

# לוגיקה ונושאים דיסקרטיים



## תוכן העניינים

1	.....	1. לוגיקה
15	.....	2. תורת הקבוצות
29	.....	3. אינדוקציה
31	.....	4. תורת הגרפים

# לוגיקה ונושאים דיסקרטיים

פרק 1 - לוגיקה

תוכן העניינים

1. מבוא ..... 1
2. הקשרים ..... (ללא ספר) 2
3. טאוטולוגיה, סתירה ומושגים נוספים ..... 2
4. קבוצת קשרים שלמה ..... 7
5. צורות נורמליות ..... 8
6. חוקי דה מורגן ..... (ללא ספר) 8
7. תחשיב הפרדיקטים ..... 9
8. תרגול בשיטות ההוכחה השונות ..... 13

## מבוא

### שאלות

- 1) קבעו בכל אחד מהסעיפים האם נכון או לא נכון:
- הביטוי "בני ישראל הלכו במדבר ארבעים שנה" הוא פסוק.
  - הביטוי "ארבעים שנה" הוא פסוק.
  - שלילת הפסוק "האריה טרף את הצבי" היא "הצבי טרף את האריה".
  - הפסוק " $1+1=2$  או  $2=3$ " הוא פסוק אמת.
  - הפסוק " $1+1=2$  וגם  $2=3$ " הוא פסוק אמת.
  - הפסוק "אם  $1+1=2$  אז  $2=3$ " הוא פסוק אמת.
  - הפסוק "אם  $2=3$  אז  $1+1=2$ " הוא פסוק אמת.
  - הפסוק "אם  $2=3$  אז  $1+1 \neq 2$ " הוא פסוק אמת.
  - שלילת הפסוק " $a \neq 4$  וגם  $b \neq 3$ " היא " $a+b=7$  או  $ab=12$ ".
  - שלילת הפסוק " $a \neq 4$  או  $b \neq 3$ " היא " $a+b=7$  וגם  $ab=12$ ".
  - שלילת הפסוק " $a \notin \{3,4\}$  או  $b \notin \{3,4\}$ " היא " $a+b=7$  וגם  $ab=12$ ".

- 2) רשמו את טבלאות האמת של הפסוקים הבאים:

א.  $(p \wedge q) \vee \neg r$

ב.  $\neg(p \wedge q) \rightarrow (\neg r)$

ג.  $(p \wedge \neg q) \vee r$

ד.  $(p \vee q) \rightarrow (q \rightarrow r)$

- 3) בטאו את שלילת הפסוקים הבאים (בלי קשר לנכונותם):

א. דוד יפה או ראובן מכוער.

ב. האוכל חם וטעים.

ג. לכל  $x$  קיים  $y$ , שהוא השורש הריבועי של  $x$ .

ד. כל תרנגולת כחולה עוזבת את הלול כדי להטיל ביצים.

ה. כל פנתר שהוא ורוד משחק בסרטים מצוירים.

ו. כל פנתר שהוא ורוד קוראים לו יוסי או שהוא משחק בסרטים מצוירים.

ז. כל פנתר שהוא ורוד קוראים לו יוסי וגם הוא משחק בסרטים מצוירים.

ח. לכל נגר קיים אדם שכל רהיטיו יוצרו בידי נגר זה.

ט. אם יהיה יום יפה וגם יהיה לי מצב רוח טוב אז אצא לטיול.

י. אם יהיה יום יפה אז אם יהיה לי מצב רוח טוב אז אצא לטיול.

## טאוטולוגיה, סתירה ומושגים נוספים

### שאלות

1) בדקו אילו מזוגות הפסוקים הבאים שקולים לוגית. במקרה שהתשובה חיובית, הראו זאת הן בעזרת טבלת אמת והן בעזרת עץ שקר.

$$\text{א. } \neg(p \rightarrow q) \quad p \wedge (\neg q)$$

$$\text{ב. } (\neg p) \rightarrow q \quad p \vee (\neg q)$$

$$\text{ג. } p \rightarrow (\neg q) \quad \neg(p \wedge q)$$

$$\text{ד. } (p \vee q) \wedge (\neg q) \quad p \wedge (\neg q)$$

$$\text{ה. } p \leftrightarrow q \quad (p \wedge q) \vee ((\neg p) \wedge (\neg q))$$

$$\text{ו. } p \vee u \quad (s \rightarrow (p \wedge (\neg r))) \wedge ((p \rightarrow (r \vee q)) \wedge s)$$

ז. הראו כי  $\neg(r \wedge (p \vee q)) \equiv ((\neg p) \wedge (\neg q)) \vee \neg r$ , בעזרת זהויות יסוד.

2) יהיו  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta$  הפסוקים:

$$\alpha_1 : (A \vee B) \rightarrow (D \rightarrow C)$$

$$\alpha_2 : B \rightarrow \neg(C \wedge A)$$

$$\alpha_3 : C \leftrightarrow (A \wedge D)$$

$$\beta : D \vee (B \wedge C)$$

בדקו אלו מהטענות הבאות נכונות והוכיחו:

$$\text{א. } \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \Rightarrow \beta$$

ב.  $\beta$  אינה נובעת טאוטולוגית מהפסוקים  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , אך מתיישבת אתם.

ג.  $\beta$  אינה מתיישבת עם הפסוקים  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , כלומר סותרת אתם.

3 הוכיחו כי הפסוקים הבאים הינם טאוטולוגיות, ללא שימוש בטבלת אמת:

א.  $p \vee (\neg p)$

ב.  $p \vee (p \rightarrow q)$

ג.  $(p \rightarrow q) \vee (q \rightarrow r)$

ד.  $(p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q$

ה.  $((p \rightarrow q) \wedge (q \rightarrow r)) \rightarrow (p \rightarrow r)$

ו.  $((p \rightarrow r) \wedge (q \rightarrow r)) \rightarrow ((p \vee q) \rightarrow r)$

ז.  $(q \vee p \vee r) \rightarrow ((\neg p) \rightarrow ((q \vee r) \wedge (\neg p)))$

ח.  $((B \rightarrow (C \wedge (\sim A))) \wedge ((\sim B) \vee C) \rightarrow D) \wedge (E \rightarrow (\sim D)) \rightarrow (A \rightarrow \sim E)$

ט. הוכיחו בעזרת טבלת אמת ש- $(u \rightarrow v) \leftrightarrow ((\neg v) \rightarrow (\neg u))$  טאוטולוגיה.

י. הוכיחו כי הפסוק הבא הוא טאוטולוגיה (מותר להסתמך על סעיף ט):

$$((u \rightarrow v) \leftrightarrow ((\neg v) \rightarrow (\neg u))) \rightarrow (((p \rightarrow r) \wedge ((\neg q) \rightarrow p) \wedge (\neg r)) \rightarrow q)$$

4 בארץ חלם מתקיימת שביתת רופאים במטרה להגדיל את תקציב הבריאות.

להלן ניתוח המצב:

\* אם הרופאים לא יסיימו את השביתה אז הנהלות בתי החולים יתערבו.

\* אם לא תיפגע בריאותם של החולים אז הממשלה לא תגדיל את הקציב.

\* אם הנהלות בתי החולים יתערבו אז לא תפגע בריאותם של החולים או שבית המשפט יתערב.

\* בית המשפט לא יתערב וגם הממשלה לא תגדיל את התקציב.

מסקנה: הרופאים יסיימו את השביתה.

נסמן:  $D$  – הרופאים יסיימו את השביתה,  $H$  – הנהלות בתי החולים יתערבו,

$P$  – בית המשפט יתערב,  $C$  – לא תפגע בריאותם של החולים,  $M$  – הממשלה

תגדיל את התקציב.

א. הצרינו את הטיעון לשפת תחשיב הפסוקים בעזרת המשתנים המוצעים.

ב. בדקו, ללא שימוש בטבלת אמת, אם הטיעון תקף.

- 5) בארץ חלם מתקיימות בחירות. זרובבל, כתבנו לענייני מפלגות, מנתח את המצב:
- \* אם אבי ייבחר לראשות מפלגת נתיב את דני יפרוש.
  - \* אם שמעון יציע לדני תפקיד אז דני יפרוש.
  - \* אם בני ייבחר לראשות מפלגת פיתה אז שמעון יציע לדני תפקיד או שאבי ייבחר לראשות מפלגת נתיב.
  - \* בני יבחר לראשות מפלגת פיתה.
  - לכן, כתבנו מסיק שדני יפרוש.
- נסמן:  $A$  – אבי ייבחר לראשות מפלגת נתיב,  $B$  – בני יבחר לראשות מפלגת פיתה,  $C$  – שמעון יציע לדני תפקיד,  $D$  – דני יפרוש. הצרינו את הטענה לשפת תחשיב הפסוקים והוכיחו כי המסקנה תקפה.
- 6) בפרס העתיקה מחליט היזם וייזתא לבנות תיאטרון. אם נרצה שהתיאטרון נגיש לתושבים אז נצטרך להקימו בלב העיר. אם נרצה שהתיאטרון יהיה רווחי, אז הוא יצטרך להיות גדול ומרווח כדי שיכיל הרבה אנשים. אבל אם התיאטרון יהיה גדול ומרווח ויבנה בלב העיר, אז הוא יעלה 10 מיליון זוזים פרסיים. אבל לויזתא היזם אין 10 מיליון זוזים פרסיים. לכן, וייזתא היזם מסיק כי התיאטרון יוקם במקום לא נגיש לתושבים או שלא יהיה גדול ומרווח.
- א. תרגמו את ניתוח המצב לשפת הפסוקים, תוך שימוש בסימונים הבאים:
- $N$  – נגיש לתושבים,  $L$  – בלב העיר,  $Y$  – יכיל הרבה אנשים,  $G$  – גדול ומרווח,  $M$  – מחירו יעלה על...,  $R$  – רווחי.
- ב. הצרינו את ההנחות והמסקנה לשפת הפסוקים ובדקו האם המסקנה תקפה, ללא שימוש בטבלת אמת.
- 7) הוכיחו או הפריכו כל אחת מהטענות הבאות (כאשר  $p, q, r$  פסוקים אטומים):
- א.  $(p \vee q) \Rightarrow p$
  - ב.  $(p \vee q) \Rightarrow q$
  - ג.  $(p \rightarrow q) \Rightarrow q$
  - ד.  $p, p \rightarrow q \Rightarrow q$
  - ה.  $(p \rightarrow q) \wedge (p \rightarrow r) \wedge p \Rightarrow r$
  - ו.  $r \Rightarrow (p \rightarrow q) \wedge (p \rightarrow r) \wedge p$
  - ז.  $A \rightarrow B, C \rightarrow B, D \rightarrow (A \vee C), D \Rightarrow B$
  - ח.  $(A \vee B \rightarrow D), D \rightarrow (C \vee P), P \rightarrow Q, (\neg C) \wedge (\neg Q) \Rightarrow \neg A$
  - ט.  $(B \rightarrow (C \wedge (\sim A))), (((\sim B) \vee C) \rightarrow D), (E \rightarrow (\sim D)) \models (A \rightarrow \sim E)$

8 נתון כי  $\alpha, \beta, \gamma$  פסוקים לאו דווקא אטומים.

