

# חשוביות וסיבוכיות

## תוכן העניינים

<b>3</b>	<b>1 מכונות טיורינג</b>
3	הגדרה של מכונת טיורינג . . . . .
16	טבלת המעברים . . . . .
20	חישוב פונקציות . . . . .
<b>23</b>	<b>2 מודלים חשובים שקולית</b>
<b>27</b>	<b>3 מכונות טיורינג מרובת סרטים</b>
27	מכונת טיורינג מרובת סרטים: הגדרה היוריסטית . . . . .
27	מכונת טיורינג מרובת סרטים: הגדרה פורמלית . . . . .
28	קונפיגורציה של מטמ"ס . . . . .
30	שקילות בין מטמ"ס למ"ט עם סרט יחיד . . . . .
<b>35</b>	<b>4 מכונת טיורינג אי דטרמיניסטית</b>
35	הגדרה של מכונת טיורינג אי-דטרמיניסטית . . . . .
37	עץ החישוב של מ"ט א"ד . . . . .
38	שקילות בין מ"ט א"ד למ"ט דטרמיניסטית . . . . .
<b>42</b>	<b>5 התזה של צרף טיורינג ודקדוקים כלליים</b>
42	היחס בין הכרעה וקבלה . . . . .
43	שקילות של מכונת טיורינג ותוכנית מחשב . . . . .
43	SIMPLE . . . . .
49	דקדוקים כלליים . . . . .
55	דקדוקים כלליים ומכונת טיורינג . . . . .
56	ההיררכיה של חומסקי . . . . .
56	כל שפה חסרת הקשר הינה כריעה . . . . .
<b>58</b>	<b>6 תכונות סגירות של <math>R</math> ו- <math>RE</math></b>
58	הגדרה של השפות $R$ ו- $RE$ . . . . .
64	קידוד של מ"ט דטרמיניסטית . . . . .
64	מ"ט אוניברסלית $U$ . . . . .
<b>67</b>	<b>7 אי-כריעות</b>
67	השפות $L_d, L_{halt}, L_{acc}$ לא כריעות . . . . .
71	השפה $L_E$ לא כריעה . . . . .
73	השפה $L_{EQ}$ לא כריעה . . . . .
76	סיכום: כריעות וקבילות של שפות . . . . .

77	8	רדוקציה
77		טבלה של רדוקציות . . . . .
77		מ"ט המחשבת את פונקציה . . . . .
79		רדוקציות . . . . .
86		דוגמאות בשימוש של משפט הרדוקציה בין שפות משלימות (משפט 8.2) . . . . .
86		דוגמאות בשימוש של משפט הרדוקציה (משפט 8.1) . . . . .
93	9	מבוא לסיבוכיות
93		הגדרה של סיבוכיות . . . . .
95		יחס בין הסיבוכיות של מ"ט סרט יחיד ומטמ"ס . . . . .
96		יחס בין הסיבוכיות של מ"ט דטרמיניסטית ומ"ט א"ד . . . . .
98		המחלקה $P$ . . . . .
98		בעיית PATH . . . . .
100		בעיית RELPRIME . . . . .
103	10	המחלקה $P$ והמחלקה NP
103		המחלקה $P$ . . . . .
103		דוגמאות לבעיות ב- $P$ . . . . .
103		בעיית המסלול ההמילטוני HAMPATH . . . . .
104		אלגוריתם אימות . . . . .
104		המחלקה NP . . . . .
107		הקשר בין NP למ"ט א"ד . . . . .
108		הקשר בין המחלקה $P$ ו- NP . . . . .
111	11	NP שלמות
111		המחלקות $NPC$ ו- $NPH$ . . . . .
112		בעיית הספיקות . . . . .
112		בעיית SAT . . . . .
113		משפט קוק לויין . . . . .
113		גרסאות של $kSAT$ . . . . .
113		בעיית $3SAT$ . . . . .
115		הוכחת משפט קוק לויין* . . . . .
121	12	רדוקציות פולינומיאליות
121		$CLIQUE$ היא $NP$ -שלמה . . . . .
123		בעיית הקבוצה הבלתי תלויה . . . . .
125		בעיית הכיסוי בקודקודים . . . . .
126		הבעיה $VC$ . . . . .
127		$PARTITION$ . . . . .
127		רדוקציות פולינומיאליות . . . . .
128		שפות $NP$ שלמות . . . . .
129	13	סיבוכיות מקום ושלמות ב PSPACE
129		משפט סביץ' . . . . .
129		המחלקה PSPACE . . . . .
129		שלמות ב- PSPACE . . . . .
129		המחלקה $L$ . . . . .
129		המחלקה $NL$ . . . . .
129		שלמות ב- $NL$ . . . . .
129		שיוויון $NL$ ו- $coNL$ . . . . .

# שיעור 1

## מכונות טיורינג

### 1.1 הגדרה של מכונת טיורינג

#### הגדרה 1.1 מכונת טיורינג (הגדרה היוריסטית)

##### הקלט והסרט

- מכונת טיורינג (מ"ט) קורא קלט.
- הקלט עצמו נמצא על סרט אינסופי מחולק למשבצות.
- כל תו של הקלט כתוב במשבצת אחת של הסרט.
- במכונת טיורינג אנחנו מניחים שהסרט אינסופי לשני הכיוונים.
- \* משמאל לתחילת הקלט יש רצף אינסופי של תווי רווח " ".
- \* מימין לסוף הקלט יש רצף אינסופי של תווי רווח " ".

...	␣	␣	a	b	b	b	a	a	␣	␣	␣	...
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----

##### הראש

- במצב ההתחלתי הראש בקצה השמאלי של הקלט.

...	␣	␣	a	b	b	b	a	a	␣	␣	␣	...
			↑									

- הראש יכול לזוז ימינה על הסרט וגם שמאלה על הסרט.
- הראש קורא את התוכן של המשבצת שבה הוא נמצא.
- הראש יכול לכתוב על משבצת, אבל רק על המשבצת שבה הראש נמצא.

##### תאור העבודה של המכונה

- בתחילת הריצה, הקלט כתוב התחילת הסרט כאשר מימינו נמצא רצף אינסופי של תווי ␣ -ים.
- הראש מצביע על התא הראשון בסרט והמכונה נמצאת במצב התחלתי  $q_0$ .

$q_0$	...	␣	␣	a	b	b	b	a	a	␣	␣	␣	...
				↑									

- בכל צעד חישוב, בהתאם למצב הנוכחי ולאות שמתחת לראש (התו הנקרא), המכונה מחליטה:
  - \* לאיזה מצב לעבור
  - \* מה לכתוב מתחת לראש (התו הנכתב)
  - \* לאן להזיז את הראש (תא אחד ימינה, או תא אחד שמאלה, או להישאר במקום).
- למכונה ישנם שני מצבים מיוחדים:
  - \*  $q_{acc}$ : אם במשך הריצה המכונה מגיעה ל-  $q_{acc}$  היא עוברת ומקבלת.
  - \*  $q_{rej}$ : אם במשך הריצה המכונה מגיעה ל-  $q_{rej}$  היא עוברת ודוחה.
  - \* אם המכונה לא מגיעה ל-  $q_{acc}$  או  $q_{rej}$  היא תמשיך לרוץ לנצח.

## הגדרה 1.2 מכונת טיורינג

מכונת טיורינג (מ"ט) היא שביעה

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{acc}, q_{rej})$$

כאשר:

$Q$	קבוצת מצבים סופית ולא ריקה
$\Sigma$	אלפבית הקלט
$\Gamma$	אלפבית הסרט
$\delta$	פונקציית המעברים
$q_0$	מצב התחלתי
$q_{acc}$	מצב מקבל יחיד
$q_{rej}$	מצב דוחה יחיד

$$\_ \notin \Sigma$$

$$\Sigma \subseteq \Gamma, \_ \in \Gamma$$

$$\delta : (Q \setminus \{q_{rej}, q_{acc}\}) \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R\}$$

## 1.1 דוגמה

נבנה מכונת טיורינג אשר מקבלת מילה אם היא בשפה

$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid \#a_w = \#b_w\}.$$

ז"א השפת כל המילים עם מספר שווה אותיות  $a$  ו  $b$ . הפאודו-קוד של המכונה, כדלקמן.פסאודו-קוד

- (1) סורקים את הקלט משמאל לימין.
  - אם לא מצאנו  $a$  וגם לא מצאנו  $b \Leftarrow$  מקבלת.
  - אם האות הראשונה שהראש מצא היא  $a$ , כותבים עליו  $\checkmark$ , ועוברים לשלב (2).
  - אם האות הראשונה שהראש מצא היא  $b$ , כותבים עליו  $\checkmark$ , ועוברים לשלב (3).
- (2) ממשיכים לזוז ימינה עד שנמצא  $b$  תואם.
  - אם לא מצאנו  $b \Leftarrow$  דוחה.
  - אם מצאנו  $b$  כותבים עליו  $\checkmark$ , חוזרים לתחילת הקלט וחוזרים לשלב (1).
- (3) ממשיכים לזוז ימינה עד שנמצא  $a$  תואם.
  - אם לא מצאנו  $a \Leftarrow$  דוחה.
  - אם מצאנו  $a$  כותבים עליו  $\checkmark$ , חוזרים לתחילת הקלט וחוזרים לשלב (1).

כעת נתן הגדרה פורמלית של המכונת טיורינג שמבצעת את האלגוריתם הזה.

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{acc}, q_{rej})$$

כאשר  $Q$  הקבוצת המצבנים הבאה:

$$Q = \{q_0, q_a, q_b, q_{back}, q_{rej}, q_{acc}\}.$$

המשמעותם של כל המצבים נרשמים בטבלה למטה:

$q_0$	המצב ההתחלתי. אליו נחזור אחרי כל סבב התאמה של זוג אותיות.
$q_a$	מצב שבו ראינו $a$ ומחפשים $b$ תואם.
$q_b$	מצב שבו ראינו $b$ ומחפשים $a$ תואם.
$q_{back}$	מצב שנשתמש בו כדי לחזור לקצה השמאלי של הקלט ולהתחיל את הסריקה הבאה (סבב ההתאמה הבא).
$q_{acc}$	מצב מקבל.
$q_{rej}$	מצב דוחה.

האלפבית של הקלט,  $\Sigma$ , והלפבית של הסרט,  $\Gamma$ , הינן:

$$\Sigma = \{a, b\}, \quad \Gamma = \{a, b, \sqcup, \checkmark\}.$$

הפונקציות המעבריים  $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R\}$  היא מוגדרת כדלקמן.

$$\delta(q_0, a) = (q_a, \checkmark, R),$$

$$\delta(q_0, b) = (q_b, \checkmark, R),$$

$$\delta(q_0, \sqcup) = (q_{acc}, \sqcup, R),$$

$$\delta(q_a, \checkmark) = (q_a, \checkmark, R),$$

$$\delta(q_a, a) = (q_a, a, R),$$

$$\delta(q_a, b) = (q_{back}, \checkmark, L),$$

$$\delta(q_b, \checkmark) = (q_b, \checkmark, R),$$

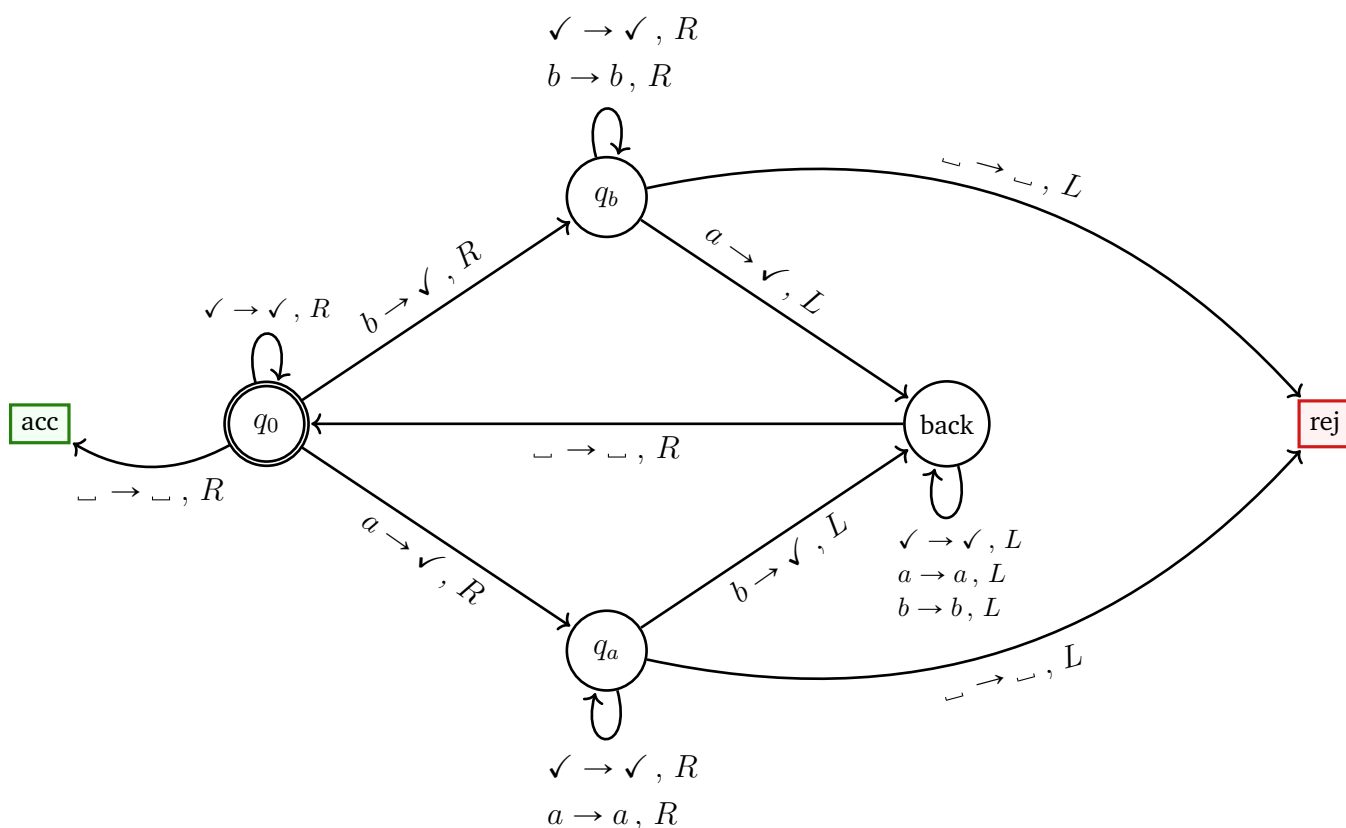
$$\delta(q_b, b) = (q_a, b, R),$$

$$\delta(q_b, a) = (q_{back}, \checkmark, L).$$

לעתים קל יותר לרשום את פונקציית המעבריים  $\delta$  כטבלה:

$Q \backslash \Gamma$	a	b	$\sqcup$	$\checkmark$
$q_0$	$(q_a, \checkmark, R)$	$(q_b, \checkmark, R)$	$(q_{acc}, \sqcup, R)$	$(q_0, \checkmark, R)$
$q_a$	$(q_a, a, R)$	$(q_{back}, \checkmark, L)$	$(q_{rej}, \sqcup, L)$	$(q_a, \checkmark, R)$
$q_b$	$(q_{back}, \checkmark, L)$	$(q_b, b, R)$	$(q_{rej}, \sqcup, L)$	$(q_b, \checkmark, R)$
$q_{back}$	$(q_{back}, a, L)$	$(q_{back}, b, L)$	$(q_0, \sqcup, R)$	$(q_{back}, \checkmark, L)$

### תרשים מצבים



## דוגמה 1.2

בדקו אם המכונת טיורינג של הדוגמה 1.1 מקבלת את המילה .aab

**פתרון:**

⌊	$q_0$	a	a	b	⌊
⌊	✓	$q_a$	a	b	⌊
⌊	✓	a	$q_a$	b	⌊
⌊	✓	$q_{back}$	a	✓	⌊
⌊	$q_{back}$	✓	a	✓	⌊
$q_{back}$	⌊	✓	a	✓	⌊
⌊	$q_0$	✓	a	✓	⌊
⌊	✓	$q_0$	a	✓	⌊
⌊	✓	✓	$q_a$	✓	⌊
⌊	✓	✓	✓	$q_a$	⌊
⌊	✓	✓	rej	✓	⌊

## דוגמה 1.3

בדקו אם המכונת טיורינג של הדוגמה 1.1 מקבלת את המילה .abbbbaa

**פתרון:**

⌊	$q_0$	a	b	b	b	a	a	⌊
⌊	✓	$q_a$	b	b	b	a	a	⌊
⌊	$q_{back}$	✓	✓	b	b	a	a	⌊
$q_{back}$	⌊	✓	✓	b	b	a	a	⌊
⌊	$q_0$	✓	✓	b	b	a	a	⌊
⌊	✓	$q_0$	✓	b	b	a	a	⌊
⌊	✓	✓	$q_0$	b	b	a	a	⌊
⌊	✓	✓	✓	$q_b$	b	a	a	⌊
⌊	✓	✓	✓	b	$q_b$	a	a	⌊
⌊	✓	✓	✓	$q_{back}$	b	✓	a	⌊
⌊	✓	✓	$q_{back}$	✓	b	✓	a	⌊
⌊	✓	$q_{back}$	✓	✓	b	✓	a	⌊
$q_{back}$	⌊	✓	✓	✓	b	✓	a	⌊
⌊	$q_0$	✓	✓	✓	b	✓	a	⌊
⌊	✓	$q_0$	✓	✓	b	✓	a	⌊
⌊	✓	✓	$q_0$	✓	b	✓	a	⌊
⌊	✓	✓	✓	$q_0$	b	✓	a	⌊
⌊	✓	✓	✓	✓	$q_b$	✓	a	⌊
⌊	✓	✓	✓	✓	✓	$q_b$	a	⌊
⌊	✓	✓	✓	✓	$q_{back}$	✓	✓	⌊
⌊	✓	✓	✓	$q_{back}$	✓	✓	✓	⌊

⊥	✓	✓	$q_{back}$	✓	✓	✓	✓	⊥
⊥	✓	$q_{back}$	✓	✓	✓	✓	✓	⊥
⊥	$q_{back}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	⊥
$q_{back}$	⊥	✓	✓	✓	✓	✓	✓	⊥
⊥	$q_0$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	⊥
⊥	✓	$q_0$	✓	✓	✓	✓	✓	⊥
⊥	✓	✓	$q_0$	✓	✓	✓	✓	⊥
⊥	✓	✓	✓	$q_0$	✓	✓	✓	⊥
⊥	✓	✓	✓	✓	$q_0$	✓	✓	⊥
⊥	✓	✓	✓	✓	✓	$q_0$	✓	⊥
⊥	✓	✓	✓	✓	✓	✓	$q_0$	⊥
⊥	✓	✓	✓	✓	✓	✓	⊥	$q_{acc}$

### הגדרה 1.3 קונפיגורציה

תהי  $M = (Q, q_0, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{acc}, q_{rej})$  מכונת טיורינג. קונפיגורציה של  $M$  הינה מחרוזת

$$uq\sigma v$$

כאשר משמעות:

$$u, v \in \Gamma^*, \quad \sigma \in \Gamma, \quad q \in Q.$$

$q$  מצב המכונה,  
 $\sigma$  הסימון במיקום הראש  
 $u$  תוכן הסרט משמאל לראש,  
 $v$  תוכן הסרט מימין לראש.

### דוגמה 1.4 (המשך של דוגמה 1.2)

$u$	$q$	$\sigma$	$v$
⊥	$q_0$	a	a b ⊥
⊥ ✓	$q_a$	a	b ⊥
⊥ ✓ a	$q_a$	b	⊥
⊥ ✓	$q_{back}$	a	✓ ⊥
⊥	$q_{back}$	✓	a ✓ ⊥
⊥	$q_{back}$	⊥	✓ a ✓ ⊥
⊥	$q_0$	✓	a ✓ ⊥
⊥ ✓	$q_0$	a	✓ ⊥
⊥ ✓ ✓	$q_a$	✓	⊥
⊥ ✓ ✓ ✓	$q_a$	⊥	⊥
⊥ ✓ ✓	$q_{rej}$	✓	⊥

### דוגמה 1.5

בנו מכונת טיורינג אשר מקבלת כל מילה בשפה

$$L = \{a^n \mid n = 2^k, k \in \mathbb{N}\}$$

ז"א מילים בעלי מספר אותיות  $a$  אשר חזקה של 2.

## פתרון:

ראשית נשים לב למשפט הבא:

## משפט 1.1

מספר שלם  $n$  שווה לחזקה אי-שלילית של 2, כלומר  $n = 2^k$  ( $k \geq 0$ ) אם ורק אם קיים שלם  $m$  עבורו חילוק של  $n$  ב-2 בדיוק  $m$  פעמים נותן 1.

הוכחה:

כיוון  $\Leftarrow$ 

אם  $n = 2^k$  ( $k \geq 0$ ) אז  $\frac{n}{2^k} = 1$ .

כיוון  $\Rightarrow$ 

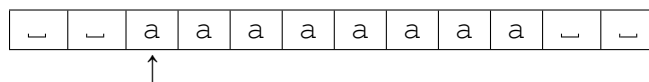
■ אם קיים  $m \geq 0$  עבורו  $\frac{n}{2^m} = 1$  אז  $n = 2^m$  ולכן  $n$  שווה לחזקה אי-שלילית של 2.

לאור המשפט הזה נבנה אלגוריתם אשר מחלק את מספר האותיות במילה ב-2 שוב ושוב בצורה איטרטיבית.

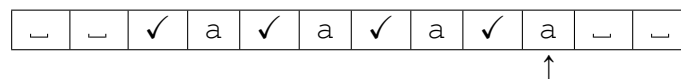
- אם אחרי סיבוב מסויים נקבל מספר אי-זוגי שונה מ-1, אז אין מצב שמספר האותיות  $a$  הוא חזקה של 2.
- בצד שני אם אחרי סיבוב כלשהו נקבל בדיוק  $a$  אחת הנשארת, ז"א אחרי מספר מסוים של חילוקים של המספר אותיות  $a$  קיבלנו 1, אזי מובטח לנו שהמספר של אותיות  $a$  הוא שווה לחזקה של 2.

כעת נסביר כיצד המכונת טיורינג מבצעת את השיטה הזאת בפועל כדלקמן.

(1) במצב ההתחלתי יש מחרוזת של רצף אותיות  $a$  כתובה על הסרט והראש נמצא מתחת האות הראשונה.



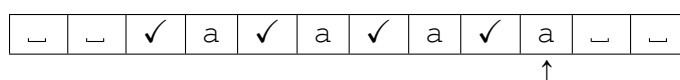
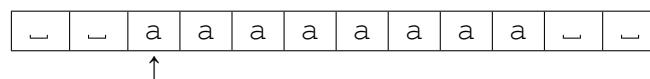
(2) עוברים על הקלט משמאל לימין ומבצעים מחיקה לסירוגין של האות  $a$ . כלומר, אות אחת נמחק ואות אחת נשאיר וכן הלאה, עד שמגיעים לקצה הימין של המילה.



(3) אחרי שהראש הגיע לסוף המילה:

- אם מצאנו אות  $a$  אחת בדיוק  $\Leftarrow$  המכונה תקבל.
- אם כתוב ✓ בתו האחרון  $\Leftarrow$  המכונה תדחה.
- אחרת, אם כתוב  $a$  בתו האחרון הראש חוזר לתחילת המחרוזת וחוזרים לשלב (2).

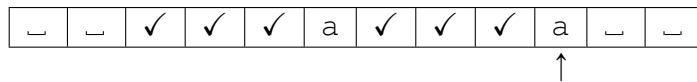
כדוגמה של מילה המתקבלת על ידי האלגוריתם, למטה רשומות האיטרציות של האלגוריתם הזה על המילה  $w = aaaaaaaaaa$  (8 אותיות  $a$ ). במצב ההתחלתי הסרט נראה כדלקמן.



(איטרציה 1) לבסוף האיטרציה  $i = 1$  הסרט נראה כך:

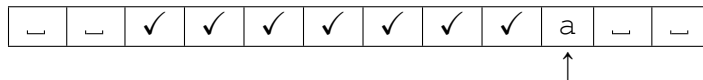
התו האחרון  $a$  אז ממשיכים לאיטרציה הבאה.





**איטרציה 2** בסוף האיטרציה  $i = 2$  הסרט נראה כך:

התו הראשון הוא  $a$  אז ממשיכים לאיטרציה הבאה.

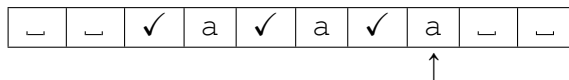
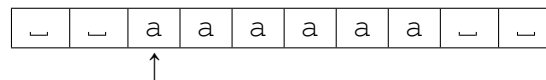


**איטרציה 3** לאחר האיטרציה  $i = 3$  הסרט נראה כך:

התו האחרון הוא  $a$  אז ממשיכים לאיטרציה הבאה.

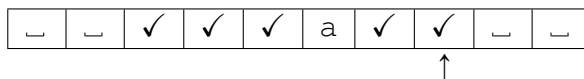
**איטרציה 4** באיטרציה  $i = 4$  יש אות  $a$  אחת בדיוק אז המכונה מקבלת.

כדוגמה של מילה הלא המתקבלת על ידי האלגוריתם, למטה רשומות האיטרציות של האלגוריתם הזה על המילה  $w = aaaaaa$  (6 אותיות  $a$ ).  
במצב ההתחלתי הסרט נראה כדלקמן.



**איטרציה 1** לבסוף האיטרציה  $i = 1$  הסרט נראה כך:

התו האחרון  $a$  אז ממשיכים לאיטרציה הבאה.



**איטרציה 2** בסוף האיטרציה  $i = 2$  הסרט נראה כך:

התו הראשון הוא ✓ אז דוחה.

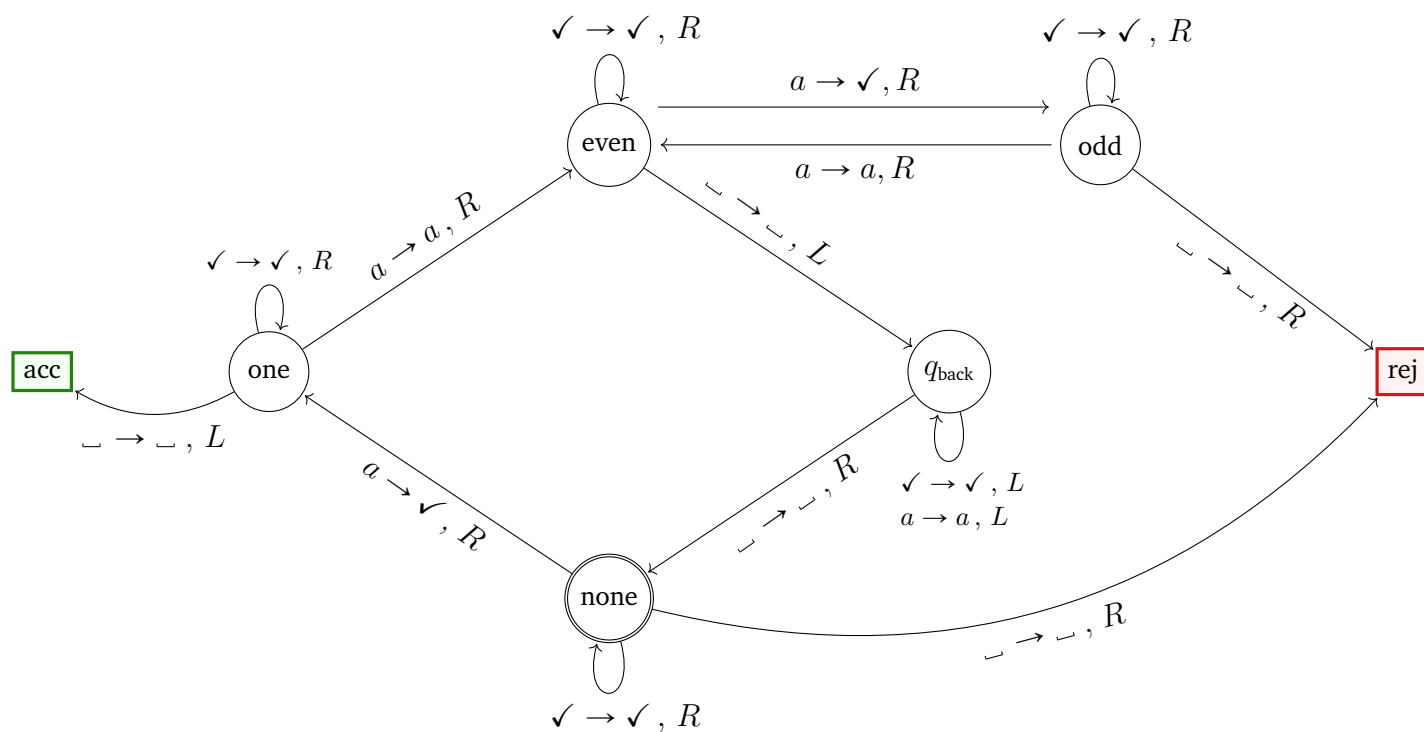
כעת נתן הגדרה פורמלית של המכונת טיורנג שמקבלת השפה הזאת:

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{acc}, q_{rej}) ,$$

כאשר  $\Sigma = \{a\}$ ,  $\Gamma = \{a, \_, \checkmark\}$ , והקבוצת המצבים היא  $Q = \{q_0, \text{one}, \text{even}, \text{odd}, q_{acc}, q_{rej}\}$  כאשר המשמעותם הם מפורטים למטה:

מצב none:	מצב התחלתי. עדיין לא קראנו $a$ בסבב סריקה זה.
מצב one:	קראנו $a$ בודד.
מצב even:	קראנו מספר זוגי של $a$ .
מצב odd:	קראנו מספר אי-זוגי של $a$ .
מצב $q_{back}$ :	חזרה שלמאלה.
מצבים למטה:	

הפונקציות המעברים מתוארות על ידי התרשים



## דוגמה 1.6

בדקו אם המילה aaaa מתקבלת על ידי המכונת טיורינג בדוגמה 1.5.

פתרון:

$\_$	none	a	a	a	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	one	a	a	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	a	even	a	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	a	$\checkmark$	odd	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	a	$\checkmark$	a	even	$\_$
$\_$	$\checkmark$	a	$\checkmark$	back	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	a	back	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	back	a	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	back	$\checkmark$	a	$\checkmark$	a	$\_$
back	$\_$	$\checkmark$	a	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	none	$\checkmark$	a	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	none	a	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	$\checkmark$	one	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	one	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	a	even	$\_$
$\_$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	back	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	$\checkmark$	back	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	back	$\checkmark$	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	back	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	a	$\_$
back	$\_$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	none	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	none	$\checkmark$	$\checkmark$	a	$\_$
$\_$	$\checkmark$	$\checkmark$	none	$\checkmark$	a	$\_$

⌊	✓	✓	✓	none	a	⌊
⌊	✓	✓	✓	✓	one	⌊
⌊	✓	✓	✓	acc	✓	⌊

$u$	$q$	$\sigma$	$v$
⌊	none	a	aaa ⌊
⌊ ✓	one	a	aa ⌊
⌊ ✓ a	even	a	a ⌊
⌊ ✓ a ✓	odd	a	⌊
⌊ ✓ a ✓ a	even	⌊	⌊
⌊ ✓ a ✓	back	a	⌊
⌊ ✓ a	back	✓	a ⌊
⌊ ✓	back	a	✓ a ⌊
⌊	back	✓	a ✓ a ⌊
⌊	back	⌊	✓ a ✓ a ⌊
⌊	none	✓	a ✓ a ⌊
⌊ ✓	none	a	✓ a ⌊
⌊ ✓ ✓	one	✓	a ⌊
⌊ ✓ ✓ ✓	one	a	⌊
⌊ ✓ ✓ ✓ a	even	⌊	⌊
⌊ ✓ ✓ ✓	back	a	⌊
⌊ ✓ ✓	back	✓ a	⌊
⌊ ✓	back	✓	✓ a ⌊
⌊	back	✓	✓ ✓ a ⌊
⌊	back	⌊	✓ ✓ ✓ a ⌊
⌊	none	✓	✓ ✓ a ⌊
⌊ ✓	none	✓	✓ a ⌊
⌊ ✓ ✓	none	✓	a ⌊
⌊ ✓ ✓ ✓	none	a	⌊
⌊ ✓ ✓ ✓ ✓	one	⌊	⌊
⌊ ✓ ✓ ✓	acc	✓	⌊

## דוגמה 1.7

בדקו אם המילה aaa מתקבלת על ידי המכונת טיורינג בדוגמה 1.5.

פתרון:

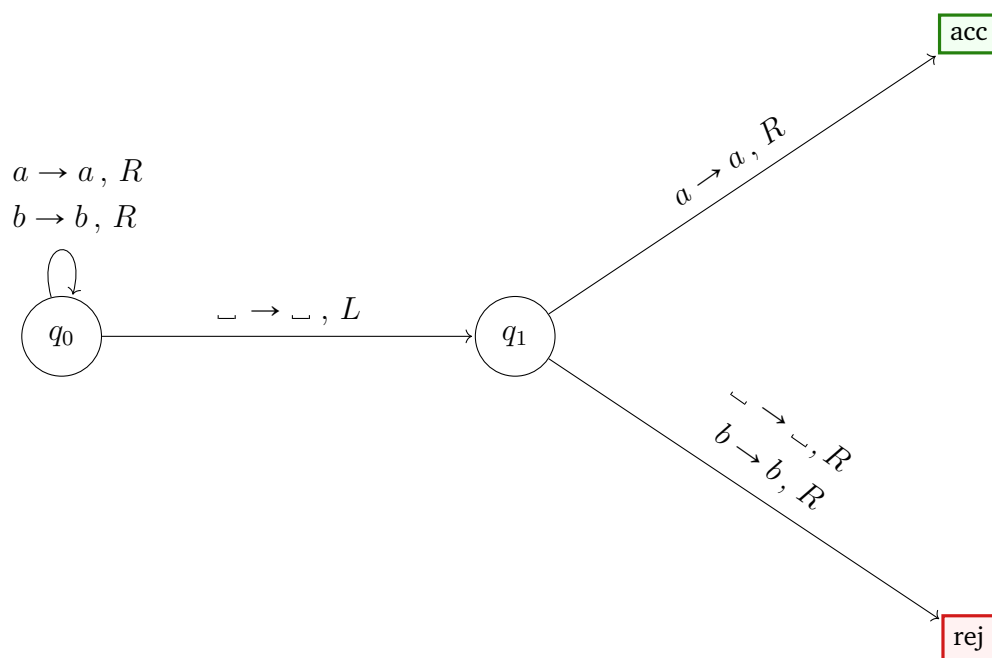
⌊	none	a	a	a	⌊
⌊	✓	one	a	a	⌊
⌊	✓	a	even	a	⌊
⌊	✓	a	✓	odd	⌊
⌊	✓	a	✓	⌊	rej

$u$	$q$	$\sigma$	$v$
⌊	none	a	aa ⌊

$\_$	✓		one	a	a	$\_$
$\_$	✓	a	even	a	$\_$	
$\_$	✓	a	odd	$\_$	$\_$	
$\_$	✓	a	rej	$\_$	$\_$	

## דוגמה 1.8

מהי השפה של המכונה למטה:



## פתרון:

(1) סורקים את הקלט משמאל לימין.

- אם התו הנקרא  $a$  או  $b$  עוברים לתו ימינה הבא וחוזרים לשלב (1).
- אם התו הנקרא  $\_$  אז הגענו לסוף הקלט, ועוברים לשלב (2).

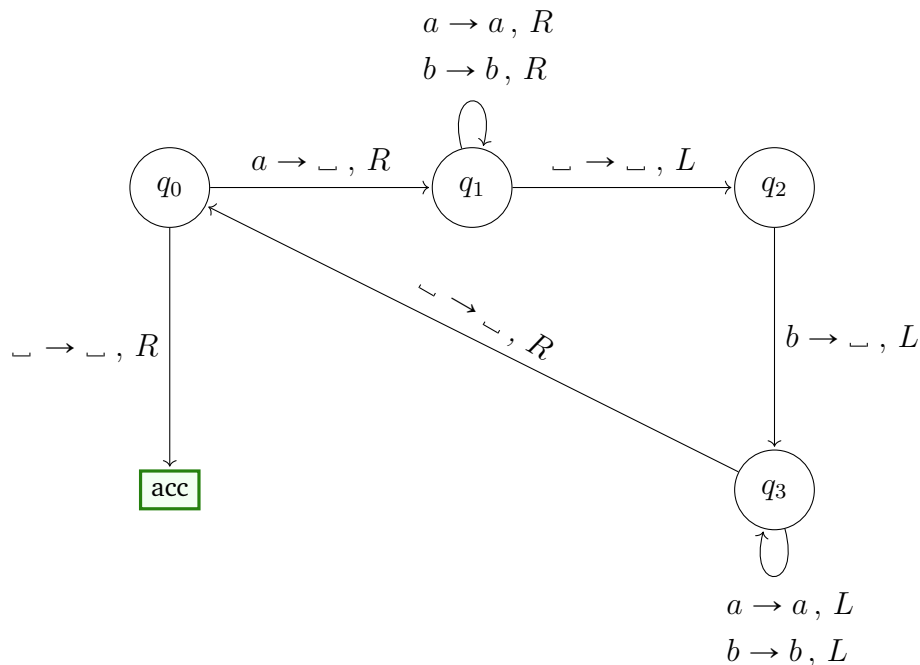
(2) עוברים שמאלה לתו הארון של המילה.

- אם התו הנקרא  $a \Leftarrow$  מקבל.
- אחרת דוחה.

לכן המכונה מקבלת שפת המילים המסתיימות באות  $a$ .

## דוגמה 1.9

מהי השפה של המכונה למטה:



## פתרון:

## (1) במצב ההתחלתי:

- אם התו הנקרא  $\_$   $\Leftarrow$  מקבל.
- אם התו הנקרא  $a$  מורידים אותו על ידי  $\_$  ועוברים לשלב (2).
- אחרת  $\Leftarrow$  דוחה.

## (2) עוברים ימינה עד שמגיעים לסוף המילה.

- אם התו האחרון הוא  $b$ , מורידים אותו על ידי  $\_$ , חוזרים לתחילת המילה וחוזרים לשלב (1).
- אחרת דוחה.

