

## שיעור 6

### צורת ז'ורדן

#### הגדרה 6.1 מטריצת ז'ורדן נילפוטנטית יסודית מסדר $n$

יהי  $E = \{e_1, \dots, e_n\}$  הבסיס הסטנדרטי של  $\mathbb{F}^n$ .  
 המטריצה  $J_n(0) \in \mathbb{F}^{n \times n}$  מוגדרת

$$J_n(0) = \begin{pmatrix} | & | & | & \dots & | \\ \bar{0} & e_1 & e_2 & \dots & e_{n-1} \\ | & | & | & \dots & | \end{pmatrix}$$

שהעמודה הראשונה שלה היא וקטור האפס ושכל  $2 \leq i \leq n$  העמודה ה- $i$  שלה היא  $e_{i-1}$ , נקראת מטריצת ז'ורדן נילפוטנטית יסודית מסדר  $n$ . כלומר:

$$J_n(0) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & & & \\ & 0 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & 1 \\ & & & & 0 \end{pmatrix}$$

#### הגדרה 6.2 בלוק ז'ורדן

בלוק ז'ורדן  $J_k(\lambda)$ ,  $\lambda \in \mathbb{F}$ ,  $k \in \mathbb{N}$ , הוא מטריצה מסדר  $k \times k$  מצורה

$$J_k(\lambda) = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda \end{pmatrix}$$

#### דוגמה 6.1

$$J_4(2) = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

## 6.2 דוגמה

מצאו את הפולינום האופייני של  $J_4(2)$ .

### פתרון:

$J_4(2)$  משולשית עליונה, לכן הפולינום האופייני מתפרק לגורמים לינאריים, והערכים עצמיים נמצאים על האלכסון הראשי. לכן נקבל

$$P_{J_4(2)} = (\lambda - 2)(\lambda - 2)(\lambda - 2)(\lambda - 2) = (\lambda - 2)^4.$$

יש ערך עצמי יחיד  $\lambda = 2$  מריבוי אלגברי 4. נמצא את הריבוי הגאומטרי:

$$(A - 2I_{4 \times 4}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

אנחנו רואים מייד כי  $\dim V_2 = 3$ . ז"א הריבוי גאומטרי פחות מהריבוי אלגברי, ולכן המטריצה לא לכסינה.

### משפט 6.1 בלוק ז'ורדן לא לכסין

$J_k(\lambda)$  לא לכסין.

### הוכחה:

$$J_k(\lambda_1) = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_1 \end{pmatrix}$$

$J_k(\lambda_1)$  משולשית עליונה. לכן הפולינום האופייני מתפרק לגורמים לינאריים, והערכים עצמיים נמצאים על האלכסון הראשי (משפט 3.20).

$$p_{J_k(\lambda_1)}(\lambda) = \underbrace{(\lambda - \lambda_1) \dots (\lambda - \lambda_1)}_{k \text{ פעמים}} = (\lambda - \lambda_1)^k$$

יש ערך עצמי יחיד:  $\lambda = \lambda_1$  מריבוי אלגברי  $k$ . נחשב את המרחב עצמי  $V_{\lambda_1}$ :

$$(A - \lambda_1 I_{k \times k}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

נקבל כי  $\dim V_{\lambda_1} = k - 1$ . ז"א הריבוי גאומטרי פחות מהריבוי אלגברי, ולכן המטריצה לא לכסינה. ■

### הגדרה 6.3 צורת ז'ורדן

צורת ז'ורדן היא מטריצה ריבועית  $A \in \mathbb{F}^{n \times n}$  שעל האלכסון הראשי שלה יש בלוקים ז'ורדן ו-0 בכל מקום אחר.

$$A = \text{diag}\left(J_{k_1}(\lambda_1), J_{k_2}(\lambda_2), \dots, J_{k_l}(\lambda_l)\right) = \begin{pmatrix} J_{k_1}(\lambda_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_{k_2}(\lambda_2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & J_{k_l}(\lambda_l) \end{pmatrix}$$

### דוגמה 6.3

$$\text{diag}\left(J_2(1), J_3(0)\right) = \begin{pmatrix} J_2(1) & 0 \\ 0 & J_3(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{matrix}} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} & \boxed{\begin{matrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix}} \end{pmatrix}$$

$$\text{diag}\left(J_3(5), J_2(7), J_4(9)\right) = \begin{pmatrix} J_3(5) & 0 & 0 \\ 0 & J_2(7) & 0 \\ 0 & 0 & J_4(9) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} 5 & 1 & 0 \\ 0 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & 5 \end{matrix}} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \boxed{\begin{matrix} 7 & 1 \\ 0 & 7 \end{matrix}} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 9 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 9 \end{matrix} \end{pmatrix}$$

(1) צורת ז'ורדן היא משולשית.

