

# מבוא מתמטי לפיסיקאים 2 (ממפיס 2)

פרק 19 - מרחבי מכפלה פנימית

תוכן העניינים

1. מרחבי מכפלה פנימית ..... 1
2. הנורמה והמרחק ..... 3
3. אי שוויון קושי שוורץ, יישומים ..... 5
4. אורתוגונליות ..... 7
5. משלים אורתוגונלי ..... 9
6. קבוצה ובסיס אורתוגונלי ..... 11
7. ההיטל של וקטור ..... 14
8. תהליך גרהם שמידט ..... 15
9. מטריצות אורתוגונליות ..... 16
10. העתקות אורתוגונליות ..... 19

## מרחבי מכפלה פנימית

### שאלות

(1) לכל שני וקטורים  $u = (x_1, x_2)$ ,  $v = (y_1, y_2)$  ב- $\mathbb{R}^2$ , נגדיר:

$$\langle u, v \rangle = x_1 y_1 - 3x_1 y_2 - 3x_2 y_1 + 4x_2 y_2$$

בדוק האם ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $\mathbb{R}^2$ .

(2) לכל שני וקטורים  $u = (x_1, x_2)$ ,  $v = (y_1, y_2)$  ב- $\mathbb{R}^2$ , נגדיר:

$$\langle u, v \rangle = x_1 y_1 - 3x_1 y_2 - 3x_2 y_1 + kx_2 y_2$$

עבור אילו ערכים של הקבוע  $k$  ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $\mathbb{R}^2$ ?

(3) לכל שני וקטורים  $u = (x_1, x_2, x_3)$ ,  $v = (y_1, y_2, y_3)$  ב- $\mathbb{R}^3$ , נגדיר:

$$\langle u, v \rangle = x_1 y_1 + kx_1 y_3 + x_2 y_2 + kx_3 y_1 + x_3 y_3$$

עבור אילו ערכים של הקבוע  $k$  ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $\mathbb{R}^3$ ?

(4) לכל שני וקטורים  $u = (u_1, \dots, u_n)$ ,  $v = (v_1, \dots, v_n)$  ב- $\mathbb{R}^n$ ,

נגדיר:  $\langle u, v \rangle = \sum_{i=1}^n k_i u_i v_i$ , כאשר  $k_1, \dots, k_n$  מספרים חיוביים כלשהם.

הראה כי הנוסחה לעיל מגדירה מכפלה פנימית ב- $\mathbb{R}^n$ .

מהי המכפלה המתקבלת אם  $k_i = 1$  לכל  $1 \leq i \leq n$ ?

(5) לכל שתי מטריצות  $A, B$  ב- $M_{m \times n}[R]$ , נגדיר:  $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$ .

בדוק האם ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $M_{m \times n}[R]$ .

$\text{tr}$  מייצג את המילה  $\text{trace}$  (עקבה), כלומר, סכום איברי האלכסון.

(6) לכל שתי פונקציות  $f, g$  ב- $C[a, b]$ , נגדיר:  $\langle f, g \rangle = \int_a^b f \cdot g dx$ .

בדוק האם ההגדרה לעיל מהווה מכפלה פנימית ב- $C[a, b]$ .

- (7) נתונה מכפלה פנימית על  $R^3$ , שעבורה הקבוצה  $B = \{(1,1,0), (1,1,0), (1,0,0)\}$  מהווה בסיס אורתונורמלי. חשב את המכפלה הפנימית של שני וקטורים כלליים  $\langle (x_1, x_2, x_3), (y_1, y_2, y_3) \rangle$ .

### תשובות סופיות

- (1) ההגדרה לא מהווה מכפלה פנימית.  
 (2)  $k > 9$   
 (3)  $-1 < k < 1$   
 (4) עבור  $k_i = 1$  לכל  $1 \leq i \leq n$ , נקבל את המכפלה הפנימית הסטנדרטית.  
 (5) ההגדרה מהווה מכפלה פנימית ב- $M_{m \times n}[R]$ .  
 (6) ההגדרה מהווה מכפלה פנימית ב- $C[a, b]$ .

$$(x_1, x_2, x_3) \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

## הנורמה והמרחק

### שאלות

(1) נתונים שלושה וקטורים ב- $\mathbb{R}^3$ :  $u = (1, -2, 2)$ ,  $v = (3, -2, 6)$ ,  $w = (5, 3, -2)$ .  
 בהתייחס למכפלה הפנימית הרגילה ב- $\mathbb{R}^3$ , חשב:

- א.  $\langle u, v \rangle$       ב.  $\langle u, w \rangle$       ג.  $\langle v, w \rangle$       ד.  $\langle u + v, w \rangle$   
 ה.  $\|u\|$       ו.  $\|v\|$       ז.  $\|u + v\|$       ח.  $d(u, v)$   
 ט.  $\hat{u}$       י.  $\hat{v}$