בכל איטרציה המכונה מורידה תו  $a$  בתחילת המילה וחוזרת ומורידה תו  $b$  תואם בסוף המילה. בכל איטרציה אם המכונה לא מוצאת  $b$  תואם בסוף המילה היא דוחה המילה. אחרת אם המכונה לא דחתה המילה וכל האותיות נמחקות אז המילה מתקבלת. לכן המכונה מקבלת שפת המילים

$$\{a^n b^n \mid n \geq 0\}.$$

## הגדרה 1.4 גרירה בצעד אחד

תהי  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{acc}, q_{rej})$  מכונת טיורינג, ותהייה  $c_1$  ו- $c_2$  קונפיגורציות של  $M$ . נסמן

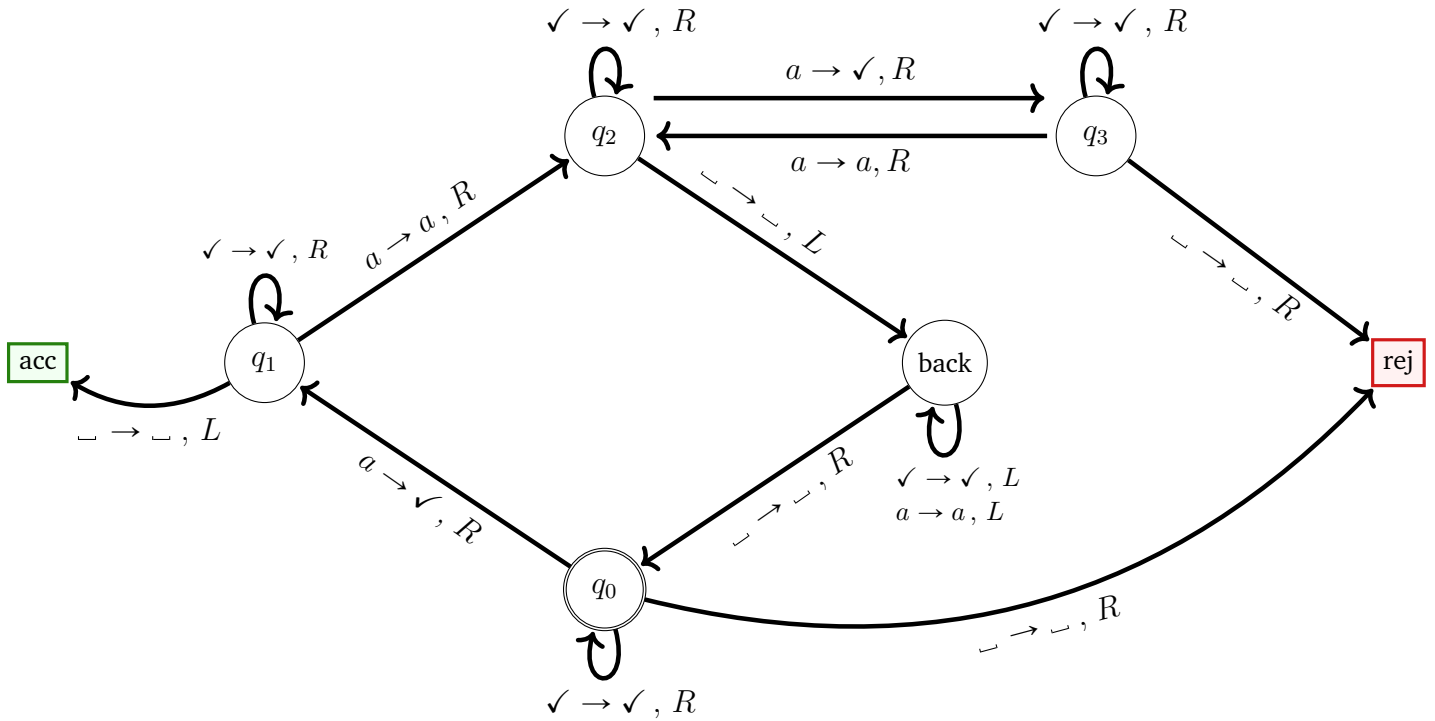
$$c_1 \vdash_M c_2$$

(במילים,  $c_1$  גורר את  $c_2$ ) אם כשנמצאים ב- $c_1$  עוברים ל- $c_2$  בצעד בודד.

## דוגמה 1.10 (המשך של דוגמה 1.5)

עבור המכונת טיורינג שמתוארת בתרשים למטה מתקיים

$$\checkmark q_0 a \checkmark a \vdash_M \checkmark \checkmark q_1 \checkmark a$$



## הגדרה 1.5 גרירה בכללי

תהי  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{acc}, q_{rej})$  מכונת טיורינג, ותהי  $c_1$  ו- $c_2$  קונפיגורציות של  $M$ .  
נסמן

$$c_1 \vdash_M^* c_2$$

אם ניתן לעבור מ- $c_1$  ל- $c_2$  ב-0 או יותר צעדים.

## דוגמה 1.11 (המשך של דוגמה 1.5)

עבור המכונת טיורינג שמתוארת בתרשים למטה מתקיים

$$\checkmark q_0 a \checkmark a \vdash_M^* \checkmark \checkmark \checkmark q_4 a$$

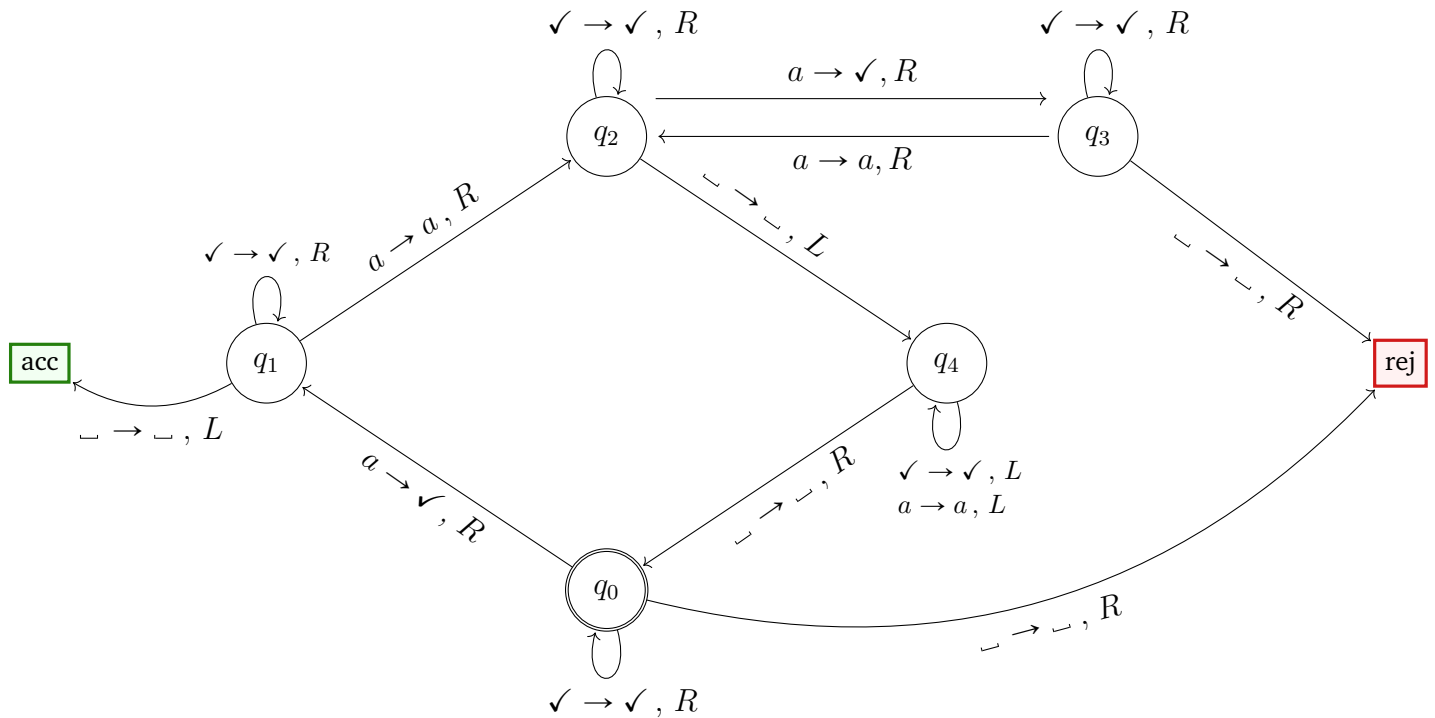
בגלל ש:

$$\checkmark q_0 a \checkmark a \vdash_M \checkmark \checkmark q_1 \checkmark a$$

$$\vdash_M \checkmark \checkmark \checkmark q_1 a$$

$$\vdash_M \checkmark \checkmark \checkmark a q_2 \sqcup$$

$$\vdash_M \checkmark \checkmark \checkmark q_4 a .$$



### הגדרה 1.6 קבלה ודחייה של מחרוזת

תהי  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{acc}}, q_{\text{rej}})$  מכונת טיורינג, ו-  $w \in \Sigma^*$  מחרוזת. אומרים כי:

•  $M$  מקבלת את  $w$  אם

$$q_0 w \vdash_M^* u q_{\text{acc}} \sigma v$$

כאשר  $u, v \in \Gamma^*$ ,  $\sigma \in \Gamma$  כלשהם.

•  $M$  דוחה את  $w$  אם

$$q_0 w \vdash_M^* u q_{\text{rej}} \sigma v$$

כאשר  $u, v \in \Gamma^*$ ,  $\sigma \in \Gamma$  כלשהם.

### הגדרה 1.7 הכרעה של שפה

תהי  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, \text{acc}, q_{\text{rej}})$  מכונת טיורינג, ו-  $L \subseteq \Sigma^*$  שפה. אומרים כי  $M$  מכריעה את  $L$  אם לכל  $w \in \Sigma^*$  מתקיים:

•  $M \Leftarrow w \in L$  מקבלת את  $w$ .

•  $M \Leftarrow w \notin L$  דוחה את  $w$ .

### הגדרה 1.8 קבלה של שפה

תהי  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{acc}}, q_{\text{rej}})$  מכונת טיורינג, ו-  $L \subseteq \Sigma^*$  שפה. אומרים כי  $M$  מקבלת את  $L$  אם לכל  $w \in \Sigma^*$  מתקיים:

• אם  $w \in L$  אז  $M$  מקבלת את  $w$ .

• אם  $w \notin L$  אז  $M$  לא מקבלת את  $w$ .

במקרה כזה כאשר  $M$  מקבלת את השפה  $L$ , נכתוב ש-

$$L(M) = L.$$

## 1.2 טבלת המעברים

### 1.12 דוגמה

בנו מכונת טיורינג שמכריעה את השפה

$$L = \{w = \{a, b, c\}^* \mid \#a_w = \#b_w = \#c_w\}$$

#### פתרון:

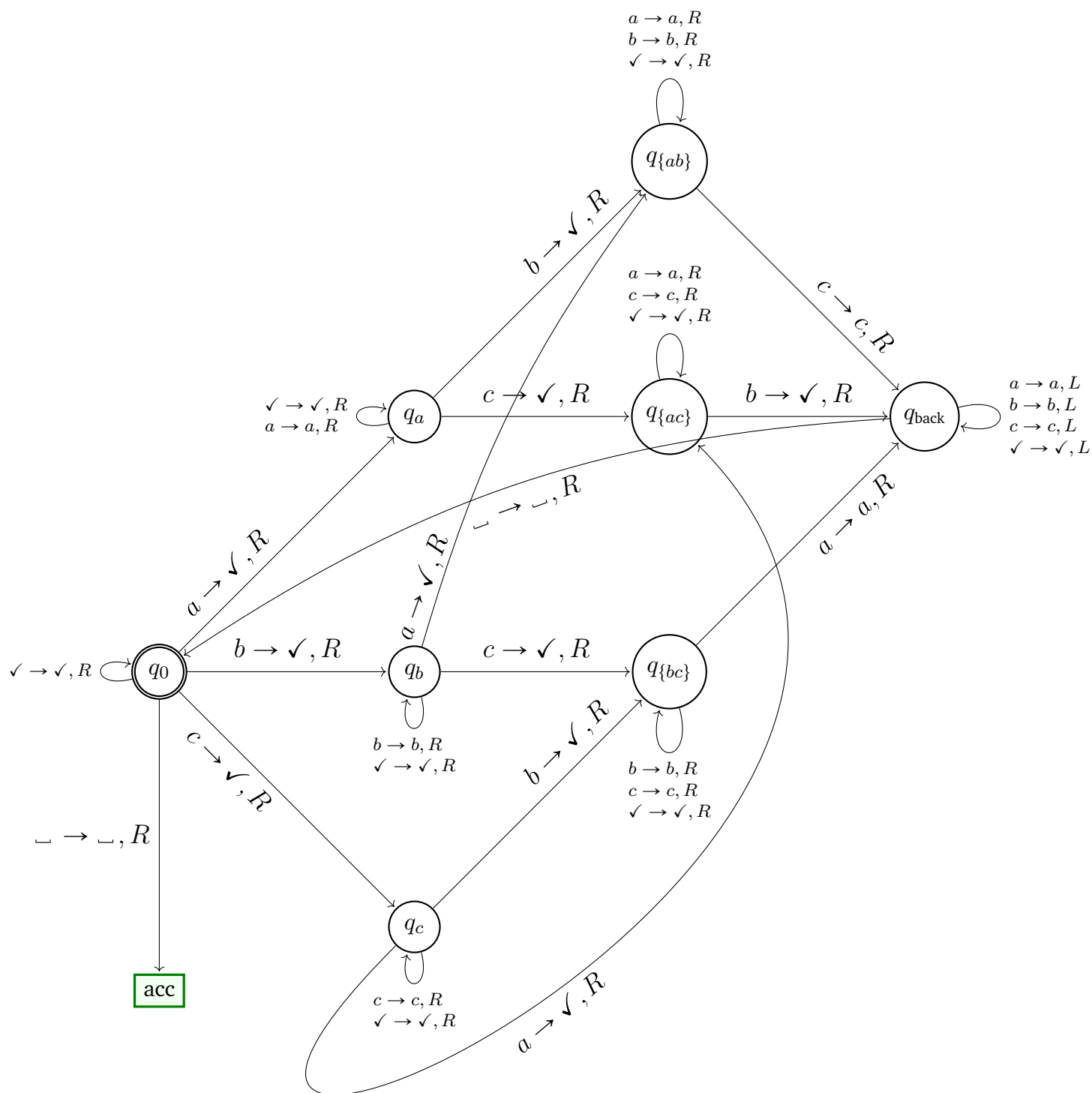
נתאר את המכונה על ידי הטבלת המעברים של המכונה. הסימן  $S$  מסמן כל זוג אותיות שונות מהקבוצה  $\{a, b, c\}$  ללא חשיבות לסדר. כלומר:

$$S = \{a, b\}, \quad S = \{b, c\}, \quad S = \{a, c\}.$$

תנאי	תזוזה	כתיבה	מצב חדש	סימון בסרט	מצב
$\sigma \in \{a, b, c\}$	$R$	✓	$q.\sigma$	$\sigma$	$q_0$
$\sigma \in \{a, b, c\}$	$R$	↻	$q.\sigma$	$\sigma$	$q.\sigma$
$\sigma, \tau \in \{a, b, c\} \wedge \sigma \neq \tau$	$R$	✓	$q.\{\sigma\tau\}$	$\tau$	$q.\sigma$
$\sigma \in S$	$R$	$\sigma$	$q.S$	$\sigma$	$q.S$
$\sigma \notin S$	$L$	✓	$q_{\text{back}}$	$\sigma$	$qS$
	$L$	↻	$q_{\text{back}}$	$a, b, c, \checkmark$	$q_{\text{back}}$
	$R$	↻	$q_{\text{acc}}$	⌊	$q_0$
	$L$	↻	$q_{\text{back}}$	$a, b, c, \checkmark$	$q_{\text{back}}$
	$R$	↻	$q_0$	⌊	$q_{\text{back}}$

כעת נתאר את המכונה על ידי תרשים המצבים של המכונה:





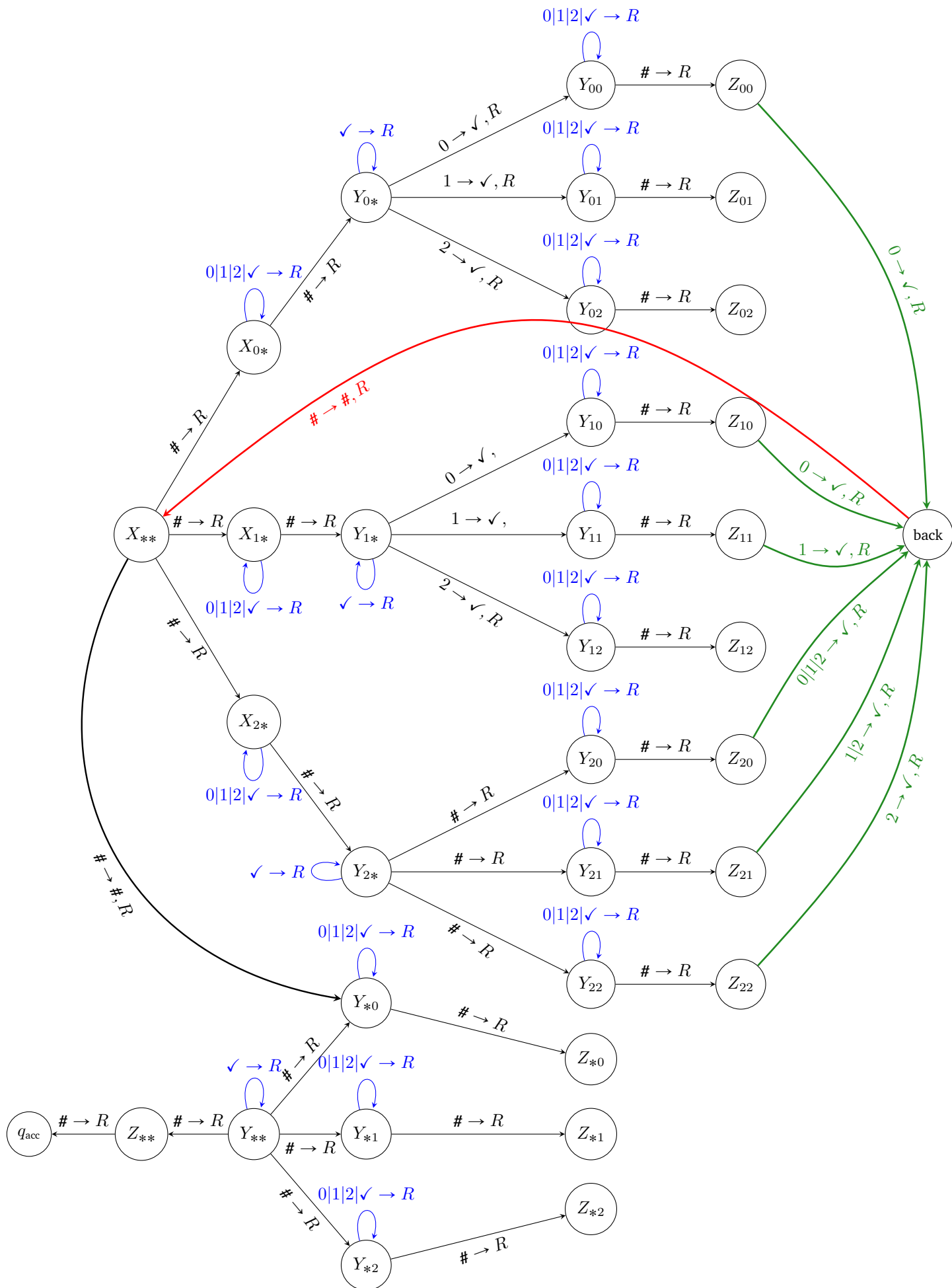
## דוגמה 1.13

בנו מכונת טיורינג שמכריעה את השפה

$$\{x_1 \dots x_k \# y_1 \dots y_k \# z_1 \dots z_k \mid x_i, y_i, z_i \in \{0, 1, 2\}, \forall i, x_i \geq z_i \geq y_i\}$$

פתרון:

מצב	סימון בסרט	מצב חדש	כתיבה	תזוזה	תנאי
$X **$	$\sigma$	$X\sigma*$	$\checkmark$	$R$	
$X **$	$\checkmark$	$X **$	$\checkmark$	$R$	
$X\sigma*$	$0, 1, 2, \checkmark$	$X\sigma*$	$\Omega$	$R$	
$X\tau*$	$\#$	$Y\tau*$	$\Omega$	$R$	
$Y\tau*$	$\sigma$	$Y\tau\sigma$	$\Omega$	$R$	
$Y\tau*$	$\checkmark$	$Y\tau*$	$\Omega$	$R$	
$Y\tau\sigma$	$0, 1, 2, \checkmark$	$Y\tau\sigma$	$\Omega$	$R$	
$Y\tau_1\tau_2$	$\#$	$Z\tau_1\tau_2$	$\Omega$	$R$	
$Z\tau_1\tau_2$	$\checkmark$	$Z\tau_1\tau_2$	$\Omega$	$R$	
$Z\tau_1\tau_2$	$\sigma$	$q_{\text{back}}$	$\checkmark$	$L$	
$Z **$	$\sqcup$	$q_{\text{acc}}$	$\Omega$	$R$	$\tau_1 \geq \sigma \geq \tau_2$
$q_{\text{back}}$	$0, 1, 2, \checkmark$	$q_{\text{back}}$	$\Omega$	$L$	
$q_{\text{back}}$	$\sqcup$	$X **$	$\Omega$	$R$	



## 1.3 חישוב פונקציות

### הגדרה 1.9 מכונת טיורינג שמחשבת פונקציה $f$

תהי  $f : \Sigma_1^* \rightarrow \Sigma_2^*$  ותהי  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{acc}, q_{rej})$  מכונת טיורינג. אומרים כי  $M$  מחשבת את  $f$  אם:

- $\Sigma_2 \subset \Gamma$  ו-  $\Sigma = \Sigma_1$ .
- לכל  $w \in \Sigma_1^*$  מתקיים  $q_0 w \vdash q_{acc} f(w)$ .

### דוגמה 1.14 חיבור אונרי

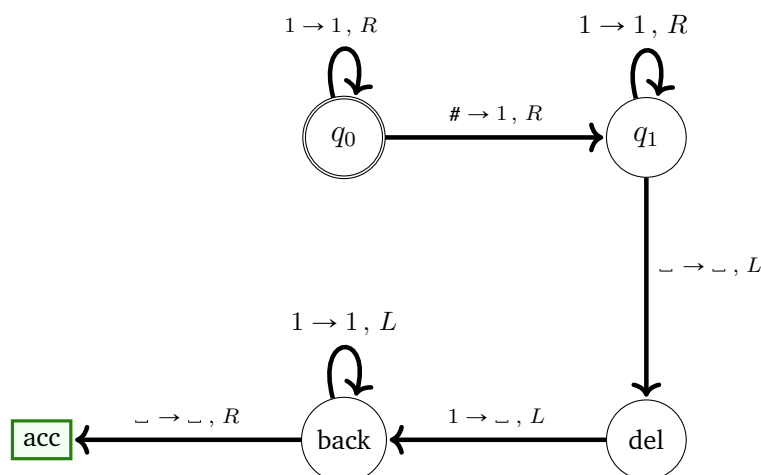
בנו מכונת טיורינג אשר מקבלת את הקלט

$$1^i \# 1^j$$

ומחזירה את פלט

$$1^{i+j}.$$

פתרון:



### דוגמה 1.15 כפל אונרי

בנו מכונת טיורינג אשר מקבלת את הקלט

$$1^i \# 1^j$$

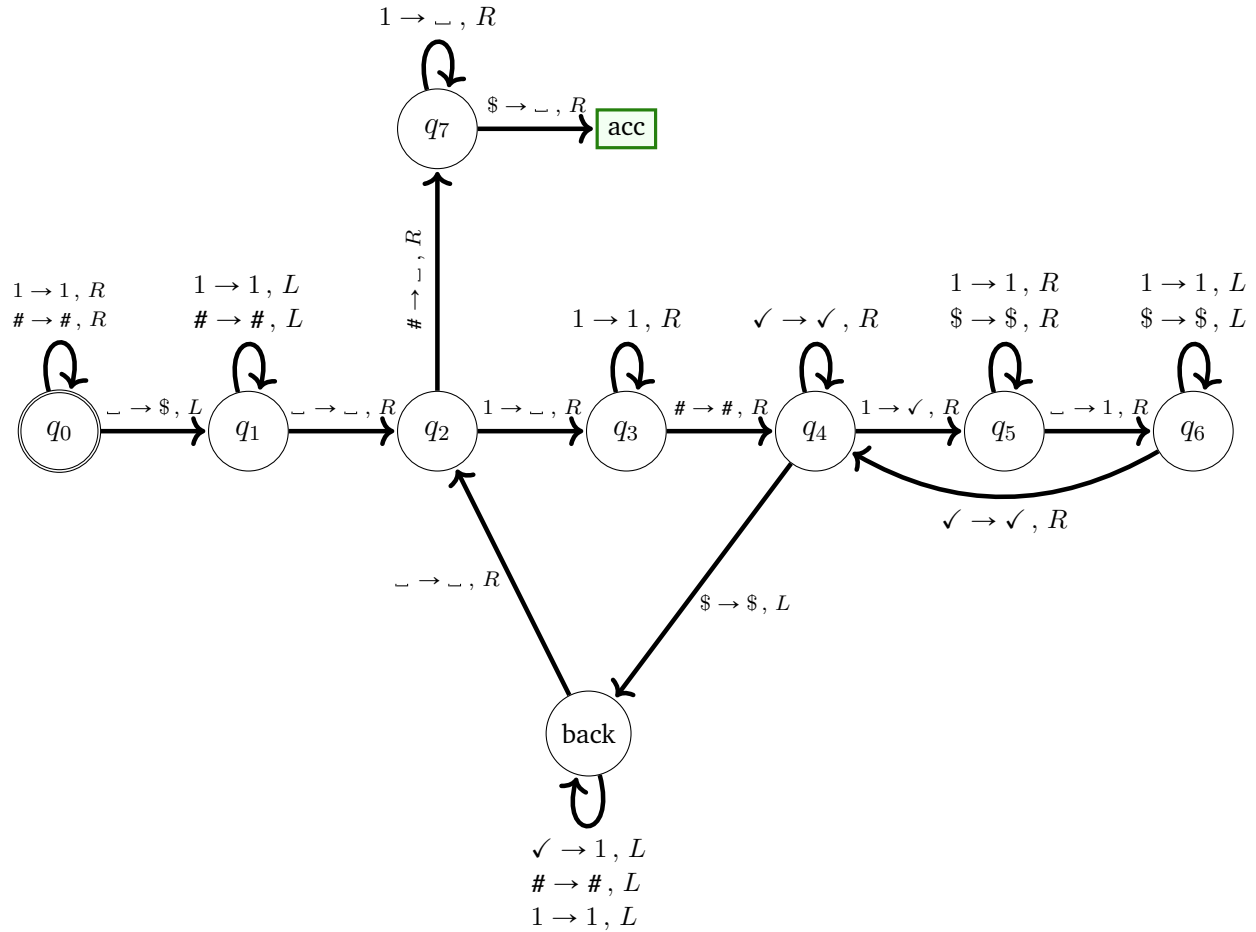
ומחזירה את פלט

$$1^{i \cdot j}.$$

פתרון:

- לדוגמה, נניח שהקלט הוא 2 כפול 2. הקלט הוא 11#11.

- נרצה להבדיל בין הקלט לבין הפלט.  
לכן בתחילת הריצה, נתקדם ימינה עד סוף הקלט ונוסיף שם את התו \$.  
לאחר מכן נחזור לתחילת הקלט.
- על כל אות 1 במילה השמאלית נעתיק את המילה הימינית לאחר סימן ה- \$.
- לאחר מכן נשאיר רק את התווים שלאחר סימן ה- \$. כלומר, נמחק את כל מה שאינו פלט.



$\mu$	$q$	$\sigma$	$\nu$
$\_$	$q_0$	1	1#11 $\_$
$\_11\#11$	$q_1$	$\_$	$\_$
$\_11\#11$	$q_1$	\$	$\_$
$\_$	$q_1$	$\_$	11#11\$
$\_$	$q_2$	1	1#11\$
$\_ \_$	$q_3$	1	#11\$
$\_ \_1\#$	$q_4$	1	1\$
$\_ \_1\#\checkmark$	$q_5$	1	\$
$\_ \_1\#\checkmark1\$$	$q_5$	$\_$	$\_$
$\_ \_1\#\checkmark1\$1$	$q_6$	$\_$	$\_$
$\_ \_1\#$	$q_6$	$\checkmark$	1\$1 $\_$
$\_ \_1\#\checkmark$	$q_4$	1	\$1 $\_$
$\_ \_1\#\checkmark\checkmark$	$q_5$	\$	1 $\_$
$\_ \_1\#\checkmark\checkmark\$1$	$q_5$	$\_$	$\_$
$\_ \_1\#\checkmark\checkmark\$11$	$q_6$	$\_$	$\_$

_ _1#✓	$q_6$	✓	\$11_
_ _1#✓✓	$q_4$	\$	11_
_ _1#✓	back	✓	\$11_
_	back	_	1#11\$11_
_ _	$q_2$	1	#11\$11_
_ _ _	$q_3$	#	11\$11_
_ _ _#	$q_4$	1	1\$11_
_ _ _#✓	$q_5$	1	\$11_
_ _ _#✓1\$11	$q_5$	_	_
_ _ _#✓1\$111	$q_6$	_	_
_ _ _#	$q_6$	✓	1\$111_
_ _ _#✓	$q_4$	1	\$111_
_ _ _#✓✓	$q_5$	\$	111_
_ _ _#✓✓\$111	$q_5$	_	_
_ _ _#✓✓\$1111	$q_6$	_	_
_ _ _#✓	$q_4$	✓	\$1111
_ _ _#✓✓	$q_4$	\$	1111
_ _ _#✓	back	✓\$	1111
_ _ _	back	_	#11\$1111
_ _ _ _	$q_2$	#	11\$1111
_ _ _ _ _	$q_7$	1	1\$1111
_ _ _ _ _ _ _	$q_7$	\$	1111
_ _ _ _ _ _ _ _ _	acc	1	111

## שיעור 2

### מודלים חשובים שקולית

#### הגדרה 2.1 מודל חשובי

מודל חשובי הוא אוסף של מכונות טיורינג שעבורן מוגדרים המושגים של הכרעה וקבלה של שפות.

#### הגדרה 2.2 מודלים שקולים חשובית

יהיו  $A$  ו- $B$  מודלים חשוביים. אומרים כי  $A$  ו- $B$  שקולים אם לכל שפה  $L$  התנאים הבאים מתקיימים:

(1) קיימת מ"ט במודל  $A$  שמכריעה את  $L$  אם"ם קיימת מ"ט במודל  $B$  שמכריעה את  $L$ .

(2) קיימת מ"ט במודל  $A$  שמקבלת את  $L$  אם"ם קיימת מ"ט במודל  $B$  שמקבלת את  $L$ .

#### דוגמה 2.1

**נסמן ב- $T$  את מודל מכונת הטיורינג הבסיסי.**

במודל זה בכל צעד ניתן לזוז ימינה או שמאלה. אך לא ניתן להישאר במקום, באותה המשבצת בסרט. במודל זה, הסרט הוא אינסופי לשני הכיוונים. בתחילת החישוב הראש נמצא בתחילת הקלט.

**נסמן ב- $O$  את מודל מכונת הטיורינג עם סרט ימינה בלבד.**

במודל זה בכל צעד ניתן לזוז ימינה או שמאלה. אך לא ניתן להישאר במקום, באותה המשבצת בסרט. במודל זה, הסרט הוא אינסופי לכיוון אחד בלבד - ימינה. בתחילת החישוב, הקלט ממוקם בקצה השמאלי של הסרט והראש נמצא בתחילת הקלט. החישוב מתנהל כמו במכונה במודל  $T$ , למעט כאשר הראש נמצא במשבצת השמאלית ביותר בסרט וצריך לזוז שמאלה - במקרה כזה הראש נשאר במקום ולא זז.

**הוכיחו כי המודל  $T$  והמודל  $O$  שקולים חשובית.**

#### פתרון:

יש להוכיח ש:

• לכל מ"ט במודל  $O$  קיימת מ"ט שקולה במודל  $T$ .

• לכל מ"ט במודל  $T$  קיימת מ"ט שקולה במודל  $O$ .

#### כיוון ראשון

נוכיח כי לכל מ"ט במודל  $O$  קיימת מ"ט שקולה במודל  $T$ . כלומר:

נתונה  $M^O = (Q^O, \Sigma^O, \Gamma^O, \delta^O, q_0^O, acc^O, rej^O)$  במודל  $O$ .

נבנה  $M^T = (Q^T, \Sigma^T, \Gamma^T, \delta^T, q_0^T, acc^T, rej^T)$  שקולה במודל  $T$ .

• רכיבי המ"ט  $M^T$  זהים לאלו של המ"ט  $M^O$ , מלבד מהתכונה שהראש של  $M^O$  לעולם לא זז מעבר לקצה השמאל של הקלט.

• נעבוד רק עם צד ימין של הסרט האינסופי של  $M^T$  ואז  $M^T$  תהיה שקולה ל- $M^O$ .

- כדי לדאוג שהראש של המכונה הדו-כיוונית  $M^T$  לא יזז מעבר לקצה השמאל של הקלט, נוסיף מצבים חדשים וגם מעברים חדשים לפונקציית המעברים של  $M^T$ , שמבטיחים שהראש של  $M^T$  לא יזז מעבר לקצה השמול של הקלט, באופן הבא.
- בתחילת כל חישוב, המכונה  $M^T$  מסמנת את המשבצת מצד שמאל וליד המשבצת הראשונה של הקלט בסימן מיוחד \$.
- נגדיר את הפונקציית המעברים של  $M^T$  כך שכל פעם שהראש מגיע למשבצת המסומנת \$, הראש חוזר ימינה למשבצת הראשונה של הקלט, כמפורט בטבלת המעברים למטה.

לכן, המכונה  $M^T$  השקולה למכונה  $M^O$  היא

$$M^T = (Q^T, \Sigma^T, \Gamma^T, \delta^T, q_0^T, q_{acc}^T, q_{rej}^T),$$

כאשר

$$Q^T = Q^O \cup \{q_0^T, q_\$ \}, \quad \Sigma^T = \Sigma^O, \quad \Gamma^T = \Gamma^O \cup \{\$ \}, \quad q_{acc}^T = q_{acc}^O, \quad q_{rej}^T = q_{rej}^O$$

והפונקציית המעברים מתוארת בטבלה למטה.

תנאי	תזוזה	כתיבה	מצב חדש	סימון	מצב
	$L$	$\Omega$	$q_\$$	$\sigma$	$q_0^T$
	$R$	$\$$	$q_0^O$	$\_$	$q_\$$
$\forall q \in Q^O$	$R$	$\$$	$q$	$\$$	$q$

הוכחנו את הכיוון הראשון:

ראינו מכונה דו-כיוונית השקולה למכונה חד-כיוונית.

כעת נוכיח את הטענה בכיוון הראשון:

נראה מכונה חד-כיוונית השקולה למכונה דו-כיוונית.

### כיוון שני

נוכיח כי לכל מ"ט במודל  $T$  קיימת מ"ט שקולה במודל  $O$ . כלומר:

נתונה  $M^T = (Q^T, \Sigma^T, \Gamma^T, \delta^T, q_0^T, acc^T, rej^T)$  במודל  $T$ .

נבנה  $M^O = (Q^O, \Sigma^O, \Gamma^O, \delta^O, q_0^O, acc^O, rej^O)$  שקולה במודל  $O$ .

- נסמן "קו המפריד" על הסרט של המכונה הדו-כיוונית  $M^T$ .

...	_	a	b	b		b	c	c	a	b	_	...
-----	---	---	---	---	--	---	---	---	---	---	---	-----

- נסמן את המשבצת הראשונה של הסרט של המכונה החד-כיוונית  $M^O$  עם \$.

- כל שאר המשבצות של הסרט של  $M^O$  נחלק לשני חצאים: חצי העליון  $U$  וחצי התחתון  $D$ .

- תוכן הסרט של המכונה הדו-כיוונית  $M^T$  נכתב על סרטה של המכונה החד-כיוונית  $M^O$  כך:

\* החלק של הסרט שמצד שמאל של קו המפריד נכתב בשורה העליונה של סרט  $M^O$  בכיוון הפוך (מימין לשמאל).



\* החלק של הסרט שמצד ימין של קו המפריד נכתב בשורה התחתונה של סרט  $M^O$  בכיוון הרגיל (משמאל לימין).

\$	b	b	a	␣	␣	␣	␣	...
	b	c	c	a	b	␣	␣	...

- \* תזוזה ימינה של  $M^T$  מצד ימין של קו המפריד  $\Leftarrow$  תזוזה ימינה בשורה התחתונה של  $M^O$ .
  - \* תזוזה ימינה של  $M^T$  מצד שמאל של קו המפריד  $\Leftarrow$  תזוזה שמאלה בשורה העליונה של  $M^O$ .
- תזוזה ימינה ב-  $M^T$ :

␣	a →	b →		b →	b →	c →	c →	a →	␣ →
---	-----	-----	--	-----	-----	-----	-----	-----	-----

תזוזה שקולה ב-  $M^O$ :

\$	← b	← b	← a	␣	␣	␣	␣
	b →	c →	c →	a →	b →	␣ →	␣

- \* תזוזה שמאלה של  $M^T$  מצד ימין של קו המפריד  $\Leftarrow$  תזוזה שמאלה בשורה התחתונה של  $M^O$ .
- \* תזוזה שמאלה של  $M^T$  מצד שמאל של קו המפריד  $\Leftarrow$  תזוזה ימינה בשורה העליונה של  $M^O$ .

תזוזה שמאלה ב-  $M^T$ :

␣	a ←	b ←		b ←	b ←	c ←	c ←	a ←	␣ ←
---	-----	-----	--	-----	-----	-----	-----	-----	-----

תזוזה שקולה ב-  $M^O$ :

\$	→ b	→ b	→ a	␣	␣	␣	␣
	b ←	c ←	c ←	a ←	b ←	␣ ←	␣

לכן, המכונה  $M^O$  השקולה למכונה  $M^T$  היא

$$M^O = (Q^O, \Sigma^O, \Gamma^O, \delta^O, q_0^O, q_{acc}^O, q_{rej}^O),$$

נסביר את כל הרכיבים של  $M^O$ :

- לכל מצב  $q \in Q^T$  נגדיר  $q_U$  ו-  $q_D$  של  $Q^O$ , כדי להבחין בין המצבים שבהם הראש נמצא בחלק העליון לבין המצבים שבהם הראש נמצא בחלק התחתון של הסרט.

$$\Sigma^O = \Sigma^T.$$

$$\Gamma^O \subseteq (\Gamma^T \times \Gamma^T) \cup \{\$ \}.$$

$$q_{acc}^O = q_{acc}^T.$$

$$q_{rej}^O = q_{rej}^T.$$

- הפונקציות המעבריים  $\delta^O$  מתוארת בטבלת המעבריים למטה. בטבלה, הסימנים  $\tau, \sigma, \pi \in \Gamma^T$  מסמנים כל תו שבאלפבית  $\Gamma^T$ :

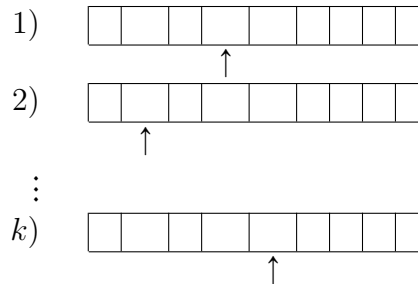
תנאי	תזוזה	כתיבה	מצב חדש	סימון	מצב
אתחול					
$\tau \in \Sigma \cup \{\perp\}$ $\sigma \in \Sigma$	$R$	$\$$	$q_\tau$	$\tau$	$q_0^O$
	$R$	$\perp_\sigma$	$q_\tau$	$\tau$	$q_\sigma$
	$L$	$\perp_\perp$	back	$\perp$	$q.\perp$
	$L$	$\curvearrowright$	$q_{\text{back}}$	$\perp_\tau$	$q_{\text{back}}$
	$R$	$\curvearrowright$	$q_0^T.D$	$\$$	$q_{\text{back}}$
תזוזה מקורית שמאלה					
תזוזה שמאלה: $(q, \sigma) \xrightarrow{M^T} (p, \tau, L)$	$L$	$\pi_\tau$	$p_D$	$\pi$	$q_D$
	$R$	$\tau_\pi$	$p_U$	$\sigma$	$q_U$
תזוזה שמאלה: $(q, \perp) \xrightarrow{M^T} (p, \tau, L)$	$L$	$\perp_\tau$	$p_D$	$\perp$	$q_D$
	$R$	$\tau_\perp$	$p_U$	$\perp$	$q_U$
תזוזה מקורית ימינה					
תזוזה ימינה: $(q, \sigma) \xrightarrow{M^T} (p, \tau, R)$	$R$	$\pi_\tau$	$p_D$	$\pi$	$q_D$
	$L$	$\tau_\pi$	$p_U$	$\sigma$	$q_U$
תזוזה ימינה: $(q, \perp) \xrightarrow{M^T} (p, \tau, R)$	$R$	$\perp_\tau$	$p_D$	$\perp$	$q_D$
	$L$	$\tau_\perp$	$p_U$	$\perp$	$q_U$
פגיעה בקצה					
	$R$	$\curvearrowright$	$q_U$	$\$$	$q_D$
	$R$	$\curvearrowright$	$q_D$	$\$$	$q_U$
כל השאר עוברים ל-rej					

## שיעור 3

### מכונות טיורינג מרובת סרטים

#### 3.1 מכונת טיורינג מרובת סרטים: הגדרה היוריסטית

מכונת טיורינג מרובת סרטים (מטמ"ס) היא הכללה של מ"ט עם סרט יחיד. ההבדל הוא שלמטמ"ס ישנו מספר סופי של סרטים, נניח  $k > 1$  סרטים.



