

## שיעור 5

### שילוש מטריצה

#### 5.1 מטריצה משולשית עילית

משפט 5.1 ערכים עצמיים ופולינום אופייני של מטריצה משולשית

תהי  $A$  מטריצה משולשית מעל שדה  $\mathbb{F}$ . כלומר

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & \dots & a_{3n} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & \dots & a_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

אז

(1)

$$p_A(x) = (x - a_{11})(x - a_{22}) \dots (x - a_{nn}),$$

כלומר, הפולינום האופייני מתפרק לגורמים לינאריים (לא בהכרח שונים) מעל  $\mathbb{F}$ .

(2) איברי האלכסון של מטריצה משולשית עליונה הם הערכים עצמיים.

המספר הפעמים שכל ערך עצמי מופיע באלכסון הוא הריבוי האלגברי של הערך עצמי.

הוכחה:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & \dots & a_{3n} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & \dots & a_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} p_A(\lambda) = |A - \lambda I| &= \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} - \lambda & a_{23} & a_{24} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} - \lambda & a_{34} & \dots & a_{3n} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} - \lambda & \dots & a_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} \\ &= (a_{11} - \lambda)(a_{22} - \lambda) \dots (a_{nn} - \lambda) \end{aligned} \quad (*)$$

(2) לפי (\*),  $a_{11}, a_{22}, \dots, a_{nn}$  הם הערכים עצמיים של  $A$ . כל איבר על האלכסון הראשי מופיע בפולינום האופייני. לכן המספר הפעמים שאיבר מסוים מופיע על האלכסון הראשי שווה למספר הפעמים שהוא מופיע בפולינום

האופייני. מאותה מידה המספר הפעמים שאיבר מסוים מופיע על האלכסון הראשי שווה לריבוי אלגברי של הערך עצמי.



### הגדרה 5.1 מטריצה ניתנת לשילוש

תהי  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$  מטריצה ריבועית. אומרים ש  $A$  ניתנת לשילוש מעל  $\mathbb{F}$  אם  $A$  דומה למטריצה משולשית עליונה, כלומר אם קיימת מטריצה  $P$  הפיכה כך ש-

$$M = P^{-1}AP$$

מטריצה משולשית.  $P$  נקראת מטריצה משלשת.

### 5.1 דוגמה

מטריצה  $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}$  ניתנת לשילוש מעל  $\mathbb{R}$  כי קיימת  $P = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$  הפיכה ו-  $M = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  משולשית כך ש-  $P^{-1}AP = M$ :

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

בנוסף קיימת  $P = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$  הפיכה ו-  $M = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  משולשית כך ש-  $P^{-1}AP = M$ :

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

### משפט 5.2 תנאי לשילוש

תהי  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$ . אם  $A$  ניתנת לשילוש מעל  $\mathbb{F}$  אז הפולינום האופייני של  $A$  מתפרק לגורמים לינאריים (לא בהכרח שונים) מעל  $\mathbb{F}$ .

**הוכחה:** נניח ש-  $A$  ניתנת לשילוש. אז קיימת  $P$  הפיכה ו-  $M$  משולשית כך ש-  $M = P^{-1}AP$ . למטריצות דומות יש אותו פולינום האופייני, לכן

$$p_A(x) = p_M(x).$$

הגורמים של  $p_M(x)$  לינאריים (לא בהכרח שונים) כי  $M$  מטריצה משולשית, לכן הגורמים של  $p_A(x)$  לינאריים (לא בהכרח שונים).



### 5.2 דוגמה

נתונה  $A \in \mathbb{F}^{2 \times 2}$ . נניח ש  $p(A)$  מתפרק למכפלה של גורמים לינאריים מעל  $\mathbb{F}$ . הוכיחו כי  $A$  ניתנת לשילוש.

### פתרון:

$p(A)$  מתפרק לגורמים לינאריים, לכן קיים לפחות ערך עצמי אחד  $\lambda$ . יהי הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda$ .

$$A \cdot u_1 = \lambda u_1.$$

נשלים את  $u_1$  לבסיס של  $\mathbb{F}^2$ . נקבל בסיס  $B = \{u_1, u_2\}$ . אז

$$A \cdot u_1 = \lambda u_1 + 0 \cdot v_1$$

$$A \cdot u_2 = \alpha_1 u_1 + \alpha_2 \cdot v_2$$

$A$  מייצגת את הטרנספורמציה  $T_A : \mathbb{F}^2 \rightarrow \mathbb{F}^2$  ביחס לבסיס הסטנדרטי  $E$  של  $\mathbb{F}^2$ . המטריצה המייצגת של  $T : \mathbb{F}^2 \rightarrow \mathbb{F}^2$  בבסיס  $B$  היא

$$[T_A]_B = \begin{pmatrix} | & | \\ T(b_1) & T(b_2) \\ | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda & \alpha_1 \\ 0 & \alpha_2 \end{pmatrix}.$$