(2) נתונות שלוש מטריצות ב- $M_{2 \times 3}[R]$ :

$$A = \begin{pmatrix} 10 & 9 & 8 \\ 7 & 6 & 5 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 3 & -5 & 2 \\ 1 & 0 & -4 \end{pmatrix}$$

בהתייחס למכפלה הפנימית  $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$  ב- $M_{2 \times 3}[R]$ ,  
 חשב:

- א.  $\langle A, B \rangle$       ב.  $\langle A, C \rangle$       ג.  $\langle A, B + C \rangle$   
 ד.  $\langle B, C \rangle$       ה.  $\langle 4A + 10B, 11C \rangle$       ו.  $\|A\|$   
 ז.  $\|B\|$       ח.  $d(A, B)$       ט.  $\hat{A}$

(3) נתונים שלושה פולינומים ב- $C[0, 1]$ :

$$p(x) = x + 3, \quad q(x) = 3x + 1, \quad r(x) = x^2 - 4x - 1$$

בהתייחס למכפלה הפנימית:  $\langle p, q \rangle = \int_0^1 p(x) \cdot q(x) dx$

חשב:

- א.  $\langle p, q \rangle$       ב.  $\langle p, r \rangle$       ג.  $\langle p, q + r \rangle$   
 ד.  $\|p\|$       ה.  $d(p, q)$       ו.  $\hat{r}$

(4) הוכח:  $\|u+v\|^2 = \|u\|^2 + 2\langle u, v \rangle + \|v\|^2$ .

(5) הוכח:  $\|u-v\|^2 = \|u\|^2 - 2\langle u, v \rangle + \|v\|^2$ .

(6) הוכח:  $\langle u-v, u+v \rangle = \|u\|^2 - \|v\|^2$ .

(7) הוכח:  $\|u+v\|^2 + \|u-v\|^2 = 2\|u\|^2 + 2\|v\|^2$ .

(8) הוכח:  $\frac{1}{4}(\|u+v\|^2 - \|u-v\|^2) = \langle u, v \rangle$ .

### תשובות סופיות

- (1) א. 19      ב. -5      ג. -3      ד. -8  
 ה. 3      ו. 7      ז.  $\sqrt{96}$       ח.  $\sqrt{20}$   
 ט.  $\left(\frac{1}{3}, -\frac{2}{3}, \frac{2}{3}\right)$       י.  $\left(\frac{3}{7}, -\frac{2}{7}, \frac{6}{7}\right)$
- (2) א. 185      ב. -12      ג. 173      ד. -24      ה. -3168  
 ו.  $\sqrt{355}$       ז.  $\sqrt{139}$       ח.  $\sqrt{124}$       ט.  $\frac{1}{\sqrt{355}} \begin{pmatrix} 3 & -5 & 2 \\ 1 & 0 & -4 \end{pmatrix}$
- (3) א. 9      ב. -9.5833      ג. -0.5833      ד.  $\sqrt{\frac{37}{3}}$
- ה.  $\sqrt{\frac{4}{3}}$       ו.  $\frac{x^2 - 4x - 1}{\sqrt{7\frac{13}{15}}}$
- (4) שאלת הוכחה.  
 (5) שאלת הוכחה.  
 (6) שאלת הוכחה.  
 (7) שאלת הוכחה.  
 (8) שאלת הוכחה.

## אי שוויון קושי-שוורץ, יישומים

### שאלות

(1) הוכח כי אם  $u, v$  תלויים לינארית, אז  $|\langle u, v \rangle| = \|u\| \cdot \|v\|$ .

(2) יהיו  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ו- $y_1, y_2, \dots, y_n$  מספרים ממשיים. הוכח כי  $(x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n)^2 \leq (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)$ .

(3) יהיו  $f, g$  פונקציות רציפות בקטע הסגור  $[a, b]$ . הוכח כי  $\left( \int_a^b f(x)g(x)dx \right)^2 \leq \left( \int_a^b f^2(x) \right) \left( \int_a^b g^2(x) \right)$ .

(4) חשב את הזווית בין שני הווקטורים  $u = (1, 2, 2)$ ,  $v = (-2, 1, 2)$  ביחס למכפלה הפנימית הסטנדרטית ב- $\mathbb{R}^3$ .

(5) חשב את הזווית בין שני הווקטורים  $u = (3, 4)$ ,  $v = (1, 2)$  ביחס למכפלה הפנימית  $\langle (x_1, x_2), (y_1, y_2) \rangle = x_1 y_1 - x_1 y_2 - x_2 y_1 + 3x_2 y_2$  ב- $\mathbb{R}^2$ .

