שיעור 2
ערכים עצמיים ווקטוירם עצמיים

2.1 ערכיים עצמיים, ווקטורים עצמיים של מטריצות

הגדרה 2.1 ערך עצמי ווקטור עצמי של מטריצה

תהי $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$ מטריצה ריבועית מעל שדה $\mathbb{F}$. וקטור $\mathrm{v}\in F^n$ שלא שווה לוקטור האפס ($\mathrm{v}\neq\bar{0}$) יקרא וקטור עצמי של A אם קיים סקלר $\lambda\in\mathbb{F}$ כך ש-

$$A\cdot \mathrm{v}=\lambda \mathrm{v}\ .$$

λ נקרא ערך עצמי של A ששייך לוקטור עצמי v. המשוואה הזאת נקראת משוואת ערך עצמי של A.

דוגמה 2.1

נתונה מטריצה

$$A=\begin{pmatrix}2&4\\3&6\end{pmatrix}\ ,$$

קבעו אם כל אחד מהוקטורים הבאים, הוא וקטור עצמי של A ומצאו את הערך עצמי המתאים:

(א) $u_1=\begin{pmatrix}2\\3\end{pmatrix}$

(ב) $u_2=\begin{pmatrix}-2\\1\end{pmatrix}$

(ג) $u_3=\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$

פתרון:

(א)

$$A\cdot \mathrm{v}_1=\begin{pmatrix}2&4\\3&6\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}2\\3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}16\\24\end{pmatrix}=8\begin{pmatrix}2\\3\end{pmatrix}=8u_1.$$

ולכן u_1 הוא הוקטור עצמי של A השייך לערך עצמי

$$\lambda_1=8\ .$$

(ב)

$$A\cdot \mathrm{v}_2=\begin{pmatrix}2&4\\3&6\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}-2\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}=0\begin{pmatrix}-2\\1\end{pmatrix}=0u_2.$$

ולכן u_2 הוא הוקטור עצמי של A השייך לערך עצמי

$$\lambda_2=0\ .$$

(ג)

$$A \cdot u_3 = \begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 3 & 6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \neq \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

ולכן u_3 אינו וקטור עצמי של A.

דוגמה 2.2

נתונה מטריצה

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 8 \\ 1 & 6 \end{pmatrix} ,$$

קבעו אם כל אחד מהוקטורים הבאים, הוא וקטור עצמי של A ומצאו את הערך עצמי המתאים:

(א) $u_1 = \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \end{pmatrix}$

(ב) $u_2 = \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \end{pmatrix}$

(ג) $u_3 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$

פתרון:

(א)

$$A \cdot u_1 = \begin{pmatrix} 4 & 8 \\ 1 & 6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 24 \\ 10 \end{pmatrix} \neq \lambda u_1 .$$

ולכן u_1 אינו וקטור עצמי של A.

(ב)

$$A \cdot u_2 = \begin{pmatrix} 4 & 8 \\ 1 & 6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8 \\ 2 \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \end{pmatrix} = 2u_2 .$$

ולכן u_2 הוא הוקטור עצמי של A השייך לערך עצמי

$$\lambda = 2 \ .$$

(ג)

$$A \cdot u_3 = \begin{pmatrix} 4 & 8 \\ 1 & 6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16 \\ 8 \end{pmatrix} = 8 \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ולכן u_3 הוא הוקטור עצמי של A השייך לערך עצמי $\lambda = 8$.

דוגמה 2.3

הראו ש $u_1 = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \end{pmatrix}$, $u_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ הינם וקטורי עצמיים של המטריצה

$$A = \begin{pmatrix} 5 & 0 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון:

$$A\cdot u_1=\begin{pmatrix}5&0\\2&0\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}5\\2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}10\\4\end{pmatrix}\quad=2\begin{pmatrix}5\\2\end{pmatrix}$$
$$A\cdot u_2=\begin{pmatrix}5&0\\2&0\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}\quad=0\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$$

לכן u_1 הוא וקטור עצמי השייך לערך עצמי $\lambda_1=2$ ו u_2 הוא וקטור עצמי השייך לערך עצמי $\lambda_2=0$.

משפט 2.1

ערך עצמי של מטריצה יכול להיות 0.
וקטור האפס לא יכול להיות וקטור עצמי של מטריצה.

משפט 2.2 המשוואה האופייני של מטריצה

תהי $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$, ויהי v וקטור עצמי של A ששייך לערך עצמי λ. אז לפי הגדרה **??**,

$$A\cdot \mathrm{v}=\lambda \mathrm{v}\ ,$$

נעביר אגפים:

$$\bar{0}=\lambda\mathrm{v}-A\mathrm{v}\qquad\Rightarrow\qquad \bar{0}=(\lambda I-A)\,\mathrm{v}$$

כאשר I המטריצה היחידה של $\mathbb{F}^{n\times n}$. קיבלנו את המשוואה

$$(\lambda I-A)\,\mathrm{v}=\bar{0}\ .$$

v וקטור עצמי אז הוא לא יכול להיות וקטור האפס. לכן הדטרמיננטה של המטריצה $(\lambda I-A)$ שווה ל- 0. כלומר

$$|\lambda I-A|=0\ .$$

המשוואה הזאת נקראת **משוואת האופייני של** A.

הצד שמאל נקרא **הפולינום האופייני של** A ומסומן $p_A(\lambda)$. כלומר

$$p_A(\lambda)=|\lambda I-A|\ .$$

משפט 2.3 סדר של פולינום האופייני

אם $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$, אז הפולינום האופייני $p_A(x)$ של A מסדר n.

