

# שיעור 11

## דטרמיננטות וכלל קרמר

### 11.1 הגדרה של דטרמיננטה של מטריצה ריבועית

נדון רק במטריצה ריבועית.

הדטרמיננטה של מטריצה  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , תסומן  $\det A$  או  $|A|$ , היא מספר ממשי. באופן דומה, הדטרמיננטה של מטריצה  $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ , היא מספר מורכב.

#### הגדרה 11.1 דטרמיננטה של מטריצה ריבועית מסדר $2 \times 2$

נתונה מטריצה  $A \in \mathbb{F}^{2 \times 2}$ .

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

הדטרמיננטה של  $A$  מוגדרת

$$|A| = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

דוגמה 11.1 דטרמיננטה

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}, \quad |A| = 1 \cdot 4 - 2 \cdot 3 = -2.$$

■

#### הגדרה 11.2 דטרמיננטה של מטריצה ריבועית מסדר $3 \times 3$

נתונה מטריצה  $A \in \mathbb{F}^{3 \times 3}$ .

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

ניצן לחשב את הדטרמיננטה של  $A$  ע"י כל אחת מהשורות או ע"י כל אחת מהעמודות:

שורה 1:

$$|A| = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}.$$

שורה 2:

$$|A| = -a_{21} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{22} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{23} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}.$$

שורה 3:

$$|A| = a_{31} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} - a_{32} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{23} \end{vmatrix} + a_{33} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}.$$

עמודה 1:

$$|A| = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{21} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{31} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} .$$

עמודה 2:

$$|A| = -a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{22} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{32} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{23} \end{vmatrix} .$$

עמודה 3:

$$|A| = a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} - a_{23} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} + a_{33} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} .$$

## דוגמה 11.2 דטרמיננטה

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 5 \\ 6 & 0 & 7 \end{pmatrix} ,$$

$$\begin{aligned} |A| &= 1 \cdot \begin{vmatrix} 4 & 5 \\ 0 & 7 \end{vmatrix} - 2 \cdot \begin{vmatrix} 0 & 5 \\ 6 & 7 \end{vmatrix} + 3 \cdot \begin{vmatrix} 0 & 4 \\ 6 & 0 \end{vmatrix} \\ &= 1 \cdot (4 \cdot 7 - 5 \cdot 0) - 2(0 \cdot 7 - 5 \cdot 6) + 3 \cdot (0 \cdot 0 - 4 \cdot 6) \\ &= 28 + 60 - 72 , \\ &= 16 . \end{aligned}$$

## הגדרה 11.3 המינור

נתונה מטריצה ריבועית  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$ . המינור ה- $(i, j)$  של  $A$  מסומן ב- $M_{ij}$  ומוגדר להיות הדטרמיננטה של המטריצה הריבועית המתקבלת מ- $A$  ע"י מחיקת שורה  $i$  ועמודה  $j$ . את המינור ה- $(i, j)$  נסמן ב- $M_{ij}$ .

## דוגמה 11.3

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 5 \\ 6 & 0 & 7 \end{pmatrix} \text{ עבור } M_{32}, M_{23}, M_{12}, M_{11} \text{ מצאו את}$$

פתרון:

$$\begin{aligned} M_{11} &= \begin{vmatrix} 4 & 5 \\ 0 & 7 \end{vmatrix} = 28 , \\ M_{12} &= \begin{vmatrix} 0 & 5 \\ 6 & 7 \end{vmatrix} = -30 , \\ M_{23} &= \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 6 & 0 \end{vmatrix} = -12 , \\ M_{32} &= \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 5 \end{vmatrix} = 5 . \end{aligned}$$

## הגדרה 11.4 הקופקטור

נתונה מטריצה ריבועית  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$ . הקופקטור ה- $(i, j)$  של  $A$  מסומן ב- $C_{ij}$  ומוגדר להיות המינור ה- $(i, j)$  כפול  $(-1)^{i+j}$ :

$$C_{ij} = (-1)^{i+j} \cdot M_{ij}.$$

## דוגמה 11.4

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 5 \\ 6 & 0 & 7 \end{pmatrix} \text{ עבור } C_{32}, C_{23}, C_{12}, C_{11} \text{ מצאו את}$$