- לכל סרט יש ראש שלו.
- בתחילת העבודה הקלט  $w$  כתוב בתחילת הסרט הראשון וכל שאר הסרטים ריקים. הראשים בכל סרט מצביעים על התא הראשון בסרט, והמכונה נמצאת במצב התחלתי  $q_0$ .
- בכל צעד חישוב, לפי המצב הנוכחי ול- $k$  התווים שמתחת ל- $k$  הראשים, המכונה מחליטה לאיזה מצב לעבור, מה לכתוב מתחת לכל אחד מ- $k$  הראשים ולאיזי את הראש בכל אחד מ- $k$  סרטים.
- הראשים של הסרטים יכולים לזוז באופן בלתי-תלוי בהתאם לפונקצית המעברים של המטמ"ס.

#### 3.2 מכונת טיורינג מרובת סרטים: הגדרה פורמלית

##### 3.1 מכונת טיורינג מרובת סרטים

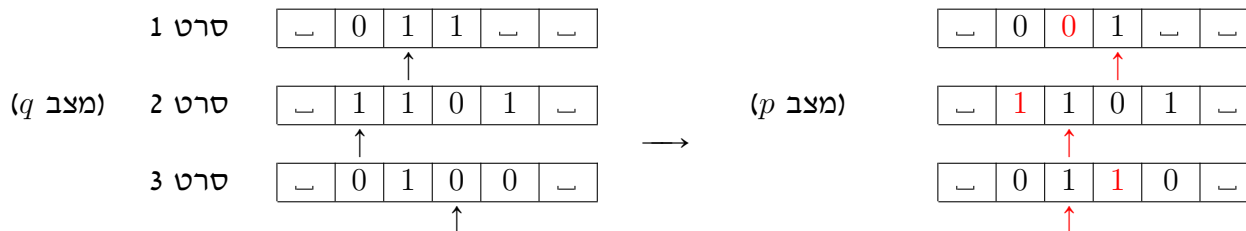
מכונת טיורינג מרובת סרטים היא שביעייה:

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta_k, q_0, q_{acc}, q_{rej})$$

כאשר  $Q, \Sigma, \Gamma, q_0, q_{acc}, q_{rej}$  מוגדרים כמו מ"ט עם סרט יחיד (ראו הגדרה 1.2). ההבדל היחיד בין מ"ט עם סרט יחיד לבין מטמ"ס הוא הפונקצית המעברים. עבור מטמ"ס הפונקצית המעברים היא מצורה הבאה:

$$\delta_k : (Q \setminus \{q_{acc}, q_{rej}\}) \times \Gamma^k \rightarrow Q \times \Gamma^k \times \{L, R, S\}^k$$

### 3.1 דוגמה



$$\delta_k \left( q, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = \left( p, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} R \\ R \\ L \end{pmatrix} \right).$$

## 3.3 קונפיגורציה של מטמ"ס

הכללה של קונפיגורציה של מטמ"ס עם סרט יחיד:

$$\begin{pmatrix} u_1 q & v_1 \\ u_2 q & v_2 \\ \vdots \\ u_k q & v_k \end{pmatrix}$$

### 3.2 דוגמה

בנו מטמ"ס שמכריעה את השפה:

$$L_{w^R} = \{ w = \{a, b\}^* \mid w = w^R \}.$$

כלומר שפת הפלינדרומים.

### פתרון:

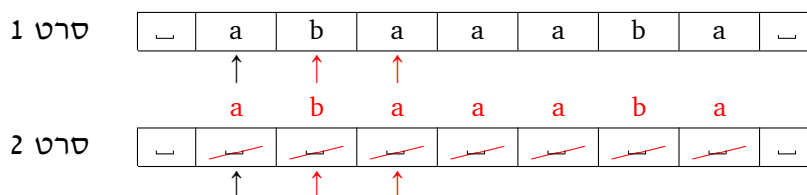
נבנה מטמ"ס עם שני סרטים:

תאור המכונה:

נסמן  $M_2$  המ"ט עם 2 סרטים שמכריעה את השפה  $L_{w^R}$ .

$M_2 =$  על הקלט  $w$ :

(1) מעתיקה את  $w$  לסרט 2.



(2) מזיזה את הראש בסרט 1 לתו הראשון ב-  $w$  ואת הראש בסרט 2 לתו האחרון ב-  $w$ .

(3) משווה בין התווים שמתחת לראשים:

- אם התו שמתחת לראש בסרט 1 הוא  $\_$   
 $\text{acc} \leftarrow$
- אם התווים שמתחת לראשים שונים  $\leftarrow \text{rej}$ .
- אחרת מזיזה את הראש בסרט 1 ימינה ואת הראש בסרט 2 שמאלה, וחוזרת לשלב (3).

הפונקציה המעברים של  $M_2$  היא:

$$\begin{aligned}\delta\left(q_0, \begin{pmatrix} a \\ \_ \end{pmatrix}\right) &= \left(q_0, \begin{pmatrix} a \\ a \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} R \\ R \end{pmatrix}\right), \\ \delta\left(q_0, \begin{pmatrix} b \\ \_ \end{pmatrix}\right) &= \left(q_0, \begin{pmatrix} b \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} R \\ R \end{pmatrix}\right), \\ \delta\left(q_0, \begin{pmatrix} \_ \\ \_ \end{pmatrix}\right) &= \left(q_{\text{back}}, \begin{pmatrix} \_ \\ \_ \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} L \\ S \end{pmatrix}\right), \\ \delta\left(q_0, \begin{pmatrix} \_ \\ \_ \end{pmatrix}\right) &= \left(q_{\text{back}}, \begin{pmatrix} \_ \\ \_ \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} L \\ S \end{pmatrix}\right), \\ \delta\left(q_{\text{back}}, \begin{pmatrix} \_ \\ \_ \end{pmatrix}\right) &= \left(q_{\text{check}}, \begin{pmatrix} \_ \\ \_ \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} R \\ S \end{pmatrix}\right), \\ \delta\left(q_{\text{check}}, \begin{pmatrix} \sigma \\ \sigma \end{pmatrix}\right) &= \left(q_{\text{check}}, \begin{pmatrix} \sigma \\ \sigma \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} R \\ L \end{pmatrix}\right), \\ \delta\left(q_{\text{check}}, \begin{pmatrix} \sigma \\ \tau \end{pmatrix}\right) &= \left(q_{\text{rej}}, \begin{pmatrix} \sigma \\ \tau \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} S \\ S \end{pmatrix}\right), \\ \delta\left(q_{\text{check}}, \begin{pmatrix} \_ \\ \_ \end{pmatrix}\right) &= \left(q_{\text{acc}}, \begin{pmatrix} \_ \\ \_ \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} S \\ S \end{pmatrix}\right).\end{aligned}$$

נשים לב כי הסיבוכיות זמן של המכונה עם שני סרטים,  $M_2$  היא  $O(|w|)$ , כאשר  $w$  האורך של המילה.

כעת נבנה מ"ט עם סרט יחיד שמכריעה את השפה  $L_{WR}$ .

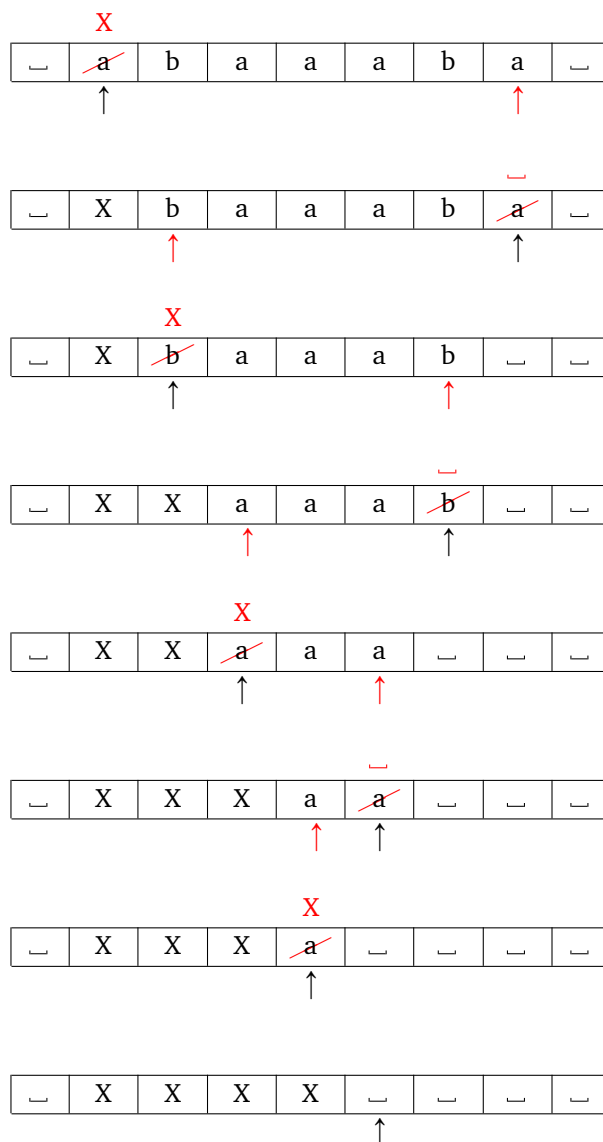
תאור המכונה:

נסמן  $M_1$  המכונה עם סרט יחיד שמכריעה את השפה  $L_{wR}$ .

$M_1 =$  על הקלט  $w$ :

- (1) אם התו שמתחת לראש הוא  $\_$  אז  $M_1 \leftarrow \text{acc}$ .
  - (2) זוכרת את התו שמתחת לראש ומוחקת אותו ע"י  $X$ .
  - (3) מזיזה את הראש ימינה עד התו הראשון משמאל ל-  $\_$ .
- אם התו שמתחת לראש הוא  $X \leftarrow \text{acc}$ .

- אם התו שונה מהתו שזכרנו  $\Leftarrow \text{rej}$ .
- מוחקת את התו שמתחת לראש ע"י  $\_$ , מזיזה את הראש שמאולה עד התו הראשון מימין ל-  $X$  וחוזרת לשלב (1).



### 3.4 שקילות בין מטמ"ס למ"ט עם סרט יחיד

מ"ט עם סרט יחיד היא מקרה פרטי של מטמ"ס.

#### משפט 3.1 שקילות בין מטמ"ס למ"ט עם סרט יחיד

לכל מטמ"ס  $M$  קיימת מ"ט עם סרט יחיד  $M'$  השקולה ל-  $M$ .

כלומר, לכל קלט  $w \in \Sigma^*$ :

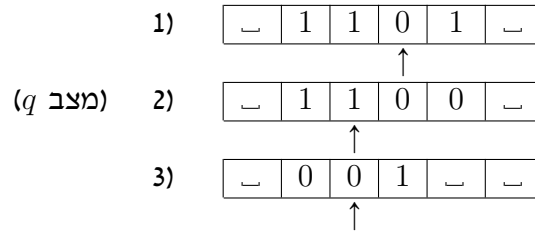
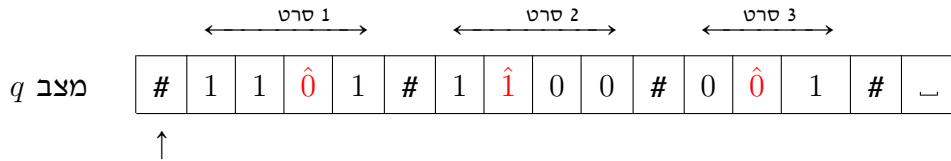
- אם  $M$  מקבלת את  $w \Leftarrow M'$  מקבלת את  $w$ .
- אם  $M$  דוחה את  $w \Leftarrow M'$  דוחה את  $w$ .
- אם  $M$  לא עוצרת על  $w \Leftarrow M'$  לא עוצרת על  $w$ .

הוכחה:

בהינתן מטמ"ס  $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta_k, q_0, q_{acc}, q_{rej})$  עם  $k$  סרטים, נבנה מטמ"ס עם סרט יחיד  $M' = (Q', \Sigma, \Gamma', \delta', q'_0, q'_{acc}, q'_{rej})$  השקולה ל- $M$  באופן הבא:

רעיון הבנייה:

בהינתן קלט  $w \in \Sigma^*$ ,  $M'$  תבצע "סימולציה" של ריצה  $M$  על  $w$ .

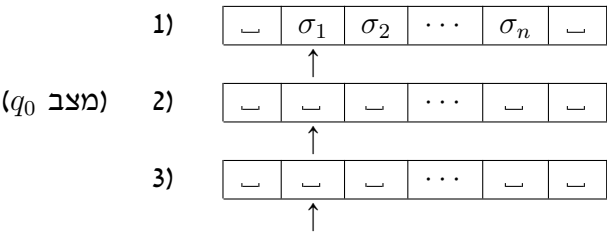
ב- $M$ ב- $M'$ 

- $M'$  תשמור את התוכן של  $k$  הסרטים של  $M$  על הסרט, רק שהתוכן של סרט  $i$  יופיע בין  $\#_i$  ל- $\#_{i+1}$ .
- $M'$  תשמור את המיקום של הראשים של  $M$  ע"י הכפלת הא"ב  $\Gamma$ .
- כלומר, לכל אות  $\alpha \in \Gamma$ ,  $M'$  תשמור שתי אותיות  $\alpha$  ו- $\hat{\alpha}$  ב- $\Gamma'$ , כך ש- $\hat{\alpha}$  תסמן את התו שמתחת לראש בכל סרט.
- בכל צעד חישוב,  $M'$  סורקת את הסרט שלה משמאל לימין כדי ללמוד מהם התווים שמתחת לראשים (התווים שמסומנים ב- $\hat{\alpha}$ ).
- $M'$  משתמשת בפונקצית המעברים  $\delta_k$  של  $M$  כדי לחשב את המעבר הבא.
- $M'$  סורקת את הסרט שלה משמאל לימין כדי לעדכן את הסרטים ואת המיקום הראשים בהם.

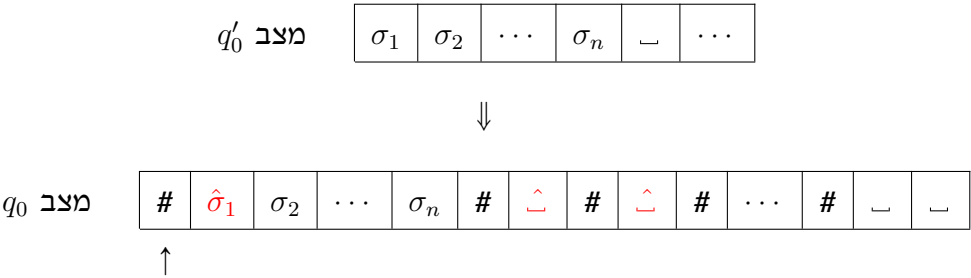
תאור הבנייה של  $M'$ **(1) שלב האיתחול**

בהינתן קלט  $w = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_n$ ,  $M'$  מאתחלת את הקונפיגורציה ההתחלתית של  $M$  על הסרט שלה.

ב-  $M$

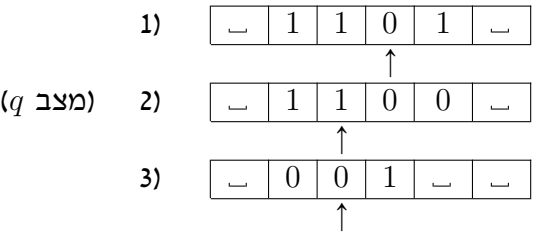


ב-  $M'$

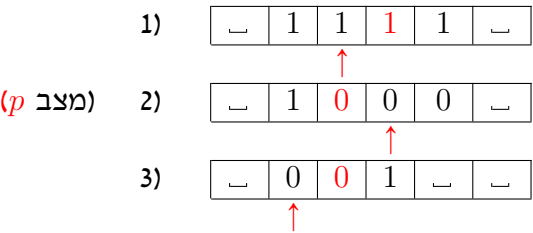


(2) תאור צעד חישוב של  $M$

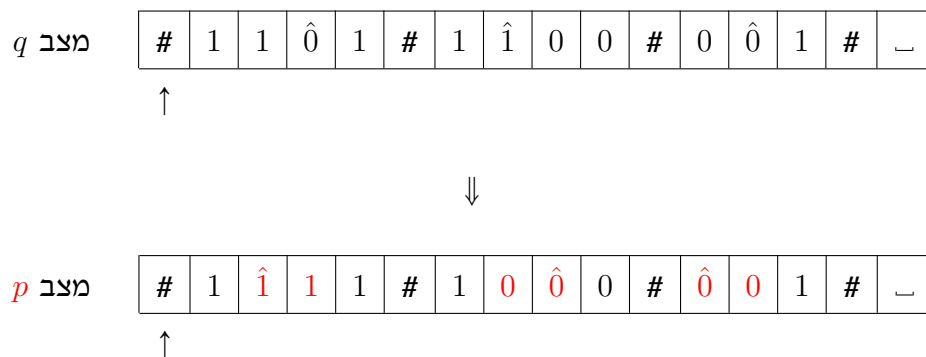
ב-  $M$



$$\delta_k \left( q, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = \left( p, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} L \\ R \\ L \end{pmatrix} \right)$$





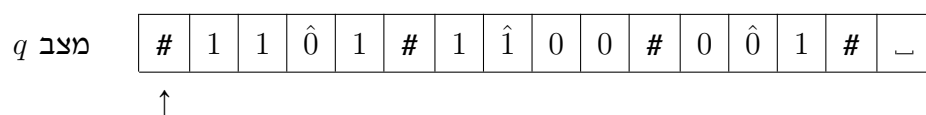
$M'$  -ב

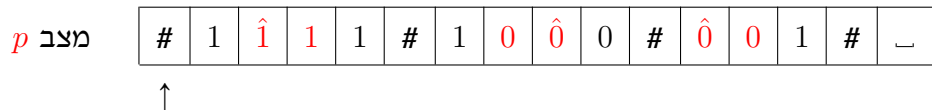
- איסוף מידע
- $M'$  סורקת את הסרט שלה משמאל לימין ומזהה את התווים שמסומנים ב-  $\hat{\alpha}$ . מידע זה ניתן לשמור במצבים. לדוגמה:

$$q, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

זה אפשרי מכיוון שמספר המצבים הנדרש הוא סופי:

$$|Q| \times |\Gamma|^k \quad .$$





$M'$  סורקת את הסרט שלה פעם נוספת כדי לפעול על פי פונקצית המעברים, כלומר, לעדכן את התאים שמתחת לראשים ולעדכן את מיקום הראשים.

## שיעור 4

### מכונת טיורינג אי-דטרמיניסטית

#### 4.1 הגדרה של מכונת טיורינג אי-דטרמיניסטית

##### 4.1 מכונת טיורינג אי-דטרמיניסטית

מכונת טיורינג אי-דטרמיניסטית (מ"ט א"ד) היא שביעייה

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, \Delta, q_0, q_{acc}, q_{rej})$$

כאשר  $Q, \Sigma, \Gamma, q_0, q_{acc}, q_{rej}$  מוגדרים כמו במ"ט דטרמיניסטי (ראו הגדרה 1.2).

$\Delta$  היא פונקצית המעברים

$$\Delta : (Q \setminus \{q_{acc}, q_{rej}\}) \times \Gamma \rightarrow P(Q \times \Gamma \times \{L, R, S\}) .$$

$$\Delta(q, a) = \{(q_1, a, S), (q_2, b, L), \dots\} .$$

כלומר, לכל זוג  $q \in Q, a \in \Gamma$  ייתכן מספר מעברים אפשריים, 0, 1 או יותר.

- קונפיגורציה של מ"ט א"ד זהה לקונפיגורציה של מ"ט דטרמיניסטית.

- לכל קונפיגורציה ייתכן מספר קונפיגורציות עוקבות.

- לכל מילה  $w \in \Sigma^*$  ייתכן מספר ריצות שונות:

- \* ריצות שמגיעות ל-  $q_{acc}$ .

- \* ריצות שמגיעות ל-  $q_{rej}$ .

- \* ריצות שלא עוצרות.

- \* ריצות שנתקעות.

##### 4.2 הגדרה

מילה  $w \in \Sigma^*$  מתקבלת במ"ט א"ד  $M$  אם קיימת לפחות ריצה אחת שמגיעה ל-  $q_{acc}$ .

השפה של מ"ט א"ד  $M$  היא

$$L(M) = \{w \in \Sigma^* \mid \exists u, v \in \Gamma^* : q_0 w \vdash_* u q_{acc} v\}$$

כלומר,

$w \in L(M)$  אם קיימת ריצה אחת שבה  $M$  מקבלת את  $w$ .

$w \notin L(M)$  אם בכל ריצה של  $M$  על  $w$ ,  $M$  דוחה או לא עוצרת, או נתקעת.

**הגדרה 4.3 מ"ט א"ד המכריעה שפה  $L$** 

תהי  $M$  מ"ט א"ד.  
אומרים כי מ"ט א"ד  $M$  מכריעה שפה  $L$  אם לכל  $w \in \Sigma^*$ :

• אם  $w \in L$  אז  $M$  מקבלת את  $w$ .

• אם  $w \notin L$  אז  $M$  דוחה את  $w$ .

**הגדרה 4.4 מ"ט א"ד המקבלת שפה  $L$** 

תהי  $M$  מ"ט א"ד.  
אומרים כי מ"ט א"ד  $M$  מקבלת שפה  $L$  אם לכל  $w \in \Sigma^*$ :

• אם  $w \in L$  אז  $M$  מקבלת את  $w$ .

• אם  $w \notin L$  אז  $M$  דוחה את  $w$  או  $M$  לא עוצרת על  $w$ .

**דוגמה 4.1**

נתונה השפה

$$L = \{1^n \mid n \text{ אינו ראשוני}\}, \quad \Sigma = \{1\}.$$

בנו מ"ט המכריעה את השפה  $L$ .

**פתרון:**הרעיון

נבנה מ"ט א"ד  $N$  המכריעה את  $L$ .

$N$  תבחר באופן א"ד מספר  $1 < t < n$  ותבדוק האם  $t$  מחלק את  $n$ .

	$n$								
סרט 1	$\sqcup$	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	...
	$t$								
סרט 2	$\sqcup$	1	1	1	$\sqcup$	...			

תאור הבניה

$N$  = על קלט  $w = 1^n$

**שלב 1)**

•  $N$  בוחרת באופן א"ד מספר  $1 < t < n$ .

• מעתיקה את  $w$  לסרט 2.

• עוברת על העותק משמאל לימין, ובכל תא מחליטה באופן א"ד האם להשאיר את ה-1 או למחוק אותו ע"י  $X$  (לדאוג שהמספר שנבחר הוא לא 1 ולא  $n$ ).

- בסוף המעבר המספר  $t$  שנבחר הוא כמות ה-1 ים שלא נמחקו.

סרט 1 

␣	1	1	1	1	...	1	1	␣	...
---	---	---	---	---	-----	---	---	---	-----

סרט 2 

␣	1	<del>1</del>	<del>1</del>	1	...	<del>1</del>	1	␣	...
---	---	--------------	--------------	---	-----	--------------	---	---	-----

**שלב 2**  $N$  בודקת האם  $t$  שנבחר מחלק את  $n$ .

- אם כן  $N \Leftarrow$  מקבלת.

- אם לא  $N \Leftarrow$  דוחה.

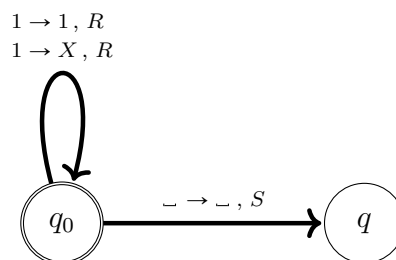
## 4.2 עץ החישוב של מ"ט א"ד

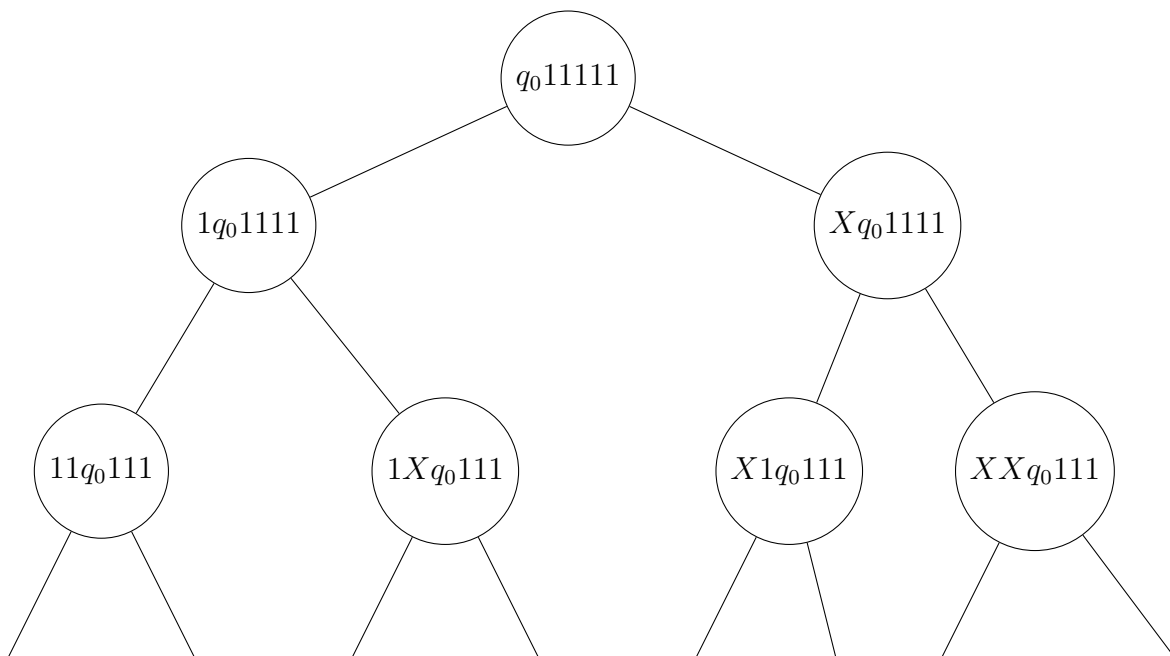
### הגדרה 4.5 עץ החישוב של מ"ט א"ד

בהינתן מ"ט א"ד  $M$  ומילה  $w \in \Sigma^*$ , עץ החישוב של  $M$  ו- $w$  הוא עץ מושרש שבו:

- (1) כל קדקוד בעץ מתאר קונפיגורציה בחישוב של  $M$  על  $w$ .
- (2) שורש העץ מתאר את הקונפיגורציה ההתחלתית  $q_0 w$ .
- (3) לכל קדקוד  $v$  בעץ הבנים של  $v$  הם כל הקדקודים הנובעים מהקונפיגורציה המתוארת ע"י  $v$ .

### דוגמה 4.2





### 4.3 שקילות בין מ"ט א"ד למ"ט דטרמיניסטית

#### משפט 4.1 שקילות בין מ"ט א"ד למ"ט דטרמיניסטית ב- $RE$

לכל מ"ט א"ד  $N$  קיימת מ"ט דטרמיניסטית  $D$  כך ש-

$$L(N) = L(D) .$$

כלומר לכל  $w \in \Sigma^*$ :

- אם  $N$  מקבלת את  $w \Leftarrow D$  תקבל את  $w$ .
- אם  $N$  לא מקבלת את  $w \Leftarrow D$  לא תקבל את  $w$ .

**הוכחה:** בהינתן מ"ט א"ד  $N$  נבנה מ"ט דטרמיניסטית  $D$  ונוכיח כי

$$L(N) = L(D) .$$

רעיון ההוכחה

בהינתן קלט  $w \in \Sigma^*$ ,  $D$  תבצע ריצה של כל החישובים האפשריים של  $N$  על  $w$ , ואם אחד החישובים מסתיים ב-  $q_{acc}$  אזי  $D$  תעצור ותקבל.

מכיוון שייטכנו חישובים אינסופיים, לא נוכל לסרוק את עץ החישוב לעומק. במקום זה נסרוק את העץ לרוחב. כלומר, נבדוק את כל החישובים באורך 1, ואחרי זה נבדוק את כל החישובים באורך 2, וכן הלאה. אם אחד החישובים הסתיים ב-  $q_{acc}$ , אזי  $D$  תעצור ותקבל.

תאור הבניה

מכיוון שלכל  $q \in Q$  ולכל  $\alpha \in \Gamma$ :

$$\Delta(q, \alpha) \subseteq Q \times \Gamma \times \{L, R, S\}.$$

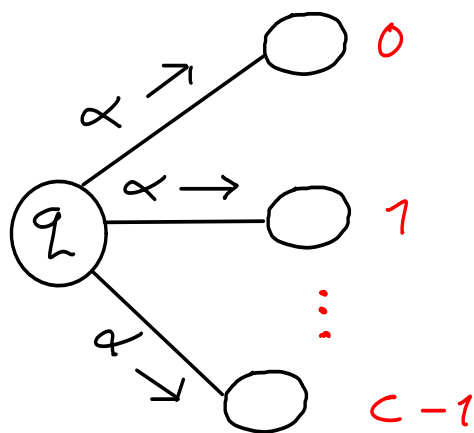
אזי

$$|\Delta(q, \alpha)| \leq |Q| \cdot |\Gamma| \cdot |\{L, R, S\}| = 3|Q| \cdot |\Gamma|.$$

נסמן:

$$C = 3|Q| \cdot |\Gamma|.$$

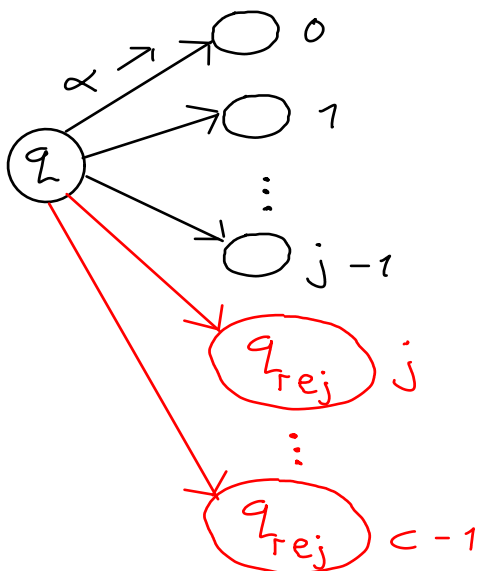
- לכל מצב  $q \in Q$  ולכל אות  $\alpha \in \Gamma$  נמספר את המעברים ב-  $\Delta(q, \alpha)$  שרירותית  $\{0, 1, 2, \dots, C-1\}$ .



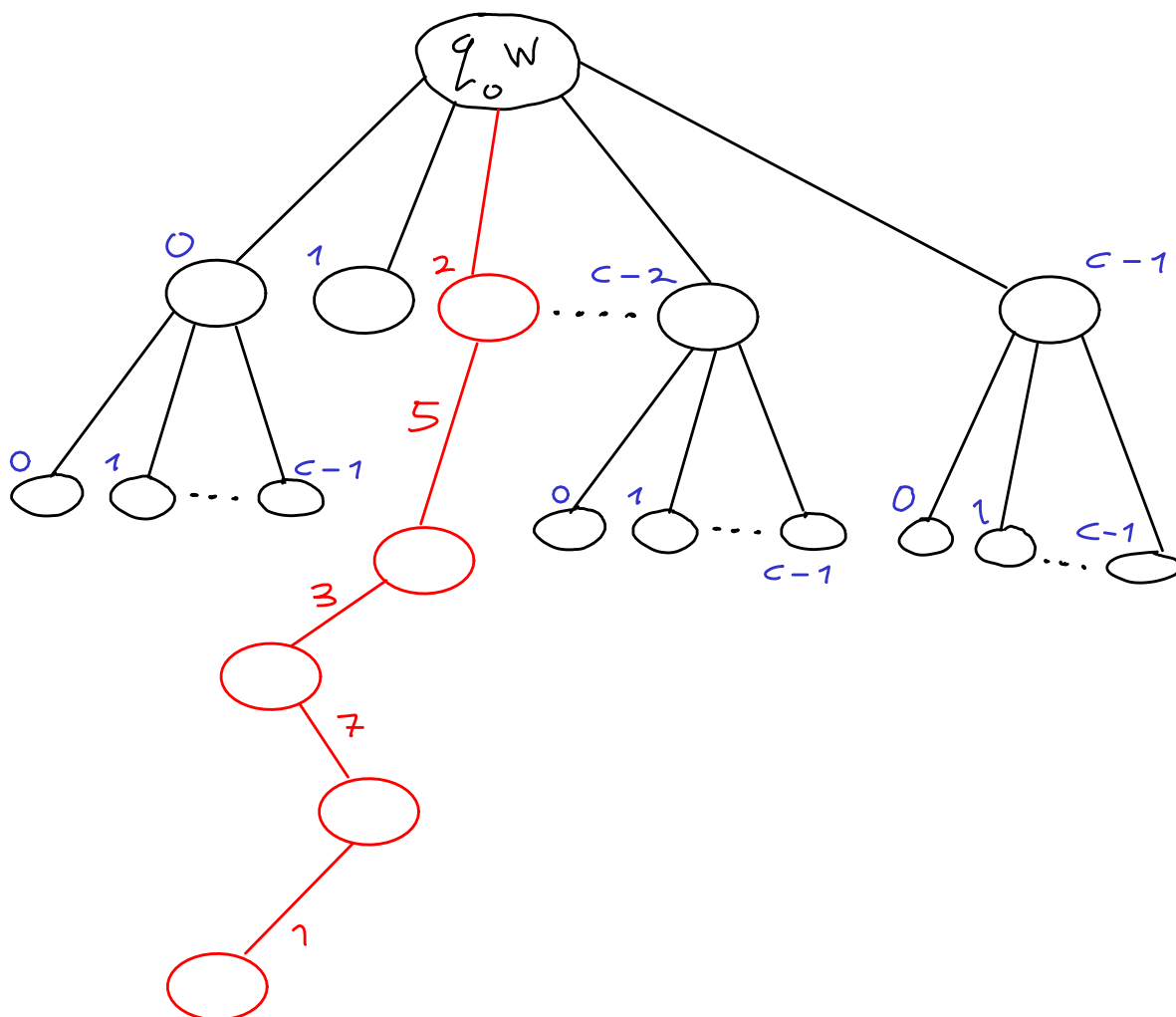
- אם  $|\Delta(q, \alpha)| = j < C$ ,

אזי לכל  $j \leq k \leq C-1$

נקבע  $k = (q_{rej}, \alpha, S)$ .



- נשים לב כי שינוי זה לא משנה את השפה של  $N$ .



קידום לקסיקוגרפי:

0	00	10	...	$(C-1)0$	000	
1	01	11	...	$(C-1)1$	001	
2	02	12	...	$(C-1)2$	002	...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	$\vdots$	
$C-1$	$0(C-1)$	$1(C-1)$	...	$(C-1)(C-1)$	$00(C-1)$	

הבניה של  $D$

$D$  מכילה 3 סרטים:



				$n$					
סרט 1	␣	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	...
				$t$					
סרט 2	␣	1	1	1	␣				...
סרט 3	␣	1	1	1	␣				...

$D = \text{"על קלט } w$ :

(1) מאתחלת את המחרוזת בסרט 3 ל-0.

(2) מעתיקה את  $w$  לסרט 2.

(3) מריצה את  $N$  על  $w$  לפי המחרוזת בסרט 3.

• אם  $N$  קיבלה את  $w \Leftarrow D$  עוצרת ומקבלת.

• אחרת,  $D$  מוחקת את סרט 2, מקדמת את המחרוזת בסרט 3 לקסיקוגרפית וחוזרת לשלב (2).  
"



## שיעור 5

### התזה של צרף טיורינג ודקדוקים כלליים

#### 5.1 היחס בין הכרעה וקבלה

**משפט 5.1 כל שפה כריעה היא גם קבילה**

כל שפה כריעה היא גם קבילה.

■ **הוכחה:** המכונה טיורינג שמכריעה את  $L$  גם מקבלת אותה. נשאל שאלה. האם כל שפה קבילה היא גם כריעה? זאת שאלה שכרגע אין לנו מספיק כלים לענות עליה. נחזור לשאלה הזו בפרק הבא. לבינתיים נוכיח טענה חלשה יותר.

**משפט 5.2**

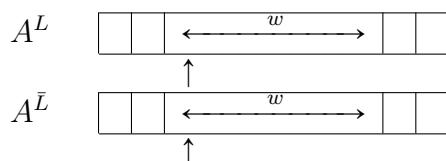
תהי  $L$  שפה.

אם גם  $L$  וגם  $\bar{L}$  קבילות אזי  $L$  כריעה.

**הוכחה:** תהי  $A^L$  מ"ט שמקבלת את  $L$ , ותהי  $A^{\bar{L}}$  מ"ט שמקבלת את  $\bar{L}$ . נבנה מ"ט  $D^L$  שמכריעה את  $L$ .

כיצד תעבוד המ"ט  $D^L$  המכריעה?

- נריץ במקביל את  $A^L$  ואת  $A^{\bar{L}}$ .
- אם  $A^L$  מקבלת את המילה אז נעבור ל-acc.
- אם  $A^{\bar{L}}$  מקבלת את המילה אז נעבור ל-rej.



- הסימולציה מתבצעת ע"י סימלוץ צעד צעד.

\* צעד במכונה  $A^L$ .

\* צעד במכונה  $A^{\bar{L}}$ .

- נמשיך בסימולציה המקבילית עד שאחת המכונות מגיעה למצב acc.

\* אם  $A^L$  מקבלת  $\leftarrow \text{acc}$ .

\* אם  $A^{\bar{L}}$  מקבלת  $\leftarrow \text{rej}$ .

- לא יכול להיות מצב כי אף אחת מהמכונות לא מגיעה למצב acc כי כל מחרוזת  $w \in L$  או  $w \in \bar{L}$ .

## 5.2 שקילות של מכונת טיורינג ותוכנית מחשב

- מכונת טיורינג היא מודל חישובי למחשב.

- מחשב = תוכנית מחשב.

- תוכנית משחב כתובה בשפת תכנות, למשל

\* ג'אווה

\* פייתון

\* C

\* SIMPLE

- המרכיבים של שפת תכנות הם

\* משתנים

\* פעולות

\* תנאים

\* זרימה

נוכיח כי מכונת טיורינג ותוכנית משחב שקולים חישובי.

## 5.3 SIMPLE

### משתנים

- טבעיים:

$i, j, k, \dots$

מקבלים כערך מספר טבעי.

- אתחול: הקלט נמצא בתאים הראשונים של  $A[]$

כל שאר המשתנים מאותחלים ל-0.

### פעולות

- השמה בקבוע:

$i = 3, B[i] = "\#"$

- השמה בין משתנים:

$i = k, A[k] = B[i]$

## • פעולות חשבון:

$$x = y + z, \quad x = y - z, \quad x = y \cdot z$$
תנאים•  $B[i] == A[j]$  (מערכים).•  $x \geq y$  (משתנים טבעיים).זרימה

• סדרה פקודות ממוספרות.

• goto : מותנה ולא מותנה.

• stop : עצירה עם ערך חזרה.

```

one = 1
zero = 0
B[zero] = "0"
i=0
j=i
if A[i] == B[zero] goto 9
i=j + one
goto 3
C[one] = A[j]
if C[one] == A[zero] goto 12
stop(0)
stop(1)

```

כעת נגדיר את מושגי הקבלה והדחייה של מילים בשפה SIMPLE, ונגדיר את מושגי הכרעה והקבלה של שפות בשפה SIMPLE.

