

## מבחן סוף סמסטר – מועד א'

### טור 1

**מראה אחראי:** ד"ר שחר יצחקי

**מתרגלים:** הילה לוי, תומר כהן, גיא ארבל, אנדריי בבין

הוראות:

1. בטופס המבחן 13 עמודים, מתוכם 5 דפי נוסחאות. בדקו שכל העמודים ברשותכם.
2. משך המבחן שלוש שעות (180 דקות).
3. כל חומר עזר חיצוני אסור לשימוש.
4. בשאלות הפתוחות, ניתן לציין לגבי סעיף או שאלה "לא יודעת". תשובה זו תזכה ב-20% מהניקוד. תשובות שגויות לא יזכו בניקוד.
5. קראו את כל המבחן לפני שאתם מתחילים לענות על השאלות.
6. אין צורך להגיש את טופס מבחן זה בתום הבחינה.
7. את התשובות לשאלות הסגורות יש לסמן בטופס התשובות הנפרד בלבד.
8. את התשובות לשאלות הפתוחות יש לכתוב במקומות המסומנים בטופס המיועד לכך.
9. במידה ואתם משתמשים בדפי העזר הנוספים יש לציין במפורש את מספר השאלה ומספר הסעיף. ודאו כי אתם מגישים טפסי התשובות המיועדים בלבד (את מחברת הטיוטה ניתן לשמור אצלכם).

**שימו לב, שינויים שנאמרו בעל פה בזמן המבחן מסומנים בצהוב.**

**בהצלחה!**

### חלק א' - שאלות סגורות (45 נק')

שלבי קומפילציה (27 נק')

נתונה התוכנית הבאה בשפת FanC:

```
1. int m = 100;
2. int n = 200;
3. int x = n * m; 20000
4. int y = (n + m) / 2; 150
5. int k = 0;
6. while (k * k < x) { 20000
7.     k = k + 1;
8. }
9. if (k < y){ 150 - 152
10.     print("true");
11. }
12. else {
13.     print("false");
14. }
```

בסעיפים הבאים (שאלות 1 עד 5) מוצגים שינויים (בלתי תלויים) לקוד של התוכנית. עבור כל שינוי ציינו את השלב המוקדם ביותר שבו נגלה את השגיאה:

#### שאלה מספר 1:

```
int y = {n + m} / 2;
```

(3 נק') מחליפים את שורה 4 ב-

- א. שגיאה בניתוח לקסיקלי
- ב. שגיאה בניתוח סמנטי
- ג. שגיאה בייצור קוד
- ד. אין שגיאה
- ה. שגיאה בניתוח תחבירי
- ו. שגיאה בזמן ריצה

#### שאלה מספר 2:

```
print("true");
```

(3 נק') מחליפים את שורה 10 ב-

- א. שגיאה בזמן ריצה
- ב. שגיאה בניתוח תחבירי
- ג. אין שגיאה
- ד. שגיאה בייצור קוד
- ה. שגיאה בניתוח לקסיקלי
- ו. שגיאה בניתוח סמנטי

**שאלה מספר 3:**

(3 נק') מחליפים את שורה 1 ב-

```
intm = 100;
```

- א. ☒ שגיאה בניתוח הסמנטי
- ב. ☐ שגיאה בייצור קוד
- ג. ☐ שגיאה בניתוח תחבירי
- ד. ☐ אין שגיאה
- ה. ☐ שגיאה בניתוח לקסיקלי
- ו. ☐ שגיאה בזמן ריצה

**שאלה מספר 4:**

(3 נק') מחליפים את שורה 9 ב-

```
if (k - y) {
```

- א. ☒ שגיאה בניתוח לקסיקלי
- ב. ☒ שגיאה בייצור קוד
- ג. ☒ שגיאה בניתוח תחבירי
- ד. ☐ אין שגיאה
- ה. ☒ שגיאה בניתוח סמנטי
- ו. ☒ שגיאה בזמן ריצה