נסמן ב-  $P_{E \rightarrow B}$  המטריצה המעבר מבסיס  $E$  לבסיס  $B$ . אז

$$[T_A]_B = P_{E \rightarrow B} [T_A]_E P_{E \rightarrow B}^{-1}$$

כלומר

$$\begin{pmatrix} \lambda & \alpha_1 \\ 0 & \alpha_2 \end{pmatrix} = P_{E \rightarrow B} A P_{E \rightarrow B}^{-1}$$

קיבלנו ש-  $A$  דומה למטריצה משולשית.

### 5.3 דוגמה

הוכיחו כי המטריצה  $A = \begin{pmatrix} 5 & -\frac{3}{2} \\ 6 & -1 \end{pmatrix}$  ניתנת לשילוש מעל  $\mathbb{R}$ . מצאו מטריצה משולשית עבור  $A$  ומטריצה משלשת  $P$ .

### פתרון:

נמצא את הערכים עמציים של  $A$ .

$$\left| \begin{pmatrix} \lambda - 5 & \frac{3}{2} \\ -6 & \lambda + 1 \end{pmatrix} \right| = (\lambda - 5)(\lambda + 1) + 9 = \lambda^2 - 4\lambda + 4 = (\lambda - 2)^2$$

יש ערך עצמי אחד  $\lambda = 2$  מריבוי אלגברי 2.

נמצא את הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda = 2$ :

$$\begin{pmatrix} 5 - \lambda & -\frac{3}{2} \\ 6 & -1 - \lambda \end{pmatrix} \stackrel{\lambda=2}{=} \begin{pmatrix} 3 & -\frac{3}{2} \\ 6 & -3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 3 & -\frac{3}{2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון  $x = \frac{1}{2}y$ ,  $y \in \mathbb{R}$ . לכן הוקטור עצמי הוא  $u_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$ . נשלים את  $u_1$  לבסיס של  $\mathbb{R}^2$ :

$$u_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad u_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A \cdot u_1 = 2u_1$$

$$A \cdot u_2 = \begin{pmatrix} 5 & -\frac{3}{2} \\ 6 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} \\ -1 \end{pmatrix} = -\frac{3}{2}u_1 + 2u_2$$

לכן  $A$  דומה למטריצה

$$M = \begin{pmatrix} 2 & -\frac{3}{2} \\ 0 & 2 \end{pmatrix}.$$

המטריצה המשלשת היא

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

## 5.2 העתקות לינאריות ניתנות לשילוש

### הגדרה 5.2 העתקה לינארית ניתנת לשילוש

יהי  $V$  מרחב וקטורי נוצר סופית מעל שדה  $\mathbb{F}$  ויהי  $T : V \rightarrow V$  אופרטור.  $T$  נקרא ניתן לשילוש אם קיים בסיס  $B$  של  $V$  שעבורו המטריצה המייצגת  $[T]_B$  היא מטריצה משולשית עליונה. הבסיס נקרא בסיס משלש עבור  $B$ .

### משפט 5.3 תנאי לקיום שילוש מטריצה

יהי  $V$  מרחב וקטורי נוצר סופית מעל שדה  $\mathbb{F}$  ויהי  $T : V \rightarrow V$  אופרטור. אם  $T$  ניתנת לשילוש אז הפולינום האופייני של  $T$  מתפרק לגורמים לינאריים (לא בהכרח שונים) מעל  $\mathbb{F}$ .

### משפט 5.4 קיום שילוש

לכל מרחב וקטורי  $V$  מעל  $\mathbb{C}$  ולכל  $T \in \text{Hom}(V)$  ניתנת לשילוש.

הוכחה: כל פולינום מתפרק לגורמים לינאריים מעל  $\mathbb{C}$ .

## 5.3 תת מרחבים שמורים (אינווריאנטיים)

### הגדרה 5.3 העתקה לינארית ניתנת לשילוש

יהי  $V$  מרחב וקטורי מעל שדה  $\mathbb{F}$  ויהי  $T : V \rightarrow V$  אופרטור. תת מרחב  $W$  של  $V$  נקרא תת מרחב שמור אם  $T(W) \subseteq W$ .

### דוגמה 5.4

$$W = \{\bar{0}\} \subseteq V$$

תת מרחב שמור לכל  $T : V \rightarrow V$ .

