

# אלגברה ליניארית

פרק 6 - מרחבים וקטורים

תוכן העניינים

1. מרחבים ותת-מרחבים..... 1
2. צירופים ליניאריים, פרישה ליניארית ותלות ליניארית..... 5
3. בסיס ומימד, דרגה של מטריצה..... 9
4. חיתוך, סכום וסכום ישר של תת-מרחבים..... 13
5. וקטור קואורדינטות ומטריצת מעבר מבסיס לבסיס..... 18
6. תרגילי תיאוריה מתקדמים..... 20

## מרחבים ותת-מרחבים

### סימון

- $R^n$  - המרחב הווקטורי של כל הווקטורים הממשיים ממימד  $n$  מעל השדה הממשי  $R$ .
- $M_n[R]$  - המרחב הווקטורי של כל המטריצות הריבועיות מסדר  $n$  מעל השדה הממשי  $R$ .
- $P_n[R]$  - המרחב הווקטורי של כל הפולינומים ממעלה קטנה או שווה ל- $n$  מעל השדה  $R$ .
- $F[R]$  - המרחב הווקטורי של כל הפונקציות הממשיות ( $f: R \rightarrow R$ ) מעל השדה  $R$ .

### שאלות

בשאלות 1-7 בדוק האם  $W$  תת-מרחב של  $R^3$ :

$$W = \{(a, b, c) \mid a + b + c = 0\} \quad (1)$$

$$W = \{(a, b, c) \mid a = c\} \quad (2)$$

$$W = \{(a, b, c) \mid a = 3b\} \quad (3)$$

$$W = \{(a, b, c) \mid a < b < c\} \quad (4)$$

$$W = \{(a, b, c) \mid a = c^2\} \quad (5)$$

$$W = \{(a, b, c) \mid c - b = b - a\} \quad (6)$$

כלומר,  $a, b, c$  מהווים סדרה חשבונית.

$$W = \{(a, b, c) \mid b = a \cdot q, c = a \cdot q^2\} \quad (7)$$

כלומר,  $a, b, c$  מהווים סדרה הנדסית.

בשאלות 8-15 בדוק האם  $W$  תת-מרחב של  $M_n[R]$  :

(8)  $W$  מורכב מן המטריצות הסימטריות. כלומר,  $W = \{A \mid A = A^T\}$ .

(9)  $W$  מורכב מכל המטריצות המתחלפות בכפל עם מטריצה נתונה  $B$ . כלומר,  $W = \{A \mid AB = BA\}$ .

(10)  $W$  מורכב מכל המטריצות שהדטרמיננטה שלהן אפס. כלומר,  $W = \{A \mid |A| = 0\}$ .

(11)  $W$  מורכב מכל המטריצות ששוות לריבוע שלהן. כלומר,  $W = \{A \mid A^2 = A\}$ .

(12)  $W$  מורכב מכל המטריצות שהן משולשות עליונות.

(13)  $W$  מורכב מכל המטריצות שמכפלתן במטריצה נתונה  $B$  הוא אפס. כלומר,  $W = \{A \mid AB = 0\}$ .

(14)  $W$  מורכב מכל המטריצות שהעקבה שלהן אפס. כלומר,  $W = \{A \mid \text{tr}(A) = 0\}$ .

(15)  $W$  מורכב מכל המטריצות שבהן סכום כל שורה הוא אפס.

בשאלות 16-21 בדוק האם  $W$  הוא תת-מרחב של  $P_n[R]$  :

(16)  $W$  מורכב מכל הפולינומים בעלי 4 כשורש. כלומר,  $W = \{p(x) \mid p(4) = 0\}$ .

(17)  $W$  מורכב מכל הפולינומים בעלי מקדמים שלמים.

(18)  $W$  מורכב מכל הפולינומים בעלי מעלה  $\geq 4$ . כלומר,  $W = \{p(x) \mid \deg(p) \leq 4\}$ .

(19)  $W$  מורכב מכל הפולינומים בעלי חזקות זוגיות בלבד של  $x$ .

(20)  $W$  מורכב מכל הפולינומים ממעלה  $n$ , כאשר  $4 \leq n \leq 7$ .

(21)  $W = \{p(x) \mid p(0) = 1\}$

בשאלות 22-30 בדוק האם  $W$  הוא תת-מרחב של  $F[R]$  :

(22)  $W$  מורכב מכל הפונקציות הזוגיות.  
 כלומר, לכל  $x$  ממשי  $W = \{f(x) \mid f(-x) = f(x)\}$ .

(23)  $W$  מורכב מכל הפונקציות החסומות.  
 כלומר, לכל  $x$  ממשי  $W = \{f(x) \mid |f(x)| \leq M\}$ .

(24)  $W$  מורכב מכל הפונקציות הרציפות.

(25)  $W$  מורכב מכל הפונקציות הגזירות.

(26)  $W$  מורכב מכל הפונקציות הקבועות.

(27)  $W = \left\{ f(x) \mid \int_0^1 f(x) dx = 4 \right\}$  (הנח ש- $f$  אינטגרבילית ב- $[0,1]$ ).

(28)  $W = \{f(x) \mid f'(x) = 0\}$  (הנח ש- $f$  גזירה לכל  $x$ ).

(29)  $W = \{f(x) \mid f'(x) = 1\}$  (הנח ש- $f$  גזירה לכל  $x$ ).

(30)  $W = \{f(x) \mid f(x) = f(x+1)\}$

(31) בדוק האם  $W = \{(z_1, z_2, z_3) \mid z_2 = \bar{z}_1, z_3 = z_1 + \bar{z}_1\}$  הוא תת-מרחב של  $C^3$  :

א. מעל השדה הממשי  $\mathbb{R}$ .

ב. מעל שדה המרוכבים  $\mathbb{C}$ .

(32) נתונה המטריצה  $A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 3 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$

א. מצא וקטור  $b$ , כך שלמערכת  $Ax = b$  אין פתרון.

ב. מהי קבוצת כל הווקטורים  $b$ , כך שלמערכת  $Ax = b$  אין פתרון?

ג. האם הקבוצה מסעיף ב' מהווה תת-מרחב של  $R^5$ ?

- (33) יהי  $V$  מרחב הפולינומים ממעלה קטנה או שווה ל-4, מעל שדה  $F$ .  
 א. מצאו תנאי על  $k$ , עבורו הקבוצה  $W = \{p \in V \mid p(0) = p(1) = p(2) = k\}$ ,  
 הינה תת-מרחב של  $V$ .  
 ב. מצאו קבוצה סופית של פולינומים מ- $V$ , שפורשים את  $W$ .

הערה: לפתרון סעיף זה עבור קודם על הנושא 'בסיס ומימד למרחב הפתרונות של מערכת משוואות הומוגנית'.

### תשובות סופיות

- |      |                                    |  |    |      |    |      |    |      |    |
|------|------------------------------------|--|----|------|----|------|----|------|----|
| (1)  | כן                                 | (2)  | כן | (3)  | כן | (4)  | לא | (5)  | לא |
| (6)  | כן                                 | (7)  | לא | (8)  | כן | (9)  | כן | (10) | לא |
| (11) | לא                                 | (12)   | כן | (13) | כן | (14) | כן | (15) | כן |
| (16) | כן                                 | (17)   | לא | (18) | כן | (19) | כן | (20) | לא |
| (21) | לא                                 | (22)   | כן | (23) | כן | (24) | כן | (25) | כן |
| (26) | כן                                 | (27)   | לא | (28) | כן | (29) | לא | (30) | כן |
| (31) | א. כן<br>ב. לא                     |  |    |      |    |      |    |      |    |
| (32) | א. $u = (1, 0, 0, 0, 0)$<br>ג. לא. | ב. $B = \{(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) \mid -b_1 + b_2 + 2b_3 \neq 0\}$ |    |      |    |      |    |      |    |
| (33) | א. $k = 0$                         | ב. $W = \text{span}\{2x - 3x^2 + x^3, 6x - 7x^2 + x^4\}$             |    |      |    |      |    |      |    |