(6) מצא את  $\cos \theta$  עבור הזווית  $\theta$  שבין  $p(x) = 2x - 1$  ו- $q(x) = x^2$  בהתייחס למכפלה הפנימית  $\langle p, q \rangle = \int_0^1 p(x) \cdot q(x) dx$  שב- $C[0, 1]$ .

(7) מצא את  $\cos \theta$  עבור הזווית  $\theta$  שבין  $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}$ ,  $B = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$  בהתייחס למכפלה הפנימית  $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$  ב- $M_{2 \times 2}[\mathbb{R}]$ .

**תשובות סופיות**

(1) הוכחה.

(2) הוכחה.

(3) הוכחה.

(4)  $\theta = 63.61^\circ$ (5)  $\theta = 9.44^\circ$ (6)  $\cos \theta = 0.173^\circ$ (7)  $\cos \theta = 0.00036^\circ$

## אורתוגונליות

## שאלות

1) הוכח כי הווקטורים  $u = (1, 2, 3)$ ,  $v = (4, 7, -6)$  אורתוגונליים ב- $\mathbb{R}^3$ .

2) מצא את ערכו של הקבוע  $k$ , עבורו הווקטורים  $u = (1, k, 3)$ ,  $v = (4, 7, -6)$  יהיו אורתוגונליים ב- $\mathbb{R}^3$ .

3) מצא וקטור יחידה המאונך לשני הווקטורים  $u = (1, 2, 3)$ ,  $v = (2, 5, 7)$  ב- $\mathbb{R}^3$ .

4) הוכח כי הפולינומים  $p(x) = 2x - 1$ ,  $q(x) = 6x^2 - 6x + 1$  אורתוגונליים בקטע  $[0, 1]$  (ביחס למכפלה הפנימית  $\langle p, q \rangle = \int_0^1 p(x) \cdot q(x) dx$ ).

5) במרחב  $P_n[\mathbb{R}]$  (מרחב הפולינומים ממעלה  $n \geq 0$  מעל  $\mathbb{R}$ ), נגדיר מכפלה פנימית:

$$\langle p(x), q(x) \rangle = \sum_{k=0}^n p(k)q(k) = p(0)q(0) + p(1)q(1) + \dots + p(n)q(n)$$

הראה כי הפולינומים:

$$p(x) = x(x-2)(x-4)(x-6), \quad q(x) = x(x-1)(x-3)(x-5)(x-7)$$

אורתוגונליים כאיברי המרחב  $P_7[\mathbb{R}]$ , עם המכפלה הפנימית שהוגדרה לעיל.

6) נתונות שתי מטריצות:  $A = \begin{pmatrix} k & 1 \\ 3 & -1 \end{pmatrix}$ ,  $B = \begin{pmatrix} 4 & -1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$

בהתייחס למכפלה הפנימית:  $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$  ב- $M_{2 \times 2}[\mathbb{R}]$ , מצא את הערך של הקבוע  $k$ , עבורו המטריצות הנ"ל אורתוגונליות.

7) הוכח כי:  $\|u+v\| = \|u-v\| \Leftrightarrow u \perp v$ .

מהו הפירוש הגיאומטרי של תכונה זו ב- $\mathbb{R}^2$ ?

8) הוכח כי:  $\|u+v\|^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2 \Leftrightarrow u \perp v$ .

מהו הפירוש הגיאומטרי של תכונה זו?

(9) הוכח כי :  $\|u\| = \|v\| \Leftrightarrow (u-v) \perp (u+v)$ .  
 מהו הפירוש הגיאומטרי של תכונה זו?

### תשובות סופיות

(1) הוכחה.

(2)  $k = 2$

(3)  $\left( \frac{-1}{\sqrt{3}}, \frac{-1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right)$

(4) הוכחה.

(5) הוכחה.

(6)  $k = 0.5$

(7) הוכחה.

(8) הוכחה.

(9) הוכחה.

## משלים אורתוגונלי

## שאלות

- (1) יהי  $W = \text{span}\{(1, 2, -1, 1), (2, 5, 3, 1)\}$ . מצא בסיס וממד עבור  $W^\perp$ . הראה כי מתקיים משפט הפירוק.
- (2) יהי  $w = \text{span}\{(1, 1, 1)\}$ . מצא בסיס וממד עבור  $W^\perp$ . הראה כי מתקיים משפט הפירוק.
- (3) יהי  $W = \text{span}\{x\} \subseteq P_2[R]$ . מצא בסיס וממד עבור  $W^\perp$ , ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית בקטע  $[0, 1]$ .
- (4) יהי  $W = \text{span}\{x, x^2\} \subseteq P_2[R]$ . מצא בסיס וממד עבור  $W^\perp$ , ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית בקטע  $[0, 1]$ .
- (5) יהי  $W = \text{span}\left\{\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}\right\} \subseteq M_{2 \times 2}[R]$ . מצא בסיס וממד עבור  $W^\perp$ , ביחס למכפלה הפנימית  $\langle A, B \rangle = \text{tr}(B^T A)$  ב- $M_{2 \times 2}[R]$ .
- (6) מצא בסיס למשלים האורתוגונלי של מרחב המטריצות האלכסוניות מסדר 3.
- (7) מצא בסיס למשלים האורתוגונלי של מרחב המטריצות הסימטריות מסדר 2.
- (8) נתונה מערכת משוואות הומוגנית  $A \cdot \underline{x} = 0$ . יהי  $U$  מרחב הפתרונות של המערכת. תן פירוש אפשרי ל- $U$  בעזרת המושג משלים אורתוגונלי, והמושג מרחב השורות של המטריצה  $A$ .
- (9) נניח ש- $W_1, W_2$  הן תת קבוצות של  $V$ . הוכח כי:  $W_1 \subseteq W_2 \Rightarrow W_2^\perp \subseteq W_1^\perp$ .

