

תורת הקבוצות ב'



תוכן העניינים

1	1. פונקציות.....
15	2. עוצמות.....

תורת הקבוצות ב'

פרק 1 - פונקציות

תוכן העניינים

1. מבוא והגדרות ראשונות 1
2. תמונה של קבוצה 6
3. הרכבת פונקציות והפונקציה ההפוכה 10

מבוא לפונקציות:

שאלות:

אופציה	תיאור	אופציה	תיאור

(1) בכל אחד מהאיורים הבאים זהה את התחום ואת הטווח ובחר את האפשרות המתאימה:

- א. זו אינה פונקציה.
- ב. זו פונקציה חח"ע שאינה על.
- ג. זו פונקציה על שאינה חח"ע.
- ה. זו פונקציה שאינה חח"ע ואינה על.
- ו. זו פונקציה שהיא גם חח"ע וגם על.

(2) עבור הפונקציה $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ מוגדרת ע"י $g(x) = \lfloor x \rfloor$ (ערך שלם תחתון של x). חשב את:

- א. $g(\pi)$, $g(-\pi)$
- ב. $\text{Im}(g)$
- ג. מצא מקור ל-7.
- ד. מצא את כל המקורות ל-7.
- ה. האם כל איבר בטווח הוא גם תמונה?

(3) עבור כל אחת מהפונקציות הבאות, קבע האם היא חח"ע? האם על? הוכח טענותיך.

- א. פונקציית הזהות $I_A: A \rightarrow A$ המוגדרת ע"י $I_A(x) = x$.
- ב. $h_1: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ מוגדרת ע"י $h_1(x) = 2x + 1$.
- ג. $h_2: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ מוגדרת ע"י $g(x) = \lfloor x \rfloor$ (ערך שלם תחתון של x).
- ד. $h_3: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Z}$ מוגדרת ע"י $h_3(x, y) = x - y$.
- ה. $h_4: P(\mathbb{N}) \times P(\mathbb{N}) \rightarrow P(\mathbb{N})$ מוגדרת ע"י $h_4(A, B) = A \cup B$ וחשב את $\text{Im } h_4$.
- ו. $f_1: (0, \infty) \rightarrow (0, 2)$ מוגדרת ע"י $f_1(x) = \frac{2x}{x+3}$.

- ז. $f_2: (0, \infty) \rightarrow (0, \infty)$ מוגדרת ע"י $f_2(x) = x + \frac{1}{x}$.
- ח. $f_3: (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ מוגדרת ע"י $f_3(x) = x - \frac{1}{x}$.
- ט. $f_4: P(\mathbb{R}) \rightarrow P(\mathbb{R})$ מוגדרת ע"י $f_4(X) = X \cap \mathbb{Z}$.
- י. $f_5: P(\mathbb{R}) \rightarrow P(\mathbb{Z})$ מוגדרת ע"י $f_5(X) = X \cap \mathbb{Z}$.
- יא. $f_6: P(\mathbb{R}) \rightarrow P(\mathbb{R})$ מוגדרת ע"י $f_6(X) = X \Delta \mathbb{Z}$.
- יב. $f_7: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ מוגדרת ע"י $f_7(n) = \text{the sum of the digits of } n$.
- יג. $f_8: \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$ מוגדרת ע"י $f_8(\langle x, y \rangle) = 3x + 2y$.
- יד. $f_9: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ מוגדרת ע"י $f_9(\langle n, k \rangle) = 2^{n-1}(2k-1)$.
- טו. $h: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ מוגדרת ע"י $h(n) = \begin{cases} \frac{n}{2} & n \in \mathbb{N}_{\text{even}} \\ n+3 & n \in \mathbb{N}_{\text{odd}} \end{cases} = \begin{cases} \frac{n}{2} & n \in \mathbb{N}_{\text{even}} \\ n+3 & \text{else} \end{cases}$.

4) בדוק אם הפונקציות הבאות חח"ע, על וחשב את תמונתן:

- א. $f_9: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ מוגדרת ע"י $f_9(x) = \begin{cases} \frac{n}{2} & 4|n \\ 2n+1 & \text{else} \end{cases}$ וחשב את $\text{Im } f_9$.
- ב. $f_{10}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ מוגדרת ע"י $f_{10}(x) = \begin{cases} 3x-1 & x < 2 \\ x-3 & x \geq 2 \end{cases}$ וחשב את $\text{Im } f_{10}$.
- ג. $f_{11}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ מוגדרת ע"י $f_{11}(x) = \begin{cases} x+1 & x \leq 1 \\ \frac{1}{2}x + \frac{3}{2} & x > 1 \end{cases}$.

5) תהיינה $f, g: A \rightarrow A$ פונקציה. הוכח או הפוך כל אחת מהטענות הבאות:

- א. אם לכל איבר ב- $\text{Im}(f)$ יש מקור יחיד אז f חח"ע.
- ב. אם לכל איבר ב- $\text{Im}(f)$ יש מקור יחיד אז f על.
- ג. אם לכל איבר ב- $\text{Im}(f)$ יש מקור יחיד אז f אינה קבועה.
- ד. אם יש איבר ב- $\text{Im}(f)$ ללא מקור אז f על.
- ה. אם $\text{Im}(f) \subset \text{Im}(g)$ (הכלה ממש) אז f אינה על.
- ו. אם $\text{Im}(f) \subset \text{Im}(g)$ (הכלה ממש) אז g אינה על.
- ז. אם $\text{Im}(f) = \text{Im}(g)$ אז $f = g$.
- ח. לכל $D \subseteq A$, $D \neq \emptyset$ קיימת $f: A \rightarrow A$ כך ש- $\text{Im}(f) = D$.

