

תרגילים : סיבוכיות

שאלה 1 הבעיית קליקה מוגדרת באופן הבא:

קלט: גרף לא מכוון $G = (V, E)$ ומספר טבעי k .
 פלט: האם G מכיל קליקה בגודל k ?

$$CLIQUE = \{ \langle G, k \rangle \mid G \text{ מכיל קליקה בגודל } k \}.$$

הבעיית כיסוי בקדקודים מוגדרת:

קלט: גרף לא מכוון $G = (V, E)$ ומספר טבעי k .
 פלט: האם G מכיל כיסוי בקדקודים k ?

$$VC = \{ \langle G, k \rangle \mid G \text{ מכיל כיסוי בקדקודים בגודל } k \}.$$

הוכיחו כי קיימת רדוקציה זמן-פולינומיאלית מבעיית $CLIQUE$ לבעיית VC : כלומר

$$CLIQUE \leq_p VC.$$

שאלה 2

בהינתן גרף לא מכוון $G = (V, E)$.
 תת-קבוצת קודקודים $S \subseteq V$ היא **קבוצת בלתי תלויה** אם התנאי הבא מתקיים:
 אם $u_1, u_2 \in S$ אז $(u_1, u_2) \notin E$.

תת-קבוצת קודקודים $C \subseteq V$ תקרא **קליקה** אם התנאי הבא מתקיים:
 אם $u_1, u_2 \in C$ אז $(u_1, u_2) \in E$.

הבעיית IS מוגדרת:

$$IS = \{ \langle G, k \rangle \mid G \text{ גרף לא מכוון המכיל קבוצה בלתי תלויה בגודל } k \}$$

הבעיית $CLIQUE$ מוגדרת:

$$CLIQUE = \{ \langle G, k \rangle \mid G \text{ גרף לא מכוון המכיל קליקה בגודל } k \}$$

הוכיחו כי

$$IS \leq_p CLIQUE.$$

כלומר, הראו כי קיימת רדוקציית התאמה פולינומיאלית מהשפה IS לשפה $CLIQUE$.
 יש להראות כי הרדוקציית התאמה וכי היא ניתנת לחישוב בזמן פולינומיאלי.

שאלה 3

בהינתן גרף לא מכוון $G = (V, E)$. קבוצת קדקודים $U \subseteq V$ תקרא **קבוצת בלתי תלויה** אם לכל זוג קדקודים u_1, u_2 ב- U מתקיים ש-

$$(u_1, u_2) \notin E.$$

בהינתן גרף לא מכוון $G = (V, E)$. קבוצת קדקודים $U \subseteq V$ תקרא **ניסוי קדקודים** ב- G אם לכל צלע $(u_1, u_2) \in E$, מתקיים ש-

$$u_1 \in U \quad \vee \quad u_2 \in U .$$

נתבונן בשפות הפורמליות הבאות:

$$IS = \{ \langle G, k \rangle \mid G \text{ is an undirected graph, } k \text{ is an integer, } G \text{ includes an independent set of size at least } k \}$$

$$VC = \{ \langle G, k \rangle \mid G \text{ is an undirected graph, } k \text{ is an integer, } G \text{ includes a vertex cover of size at least } k \}$$

הוכיחו כי

$$IS \leq_P VC .$$

כלומר, הראו כי קיימת רדוקציית התאמה פולינומיאלית מהשפה IS לשפה VC . יש להראות כי הרדוקציית התאמה וכי היא ניתנת לחישוב בזמן פולינומיאלי.

שאלה 4 בעיית סכום התת קבוצה (subsetSum): בהינתן קבוצת מספרים שלמים $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

ומספר שלם t , האם קיימת תת קבוצה $Y \subseteq S$ שסכום איבריה הוא בדיוק t . בעיית סכום התת קבוצה כשפה פורמלית:

$$\text{SubsetSum} = \left\{ \langle S, t \rangle \mid t = \sum_{y \in Y} y \text{ כד } Y \subseteq S \text{ קבוצה תת-קבוצה של } S \right\}$$

בעיית החלוקה (Partition): בהינתן קבוצת מספרים שלמים $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ האם קיימת תת-קבוצה $Y \subseteq S$ כך ש- $\sum_{y \in Y} y = \sum_{y \in S \setminus Y} y$. בעיית החלוקה כשפה פורמלית:

$$\text{partition} = \left\{ S \mid \sum_{y \in Y} y = \sum_{y \in S \setminus Y} y \text{ כד } Y \subseteq S \text{ קבוצה שלמים, וקיימת תת-קבוצה של } S \right\}$$

הוכיחו כי קיימת רדוקציית התאמה פולינומיאלית מהשפה SubsetSum לשפה partition. כלומר:

$$\text{SubsetSum} \leq_P \text{Partition} .$$

בשאלה זו עליכם:

- (א) להגדיר במפורש את הרדוקציה.
- (ב) להראות שהרדוקציה היא רדוקציית התאמה.
- (ג) להראות שהרדוקציה פולינומיאלית.