## פתרון:

$$C_{11} = (-1)^2 \cdot M_{11} = \begin{vmatrix} 4 & 5 \\ 0 & 7 \end{vmatrix} = 28,$$

$$C_{12} = (-1)^3 \cdot M_{12} = - \begin{vmatrix} 0 & 5 \\ 6 & 7 \end{vmatrix} = 30,$$

$$C_{23} = (-1)^5 \cdot M_{23} = - \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 6 & 0 \end{vmatrix} = 12,$$

$$C_{32} = (-1)^5 \cdot M_{32} = - \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 5 \end{vmatrix} = -5.$$

## הגדרה 11.5 דטרמיננטה של מטריצה ריבועית מסדר $n \times n$

תהי  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$  מטריצה ריבועית.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

הדטרמיננטה של  $A$ , מסומנת ב- $|A|$ . ניתן לחשב את הדטרמיננטה לפי שורה  $i$ :

$$|A| = \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} M_{ij} = \sum_{j=1}^n a_{ij} C_{ij},$$

כאשר  $M_{ij}$  המינור ה- $(i, j)$  של  $A$  ו- $C_{ij}$  הקופקטור ה- $(i, j)$  של המטריצה  $A$ . ניתן לחשב את הדטרמיננטה לפי עמודה  $j$ :

$$|A| = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} M_{ij} = \sum_{i=1}^n a_{ij} C_{ij}.$$

למעשה, ניתן לחשב את  $|A|$  לפי שורה כלשהי או לפי עמודה כלשהי.

## 11.5 דוגמה

נסמן  $A = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 0 \\ 2 & 4 & -1 \\ 0 & -2 & 0 \end{pmatrix}$ , מצאו את הדטרמיננטה של המטריצה.

**פתרון:**

$$\begin{aligned} |A| &\stackrel{\text{שורה ראשונה}}{=} 1 \cdot M_{11} - 5 \cdot M_{12} + 0 \cdot M_{13} \\ &= 1 \cdot \begin{vmatrix} 4 & -1 \\ -2 & 0 \end{vmatrix} - 5 \cdot \begin{vmatrix} 2 & -1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + 0 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 4 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} \\ &= -2. \end{aligned}$$

נשתעשע....

$$\begin{aligned} |A| &\stackrel{\text{שורה שנייה}}{=} -2 \cdot M_{21} + 4 \cdot M_{22} - (-1) \cdot M_{23} \\ &= -2 \cdot \begin{vmatrix} 5 & 0 \\ -2 & 0 \end{vmatrix} - 4 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 5 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} \\ &= -2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |A| &\stackrel{\text{עמודה שלישית}}{=} 0 \cdot M_{13} - (-1) \cdot M_{23} + 0 \cdot M_{33} \\ &= 0 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 4 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} + 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 5 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} + 0 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 5 \\ 2 & 4 \end{vmatrix} \\ &= -2. \end{aligned}$$

**הערה:**

סימני האיברים הם כך:

$$A = \begin{pmatrix} + & - & + & \dots \\ - & + & - & \dots \\ + & - & + & \\ \vdots & & & \ddots \end{pmatrix}$$

## 11.6 דוגמה

חשבו את הדטרמיננטה של המטריצה הבאה:

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

**פתרון:**

$$\begin{aligned}
 |A| &\stackrel{\text{עמודה ראשונה}}{=} 3 \cdot M_{11} - 0 \cdot M_{21} + 0 \cdot M_{31} - 0 \cdot M_{41} + 0 \cdot M_{51} - 0 \cdot M_{61} \\
 &= 3 \cdot \begin{vmatrix} 2 & -5 & 7 & 3 \\ 0 & 1 & 5 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} \\
 &= 3 \cdot (-1)^{1+1} \cdot 2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 5 & 0 \\ 2 & 4 & -1 \\ 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} \\
 &= 6 \cdot (-2) = -12.
 \end{aligned}$$

### משפט 11.1 דטרמיננטה של מטריצה משולשית

אם  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  מטריצה משולשית אז  $|A| = a_{11} \cdot a_{22} \cdot \dots \cdot a_{nn}$ , כלומר מכפלת איברי האלכסון הראשי.

הוכחה: תרגיל בית.