**הגדרה 5.1 קבלה ודחייה של מחרוזת בשפה SIMPLE**

עבור קלט  $w$  ותוכנית  $P$  בשפת SIMPLE. אומרים כי

- $P$  **מקבלת** את  $w$  אם הריצה של  $P$  על  $w$  עוצרת עם ערך חזרה 1.
- $P$  **דוחה** את  $w$  אם הריצה של  $P$  על  $w$  עוצרת עם ערך חזרה 0.

**הגדרה 5.2 הכרעה וקבלה של מחרוזת בשפה SIMPLE**

עבור שפה  $L$  ותוכנית  $P$  בשפת SIMPLE. אומרים כי

- $P$  **מכריעה** את  $L$  אם היא מקבלת את המילים שב-  $L$  ודוחה את אלה שלא ב-  $L$ .
- $P$  **מקבלת** את  $L$  אם היא מקבלת את כל ורק המילים ב-  $L$ .

**משפט 5.3**

המודלים של מכונת טיורינג ותוכניות SIMPLE שקולים.

**הוכחה:**כיוון ראשון: $\forall M \exists P$  . שקולה .

במילים, לכל מ"ט  $M$  קיימת תוכנית  $P$  שקולה.  
 נבצע סימולציה של מ"ט  $M$  במשחב  $P$  .

בלי להכנס, לפרטים די ברור שבשפה, עילית כגון ג'אוה, ניתן להגדיר מבני נתונים עבור כל מרכיבי מכונת טיורינג:

- הסרט.
- המצבים.
- מיקום הראש.
- טבלת המעברים.

וברור שניתן לבצע סימולציה של פעילות המכונה.  
 ואם ניתן לעשות זאת בשפה עילית, ניתן לעשות זאת גם בשפת SIMPLE.

כיוון שני: $\forall P \exists M$  . שקולה .

במילים, לכל תוכנית  $P$  בשפה SIMPLE קיימת מ"ט שקולה.

אנחנו צריכים להראות כיצד ניתן לממש את הרכיבים השונים של תוכניות SIMPLE במ"ט.

הרכיבים הם:

- משתנים.
- פעולות.
- תנאים.
- זרימה.

משתנים

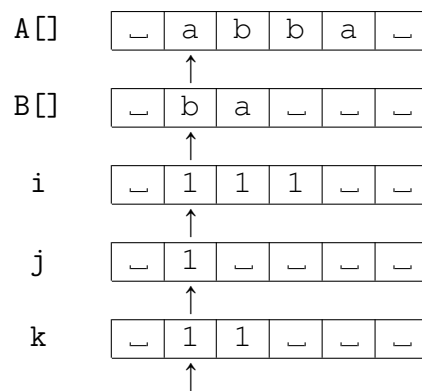
לכל משתנה יהיה סרט משלו.  
 המספר שהמשתנה יחזיק ייוצג בבסיס אונרי.  
 בהתחלה הסרט יהיה רק עם רווחים, זה מייצג את המספר אפס בבסיס אונרי.

לכל מערך יהיה סרט משלו.  
 בכל תא בסרט המערך תהיה אות.  
 בהתחלה כל המערכים יהיו מאופסים למעט הסרט הראשון, שיחזיק את הקלט.

למשל ההשמה הבאה של משתנים בשפה SIMPLE:

$A[1] = a, A[2] = b, A[3] = b, A[4] = a$   
 $B[1] = b, B[2] = a$   
 $i = 3$   
 $j = 1$   
 $k = 2$

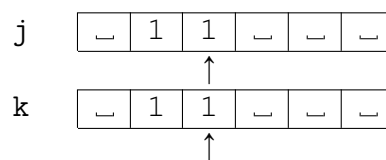
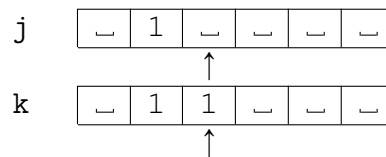
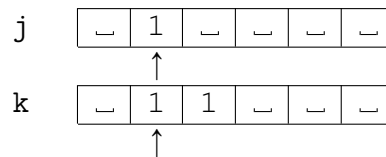
ניתן לממש במ"ט על ידי לכתוב על סרטים, שרט אחד לכל משתנה:

פעולות

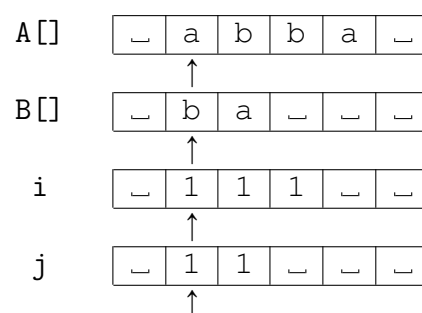
כעת נניח שנשים

$$j = k$$

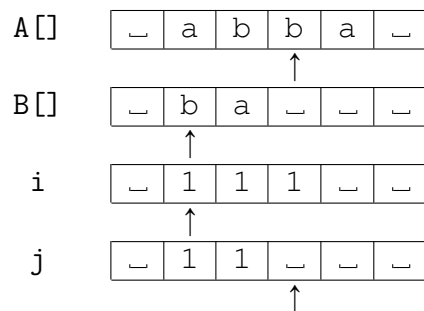
אפשר לממש את ההשמה הזאת על ידי להעתיק את תוכן הסרט של המשתנה k לסרט של המשתנה j.

כעת נניח שנשים  $B[i]=A[j]$  ז"א  $B[3]=A[2]$ .

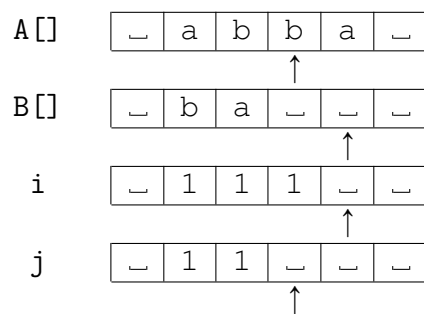
נממש זה במ"ט ע"י להעתיק את תוכן משבצת 2 בסרט של A[] למשבצת 3 בסרט של B[].

**שלב 1)**

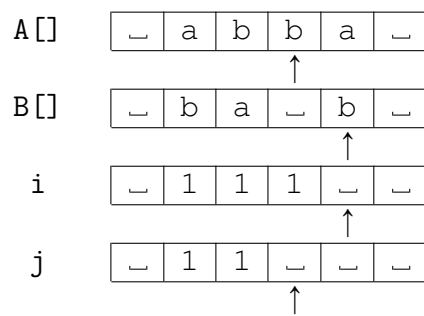
(שלב 2)



(שלב 3)



(שלב 4)



נניח עכשיו שאנחנו רוצים לשים

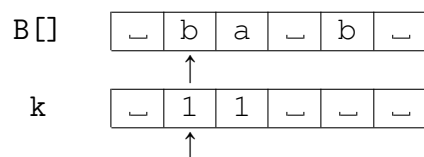
 $B[k] \leftarrow "a"$ 

ז"א

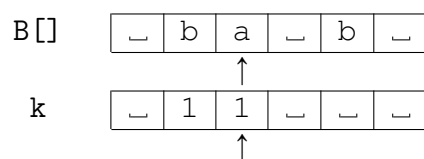
 $B[3] \leftarrow "a"$ 

נממש זה במ"ט ע"י על ידי הפעולות הבאות עם הסרט של B[] והסרט של k.

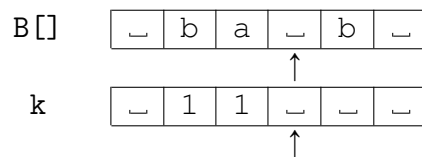
(שלב 1)



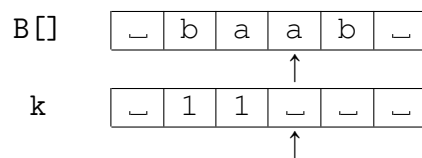
(שלב 2)



שלב 3



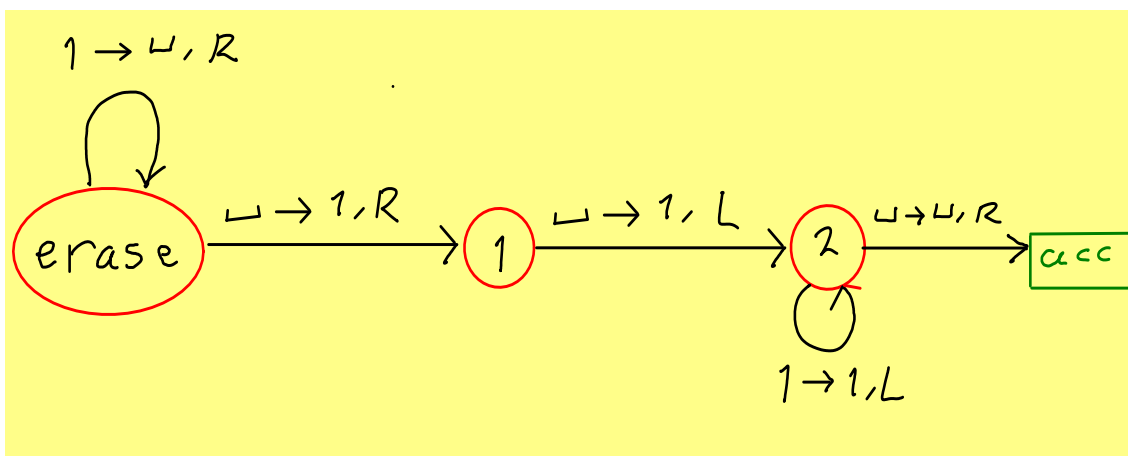
שלב 4



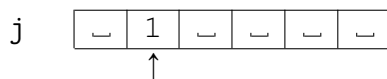
כעת נניח שאנחנו רוצים לשים

j = 2

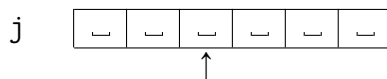
אז נממש זה במ"ט עם הפעולות הבאות:



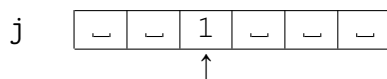
שלב 1



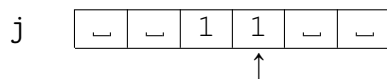
שלב 2



שלב 3

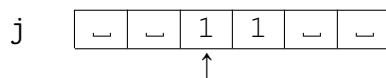


שלב 4

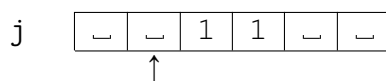




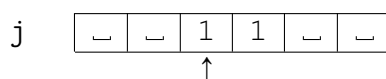
(שלב 5)



(שלב 6)



(שלב 7)

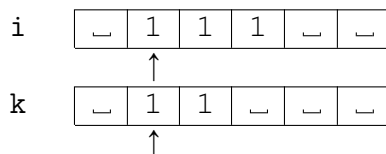
תנאים

נניח שאנחנו רוצים לממש את התנאי

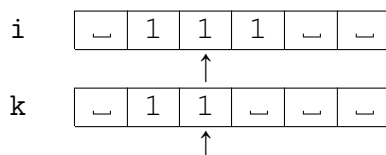
$$i \geq k$$

ניתן לבדוק את התנאי במ"ט על ידי הפעולות הבאות:

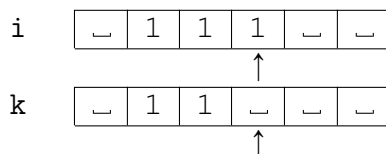
(שלב 1)



(שלב 2)



(שלב 3)



## 5.4 דקדוקים כלליים

**הגדרה 5.3 זקדוקים חסרי קשר**

דקדוק חסר קשר הוא קבוצה

$$(V, \Sigma, R, S)$$

כאשר

- $V$  קבוצה סופית של **משתנים** שמורכב מאותיות גדולות של אלפיבית.
- $\Sigma$  קבוצה סופית של **טרמינלים** שמורכב מאותיות קטנות וסימנים של אלפיבית.
- $R$  קבוצה של כללים. כל כלל הוא מצורה

$$\gamma \rightarrow u$$

כאשר  $\gamma \in V$  משתנה בודד בצד שמאל ו-  $u \in (V \cup \Sigma)^*$  מחרוזת של משתנים וטרמינלים בצד ימין

- $S \in V$  המשתנה ההתחלתי.

**דוגמה 5.1**

נתון הדקדוק חסר קשר:

$$G_1 = (\{A, B\}, \{0, 1, \#\}, R, A)$$

הקבוצת משתנים היא  $V = \{A, B\}$ , הקבוצת טרמינלים היא  $V = \{0, 1, \#\}$ , המשתנה ההתחלתי הוא  $S = A$  והכללים של הדקדוק הם

$$R = \begin{cases} A \rightarrow 0A1 \\ A \rightarrow B \\ B \rightarrow \# \end{cases}$$

**הגדרה 5.4 יצירה של מילה על ידי דקדוק חסר קשר**(1) כתבו את המשתנה ההתחלתי  $S$ .

(2) מצאו משתנה וכלל אשר מתחיל אם משתנה זה, והחליפו אותו עם המחרוזת בצד ימין של הכלל.

(3) חזרו על שלבים 1 ו-2 עד שלא נשאר אף משתנים של  $V$ .**דוגמה 5.2**הדקדוק  $G_1$  יוצר את המחרוזת  $000\#111$ :

$$A \xrightarrow{A \rightarrow 0A1} 0A1 \xrightarrow{A \rightarrow 0A1} 00A11 \xrightarrow{A \rightarrow 0A1} 000A111 \xrightarrow{A \rightarrow B} 00B11 \xrightarrow{B \rightarrow \#} 000\#111$$

**דוגמה 5.3**

נתון את הדקדוק

$$G_2 = (\{S, T, F\}, \{(\cdot), +, \times, a\}, R, S)$$

כאשר הכללים הם

$$R = \begin{cases} S \rightarrow S + T \\ S \rightarrow T \\ T \rightarrow T \times F \\ T \rightarrow F \\ F \rightarrow (S) \\ F \rightarrow a . \end{cases}$$

$G_2$  יוצר את המילה:  $a + a$

$$S \xrightarrow{S \rightarrow S+T} S + T \xrightarrow{SA \rightarrow T} T + T \xrightarrow{T \rightarrow F} F + F \xrightarrow{F \rightarrow a} a + a$$

בדקדוק כללי, גם בצד ימין וגם בצד שמאל יכולה להופיע מחרוזת של משתנים וטרמינלים. פורמלי:

### הגדרה 5.5 זקדוקים כלליים

דקדוק חסר קשר הוא קבוצה

$$(V, \Sigma, R, S)$$

כאשר

- $V$  קבוצה סופית של **משתנים** שמורכב מאותיות גדולות של אלפיבית.
- $\Sigma$  קבוצה סופית של **טרמינלים** שמורכב מאותיות קטנות וסימנים של אלפיבית.
- $R$  קבוצה של כללים. כל כלל הוא מצורה

$$\gamma \rightarrow u$$

כאשר  $\gamma \in (V \cup \Sigma)^+$ ,  $u \in (V \cup \Sigma)^*$ . מחרוזת של משתנים וטרמינלים בצד ימין

- $S \in V$  המשתנה ההתחלתי.

### דוגמה 5.4

נתון את הדקדוק

$$G = (\{S, [, ]\}, \{a\}, R, S)$$

שבו הקבוצת משתנים היא  $V = \{S, [, ]\}$ , הקבוצת טרמינלים היא  $\Sigma = \{a\}$  והכללים הם

$$R = \begin{cases} S \rightarrow [S] \\ S \rightarrow a \\ [a \rightarrow aa[ \\ [] \rightarrow \epsilon . \end{cases}$$

$G$  יוצר את המילה:  $aaaa$

$$\begin{array}{ccccccc} S & \xrightarrow{S \rightarrow [S]} & [S] & \xrightarrow{S \rightarrow [S]} & [[S]] & \xrightarrow{S \rightarrow a} & [[a]] \\ & \xrightarrow{[] \rightarrow \epsilon} & [aa] & \xrightarrow{[a \rightarrow aa[} & aa[a] & \xrightarrow{[a \rightarrow aa[} & aa aa[] \\ & & & & & & \xrightarrow{[] \rightarrow \epsilon} & aaaa \end{array}$$

### דוגמה 5.5

נתון את הדקדוק

$$G = (\{S, [, ]\}, \{a\}, R, S)$$

שבו הקבוצת משתנים היא  $V = \{S, [, ]\}$ , הקבוצת טרמינלים היא  $\Sigma = \{a\}$  והכללים הם

$$R = \begin{cases} S \rightarrow [S] \\ S \rightarrow a \\ [a \rightarrow aa[ \\ [] \rightarrow \varepsilon. \end{cases}$$

מהן המילים שניתן לצור בעזרת הדקדוק הזה, או במילים אחרות: מהי השפה של הדקדוק?

**פתרון:**

תשובה:

$$L(G) = \{a^n \mid n = 2^k, k \geq 1\}.$$

הסבר:

$$\begin{array}{ccccccc} S & \xrightarrow{S \rightarrow [S]} & [S] & \xrightarrow{S \rightarrow [S]} & \dots & \xrightarrow{S \rightarrow [S]} & [^k S]^k \\ & \xrightarrow{S \rightarrow a} & [^k a]^k & & & & \\ & \xrightarrow{[a \rightarrow aa[} & [^{k-1} aa [ ]^k & \xrightarrow{[] \rightarrow \varepsilon} & [^{k-1} aa]^{k-1} & & \\ & \xrightarrow{[a \rightarrow aa[} & [^{k-2} aa [a]^{k-1} & \xrightarrow{[a \rightarrow aa[} & [^{k-2} aaaa [ ]^{k-1} & \xrightarrow{[] \rightarrow \varepsilon} & [^{k-2} aaaa]^{k-2} \\ & & & & \dots & \rightarrow & a^k \end{array}$$

## 5.6 דוגמה

בנו דקדוק כללי אשר יוצר את הפשה

$$L = \{w \in \{a, b\}^* \mid \#a_w = \#b_w\}.$$

**פתרון:**

$$G = (\{S\}, \{a, b\}, R, \{S\})$$

$$S \rightarrow abS, \quad (1)$$

$$ab \rightarrow ba, \quad (2)$$

$$ba \rightarrow ab, \quad (3)$$

$$S \rightarrow \varepsilon. \quad (4)$$

$$S \xrightarrow{1} abS \xrightarrow{1} ababS \xrightarrow{2} baabS \xrightarrow{4} baab$$

שימו לב: בדקדוק כללי אנו מאפשרים גם כלליצירה בהם בצד שמאל יש רק טרמינלים. לכן, יתכן גם שנמשיך ונפתח מחרוזתשכולה טרמינללים. למשל

$$S \xrightarrow{1} abS \xrightarrow{1} ababS \xrightarrow{4} abab \xrightarrow{2} baab$$

נשאל שאלה כללית:

- אלו שפות ניתן לצור בעזרת דקדוק כללי?
- האם יש שפות שלא ניתן לצור בעזרת דקדוק כללי?
- האם יש מודל חישובי שמקבל שפות שנוצרות ע"י דקדוקים כלליים?

## דוגמה 5.7

בנו דקדוק כללי שיוצר את השפה

$$w = \{w \in \{a, b, c\}^* \mid w = a^n b^n c^n\}$$

### פתרון:

נראה דקדוק כללי עבור שפה זו.

שפה זו אינה חסרת הקשר.

לכן, לא ניתן לבנות עבורה דקדוק חסר הקשר.

אנו נבנה לה דקדוק כלל.

נגזור את האותיות  $a, b, c$  יחד.

נעשה זאת בצורה כזו שכדי לסיים את תהליך הגזירה יש לסדר את האותיות בסדר הרצוי:

תחילה  $a$ ,

אחר כך  $b$ ,

ובסוף  $c$ .

$$S \rightarrow S' ] \quad (1)$$

$$S' \rightarrow aS'bC \mid \varepsilon \quad (2)$$

$$Cb \rightarrow bC \quad (3)$$

$$C] \rightarrow ]c \quad (4)$$

$$] \rightarrow \varepsilon \quad (5)$$

$$\begin{array}{llllll} S & \xrightarrow{1} & S' ] & \xrightarrow{2} & aS'bC] & \xrightarrow{2} & aaS'bCbC] & \xrightarrow{2} & aaaS'bCbCbC] \\ & \xrightarrow{3} & aaaS'bbCCbC] & \xrightarrow{3} & aaaS'bbCbCC] & \xrightarrow{3} & aaaS'bbbCCC] & & \\ & \xrightarrow{4} & aaaS'bbbCC]c & \xrightarrow{4} & aaaS'bbbC]cc & \xrightarrow{4} & aaaS'bbb]ccc & & \\ & \xrightarrow{5} & aaaS'bbbccc & \xrightarrow{1} & aaabbbccc & & & & \end{array}$$

## דוגמה 5.8

בנו דקדוק כללי אשר יוצר את שפת המילים

$$L = \{uu \mid u \in \{a, b\}^*\}$$

### פתרון:

דוגמא זאת תמחיש ביצד דקדוק כללי יכול "לפעול בדומה" למכונת טיורינג.

בדקדוק נשתמש במשתנים וכללי גזירה שיאפשרו מעין תנועה על גבי המחרוזת הנגזרת, בדומה לתנועת הראש של מכונת טיורינג על גבי הסרט.

$S \rightarrow [H\{$	כלל גזירה יחיד מהמשתנה ההתחלתי. המשתנה $H$ ידמה את הראש של המ"ט ש"יזוז" מצד לצד על המחרות הנגזרות. הסוגר המרובע $[$ מסמן את הקצה השמאלי של המילה השמאלית. הסוגר המסולסל $\{$ מסמן את הקצה השמאלי של המילה הימינית.	1
$[H \rightarrow [aH_a$	כלל זה מאפשר הוספת אות $a$ לקצה השמאלי של המילה השמאלית. המשתנה $H$ מוחלף במשתנה $H_a$ כדי "לזכור" שיש עכשיו להוסיף גם במחרות הימינית. (בדומה לזיכרונות של מ"ט).	2
$H_a a \rightarrow aH_a$	כלל זה מאפשר לראש "לזוז" ימינה.	3
$H_a \{ \rightarrow H\{a$	כאשר המשתנה $H_a$ "יגיע" לסוגר המסולסל, הוא יגזור אות $a$ נוספת מימין לסוגר, שהוא הקצה השמאלי של המחרות הימינית. כך אפשרנו להוסיף שתי אותיות $a$ : אחת מימין לסוגר $[$ ואחת תואם ימין לסוגר $\{$ . כלומר אות $a$ בקצה השמאלי של כל אחת המחרות.	4
$aH \rightarrow Ha$	כעת צריך לאפשר למשתנה $H$ לחזור שמאלה על גבי האותיות שבין הסוגרים, עד הסוגר $[$ .	5

ברגע "שהראש"  $H$  חזר לתחילת המחרות ועומד ליד הסוגר  $[$  עוברים על השלבים 2-5 שוב. בסבב הבא נחק בחשבון גם יצירה של שתי אותיות  $b$ .

$[H \rightarrow [bH_b$	כלל זה מאפשר הוספת אות $b$ לקצה השמאלי של המילה השמאלית. המשתנה $H$ מוחלף במשתנה $H_b$ כדי "לזכור" שיש עכשיו להוסיף גם במחרות הימינית.	'2
$H_a a \rightarrow aH_a$ $H_a b \rightarrow bH_a$ $H_b a \rightarrow aH_b$ $H_b b \rightarrow bH_b$	כללים האלה מאפשרים לראש "לזוז" ימינה.	'3
$H_b \{ \rightarrow H\{b$	כאשר המשתנה $H_b$ "יגיע" לסוגר המסולסל, הוא יגזור אות $b$ נוספת מימין לסוגר, שהוא הקצה השמאלי של המחרות הימינית. כך אפשרנו להוסיף שתי אותיות $b$ : אחת מימין לסוגר $[$ ואחת תואם ימין לסוגר $\{$ . כלומר אות $b$ בקצה השמאלי של כל אחת המחרות.	'4
$bH \rightarrow Hb$	כעת צריך לאפשר למשתנה $H$ לחזור שמאלה על גבי האותיות שבין הסוגרים, עד הסוגר $[$ .	'5

בכדי לסיים את הגזירה יש להפטר ממשני העזר על ידי הכללים הבאים:

$H \rightarrow \varepsilon$ $[ \rightarrow \varepsilon$ $\{ \rightarrow \varepsilon$	הכללים האלה מאפשרים להעלים את המשתנים $H, [, \{$	6
--	--	---

למשל:

$$\begin{array}{ccccccc}
 S & \xrightarrow{1} & [H\{ & \xrightarrow{2} & [aH_a\{ & \xrightarrow{4} & [aH\{a & \xrightarrow{5} & [Ha\{a \\
 & & & \xrightarrow{2} & [aH_a a\{a & \xrightarrow{3} & [aaH_a\{a & \xrightarrow{4} & [aaH\{aa & \xrightarrow{5} & [Haa\{aa \\
 & & & \xrightarrow{2} & [bH_b aa\{aa & \xrightarrow{3} & [baaH_b\{aa & \xrightarrow{4} & [baaH\{baa & \xrightarrow{5} & [Hbaa\{baa \\
 & & & & & & & & & & & \xrightarrow{6} & baabaa
 \end{array}$$

## 5.5 דקדוקים כלליים ומכונת טיורינג

### משפט 5.4 קדוקים כלליים ומכונת טיורינג

תהי  $L$  שפה.  $L$  קבילה אם ורק אם קיים דקדוק כללי  $G$  כך ש-  $L(G) = L$ .

**הוכחה:** כיוון ראשון.

נוכיח שאם קיים דקדוק כללי  $G$  אז  $L(G)$  קבילה.

נניח שקיים דקדוק כללי  $G$ . נוכיח כי  $L(G)$  קבילה על ידי להוכיח שקיימת תוכנית מחשב  $P$  שמקבלת  $L(G)$ .

נתון דקדוק כללי  $G$ . נבנה תוכנית מחשב שמקבלת את  $L(G)$ .  
יהי הקלט  $w \in L(G)$ , כלומר  $w$  מילה בשפה  $L(G)$ .

(1)  $u = S$ .

(2) repeat

- פצל באופן לא דטרמיניסטי את  $u$  ל-  $xyz$ .
- בחר באופן לא דטרמיניסטי גזירה  $t \rightarrow v$  של  $G$ .
- אם  $y \neq t$  דחה.
- $u = xvz$
- אם  $w = u$  קבל.

**כיוון שני.**

נוכיח שאם  $L(G)$  קבילה אז קיים דקדוק כללי  $G$ .

ז"א, נניח שקיימת מ"ט  $M$  שמקבלת את השפה  $L$ . נוכיח שקיים דקדוק כללי  $G$  כך ש-  $L(G) = L(M)$ , כלומר השפה המתקבלת על ידי  $M$  היא השפה של דקדוק כללי  $G$ .

נתונה מ"ט  $M$  בעלת הטבלת המעברים להלן. נבנה דקדוק כללי  $G$  שמממש אותם צעדים.

תזוזה	כתיבה	מצב חדש	סימן	מצב
$R$	$a$	$q_0$	$a$	$q_0$
$R$	$a$	$q_1$	$b$	$q_0$
$L$	$\_$	acc	$\_$	$q_0$
$L$	$b$	$q_0$	$a$	$q_1$
$L$	$b$	$q_1$	$b, \_$	$q_1$

לפי הטבלת המעברים קיים הצעד

$$q \ q_0 \ b \ a \ b \vdash_M \ a a q_1 \ a b$$

נניח שבדקדוק כללי  $G$  קיים אותו הצעד

$$q \ q_0 \ b a b \xrightarrow{G} \ a a q_1 \ a b$$

ניתן לממש צעד זה על ידי הכלל

$$q_0 b \rightarrow a q_1$$

באופן כללי,

- עבור כל פונקצית המעברים של  $M$  שגוררת תזוזה ימינה מצורה

$$\delta(q, \sigma) = (p, \pi, R)$$

נממש מעבר זה על ידי כלל של הדקדוק  $G$  מצורה

$$q\sigma \rightarrow \pi p.$$

- עבור כל פונקצית המעברים של  $M$  שגוררת תזוזה שמאלה מצורה

$$\delta(q, \sigma) = (p, \pi, L)$$

אז לכל  $\tau \in \Gamma$  ב-  $G$  נממש מעבר זה על ידי הכלל

$$\tau q\sigma \rightarrow p\tau\pi.$$



## 5.6 ההיררכיה של חומסקי

משפחת שפות	דקדוק	מודל חישובי
קבילות	כללי	מכונת טיורינג
חסרות הקשר	חסר הקשר	אוטומט מחסנית
רגולריות	רגולרי	אוטומט סופי

- היררכיה של חומסקי קושרת לנו בין משפחות של שפות דקדוקים ומודלים חישוביים.
- בתחתית ההיררכיה נמצאות השפות הרגולריות שנוצרות על ידי דקדוקים רגולריים ומתקבלות על ידי אוטומטים סופיים.
- מעליהן נמצאות השפות חסרות ההקשר שנוצרות על ידי דקדוקים חסרי הקשר ומתקבלות על ידי אוטומטי מחסנית.
- ומעליהן נמצאות השפות הקבילות שנוצרות על ידי דקדוקים כלליים ומתקבלות על ידי מכונות טיורינג.
- כל רמה בהיררכיה מכילה ממש את הרמה שמתחתיה.
- \* כל שפה רגולרית היא גם חסרת ההקשר, אבל יש שפות חסרות הקשר שאינן רגולריות.
- \* כל שפה חסרת הקשר היא קבילה, אבל יש שפות קבילות שאינן חסרות הקשר.

## 5.7 כל שפה חסרת הקשר הינה כריעה

לפי ההיררכיה של חומסקי אנחנו יודעים לקבוע שכל שפה חסרת הקשר היא קבילה.

האם כל שפה חסרת הקשר הינה כריעה?



## משפט 5.5

יהי  $G = (V, \Sigma, S, R)$  דקדוק חסר הקשר ו-  $w \in L(G)$ . אזי קיים עץ גזירה של  $w$  שעומקו לכל היותר  $(|V| + 1)(|w| + 1)$ .

**הוכחה:** יהי  $T$  עץ הגזירה הקטן ביותר (מבחינת מספר קדקודים) של  $w$ .

בשלילה נניח שב-  $T$  יש מסלול מהשורש לעלה שמכיל לפחות  $(|V| + 1)(|w| + 1)$  קודקודים פנימיים.

נסמן מסלול זה ב-

$$p = (u_1, u_2, \dots, u_m).$$

עבור קודקוד  $u_i$  במסלול נסמן ב-  $s(u_i)$  את תת-המחרוזת של  $w$  שנוצרת מ-  $u_i$ .

מתקיים ש-  $s(u_{i+1})$  היא תת-מחרוזת של  $s(u_i)$ . אומרים שקדקוד  $u_i$  הוא משמעותי אם  $s(u_i)$  מכיל ממש את  $s(u_{i+1})$ .

**כל קודקוד משמעותי מוסיף לפחות אות אחת ל-  $w$ .**

לכן, ישנם לכל היותר  $|w|$  קודקודים משמעותיים.

לכן, ברצף הקודקודים הפנימיים  $(u_1, u_2, \dots, u_m)$  שאורכן לפחות  $(|V| + 1)(|w| + 1)$ , בהכרח ישנו תת רצף  $(u_i, u_{i+1}, \dots, u_{i+|V|})$  באורך  $|V| + 1$ , שבו כל הקודקודים לא משמעותיים.

**ברצף זה בהכרח ישנם שני קודקודים, נאמר  $u_j, u_k$ ,  $j < k$  שמסומנים עם אותו משתנה.**

לכן בעץ הגזירה, ניתן להחליף את הקודקוד  $u_j$  יחד עם כל תת העץ שמתחתיו- בקודקוד  $u_k$ , יחד עם כל תת העץ שמתחתיו.

כיוון שכל הקודקודים שבין  $u_j$  ל-  $u_k$  (כולל) הם לא משמעותיים, החלפה זו לא משנה את המחרוזת הנוצרת.

כלומר, העץ החדש גם הוא עץ הגזירה עבור  $w$ .

בסתירה להנחת המינימליות של העץ.

## משפט 5.6

כל שפה חסרת הקשר היא כריעה.

**הוכחה:** בהינתן דקדוק חסר הקשר  $G = (V, \Sigma, S, R)$ , התוכנית הלא דטרמיניס הבאה מכריעה את  $L(G)$ .

קלט: מחרוזת  $w$ .

פלט: כן או לא.

(1) נחש עץ גזירה של הדקדוק  $G$  בעומק לכל היותר  $(|V| + 1)(|w| + 1)$ .

(2) בדוק האם העץ יוצר את המחרוזת  $w$ . אם כן, החזר "כן" איתר החזר "לא".

שני שלבי התוכנית בהכרח מסתיימים. לכן, זו תוכנית להכרעה. ישנו חישוב שמחזיר "כן" אם ורק אם  $w \in L(G)$  לכן זו תוכנית שמכריעה את  $L(G)$ .

## שיעור 6

### תכונות סגירות של $R$ ו- $RE$

#### 6.1 הגדרה של השפות $R$ ו- $RE$

##### הגדרה 6.1 $R$

אוסף השפות הכריעות מסומן  $R$  ומוגדר

$$R = \{L \subseteq \Sigma^* : L \text{ מכריעה את } L\}.$$

##### הגדרה 6.2 $RE$

אוסף השפות הקבילות מסומן  $RE$  ומוגדר

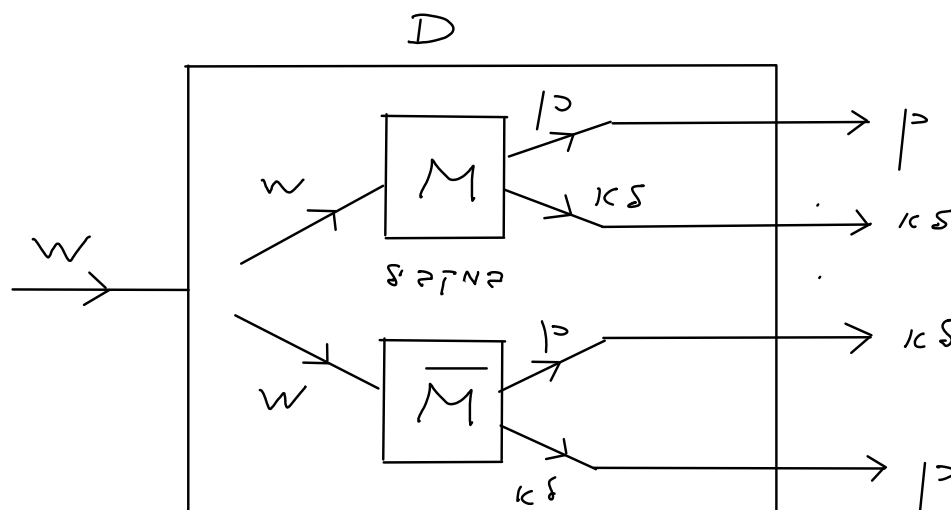
$$RE = \{L \subseteq \Sigma^* : L \text{ מקבלת את } L\}.$$

##### למה 6.1

אם  $L \in RE$  וגם  $\bar{L} \in RE$  אזי  $L \in R$ .

**הוכחה:** תהי  $M$  מ"ט המקבלת את  $L$  ותהי  $\bar{M}$  מ"ט המקבלת את  $\bar{L}$ .

נבנה מ"ט  $D$  המכריעה את  $L$ .



$D =$  על קלט  $w$ :

(1)  $D$  מעתיקה את  $w$  לסרט נוסף.

(2) מריצה במקביל את  $M$  על  $w$  ואת  $\bar{M}$  על העותק של  $w$ .

• אם  $M$  מקבלת  $D \Leftarrow$  מקבלת.

• אם  $\bar{M}$  מקבלת  $D \Leftarrow$  דוחה.

• אם  $M$  דוחה  $D \Leftarrow$  דוחה.

• אם  $\bar{M}$  דוחה  $D \Leftarrow$  מקבלת.

נוכיח כי  $D$  מכריעה את  $L$ .

אם  $w \in L$

$w \in L(M) \Leftarrow$

$\Leftarrow (M \text{ מקבלת את } w) \text{ או } (\bar{M} \text{ דוחה את } w)$

$\Leftarrow D \text{ עוצרת ומקבלת את } w$ .

אם  $w \notin L$

$w \in \bar{L} \Leftarrow$

$\Leftarrow w \in L(\bar{M})$

$\Leftarrow (\bar{M} \text{ מקבלת את } w) \text{ או } (M \text{ דוחה את } w)$

$\Leftarrow D \text{ עוצרת ודוחה את } w$ .

■

### משפט 6.1 סגירות של השפות הכריעות

$R$  סגורה תחת:

(1) איחוד

(2) חיתוך

(3) משלים

(4) שרשור

(5) סגור קליין

### משפט 6.2 סגירות של השפות הקבילות

$RE$  סגורה תחת:

(1) איחוד

(2) חיתוך

(3) שרשור

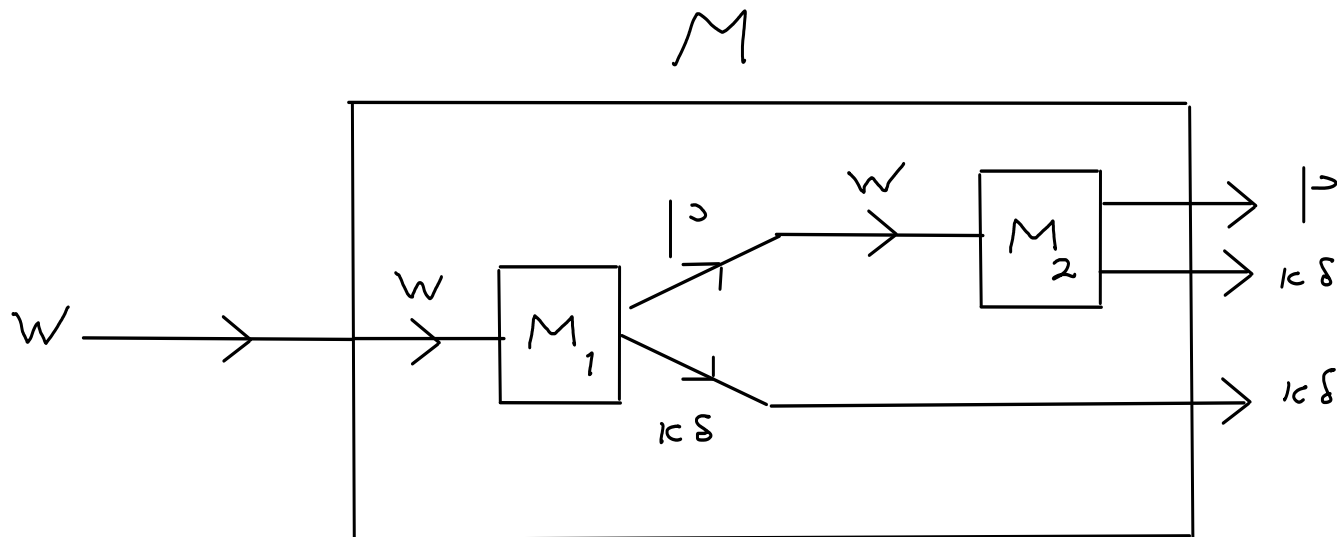
(4) סגור קליין

## (1) חיתוך:

(א) סגורה תחת חיתוך

נוכיח כי לכל שתי שפות  $L_1, L_2 \in R$  מתקיים  $L_1 \cap L_2 \in R$ .

תהי  $M_1$  ו-  $M_2$  מ"ט המכריעות את  $L_1$  ו-  $L_2$  בהתאמה. נבנה מ"ט  $M$  המכריעה את  $L_1 \cap L_2$ .



תאור הבנייה

$M =$  על קלט  $w$ :

(1) מעתיקה את  $w$  לסרט נוסף.

(2) מריצה את  $M_1$  על  $w$ .

• אם  $M_1$  דוחה  $M \Leftarrow$  דוחה.

• אחרת  $M$  מריצה את  $M_2$  על העותק של  $w$  ועונה כמוה.

נכונות:

נוכיח כי  $M$  מכריעה את  $L_1 \cap L_2$ .