הוכיחו או הפריכו כל אחת מהטענות הבאות:

- א. אם  $\alpha$  סתירה וגם  $\alpha \Rightarrow \beta \vee \gamma$ , אז  $\beta \Rightarrow \neg \gamma$ .
- ב. אם  $\alpha$  טאוטולוגיה וגם  $\alpha \Rightarrow \beta \vee \gamma$ , אז  $\neg \beta \Rightarrow \gamma$ .
- ג. אם  $\alpha \Rightarrow \beta \vee \gamma$ , אז  $((\alpha \Rightarrow \beta) \vee (\alpha \Rightarrow \gamma))$ .
- ד. אם  $((\alpha \Rightarrow \beta) \vee (\alpha \Rightarrow \gamma))$ , אז  $\alpha \Rightarrow \beta \vee \gamma$ .
- ה. אם  $\alpha \Rightarrow \beta \wedge \gamma$ , אז  $((\alpha \Rightarrow \beta) \wedge (\alpha \Rightarrow \gamma))$ .
- ו. אם  $((\alpha \Rightarrow \beta) \wedge (\alpha \Rightarrow \gamma))$ , אז  $\alpha \Rightarrow \beta \wedge \gamma$ .
- ז. אם  $\alpha \Rightarrow (\beta \rightarrow \gamma)$ , אז  $(\alpha \rightarrow \beta) \Rightarrow \gamma$ .
- ח. אם  $(\alpha \rightarrow \beta) \Rightarrow \gamma$ , אז  $\alpha \Rightarrow (\beta \rightarrow \gamma)$ .
- ט. אם  $\alpha \vee \beta \Rightarrow \gamma$ , אז  $(\alpha \Rightarrow \gamma) \vee (\beta \Rightarrow \gamma)$ .
- י. אם  $(\alpha \Rightarrow \gamma) \vee (\beta \Rightarrow \gamma)$ , אז  $\alpha \vee \beta \Rightarrow \gamma$ .
- יא. אם  $\alpha \models \beta \rightarrow \gamma$ , אז  $\alpha, \beta \models \gamma$ .
- יב. אם  $\alpha \models \beta \rightarrow \gamma$ , אז  $\alpha \vee \beta \models \gamma$ .

9 עבור  $\alpha$ , פסוק אטומי או מורכב, נגדיר את הקבוצה  $F_\alpha = \{\gamma \mid \alpha \Rightarrow \gamma\}$ .

כלומר,  $F_\alpha$  היא קבוצת כל הפסוקים שנובעים טאוטולוגית מהפסוק  $\alpha$ .

הוכיחו כי  $\alpha \equiv \beta$  אם ורק אם  $F_\alpha = F_\beta$ .

10 הוכיחו כי ההנחה  $A$  גוררת טאוטולוגית את המסקנה  $\neg(\neg A)$ ,

בעזרת כללי ההיסק הבאים:

$$1. \Rightarrow p \rightarrow p$$

$$2. p \Rightarrow q \rightarrow p$$

$$3. p \rightarrow q, p \rightarrow (\neg q) \Rightarrow \neg p$$

11) הוכיחו שההנחות הבאות גוררות טאוטולוגית את המסקנה  $A$

$$B \vee D$$

$$C \rightarrow B$$

$$D \rightarrow (A \vee C)$$

$$\neg B$$

מותר להשתמש רק בכללי ההיסק הבאים:

$$P \Rightarrow Q \vee P$$

$$P \wedge Q \Rightarrow P$$

$$P \wedge Q \Rightarrow Q$$

$$P \rightarrow Q, Q \rightarrow R \Rightarrow P \rightarrow R$$

$$P, P \rightarrow Q \Rightarrow Q$$

$$\neg P, P \vee Q \Rightarrow Q$$

$$P \Rightarrow \neg \neg P$$

$$P \rightarrow Q \Rightarrow \neg Q \rightarrow \neg P$$

## קבוצת קשרים שלמה

### שאלות

1) הביעו את הקשרים הבאים:

- א. קשר הגרירה בעזרת קבוצת הקשרים  $\{\wedge, \neg\}$ .
- ב. קשר ה- $\vee$  בעזרת קבוצת הקשרים  $\{\wedge, \neg\}$ .
- ג. קשר ה- $\oplus$  (XOR) בעזרת קבוצת הקשרים  $\{\wedge, \neg\}$ .
- ד. קשר ה- $\leftrightarrow$  בעזרת קבוצת הקשרים  $\{\wedge, \neg\}$ .
- ה. קשר הגרירה בעזרת קבוצת הקשרים  $\{\vee, \neg\}$ .
- ו. הקשר  $\wedge$  בעזרת קבוצת הקשרים  $\{\vee, \neg\}$ .
- ז. קשר ה- $\oplus$  (XOR) בעזרת קבוצת הקשרים  $\{\vee, \neg\}$ .
- ח. קשר ה- $\leftrightarrow$  בעזרת קבוצת הקשרים  $\{\vee, \neg\}$ .
- ט. הוכיחו כי הקבוצה  $\{\downarrow\}$  היא קבוצת קשרים שלמה.
- י. נתון  $f$  קשר טרינארי המוגדר כך:  $f(x, y, z) = x \rightarrow \neg(y \rightarrow z)$ . הוכיחו כי  $\{f\}$  היא קבוצת קשרים שלמה.
- יא. הביעו את הקשר  $f(x, y, z) = x \rightarrow \neg(y \rightarrow z)$  באמצעות  $\downarrow$  בלבד.
- יב. הביעו את הקשר  $\downarrow$  באמצעות  $f(x, y, z) = x \rightarrow \neg(y \rightarrow z)$  בלבד.

## צורות נורמליות

### שאלות

1) בסעיפים הבאים רשמו צורה דיסיונקטיבית-נורמלית (DNF) וצורה קוניונקטיבית-נורמלית (CNF) של הפסוקים:

א.  $p \rightarrow q$

ב.  $(p \vee q) \wedge \neg r$

ג.  $(p \rightarrow q) \rightarrow (r \rightarrow \neg q)$

## תחשיב הפרדיקטים

### שאלות

1 לכל אחת מהטענות הבאות קבעו האם היא נכונה ורשמו את שלילתה ללא שימוש בקשר השלילה. במקרה שהטענה נכונה נמקו זאת, ובמקרה שהטענה אינה נכונה הביאו דוגמה נגדית.

א.  $\forall x \in \mathbb{N} (\exists y \in \mathbb{N} (x < y))$

ב.  $\forall x \in \mathbb{N} (\exists y \in \mathbb{N} (x > y))$

ג.  $\forall x, y \in \mathbb{R} (x > y) \rightarrow \exists z \in \mathbb{R} (x > y + z)$

ד.  $\forall x \in \mathbb{R} (x > 0) \rightarrow (\exists n \in \mathbb{N} (x > \frac{1}{n}))$

ה.  $\forall x \in \mathbb{R} (x \neq 0 \rightarrow \forall y \in \mathbb{Z} \exists z \in \mathbb{R} (xz = y))$

ו.  $\forall x \in \mathbb{N} (x \geq 1 \rightarrow \forall y \in \mathbb{N} \exists z \in \mathbb{N} (xz = y))$

ז.  $\forall x \in \mathbb{R} (x > 0 \rightarrow \exists y \in \mathbb{N} (xy > 1))$

ח.  $\forall x \in \mathbb{R} \forall y \in \mathbb{R} (xy = x \wedge x + y < 5) \rightarrow y < 4\frac{1}{2}$

ט.  $\forall x \in \mathbb{R} ((x > 0) \rightarrow \forall y \in \mathbb{R} (\exists n \in \mathbb{N} (nx > y)))$

2 הוכיחו או הפריכו כל אחת מהטענות הבאות, ורשמו את השלילה של כל טענה, כאשר הקשר  $\neg$  מופיע רק לצד פרדיקטים. במקרה של הפרכה הדגימו עולם דיון מתאים עבורו הטענה לא מתקיימת, והסבירו מדוע הטענה לא מתקיימת.

א.  $\forall x P(x) \rightarrow \exists x P(x)$

ב.  $\exists x P(x) \rightarrow \forall x P(x)$

ג.  $(\forall x (P(x) \wedge Q(x))) \rightarrow (\forall x P(x) \wedge \forall x Q(x))$

ד.  $(\forall x P(x) \wedge \forall x Q(x)) \rightarrow (\forall x (P(x) \wedge Q(x)))$

ה.  $(\forall x (P(x) \vee Q(x))) \rightarrow (\forall x P(x) \vee \forall x Q(x))$

ו.  $(\forall x P(x) \vee \forall x Q(x)) \rightarrow (\forall x (P(x) \vee Q(x)))$

ז.  $(\exists x (P(x) \wedge Q(x))) \rightarrow (\exists x P(x) \wedge \exists x Q(x))$

ח.  $(\exists x P(x) \wedge \exists x Q(x)) \rightarrow (\exists x (P(x) \wedge Q(x)))$

ט.  $(\exists x (P(x) \vee Q(x))) \rightarrow (\exists x P(x) \vee \exists x Q(x))$

י.  $(\exists x P(x) \vee \exists x Q(x)) \rightarrow (\exists x (P(x) \vee Q(x)))$

$$P(x): x^2 - 8x + 15 = 0$$

$$Q(x): x \text{ is odd}$$

$$R(x): x > 0$$

$$L(x): x^2 + 2x + 2 = 0$$

(3) בעולם הדין  $\mathbb{Z}$ , נסמן

הוכיחו או הפריכו כל אחת מהטענות הבאות:

א.  $\forall x [P(x) \rightarrow Q(x)]$

ב.  $\forall x [Q(x) \rightarrow P(x)]$

ג.  $\exists x [P(x) \rightarrow Q(x)]$

ד.  $\exists x [Q(x) \rightarrow P(x)]$

ה.  $\forall x [L(x) \rightarrow Q(x)]$

ו.  $\exists x [L(x) \rightarrow Q(x)]$

ז.  $\exists x [R(x) \rightarrow P(x)]$

ח.  $\forall x (\neg Q(x) \rightarrow \neg P(x))$

ט.  $\forall x [(P(x) \vee Q(x)) \rightarrow R(x)]$

י.  $\exists x [P(x) \rightarrow (Q(x) \wedge R(x))]$

יא.  $\forall x [P(x) \rightarrow (Q(x) \wedge R(x))]$

נפנה עתה למספר שאלות בהצרנות. מותר להשתמש בסימני המשתנים  $x, y, z$ , סימני הקבוצה  $A, B, C, \dots, \mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}$ , סוגריים, קשרים, כמתים, הפרדיקטים  $(, \exists, \forall, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow, >, <, \neq, =, \subseteq, \supseteq$ ), וכן סימנים נוספים הנתונים בגף השאלה.

**שימו לב: אסור להשתמש בקשר השלילה ואין להשתמש בסימן  $\notin$ .**

4) הצרינו כל אחת מהטענות הבאות:

- א. לכל מספר ממשי אין עוקב מידי (כלומר, שאין מספר ראשון מיד אחריו).
- ב. אין קבוצה שמכילה את כל הקבוצות (מותר להשתמש בסימן  $\notin$ ).
- ג. לכל מספר שאינו ראשוני יש לפחות שני מחלקים שונים.  
(מותר להשתמש ב- $P$  עבור קבוצת המספרים הראשוניים וב- $\notin$ )
- ד. למספר הטבעי הכי גדול אין מחלקים (ברור שאין, אבל צריך להצריך).
- ה. לא כל מספר טבעי הוא ראשוני.
- ו. כל קבוצה אינה שקולה לקבוצת החזקה שלה.
- ז. לכל שני מספרים טבעיים שונים יש מחלק משותף.
- ח. בכל קבוצה בת לפחות שלושה איברים שונים אין איבר מקסימלי.
- ט. לא בכל תת קבוצה של ממשיים יש איבר מינימלי.
- י. תהי פונקציה  $f: X \rightarrow Y$ .

נגדיר את הפונקציה  $G: P(X) \rightarrow P(Y)$  כך:  $G(B) = \{x \in X \mid f(x) \in B\}$

הצרינו את הטענה: אם  $f$  על אז  $G$  ח.ח.ע.

השתמשו רק בסימנים הבאים:

סימני המשתנים  $x, y, B, C$ , סימני הקבוצות  $X, Y$ , סימן הפונקציה  $f$ , סוגריים, קשרים, כמתים ופרדיקטים.  
שימו לב: אסור להשתמש בסימנים  $G$  ו- $P$ . יש להשתמש בהגדרותיהם כדי להחליפם בסימנים אחרים.

יא. לכל מספר ממשי יש לכל היותר שני מספרים ממשיים שונים זה מזה שריבועם שווה לו.

יב. הצרינו את הטענה: לכל פונקציה  $f: A \rightarrow B$  ולכל פונקציה  $g: B \rightarrow A$ , אם  $g \circ f = Id_A$ , אז  $f$  היא על.

מותר להשתמש בסימנים הבאים ורק בהם: סימני המשתנים  $x_1, x_2, \dots$ ,

קשרים  $\rightarrow, \leftrightarrow, \wedge, \vee$ , והסימנים  $f, g, A^B, B^A, \exists, \forall, (, )$ .