(10) נניח ש- $W$  הוא תת קבוצה של  $V$ .  
הוכח כי:  $W \subseteq W^{\perp\perp}$ .

(11) נניח ש- $W$  הוא תת קבוצה של  $V$ .  
הוכח כי:  $W = W^{\perp\perp}$  (אם  $V$  מממד סופי).

(12) נניח ש- $W_1, W_2$  הן תת קבוצות של  $V$ .  
הוכח כי:  $(W_1 + W_2)^\perp = W_1^\perp \cap W_2^\perp$ .

(13) נניח ש- $W_1, W_2$  הן תת קבוצות של  $V$ .  
הוכח כי:  $(W_1 \cap W_2)^\perp = W_1^\perp + W_2^\perp$ .

### תשובות סופיות

$$W^\perp = \text{span}\{(-3, 1, 0, 1), (11, -5, 1, 0)\} \quad (1)$$

$$W^\perp = \text{span}\{(-1, 0, 1), (-1, 1, 0)\} \quad (2)$$

$$W^\perp = \text{span}\left\{\left(-\frac{2}{3} + x\right), \left(-\frac{1}{2} + x^2\right)\right\} \quad (3)$$

$$W^\perp = \text{span}\{1.5x^2 - 6x + 5\} \quad (4)$$

$$W^\perp = \text{span}\left\{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\right\} \quad (5)$$

$$B_w = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$B_{w^\perp} = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \right\} \quad (7)$$

(8) הסבר בוודאו.

(9) הוכחה.

(10) הוכחה.

(11) הוכחה.

(12) הוכחה.

(13) הוכחה.

## קבוצה ובסיס אורתוגונלי

## שאלות

- (1) נתונה קבוצת וקטורים  $S = \{(2, 1, -4), (1, 2, 1), (3, -2, 1)\}$  ב- $\mathbb{R}^3$ .
- א. הראה שהקבוצה  $S$  אורתוגונלית.  
 ב. נרמל את הקבוצה לקבלת קבוצה אורתונורמלית.  
 ג. ללא חישוב, הוכח שהקבוצה מהווה בסיס ל- $\mathbb{R}^3$ .
- (2) נתונה קבוצת וקטורים  $S = \{(2, 1, -4), (1, 2, 1), (3, -2, 1)\}$  ב- $\mathbb{R}^3$ ,  
 ללא דירוג, תוך שימוש במכפלות פנימיות, רשום את הווקטור  $(13, -1, 7)$ ,  
 כצירוף לינארי של איברי  $S$ .
- (3) נתונה קבוצת וקטורים  $S = \{(2, 1, -4), (1, 2, 1), (3, -2, 1)\}$  ב- $\mathbb{R}^3$ .  
 רשום את וקטור הקואורדינטות של וקטור כלשהו  $v = (a, b, c)$  ב- $\mathbb{R}^3$ ,  
 ביחס לבסיס  $S$ .
- (4) נניח ש- $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  היא בסיס אורתוגונלי ל- $V$ .  
 הוכח שלכל  $v \in V$ , אז  $v = \frac{\langle v, u_1 \rangle}{\langle u_1, u_1 \rangle} u_1 + \frac{\langle v, u_2 \rangle}{\langle u_2, u_2 \rangle} u_2 + \dots + \frac{\langle v, u_n \rangle}{\langle u_n, u_n \rangle} u_n$ .  
 הערה: הקבוע  $a_i = \frac{\langle v, u_i \rangle}{\langle u_i, u_i \rangle}$  נקרא מקדם פורייה של  $v$  ביחס ל- $u_i$ ,  
 או הרכיב של  $v$  ביחס ל- $u_i$ .
- (5) נתונה קבוצת פונקציות  $S = \{\cos x, \cos 2x, \cos 3x, \dots\}$  ב- $V = C[0, \pi]$ .  
 האם הקבוצה אורתוגונלית? אם כן, האם היא אורתונורמלית?  
 במידה והקבוצה אורתוגונלית ולא אורתונורמלית,  
 נרמל אותה לקבלת קבוצה אורתונורמלית.  
 ענה ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית.
- (6) נתונה קבוצת פונקציות  $S = \{1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots\}$  ב- $V = C[0, 2\pi]$ .  
 האם הקבוצה אורתוגונלית? אם כן, נרמל אותה לקבלת קבוצה אורתונורמלית.  
 ענה ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית.  
 האם הקבוצה מהווה בסיס?