### דוגמה 5.5

אם  $W = V_\lambda$  המרחב עצמי של  $\lambda$  ביחס לאופרטור  $T$ . אז לכל  $u \in V_\lambda$ ,

$$T(u) = \lambda u \in V_\lambda$$

לכן  $V_\lambda$

הוא תת מרחב שמור לכל  $T : V \rightarrow V$ .

### דוגמה 5.6

הוכיחו כי לכל אופרטור  $T : V \rightarrow V$

(א) תת מרחב  $\ker T$  הוא תת מרחב  $T$  - שמור.

(ב) תת מרחב  $\text{Im } T$  הוא תת-מרחב  $T$  - שמור.

## פתרון:

(א) צריך להוכיח ש  $\ker T$  שמור.

לכל  $u \in \ker T$ ,

$$T(u) = \bar{0} \in \ker(T)$$

לכן תת מרחב  $T$  - שמור.

(ב) צריך להוכיח ש  $\text{Im } T$  הוא תת-מרחב  $T$  - שמור.

לכל  $u \in \text{Im } (T)$ ,

$$T(u) \in \text{Im } (T)$$

לכן  $\text{Im } (T)$  הוא תת מרחב  $T$  - שמור.

## 5.7 דוגמה

יהי  $u$  וקטור עצמי של אופרטור  $T$  ששייך לערך עצמי  $\lambda$ . נסמן  $V_1 = \text{span}(u)$ . הוכיחו כי  $V_1$  תת מרחב שמור.

## פתרון:

צריך להוכיח ש  $T(u_1) \subseteq V_1$ .

נקח  $u \in V_1$

$\Leftarrow$

קיים  $\alpha \in \mathbb{F}$  כך ש  $u = \alpha u$ . אז

$$T(u) = \alpha T(u) = \alpha \cdot \lambda u \in \text{sp}(u) = V_1$$

## 5.4 \*העתקה ניתנת לשילוש א"ם קיימת סדרת תת מרחבים

### משפט 5.5 העתקה ניתנת לשילוש א"ם קיימת סדרת תת מרחבים $T$ שמורים

יהי  $V$  מרחב וקטורי  $n$  -ממדי מעל שדה  $\mathbb{F}$ , ויהי  $T : V \rightarrow V$  אופרטור.  $T$  ניתנת לשילוש א"ם קיימת סדרה של תת מרחבים  $V_1 \subset V_2 \subset \dots \subset V_{n-1} \subset V_n = V$  כך ש-  $V_i$  הוא תת מרחב  $T$  שמור וגם  $\dim(V_i) = i$  לכל  $1 \leq i \leq n$ .

הוכחה: נוכיח אם

נניח ש  $T$  ניתנת לשילוש. אז קיים בסיס  $U = \{u_1, \dots, u_n\}$  שעבורו  $[T]_U$  משולשית. ז"א

$$[T]_U = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & \dots & a_{3n} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & \dots & a_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

לכן

$$T(u_1) = a_{11}u_1,$$

$$T(u_2) = a_{12}u_1 + a_{22}u_2,$$

$$\vdots$$

$$T(u_n) = a_{1n}u_1 + a_{2n}u_2 + \dots + a_{nn}u_n.$$

נסמן  $V_i = \text{span}(u_1, \dots, u_i)$ . אז  $\dim(V_i) = i$ .

לכן,  $V_1 \subset V_2 \subset \dots \subset V_n = V$ ,

בנוסף  $T(u_1), \dots, T(u_i) \in V_i$ .

יהי  $u \in V_i$ . אז  $u = \alpha_1 u_1 + \dots + \alpha_i u_i$ . לכן לכל  $u \in V_i$ :

$$T(u) = \alpha_1 T(u_1) + \dots + \alpha_i T(u_i) \in V_i$$

ז"א  $V_i$  תת מרחב  $T$  שמור.

### נוכיח רק אם

נניח שקיימת סדרת תת מרחבים  $T$  שמורים  $V_1 \subset V_2 \subset \dots \subset V_{n-1} \subset V_n = V$  כך ש

$$\dim(V_i) = i \quad \forall i$$

נבנה בסיס  $U = \{u_1, \dots, u_n\}$  של  $V$  כך שלכל  $1 \leq i \leq n$ ,  $\{u_1, \dots, u_i\}$  הוא בסיס של  $V_i$ . את הבסיס  $U$  נבנה ע"י אינדוקציה על  $n$ .

עבור  $n = 1$ :

$\dim(V_1) = 1$  לכן קיים וקטור  $u_1 \in V_1$ . הוקטור  $\{u_1\}$  מהווה בסיס של  $V_1$ .