### דוגמה 11.7

חשבו

$$\begin{vmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 0 & 2 & 19 \\ 0 & 0 & 3 \end{vmatrix}.$$

פתרון:

$$\begin{vmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 0 & 2 & 19 \\ 0 & 0 & 3 \end{vmatrix} = 1 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 19 \\ 0 & 3 \end{vmatrix} = 1 \cdot 2 \cdot 3 = 6.$$

### משפט 11.2

אם  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  מטריצה ריבועית ו-  $B$  מטריצה המתקבלת מ-  $A$  ע"י הפעולה האלמנטרית:

(1) החלפת 2 שורות, אז

$$|B| = -|A|.$$

(2) הכפלת שורה בסקלר  $\alpha \neq 0$ , אז

$$|B| = \alpha |A|.$$

(3) הוספת כפולה של שורה אחת לשורה אחרת, אז

$$|B| = |A|.$$

הוכחה: תרגיל בית.

## 11.8 דוגמה

$$\cdot \begin{vmatrix} 3 & 6 \\ 8 & 4 \end{vmatrix} \text{ חשבו את}$$

**פתרון:**

$$\begin{vmatrix} 3 & 6 \\ 8 & 4 \end{vmatrix} = 3 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 8 & 4 \end{vmatrix} = 3 \cdot 4 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = 12 \cdot (1 \cdot 1 - 2 \cdot 2) = 12 \cdot (-3) = -36 .$$

## 11.9 דוגמה

$$\begin{vmatrix} 2 & 4 & 6 \\ 12 & 15 & 18 \\ 28 & 32 & 40 \end{vmatrix} \text{ חשבו את}$$

**פתרון:**

$$\begin{vmatrix} 2 & 4 & 6 \\ 12 & 15 & 18 \\ 28 & 32 & 40 \end{vmatrix} = 2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 12 & 15 & 18 \\ 28 & 32 & 40 \end{vmatrix} = 2 \cdot 3 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 28 & 32 & 40 \end{vmatrix} = 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 10 \end{vmatrix}$$

$$\xrightarrow{R_2 \rightarrow R_2 - 4R_1} 24 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -3 & -6 \\ 7 & 8 & 10 \end{vmatrix}$$

$$\xrightarrow{R_3 \rightarrow R_3 - 7R_1} 24 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -3 & -6 \\ 0 & -6 & -11 \end{vmatrix}$$

$$\xrightarrow{R_3 \rightarrow R_3 - 2R_2} 24 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -3 & -6 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$= 24 \cdot (-3) = -72 .$$

## 11.10 דוגמה

$$\begin{vmatrix} 7 & 14 & 21 \\ 28 & 35 & 42 \\ 49 & 56 & 70 \end{vmatrix} \text{ חשבו את}$$

**פתרון:**

$$\begin{vmatrix} 7 & 14 & 21 \\ 28 & 35 & 42 \\ 49 & 56 & 70 \end{vmatrix} = 7 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 28 & 35 & 42 \\ 49 & 56 & 70 \end{vmatrix} = 7 \cdot 7 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 49 & 56 & 70 \end{vmatrix} = 7 \cdot 7 \cdot 7 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 10 \end{vmatrix}$$

$$= 7^3 \cdot \left( 1 \cdot \begin{vmatrix} 5 & 6 \\ 8 & 10 \end{vmatrix} - 2 \begin{vmatrix} 4 & 6 \\ 7 & 10 \end{vmatrix} + 3 \begin{vmatrix} 4 & 5 \\ 7 & 8 \end{vmatrix} \right)$$

$$= 7^3 \cdot (1 \cdot (50 - 48) - 2 \cdot (40 - 42) + 3 \cdot (32 - 35))$$

$$= 7^3 \cdot (-3) = -1029. .$$

### משפט 11.3

$$|\alpha A| = \alpha^n \cdot |A|$$

כאשר  $A$  מסדר  $n \times n$ .

הוכחה: תרגיל בית.

הערה:

כל מטריצה ריבועית  $A$  (מסדר  $n \times n$ ) ניתן להעביר למטריצה מדורגת  $B$  ע"י ביצוע מספר סופי של פעולות שורה אלמנטריות מסוג החלפת 2 שורות והוספת שורה אחת לשורה אחרת (בלי פעולת הכפלת שורה בסקלר  $\alpha \neq 0$ ).  
לכן

$$|A| = (-1)^k |B|$$

כאשר  $k$  הוא מספר החלפות השורות שביצענו. כמו כן מאחר ו-  $B$  משולשית עליונה,

$$|B| = b_{11} \cdot b_{22} \cdot \dots \cdot b_{nn} .$$

### משפט 11.4

תהי  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  מתקיים:

$$|A^t| = |A| .$$

הוכחה: תרגיל בית.

