

# אלגברה ליניארית

פרק 11 - מספרים מרוכבים ופתרון משוואות פולינומיאליות

## תוכן העניינים

1. מספרים מרוכבים - הכרות ותכונות בסיסיות.....1
2. הצמוד המרוכב.....3
3. הצגת מספר מרוכב בצורה קוטבית.....6
4. נוסחת דה-מואבר – חזקה ושורש של מספר מרוכב.....8
5. תרגול נוסף במספרים מרוכבים.....10
6. חילוק פולינומים.....13
7. פתרון משוואות פולינומיאליות ממעלה גבוהה.....14
8. שימושים של מספרים מרוכבים באלגברה ליניארית.....15

## מספרים מרוכבים – היכרות ותכונות בסיסיות

### שאלות

בשאלות 1-3 פתרו את המשוואות ומצאו את  $z$  :

$$(1) \quad z^2 + 9 = 0 \quad (2) \quad z^2 - 4z + 5 = 0 \quad (3) \quad z^2 - 6z + 13 = 0$$

בשאלות 4-7 חשבו :

$$(4) \quad (i\sqrt{2})^6 \quad (5) \quad (i^5 - i^{13})^2$$

$$(6) \quad (4+i) - (2+10i) \quad (7) \quad (-4-i)(2-3i)$$

(8) נתונים שני מספרים מרוכבים  $z_1 = a_1 + b_1i$  ו-  $z_2 = a_2 + b_2i$ .

ידוע כי  $z_1 + z_2$  ממשי וכי  $z_1 - z_2$  מדומה.

א. מצאו קשר בין  $a_1$  ל-  $a_2$  ובין  $b_1$  ל-  $b_2$ .

ב. הראו כי המכפלה  $z_1 \cdot z_2$  היא ממשית.

(9) יהיו  $z_1, z_2, \dots, z_n$  מספרים מרוכבים.

א. הוכיחו כי  $|z_1 \cdot z_2| = |z_1| \cdot |z_2|$

ב. הוכיחו כי  $|z_1 \cdot z_2 \cdot \dots \cdot z_n| = |z_1| \cdot |z_2| \cdot \dots \cdot |z_n|$

ג. הוכיחו כי  $|z_1^n| = |z_1|^n$

(10) יהי  $z$  מספר מרוכב.

הוכיחו: אם  $z^{11} = 1$  אז  $z + \frac{1}{z}$  מספר ממשי.

(11) יהי  $z$  מספר מרוכב.

הוכיחו: אם  $|z+1| = |z-1|$  אז  $iz$  מספר ממשי.

**תשובות סופיות**

- (1)  $\pm 3i$
- (2)  $2 \pm i$
- (3)  $3 \pm 2i$
- (4)  $-8$
- (5)  $0$
- (6)  $2 - 9i$
- (7)  $-11 + 10i$
- (8) שאלת הוכחה.
- (9) שאלת הוכחה.
- (10) שאלת הוכחה.
- (11) שאלת הוכחה.

## הצמוד המרוכב

### שאלות

בשאלות 1-3 חשבו (כתבו את התוצאה בצורה  $z = x + yi$ ):

$$\frac{i}{1-i} - \frac{1}{(i+1)^2} \quad (3)$$

$$\frac{1+i}{1-3i} \quad (2)$$

$$\frac{5}{2+i} \quad (1)$$

פתרו את המשוואות בשאלות 4-6 ומצאו את המספר המרוכב  $z$ :

$$(1+i)z^2 + 2z - i + 1 = 0 \quad (6)$$

$$z\bar{z} - 5\bar{z} = 10i \quad (5)$$

$$2z - 6i = \bar{z} - 1 \quad (4)$$

(7) פתרו את מערכת המשוואות הבאה (כאשר  $z$  ו- $w$  משתנים מרוכבים):

$$\begin{cases} 3z + iw = 5 - 4i \\ 5iz - 2w = 5 + 8i \end{cases}$$

(8) חשבו את ערכי המספרים המרוכבים הבאים:

$$\text{א. } \sqrt{5-12i}$$

$$\text{ב. } \sqrt{8+6i}$$

(9) פתרו את המשוואות הריבועיות הבאות:

$$\text{א. } (1-i)z^2 - 2z + i + 1 = 0$$

$$\text{ב. } (-2+i)z^2 - (6+12i)z + 10 - 25i = 0$$

בשאלות 10-11 פתרו את המשוואות:

$$iz^2 - 2(1-i)z + 6 + 15i = 0 \quad (10)$$

$$z^2 - i\bar{z} + 6 = 0 \quad (11)$$

(12) הוכיחו שהמספר הבא הוא מספר מדומה  $\frac{\bar{z}}{z^2} - \frac{z}{\bar{z}^2}$  כאשר  $z \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$ .

**13** נתון מספר מרוכב  $z \neq 0$  המקיים:  $|z - i| = 1$ .  
הוכח:

א.  $|z|^2 = 2 \operatorname{Im}(z)$

ב.  $\frac{z - 2i}{iz} \in \mathbb{R}$

**14** המספר  $\frac{3+4i}{a-i}$  הוא ממשי טהור.  
מצאו את  $a$ .

**15** נתונים שני מספרים מרוכבים  $z_1 = a_1 + b_1 i$  ו-  $z_2 = a_2 + b_2 i$ .

הראו כי כדי שתוצאת החילוק  $\frac{z_1}{z_2}$  תהיה ממשית טהורה, צריך להתקיים

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2}$$

## תשובות סופיות

(1)  $2 - i$

(2)  $-\frac{1}{5} + \frac{2}{5}i$

(3)  $-\frac{1}{2} + i$

(4)  $z = -1 + 2i$

(5)  $z = 1 + 2i, z = 4 + 2i$

(6)  $z = i, z = -1$

(7)  $z = 2 - 3i, w = 5 + i$

(8) א.  $z = \pm(3 - 2i)$  ב.  $z = \pm(3 + i)$

(9) א.  $z_{1,2} = i, 1$  ב.  $z_{1,2} = -2 - i, 2 - 5i$

(10)  $z_1 = -2 - 5i, z_2 = 3i$

(11)  $z_1 - 3i, z_2 = 2i$

(12) שאלת הוכחה.

(13) שאלת הוכחה.

(14)  $a = -\frac{3}{4}$

(15) שאלת הוכחה.

## הצגת מספר מרוכב בצורה קוטבית

### שאלות

כתבו את המספרים בשאלות 1-8 בצורה קוטבית :

- |                     |                    |                      |             |
|---------------------|--------------------|----------------------|-------------|
| (1) $1 + \sqrt{3}i$ | (2) $-1 - i$       | (3) $-3 - \sqrt{3}i$ | (4) $1 - i$ |
| (5) $1 + i$         | (6) $\sqrt{3} - i$ | (7) $\sqrt{3}i$      | (8) $-8$    |

(9) נתון המספר המרוכב  $z = R \operatorname{cis} \theta$ .

הביעו באמצעות  $R$  ו- $\theta$  את המספרים :

- $\bar{z}$
- $\frac{1}{z}$
- $-z$
- $-\frac{1}{z}$
- $iz$
- $z \cdot \bar{z}$

(10) הראו כי המספרים הבאים הם ממשיים טהורים :

- $z + \bar{z}$
- $z \cdot \bar{z}$
- $\frac{z}{\bar{z}} + \frac{\bar{z}}{z}$

(11) הראו כי המספרים הבאים הם מדומים טהורים :

- $z^2 - \bar{z}^2$
- $\frac{1}{\bar{z}} - \frac{1}{z}$

(12) הוכיחו :