למען הסר ספק: אסור להשתמש ב- $d_A$  וב- $\circ$ .

יג. מספר ראשוני הוא מספר טבעי גדול מאחד שמחלקיו היחידים הם הוא עצמו ו-1. הצרינו את הטענה הבאה:

לכל מספר טבעי, בתחום שבין המספר עצמו לפעמיים המספר (כולל קצוות) יש לפחות מספר ראשוני אחד.

מותר להשתמש אך ורק בסימנים הבאים: סימני המשתנים  $x_1, x_2, \dots$ ,

הקשרים  $\leftrightarrow, \Leftrightarrow, \wedge, \vee$  והסימנים  $\exists, \forall, (, \in, \mathbb{N}, \leq, 1, 2, 3, \dots, =, |$  פירושו מחלק.

יז. הצרינו את הטענה הבאה: בקבוצה  $A$  יש לכל היותר שני מספרים טבעיים.

השתמשו רק בסימנים הבאים: סימני המשתנים  $x, y, z$ , סימני הקבוצות  $A, \mathbb{N}$  וכן סוגריים, קשרים, כמתים, ופרדיקטים.

טו. הצרינו את הטענה: לא תמיד נכון שאם  $A \subseteq B$  אז  $A \sim B$ . מותר להשתמש רק בסימנים הבאים: סימני הקבוצות  $A, B$  (מותר לצרף אותם לקבוצה בחזקת קבוצה), סוגריים, קשרים, כמתים, ופרדיקטים. אין להשתמש בקשר השלילה.

טז. הצרינו את הטענה הבאה: קבוצת הפונקציות החח"ע מהממשיים לטבעיים אינה ריקה.

השתמשו רק בסימנים הבאים: סימני המשתנים  $x, y$ , סימני הקבוצות  $\mathbb{R}, \mathbb{N}$  (וצירופי חזקות שלהן), סימני הפונקציות  $f, g$ , סוגריים, קשרים, וכמתים:  $\exists, \forall, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow, (, \{, \}, \in, \neq, =$ .

יז. הצרינו את כלל הכפל של אי-שוויון ממשי (קטן או שווה) במספר ממשי שונה מאפס.

מותר להשתמש אך ורק בסימנים הבאים: סימני המשתנים  $x_1, x_2, \dots$ , הקשרים  $\leftrightarrow, \Leftrightarrow, \wedge, \vee$  והסימנים  $\forall, (, \in, \mathbb{R}, \leq, 0$ .

דוגמה לכלל הזה היא: מאי השוויון  $3.14 \leq \pi$  (על ידי כפל במינוס חצי) לקבל את אי השוויון  $-0.5\pi \leq -1.57$ .

$$(5) \quad \{x \in \mathbb{R} \mid \forall y \left[ (y \in \{t \in \mathbb{N} \mid t > 3\} \rightarrow (y > x)) \right]\}$$

כתבו אותה בצורה  $\{x \in \mathbb{R} \mid \dots\}$ , כך שבאגף ימין לא יופיע אף משתנה חוץ מ- $x$ .

(6) תארו במדויק את הקבוצה:

$$A = \{x \in \mathbb{R} \mid \exists y \in \mathbb{N} (x = y^2) \rightarrow (x > 2)\} - \{x \in \mathbb{R} \mid |x| > 1\}$$

## תרגול בשיטות ההוכחה השונות

### שאלות

(1) הוכיחו:

- א. אם  $m, n \in \mathbb{Z}$  מספרים עוקבים, אז  $m+n$  אי-זוגי.
- ב. אם  $m, n \in \mathbb{Z}$  מספרים עוקבים, אז  $mn$  זוגי.
- ג. אם  $m, n \in \mathbb{Z}$  מספרים אי-זוגיים, אז  $m+n$  זוגי.
- ד. אם  $n \in \mathbb{N}$  אי-זוגי, אז קיימים  $m, k \in \mathbb{N}$ , כך ש- $m^2 - k^2 = n$ .
- רמז: חפשו  $m, k \in \mathbb{N}$  עוקבים.
- ה. אם  $a, b, c \in \mathbb{N}$  וגם  $a|b$  וגם  $a|c$ , אז  $a|b+c$ .

(2) הוכיחו:

- א. קיימים אינסוף מספרים ראשוניים (נסו בצורה ישירה ועל דרך השלילה).
- ב. קיימים  $x, y \notin \mathbb{Q}$ , כך ש- $x^y \in \mathbb{Q}$ .
- ג. יש אינסוף שלשות פיתגוריות.
- כלומר, יש אינסוף פתרונות בשלמים למשוואה  $x^2 + y^2 = z^2$ .
- ד. לכל  $n \in \mathbb{N}$  קיים רצף של  $n$  מספרים טבעיים עוקבים, שאף אחד מהם אינו ראשוני.

(3) הוכיחו בדרך השלילה:

- א. שלא קיים טבעי הכי גדול.
- ב. שלכל מספר טבעי קיים מספר טבעי גדול ממנו.
- ג.  $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$ .
- ד. שלא קיימים  $p, t \in \mathbb{Q}$ , כך ש- $p-t \notin \mathbb{Q}$ .
- ה. שלא קיימים  $p \in \mathbb{Q}, r \in \mathbb{R} - \mathbb{Q}$ , כך ש- $p+r \in \mathbb{Q}$ .
- ו. שלא קיים  $q \in \{x | 0 < x \in \mathbb{Q}\}$ , כך ש- $q = \min \{x | 0 < x \in \mathbb{Q}\}$ .
- ז. שלכל  $q \in \{x | 0 < x \in \mathbb{Q}\}$  מתקיים  $q \neq \min \{x | 0 < x \in \mathbb{Q}\}$ .

4 הוכיחו בקונטרה-פוזיציה :

- א. אם  $n \in \mathbb{N}$ , כך ש- $n^2$  זוגי, אז  $n$  זוגי.  
 ב. אם  $m, n \in \mathbb{Z}$  מספרים, כך ש- $m$  זוגי, אז  $n$  זוגי או  $m$  זוגי.  
 ג. אם  $m, n \in \mathbb{Z}$  מספרים, כך ש- $m$  אי-זוגי, אז  $n$  אי-זוגי וגם  $m$  אי-זוגי.  
 ד. אם  $x, y \in \mathbb{R}$ , כך ש- $x+y$  אי-רציונלי, אז לפחות אחד מהמספרים  $x, y$  הוא אי-רציונלי.  
 ה. אם  $A, B$  קבוצות ו- $x$  איבר, כך שמתקיים  $x \notin A \cap B$ , אז  $x \notin A$  או  $x \notin B$ .  
 ו. אם  $A, B$  קבוצות ו- $x$  איבר, כך שמתקיים  $x \notin A \cup B$ , אז  $x \notin A$  וגם  $x \notin B$ .  
 ז. אם  $A, B$  קבוצות ו- $x$  איבר, כך שמתקיים  $x \notin A$ , אז  $x \notin A \cap B$ .  
 ח. אם  $A - (B - C) \subseteq (A - B) - C$ , אז  $A \cap C = \emptyset$ .  
 ט. אם  $(A \cup B) - C \subseteq A - B$ , אז  $A(-C) \cap B = \emptyset$ .  
 י. אם  $P(A \cup B) = P(A) \cup P(B)$ , אז  $(A \subseteq B) \vee (B \subseteq A)$ .

5 ענו על הסעיפים הבאים :

- א. הוכיחו, תוך הפרדה למקרים, שאם  $z \in \mathbb{Z}$ , כך ש- $z$  לא מתחלק ב-3, אז  $z^2 = 1 \pmod{3}$ .  
 ב. הוכיחו או הפריכו:  
 אם  $z \in \mathbb{Z}$ , כך ש- $z$  לא מתחלק ב-4, אז  $z^2$  לא מתחלק ב-4.

6 הוכיחו בדרך השלילה :

- א. אם  $n \in \mathbb{N}$ , כך ש- $n \pmod{3} = 2$ , אז  $n$  הוא לא ריבוע של אף מספר טבעי.  
 ב. אם  $(A - C) \cup (C - B) \subseteq A \cap B$ , אז  $A \subseteq B$ .  
 ג. אם  $(C - A) \cup (B - C) \subseteq A - B$ , אז  $B \subseteq A$ .

# לוגיקה ונושאים דיסקרטיים

פרק 2 - תורת הקבוצות

תוכן העניינים

15	1. מבוא לתורת הקבוצות
16	2. פעולות על קבוצות
18	3. דיאגרמת ון
20	4. שאלות הוכחה
22	5. קריאת קבוצות
24	6. דרך השלילה
25	7. קבוצת חזקה
27	8. מכפלה קרטזית

## מבוא לתורת הקבוצות

## שאלות

1) לגבי כל אחד מהממדים הבאים רשמו ב-□ את הסימן המתאים,  $\in, \notin, \subseteq, \subset, \supseteq, \supset, \neq$ . שימו לב שתיתכן יותר מתשובה אחת. אם התשובה היא  $\neq$ , נמקו.

א.  $1 \square \{1, \{1\}\}$       ב.  $\{1\} \square \{1, \{1\}\}$       ג.  $\{8, \emptyset\} \square \{1, 2, 8\}$

ד.  $\emptyset \square \{1, 2\}$       ה.  $\emptyset \square \{\emptyset, 1, 2\}$

ו.  $\{2\} \square \{\{1, \{2\}\}\}$       ז.  $\{2\} \square \{2, \{2, \{2\}\}\}$

ח.  $\{2\} \square \{2, \{2\}, \{\{2\}\}\}$       ט.  $\{2\} \square \{2, \{2, \{2\}\}, \{2\}\}$

י.  $\{\{2, \emptyset\}\} \square \{2, \{2\}, \{\{2\}\}\}$       יא.  $\emptyset \square \{1, \{\emptyset\}\}$

יב.  $\{\emptyset\} \square \{1, \{\emptyset\}\}$       יג.  $\{1, 2\} \square \{1, \{2\}\}$

יד.  $1 \square \mathbb{N}$       טו.  $\{1\} \square \mathbb{N}$

טז.  $1 \square \{\mathbb{N}\}$       יז.  $\{1\} \square \{\mathbb{N}\}$

## תשובות סופיות

1) א.  $\in$       ב.  $\in, \subseteq, \subset$       ג.  $\notin, \supseteq$       ד.  $\in, \subseteq, \subset$       ה.  $\in, \subseteq, \subset$   
 ו.  $\notin, \supseteq$       ז.  $\in, \subseteq, \subset$       ח.  $\in, \subseteq, \subset$       ט.  $\in, \subseteq, \subset$       י.  $\notin, \supseteq$   
 יא.  $\in, \subseteq, \subset$       יב.  $\in, \supseteq$       יג.  $\notin, \supseteq$       יד.  $\in, \notin$       טו.  $\in, \subseteq, \subset$   
 טז.  $\notin$       יז.  $\notin, \supseteq$

## פעולות על קבוצות

### שאלות

(1) עבור  $A = \{1, 2, 3\}$ ,  $B = \{3, 4, 5\}$ ,  $C = \{1, 4, 6\}$  חשבו את הקבוצות הבאות:

א.  $(A \cup C) \setminus B$

ב.  $(A \cap B) \cup C$

ג.  $A \cap (B \cup C)$

ד.  $P(A)$

ה.  $C \setminus A$

(2) עבור  $A = \{1, 2, 3\}$ ,  $B = \{3, 4, 5\}$ ,  $C = \{1, 4, 6\}$ :

א. האם  $B \subseteq C$ ?

ב. האם  $\{1\} \subseteq B$ ?

ג. האם  $\{1\} \subseteq A$ ?

ד. האם  $\{1\} \in P(A)$ ?

ה. האם  $\{1\} \subseteq P(A)$ ?

ו. האם  $\{\{1\}\} \subseteq P(A)$ ?

ז. האם  $\{\{1\}, \emptyset\} \subseteq P(A)$ ?

