פרק 6
אוטומט מחסנית

6.1 הגדרה של השפות R ו- RE

הגדרה 6.1 R

אוסף השפות הכריעות מסומן R ומוגדר

$$R = \{L \subseteq \Sigma^* \ : \ \text{קיימת מ"ט המכריעה את } L\} \ .$$

הגדרה 6.2 RE

אוסף השפות הקבילות מסומן RE ומוגדר

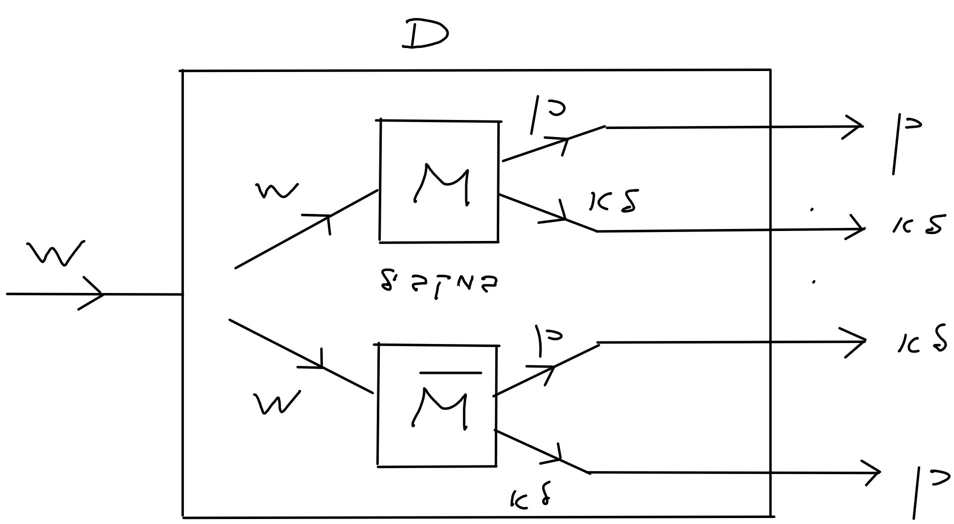
$$RE = \{L \subseteq \Sigma^* \ : \ \text{קיימת מ"ט המקבלת את } L\} \ .$$

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

נוכיח כי D מכריעה את L.

אם $w \in L$

$\Leftarrow$ $w \in L(M)$

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

$\Leftarrow$ D עוצרת ומקבלת את w.

אם $w \notin L$

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

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

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

$\Leftarrow$ D עוצרת ודוחה את w.

■

משפט 6.1 סגירות של השפה הכריעות

R סגורה תחת:

1) איחוד
2) חיתוך
3) משלים
4) שרשור
5) סגור קלין

משפט 6.2 סגירות של השפה הקבילות

RE סגורה תחת:

1) איחוד
2) חיתוך
3) שרשור
4) סגור קלין

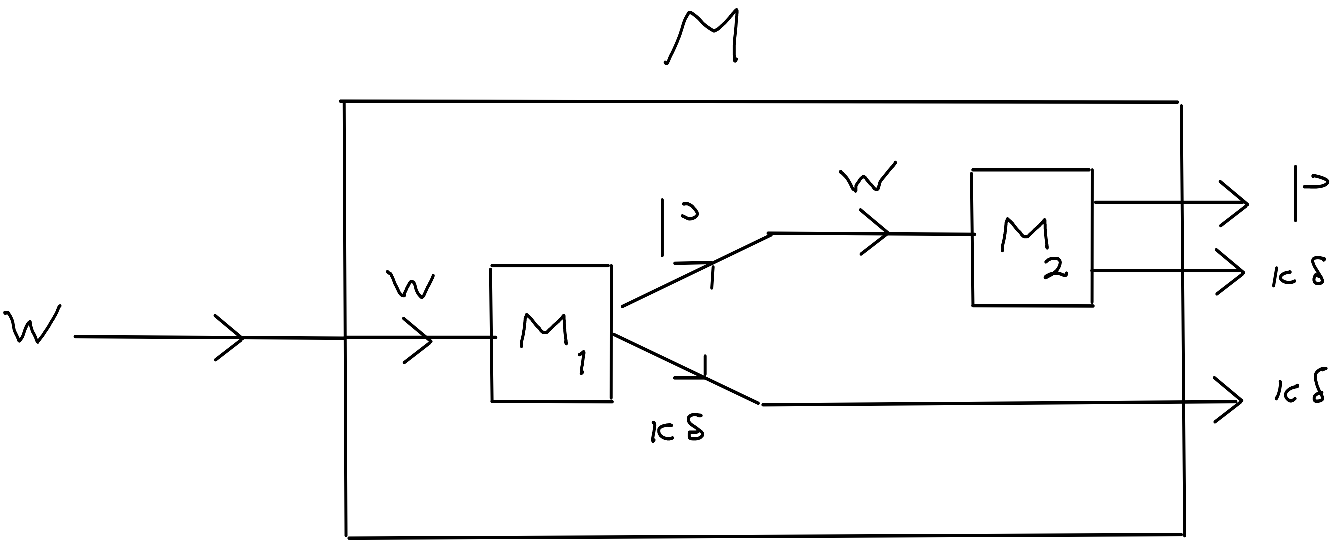
הוכחה:

1) חיתוך:

(א) R 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 $L_1 \cap L_2$.



<u>תאור הבנייה</u>

$M =$ על קלט w:

1) M מעתיקה את w לסרט נוסף.
2) M מריצה את M_1 על w.
- אם M_1 דוחה $\Leftarrow$ M דוחה.
- אחרת M מריצה את M_2 על העותק של w ועונה כמוה.

<u>נכונות:</u>

נוכיח כי M מכריעה את $L_1 \cap L_2$.

אם $w \in L_1 \cap L_2$

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

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

$\Leftarrow$ M מקבלת את w.

אם $w \notin L_1 \cap L_2$

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

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

$\Leftarrow$ M דוחה את w.

(ב) RE **סגורה תחת חיתוך**

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:

(א) R **סגורה תחת איחוד**

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

$M =$ על קלט w:

1) M מעתיקה את w לסרט נוסף.
2) M 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.

(ב) RE **סגורה תחת איחוד**

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

$M =$ 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:

(א) R **סגורה תחת שרשור**

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

$$L_1 \cdot L_2 = \left\{ w = w_1 w_2 \;\middle|\; w_1 \in L_1 \wedge w_2 \in L_2 \right\} \ .$$

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

$M =$ 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) <u>RE **סגורה תחת שרשור**</u>

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

4) קליני $*$

א) <u>R **סגורה תחת $*$ קליני**</u>

נוכיח כי לכל שפה L:

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

כאשר

$$L^* = \left\{ w = w_1 w_2 \cdots w_k \;\middle|\; \forall 1 \leqslant i \leqslant k \;,\; w_i \in L \right\} \;.$$

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

<u>תאור הבנייה</u>

$M^* =$ 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 $1 \leqslant i \leqslant k$:

M^* מריצה את M על w_i.

- אם M דוחה את $w_i \Leftarrow M^*$ דוחה.
- אחרת חוזרים לשלב 3).

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

ב) <u>RE **סגורה תחת $*$ קליני**</u>

5) משלים

א) <u>R **סגורה תחת המשלים**</u>

נוכיח כי

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

כאשר

$$\bar{L} = \left\{ w \in \Sigma^* \;\middle|\; w \notin L \right\} \;.$$

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.

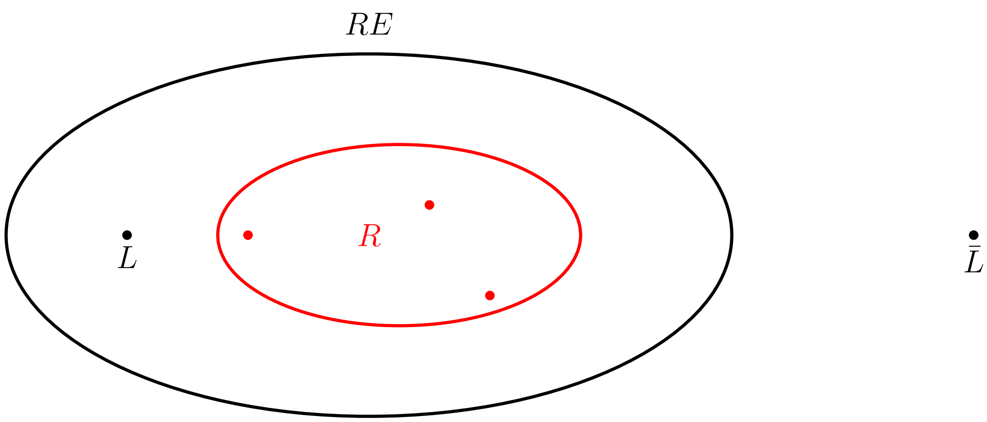
- אם M מקבלת $\Leftarrow$ $\bar{M}$ דוחה.
- אם M דוחה $\Leftarrow$ $\bar{M}$ מקבלת.