- $z - i\bar{z} = \overline{\bar{z} + iz}$
- $z \cdot \bar{z} = |z|^2$

## תשובות סופיות

$$2 \left( \cos \frac{\pi}{3} + i \sin \frac{\pi}{3} \right) \quad \textbf{(1)}$$

$$\sqrt{2} \left( \cos \frac{5\pi}{4} + i \sin \frac{5\pi}{4} \right) \quad \textbf{(2)}$$

$$\sqrt{12} \left( \cos \frac{7\pi}{6} + i \sin \frac{7\pi}{6} \right) \quad \textbf{(3)}$$

$$\sqrt{2} \left( \cos \frac{7\pi}{4} + i \sin \frac{7\pi}{4} \right) \quad \textbf{(4)}$$

$$\sqrt{2} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) \quad \textbf{(5)}$$

$$2 \left( \cos \frac{11\pi}{6} + i \sin \frac{11\pi}{6} \right) \quad \textbf{(6)}$$

$$\sqrt{3} \left( \cos \frac{\pi}{2} + i \sin \frac{\pi}{2} \right) \quad \textbf{(7)}$$

$$8(\cos \pi + i \sin \pi) \quad \textbf{(8)}$$

$$\textbf{(9)} \quad \text{א. } R \operatorname{cis}(-\theta) \quad \text{ב. } \frac{1}{R} \operatorname{cis}(-\theta) \quad \text{ג. } R \operatorname{cis}(180^\circ + \theta)$$

$$\text{ד. } \frac{1}{R} \operatorname{cis}(180^\circ + \theta) \quad \text{ה. } R \operatorname{cis}(90^\circ + \theta) \quad \text{ו. } R^2$$

**(10)** שאלת הוכחה.

**(11)** שאלת הוכחה.

**(12)** שאלת הוכחה.



## נוסחת דה-מואבר – חזקה ושורש של מספר מרוכב

### שאלות

בשאלות 1-6 חשבו :

$$\left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2}i\right)^{100} \quad (3) \qquad (1 + \sqrt{3}i)^9 \quad (2) \qquad \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}i\right)^{10} \quad (1)$$

$$\sqrt[3]{-8} \quad (6) \qquad \sqrt[5]{1} \quad (5) \qquad \sqrt[6]{-8} \quad (4)$$

(7) בעזרת משפט דה-מואבר, הוכיחו את הזהויות הבאות :

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\cos 3\alpha = 4 \cos^3 \alpha - 3 \cos \alpha$$

$$\sin 3\alpha = 3 \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha$$

(8) בעזרת משפט דה-מואבר, הוכיחו כי :  $\sin 1 + \sin 2 + \dots + \sin n = \frac{\sin \frac{n+1}{2} \sin \frac{n}{2}}{\sin \frac{1}{2}}$

## תשובות סופיות

$$\frac{1}{32}i \quad (1)$$

$$-2^9 \quad (2)$$

$$-1 \quad (3)$$

$$8^{\frac{1}{6}} \left( \cos \frac{\pi + 2\pi k}{6} + i \sin \frac{\pi + 2\pi k}{6} \right) \quad k = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \quad (4)$$

$$1^{\frac{1}{5}} \left( \cos \frac{0 + 2\pi k}{5} + i \sin \frac{0 + 2\pi k}{5} \right) \quad k = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

$$8^{\frac{1}{3}} \left( \cos \frac{\pi + 2\pi k}{3} + i \sin \frac{\pi + 2\pi k}{3} \right) \quad k = 0, 1, 2 \quad (6)$$

(7) שאלת הוכחה.

(8) שאלת הוכחה.

## תרגול נוסף במספרים מרוכבים

### שאלות

(1) ענו על הסעיפים הבאים:

- א. מצאו את כל הפתרונות של המשוואה  $z^4 + z^2 + 1 = 0$ .  
 ב. הראו כי אם  $z$  הוא פתרון של המשוואה מסעיף א אזי:  $z^6 = 1$ .

(2) נתונה המשוואה  $z^4 = -8 - 8\sqrt{3}i$ .

- א. מצאו את פתרונות המשוואה הנתונה.  
 ב. הוכיחו כי החזקה השלישית של כל אחד מפתרונות הנתונה היא מספר ממשי או מספר מדומה טהור.

(3) פתרו את המשוואה  $\left(\frac{z+i}{z-i}\right)^4 = 1$ .