(3) עבור  $A = \{1, \{3, *\}, \emptyset\}$ ,  $B = \{4, \emptyset\}$  חשבו:

א.  $A \cup B$

ב.  $A \cap B$

ג.  $A - B$

ד.  $B - A$

ה.  $A \oplus B$

**תשובות סופיות**

- (1) א.  $\{1, 2, 6\}$     ב.  $\{1, 3, 4, 6\}$     ג.  $\{1, 3\}$     ד.  $2 \notin P(A)$
- (2) א. לא.    ב. לא.    ג. כן.    ד. כן.
- ה. לא.    ו. כן.    ז. כן.
- (3) א.  $\{1, \{3, *\}, \emptyset, 4\}$     ב.  $\{\emptyset\}$     ג.  $\{1, \{3, *\}\}$     ד.  $\{4\}$
- ה.  $(A \setminus B) \cup (B \setminus A)$

## דיאגרמת ון

### שאלות

1) באיור שלהלן דיאגרמת ון.



קווקוו את השטח המתאר את הקבוצות הבאות:

- |                        |                                     |
|------------------------|-------------------------------------|
| א. $(A - B) - C$       | ב. $A - (B - C)$                    |
| ג. $A \cap B^c$        | ד. $(A \cap B^c) \cup (C \cap A^c)$ |
| ה. $(A \cap B) \cap C$ | ו. $A \cap (B \cap C)$              |
| ז. $(A \cup B) \cup C$ | ח. $A \cup (B \cup C)$              |

**תשובות סופיות**

1 א.



ב.



ג.



ד.



ה.



ו.



ז.



ח.



## שאלות הוכחה

## שאלות

בכל אחת משאלות הפרק יש לפעול כפי שמתואר בשאלה 1.

(1) תהיינה  $A, B$  קבוצות.

אם הטענה נכונה, ציינו זאת ותנו נימוק קצר מדוע.  
אם הטענה אינה נכונה, ציינו זאת, ותנו דוגמה נגדית.  
יש ערך רב יותר לדוגמה מינימלית; בדקו האם בדוגמה הנגדית יש פרטים מיותרים והסירו אותם.  
אם טענות יב-כא נכונות, נסו להוכיחן, ובמיוחד את טענה יב, שבה נשתמש יותר מאוחר להוכחת תכונות של קבוצת חזקה.

א. אם  $x \notin A$ , אז  $x \notin A \cup B$ .

ב. אם  $x \notin A \cup B$ , אז  $x \notin A$ .

ג. אם  $x \notin A$ , אז  $x \notin A \cap B$ .

ד. אם  $x \notin A \cap B$ , אז  $x \notin A$ .

ה. אם  $x \notin A$ , אז  $x \notin A - B$ .

ו. אם  $x \notin A - B$ , אז  $x \notin A$ .

ז. אם  $x \in B$ , אז  $x \notin A - B$ .

ח. אם  $x \notin A - B$ , אז  $x \in B$ .

ט.  $x \notin A \Leftrightarrow x \notin A - B$

י.  $x \in B \Leftrightarrow x \notin A - B$

יא. השלימו:  $x \notin A - B \Leftrightarrow \underline{\hspace{2cm}}$ .

יב.  $(A \subseteq B \wedge A \subseteq C) \Leftrightarrow A \subseteq B \cap C$

יג.  $(A \subseteq B \vee A \subseteq C) \Leftrightarrow A \subseteq B \cup C$

יד. אם  $A = A \cup B$ , אז  $A \subseteq B$ .

טו. אם  $A = A \cup B$ , אז  $B \subseteq A$ .

טז. אם  $A = A \cap B$ , אז  $A \subseteq B$ .

יז. אם  $A = A \cap B$ , אז  $B \subseteq A$ .

יח. אם  $A \subseteq B$ , אז  $A = A \cup B$ .

יט. אם  $B \subseteq A$ , אז  $A = A \cup B$ .

כ. אם  $A \subseteq B$ , אז  $A = A \cap B$ .

כא. אם  $B \subseteq A$ , אז  $A = A \cap B$ .

(2) תהיינה  $A, B, C$  קבוצות.

הוכיחו או הפריכו את הטענות הבאות:

א. אם  $A = A - B$ , אז  $B = \emptyset$ .

ב. אם  $A = A - B$ , אז  $A \cap B = \emptyset$ .

ג. אם  $A = A \cup B$ , אז  $A \cap B = B$ .

ד. אם  $B = A \cup B$ , אז  $A \cap B = B$ .

ה. אם  $A \cap B = A$ , אז  $A = A \cup B$ .

ו. אם  $A \cap B = B$ , אז  $A = A \cup B$ .

ז. אם  $A \cup B = A \cup C$  וגם  $A \cap B = A \cap C$  אז  $B = C$ .

ח.  $A \cup (B - C) = (A \cup B) - C$ .

ט.  $A \cup (B - C) = (A \cup B) - (A \cup C)$ .

י.  $(A \cup B) \cap C = A \cup (B \cap C)$ .

יא.  $(A \setminus B) \setminus C = A \setminus (B \cup C)$ .

יב.  $A \cap (B \Delta C) = (A \cap B) \Delta (A \cap C)$ .

יג.  $(A - B) \cap (C - D) = (A \cap C) - (B \cup D)$ .

יד. להלן שתי טענות. הוכיחו את הנכונה והפריכו את השגויה:

1.  $A \cap B \cap C \subseteq A \oplus B \oplus C$

2.  $A \oplus B \oplus C \subseteq A \cap B \cap C$

## תשובות סופיות

- (1) א. לא נכונה. ב. נכונה. ג. נכונה. ד. לא נכונה. ה. נכונה.  
ו. לא נכונה. ז. נכונה. ח. לא נכונה. ט. לא נכונה. י. לא נכונה.  
יא.  $x \in B \vee x \notin A$  יב. נכונה. יג. לא נכונה. יד. לא נכונה.  
טו. נכונה. טז. נכונה. יז. לא נכונה. יח. לא נכונה. יט. נכונה.  
כ. נכונה. כא. לא נכונה.
- (2) א. לא נכונה. ב. לא נכונה. ג. נכונה. ד. לא נכונה. ה. לא נכונה.  
ו. נכונה. ז. נכונה. ח. לא נכונה. ט. לא נכונה. י. לא נכונה.  
יא. נכונה. יב. נכונה. יג. נכונה. יד. 1. נכונה. 2. לא נכונה.

## קריאת קבוצות

### שאלות

(1) עבור  $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$ , רשמו בשתי דרכים את הקבוצות הבאות:

א. קבוצת המספרים טבעיים האי זוגיים,  $\mathbb{N}_{odd} = \{1, 3, 5, \dots\}$ .

ב. קבוצת כל הטבעיים שיש להם שורש ריבועי,  $A = \{1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, \dots\}$ .

ג. קבוצת כל הטבעיים שאין להם שורש ריבועי,

$B = \{2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, \dots\}$ .

ד. קבוצת כל השורשים של מספרים טבעיים,

$C = \{\sqrt{1}, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \sqrt{4}, \sqrt{5}, \sqrt{6}, \sqrt{7}, \dots\}$ .

ה. קבוצת כל החזקות של 2,

$D = \{2^1, 2^2, 2^3, \dots\} = \{2, 4, 8, 16, 32, \dots\}$ .

(2) עבור  $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$ , חשבו את הקבוצות הבאות:

א.  $C = \{3n - 1 \mid n \in \mathbb{N}\}$ .

ב.  $K = \{x \in \mathbb{Z} \mid |x| \geq 2 \rightarrow x^2 > 41\}$ .

ג.  $C = \{x \in \mathbb{Z} \mid |x| \geq 7 \rightarrow x < 20\}$ .

ד.  $C = \{3n - 1 \mid n \in \mathbb{N} \wedge \sqrt{n} \in \mathbb{N}\} = \{3n - 1 \mid \sqrt{n} \in \mathbb{N}\}$ .

ה.  $C = \{x \in \mathbb{Z} \mid x \geq 8 \rightarrow x^2 < 67\}$ .

## תשובות סופיות

- (1) א. דרך 1:  $\left\{n \in \mathbb{N} \mid \frac{n+1}{2} \in \mathbb{N}\right\}$ , דרך 2:  $\{2n-1 \mid n \in \mathbb{N}\}$ .
- ב. דרך 1:  $\{n \in \mathbb{N} \mid \sqrt{n} \in \mathbb{N}\}$ , דרך 2:  $\{n^2 \mid n \in \mathbb{N}\}$ .
- ג. דרך 1:  $\{n \in \mathbb{N} \mid \sqrt{n} \notin \mathbb{N}\}$ , דרך 2:  $\{n \mid n \in \mathbb{N} \wedge \forall k \in \mathbb{N} n \neq k^2\}$ .
- ד. דרך 2:  $\{\sqrt{n} \mid n \in \mathbb{N}\}$ .
- ה. דרך 1:  $\{n \in \mathbb{N} \mid \exists k \in \mathbb{N} n = 2^k\}$ , דרך 2:  $\{2^n \mid n \in \mathbb{N}\}$ .
- (2) א.  $C = \{2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, \dots\}$
- ב.  $\mathbb{Z} - \{\pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6, \dots\}$
- ג.  $\mathbb{Z} - \{20, 21, 22, 23, \dots\}$
- ד.  $\{2, 11, 26, 74, 107, 146, \dots\}$
- ה.  $\mathbb{Z} - \{9, 10, 11, 12, \dots\}$

## דרך השלילה

### שאלות

הוכיחו כל אחת מהטענות הבאות בדרך השלילה. במקום הטענה אם  $\alpha$ , או  $\beta$ , נוכיח אם  $\neg\beta$ , או  $\neg\alpha$ .

יש לזכור תמיד שלהנחת השלילה  $\neg\beta$  ולכל הנובע ממנה מתייחסים כנתון.

$$(1) \text{ אם } A \cap C = \emptyset \text{ או } A - (B - C) \subseteq (A - B) - C$$

$$(2) \text{ אם } A \subseteq B \text{ או } (A - C) \cup (C - B) \subseteq A \cap B$$

$$(3) \text{ אם } (A - C) \cap B = \emptyset \text{ או } (A \cup B) - C \subseteq A - B$$

$$(4) \text{ אם } B \subseteq A \text{ או } (C - A) \cup (B - C) \subseteq A - B$$

$$(5) \text{ אם } A \subseteq A \Delta B \text{ וגם } B - C = B \Delta C \text{ או } A \cap C = \emptyset$$

$$(6) \text{ אם } A \subseteq A \oplus B \text{ וגם } B - C = B \oplus C \text{ או } A \cap C = \emptyset$$

### תשובות סופיות

(1) הוכחה.

(2) הוכחה.

(3) הוכחה.

(4) הוכחה.

(5) הוכחה.

(6) הוכחה.

## קבוצת חזקה

## שאלות

(1) עבור  $A = \{3, \{\emptyset\}\}$ ,  $B = \{\{3\}, \{4, \emptyset\}\}$ ,  $C = \{3, \{3\}, \{\emptyset, 3\}\}$   
רשמו את הקבוצות הבאות:

א. את  $P(C)$ ,  $P(B)$  ואת  $P(A)$ .

ב.  $P(A) \cap B$ ,  $P(A) \cap A$ ,  $P(C) \cap C$  ואת  $C - P(C)$ .

(2) עבור הקבוצות  $A = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$ ,  $B = \{1, \emptyset\}$

א. רשמו את  $P(A)$  ואת  $P(B)$ .

ב. רשמו את  $P(A) - P(B)$  ואת  $P(B) - P(A)$ .

ג.  $P(A) - A$  ואת  $P(A) - \{A\}$ .

(3) רשמו את  $P(\emptyset)$ , את  $P(P(\emptyset))$  ואת  $P(P(P(\emptyset)))$ .

(4) תהיינה  $A, B$  שתי קבוצות. הוכיחו או הפריכו:

א.  $P(A \cup B) = P(A) \cup P(B)$

ב.  $P(A) \cup P(B) \subseteq P(A \cup B)$

ג.  $P(A \cap B) = P(A) \cap P(B)$

ד.  $P(A) \cap A \neq \emptyset$

ה.  $P(A) \cap A = \emptyset$

ו. תנו דוגמה לקבוצה  $A$  שמקיימת  $A \cap P(A) \cap P(P(A)) \neq \emptyset$ .

ז. אם  $\{A\} \subseteq P(B)$ , אז  $P(A) \subseteq P(B)$ .