7) נתונה קבוצה  $S = \{(2, 4, 4), (4, -1, -1), (0, 2, -2)\}$  ב- $\mathbb{R}^3$ .

בדוק האם הקבוצה  $S$  אורתוגונלית.  
 האם היא בסיס אורתוגונלי? האם היא אורתונורמלית?  
 האם היא בסיס אורתונורמלי?  
 במידה והקבוצה אורתוגונלית אך לא אורתונורמלית, נרמל אותה.

8) נתונה קבוצה  $S = \{1, x, x^2, x^3\}$  ב- $P_3[\mathbb{R}]$ .

בדוק האם הקבוצה  $S$  אורתוגונלית.  
 האם היא בסיס אורתוגונלי? האם היא אורתונורמלית?  
 האם היא בסיס אורתונורמלי?  
 במידה והקבוצה אורתוגונלית אך לא אורתונורמלית, נרמל אותה.  
 (ענה ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית ב- $[0,1]$ )

9) נתונה קבוצה  $S = \{1, 2x-1, 6x^2-6x+1\}$  ב- $P_2[\mathbb{R}]$ .

בדוק האם הקבוצה  $S$  אורתוגונלית.  
 האם היא בסיס אורתוגונלי? האם היא אורתונורמלית?  
 האם היא בסיס אורתונורמלי?  
 במידה והקבוצה אורתוגונלית אך לא אורתונורמלית, נרמל אותה.  
 (ענה ביחס למכפלה הפנימית האינטגרלית ב- $[0,1]$ )

10) נתונה הקבוצה  $S = \left\{ \begin{pmatrix} 2 & 4 & 6 \\ 0 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\} \subseteq M_3[\mathbb{R}]$

בדוק: האם הקבוצה  $S$  אורתוגונלית? האם היא בסיס אורתוגונלי?  
 האם היא אורתונורמלית? האם היא בסיס אורתונורמלי?  
 במידה והקבוצה אורתוגונלית אך לא אורתונורמלית, נרמל אותה.  
 ענה ביחס למכפלה הפנימית הסטנדרטית של המטריצות.

## תשובות סופיות

1 א. הוכחה. ב.  $S = \left\{ \frac{(2,1,-4)}{\sqrt{2^2+1^2+(-4)^2}}, \frac{(1,2,1)}{\sqrt{6}}, \frac{(3,-2,1)}{\sqrt{14}} \right\}$  ג. הוכחה.

$$(13, -1, 7) = \frac{-1}{7}(2, 1, 4) + 3(1, 2, 1) + \frac{24}{7}(3, -2, 1) \quad (2)$$

$$\frac{2a+b-4c}{21}(2, 1, 4) + \frac{a+2b+c}{6}(1, 2, 1) + \frac{3a-2b+c}{14}(3, -2, 1) \quad (3)$$

4 הוכחה.

5 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה לא אורתונורמלית,

$$S = \left\{ \frac{\cos x}{\sqrt{0.5\pi}}, \frac{\cos 2x}{\sqrt{0.5\pi}}, \frac{\cos 3x}{\sqrt{0.5\pi}}, \dots \right\}$$

6 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה לא אורתונורמלית,

$$S = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\cos x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos 2x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin 2x}{\sqrt{\pi}}, \dots \right\}$$

7 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה מהווה בסיס אורתוגונלי, הקבוצה אינה

$$S = \left\{ \frac{1}{\sqrt{36}}(2, 4, 4), \frac{1}{\sqrt{8}}(4, -1, -1), \frac{1}{\sqrt{18}}(0, 2, -2) \right\}$$

8 הקבוצה לא אורתוגונלית.

