מופרדים בתווים לבנים.

מותר להניח (אין צורך לבדוק) שהשמות תקינים מבחינת אורכם וסוג התווים, כמפורט לעיל.

לתשומת לב: הקפידו שלא לכלול בשם את התו `\` המופיע בסוף שורת קלט.

הקלט לתכנית הוא מ-`stdin`, ויכול להגיע **מהמקלדת או מקובץ** (באמצעות `redirection` בעת הפעלת התכנית). לנוחיותכם, הכינו מספר קבצי קלט והשתמשו בהם שוב ושוב לדיבוג התכנית.

על התכנית **להדפיס הודעת בקשה ידידותית לקלט**. כמו כן יש **להדפיס באופן יזום מתוך התכנית את כל הנתונים כפי שנקלטו**, וזאת לפני הקריאה הראשונה לפונקציה `get_name`. באופן זה, הקלט יוצג גם כאשר הוא מגיע מקובץ.

חובה **לצרף להגשה מספר הרצות בדיקה**, המדגימות את פעולת התכנית על מגוון נתוני קלט (לרבות שגיאות). יש להגיש **תדפיסי מסך (או קבצי פלט) של כל ההרצות**. יש להגיש גם **קבצי קלט**.

לתשומת לבכם: לא תינתן דחיה בהגשת הממ"ן, פרט למקרים מיוחדים כגון מילואים או אשפוז. במקרים אלו יש לבקש ולקבל אישור מראש ממנחה הקבוצה.

בהצלחה!

מטלת מנחה (ממ"ן) 22

הקורס: 20465 - מעבדה בתכנות מערכות

חומר הלימוד למטלה: פרקים 4,5,6

משקל המטלה: 8 נקודות (רשות)

מספר השאלות: 1

מועד אחרון להגשה: 07.01.2024

סמסטר: 2024א'

אופן הגשת המטלות:

שליחת מטלות באמצעות מערכת המטלות המקוונת באתר הבית של הקורס
הסבר מפורט ב"נוהל הגשת מטלות מנחה"

יש לקמפל עם דגלים מקסימליים, לקבלת כל האזהרות: `-Wall -ansi -pedantic`. יש להגיש את קבצי המקור `.c` (`.h` רק אם קיימים), קבצי ההרצה (את קבצי `.o` אין צורך לצרף), קבצי הסביבה המתאימים (כולל קבצי `makefile`), וכן קבצי קלט ותדפיסי מסך או קבצי פלט (לפי ההנחיות במטלה/במפגש/באתר).

קבצי התוכנית יהיו בתיקה. נדרש ששם התיקה ושם הקובץ לריצה יהיו כשם הקובץ המכיל את הפונקציה `main`, ללא הסיומת `.c`.

יש להגיש תכנית מלאה (בין השאר מכילה `main`), הניתנת להידור והרצה, ומאפשרת בדיקה של כל התוצאות המגוונות של הריצה ללא צורך בשינויים כלשהם בקוד המקור של התוכנית. את המטלה יש להגיש בקובץ `zip`.

חשוב מאוד:

- אופן הגשת המטלה והקבצים הנדרשים להגשה מופיעים כאן וכן בעמודים ה-ז בסעיף תיאור המטלות. במקרה של הנחיה שונה בפורום, יש לוודא את הנושא עם מנחה הקבוצה.
- לאחר ההגשה, יש להוריד את המטלה משרת האו"פ למחשב האישי, ולבדוק שהקבצים אכן הועלו למערכת באופן תקין.

שאלה 1 (בקבצים `my.mat.c`, `my.mat.h`, ותכנית ראשית בקובץ `main.mat.c`)
עליכם לכתוב תכנית שפועלת כ"מחשב כיס" אינטראקטיבי לביצוע פעולות חשבוניות על מטריצות.

תזכורת:

להלן כמה פעולות חשבוניות בסיסיות על מטריצות.