(6) נתונה $g: \mathbb{N}_{\text{odd}} \rightarrow \mathbb{N}$ פונקציה לא ידועה.

$$\text{נגדיר } h: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \text{ באופן הבא: } h(n) = \begin{cases} \frac{n}{2} & n \in \mathbb{N}_{\text{even}} \\ g(n) & n \in \mathbb{N}_{\text{odd}} \end{cases}$$

למשל: $h(34)=17$, $h(35)=g(35)$ שהוא מספר טבעי לא ידוע.
הוכח כי h אינה חח"ע.

מצא אינסוף מספרים טבעיים שונים $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ כך שלכל $i \neq j$ מתקיים $h(x_i) = h(x_j)$.

(7) נגדיר $F: (\mathbb{R}^{\mathbb{R}} \times P(\mathbb{R})) \rightarrow P(\mathbb{R})$ באופן הבא: $F((f, A)) = \{x \in \mathbb{R} \mid \exists y \in A \ f(y) = x\}$

א. עבור $A = \{2, 3, 4, 5, 17, 18\}$, $g(x) = 2x$, חשב: $F((g, A))$.

ב. בדוק האם f חח"ע והאם על.

ג. מצא את $\text{Im}(F)$.

(8) נגדיר $G: \mathbb{N}^{\mathbb{N}} \rightarrow P(\mathbb{N})$ באופן הבא: $G(f) = \{\alpha \in \mathbb{N} \mid \exists \beta \in \mathbb{N} \ f(\beta) = \alpha\}$

א. חשב $G(f)$ עבור $f = I_{\mathbb{N}}$ פונקציית הזהות $\mathbb{N}$ עבור

$$f(n) = \begin{cases} 1 & n \in \mathbb{N}_{\text{even}} \\ 4 & \text{else} \end{cases} \text{ הפונקציה ועבור הפונקציה הקבועה 3.}$$

ב. בדוק האם G חח"ע והאם על ומצא את $\text{Im}(G)$.

(9) נגדיר פונקציה $F: \{0,1\}^{\mathbb{N}} \rightarrow P(\{0,1\} \times \{0,1\})$ באופן הבא:

$$F(g) = \{(g(n), g(n+1)) \mid n \in \mathbb{N}\}$$

הוכח כי F אינה על.

(10) נגדיר $F: \mathbb{N}^{\mathbb{R}} \rightarrow P(\mathbb{N})$ באופן הבא: $F(f) = \{n \in \mathbb{R} \mid f(x) = 1\}$

הוכח כי F אינה חח"ע.

(11) נגדיר פונקציה $F: \{0,1,2\}^{\mathbb{N}} \rightarrow P(\mathbb{N})$ באופן הבא: $F(f) = \{n \in \mathbb{N} \mid f(n) = 0\}$

קבע האם F חח"ע ועל.

12 תהי $P_{\text{even}}(\mathbb{N})$ קבוצת כל תת הקבוצות של $\mathbb{N}$ שמספר אבריהן זוגי. ותהי $P_{\text{odd}}(\mathbb{N})$ קבוצת כל תת הקבוצות של $\mathbb{N}$ שמספר אבריהן אי זוגי. לדוגמה $\{1,3\} \in P_{\text{even}}(\mathbb{N}), \{1,3\} \notin P_{\text{odd}}(\mathbb{N})$, ולעומת זאת, $\{2,4,6\} \notin P_{\text{even}}(\mathbb{N}), \{2,4,6\} \in P_{\text{odd}}(\mathbb{N})$. לכל קבוצה A סופית של טבעיים נסמן ב- $\max(A)$ את המספר הגדול ביותר ב- A וב- $\max(\emptyset) = 0$. הוכיחו כי הפונקציה $f: P_{\text{even}}(\mathbb{N}) \rightarrow P_{\text{odd}}(\mathbb{N})$ המוגדרת על ידי $f(A) = A \cup \max(A)$ היא חח"ע ואינה על.

13 נגדיר $H: \mathbb{R}^{\mathbb{R}} \times \mathbb{R}^{\mathbb{R}} \rightarrow P(\mathbb{R})$ באופן הבא: $H(\langle f, g \rangle) = \text{Im } f \Delta \text{Im } g$. בדוק אם f חח"ע ועל.

פונקציות שחובה להכיר:

- 14** בכל אחד מהסעיפים הבאים מצא פונקציה כנדרש:
- מצא $f: (0,1) \rightarrow (1,\infty)$ שהיא חח"ע ועל.
 - השתמש בפונקציה שמצאת בסעיף קודם כדי למצוא $f: (0,1) \rightarrow (0,\infty)$ שהיא חח"ע ועל.
 - מצא $f: [2,5) \rightarrow [1,7)$ שהיא חח"ע ועל.
 - עבור $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ מספרים נתונים מצא $f: [a,b] \rightarrow [c,d]$ שהיא חח"ע ועל.
 - מצא $f: [1,3) \cup [4,8] \rightarrow [0,1]$ שהיא חח"ע ועל.
 - מצא פונקציה $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Z}$ שהיא חח"ע ועל. מצא גם $g: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$ שהיא היפוך החיצים לפונקציה $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Z}$ שמצאת.
 - מצא פונקציה $f: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ שהיא חח"ע ועל.
 - מצא פונקציה $f: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ שהיא חח"ע.
 - מצא $g: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ שהיא על. (רמז: סעיף קודם)
 - מצא פונקציה $f: \underbrace{\mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \times \dots \times \mathbb{N}}_7 \rightarrow \mathbb{N}$ (כלומר $f: \mathbb{N}^7 \rightarrow \mathbb{N}$) שהיא חח"ע.
 - מצא פונקציה $f: \mathbb{N} \times [0,1) \rightarrow [0,\infty)$ שהיא חח"ע ועל.
 - מצא גם $g: [0,\infty) \rightarrow \mathbb{N} \times [0,1)$ שהיא היפוך החיצים לפונקציה שמצאת.
 - מצא פונקציה $f: (0,1] \rightarrow (0,1)$ שהיא חח"ע ועל.
 - מצא $F: [0,1) \times [0,1) \rightarrow [0,1)$ חח"ע ועל.
 - מצא פונקציה $f: \mathbb{N} \times \{0,1\} \rightarrow \mathbb{N}$ שהיא חח"ע ועל.
 - מצא גם $g: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \times \{0,1\}$ שהיא היפוך החיצים לפונקציה שמצאת.