## צירופים לינאריים, פרישה לינארית ותלות לינארית

### שאלות

בשאלות 1-7 נתונים הווקטורים הבאים :

$$u_1 = (4, 1, 1, 5), \quad u_2 = (0, 11, -5, 3), \quad u_3 = (2, -5, 3, 1), \quad u_4 = (1, 3, -1, 2)$$

- (1) א. האם  $u_1$  הוא צירוף לינארי של  $u_4$  ?  
 ב. האם  $u_1$  שייך ל-  $Sp\{u_4\}$  ?  
 ג. האם הקבוצה  $\{u_1, u_4\}$  תלויה לינארית?
- (2) א. האם  $u_3$  הוא צירוף לינארי של  $u_1$  ו-  $u_2$  ?  
 ב. האם  $u_3$  שייך ל-  $Sp\{u_1, u_2\}$  ?  
 ג. האם הקבוצה  $\{u_1, u_2, u_3\}$  תלויה לינארית?  
 במידה וכן, רשום כל וקטור בקבוצה כצירוף לינארי של הווקטורים האחרים.
- (3) א. האם  $u_4$  הוא צירוף לינארי של  $u_1$  ו-  $u_2$  ?  
 ב. האם  $u_4$  שייך ל-  $Sp\{u_1, u_2\}$  ?  
 ג. האם הקבוצה  $\{u_1, u_2, u_4\}$  תלויה לינארית?  
 במידה וכן, רשום כל וקטור בקבוצה כצירוף לינארי של הווקטורים האחרים.
- (4) נתון  $v = (4, 12, k, -2k)$ .  
 א. מה צריך להיות ערכו של  $k$ , על מנת שהווקטור  $v$  יהיה צירוף לינארי של  $u_1$  ו-  $u_2$  ?  
 ב. מה צריך להיות ערכו של  $k$ , על מנת שהווקטור  $v$  יהיה שייך ל-  $Sp\{u_1, u_2\}$  ?  
 ג. מה צריך להיות ערכו של  $k$ , על מנת שהקבוצה  $\{u_1, u_2, v\}$  תהיה תלויה לינארית?
- (5) נתון  $v = (a, b, c, d)$ .  
 א. מה התנאים על  $a, b, c, d$ , על מנת שהווקטור  $v$  יהיה צירוף לינארי של  $u_1$  ו-  $u_2$  ?  
 ב. מה התנאים על  $a, b, c, d$ , על מנת שהווקטור  $v$  יהיה שייך ל-  $Sp\{u_1, u_2\}$  ?  
 ג. מה התנאים על  $a, b, c, d$ , על מנת שהקבוצה  $\{u_1, u_2, v\}$  תהיה תלויה לינארית?

6) הבע את הווקטור  $v = (10, 8, 0, 14)$  כצירוף לינארי של  $u_1, u_2, u_3$ . בכמה אופנים ניתן לעשות זאת?

7) הבע את הווקטור  $v = (7, 10, -2, 11)$  כצירוף לינארי של  $u_1, u_2, u_3, u_4$ . בכמה אופנים ניתן לעשות זאת?

8) נתונות המטריצות הבאות:

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 1 & 5 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 11 \\ -5 & 3 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 2 & -5 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}$$

- א. בדוק האם המטריצות תלויות ליניארית מעל  $M_2[R]$ .  
 ב. במידה והמטריצות תלויות, רשום כל אחת מהמטריצות כצירוף לינארי של יתר המטריצות.  
 ג. האם המטריצה  $A$  שייכת ל-  $Sp\{B, C\}$ ?

9) נתונים הפולינומים הבאים:  $p_1(x) = 4 + x + x^2 + 5x^3$ ,  $p_2(x) = 11x - 5x^2 + 3x^3$ ,  $p_3(x) = 2 - 5x + 3x^2 + x^3$ ,  $p_4(x) = 1 + 3x - x^2 + 2x^3$

- א. בדוק האם הפולינומים תלויים ליניארית מעל  $P_3[R]$ .  
 ב. במידה והפולינומים תלויים ליניארית, רשום כל פולינום כצירוף לינארי של שאר הפולינומים.  
 ג. האם הפולינום  $p_2$  שייך ל-  $Sp\{p_1, p_4\}$ ?

10) עבור איזה ערכים של  $a, b, c$ , הווקטורים הבאים תלויים ליניארית:

$$\{(c, 2, 4), (2, 4, a, 2), (c, b, 6), (b, 2, a)\}$$

בשאלות 11-13 נתון כי קבוצת הווקטורים  $\{u, v, w\}$  בלתי תלויה ליניארית ב-  $V[F]$ . בדוק האם הקבוצות הבאות תלויות ליניארית, ובמידה וכן רשום כל וקטור כצירוף של הווקטורים האחרים:

$$\{u - v, u - w, u + v - 2w\} \quad (11)$$

$$\{u + 2v + 3w, 4u + 5v + 6w, 7u + 8v + 9w\} \quad (12)$$

$$\{u + v, v + w, w\} \quad (13)$$

בשאלות 14-15 בדוק האם הווקטורים  $\{(1, i, i-1), (i+1, i-1, -2)\}$  תלויים ליניארית ב-  $C^3$  :

(14) מעל  $C$  .

(15) מעל  $R$  .

(16) נתבונן ב-  $V = R$  כמרחב וקטורי מעל השדה  $Q$  . הוכיחו כי הקבוצה  $\{1, \sqrt{2}, \sqrt{3}\}$  היא בת"ל ב-  $R$  , כשהוא מרחב וקטורי מעל  $Q$  .

(17) תהי  $A_{m \times n}$  מטריצה, שעמודותיה  $A_1, A_2, \dots, A_n$  . הוכיחו את הטענה הבאה :

למערכת  $Ax = b$  יש פתרון אם ורק אם  $b \in \text{span}\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  .

(18) לפניכם 3 תת-קבוצות של  $R^4$  :

$$U = \text{span}\{(1, 2, 2, 1), (1, 1, -1, -1), (0, 0, 1, 1)\}$$

$$W = \text{span}\{(1, 1, 0, 0), (1, 2, 1, 0), (1, 3, 3, 1)\}$$

$$V = \text{span}\{(2, 3, 1, 0), (1, 2, 1, 0), (1, 4, 3, 1)\}$$

א. האם  $U = W$  ?

ב. האם  $U = V$  ?

## תשובות סופיות

- (1) א. לא. ב. לא. ג. לא.
- (2) א. כן. ב. כן. ג. כן,  $u_1 = 2u_3 + u_2$ ,  $u_2 = u_1 - 2u_3$ .
- (3) א. כן. ב. כן. ג. כן,  $u_1 = 4u_4 - u_2$ ,  $u_2 = 4u_4 - u_1$ .
- (4) א+ב+ג.  $k = -4$ .
- (5)  $a = 5t + 3s$ ,  $b = 4t - 13s$ ,  $c = 7s$ ,  $d = 7t$ .
- (6) אינסוף,  $v = 2u_1 + u_2 + u_3$ .
- (7) אינסוף,  $v = \frac{7}{4}u_1 + \frac{3}{4}u_2$ .
- (8) א. המטריצות תלויות. ג. כן.  $A = B + 2C$ .
- ב.  $A = B + 2C$ ,  $B = A - 2C$ ,  $C = 0.5A - 0.5B$ ,  $D = 0.25A + 0.25B$ .
- (9) א. הפולינומים תלויים. ג.  $p_2 = 4p_4 - p_1$ .
- ב.  $p_1 = p_2 + 2p_3$ ,  $p_2 = p_1 - 2p_3$ ,  $p_3 = 0.5p_1 - 0.5p_2$ ,  $p_4 = 0.25p_1 + 0.25p_2$ .
- (10) לכל ערך של  $a, b, c$ .
- (11) הווקטורים תלויים ליניארית, ומתקיים:  $x = 2y - z$ ,  $y = 0.5x + 0.5z$ ,  $z = 2y - x$ .
- (12) הווקטורים תלויים ליניארית, ומתקיים:  $x = 2y - z$ ,  $y = 0.5x + 0.5z$ ,  $z = 2y - x$ .
- (13) בלתי תלויים ליניארית.
- (14) תלויים.
- (15) בלתי תלויים ליניארית.
- (16) הוכחה.
- (17) הוכחה.
- (18) א. כן. ב. לא.