משפט 2.4 מרחב עצמי

תהי $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$ ויהי λ ערך עצמי של A. נסמן ב- V_λ הקבוצה של כל הוקטורים עצמיים ששייכים לערך עצמי λ, בתוספת הוקטור האפס.
V_λ תת-מרחב של $\mathbb{F}^{n\times n}$.

הוכחה: תרגיל בית. ■

משפט 2.5 מרחב עצמי של ערך עצמי λ שווה למרחב האפס של $A-\lambda I$

תהי $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$, יהי λ ערך עצמי של A ויהי V_λ מרחב העצמי של A. אז

$$V_\lambda=\text{Nul}\left(A-\lambda I\right)\ .$$

הוכחה: נוכיח כי $V_\lambda\subseteq\text{Nul}\left(A-\lambda I\right)$.

יהי u וקטור עצמי של A ששייך לערך עצמי A. ז"א u מקיים את משוואת הערך עצמי:

$$A\cdot u=\lambda u\qquad\Rightarrow\qquad(A-\lambda I)\cdot u=\bar{0}$$

כאשר $\bar{0}\in\mathbb{F}^n$ וקטור האפס. לכן $u\in\text{Nul}(A-\lambda I)$ לכל וקטור $u\in V_\lambda$. לכן

$$V_\lambda\subseteq\text{Nul}\left(A-\lambda I\right)\ .$$

נוכיח כי $\text{Nul}\left(A-\lambda I\right)\subseteq V_\lambda$.

יהי $u\in\text{Nul}\left(A-\lambda I\right)$. ז"א

$$\left(A-\lambda I\right)u=\bar{0}\qquad\Rightarrow\qquad A\cdot u=\lambda u\ .$$

ז"א u וקטור עצמי של u ששייך לערך עצמי λ. לכן $u\in V_\lambda$ לכל $u\in\text{Nul}\left(A-\lambda I\right)$. לכן

$$\text{Nul}(A-\lambda I)\subseteq V_\lambda\ .$$

■

הגדרה 2.2 ריבוי אלגברי וריבוי גיאומטרי של ערך עצמי של מטריצה

תהי $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$, ויהי u_i ערך עצמי λ_i.

הריבוי אלגברי של λ_i הוא הריבוי של λ_i בפולינום האופייני של A. כלומר אם

$$|\lambda I-A|=(\lambda-\lambda_1)^{m_1}\cdot(\lambda-\lambda_2)^{m_2}\quad\cdots\quad(\lambda-\lambda_i)^{m_i}\quad\cdots\quad(\lambda-\lambda_l)^{m_l}\ ,$$

אז הריבוי אלגברי של λ_i הוא m_i.

הריבוי גיאומטרי של λ_i הוא המימד של המרחב עצמי שלו. כלומר אם

$$V_{\lambda_i}=\{u_1,\ldots,u_k\}$$

אז ל- λ_i יש k וקטורים עצמיים ואומרים כי הריבוי גיאומטרי של λ_i הוא k.

דוגמה 2.4

מצאו את כל הערכים עצמיים והוקטורים עצמיים של המטריצה

$$A=\begin{pmatrix}1&2\\3&2\end{pmatrix}\ .$$

פתרון:
נרשום את הפולינום האופייני של המטריצה:

$$|\lambda I - A| = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{vmatrix} \lambda-1 & -2 \\ -3 & \lambda-2 \end{vmatrix} = 0 \quad \Rightarrow \quad (\lambda-1)(\lambda-2)-6=0 \quad \Rightarrow \quad \lambda^2-3\lambda-4=0$$

או שקול

$$(\lambda-4)(\lambda+1)=0$$

ולכן לפולינום אופייני יש שני פתרונות:
$\lambda = 4$
$\lambda = -1$.
נמצא את הוקטורים עצמיים של כל אחד של הערכים עצמיים ע"י למצוא את $\text{Nul}\,(A-\lambda I)$.

$\underline{\lambda = 4}$

$$(A-\lambda I \mid \bar{0}) \overset{\lambda=4}{=} (A-4I \mid \bar{0}) = \left(\begin{array}{cc|c} -3 & 2 & 0 \\ 3 & -2 & 0 \end{array}\right) \to \left(\begin{array}{cc|c} -3 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array}\right)$$

פתרון: $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = y\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$. נסמן

$$V_4 = \text{span}\left\{\begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}\right\} \ .$$

V_4 הוא ה **מרחב עצמי** השייך לערך עצמי $\lambda = 4$. נסמן

$$u_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \ .$$

u_1 הוא הוקטור עצמי ששייך לערך עצמי $\lambda = 4$.
$\dim(V_4) = 1$ לכן הריכוי גיאומטרי של $\lambda = 4$, הוא 1.

$\underline{\lambda = -1}$

$$(A-\lambda I \mid \bar{0}) \overset{\lambda=-1}{=} (A+I \mid \bar{0}) = \left(\begin{array}{cc|c} 2 & 2 & 0 \\ 3 & 3 & 0 \end{array}\right) \to \left(\begin{array}{cc|c} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array}\right)$$

הפתרון הוא: $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = y\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$ נסמן

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

V_{-1} הוא המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda = -1$. נסמן

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

u_2 הוא הוקטור עצמי ששייך לערך עצמי $\lambda = -1$.
$\dim(V_{-1}) = 1$ לכן הריכוי גיאומטרי של $\lambda = -1$, הוא 1.