(2) מטריצה אלכסונית היא בצורת ז'ורדן.

(3) צורת ז'ורדן היא הצורה הקרובה ביותר למטריצה אלכסונית.

תהי  $A$  מטריצה ריבועית מסדר  $2 \times 2$  עם ערך עצמי אחד,  $\lambda$  מריבוי אלגברי 2. יהי  $V_\lambda$  המרחב עצמי. אז ישנן שתי אפשרויות:

$$(1) \dim(V_\lambda) = 2 \text{ (הריבוי גאומטרי 2).}$$

$$(2) \dim(V_\lambda) = 1 \text{ (הריבוי גאומטרי 1).}$$

**מקרה (1):**  $\dim(V_\lambda) = 2$ .

$A$  לכסינה כי לכל ערך עצמי הריבוי אלגברי שווה לריבוי גאומטרי. יהיו שני וקטורים עצמיים  $u_1, u_2$  השייכים לערך עצמי  $\lambda$ . כלומר  $A \cdot u_1 = \lambda u_1$  ו-  $A \cdot u_2 = \lambda u_2$ . לכן

$$A \cdot \begin{pmatrix} | & | \\ u_1 & u_2 \\ | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} | & | \\ A \cdot u_1 & A \cdot u_2 \\ | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} | & | \\ \lambda u_1 & \lambda u_2 \\ | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} | & | \\ u_1 & u_2 \\ | & | \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

$$\text{נסמן } P = \begin{pmatrix} | & | \\ u_1 & u_2 \\ | & | \end{pmatrix} \text{ ו- } D = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \text{ אז}$$

$$A \cdot P = PD \quad \Rightarrow \quad A = PDP^{-1}$$

$A$  דומה למטריצה אלכסונית ולכן  $A$  לכסינה.

**מקרה (2):**  $\dim(V_\lambda) = 1$

$A$  לא לכסינה כי עבור הערך עצמי  $\lambda$  הריבוי אלגברי לא שווה לריבוי גאומטרי. אז  $A$  לא לכסינה אבל היא כן דומה למטריצה בלוק ז'ורדן  $J_2(\lambda)$ .

יש וקטור עצמי אחד,  $u_1$  השייך לערך עצמי  $\lambda$ . כלומר

$$A \cdot u_1 = \lambda u_1 \quad \Rightarrow \quad (A - \lambda I) \cdot u_1 = 0.$$

נגדיר וקטור  $u_2$  כך ש-

$$(A - \lambda I) \cdot u_2 = u_1 \quad \Rightarrow \quad A \cdot u_2 = \lambda u_2 + u_1.$$

מכאן

$$(A - \lambda I)^2 u_2 = (A - \lambda I) \cdot u_1 = 0.$$

לכן נקבל

$$A \cdot \begin{pmatrix} | & | \\ u_1 & u_2 \\ | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} | & | \\ A \cdot u_1 & A \cdot u_2 \\ | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} | & | \\ \lambda u_1 & \lambda u_2 + u_1 \\ | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} | & | \\ u_1 & u_2 \\ | & | \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}.$$

נשים לב שהמטריצה בסוף היא  $J_2(\lambda) = \begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$ . נסמן  $P = \begin{pmatrix} | & | \\ u_1 & u_2 \\ | & | \end{pmatrix}$  אז קיבלנו

$$A \cdot P = P \cdot J_2(\lambda) \quad \Rightarrow \quad A = P J_2(\lambda) P^{-1}.$$

הקבוצת וקטורים  $\{u_1, u_2\}$  נקראת **בסיס ז'ורדן של  $A$** .

## דוגמה 6.4

תהי  $A = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ . מצאו צורת ז'ורדן  $J$  ומטריצה הפיכה  $P$  כך ש-  $A = PJP^{-1}$ .