## בסיס ומימד, דרגה של מטריצה

### שאלות

(1) בדוק אם הקבוצות הבאות הן בסיס ל- $R^3$  :

א.  $\{(1,0,1), (0,0,1)\}$

ב.  $\{(1,1,2), (1,2,3), (3,3,4), (2,2,1)\}$

ג.  $\{(1,2,3), (4,5,6), (7,8,9)\}$

(2) בדוק אם הקבוצות הבאות הן בסיס ל- $M_{2 \times 2}[R]$  :

א.  $\left\{ \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 9 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} \right\}$

ב.  $\left\{ \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 9 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 5 & 16 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} \right\}$

ג.  $\left\{ \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}$

(3) בדוק אם הקבוצות הבאות הן בסיס ל- $P_2(R)$  :

א.  $\{1+x, x^2+2x+3\}$

ב.  $\{1+x, x^2+2x+3, 2x+4x^2, x-x^2\}$

ג.  $\{1+2x+3x^2, 4+5x+6x^2, 7+8x+10x^2\}$

(4) נתונה קבוצת וקטורים ב- $R^3$  :  $T = \{(1,2,3), (4,5,6), (7,8,9), (2,3,4)\}$ .

א. האם  $T$  בסיס ל- $R^3$  ?

ב. מצא קבוצה  $T'$ , שהיא קבוצה מקסימלית של וקטורים,

בלתי תלויה ליניארית ב- $T$ .

ג. השלם את  $T'$  לבסיס של  $R^3$ .

## מציאת בסיס וממד למרחב פתרונות של מערכת משוואות הומוגנית

(5) לפי 3 מערכות של משוואות הומוגניות:

$$\begin{cases} x - y + z + w = 0 \\ 2x - 2y + 2z + 2w = 0 \end{cases} \cdot 3 \quad \begin{cases} x - y + z + w = 0 \\ x + 2z - w = 0 \\ x + y + 3z - 3w = 0 \end{cases} \cdot 2 \quad \begin{cases} x + y - z + 2w = 0 \\ 3x - y + 7z + 4w = 0 \\ -5x + 3y - 15z - 6w = 0 \end{cases} \cdot 1$$

1. נסמן ב- $W$  את המרחב הנפרש ע"י מערכת המשוואות2. נסמן ב- $U$  את המרחב הנפרש ע"י מערכת המשוואות3. נסמן ב- $V$  את המרחב הנפרש ע"י מערכת המשוואותמצא בסיס וממד ל- $U$ ,  $W$  ו- $V$ .

(6) נתון  $U = \{(a, b, c, d) \in \mathbb{R}^4 \mid a = c, b = d\}$

מצא בסיס וממד ל- $U$ .

(7) נתון  $U = \{(a, b, c, d) \in \mathbb{R}^4 \mid c = a + b, d = b + c\}$

מצא בסיס וממד ל- $U$ .

(8) נתון  $U = \{v \in \mathbb{R}^4 \mid v \cdot (1, -1, 1, -1) = 0\}$

מצא בסיס וממד ל- $U$ .

(9) נתון  $U = \{A \in M_{2 \times 2}[\mathbb{R}] \mid A = A^T\}$

מצא בסיס וממד ל- $U$ .

(10) נתון  $U = \left\{ A \in M_{2 \times 2}[\mathbb{R}] \mid A \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right\}$

מצא בסיס וממד ל- $U$ .

(11) נתון  $U = \{p(x) \in P_3[\mathbb{R}] \mid p(1) = 0\}$

מצא בסיס וממד ל- $U$ .

**מציאת בסיס וממד לתת-מרחב**

(12) לפניכם שני תתי מרחבים של המרחב  $R^4$  :

$$U = \text{span}\{(1,1,-1,2), (3,-1,7,4), (-5,3,-15,-6)\}$$

$$V = \text{span}\{(1,-1,1,1), (1,0,2,-1), (1,1,3,-3), (5,1,5,8)\}$$

א. מצא בסיס, ממד ומשוואות ל- $U$ .

ב. מצא בסיס, ממד ומשוואות ל- $V$ .

(13) לפניכם תת-מרחב של המרחב  $M_{2 \times 2}[R]$  :

$$U = \text{span}\left\{\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & -3 \end{pmatrix}\right\}$$

מצא בסיס וממד ל- $U$ .

(14) לפניכם תת-מרחב של המרחב  $P_3[R]$  :

$$U = \text{span}\{1+x-x^2+2x^3, 4+x-x^2+x^3, 2-x+x^2-3x^3\}$$

מצא בסיס וממד ל- $U$ .

**מציאת בסיס וממד למרחב שורה ומרחב עמודה של מטריצה, דרגת מטריצה**

בשאלות 15-16 מצא בסיס וממד למרחב השורה ומרחב העמודה של המטריצה, וציין את דרגת המטריצה (rank) :

$$\begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 & 5 \\ 0 & 11 & -5 & 3 \\ 2 & -5 & 3 & 1 \\ 1 & 3 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 3 & 5 \\ 2 & 5 & 3 & 1 & 6 \\ 1 & -1 & -2 & 2 & 1 \\ -2 & 3 & 5 & -4 & -1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

## תשובות סופיות

- (1) א. לא. ב. לא. ג. לא.
- (2) א. לא. ב. לא. ג. כן.
- (3) א. לא. ב. לא. ג. כן.
- (4) א. לא. ב.  $T' = \{(1,2,3), (4,5,6)\}$ . ג.  $T' = \{(1,2,3), (4,5,6), (0,0,1)\}$ .
- (5) א.  $W$  - בסיס:  $\{(-1.5, 2.5, 1, 0), (-1.5, -0.5, 0, 1)\}$ , ממד: 2.
- $U$  - בסיס:  $\{(-2, -1, 1, 0), (1, 2, 0, 1)\}$ , ממד: 2.
- $V$  - בסיס:  $\{(-1, 0, 0, 1), (-1, 0, 1, 0), (1, 1, 0, 0)\}$ , ממד: 3.
- (6) בסיס:  $\{(0, 1, 0, 1), (1, 0, 1, 0)\}$ , ממד: 2.
- (7) בסיס:  $\{(-1, 1, 0, 1), (2, -1, 1, 0)\}$ , ממד: 2.
- (8) בסיס:  $\{(1, 0, 0, 1), (-1, 0, 1, 0), (1, 1, 0, 0)\}$ , ממד: 3.
- (9) בסיס:  $\left\{ \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right\}$ , ממד: 3.
- (10) בסיס:  $\left\{ \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right\}$ , ממד: 0.
- (11) בסיס:  $\{p_1(x) = -1 + x^3, p_2(x) = -1 + x^2, p_3(x) = -1 + x\}$ , ממד: 3.
- (12) א. בסיס:  $\{(1, 1, -1, 2), (0, -4, 10, -2)\}$ , ממד: 2.
- ב. בסיס:  $\{(1, -1, 1, 1), (0, -1, 1, -2), (0, 0, -2, 5)\}$ , ממד: 3.
- (13) בסיס:  $\left\{ \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -3 \\ 3 & -7 \end{pmatrix} \right\}$ , ממד: 2.
- (14) בסיס:  $\{1 + x - x^2 + 2x^3, -3x + 3x^2 - 7x^3\}$ , ממד: 2.
- (15) מרחב שורה: בסיס:  $\{(4, 1, 1, 5), (0, 11, -5, 3)\}$ , ממד: 2.
- מרחב עמודה: בסיס:  $\left\{ \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$ , ממד: 2, דרגה: 2.
- (16) מרחב שורה: בסיס:  $\{(1, 2, 1, 3, 5), (0, 11, -5, -4), (0, 0, 0, 1, 1)\}$ , ממד: 3.
- מרחב עמודה: בסיס:  $\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -3 \\ 7 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -16 \\ 37 \end{pmatrix} \right\}$ , ממד: 3, דרגה: 3.