טו. מצא $f: \mathbb{R} \rightarrow (-1, 1)$ שהיא חח"ע ועל.

טז. מצא $F: \{0, 1\}^A \rightarrow P(A)$ חח"ע ועל. הוכח כי הפונקציה שמצאת היא אכן חח"ע ועל.

יז. מצא $F: \{0, 1\}^{\mathbb{N}_{\text{even}}} \times \{0, 1\}^{\mathbb{N}_{\text{odd}}} \rightarrow \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ שהיא חח"ע ועל.

יח. מצא $F: (\{0, 1\}^{\mathbb{N}})^2 \rightarrow \{0, 1, 2, 3\}^{\mathbb{N}}$ כלומר $F: \{0, 1\}^{\mathbb{N}} \times \{0, 1\}^{\mathbb{N}} \rightarrow \{0, 1, 2, 3\}^{\mathbb{N}}$ שהיא חח"ע ועל והוכח שהיא חח"ע ועל.

תמונה של קבוצה:

רקע:

צפה בשיעורים בנושא תמונה ותמונה הפוכה של קבוצה בטרם תענה על השאלות שבנושא זה.

$$f(\alpha) = t \Leftrightarrow \alpha \in D \text{ קיים } (x \mid t \in f(D))$$

$$\alpha \in D \Leftrightarrow f(\alpha) \in f(D)$$

$$F(\alpha) \in E \Leftrightarrow \alpha \in f^{-1}(E)$$

שאלות:

(1) נגדיר $g: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ מוגדרת ע"י: $g(n) = 2n$ $K = \{1, 8, 17\}$.

חשב את הקבוצות הבאות:

א. $g(K)$

ב. $g^{-1}(K)$

ג. $g(\mathbb{N})$

ד. $g(\mathbb{N}_{\text{even}})$

ה. $g(\mathbb{N}_{\text{odd}})$

ו. $g^{-1}(\mathbb{N}_{\text{even}})$

ז. $g^{-1}(\mathbb{N}_{\text{odd}})$

(2) נגדיר $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ מוגדרת ע"י: $f(x) = x^2 - 5x + 4$ $M = \{0, 4\}$.

נגדיר $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ מוגדרת ע"י: $f(n) = \begin{cases} 2n & n \in \mathbb{N}_{\text{even}} \\ 1 & \text{else} \end{cases}$ ותהי $E = \{1, 5, 6, 8\}$.

חשב את הקבוצות הבאות:

א. $f^{-1}(f(M))$

ב. $f(f^{-1}(M))$

ג. $f(f^{-1}(\{-3, 4\}))$

ד. $f(f^{-1}(\{-3\}))$

ה. $f(f^{-1}(E))$

(3) תהי $f: A \rightarrow B$ פונקציה ותהינה $D \subseteq A$, $E \subseteq B$ שתי קבוצות. הוכח או הפרך כל אחת מהטענות הבאות:

א. $f(D) = D$

ב. $f(D) \neq D$

ג. $f^{-1}(E) = E$

ד. $f^{-1}(E) \neq E$

ה. $f(D) \subseteq f(A)$

ו. אם $D \subset A$ אז $f(D) \subset f(A)$ (שים ♥ שההכלות בסעיף זה הן הכלות ממש).

ז. $f^{-1}(E) \subseteq A$

ח. אם $E \subset B$ אז $f^{-1}(E) \subset A$ (שים ♥ שההכלות בסעיף זה הן הכלות ממש).

ט. f על אם"ם לכל $y \in B$ מתקיים: $f^{-1}(\{y\}) \neq \emptyset$.

י. f חח"ע אם"ם לכל $y \in A$ מתקיים: $f^{-1}(\{y\})$ ריקה או בעלת איבר אחד.

(4) בשאלה זו נבחן את השוויון: $f(D_1 \cup D_2) = f(D_1) \cup f(D_2)$

א. אשר את השוויון עבור $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ מוגדרת ע"י: $f(x) = x^2$.

$$D_1 = \{2, 5\} \quad D_2 = \{-2, 4\}$$

ב. הוכח כי שוויון זה מתקיים תמיד.

כלומר: תהי $f: A \rightarrow B$ פונקציה ותהינה $D_1, D_2 \subseteq A$.

הוכח כי: $f(D_1 \cup D_2) = f(D_1) \cup f(D_2)$

(5) $f: A \rightarrow B$ פונקציה ותהינה $D_1, D_2 \subseteq A$.