9 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה מהווה בסיס אורתוגונלי,

$$S = \{1, \sqrt{3}(2x-1), \sqrt{5}(6x^2-6x+1)\}$$

10 הקבוצה אורתוגונלית, הקבוצה אינה בסיס אורתוגונלי, הקבוצה לא

$$S = \left\{ \frac{1}{\sqrt{80}} \begin{pmatrix} 2 & 4 & 6 \\ 0 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\}$$

## ההיטל של וקטור

### שאלות

- (1) מצא את מקדם פורייה  $c$  ואת ההיטל של  $v = (1, 2, 2)$  לאורך  $w = (0, 1, -1)$  ב- $\mathbb{R}^3$ .
- (2) מצא את מקדם פורייה  $c$  ואת ההיטל של  $v = (1, -2, 2, 0)$  לאורך  $w = (0, 2, -1, 2)$  ב- $\mathbb{R}^4$ . מסמנים גם  $\text{proj}(v, w)$ .
- (3) מצא את מקדם פורייה  $c$  ואת ההיטל של  $p(x) = 2x - 1$  לאורך  $q(x) = x^2$  במרחב הפולינומים עם המכפלה הפנימית האינטגרלית ב- $[0, 1]$ .
- (4) מצא את מקדם פורייה  $c$  ואת ההיטל של  $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$  לאורך  $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$  במרחב המטריצות הממשיות מסדר 2 עם המכפלה הפנימית הסטנדרטית.

### תשובות סופיות

- (1)  $\text{proj}(v, w) = cw = 0, \quad c = 0$
- (2)  $\text{proj}(v, w) = cw = -\frac{2}{3}(0, 2, -1, 2), \quad c = \frac{-2}{3}$
- (3)  $\text{proj}(p, q) = c \cdot q(x) = \frac{5}{6}x^2, \quad c = \frac{5}{6}$
- (4)  $\text{proj}(A, B) = cB = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad c = \frac{1}{6}$

## תהליך גרהם-שמידט

### שאלות

(1) נתון:  $U = \text{span}\{(1, 2, 3), (4, 5, 6), (7, 8, 9)\} \subseteq \mathbb{R}^3$   
מצא בסיס אורתונורמלי ל- $U$ .

(2) נתון:  $U = \text{span}\{(2, 2, 2, 2), (1, 1, 2, 4), (1, 2, -4, -3)\} \subseteq \mathbb{R}^4$   
מצא בסיס אורתונורמלי ל- $U$ .

(3) נתון:  $U = \text{span}\{4, x, x^2, x^3\} \subseteq P_3[x]$   
מצא בסיס אורתונורמלי ל- $U$ ,  
בהתייחס למכפלה הפנימית האינטגרלית בקטע  $[-1, 1]$ .

(4) נתון:  $U = \text{span}\left\{\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}\right\} \subseteq M_2[R]$   
מצא בסיס אורתונורמלי ל- $U$ ,  
בהתייחס למכפלה הפנימית הרגילה של המטריצות.

### תשובות סופיות

$$B_{\text{orthonormal}} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{15}}(1, 2, 3), \frac{1}{\sqrt{21}}(-4, -1, 2) \right\} \quad (1)$$

$$B_{\text{orthonormal}} = \left\{ w_1 = \frac{(2, 2, 2, 2)}{\sqrt{16}}, w_2 = \frac{(-1, -1, 0, 2)}{\sqrt{6}}, w_3 = \frac{(1, 3, -6, 2)}{\sqrt{50}} \right\} \quad (2)$$

$$B_{\text{orthonormal}} = \left\{ \hat{w}_1 = \frac{4}{\sqrt{32}}, \hat{w}_2 = \frac{x}{\sqrt{2}}, \hat{w}_3 = \frac{3x^2 - 1}{\sqrt{8}}, \hat{w}_4 = \frac{5x^3 - 3x}{\sqrt{7}} \right\} \quad (3)$$

$$B_{\text{orthonormal}} = \left\{ \hat{w}_1 = \frac{\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}}{\sqrt{30}}, \hat{w}_2 = \frac{\begin{pmatrix} 7 & 14 \\ -9 & -2 \end{pmatrix}}{\sqrt{330}}, \hat{w}_3 = \frac{\begin{pmatrix} -4 & 3 \\ 2 & -2 \end{pmatrix}}{\sqrt{33}} \right\} \quad (4)$$

## מטריצות אורתוגונליות

### שאלות

1) ציין אילו מבין המטריצות הבאות הן אורתוגונליות. במידה והמטריצה אורתוגונלית, מצא עבורה את המטריצה ההופכית:

$$\text{א. } \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix}$$

$$\text{ב. } \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$\text{ג. } \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

2) הוכח את המשפטים הבאים:

- א. מטריצה ריבועית  $A$  היא אורתוגונלית אם ורק אם  $A^T A = I$ .  
 ב. מטריצה אורתוגונלית  $A$  היא הפיכה ומתקיים  $A^{-1} = A^T$ .

3) ענה על הסעיפים הבאים:

- א. תהי  $A$  מטריצה אורתוגונלית. הוכח כי המטריצות  $A^{-1}, A^T$  אורתוגונליות.  
 ב. הוכח כי מכפלת מטריצות אורתוגונליות (מאותו סדר), היא מטריצה אורתוגונלית.  
 ג. הוכח שהדטרמיננטה של מטריצה אורתוגונלית היא 1 או -1.  
 ד. האם סכום מטריצות אורתוגונליות הוא בהכרח מטריצה אורתוגונלית?  
 ה. האם מכפלה של מטריצה אורתוגונלית בסקלר היא בהכרח מטריצה אורתוגונלית?  
 ו. הראה כי אם מטריצה אורתוגונלית היא משולשת, אז היא אלכסונית.