## חיתוך, סכום וסכום ישיר של תת-מרחבים

### שאלות

(1) לפניך 3 מערכות של משוואות לינאריות הומוגניות:

$$1) \begin{cases} x + y - z + 2w = 0 \\ 3x - y + 7z + 4w = 0 \\ -5x + 3y - 15z - 6w = 0 \end{cases} \quad 2) \begin{cases} x - y + z + w = 0 \\ x + 2z - w = 0 \\ x + y + 3z - 3w = 0 \end{cases} \quad 3) \begin{cases} x - y + z + w = 0 \\ 2x - 2y + 2z + 2w = 0 \end{cases}$$

נסמן ב-  $V, U, W$  את המרחבים הנפרשים ע"י פתרון המערכות 1, 2 ו-3 בהתאמה.

א. מצא בסיס וממד ל-  $U, W$  ו-  $V$ .

ב. מצא בסיס וממד ל-  $U + V$ .

ג. מצא בסיס וממד ל-  $U \cap V$ .

(2) לפניכם שני תת-מרחבים של המרחב  $R^4$ :

$$U = sp\{(1, 1, -1, 2), (3, -1, 7, 4), (-5, 3, -15, -6)\}$$

$$V = sp\{(1, -1, 1, 1), (1, 0, 2, -1), (1, 1, 3, -3), (5, 1, 5, 8)\}$$

א. מצא בסיס, ממד ומשוואות ל-  $U$ .

ב. מצא בסיס, ממד ומשוואות ל-  $V$ .

ג. מצא בסיס וממד ל-  $U + V$ .

ד. מצא בסיס וממד ל-  $U \cap V$  (פתור בשתי דרכים שונות).

ה. האם  $U + V = R^4$ ?

ו. האם  $U \oplus V = R^4$ ?

(3) לפניכם שני תת-מרחבים של המרחב  $P_3[R]$ :

$$U = sp\{1 + x - x^2 + 2x^3, 3 - x + 7x^2 + 4x^3, -5 + 3x - 15x^2 - 6x^3\}$$

$$V = sp\{1 - x + x^2 + x^3, 1 + 2x^2 - x^3, 1 + x + 3x^2 - 3x^3, 5 + x + 5x^2 + 8x^3\}$$

א. מצא בסיס וממד ל-  $U + V$ .

ב. מצא בסיס וממד ל-  $U \cap V$ .

(4) לפניכם שני תת-מרחבים של המרחב  $P_3[R]$ :

$$U = sp\{1 + x + x^3, 1 + 2x + x^2 + 2x^3, -1 + 2x + 3x^2 + 2x^3\}$$

$$V = \{p(x) \in P_3[R] \mid p(1) = p(-1) = 0\}$$

א. מצא בסיס וממד ל-  $U + V$ .

ב. מצא בסיס וממד ל-  $U \cap V$ .

$$U = \text{sp}\{1+x, x+x^2, 1+x^3\} \quad (5) \quad \text{לפניכם שני תת-מרחבים של המרחב } P_3[R] : \\ V = \{p(x) \in P_3[R] \mid p'(0) = 0\}$$

מצא בסיס וממד ל-  $U \cap V$ .

$$(6) \quad \text{לפניכם שני תת-מרחבים של המרחב } M_2[R]$$

$$U = \left\{ \begin{pmatrix} x+3y-5z & x-y+3z \\ -x+7y-15z & 2x+4y-6z \end{pmatrix} \mid x, y, z \in R \right\}$$

$$W = \text{sp} \left\{ \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 3 & -3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 5 & 1 \\ 5 & 8 \end{pmatrix} \right\}$$

- מצא בסיס וממד ל-  $U$  ול-  $W$ .
- מצא בסיס וממד ל-  $U+W$ .
- מצא בסיס וממד ל-  $U \cap W$ .
- אשר את משפט הממד עבור תרגיל זה.

$$(7) \quad \text{לפניכם שני תת-מרחבים של המרחב } V = M_2[R] :$$

$$U = \{A \in V \mid A = -A^T\}, \quad W = \left\{ A \in V \mid A \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix} = 0 \right\}$$

- מצא בסיס וממד ל-  $U$  ול-  $W$ .
- מצא בסיס וממד ל-  $U+W$ .
- מצא בסיס וממד ל-  $U \cap W$ .
- האם  $U+W = V$ ?
- האם  $U \oplus W = V$ ?

$$(8) \quad \text{לפניכם שני תת-מרחבים של המרחב } V = M_3[R] :$$

$$U = \{A \in V \mid A = A^T\}, \quad W = \{A \in V \mid A \text{ משולשית עליונה}\}$$

- מצא בסיס וממד ל-  $U$ .
- מצא בסיס וממד ל-  $W$ .
- מצא בסיס וממד ל-  $U+W$ .
- מצא בסיס וממד ל-  $U \cap W$ .
- $U \oplus W = V$ .

$$(9) \quad \text{יהיו } U \text{ ו- } W \text{ שני תת-מרחבים מממד 2 של } R^3. \\ \text{הוכח כי } \dim(U \cap W) \neq 0.$$

(10) יהי  $V$  מרחב וקטורי ממימד 10.

יהיו  $U$  ו- $W$  שני תת-מרחבים שונים של  $V$  ממימד 9.

א. הוכח כי  $U + W = V$ .

ב. חשב  $\dim(U \cap W)$ .

(11) יהי  $V$  מרחב וקטורי ממימד 10.

יהיו  $U$  ו- $W$  שני תת-מרחבים שונים של  $V$  ממימד 7.

מצא את המימדים האפשריים של  $U \cap W$  ו- $U + W$ .

(12) יהי  $V$  מרחב וקטורי ממימד 7.

יהיו  $U$  ו- $W$  שני תת-מרחבים של  $V$ , כך ש- $\dim U = 4$ ,  $\dim W = 5$  ( $U \not\subseteq W$ ).

מצא את המימדים האפשריים של  $U \cap W$  ו- $U + W$ .

(13) יהי  $V$  מרחב וקטורי מעל שדה  $F$ .  $\phi \neq A, B \subseteq V$ .

נגדיר:  $A + B = \{a + b \mid a \in A, b \in B\}$ .

הוכח או הפרך:

א.  $sp(A + B) = sp(A) \cup sp(B)$ .

ב.  $sp(A \cup B) = sp(A) \cup sp(B)$ .

ג.  $sp(A \cup B) = sp(A) + sp(B)$ .

ד.  $sp(A + B) = sp(A) + sp(B)$ .

ה.  $sp(A \cap B) = sp(A) \cap sp(B)$ .

(14) יהיו  $U$  ו- $W$  תת-מרחבים של  $R^3$ , המוגדרים על ידי:

$U = \{(a, b, c) \mid a = b = c\}$ ,  $W = \{(0, b, c)\}$

הוכח כי  $U \oplus W = R^3$ .

(15) יהי  $V = M_n[R]$ .

א. יהי  $U$  תת-מרחב של  $V$  המכיל את כל המטריצות הסימטריות.

יהי  $W$  תת-מרחב של  $V$  המכיל את כל המטריצות האנטי-סימטריות.

הוכח כי  $U \oplus W = V$ .

ב. יהי  $U$  תת-מרחב של  $V$  המכיל את כל המטריצות המשולשות העליונות.

יהי  $W$  תת-מרחב של  $V$  המכיל את כל המטריצות המשולשות התחתונות.

הוכח כי  $U \oplus W \neq V$ .