(4) ענו על הסעיפים הבאים:

- א. מצאו את שלושת הפתרונות של המשוואה  $z^3 = i$ .  
 ב. הראו שמכפלת שלושת הפתרונות היא  $i$ .  
 ג. הראו שאם מעלים בריבוע פתרון כלשהו של המשוואה, התוצאה שווה למכפלת שני הפתרונות האחרים.

(5) ענו על הסעיפים הבאים:

- א. פתרו את המשוואה  $z^5 = -16(\sqrt{3} - i)$ .  
 ב. הוכיחו כי חמשת השורשים מהווים סדרה הנדסית, ומצאו את מנת הסדרה.  
 הערה: סדרה הנדסית היא סדרה מהצורה  $a_1, a_1q, a_1q^2, \dots, a_1q^{n-1}$ , כאשר  $q$  מנת הסדרה.

(6) נתון  $w = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}i$ .

- א. מצאו את פתרונות המשוואה  $z^3 = w^3$ .  
 ב. הראו כי מכפלת הפתרונות של המשוואה היא  $w^3$ .

(7) נתונה המשוואה  $(z-1)^3 = 1$ .  
 הוכיחו שסכום שורשיה הוא 3.

(8) נתונה המשוואה  $z^3 = -\sqrt{3} + i$ .  
 א. מצאו את שורשי המשוואה:  $z_3, z_2, z_1$ .  
 ב. מצאו את הסכום  $|z_1|^3 + |z_2|^3 + |z_3|^3$ .  
 ג. הראו כי הסכום  $(z_1)^9 + (z_2)^9 + (z_3)^9$  הוא מספר מדומה טהור.

(9) נתונה המשוואה  $z^2 + |z|^2 - 2ti = 18s^2$ , כאשר  $z$  הוא מספר מרוכב,  
 $s$  ו- $t$  הם מספרים ממשיים שונים מאפס ו- $z_1, z_2$  הם פתרונות המשוואה.  
 א. הביעו את פתרונות המשוואה באמצעות  $s$  ו- $t$ .  
 ב. נתון  $z_1 \cdot z_2 = -18i$ . מצאו את הפרמטרים  $s$  ו- $t$ .

(10) ענו על הסעיפים הבאים:

א. פתרו את המשוואה  $\bar{z} \cdot i + (\bar{z})^2 + |z|^2 + z + \bar{z} = 0$ .  
 ב. אחד מהפתרונות שמצאת בסעיף א הוא איבר אחרון בסדרה חשבונית,  
 שכל איבריה שונים מאפס.  
 הפרש סדרה זו הוא  $1 + \frac{1}{16}i$ .  
 האיבר הראשון בסדרה הוא מספר ממשי.  
 חשבו את האיבר הראשון בסדרה.  
 הערה: סדרה חשבונית היא סדרה מהצורה:  $a_1, a_1 + d, a_1 + 2d, \dots, a_1 + (n-1)d$ ,  
 כאשר  $d$  נקרא הפרש הסדרה.

## תשובות סופיות

(1) א.  $z_1 = \text{cis}60^\circ, z_2 = \text{cis}240^\circ, z_3 = \text{cis}120^\circ, z_4 = \text{cis}300^\circ$  ב. שאלת הוכחה.

(2) א.  $z_1 = 1 + \sqrt{3}i, z_2 = -\sqrt{3} + i, z_3 = -1 - \sqrt{3}i, z_4 = \sqrt{3} - i$  ב. שאלת הוכחה.

(3)  $z = 0, z = 1, z = -1$

(4) א.  $z_1 = \frac{1}{2}\sqrt{3} + \frac{1}{2}i, z_2 = -\frac{1}{2}\sqrt{3} + \frac{1}{2}i, z_3 = -i$

ב. שאלת הוכחה. ג. שאלת הוכחה.

(5) א.  $z_n = 2\text{cis}[30^\circ + (n-1)72^\circ] \quad n = 1, 2, 3, 4, 5$  ב.  $q = \text{cis}72^\circ$

(6) א.  $z_1 = \text{cis}45^\circ, z_2 = \text{cis}165^\circ, z_3 = \text{cis}285^\circ$  ב. שאלת הוכחה.