חיבור מטריצות.
דוגמה :

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 4 & 5 & 4 \\ 3 & 4 & 5 & 4 \\ 3 & 4 & 5 & 4 \\ 3 & 4 & 5 & 4 \end{pmatrix}$$

חיסור מטריצות.
דוגמה :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

כפל מטריצות.
דוגמה :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 & 3 & 3 & 4 \\ 10 & 6 & 6 & 8 \\ 5 & 3 & 3 & 4 \\ 10 & 6 & 6 & 8 \end{pmatrix}$$

כפל מטריצה בסקלר.
דוגמה :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 3 \end{pmatrix} * 0.5 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0 & 1 & 1.5 \end{pmatrix}$$

שחלוף (transposition) של מטריצה.
דוגמה :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

משימות התכנית :

עליכם לכתוב תכנית הקוראת פקודות מהקלט הסטנדרטי, מפענחת ומבצעת אותן. הפקודות עוסקות בפעולות חשבוניות על מטריצות (על פי התזכורת לעיל).

עליכם להגדיר, תוך שימוש ב- typedef, את הטיפוס mat אשר מחזיק מטריצה בגודל 4 על 4. איברי המטריצה הם מספרים ממשיים. מבנה הנתונים שהגדרתם צריך להיות חסכוני מבחינת ניצול הזיכרון, ויעיל מבחינת הגישה אליו.

בנוסף, עליכם להגדיר בתכנית הראשית (בפונקציה main) שישה משתנים מטיפוס mat, בשמות : MAT_A, MAT_B, MAT_C, MAT_D, MAT_E, MAT_F

בתחילת ריצת התכנית, יש לאתחל את כל המטריצות עם אפסים בכל האיברים.

כעת, עליכם לבצע פעולות חשבוניות על מטריצות. כל פעולה תופעל באמצעות פקודה שמועברת מהמשתמש בקלט לתכנית. בפקודות שמפורטות להלן, כל אופרנד שהוא שם של מטריצה יהיה אחד מששת המשתנים שהוגדרו לעיל. כיוון הקריאה של נוסח הפקודה הוא משמאל לימין.

מבנה הפקודות המשמשות כקלט לתכנית :

1. הצבת ערכים במטריצה :

רשימת ערכים ממשיים מופרדים בפסיקים, שם-מטריצה read_mat

הפקודה מציבה את הערכים שברשימה לתוך המטריצה ששמה ניתן בפקודה, לפי סדר השורות. אם ברשימה יש פחות מ-16 ערכים, האיברים שלא נתקבל עבורם ערך יכילו אפסים. אם יש יותר מ-16 ערכים, התכנית תתעלם מהערכים העודפים. חובה שיהיה ברשימה לפחות ערך אחד.

הערכים בקלט הם מספרים ממשיים בבסיס עשרוני.

לדוגמה, הפקודה: `read_mat MAT_A, 5, 6.253, -7, -200.5, 23`
תציב בתא [0,0] במטריצה MAT_A את הערך 5, בתא [0,1] את הערך 6.253, בתא [0,2] את הערך -7, בתא [0,3] את הערך -200.5, ובתא [1,0] את הערך 23. ביתר תאי המטריצה MAT_A יוצב הערך 0.

2. הדפסת מטריצה :

שם מטריצה print_mat

הפקודה מדפיסה את תוכן המטריצה ששמה ניתן בפקודה, בתצוגה דו-מימדית נאה. הערכים יודפסו בבסיס עשרוני.

יש להקפיד בהדפסה על עימוד נאה ומיושר של אברי המריצה. זכרו שמדובר במספרים ממשיים. מותר להסתפק בהדפסה עם דיוק של 2 ספרות מימין לנקודה, וכן ברוחב שדה של 7 תווים לכל המספר (כולל נקודה-עשרונית וסימן מינוס לפי הצורך). במידה והחלק השלם של מספר דורש רוחב שדה גדול יותר, מותרת סטיה מהעימוד המיושר בשורה זו. מומלץ להשתמש ביכולות של הפונקציה `printf` לשלוט בפורמט של השדה המודפס.

לדוגמה: הפקודה `print_mat MAT_A` (לאחר ביצוע דוגמת הפקודה `read_mat` מהסעיף הקודם) תבצע הדפסה בסגנון הבא (או דומה לו):

5.00	6.25	-7.00	-200.50
23.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00

3. חיבור מטריצות :

שם-מטריצה-ג', שם-מטריצה-ב', שם-מטריצה-א' add_mat

הפקודה מחברת את מטריצה א' ומטריצה ב' ומאכסנת את התוצאה במטריצה ג'.