אם  $w \in L_1 \cap L_2$

$w \in L_1$  וגם  $w \in L_2 \Leftarrow$

$M_1$  מקבלת את  $w$  וגם  $M_2$  מקבלת את  $w \Leftarrow$

$M$  מקבלת את  $w \Leftarrow$

אם  $w \notin L_1 \cap L_2$

$w \notin L_1$  או  $w \notin L_2 \Leftarrow$

$M_1$  דוחה את  $w$  או  $M_2$  דוחה את  $w \Leftarrow$

$M$  דוחה את  $w \Leftarrow$

RE סגורה תחת חיתוך (ב)

נוכיח כי לכל שתי שפות  $L_1, L_2 \in RE$  מתקיים  $L_1 \cap L_2 \in RE$ .

תהיינה  $M_1$  ו- $M_2$  שתי מכונות טיורינג המקבלות את  $L_1$  ו- $L_2$  בהתאמה.  
נבנה מ"ט  $M$  המקבלת את  $L_1 \cap L_2$  באותו אופן כמו (א).

(2) איחוד:

R סגורה תחת איחוד (א)

נוכיח כי לדל שתי שפות  $L_1, L_2 \in R$  מתקיים  $L_1 \cup L_2 \in R$ .

תהיינה  $M_1$  מ"ט המכריעה את  $L_1$  ו- $M_2$  מ"ט המכריעה את  $L_2$ .  
נבנה מ"ט  $M$  המכריעה את  $L_1 \cup L_2$ .

תאור הבנייה

$$M = \text{על קלט } w:$$

(1) מעתיקה את  $w$  לסרט נוסף.

(2) מריצה את  $M_1$  על  $w$ .

• אם  $M_1$  מקבלת  $\Leftarrow M$  מקבלת.

• אחרת,  $M$  מריצה את  $M_2$  על העותק של  $w$  ועונה כמוה.

RE סגורה תחת איחוד (ב)

נוכיח כי לכל שתי שפות  $L_1, L_2 \in RE$  מתקיים  $L_1 \cup L_2 \in RE$ .

תהיינה  $M_1$  מ"ט המקבלת את  $L_1$  ו- $M_2$  מ"ט המקבלת את  $L_2$ .  
נבנה מ"ט א"ד  $M$  המקבלת את  $L_1 \cup L_2$ .

תאור הבנייה

$$M = \text{על קלט } w:$$

(1)  $M$  בוחרת באופן א"ד  $i \in \{1, 2\}$ .

(2)  $M$  מריצה את  $M_i$  על  $w$  ועונה כמוה.

(3) שרשור:

R סגורה תחת שרשור (א)

נוכיח כי לכל שתי שפות  $L_1, L_2 \in R$  מתקיים  $L_1 \cdot L_2 \in R$  כאשר

$$L_1 \cdot L_2 = \{w = w_1w_2 \mid w_1 \in L_1 \wedge w_2 \in L_2\}.$$

תהיינה  $M_1$  מ"ט המכריעה את  $L_1$  ו- $M_2$  מ"ט המכריעה את  $L_2$ .  
נבנה מ"ט א"ד  $M$  המכריעה את  $L_1 \cdot L_2$ .

תאור הבנייה

$$M = \text{על קלט } w:$$

(1)  $M$  בוחרת באופן א"ד חלוקה של  $w$  ל-  $w = w_1 w_2$ .

(2)  $M$  מריצה את  $M_1$  על  $w_1$ .

• אם  $M_1$  דוחה  $\Leftarrow M$  דוחה.

• אחרת,  $M$  מריצה את  $M_2$  על  $w_2$  ועונה כמוה.

(ב)  $RE$  סגורה תחת שרשור

$RE$  סגורה תחת שרשור באותו אופן כמו ב- (א)

(4) \* קליני

(א)  $R$  סגורה תחת \* קליני

נוכיח כי לכל שפה  $L$ :

$$L \in R \Rightarrow L^* \in R$$

כאשר

$$L^* = \{w = w_1 w_2 \cdots w_k \mid \forall 1 \leq i \leq k, w_i \in L\}.$$

תהי  $M$  מ"ט המכריעה את  $L$ .

נבנה מ"ט  $M^*$  א"ד המכריעה את  $L^*$ .

תאור הבנייה

$M^* =$  על קלט  $w$ :

(1) אם  $w = \varepsilon$  אז  $M^*$  מקבלת.

(2) אחרת  $M^*$  בוחרת באופן א"ד חלוקה של  $w$  ל-  $w = w_1 \cdots w_k$ .

(3) לכל  $1 \leq i \leq k$ :

$M^*$  מריצה את  $M$  על  $w_i$ .

• אם  $M$  דוחה את  $w_i$  אז  $M^*$  דוחה.

• אחרת חוזרים לשלב (3).

(4) אם  $M$  קיבלה את כל המחרוזות  $\{w_i\}$  אזי  $M^*$  מקבלת.

(ב)  $RE$  סגורה תחת \* קליני

(5) משלים

(א)  $R$  סגורה תחת המשלים

נוכיח כי

$$L \in R \Rightarrow \bar{L} \in R,$$

כאשר

$$\bar{L} = \{w \in \Sigma^* \mid w \notin L\}.$$

תהי  $M$  מ"ט המכריעה את  $L$ .

נבנה מ"ט  $\bar{M}$  המכריעה את  $\bar{L}$ .

$\bar{M} =$  על קלט  $w$ :

(1)  $\bar{M}$  מריצה את  $M$  על  $w$ .

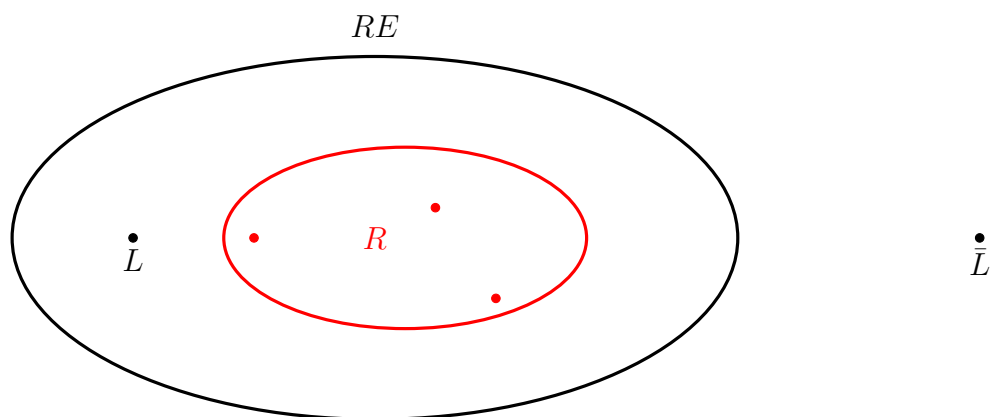
• אם  $M$  מקבלת  $\bar{M} \Leftarrow$  דוחה.

• אם  $M$  דוחה  $\bar{M} \Leftarrow$  מקבלת.

(ב)  $RE$  אינה סגורה תחת המשלים

### משפט 6.3 $RE$ אינה סגורה תחת המשלים

$$L \in RE \setminus R \Rightarrow \bar{L} \notin RE.$$



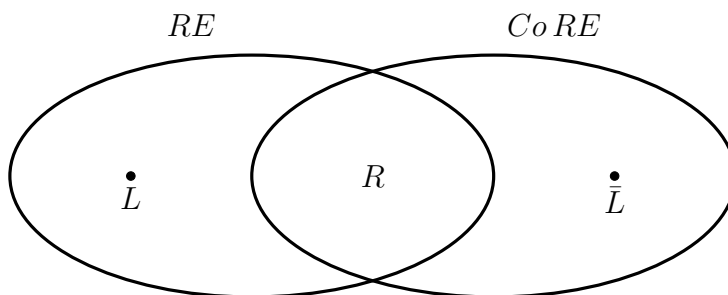
הוכחה:

נניח כי  $L \in RE \setminus R$  ונניח בשלילה כי  $\bar{L} \in RE$ .

אזי לפי טענת עזר (למה 6.1),  $L \in R$  וזו סתירה.

### הגדרה 6.3 $CoRE$

$$CoRE = \{L \subseteq \Sigma^* \mid \bar{L} \in RE\}.$$



אבחנה

לפי למה 6.1:

$$RE \cap CoRE = R.$$

## 6.2 קידוד של מ"ט דטרמיניסטית

### הגדרה 6.4 קידוד של מ"ט

בהינתן קבוצה  $O$  של עצמים מופשטים (למשל מכונת טיורינג, תוכנית מחשב, גרף). הקידוד של  $O$ , מסומן  $\langle O \rangle$ , הוא מיפוי של  $O$  אל מחרוזת מעל אלפבית סופי שיש בו לפחות שני סימנים.

במידה ויש רב עצמים  $O_1, \dots, O_k$  נסמן את הקידוד שלהם  $\langle O_1, O_2, \dots, O_k \rangle$ .

## 6.3 מ"ט אוניברסלית $U$



מ"ט אוניברסלית  $U$  מקבלת כקלט זוג, קידוד של מ"ט  $\langle M \rangle$  וקידוד של מילה  $\langle w \rangle$ , ומבצעת סימוציה של ריצה של  $M$  על  $w$  ועונה בהתאם.

תאור הפעולה של  $U$

$U = \text{על קלט } x$ :

(1) בודקת האם  $x$  הוא קידוד של מ"ט  $\langle M \rangle$  וקידוד של מילה  $\langle w \rangle$ .

• אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.

(2) מבצעת סימולציה של  $M$  על  $w$ :

1	670	$\langle M \rangle$	,	$\langle w \rangle$	$\sqcup \sqcup \dots$
---	-----	---------------------	---	---------------------	-----------------------

2	670	$\langle q_0 \rangle$	,	$\langle w \rangle$	$\sqcup \sqcup \dots$
---	-----	-----------------------	---	---------------------	-----------------------

- רושמת את הקונפיגורציה ההתחלתית  $q_0 w$  על סרט 2.
- מחשבת את הקונפיגורציה הבאה בעזרת טבלת המעברים.
- בסוף כל מעבר בין שתי קונפיגורציות,  $U$  בודקת האם המצב הנוכחי הוא  $q_{acc}$ .
- אם כן  $U$  עוצרת ומקבלת.



- \* אחרת  $U$  בודקת האם המצב הוא  $q_{rej}$ .
- \* אם כן  $U$  עוצרת ודוחה.
- \* אחרת  $U$  ממשיכה לקונפיגורציה הבאה.

מהי השפה של  $U$ ?

לכל  $x$ :

(1) אם  $U \Leftarrow x \neq \langle M, w \rangle$  דוחה את  $x$ .

(2) אם  $x = \langle M, w \rangle$ :

- אם  $M$  מקבלת  $w \Leftarrow U$  מקבלת את  $x$ .
- אם  $M$  דוחה את  $w \Leftarrow U$  דוחה את  $x$ .
- אם  $M$  לא עוצרת על  $w \Leftarrow U$  לא עוצרת על  $x$ .

$$L(U) = \{ \langle M, w \rangle \mid w \in L(M) \} .$$

### הגדרה 6.5 $L_{acc}$

$$L_{acc} = \{ \langle M, w \rangle \mid w \in L(M) \} \in RE \setminus R$$

### הגדרה 6.6 $L_{halt}$

$$L_{halt} = \{ \langle M, w \rangle \mid M \text{ עוצרת על } w \} \in RE \setminus R$$

### הגדרה 6.7 $L_d$

$$L_d = \{ \langle M \rangle \mid \langle M \rangle \notin L(M) \} \notin RE$$

אבחנה:

$$L_{acc} \subseteq L_{halt} .$$



## משפט 6.4

$$L_{\text{acc}} \in RE.$$

הוכחה: מכיוון ש- $L(U) = L_{\text{acc}}$ ,  $U$  מקבלת את  $L_{\text{acc}}$  ולכן  $L_{\text{acc}} \in RE$ . ■

## משפט 6.5

$$L_{\text{halt}} \in RE.$$

הוכחה: נבנה מ"ט  $U'$  שהיא למעשה  $U$  פרט למקום שבו  $U$  עצרה ודחתה,  $U'$  תעצור ותקבל.

נוכיח כי  $U'$  מקבלת את  $L_{\text{halt}}$ :

אם  $x \in L_{\text{halt}}$

$x = \langle M, w \rangle \Leftarrow$   $M$  עוצרת על  $w$

$U'$  עוצרת ומקבלת את  $x$ .

אם  $x \notin L_{\text{halt}}$  שני מקרים:

•  $x = \langle M, w \rangle \Leftarrow U'$  דוחה את  $x$ .

•  $x = \langle M, w \rangle \Leftarrow M$  לא עוצרת על  $w \Leftarrow U'$  לא עוצרת על  $x$ .

■

## שיעור 7

### אי-כריעות

#### 7.1 השפות $L_d, L_{halt}, L_{acc}$ לא כריעות

##### הגדרה 7.1 $L_{acc}$

$$L_{acc} = \{ \langle M, w \rangle \mid w \in L(M) \} \in RE \setminus R$$

##### הגדרה 7.2 $L_{halt}$

$$L_{halt} = \{ \langle M, w \rangle \mid M \text{ עוצרת על } w \} \in RE \setminus R$$

##### הגדרה 7.3 $L_d$

$$L_d = \{ \langle M \rangle \mid \langle M \rangle \notin L(M) \} \notin RE$$

##### משפט 7.1 $L_{acc} \in RE$

$$L_{acc} \in RE.$$

**הוכחה:** מכיוון ש- $L(U) = L_{acc}$ , כאשר  $U$  המכונת טיורינג האוניברסלית אשר מקבלת את  $L_{acc}$ , לכן  $L_{acc} \in RE$ . ■

##### משפט 7.2 $L_{halt} \in RE$

$$L_{halt} \in RE.$$

**הוכחה:** נבנה מ"ט  $U'$  שהיא למעשה  $U$  פרט למקום שבו  $U$  עצרה ודחתה,  $U'$  תעצור ותקבל.

נוכיח כי  $U'$  מקבלת את  $L_{halt}$ :

אם  $x \in L_{halt}$

$\Leftarrow x = \langle M, w \rangle$  ו- $M$  עוצרת על  $w$

$\Leftarrow U'$  עוצרת ומקבלת את  $x$ .

אם  $x \notin L_{\text{halt}} \Leftarrow$  שני מקרים:

•  $x \neq \langle M, w \rangle \Leftarrow U'$  דוחה את  $x$ .

•  $x = \langle M, w \rangle$  ו- $M$  לא עוצרת על  $w \Leftarrow U'$  לא עוצרת על  $x$ .

### משפט 7.3 $L_d \notin RE$

$$L_d \notin RE .$$

הוכחה:

נניח בשלילה כי  $L_d \in RE$ .

$\Leftarrow \exists$  מ"ט  $M_d$  המקבלת את  $L_d$ .

$\Leftarrow L(M_d) = L_d$ .

נבדוק ריצה של  $M_d$  על  $\langle M_d \rangle$ :

• אם  $\langle M_d \rangle \in L(M_d) \Leftarrow \langle M_d \rangle \notin L_d \Leftarrow L(M_d) \neq L_d$ .

• אם  $\langle M_d \rangle \notin L(M_d) \Leftarrow \langle M_d \rangle \in L_d \Leftarrow L(M_d) \neq L_d$ .

בשני המקרים קיבלנו סתירה לכך ש- $L(M_d) = L_d$  ולכן  $L_d \notin RE$ .

### משפט 7.4 $L_{\text{acc}}$ לא כריעה

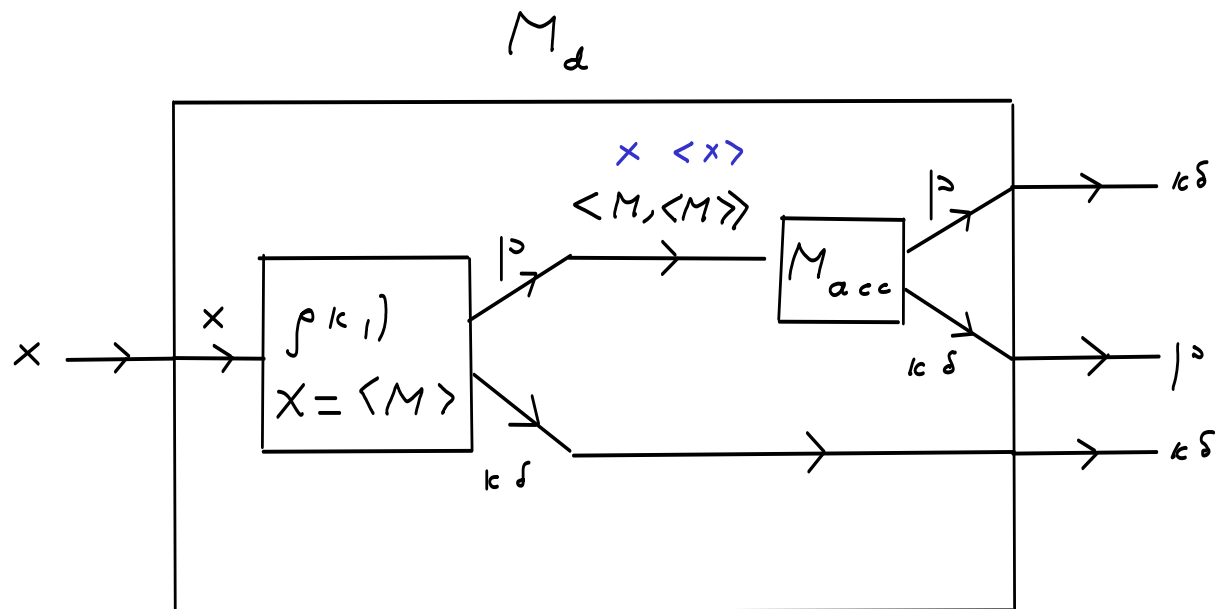
$$L_{\text{acc}} = \{ \langle M, w \rangle \mid w \in L(M) \} \notin R .$$

הוכחה:

נניח בשלילה כי  $L_{\text{acc}} \in R$  ותהי  $M_{\text{acc}}$  המ"ט המקריעה את  $L_{\text{acc}}$ .

נשתמש ב- $M_{\text{acc}}$  כדי לבנות מ"ט  $M_d$  המקריעה את  $L_d$  (בסתירה לכך ש- $L_d \notin RE$  כפי שהוכחנו במשפט 7.3).

$$L_d = \{ \langle M, w \rangle \mid \langle M \rangle \notin L(M) \} .$$



התאור של  $M_d$

$M_d = \text{על קלט } x$

(1) בודקת האם  $x = \langle M \rangle$ . אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.

(2) מחשבת את  $\langle \langle M \rangle \rangle$ .

(3) מריצה את  $M_{acc}$  על הזוג  $\langle M, \langle M \rangle \rangle$ :

• אם  $M_{acc}$  מקבלת  $\Leftarrow M_d$  דוחה.

• אם  $M_{acc}$  דוחה  $\Leftarrow M_d$  מקבלת.

כעת נוכיח כי  $M_d$  מכריעה את  $L_d$ :

אם  $x \in L_d$

$\Leftarrow x = \langle M \rangle$  ו-  $\langle M \rangle \notin L(M)$

$\Leftarrow M_{acc}$  דוחה את הזוג  $\langle M, \langle M \rangle \rangle$

$\Leftarrow M_d$  מקבלת את  $x$ .

אם  $x \notin L_d$  שני מקרים:

מקרה (1):  $x \neq \langle M \rangle \Leftarrow M_d$  דוחה את  $x$ .

מקרה (2):  $x = \langle M \rangle$  ו-  $\langle M \rangle \in L(M)$

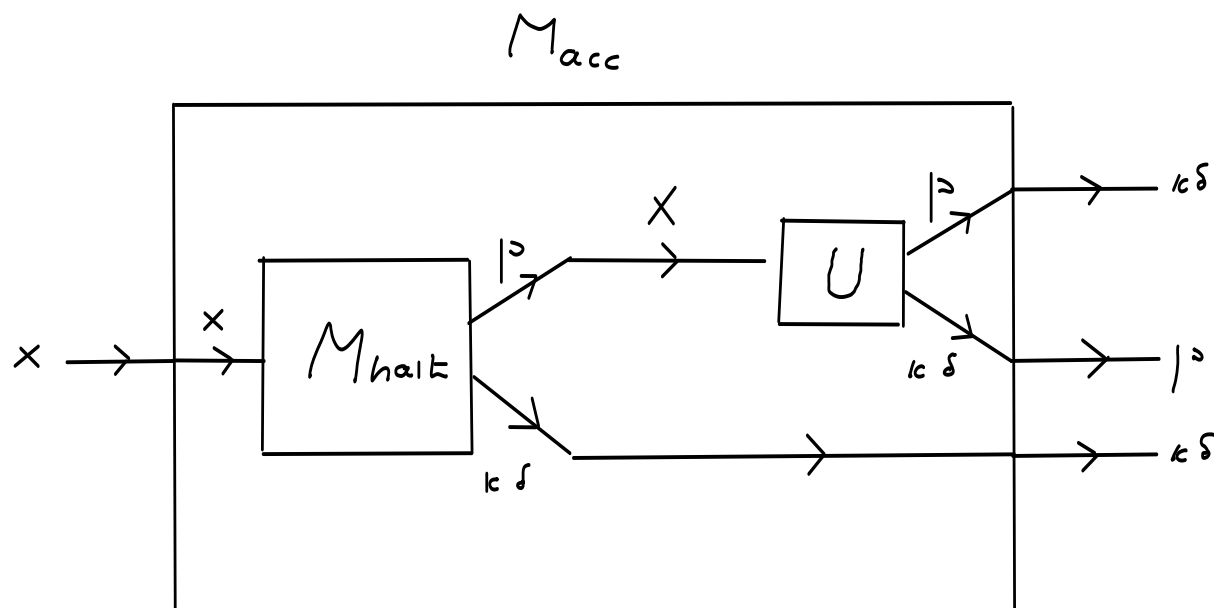
$\Leftarrow M_{acc}$  מקבלת את זוג  $\langle M, \langle M \rangle \rangle$

$\Leftarrow M_d$  דוחה את  $x$ .

משפט 7.5  $L_{\text{halt}}$  לא כריעה

$$L_{\text{halt}} = \{ \langle M, w \rangle \mid M \text{ עוצרת על } w \} \notin R.$$

הוכחה:

נניח בשלילה כי  $L_{\text{halt}} \in R$  ותהי  $M_{\text{halt}}$  מ"ט המכריעה את  $L_{\text{halt}}$ .נשתמש ב-  $M_{\text{halt}}$  כדי לבנות מ"ט  $M_{\text{acc}}$  המכריעה את  $L_{\text{acc}}$  (בסתירה לכך ש-  $L_{\text{acc}} \notin R$  כפי שהוכחנו במשפט 7.4).התאור של  $M_{\text{acc}}$  $M_{\text{acc}}$  = על קלט  $x$ :(1) מריצה את  $M_{\text{acc}}$  על  $x$ .

- אם  $M_{\text{halt}}$  דוחה  $\Leftarrow M_{\text{acc}}$  דוחה.
- אם  $M_{\text{halt}}$  מקבלת  $\Leftarrow M_{\text{acc}}$  מריצה את  $U$  על  $x$  ועונה כמוה.

אבחנהנוכיח כי  $M_{\text{acc}}$  מכריעה את  $L_{\text{acc}}$ :אם  $x \in L_{\text{acc}}$  $\Leftarrow x = \langle M, w \rangle$  ו-  $\langle w \rangle \in L(M)$  $\Leftarrow M_{\text{halt}}$  מקבלת את  $x$  וגם  $U$  מקבלת את  $x$  $\Leftarrow M_{\text{acc}}$  מקבלת את  $x$ .

אם  $x \notin L_{acc} \Leftarrow$  שני מקרים:

מקרה (1):  $x \neq \langle M, w \rangle$

$M_{halt}$  דוחה את  $x \Leftarrow$

$M_{acc}$  דוחה את  $x \Leftarrow$

מקרה (2):  $x = \langle M, w \rangle$  ו-  $\langle w \rangle \notin L(M) \Leftarrow$  שני מקרים:

מקרה (א):  $M$  לא עוצרת על  $w \Leftarrow M_{halt}$  דוחה את  $x \Leftarrow M_{acc}$  דוחה את  $x$ .

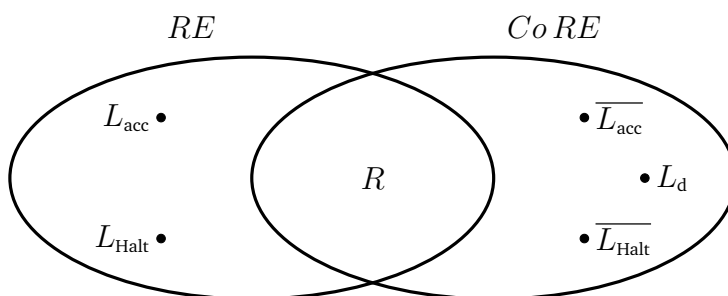
מקרה (ב):  $M$  דוחה את  $w \Leftarrow M_{halt}$  מקבלת את  $x$  אבל  $U$  דוחה את  $x \Leftarrow M_{acc}$  דוחה את  $x$ .

הראנו כי  $M_{acc}$  מכריעה את  $L_{acc}$  בסתירה לכך ש-  $L_{acc} \notin R$ .

לכן  $L_{halt} \notin R$ .

## משפט 7.6

$$\begin{aligned} L_{acc} \in RE \setminus R &\Rightarrow \bar{L}_{acc} \notin RE, \\ L_{halt} \in RE \setminus R &\Rightarrow \bar{L}_{halt} \notin RE, \\ L_d &\notin RE \setminus R. \end{aligned}$$



## 7.2 השפה $L_E$ לא כריעה

### הגדרה 7.4 השפה $L_E$

$$L_E = \{ \langle M \rangle \mid L(M) = \emptyset \}.$$

### משפט 7.7 $L_E \notin R$

$$L_E \notin R.$$

כלומר  $L_E$  לא כריעה.

**הוכחה:**

נניח בשלילה כי  $L_E$  כריעה. אז נבנה מ"ט  $M_{acc}$  המכריעה את  $L_{acc}$  באופן הבא.

בנייה של  $M_w$

ראשית נגדיר את המ"ט  $M_w$ :

$$M_w = \text{על כל קלט } x:$$

(1) אם  $x \neq w \Leftarrow$  דוחה.

(2) אם  $x = w$  אז מריצה  $M$  על  $w$  ועונה כמוה.

אבחנה

אם  $x = w$  ו-  $M$  מקבלת את  $w$  אז  $L(M_w) = \Sigma^*$ .

אם  $x \neq w$  או אם  $x = w$  ו-  $M$  דוחה את  $w$  אז  $L(M_w) = \emptyset$ .

בנייה של  $M_{\text{acc}}$

נניח כי קיימת מ"ט  $M_E$  המכריעה את  $L_E$ . אז נבנה מ"ט  $M_{\text{acc}}$  המכריעה את  $L_{\text{acc}}$ :

$$M_{\text{acc}} = \text{על כל קלט } x:$$

(1) אם  $\langle M, w \rangle \neq x \Leftarrow$  דוחה.

(2) אם  $x = \langle M, w \rangle$ , בעזרת התאור  $\langle M, w \rangle$ , בונה מ"ט  $M_w$ .

(3) מריצה  $M_E$  על  $\langle M_w \rangle$ :

(4) • אם  $M_E$  מקבלת  $\Leftarrow$  דוחה.

• אם  $M_E$  דוחה  $\Leftarrow$  מקבלת.

נכונות

אם  $x \in L_{\text{acc}} \Leftarrow x = \langle M, w \rangle \Leftarrow x = \langle M, w \rangle \Leftarrow L(M_w) = \Sigma^* \neq \emptyset \Leftarrow M_E$  דוחה  $\langle M_w \rangle$  מקבלת.  $M_{\text{acc}} \Leftarrow$

אם  $x \notin L_{\text{acc}} \Leftarrow$  שני מקרים:

מקרה 1:  $x \neq \langle M, w \rangle \Leftarrow L(M_w) = \emptyset \Leftarrow M_E$  מקבלת  $\langle M_w \rangle \Leftarrow M_{\text{acc}}$  דוחה.

מקרה 2:  $x = \langle M, w \rangle \Leftarrow w \notin L(M) \Leftarrow L(M_w) = \emptyset \Leftarrow M_E$  מקבלת  $\langle M_w \rangle \Leftarrow M_{\text{acc}}$  דוחה.

לסיכום:

אם  $L_E$  כריעה אז אפשר לבנות מ"ט  $M_{\text{acc}}$  המכריעה את  $L_{\text{acc}}$  בסתירה לכך ש-  $L_{\text{acc}} \notin R$ .  
לכן  $L_E \notin R$ .

**משפט 7.8  $L_E \notin RE$**

$L_E \notin RE$

הוכחה:  
הרעיון



נבנה מ"ט א"ד  $N$  המקבלת את

$$\bar{L}_E = \{\langle M \rangle \mid L(M) \neq \emptyset\}$$

$\square = N$  על קלט  $x$ :

(1) אם  $\langle M \rangle \neq x \Leftarrow$  דוחה.

(2) אם  $x = \langle M \rangle$  אז  $N$  בוחרת מילה  $w \in \Sigma^*$  באופן א"ד.

(3) מריצה  $M$  על  $w$ .

• אם  $M$  מקבלת  $N \Leftarrow$  מקבלת.

• אם  $M$  דוחה  $N \Leftarrow$  דוחה.

הוכחת הנכונות

אם  $x \in \bar{L}_E$

$$\Leftarrow \langle M \rangle = x \text{ ו- } L(M) \neq \emptyset$$

$$\Leftarrow \text{קיימת מילה } w \in \Sigma^* \text{ כך ש- } w \in L(M)$$

$$\Leftarrow \exists \text{ ניחוש } w \in \Sigma^* \text{ כך ש- } M \text{ מקבלת את } w$$

$$\Leftarrow \text{קיים חישוב של } N \text{ המקל את } \langle M \rangle = x$$

$$\Leftarrow x \in L(N)$$

לכן קיימת מ"ט א"ד  $N$  המקבלת את השפה  $\bar{L}_E$  לכן  $\bar{L}_E \in RE$ .

כעת נוכיח כי  $L_E \notin RE$ .

נניח בשלילה כי  $L_E \in RE$ . הוכחנו למעלה ש-  $\bar{L}_E \in RE$ . לכן לפי משפט 6.1,  $L_E \in R$ .

זו בסתירה לכך ש-  $L_E \notin R$ .

לכן  $L_E \notin RE$ .

■

## 7.3 השפה $L_{EQ}$ לא כריעה

**הגדרה 7.5**  $L_{EQ}$

$$L_{EQ} = \{\langle M_1, M_2 \rangle \mid L(M_1) = L(M_2)\}$$

**משפט 7.9**  $L_{EQ} \notin R$

$$L_{EQ} \notin R$$

השפה  $L_{EQ}$  לא כריעה.

הוכחה:

נניח בשלילה כי  $L_{EQ}$  כריעה. תהי  $M_{EQ}$  מ"ט המכריעה את  $L_{EQ}$ . אז נבנה מ"ט  $M_E$  המכריעה את  $L_E$  באופן הבא.

### בנייה של $M_E$

$M_E =$  על כל קלט  $x$ :

(1) אם  $x \neq \langle M \rangle \Leftarrow$  דוחה.

(2) אם  $x = \langle M \rangle$ , מריצה  $M_{EQ}$  על  $\langle M, M_\emptyset \rangle$  כאשר  $M_\emptyset$  המ"ט שדוחה כל קלט.

(3) • אם  $M_{EQ}$  מקבלת  $\Leftarrow$  מקבלת.

• אם  $M_{EQ}$  דוחה  $\Leftarrow$  דוחה.

### נכונות

אם  $x \in L_E$

$\Leftarrow x = \langle M \rangle$  ו-  $L(M) = \emptyset$

$\Leftarrow L(M) = L(M_\emptyset)$

$\Leftarrow \langle M, M_\emptyset \rangle \in L_{EQ}$

$\Leftarrow M_{EQ}$  מקבלת  $\langle M, M_\emptyset \rangle$

$\Leftarrow M_E$  מקבל.

אם  $x \notin L_E$  שני מקרים:

מקרה 1:  $x \neq \langle M \rangle \Leftarrow M_E$  דוחה.

מקרה 2:  $x = \langle M \rangle$  ו-  $L(M) \neq \emptyset$

$\Leftarrow L(M) \neq L(M_\emptyset)$

$\Leftarrow \langle M, M_\emptyset \rangle \notin L_{EQ}$

$\Leftarrow M_{EQ}$  דוחה  $\langle M, M_\emptyset \rangle$

$\Leftarrow M_E$  דוחה.

### לסיכום:

אם  $L_{EQ}$  כריעה אז אפשר לבנות מ"ט  $M_E$  המכריעה את  $L_E$  בסתירה למשפט 7.7 האומר ש-  $L_E \notin R$ .  
לכן  $L_{EQ} \notin R$ .

### משפט 7.10 $L_{EQ} \notin RE$

$L_{EQ} \notin RE$

$L_{EQ}$  לא קבילה.

### הוכחה:

נניח בשלילה כי  $L_{EQ}$  קבילה. תהי  $M_{EQ}$  מ"ט המקבלת את  $L_{EQ}$ . אז נבנה מ"ט  $M_E$  המקבלת את  $L_E$  באופן הבא.

בנייה של  $M_E$ 

$$M_E = \text{על כל קלט } x:$$

(1) אם  $\langle M \rangle \neq x \Leftarrow$  דוחה.

(2) אם  $x = \langle M \rangle$ , מריצה  $M_{EQ}$  על  $\langle M, M_\emptyset \rangle$  כאשר  $M_\emptyset$  המ"ט שדוחה כל קלט.

(3) • אם  $M_{EQ}$  מקבלת  $\Leftarrow$  מקבלת.

נכונות

אם  $x \in L_E$

$$\Leftarrow \langle M \rangle = x \text{ ו- } L(M) = \emptyset$$

$$\Leftarrow L(M) = L(M_\emptyset)$$

$$\Leftarrow \langle M, M_\emptyset \rangle \in L_{EQ}$$

$$\Leftarrow M_{EQ} \text{ מקבלת } \langle M, M_\emptyset \rangle$$

$$\Leftarrow M_E \text{ מקבל.}$$

לסיכום:

אם  $L_{EQ}$  קבילה אז אפשר לבנות מ"ט  $M_E$  המקבלת את  $L_E$  בסתירה למשפט 7.8 האומר ש-  $L_E \notin RE$ .  
לכן  $L_{EQ} \notin RE$ .

**משפט 7.11  $\bar{L}_{EQ} \notin RE$** 

$$\bar{L}_{EQ} \notin RE.$$

הוכחה:

נניח בשלילה כי  $\bar{L}_{EQ}$  קבילה. תהי  $M_{EQ}$  מ"ט המקבלת את  $\bar{L}_{EQ}$ . אז נבנה מ"ט  $M_{acc}$  המקבלת את  $\bar{L}_{acc}$  באופן הבא.

בנייה של  $M_1$ 

ראשית נגדיר מ"ט  $M_1$  באופן הבא:

$$M_1 = \text{על קלט } x:$$

(1) מריצה  $M$  על  $w$  ועונה כמוה.

בנייה של  $M_{acc}$ 

$$M_{acc} = \text{על כל קלט } x:$$

(1) אם  $\langle M, w \rangle \neq x \Leftarrow$  מקבלת.

(2) אם  $x = \langle M, w \rangle$  אז בונה  $M_1$ .

(3) מריצה  $M_{\overline{EQ}}$  על  $\langle M_1, M^* \rangle$  כאשר  $M^*$  המ"ט שמקבלת כל קלט.

(4) • אם  $M_{\overline{EQ}}$  מקבלת  $\Leftarrow$  מקבלת.

#### נכונות

אם  $x \in L_{\overline{acc}}$

$\Leftarrow M$  לא מקבלת  $w$

$\Leftarrow L(M_1) = \emptyset$

$\Leftarrow \langle M_1, M^* \rangle \in L_{\overline{EQ}}$

$\Leftarrow M_{\overline{EQ}}$  מקבלת  $\langle M_1, M^* \rangle$

$\Leftarrow M_{\overline{acc}}$  מקבל.

#### לסיכום:

אם  $L_{\overline{EQ}}$  קבילה אז אפשר לבנות מ"ט  $M_{\overline{acc}}$  המקבלת את  $L_{\overline{acc}}$  בסתירה למשפט 7.6 האומר ש-  $L_{\overline{acc}} \notin RE$ .  
לכן  $L_{\overline{EQ}} \notin RE$ .

## 7.4 סיכום: כריעות וקבילות של שפות

קבילה	כריעה	
✓	×	$L_{\overline{acc}}$
×	×	$\overline{L_{\overline{acc}}}$
×	×	$L_d$
✓	×	$L_{\text{Halt}}$
×	×	$\overline{L_{\text{Halt}}}$
×	×	$L_E$
✓	×	$\overline{L_E}$
×	×	$L_{\text{EQ}}$
×	×	$\overline{L_{\text{EQ}}}$
×	×	$L_{\text{REG}}$
×	×	$L_{\text{NOTREG}}$

## שיעור 8

### רדוקציה

#### 8.1 טבלה של רדוקציות

##### טבלה של רדוקציות

רדוקציה	עמוד
$L_{\text{HALT}} \leq L_{\text{acc}}$	דוגמה 8.6 עמוד 82
$\bar{L}_{\text{acc}} \leq L_{\text{NOTREG}}$	דוגמה 8.11 עמוד 86
$L_{\text{acc}} \leq L_{\text{NOTREG}}$	דוגמה 8.12 עמוד 87
$L_{\text{HALT}} \leq L_{\text{NOTREG}}$	דוגמה 8.13 עמוד 88
$L_{\text{acc}} \leq L_{\text{REG}}$	דוגמה 8.15 עמוד 90
$\bar{L}_{\text{acc}} \leq L_{\text{REG}}$	דוגמה 8.14 עמוד 89
$\bar{L}_{\text{acc}} \leq L_{M_1 \neg M_2}$ כאשר $L_{M_1 \neg M_2} = \{ \langle M_1, M_2, w \rangle \mid w \in L(M_1) \wedge w \notin L(M_2) \}$	דוגמה 8.16 עמוד 91
$\bar{L}_{\text{acc}} \leq L_{M_1 \subset M_2}$ כאשר $L_{M_1 \subset M_2} = \{ \langle M_1, M_2 \rangle \mid L(M_1) \subset L(M_2) \}$	דוגמה 8.17 עמוד 91

#### 8.2 מ"ט המחשבת את פונקציה

##### הגדרה 8.1 מ"ט המחשבת פונקציה

בהינתן פונקציה  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  אומרים כי מ"ט  $M$  מחשבת את  $f$  אם לכל  $x \in \Sigma^*$ :

- $M$  מגיעה ל-  $q_{\text{acc}}$  בסוף החישוב של  $f(x)$  וגם
- על סרט הפלט של  $M$  רשום  $f(x)$ .

##### הערה 8.1

מ"ט שמחשבת פונקציה עוצרת תמיד.

##### הגדרה 8.2 מ"ט המחשבת פונקציה

בהינתן פונקציה  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  אומרים כי  $f$  חשיבה אם קיימת מ"ט המחשבת את  $f$ .

## 8.1 דוגמה

$$f_1(x) = xx \quad (8.1)$$

$f_1(x)$  חשיבה.

## 8.2 דוגמה

$$f_2(x) = \begin{cases} x & |x| \text{ זוגי} \\ xx & |x| \text{ אי-זוגי} \end{cases} \quad (8.2)$$

$f_2(x)$  חשיבה.