(7) שאלת הוכחה.

(8) א.  $z_3 = \sqrt[3]{2}\text{cis}290^\circ, z_2 = \sqrt[3]{2}\text{cis}170^\circ, z_1 = \sqrt[3]{2}\text{cis}50^\circ$  ב. 6 ג. שאלת הוכחה.

(9) א.  $z_2 = -3s - \frac{t}{3s}i, z_2 = -3s - \frac{t}{3s}i$  ב.  $t = 9, s = \pm 1$

(10) א.  $z_2 = -0.5 + 0.5i, z_1 = 0$  ב.  $a_1 = -8.5$

## חילוק פולינומים

### שאלות

צמצמו עד כמה שניתן את השברים האלגבריים הבאים :

$$\frac{4x^4 + 6x^3 + 31x^2 + 99x + 10}{x^2 - x + 10} \quad (2) \qquad \frac{x^3 - x^2 + x - 1}{x - 1} \quad (1)$$

$$\frac{x^2 - 5x - 14}{x + 2} \quad (4) \qquad \frac{4x^2 + x - 1}{x - 2} \quad (3)$$

$$\frac{x^4 + x^3 - x^2 + 14x - 3}{x + 3} \quad (6) \qquad \frac{x^3 + x^2 + 3x - 5}{x - 1} \quad (5)$$

$$\frac{x^3 + 5x^2 - 4x - 20}{x + 5} \quad (8) \qquad \frac{x^3 - 4x^2 + 9}{x - 3} \quad (7)$$

### תשובות סופיות

$$x^2 + 1 \quad (1)$$

$$0 \quad (2)$$

$$4x + 9 + \frac{17}{x - 2} \quad (3)$$

$$x - 7 \quad (4)$$

$$x^2 + 2x + 5 \quad (5)$$

$$x^3 - 2x^2 + 5x - 1 \quad (6)$$

$$x^2 - x - 3 \quad (7)$$

$$x^2 - 4 \quad (8)$$

## פתרון משוואות פולינומאליות ממעלה גבוהה

### שאלות

פתרו את המשוואות הבאות :

$$k^4 + 3k^3 - 15k^2 - 19k + 30 = 0 \quad (1)$$

$$k^3 + 2k^2 - 3k + 20 = 0 \quad (2)$$

$$k^5 + 3k^4 + 2k^3 - 2k^2 - 3k - 1 = 0 \quad (3)$$

$$k^3 - 6k^2 + 12k - 8 = 0 \quad (4)$$

$$k^6 - 3k^4 + 3k^2 - 1 = 0 \quad (5)$$

$$k^3 - k^2 + k - 1 = 0 \quad (6)$$

$$k^4 - 3k^3 + 6k^2 - 12k + 8 = 0 \quad (7)$$

### תשובות סופיות

$$k_1 = 1, \quad k_2 = -2, \quad k_3 = 3, \quad k_4 = -5 \quad (1)$$

$$k_1 = -4, \quad k_{2,3} = 1 \pm 2i \quad (2)$$

$$k_1 = 1, \quad k_2 = -1, \quad k_3 = -1, \quad k_4 = -1, \quad k_5 = -1 \quad (3)$$

$$k_1 = 2, \quad k_2 = 2, \quad k_3 = 2 \quad (4)$$

$$k_1 = 1, \quad k_2 = -1, \quad k_3 = 1, \quad k_4 = -1, \quad k_5 = 1, \quad k_6 = -1 \quad (5)$$

$$k_1 = 1, \quad k_{2,3} = \pm i \quad (6)$$

$$k_1 = 1, \quad k_2 = 2, \quad k_{3,4} = \pm 2i \quad (7)$$

## שימושים של מספרים מרוכבים באלגברה לינארית

### שאלות

בשאלות 1-4 נתון  $u = (3 - 2i, 4i, 1 + 6i)$ ,  $v = (5 + i, 2 - 3i, 7 + 2i)$   
מצאו :

$$(1) \quad \text{א. } 4u + v \quad \text{ב. } 2i \cdot u - v \quad (2) \quad u \cdot v$$