4. חיסור מטריצות :

שם-מטריצה-ג', שם-מטריצה-ב', שם-מטריצה-א' sub_mat

הפקודה מחסרת את מטריצה ב' ממטריצה א' ומאכסנת את התוצאה במטריצה ג'.

5. כפל ממטריצות :

שם-מטריצה-ג', שם-מטריצה-ב', שם-מטריצה-א' mul_mat

הפקודה מכפילה את מטריצה א' במטריצה ב' ומאכסנת את התוצאה במטריצה ג'.

6. כפל מטריצה בסקלר :

שם-מטריצה ב', ערך-ממשי, שם-מטריצה-א' mul_scalar

הפקודה מכפילה את מטריצה א' בערך ממשי (הפרמטר השני) ומאכסנת את התוצאה במטריצה ב'. הערך הממשי נתון בבסיס עשרוני.

7. שחלוף מטריצה :

שם מטריצה ב', שם-מטריצה-א' trans_mat

הפקודה מבצעת שחלוף (transpose) של מטריצה א' ומאכסנת את התוצאה במטריצה ב'.

8. **סיום התכנית:**

stop

הפקודה גורמת לסיום התכנית.

לתשומת לב: אותו שם מטריצה יכול לשמש ביותר מארגומנט אחד באותה הפקודה. מימוש הפעולות החשבוניות על מטריצות צריך להתחשב בכך (לא לדרוס נתונים תוך כדי החישוב). לדוגמה, הפקודות שלהלן תקינות ומוגדרות היטב:

```
mul_mat MAT_A, MAT_B, MAT_A
```

```
trans_mat MAT_C, MAT_C
```

המבנה התחבירי של הקלט:

- כל פקודה תופיע בשלמותה בשורת קלט יחידה, כולל כל הארגומנטים. מותרות גם שורות ריקות (שורות המכילות רק תווים לבנים).
- שם הפקודה מופרד מהארגומנט הראשון באמצעות רווחים ו/או טאבים (אחד או יותר).
- בין כל שני ארגומנטים יש פסיק אחד. לפני ואחרי הפסיק יכולים להיות רווחים ו/או טאבים בכמות בלתי מוגבלת. אסור שיהיה פסיק אחרי הפרמטר האחרון.
- יכולים להיות רווחים ו/או טאבים בכמות בלתי מוגבלת בתחילת השורה לפני שם הפקודה, וגם בסוף השורה (אחרי הארגומנט האחרון).
- אסור שיהיו תווים מיותרים (תווי זבל) בסוף השורה (למעט תווים לבנים).
- שמות הפקודות יופיעו באותיות קטנות בלבד, ושמות המשתנים באותיות גדולות בלבד.

אופן פעולת התכנית:

יש לממש ממשק משתמש ידידותי, כך שהמשתמש יוכל להבין בכל שלב של התכנית מה קורה. בפרט, על התכנית להדפיס הודעה או סימן (prompt) בכל פעם שהיא מוכנה לקלוט את הפקודה הבאה. התכנית תמשיך לקלוט ולבצע פקודה אחרי פקודה, עד שתקבל הפקודה stop.

התכנית אינה מניחה שהקלט תקין. על התכנית לנתח כל פקודה ולוודא שאין בה שגיאות (ראו דוגמאות בהמשך). במידה ונתגלתה שגיאה, התכנית תדפיס הודעת שגיאה פרטנית, ותעבור לפקודה הבאה, בלי לבצע את הפקודה השגויה. אין לעצור את התכנית עם גילוי השגיאה הראשונה. אין צורך לדווח על יותר משגיאה אחת בכל שורת קלט.

יש לטפל גם במצב של EOF (גמר הקלט). סיום התכנית שלא באמצעות פקודת stop מפורשת בקלט אינה נחשבת תקינה (גם לא כאשר הקלט מגיע מקובץ באמצעות redirection), ויש להדפיס על כך הודעת שגיאה ורק אז לעצור. לתשומת לב: השורה האחרונה בקובץ קלט אינה חייבת להסתיים בתו "שורה חדשה".

להלן דוגמאות של קלט שגוי:

שימו לב: ייתכנו סוגים נוספים של שגיאות בקלט. עליכם לחשוב על כל מגוון השגיאות האפשריות, ולטפל בכולן.