הוכח או הפרך כל אחת מהטענות הבאות:

א. $f(D_1 \cap D_2) \subseteq f(D_1) \cap f(D_2)$

ב. $f(D_1 \cap D_2) \supseteq f(D_1) \cap f(D_2)$

ג. אם f חח"ע אז $f(D_1 \cap D_2) = f(D_1) \cap f(D_2)$

ד. אם f על אז $f(D_1 \cap D_2) = f(D_1) \cap f(D_2)$

ה. אם $f(D_1 \cap D_2) \neq f(D_1) \cap f(D_2)$ אז f אינה חח"ע.

(6) $f: A \rightarrow B$ פונקציה ותהינה $E_1, E_2 \subseteq B$.

הוכח כל אחת מהטענות הבאות:

א. $f^{-1}(E_1 \cap E_2) = f^{-1}(E_1) \cap f^{-1}(E_2)$

ב. $f^{-1}(E_1 \cup E_2) = f^{-1}(E_1) \cup f^{-1}(E_2)$

(7) $f : A \rightarrow B$ פונקציה ותהי $D \subseteq A$.

הוכח או הפרך כל אחת מהטענות הבאות:

א. $f^{-1}(f(D)) \subseteq D$

ב. $f^{-1}(f(D)) \supseteq D$

ג. אם f חח"ע אז $f^{-1}(f(D)) = D$.

ד. אם f לא חח"ע אז $f^{-1}(f(D)) \neq D$.

ה. אם f על אז $f^{-1}(f(D)) = D$.

ו. אם לכל $D \subseteq A$ מתקיים $f^{-1}(f(D)) = D$ אז f על.

ז. אם $f^{-1}(f(D)) = D$ אז f חח"ע.

ח. אם לכל $D \subseteq A$ מתקיים $f^{-1}(f(D)) = D$ אז f חח"ע.

ט. אם $f^{-1}(f(D)) \neq D$ אז f אינה חח"ע.

י. אם f על אז לכל $D \subseteq A$ מתקיים $f^{-1}(f(D)) = D$.

יא. אם f לא על אז קיימת $D \subseteq A$ עבורה $f^{-1}(f(D)) \neq D$.

יב. אם f לא חח"ע אז קיימת $D \subseteq A$ עבורה $f^{-1}(f(D)) \neq D$.

(8) $f : A \rightarrow B$ פונקציה ותהי $E \subseteq B$ הוכח או הפרך כל אחת מהטענות הבאות:

א. $f(f^{-1}(E)) \subseteq E$

ב. $f(f^{-1}(E)) \supseteq E$

ג. $f(f^{-1}(E)) \subseteq E$ או $f(f^{-1}(E)) \supseteq E$.

ד. אם f חח"ע אז $f(f^{-1}(E)) = E$.

ה. אם f על אז $f(f^{-1}(E)) = E$.

ו. אם לכל $E \subseteq B$ מתקיים $f(f^{-1}(E)) = E$ אז f חח"ע.

ז. אם לכל $E \subseteq B$ מתקיים $f(f^{-1}(E)) = E$ אז f על.

ח. אם לא לכל $E \subseteq B$ מתקיים $f(f^{-1}(E)) = E$ אז f לא על.

ט. אם לכל $E \subseteq B$ מתקיים $f(f^{-1}(E)) = E$ אז f היא פונקציית הזהות.

י. אם קיימת $E \subseteq B$ כך ש- $f(f^{-1}(E)) \neq E$ אז קיים $\alpha \in A$ כך שלכל $\beta \in A$

מתקיים: $f(\beta) \neq \alpha$.

(9) נתונות פונקציה $f: A \rightarrow B$ וקבוצות $C, D \subseteq A$.

- א. הוכח כי: $f(C \cap D) \subseteq f(C) \cap f(D)$.
- ב. הוכח שאם f היא חד-חד-ערכית אז $f(C \cap D) = f(C) \cap f(D)$.
- ג. הדגם קבוצות $C, D \subseteq \mathbb{N}$ ופונקציה $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ כך ש- f על וגם $f(C \cap D) \subsetneq f(C) \cap f(D)$.
- ד. הוכח כי: $f(C \cup D) = f(C) \cup f(D)$.

תשובות סופיות:

- (1) א. $\{2, 16, 18\}$ ב. $\{4\}$ ג. $\{4n | n \in \mathbb{N}\}$ ד. ראה סרטון.
ה. $\{4n + 2 | n \in \mathbb{N}\}$ ו. $\mathbb{N}$ ז. $\emptyset$
- (2) א. $\{0, 1, 4, 5\}$ ב. $\{0, 4\}$ ג. $\{0, 4\}$ ד. $\emptyset$ ה. $\{1, 8\}$
- (3) א. לא נכון. ב. לא נכון. ג. לא נכון. ד. לא נכון. ה. נכון.
ו. לא נכון. ז. נכון. ח. לא נכון. ט. נכון. י. נכון.
- (4) הוכחה.
- (5) א. נכון. ב. לא נכון. ג. נכון. ד. לא נכון. ה. נכון.
- (6) הוכחה.
- (7) א. לא נכון. ב. נכון. ג. נכון. ד. לא נכון. ה. לא נכון.
ו. לא נכון. ז. לא נכון. ח. נכון. ט. נכון. י. לא נכון.
יא. לא נכון. יב. לא נכון.
- (8) א. לא נכון. ב. נכון. ג. נכון. ד. לא נכון. ה. נכון.
ו. לא נכון. ז. נכון. ח. נכון. ט. לא נכון. י. נכון.
- (9) הוכחה.

הרכבת פונקציות

שאלות

1) חשבו את ההרכבה $f \circ g$ ו- $g \circ f$ במקרה שהן מוגדרות עבור הפונקציות הנתונות.