דוגמה 2.5

מצאו את כל הערכים עצמיים והוקטורים עצמיים של המטריצה

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

פתרון:

נרשום את הפולינום האופייני של המטריצה:

$$|\lambda I-A|=0 \quad\Rightarrow\quad \begin{vmatrix} \lambda-2&0&0&-1\\ 0&\lambda-2&1&1\\ 1&1&\lambda-2&0\\ 0&0&0&\lambda-1 \end{vmatrix}=0 \quad\Rightarrow\quad (\lambda-1)(\lambda-2)\left((\lambda-2)^2-1\right)=0 .$$

$$\begin{aligned} (\lambda-1)(\lambda-2)\left(\lambda^2-4\lambda+4-1\right) &=0\\ (\lambda-1)(\lambda-2)\left(\lambda^2-4\lambda+3\right) &=0\\ (\lambda-1)(\lambda-2)(\lambda-3)(\lambda-1) &=0\\ (\lambda-1)^2(\lambda-2)(\lambda-3) &=0 \end{aligned}$$

קיימים 3 ערכים עצמיים:

$\lambda=1$ מריבוי אלגברי 2.

$\lambda=2$ מריבוי אלגברי 1.

$\lambda=3$ מריבוי אלגברי 1.

$\underline{\lambda=1}$

$$(A-\lambda I\mid\bar{0}) \stackrel{\lambda=1}{=} (A-I\mid\bar{0})=\left(\begin{array}{cccc|c} 1&0&0&1&0\\ 0&1&-1&-1&0\\ -1&-1&1&0&0\\ 0&0&0&0&0 \end{array}\right)$$

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1&0&0&1&0\\ 0&1&-1&-1&0\\ -1&-1&1&0&0\\ 0&0&0&0&0 \end{array}\right) \to \left(\begin{array}{cccc|c} 1&0&0&1&0\\ 0&1&-1&-1&0\\ 0&-1&1&1&0\\ 0&0&0&0&0 \end{array}\right) \to \left(\begin{array}{cccc|c} 1&0&0&1&0\\ 0&1&-1&-1&0\\ 0&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&0 \end{array}\right)$$

הפתרון הוא $z,w\in\mathbb{R}$, $\begin{pmatrix}x\\y\\z\\w\end{pmatrix}=z\begin{pmatrix}0\\1\\1\\0\end{pmatrix}+w\begin{pmatrix}-1\\1\\0\\1\end{pmatrix}$. המרחב עצמי ששייך לערך עצמי $\lambda=1$ הוא

$$V_1=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}0\\1\\1\\0\end{pmatrix},\begin{pmatrix}-1\\1\\0\\1\end{pmatrix}\right\}$$

בבסיס של V_1 ישנם שני וקטורים. נסמן

$$u_1=\begin{pmatrix}0\\1\\1\\0\end{pmatrix}\ ,\qquad u_2=\begin{pmatrix}-1\\1\\0\\1\end{pmatrix}\ .$$

u_1 ו- u_2 הם הוקטורים עצמיים ששייכים לערך עצמי $\lambda=1$.

כיוון ש $\dim(V_1)=2$, אומרים כי **הריבוי גאומטרי** של הערך עצמי $\lambda=1$, הוא 2.

$\underline{\lambda=2}$

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

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

פתרון: $\begin{pmatrix}x\\y\\z\\w\end{pmatrix}=y\begin{pmatrix}1\\-1\\0\\0\end{pmatrix}\ ,\ y\in\mathbb{R}.$ המרחב עצמי ששייך לערך עצמי $\lambda=2$ הוא

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

בביס של V_2 יש וקטור אחד. נסמן

$$u_3=\begin{pmatrix}1\\-1\\0\\0\end{pmatrix}\ .$$

u_3 הוא הוקטור עצמי ששייך לערך עצמי $\lambda=2$. כיוון ש $\dim(V_2)=1$, אז אומרים כי הריבוי גאומטרי של הערך עצמי $\lambda=2$, הוא 1.

$\underline{\lambda=3}$

$$(A-3I \mid \bar{0}) = \left(\begin{array}{cccc|c} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \end{array}\right) \xrightarrow[R_2\to -R_2]{R_1\to -R_1} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \end{array}\right)$$

$$\xrightarrow[R_4\to -\frac{1}{2}R_4]{R_3\to R_3+R_1} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}\right)$$

$$\xrightarrow{R_3\to R_3+R_2} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}\right)$$

$$\xrightarrow{R_4\to R_4-2R_3} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right)$$

פתרון: $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix} = z\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} , \ z\in\mathbb{R}.$ המרחב עצמי ששייך לערך עצמי $\lambda=3$ הוא

$$V_3 = \text{span}\left\{\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}\right\}$$

בבסיס של V_3 יש וקטור אחד:

$$u_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} .$$

u_4 הוא הוקטור עצמי ששייך לערך עצמי $\lambda=3$. כיוון ש- $\dim(V_3)=1$ אז אומרים כי הריבוי גאומטרי של הערך עצמי $\lambda=3$, הוא 1.

2.2 לכסון של מטריצה

הגדרה 2.3 לכסינות של מרטיצות

תהי $A \in \mathbb{F}^{n\times n}$. A תקרא לכסינה אם היא דומה למטריצה אלכסונית. כלומר אם קיימת מטריצה הפיכה $P \in \mathbb{F}^{n\times n}$ ומטריצה אלכסונית $D \in \mathbb{F}^{n\times n}$ כך ש-

$$D = P^{-1}AP \ .$$

משפט 2.6 לכסינות של מרטיצות

תהי $A \in \mathbb{F}^{n\times n}$. אם הוקטורים עצמיים של A מהווה בסיס של $\mathbb{F}^n$ אז A לכסינה.

