

מתמטיקה בדידה (5112)



תוכן העניינים

1	1. לוגיקה
15	2. תורת הקבוצות
29	3. יחסים

מתמטיקה בדידה (5112)

פרק 1 - לוגיקה

תוכן העניינים

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

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

ג. β 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 α, β, γ פסוקים לאו דווקא אטומים.

הוכיחו או הפריכו כל אחת מהטענות הבאות:

א. אם α סתירה וגם $\alpha \Rightarrow \beta \vee \gamma$, אז $\beta \Rightarrow \neg \gamma$.

ב. אם α 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 α , פסוק אטומי או מורכב, נגדיר את הקבוצה $F_\alpha = \{\gamma \mid \alpha \Rightarrow \gamma\}$.

כלומר, F_α היא קבוצת כל הפסוקים שנובעים טאוטולוגית מהפסוק α .

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 $(, \exists, \forall, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow, <, >, \neq, =, \subseteq, \supseteq, \in$) 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 $f, g, A^B, B^A, \in, (, \exists, \forall$.

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 $B \subseteq A$.

מתמטיקה בדידה (5112)

פרק 2 - תורת הקבוצות

תוכן העניינים

15	1. מבוא לתורת הקבוצות
16	2. פעולות על קבוצות
18	3. דיאגרמת ון
20	4. קריאת קבוצות
22	5. שאלות הוכחה
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.



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

$$(1) \text{ א. דרך 1: } \left\{ n \in \mathbb{N} \mid \frac{n+1}{2} \in \mathbb{N} \right\}, \text{ דרך 2: } \{2n-1 \mid n \in \mathbb{N}\}.$$

$$\text{ב. דרך 1: } \{n \in \mathbb{N} \mid \sqrt{n} \in \mathbb{N}\}, \text{ דרך 2: } \{n^2 \mid n \in \mathbb{N}\}.$$

$$\text{ג. דרך 1: } \{n \in \mathbb{N} \mid \sqrt{n} \notin \mathbb{N}\}, \text{ דרך 2: } \{n \mid n \in \mathbb{N} \wedge \forall k \in \mathbb{N} n \neq k^2\}.$$

$$\text{ד. דרך 2: } \{\sqrt{n} \mid n \in \mathbb{N}\}.$$

$$\text{ה. דרך 1: } \{n \in \mathbb{N} \mid \exists k \in \mathbb{N} n = 2^k\}, \text{ דרך 2: } \{2^n \mid n \in \mathbb{N}\}.$$

$$(2) \text{ א. } C = \{2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, \dots\}$$

$$\text{ב. } \mathbb{Z} - \{\pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6, \dots\}$$

$$\text{ג. } \mathbb{Z} - \{20, 21, 22, 23, \dots\}$$

$$\text{ד. } \{2, 11, 26, 74, 107, 146, \dots\}$$

$$\text{ה. } \mathbb{Z} - \{9, 10, 11, 12, \dots\}$$

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

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.

דרך השלילה

שאלות

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

מתמטיקה בדידה (5112)

פרק 3 - יחסים

תוכן העניינים

- 29 1. יחסים - מושגי יסוד
- 30 2. יחס רפלקסיבי, סימטרי, טרנזיטיבי, אנטי-יחס, סגור
- 34 3. יחס שקילות, קבוצת מנה, מחלקת שקילות
- 37 4. יחסי סדר
- 38 5. שאלות שמשלבות יחסים ופונקציות

לנושא זה לא קיים ספר פרק

יחס רפלקסיבי, סימטרי, טרנזיטיבי, אנטי-יחס, סגור

שאלות

(1) עבור $A = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ נגדיר יחס T באופן הבא: $\langle x, y \rangle \in T \Leftrightarrow x \cdot y \leq 23$.
רשום מדגם בן שלושה זוגות של איברים ביחס ובדוק האם T רפלקסיבי, סימטרי, אנטי סימטרי (חלש) טרנזיטיבי.