4) תהי  $A$  מטריצה מסדר  $n$ .

הוכח או הפרך:

- א. עמודותיה של המטריצה  $A$  מהוות בסיס אורתונורמלי ל- $R^n$ , אם ורק אם שורותיה מהוות בסיס אורתונורמלי ל- $R^n$ .  
 ב. עמודותיה של המטריצה  $A$  מהוות בסיס אורתוגונלי ל- $R^n$ , אם ורק אם שורותיה מהוות בסיס אורתוגונלי ל- $R^n$ .

(5) ענה על הסעיפים הבאים :

א. תהי  $A$  מטריצה מסדר  $n$ , אשר עמודותיה,  $\{v_1, \dots, v_n\}$ ,

מהוות בסיס אורתוגונלי ל- $R^n$ . נסמן  $v_i v_i = \lambda_i$ .

הוכח כי  $A^T A = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$ .

ב. הוכח: כדי להפוך מטריצה שעמודותיה מהוות בסיס אורתוגונלי, יש לחלק כל עמודה בסכום ריבועי איבריה ולשחלף לאחר מכן.

ג. הפוך את המטריצה  $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 0 & 4 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ .

ד. הפוך את המטריצה  $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} \\ 2 & 2 & -\sqrt{8} \\ -\sqrt{0.5} & \sqrt{0.5} & 0 \end{pmatrix}$ .

(6) הוכח את המשפט:

יהיו  $B$  ו- $C$  שני בסיסים אורתונורמליים של המרחב  $R^n$ .  
אז מטריצת המעבר מ- $B$  ל- $C$  היא מטריצה אורתוגונלית.

(7) ענה על הסעיפים הבאים :

א. תהי  $A$  מטריצת המעבר מבסיס אורתונורמלי  $B$  לבסיס  $C$ , של המרחב  $R^n$ .

הוכח כי אם  $A$  מטריצה אורתוגונלית, אז הבסיס  $C$  גם אורתונורמלי.

ב. תהי  $A$  מטריצת המעבר מבסיס  $B$  לבסיס אורתונורמלי  $C$ , של המרחב  $R^n$ .

הוכח כי אם  $A$  מטריצה אורתוגונלית, אז הבסיס  $B$  גם אורתונורמלי.

(8) ענה על הסעיפים הבאים :

א. הוכח כי אם  $A$  מטריצה אורתוגונלית מסדר  $n$ ,

אז קיימים שני בסיסים אורתונורמליים  $B$  ו- $C$ , של המרחב  $R^n$ ,  
כך ש- $A$  משמשת מטריצת המעבר מ- $B$  ל- $C$ .

ב. יהי  $v \in R^n$ , כך ש- $\|v\|=1$ .

הוכח שקיימת מטריצה אורתוגונלית, שהעמודה הראשונה שלה היא הוקטור  $v$ .

## תשובות סופיות

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}. \text{ב.}$$

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix}. \text{א. (1)}$$

ג. לא אורתוגונלית.

(2) שאלת הוכחה.

(3) שאלת הוכחה.

(4) שאלת הוכחה.

(5) א. שאלת הוכחה. ב. שאלת הוכחה.

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 0.25 & 0.125 & -\sqrt{0.5} \\ 0.25 & 0.125 & \sqrt{0.5} \\ \sqrt{0.125} & -\sqrt{0.125} & 0 \end{pmatrix}. \text{ד.}$$

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0.25 & 0 \\ -0.4 & 0 & 0.2 \end{pmatrix}. \text{ג.}$$

(6) שאלת הוכחה.

(7) שאלת הוכחה.

(8) שאלת הוכחה.