## פתרון:

הפולינום האופייני הוא:

$$|\lambda I - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 2 & -3 \\ 0 & \lambda - 2 \end{vmatrix} = (\lambda - 2)^2 = 0$$

לכן יש ערך עצמי אחד,  $\lambda = 2$ , מירבוי אלגברי 2. נמצא את המרחב עצמי:

$$(A - 2I) = \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

הפתרון הוא  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \end{pmatrix} = x \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  לכן

$$V_2 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} .$$

נסמן ב-  $u_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  הוקטור עצמי של ערך עצמי  $\lambda = 2$ .  $\dim(V_\lambda) = 1 < 2$  לכן  $A$  לא לכסינה. נסמו הוקטור עצמי  $u_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

$$(A - \lambda I) \cdot u_2 = u_1 .$$

$$u_2 = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \text{ נסמן}$$

$$(A - 2I) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\left( \begin{array}{cc|c} 0 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{cc|c} 0 & 1 & \frac{1}{3} \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

לכן  $u_2 = \begin{pmatrix} x \\ \frac{1}{3} \end{pmatrix}$ ,  $x \in \mathbb{R}$  נבחר  $x = 1$  ונקבל  $u_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{3} \end{pmatrix}$

$$J = \begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} | & | \\ u_1 & u_2 \\ | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$A = PJP^{-1} .$$

## 6.5 דוגמה

תהי  $A = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 1 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$  מצאו צורת זיורדן  $J$  ומטריצה הפיכה  $P$  כך ש-  $A = PJP^{-1}$ .

### פתרון:

הפולינום האופייני הוא:

$$|\lambda I - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 4 & 0 & -1 \\ 0 & \lambda - 4 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - 4 \end{vmatrix} = (\lambda - 4)^3 = 0$$

לכן יש ערך עצמי אחד,  $\lambda = 4$ , מירבוי אלגברי 3. נמצא את המרחב עצמי:

$$(A - 4I) = \left( \begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

הפתרון הוא  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = x \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + y \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  לכן

$$V_4 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} .$$

$\dim(V_\lambda) = 2 < 3$ . לכן  $A$  לא לכסינה. נסמן הוקטורים בבסיס של  $V_4$  ב-  $u_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, u_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ . נרשום וקטור עצמי  $w_1$  של  $\lambda = 4$  כצירוף לינארי של הבסיס הזה:

$$w_1 = \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2.$$

נגדיר  $w_2$  לפי:

$$(A - 4I) \cdot w_2 = w_1 = \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2.$$

נסמן  $w_2 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  ונרשום את המשוואה בצורה

$$(A - 4I) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

נרכיב את המטריצה המורחבת של המשוואה:

$$\left( \begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 1 & \alpha_2 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

יש פתרון כאשר  $\alpha_1 = 0$ . נבחר  $\alpha_2 = 1$  ונקבל את הפתרון  $w_2 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$ ,  $x, y \in \mathbb{R}$ . המשתנים  $x, y$  יכולים לקבל

כל ערך. נציב  $x = 1, y = 1$  ונקבל  $w_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ .

נבנה בסיס ז'ורדן מהוקטורים עצמיים  $u_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, u_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  והוקטור המוכלל  $u_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ .

$$P = \begin{pmatrix} | & | & | \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ | & | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$J = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 1 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

$$A = PJP^{-1}.$$

שימו לב שבדוגמה הזאת  $J$  צורת ז'ורדן מצורה

$$J = \text{diag}(J_1(\lambda), J_2(\lambda)) = \text{diag}(J_1(4), J_2(4)).$$

## 6.6 דוגמה

תהי  $A = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 \\ 0 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$ . מצאו צורת ז'ורדן  $J$  ומטריצה הפיכה  $P$  כך ש-  $A = PJP^{-1}$ .

**פתרון:**

הפולינום האופייני הוא:

$$|\lambda I - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 4 & -1 & -1 \\ 0 & \lambda - 4 & -1 \\ 0 & 0 & \lambda - 4 \end{vmatrix} = (\lambda - 4)^3 = 0$$

לכן יש ערך עצמי אחד,  $\lambda = 4$ , מירבוי אלגברי 3. נמצא את המרחב עצמי:

$$(A - 4I) = \left( \begin{array}{ccc|c} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

$$\text{הפתרון הוא } \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = x \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ לכן}$$

$$V_4 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}.$$

$$\dim(V_\lambda) = 1 < 3. \text{ לכן } A \text{ לא לכסינה. נסמן הוקטור בבסיס של } V_4 \text{ ב-} u_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$$(A - 4I) \cdot u_2 = u_1.$$

$$u_2 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ נסמן}$$

$$(A - 4I) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\left( \begin{array}{ccc|c} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{ccc|c} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

$$\alpha \in \mathbb{R}, u_2 = \begin{pmatrix} \alpha \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ הפתרון הוא}$$

$$(A - 4I) \cdot u_3 = u_2.$$

$$u_3 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ נסמן}$$

$$\left( \begin{array}{ccc|c} 0 & 1 & 1 & \alpha \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{ccc|c} 0 & 1 & 0 & \alpha - 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