את שתי הטענות הבאות הוכיחו בדרך השלילה:

ח. אם  $P(A) \subseteq P(A - B)$ , אז  $A \cap B = \emptyset$ .

ט. אם  $P(A \cup B) = P(A) \cup P(B)$ , אז  $(A \subseteq B) \vee (B \subseteq A)$  (שאלה קשה).

(5) תהיינה  $A, B, C$  קבוצות כלשהן, ונתון  $P(B) - P(A) = P(B) - \{\emptyset\}$ .

הוכיחו כי  $B - A = B$ .

## תשובות סופיות

- (1) א.  $P(B) = \{\emptyset, \{\{3\}\}, \{\{4, \emptyset\}\}, \{\{3, \{4, \emptyset\}\}\}$  ,  $P(A) = \{\emptyset, \{3\}, \{\{\emptyset\}\}, \{3, \{\emptyset\}\}$   
 .  $P(C) = \{\emptyset, \{3\}, \{\{3\}\}, \{\{\emptyset, 3\}\}, \{3, \{3\}\}, \{3, \{\emptyset, 3\}\}, \{\{3\}, \{\emptyset, 3\}\}, \{3, \{3\}, \{\emptyset, 3\}\}$   
 ב.  $C - P(C) = \{3, \{\emptyset, 3\}\}$  ,  $P(C) \cap C = \{\{3\}\}$  ,  $P(A) \cap A = \emptyset$  ,  $P(A) \cap B = \{\{3\}\}$
- (2) א.  $P(B) = \{\emptyset, \{1\}, \{\emptyset\}, \{1, \emptyset\}\}$  ,  $P(A) = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}$   
 ב.  $P(B) - P(A) = \{\{1\}, \{1, \emptyset\}\}$  ,  $P(A) - P(B) = \{\{\{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}$   
 ג.  $P(A) - \{A\} = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}\}$  ,  $P(A) - A = \{\{\{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}$
- (3) .  $P(P(P(\emptyset))) = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}$  ,  $P(P(\emptyset)) = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$  ,  $P(\emptyset) = \{\emptyset\}$
- (4) א. לא נכונה. ב. נכונה. ג. נכונה. ד. לא נכונה. ה. לא נכונה.  
 ו. ראו סרטון. ז. נכונה. ח. הוכחה. ט. הוכחה.
- (5) הוכחה.

## מכפלה קרטזית

### שאלות

(1) תהיינה  $A, B, C$  קבוצות. הוכיחו:

א.  $(A = B) \Leftrightarrow (A \times A = B \times B)$

ב.  $((B = \emptyset) \vee (A = \emptyset) \vee (A = B)) \Leftrightarrow (A \times B = B \times A)$

ג. הוכיחו כי לכל ארבע קבוצות  $A, B, C, D$  מתקיים

$$(A \cup B) \times C = (A \times C) \cup (B \times C)$$

ד. אם  $((A \times A) \cup (B \times B) = (C \times C))$ , אז

$$(((B \subseteq A) \vee (A \subseteq B)) \wedge (A \cup B \subseteq C))$$

ה. הוכיחו כי לכל ארבע קבוצות  $A, B, C, D$  מתקיים

$$(A \cap B) \times (C \cap D) = (A \times C) \cap (B \times D)$$

(2) הוכיחו או הפריכו:

תהיינה  $A, B$  שתי קבוצות כלשהן ותהי  $S \subseteq A \times B$ .

אז קיימות  $C \subseteq A$  ו- $D \subseteq B$ , כך ש- $S = C \times D$ .

(3) הוכיחו או הפריכו:

קיימות שתי קבוצות  $A, B$ , כך ש- $|A \times B| = 24$  וגם  $|A \cap B| = 5$  (סימן  $||$  על קבוצה מסמן את מספר אבריה).

(4) הוכיחו או הפריכו:

לכל שלוש קבוצות  $A, B, C$  מתקיים  $A \times (B \oplus C) = (A \times B) \oplus (A \times C)$ .

(5) הדגימו שלוש קבוצות  $A, B, C$ , כך ש- $(A \times (B \times C)) \cap ((A \times B) \times C) \neq \emptyset$ .

**תשובות סופיות**

- (1) א. הוכחה. ב. הוכחה. ג. הוכחה. ד. הוכחה. ה. הוכחה.
- (2) לא נכונה.
- (3) לא נכונה.
- (4) נכונה.
- (5) ראו סרטון.

# לוגיקה ונושאים דיסקרטיים

פרק 3 - אינדוקציה

תוכן העניינים

1. אינדוקציה.....29

## אינדוקציה

## שאלות

הוכיחו באינדוקציה את הטענות הבאות:

$$1+3+5+7+\dots+(2n-1)=n^2 \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^n (4k+1) = n(2n+3) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n}{6}(n+1)(2n+1) \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k(k+1)} = \frac{n}{n+1} \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{(4k-3)(4k+1)} = \frac{n}{4n+1} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^n 2^k = 2(2^n - 1) \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^n \frac{3}{4^{k-1}} = 4 - \frac{1}{4^{n-1}} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{3n} k = 1\frac{1}{2}n(3n+1) \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{3n} (4k-1) = 3n(6n+1) \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^n (n+k) = \frac{n}{2}(3n+1) \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^n 3^{n+k} = \frac{3^{n+1}(3^n-1)}{2} \quad (11)$$

$$13 \mid (4^{2n+1} + 3^{n+2}) \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^{2n} \frac{1}{k} < \frac{2+3}{2} \quad (13)$$

(14) הוכיחו באינדוקציה על  $n$  שהנוסחה הנתונה היא אכן פתרון לנוסחה הרקורסיבית הנתונה:

לכל  $n > 1$ ,  $a_n = 0$ ,  $a_{n-1} \mid 2a_{n-1} \mid a_n = 0$ , כאשר  $a_0 = a_1 = 1$ .

הוכיחו באינדוקציה כי: לכל  $n \geq 0$ ,  $a = (-1)^n (1 - 2n)$ .

לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר [www.GooL.co.il](http://www.GooL.co.il)

# לוגיקה ונושאים דיסקרטיים

פרק 4 - תורת הגרפים

תוכן העניינים

31	1. מבוא לתורת הגרפים
37	2. גרף דו צדדי
40	3. עצים
44	4. מעגלים מיוחדים
48	5. איזומורפיזם

## מבוא לתורת הגרפים

### שאלות

הערה: חלק קטן משאלות פרק זה מסתמכות על מושג העץ. רצוי ללמוד את הפרק עצים שהוא פרק חשוב ביותר.

(1) ענו על הסעיפים הבאים:

- א. יהי  $G = (V, E)$  גרף על 43 צמתים: 10 צמתים מדרגה 7, 17 צמתים מדרגה 6, 12 צמתים מדרגה 4 והיתר מדרגה 1. כמה קשתות יש ב- $G$ ?
- ב. הוכיחו כי בכל גרף מספר הצמתים מדרגה אי-זוגית הוא זוגי.

(2) עבור  $n \in \mathbb{N}$  נגדיר גרף פשוט  $G_n$ , כך שצמתיו הם  $2^n$  הסדרות הבינאריות באורך  $n$ , ושני קודקודים מחוברים ביניהם בקשת אם ורק אם הם נבדלים בקואורדינטה אחת. מה מספר הקשתות של  $G_5$  ושל  $G_n$ ? (גרף כזה נקרא גרף הקובייה)

(3) נגדיר גרף  $G = (V, E)$  באופן הבא:  $V = \{A \in P\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\} \mid |A| = 3\}$   $E = \{\{A, B\} \mid |A \cap B| = 1\}$ , למשל  $\{\{2, 4, 7\}, \{1, 4, 6\}\} \in E$ , כי בחיתוך יש איבר אחד. א. מהו מספר הצמתים? מה דרגת כל קודקוד? מה מספר הקשתות? ב. האם  $G$  דו"צ?

(4) חזרו על שאלה קודמת עבור הגרף  $G = (V, E)$  באופן הבא:  $V$  כמו קודם ו- $E = \{\{A, B\} \mid A \cap B = \emptyset\}$ .

(5) יהי  $G = (V, E)$  על 7 צמתים: 4 מהצמתים הם מדרגה 5 וכל יתר הדרגות קטנות מ-3. מהן האפשרויות הנכונות? א. יש גרף פשוט כזה, שהוא קשיר. ב. יש גרף פשוט כזה, אבל הוא לא קשיר. ג. יש גרף כזה, אבל הוא לא פשוט ולא קשיר. ד. יש גרף כזה, והוא לא פשוט וקשיר.

6 נתונים שני גרפים  $G_1, G_2$  על 5 קודקודים. סדרת דרגותיו של  $G_1$  היא  $1, 2, 3, 4, 4, 5, 6$  וסדרת דרגותיו של  $G_2$  היא  $1, 2, 3, 4, 4, 5, 6$ .

לגבי כל אחד משני הגרפים קבעו איזו מן הטענות הבאות נכונה:

- יש גרף פשוט וקשיר כזה.
- יש גרף קשיר כזה, אבל הוא לא פשוט.
- יש גרף פשוט כזה, אבל הוא לא קשיר.
- יש גרף כזה, אבל הוא חייב להיות לא פשוט ולא קשיר.
- לא קיים גרף כזה.

7 ענו על הסעיפים הבאים:

- יהי  $G$  גרף פשוט בעל  $n$  קודקודים. הוכיחו כי אם לכל שני קודקודים  $x, y \in V$  מתקיים  $d(x) + d(y) \geq n - 1$ , אז  $G$  קשיר.
- הוכיחו באינדוקציה כי גרף על  $n$  קודקודים ופחות מ- $n - 1$  קשתות אינו קשיר.

8 יהי  $G$  גרף פשוט בעל  $n$  קודקודים.

- הוכיחו כי אם:  $|E| > \binom{n-1}{2}$  (\*) אז  $G$  קשיר, כאשר  $|E|$  מספר הקשתות. הראו גם כי חסם זה הדוק. כלומר, הראו גרף פשוט  $G$ , עבורו  $|E| = \binom{n-1}{2}$ , כך ש- $G$  אינו קשיר. זה מראה שלא ניתן לשפר את אי השוויון (\*).

9 יהי  $G = (V, E)$  גרף פשוט ויהיו  $x, y \in V$  שני קודקודים לא שכנים.

הוכיחו כי אם  $d(x) + d(y) \geq n$ , אז יש ל- $x$  ול- $y$  לפחות שני שכנים משותפים.

10 יהי  $G$  גרף פשוט על  $n \geq 2$  צמתים, ויהיו  $u, v \in V$  קודקודים שאינם שכנים.

הוכיחו כי אם:  $d(u), d(v) \geq \frac{n+1}{2}$  אז יש ל- $u, v$  לפחות שלושה שכנים משותפים.

11 יהי  $G = (V, E)$  גרף, כך ש- $(n \geq 2)$ ,  $V = P_2(\{1, 2, \dots, n\})$ ,  $e \in E \Leftrightarrow A \cap B = \emptyset$ ,  $A, B \in V$ .

כאשר  $A, B \in V$ .

א. חשבו את  $|V|$ .

ב. מהי דרגת כל צומת?

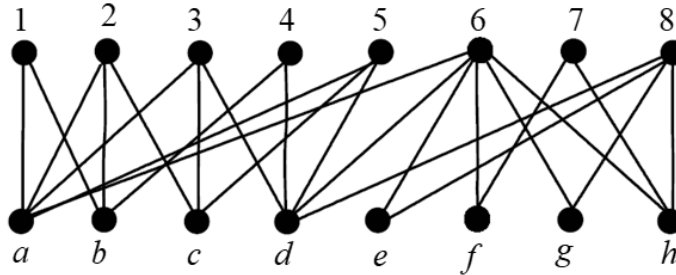
ג. הוכיחו כי אם  $n \geq 5$  אזי  $G$  קשיר (רמז: דרך השלילה).