נסמן הוקטורים עצמיים ב- $\{u_1,\ldots,u_n\}$ ששייכים לערכים עצמיים $\lambda_1,\ldots,\lambda_n$ בהתאמה (הערכים עצמיים לא בהכרח שונים זה מזה). מכאן נובע ש-

$$D = P^{-1}AP \qquad \Leftrightarrow \qquad A = PDP^{-1}$$

כאשר $D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \lambda_n \end{pmatrix}$ מטריצה אלכסונית ו $P = \begin{pmatrix} | & | & & | \\ u_1 & u_2 & \ldots & u_n \\ | & | & & | \end{pmatrix}$ מטריצה הפיכה.

הוכחה: $A\cdot u_i = \lambda_i u_i$ לכל $1 \leq i \leq n$. לכן

$$\begin{aligned} A\cdot P &= \begin{pmatrix} | & | & & | \\ A\cdot u_1 & A\cdot u_2 & \ldots & A\cdot u_n \\ | & | & & | \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} | & | & & | \\ \lambda_1 u_1 & \lambda_2 u_2 & \ldots & \lambda_n u_n \\ | & | & & | \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} | & | & & | \\ u_1 & u_2 & \ldots & u_n \\ | & | & & | \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \lambda_n \end{pmatrix} \\ &= PD \ . \end{aligned}$$

כלומר $AP = PD$. נתון כי הוקטורים עצמיים מהווים בסיס, אז $\{u_1,\ldots,u_n\}$ ולכן P הפיכה. לכן P^{-1} קיימת ומותר להכפיל מצד שמאל ב- P^{-1}. נקבל

$$A = P^{-1}PD \ .$$

■

משפט 2.7 קריטירון 1 ללכסינות של מטריצה

תהי $A \in \mathbb{F}^{n\times n}$. אם ל- A יש n ערכים עצמיים **שונים** ב- $\mathbb{F}$, אז A לכסינה.

הוכחה: תרגיל בית. ■

משפט 2.8 קריטירון 2 ללכסינות של מטריצה: סכום המימדים של מרחבים העצמיים

תהי $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$. A לכסינה אם"ם סכום המימדים של המרחבים העצמיים השונים שווה ל- n.

הוכחה: תרגיל בית. ■

משפט 2.9 קריטירון 3 ללכסינות של מטריצה

תהי $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$. אם

1. הפולינום האופייני שלה מתפרק למכפלה של גורמים ליניאריים מעל $\mathbb{F}$, לא בהכרח שונים, ו-
2. הריבוי האלגברי של כל ערך עצמי שווה לריבוי הגיאומטרי שלו,

אז A לכסינה מעל $\mathbb{F}$.

הוכחה: תרגיל בית. ■

2.3 ערכים עצמיים של טרנספורמציות ליניאריות

הגדרה 2.4 אופרטור ליניארי

יהי V מרחב וקטורי. טרנספורציה ליניארי $T:V\to V$ נקראת אופרטור ליניארי.

הגדרה 2.5 אופרטור לכסין

אופרטור ליניארי $T:V\to V$ נקראת לכסין אם קיים בסיס של V כך ש- $[T]_B$ אלכסונית.

ז"א קיים בסיס $B=\{b_1,\ldots,b_n\}$ של V כך ש-

$$T(b_1)=\lambda_1 b_1\ ,\qquad T(b_2)=\lambda_2 b_2,\quad \ldots\quad ,T(b_n)=\lambda_n b_n\ .$$

אז

$$[T]_B=\begin{pmatrix}\lambda_1 & 0 & \ldots & 0\\ 0 & \lambda_2 & \ldots & 0\\ \vdots & \vdots & \ddots & 0\\ 0 & 0 & \ldots & \lambda_n\end{pmatrix}$$

(לא כל ה- λ בהכרח שונים זה מזה)

הגדרה 2.6 ערך עצמי ווקטור עצמי של אופרטור ליניארי

תהי $T:V\to V$ אופרטור ליניארי ו- λ סקלר. λ נקרא **ערך עצמי** של T אם קיים וקטור $0\neq u$ כך ש-

$$T(u)=\lambda u\ .$$

u נקרא
וקטור עצמי ששייך לערך עצמי λ.

משפט 2.10

אופרטור ליניארי $T : V \to V$ לכסינה אם"ם קיים בסיס של V המורכב מוקטורים עצמיים.

הוכחה: $\Rightarrow$

נניח ש T לכסינה. ז"א קיים בסיס $U = \{u_1, \ldots, u_n\}$ כך ש-

$$T(u_1) = \lambda_1 u_1 \ , \qquad T(u_2) = \lambda_2 u_2, \quad \ldots \quad , T(u_n) = \lambda_n u_n \ .$$

אז

$$[T]_U = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \lambda_n \end{pmatrix}$$

(לא כל ה- λ בהכרח שונים זה מזה).

$\Leftarrow$

נניח שקיים בסיס $U = \{u_1, \ldots, u_n\}$ שמורכב מוקטורים עצמיים. ז"א קיימים סקלרים $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$ כך ש-

$$T(u_1) = \lambda_1 u_1 \ , \quad \ldots \quad , T(u_n) = \lambda_n u_n \ .$$

לכן

$$[T]_U = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \lambda_n \end{pmatrix}$$

אלכסונית. ■

הגדרה 2.7 פולינום האופייני של אופרטור ליניארי

תהי $T : V \to V$ אופרטור ליניארי. נניח ש A המטריצה המייצגת של T לפי בסיס B. אז הפולינום

$$p_T(\lambda) = |\lambda I - A|$$

נקרא הפולינום האופייני של T.

הגדרה 2.8 ריבוי אלגברי וריבוי גיאומטרי של ערך עצמי של אופרטור ליניארי

נניח $T : V \to V$ אופרטור ליניארית ו- λ ערך עצמי.

1) הריבוי האלגברי של λ הוא הריבוי של λ בפולינום האופייני.