(2) נתון היחס T הבא מעל $A = \{1, 2, 3, 4\}$
 $T = \{\langle 2, 3 \rangle, \langle 3, 2 \rangle, \langle 2, 1 \rangle, \langle 1, 2 \rangle, \langle 4, 4 \rangle, \langle 3, 3 \rangle, \langle 1, 1 \rangle, \langle 2, 2 \rangle\}$
האם T רפלקסיבי? אם לא רפלקסיבי אז הוסף או החסר מספר מינימאלי של זוגות כדי שהתשובה תהיה חיובית.
האם T סימטרי? אם לא אז סימטרי הוסף או החסר מספר מינימאלי של זוגות כדי שהתשובה תהיה חיובית.
האם T טרנזיטיבי? אם לא טרנזיטיבי אז הוסף או החסר מספר מינימאלי של זוגות כדי שהתשובה תהיה חיובית.
הוסף או החסר מספר מינימאלי של זוגות כדי ש- T יהיה גם רפלקסיבי, גם סימטרי, וגם טרנזיטיבי.

(3) נגדיר יחס T מעל \mathbb{Z} באופן הבא: $T = \{\langle a, b \rangle \mid a \cdot b \in \mathbb{Z}_{\text{even}}\}$

א. רשום שלוש זוגות ביחס ושלושה זוגות שאינם ביחס.
ב. בדוק האם T רפלקסיבי, סימטרי, טרנזיטיבי.

(4) נתון יחס S מעל \mathbb{Z} המוגדר באופן הבא: (יש ל- x, y אותה הזוגיות)
 $\langle x, y \rangle \in S \Leftrightarrow$ (כלומר שניהם זוגיים או שניהם אי זוגיים)
הוכח כי S רפלקסיבי, סימטרי וטרנזיטיבי.

(5) נתון יחס R מעל קבוצה A .
הוכיחו כי $R^2 \subseteq R$ אם R טרנזיטיבי.

(6) נתון יחס S מעל \mathbb{Z} המוגדר באופן הבא: $\langle x, y \rangle \in S \Leftrightarrow 3 \mid x - y$.
הוכח כי S רפלקסיבי, סימטרי וטרנזיטיבי.

7 נתונים היחסים הבאים מעל $A = \{1, 2, 3\}$

$$R_1 = \{(1, 2), (2, 1), (2, 3)\} \quad R_2 = \{(1, 2), (2, 2), (2, 3), (2, 1)\}$$

עבור כל אחד מארבעת היחסים $R_1, R_2, R_1 \cap R_2, R_1 \cup R_2$, קבעו האם הוא רפלקסיבי, סימטרי או טרנזיטיבי. (במקרה של הפרכה הביאו דוגמה מתאימה)

8 עבור $A = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, נגדיר S מעל A כך:

$$S = \{ \langle 1, 1 \rangle, \langle 1, 2 \rangle, \langle 1, 5 \rangle, \langle 2, 2 \rangle, \langle 2, 6 \rangle, \langle 3, 1 \rangle, \langle 6, 3 \rangle \}$$

- בדקו אם S רפלקסיבי, סימטרי, אנטי-סימטרי חלש, חזק וטרנזיטיבי.
- רשמו את היחסים I_A ו- S^{-1} .
- רשמו את כל החזקות השונות של S .
- רשמו את היחס $R = \{1, 3, 6\}^2 \cup \{2, 4\}^2 \cup \{5\}^2$, כקבוצה של זוגות.
- היחס R הוא יחס שקילות. רשמו את מחלקות השקילות השונות ואת קבוצת המנה.

9 לגבי כל אחד מהיחסים הבאים, רשמו שלושה זוגות שנמצאים ביחס, ונמקו מדוע הם ביחס. כתבו שלושה זוגות שאינם ביחס, ונמקו מדוע אינם ביחס. כמו כן, קבעו האם היחס הוא רפלקסיבי, אנטי רפלקסיבי, סימטרי, א-סימטרי חלש, חזק, וטרנזיטיבי.