**שאלה מספר 5:**

(3 נק') מחליפים את שורה 5 ב-

```
int k = "0";
```

- א. ☐ שגיאה בזמן ריצה
- ב. ☐ שגיאה בניתוח תחבירי
- ג. ☐ שגיאה בייצור קוד
- ד. ☒ שגיאה בניתוח סמנטי
- ה. ☐ שגיאה בניתוח לקסיקלי
- ו. ☐ אין שגיאה

### שינויים ב-FanC- שאלות 6-7:

נרצה להוסיף לשפת FanC תמיכה בפונקציות אשר מקבלות ארגומנט **בודד** ומחזירות ערך (בודד). הגדרת הפונקציות דומה לשפת C, אך ההגדרות משולבות בין הצהרות ומשפטים אחרים בתוכנית, למשל:

```
1. printi(10);
2. int foo(int x) {
3.     return x + 2;
4. }
5. printi(foo(3));
6. int bar(int y) {
7.     return foo(y);
8. }
9. printi(bar(foo(4)));
```

**הערה:**

טיפוס הארגומנט וטיפוס ערך החזרה הם int, byte או bool.

### שאלה מספר 6:

(6 נק') נתבונן בקוד הבא:

```
1. int a = 2 / 0;
2. int f(int x) {
3.     int y = x * 2;
4.     return y * y;
5. }
6. int y = f(2);
```

האם ייוצר קוד של פונקציה f בשפת היעד כאשר לא משתמשים באופטימיזציות?

א. לא, בזמן ריצה תתבצע חלוקה ב-0 בשורה 1 ולכן התוכנית תקרס לפני שתגיע להגדרה של f.

ב. לא, הקוד לא יתקמפל בגלל הגדרה של משתנה y בשורה 6 אשר כבר הוגדר בשורה 3. ~~X~~

ג. לא, הקוד הנתון לא יתקמפל כי חסרה פונקציית main. ~~X~~

ד. כן. X

### שאלה מספר 7:

(6 נק') בשביל תמיכה בפיצ'ר החדש, באילו שלבי קומפילציה מבין הרשומים כאן, לא נבצע שינויים?

א. ייצור קוד

ב. ניתוח לקסיקלי X

ג. נצטרך לערוך שינויים בכל אחד משלבי הקומפילציה שרשומים כאן.

ד. ניתוח סמנטי

אופטימיזציות (18 נק')

נתונה התוכנית הבאה בשפת הרביעיות שבה נמחקה כתובת הקפיצה משורה 5.

L 1. a = 0  
L 2. b = 1000  
3. c = 0  
L 4. if c >= b goto 10  
L 5. if d == 0 goto \_\_\_\_\_  
L 6. if e == 0 goto 8  
L 7. a = c + a  
L 8. c = c + 1  
9. goto 4  
L 10. print a

שאלה מספר 8:

(6 נק') מבין כל הערכים האפשריים עבור כתובת בשורה 5, מהו מספר הבלוקים הבסיסיים הקטן ביותר שניתן לקבל?

- א. 6
- ב. אף תשובה אינה נכונה
- ג. 7
- ד. 8

שאלה מספר 9:

(6 נק') עבור הערך 2 בשורה 5 מה מספר הבלוקים הבסיסיים?

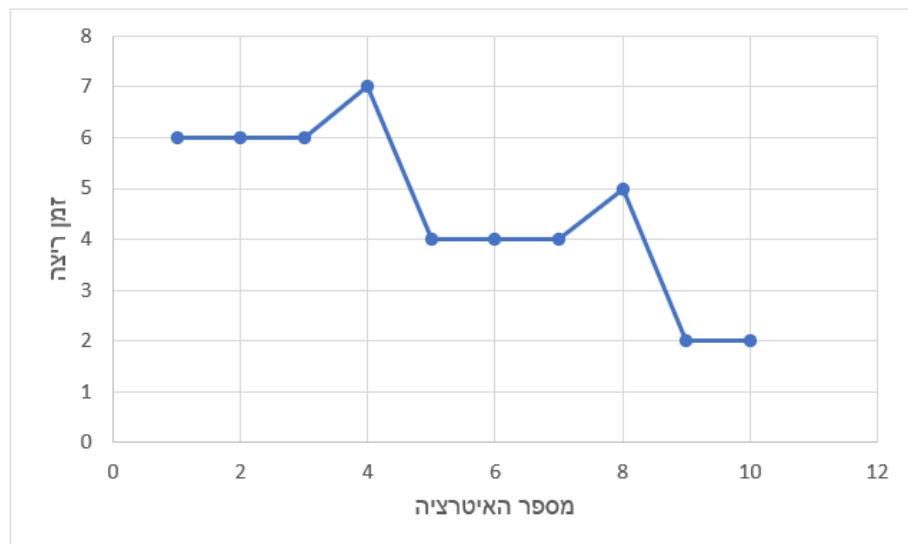
- א. 6
- ב. 8
- ג. אף תשובה אינה נכונה
- ד. 7