## 8.3 דוגמה

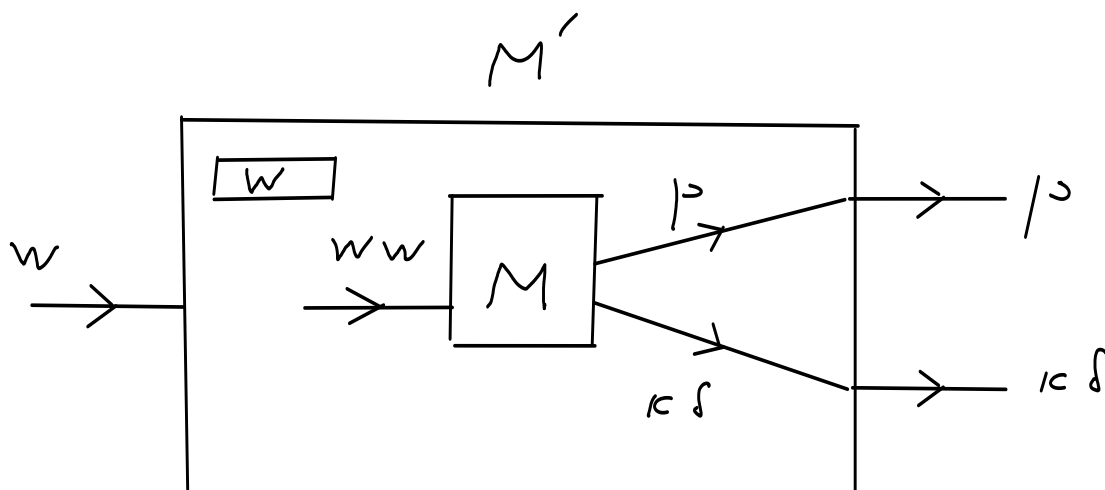
$$f_3(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & x = \langle M \rangle \\ \langle M^* \rangle & x \neq \langle M \rangle \end{cases} \quad (8.3)$$

כאשר

•  $M^*$  מ"ט שמקבלת כל קלט.

•  $M'$  מ"ט המקבלת את השפה

$$L(M') = \{w \in \Sigma^* \mid ww \in L(M)\}$$



$f_3(x)$  חשיבה כי ניתן לבנות מ"ט שבודקת האם  $x = \langle M \rangle$ . אם לא, מחזירה קידוד קבוע  $\langle M^* \rangle$ . ואם כן, מחזירה קידוד  $\langle M' \rangle$  ע"י הוספת מעברים המשכפלים את הקלט בתחילת הקידוד  $\langle M \rangle$ .

## 8.4 דוגמה

$$f_4(x) = \begin{cases} 1 & x = \langle M \rangle \wedge \langle M \rangle \in L(M) \\ 0 & \text{אחרת} \end{cases} \quad (8.4)$$

$f_4(x)$  לא חשיבה כי ייתכנו קלטים  $x = \langle M \rangle$  ו- $M$  לא עוצרת על  $\langle M \rangle$ .

## 8.3 רדוקציות

## הגדרה 8.3 רדוקציות

בהינתן שתי שפות  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$  אומרים כי  $L_1$  ניתנת לרדוקציה ל- $L_2$ , ומסמנים

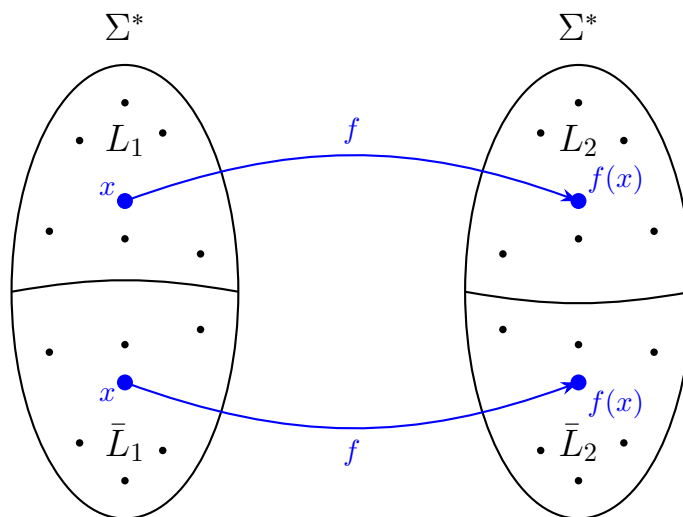
$$L_1 \leq L_2 ,$$

אם  $\exists$  פונקציה  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  המקיימת:

(1)  $f$  חשיבה

(2) לכל  $x \in \Sigma^*$ :

$$x \in L_1 \iff f(x) \in L_2 .$$



## 8.5 דוגמה

נתונות השפות

$$L_1 = \{x \in \{0,1\}^* \mid |x| \text{ זוגי} \} ,$$

$$L_2 = \{x \in \{0,1\}^* \mid |x| \text{ אי-זוגי} \} .$$

הוכיחו כי

$$L_1 \leq L_2 .$$

פתרון:

נגדיר את הפונקציה

$$f(x) = \begin{cases} 1 & |x| \text{ זוגי} \\ 10 & |x| \text{ אי-זוגי} \end{cases}$$

הוכחת הנכונות:

$$f(x) \in L_2 \text{ אי-זוגי } |f(x)| \Leftarrow f(x) = 1 \Leftarrow |x| \text{ זוגי } \Leftarrow x \in L_1$$

$$f(x) \notin L_2 \text{ זוגי } |f(x)| \Leftarrow f(x) = 10 \Leftarrow |x| \text{ אי-זוגי } \Leftarrow x \notin L_1$$

**משפט 8.1 משפט הרדוקציה**לכל שתי שפות  $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$ , אם קיימת רדוקציה

$$L_1 \leq L_2$$

אזי התנאים הבאים מתקיימים:

$$L_1 \in R \Leftarrow L_2 \in R \quad (1)$$

$$L_1 \in RE \Leftarrow L_2 \in RE \quad (2)$$

$$L_1 \notin R \Rightarrow L_2 \notin R \quad (3)$$

$$L_1 \notin RE \Rightarrow L_2 \notin RE \quad (4)$$

**הוכחה:** מכיוון ש-

$$L_1 \leq L_2$$

קיימת פונקציה  $f$  חשיבה המקיימת:

$$x \in L_1 \Leftrightarrow f(x) \in L_2$$

לכל  $x \in \Sigma^*$ .תהי  $M_f$  מ"ט המחשבת את  $f$ .

$$(1) \quad \underline{L_1 \in R \Leftarrow L_2 \in R} \text{ נוכיח}$$

תהי  $M_2$  מ"ט המכריעה את  $L_2$ .נבנה מ"ט  $M_1$  המכריעה את  $L_1$ .התאור של  $M_1$ 

$$M_1 = \text{על קלט } x:$$

1. מחשבת את  $f(x)$  בעזרת  $M_f$ .2. מריצה את  $M_2$  על  $f(x)$  ועונה כמוה.נוכיח כי  $M_1$  מכריעה את  $L_1$ .

$$\bullet \text{ אם } x \in L_1 \Leftarrow f(x) \in L_2 \Leftarrow M_2 \text{ מקבלת את } f(x) \Leftarrow M_1 \text{ מקבלת את } x.$$

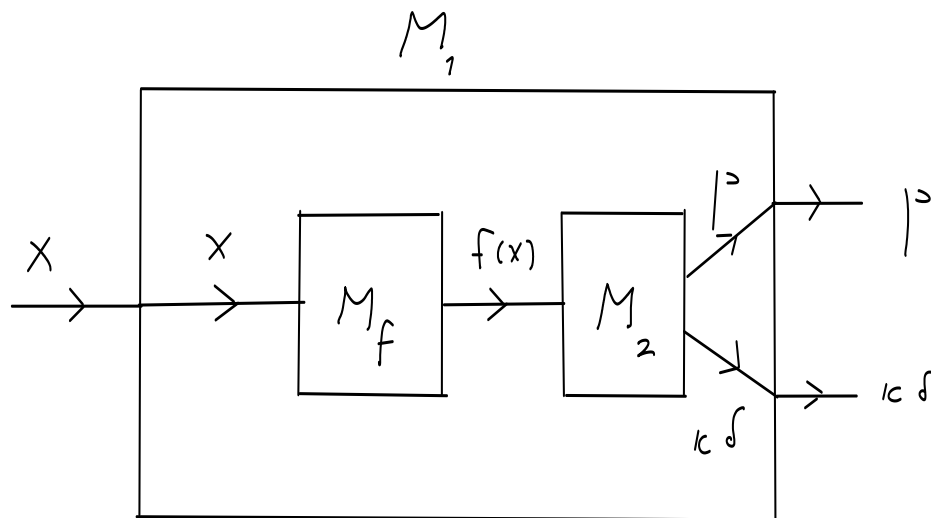


• אם  $x \notin L_1 \Leftrightarrow f(x) \notin L_2 \Leftrightarrow M_2$  דוחה את  $f(x) \Leftrightarrow M_1$  דוחה את  $x$ .

(2) נוכיח  $L_1 \in RE \Leftrightarrow L_2 \in RE$

תהי  $M_2$  מ"ט המקבלת את  $L_2$ .

נבנה מ"ט  $M_1$  המקבלת את  $L_1$ .



התאור של  $M_1$

$M_1 =$  על קלט  $x$ :

1. מחשבת את  $f(x)$  בעזרת  $M_f$ .

2. מריצה את  $M_2$  על  $f(x)$  ועונה כמוה.

נוכיח כי  $M_1$  מקבלת את  $L_1$ :

• אם  $x \in L_1 \Leftrightarrow f(x) \in L_2 \Leftrightarrow M_2$  מקבלת את  $f(x) \Leftrightarrow M_1$  מקבלת את  $x$ .

• אם  $x \notin L_1 \Leftrightarrow f(x) \notin L_2 \Leftrightarrow M_2$  לא מקבלת את  $f(x) \Leftrightarrow M_1$  לא מקבלת את  $x$ .

(3)

(4)

## כלל 8.1

• אם רוצים להוכיח כי שפה כלשהי  $L \in RE$ , בוחרים שפה אחרת  $L' \in RE$  ומראים שקיימת רדוקציה

$$L \leq L'.$$

לדוגמה:

$$L \leq L_{acc}$$

(כנ"ל לגבי  $R$ )

- אם רוצים להוכיח כי שפה כלשהי  $L \notin RE$  בוחרים שפה אחרת  $L' \notin RE$  ומראים שקיימת רדוקציה

$$L' \leq L.$$

לדוגמה

$$L_d \leq L$$

(כנ"ל לגבי  $R$ ).

## 8.6 דוגמה

נתונות השפות  $L_{acc} = \{\langle M, w \rangle \mid w \in L(M)\}$  ו-  $L_{halt} = \{\langle M, w \rangle \mid M \text{ עוצרת על } w\}$ .  
הוכיחו כי  $L_{acc} \notin R$  ע"י רדוקציה  $L_{acc} \leq L_{halt}$ .

### פתרון:

נבנה פונקציה  $f$  חשיבה ומקיימת

$$x \in L_{acc} \iff f(x) \in L_{halt}.$$

$$M \text{ מקבלת את } w \iff M' \text{ תעצור על } w'.$$

$$M \text{ דוחה את } w \iff M' \text{ לא תעצור על } w'.$$

$$M \text{ לא עוצרת את } w \iff M' \text{ לא תעצור על } w'.$$

$$f(x) = \begin{cases} \langle M', w \rangle & : x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_{loop}, \varepsilon \rangle & : x \neq \langle M, w \rangle \end{cases}$$

כאשר

- $M_{loop}$  מ"ט שלא עוצרת על אף קלט.

- $M'$  מ"ט המתנהגת כמו  $M$  פרט למקומות בהם  $M$  עצרה ודחתה,  $M'$  תיכנס ללולאה אינסופית.

### נכונות הרדוקציה

$f$  חשיבה כי ניתן לבנות מ"ט שתבדוק האם  $x = \langle M, w \rangle$ .

אם לא, תחזיר קידוד קבוע  $\langle M_{loop}, w \rangle$

ואם כן, תחזיר קידוד  $\langle M', w \rangle$  ע"י ביצוע שינויים לוקלים בקידוד של  $M$ .

$$x \in L_{acc} \iff f(x) \in L_{halt} \text{ נוכיח כי}$$

אם  $x \in L_{acc}$

$$w \in L(M) \text{ ו- } x = \langle M, w \rangle \Leftarrow$$

$$w \text{ עוצרת ומקבלת את } M' \text{ ו- } f(x) = \langle M', w \rangle \Leftarrow$$

$$f(x) \in L_{\text{halt}} \Leftarrow$$

אם  $x \notin L_{\text{acc}}$  אז שני מקרים:

מקרה 1:

$$f(x) \notin L_{\text{halt}} \Leftarrow \varepsilon \text{ לא עוצרת על } M_{\text{loop}} \text{ ו- } f(x) = \langle M_{\text{loop}}, \varepsilon \rangle \Leftarrow x \neq \langle M, w \rangle$$

מקרה 2:

$$\text{שני מקרים:} \quad \Leftarrow f(x) = \langle M', w \rangle \Leftarrow w \notin L(M) \text{ ו- } x = \langle M, w \rangle$$

$$\text{מקרה א:} \quad M \text{ לא עוצרת על } w \Leftarrow M' \text{ לא עוצרת על } w \Leftarrow f(x) \notin L_{\text{halt}}$$

$$\text{מקרה ב:} \quad M \text{ דוחה את } w \Leftarrow M' \text{ לא עוצרת על } w \Leftarrow f(x) \notin L_{\text{halt}}$$

לסיכום, הוכחנו רדוקציה  $L_{\text{acc}} \leq L_{\text{halt}}$ . ומכיוון ש-  $L_{\text{acc}} \notin R$  (משפט 7.4) אז ממשט הרדוקציה 8.1, מתקיים  $L_{\text{halt}} \notin R$ .

## 8.7 דוגמה

נתונה השפה

$$L_{\Sigma^*} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) = \Sigma^* \}$$

ונתונה השפה

$$\bar{L}_{\Sigma^*} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \neq \Sigma^* \} \cup \{ x \neq \langle M \rangle \} .$$

הוכיחו כי:

$$\text{א) } L_{\Sigma^*} \notin RE$$

$$\text{ב) } L_{\Sigma^*} \notin R$$

$$\text{ג) } \bar{L}_{\Sigma^*} \notin RE$$

**פתרון:**

נוכיח כי  $L_{\Sigma^*} \notin R$  ע"י רדוקציה

$$L_{\text{acc}} \leq L_{\Sigma^*} .$$

נבנה פונקציה חשיבה  $f$  המקיימת

$$x \in L_{\text{acc}} \Leftrightarrow f(x) \in L_{\Sigma^*} .$$

$$L(M') = \Sigma^* \Leftarrow w \in L(M)$$

$$L(M') \neq \Sigma^* \Leftarrow w \notin L(M)$$

$$f(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & : x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_{\emptyset} \rangle & : x \neq \langle M, w \rangle \end{cases}$$

- $M_\emptyset$  מ"ט שדוחה כל קלט.
- $M'$  היא מ"ט שעל כל קלט  $x$ , מתעלמת מ- $x$  ומריצה את  $M$  על  $w$  ועונה כמוה.

אבחנה:

$$L(M') = \begin{cases} \Sigma^* & : w \in L(M) \\ \emptyset & : w \notin L(M) \end{cases}$$

נכונות הרדוקציה:

$f$  חשיבה כי ניתן לבנות מ"ט שתבדוק האם  $x = \langle M, w \rangle$ .

אם לא תחזיר קידוד קבוע  $\langle M_\emptyset \rangle$ .

אם כן, תחזיר קידוד  $\langle M' \rangle$  ע"י הוספת קוג ל- $M$  שמוחק את הקלט מהסרט וכותב  $w$  במקומו.

נוכיח כי

$$x \in L_{\text{acc}} \Leftrightarrow f(x) \in L_{\Sigma^*}$$

$$\Leftrightarrow L(M') = \Sigma^* \text{ ולפי האבחנה } f(x) = \langle M' \rangle \Leftrightarrow w \in L(M) \text{ ו- } x = \langle M, w \rangle \Leftrightarrow x \in L_{\text{acc}} \text{ אם } f(x) \in L_{\Sigma^*}$$

$$\text{אם } x \in L_{\text{acc}} \Leftrightarrow \text{שני מקרים:}$$

$$\text{מקרה 1: } f(x) \notin L_{\Sigma^*} \Leftrightarrow L(M_\emptyset) = \emptyset \text{ ו- } f(x) = \langle M_\emptyset \rangle \Leftrightarrow x \neq \langle M, w \rangle$$

$$\text{מקרה 2: } f(x) \notin L_{\Sigma^*} \Leftrightarrow L(M') = \emptyset \text{ ולפי האבחנה } f(x) = \langle M' \rangle \Leftrightarrow w \notin L(M) \text{ ו- } x = \langle M, w \rangle$$

לסיכום, הוכחנו רדוקציה  $L_{\text{acc}} \leq L_{\Sigma^*}$ . ומכיוון ש- $L_{\text{acc}} \notin R$  (משפט 7.4) אז ממשט הרדוקציה 8.1, מתקיים  $L_{\Sigma^*} \notin R$ .

## 8.8 דוגמה

נתונה השפה

$$L_d = \{ \langle M \rangle \mid \langle M \rangle \notin L(M) \}$$

ונתונה השפה

$$\bar{L}_{\text{acc}} = \{ \langle M, w \rangle \mid w \notin L(M) \} \cup \{ x \neq \langle M, w \rangle \}.$$

הוכיחו כי

$$\bar{L}_{\text{acc}} \notin RE \text{ ע"י רדוקציה}$$

$$L_d \leq \bar{L}_{\text{acc}}.$$

**פתרון:**

נבנה פונקציה חשיבה  $f$  המקיימת

$$x \in L_d \Leftrightarrow f(x) \in L_{\text{acc}}.$$

$$w' \notin L(M') \Leftrightarrow \langle M \rangle \notin L(M)$$

$$w' \in L(M') \Leftrightarrow \langle M \rangle \in L(M)$$

$$f(x) = \begin{cases} \langle M, \langle M \rangle \rangle & : x = \langle M \rangle \\ \langle M^*, \varepsilon \rangle & : x \neq \langle M \rangle \end{cases}$$

כאשר  $M^*$  המ"ט שמקבלת כל קלט.

נכונות הרדוקציה:

$f$  חשיבה כי ניתן לבנות מ"ט שתבדוק האם  $x = \langle M, w \rangle$

אם לא תחזיר קידוד קבוע  $\langle M^*, \varepsilon \rangle$ .

אם כן, תחשב  $\langle M, \langle M \rangle \rangle$ .

נוכיח כי

$$\begin{aligned} x \in L_d &\Leftrightarrow f(x) \in \bar{L}_{acc} \\ \Leftrightarrow \langle M \rangle \notin L(M) \text{ ו- } f(x) = \langle M, \langle M \rangle \rangle &\Leftrightarrow \langle M \rangle \notin L(M) \text{ ו- } x = \langle M \rangle \Leftrightarrow \begin{aligned} &x \in L_d \text{ אם } \\ &f(x) \in \bar{L}_{acc} \end{aligned} \end{aligned}$$

אם  $x \notin L_d$  שני מקרים:

$$\text{מקרה 1: } f(x) \notin \bar{L}_{acc} \Leftrightarrow \varepsilon \in L(M^*) \text{ ו- } f(x) = \langle M^*, \varepsilon \rangle \Leftrightarrow x \neq \langle M \rangle$$

$$\text{מקרה 2: } f(x) \notin \bar{L}_{acc} \Leftrightarrow \langle M \rangle \in L(M) \text{ ו- } f(x) = \langle M, \langle M \rangle \rangle \Leftrightarrow \langle M \rangle \in L(M) \text{ ו- } x = \langle M \rangle$$

לסיכום, הוכחנו רדוקציה  $L_d \leq \bar{L}_{acc}$ , ומכיוון ש-  $L_d \notin RE$  (משפט 7.3) אז ממשט הרדוקציה 8.1, מתקיים  $\bar{L}_{acc} \notin RE$ .

## משפט 8.2 משפט הרדוקציה בין שפות משלימות

אם קיימת רדוקציה  $L_1 \leq L_2$ , אזי קיימת רדוקציה  $\bar{L}_1 \leq \bar{L}_2$ .

**הוכחה:**

אם  $\exists$  רדוקציה

$$L_1 \leq L_2$$

אזי  $\exists$  פונקציה חשיבה  $f$  המקיימת

$$x \in L_1 \Leftrightarrow f(x) \in L_2$$

ולכן עבור אותה פונקציה  $f$  היא גם חשיבה וגם מקיימת

$$x \in \bar{L}_1 \Leftrightarrow f(x) \in \bar{L}_2$$

ולכן

$$\bar{L}_1 \leq \bar{L}_2 .$$

## 8.4 דוגמאות בשימוש של משפט הרדוקציה בין שפות משלימות (משפט 8.2)

### 8.9 דוגמה

הוכחנו בדוגמה 8.7 רדוקציה

$$L_{acc} \leq L_{\Sigma^*}.$$

לכן לפי משפט 8.2 קיימת רדוקציה

$$\bar{L}_{acc} \leq \bar{L}_{\Sigma^*}.$$

מכיוון ש-  $\bar{L}_{acc} \notin RE$ , אזי ממשפט הרדוקציה 8.1 מתקיים  $\bar{L}_{\Sigma^*} \notin RE$ .

### 8.10 דוגמה

הוכחנו בדוגמה 8.8 רדוקציה

$$L_d \leq \bar{L}_{acc}.$$

לכן לפי משפט 8.2 קיימת רדוקציה

$$\bar{L}_d \leq L_{acc}.$$

מכיוון ש-  $L_{acc} \in RE$ , אזי ממשפט הרדוקציה 8.1 מתקיים  $\bar{L}_d \in RE$ .

## 8.5 דוגמאות בשימוש של משפט הרדוקציה (משפט 8.1)

### 8.11 דוגמה $\bar{L}_{acc} \leq L_{NOTREG}$

תהי  $L_{NOTREG}$  השפה

$$L_{NOTREG} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ לא רגולרית} \}.$$

הוכיחו כי השפה  $L_{NOTREG}$  לא כריעה על ידי רדוקציה מ-  $\bar{L}_{acc}$ .

### פתרון:

השפה  $\bar{L}_{acc}$  מוגדרת

$$\bar{L}_{acc} = \{ \langle M, w \rangle \mid w \text{ לא מקבלת } M \} \cup \{ x \neq \langle M, w \rangle \}.$$

והשפה  $L_{NOTREG}$  מוגדרת

$$L_{NOTREG} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ לא רגולרית} \}.$$

נגדיר הפונקציה הבאה:

$$f(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & x = \langle M, w \rangle \\ w' \in PAL & x \neq \langle M, w \rangle \end{cases}$$

כאשר  $M'$  מ"ט הבאה:

$M' =$  על כל קלט  $y$ :

(1) אם  $y \in PAL \Leftarrow$  מקבלת.

(2) אחרת מריצה  $M$  על  $w$  ועונה כמוה.

### הוכחת נכונות הרדוקציה

אם  $x \in \bar{L}_{acc}$   $\Leftarrow$  שני מקרים:

מקרה 1:  $x = \langle M, w \rangle$

$\Leftarrow M$  לא מקבלת  $w$

$\Leftarrow L(M') \in PAL$

$\Leftarrow \langle M' \rangle \in PAL$

$\Leftarrow f(x) \in PAL$

$\Leftarrow f(x) \in L_{NOTREG}$

מקרה 2:  $x \neq \langle M, w \rangle$   $\Leftarrow f(x) \in PAL \Leftarrow f(x) \in L_{NOTREG}$

אם  $x \notin \bar{L}_{acc}$   $\Leftarrow M$  מקבלת  $w$   $\Leftarrow L(M') = \Sigma^*$   $\Leftarrow f(x) \in \Sigma^*$   $\Leftarrow f(x) \in L_{NOTREG}$

לכן הוכחנו כי  $x \in \bar{L}_{acc} \Leftrightarrow f(x) \in NOTERG$ , ז"א  $f(x)$  היא רדוקציה מ- $L_{acc}$  ל- $L_{NOTREG}$ .

השפה  $\bar{L}_{acc}$  לא כריעה. לפיכך, לפי משפט הרדוקציה גם  $L_{NOTREG}$  לא כריעה.

### 8.12 דוגמה $L_{acc} \leq L_{NOTREG}$

תהי  $L_{NOTREG}$  השפה

$$L_{NOTREG} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ לא רגולרית} \}.$$

הוכיחו כי השפה  $L_{NOTREG}$  לא כריעה על ידי רדוקציה מ- $L_{acc}$ .

### פתרון:

השפה  $L_{acc}$  מוגדרת

$$L_{acc} = \{ \langle M, w \rangle \mid M \text{ מקבלת } w \}.$$

והשפה  $L_{NOTREG}$  מוגדרת

$$L_{NOTREG} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ לא רגולרית} \}.$$

נגדיר הפונקציה הבאה:

$$f(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_{\emptyset} \rangle & x \neq \langle M, w \rangle \end{cases}$$

כאשר  $M'$  מ"ט הבאה:

$M' =$  על כל קלט  $y$ :

(1)  $M'$  מריצה  $M$  על  $w$ .

(2) אם  $M$  דוחה  $\Leftarrow$  דוחה.

• אם  $M$  מקבלת  $\Leftarrow M'$  בודקת אם  $y$  פלינדרום.

\* אם כן  $\Leftarrow$  מקבלת.

\* אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.

### הוכחת נכונות הרדוקציה

אם  $x \in L_{acc}$   $\Leftarrow M$  מקבלת  $w$   $\Leftarrow L(M') = PAL$   $\Leftarrow f(x) \in PAL$   $\Leftarrow f(x) \in L_{NOTREG}$ .

$x \notin L_{acc}$   $\Leftarrow$  שני מקרים.

מקרה 1:  $x \neq \langle M, w \rangle \Leftarrow f(x) = \langle M_\emptyset \rangle$  ו-  $L(M_\emptyset) = \emptyset \Leftarrow \langle M_\emptyset \rangle \notin L_{NOTREG}$   $\Leftarrow f(x) \notin L_{NOTREG}$ .

מקרה 2:  $x = \langle M, w \rangle$  ו-  $M$  לא מקבלת  $w$   $\Leftarrow L(M') = \emptyset \Leftarrow \langle M' \rangle \notin L_{NOTREG}$   $\Leftarrow f(x) \notin L_{NOTREG}$ .

### **8.13 דוגמה** $L_{HALT} \leq L_{NOTREG}$

תהי  $L_{NOTREG}$  השפה

$$L_{NOTREG} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ לא רגולרית} \}.$$

הוכיחו כי השפה  $L_{NOTREG}$  לא כריעה על ידי רדוקציה מ-  $L_{HALT}$ .

### **פתרון:**

השפה  $L_{HALT}$  מוגדרת

$$L_{HALT} = \{ \langle M, w \rangle \mid M \text{ עוצרת על } w \}.$$

והשפה  $L_{NOTREG}$  מוגדרת

$$L_{NOTREG} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ לא רגולרית} \}.$$

נגדיר הפונקציה הבאה:

$$f(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_\emptyset \rangle & x \neq \langle M, w \rangle \end{cases}.$$

כאשר  $M'$  מ"ט הבאה:

$M' =$  על כל קלט  $y$ :

(1)  $M'$  מריצה  $M$  על  $w$ .

(2) אם  $M$  דוחה  $\Leftarrow$  דוחה.

• אם  $M$  מקבלת  $\Leftarrow$  ממשיכה לשלב (3).

(3)  $M'$  בודקת אם  $y \in PAL$ .

• אם כן  $\Leftarrow$  מקבלת.

• אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.



הוכחת הנכונות

$$L(M') \in L_{\text{NOTREG}} \iff L(M') \in PAL \iff x \in L_{\text{HALT}}$$

$$\text{שני מקרים:} \iff x \notin L_{\text{HALT}}$$

$$\langle M_\emptyset \rangle \notin L_{\text{NOTREG}} \iff L(M_\emptyset) = \emptyset \text{ ו- } f(x) = \langle M_\emptyset \rangle \iff x \neq \langle M, w \rangle \quad \text{מקרה 1:}$$

$$f(x) \notin L_{\text{NOTREG}} \iff$$

$$\langle M_\emptyset \rangle \notin L_{\text{NOTREG}} \iff L(M_\emptyset) = \emptyset \iff w \text{ לא עוצרת על } M \text{ ו- } x = \langle M, w \rangle \quad \text{מקרה 2:}$$

$$f(x) \notin L_{\text{NOTREG}} \iff$$

**דוגמה 8.14**  $\bar{L}_{\text{acc}} \leq L_{\text{REG}}$ תהי  $L_{\text{REG}}$  השפה

$$L_{\text{REG}} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ רגולרית} \}.$$

הוכיחו כי השפה  $L_{\text{REG}}$  לא כריעה על ידי רדוקציה מ- $\bar{L}_{\text{acc}}$ .**פתרון:**השפה  $\bar{L}_{\text{acc}}$  מוגדרת

$$\bar{L}_{\text{acc}} = \{ \langle M, w \rangle \mid w \text{ לא מקבלת } M \} \cup \{ x \mid x \neq \langle M, w \rangle \}.$$

והשפה  $L_{\text{REG}}$  מוגדרת

$$L_{\text{REG}} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ רגולרית} \}.$$

נגדיר הפונקציה הבאה:

$$f(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_\emptyset \rangle & x \neq \langle M, w \rangle \end{cases}$$

כאשר  $M_\emptyset$  המ"ט שדוחה כל קלט ו- $M'$  מ"ט הבאה:

$$M' = \text{על כל קלט } y:$$

(1) מריצה  $M$  על  $w$ .(2) • אם  $M$  דוחה  $\Leftarrow$  דוחה.• אם  $M$  מקבלת  $\Leftarrow$  בודקת אם  $y$  פלינדרום:• אם כן  $\Leftarrow$  מקבלת.• אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.אבחנה

$$L(M') = \begin{cases} PAL & w \in L(M) \\ \emptyset & w \notin L(M) \end{cases}$$

הוכחת נכונות הרדוקציה

אם  $x \in \bar{L}_{acc}$  שני מקרים:  $\Leftarrow$

מקרה 1:  $x \neq \langle M, w \rangle \Leftarrow f(x) = \langle M_{\emptyset} \rangle \Leftarrow L(M_{\emptyset}) = \emptyset \Leftarrow \langle M_{\emptyset} \rangle \in L_{REG} \Leftarrow f(x) \in L_{REG}$

מקרה 2:  $x = \langle M, w \rangle \Leftarrow x \notin L(M) \Leftarrow f(x) = \langle M' \rangle \Leftarrow L(M') = \emptyset$  ולפי האבחנה  $\langle M_{\emptyset} \rangle \in L_{REG} \Leftarrow f(x) \in L_{REG}$

אם  $x \notin \bar{L}_{acc} \Leftarrow w \in L(M) \Leftarrow f(x) = \langle M' \rangle \Leftarrow L(M') \in PAL$  ולפי האבחנה  $f(x) \in PAL \Leftarrow f(x) \notin L_{REG}$

## 8.15 דוגמה $L_{acc} \leq L_{REG}$

תהי  $L_{REG}$  השפה

$$L_{REG} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ רגולרית} \}.$$

הוכיחו כי השפה  $L_{REG}$  לא כריעה על ידי רדוקציה מ- $L_{acc}$ .

## פתרון:

השפה  $L_{acc}$  מוגדרת

$$L_{acc} = \{ \langle M, w \rangle \mid M \text{ מקבלת } w \}.$$

והשפה  $L_{REG}$  מוגדרת

$$L_{REG} = \{ \langle M \rangle \mid L(M) \text{ רגולרית} \}.$$

נגדיר הפונקציה הבאה:

$$f(x) = \begin{cases} \langle M' \rangle & x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_{PAL} \rangle & x \neq \langle M, w \rangle \end{cases}$$

כאשר  $M_{PAL}$  המ"ט שמכריעה את השפה של פלינדרומים, ו- $M'$  מ"ט הבאה:

$$M' = \text{על כל קלט } y:$$

(1)  $M'$  בודקת אם  $y$  פלינדרום:

- אם כן  $\Leftarrow$  מקבלת.
- אם לא מריצה  $M$  על  $w$  ועונה כמזה.

## הוכחת נכונות הרדוקציה

אם  $x \in L_{acc} \Leftarrow M \text{ מקבלת } w \Leftarrow L(M') = \Sigma^* \Leftarrow f(x) \in REG$

$x \notin L_{acc} \Leftarrow$  שני מקרים:

מקרה 1:  $x \neq \langle M, w \rangle \Leftarrow f(x) = \langle M_{PAL} \rangle \Leftarrow L(M_{PAL}) = PAL \Leftarrow \langle M_{PAL} \rangle \notin L_{REG}$

מקרה 2:  $x = \langle M, w \rangle \Leftarrow M \text{ לא מקבלת } w \Leftarrow L(M') = PAL \Leftarrow \langle M' \rangle \notin L_{REG}$

**דוגמה 8.16**  $\bar{L}_{acc} \leq L_{M_1 \neg M_2}$ 

נתונה השפה הבאה:

$$L = \{ \langle M_1, M_2, w \rangle \mid w \in L(M_1) \wedge w \notin L(M_2) \} .$$

הוכיחו כי  $L \notin RE$  ע"י רדוקציה מ-  $\bar{L}_{acc}$ .**פתרון:**פונקצית הרדוקציה:

$$f(x) = \begin{cases} \langle M^*, M, w \rangle & x = \langle M, w \rangle \\ \langle M^*, M_\emptyset, \varepsilon \rangle & x \neq \langle M, w \rangle \end{cases}$$

כאשר

•  $M^*$  היא מ"ט שמקבלת כל קלט•  $M_\emptyset$  היא מ"ט שדוחה כל קלט.נכונת הרדוקציה:

ראשית,  $f$  חשיבה כי ניתן לבנות מ"ט שתבדוק האם  $x = \langle M, w \rangle$ . אם לא, תחזיר קידוד קבוע  $\langle M^*, M_\emptyset, \varepsilon \rangle$  ואם כן, תחזיר קידוד  $\langle M^*, M, w \rangle$ .

נוכיח כי

$$x \in \bar{L}_{acc} \iff f(x) \in L_{M_1 \neg M_2} .$$

אם  $x \in \bar{L}_{acc}$   $\Leftarrow$  שני מקרים:

$$f(x) \in L_{M_1 \neg M_2} \iff x \neq \langle M, w \rangle \iff f(x) = \langle M^*, M_\emptyset, \varepsilon \rangle \iff \varepsilon \notin L(M_\emptyset) \text{ ו- } \varepsilon \in L(M^*) \iff x \notin \bar{L}_{acc} .$$

$$\text{מקרה 2: } x = \langle M, w \rangle \text{ ו- } w \notin L(M) \iff f(x) = \langle M^*, M, w \rangle \iff w \in L(M^*) \text{ ו- } w \notin L(M) \iff f(x) \notin L_{M_1 \neg M_2} .$$

$$\text{אם } x \notin \bar{L}_{acc} \iff x = \langle M, w \rangle \text{ ו- } w \in L(M) \iff f(x) = \langle M^*, M, w \rangle \iff w \in L(M^*) \text{ ו- } w \in L(M) \iff f(x) \in L_{M_1 \neg M_2} .$$

לסיכום, הוכחנו רדוקציה  $\bar{L}_{acc} \leq L_{M_1 \neg M_2}$ , ומכיון ש-  $\bar{L}_{acc} \notin RE$  ממשפט הרדוקציה מתקיים  $L_{M_1 \neg M_2} \notin RE$ .

**דוגמה 8.17**  $L_{acc} \leq L_{M_1 \subset M_2}$ 

נתונה השפה הבאה:

$$L = \{ \langle M_1, M_2, w \rangle \mid w \in L(M_1) \wedge w \notin L(M_2) \} .$$

הוכיחו כי  $L \notin RE$  ע"י רדוקציה מ-  $L_{acc}$ .**פתרון:**פונקצית הרדוקציה:

$$f(x) = \begin{cases} \langle M_\emptyset, M' \rangle & x = \langle M, w \rangle \\ \langle M_\emptyset, M_\emptyset \rangle & x \neq \langle M, w \rangle \end{cases}$$

כאשר

- $M_\emptyset$  היא מ"ט שדוחה כל קלט.
- $M'$  היא מ"ט שעל קלט  $y$  מתעלמת מ- $y$  ומריצה  $M$  על  $w$  ועונה כמוה.

אבחנה:

$$L(M') = \begin{cases} \Sigma^* & w \in L(M) \\ \emptyset & w \notin L(M) \end{cases}.$$

נכונת הרדוקציה:

ראשית,  $f$  חשיבה כי ניתן לבנות מ"ט שתבדוק האם  $x = \langle M, w \rangle$ . אם לא, תחזיר קידוד קבוע  $\langle M_\emptyset, M_\emptyset \rangle$  ואם כן, תחזיר קידוד  $\langle M^*, M' \rangle$ , כאשר  $M_\emptyset$  היא קידוד קבוע ו- $M'$  נוצר ע"י הוספת קוד ל- $\langle M \rangle$  המוחק את הקלט  $y$  ורושם  $w$  במקומו.

נוכיח כי

$$x \in L_{\text{acc}} \iff f(x) \in L_{M_1 \subset M_2}.$$

$$L(M') = \Sigma^* \text{ ולפי האבחנה } f(x) = \langle M_\emptyset, M' \rangle \iff x = \langle M, w \rangle \text{ ו- } w \in L(M) \iff x \in L_{\text{acc}} \\ f(x) \in L_{M_1 \subset M_2} \iff L(M_\emptyset) \subset L(M') \iff$$

$$x \notin L_{\text{acc}} \iff \text{שני מקרים:}$$

$$\text{מקרה 1: } x \neq \langle M, w \rangle \iff f(x) = \langle M_\emptyset, M_\emptyset \rangle \text{ ו- } L(M_\emptyset) = L(M_\emptyset) \iff f(x) \notin L_{M_1 \subset M_2}.$$

$$\text{מקרה 2: } x = \langle M, w \rangle \text{ ו- } w \notin L(M) \iff f(x) = \langle M_\emptyset, M' \rangle \text{ ולפי האבחנה } L(M') = \emptyset \\ L(M') = L(M_\emptyset) \iff f(x) \notin L_{M_1 \subset M_2}.$$

לסיכום, הוכחנו רדוקציה  $L_{\text{acc}} \leq L_{M_1 \subset M_2}$ , ומכיוון ש- $L_{\text{acc}} \notin R$  ממשפט הרדוקציה מתקיים  $L_{M_1 \subset M_2} \notin R$ .

## שיעור 9

### מבוא לסיבוכיות

## 9.1 הגדרה של סיבוכיות

### 9.1 הערה

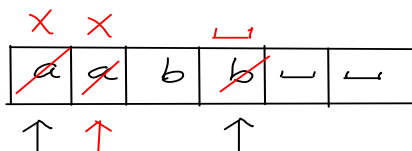
זמן ריצה של מ"ט  $M$  על קלט  $w$ , נמדד ביחס לגודל הקלט  $w$ , כלומר  $f(|w|)$ .

### 9.1 הגדרה

נאמר כי ניתן להכריע שפה  $L$  בזמן  $f(n)$ , אם קיימת מ"ט  $M$  המכריעה את  $L$  ולכן קלט  $w \in \Sigma^*$ , זמן הריצה של  $M$  על  $w$  חסום ע"י  $f(|w|)$ .

### 9.1 דוגמה

נבנה מ"ט  $M$  המכריעה השפה  $L = \{a^n b^n \mid n \geq 0\}$ .



התאור של  $M$ :

על קלט  $w$ :

- (1) אם התו שמתחת לראש הוא  $\_$   $\Leftarrow$  מקבלת.
  - (2) אם התו שמתחת לראש הוא  $b$   $\Leftarrow$  דוחה.
  - (3) מוחקת את התו שמתחת לראש ע"י  $X$ .
  - (4) מזיזה את הראש ימינה עד התו הראשון משמאל ל-  $\_$ .
- אם התו הוא  $a$  או  $X$   $\Leftarrow$  דוחה.
  - מוחקת את התו שמתחת לראש ע"י  $\_$ , מזיזה את הראש שמאלה עד התו הראשון מימין ל-  $X$  וחוזרת ל- (1).

זמן הריצה

•  $\frac{|w|}{2}$  איטרציות.