- 12) יהי  $G$  גרף פשוט על 10 קודקודים שיש בו 41 קשתות. הוכיחו:  
א. יש לפחות שני קודקודים ב- $G$  שדרגתם היא 9.  
ב.  $G$  קשיר.
- 13) יהי  $G = (V, E)$  גרף פשוט. הוכיחו כי אם  $|V| = |E|$ , אז ב- $G$  יש מעגל, ואם  $G$  קשיר, אז המעגל יחיד.
- 14) יהי  $G$  גרף פשוט קשיר בן 7 קודקודים, שסדרת דרגותיו היא  $3, 2, 2, 2, 1, 1, 1$ . כמה מעגלים פשוטים יש בגרף?
- 15) יהי  $G$  גרף פשוט בעל  $n$  קודקודים. הוכיחו כי אם לכל קודקוד  $x \in V$  מתקיים  $d(x) \geq \frac{n}{2}$ , אז ב- $G$  מעגל באורך 4.
- 16) הוכיחו כי בכל גרף פשוט על 100 קודקודים, שבו כל הדרגות הן לפחות 10, יש מעגל באורך  $\geq 4$ .
- 17) יהי  $G$  גרף פשוט. הוכיחו כי לפחות אחד מבין הגרפים  $G, \bar{G}$  קשיר. בניסוח שקול: הוכיחו כי בכל צביעת קשתות הגרף השלם  $K_n$  בשני צבעים לפחות, אחד הגרפים החד צבעיים הוא קשיר.
- 18) הוכיחו כי בכל צביעת קשתות הגרף השלם  $K_6$  בשני צבעים, יש משולש מונוכרומטי (משולש חד צבעי).
- 19) הוכיחו כי בכל קבוצה של 9 אנשים יש בהכרח לפחות 4 המכירים זה את זה או לפחות 3 שאף שניים מהם אינם מכירים זה את זה.
- 20) יהי  $G$  גרף שקודקודיו הם תתי קבוצות בנות 4 אברים של הקבוצה  $\{1, 2, \dots, n\}$ , (כאשר  $n$  גדול מ-6). שני קודקודים מחוברים בקשת בגרף אם בחיתוך שלהם יש שני אברים בדיוק. לדוגמה, הקודקוד  $\{1, 2, 3, 4\}$  שכן של  $\{1, 2, 7, 8\}$ , אך לא של  $\{1, 2, 3, 7\}$ . כמה קודקודים בגרף הם שכנים של  $\{1, 2, 3, 5\}$ ,  $\{1, 2, 3, 4\}$  או  $\{1, 2, 4, 5\}$ ?

- (21)** הוכיחו כי בכל צביעת קשתות הגרף השלם  $K_{17}$  ב-8 צבעים יש מעגל שכל קשתותיו צבועות בצבע אחד (מעגל מונוכרומטי).
- (22)** כמה מעגלים פשוטים באורך  $3 \leq k \leq n$  יש בגרף השלם  $K_n$  על קבוצת הקודקודים  $\{1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ ?  
שני מעגלים המתקבלים אחד מהשני על ידי סיבוב נחשבים זהים.  
למשל, עבור  $n=5$ , שני המעגלים  $1, 2, 3, 4, 5, 1$  ו- $3, 4, 5, 1, 2, 3$  נחשבים זהים, ואילו המעגלים  $1, 2, 3, 1$  ו- $1, 3, 2, 1$  אינם זהים.
- (23)** נצבע ב- $n \geq 2$  צבעים את קשתות הגרף השלם  $K_n$ , כך שכל צבע מופיע לפחות פעם אחת.  
הוכיחו כי קיים מעגל שכל קשתותיו צבועות בצבעים שונים.
- (24)** יהי  $G$  גרף קשיר על 13 קודקודים, שניתן לצבוע בשלושה צבעים (כלומר, אפשר לצבוע את הקודקודים בשלושה צבעים, כך שאין שני קודקודים מאותו צבע שמחוברים בקשת).  
הוכיחו שיש בגרף אנטי קליקה בגודל 5 (כלומר, 5 קודקודים שאף אחד מהם לא מחובר לאף אחד אחר).
- (25)** נתונים שלושה גרפים בעלי אותה קבוצת קודקודים  $G_1 = (V, E_1)$ ,  $G_2 = (V, E_2)$  ו- $G_3 = (V, E_3)$ . נגדיר  $G = (V, E_1 \cup E_2 \cup E_3)$  כאיחוד שלושת הגרפים, ונניח כי לכל קודקוד ב- $V$  דרגתו ב- $G$  היא לפחות 6.  
הוכיחו כי לפחות אחד מהגרפים  $G_1$ ,  $G_2$  ו- $G_3$  אינו חסר-מעגלים.  
שאלה זו מופיעה גם בפרק עצים.
- (26)** יהי  $G_n$  גרף פשוט שקודקודיו הם כל תתי-קבוצות של  $\{1, 2, 3, 4, \dots, n\}$ , למעט  $\emptyset$  ו- $\{1, 2, 3, 4, \dots, n\}$  עצמה. שני קודקודים הם שכנים אם ורק אם אף אחד אינו מוכל במשנהו.  
א. הוכיחו כי לכל  $n \geq 2$ ,  $G_n$  קשיר.  
ב. הוכיחו כי אם  $v$  תת קבוצה בת  $k$  אברים של  $\{1, 2, 3, 4, \dots, n\}$  אז דרגתה כקודקוד ב- $G_n$  היא:  $2^n - 2^{n-k} - 2^k + 1$ .  
ג. הוכיחו כי לכל  $n \geq 3$  קיים מעגל המילטון ב- $G_n$ . מותר להסתמך על סעיפים קודמים ועל העובדה ש- $2^{n-1} + 2 \leq 2^{n-k} + 2^k$ .

- (27) כמה זיווגים מושלמים יש, (שאלה זו מופיעה גם בפרק גרף דו צדדי)  
 א. בגרף המלא  $K_5$  ?  
 ב. בגרף המלא  $K_6$  ?  
 ג. בגרף הדו"צ המלא  $K_{5,5}$  ?  
 (הגדרת גרף דו"צ בפרק גרף דו צדדי)  
 ד. בגרף הדו"צ המלא  $K_{5,5}$ , כאשר מחקנו שלוש קשתות שיש להן צומת משותף?

- (28) ענו על הסעיפים הבאים:  
 א. הוכיחו כי בגרף הבא אין זוג מושלם.  
 ב. מצאו זוג מקסימום.  
 ג. מהו המספר המינימלי של קשתות שיש להוסיף לגרף כך שיהיה זוג?



- (29) יהי  $G = (V, E)$  גרף פשוט, ונגדיר גרף חדש  $H = (V, E')$  באופן הבא:  
 $E' = \{\{x, y\} \mid x, y \in V \wedge \exists z \in V : \{\{x, z\}, \{y, z\}\} \subseteq E\}$   
 הוכיחו או הפריכו כל אחת מהטענות הבאות:  
 א. אם  $G$  קשיר, אז  $H$  קשיר.  
 ב. אם  $G$  קשיר, אז  $H$  לא קשיר.  
 ג. אם  $H$  קשיר, אז  $G$  קשיר.  
 ד. אם  $H$  קשיר, אז  $G$  לא קשיר.

- (30) נתון גרף  $G$ .  
 הוכיחו כי אם  $\bar{G}$  לא קשיר, אז לכל שני קודקודים  $x, y$  ב- $G$  מתקיים  $d(x, y) \leq 2$  (כאשר  $d(x, y)$  הוא המרחק בין  $x$  ל- $y$ ).
- (31) נתונה קבוצה בת 5 קודקודים  $V = \{v, u, t, s, r\}$ .  
 כמה גרפים שונים על קבוצת הקודקודים  $V$  מקיימים שדרגת כל קודקוד קטנה ממש מ-4?

32) יהי  $G$  גרף חסר מעגלים כעל 20 קודקודים ו-15 קשתות. כמה רכיבי קשירות בגרף?

33) הוכיחו כי בכל צביעה של קשתות  $K_{2t+1}$  ב- $t$  צבעים, נקבל מעגל חד צבעי.

## גרף דו צדדי

## שאלות

- (1) נגדיר גרף  $G = (V, E)$  באופן הבא:  $V = \{A \in P\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\} \mid |A| = 3\}$   
 $E = \{\{A, B\} \mid |A \cap B| = 1\}$   
 א. האם  $G$  דו צדדי?  
 ב. האם  $G$  דו קשיר?
- (2) יהי  $G = (V, E)$  גרף, כאשר כל צומת של  $G$  היא סדרה בינארית באורך 6. למשל, 000000 צומת של  $G$ . שני צמתים הם מחוברים אם הם נבדלים זה מזה בשני מקומות בדיוק. למשל, 010111 מחובר ל-011101, כי הם נבדלים במקומות השלישי והחמישי.  
 א. כמה קשתות יש ל- $G$ ?  
 ב. האם  $G$  קשיר? כמה רכיבי קשירות יש ל- $G$ ?  
 ג. האם  $G$  דו"צ?  
 ד. (למי שלמדו גרפים מישוריים, האם  $G$  מישורי?)
- (3) מחקו  $n-1$  קשתות מן הגרף הדו-צדדי השלם  $K_{2,n}$  (כאשר  $n \geq 1$ ) והתקבל גרף  $G$  שאין בו קודקודים מבודדים (כלומר, אין בו קודקודים שדרגתם אפס). הוכיחו ש- $G$  הוא עץ (שאלה זו מופיעה גם בפרק עצים).
- (4) מה הגרף המשלים של הגרפים הדו"צ  $K_{4,4}, K_{5,5}$ , ובאופן כללי  $K_{n,n}$ ?
- (5) יהיו  $G_1 = (V_1, E_1)$  ו- $G_2 = (V_2, E_2)$  שני גרפים, כאשר האיחוד שלהם מוגדר להיות  $G_1 \cup G_2 = (V, E)$  כש- $V = V_1 \cup V_2, E = E_1 \cup E_2$ .  
 הוכיחו או הפריכו:  
 א. איחוד של שני גרפים דו"צ הוא גרף דו"צ.  
 ב. איחוד של שני גרפים דו"צ על קבוצות צמתים זרות הוא גרף דו"צ.  
 ג. איחוד של  $n$  גרפים דו"צ על קבוצות צמתים זרות הוא גרף דו"צ.  
 ד. איחוד של  $n$  גרפים דו"צ על קבוצות צמתים זרות בזוגות הוא גרף דו"צ.
- (6) הציגו את  $K_{16}$  כאיחוד של 4 גרפים דו"צ.

- (7) הוכיחו או הפריכו :  
אם  $G = (V, E)$  גרף דו"צ  $k$  רגולרי שצדדיו הם  $A, B$ , אז  $|A| = |B|$ .
- (8) יהיו  $G_1, G_2, G_3, \dots, G_7$  שבעה גרפים דו"צ שונים על אותה קבוצת צמתים  $V$ .  
לכל גרף צדדים  $A_i, B_i$ , כאשר  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ . כמוכן שבסימונים אלה מתקיים  $A_i \cup B_i = V, A_i \cap B_i = \emptyset$  לכל  $1 \leq i \leq 7$ .  
יהי  $G$  איחוד כל הגרפים האלה, כאשר אם יש קשר המופיע בכמה גרפים ניקח רק קשת אחת, כך שאין קשתות מרובות והגרף שהגדרנו הוא גרף פשוט.  
לכל צומת ב- $G$  נתאים סדרה בת שבע אותיות לפי הצדדים אליה הוא שייך בגרפים  $G_1, G_2, G_3, \dots, G_7$ , בהתאמה.  
למשל, אם  $v$  שייך לקבוצות  $A_1, A_2, B_3, B_4, B_5, A_6, A_7$ , כלומר בשני הגרפים הראשונים הוא בצד  $A$ , בשלושת הגרפים הבאים בצד  $B$ , ובשני הגרפים האחרונים בצד  $A$ , אז נשמיט את האינדקסים ונתאים לו את המילה  $AABBBA$ .  
כלומר, ל- $v$  שלנו תתאים המילה  $AABBBA$ , ובאופן דומה, לכל צומת תתאים מילה בת 7 אותיות.  
הוכיחו כי אם לשני צמתים  $u, v$  מתאימה אותה מילה אז אין צומת ב- $G$  בין  $u$  לבין  $v$ .
- (9) יהי  $G$  גרף דו צדדי  $V = V_1 \cup V_2, V_1 \cap V_2 = \emptyset$ , ונתון כי  $G$  הוא  $d$  רגולרי,  $d \geq 1$ .  
הוכיחו כי  $|V_1| = |V_2|$ .
- (10) הוכיחו או הפריכו :  
א. אם לגרף יש שני רכיבי קשירות בדיוק, אז הגרף המשלים הוא דו צדדי.  
ב. אם לגרף יש שני רכיבי קשירות בדיוק, אז הגרף המשלים אינו דו צדדי.
- (11) כמה זיווגים מושלמים יש,  
(שאלה זו מופיעה גם בפרק גרף דו צדדי)  
א. בגרף המלא  $K_5$  ?  
ב. בגרף המלא  $K_6$  ?  
ג. בגרף הדו"צ המלא  $K_{5,5}$  ?  
(הגדרת גרף דו"צ בפרק גרף דו צדדי)  
ד. בגרף הדו"צ המלא  $K_{5,5}$  כאשר מחקנו שלוש קשתות שיש להן צומת משותף?
- (12) יהי  $G = (V, E)$  גרף דו-צדדי פשוט, וכן  $|V| = n$ .  
הוכיחו כי  $|E| \leq \frac{n^2}{4}$ .