- יחס $@$ מעל \mathbb{R} , המוגדר באופן הבא: $(x, y) \in @ \Leftrightarrow |x - y| \leq 100$.
- יחס \clubsuit מעל \mathbb{Z} , המוגדר באופן הבא: $(x, y) \in \clubsuit \Leftrightarrow 3|x - y|$.
- היחס \subseteq מעל $P(\mathbb{N})$, המוגדר באופן הבא: $A \subseteq B \Leftrightarrow (A, B) \in \subseteq$.
- היחס שרגא מעל \mathbb{R} , המוגדר באופן הבא: שרגא $(x, y) \in$ שרגא $\Leftrightarrow x + y \geq x \cdot y$.
- יחס T מעל \mathbb{Z} , המוגדר באופן הבא: $(x, y) \in T \Leftrightarrow x^2 + y \geq 1$.

10 תהי \mathbb{N}_+ הקבוצה $\mathbb{N} \setminus \{0\}$, ונגדיר עליה יחס R כך: $aRb \Leftrightarrow [a = b^b \vee b = a^a]$.

- האם $|R|$? האם R רפלקסיבי?
- האם R סימטרי?
- האם R אנטי-סימטרי?
- האם R טרנזיטיבי?

11 נגדיר יחס R על הקבוצה $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, על ידי $\langle f, g \rangle \in R$ אם ורק אם קיימת $A \subseteq \mathbb{N}$ אינסופית, כך ש- $f(n) = g(n)$ לכל $n \in A$.

א. האם R רפלקסיבי?

ב. האם R אנטי-סימטרי?

ג. האם R טרנזיטיבי?

12 בדקו האם היחס הוא רפלקסיבי, סימטרי, אנטי-סימטרי וטרנזיטיבי:

א. נגדיר יחס T מעל \mathbb{R} , כך: $aTb \Leftrightarrow a < b+1$.

ב. נגדיר יחס P מעל $P(\mathbb{N})$, כך: $APB \Leftrightarrow (A = B \vee A \cup \{1,2\} = B)$.

13 מצאו אלו מהתכונות: רפלקסיביות, אנטי-רפלקסיביות, סימטריות, אנטי-סימטריות חלשה, אנטי סימטריות חזקה וטרנזיטיביות, מקיים כל אחד

מהיחסים הבאים, מעל הקבוצות $\mathbb{Z}, \mathbb{N}, A = \{3,5,7,9\}$.

א. $xRy \Leftrightarrow \exists m \in \mathbb{Z}_{\text{odd}} x = my$

ב. $xsy \Leftrightarrow \exists m \in \mathbb{Z}_{\text{even}} x = my$

ג. $xRy \Leftrightarrow \exists m \in \mathbb{Z}_{\text{odd}} (x = my \vee y = mx)$

14 תהי $A = \{1,2,3,4\}$ ויהי R יחס מעל A .

איזו טענה נכונה:

א. $R = \{(1,1), (2,2), (3,3)\}$ הוא יחס הזהות מעל A .

ב. $R = \{(1,1), (1,2), (1,3), (1,4)\}$ הוא היחס המלא מעל A .

ג. אם R הוא היחס המלא מעל A , אז R^{-1} הוא היחס המלא מעל A .

ד. אם R הוא יחס הזהות מעל A , אז R^{-1} הוא יחס הזהות מעל A .

ה. יהי R יחס מעל $A = \{1,2\}$.

האם יתכן כי R אינו טרנזיטיבי? נמקו.

15 יהי R יחס מעל A . הוכיחו:

א. אם $I_A \subseteq R$, אז R רפלקסיבי.

ב. אם $R = R^{-1}$, אז R סימטרי.

ג. אם $R^2 \subseteq R$, אז R טרנזיטיבי.