הנחת אינדוקציה:

נניח שעבור  $1 < i < n$  בנינו בסיס  $\{u_1, \dots, u_i\}$  של  $V_i$ .

$$\dim(V_{i+1}) = \dim(V_i) + 1$$

לכן, קיים  $u_{i+1} \in V_{i+1}/V_i$ . אז  $u_1, \dots, u_i, u_{i+1} \in V_{i+1}$ . בת"ל. לכן  $\{u_1, \dots, u_i, u_{i+1}\}$  בסיס של  $V_{i+1}$ . הוכחנו דרך אינדוקציה כי קיים בסיס  $U = \{u_1, \dots, u_n\}$  של  $V$  כך שלכל  $1 \leq i \leq n$ ,  $\{u_1, \dots, u_i\}$  בסיס של  $V_i$ .

כעת, כיוון ש-  $V_i$  תת מרחבים  $T$  שמורים, מקבלים

$$\begin{aligned} T(u_1) &= a_{11}u_1, \\ T(u_2) &= a_{12}u_1 + a_{22}u_2, \\ T(u_3) &= a_{13}u_1 + a_{23}u_2 + a_{33}u_3, \\ &\vdots \\ T(u_n) &= a_{1n}u_1 + a_{2n}u_2 + a_{3n}u_3 + \dots + a_{nn}u_n. \end{aligned}$$

לכן

$$[T]_U = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & \dots & a_{3n} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & \dots & a_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

מטריצה משולשית.

## 5.5 \*אלגוריתם לשילוש מטריצה: פירוק שור

### 5.8 דוגמה

נתונה  $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$  מצאו מטריצה הפיכה  $P$  ומטריצה משולשית  $T$  כך ש

$$T = P^{-1}AP$$

**פתרון:**

שלב 1: נמצא ערכים עצמים של  $A$ :

$$|A - \lambda I| = -\lambda^3 + 2\lambda^2 + \lambda - 2 = -(\lambda - 2)(\lambda - 1)(\lambda + 1) = 0.$$

הערכים עצמיים הם  $\lambda = 2, \lambda = -1, \lambda = 1$ .

שלב 2: נמצא הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda = 1$ :

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון:  $(x, y, z) = (3, -2, 1)z$ .  $z \in \mathbb{R}$ . לכן הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda = 1$  הוא  $u_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}$

שלב 3: נשלים את  $u_1$  לבסיס של  $\mathbb{R}^3$ :

$$\left\{ \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

ואז נגדיר את המטריצה

$$U_1 = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

שלב 4: נגדיר

$$U_1^{-1}AU_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ \frac{2}{3} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{3} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ 0 & \frac{5}{3} & \frac{4}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}$$

שלב 5:

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ 0 & \frac{5}{3} & \frac{4}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}, \quad A_1 = \begin{pmatrix} \frac{5}{3} & \frac{4}{3} \\ \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}$$

עכשיו נחזור על שלבים 1 – 5 עבור המטריצה  $A_1$  המתקבל.

שלב 1: נמצא ערכים עצמים של  $A_1$ :

$$|A_1 - \lambda I| = \lambda^2 - \lambda - 2 = (\lambda - 2)(\lambda + 1) = 0.$$

הערכים עצמיים הם  $\lambda = 2, \lambda = -1$ .

שלב 2: נמצא הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda = -1$ :

$$\begin{pmatrix} \frac{8}{3} & \frac{4}{3} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 8 & 4 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון:  $(x, y) = (-\frac{1}{2}, 1)y$ . לכן הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda = -1$  הוא  $u_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} \\ 1 \end{pmatrix}$

שלב 3: נשלים את  $u_1$  לבסיס של  $\mathbb{R}^2$ :

$$\left\{ \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

ואז נגדיר את המטריצה

$$M_2 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

ואת המטריצה

$$U_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$



שלב 4: נגדיר

$$M_2^{-1}A_1M_2 = \begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{5}{3} & \frac{4}{3} \\ \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & -\frac{8}{3} \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

קיבלנו מטריצה משולשית עילית אז התהליך מסתיים כאן.

$$(U_1U_2)^{-1}A(U_1U_2) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{2}{3} \\ 0 & -1 & -\frac{8}{3} \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} = T$$

לכן מצאנו  $P$  הפיכה ו  $T$  משולשית כך ש-

$$P^{-1}AP = T$$

## דוגמה 5.9

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 7 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} \text{ נתונה } A \text{ מצאו מטריצה הפיכה } P \text{ ומטריצה משולשית } T \text{ כך ש}$$

$$T = P^{-1}AP$$

**פתרון:**

שלב 1: נמצא ערכים עצמים של  $A$ :

$$|A - \lambda I| = \lambda^4 - 13\lambda^3 + 53\lambda^2 - 83\lambda + 42 = (\lambda - 7)(\lambda - 3)(\lambda - 2)(\lambda - 1) = 0 .$$

הערכים עצמיים הם  $\lambda = 7, \lambda = 3, \lambda = 2, \lambda = 1$ .