$$\beta \in \mathbb{R}, u_3 = \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha - 1 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ הפתרון הוא נציב } \alpha = 1, \beta = 1 \text{ ונקבל הבסיס ג'ורדן:}$$

$$\left\{ u_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, u_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, u_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$P = \begin{pmatrix} | & | & | \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ | & | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$J = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 \\ 0 & \lambda & 1 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

$$A = PJP^{-1}.$$

שימו לב שבדוגמה הזאת  $J$  צורת ז'ורדן מצורה

$$J = J_3(\lambda) = J_3(4).$$

## משפט 6.2 משפט ז'ורדן

יהי  $T : V \rightarrow V$  אופרטור לינארי מעל שדה  $\mathbb{F}$ . נניח שהפולינום האופייני מתפרק לגורמים לינאריים

$$p(x) = (\lambda - \lambda_1)^{n_1} (x - \lambda_2)^{n_2} \dots (x - \lambda_l)^{n_l}$$

כאשר  $\lambda_i \neq \lambda_j$  עבור  $i \neq j$  לכל  $1 \leq i \leq l$ . נניח שפולינום המינימלי הוא

$$m(x) = (x - \lambda_1)^{m_1} (x - \lambda_2)^{m_2} \dots (x - \lambda_l)^{m_l}$$

כאשר  $1 \leq m_i \leq n_i$  לכל  $i$ . אז יש ל- $T$  יצוג ע"י מטריצה מצורת ז'ורדן מצורה

$$\begin{pmatrix} \beta_1 & & 0 \\ & \beta_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & \beta_l \end{pmatrix}$$

כאשר  $\beta_i$  מתאים לערך עצמי  $\lambda_i$ ,

$$\beta_i = \text{diag} \left( J_{a_1}(\lambda_i), J_{a_2}(\lambda_i), \dots, J_{a_s}(\lambda_i) \right) = \begin{pmatrix} J_{a_1}(\lambda_i) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_{a_2}(\lambda_i) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & J_{a_s}(\lambda_i) \end{pmatrix}$$

כאשר

$$a_1 = m_i \quad (1)$$

$$a_1 \geq a_2 \geq a_3 \geq \dots \geq a_s \quad (2)$$

$$a_1 + a_2 + \dots + a_s = n_i \quad (3)$$

$$s \text{ הוא הריבוי הגאומטרי של } \lambda_i \quad (4)$$

לכן, שתי מטריצות דומות אם ורק אם יש להן אותה צורת ז'ורדן עד כדי סדר הבלוקים.

## דוגמה 6.7

נתון פולינום אופייני  $p(x) = (x-2)^4(x-3)^3$  ופולינום מינימלי  $m(x) = (x-2)^2(x-3)^2$  אז צורת ז'ורדן



היא

$$\begin{pmatrix} \beta_1 & 0 \\ 0 & \beta_2 \end{pmatrix}$$

נמצא  $\beta_1$  עבור  $\lambda = 2$ :

יש שתי אפשרויות עבור  $\beta_1$ .

$$\beta_1 = \begin{pmatrix} J_2(2) & 0 & 0 \\ 0 & J_1(2) & 0 \\ 0 & 0 & J_1(2) \end{pmatrix} \quad \text{או} \quad \beta_1 = \begin{pmatrix} J_2(2) & 0 \\ 0 & J_2(2) \end{pmatrix}$$

נחשב  $\beta_2$  עבור  $\lambda = 3$ :

$$\beta_2 = \begin{pmatrix} J_2(3) & 0 \\ 0 & J_1(3) \end{pmatrix}$$

בכדי לקבוע  $\beta_1$  יש למצוא את הירבוי הגאומטרי של  $\lambda = 2$ .

מספר הבלוקים ב-  $\beta_1$  שווה לריבוי הגאומטרי של  $\lambda = 2$ .

## 6.8 דוגמה

נתון הפולינום האופייני  $p(x) = (x-2)^3(x-5)^2$  מצאו את הצורות  $\lambda$  הירבוי האפשריות.