### דוגמה 11.11

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} , \quad |A| = -2 ,$$

$$A^t = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{pmatrix} , \quad |A^t| = -2 .$$

### משפט 11.5 משפט המכפלה

תהיינה  $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$  מתקיים:

$$|A \cdot B| = |A| \cdot |B| .$$

הוכחה: תרגיל בית.

### דוגמה 11.12

נסמן  $A = \begin{pmatrix} 6 & 1 \\ 3 & 2 \end{pmatrix}$ ,  $B = \begin{pmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$ . מצאו את המטריצה  $AB$  ואת הדטרמיננטות הבאות:  $|A|$ ,  $|B|$ ,  $|AB|$ .

פתרון:

$$\begin{aligned} AB &= \begin{pmatrix} 6 & 1 \\ 3 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 25 & 20 \\ 14 & 13 \end{pmatrix}, \\ |A| &= 12 - 3 = 9, \\ |B| &= 8 - 3 = 5, \\ |AB| &= 25 \cdot 13 - 20 \cdot 14 = 45. \end{aligned}$$

### משפט 11.6

תהי  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  ויהי  $k \in \mathbb{N}$ . מתקיים:

$$|A^k| = |A|^k.$$

הוכחה: תרגיל בית.

### דוגמה 11.13

נתונה  $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$  ו-  $|A| = -2$  מהי  $A^{2020}$ ?

פתרון:

$$|A^{2020}| = \underbrace{|A \cdot A \cdots A|}_{\text{פעמים } 2020} = \underbrace{|A| \cdot |A| \cdots |A|}_{\text{פעמים } 2020} = |A|^{2020}$$

ולכן  $|A^{2020}| = (-2)^{2020}$ .

### הגדרה 11.6 המטריצה של קופקטורים

תהי  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$ . נגדיר את המטריצה של קופקטורים מסדר  $n \times n$ :

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \cdots & C_{nn} \end{pmatrix}$$

כאשר  $C_{ij}$  הקופקטור ה- $(i, j)$  של  $A$ .

### הגדרה 11.7 המטריצה המצורפת

תהי  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$ . המטריצה המצורפת של  $A$  היא מטריצה מסדר  $n \times n$  שמסומנת  $\text{adj}(A)$  ומוגדרת



$$\text{adj}(A) = C^t$$

כאשר  $C$  המטריצה של קופקטורים של  $A$ .

### משפט 11.7 נוסחת קיילי המילטון

תהי  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$ . נניח ש- $A$  הפיכה. אז

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \cdot C^t = \frac{1}{|A|} \cdot \text{adj}(A) .$$

הוכחה: מעבר לקורס הזה.

### דוגמה 11.14

נתונה  $A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 2 & 4 & 3 \\ 1 & 5 & 0 \end{pmatrix}$  חשבו את  $A^{-1}$ .

**פתרון:**

$$M_{11} = -15 \quad C_{11} = 15$$

$$M_{12} = -3 \quad C_{12} = 3$$

$$M_{13} = 6 \quad C_{13} = 6$$

$$M_{21} = -20 \quad C_{21} = 20$$

$$M_{22} = -4 \quad C_{22} = -4$$

$$M_{23} = 2 \quad C_{23} = -2$$

$$M_{31} = -7 \quad C_{31} = -7$$

$$M_{32} = -5 \quad C_{32} = 5$$

$$M_{33} = -2 \quad C_{33} = -2$$

$$C = \begin{pmatrix} -15 & 3 & 6 \\ 20 & -4 & -2 \\ -7 & 5 & -2 \end{pmatrix} \Rightarrow \text{adj}(A) = \begin{pmatrix} -15 & 20 & -7 \\ 3 & -4 & 5 \\ 6 & -2 & -2 \end{pmatrix} .$$

$$|A| = 1 \cdot (-15) + 3 \cdot 3 + 4 \cdot 6 = 18 .$$

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \text{adj}(A) = \frac{1}{18} \begin{pmatrix} -15 & 20 & -7 \\ 3 & -4 & 5 \\ 6 & -2 & -2 \end{pmatrix} .$$

## משפט 11.8 מטריצה הפיכה

תהי  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ .

$|A| \neq 0$  אם ורק אם  $A$  הפיכה.

**הוכחה:** נניח ש- $A$  הפיכה. אז קיימת  $A^{-1}$  כך ש-

$$A \cdot A^{-1} = I.$$

לכן לפי משפט 11.5:

$$|A \cdot A^{-1}| = |A| \cdot |A^{-1}| = 1.$$

כלומר  $|A| \cdot |A^{-1}| = 1$ . לכן  $|A| \neq 0$ .

נניח ש- $|A| \neq 0$ . נסמן את הסקלר  $a = |A| \in \mathbb{F}$ . מכיוון ש- $a \neq 0$  אז ההופכית קיים. זאת אומרת  $a^{-1} = \frac{1}{|A|}$  קיים. לכן לפי נוסחת קיילי המילטון (משפט 11.7)  $A^{-1}$  קיימת. לכן  $A$  הפיכה. ■

## דוגמה 11.15

היעזרו במשפט 11.8 לעיל וקבעו האם המטריצה הבאה הפיכה:

$$\begin{pmatrix} 3 & -1 & 2 & -5 \\ 0 & 5 & -3 & -6 \\ -6 & 7 & -7 & 4 \\ -5 & -8 & 0 & 9 \end{pmatrix}$$

**פתרון:**

$$\left| \begin{array}{cccc} 3 & -1 & 2 & -5 \\ 0 & 5 & -3 & -6 \\ -6 & 7 & -7 & 4 \\ -5 & -8 & 0 & 9 \end{array} \right| \xrightarrow{R_3 \rightarrow R_3 + 2R_1} \left| \begin{array}{cccc} 3 & -1 & 2 & -5 \\ 0 & 5 & -3 & -6 \\ 0 & 5 & -3 & -6 \\ -5 & -8 & 0 & 9 \end{array} \right|$$

$$\xrightarrow{R_3 \rightarrow R_3 - R_2} \left| \begin{array}{cccc} 3 & -1 & 2 & -5 \\ 0 & 5 & -3 & -6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & -8 & 0 & 9 \end{array} \right|$$

$$= 0.$$

לכן  $A$  לא הפיכה.

## משפט 11.9

תהי  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  הפיכה, אז

$$|A^{-1}| = \frac{1}{|A|}.$$

**הוכחה:** מתקיים  $A^{-1} \cdot A = I$  ולכן  $|A \cdot A^{-1}| = |I|$ . לפי משפט המכפלה,  $|A| \cdot |A^{-1}| = 1$ . נחלק ב-  $|A| \neq 0$  ונקבל

$$|A^{-1}| = \frac{1}{|A|}.$$

## 11.16 דוגמה

נתונה  $A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  המקיימת  $A^3 = 2A^{-1}B$ , כאשר  $B = \begin{pmatrix} -2 & 3e & \pi \\ 0 & 1 & 23 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$ . מצאו את  $|A|$ .

## פתרון:

### דרך א:

לפי הנתון  $A^3 = 2A^{-1}B$ , ולכן  $|A^3| = |2A^{-1}B|$ . לפי משפט המכפלה,  $|A|^3 = |2A^{-1}| \cdot |B|$ . מאחר ו-  $A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ , נקבל  $|A|^3 = 2^3 \cdot |A^{-1}| \cdot |B|$ . מכאן,

$$|A|^3 = 2^3 \cdot \frac{1}{|A|} \cdot |B|,$$

ולכן

$$|A|^4 = 8 \cdot |B| = 8 \cdot 2 = 16,$$

ונקבל  $|A| = \pm 2$ .

### דרך ב:

$$\begin{aligned} A \cdot (2A^{-1}B) &= A \cdot A^3 \Rightarrow A^4 = (A \cdot 2A^{-2})B \Rightarrow A^4 = (2 \cdot AA^{-2})B \Rightarrow A^4 = (2 \cdot I)B \\ A^4 &= 2B \Rightarrow |A^4| = |2B| \Rightarrow |A|^4 = 2^3 \cdot |B| \Rightarrow |A|^4 = 8 \cdot 2 = 16. \end{aligned}$$

## 11.17 דוגמה

תהיינה  $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . הוכח או הפרד:

$$|A + B| = |A| + |B|.$$

## פתרון:

הטענה איננה נכונה. דוגמה נגדית:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A + B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$|A| = 0, \quad |B| = 0,$$

$$|A + B| = |I| = 1,$$

$$|A + B| \neq |A| + |B|.$$

## דוגמה 11.18

תהינה  $A, B \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$  הפיכות, כך שמתקיים  $A + 3B^t = 0$ . חשבו את  $|A^{-1}B^2(B^t)^{-1}|$ .