2) הריבוי הגאומרטי של λ הוא $\dim(V_\lambda)$, כלומר, מספר הוקטורים העצמיים הבת"ל השייכים ל- λ.

דוגמה 2.6

$$T\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x+2y\\3x+2y\end{pmatrix}$$

חפשו את הוקטורים עצמיים של T כך ש- $T(u)=\lambda u$.
האם T לכסינה?

פתרון:

$$T\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}=A\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x+2y\\3x+2y\end{pmatrix}$$

כאשר $A=\begin{pmatrix}1&2\\3&2\end{pmatrix}$ המטריצה המייצגת של האופרטור.

פולינום האופייני:

$$|\lambda I-A|=\begin{vmatrix}\lambda-1&-2\\-3&\lambda-2\end{vmatrix}=(\lambda-1)(\lambda-2)-6=\lambda^2-3\lambda-4=(\lambda-4)(\lambda+1)=0\ .$$

ערכים עצמיים:
$\lambda=-1$
$\lambda=4$.

$\underline{\lambda=4}$

$$(A-4I)=\begin{pmatrix}-3&2\\3&-2\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}-3&2\\0&0\end{pmatrix}$$

פתרון: $y,y\in\mathbb{R}$ $\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\frac{2}{3}\\1\end{pmatrix}$. לכן המרחב עצמי של $\lambda=4$ הוא $V_4=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}2\\3\end{pmatrix}\right\}$. נסמן הוקטור עצמי שלו ב- $u_1=\begin{pmatrix}2\\3\end{pmatrix}$.

$\underline{\lambda=-1}$

$$(A+I)=\begin{pmatrix}2&2\\3&3\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&1\\0&0\end{pmatrix}$$

פתרון: $y,y\in\mathbb{R}$ $\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-1\\1\end{pmatrix}$. לכן המרחב עצמי של $\lambda=-1$ הוא $V_{-1}=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}1\\-1\end{pmatrix}\right\}$. נסמן הוקטור עצמי שלו ב- $u_2=\begin{pmatrix}1\\-1\end{pmatrix}$.

u_1,u_2 בת"ל:

$$\begin{pmatrix}u_1&u_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}2&1\\3&-1\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}2&1\\0&-5\end{pmatrix}$$

לכן הם מהווים בסיס של $\mathbb{R}^2$. לכן T לכסינה.

$$T(u_1)=4\cdot u_1\ ,\qquad T(u_2)=-1\cdot u_2\ .$$

משפט 2.11

יהי V מרחב וקטורי מעל $\mathbb{F}$ ויהי $T:V\to V$ אופרטור לינארי לכסיו.
נניח ש- $[T]_B$ המטריצה המייצגת של T לפי בסיס B.
יהיו $u_1,\ldots,u_n$ הוקטורים עצמיים של T לפי בסיס B, ששייכים לערכים עצמיים $\lambda_1,\ldots,\lambda_n$ (הם לא בהכרח שונים זה מזה).
אז

$$[T]_B=PDP^{-1}$$

או באופן שקול

$$P^{-1}[T]_BP=D$$

כאשר $P=\begin{pmatrix} | & | & & | \\ u_1 & u_2 & \ldots & u_n \\ | & | & & | \end{pmatrix}$ ו- $D=\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \lambda_n \end{pmatrix}$.

הוכחה:

$$\begin{aligned}
[T]_BP =&[T]_B \begin{pmatrix} | & | & & | \\ u_1 & u_2 & \ldots & u_n \\ | & | & & | \end{pmatrix}\\
=&\begin{pmatrix} | & | & & | \\ [T]_Bu_1 & [T]_Bu_2 & \ldots & [T]_Bu_n \\ | & | & & | \end{pmatrix}\\
=&\begin{pmatrix} | & | & & | \\ \lambda_1u_1 & \lambda_2u_2 & \ldots & \lambda_nu_n \\ | & | & & | \end{pmatrix}\\
=&\begin{pmatrix} | & | & & | \\ u_1 & u_2 & \ldots & u_n \\ | & | & & | \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & \lambda_n \end{pmatrix}\\
=&PD\ ,
\end{aligned}$$

כלומר, $[T]_BP=PD$. הוקטורים עצמיים $u_1,\ldots,u_n$ בת"ל, אז P הפיכה לכן P^{-1} קיימת. לכן מותר להכפיל מצד ימין ב- P^{-1}. נקבל: ולכן

$$[T]_B=PDP^{-1}$$

ומכאן נובע כי

$$P^{-1}[T]_BP=D$$

■

משפט 2.12

תהי $T:V\to V$ העתקה לינארית ו λ_0 ערך עצמי. אם m הריבוי האלגברי ו- k הריבוי הגיאומטרי של λ_0, אז

$$k\le m\ .$$

במילים: הריבוי הגיאומטרי קטן או שווה לריבוי האלגברי.