## העתקות אורתוגונליות

### שאלות

- (1) תהי  $T : R^n \rightarrow R^n$  העתקה לינארית. הוכח את המשפט:  $T$  אורתוגונלית  $\Leftrightarrow \forall u \in R^n, \|T(u)\| = \|u\|$ .
- (2) תהי  $T : R^n \rightarrow R^n$  העתקה לינארית אורתוגונלית.  
 א. הוכח כי  $T$  איזומורפיזם.  
 ב. הוכח כי גם  $T^{-1}$  אורתוגונלית.
- (3) ענה על הסעיפים הבאים:  
 א. תהי  $A$  מטריצה אורתוגונלית מסדר  $n$ . נגדיר העתקה לינארית  $T : R^n \rightarrow R^n$ , על ידי  $T(u) = Au$ . הוכח כי  $T$  היא העתקה אורתוגונלית.  
 ב. הוכח שכל העתקה אורתוגונלית  $T : R^n \rightarrow R^n$ , ניתן להציג בצורה  $T(u) = Au$ , כאשר  $A$  אורתוגונלית.
- (4) ענה על הסעיפים הבאים:  
 א. הוכח שהערכים העצמיים היחידים של העתקה אורתוגונלית הם  $\pm 1$ .  
 ב. הוכח שהערכים העצמיים היחידים של מטריצה אורתוגונלית הם  $\pm 1$ .
- (5) הוכח שמכפלת העתקות אורתוגונליות היא העתקה אורתוגונלית.
- (6) ענה על הסעיפים הבאים:  
 א. תהי  $T : R^n \rightarrow R^n$  העתקה אורתוגונלית, ויהי  $\{u_1, \dots, u_n\}$  בסיס אורתונורמלי כלשהו של  $R^n$ . הוכח ש- $\{T(u_1), \dots, T(u_n)\}$  אף הוא בסיס אורתונורמלי של  $R^n$ .  
 ב. תהי  $T : R^n \rightarrow R^n$  העתקה לינארית, ונניח שיש בסיס אורתונורמלי  $\{u_1, \dots, u_n\}$  של  $R^n$ , כך שגם הקבוצה  $\{T(u_1), \dots, T(u_n)\}$  מהווה בסיס אורתונורמלי של  $R^n$ . הוכח כי  $T$  היא העתקה אורתוגונלית.

7) ענה על הסעיפים הבאים :

- א. הוכח שמטריצה, שמייצגת העתקה אורתוגונלית לפי בסיס אורתונורמלי, היא בהכרח מטריצה אורתוגונלית.  
 ב. הוכח שכל העתקה לינארית, שהמטריצה המייצגת שלה בבסיס אורתונורמלי כלשהו היא אורתוגונלית, היא בהכרח העתקה אורתוגונלית.

8) בכל אחד מהסעיפים הבאים רשמו את הנוסחה עבור ההעתקה  $T$  :

א.  $T: R^2 \rightarrow R^2$  העתקת השיקוף ביחס לישר  $y = \frac{1}{\sqrt{3}}x$ .

ב.  $T: R^2 \rightarrow R^2$  העתקת השיקוף ביחס לישר  $y = \sqrt{3}x$ .

ג.  $T: R^2 \rightarrow R^2$  העתקת הסיבוב בזווית  $30^\circ$  ב- $R^2$ .

9) בכל אחד מהסעיפים הבאים תאר את פעולת ההעתקה מבחינה גיאומטרית. השתמש במושגים שיקוף וסיבוב.

א.  $T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

ב.  $T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{5} & \frac{4}{5} \\ \frac{4}{5} & -\frac{3}{5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

ג.  $T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

ד.  $T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{4}{5} & -\frac{3}{5} \\ -\frac{3}{5} & -\frac{4}{5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

\* את סעיף ד' פתור בשתי דרכים שונות.

10) תהי  $T: R^2 \rightarrow R^2$  העתקה לינארית, שמסובבת וקטור ב- $\theta$  מעלות נגד כיוון השעון. מצא נוסחה עבור ההעתקה  $T$ .

11) תהי  $T: R^2 \rightarrow R^2$  העתקת השיקוף ביחס לישר  $y = \tan \frac{\theta}{2} x$ .

מצא נוסחה עבור ההעתקה  $T$ .

12) תהי  $T: R^2 \rightarrow R^2$  העתקה אורתוגונלית. הוכח ש- $T$  היא בהכרח העתקת סיבוב, או העתקת שיקוף.

## תשובות

(1) שאלת הוכחה.

(2) שאלת הוכחה.

(3) שאלת הוכחה.

(4) שאלת הוכחה.

(5) שאלת הוכחה.

(6) שאלת הוכחה.

(7) שאלת הוכחה.

$$(8) \text{ א. } T(x, y) = \left( \frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y, \frac{\sqrt{3}}{2}x - \frac{1}{2}y \right) \text{ ב. } T(x, y) = \left( -\frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y, \frac{\sqrt{3}}{2}x + \frac{1}{2}y \right)$$

$$\text{ג. } T(x, y) = \left( \frac{\sqrt{3}}{2}x - \frac{1}{2}y, \frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y \right)$$

$$(9) \text{ א. שיקוף ביחס לישר } y = 0.4142x \text{ ב. שיקוף ביחס לישר } y = \frac{1}{2}x$$

ג. סיבוב של 90 מעלות במישור.

$$\text{ד. דרך I: סיבוב של 90 מעלות ולאחריו שיקוף ביחס לישר } y = \frac{1}{2}x$$

$$\text{דרך II: שיקוף ביחס לישר } y = -\frac{1}{3}x$$

$$(10) T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$(11) T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

(12) שאלת הוכחה.