### שאלה מספר 10:

6 נק') מהנדס בכיר רצה לבדוק את זמני הריצה של הקוד GreatC (שפה דמוית C) שלו. נתון הקוד הבא, שימו לב כי הערכים בשורה של הגדרת המערך x נמחקו.

```
int main() {
    int x[10] = {_,_,_,_,_,_,_,_,_,_};
    int i = 0;
    while(i < 10) {
        switch(a[i] x[i]) {
            case 1:
                f();
                break;
            case 2:
                g();
                break;
            default:
                h();
        }
        i++;
    }
    return 0;
}
```

הקוד קומפל ל-LLVM IR באמצעות הקומפיילר של GreatC וכמו כן הורץ באמצעות אינטרפרטר של LLVM IR עם כל האופטימיזציות שנלמדו בקורס, כולל JIT. ידוע כי f, g, h אינן קוראות אחת לשנייה ואינן קוראות לפונקציות משותפות. בנוסף, ידוע כי זמן הריצה של f, g, h זהה בכל אחת מרמות האופטימיזציה שלהן. נתון גרף הביצועים הבא כאשר ציר ה x (הציר האופקי) מייצג את מספר האיטרציה של לולאת ה while, וציר ה y (הציר האופקי האנכי) הוא זמן הריצה של אותה איטרציה.



מבין המערכים הבאים מה המערך שהכי סביר שנמחק מן השורה הראשונה (מספור המערך משמאל לימין)?

- א. 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
- ב. 1,1,1,2,2,2,2,3,3,3
- ג. 1,1,1,2,1,1,1,2,1,1
- ד. 1,1,1,2,1,1,1,3,1,1

	s	g	d	\$	w	c	7
0	s <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>			1	2	
1				acc			
2				r <sub>0</sub>			
3	s <sub>3</sub>	s <sub>4</sub>				5	
4			s <sub>5</sub>	r <sub>4</sub>			7
5							
6							
7							
8							

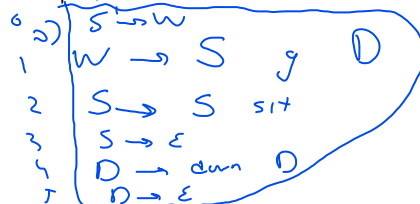
תורת הקומפילציה 236360, סמסטר חורף תשפ"ד הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

## חלק ב' - שאלות פתוחות (55 נק')

### שאלה 1: דקדוקים (25 נק')

הדקדוק הבא מייצג את שפת הפקודות שניתנות לציארי כאשר המשתנה ההתחלתי הוא WUFF. שימו לב, משתנים מיוצגים באותיות גדולות וטרמינלים עם קו תחתון.

WUFF → CMD  
CMD → CMD down  
CMD → sit CMD  
CMD → good!



א. (10 נק') צ'ארי החכמה מנסה להבין את השפה, אך לא מצליחה כי הדקדוק לא שייך למנטח LR(1). עזרו לציארי להבין למה הדקדוק לא שייך ל-LR(1).