### פתרון:

האפשרויות של הפולינום המינימלי הן

$$(x-2)(x-5), \quad (x-2)(x-5)^2, \quad (x-2)^2(x-5), \quad (x-2)^2(x-5)^2, \quad (x-2)^3(x-5), \quad (x-2)^3(x-5)^2.$$

לכן האפשרויות לצורת  $\lambda$  הירבוי הן:

$$\underline{m(x) = (x-2)(x-5)}$$

$$\begin{pmatrix} J_1(2) & & & & \\ & J_1(2) & & & \\ & & J_1(2) & & \\ & & & J_1(5) & \\ & & & & J_1(5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}$$

$$\underline{m(x) = (x-2)^2(x-5)}$$

$$\begin{pmatrix} J_2(2) & & & & \\ & J_1(2) & & & \\ & & J_1(5) & & \\ & & & J_1(5) & \\ & & & & J_1(5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boxed{2} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}$$

$$\underline{m(x) = (x-2)^3(x-5)}$$

$$\begin{pmatrix} J_3(2) & & \\ & J_1(5) & \\ & & J_1(5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{matrix}} & \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{matrix} \end{pmatrix}$$

$$\underline{m(x) = (x-2)(x-5)^2}$$

$$\begin{pmatrix} J_1(2) & & & \\ & J_1(2) & & \\ & & J_1(2) & \\ & & & J_2(5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{matrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \boxed{\begin{matrix} 5 & 1 \\ 0 & 5 \end{matrix}} \end{matrix} \end{pmatrix}$$

$$\underline{m(x) = (x-2)^2(x-5)^2}$$

$$\begin{pmatrix} J_2(2) & & \\ & J_1(2) & \\ & & J_2(5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \end{matrix}} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 2 & 0 & 0 \\ \boxed{\begin{matrix} 5 & 1 \\ 0 & 5 \end{matrix}} \end{matrix} \end{pmatrix}$$

$$\underline{m(x) = (x-2)^3(x-5)^2}$$

$$\begin{pmatrix} J_3(2) & \\ & J_2(5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{matrix}} & \begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \boxed{\begin{matrix} 5 & 1 \\ 0 & 5 \end{matrix}} \end{pmatrix}$$

## 6.9 דוגמה

למטריצות  $A$  ו- $B$  יש אותו פולינום מינימלי ופולינום אופייני:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad p_A(x) = x^4, \quad m_A(x) = x^2.$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad p_B(x) = x^4, \quad m_B(x) = x^2.$$

מטריצות  $A$  ו- $B$  לא דומות אבל

• למטריצות  $A$  ו- $B$  יש אותם ערכים עצמיים,

•  $|A| = |B|$  אבל

•  $\text{rank}(A) \neq \text{rank}(B)$ .

בדוגמה היו שתי מטריצות לא דומות עם אותם  $p(x)$  ו-  $m(x)$ ,  $|A| = |B|$ , אותם ערכים עצמיים וגם אותה דרגה.

### משפט 6.3 צורת ז'ורדן של מטריצה $3 \times 3$

עבור מטריצות  $3 \times 3$  צורות פולינום אופייני הן:

$$p(x) = (x-a)(x-b)(x-c), \quad p(x) = (x-a)^2(x-b), \quad p(x) = (x-a)^3.$$

#### מקרה 1:

$$p(x) = (x-a)(x-b)(x-c), \quad m(x) = (x-a)(x-b)(x-c).$$

קיימת צורת ז'ורדן אחת:

$$\begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{pmatrix}$$

מטריצה אלכסונית. הצ'ורת ז'ורדן היא

$$\begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1(a) & 0 & 0 \\ 0 & J_1(b) & 0 \\ 0 & 0 & J_1(c) \end{pmatrix}$$

#### מקרה 2:

$$p(x) = (x-a)^2(x-b)$$

$\Leftarrow$  ישנן שתי אפשרויות לפולינום המינימלי:

$$m(x) = (x-a)(x-b) \quad \vee \quad m(x) = (x-a)^2(x-b)$$

$$\underline{m(x) = (x-a)(x-b)}$$

קיימת צורת ז'ורדן אחת:

$$\begin{pmatrix} J_1(a) & 0 & 0 \\ 0 & J_1(a) & 0 \\ 0 & 0 & J_1(b) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & b \end{pmatrix}$$

$$\underline{m(x) = (x-a)^2(x-b)}$$

קיימת צורת ז'ורדן אחת:

$$\begin{pmatrix} J_2(a) & 0 \\ 0 & J_1(b) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 1 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & b \end{pmatrix}$$