ב) <u>RE אינה סגורה תחת המשלים</u>

■

משפט 6.3 RE אינה סגורה תחת המשלים

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



הוכחה:

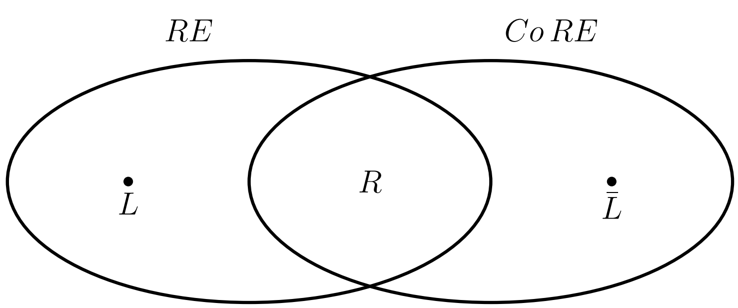
נניח כי $L \in RE \backslash R$ ונניח בשלילה כי $\bar{L} \in RE$.

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

■

הגדרה 6.3 $Co\,RE$

$$Co\,RE = \left\{ L \subseteq \Sigma^* \mid \bar{L} \in RE \right\} \ .$$



<u>אבחנה</u>

לפי למה 6.1:

$$RE \cap Co\,RE = R \ .$$

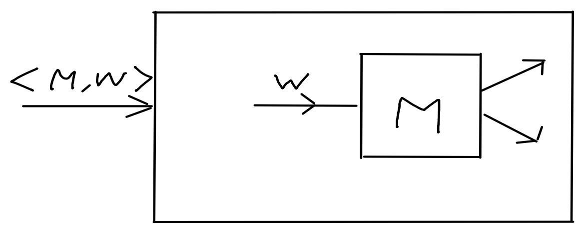
6.2 קידוד של מ"ט דטרמיניסטית

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.

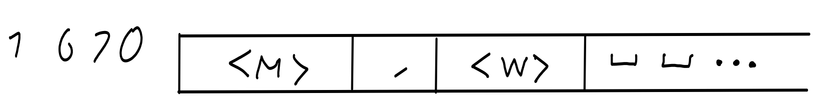
<u>תאור הפעולה של U</u>

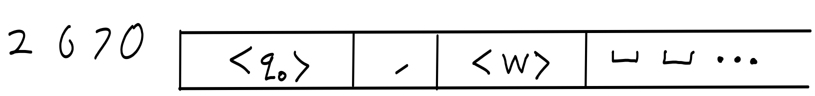
$U=$ על קלט x:

(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:





- רושמת את הקונפיגורציה ההתחלתית q_0w 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.

<u>מהי השפה של U?</u>

לכל x:

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

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

הגדרה 6.5 L_{acc}

$$L_{\text{acc}} = \big\{\langle M, w\rangle \ \big|\ w \in L(M)\big\} \in RE \backslash R$$

הגדרה 6.6 L_{halt}

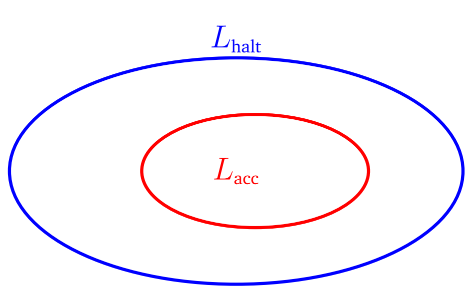
$$L_{\text{halt}} = \big\{\langle M, w\rangle \ \big|\ \text{עוצרת על } w \ M\big\} \in RE \backslash R$$

הגדרה 6.7 L_{d}

$$L_{\text{d}} = \big\{\langle M\rangle \ \big|\ \langle M\rangle \notin L(M)\big\} \notin RE$$

<u>אבחנה:</u>

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



משפט 6.4

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

הוכחה: מכיוון ש- $L(U) = L_{\text{acc}}$, U מקבלת את L_{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_{halt}:

אם $x \in L_{\text{halt}}$

$\Leftarrow$ $x = \langle M, w\rangle$ 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.

■