1. לפקודה:
`read_mat MAT_G, 3.2, 8`
 Undefined matrix name
 יש להגיב בהודעה כגון:
2. לפקודה:
`read_mat mat_a, 3.2, -5.3`
 Undefined matrix name
 יש להגיב בהודעה כגון:
3. לפקודה:
`do_it MAT_A, MAT_B, MAT_C`
 Undefined command name
 יש להגיב בהודעה כגון:
4. לפקודה:
`Add_Mat MAT_A, MAT_B, MAT_C`
 Undefined command name
 יש להגיב בהודעה כגון:
5. לפקודה:
`read_mat MAT_A, abc, 567`
 Argument is not a real number
 יש להגיב בהודעה כגון:
6. לפקודה:
`read_mat MAT_A, 3, -4.2, 6,`
 Extraneous text after end of command
 יש להגיב בהודעה כגון:
7. לפקודה:
`read_mat MAT_A`
 Missing argument
 יש להגיב בהודעה כגון:
8. לפקודה:
`mul_mat MAT_B, MAT_C`
 Missing argument
 יש להגיב בהודעה כגון:
9. לפקודה:
`trans_mat MAT_B, MAT_C, MAT_D`
 Extraneous text after end of command
 יש להגיב בהודעה כגון:
10. לפקודה:
`print_mat, MAT_A`
 Illegal comma
 יש להגיב בהודעה כגון:
11. לפקודה:
`trans_mat MAT_A MAT_B`
 Missing comma
 יש להגיב בהודעה כגון:
12. לפקודה:
`sub_mat MAT_A, , MAT_B, MAT_C`
 Multiple consecutive commas
 יש להגיב בהודעה כגון:
13. לפקודה:
`mul_scalar MAT_A, MAT_B, MAT_C`

יש להגיב בהודעה כגון :

Argument is not a scalar

14. לפקודה :

stop now

יש להגיב בהודעה כגון :

Extraneous text after end of command

להלן דוגמה של סדרת פקודות שכולן תקינות :

הערה : סדרה כגון זו יכולה לשמש כקלט בהרצת בדיקה ללא טיפול בשגיאות בקלט.

```
print_mat MAT_A
print_mat MAT_B
print_mat MAT_C
read_mat MAT_A, 1, 2, 3, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 6, 6, 6, 6
read_mat MAT_B, 1, 2.3456, -7.89
read_mat MAT_C, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
print_mat MAT_A
print_mat MAT_B
print_mat MAT_C
add_mat MAT_A, MAT_B, MAT_D
print_mat MAT_D
sub_mat MAT_B, MAT_A, MAT_E
print_mat MAT_E
mul_mat MAT_B, MAT_C, MAT_F
print_mat MAT_F
mul_scalar MAT_A, 12.5, MAT_A
print_mat MAT_A
trans_mat MAT_C, MAT_C
print_mat MAT_C
read_mat MAT_B, 0
print_mat MAT_B
mul_mat MAT_A, MAT_A, MAT_A
print_mat MAT_A
stop
```

ארגון קוד התכנית :

יש לחלק את התכנית למספר קבצי מקור : mymat.c, mymat.h, mainmat.c

- בקובץ mymat.c יש לרכז את הפונקציות החישוביות על מטריצות. לא יבוצע כל קלט/פלט בקובץ זה.
- בקובץ mainmat.c תהיה הפונקציה main, וכן כל פעילויות האינטראקציה עם המשתמש, וניתוח הפקודות (לרבות הודעות שגיאה). כמו כן, בפונקציה main יוגדרו ששת המשתנים מטיפוס mat.
- בקובץ mymat.h תהיה הגדרת טיפוס הנתונים mat, וכן ההצהרות (אב-טיפוס) של הפונקציות הממומשות בקובץ mymat.c. יש לכלול (#include) את הקובץ mymat.h בקבצי המקור האחרים.
- ניתן לבנות קבצי מקור נוספים (למשל : קובץ המכיל פונקציות עזר לניתוח הקלט, וכד').