## תשובות סופיות

$$B_W = \{(-1.5, 2.5, 1, 0), (-1.5, -0.5, 0, 1)\} \quad , \quad \dim W = 2 \quad \text{א. (1)}$$

$$B_U = \{(-2, -1, 1, 0), (1, 2, 0, 1)\} \quad , \quad \dim U = 2$$

$$B_V = \{(-1, 0, 0, 1), (-1, 0, 1, 0), (1, 1, 0, 0)\} \quad , \quad \dim V = 3$$

$$B_{U+V} = \{(0, 0, -1, 1), (0, 1, 1, 0), (1, 1, 0, 0)\} \quad \dim(U+V) = 3 \quad \text{ב.}$$

$$B_{U \cap V} = \{(-2, -1, 1, 0), (1, 2, 0, 1)\} \quad , \quad \dim(U \cap V) = 2 \quad \text{ג.}$$

$$\begin{cases} -3x + 5y + 2z = 0 \\ -3x - y + 2t = 0 \end{cases} \quad , \quad B_U = \{(1, 1, -1, 2), (0, 2, -5, 1)\} \quad , \quad \dim U = 2 \quad \text{א. (2)}$$

$$-8x - y + 5z + 2t = 0 \quad , \quad B_V = \{(1, -1, 1, 1), (0, 1, 1, -2), (0, 0, 2, -5)\} \quad , \quad \dim V = 3 \quad \text{ב.}$$

$$B_{U+V} = \{(1, 1, -1, 2), (0, -4, 10, -2), (0, 0, 1, 0), (0, 0, 0, 1)\} \quad , \quad \dim(U+V) = 4 \quad \text{ג.}$$

$$B_{U \cap V} = \{(5, 1, 5, 8)\} \quad , \quad \dim(U \cap V) = 1 \quad \text{ד.} \quad \text{ה. כן.} \quad \text{ו. לא.}$$

$$U+V = sp\{1+x-x^2+2x^3, 2x-5x^2+x^3, x^2, x^3\} \quad , \quad \dim(U+V) = 4 \quad \text{א. (3)}$$

$$B_{U \cap V} = \{5+x+5x^2+8x^3\} \quad , \quad \dim(U \cap V) = 1 \quad \text{ב.}$$

$$B_{U+V} = \{1+x+x^3, x+x^2+x^3, x^2+2x^3\} \quad , \quad \dim(U+V) = 3 \quad \text{א. (4)}$$

$$B_{U \cap V} = \{-1+x^2\} \quad , \quad \dim(U \cap V) = 1 \quad \text{ב.}$$

$$B_{U \cap V} = \{-1+x^2, 1+x^3\} \quad , \quad \dim(U \cap V) = 2 \quad \text{א. (5)}$$

$$B_U = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -4 \\ 10 & -2 \end{pmatrix} \right\} \quad , \quad \dim(U) = 2 \quad \text{א. (6)}$$

$$B_W = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -6 & 15 \end{pmatrix} \right\} \quad , \quad \dim(W) = 3$$

$$B_{U+W} = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ -5 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\} \quad , \quad \dim(U+W) = 4 \quad \text{ב.}$$

$$B_{U \cap W} = \left\{ \begin{pmatrix} 5 & 1 \\ 5 & 8 \end{pmatrix} \right\} \quad , \quad \dim(U \cap W) = 1 \quad \text{ג.}$$

ד. ראו בווידאו.

$$B_U = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right\}, \dim U = 1, \quad B_W = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right\}, \dim W = 2. \quad \text{א. (7)}$$

$$B_{U+W} = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right\}, \quad \dim(U+W) = 3. \quad \text{ב.}$$

$$B_{U \cap W} = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right\}, \quad \dim(U \cap W) = 0. \quad \text{ג.}$$

ד. לא.      ה. לא.

א. (8)

$$B_U = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\dim U = 6$$

ב.

$$B_W = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\dim W = 6$$

ג.

$$B_{U+W} = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\dim(U+W) = 9$$

$$B_{U \cap W} = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}, \quad \dim(U \cap W) = 3. \quad \text{ד.}$$

ה. לא.

הוכחה. (9)

א. הוכחה. (10)      ב. 8

$$\dim(U+W) = 8, 9 \text{ or } 10, \quad \dim(U \cap W) = 4, 5, 6 \text{ or } 7 \quad \text{(11)}$$

$$\dim(U \cap W) = 2, 3 \text{ or } 4, \quad \dim(U+W) = 6 \text{ or } 7 \quad \text{(12)}$$

הוכחה. (13)

הוכחה. (14)

הוכחה. (15)

## וקטור קואורדינטות ומטריצת מעבר מבסיס לבסיס

(1) נתונים שני בסיסים של  $R^3$  :

$$B_1 = \{(1,1,0), (0,1,0), (0,1,1)\}, \quad B_2 = \{(1,0,1), (0,1,1), (0,0,1)\}$$

א. מצא את וקטור הקואורדינטות ביחס לבסיס  $B_1$ .

סמן וקטור זה ב-  $[v]_{B_1}$ .

ב. מצא את וקטור הקואורדינטות ביחס לבסיס  $B_2$ .

סמן וקטור זה ב-  $[v]_{B_2}$ .

ג. מצא מטריצת מעבר מהבסיס  $B_1$  לבסיס  $B_2$ .

סמן מטריצה זו ב-  $[M]_{B_1}^{B_2}$ .

ד. מצא מטריצת מעבר מהבסיס  $B_2$  לבסיס  $B_1$ .

סמן מטריצה זו ב-  $[M]_{B_2}^{B_1}$ .

ה. אשר את הטענות הבאות:

$$1. [M]_{B_2}^{B_1} \cdot [v]_{B_1} = [v]_{B_2}$$

$$2. [M]_{B_1}^{B_2} \cdot [v]_{B_2} = [v]_{B_1}$$

$$3. [M]_{B_1}^{B_2} = \left( [M]_{B_2}^{B_1} \right)^{-1}$$

(2) נתונים שני בסיסים של  $P_2[R]$  :

$$B_1 = \{1+x, x, x+x^2\}, \quad B_2 = \{1+x^2, x+x^2, x^2\}$$

א. מצא את וקטור הקואורדינטות ביחס לבסיס  $B_1$ .

סמן וקטור זה ב-  $[v]_{B_1}$ .

ב. מצא את וקטור הקואורדינטות ביחס לבסיס  $B_2$ .

סמן וקטור זה ב-  $[v]_{B_2}$ .

ג. מצא מטריצת מעבר מהבסיס  $B_1$  לבסיס  $B_2$ .

סמן מטריצה זו ב-  $[M]_{B_1}^{B_2}$ .

$$B = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\} \quad (3) \text{ נתונים שני בסיסים של } M_2[R]$$

$$E = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}$$

א. מצא את וקטור הקואורדינטות ביחס לבסיס  $B$ .

סמן וקטור זה ב- $[v]_B$ .

ב. מצא את וקטור הקואורדינטות ביחס לבסיס  $E$ .

סמן וקטור זה ב- $[v]_E$ .

ג. מצא מטריצת מעבר מהבסיס  $B$  לבסיס  $E$ .

סמן מטריצה זו ב- $[M]_B^E$ .

(4) יהי  $V$  מרחב וקטורי ויהי  $B$  בסיס של  $V$ .

הוכח כי הווקטורים  $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  בת"ל,

אם ורק אם וקטורי הקואורדינטות שלהם,

לפי הבסיס  $B$ ,  $\{[u_1], [u_2], \dots, [u_m]\}$ , הם בת"ל.

הסבר כיצד השתמשנו בטענה זו רבות במהלך הקורס.

### תשובות סופיות

$$[M]_{B_1}^{B_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{ג.} \quad (x, y, z-x-y) \quad \text{ב.} \quad (x, y-x-z, z) \quad \text{א.} \quad (1)$$

$$[M]_{B_2}^{B_1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{ד.} \quad \text{ה. הוכחה.}$$

$$[M]_{B_1}^{B_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{ג.} \quad (a, b, c-a-b) \quad \text{ב.} \quad (a, b-a-c, c) \quad \text{א.} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{ג.} \quad (x, y, z, t) \quad \text{ב.} \quad (x, y-x, z-y+x, t-z+y-x) \quad \text{א.} \quad (3)$$

(4) שאלת הוכחה.