### מקרה 3:

$$p(x) = (x - a)^3$$

אז ישנן 3 אפשרויות ל-  $m(x)$ :

$$(x - a), \quad (x - a)^2, \quad (x - a)^3.$$

$$\underline{m(x) = (x - a)}$$

קיימת צורת ז'ורדן אחת:

$$\begin{pmatrix} J_1(a) & 0 & 0 \\ 0 & J_1(a) & 0 \\ 0 & 0 & J_1(a) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{pmatrix}$$

$$\underline{m(x) = (x - a)^2}$$

קיימת צורת ז'ורדן אחת:

$$\begin{pmatrix} J_2(a) & 0 \\ 0 & J_1(a) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 1 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{pmatrix}$$

$$\underline{m(x) = (x - a)^3}$$

קיימת צורת ז'ורדן אחת:

$$(J_3(a)) = \begin{pmatrix} a & 1 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 0 & a \end{pmatrix}$$

ז"א לכל פולינום מינימלי כאן יש צורת ז'ורדן אחת. לכן כל שתי מטריצות מסדר  $3 \times 3$  עם אותו פולינום אופייני ואותו פולינום מינימלי הן דומות אחת לשניה.

### דוגמה 6.10

מצאו את צורת ז'ורדן ובסיס מז'ורדן אל מטריצה

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

פתרון:

$$\begin{aligned}
 p_A(x) &= |xI - A| \\
 &= \begin{vmatrix} x-1 & 3 & -4 \\ -4 & x+7 & -8 \\ -6 & 7 & x+7 \end{vmatrix} \\
 &= (x-1) \begin{vmatrix} x+7 & -8 \\ 7 & x+7 \end{vmatrix} - 3 \begin{vmatrix} -4 & -8 \\ -6 & x+7 \end{vmatrix} - 4 \begin{vmatrix} -4 & x+7 \\ -6 & 7 \end{vmatrix} \\
 &= (x-1) ((x+7)^2 + 56) - 3(-28 - 4x + 48) - 4(-28 - 6(7+x)) \\
 &= -(x+1)^2(x-3)
 \end{aligned}$$

האפשרויות לפולינום המינימלי הן:

$$m(x) = (x+1)(x-3) \quad \text{או} \quad m(x) = (x+1)^2(x-3).$$

נבדוק איזה מהם מתאפס ע"י  $A$ :

$$(A+I)(A-3) = \begin{pmatrix} 2 & -3 & 4 \\ 4 & -6 & 8 \\ 6 & -7 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -2 & -3 & 4 \\ 4 & -10 & 8 \\ 6 & -7 & 4 \end{pmatrix} \neq 0$$

לכן  $m(x) = (x+1)^2(x-3)$  הצורת ז'ורדן היא

$$\begin{pmatrix} J_2(-1) & 0 \\ 0 & J_1(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

נמצא את הבסיס המז'ורדן:  $\lambda = -1$  ערך עצמי. נמצא וקטור עצמי השייך ל  $\lambda = -1$ :

$$\begin{aligned}
 (A+I) &= \begin{pmatrix} 2 & -3 & 4 \\ 4 & -6 & 8 \\ 6 & -7 & 8 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & -3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -4 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & -3 & 4 \\ 0 & 2 & -4 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & -3 & 4 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 &\rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

פתרון:  $z \in \mathbb{R} \ (x, y, z) = (z, 2z, z)$

$$V_{-1} = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

נסמן את הבסיס של  $V_{-1}$  ב-  $u_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ .

$$(A+I)u_2 = u_1$$

נסמן  $u_2 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$

$$(A+I) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

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

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

פתרון:  $z \in \mathbb{R} \ (x, y, z) = (-1 + z, -1 + 2z, z)$  נציב  $z = 1$ :

$$u_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

נחפש הוקטור עצמי ששייך לערך עצמי  $\lambda = 3$ :

$$(A - 3I) = \begin{pmatrix} -2 & -3 & 4 \\ 4 & -10 & 8 \\ 6 & -7 & 4 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -2 & -3 & 4 \\ 0 & -16 & 16 \\ 0 & -16 & 16 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -2 & -3 & 4 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

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

$$z \in \mathbb{R} \ (x, y, z) = (\frac{1}{2}z, z, z)$$

$$u_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$P = \begin{pmatrix} | & | & | \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ | & | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

לכן המרוצה  $P$  של הבסיס ג'ורדן היא

$$J = \begin{pmatrix} J_2(-1) & 0 \\ 0 & J_1(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{matrix}} & \boxed{0} \\ 0 & \boxed{3} \end{pmatrix}$$

והצורת ג'ורדן היא

$$A = PJP^{-1}$$

## 6.11 דוגמה

מצאו את צורת ג'ורדן אל מטריצה

$$A = \begin{pmatrix} -4 & 2 & 10 \\ -4 & 3 & 7 \\ -3 & 1 & 7 \end{pmatrix}$$

מעל  $\mathbb{C}$  ומטריצה  $P$  כך ש  $P^{-1}AP = J$ .