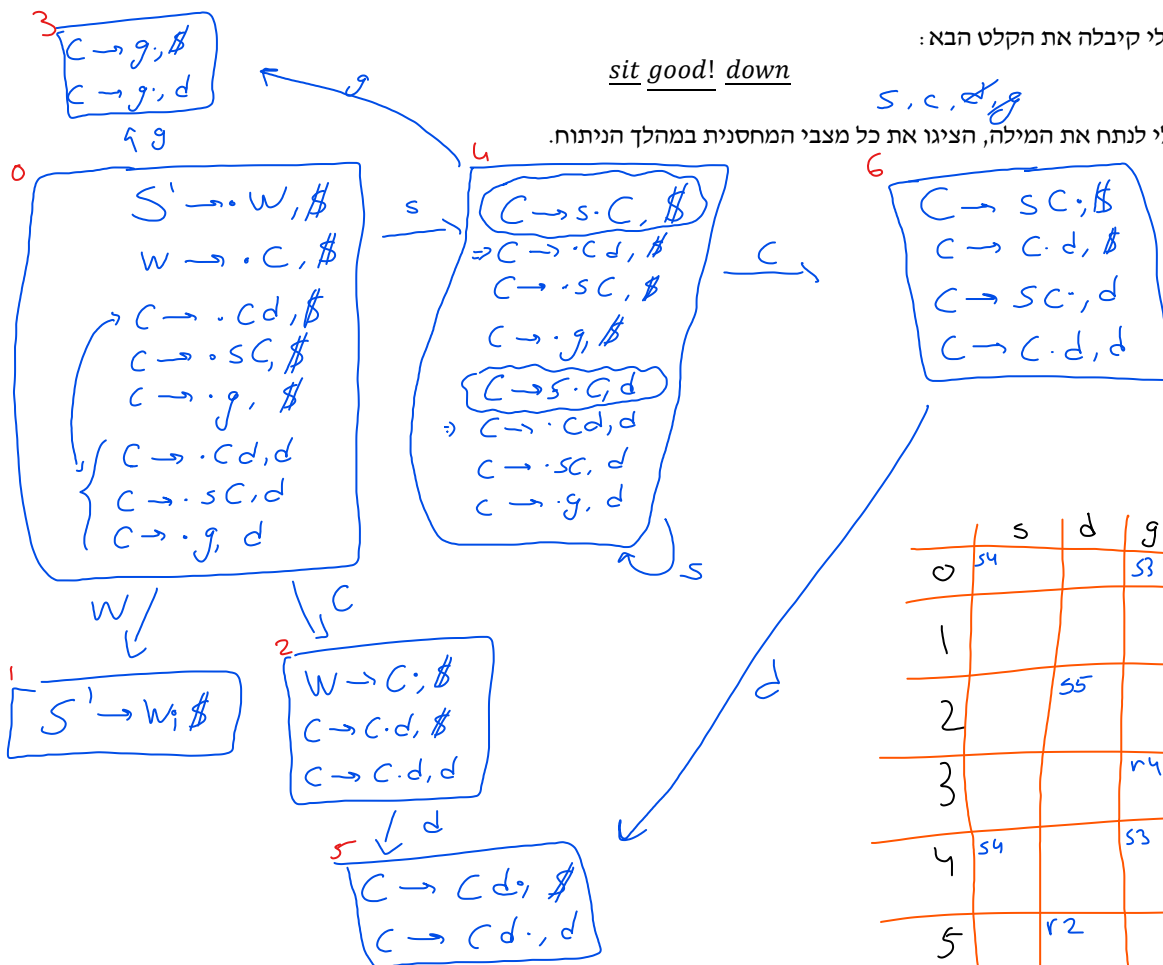
ב. (10 נק') עזרו לציארי לשנות את הדקדוק מבלי לשנות את השפה כך שיתאים לאחד מבין המנתחים הבאים: LR(0), SLR, LR(1). יש להוכיח כי המנתח אכן מקבל את הדקדוק שיצרתם על ידי בניית אוטומט וטבלת מצבים. ענו על הסעיף כך שהמנתח יצרוך כמות נמוכה ככל הניתן של זיכרון, נגדיר כמות זיכרון שהמנתח צורך בתור מספר התאים בטבלת הניתוח.