א. $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ $f(x) = 2^{x^2-1}$ $g(x) = 3x+7$

ב. $f, g: P(\mathbb{R}) \rightarrow P(\mathbb{R})$ $f(A) = A \cap \mathbb{N}$ $g(A) = \bar{A}$

ג. $f, g: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ $f(n) = \text{The sum of } n\text{'s digits}$ $g(n) = 10n$

ד. $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ $f(x) = \begin{cases} 7 & x < 3 \\ 8 & x \geq 3 \end{cases}$ $g(x) = \begin{cases} 5 & x \geq 1 \\ 2 & x < 1 \end{cases}$

ה. $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ $f(x) = 2x-1$ $g(x) = \begin{cases} 2x-1 & x \leq 3 \\ x & x > 3 \end{cases}$

2) חשבו את ההרכבה הבאה :

א. נגדיר $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ באופן הבא :

$$f(x) = \begin{cases} 4x+3 & x < 5 \\ 2x & x \geq 5 \end{cases}, g(x) = \begin{cases} 3 & x \geq 1 \\ 2 & x < 1 \end{cases}$$

חשבו $g \circ f$.

ב. עבור $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

$$f(x) = \begin{cases} 3x+1 & x \geq 1 \\ 4-3x & x < 1 \end{cases}, g(x) = \begin{cases} x+3 & x < 2 \\ 2x-1 & x \geq 2 \end{cases}$$

חשבו $f \circ g$.

3) בדקו את השוויון $f \circ (g \circ h) = (f \circ g) \circ h$ עבור הפונקציות הבאות :

א. $f, g, h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ $f(x) = 2x+3$, $g(x) = 2x+3$, $h(x) = 2x+3$

ב. $f, g, h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ $f(x) = 3^{x^2-7}$, $g(x) = x^3+1$, $h(x) = \frac{2}{\sqrt{|x|}+3}$

ג. $f, g, h: P(\mathbb{R}) \rightarrow P(\mathbb{R})$ $f(A) = A \cap \mathbb{N}$, $g(A) = \bar{A}$, $h(A) = A \Delta \mathbb{Z}$

שאלת חזרה

יהיו f ו- g פונקציות מ- $\mathbb{N}$ ל- $\mathbb{N}$ המוגדרות כך: $f(n) = \begin{cases} \frac{n+1}{2} & n \text{ odd} \\ n-1 & n \text{ even} \end{cases}$

וכן לכל $n \in \mathbb{N}$, $g(n) = 2n - 1$.

הוכיחו או הפריכו:

א. f היא חח"ע.

ב. g חח"ע.

ג. f על $\mathbb{N}$.

ד. g על $\mathbb{N}$.

ה. $f \circ g$ היא פונקציית הזהות על $\mathbb{N}$.

ו. $g \circ f$ היא פונקציית הזהות על $\mathbb{N}$.

(4) תהי $f: A \rightarrow B$ פונקציה הוכיחו כי $I_B \circ f = f$, $f \circ I_A = f$.
הסיקו כי לכל $f: A \rightarrow A$ מתקיים $f \circ I_A = I_A \circ f = f$ זה מראה כי פונקציית הזהות מתנהגת כמו 1 בכפל.

(5) תהיינה $f: C \rightarrow D$, $g: B \rightarrow C$, $h: A \rightarrow B$ שלוש פונקציות.
הוכיחו כי $(f \circ g) \circ h = f \circ (g \circ h)$.
המשמעות של תכונה זו היא שאפשר למקם סוגרים כרצוננו בדיוק כמו בכפל וחיבור רגילים.

6) תהי $f: A \rightarrow A$.

הוכיחו את הזהויות הבאות.

הערה: בשני הסעיפים האחרונים נתון כי f הפיכה.

א. $f^m \circ f^k = f^{m+k}$

ב. $f^5 \circ f^{-2} = f^{5-2} = f^3$ $f^2 \circ f^{-5} = f^{2-5} = f^{-3}$

ג. הסק מסעיף קודם כי $f^m \circ f^{-k} = f^{m-k}$ והסק כי $f^0 = I$

ד. $(f^m)^k = (f^m)^k = f^{mk}$

ה. $(f^{-1})^{-1} = f$

ו. $(f^{-1})^n = (f^n)^{-1}$

7) תהיינה $f, g: A \rightarrow A$.

הוכיחו כי $\text{Im } f \circ g \subseteq \text{Im } f$ ותנו דוגמה לפונקציות עבורן ההכלה היא הכלה ממש.

8) הוכיחו או הפריכו:

א. אם g היא פונקציה על אז $\text{Im } f \circ g = \text{Im } f$.

ב. אם $\text{Im } f \circ g = \text{Im } f$ אז g היא פונקציה על.

9) תהי $\mathbb{N}$ הטבעיים ותהי $B \subseteq \mathbb{N}$ תת קבוצה סופית לא ריקה נתונה.

נגדיר $f: P(\mathbb{N}) \rightarrow P(\mathbb{N})$ באופן הבא:

$$f(X) = \begin{cases} X \cap B^c & X \cap B \neq \emptyset \\ X \cup B & X \cap B = \emptyset \end{cases}$$

לדוגמה, עבור $B = \{1, 2\}$ מתקיים: $f(\{2, 3\}) = \{3\}$, $f(\{3, 4\}) = \{1, 2, 3, 4\}$.

א. הוכיחו כי אם $X \cap B = \emptyset$ אז $f(f(X)) = X$.