הקלט לתכנית הוא מ-stdin, ויכול להגיע מהמקלדת או מקובץ (באמצעות redirection בעת הפעלת התכנית). לנוחיותכם, הכינו מספר קבצי קלט והשתמשו בהם שוב ושוב כדיבוג התכנית. בכל קובץ קלט תהיה סדרה של פקודות מגוונות על מטריצות.

על התכנית **להדפיס הודעת בקשה ידידותית לקלט** עבור כל שורת קלט (כל פקודה). כמו כן, יש **להדפיס באופן יזום מתוך התכנית את השורה כפי שנקלטה**, וזאת לפני הניתוח של הפקודה.

באופן זה, שורת הקלט תוצג גם כאשר הקלט מגיע מקובץ (כידוע, נתונים הנקראים מקובץ אינם מוצגים במסך בזמן הקלט).

חובה לצרף להגשה הרצות דוגמה (אחת או יותר), המדגימות את השימוש בכל סוגי הפעולות ובכל ששת המטריצות, וכן את הטיפול בכל מגוון השגיאות בקלט.
רמז: מומלץ להכניס פקודת הדפסה של מטריצת התוצאה אחרי כל פעולה, כדי להראות שהתוצאה אכן נכונה (ראו לעיל הדוגמה של סדרת פקודות תקינות).
יש להגיש תדפיסי מסך (או קבצי פלט) של כל ההרצות. יש להגיש גם קבצי קלט.

לתשומת לבכם: לא תינתן דחיה בהגשת הממ"ן, פרט למקרים מיוחדים כגון מילואים או אשפוז. במקרים אלו יש לבקש ולקבל אישור מראש ממנחה הקבוצה.

בהצלחה!

מטלת מנחה (ממ"ן) 23

הקורס: 20465 - מעבדה בתכנות מערכות

חומר הלימוד למטלה: פרקים 6,7,8

משקל המטלה: 12 נקודות (רשות)

מספר השאלות: 2

מועד אחרון להגשה: 21.01.2024

סמסטר: 2024א'

אופן הגשת המטלות:

שליחת מטלות באמצעות מערכת המטלות המקוונת באתר הבית של הקורס
הסבר מפורט ב"נוהל הגשת מטלות מנחה"

יש לקמפל עם דגלים מקסימליים, לקבלת כל האזהרות: -Wall -ansi -pedantic. יש להגיש את קבצי המקור c. h. רק אם קיימים, קבצי ההרצה (את קבצי o. אין צורך לצרף), קבצי הסביבה המתאימים (כולל קבצי makefile), וכן קבצי קלט ותדפיסי מסך או קבצי פלט (לפי ההנחיות במטלה/במפגש/באתר). קבצי התכנית יהיו בתיקה. נדרש ששם התיקה ושם הקובץ לריצה יהיו כשם הקובץ המכיל את הפונקציה main, ללא הסיומת c. יש להגיש תכנית מלאה (בין השאר מכילה main), הניתנת להידור והרצה, ומאפשרת בדיקה של כל התוצאות המגוונות של הריצה ללא צורך בשינויים כלשהם בקוד המקור של התוכנית. את המטלה יש להגיש בקובץ zip.

חשוב מאוד:

- אופן הגשת המטלה והקבצים הנדרשים להגשה מופיעים כאן וכן בעמודים ה-ז בסעיף תיאור המטלות. במקרה של הנחייה שונה בפורום, יש לוודא את הנושא עם מנחה הקבוצה.
- לאחר ההגשה, יש להוריד את המטלה משרת האו"פ למחשב האישי, ולבדוק שהקבצים אכן הועלו למערכת באופן תקין.

שאלה 1 (10 נקודות)

בכל סעיף, עליכם לכתוב האם "תמיד נכון" בשפת ANSI-C, "לפעמים נכון ולפעמים אינו נכון", או "תמיד אינו נכון". עליכם לנמק את תשובתכם. תשובה לא מנומקת, גם אם היא נכונה, לא תזכה בנקודות (כל סעיף 5 נקודות).

- קובץ הקלט הסטנדרטי stdin הוא תמיד המקלדת, קובץ הפלט הסטנדרטי stdout הוא תמיד המסך, וקובץ השגיאות stderr הוא תמיד המסך.
- ניתן לשנות את תחום האינדקסים של מערך. ברירת המחדל היא אינדקסים החל מ-0, אך ניתן לשנות זאת לאינדקסים החל מ-1.