תשובות

שאלה 1 בהינתן זוג $\langle G, k \rangle$ הקלט עבור $CLIQUE$, ניצור זוג $\langle G', k' \rangle$, הקלט של VC ע"י פונקצית הרדוקציה

$$\begin{aligned}\langle G, k \rangle \in CLIQUE &\Rightarrow \langle G', k' \rangle \in VC \\ \langle G, k \rangle \in CLIQUE &\Leftarrow \langle G', k' \rangle \in VC\end{aligned}$$

הגדרת הרדוקציה

• נגדיר את G' להיות הגרף המשלים $\bar{G}(V, \bar{E})$:

$$\bar{E} = \{(u_1, u_2) \mid (u_1, u_2) \notin E\}.$$

• נגדיר $k' = |V| - k$.

נכונות הרדוקציה

כיוון \Leftarrow

נניח כי $\langle G, k \rangle \in CLIQUE$.

\Leftarrow מכיל קליקה C בגודל k .

\Leftarrow לכל $(u_1, u_2) \in \bar{E}$ של \bar{G} , מתקיים $(u_1, u_2) \notin E$ ולכן $u_1 \notin C$ או $u_2 \notin C$.

\Leftarrow לכל שני קודקודים u_1, u_2 ב- \bar{G} , $u_1 \in V \setminus C$ או $u_2 \in V \setminus C$.

\Leftarrow הקבוצת קודקודים $V \setminus C$ היא כיסוי בקודקודים של \bar{G} בגודל $k' = |V| - k$.

$\Leftarrow \langle G', k' \rangle \in VC$.

כיוון \Rightarrow

נניח כי $\langle G', k' \rangle \in VC$.

\Leftarrow G' מכיל כיסוי בקודקודים S בגודל $k' = |V| - k$.

\Leftarrow לכל שני קודקודים u_1, u_2 של G' , אם $(u_1, u_2) \in \bar{E}$ אז $u_1 \in S$ או $u_2 \in S$.

השלילה הלוגית של גרירה זו היא: אם $u_1 \notin S$ וגם $u_2 \notin S$ אז $(u_1, u_2) \notin \bar{E}$.

\Leftarrow אם $u_1 \in V \setminus S$ וגם $u_2 \in V \setminus S$ אז $(u_1, u_2) \in \bar{E}$.

\Leftarrow הקבוצת קודקודים $V \setminus S$ היא קליקה ב- G בגודל $k = |V| - k'$.

\Leftarrow G מכיל קליקה בגודל k .

שאלה 2 עלינו להוכיח כי \exists רידוקציית זמן-פולינומיאלית מ- IS ל- CLQ :

$$IS \leq_P CLQ.$$

ראשית נגדיר את הבעיות CLQ ו- IS .

הגדרת הבעיית CLQ :

קלט: גרף לא מכוון $G = (V, E)$ ומספר שלם חיובי k .
 פלט: האם G מכיל קליקה בגודל לפחות k .

$$CLQ = \{ \langle G, k \rangle \mid G \text{ מכיל קליקה בגודל } k \text{ לפחות} \}.$$

הגדרת הבעיית IS :

קלט: גרף לא מכוון $G = (V, E)$ ומספר שלם חיובי k .
 פלט: האם G מכיל קבוצה בלתי תלוייה בגודל לפחות k .

$$IS = \{ \langle G, k \rangle \mid G \text{ מכיל קבוצה בלתי תלוייה בגודל } k \text{ לפחות} \}.$$

פונקציית הרדוקציה:

אנחנו נגדיר פונקציית הרדוקציה R שבהינתן זוג $\langle G, k \rangle \in IS$ מחזירה $\langle G', k' \rangle \in CLQ$, כלומר

$$R(\langle G, k \rangle) = \langle G', k' \rangle. \quad (*)$$

כך ש:

$$\langle G, k \rangle \in IS \Leftrightarrow \langle G', k' \rangle \in CLQ. \quad (**)$$