ד. אם $R \cap R^{-1} \subseteq I_A$, אז R אנטי-סימטרי.

16) תהי $A = \{1, 2, 3, 4\}$ ויהי $R = \{(1, 2), (2, 1), (1, 3)\}$ יחס מעל A .

- א. רשמו את הסגור הרפלקסיבי של R .
- ב. רשמו את הסגור הסימטרי של R .
- ג. רשמו את הסגור הטרנזיטיבי של R .

17) תהי A קבוצה ו- R יחס מעל A הוכיחו או הפריכו כל אחת מהטענות הבאות. בכל מקרי ההפרכה תנו דוגמה נגדית מינימלית. בדקו האם יש בדוגמתך פרטים מיותרים והסר אותם.

- א. אם R סימטרי, אז R טרנזיטיבי.
- ב. אם R אנטי סימטרי חלש, אז R טרנזיטיבי.
- ג. אם R סימטרי וגם אנטי סימטרי חלש, אז R טרנזיטיבי.
- ד. אם R סימטרי וגם אנטי סימטרי חלש, אז $R = \emptyset$.
- ה. אם R סימטרי וגם אנטי סימטרי חזק, אז $R = \emptyset$.
- ו. אם R טרנזיטיבי וסימטרי, אז R רפלקסיבי.
- ז. אם R טרנזיטיבי ואנטי רפלקסיבי, אז R אנטי סימטרי חזק.
- ח. אם R טרנזיטיבי ולא סימטרי, אז R אנטי סימטרי חלש.

18) יהי R יחס סימטרי וטרנזיטיבי מעל A , כך ש- $aRb \implies a \in A \wedge b \in A$. הוכיחו כי R רפלקסיבי.

19) הוכיחו או הפריכו: לכל קבוצה A ולכל יחס רפלקסיבי R מעל A קיימות קבוצות $B, C \subseteq A$, כך ש- $R = B \times C$.

20) יהי S יחס אנטי רפלקסיבי וטרנזיטיבי מעל קבוצה A , ונניח שקיים $x, y \in A$, עבורו $(x, y) \in S$. הוכיחו כי לכל $z \in A$ מתקיים $(y, z) \notin S$.

21) נתון כי R יחס על A וכן $R \cap I_A = \emptyset$ (אנטי-רפלקסיבי), וכן $a, b \in A$, לא בהכרח שונים זה מזה, המקיימים $(a, b) \in R^2$ וגם $(b, a) \in R^2$. הוכיחו שקיימים $c, d \in A$ (לא בהכרח שונים זה מזה), שאף אחד מהם אינו שווה ל- a ואינו שווה ל- b , המקיימים $(c, d) \in R^2$ וגם $(d, c) \in R^2$.