ג. (5 נק') צ'ארי קיבלה את הקלט הבא:

sit good! down

s, c, d, g

עזרו לציארי לנתח את המילה, הציגו את כל מצבי המחסנית במהלך הניתוח.



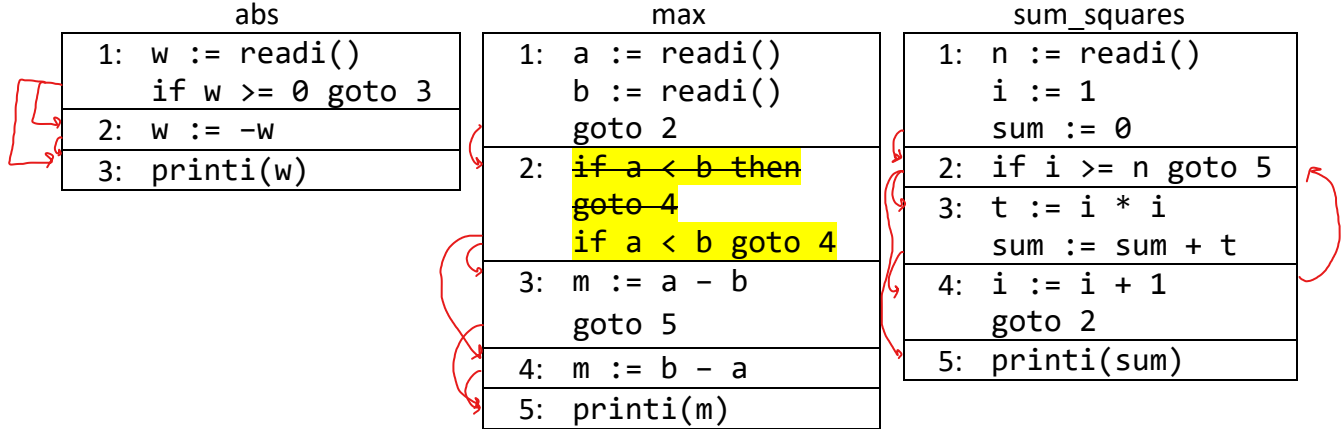
	s	d	g	\$	w	c
0	s <sub>4</sub>		s <sub>3</sub>		1	2
1				acc		
2		s <sub>5</sub>	r <sub>1</sub>			
3			r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>		
4	s <sub>4</sub>		s <sub>3</sub>			6
5		r <sub>2</sub>		r <sub>2</sub>		
6		r <sub>3</sub> /s <sub>5</sub>		r <sub>3</sub>		

shift/reduce בחר (6, d) וזן

נשים לב כי הצ'יז קומפילטור  
הדקדוק, אינו שייך ל-LR(1)

## שאלה 2: אנליזה סטטית (30 נק')

אלפור משתמש במודול ייצור קוד ביניים אשר הפלט שלו הוא קוד בשפת הרביעיות (3AC). אלפור מעוניין לבצע אופטימיזציות ולאחר מכן לתרגם את קוד הביניים לאסמבלי (של מעבד אלפא, כמוכן). אך אבוי – הנוהל המקובל קובע כי קוד הביניים צריך להיות בצורת SSA, ואילו הפלט של המודול שבידי אלפור איננו בצורה זו. למשל, הוא קיבל ממנו את שלוש התוכניות הבאות, שבהן למשתנים  $i, m, w$  יש יותר מהשמה אחת.



אלפור קרא בספר כי ניתן להמיר כל קוד ביניים הכולל השמות לקוד SSA על-ידי שימוש באנליזה סטטית מסוג Reaching Definitions. האנליזה היא מסוג gen/kill המוגדרת באופן הבא:

Statement at $\ell$	kill( $\ell$ )	gen( $\ell$ )
$v := \text{expr}$	$\{ (v, i) \mid i \in \text{Lab} \}$	$\{ (v, \ell) \}$
anything else	$\emptyset$	$\emptyset$