### פתרון:

נשים לב שלא נכון לכתוב

$$A + 3B^t = 0 \Rightarrow |A + 3B^t| = |0| \Rightarrow |A| + |3B^t| = 0.$$

נחשב

$$|A^{-1}B^2(B^t)^{-1}| = |A^{-1}| \cdot |B^2| \cdot |(B^t)^{-1}| = \frac{1}{|A|} \cdot |B|^2 \cdot \frac{1}{|B^t|} = \frac{1}{|A|} \cdot |B|^2 \cdot \frac{1}{|B|} = \frac{|B|}{|A|}.$$

לפי הנתון  $A + 3B^t = 0$  ולכן

$$A = -3B^t \Rightarrow |A| = |-3B^t| \Rightarrow |A| = (-3)^5 |B^t| \Rightarrow |A| = -243 |B| \Rightarrow \frac{|B|}{|A|} = -\frac{1}{243}.$$

## דוגמה 11.19

תהינה  $X, Y \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  המקיימות

$$XY = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

(א) האם  $X$  הפיכה?

(ב) עבור  $X = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 4 & 0 & -6 \end{pmatrix}$  מצאו את  $Y$ .

### פתרון:

(א) נסמן  $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$ . לפי הנתון  $XY = A$ . נשים לב ש- $|A| = -6$  ולפי משפט המכפלה,  $|A| = |XY| = |X| \cdot |Y|$ . בפרט,  $|X| \neq 0$ , ולכן  $X$  הפיכה.

(ב) לפי הנתון  $XY = A$ . הוכחנו ש- $X$  הפיכה, נכפול את שני האגפים משמאל בהופכית של  $X$ . נקבל  $Y = X^{-1}A$ . לאחר חישוב, נקבל ש-

$$X^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & -2 & 0 \\ \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{1}{6} \end{pmatrix}$$

לכן

$$Y = X^{-1}A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & -2 & 0 \\ \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{1}{6} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -3 & 0 \\ 1 & -6 & 0 \\ \frac{2}{3} & -2 & \frac{1}{3} \end{pmatrix}.$$

## 11.2 כלל קרמר

### משפט 11.10 כלל קרמר

תהי  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$  מטריצה ריבועית הפיכה ויהי  $X \in \mathbb{F}^n$  ווקטור של משתנים:

$$A = \begin{pmatrix} | & | & \dots & | \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ | & | & \dots & | \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

לכל  $b \in \mathbb{F}^n$  הפתרון היחיד למערכת  $AX = b$  ניתן ע"י

$$x_i = \frac{|A_{ib}|}{|A|}$$

כאשר

$$A_{ib} = \begin{pmatrix} | & | & \dots & | & | & | & \dots & | \\ a_1 & a_2 & \dots & a_{i-1} & b & a_{i+1} & \dots & a_n \\ | & | & \dots & | & | & | & \dots & | \end{pmatrix},$$

כלומר המטריצה המתקבלת מ- $A$  ע"י החלפת העמודה ה- $i$  ב- $b$ .

הוכחה: תרגיל בית.

### דוגמה 11.20

פתרו את המערכת הבאה בעזרת כלל קרמר:

$$\begin{aligned} x_1 + 2x_2 &= 1 \\ 3x_1 + 4x_2 &= 2. \end{aligned}$$

פתרון:

$$\begin{aligned} x_1 + 2x_2 &= 1 \\ 3x_1 + 4x_2 &= 2 \end{aligned} \Leftrightarrow \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}}_X = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}}_b$$

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} = -2, \text{ ולכן המטריצה הפיכה.}$$

$$|A_1(b)| = \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{vmatrix} = 0 ,$$

$$x_1 = \frac{|A_1(b)|}{|A|} = \frac{0}{-2} = 0 ,$$

$$|A_2(b)| = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 3 & 2 \end{vmatrix} = -1 ,$$

$$x_2 = \frac{|A_2(b)|}{|A|} = \frac{-1}{-2} = \frac{1}{2} .$$