## תרגילי תיאוריה מתקדמים

### שאלות הוכחה

- (1) יהי  $V$  מרחב, ותהי  $A = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$  קבוצה;  $b \in V$ .  
הוכיחו כי:  $b \in sp(A) \Leftrightarrow sp(A \cup \{b\}) = sp(A)$ .
- (2) יהיו  $u, v, w$  וקטורים, כך ש-  $\{u, v\}$  בלתי-תלויה ליניארית ו-  $u \in sp(\{v, w\})$ .  
א. הוכיחו ש-  $w \in sp(\{u, v\})$ .  
ב. נתון גם כי עבור וקטור נוסף  $z$ , הקבוצה  $\{u, w, z\}$  בלתי-תלויה ליניארית.  
הוכיחו שגם הקבוצה  $\{u, v, z\}$  בלתי-תלויה ליניארית.
- (3) יהי  $U$  מרחב, תהי  $A = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \subseteq U$  ויהי  $u \in U$  וקטור כלשהו.  
הוכח כי אם  $u \in sp(A)$ , וכן  $u \notin sp(A - \{u_n\})$ , אז  $u_n \in sp(u_1, u_2, \dots, u_{n-1}, u)$ .
- (4) יהי  $V$  מרחב,  $b \in V$  ו-  $A = \{v_1, v_2, \dots, v_k\} \subseteq V$  בלתי-תלויה ליניארית.  
הוכיחו כי  $A \cup \{b\} = \{v_1, v_2, \dots, v_k, b\}$  בת"ל  $\Leftrightarrow b \in sp(A)$ .
- (5) יהי  $V$  מרחב  $n$  מימדי, תהי  $A = \{v_1, v_2, \dots, v_k\} \subseteq V$  ויהי  $b \in sp(A)$ .  
למשוואה  $x_1 v_1 + x_2 v_2 + \dots + x_k v_k = b$  אין פתרון יחיד.  
הוכח או הפרך:  
א.  $k \geq n$ .  
ב.  $A$  פורשת את  $V$ .  
ג.  $A$  בהכרח תלויה ליניארית.
- (6) יהי  $V$  מרחב,  $b \in V$  ו-  $A = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \subseteq V$  בלתי-תלויה ליניארית.  
הוכח או הפרך:  
א. אם  $b \notin sp(A)$ , אז הקבוצה  $B = \{v_1 + b, v_2 + b, \dots, v_n + b\}$  היא בת"ל.  
ב. אם  $b \in sp(A)$ , אז הקבוצה  $B = \{v_1 + b, v_2 + b, \dots, v_n + b\}$  היא בת"ל.  
ג. אם  $b \in sp(A)$ , אז הקבוצה  $B = \{v_1 + b, v_2 + b, \dots, v_n + b\}$  היא ת"ל.

- (7) יהי  $V$  מרחב וקטורי מעל  $\mathbb{R}$ , ויהיו  $v_1, v_2, v_3 \in V$ .  
 נסמן:  $S = \{v_1, v_2, v_3\}$ ,  $T = \{av_1 + v_2 + v_3, v_1 + av_2 + v_3, v_1 + v_2, av_3\}$ .  
 הוכח או הפרך:  
 א.  $spS \subseteq spT$ .  
 ב. אם  $S$  בלתי תלויה ליניארית ואם  $a \neq -2, 1$ , אז בהכרח  $sp(T) = sp(S)$ .  
 ג.  $\dim(spT) \leq 2$ .  
 ד.  $\dim(sp(T)) = \dim(sp(S))$ .
- (8) יהי  $V$  מרחב ותהיינה  $A = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ ,  $B = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$  קבוצות וקטורים ב- $V$ .  
 הוכח או הפרך:  
 א.  $sp(A \cup B) = sp(A) + sp(B)$ .  
 ב. אם  $A \cup B$  בת"ל, אז  $A, B$  שתיהן בת"ל.  
 ג. אם  $\dim V = m + k$  וגם  $A, B$  שתיהן בת"ל, אז  $A \cup B$  בת"ל.  
 ד. אם  $A \cup B$  בת"ל, אז  $sp(A) \cap sp(B) = \{0\}$ .
- (9) יהי  $V$  מרחב ויהיו  $U, W \subseteq V$  תמריים.  
 תהיינה  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \subseteq U$ ,  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$  שתי קבוצות בת"ל.  
 הוכח כי אם  $U \cap W = \{0\}$ , אז  $A \cup B$  בת"ל.
- (10) יהי  $V$  מרחב ויהיו  $U, W$  תמריים שלו.  
 הוכח כי  $U \cup W$  מרחב  $\Leftrightarrow W \subseteq U$  או  $U \subseteq W$ .

לפתרונות המלאים בסרטוני וידאו היכנסו ל- [www.GooL.co.il](http://www.GooL.co.il)

## שאלות אמריקאיות

11) תהינה  $A, B$  מטריצות ריבועיות ממשיות מסדר  $n \geq 2$ .  
 אז בהכרח מתקיים:

- א. מרחב השורות של  $A^2$  מוכל במרחב השורות של  $A$ .
- ב. אם  $AB$  משולשית עליונה, אז בהכרח  $A$  משולשית עליונה או  $B$  משולשית עליונה.
- ג. אם  $AB = 0$ , אז בהכרח  $B = 0$  או  $A = 0$ .
- ד. אף תשובה אינה נכונה.

$$(12) \text{ נסמן } W = Sp \left\{ \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{pmatrix} \right\}, U = Sp \left\{ \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} \right\}$$

שני תת-מרחבים של  $\mathbb{R}^3$ .  
 אזי בהכרח מתקיים:

- א.  $U = W$
- ב.  $\dim U = \dim W$
- ג.  $U \subseteq W$
- ד. אם  $U + W = \mathbb{R}^3$ , אז  $U \cap W = \{0\}$ .
- ה. אף תשובה אינה נכונה.

13) תהי  $A$  קבוצה בת 6 פולינומים במרחב  $\mathbb{R}_5[x]$  מעל  $\mathbb{R}$  (מרחב הפולינומים

ממעלה עד וכולל 5), ונניח בנוסף ש-  $\mathbb{R}_5[x] = Sp(A)$ .  
 אזי בהכרח מתקיים:

- א. ייתכן ש-  $A$  מכילה בדיוק 4 פולינומים ממעלה 4.
- ב. ייתכן ש-  $A$  מכילה בדיוק 5 פולינומים ממעלה 3.
- ג. שני תת-מרחבים של  $\mathbb{R}_5[x]$  מאותו מימד בהכרח שווים.
- ד.  $A$  תלויה ליניארית.
- ה. אף תשובה אינה נכונה.

14) במרחב וקטורי  $\mathbb{R}^2$  מעל שדה  $\mathbb{R}$ ,

תהי  $A = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$  קבוצה סדורה של 2 וקטורים מ- $\mathbb{R}^2$ .

אז מטריצה  $P$  המקיימת  $[v]_A = Pv$  לכל  $v \in \mathbb{R}^2$ , שווה ל:

א.  $P = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$

ב.  $P = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$

ג.  $P = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & -3 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$

ד.  $P = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -3 & 1 \end{pmatrix}$

ה. אף תשובה אינה נכונה.

15) יהי  $V$  מרחב וקטורי מעל שדה  $F$ , ותהיינה  $A, B$  קבוצות שונות לא ריקות

וזרות של וקטורים מ- $V$ . אז בהכרח מתקיים:

א. אם  $A \cup B$  בלתי תלויה לינארית, אז בהכרח  $sp(A) \cap sp(B) = \{0\}$ .

ב. אם  $A \cup B$  תלויה לינארית,

אז בהכרח  $A$  תלויה לינארית או  $B$  תלויה לינארית.

ג. אם  $A, B$  בלתי תלויות לינארית, אז בהכרח  $A \cup B$  בלתי תלויה לינארית.

ד. אם  $sp(A) \cup sp(B) = sp(A \cup B)$ , אז בהכרח  $A \cup B$  תלויה לינארית.

ה. אף תשובה אינה נכונה.