- 13** נגדיר גרף שצמתיו הם  $P(\{1, 2, 3, \dots, n\})$  (יש  $2^n$  צמתים), ושני צמתים מחוברים, אם אחד מהם מכיל את השני והם נבדלים באיבר אחד. (למשל,  $\{1, 2, 5, 7\}$ ,  $\{1, 5, 7\}$  מחוברים)
- א. הוכיחו כי  $G$  קשיר.  
 ב. הוכיחו כי  $G$  רגולרי.  
 ג. הוכיחו כי  $G$  הוא גרף דו"צ.

- 14** הוכיחו או הפריכו: אם  $G = (V, E)$  אוילרי דו צדדי, אז:  $|V| \in \mathbb{N}_{even}$ .  
 (שאלה זו מופיעה גם בפרק מעגלים מיוחדים)

לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר [www.GooL.co.il](http://www.GooL.co.il)

## עצים

## שאלות

- (1) יהי  $T$  עץ שעל  $n \geq 2$  קודקודים שלו בדיוק שני עלים. מהן דרגות קודקודי  $T$ ? רשמו אותן לכל  $n \geq 2$ , בסדר עולה משמאל לימין (סדרת הדרגות) והוכיחו נכונות תשובתכם.
- (2) יהי  $T = (V, E)$  עץ. הוכיחו שאם כל דרגותיו אי-זוגיות, אזי גם  $|E|$  הוא מספר אי-זוגי.
- (3) יהי  $T$  עץ על  $n \geq 4$  קודקודים. אורך המסלול הפשוט הארוך ביותר ב- $T$  הוא  $n-2$  (יש מסלול פשוט באורך  $n-2$  ואין מסלול ארוך יותר). מהן דרגות קודקודי  $T$ ? רשמו אותן בסדר עולה משמאל לימין (סדרת הדרגות).
- (4) יהי  $T$  עץ. נוסף ל- $T$  קודקוד שנקרא לו  $v$ , וקשתות מ- $v$  לחלק מקודקודי  $T$ . מה צריכה להיות דרגת  $v$  כדי שבגרף המתקבל יהיה בדיוק מעגל פשוט אחד? הוכיחו שאם דרגת  $v$  תהיה גדולה יותר, בגרף יהיה יותר ממעגל פשוט אחד.
- (5)  $G$  גרף עם 20 קודקודים ו-15 קשתות ללא מעגלים. כמה רכיבי קשירות בגרף?
- (6) נתונה קבוצה של 10 קודקודים, ואוסף שקפים שעליהם מצוירים עצים על אותם עשרה קודקודים. גיורא מניח מספר כלשהו של שקפים זה על זה ומקפיד שאף קשת משקף אחד לא תכסה על אותה קשת בשקף אחר (כלומר, אין אף קשת משותפת לשני עצים שונים). הוכיחו שהגרף שגיורא מקבל מאיחוד העצים שמצוירים על השקפים לא יכול להיות גרף שכל דרגותיו שוות ל-5. רמז: חשבו את מספר הקשתות בגרף.
- (7) יהיו  $T_1 = (V, E_1)$ ,  $T_2 = (V, E_2)$  שני עצים על אותה קבוצת קודקודים, ונגדיר גרף  $G$  על אותה קבוצת קודקודים, שקשתותיו  $E = E_1 \cup E_2$ . הוכיחו כי קיים  $x \in V$ , כך ש- $d(x) \leq 3$  (דרגתו של  $x$  ב- $G$ ).

- (8) יהיו  $T_1 = \langle V_1, E_1 \rangle$ ,  $T_2 = \langle V_2, E_2 \rangle$  עצים, ונגדיר גרף  $G$  כך:  $G = \langle V_1 \cup V_2, E_1 \cup E_2 \rangle$ .
- א. נתון כי  $V_1 \cap V_2 = \{v\}$ .  
האם  $G$  בהכרח עץ? נמקו.
- ב. נתון כי  $E_1 \cap E_2 = \{e\}$ .  
האם  $G$  בהכרח עץ? נמקו.
- (9) יהי  $T$  עץ על  $n \geq 3$  קודקודים ויהי  $v$  קודקוד ב- $T$  מדרגה 2.  
יהי  $k$  מספר רכיבי הקשירות של  $T-v$  (שהוא תת הגרף של  $T$  המתקבל ממחיקת  $v$ , והקשתות ש- $v$  קצה שלהן).  
מה הם הערכים האפשריים עבור  $k$ ? הוכיחו.
- (10) יהי  $T$  עץ בעל  $n$  קודקודים, ונתון שדרגותיו הן 1,3,5 בלבד. יש 7 קודקודים מדרגה 3 ו-10 מדרגה 5.  
כמה עלים יש בעץ?
- (11) יהי  $T = (V, E)$  עץ, שבו  $|V| = n$ . דרגות צמתי  $T$  הן 1,3,5 בלבד. מספר הצמתים שלהם מדרגה 3 הוא 10 ומספר הצמתים שלהם מדרגה 5 הוא 12.  
כמה עלים (צמתים מדרגה 1) יש לעץ?
- (12) הוכיחו כי בכל צביעת קשתות הגרף השלם  $K_n$  בשני צבעים קיים עץ פורש מונוכרומטי.  
הערה: עץ פורש הוא עץ שקודקודיו הם כל קודקודי  $G$  וקשתותיו הן חלק מקשתות  $G$ .
- (13) יהי  $G = (V, E)$ ,  $|V| = n$ , גרף פשוט וחסר מעגלים, שבו  $k$  רכיבי קשירות.  
הוכיחו כי  $|E| = n - k$ .
- (14) מהי העוצמה הגדולה ביותר האפשרית לקבוצה של עצים על קבוצת הקודקודים  $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , שאף שניים מהם אינם איזומורפיים? (שאלה זו מופיעה גם בפרק איזומורפיזם)
- (15) מחקו  $n-1$  קשתות מן הגרף הדו-צדדי השלם  $K_{2,n}$  (כאשר  $n \geq 1$ ), והתקבל גרף  $G$  שאין בו קודקודים מבודדים (כלומר, אין בו קודקודים שדרגתם אפס).  
הוכיחו ש- $G$  הוא עץ (שאלה זו מופיעה גם בפרק גרף דו צדדי).

16) ענו על הסעיפים הבאים :

א. נתונים שלושה גרפים בעלי אותה קבוצת קודקודים  $G_1 = (V, E_1)$ ,

$$G_2 = (V, E_2) \text{ ו- } G_3 = (V, E_3).$$

נגדיר  $G = (V, E_1 \cup E_2 \cup E_3)$  כאיחוד שלושת הגרפים, ונניח כי לכל

קודקוד ב- $V$  דרגתו ב- $G$  היא לפחות 6.

הוכיחו כי לפחות אחד מהגרפים  $G_1, G_2, G_3$  אינו חסר-מעגלים.

ב. יהיו  $G_1 = (V_1, E_1), G_2 = (V_2, E_2), G_3 = (V_3, E_3)$  שלושה עצים על אותה

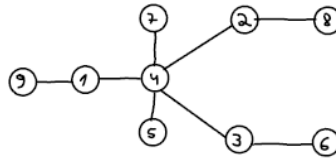
קבוצת צמתים  $V$ .

לכל צומת  $v \in V$  נסמן ב- $d_i(v)$  את הדרגה של  $v$  ב- $G_i$ , אשר  $i = 1, 2, 3$ .

$$\sum_{i=1}^3 d_i(v) \leq 5, v \in V, \text{ שעבורו, הוכיחו כי קיים צומת } v \in V$$

17) מיהו העץ הממוספר המותאם למילה  $(1, 1, 3, 4, 3, 6, 10, 1)$ ?

18) מהי סדרת פרופר של העץ הבא?



19) בכמה עצים שונים על קבוצת הצמתים  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  אין שום צומת מדרגה זוגית?

20) בכמה עצים על קבוצת הקודקודים  $\{1, 2, 3, 4, \dots, 10\}$  כל העלים הם מספרים זוגיים?

21) כמה עצים שונים יש על הקודקודים  $\{1, \dots, n\}$ , שלהם בדיוק שני עלים?

22)  $T$  הוא עץ בעל 60 צמתים, מתוכם בדיוק 10 צמתים מדרגה 3 ואין בצמתים מדרגה גדולה מ-3.

א. הדגימו עץ כזה.

ב. מצאו את מספר העלים ללא שימוש בקוד פרופר.

ג. מצאו את מספר העלים בעזרת קוד פרופר.

23) בכמה עצים על הקודקודים  $\{1, 2, 3, \dots, 10\}$  יש שלושה עלים והם (ורק הם):  
?8,9,10

- (24) יהי  $G$  גרף פשוט על  $n$  קודקודים המכיל מעגל המילטון, ונתון כי על ידי השמטת קשתות המעגל מתקבלת גרף של  $G$  שהוא עץ. האם ניתן על סמך הנתונים לקבוע כמה קשתות בגרף  $G$ ? אם כן, מהו מספר הקשתות?  
(שאלה זו מופיעה גם בפרק מעגלים מיוחדים)
- (25) מהי העוצמה הגדולה ביותר האפשרית לקבוצה של עצים על קבוצת הקודקודים  $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , שאף שניים מהם אינם איזומורפיים?  
(שאלה זו מופיעה בפרק איזומורפיזם)

לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר [www.GooL.co.il](http://www.GooL.co.il)

## מעגלים מיוחדים

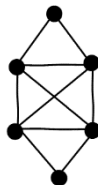
הערה: חלק קטן משאלות פרק זה מסתמכות על מושג העץ. רצוי ללמוד את הפרק עצים שהוא פרק חשוב ביותר.

### דוגמאות

- (1) צפו בסרטון על מעגלי המילטון והוכיחו כי:
- תנאי אורה אינו תנאי הכרחי.
  - החסם במשפט אורה הוא הדוק.
- (2) בשאלה זו נחקור את הקשר בין המושג מעגל אוילר לבין מעגל המילטון. הוכיחו או הפריכו:
- אם  $G$  המילטוני, אז  $G$  אוילרי.
  - אם  $G$  המילטוני, אז  $G$  לא אוילרי.
  - אם  $G$  לא המילטוני, אז  $G$  אוילרי.
  - אם  $G$  לא המילטוני, אז  $G$  לא אוילרי.
  - לעניין הקשר בין המושגים, מה המסקנה המתבקשת מסעיפים א-ד?
  - אם  $G$  הוא גם אוילרי וגם המילטוני, אז יש בו מסלול שהוא בעת ובעונה אחת גם מסלול אוילר וגם מסלול המילטון.
  - אם  $G$  אוילרי וגם המילטוני, אז  $G$  הוא מעגל פשוט.
  - אם יש ב- $G$  מסלול שהוא בעת ובעונה אחת מעגל אוילר וגם מעגל המילטון, אז  $G$  הוא מעגל פשוט.

### שאלות

- (1) ענו על הסעיפים הבאים:
- מצא מעגל אוילר, מעגל המילטון, ומסלול המילטון שאינו מעגל המילטון בגרף הבא:



- הוכיחו את הטענה הבאה, או תנו דוגמה נגדית והסבר שמראה שאכן מדובר בדוגמה נגדית: אם בגרף יש מעגל המילטון, אז יש בו מעגל אוילר.