הפונקציית הרדוקציה במשוואה (*) 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

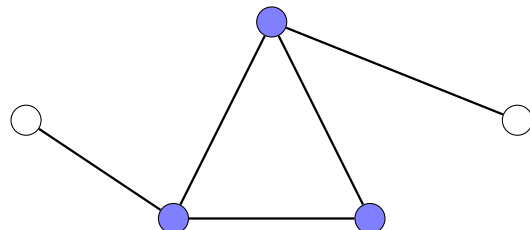
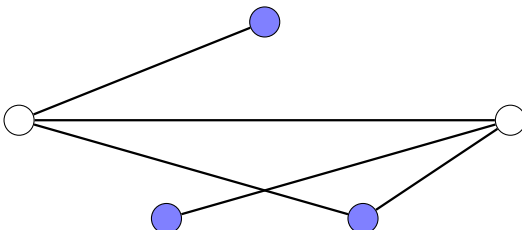
$$\bar{E} = \{ (u_1, u_2) \mid (u_1, u_2) \notin E \}.$$

2 $k' = k$

לדוגמה, בהינתן הגרף $G = (V, E)$ שמכיל קבוצה בלתי תלוייה בגודל $k = 3$, הפונקציית הרדוקציה R מחזירה את הגרף $\bar{G} = (V, \bar{E})$ ואת המספר $k' = k = 3$ כמתואר בתרשים למטה:

$$G = (V, E)$$

$$\bar{G} = (V, \bar{E})$$



נכונות הרדוקציה

כעת נוכיח שתנאי (*2) מתקיים.

כיוון \Leftarrow

בהינתן גרף $G = (V, E)$ ושלם k .

נניח כי $\langle G, k \rangle \in IS$.

\Leftarrow מכיל קבוצה בלתי תלוייה בגודל k לפחות.

\Leftarrow מכיל קבוצה בלתי תלוייה U בגודל k .

\Leftarrow כל שני קדקודים ב- U לא מחוברים בצלע של G .

\Leftarrow כל שני קדקודים ב- U מחוברים בצלע של \bar{G} .

\Leftarrow הקבוצה U היא קליקה בגודל k של \bar{G} .

\Leftarrow הקבוצה U היא קליקה בגודל $k' = k$ של $G' = \bar{G}$.

$\Leftarrow \langle G', k' \rangle \in CLQ$

כיוון \Rightarrow

בהינתן גרף G' ושלם k' .

נניח כי $\langle G', k' \rangle \in CLQ$.

\Leftarrow מכיל קליקה בגודל k' לפחות.

\Leftarrow מכיל קליקה U' בגודל k' .

על פי ההגדרה של הפונקציית הרדוקציה $R: \bar{G} = G'$.

\Leftarrow מכיל קליקה U' בגודל k' .

\Leftarrow כל שני קדקודים ב- U' מחוברים בצלע של \bar{G} .

\Leftarrow כל שני קדקודים ב- U' לא מחוברים בצלע של המשלים של הגרף \bar{G} , דהיינו G .

\Leftarrow הקבוצה U' היא קבוצה בלתי תלוייה בגודל $k' = k$ של G .

$\Leftarrow \langle G, k \rangle \in IS$

שאלה 3 עלינו להוכיח כי \exists רידוקציית זמן-פולינומיאלית מ- IS ל- VC :

$$IS \leq_P VC.$$

ראשית נגדיר את הבעיות VC ו- IS .

הגדרת הבעיית VC :

קלט: גרף לא מכוון $G = (V, E)$ ומספר שלם חיובי k .
 פלט: האם קיים כיסוי קדקודים ב- G בגודל לפחות k .

$$VC = \{ \langle G, k \rangle \mid \text{ } \}$$

הגדרת הבעיית IS :

קלט: גרף לא מכוון $G = (V, E)$ ומספר שלם חיובי k .
 פלט: האם G מכיל קבוצה בלתי תלוייה בגודל לפחות k .

$$IS = \{ \langle G, k \rangle \mid \text{ } \}$$

פונקציית הרדוקציה:

אנחנו נגדיר פונקציית הרדוקציה R שבהינתן זוג $\langle G, k \rangle \in IS$, מחזירה R $\langle G', k' \rangle \in VC$, כלומר

$$R(\langle G, k \rangle) = \langle G', k' \rangle. \quad (*)1$$

כך ש:

$$\langle G, k \rangle \in IS \Leftrightarrow \langle G', k' \rangle \in VC. \quad (*)2$$

הפונקציית הרדוקציה במשוואה (*)1 מוגדרת כך שהתנאים הבאים מתקיימים:

$$1 \quad G = (V, E) \text{ הוא גרף } G = (V, E)$$

$$\text{אז הגרף } G' \text{ הוא אותו גרף } G = (V, E)$$

$$2 \quad k' = |V| - k$$

נכונות הרדוקציה

כעת נוכיח שתנאי (*)2 מתקיים.

כיוון \Leftarrow

$$\text{בהינתן גרף } G = (V, E) \text{ ושלם } k.$$

$$\text{נניח כי } \langle G, k \rangle \in IS$$

$$\Leftarrow G \text{ מכיל קבוצה בלתי תלוייה } U \text{ בגודל } k \text{ לפחות.}$$

$$\Leftarrow G \text{ מכיל קבוצה בלתי תלוייה } U \text{ בגודל } k.$$

$$\Leftarrow \text{כל שני קדקודים ב- } U \text{ לא מחוברים בצלע ב- } G.$$

$$\Leftarrow V \setminus U \text{ היא כיסוי קדקודים ב- } G \text{ בגודל } k' = |V| - k.$$

$$\Leftarrow \text{הגרף } G' = \bar{G} \text{ מכיל כיסוי קדקודים בגודל } k.$$

$$\Leftarrow \langle G', k' \rangle \in VC$$

כיוון \Rightarrow בהינתן גרף G' ושלם k' .נניח כי $\langle G', k' \rangle \in VC$. $\Leftarrow G'$ מכיל כיסוי קדקודים בגודל k' לפחות. $\Leftarrow G'$ מכיל כיסוי קדקודים U' בגודל k' . $\Leftarrow G$ מכיל כיסוי קדקודים U' בגודל k' . \Leftarrow כל שני קדקודים ב- $V \setminus U'$ היא קבוצת בלתי תלויה ב- G' בגודל $k' - |V| = k$. \Leftarrow הגרף $G = G'$ מכיל קבוצה בלתי תלויה בגודל k .

שאלה 4

(א) נבנה פונקצית הרדוקציה $f : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$ שמוגדרת

$$f(\langle S, t \rangle) = \langle S' \rangle$$

כאשר $\langle S, t \rangle$ קלט של SubsetSum ו- $\langle S' \rangle$ קלט של Partition.

$$(1) \text{ יהי } s = \sum_{x \in S} x$$

(2) נגדיר את הקבוצה החדשה S' על ידי הוספת האיבר $s - 2t$ לקבוצה S :

$$S' = S \cup \{s - 2t\}.$$

(ב) כיוון \Leftarrow נניח ש- $\langle S, t \rangle \in \text{SubsetSum}$.

$$\Leftarrow \text{קיימת תת-קבוצה } Y \subseteq S \text{ כך ש- } t = \sum_{y \in Y} y$$

לכן:

$$\begin{aligned} \sum_{y \in (Y \cup \{s-2t\})} y &= |Y| + s - 2t \\ &= t + s - 2t \\ &= s - t. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{y \in S' \setminus (Y \cup \{s-2t\})} y &= |S'| - (|Y| + s - 2t) \\ &= |S'| - |Y| - s + 2t \\ &= |S| + s - 2t - |Y| - s + 2t \\ &= |S| - |Y| \\ &= s - t. \end{aligned}$$

\Leftarrow התת-קבוצה $Y \cup \{s - 2t\}$ והתת-קבוצה $S' \setminus (Y \cup \{s - 2t\})$ מהוות חלקיה של הקבוצה S' .
 $\Leftarrow \langle S' \rangle \in \text{Partition}$.

\Rightarrow כיוון

נניח ש- $\langle S' \rangle \in \text{Partition}$.