$$(3) \quad \text{א. } u \cdot u \quad \text{ב. } |u|$$

$$(4) \quad |v|$$

בשאלות 5-6 פתרו את מערכת המשוואות הבאה בשיטת גאוס,

$$z_1 + iz_2 + (1 - i)z_3 = 1 + 4i$$

מעל השדה  $F$  :  $iz_1 + z_2 + (1 + i)z_3 = 2 + i$  , כאשר :

$$(-1 + 3i)z_1 + (3 - i)z_2 + (2 + 4i)z_3 = 5 - i$$

$$(5) \quad F = \mathbb{R}$$

$$(6) \quad F = \mathbb{C}$$

בשאלות 7-8 בדקו 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  $C^3$  :

(7) מעל השדה הממשי  $\mathbb{R}$ .

(8) מעל שדה המרוכבים  $\mathbb{C}$ .

בשאלות 9-10 בדקו האם הווקטורים  $\{(1, i, i - 1), (i + 1, i - 1, -2)\}$   
תלויים ליניארית ב- $C^3$  :

(9) מעל  $\mathbb{C}$ .

(10) מעל  $\mathbb{R}$ .



עבור כל אחת מהמטריצות בשאלות 11-13 מצאו ערכים עצמיים ו-וקטורים עצמיים. במידה והמטריצה ניתנת ללכסון, לכסנו אותה. כלומר, מצאו מטריצה הפיכה  $P$ , כך ש- $P^{-1}AP = D$ , באשר  $D$  מטריצה אלכסונית. פתרו פעם מעל  $\mathbb{C}$  ופעם מעל  $\mathbb{R}$ .

$$A = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 4 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$A = \begin{pmatrix} 3 & -2 \\ 4 & -1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$(13) \text{ נתונה מטריצה } A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

מצאו את הערכים העצמיים והווקטורים העצמיים של המטריצה.

## תשובות סופיות

$$(1) \quad \text{א. } (17 - 7i, 2 + 13i, 11 + 26i) \quad \text{ב. } (-1 + 5i, -10 + 3i, -19)$$

$$(2) \quad \text{א. } 20 + 35i \quad \text{ב. } 66$$

$$(3) \quad \sqrt{66}$$

$$(4) \quad \sqrt{92}$$

$$(5) \quad (z_1, z_2, z_3)_{F=\mathbb{R}} = (2, 3, -1)$$

$$(6) \quad (z_1, z_2, z_3)_{F=\mathbb{C}} = ((-1+i)t + 1 + i, 3, t)$$

$$(7) \quad \text{כן}$$

$$(8) \quad \text{לא}$$

$$(9) \quad \text{תלויים.}$$

$$(10) \quad \text{בלתי תלויים.}$$

$$(11) \quad \text{אין פתרונות מעל } \mathbb{R}, \text{ ולכן אין ערכים עצמיים ווקטורים עצמיים.}$$

$$\text{מעל } \mathbb{C} : x = 1 \pm 2i, \mathbf{v}_{x=1-2i} = \langle 1-i, 2 \rangle, \mathbf{v}_{x=1+2i} = \langle 1+i, 2 \rangle$$

$$A = \begin{bmatrix} 1+i & 1-i \\ 2 & 2 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1+2i & 0 \\ 1 & 1-2i \end{bmatrix}$$

$$(12) \quad \text{ערכים עצמיים : } x = 3, \text{ וקטורים עצמיים : } \mathbf{v}_{x=3} = \langle -1, 1 \rangle. \text{ לא ניתנת ללכסון.}$$

$$(13) \quad \mathbf{v}_{x=1+\sqrt{3}i} = (1 - \sqrt{3}i, 1 + \sqrt{3}i, -2), \mathbf{v}_{x=1} = \langle 1, 1, 1 \rangle, x = 1, x = 1 \pm \sqrt{3}i$$

$$\mathbf{v}_{x=1-\sqrt{3}i} = (1 + \sqrt{3}i, 1 - \sqrt{3}i, -2)$$