16) אם  $W$  תת מרחב של מרחב וקטורי  $V$ , אז:

א. כל בסיס של  $V$  מכיל בסיס כלשהו של  $W$ , וכל בסיס של  $W$  מוכל בבסיס כלשהו של  $V$ .

ב. כל בסיס של  $V$  מכיל בסיס כלשהו של  $W$ , אבל לא כל בסיס של  $W$  מוכל בהכרח בבסיס כלשהו של  $V$ .

ג. לא כל בסיס של  $V$  מכיל בהכרח בסיס כלשהו של  $W$ , אבל כל בסיס של  $W$  מוכל בבסיס כלשהו של  $V$ .

ד. אף תשובה אינה נכונה.

(17) יהיו  $U, W$  שני תתי-מרחבים של מרחב  $V$ ,

כך ש- $\dim V = n, \dim U = \dim W = n - 1$ .

אז:

א.  $n - 2 \leq \dim(U \cap W)$

ב. אם  $U \neq W$ , ייתכן ש- $U \subset W$ .

ג. קיים  $v \in V$ , כך ש- $V = U + \text{sp}\{v\}$  ו- $U \cap \text{sp}\{v\} = \{0\}$ .

ד. אם  $U + \text{sp}\{v\} = V$  ו- $U \cap \text{sp}\{v\} = \{0\}$ , אז  $v \in W$ .

(18) נניח כי  $v_1, v_2, v_3, v_4$  הם וקטורים במרחב ליניארי  $V$ .

הוכיחו כל אחת מהטענות הבאות:

א. אם  $\text{Span}\{v_1, v_2\} \cap \text{Span}\{v_3, v_4\}$  והווקטורים  $v_1, v_2, v_3, v_4$  שונים זה מזה,

אז הווקטורים  $v_1 - v_2$  ו- $v_3 - v_4$  הם בת"ל.

ב. אם  $v_1, v_2$  בת"ל וגם  $v_3, v_4$  בת"ל, וכן  $\text{Span}\{v_1, v_2\} \cap \text{Span}\{v_3, v_4\} = \{0\}$ ,

אז  $v_1, v_2, v_3, v_4$  הם בת"ל.

(19) אם  $V, W$  תת מרחבים של מרחב וקטורי  $U$ , ומתקיים:

$$\dim U = 6, \dim V = 5, \dim W = 3$$

אז  $\dim(V \cap W)$  יכול להיות:

א. 0

ב. 1

ג. 2

ד. 3

ה. 4

ו. 5

(20)  $V, W$  תת-מרחבים ממימד 3 של  $\mathbb{R}^7$ ,  $\{w_1, w_2, w_3\}$  בסיס של  $W$  ו- $\{v_1, v_2, v_3\}$

בסיס של  $V$ , אז:

א.  $\{v_1, w_1, v_2, w_2, v_3, w_3\}$  בלתי תלוי לינארית.

ב.  $\{v_1, w_1, v_2, w_2, v_3, w_3\}$  פורשת את  $V + W$ .

ג.  $\{v_1 + w_1, v_2 + w_2, v_3 + w_3\}$  בת"ל.

ד.  $\{v_1 + w_1, v_2 + w_2, v_3 + w_3\}$  פורשת את  $V + W$ .

ה. אף תשובה אינה נכונה.

(21) אם  $A$  מטריצה לא ריבועית, אז בהכרח:

- מרחב השורות של  $A^t$  שווה למרחב השורות של  $A$ .
- מרחב השורות של  $A^t$  שונה ממרחב השורות של  $A$ .
- ממד מרחב השורות של  $A^t$  שווה לממד מרחב השורות של  $A$ .
- ממד מרחב השורות של  $A^t$  שונה מממד מרחב השורות של  $A$ .
- אף תשובה אינה נכונה.

(22) תהינה  $A, B$  מטריצות ריבועיות ממשיות מסדר  $n \geq 2$ .

אזי בהכרח מתקיים:

- מרחב השורות של  $AB$  מוכל במרחב השורות של  $A$ .
- אם  $AB = 0$ , אז בהכרח  $B = 0$  או  $A = 0$ .
- אם  $AB$  משולשית עליונה, אז בהכרח  $A$  משולשית עליונה או  $B$  משולשית עליונה.
- אם  $AB = 2I_n$ , אז בהכרח  $BA = 2I_n$ .
- אף תשובה אינה נכונה.

(23) תהי  $A$  קבוצה בת 6 פולינומים במרחב  $\mathbb{R}_5[x]$  מעל  $\mathbb{R}$  (מרחב הפולינומים

ממעלה עד וכולל 6), ונניח בנוסף ש- $Sp(A) = \mathbb{R}_5[x]$ .

אזי בהכרח מתקיים:

- א. ייתכן ש- $A$  מכילה בדיוק 4 פולינומים ממעלה 2.
- ב. ייתכן ש- $A$  מכילה בדיוק 4 פולינומים ממעלה 1.
- ג. שני תת-מרחבים של  $\mathbb{R}_5[x]$  מאותו מימד בהכרח שווים.
- ד.  $A$  בלתי תלויה לינארית.
- ה. אף תשובה אינה נכונה.

$$(24) \text{ יהי } a \text{ מספר ממשי ויהיו } U = Sp \left\{ \begin{pmatrix} a \\ a \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ 1 \\ a \end{pmatrix} \right\}, W = Sp \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ a \\ a \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a \\ 1 \\ a \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

שני תתי-מרחבים של  $\mathbb{R}^4$ . בהכרח מתקיים:

- א.  $U \cap W = \{0\}$  לכל ערכי  $a$ .
- ב.  $U \cap W \neq \{0\}$  לכל ערכי  $a$ .
- ג.  $\dim(U \cap W) = 3$  לכל ערכי  $a \neq \pm 1$ .
- ד.  $\dim(U \cap W) = 1$  לכל ערכי  $a \neq \pm 1$ .
- ה. אף תשובה אינה נכונה.

$$(25) \text{ נתונות המטריצות } T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 6 & 9 \\ 2 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 5 \\ -1 & -1 & 0 \\ 2 & 4 & 3 \end{bmatrix}$$

אז בהכרח מתקיים:

א.  $\text{rank}(T) = 1, \text{rank}(R) = 2$

ב.  $\text{rank}(R^3 T^5) = 1$

ג. מרחב השורות של  $R^3 T^5$  שווה למרחב השורות של  $T^5$ .

ד.  $T^{100} = 0$

ה. אף תשובה אינה נכונה.

(26) יהי  $V$  מרחב וקטורי מעל שדה  $F$ , ותהי  $A = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  קבוצה של וקטורים

מ- $V$  ( $1 \leq n$ ). נניח בנוסף ש- $\dim(V) = n$ . אזי בהכרח מתקיים:

א. אם  $A$  בלתי תלויה לינארית, אז  $A$  פורשת את  $V$ .

ב. אם  $A$  קבוצה פורשת ל- $V$ , אז  $A$  בלתי תלויה לינארית.

ג. ייתכנו מקרים בהם  $A$  פורשת את  $V$ , אך  $A$  תלויה לינארית.

ד. ייתכנו מקרים בהם  $A$  בלתי תלויה לינארית, אך  $A$  אינה פורשת את  $V$ .

ה. אף תשובה אינה נכונה.

(27) יהי  $V$  מרחב וקטורי מעל שדה  $F$ , ותהיינה  $A, B$  קבוצות שונות לא ריקות של

וקטורים מ- $V$ . אז בהכרח מתקיים:

א. אם  $A \cup B$  בלתי תלויה לינארית, אז בהכרח  $sp(A) \cap sp(B) = \{0\}$ .

ב. אם  $A, B$  תלויות לינאריות, אז בהכרח  $A \cap B$  תלויה לינארית.

ג. אם  $A, B$  בלתי תלויות לינאריות, אז בהכרח  $A \cup B$  בלתי תלויה לינארית.

ד. אם  $sp(A) \cup sp(B) = sp(A \cup B)$ , אז בהכרח  $A \cup B$  תלויה לינארית.

ה. אף תשובה אינה נכונה.