הוכחה: נניח ש- λ_0 ערך עצמי מריבוי אלגברי m וריבוי גיאומטרי k.
ז"א קיימים k וקטורים בת"ל $u_1,\ldots,u_k$ ששייכים לערך עצמי λ_0.
נשלים אותו לבסיס של V:

$$B=\{u_1,\ldots,u_k,u_{k+1},\ldots,u_n\} \ .$$

נחשב את המטריצה המייצגת של T ביחס לבסיס B:

$$T(u_1)=\lambda_0 u_1 \ , \quad \ldots \quad , T(u_k)=\lambda_0 u_k$$

לכן

$$[T]_B=\left(\begin{array}{cccc|c} \lambda_0 & 0 & \cdots & 0 & \\ 0 & \lambda_0 & \cdots & 0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & * \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_0 & \\ \hline 0 & 0 & \cdots & 0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & A' \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \end{array}\right)$$

הפולינום הופייני של A הוא

$$p_A(\lambda)=|\lambda I-A|=\left|\left(\begin{array}{cccc|c} \lambda-\lambda_0 & 0 & \cdots & 0 & \\ 0 & \lambda-\lambda_0 & \cdots & 0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & * \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda-\lambda_0 & \\ \hline 0 & 0 & \cdots & 0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \lambda I-A' \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \end{array}\right)\right|$$

נחשב את הדטרמיננטה דרך העמודה הראשונה:

$$p_A(\lambda)=(\lambda-\lambda_0)\cdot\left|\left(\begin{array}{ccc|c} \lambda-\lambda_0 & \cdots & 0 & \\ \vdots & \ddots & \vdots & * \\ 0 & \cdots & \lambda-\lambda_0 & \\ \hline 0 & \cdots & 0 & \\ \vdots & \ddots & \vdots & \lambda I-A' \\ 0 & \cdots & 0 & \end{array}\right)\right|$$

עד שנקבל

$$p_A(\lambda)=(\lambda-\lambda_0)^k\,|\lambda I-A'|=(\lambda-\lambda_0)^k p_{A'}(\lambda)$$

לכן הריבוי האלגברי גדול או שווה ל- k. $\blacksquare$

דוגמה 2.7

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

א מצאו את הערכים העצמיים ומרחבים עצמיים של A.

ב האם A לכסינה? אם כן, רשמו מטריצה אלכסונית D ומטריצה הפיכה P כך ש

$$D = P^{-1}AP \ .$$

פתרון:

א

$$|\lambda I - A| = \begin{vmatrix} \lambda+1 & 0 & -1 \\ 0 & \lambda+1 & -3 \\ 1 & -3 & \lambda-1 \end{vmatrix} = (\lambda+1)\begin{vmatrix} \lambda+1 & -3 \\ -3 & \lambda-1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1+\lambda \\ 1 & -3 \end{vmatrix}$$
$$\begin{aligned} =&(\lambda+1)\left((\lambda+1)(\lambda-1)-9\right)-(0-(1+\lambda)) \\ =&(\lambda+1)(\lambda^2-1-9+1) \\ =&(\lambda+1)(\lambda^2-9) \\ =&(\lambda+1)(\lambda+3)(\lambda-3) \end{aligned}$$

ערכים עצמיים:

$\lambda = -1$ מריבוי אלגברי 1.

$\lambda = 3$ מריבוי אלגברי 1.

$\lambda = -3$ מריבוי אלגברי 1.

$\underline{\lambda = -1}$

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

פתרון: $y \in \mathbb{R} \quad y, \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$. המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda = -1$ הוא

$$V_{-1} = \text{span}\left\{ \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

הווקטור עצמי של $\lambda = -1$ הוא $u_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$.

$\dim(V_{-1}) = 1$ לכן הריבוי הגיאומטרי של הערך עצמי $\lambda = -1$, הוא 1.

$\underline{\lambda = 3}$

$$(A-3I)=\begin{pmatrix}-4&0&1\\0&-4&3\\-1&3&-2\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}-4&0&1\\0&-4&3\\0&-12&9\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}-4&0&1\\0&-4&3\\0&0&0\end{pmatrix}$$

פתרון: $\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\frac{z}{4}\\\frac{3}{4}z\\z\end{pmatrix}=z\begin{pmatrix}1\\3\\4\end{pmatrix}$. המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda=3$ הוא

$$V_3=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}1\\3\\4\end{pmatrix}\right\}$$

הוקטור עצמי של הערך עצמי $\lambda=3$ הוא

$$u_2=\begin{pmatrix}1\\3\\4\end{pmatrix}\ .$$

$\dim(V_3)=1$ לכן הריבוי גיאומטרי של הערך עצמי $\lambda=3$, הוא 1.

<u>$\lambda=-3$</u>

$$(A+3I)=\begin{pmatrix}2&0&1\\0&2&3\\-1&3&4\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}2&0&1\\0&2&3\\0&6&9\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}2&0&1\\0&2&3\\0&0&0\end{pmatrix}$$

פתרון: $\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-\frac{1}{2}z\\-\frac{3}{2}z\\z\end{pmatrix}=z\begin{pmatrix}-\frac{1}{2}\\-\frac{3}{2}\\1\end{pmatrix}$. המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda=-3$ הוא

$$V_{-3}=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}-1\\-3\\2\end{pmatrix}\right\}$$

הוקטור עצמי של הערך עצמי $\lambda=-3$ הוא

$$u_3=\begin{pmatrix}-1\\-3\\2\end{pmatrix}\ .$$

$\dim V_{-3}=1$ לכן הריבוי גיאומטרי של הערך עצמי $\lambda=-3$, הוא 1.

ב $\dim V_1+\dim V_3+\dim V_{-3}=3$ לכן קיים בסיס של $\mathbb{R}^3$:

$$u_1=\begin{pmatrix}3\\1\\0\end{pmatrix}\ ,\quad u_2=\begin{pmatrix}1\\3\\4\end{pmatrix}\ ,\quad u_3=\begin{pmatrix}-1\\-3\\2\end{pmatrix}\ .$$

ומטריצה A לכסינה:

$$D=\begin{pmatrix}-1&0&0\\0&3&0\\0&0&-3\end{pmatrix}\ ,\qquad P=\begin{pmatrix}3&1&-1\\1&3&-3\\0&4&2\end{pmatrix}\ .$$

דוגמה 2.8

$$A=\begin{pmatrix}5&2&-2\\2&5&-2\\-2&-2&5\end{pmatrix}$$

א מצאו את הערכים העצמיים ומרחבים עצמיים של A.