\Leftarrow קיימות תת-קבוצות $S'_1, S'_2 \subseteq S'$ כך שמתקיים

$$S'_1 \cup S'_2 = S' \quad (1*)$$

-1

$$\sum_{x \in S'_1} x = \sum_{x \in S'_2} x. \quad (2*)$$

הקבוצה S קשור לקבוצה S' על ידי היחס $S' = S \cup \{s - 2t\}$.
 לכן

$$S'_1 \cup S'_2 = S \cup \{s - 2t\} \quad (3*)$$

ללא הגבלת כלליות אנחנו נגדיר את התת-קבוצה $S_1 \subseteq S$ של הקבוצה S להיות

$$S_1 = S'_1 \cup \{s - 2t\},$$

ואנחנו נגדיר את התת-קבוצה $S_2 \subseteq S$ של הקבוצה S להיות

$$S_2 = S'_2.$$

מכאן מנובע מהמשוואה (3*) ש:

$$S_1 \cup S_2 = S'_1 \cup S'_2 + \{s - 2t\} = S \cup \{s - 2t\} \Rightarrow S_1 \cup S_2 = S. \quad (4*)$$

\Leftarrow ניתן לרשום משוואה (2*) בצורה הבאה:

$$\sum_{x \in (S_1 \cup \{s - 2t\})} x = \sum_{x \in S_2} x. \quad (5*)$$

ניתן לחלק את הסכום בצד השמאל של המשוואה (5*) ולרשום אותה בצורה הבאה:

$$\sum_{x \in S_1} x + s - 2t = \sum_{x \in S_2} x. \quad (6*)$$

נוסיף את הסכום $\sum_{x \in S_1} x$ לשני האגפים של משוואה של (6*) ונקבל

$$\sum_{x \in S_1} x + \sum_{x \in S_1} x + s - 2t = \sum_{x \in S_2} x + \sum_{x \in S_1} x. \quad (7*)$$

הסכום בצד הימין של משוואה (7*) הוא הסכום $\sum_{x \in (S_1 \cup S_2)} x$.

לפי המשוואה (4*), $S_1 \cup S_2 = S$, לכן $\sum_{x \in (S_1 \cup S_2)} x = \sum_{x \in S} x$.

לכן הסכום בצד הימין של משוואה (7*) הוא הסכום של כל האיברים אשר בקבוצה S .
אנחנו מסמנים את הסכום הזה כ- $\sum_{x \in S} x = s$. לכן ניתן לרשום את משוואה (7*) בצורה הבאה:

$$\sum_{x \in S_1} x + \sum_{x \in S_2} x + s - 2t = s. \quad (8*)$$

אפשר לבטל s בצד שמאל ובצד ימין ולהעביר את ה- $2t$ לצד ימין ולקבל את המשוואה:

$$\sum_{x \in S_1} x + \sum_{x \in S_2} x = 2t, \quad (9*)$$

זאת אומרת

$$2 \sum_{x \in S_1} x = 2t \Rightarrow \sum_{x \in S_1} x = t. \quad (10*)$$

\Leftarrow קיימת תת קבוצה $S_1 \subseteq S$ של S שמקיימת את התנאי $\sum_{x \in S_1} x = t$.

$\Leftarrow \langle S, t \rangle \in \text{SubsetSum}$.

הפונקציה הרדוקציה f , על קלט $\langle S, t \rangle$ מחזירה את הפלט $\langle S', t \rangle$ כאשר $S' = S \cup \{s - 2t\}$. ג

לכן הפונקציה מחשבת את הסכום s של כל האיברים שבקבוצה S ואז מחשבת את החיסור $s - 2t$.

נסמן $n = |S|$ האורך של הקבוצה S .

אפשר לתאר את f בפסאודו-קוד באופן הבא:

שלב 1. הפונקציה f מאתחלת משתנה $s = 0$.

שלב 2. הפונקציה נכנסת ללואה מעל כל האיברים שבקבוצה S ומחברת האיבר הנוכחי לערך של s כל איטרציה.

שלב 3. בסוף הפונקציה מחשבת את החיסור $s - 2t$.

שלב 4. הפונקציה מחזירה את הקבוצה החדשה $S' = S \cup \{s - 2t\}$.

• שלב 1 דורש צעד אחד. לכן הסיבוכיות של שלב 1 הוא $O(1)$.

• שלב 2 דורש n צעדים. לכן הסיבוכיות של שלב 2 הוא $O(n)$.

• שלב 3 דורש צעד אחד. לכן הסיבוכיות של שלב 3 הוא $O(1)$.

• שלב 4 דורש צעד אחד. לכן הסיבוכיות של שלב 4 הוא $O(1)$.

בסך הכל הסיבוכיות של הפונקציה f היא

$$O(1) + O(n) + O(1) + O(1) = O(n).$$