ב. הוכיחו כי אם $B \subseteq X$ אז $f(f(X)) = X$.

ג. הוכיחו כי אם X שייכת לתמונה של הפונקציה אז $f(f(X)) = X$.

ד. האם הפונקציה חח"ע?

ה. האם הפונקציה על?

(10) תהי A קבוצה ו- B תת קבוצה החלקית ממש ל- A . נתונות הפונקציות

$$\begin{aligned} g(X) &= X \cap B \\ f(X) &= A - X \end{aligned} \quad f, g: P(A) \rightarrow P(A)$$

הוכיחו או הפריכו: $f \circ g$ על.

(11) הוכיחו או הפריכו:

הפונקציה $f: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \times \mathbb{R}$, המוגדרת על-ידי $f((x, y)) = (3x + 4y, 4x + 5y)$, היא פונקציה הפיכה.

(12) נגדיר פונקציה $h: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Z}$ כך: $h(x) = 2x$

הוכיחו כי $\{f \circ h \mid f \in \mathbb{N}^{\mathbb{Z}}\} = \mathbb{N}^{\mathbb{N}}$.

(13) מצאו $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ שאינה פונקציה קבועה ואינה זהות כך ש- $f \circ f = f$.

(14) נתונות שלוש פונקציות $f, g, h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$.

הוכיחו כי אם $f \circ g$ חח"ע וגם $g \circ h$ חח"ע וגם $h \circ f$ על, אז f, g, h שלושתן הפיכות.

(15) תהיינה $g: A \rightarrow B$, $f: B \rightarrow C$ שתי פונקציות (בתנאים אלו $f \circ g: A \rightarrow C$).

הוכיחו או הפריכו (במקרה של הפרכה בחרו $A = B = C = \mathbb{N}$):

א. אם f חח"ע וגם g חח"ע אז $f \circ g$ חח"ע.

ב. אם $f \circ g$ חח"ע אז f חח"ע.

ג. אם $f \circ g$ חח"ע אז g חח"ע.

ד. אם f על וגם g על אז $f \circ g$ על.

ה. אם $f \circ g$ על אז f על.

ו. אם $f \circ g$ על אז g על.

ז. אם $f \circ g$ חח"ע וגם g על אז f חח"ע.

ח. אם $f \circ g$ על וגם f חח"ע אז g על.

ט. אם f לא חח"ע וגם g לא על אז $f \circ g$ לא חח"ע או $f \circ g$ לא על.

16 תהי A קבוצה כלשהי ותהיינה $f, g, h: A \rightarrow A$. הוכיחו או הפריכו:

- א. אם $g \circ f = h \circ f$ אז $g = h$.
- ב. אם $g \circ f = h \circ f$ וגם f על אז $g = h$.
- ג. אם $g \circ f = h \circ f$ וגם f חח"ע אז $g = h$.
- ד. אם $f \circ g = f \circ h$ אז $g = h$.
- ה. אם $f \circ g = f \circ h$ וגם f חח"ע אז $g = h$.
- ו. אם $f \circ g = f \circ h$ וגם f על אז $g = h$.

17 תהי A קבוצה ותהי $f: A \rightarrow A$ פונקציה. הוכיחו או הפריכו:

- א. אם $f \circ f = f$ אז $f = I$.
- ב. אם $f \circ f = f$ אז $f = I$ או ש- f היא פונקציה קבועה.
- ג. אם $f \circ f = f$ וגם f חח"ע אז $f = I$.
- ד. אם $f \circ f = f$ וגם f על אז $f = I$.

18 יהיו $f, g, h: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ הפריכו (שאלה קשה מאוד):

- א. אם $f \circ g = f \circ h$ וגם f על וגם g, h חח"ע וגם אז $g = h$.
- ב. אם $g \circ f = h \circ f$ וגם f חח"ע וגם g, h על אז $g = h$.
- ג. אם $f \circ f = I$ או $f \circ f \circ f = I$.
- ד. אם $f \circ f \circ f = f \circ f$ או $f \circ f = f$.

תשובות סופיות

השאלות בנושא זה הן שאלות הוכחה, ראו תשובות מפורטות באתר.

תורת הקבוצות ב'

פרק 2 - עוצמות

תוכן העניינים

1. עוצמות 15

עוצמות

שאלות

1) ללא שימוש בפונקציית שקילות :

א. הוכיחו כי $\mathbb{N}_{\text{odd}} = \{1, 3, 5, \dots\}$ ו- $\mathbb{N}_{\text{even}} = \{0, 2, 4, \dots\}$ שוות עוצמה.

ב. הוכיחו כי $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$ ו- $\mathbb{N}_{\text{even}} = \{0, 2, 4, \dots\}$ שוות עוצמה.

ג. הוכיחו כי $\mathbb{N}^2 = \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ שקולה ל- $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$.

ד. הוכיחו כי $\mathbb{N} \sim \mathbb{Z}$.

ה. הוכיחו כי $\mathbb{Q}^+ \sim \mathbb{N}$, כאשר $\mathbb{Q}^+$ היא קבוצת הרציונליים החיוביים.

ו. הוכיחו כי $[0, 1] \sim [0, 3]$.

ז. הוכיחו כי $[0, 1] \sim [3, 4]$.

ח. הוכיחו כי $[0, 1] \sim [3, 5]$.

ט. הוכיחו כי לכל שתי קבוצות A, B , מתקיים $A \times B \sim B \times A$.