ב האם A לכסינה? אם כן, רשמו מטריצה אלכסונית D ומטריצה הפיכה P כך ש

$$D=P^{-1}AP\ .$$

פתרון:

א

$$\begin{aligned}|\lambda I-A|=&\begin{vmatrix}\lambda-5&-2&2\\-2&\lambda-5&2\\2&2&\lambda-5\end{vmatrix}\\
=&(\lambda-5)\begin{vmatrix}\lambda-5&2\\2&\lambda-5\end{vmatrix}+2\begin{vmatrix}-2&2\\2&\lambda-5\end{vmatrix}+2\begin{vmatrix}-2&\lambda-5\\2&2\end{vmatrix}\\
=&(\lambda-5)\left((\lambda-5)^2-4\right)+2\left(-2(\lambda-5)-4\right)+2\left(-4-2(\lambda-5)\right)\\
=&(\lambda-5)\left(\lambda^2-10\lambda+21\right)+2\left(-2\lambda+6\right)+2\left(-2\lambda+6\right)\\
=&(\lambda-5)(\lambda-7)(\lambda-3)-4(\lambda-3)-4(\lambda-3)\\
=&(\lambda-3)\left((\lambda-5)(\lambda-7)-8\right)\\
=&(\lambda-3)\left(\lambda^2-12\lambda+35-8\right)\\
=&(\lambda-3)\left(\lambda^2-12\lambda+27\right)\\
=&(\lambda-3)(\lambda-9)(\lambda-3)\end{aligned}$$

$\lambda=3$ ערך עצמי מריבוי אלגברי 2.

$\lambda=9$ ערך עצמי מריבוי אלגברי 1.

$\underline{\lambda=3}$

$$(A-3I)=\begin{pmatrix}2&2&-2\\2&2&-2\\-2&-2&2\end{pmatrix}\ \rightarrow\ \begin{pmatrix}1&1&-1\\0&0&0\\0&0&0\end{pmatrix}$$

פתרון: $\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-y+z\\y\\z\end{pmatrix}=y\begin{pmatrix}-1\\1\\0\end{pmatrix}+z\begin{pmatrix}1\\0\\1\end{pmatrix}$. המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda=3$ הוא

$$V_3=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}-1\\1\\0\end{pmatrix},\begin{pmatrix}1\\0\\1\end{pmatrix}\right\}$$

$\dim(V_3)=2$ אז הריבוי הגיאומטרי של הערך עצמי $\lambda=3$, הוא 2.

$\underline{\lambda=9}$

$$(A-9I)=\begin{pmatrix}-4&2&-2\\2&4&-2\\-2&-2&-4\end{pmatrix}\rightarrow\begin{pmatrix}-2&1&-1\\0&-3&-3\\0&3&3\end{pmatrix}\rightarrow\begin{pmatrix}-2&1&-1\\0&-3&-3\\0&0&0\end{pmatrix}$$

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

פתרון: $\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-z\\-z\\z\end{pmatrix}=z\begin{pmatrix}-1\\-1\\1\end{pmatrix}$. המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda=9$ הוא

$$V_9=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}-1\\-1\\1\end{pmatrix}\right\}$$

$\dim(V_9)=1$, אז הריבוי הגיאומטרי של הערך עצמי הוא 1.

ב $\dim\, V_3=2$, $\dim\, V_9=1$.

$$\dim V_3+\dim V_9=3\ .$$

לכן קיים בסיס של $\mathbb{R}^3$ המורכב מוקטורים עצמיים:

$$u_1=\begin{pmatrix}-1\\1\\0\end{pmatrix}\ ,\quad u_2=\begin{pmatrix}1\\0\\1\end{pmatrix}\ ,\quad u_3=\begin{pmatrix}-1\\-1\\1\end{pmatrix}\ .$$

ומטריצה A לכסינה:

$$D=\begin{pmatrix}3&0&0\\0&3&0\\0&0&9\end{pmatrix}\ ,\qquad P=\begin{pmatrix}-1&1&-1\\1&0&-1\\0&1&1\end{pmatrix}\ .$$

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

דוגמה 2.9

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 12 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

האם A לכסינה?

פתרון:

$$\begin{aligned} |\lambda I - A| = & \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 0 & -12 \\ -1 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - 1 \end{vmatrix} \\ = & (\lambda - 1)\lambda(\lambda - 1) = 0 \end{aligned}$$

$\lambda = 0$ ערך עצמי מריבוי אלגברי 1.

$\lambda = 1$ ערך עצמי מריבוי אלגברי 2.

$\underline{\lambda = 1}$

$$(A - I) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 12 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון: $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = y \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$. המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda = 1$ הוא

$$V_1 = \text{span}\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

$\dim(V_1) = 1$ אז הריבוי הגיאומטרי של הערך עצמי $\lambda = 1$ הוא 1.

$\underline{\lambda = 0}$

$$(A - 0 \cdot I) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 12 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון: $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = y \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$. המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda = 0$ הוא

$$V_0 = \text{span}\left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

$\dim(V_0) = 1$ אז הריבוי הגיאומטרי של הערך עצמי $\lambda = 0$ הוא 1.

$\dim\,V_1=1$,$\dim\,V_0=1$.

$$\dim V_1+\dim V_0=2<\dim(\mathbb{R}^3)\ .$$

לכן לא קיים בסיס של $\mathbb{R}^3$ המורכב מוקטורים עצמיים. לכן A לא לכסינה.