לתשומת לב:

את הפתרון לשאלה זו יש להגיש במסמך (קובץ) מוקלד, בפורמט word או pdf.

שאלה 2 (90 נקודות) (תכנית ראשית בקובץ index.c)

עליכם לכתוב תוכנית המקבלת כפרמטר שם של קובץ. על התוכנית ליצור "אינדקס" עבור קובץ זה. האינדקס יכיל את כל המילים המופיעות בקובץ, ואת רשימת מספרי השורות שמילה זו מופיעה בהן.

אין להניח שכל שורה מכילה מילה אחת בלבד (אבל תתכן שורה בעלת מילה אחת). על התוכנית להודיע הודעת שגיאה לקובץ השגיאות הסטנדרטי ולהפסיק את עבודתה, אם המשתמש שכח לתת ארגומנט של שורת פקודה, אם נתן יותר מדי ארגומנטים, או אם נתן ארגומנט לא מתאים (לדוגמה: קובץ לא קיים).

בנוסף יש להדפיס **הודעות שגיאה** במקרה של קובץ לא נפתח או הקצאת זיכרון נכשלה.

את תוכן האינדקס יש להדפיס לקובץ הפלט הסטנדרטי, כאשר המילים מופיעות בסדר לקסיקוגרפי.

לדוגמה, אם תוכן קובץ הקלט הוא:

```
jack and jill  
went up the hill  
jack and jill  
went down the hill  
then the hill disappeared
```

אזי הפלט של התוכנית אמור להיות:

```
and    appears in lines 1,3  
disappeared appears in line 5  
down   appears in line 4  
hill    appears in lines 2,4,5  
jack    appears in lines 1,3  
jill    appears in lines 1,3  
the     appears in lines 2,4,5  
then    appears in line 5  
up       appears in line 2  
went    appears in lines 2,4
```

חובה לצרף להגשה **מספר הרצות בדיקה** המדגימות את פעולת התכנית על קלטים בגדלים ובערכים מגוונים. יש להגיש **תדפיסי מסך של כל הרצות הדוגמה**, וכן את הקבצים ששימשו להרצות התכנית (אשר שמם הוכנס כפרמטר לתכנית).

לתשומת לבכם: לא תינתן דחיה בהגשת הממ"ן, פרט למקרים מיוחדים כגון מילואים או אשפוז. במקרים אלו יש לבקש ולקבל אישור מראש ממנחה הקבוצה.

בהצלחה!

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 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.

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 נוח 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 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>	האופרנד הוא שם של רגיסטר.	<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: rts, hlt.

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
        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 יכולו 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 יכולו 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 יכולו 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 יכולו 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 "יש 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	00001001000100 00000111100010
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 00000111110010 00000000001010 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 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 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 לשלוח 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 האסמבלר 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 (תווית), 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 תוכנית 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	00000011111100 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:

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

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 00000001110000 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 11111111101111 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.ent` 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 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 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.

3	2	1	0	בסיס 4 רגיל
!	%	#	*	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 שייתכן 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 00000000110000 00001000010010 00000000001000
0104 0105	LOOP: jmp W	00001001000100 00000000000001
0106 0107	prn #-5	00001100000000 11111111101100
0108 0109 0110 0111 0112	mov STR[5], STR[2]	00000000101000 00000111110110 00000000010100 00000111110110 00000000001000
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 0133 0134	LIST: .data 6, -9, len	00000000000110 1111111110111 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

```

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 הסיימות. 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, ממשיק 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 כל אחד מהמנחים בשעות הקבלה שלהם.

להזכירכם, באפשרותו של כל סטודנט לפנות לכל מנחה, לאו דווקא למנחה הקבוצה שלו, לקבלת עזרה. שוב מומלץ לכל אלה שטרם בדקו את התכנים באתר הקורס לעשות זאת. נשאלות באתר זה הרבה שאלות בנושא חומר הלימוד והממ"נים, והתשובות יכולות להועיל לכולם.

לתשומת לבכם : לא תינתן דחיה בהגשת הממ"ן, פרט למקרים מיוחדים כגון מילואים או אשפוז. במקרים אלו יש לבקש ולקבל אישור מראש ממנחה הקבוצה.

ב ה צ ל ח ה !