יחס שקילות, קבוצת מנה, מחלקת שקילות

שאלות

- 1) עבור $A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ נגדיר יחס S על A כך: $xSy \Leftrightarrow x \cdot y \geq 2$.
- א. האם $S^2 \setminus S = \emptyset$?
 ב. האם S יחס שקילות על A ?
- 2) עבור $A = \{1, 2, 3\}$ נגדיר יחסים R, S מעל A כך:
- $$R = \{\langle 1, 2 \rangle, \langle 3, 2 \rangle\}, \quad S = \{\langle 1, 2 \rangle, \langle 2, 2 \rangle, \langle 2, 3 \rangle, \langle 3, 1 \rangle\}$$
- א. חשבו את היחסים RS ו- SR , ובדקו האם הם יחסי שקילות.
 ב. האם היחסים S ו- S^2 אנטי-סימטריים? נמקו.
- 3) תהי S קבוצה שאיבריה הן קבוצות, ונגדיר יחס בינארי E מעל S באופן הבא:
- $$(A \subseteq B \wedge B \subseteq A) \Leftrightarrow AEB$$
- הוכיחו או הפריכו: E יחס שקילות.
- 4) נגדיר יחס בינארי E מעל $\mathbb{Z} - \{0, 1\}$ (קבוצת השלמים ללא 0 ו-1) באופן הבא:
- $$aEb \Leftrightarrow ab \geq -1$$
- הוכיחו כי E יחס שקילות ותנו תיאור מפורש של מחלקות השקילות שלו.
- 5) תהי $A = \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ קבוצת כל הזוגות הסדורים של המספרים הטבעיים, ויהי $R \subseteq A^2$ יחס המוגדר על ידי $(m_1, n_1) R (m_2, n_2) \Leftrightarrow m_1 - m_2 = n_1 - n_2$.
- א. הוכיחו כי R הינו יחס שקילות ב- A .
 ב. תארו באופן גרפי את מחלקות השקילות $[(1, 1)]_R, [(1, 2)]_R, [(2, 1)]_R$.
- 6) נתון היחס R מעל \mathbb{N} .
- $$xRy \Leftrightarrow (6 \mid x - y) \vee (3 \nmid x \cdot y)$$
- מצאו את מחלקות השקילות ואת קבוצת המנה.

7) נגדיר יחס שקילות S מעל \mathbb{R} באופן הבא: $xSy \Leftrightarrow (x = y = 0) \vee (xy > 0)$
 ונגדיר יחס שקילות T מעל \mathbb{R} באופן הבא: $xTy \Leftrightarrow (x^2 - 9)S(y^2 - 9)$
 (אין צורך להוכיח כי מדובר ביחסי שקילות)
 כתבו במפורש את קבוצת המנה \mathbb{R}/T , ונמקו בקצרה.

8) יהי R יחס שקילות על A .
 נאמר כי R אוקלידי, אם עבור כל $a, b, c \in A$ מתקיים התנאי:
 $[(a, b) \in R \wedge (a, c) \in R] \Rightarrow (b, c) \in R$
 הוכיחו או הפריכו:
 א. אם R יחס שקילות, אז הוא אוקלידי.
 ב. אם R רפלקסיבי ואוקלידי, אז הוא יחס שקילות.

9) נתון כי R יחס שקילות על A , וכן $A \in P(B) \setminus \{B\}$.
 האם מהנתון נובע כי R יחס שקילות על B , או שאינו יחס שקילות על B ?

10) תהי A קבוצה ויהיו R, S יחסים מעל A .
 הוכיחו או הפריכו את הטענות הבאות (הפרכה = דוגמה מינימלית):
 א. אם R, S רפלקסיביים, אז $R \cap S$ רפלקסיבי.
 ב. אם R, S רפלקסיביים, אז $R \cup S$ רפלקסיבי.
 ג. אם R, S סימטריים, אז $R \cap S$ סימטרי.
 ד. אם R, S סימטריים, אז $R \cup S$ סימטרי.
 ה. אם R, S טרנזיטיביים, אז $R \cap S$ טרנזיטיבי.
 ו. אם R, S טרנזיטיביים, אז $R \cup S$ טרנזיטיבי.
 ז. אם R, S יחסי שקילות, אז $R \cap S$ יחס שקילות.
 ח. אם R, S יחסי שקילות, אז $R \cup S$ יחס שקילות.
 ט. אם R, S אנטי סימטריים חלש, אז $R \cap S$ אנטי סימטרי חלש.
 י. אם R, S אנטי סימטריים חלש, אז $R \cup S$ אנטי סימטרי חלש.

11) רשמו במפורש את כל יחסי השקילות E מעל $S = \{a, b, c, d\}$
 המקיימים $|S/E| = 2$ וכל מחלקות השקילות הן שוות עוצמה.
 הערה: יש להציג כל יחס כבת קבוצה מפורשת של $S \times S$.