2) הוכיחו את השקילויות הבאות באמצעות פונקציות חח"ע ועל בין הקבוצות :
(פונקציית שקילות)

א. $(0, 2010) \sim (0, \infty)$

ב. $[1, 3) \cup [4, 8] \sim [0, 1]$

ג. $\{(x, y) \mid x^2 + y^2 = 1\} \sim \{(x, y) \mid x^2 + y^2 = 4\}$

ד. $\mathbb{N} \sim \mathbb{Z}$

ה. $\mathbb{N} \times \{0, 1\} \sim \mathbb{N}$

ו. $(-1, 1) \sim \mathbb{R}$

ז. $\mathbb{N} \times [0, 1) \sim [0, \infty)$

ח. $(0, 1] \sim (0, 1)$

ט. $[0, 1) \times [0, 1) \sim [0, 1)$

י. $\{0, 1\}^{\mathbb{N}} \sim \{0, 1\}^{\mathbb{N}_{\text{even}}} \times \{0, 1\}^{\mathbb{N}_{\text{odd}}}$

יא. $\{0, 1\}^{\mathbb{N}} \times \{0, 1\}^{\mathbb{N}} \sim \{0, 1, 2, 3\}^{\mathbb{N}}$

יב. $\{0, 1\}^A \sim P(A)$

הגדרה: קבוצה A היא אינסופית אם קיימת קבוצה שחלקית לה ממש ושקולה לה.

היעזרו בהגדרה זו לפתרון שאלות 3-4.

(3) תהיינה A, B קבוצות. הוכיחו:

- א. אם A אינסופית, אז $A \cup B$ אינסופית.
- ב. אם A אינסופית וגם $A \subseteq B$, אז B אינסופית.

(4) תהיינה A, B קבוצות, ונתון כי $A \cap B$ שקולה ל- A . הוכיחו או הפריכו:

- א. אם $A \cup B \neq B$, אז A אינסופית.
- ב. אם $A \cup B \neq A$, אז B אינסופית.
- ג. אם A סופית, אז $A \subseteq B$.

(5) נגדיר יחס $\sim$ בין קבוצות באופן הבא: $(A, B) \in \sim \Leftrightarrow A, B$ שוות עוצמה. הוכיחו כי $\sim$ הוא יחס שקילות.

(6) הוכיחו:

- א. $\aleph_0 + n = \aleph_0$, כאשר $n \in \mathbb{N}$.
- ב. $\aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0$.
- ג. $3 \cdot \aleph_0 \cdot 2 \cdot \aleph_0 = \aleph_0$.
- ד. $n \cdot \aleph_0 = \aleph_0$, כאשר $n \in \mathbb{N}$.
- ה. $\aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0$.
- ו. $\aleph_0^n = \aleph_0$ (היעזרו במשפט קב"ש).
- ז. אם $\aleph_0 \leq \alpha$, אז $\alpha = \alpha + 3$.
- ח. $2^{\aleph_0} = \aleph_0^{\aleph_0}$.
- ט. $\aleph_0^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0}$.
- י. $\aleph_0^{\aleph_0} > 2^{\aleph_0}$ (הדרכה: הסיקו מהסעיף הקודם כי $\aleph_0^{\aleph_0} > \aleph_0^{\aleph_0}$).

7) גדירות היטב של אריתמטיקה של עוצמות.

- א. תהיינה k_1, k_2 עוצמות ויהיו A, B קבוצות, כך ש- $|A| = k_1, |B| = k_2$.
 נגדיר פעולת הפרש בין עוצמות באופן הבא: $k_1 - k_2 = |A - B|$.
 פעולה זו אינה מוגדרת היטב, כלומר התוצאות של ההפרש משתנות בהתאם לקבוצה ולא בהתאם למחלקה.
 הציגו 2 דוגמאות לקבוצות שעוצמתן $\aleph_0$, אך עוצמת ההפרש שונה בכל אחת מהדוגמאות.
 ב. הוכיחו כי אם מתקיים $B \cap D = \emptyset \wedge A \cap C = \emptyset \wedge C \sim D \wedge A \sim B$, אז $(A \cup C) \sim (B \cup D)$.
 ג. הוכיחו כי אם $C \sim D \wedge A \sim B$, אז $A \times C \sim B \times D$.

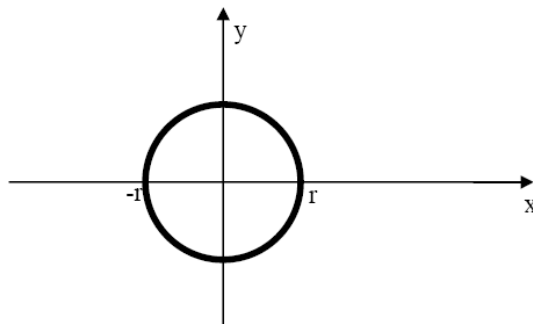
8) הוכיחו כי לכל שלוש קבוצות A, B, C מתקיים:

- א. $A \times (B \times C) \sim (A \times B) \times C$.
 ב. אם $B \cap C = \emptyset$, אז $A^B \times A^C \sim A^{(B \cup C)}$, והראו כי $B \cap C = \emptyset$ הכרחית.
 ג. $(A \times B)^C = A^C \times B^C$.
 ד. $(A^B)^C \sim A^{B \times C}$.

9) הוכיחו כי הקבוצה $A = \mathbb{Q}$, קבוצת המספרי הרציונליים,

$$B = \{f(x) = ax^2 + bx + c : a, b, c \in \mathbb{Q}\} \text{ שוות עוצמה.}$$

- 10) מעגל במישור ברדיוס r (כאשר $r > 0$ ממשי), שמרכזו בראשית הצירים, הוא קבוצת כל הנקודות (x, y) במישור המקיימות את המשוואה $x^2 + y^2 = r^2$, כמודגם בציור שלהלן.
 הוכיחו שלכל $r > 0$, עוצמת מעגל ברדיוס r שמרכזו בראשית הצירים היא $\aleph_0$.