פתרון:

$$\begin{aligned}
 p_A(x) &= |x - IA| \\
 &= \begin{vmatrix} x+4 & -2 & -10 \\ 4 & x-3 & -7 \\ 3 & -1 & x-7 \end{vmatrix} \\
 &= (x+4) \begin{vmatrix} x-3 & -7 \\ -1 & x-7 \end{vmatrix} + 2 \begin{vmatrix} 4 & -7 \\ 3 & x-7 \end{vmatrix} - 10 \begin{vmatrix} 4 & x-3 \\ 3 & -1 \end{vmatrix} \\
 &= (x+4)(x^2 - 10x + 21 - 7) + 2(4x - 28 + 21) - 10(-4 - 3x + 9) \\
 &= (x+4)(x^2 - 10x + 14) + 2(4x - 7) - 10(-3x + 5) \\
 &= x^3 - 10x^2 + 14x + 4x^2 - 40x + 56 + 8x - 14 + 30x - 50 \\
 &= x^3 - 6x^2 + 12x - 8 \\
 &= (x-2)^3.
 \end{aligned}$$

האפשרויות לפולינום המינימלי הן:

$$m(x) = (x-2) \quad \text{או} \quad m(x) = (x-2)^2 \quad \text{או} \quad m(x) = (x-2)^3.$$

נבדוק איזה מהם מתאפס ע"י  $A$ :

$$(A - 2I) \neq 0, \quad (A - 2I)^2 = \begin{pmatrix} -6 & 2 & 10 \\ -4 & 1 & 7 \\ -3 & 1 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -6 & 2 & 10 \\ -4 & 1 & 7 \\ -3 & 1 & 5 \end{pmatrix} \neq 0$$

לכן  $m(x) = (x-2)^3$  הצורת ז'ורדן היא

$$J = (J_3(2)) = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

נמצא את הבסיס המז'ורדן:  $\lambda = 2$  ערך עצמי. נמצא את המרחב עצמי ששייך ל  $\lambda = 2$ :

$$\begin{aligned}
 (A - 2I) &= \begin{pmatrix} -6 & 2 & 10 \\ -4 & 1 & 7 \\ -3 & 1 & 5 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -6 & 2 & 10 \\ -4 & 1 & 7 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -3 & 1 & 5 \\ -4 & 1 & 7 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -3 & 1 & 5 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 &\rightarrow \begin{pmatrix} -3 & 0 & 6 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -1 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

פתרון:  $(x, y, z) = (2z, z, z)$   $z \in \mathbb{R}$ . לכן המרחב עצמי הוא  $V_2 = \left\{ \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$ . נסמן את הוקטור בבסיס של  $V_2$

ב-

$$u_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$:u_2 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ נסמן}$$

$$(A - 2I) \cdot u_2 = u_1 \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} -6 & 2 & 10 \\ -4 & 1 & 7 \\ -3 & 1 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -6 & 2 & 10 & | & 2 \\ -4 & 1 & 7 & | & 1 \\ -3 & 1 & 5 & | & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -3 & 1 & 5 & | & 1 \\ -4 & 1 & 7 & | & 1 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -3 & 1 & 5 & | & 1 \\ 0 & -1 & 1 & | & -1 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix} \\ \rightarrow \begin{pmatrix} -3 & 0 & 6 & | & 0 \\ 0 & -1 & 1 & | & -1 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & | & 0 \\ 0 & 1 & -1 & | & 1 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון:  $(x, y, z) = (2z, z + 1, z)$ ,  $z \in \mathbb{R}$  נסמן

$$u_2 = \begin{pmatrix} 2\alpha \\ 1 + \alpha \\ \alpha \end{pmatrix}, \quad \alpha \in \mathbb{R}.$$