- 12** יהי S יחס המוגדר מעל $P(\mathbb{N})$ קבוצת החזקה של \mathbb{N} באופן הבא:
- $\min A = \min B \Leftrightarrow ASB$, כאשר $\min A$ הוא המספר הקטן ביותר ב- A .
- א. הוכיחו כי S הינו יחס שקילות.
- ב. נסמן ב- K את קבוצת מחלקות השקילות של היחס S .
בנו פונקציה $F: K \rightarrow \mathbb{N}$ חח"ע ועל.

- 13** יהיו R, S יחסי שקילות מעל A .
- הוכיחו כי $R \Delta S$ לא יחס שקילות מעל A .

- 14** יחס R מעל A נקרא סוגר משולשים, אם מתקיים $(aRb \wedge bRc) \rightarrow cRa$
- לכל $a, b, c \in A$.

- א. הוכיחו כי יחס רפלקסיבי וסוגר משולשים הוא יחס שקילות.
- ב. הוכיחו כי אם R סימטרי, סוגר משולשים ואינו ריק,
אז R אינו אנטי רפלקסיבי.

- 15** יחס השקילות S על $P(N)$ מוגדר כך: $S\{(A, B) \mid A \cap \{1, 2, 3\} = B \cap \{1, 2, 3\}\}$.
- א. מהי העוצמה של מחלקת השקילות $[\{4, 7, 9\}]_S$?
- ב. כמה מחלקות שקילות יש?

יחסי סדר

שאלות

1) הוכיחו כי היחס R , המוגדר מעל הקבוצה $A = \{2^k \mid k \in \mathbb{N}\}$, על ידי $aRb \Leftrightarrow a|b$, הוא יחס סדר מלא.

2) נגדיר יחס בינארי D מעל הקבוצה $\mathbb{R}^2 = \{(a,b) \mid a \in \mathbb{R}, b \in \mathbb{R}\}$ באופן הבא: $(a_1, b_1)D(a_2, b_2) \Leftrightarrow (a_1 \geq a_2) \wedge (a_1 + b_1 \geq a_2 + b_2)$. הוכיחו כי D יחס סדר חלש שאינו מלא.

3) נגדיר יחס R מעל הקבוצה $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ באופן הבא: $(a,b)R(c,d) \Leftrightarrow (a \leq c \wedge b \leq d)$.

א. הוכיחו כי R יחס סדר חלש שאינו מלא.

ב. מצאו תת קבוצה אינסופית של $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$, שעליה היחס R הוא מלא.

4) נגדיר יחס סדר (חלש) S מעל \mathbb{R} באופן הבא: $xSy \Leftrightarrow \neg((\lfloor x \rfloor = \lfloor y \rfloor \rightarrow y < x))$ (אין צורך להוכיח שמדובר ביחס סדר).

כתבו במפורש את כל האיברים המינימליים של S .

תזכורת: $x \in A$ נקרא מינימלי ביחס סדר R , אם $\forall y \in A ((y \neq x) \rightarrow \neg(yRx))$.

5) יהי R יחס סדר חלש מעל A , ויהי S יחס סדר חלש מעל B . הוכיחו כי אם $A \cap B = \emptyset$, אז $R \cup S$ יחס סדר חלש מעל $A \cup B$.

6) תהי A קבוצה לא-ריקה ותהי K קבוצת כל יחסי השקילות מעל A (סדורה חלקית ביחס להכלה).

א. הראו שיש ב- K איבר קטן ביותר וגדול ביותר, והוכיחו שהם שייכים

ל- K ואכן מקיימים את הנדרש.

ב. תהי $A = \{1, 2, 3, 4\}$.

נסלק מ- K את האיבר הקטן ביותר והגדול ביותר שנמצאו בסעיף א, ונסמן את הקבוצה החדשה שהתקבלה ב- L (שאף היא סדורה חלקית ביחס להכלה).

תנו דוגמה לשני איברים מינימליים ב- L והוכיחו שהם מינימליים,

ותנו דוגמה לשני איברים מקסימליים ב- L והוכיחו שהם מקסימליים.