11) הוכיחו או הפריכו:

- תהיינה A, B שתי קבוצות כלשהן. אם $A \oplus B$ היא קבוצה מעוצמה $\aleph_0$ וגם $A \cap B$ היא קבוצה מעוצמה $\aleph_0$, אז $A \cup B$ היא קבוצה מעוצמה $\aleph_0$.

12 נגדיר $P_2(\mathbb{N}) = \{A \subseteq \mathbb{N} \mid |A| = 2\}$. כלומר, $P_2(\mathbb{N})$ היא קבוצת כל תתי-קבוצות בנות שני אברים של הטבעיים. מהי עוצמת $P_2(\mathbb{N})$? הוכיחו.

13 נסמן ע"י $\mathbb{N}$ את קבוצת המספרים הטבעיים $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$ וב- $\mathbb{R}^+$ את הממשיים החיוביים.

א. מה העוצמה של הקבוצה $A_4 = \{a \in \mathbb{R} \mid a^4 \in \mathbb{N}\}$?

למשל, $1, \sqrt{5}, 2, \sqrt[4]{7} \in A_4$.

ב. מה העוצמה של $A = \{a \in \mathbb{R}^+ \mid \exists k \in \mathbb{N}, a^k \in \mathbb{N}\}$?

למשל, $1, \sqrt{5}, 2, \sqrt[4]{7}, \sqrt[100]{3}, \sqrt[3]{4} \in A$.

ג. הראו שקבוצה של מעגלים זרים במישור ניתנת לשידוך לקבוצה חלקית של טבעיים.

14 תהי $A = \left\{x \in \mathbb{R} \mid \forall n \in \mathbb{N} \left(x < \frac{1}{n}\right) \wedge \exists n \in \mathbb{N} \left(x > -\frac{1}{n}\right)\right\}$. מה עוצמת A ?

15 תהי $A = \{(a, b) \mid a \in \mathbb{R}, b \in \mathbb{R}, a < b\}$. כלומר, A היא קבוצת כל הקטעים הפתוחים ב- $\mathbb{R}$. מהי עוצמת A ? הוכיחו.

16 נגדיר יחס S מעל $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ באופן הבא: $(x_1, x_2) S (y_1, y_2) \Leftrightarrow \lfloor x_1 \rfloor = \lfloor y_1 \rfloor$. כאשר S יחס שקילות (אין צורך להוכיח זאת). הוכיחו כי קבוצת המנה $(\mathbb{R} \times \mathbb{R}) / S$ היא מעוצמה $\aleph_0$.

17 הוכיחו או הפריכו: לכל קבוצה A מתקיים $A \times \mathbb{N} \sim A \times (\mathbb{N} - \{1\})$.

18 הוכיחו כי עוצמת הקבוצה $(1, 2) \cup (2, 3) \cup (3, 4) \cup \dots = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (n, n+1)$ היא $\aleph_0$.

19 תהי A קבוצה מעוצמה $\aleph_0$ ויהי E יחס שקילות מעל A . הוכיחו כי $|E| = \aleph_0$.

(20) הוכיחו או הפריכו :

לכל זוג קבוצות A, B מתקיים $(A \times B)^c \sim (A^c \times B) \cup (A \times B^c)$.

(21) פונקציית הסינוס $\sin: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ היא פונקציה מחזורית בעלת מחזור של 2π .

כלומר, $\sin(x + 2\pi) = \sin(x)$ לכל $x \in \mathbb{R}$.

עבור $0 \leq x \leq 2\pi$ מתקיים $\sin x = 0 \Leftrightarrow x \in \{0, \pi, 2\pi\}$.

מצאו את עוצמת הקבוצה $O_{\sin} = \{x \in \mathbb{R} \mid \sin x = 0\}$. הוכיחו.

(22) האם קיימת קבוצה A , כך ש- $|P(A)| = \aleph_0$? הוכיחו.

(23) הוכיחו כי קבוצה בת-מניה של ישרים לא יכולה לכסות את המישור $\mathbb{R}^2$.

(24) קבעו האם לקבוצה אחת עוצמה גדולה יותר, או שהן שוות:

א. $\{0,1\}^{\mathbb{R}}$, $\{0,1\}^{P(\mathbb{R})}$

ב. $P(\mathbb{R})^{\mathbb{N}}$, $P(\mathbb{R})^{P(\mathbb{N})}$

ג. $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$, $\mathbb{N}^{\mathbb{R}}$

(25) חשבו את עוצמת הקבוצות הבאות:

א. קבוצת כל הסדרות האינסופיות של הטבעיים.

ב. קבוצת כל הסדרות האינסופיות העולות ממש של הטבעיים.

ג. קבוצת כל הסדרות הבינאריות האינסופיות.

ד. קבוצת כל הסדרות הבינאריות האינסופיות, שאין בהן את הרצף 10.

ה. קבוצת כל הסדרות הבינאריות האינסופיות, שאין בהן את הרצף 00.

ו. קבוצת כל הסדרות הבינאריות האינסופיות, שאין בהן את הרצף 10 וגם את הרצף 00.

ז. קבוצת כל היחסים מעל $\mathbb{N}$.

ח. קבוצת כל היחסים הרפלקסיביים מעל $\mathbb{N}$.

לפתרונות מלאים בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il