$$u_3 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ נסמן}$$

$$(A - 2I)u_3 = u_2 \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} -6 & 2 & 10 & | & 2 \\ -4 & 1 & 7 & | & 2 \\ -3 & 1 & 5 & | & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\alpha \\ 1 + \alpha \\ \alpha \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} -6 & 2 & 10 & | & 2\alpha \\ -4 & 1 & 7 & | & 1 + \alpha \\ -3 & 1 & 5 & | & \alpha \end{pmatrix} \xrightarrow{R_1 \rightarrow \frac{1}{2} \cdot R_1} \begin{pmatrix} -3 & 1 & 5 & | & \alpha \\ -4 & 1 & 7 & | & 1 + \alpha \\ -3 & 1 & 5 & | & \alpha \end{pmatrix} \\ \xrightarrow{\substack{R_2 \rightarrow 3R_2 - 4 \cdot R_1 \\ R_3 \rightarrow R_3 - R_1}} \begin{pmatrix} -3 & 1 & 5 & | & \alpha \\ 0 & -1 & 1 & | & 3 - \alpha \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{R_1 \rightarrow R_1 + R_2} \begin{pmatrix} -3 & 0 & 6 & | & 3 \\ 0 & -1 & 1 & | & 3 - \alpha \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix} \\ \xrightarrow{R_1 \rightarrow -\frac{1}{3} \cdot R_1} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & | & -1 \\ 0 & -1 & 1 & | & 3 - \alpha \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix}$$

קיים פתרון לכל  $\alpha$ . נבחר  $\alpha = 1$  ונקבל את הפתרון  $(x, y, z) = (-1 + 2z, -2 + z, z)$  נציב  $z = 1$  ונקבל

$$u_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

לכן המטריצה של הבסיס ז'ורדן היא

$$P = \begin{pmatrix} | & | & | \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ | & | & | \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

והצורת ז'ורדן היא

$$J = J_3(2) = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}.$$



## דוגמה 6.12

תהי  $A = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$ . מצאו צורת זיורדן  $J$  ומטריצה הפיכה  $P$  כך ש-  $A = PJP^{-1}$ .

### פתרון:

הפולינום האופייני הוא:

$$|\lambda I - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 4 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda - 4 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda - 2 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda - 2 \end{vmatrix} = (\lambda - 4)^3(\lambda - 2)^2 = 0$$

הערכים עצמיים הם:

2.  $\lambda = 2$  מירבוי אלגברי 2.

3.  $\lambda = 4$  מירבוי אלגברי 3.

נמצא את המרחב עצמי  $V_2$ :

$$(A - 2I) = \left( \begin{array}{ccccc|c} 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

הפתרון הוא  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ s \\ 0 \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  לכן  $s \in \mathbb{R}$ .

$$V_2 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}.$$

$\dim(V_2) = 1 < 2$ . לכן  $A$  לא לכסינה. נסמו הוקטור עצמי  $u_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ .

$$(A - 2I) \cdot u_2 = u_1.$$

נסמן  $u_2 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ s \\ t \end{pmatrix}$

$$(A - 2I) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\left( \begin{array}{ccccc|c} 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

לכן  $u_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \alpha \\ \frac{1}{3} \end{pmatrix}$ ,  $\alpha \in \mathbb{R}$ . לכל  $\alpha$  קיים פתרון. נציב  $\alpha = 0$  ונקל  $u_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{3} \end{pmatrix}$

נמצא את המרחב עצמי  $V_4$ :

$$\left( \begin{array}{ccccc|c} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \end{array} \right)$$

הפתרון הוא  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = x \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ . לכן

$$V_4 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}.$$

$\dim(V_4) = 1 < 3$ . לכן  $A$  לא לכסינה. נסמו הוקטור עצמי  $u_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

$$(A - 4I) \cdot u_4 = u_3.$$

$$.u_4 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ s \\ t \end{pmatrix} \text{נסמן}$$

$$(A - 4I) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\left( \begin{array}{ccccc|c} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \end{array} \right)$$

$$.\beta \in \mathbb{R}, u_4 = \begin{pmatrix} \beta \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{לכן}$$

$$(A - 4I) \cdot u_5 = u_4 .$$

$$.u_5 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ s \\ t \end{pmatrix} \text{נסמן}$$

$$(A - 4I) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\left( \begin{array}{ccccc|c} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \end{array} \right)$$

לכל  $\beta$  קיים פתרון. נציב  $\beta = 0$  ונקבל

$$.u_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{נציב } \gamma = 0 \text{ ונקבל } \gamma \in \mathbb{R}, u_5 = \begin{pmatrix} \gamma \\ -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$P = \left( \begin{array}{c|c|c|c|c} | & | & | & | & | \\ u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ | & | & | & | & | \end{array} \right) = \left( \begin{array}{ccccc} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) ,$$

$$J = \left( \begin{array}{cc} J_2(2) & 0 \\ 0 & J_3(4) \end{array} \right) = \left( \begin{array}{cc|ccc} \boxed{2} & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 \\ \boxed{0} & \boxed{2} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & \boxed{4} & \boxed{1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \boxed{4} & \boxed{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{4} \end{array} \right) .$$
$$A = PJP^{-1} .$$