ג. הוכיחו שאין ב- L איבר קטן ביותר וגדול ביותר.

שאלות שמשלבות יחסים ופונקציות

שאלות

- (1) יחס T מעל $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ מוגדר באופן הבא: $fTg \Leftrightarrow f \circ g = g \circ f$.
הוכיחו או הפריכו: יחס שקילות.
- (2) תהיינה A, B שתי קבוצות לא ריקות ויהיו $<_A, <_B$ יחסי סדר חזקים ומלאים (משוויים) מעל A, B בהתאמה.
תהי $f: A \rightarrow B$ פונקציה המקיימת אם $a_1 <_A a_2$, אז $f(a_1) <_B f(a_2)$.
הוכיחו כי f חח"ע אך אינה בהכרח על.
- (3) יהי T יחס המוגדר מעל הקבוצה $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ באופן הבא:
 $fTg \Leftrightarrow$ קיים $x \in \mathbb{R}$, כך ש- $f(x) = g(x)$.
האם T יחס שקילות?
- (4) תהי $F: A \rightarrow A$ פונקציה, ונגדיר יחס R מעל A כך: $aRb \Leftrightarrow f(a) = b$.
נתון ש- R סימטרי וטרנזיטיבי.
הוכיחו כי F היא פונקציית הזהות.
- (5) נגדיר יחס S על הקבוצה $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ כך: $(x_1, x_2)S(y_1, y_2) \Leftrightarrow x_1^2 - x_2 = y_1^2 - y_2$.
 S יחס שקילות (אין צורך להוכיח).
הוכיחו כי קבוצת המנה $S \setminus \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ שוות עוצמה לקבוצה \mathbb{R} .
- (6) תהי A קבוצה לא ריקה ותהי A^A קבוצת כל הפונקציות מ- A ל- A .
נגדיר יחס E מעל A^A באופן הבא: לכל $f, g \in A^A$, אם ורק אם קיימת $h \in A^A$ הפיכה, כך ש- $f = h \circ g$.
א. הוכיחו כי E יחס שקילות.
ב. יהי $c \in A$, כלשהו, ותהי $f_c: A \rightarrow A$ הפונקציה הקבועה המוגדרת על ידי $\forall x \in A \quad f_c(x) = c$.
תארו את מחלקת השקילות של f_c ביחס ל- E (תנו תיאור מפורש ככל הניתן) ונמקו.

(7) תהי J קבוצת כל היחסים מעל A , ו- E קבוצת כל יחסי השקילות מעל A .
נגדיר פונקציה $F: J \times E \rightarrow J$ באופן הבא: $F(R, S) = R \cap S$.
הוכיחו כי F על.

(8) תהי A קבוצה סופית ותהי B תת קבוצה של A .
נסמן ב- F את קבוצת כל הפונקציות מ- A ל- $\{0,1\}$.
נגדיר יחס E מעל F באופן הבא: $F = \{(f, g) \mid B \subseteq \{x \mid f(x)g(x)\}\}$.
א. בהינתן $A = \{1, 2, 3\}$ ו- $B = \{1, 2\}$, תנו דוגמה ל- $f, g, h \in F$ שונים,
כך ש- $(f, h) \notin E, (f, g) \in E$.
ב. הוכיחו כי E יחס שקילות.
ג. מה עוצמת קבוצת המנה F/E ? נמקו.

(9) תהי $A = \{1, 2, 3\}$ ותהי M קבוצת כל היחסים מעל A ,
נגדיר פונקציה $t: M \rightarrow M$, המתאימה לכל יחס את הסגור הטרנזיטיבי שלו.
א. t חח"ע.
ב. t על.
ג. לכל $R \in M$ מתקיים $t(R^2) = (t(R^2))^2$.
ד. לכל $R \in M$ מתקיים $t(t(R)) = t(R)$.