- 5 נק' שרטטו את גרף בקרת הזרימה (CFG) של כל אחת משלוש התוכניות שלמעלה **(לפי החלוקה לבלוקים שנתונה בשאלה)**. ✓
- 5 נק' הריצו את האנליזה של Reaching Definitions על הגרפים, ומלאו את התוצאות הסופיות בטבלה (in ו-out של כל בלוק בסיסי). ✓
- 10 נק' בצעו את ההליך המתואר בפרוצדורה מהספר של אלפור על הקוד של שתי התוכניות השמאליות מהדוגמה (abs, max). ✓  
 הפרוצדורה בספר של אלפור קובעת:  
 (1) מותר למהדר להניח כי בכל בלוק בסיסי לא תהייה שתי השמות שונות לאותו משתנה.  
 (2) החליפו כל הגדרה (definition) של משתנה בהגדרה של משתנה חדש, על פי הקונבנציה הבאה: השמה למשתנה  $v$  בבלוק  $\ell$  תהפוך להשמה למשתנה בשם  $v_\ell$   
 (3) החליפו כל שימוש (use) במשתנה  $v$  בשימוש במשתנה  $v_\ell$  על-פי התוצאה של Reaching Definitions; מוצאים את ההגדרה של  $v$  שמגיעה לאותו שימוש,  $(v, \ell)$  (שייד ל- $\text{in}(b)$  כאשר  $b$  הוא הבלוק שבו מופיע השימוש), וכך יודעים מיהו  $v_\ell$  המתאים.  
 (4) במקרה שיש יותר מהגדרה אחת שמגיעה לשימוש כלשהו, מוסיפים הגדרה של משתנה זמני נוסף  $t_{v_\ell}$  (הרישא  $t_\ell$  היא קבועה ומציינת שמדובר בהגדרה שיוצרה על ידי הקומפיילר) בעזרת אופרטור  $\phi$  (פי) אשר בוחר את המשתנה המתאים. לדוגמה  

$$t_{x\_4} = \phi(x\_1, x\_3)$$
- 10 נק' טונטו מעוניין להשתמש בתשתית LLVM לצורך תרגום לקוד אלפא. ב LLVM, כאשר משתמשים באופרטור  $\phi$ , לא די לציין את שמות המשתנים המופיעים כארגומנטים, אלא יש לציין גם את הבלוק שממנו מגיעה ההגדרה של כל אחד מהארגומנטים. יתר על כן, כל ציון בלוק המוצמד לארגומנט חייב להיות בלוק קודם ישיר (direct predecessor) של הבלוק שבו מופיע השימוש באופרטור  $\phi$  — כלומר חייבת להיות קשת אחת בדיוק המקשרת ביניהם, ואסורים מסלולים באורך גדול מ-1. ✓  
 טונטו מציע להחליף כל ארגומנט  $v_\ell$  בזוג  $[v_\ell, \ell]$  ובכך לספק את הדרישה, למשל  

$$t_{x\_4} = \phi([x\_1, 1], [x\_3, 3])$$
 הציגו לטונטו תוכנית דוגמה, ואת התוצאה של הגישה המוצעת, שבה התוצאה איננה מקיימת את התנאי הנדרש שלעיל. הסבירו כיצד התנאי מופר.



## נוסחאות ואלגוריתמים

כל ההגדרות מתייחסות לדקדוק  $G = (V, T, P, S)$ .

### Top Down

$$\text{first}(\alpha) = \{ t \in T \mid \alpha \Rightarrow^* t\beta \wedge \beta \in (V \cup T)^* \}$$

$$\text{follow}(A) = \{ t \in T \cup \{\$ \} \mid S\$ \Rightarrow^* \alpha A t \beta \wedge \alpha \in (V \cup T)^* \wedge \beta \in (V \cup T)^*(\epsilon | \$) \}$$

$$\text{select}(A \rightarrow \alpha) = \begin{cases} \text{first}(\alpha) \cup \text{follow}(A) & \alpha \Rightarrow^* \epsilon \\ \text{first}(\alpha) & \text{otherwise} \end{cases}$$