שלב 2: נמצא הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda = 1$ :

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 6 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 6 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון:  $w \in \mathbb{R}^4 (x, y, z, w) = (2, 2, -3, 3)w$ . לכן הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda = 1$  הוא  $u_1 =$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

שלב 3: נשלים את  $u_1$  לבסיס של  $\mathbb{R}^4$ :

$$\left\{ \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ -3 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

ואז נגדיר את המטריצה

$$U_1 = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

שלב 4: נגדיר

$$U_1^{-1}AU_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{3}{2} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 7 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 6 & 2 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 4 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} & -2 & 2 \end{pmatrix}$$

שלב 5:

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 6 & 2 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 4 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} & -2 & 2 \end{pmatrix}, \quad A_1 = \begin{pmatrix} 6 & 2 & 0 \\ \frac{3}{2} & 4 & 0 \\ -\frac{3}{2} & -2 & 2 \end{pmatrix}$$

עכשיו נחזור על שלבים 1 – 5 עבור המטריצה  $A_1$  המתקבל.

שלב 1: נמצא ערכים עצמים של  $A_1$ :

$$|A_1 - \lambda I| = -\lambda^3 + 12\lambda^2 - 41\lambda + 42 = -(\lambda - 7)(\lambda - 3)(\lambda - 2) = 0.$$

הערכים עצמיים הם  $\lambda = 7, \lambda = 3, \lambda = 2$ .

שלב 2: נמצא הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda = 2$ :

$$u_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ הוקטור עצמי השייך לערך עצמי } \lambda = 2 \text{ הוא}$$

שלב 3: נשלים את  $u_1$  לבסיס של  $\mathbb{R}^3$ :

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

ואז נגדיר את המטריצה

$$M_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

ואת המטריצה

$$U_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

שלב 4': נגדיר

$$M_2^{-1}A_1M_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6 & 2 & 0 \\ \frac{3}{2} & 4 & 0 \\ -\frac{3}{2} & -2 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & -2 & -\frac{3}{2} \\ 0 & 4 & \frac{3}{2} \\ 0 & 2 & 6 \end{pmatrix}$$

קיבלנו מטריצה משולשית עילית אז התהליך מסתיים כאן.

שלב 5':

$$\begin{pmatrix} 2 & -2 & -\frac{3}{2} \\ 0 & 4 & \frac{3}{2} \\ 0 & 2 & 6 \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} 4 & \frac{3}{2} \\ 2 & 6 \end{pmatrix}.$$

עכשיו נחזור על שלבים  $5' - 1'$  עבור המטריצה  $A_2$  המתקבל.

שלב 1'': נמצא ערכים עצמים של  $A_2$ :

$$|A_2 - \lambda I| = \lambda^2 - 10\lambda + 21 = -(\lambda - 7)(\lambda - 3) = 0.$$

הערכים עצמיים הם  $\lambda = 7, \lambda = 3$ .

שלב 2'': נמצא הוקטור עצמי השייך לערך עצמי  $\lambda = 3$ :

$$w_1 = \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} \\ 1 \end{pmatrix} \text{ הוקטור עצמי השייך לערך עצמי } \lambda = 3 \text{ הוא}$$

שלב 3'': נשלים את  $w_1$  לבסיס של  $\mathbb{R}^2$ :

$$\left\{ \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

ואז נגדיר את המטריצה

$$M_3 = \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

ואת המטריצה

$$U_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

שלב 4'': נגדיר

$$M_3^{-1}A_2M_3 = \begin{pmatrix} -\frac{2}{3} & 0 \\ \frac{2}{3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 & \frac{3}{2} \\ 2 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 0 & 7 \end{pmatrix}$$

קיבלנו מטריצה משולשית עילית אז התהליך מסתיים כאן.

$$(U_1U_2U_3)^{-1}A(U_1U_2U_3) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & \frac{1}{2} \\ 0 & 2 & \frac{3}{2} & -\frac{3}{2} \\ 0 & 0 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} = T$$

לכן מצאנו  $P$  הפיכה ו  $T$  משולשית כך ש-

$$P^{-1}AP = T$$