(28) וקטור הקואורדינטות של הפולינום  $2x^3 + 12x^2 - x + 11$ ,

ביחס לבסיס  $\{2x^3 + 3x^2 + 2, x + 1, x^3 + x^2, 2x^2 + 2\}$ , הוא:

א.  $(2, 2, -2, 4)$

ב.  $(4, -2, -1, 2)$

ג.  $(2, -1, -2, 4)$

ד.  $(4, -1, 2, 2)$

ה. אף תשובה אינה נכונה.

(29) תהי  $A$  מטריצה כלשהי. אזי בהכרח:

- אם שורות  $A$  בת"ל, אזי עמודות  $A$  בת"ל.
- אם שורות  $A$  בת"ל ועמודות  $A$  בת"ל, אזי בהכרח  $A$  מטריצה ריבועית.
- אם שורות  $A$  בת"ל ועמודות  $A$  בת"ל, אזי בהכרח  $A$  מטריצה הפיכה.
- אם שורות  $A$  בת"ל, אזי בהכרח למערכת  $Ax=0$  יש פתרון יחיד.
- אף תשובה אינה נכונה.

(30) נתונים תת-מרחבים של  $\mathbb{R}^4$  מעל  $\mathbb{R}$ :

$$U = \{(a,b,c,d) \in \mathbb{R}^4 \mid a+b+c=d\}$$

$$W = sp\{(1,0,1,1), (0,2,1,0), (0,1,1,1), (1,1,1,0)\}$$

- מצאו בסיס וממד עבור  $U, W, U \cap W$ .
- עבור תת מרחבים  $K, L$  של מרחב וקטורי  $V$ , הגדירו את  $K+L$ .

(31)  $A$  מטריצה לא ריבועית, כך שלמערכת המשוואות ההומוגנית  $Ax=0$  פתרון יחיד, אז:

- יש מערכת לא הומוגנית  $Ax=b$  ללא פתרון.
- יש מערכת לא הומוגנית  $Ax=b$  עם יותר מפתרון אחד.
- יש מערכת לא הומוגנית  $A^t y=c$  ללא פתרון.
- יש מערכת לא הומוגנית  $A^t y=c$  עם יותר מפתרון אחד.
- אף תשובה אינה נכונה.

(32) תהי  $A$  מטריצה ממשית לא ריבועית מסדר  $m \times n$ . אזי בהכרח מתקיים:

- אם למערכת  $Ax=b$  יש פתרון לכל  $b \in \mathbb{R}^m$ , אז בהכרח  $m < n$ .
- ייתכן ש-  $A^t A = I_m$  וגם  $AA^t = I_n$ .
- אם  $rank(A) = m$ , אז למערכת ההומוגנית  $Ax=0$  יש אינסוף פתרונות.
- אם למערכת ההומוגנית  $Ax=0$  יש אינסוף פתרונות, אז בהכרח  $m < n$ .
- אף תשובה אינה נכונה.

(33) נתונות מטריצות ממשיות  $A$  מסדר  $2 \times 4$  ו-  $B$  מסדר  $4 \times 4$ ,

$$\text{כך ש- } rank(A) = 2, \quad rank(B) = 3.$$

הוכיחו כי  $AB \neq 0$ .

- 34** תהי  $A$  מטריצה ממשית מגודל  $m \times n$ , כאשר  $m < n$ .  
 נסמן ב- $A^T$  את המטריצה המוחלפת. בהכרח ש:  
 א. מימד מרחב הפתרונות של המערכת  $AX = 0$  הוא  $n - m$ .  
 ב. למערכת  $(A^T A)x = 0$  יש אינסוף פתרונות.  
 ג. ייתכן מצב בו למערכת  $(A^T A)x = 0$  יש פתרון יחיד.  
 ד. ייתכן מצב בו למערכת  $(AA^T)x = 0$  יש פתרון יחיד.  
 ה. אף תשובה אינה נכונה.

- 35**  $A$  מטריצה  $3 \times 3$ , כך ש- $A^2 = 0$  אבל  $A \neq 0$ , אז הדרגה של  $A$  יכולה להיות:  
 א. 0  
 ב. 1  
 ג. 2  
 ד. 3  
 ה. אף תשובה אינה נכונה.

- 36** תהיינה  $A$  מטריצה מסדר  $3 \times 5$  ו- $B$  מטריצה  $5 \times 3$  אז:  
 א.  $AB$  הפיכה אם ורק אם  $BA$  הפיכה.  
 ב.  $AB$  בהכרח לא הפיכה.  
 ג.  $BA$  בהכרח הפיכה.  
 ד. אם  $AB = 0$ , אז  $\text{rank}(A) + \text{rank}(B) \leq 5$ .

- 37** אם  $A$  מטריצה, כך שלמערכת ההומוגנית עם מטריצת מקדמים  $A$  פתרון יחיד, אז בהכרח:  
 א.  $A$  הפיכה.  
 ב. למערכת ההומוגנית עם מטריצת מקדמים  $A'$  פתרון יחיד.  
 ג. לכל מערכת לא הומוגנית עם מטריצת מקדמים  $A$  פתרון יחיד.  
 ד. מרחב העמודות של  $A$  שונה ממרחב הפתרונות של  $A$ .

- 38** תהי  $A$  מטריצה ממשית מסדר  $m \times n$ , אזי בהכרח מתקיים:  
 א. עבור  $m = n$ , אם למערכת  $Ax = b$  יש פתרון לכל  $b \in \mathbb{R}^m$ , אז בהכרח למערכת  $A^T x = b$ , יש פתרון לכל  $b \in \mathbb{R}^m$ .  
 ב. אם למערכת ההומוגנית  $Ax = 0$  יש אינסוף פתרונות, אז בהכרח  $m < n$ .  
 ג. ייתכן ש- $A^T A = I_n$  וגם  $AA^T = I_m$ .  
 ד. אף תשובה אינה נכונה.

$$(39) \text{ נתון כי } A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \text{ הפיכה.}$$

אז בהכרח:

$$\alpha_{11}x + \alpha_{12}y = \alpha_{13}$$

א. למערכת  $\alpha_{21}x + \alpha_{22}y = \alpha_{23}$  פתרון יחיד.

$$\alpha_{31}x + \alpha_{32}y = \alpha_{33}$$

$$\alpha_{11}x + \alpha_{12}y + \alpha_{13}z + w = 0$$

ב. למערכת  $\alpha_{21}x + \alpha_{22}y + \alpha_{23}z - 4w = 1$  אינסוף פתרונות.

$$\alpha_{31}x + \alpha_{32}y + \alpha_{33}z + 3w = -4$$

$$\alpha_{11}x + \alpha_{21}y + \alpha_{31}z = 3$$

ג. למערכת  $\alpha_{12}x + \alpha_{22}y + \alpha_{32}z = 1$  אין פתרון.

$$\alpha_{13}x + \alpha_{23}y + \alpha_{33}z = 1$$

ד. אף תשובה אינה נכונה.

### תשובות סופיות

(11) א	(12) ב	(13) א	(14) ד
(15) א+ד	(16) ג	(17) א+ג	(18) הוכחה.
(19) ד+ג	(20) ב	(21) ב+ג	(22) ד
(23) ה	(24) ד+ב	(25) ב+ג	(26) א+ב
(27) א	(28) ג	(29) ג	

$$B_U = \{(-1, 1, 00), (-1, 010), (1, 001)\}$$

$$B_W = \{(100-1), (010-1), (0012)\}$$

$$U \cap W = sp\{(1, 0, 2, 3), (0, 1, 2, 3)\}$$

$$\dim U = 3, \quad \dim W = 3, \quad \dim(U \cap W) = 2$$

$$(31) \text{ ד} \quad (32) \text{ א+ב+ג} \quad (33) \text{ הוכחה.}$$

$$(34) \text{ ד+ב} \quad (35) \text{ ב} \quad (36) \text{ ד}$$

$$(37) \text{ ד} \quad (38) \text{ א+ג} \quad (39) \text{ ב}$$