**הגדרה:** דקדוק  $G$  הוא  $LL(1)$  אם ורק אם לכל שני כללים ב- $G$  השייכים לאותו משתנה  $A$  מתקיים:  
 $\text{select}(A \rightarrow \alpha) \cap \text{select}(A \rightarrow \beta) = \emptyset$

הגדרת טבלת המעברים  $M : V \times (T \cup \{\$ \}) \rightarrow P \cup \{\text{error}\}$  עבור דקדוק  $LL(1)$ :

$$M[A, t] = \begin{cases} A \rightarrow \alpha & t \in \text{select}(A \rightarrow \alpha) \\ \text{error} & t \notin \text{select}(A \rightarrow \alpha) \text{ for all } A \rightarrow \alpha \in P \end{cases}$$

אלגוריתם מנתח  $LL(1)$ :

```
Q.push(S)
while !Q.empty() do
    X = Q.pop()
    t = next token
    if X ∈ T then
        if X = t then MATCH
        else ERROR
    else // X ∈ V
        if M[X, t] = error then ERROR
        else PREDICT(X, t)
    end if
end while
t = next token
if t = $ then ACCEPT
else ERROR
```

## Bottom Up

פריט  $LR(0)$  הוא  $(A \rightarrow \alpha \bullet \beta)$  כאשר  $A \rightarrow \alpha \beta \in P$   
 סגור (closure) על קבוצת פריטים  $I$  מוגדר באופן אינדוקטיבי:  
 ○ בסיס:  $\text{closure}(I) = I$   
 ○ צעד: אם  $(A \rightarrow \alpha \bullet B \beta) \in \text{closure}(I)$ , אז לכל  $B \rightarrow \gamma \in P$ , גם  $(B \rightarrow \bullet \gamma) \in \text{closure}(I)$   
 פונקציית המעברים של האוטומט:  

$$\delta(I, X) = \bigcup \left\{ \text{closure}(A \rightarrow \alpha X \bullet \beta) \mid (A \rightarrow \alpha \bullet X \beta) \in I \right\}$$

פריט  $LR(1)$  הוא  $(A \rightarrow \alpha \bullet \beta, t)$  כאשר  $A \rightarrow \alpha \beta \in P$ ,  $t \in T \cup \{\$ \}$   
 סגור (closure) על קבוצת פריטים  $I$  מוגדר באופן אינדוקטיבי:  
 בסיס:  $\text{closure}(I) = I$   
 צעד: אם  $(A \rightarrow \alpha \bullet B \beta, t) \in \text{closure}(I)$ , אז לכל  $B \rightarrow \gamma \in P$  ולכל  $x \in \text{first}(\beta t)$ , גם  $(B \rightarrow \bullet \gamma, x) \in \text{closure}(I)$   
 פונקציית המעברים של האוטומט:  

$$\delta(I, X) = \bigcup \left\{ \text{closure}(A \rightarrow \alpha X \bullet \beta, t) \mid (A \rightarrow \alpha \bullet X \beta, t) \in I \right\}$$

הגדרת טבלת action למנתח SLR:

$$\text{action}[i, t] = \begin{cases} \text{SHIFT}_j & \delta(I_i, t) = I_j \\ \text{REDUCE}_k & \text{rule } k \text{ is } A \rightarrow \alpha, (A \rightarrow \alpha \bullet) \in I_i \text{ and } t \in \text{follow}(A) \\ \text{ACCEPT} & (S' \rightarrow S \bullet) \in I_i \text{ and } t = \$ \\ \text{ERROR} & \text{otherwise} \end{cases}$$

הגדרת טבלת action למנתח LR(1):

$$\text{action}[i, t] = \begin{cases} \text{SHIFT}_j & \delta(I_i, t) = I_j \\ \text{REDUCE}_k & \text{rule } k \text{ is } A \rightarrow \alpha \text{ and } (A \rightarrow \alpha \bullet, t) \in I_i \\ \text{ACCEPT} & (S' \rightarrow S \bullet, \$) \in I_i \text{ and } t = \$ \\ \text{ERROR} & \text{otherwise} \end{cases}$$