• בכל איטרציה מבצעים  $O(|w|)$  צעדים.

$$\frac{|w|}{2} \cdot O(|w|) = O(|w|^2).$$

**הגדרה 9.2 זמן הריצה**

זמן הריצה של מ"ט  $M$  על קלט  $w$  היא פונקציה  $f(|w|)$  השווה למספר הצעדים הנדרש בחישוב של  $M$  על  $w$ .

**הערה 9.2**

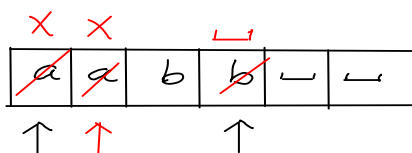
זמן הריצה של מ"ט נמדד ביחס לגודל הקלט  $|w|$ .

**הגדרה 9.3**

אומרים כי ניתן להכריעה שפה  $L$  בזמן  $f(n)$  אם קיימת מ"ט  $M$  המכריעה את  $L$  כך שלכל  $w \in \Sigma^*$ , זמן הריצה של  $M$  על  $w$  חסום ע"י  $f(|w|)$ .

**דוגמה 9.2**

נבנה מ"ט  $M$  עם סרט יחיד שמכריעה את השפה  $L = \{a^n b^n \mid n \geq 0\}$ .



התאור של  $M$ :

על קלט  $w$ :

(1) אם התו שמתחת לראש הוא  $\_$  מקבלת.

(2) אם התו שמתחת לראש הוא  $b$  דוחה.

(3) מוחקת את התו שמתחת לראש ע"י  $X$ .

(4) מזיזה את הראש ימינה עד התו הראשון משמאל ל-  $\_$ .

• אם התו הוא  $a$  או  $X$  דוחה.

• מוחקת את התו שמתחת לראש ע"י  $\_$ , מזיזה את הראש שמאלה עד התו הראשון מימין ל-  $X$  וחוזרת ל- (1).

זמן הריצה

•  $M$  מבצעת  $\frac{|w|}{2}$  איטרציות.

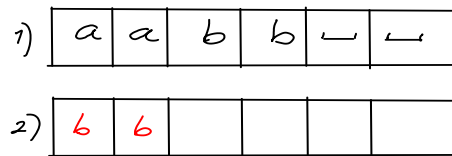
• בכל איטרציה  $M$  סורקת את הסרט פעמיים וזה עולה  $O(|w|)$ .

• לכן סה"כ זמן הריצה של  $M$  חסום ע"י

$$\frac{|w|}{2} \cdot O(|w|) = O(|w|^2).$$

### דוגמה 9.3

נבנה מ"ט מרובת סרטים  $M'$  שמכריעה את השפה  $L = \{a^n b^n \mid n \geq 0\}$ .



התאור של  $M'$ :

על קלט  $w$ :

- (1) מעתיקה את ה- $b$  ים לסרט 2 (ותוך כדי בודקת האם  $w$  מהצורה  $a^*b^*$ ).  $O(|w|)$
- (2) מזיזה את הראשים לתחילת הסרטים.  $O(|w|)$
- (3) אם שני הראשען מצביעים על  $\_$  מקבלת.
- (4) אם אחד הראשים מצביע על  $\_$  והשני לא  $\Leftarrow$  לא.
- (5) מזיזה את שהע הראשים ימינה וחוזרת לשלב (3). שלבים (3-5):  $O(|w|)$ .

זמן הריצה

זמן הריצה של  $M'$  הוא  $O(|w|)$ .

## 9.2 יחס בין הסיבוכיות של מ"ט סרט יחיד ומטמ"ס

### משפט 9.1

לכל מ"ט מרובת סרטים  $M$  הרצה בזמן  $f(n)$  קיימת מ"ט סרט יחיד  $M'$  השקולה ל- $M$  ורצה בזמן  $O(f^2(n))$ .

הוכחה:

בהינתן מ"ט מרובת סרטים  $M$ , הרצה בזמן  $f(n)$ , נבנה מ"ט עם סרט יחיד  $M'$  באותו אופן כמו בהוכחת השקילות במשפט 3.1.

כלומר,  $M'$  שומרת את התוכן של  $k$  סרטים של  $M$  על הסרט היחיד שלה (עם הפרדה ע"י #), ובכל צעד חישוב,  $M'$  סורקת את הסרט שלה כדי לזהות שת האותיות שמתחת לראשים (שמסומנות ב- $\hat{a}$ ) ואחרי זה, משתמשת בפונקצית המעברים של  $M$ , וסורקת את הסרט פעם נוספת כדי לעדכן את התוכן בכל אחד מהסרטים ואת מיקום הראש בכל אחד מהסרטים.

1) 2) 

⋮

k) 

#	$\hat{\alpha}_1$	#	$\hat{\alpha}_2$	#	$\hat{\alpha}_3$	#	
---	------------------	---	------------------	---	------------------	---	--

כמה לוקח ל-  $M'$  לסרוק את הסרט שלה? מכיוון שהסרט של  $M'$  מכיל את התוכן של  $k$  הסרטים של  $M$ , והגודל של כל אחד מהסרטים של  $M$  חסום ע"י  $f(n)$ , גודל הסרט של  $M'$  חסום ע"י

$$k \cdot f(n) = O(f(n)) .$$

העלות של הסריקה של  $M'$  לסרט שלה היא  $O(f(n))$  וזה עלות של צעד חישוב בריצה של  $M'$  על הקלט.

מכיוון ש-  $M$  רצה בזמן  $f(n)$ , זמן היצרה של  $M'$  חסום ע"י

$$f(n) \cdot O(f(n)) = O(f^2(n)) .$$

■

## 9.3 יחס בין הסיבוכיות של מ"ט דטרמיניסטית ומ"ט א"ד

### הגדרה 9.4

בהינתן מ"ט א"ד  $M$ , זמן הריצה של  $M$  על קלט  $w$ , היא פונקציה  $f(|w|)$  השווה למספר הצעדים בחישוב המקסימלי של  $M$  על  $w$ .

### משפט 9.2

לכל מ"ט א"ד  $N$  הרצה בזמן  $f(n)$ , קיימת מ"ט דטרמיניסטית  $D$  השקולה ל-  $N$  ורצה בזמן  $2^{(f(n))}$ .



**הוכחה:**

בהינתן מ"ט א"ד  $N$  הרצה בזמן  $f(n)$  מ"ט דטרמיניסטית  $D$  באותו אופן כמו בהוכחת השקילות במשפט 4.1.

כלומר, בהינתן קלט  $w$ ,  $D$  תסרו' את עץ החישוב של  $N$  ו-  $w$  לרוחב ותקבל כל אחד החישובים של  $N$  המסתיים ב-  $q_{acc}$ .

בהינתן קלט  $w$  באורך  $n$ :

- כל מסלול בעץ החישוב של  $N$  על  $w$  חסום ע"י  $f(n)$ .
- מספר החישובים ש-  $D$  מבצעת חסום ע"י מספר הקודקודים בעץ החישוב של  $N$  ו-  $w$ .
- מכיוון שמספר הבנים של כל קודקוד בעץ החישוב חסום ע"י

$$C = 3|Q| \cdot |\Gamma|$$

מספר הקודקודים בעץ החישוב חסום ע"י

$$C^0 + C^2 + \dots C^{f(n)} \leq C^{f(n)+1} = C \cdot C^{f(n)}.$$

ולכן זמן הריצה של  $D$  חסום ע"י

$$f(n) \cdot C \cdot C^{f(n)} \leq C^{f(n)} \cdot C^{f(n)} = C^{2f(n)} = (C^2)^{f(n)} = 2^{C' \cdot f(n)} = 2^{O(f(n))}.$$

נתייחס כאן לשני החסמים הבאים:



(1) חסם פולינומיאלי הוא חסם מהצורה  $n^c$  עבור  $c > 0$  כלשהו.

(2) חסם אקספוננציאלי הוא חסם מהצורה  $2^{n^c}$  עבור  $c > 0$  כלשהו.

### הגדרה 9.5 בעיית הכרעה

בעיית הכרעה מוגדרת באופן הבא:

"בהינתן קלט כלשהו, האם הקלט מקיים תנאי מסוים"

### דוגמה 9.4

בהינתן מספר  $n$ , האם  $n$  ראשוני?

כל בעיית הכרעה ניתן לתאר כפשה שקולה:

$$L_{\text{prime}} = \{ \langle n \rangle \mid n \text{ ראשוני} \}.$$

### משפט 9.3

. שפה  $\equiv$  בעיית הכרעה

**הגדרה 9.6 אלגוריתם זמן פולינומיאלי**

אומרים כי אלגוריתם  $A$  מכריעה בעייה בזמן פולינומיאלי אם קיים קבוע  $c > 0$  כך שזמן הריצה של  $A$  על כל קלט  $w$  חסום ע"י  $O(|w|^c)$ .

**משפט 9.4 התזה של צירץ' (Church Thesis)**

אם קיים אלגוריתם המכריע בעייה בזמן פולינומיאלי, אז קיימת מ"ט דטרמיניסטית המכריעה את השפה השקולה לבעייה זו בזמן פולינומיאלי.

. מכונת טיורינג  $\equiv$  אלגוריתם מכריעה

**9.4 המחלקה  $P$** **הגדרה 9.7 המחלקה  $P$** 

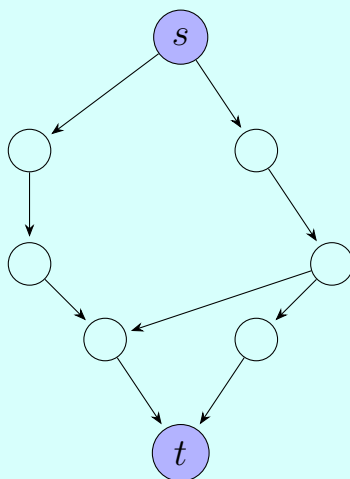
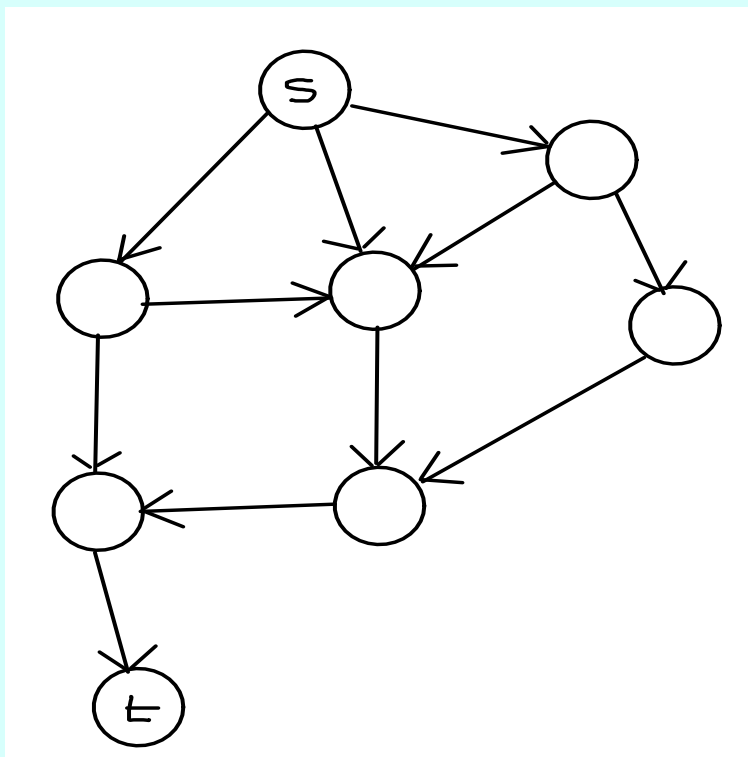
המחלקה  $P$  היא אוסף כל הבעיות (השפות) שקיים עבורן אלגוריתם (מכונת טיורינג דטרמיניסטית) המכריע אותן בזמן פולינומיאלי.

**דוגמה 9.5**

$$L = \{a^n b^n \mid n \geq 0\} \in P.$$

**9.5 בעיית PATH**

## הגדרה 9.8 בעיית המסלול בגרף מכוון



קלט: גרף מכוון  $G = (V, E)$  ושני קודקודים  $s, t \in V$ .

פלט: האם קיים מסלול ב- $G$  מ- $s$  ל- $t$ ?

$$PATH = \{ \langle G, s, t \rangle \mid t \text{ מ-} s \text{ ל-} t \text{ ב-} G \}$$

## משפט 9.5

$$PATH \in P.$$

הוכחה: נבנה אלגוריתם  $A$  עבור הבעיה  $PATH$ .

$A = \langle G, s, t \rangle$  על קלט

(1) צובע את  $s$ .

(2) מבצע  $|V| - 1$  פעמים:

• לכל  $(u, v) \in E$  צלע

\* אם  $u$  צבוע  $\Leftarrow$  צבע את  $v$ .

(3) • אם  $t$  צבוע  $\Leftarrow$  החזיר "כן".

• אחרת  $\Leftarrow$  החזיר "לא".

זמן ריצה של האלגוריתם הוא  $O(|V| \cdot |E|)$  פולינומיאלי במספר הקודקודים  $|V|$ .

האם זה פולינומיאלי בגודל הקלט  $|\langle G \rangle|$ ?

איך נקודד את  $G$ ?

• נניח כי  $|V| = n$  ו-  $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ .

• נניח כי הצלעות נתונות ע"י מטריצה  $M$  בגודל  $n \times n$  כך ש-

$$M_{ij} = \begin{cases} 1 & (i, j) \in E \\ 0 & (i, j) \notin E \end{cases}.$$

• נניח כי מספרים מקודדים בבסיס ביניארי.

• אזי גודל הקידוד של  $G$  שווה  $n^2 + n \log_2 n$ , כלומר

$$|\langle G \rangle| = \Omega(|V|^2) \Rightarrow |V| = O(|\langle G \rangle|).$$

ולכן כל אלגוריתם הרץ בזמן פולינומיאלי במספר הקודקודים  $|V|$  ירוץ בזמן פולינומיאלי בגודל הקידוד  $|\langle G \rangle|$ .



ולכן  $A$  רץ בזמן פולינומיאלי בגודל הקלט.

## 9.6 בעיית RELPRIME

### הגדרה 9.9 מספרים זרים (Relatively prime)

שני מספרים  $x, y$  זרים אם המחלק המשותף הגדול ביותר, מסומן  $\gcd(x, y)$ , שווה 1.

### הגדרה 9.10 בעיית RELPRIME

קלט: שני מספרים  $x$  ו-  $y$ .

פלט: האם  $x$  ו-  $y$  זרים?

$$RELPRIME = \{ \langle x, y \rangle \mid \gcd(x, y) = 1 \}.$$

## משפט 9.6

$$RELPRIME \in P.$$

**הוכחה:** נבנה אלגוריתם  $A$  המכריע את  $RELPRIME$  בזמן פולינומיאלי.

האלגוריתם מבוסס על העובדה ש-

$$\gcd(x, y) = 1 \iff \langle x, y \rangle \in RELPRIME.$$

ולכן נשתמש באלגוריתם האוקלידי לחישוב  $\gcd$ :

$$\gcd(x, y) = \begin{cases} x & y = 0 \\ \gcd(y, x \bmod y) & y \neq 0 \end{cases}.$$

**הוכחה:** נסמן  $d = \gcd(x, y)$ . אזי קיימים שלמים  $s, t$  כך ש- $dx + ty = d$ . נסמן  $r = x \bmod y$ . אז  $x = qy + r$ .  
לכן

$$s(qy + r) + ty = d \implies sr + (t + sq)y = d \implies \gcd(x, y) = d = \gcd(y, r).$$

לדוגמה:

$$\gcd(18, 32) = \gcd(32, 18) = \gcd(18, 14) = \gcd(14, 4) = \gcd(4, 2) = \gcd(2, 0) = 2.$$

האלגוריתם האוקלידי:

על קלט  $x$  ו- $y$ :

(1) כל עוד  $y \neq 0$

$$x \bmod y \rightarrow x$$

$$\text{swap}(x, y)$$

(כלומר מחליפים בין  $x$  ו- $y$ ).

(2) מחזירים את  $x$ .

האלגוריתם  $A$  המכריע  $RELPRIME$ :

$A = \langle x, y \rangle$  על קלט

(1) מריץ את האלגוריתם האוקלידי על  $x$  ו- $y$ .

• אם האלגוריתם האוקלידי החזיר 1  $\Leftarrow$  מקבל.

• אחרת  $\Leftarrow$  דוחה.

נכונות האלגוריתם נובעת מנכונות האלגוריתם האוקלידי.

נוכיח כי  $A$  רץ בזמן פולינומיאלי בגודל הקלט.

טענת עזר:

$$\text{אם } x > y \text{ אזי } x \bmod y < \frac{x}{2}.$$

הוכחה:

יש שתי אפשרויות:

• אם  $y \leq \frac{x}{2}$  אזי

$$x \bmod y < y \leq \frac{x}{2}.$$

• נניח ש-  $\frac{x}{2} < y < x$ 

מכיוון ש-  $x = qy + (x \bmod y)$ , וגם  $x < 2y$  אז בהכרח  $q < 2$  ולכן  $x = y + (x \bmod y)$  ולכן  $x - y = x \bmod y$ .

לפיכך

$$x \bmod y = x - y < \frac{x}{2}.$$

■

לפי טענת העזר, אחרי כל איטרציה  $x$  קטן בלפחות חצי.מכיוון שבכל איטרציה מחליפים בין  $x$  ו-  $y$ , אחרי כל שתי איטרציות גם  $x$  וגם  $y$  קטנים בלפחות חצי.ולכן לאחר  $\log_2 x + \log_2 y$  איטרציות לפחות  $x$  או  $y$  שווים ל-0.ולכן מספר האיטרציות באלגוריתם האוקלידי חסום ע"י  $\log_2 x + \log_2 y$ , וזה בדיוק זמן הריצה של האלגוריתם  $A$ .ולכן  $A$  רץ בזמן פולינומיאלי בגודל הקלט.

ולכן

$$RELPRIME \in P.$$

■

# שיעור 10

## המחלקה P והמחלקה NP

### 10.1 המחלקה P

- המחלקה P היא אוסף כל הבעיות שקיים עבורן אלגוריתם המכריע אותן בזמן פולינומיאלי.
- אלגוריתם מכריע  $\equiv$  מ"ט דטרמיניסטי ,  
בעיית הכרעה  $\equiv$  שפה ,
- אלגוריתם  $A$  מכריע בעייה בזמן פולינומיאלי אם קיים קבוע  $c > 0$  כך שזמן הריצה של  $A$  על כל קלט  $w$  חסום ע"י  $O(|w|^c)$ .

### 10.2 דוגמאות לבעיות ב-P

$$(1) \quad PATH = \{ \langle G, s, t \rangle \mid G \text{ גרף מכוון המכיל מסלול מ- } s \text{ ל- } t \} \in P$$

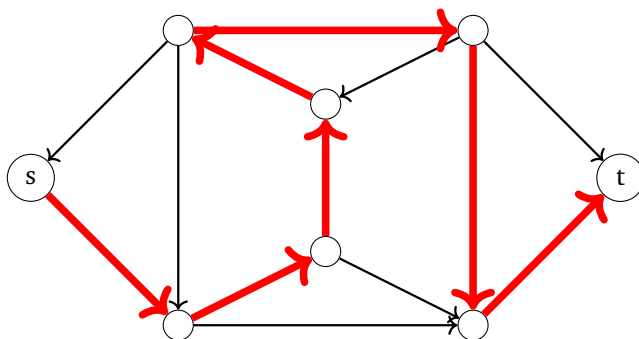
$$(2) \quad RELPRIME = \{ \langle x, y \rangle \mid x \text{ ו- } y \text{ זרים} \} \in P$$

### 10.3 בעיית המסלול ההמילטוני HAMPATH

#### הגדרה 10.1 HAMPATH

בהינתן גרף מכוון  $G = (V, E)$  ושני קודקודים  $s, t \in V$ . מסלול ההמילטוני מ-  $s$  ל-  $t$  ב-  $G$  הוא מסלול מ-  $s$  ל-  $t$  שעובר דרך כל קודקוד בגרף בדיוק פעם אחת.

לדוגמה:



#### הגדרה 10.2 בעיית HAMPATH

קלט: גרף מכוון  $G = (V, E)$  ושני קודקודים  $s, t \in V$ .

פלט: האם  $G$  מכיל מסלול המילטוני מ- $s$  ל- $t$ ?

$$HAMPATH = \{ \langle G, s, t \rangle \mid \text{גרף } G \text{ מכיל מסלול המילטוני מ-} s \text{ ל-} t \}$$

נשאל שאלה: האם  $HAMPATH \in P$ ?

לא ידוע האם קיים אלגוריתם המכריע את  $HAMPATH$  בזמן פולינומיאלי (שאלה פתוחה).

- בהינתן קלט  $\langle G, s, t \rangle$ , האם  $\langle G, s, t \rangle \in HAMPATH$ ?
- נענה על שאלה אחרת:

בהינתן קלט  $\langle G, s, t \rangle$ , ומחרוזת  $y$ , האם  $\langle G, s, t \rangle \in HAMPATH$ ?

- יתן לבדוק האם  $y$  היא מסלול המילטוני מ- $s$  ל- $t$  ב- $G$  בזמן פולינומיאלי ולענות בהתאם.
- במקרה זה, אומרים כי  $HAMPATH$  ניתנת לאימות בזמן פולינומיאלי.

## 10.4 אלגוריתם אימות

### הגדרה 10.3 אלגוריתם אימות

אלגוריתם אימות עבור בעיית  $A$  הוא אלגוריתם  $V$  כך שלכל קלט  $w \in \Sigma^*$  מתקיים:

$w \in A$  אם ורק אם קיימת מחרוזת (עדות)  $y$  באורך פולינומיאלי ב- $|w|$  כך ש- $V$  מקבל את הזוג  $(w, y)$  כלומר:

• אם  $w \in A$   $\Leftrightarrow \exists y : V(w, y) = T$ .

• אם  $w \notin A$   $\Leftrightarrow \forall y : V(w, y) = F$ .

### הערה 10.1

- זמן ריצה של אלגוריתם אימות נמדד ביחס לגודל הקלט  $|w|$ .
- אלגוריתם אימות פולינומיאלי אם הוא רץ בזמן פולינומיאלי.

## 10.5 המחלקה NP

### הגדרה 10.4 המחלקה NP

המחלקה NP היא אוסף כל הבעיות שקיים עבורן אלגוריתם אימות פולינומיאלי.

### משפט 10.1 $HAMPATH \in NP$

בעיית המסלול ההמילטוני  $HAMPATH$ :

קלט: גרף מכון  $G = (V, E)$  ושני קודקודים  $s, t \in V$ .



פלט: האם  $G$  מכיל מסלול המילטוני מ- $s$  ל- $t$ ?

$$HAMPATH = \{ \langle G, s, t \rangle \mid \text{ } G \text{ מכיל מסלול המילטוני מ-} s \text{ ל-} t \}$$

הוכיחו כי  $HAMPATH \in NP$ .

הוכחה: נבנה אלגוריתם אימות עבור  $HAMPATH$ .

$V = \text{על קלט } \langle \langle G, s, t \rangle, y \rangle$ :

(1) בודק האם  $y$  היא סדרה של

$$u_1, u_2, \dots, u_n$$

השונים זה מזה.

• אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.

(2) בודק האם  $u_1 = s$  ו- $u_n = t$ .

• אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.

(3) בודק שכל הצלעות  $(u_i, u_{i+1})$  (לכל  $1 \leq i \leq n$ ) קיימות ב- $G$ .

• אם כן  $\Leftarrow$  מקבל.

• אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.

נכונות

• זמן הריצה של האלגוריתם הוא פולינומיאלי בגודל הקלט.

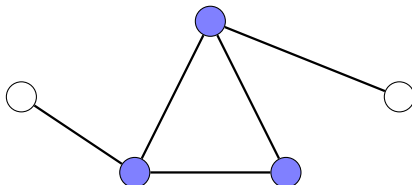
• אם  $\langle G, s, t \rangle \in HAMPATH \Leftarrow G$  מכיל מסלול המילטוני מ- $s$  ל- $t \Leftarrow$  עבור  $y$  שהוא קידוד של מסלול זה,  $V$  יקבל את הזוג  $(\langle G, s, t \rangle, y)$ .

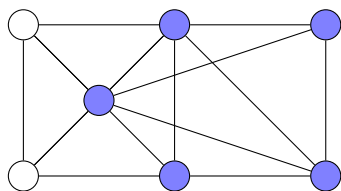
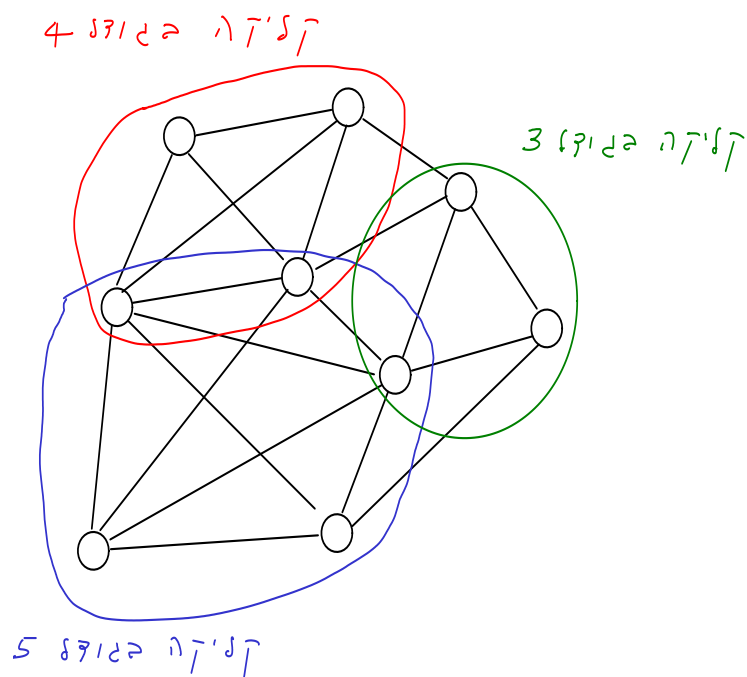
• אם  $\langle G, s, t \rangle \notin HAMPATH \Leftarrow G$  לא מכיל מסלול המילטוני מ- $s$  ל- $t \Leftarrow$  לכל  $y$ , האלגוריתם ידחה את הזוג  $(\langle G, s, t \rangle, y)$ .

## הגדרה 10.5 קליקה

בהינתן גרף לא מכוון  $G = (V, E)$ , קליקה ב- $G$  היא תת-קבוצה של קודקודים  $C \subseteq V$  כך שלכל שני קודקודים  $u, v \in C$  מתקיים  $(u, v) \in E$ .

קליקה בגודל  $k = 3$ :



קליקה בגודל  $k = 5$ :**הגדרה 10.6 בעיית הקליקה**קלט: גרף לא מכוון  $G = (V, E)$  ומספר  $k$ .פלט: האם  $G$  קליקה בגודל  $k$ ?

$$CLIQUE = \{ \langle G, k \rangle \mid k \text{ המכיל קליקה בגודל } k \}$$

**משפט 10.2  $CLIQUE \in NP$** 

$$CLIQUE \in NP.$$

**הוכחה:** נבנה אלגוריתם אימות  $V$  עבור  $CLIQUE$ . $V = \text{על קלט } \langle \langle G, k \rangle, y \rangle$ :**(1)** בודק האם  $y$  היא קבוצה של  $k$  קודקודים שונים מ- $G$ .• אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.**(2)** בודק האם כל שני קודקודים מ- $y$  מחוברים בצלע ב- $G$ .• אם כן  $\Leftarrow$  מקבל.

- אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.

### הגדרה 10.7 בעיית $SubSetSum$

קלט: קבוצת מספרים  $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  ומספר  $t$ .

פלט: האם קיימת תת-קבוצה של  $S$  שסכום איבריה שווה  $t$ ?

$$SubSetSum = \left\{ \langle S, t \rangle \mid \sum_{x \in Y} x = t \text{ ש-} Y \subseteq S \text{ קיימת} \right\}$$

### משפט 10.3 $SubSetSum \in NP$

$$SubSetSum \in NP.$$

**הוכחה:** נבנה אלגוריתם אימות  $V$  עבור  $SubSetSum$ .

$V =$  על קלט  $(\langle S, t \rangle, y)$ :

(1) בודק האם  $y$  היא תת-קבוצה של  $S$ .

- אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.

(2) בודק האם סכום המספרים ב-  $y$  שווה  $t$ .

- אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.

- אחרת  $\Leftarrow$  מקבל.

## 10.6 הקשר בין NP למ"ט א"ד

NP=Non-deterministic polynomial-time.

### משפט 10.4

לכל בעייה  $A$ :

$A \in NP$  אם ורק אם קיימת מ"ט א"ד המכריעה את  $A$  בזמן פולינומיאלי.

### דוגמה 10.1

נבנה מ"ט א"ד  $M$  המכריעה את  $CLIQUE$  בזמן פולינומיאלי.

$M =$  על קלט  $\langle G, k \rangle$ :

- בוחרת באופן א"ד קבוצה  $y$  של  $k$  קודקודים מ-  $G$ .
- בודקת האם כל שני קודקודים מ-  $y$  מחוברים בצלע ב-  $G$ .

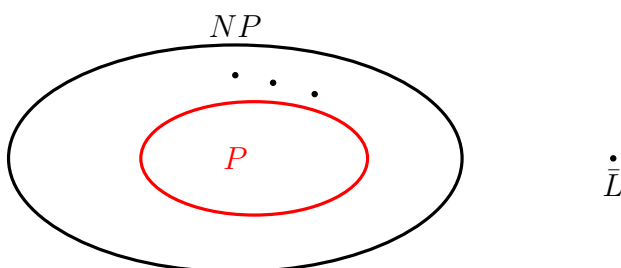
\* אם כן  $\Leftarrow$  מקבלת.\* אחרת  $\Leftarrow$  דוחה.אלגוריתם אימות  $\equiv$  מ"ט א"ד.

## 10.7 הקשר בין המחלקה P ו- NP

 $P =$  כל הבעיות שניתן להכריע בזמן פולינומיאלי. $NP =$  כל הבעיות שניתן לאמת בזמן פולינומיאלי.

### משפט 10.5

$$P \subseteq NP.$$

שאלה פתוחה: האם  $P = NP$ ?

### משפט 10.6

 $P$  סגורה תחת משלים.הוכחה: אם  $A \in P$  אזי גם  $\bar{A} \in P$ .

### הגדרה 10.8 $CoNP$

$$CoNP = \{A \mid \bar{A} \in NP.\}$$

לדוגמה:

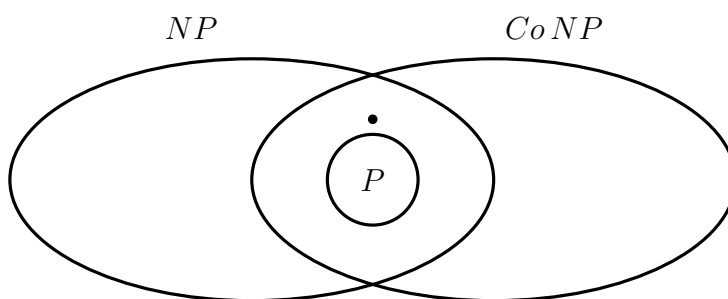
$$\overline{HAMPATH} \in CoNP.$$

$$\overline{CLIQUE} \in CoNP.$$

שאלה פתוחה: האם  $NP = CoNP$ ?

### משפט 10.7

$$P \subseteq NP \cap CoNP.$$



שאלה פתוחה: האם  $P = NP \cap CoNP$ ?

נדון בשאלה המרכזית: האם  $P = NP$ ?

### הגדרה 10.9 פונקציה פולינומיאלית

בהינתן פונקציה  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ , אומרים כי  $f$  חשיבה בזמן פולינומיאלי אם קיים אלגוריתם (מ"ט דטרמיניסטי) המחשב את  $f$  בזמן פולינומיאלי.

### הגדרה 10.10 רדוקציה פולינומיאלית

בהינתן שתי הבעיות  $A$  ו- $B$ . אומרים כי  $A$  ניתנת לרדוקציה פולינומיאלית ל- $B$ , ומסמנים  $A \leq_P B$ , אם קיימת פונקציה  $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$  המקיימת:

(1) חשיבה בזמן פולינומיאלי

(2) לכל  $w \in \Sigma^*$ :

$$w \in A \iff f(w) \in B.$$

### משפט 10.8 משפט הרדוקציה

לכל שתי בעיות  $A$  ו- $B$ , אם  $A \leq_P B$  אזי

(1) אם  $B \in P$  אזי  $A \in P$ .

(2) אם  $B \in NP$  אזי  $A \in NP$ .

מסקנה מ- (1) ו- (2):

(3) אם  $A \notin P$  אזי  $B \notin P$ .

(4) אם  $A \notin NP$  אזי  $B \notin NP$ .

**הוכחה:** מכיוון שקיימת רדוקציה  $A \leq_P B$ , קיימת פונקציה  $f$  חשיבה בזמן פולינומיאלי המקיימת, לכל  $w \in \Sigma^*$ ,

$$w \in A \iff f(w) \in B.$$

יהי  $M_f$  האלגוריתם שמחשבת את  $f$  בזמן פולינומיאלי.

(1) נוכיח כי אם  $B \in P$  אזי  $A \in P$ .

יהי  $M_B$  האלגוריתם שמכריע את  $B$  בזמן פולינומיאלי. נבנה אלגוריתם  $M_A$  המכריע את  $A$  בזמן פולינומיאלי.

התאור של  $M_A$ 

$$M_A = \text{על כל קלט } w:$$

1. מחשב את  $f(w)$  ע"י  $M_f$ .

2. מריץ את  $M_B$  על  $f(w)$  ועונה כמוה.

נוכיח כי  $M_A$  מכריע את  $A$  בזמן פולינומיאלי:

• אם  $w \in A \iff f(w) \in B \iff M_B \Leftarrow f(w)$  מקבל את  $M_A \Leftarrow f(w)$  מקבל את  $w$ .

• אם  $w \notin A \iff f(w) \notin B \iff M_B \Leftarrow f(w)$  דוחה את  $M_A \Leftarrow f(w)$  דוחה את  $w$ .

נוכיח כי זמן הריצה של  $M_A$  הוא פולינומיאלי בגודל הקלט  $|w|$  בזמן פולינומיאלי:

• נסמן ב-  $P_f$  את הפולינום של  $M_f$ .

• נסמן ב-  $P_B$  את הפולינום של  $M_B$ .

זמן הריצה של  $M_A$  על קלט  $w$  שווה

$$P_f(|w|) + P_B(|f(w)|)$$

מכיוו ש-  $|f(w)| \leq P_f(|w|)$ , זמו הריצה של  $M_A$  על  $w$  חסום ע"י

$$P_f(|w|) + P_B(P_f(|w|)) = P_f(|w|) + (P_B \circ P_f)(|w|)$$

כאשר  $P_B \circ P_f$  מסמן את ההרכבה של שני פולינומים. לכן  $M_A$  רץ בזמן פולינומיאלי בגודל  $|w|$ .



# שיעור 11

## NP שלמות

### 11.1 המחלקות NPC ו-NPH

#### הגדרה 11.1 NP-hard

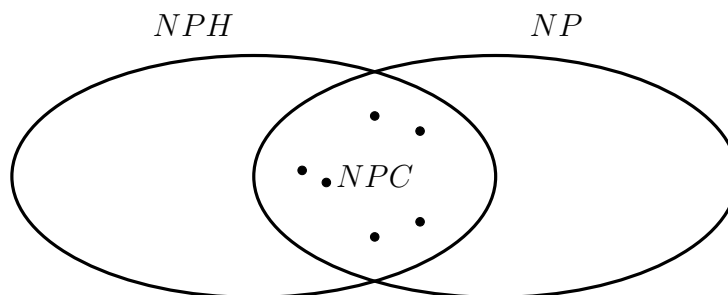
בעייה  $B$  נקראת  $NP$  קשה אם לכל בעייה  $A \in NP$  קיימת רדוקציה  $A \leq_p B$ .

#### הגדרה 11.2 NP-complete

בעייה  $B$  נקראת  $NP$  שלמה אם

$$B \in NP \quad (1)$$

(2) לכל בעייה  $A \in NP$  קיימת רדוקציה  $A \leq_p B$ .



#### משפט 11.1

אם  $B \in NP$  שלמה וגם  $B \in P$  אזי  $P = NP$ .

הוכחה:

• הוכחנו כבר ש-  $P \subseteq NP$ .

• נוכיח כי  $NP \subseteq P$ .

לכל בעייה  $A \in NP$  קיימת רדוקציה  $A \leq_p B$  ומכיון ש-  $B \in P$ , ממשפט הרדוקציה מתקיים  $A \in P$ .

#### מסקנה 11.1

אם  $A \leq_p B$  אזי  $\bar{A} \leq_p \bar{B}$ .

#### משפט 11.2

אם  $A \leq_p B$  וגם  $B \leq_p C$  אזי  $A \leq_p C$ .

הוכחה:

## משפט 11.3

תהי  $B$  בעייה  $-NP$  שלמה. אזי לכל בעייה  $C \in NP$ , אם  $B \leq_p C$  אזי גם  $C$  היא  $NP$  שלמה.

**הוכחה:** מכיוון ש- $B$  היא  $-NP$  שלמה, לכל בעייה  $A \in NP$  קיימת רדוקציה  $A \leq_p B$ . מכיוון ש- $B \leq_p C$  מהטרנזיטיביות מתקיים  $A \leq_p C$  לכל בעייה  $A \in NP$ . ולכן  $C$  היא  $-NP$  שלמה.

## 11.2 בעיית הספיקות

## הגדרה 11.3

נוסחת  $CNF$   $\phi$  היא נוסחה בוליאנית מעל  $n$  משתנים  $x_1, x_2, \dots, x_n$  המכילה  $m$  פסוקיות  $C_1, C_2, \dots, C_m$ , כאשר כל פסוקית מכילה אוסף של ליטרלים  $(x_i \vee \bar{x}_i)$  המחוברים ע"י  $OR$  ( $\vee$ ) בוליאני והפסוקיות מחוברים ע"י  $AND$  ( $\wedge$ ) בוליאני.

לדוגמה

$$\phi = \left( x_1 \vee \bar{x}_2 \vee x_4 \vee \bar{x}_7 \right) \wedge \left( x_3 \vee x_5 \vee \bar{x}_8 \right) \wedge \dots$$

הגדרה 11.4 נוסחת  $CNF$  ספיקה

נוסחת  $CNF$   $\phi$  היא ספיקה אפ קימת השמה למשתנים  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ע"י  $T \setminus F$  כך ש- $\phi$  מקבלת ערך  $T$ , כלומר בכל פסוקית ישנו לפחות ליטרל אחד שקיבל ערך  $T$ .

## 11.3 בעיית SAT

## הגדרה 11.5 בעיית SAT

קלט: נוסחת  $CNF$   $\phi$ .  
פלט: האם  $\phi$  ספיקה?

$$SAT = \{ \langle \phi \rangle \mid \text{נוסחת } CNF \text{ ספיקה} \}$$

משפט 11.4  $SAT \in NP$ 

$$SAT \in NP.$$

**הוכחה:** נבנה אלגוריתם אימות  $V$  עבור  $SAT$ .

$$V = \langle \langle \phi \rangle, y \rangle \text{ על קלט}$$

(1) בודק האם  $y$  היא השמה למשתנים  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .



• אם לא  $3CNF \Leftarrow$  דוחה.

(2) בודק האם השמה זו מספקת את  $\phi$ .

• אם כן  $\Leftarrow$  מקבל.

• אם לא  $\Leftarrow$  דוחה.



## 11.4 משפט קוק לוין

### משפט 11.5 (1973) משפט קוק לוין

הבעיית  $SAT$  היא  $NP$  - שלמה.

רעיון ההוכחה:

לכל  $A \in NP$ ,  $A \leq_p SAT$ .  
לכל  $w \in \Sigma^*$ :

$$w \in A \iff f(w) \in SAT,$$

כאן  $f(w) = \langle \phi_w \rangle$ .