- (2) נגדיר גרף  $G = (V, E)$  באופן הבא:  $V = \{A \in P\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\} \mid |A| = 3\}$   
 $E = \{\{A, B\} \mid |A \cap B| = 1\}$ . למשל,  $\{\{2, 4, 7\}, \{1, 4, 6\}\} \in E$ .
- א. מהו מספר הצמתים? מה דרגת כל קודקוד? מה מספר הקשתות?  
 ב. האם  $G$  דו"צ?  
 ג. האם  $G$  אוילרי?  
 ד. האם  $G$  המילטוני?
- (3) מהו האורך המירבי של מסלול ב- $K_{2n+1}$ ? נמקו.
- (4) הוכיחו בכל גרף שכל דרגותיו 4 ניתן לצבוע את קשתותיו כך מכל קודקוד יצאו בדיוק שתי קשתות מכל צבע.
- (5) ענו על הסעיפים הבאים:  
 א. יהי  $G$  גרף שקודקודיו הן תתי קבוצות בנות 4 איברים של  $\{1, 2, 3, \dots, 8\}$ , כאשר שני קודקודים מחוברים אם ורק אם בקבוצות יש 2 איברים בדיוק. האם ב- $G$  יש מעגל המילטון?  
 ב. יהי  $K_{m,n}$  גרף דו צדדי שלם. הוכיחו כי  $K_{m,n}$  המילטוני  $\Leftrightarrow m = n$ .
- (6) יהיו  $G_1 = (V_1, E_1)$ ,  $G_2 = (V_2, E_2)$  שני גרפים אוילריים פשוטים. נגדיר  $G = (V, E)$  באופן הבא:  $V = V_1 \cup V_2$ ,  $E = E_1 \cup E_2$ , ומלכדים צומת  $u_1 \in V_1$  עם צומת  $u_2 \in V_2$ . האם  $G$  אוילרי? אם נחבר את  $u_1$  עם  $u_2$  במקום ללכד אותם, האם כעת  $G$  אוילרי?
- (7) יהי  $G = (V, E)$  גרף אוילריאני בעל מספר אי זוגי של צמתים. הוכיחו כי יש ב- $G$  לפחות שלושה צמתים בעלי אותה דרגה. (שובך היונים, מספר הקודקודים  $2n+1$  ויש  $n$  דרגות אפשריות כי כולן זוגיות)
- (8) יהי  $G$  גרף בעל שני רכיבי קשירות,  $T_1$  ו- $T_2$ , שכל אחד מהם עץ. נוסיף שתי קשתות חדשות ל- $G$  (קבוצת הקודקודים נשארת ללא שינוי) ויתקבל גרף חדש  $\tilde{G}$ .  
 א. הוכיחו שב- $\tilde{G}$  בהכרח יש מעגל.  
 ב. בנו דוגמה שבה ב- $\tilde{G}$  יש מעגל המילטון.

- 9** יהי  $G$  גרף פשוט על  $n \geq 3$  קודקודים.  
נתון:  
1.  $n$  מספר זוגי.  
2. כל הדרגות ב- $G$  שוות (כלומר  $G$  גרף רגולרי).  
3. גם  $G$  וגם  $\bar{G}$  קשירים.  
הוכיחו שלפחות באחד מבין  $G$  ו- $\bar{G}$  יש מעגל המילטון.
- 10** הוכיחו או הפריכו: אם  $G$  אוילרי דו"צ, אז מספר הצמתים של  $G$  הוא זוגי.
- 11** עבור  $A = \{1, 2, 3\}$ , נגדיר  $G = (V, E)$ , כאשר  $V = A \times A$  (9 צמתים), ואת  $E$  קבוצת הצמתים נגדיר באופן הבא:  $\{(a, b), (c, d)\} \in E$  אם ורק אם  $a + b \neq c + d$ .  
א. הוכיחו כי  $G$  קשיר.  
ב. מה דרגת הצומת  $(1, 1)$  ומה דרגת הצומת  $(2, 3)$ ? כמה קשתות יש ב- $G$ ?  
ג. הוכיחו כי אין ב- $G$  מסלול אוילר.
- 12** יהי  $G$  גרף פשוט 3-רגולרי על  $n \geq 4$  קודקודים. נתון שב- $G$  יש מעגל המילטון. הוכיחו שתת הגרף של  $G$ , המתקבל ממחיקת כל הקשתות ששייכות למעגל המילטון, הוא בעל  $\frac{n}{2}$  רכיבי קשירות (בפרט, יש להוכיח ש- $n$  זוגי).
- 13** יהיו  $G_1 = (V, E_1)$ ,  $G_2 = (V, E_2)$  שני גרפים על אותה קבוצת קודקודים  $V$ . נגדיר את הגרף  $G = (V, E_1 \oplus E_2)$ , כאשר  $E_1 \oplus E_2$  הוא ההפרש הסימטרי של שתי קבוצות הקשתות (כל הקשתות שנמצאות ב- $E_1$  או ב- $E_2$  אבל לא בשתייהן). הוכיחו כי אם ב- $G_1, G_2$  יש מעגל אוילר ו- $G$  קשיר, אז גם בו יש מעגל אוילר.
- 14** יהי  $G = (V, E)$  גרף על  $n$  צמתים.  
א. הוכיחו כי אם  $|E| > \binom{n-1}{2} + 1$ , אז  $G$  המילטוני.  
ב. הוכיחו כי החסם הנ"ל הדוק. כלומר, כי הטענה:  
אם  $|E| \geq \binom{n-1}{2} + 1$ , אז  $G$  המילטוני – איננה נכונה.
- 15** נתון  $G = (V, E)$  גרף אוילרי שיש בו שלוש קשתות  $e_1, e_2, e_3 \in E$ , שלאחר הסרתן מהגרף,  $G$  נשאר אוילרי.  
א. הדגימו גרף כזה.  
ב. הוכיחו כי  $G$  לא דו"צ.

**16** נתון  $G$  גרף אוילר, ונגדיר שיטה: נבחר קודקוד, נתחיל ממנו מסלול, ונמשיך אותו כרצוננו כל עוד אפשר בלי לחזור על קשת פעמיים.

א. הוכיחו כי בשיטה זו תמיד נקבל מעגל.  
 ב. האם בשיטה זו מתקבל תמיד מעגל אוילר?  
 ג. נתון כי  $G$  גם המילטוני.  
 האם בהכרח יש בו מסלול שהוא גם מעגל אוילר וגם מעגל המילטון?

**17** יהי  $G$  גרף פשוט על  $n$  קודקודים, המכיל מעגל המילטון, ונתון כי על ידי השמטת קשתות המעגל מתקבלת תת גרף של  $G$  שהוא עץ.  
 האם ניתן על סמך הנתונים לקבוע כמה קשתות בגרף  $G$ ? אם כן, מהו מספר הקשתות?  
 (שאלה זו מופיעה גם בפרק מעגלים מיוחדים)

**18** יהי  $G$  גרף, לאו דווקא קשיר, שכל דרגותיו אי זוגיות. נבנה גרף  $H$  שקודקודיו הם קודקודי  $G$  ועוד קודקוד חדש  $v$ , שקשתותיו הם קשתות  $G$  וכל הקשתות האפשריות בין  $v$  לקודקודי  $G$ .  
 הוכיחו שב- $H$  יש מעגל אוילר.

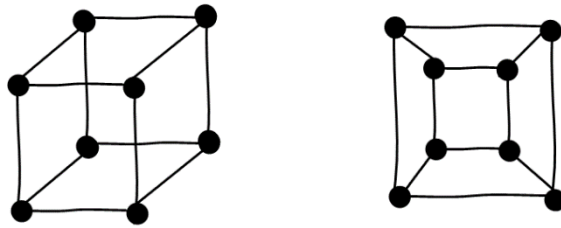
**19** הוכיחו או הפריכו: אם  $G = (V, E)$  אוילרי דו צדדי, אז:  $|V| \in \mathbb{N}_{even}$ .  
 (שאלה זו מופיעה גם בפרק גרף דו צדדי)

לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר [www.GooL.co.il](http://www.GooL.co.il)

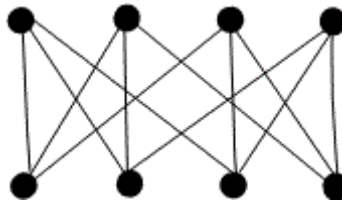
## איזומורפיזם

## שאלות

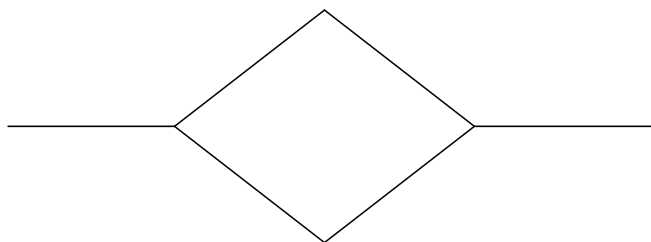
- (1) הוכיחו כי הגרפים הבאים איזומורפיים זה לזה.  
זה אומר שגרף הקובייה התלת מימדי הוא מישורי (כלומר, ניתן לשכן אותו במישור [למצוא גרף איזומורפי לו] מבלי שאף צלע חותכת צלע אחרת).



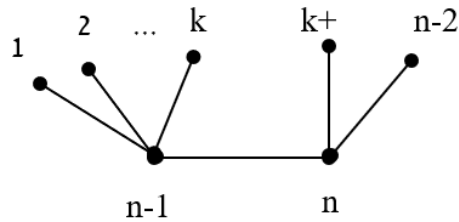
- (2) הוכיחו כי ניתן לשכן במישור את הגרף הבא.  
כלומר, קיים גרף  $G$  איזומורפי לו, מבלי שאף צלע ב- $G$  חותכת צלע אחרת.



- (3) יהיו  $G_1, G_2$  שני גרפים איזומורפיים.  
הוכיחו כי  $G_1$  חסר מעגלים  $\Leftrightarrow G_2$  חסר מעגלים, והסיקו כי  $G_1 \Leftrightarrow G_2$  עץ.
- (4) כמה גרפים שונים זה מזה ואיזומורפיים לגרף שמצויר להלן אפשר לבנות על קבוצת הקודקודים  $\{a, b, c, d, e, f\}$ ?

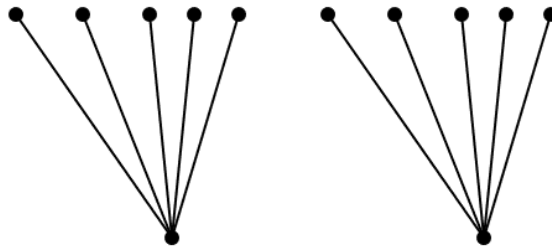


(5) כמה גרפים שונים על קבוצת הקודקודים  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  איזומורפיים לגרף הבא:



תנו תשובה לכל  $k, n$  טבעיים המקיימים  $2 \leq k \leq n-3$ .  
הפרידו בין המקרים  $n = 2k+2$ ,  $n \neq 2k+2$ .

(6) כמה גרפים שונים על קבוצת הקודקודים  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{12}\}$  איזומורפיים לגרף הבא:



(7) הוכיחו או הפריכו:  
אם לשני גרפים אותה רשימת דרגות (כלומר, אם נסדר את דרגות קודקודי כל אחד מהגרפים בסדר עולה, נקבל אותה סדרה), אז הגרפים איזומורפיים.

(8) נגדיר  $C_n$  להיות מעגל על  $n$  קודקודים.  
לאילו ערכים של  $n$  מתקיים ש- $C_n$  איזומורפי ל- $\bar{C}_n$ ?  
(כאשר  $\bar{C}_n$  הוא הגרף המשלים)

(9) יהי  $T$  עץ.  
מהי העוצמה הגדולה ביותר האפשרית לקבוצה של עצים על קבוצת הקודקודים  $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , שאף שניים מהם אינם איזומורפיים? (שאלה מאתגרת)

לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר [www.GooL.co.il](http://www.GooL.co.il)