הגדרת טבלת goto למנתח SLR ו-LR(1):

$$\text{goto}[i, X] = \begin{cases} j & \delta(I_i, X) = I_j \\ \text{error} & \text{otherwise} \end{cases}$$

אלגוריתם מנתח shift/reduce:

```
Q.push(0)           // where 0 is the initial state of the prefix automaton
while true do
    k = Q.top().state
    t = next token
    do action[k , t]
end while
```

## קוד ביניים

```
x := y op z
x := op y
x := y
goto L
if x relop y goto L
print x
```

- סוגי פקודות בשפת הביניים:
1. משפטי השמה עם פעולה בינארית
  2. משפטי השמה עם פעולה אונרית
  3. משפטי העתקה
  4. קפיצה בלתי מותנה
  5. קפיצה מותנה
  6. הדפסה

## Data-Flow Analysis

ההגדרות מתייחסות ל-CFG מהצורה  $G = (V, E)$ :

הצורה הכללית של המשוואות בחישוב סריקה קדמית:

$$\begin{aligned} \text{in}(B) &= \bigsqcup_{(S,B) \in E} \text{out}(S) \\ \text{out}(B) &= f_B(\text{in}(B)) \end{aligned}$$

הצורה הכללית של המשוואות בחישוב סריקה אחורית:

$$\begin{aligned} \text{in}(B) &= \bigsqcup_{(B,D) \in E} \text{out}(D) \\ \text{out}(B) &= f_B(\text{in}(B)) \end{aligned}$$

## שפת FanC

אסימונים:

אסימון	תבנית
INT	int
BYTE	byte
B	b
BOOL	bool
AND	and
OR	or
NOT	not
TRUE	true
FALSE	false
RETURN	return
IF	if
ELSE	else
WHILE	while
BREAK	break
CONTINUE	continue
SC	;
LPAREN	(
RPAREN	)
LBRACE	{
RBRACE	}
ASSIGN	=
RELOP	==   !=   <   >   <=   >=
BINOP	+   -   *   /
ID	[a-zA-Z][a-zA-Z0-9]*
NUM	0   [1-9][0-9]*
STRING	"([^\n\r\"\\] \\[rnt\"\\])+"

דקדוק:

1.  $Program \rightarrow Statements$
2.  $Statements \rightarrow Statement$
3.  $Statements \rightarrow Statements Statement$
4.  $Statement \rightarrow LBRACE Statements RBRACE$
5.  $Statement \rightarrow Type ID SC$
6.  $Statement \rightarrow Type ID ASSIGN Exp SC$
7.  $Statement \rightarrow ID ASSIGN Exp SC$
8.  $Statement \rightarrow Call SC$
9.  $Statement \rightarrow RETURN SC$
10.  $Statement \rightarrow IF LPAREN Exp RPAREN Statement$
11.  $Statement \rightarrow IF LPAREN Exp RPAREN Statement ELSE Statement$
12.  $Statement \rightarrow WHILE LPAREN Exp RPAREN Statement$
13.  $Statement \rightarrow BREAK SC$
14.  $Statement \rightarrow CONTINUE SC$
15.  $Call \rightarrow ID LPAREN Exp RPAREN$
16.  $Type \rightarrow INT$
17.  $Type \rightarrow BYTE$
18.  $Type \rightarrow BOOL$
19.  $Exp \rightarrow LPAREN Exp RPAREN$
20.  $Exp \rightarrow Exp BINOP Exp$
21.  $Exp \rightarrow ID$
22.  $Exp \rightarrow Call$
23.  $Exp \rightarrow NUM$
24.  $Exp \rightarrow NUM B$
25.  $Exp \rightarrow STRING$
26.  $Exp \rightarrow TRUE$
27.  $Exp \rightarrow FALSE$
28.  $Exp \rightarrow NOT Exp$
29.  $Exp \rightarrow Exp AND Exp$
30.  $Exp \rightarrow Exp OR Exp$
31.  $Exp \rightarrow Exp RELOP Exp$
32.  $Exp \rightarrow LPAREN Type RPAREN Exp$