### 11.2 מסקנה

$$P = NP \iff SAT \in P.$$

## 11.5 גרסאות של $kSAT$

ישנן לכל היותר  $k$  ליטרלים בכל פסוקית:

•  $1SAT \in P$ .

$$\phi = x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3 \wedge \dots$$

•  $2SAT \in P$ .

$$\phi = (x_1 \vee \bar{x}_2) \wedge (x_2 \vee x_4) \wedge \dots$$

•  $3SAT$  היא  $NP$  - שלמה.

## 11.6 בעיית $3SAT$

### הגדרה 11.6 בעיית $3SAT$

קלט: נוסחת  $3CNF$ ,  $\phi$ .  
פלט: האם  $\phi$  ספיקה?

$$3SAT = \{ \langle \phi \rangle \mid \phi \text{ נוסחת } 3CNF \text{ ספיקה} \}$$

משפט 11.6  $3SAT$  היא  $NP$  שלמה. $3SAT$  היא  $NP$  שלמה.

הוכחה:

יש לקיים את השני תנאים הבאים:

$$3SAT \in NP \quad (1)$$

ניתן לבנות אלגוריתם אימות עבור  $3SAT \in NP$  דומה לאלגוריתם האימות עבור  $SAT$  שבנינו בהוכחה של המשפט קוק-לויין 11.5 למעלה.

(2)  $3SAT$  היא  $NP$  קשה ע"י רדוקציה

$$SAT \leq_p 3SAT.$$

ואז בגלל ש- $SAT$  היא  $NP$  שלמה (לפי משפט קוק-לויין 11.5) ומכיוון ש- $3SAT \in NP$  אז לפי משפט האסימפטוטית 11.2 גם  $3SAT$  היא  $NP$ -שלמה.

קיום פונקציה הרדוקציה  $SAT \leq_p 3SAT$ 

כעת נבנה את פונקציה הרדוקציה מ- $SAT$  ל- $3SAT$ .

ראשית נציין כי כל נוסחה בוליאנית  $\phi$  ניתנת לרשום בצורה  $CNF$  בזמן פולינומיאלי.

בהינתן נוסחת  $CNF$ ,  $\phi$  (הקלט של  $SAT$ ) נבנה בזמן פולינומיאלי נוסחת  $3CNF$ ,  $\phi'$  (הקלט של  $3SAT$ ) ואז נוכיח שמתקיים

$$\langle \phi' \rangle \in 3SAT \iff \langle \phi \rangle \in SAT.$$

לכל פסוקית  $C$  ב- $\phi$  המכילה יותר מ-3 ליטרלים, ניצור אוסף  $C'$  ב- $\phi'$  של פסוקיות כך שכל פסוקית ב- $C'$  תכיל 3 ליטרלים. למשל בהינתן הפסוקית  $C$  הבאה של  $\phi$ :

$$C = x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5$$

ניצור את הפסוקית  $C'$  הבאה ב- $\phi'$ :

$$C' = (x_1 \vee x_2 \vee y_1) \wedge (\bar{y}_1 \vee x_3 \vee y_2) \wedge (\bar{y}_2 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5).$$

באופן כללי, לכל פסוקית  $C = a_1 \vee a_2 \vee \dots \vee a_k$  המכיל  $k > 3$  ליטרלים, ניצור אוסף  $C'$  של פסוקיות שבו כל פסוקית מכילה 3 ליטרלים, ע"י הוספת  $k-3$  משתנים  $y_1, y_2, \dots, y_{k-3}$ :

$$C' = (a_1 \vee a_2 \vee y_1) \wedge (\bar{y}_1 \vee a_3 \vee y_2) \wedge \dots \wedge (\bar{y}_{i-2} \vee a_i \vee y_{i-1}) \wedge \dots \wedge (\bar{y}_{k-3} \vee a_{k-1} \vee a_k).$$

בפרט, עבור כל פסוקית  $C = (a_1 \vee a_2 \vee \dots \vee a_k)$  נניח  $a_i = 1$  הוא הליטרל הראשון ששווה ל-1. אז

• נשים  $y_j = 1$  לכל  $1 \leq j \leq i-2$ ,

• ונשים  $y_j = 0$  לכל  $i-1 \leq j \leq k-3$ .

סיימנו להגדיר את הפונקציה הרדוקציה.

כעת נוכיח כי הפונקציה הזאת מקיימת את התנאי ההכרחי

$$\langle \phi' \rangle \in 3SAT \iff \langle \phi \rangle \in SAT.$$

כיוון  $\Leftarrow$ :

נניח כי  $\langle \phi \rangle \in SAT$  ותהי  $X$  השמה המספקת את  $\phi$ .

נוכיח שקיימת השמה  $X'$  מתאימה המספקת את  $\phi'$ .

- בכל פסוקית  $C$  של  $\phi$ , עבור הליטרלים  $a_1, a_2, \dots, a_k$  ניתן אותם ערכים כמו ב- $X$ .
- מכיוון ש- $X$  מספקת את  $\phi$ , בכל פסוקית  $C = (a_1 \vee a_2 \vee \dots \vee a_k)$  יש לפחות ליטרל אחד שקיבל ערך 1. נניח  $a_i = 1$ . אז על פי ההגדרה של פונקצית הרדוקציה:

\* נשים  $y_j = 1$  לכל  $1 \leq j \leq i - 2$ ,

\* ונשים  $y_j = 0$  לכל  $i - 1 \leq j \leq k - 3$ .

באופן הזה אנחנו ניצור אוסף  $C'$  של פסוקיות עם המבנה הבא:

$$\left( a_1 \vee a_2 \vee \overset{1}{y_1} \right) \wedge \left( \overset{0}{\bar{y}_1} \vee a_2 \vee \overset{1}{y_2} \right) \wedge \dots \wedge \left( \overset{0}{\bar{y}_{i-3}} \vee a_{i-1} \vee \overset{1}{y_{i-2}} \right) \wedge \left( \overset{0}{\bar{y}_{i-2}} \vee \overset{1}{a_i} \vee \overset{0}{y_{i-1}} \right) \wedge \left( \overset{1}{\bar{y}_{i-1}} \vee a_{i+1} \vee \overset{0}{y_i} \right) \\ \wedge \dots \wedge \left( \overset{1}{\bar{y}_{k-3}} \vee a_{k-1} \vee a_k \right)$$

ולכן השמה זו מספקת את  $C'$  ולכן  $\langle \phi' \rangle \in 3SAT$ .

כיוון  $\Rightarrow$ :

נניח כי  $\langle \phi' \rangle \in 3SAT$  ותהי  $X'$  השמה המספקת את  $\phi'$ .  
נוכיח שקיימת השמה  $X$  המספקת את  $\phi$ .

נסתכל על פסוקית  $C = (a_1 \vee a_2 \vee \dots \vee a_k)$ .  
נניח בשלילה שלא קיימת השמה  $X$  המספקת את  $C$ . אז בהכרח

$$a_1 = a_2 = \dots = a_k = 0$$

לפי זה, באוסף פסוקיות  $C'$  שנקבל על פי ההגדרה של פונקצית הרדוקציה,  $y_j = 1$  לכל  $1 \leq j \leq k - 3$ .  
כלומר מתקיים  $y_1 = y_2 = \dots = y_{k-3} = 0$ . לכן

$$C' = \left( \overset{0}{a_1} \vee \overset{0}{a_2} \vee \overset{1}{y_1} \right) \wedge \left( \overset{0}{\bar{y}_1} \vee \overset{0}{a_3} \vee \overset{1}{y_2} \right) \wedge \dots \wedge \left( \overset{0}{\bar{y}_{i-2}} \vee \overset{0}{a_i} \vee \overset{1}{y_{i-1}} \right) \wedge \dots \wedge \left( \overset{0}{\bar{y}_{k-3}} \vee \overset{0}{a_{k-1}} \vee \overset{0}{a_k} \right)$$

הפסוקית האחרונה  $\left( \overset{0}{\bar{y}_{k-3}} \vee \overset{0}{a_{k-1}} \vee \overset{0}{a_k} \right)$  אינה מסופקת.  
לכן  $C'$  אינה מסופקת, בסתירה לכך ש- $X'$  מספקת את  $C'$ .

ולכן  $\langle \phi \rangle \in SAT$ .

הוכחנו שקיימת הרדוקציה  $SAT \leq 3SAT$ .

כעת נוכיח כי הרדוקציה הזו היא זמן פולינומיאלית.

סיבוכיות

החישוב של הפונקציה מתבצע בזמן פולינומיאלי. ספציפי, אם האורך של הנוסחה  $\phi$  הוא  $n = |\phi|$  אז הרדוקציה היא  $O(n)$ .



## 11.7 הוכחת משפט קוק לוין\*

## משפט 11.7 משפט קוק לויין

הבעיית SAT היא NP - שלמה.

## הוכחה:

חשיפה מלאה: ההוכחה הבאה מתבססת על ההוכחה שנתונה בהספר של Sipser.

על פי הגדרה 11.2 יש להוכיח ששני התנאים הבאים מתקיימים:

תנאי 1:  $SAT \in NP$ .תנאי 2:  $A \leq_p SAT$  לכל  $A \in NP$ .ראשית נוכיח כי  $SAT \in NP$ :

כדי להוכיח כי SAT שייכת ל-NP, נוכיח כי אישור המורכב מהשמה מספקת עבור נוסחת קלט  $\phi$  ניתן לאימות בזמן פולינומיאלי.

נניח כי  $|\phi| = n$ . כלומר ב- $\phi$  מופיעים  $n$  ליטרלים. ז"א השמה כלשהי דורשת  $n$  משתני בוליאניים לכל היותר.

- אלגוריתם האימות מחליף כל משתנה בנוסחה בערך המתאים לו על פי ההשמה. השלב הזה הוא  $O(n)$ .

- אחר כך האלגוריתם מחשב את ערכו של הביטוי:

\* נניח כי הנוסחה  $\phi$  מכילה  $k$  דורות של סוגריים בתוך סוגריים.

\* החישוב מתחיל עם החישובים של הביטויים בתוך הסוגריים הכי בפנים.

\* יש  $n$  סוגריים הכי-בפנים לכל היותר, וכל אחד של הסוגריים האלה מכיל  $n$  ליטרלים לכל היותר. לכן החישוב הזה הוא  $O(n^2)$ .

\* יש  $k$  דורות של סוגריים לכן החישוב כולו הוא  $O(kn^2)$ .

- בסה"כ הסיבוכיות זמן הריצה היא

$$O(n) + O(kn^2) = O(n^2)$$

לפיכך אישור של השמה כלשהי מתבצע בזמן פולינומיאלי.

- אם ערכו של הביטוי הוא 1 הנוסחה ספיקה.

הוכחנו כי  $SAT \in NP$ . עכשיו נוכיח כי  $A \leq_p SAT$ .

תהי  $N$  מ"ט אי-דטרמיניסטית זמן-פולינומיאלית שמכריעה שפה  $A$  כלשהי בזמן  $O(n^k)$  עבור  $k$  טבעי. התרשים למטה מראה טבלה של קונפיגורציות של  $N$ . ברשימה הבאה רשומות ההגדרות של הטבלה:

- כל שורה מראה את תוכן הסרט בשלב מסוים של מסלול אחד של  $N$ .
- בשורה הראשונה יש את הקונפיגורציה ההתחלתית.
- אנחנו מניחים כי האורך של המילה, כלומר אורך הקלט הוא  $n$ .
- הסימנים  $w_1, \dots, w_n$  מסמנים את התווים של הקלט.

- בתא הראשון בכל שורה יש #, ואחר כך רשומה הקונפיגורציה של  $N$ . בסוף הקונפיגורציה בכל שורה יש #.
- אחרי ה- # בקצה הימין של המילה, בכל תא יש תו רווח עד הסוף של השורה. התווי רווח לפני המשבצת הראשונה של הקונפיגורציה לא מופיעים בטבלה.
- האורך של כל שורה הוא בדיוק  $n^k$  תאים.
- בטבלה יש בדיוק  $n^k$  שורות לסיבה הבאה:
  - המכונת טיורינג מבצעת  $n^k$  צעדים לכל היותר.
  - בכל צעד המ"ט עוברת לקונפיגורציה חדשה.
  - בכל שורה רשומה קונפיגורציה.
  - בסה"כ יש  $n^k$  שורות עבור ה-  $n^k$  קונפיגורציות שונות האפשריות.

#	$q_0$	$w_1$	$w_2$	$\dots$	$w_n$	$\sqsubset$	$\dots$	$\sqsubset$	#						
#	$q_0$								#						
#	$q_0$								#						
				<table><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr></table>											
#									#						

אנחנו אומרים כי טבלה שלהי היא **טבלה המקבלת** אם באחת השורות יש קונפיגורציה אשר  $N$  מקבלת אותה.

בעזרת הטבלה נתאר את הרדוקציה זמן-פולינומיאלית  $f$  משפה  $A$  כלשהי ל- $SAT$ .

הפונקציה הרדוקציה  
 $f$  מקבלת קלט  $w$  ומחזירה נוסחה  $\phi = f(w)$ , אשר לפי ההגדרה של פונקציה הרדוקציה, עומדת בתנאי הבא:

$$w \in A \quad \Leftrightarrow \quad f(w) \in SAT \text{ .}$$

יהיו  $Q$  קבוצת המצבים ו-  $\Gamma$  האלפבית של הסרט של  $N$ . נגדיר

$$C = Q \cup \Gamma \cup \{\#\} \text{ .}$$

נסמן ב-  $s$  איבר כלשהו של  $C$ .

עבור כל תא ה- $(i, j)$  של הטבלת הקונפיגורציות נגדיר משתנה בוליאני  $x_{i,j,s}$  לכל  $1 \leq i, j \leq n^k$ . המשתנה  $x_{i,j,s}$  מוגדר על פי התנאי

$$x_{ijs} = 1$$

אם בתא ה- $ij$  של הטבלה יש  $s \in C$ . למשל, אם בתא ה- $(2, 5)$  של הטבלה מופיע התו  $a$  אז

$$x_{2,5,a} = 1$$

בעוד

$$x_{2,5,b} = 0 .$$

במובן הזה, התכנים של כל התאים של הטבלה מסומנים על ידי המשתנים של  $\phi$ .

עכשיו נבנה נוסחה  $\phi$  על סמך התנאי שהשמה מספקת של  $\phi$  תהיה מתאימה לטבלה המקבלת של  $N$ . נגדיר

$$\phi = \phi_{\text{cell}} \wedge \phi_{\text{start}} \wedge \phi_{\text{move}} \wedge \phi_{\text{acc}} . \quad (11.1)$$

אנחנו נסביר את כל הנוסחאות  $\phi_{\text{cell}}$ ,  $\phi_{\text{start}}$ ,  $\phi_{\text{move}}$  ו- $\phi_{\text{acc}}$  אחד אחד למטה.

### • הנוסחה $\phi_{\text{cell}}$

כפי שמצויין לעיל, אם המשתנה  $x_{i,j}$  "דולק", כלומר אם  $x_{i,j,s} = 1$ , זאת אומרת שיש סימן  $s$  בתא ה- $ij$  של הטבלה. אנחנו רוצים להבטיח שהשמה כלשהי בנוסחה אשר מתאימה לקונפיגורציה של הטבלה, מדליקה בדיוק משתנה אחד לכל תא של הטבלה. למטרה זו נגדיר  $\phi_{\text{cell}}$  כך:

$$\phi_{\text{cell}} = \bigwedge_{1 \leq i, j \leq n^k} \left[ \left( \bigvee_{s \in C} x_{i,j,s} \right) \wedge \left( \bigwedge_{\substack{s, t \in C \\ s \neq t}} (\bar{x}_{i,j,s} \vee \bar{x}_{i,j,t}) \right) \right] \quad (11.2)$$

\* האיבר הראשון בסוגריים מרובעים,  $\bigvee_{s \in C} x_{i,j,s}$  מבטיח שלכל תא של הטבלה, לפחות משתנה אחד דולק.

\* האיבר השני  $\bigwedge_{\substack{s, t \in C \\ s \neq t}} (\bar{x}_{i,j,s} \vee \bar{x}_{i,j,t})$  מבטיח שעבור כל תא של הטבלה, משתנה אחד לכל היותר דולק.

לפיכך כל השמה מספקת עומדת בתנאי שיהיה בדיוק סימן אחד,  $s$ , בכל תא של הטבלה.

### • הנוסחה $\phi_{\text{start}}$

נוסחה  $\phi_{\text{start}}$  מבטיחה ששורה הראשונה של הטבלה היא הקונפיגורציה ההתחלתית של  $N$  על הקלט  $w$ :

$$\begin{aligned} \phi_{\text{start}} = & x_{1,1,\#} \wedge x_{1,2,q_0} \wedge x_{1,3,w_1} \wedge x_{1,4,w_2} \\ & \wedge \dots \wedge \\ & x_{1,n+2,w_n} \wedge x_{1,n+3,\sqcup} \wedge \dots \wedge x_{1,n^k-1,\sqcup} \wedge x_{1,n^k,\#} \end{aligned} \quad (11.3)$$

### • הנוסחה $\phi_{\text{acc}}$

הנוסחה  $\phi_{\text{acc}}$  מבטיחה שקיימת טבלה קונפיגורציה אשר המ"ט  $N$  מקבלת אותה.

בפרט  $\phi_{\text{acc}}$  מבטיחה שהסימן  $q_{\text{acc}}$  מופיע בתא אחד של הטבלה דרך התנאי שלפחות אחד המשתנים  $x_{i,j,q_{\text{acc}}}$  דולק:

$$\phi_{\text{acc}} = \bigvee_{1 \leq i, j \leq n^k} x_{i,j,q_{\text{acc}}} \quad (11.4)$$

• הנוסחה  $\phi_{\text{move}}$

הנוסחה  $\phi_{\text{move}}$  מבטיחה שכל שורה של הטבלה היא "שורה חוקית".

כלומר בכל שורה, הקונפיגורציה היא כך שאפשר להגיע אליה על ידי תזוזה חוקית של  $N$  מהקונפיגורציה הקודמת שמופיעה בשורה אחת למעלה.

תזוזה חוקית בין כל שתי קונפיגורציות נקבעת על ידי הפונקציה המעברים של המ"ט  $N$ .

בשפה פורמלית, אם  $c_i$  הקונפיגורציה של שורה  $i$ , ו-  $c_{i+1}$  הקונפיגורציה של השורה  $i + 1$  אחת למטה, אז  $\phi_{\text{move}}$  מבטיחה כי לכל  $1 \leq i \leq n^k - 1$  מתקיים

$$c_i \vdash_N c_{i+1}.$$

במונחי הטבלה, אפשר להגדיר תזוזה חוקית בין כל שתי שורות על ידי תת-טבלה מסדר  $2 \times 3$  שמכילה 3 תאים מתאימים של שתי שורות שכנות.

מכאן ואילך אנחנו נקרא לתת-טבלה כזאת "חלון".

למטה יש דוגמאות של חלונות חוקיים:

a	q <sub>1</sub>	b
q <sub>2</sub>	a	c

a	q <sub>1</sub>	b
a	a	q <sub>2</sub>

a	a	q <sub>1</sub>
a	a	b

#	b	a
#	b	a

a	b	a
a	b	q <sub>2</sub>

b	b	b
c	b	b

החלונות האלה למטה הם דוגמאות לחלונות לא חוקיים:

a	b	a
a	a	a

a	q <sub>1</sub>	b
q <sub>1</sub>	a	a

b	q <sub>1</sub>	b
q <sub>2</sub>	b	q <sub>2</sub>

הנוסחה  $\phi_{\text{move}}$  קובעת שכל חלון של הטבלה חוקי. בפרט, כל חלון מכיל 6 תאים. לכן  $\phi_{\text{move}}$  קובעת שהתכנים של ה-6 תאים של כל חלון מהווה חלון חוקי. ז"א

$$\phi_{\text{move}} = \bigwedge_{\substack{1 \leq i \leq n^k \\ 1 \leq j \leq n^k}} (\text{חלון ה- } i, j \text{ חוקי}) \quad (11.5)$$

אנחנו מציבים בטקסט "חלון ה-  $i, j$  חוקי" את הנוסחה הבאה, כאשר  $a_1, \dots, a_6$  מסמנים את התכנים של ה-6 תאים של כל חלון:

$$\bigvee_{\substack{\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\} \\ \text{חלון חוקי}}} (x_{i,j-1,a_1} \wedge x_{i,j,a_2} \wedge x_{i,j+1,a_3} \wedge x_{i+1,j-1,a_4} \wedge x_{i+1,j,a_5} \wedge x_{i+1,j+1,a_6}) \quad (11.6)$$

עד כה הוכחנו שקיים רדוקציה מכל שפה  $A \in NP$  ל-  $SAT$ . כעת נוכיח כי הרדוקציה זו חישובית בזמן-פולינומיאלי.

הטבלה של  $N$  היא מסדר  $n^k \times n^k$  ולכן היא מכילה  $n^{2k}$  תאים.

נחשב את הסיבוכיות של כל הנוסחאות  $\phi_{\text{move}}, \phi_{\text{acc}}, \phi_{\text{start}}, \phi_{\text{cell}}$ .

- הנוסחה  $\phi_{\text{cell}}$

הנוסחה (11.2) של  $\phi_{\text{cell}}$  מכילה  $n^{2k}$  נוסחאות עם 3 ליטרלים. לכן

$$\phi_{\text{cell}} = O(n^{2k}) .$$

- הנוסחה  $\phi_{\text{start}}$

הנוסחה (11.3) של  $\phi_{\text{start}}$  מכילה בדיוק  $n^k$  ליטרלים. לכן

$$\phi_{\text{start}} = O(n^k) .$$

- הנוסחה  $\phi_{\text{acc}}$

הנוסחה (11.4) של  $\phi_{\text{acc}}$  מכילה בדיוק  $n^k$  ליטרלים. לכן

$$\phi_{\text{acc}} = O(n^k) .$$

- הנוסחה  $\phi_{\text{move}}$

הנוסחה (11.5, 11.6) של  $\phi_{\text{move}}$  מכילה  $n^{2k}$  נוסחאות עם 6 ליטרלים. לכן

$$\phi_{\text{move}} = O(n^{2k}) .$$

לכן בסה"כ

$$\phi = O(n^{2k}) + O(n^k) + O(n^k) + O(n^{2k}) = O(n^{2k}) .$$

לפיכך קיימת רדוקציה חישובית בזמן פולינומיאלי מכל שפה  $A \in NP$  ל-  $SAT$ .





# שיעור 12

## רדוקציות פולינומיליות

### 12.1 $CLIQUE$ היא $NP$ - שלמה

**משפט 12.1**  $CLIQUE \in NPC$

הבעיית  $CLIQUE$  היא (ראו הגדרה 10.5):

$$CLIQUE = \{ \langle G, k \rangle \mid k \text{ מכיל קליקה בגודל } k \}.$$

$CLIQUE$  היא  $NP$  - שלמה

**הוכחה:**

(1) הוכחנו כי  $CLIQUE \in NP$  במשפט 10.2.

(2) נוכיח כי  $CLIQUE$  היא  $NP$  קשה ע"י רדוקציה  $3SAT \leq_P CLIQUE$ .

פונקציית הרדוקציה

בהינתן נוסחת  $3CNF$   $\phi$  מעל  $n$  משתנים  $x_1, x_2, \dots, x_n$  המכיל  $m$  פסוקיות, ניצור זוג  $\langle G, k \rangle$  ונוכיח כי

$$\langle \phi \rangle \in 3SAT \iff \langle G, k \rangle \in CLIQUE.$$

נבנה את הגרף  $G$  באופן הבא:

הקדקודים של  $G$ :

לכל פסוקית  $C_i$  ב- $\phi$  המכילה 3 ליטרלים ניצור שלשה  $t_i$  המכילה 3 קודקודים המתאימים לליטרלים של  $C_i$ :

$$x_1 \vee \bar{x}_3 \vee x_4 \longrightarrow \begin{array}{ccc} \textcircled{x_1} & \textcircled{\bar{x}_3} & \textcircled{x_4} \end{array}$$

הצלעות של  $G$ :

נבחר בין כל שני קודקודים פרט לזוגות הבאים:

- זוג קודקודים המתאימים למשתנה ומשלמים שלו.
- זוג קודקודים שנמצאים באותה שלושה.

לדוגמה:

$$\phi = \underbrace{\left( \overset{T}{x_1} \vee \overset{T}{\bar{x}_2} \vee x_3 \right)}_{C_1} \wedge \underbrace{\left( \bar{x}_1 \vee \overset{T}{\bar{x}_2} \vee x_3 \right)}_{C_2} \wedge \underbrace{\left( \bar{x}_1 \vee x_2 \vee \overset{T}{\bar{x}_3} \right)}_{C_3}$$



נקבע  $k = m$ .

נכונות הרדוקציה

(1) ניתן לבנות את  $G$  בזמן פולינומיאלי בגודל  $\phi$ .

(2) נוכיח כי

$$\langle \phi \rangle \in 3SAT \iff \langle G, k \rangle \in CLIQUE.$$

כיוון  $\Leftarrow$

- נניח כי  $\phi$  ספיקה ונסתכל על השמה המספקת את  $\phi$ .
- בכל פסוקית  $C_i$  ב-  $\phi$  יש לפחות ליטרל אחד שקיבל ערך  $T$ .
- נבחר מכל שלשה  $t_i$  בקודקוד אחד המתאים לליטרל שקיבל ערך  $T$  ב-  $C_i$  ונוסיף אותו לקליקה.
- מספר הקודקודים שבחרנו שווה  $k$  וכל שניים מהם מחוברים בצלע כי לא בחרנו שני קודקודים מאותה שלשה ולא בחרנו שני קודקודים המתאימים למשתנה ומשלים שלו.
- ולכן  $G$  מכיל קליקה בגודל  $k$ .

כיוון  $\Rightarrow$

- נניח כי  $G$  מכיל קליקה בגודל  $k$  ונסתכל על קליקה כזו.
- לפי הבנייה הקליקה מכילה בדיוק קודקוד אחד מכל שלשה  $t_i$ . ניתן השמה למשתנים של  $\phi$  כך שהליטרל שמתאים לקודקוד שנמצא בקליקה יקבל ערך  $T$ .
- השמה זו אפשרית מכיוון שהקליקה לא מכילה שני קודקודים המתאימים למשתנה ומשלים שלו.

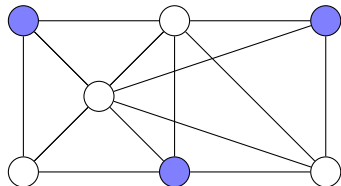
- בנוסף השם  $\phi$  מספקת את  $\phi$  מכיוון שהקליקה מכילה קודקוד מכל שלשה  $t_i$  ולכן הליטרל המתאים לקודקוד בשלשה  $t_i$  קיבל ערך  $T$  ולכן הוא מספק את הפסוקית  $C_i$ .
- לכן  $\phi$  ספיקה.



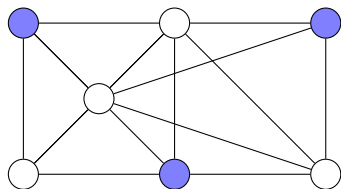
## 12.2 בעיית הקבוצה הבלתי תלויה

### הגדרה 12.1 קבוצה בלתי תלויה

בהינתן גרף לא מכוון  $G = (V, E)$ , קבוצה בלתי תלויה ב-  $G$  היא תת-קבוצה של קודקודים  $S \subseteq V$  כך שלכל שני קודקודים  $u, v \in S$  מתקיים  $(u, v) \notin E$ .



קבוצה בלתי תלויה בגודל  $k = 3$ :



קבוצה בלתי תלויה בגודל  $k = 3$ :

### הגדרה 12.2 בעיית $IS$

קלט: גרף לא מכוון  $G = (V, E)$  ומספר  $k$ .  
פלט: האם קיימת קבוצה בלתי תלויה ב-  $G$  בגודל  $k$ ?

$$IS = \{ \langle G, k \rangle \mid k \text{ קבוצה בלתי תלויה בגודל } k \}$$

### משפט 12.2 $IS \in NPC$

הבעיה  $IS$  היא  $NP$  - שלמה.

הוכחה:

(1) נוכיח כי  $IS \in NP$

נבנה אלגוריתם אימות  $V$  עבור  $IS$ .  
 $V = \langle \langle G, k \rangle, y \rangle$  על קלט

- בודק האם  $y$  היא קבוצה של  $k$  קודקודים מ-  $G$  השונים זה מזה.

◦ אם לא  $\Rightarrow$  דוחה.

- בודק האם כל שני קודקודים מ-  $y$  לא מחוברים בצלע ב-  $G$ .

◦ אם כן  $\Rightarrow$  מקבל.

○ אם לא  $\Rightarrow$  דוחה.

(2) נוכיח כי  $CLIQUE \leq_P IS$

פונקציית הרדוקציה:

בהינתן זוג  $\langle G, k \rangle$  הקלט של  $CLIQUE$ , ניצור זוג  $\langle G', k' \rangle$ , הקלט של  $IS$ , ונוכיח כי:

$$\langle G, k \rangle \in CLIQUE \Leftrightarrow \langle G', k' \rangle \in IS.$$

הפונקציית הרדוקציה מוגדרת כך שהתנאים הבאים מתקיימים:

(1) נניח שהגרף הוא  $G = (V, E)$ .

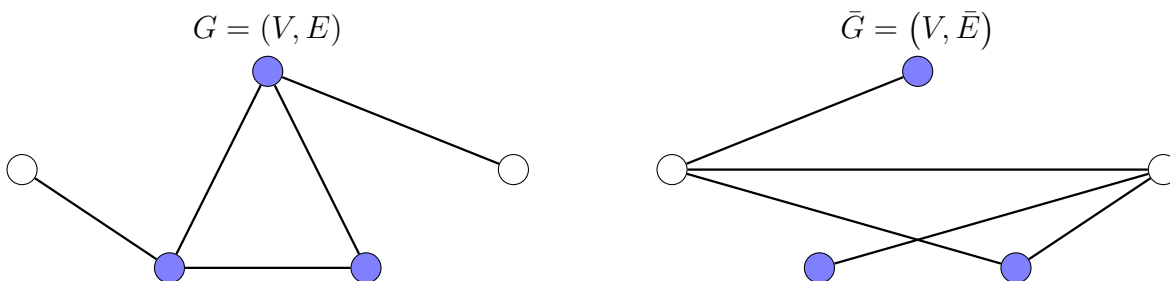
אז הגרף  $G'$  הוא הגרף המשלים של  $G = (V, E)$ .

ז"א  $G' = \bar{G} = (V, \bar{E})$  כאשר

$$\bar{E} = \{(u_1, u_2) \mid (u_1, u_2) \notin E\}.$$

(2)  $k' = k$ .

לדוגמה, בהינתן הגרף  $G = (V, E)$  שמכיל קליקה בגודל  $k = 3$ , הפונקציית הרדוקציה  $R$  מחזירה את הגרף  $\bar{G} = (V, \bar{E})$  ואת המספר  $k' = k = 3$ , כמתואר בתרשים למטה:



נכונות הרדוקציה

(1) ניתן לבנות  $G'$  בזמן פולינומיאלי בגודל  $G$ .

(2) נוכיח כי  $\langle G, k \rangle \in CLIQUE \Leftrightarrow \langle G', k' \rangle \in IS$ .

כיוון  $\Leftarrow$

בהינתן גרף  $G = (V, E)$  ושלם  $k$ .

נניח כי  $\langle G, k \rangle \in CLIQUE$ .

$\Leftarrow$   $G$  מכיל קליקה  $S$  בגודל  $k$ .

$\Leftarrow$  אם  $u_1, u_2 \in S$  (אם  $u_1, u_2$  שני קודקודים בקליקה  $S$ ) אזי  $(u_1, u_2) \in E$ .

כלומר, כל שני קודקודים ב- $S$  מחוברים בצלע של  $G$ .

$\Leftarrow$  אם  $u_1, u_2 \in S$  אזי  $(u_1, u_2) \notin \bar{E}$ .

כלומר, כל שני קודקודים ב- $S$  לא מחוברים בצלע של המשלים של הגרף  $\bar{G}$ , דהיינו  $G'$ .

$\Leftarrow$  אותה הקבוצה  $S$  היא קבוצה בלתי תלוייה ב-  $G'$  בגודל  $k' = k$ .

$\Leftarrow G' = \bar{G}(V, \bar{E})$  מכיל קבוצה בלתי תלוייה בגודל  $k'$ .

$\Leftarrow \langle G', k \rangle \in IS$

$\Rightarrow$  כיוון

בהינתן גרף  $G'$  ושלים  $k'$ .

נניח כי  $\langle G', k' \rangle \in IS$

$\Leftarrow G'$  מכיל קבוצה בלתי תלוייה  $S$  בגודל  $k'$ .

$\Leftarrow$  אם  $u_1, u_2 \in S$  אזי  $(u_1, u_2) \notin \bar{E}$ .

כלומר, כל שני קדקודים ב-  $S$  לא מחוברים בצלע של  $G'$ .

$\Leftarrow$  אם  $u_1, u_2 \in S$  אזי  $(u_1, u_2) \in E$ .

כלומר, כל שני קדקודים ב-  $S$  מחוברים בצלע של  $G(V, E)$ .

$\Leftarrow$  אותה הקבוצה  $S$  היא קליקה ב-  $G$  בגודל  $k = k'$ .

$\Leftarrow G$  מכיל קליקה בגודל  $k$ .

$\Leftarrow \langle G, k \rangle \in CLIQUE$

■

## 12.3 בעיית הכיסוי בקודקודים

### הגדרה 12.3 כיסוי בקודקודים

בהינתן גרף לא מכוון  $G = (V, E)$ , כיסוי בקודקודים ב-  $G$  הוא תת-קבוצה של קודקודים  $C \subseteq V$  כך שלכל צלע  $u, v \in S$  מתקיים  $u \in C$  או  $v \in C$ .



כיסוי בקדקודים בגודל  $k = 2$ :



כיסוי בקדקודים בגודל  $k = 5$ :



כיסוי בקדקודים בגודל  $k = 5$ :

## 12.4 הבעיה $VC$

### הגדרה 12.4 בעיית $VC$

קלט: גרף לא מכוון  $G = (V, E)$  ומספר  $k$ .  
פלט: האם קיים כיסוי בקודקודים ב- $G$  בגודל  $k$ ?

$$VC = \{ \langle G, k \rangle \mid G \text{ גרף לא מכוון המכיל כיסוי בקודקודים בגודל } k \}$$

### משפט 12.3 $VC \in NPC$

הבעיה  $VC$  היא  $NP$  - שלמה.

הוכחה:

נוכיח כי  $VC \in NP$

נבנה אלגוריתם אימות  $V$  עבור  $VC$ .  
 $V = \text{על קלט } \langle G, k \rangle, y$ :

• בודק האם כל צלע ב- $G$  מכילה לפחות קצה אחד ב- $y$ .

◦ אם כן  $\Rightarrow$  מקבל.

◦ אם לא  $\Rightarrow$  דוחה.

נוכיח כי  $VC$  היא  $NP$ -קשה ע"י רדוקציה  $IS \leq_P VC$

פונקציית הרדוקציה:

בהינתן זוג  $\langle G, k \rangle$  הקלט של  $IS$ , ניצור זוג  $\langle G', k' \rangle$  הקלט של  $VC$  ונוכיח כי

$$\langle G, k \rangle \in IS \iff \langle G', k' \rangle \in VC.$$

הפונקציית הרדוקציה מוגדרת כך שהתנאים הבאים מתקיימים:

(1) נניח שהגרף הוא  $G = (V, E)$ .

אז הגרף  $G'$  הוא אותו גרף  $G = (V, E)$ .

(2)  $k' = |V| - k$ .

נכונות הרדוקציה

(1) ניתן לבנות  $G'$  בזמן פולינומיאלי בגודל  $G$ .

(2) נוכיח כי  $\langle G, k \rangle \in IS \iff \langle G', k' \rangle \in VC$ .

כיוון  $\Leftarrow$

בהינתן גרף  $G = (V, E)$  ושלם  $k$ .

נניח כי  $\langle G, k \rangle \in IS$

$G$  מכיל קבוצה בלתי תלוייה  $S$  בגודל  $k$ .  $\Leftarrow$   
 אם  $u_1 \in S$  וגם  $u_2 \in S$  אז  $(u_1, u_2) \notin E$ .  $\Leftarrow$   
 כלומר, כל שני קדקודים ב-  $S$  **לא מחוברים** בצלע ב-  $G$ .  
 $\Leftarrow$  השלילה הלוגית של הגרירה הזאת היא:  
 אם  $(u_1, u_2) \in E$  אז  $u_1 \notin S$  או  $u_2 \notin S$ .  
 $\Leftarrow$  אם  $(u_1, u_2) \in E$  אז  $u_1 \in V \setminus S$  או  $u_2 \in V \setminus S$ .  
 $\Leftarrow$   $V \setminus S$  היא כיסוי קדקודים ב-  $G$  בגודל  $k' = |V| - k$ .  
 $\Leftarrow$  הגרף  $G' = G$  מכיל כיסוי קדקודים בגודל  $k'$ .  
 $\Leftarrow \langle G', k' \rangle \in VC$

$\Rightarrow$  כיוון

בהינתן גרף  $G'$  ושלם  $k'$ .  
 נניח כי  $\langle G', k' \rangle \in VC$ .  
 $\Leftarrow$   $G'$  מכיל כיסוי בקדקודים  $C$  בגודל  $k'$ .  
 $\Leftarrow$  אם  $(u_1, u_2) \in E$  אז  $u_1 \in C$  או  $u_2 \in C$ .  
 $\Leftarrow$  השלילה הלוגית של הגרירה הזאת היא:  
 אם  $u_1 \notin C$  וגם  $u_2 \notin C$  אז  $(u_1, u_2) \notin E$ .  
 $\Leftarrow$  אם  $u_1 \in V \setminus C$  וגם  $u_2 \in V \setminus C$  אז  $(u_1, u_2) \notin E$ .  
 $\Leftarrow$  כל שני קדקודים ב-  $V \setminus C$  לא מחוברים בצלע ב-  $G'$ .  
 $\Leftarrow$   $V \setminus C$  הוא קבוצת בלתי תלוייה ב-  $G'$  בגודל  $k = |V| - k'$ .  
 $\Leftarrow$  הגרף  $G = G'$  מכיל קבוצה בלתי תלוייה בגודל  $k$ .



## PARTITION 12.5

### הגדרה 12.5 בעיית PARTITION

קלט: קבוצת מספרים שלמים  $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$   
 פלט: האם קיימת תת-קבוצה  $Y \subseteq S$  כך ש-  $\sum_{y \in Y} y = \sum_{y \in S \setminus Y} y$ ?

$$PARTITION = \left\{ S \mid \sum_{y \in Y} y = \sum_{y \in S \setminus Y} y \text{ ש- } Y \subseteq S \text{ קבוצת שלמים, וקיימת תת-קבוצה } Y \subseteq S \right\}$$

## 12.6 רדוקציות פולינומיאליות

## משפט 12.4 רדוקציות פולינומאליות

$$\begin{aligned}
 SAT &\leq_P 3SAT \\
 3SAT &\leq_P CLIQUE \\
 CLIQUE &\leq_P IS \\
 IS &\leq_P VC \\
 SubSetSum &\leq_P PARTITION \\
 HAMPATH &\leq_P HAMCYCLE
 \end{aligned}$$

12.7 שפות  $NP$  שלמותמשפט 12.5 שפות  $NP$  -שלמות

$SAT$	-NP שלמה.	(משפט קוק לויין)
$3SAT$	-NP שלמה.	
$HAMPATH$	-NP שלמה.	
$CLIQUE$	-NP שלמה.	
$IS$	-NP שלמה.	
$VC$	-NP שלמה.	



## **שיעור 13**

### **סיבוכיות מקום ושלמות ב PSPACE**

**13.1 משפט סביץ'**

**13.2 המחלקה PSPACE**

**13.3 שלמות ב- PSPACE**

**13.4 המחלקה L**

**13.5 המחלקה NL**

**13.6 שלמות ב- NL**

**13.7 שיוויון NL ו- coNL**