משפט 2.13 קריטירון 1 ללכסינות של אופרטור

יהי V מרחב עצמי מעל $\mathbb{F}$, ויהי $T:V\to V$ אופרטור ליניארי. נניח ש- $\dim(V)=n$. אם ל- T יש n ערכים עצמיים **שונים** ב- $\mathbb{F}$, אז T לכסינה.

הוכחה: תרגיל בית. ■

משפט 2.14 קריטירון 2 ללכסינות של אופרטור: סכום המימדים של מרחבים העצמיים

יהי V מרחב עצמי מעל $\mathbb{F}$, ויהי $T:V\to V$ אופרטור ליניארי. נניח ש- $\dim(V)=n$. T לכסין אם"ם סכום המימדים של המרחבים העצמיים השונים שווה ל- n.

הוכחה: תרגיל בית. ■

משפט 2.15 קריטירון 3 ללכסינות של אופרטור

יהי V מרחב עצמי מעל $\mathbb{F}$, ויהי $T:V\to V$ אופרטור ליניארי. אם

1. הפולינום האופייני של T מתפרק למכפלה של גורמים ליניאריים מעל $\mathbb{F}$, לא בהכרח שונים, ו-
2. הריבוי האלגברי של כל ערך עצמי שווה לריבוי הגיאומטרי שלו,

אז T לכסין מעל $\mathbb{F}$.

הוכחה: תרגיל בית. ■

דוגמה 2.10

$$A=\begin{pmatrix}0&1\\-1&0\end{pmatrix}$$

1. האם A לכסינה מעל $\mathbb{R}$?
2. האם A לכסינה מעל $\mathbb{C}$?

פתרון:

$$p_A(\lambda)=\begin{vmatrix}\lambda&-1\\1&\lambda\end{vmatrix}=\lambda^2+1$$

1. $p_A(\lambda)$ לא מתפרק לגורמים ליניאריים מעל $\mathbb{R}$, לכן A לא לכסינה מעל $\mathbb{R}$.
2.

$$\lambda^2+1=(\lambda-i)(\lambda+i)=0$$

$\lambda = i$ ערך עצמי מריבוי אלגברי 1.

$\lambda = -i$ ערך עצמי מריבוי אלגברי 1.

$\underline{\lambda = i}$

$$(A - iI) = \begin{pmatrix} -i & 1 \\ -1 & -i \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} -i & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון: $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -iy \\ y \end{pmatrix} = y \begin{pmatrix} -i \\ 1 \end{pmatrix}$. המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda = i$ הוא

$$V_i = \text{span}\left\{ \begin{pmatrix} -i \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

$\dim(V_i) = 1$ אז הריבוי הגיאומטרי של הערך עצמי הוא 1.

$\underline{\lambda = -i}$

$$(A + iI) = \begin{pmatrix} i & 1 \\ -1 & i \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} i & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

פתרון: $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} iy \\ y \end{pmatrix} = y \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}$. המרחב עצמי השייך להערך עצמי $\lambda = -i$ הוא

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

$\dim(V_{-i}) = 1$ אז הריבוי הגיאומטרי של הערך עצמי הוא 1.

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ i & -i \end{pmatrix} , \qquad D = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} , \qquad D = P^{-1}AP \ .$$

משפט 2.16 וקטורים עצמיים ששייכים לערכים עצמיים שונים בת"ל

נתון $T : V \to V$ אופרטור ליניארי. וקטורים עצמיים של T ששייכים לערכים עצמיים שונים הם בת"ל.

הוכחה: <u>נתון:</u>

$T : V \to V$ אופרטור ליניארי,

$\lambda_1, \ \ldots \ , \lambda_n$ ערכים עצמיים שונים ששייכים לוקטורים עצמיים $u_1, \ \ldots \ , u_n$ של T.

<u>צריך להוכיח:</u>

$u_1, \quad \dots \quad, u_n$ בת"ל.

<u>הוכחה:</u>

נוכיח את הטענה ע"י אינדוקציה על n.

<u>שלב הבסיס:</u>

עבור $n=1$: $u_1 \neq \bar{0}$, לכן הוא בת"ל.

<u>שלב האינדוקציה:</u>

נניח שעבור $n>1$, n וקטורים עצמיים ששייכים ל n ערכים עצמיים שונים בת"ל. נניח $u_1,\dots,u_{n+1}$ וקטורים עצמיים השייכים לערכים עצמיים $\lambda_1,\dots,\lambda_{n+1}$. נרשום

(*)
$$\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \ldots + \alpha_n u_n + \alpha_{n+1} u_{n+1} = \bar{0}$$

אז

$$\alpha_1 T(u_1) + \alpha_2 T(u_2) + \ldots + \alpha_n T(u_n) + \alpha_{n+1} T(u_{n+1}) = \bar{0}$$

(*1)
$$\alpha_1 \lambda_1 u_1 + \alpha_2 \lambda_2 u_2 + \ldots + \alpha_n \lambda_n u_n + \alpha_{n+1} \lambda_{n+1} u_{n+1} = \bar{0}$$

נכפיל (*) ב λ_{n+1}:

(*2)
$$\alpha_1 \lambda_{n+1} u_1 + \alpha_2 \lambda_{n+1} u_2 + \ldots + \alpha_n \lambda_{n+1} u_n + \alpha_{n+1} \lambda_{n+1} u_{n+1} = \bar{0}$$

נחסיר (*2) מ (*1):

$$\alpha_1(\lambda_1-\lambda_{n+1})u_1 + \alpha_2(\lambda_2-\lambda_{n+1})u_2 + \ldots + \alpha_n(\lambda_n-\lambda_{n+1})u_n + \alpha_{n+1}\overset{0}{\cancel{(\lambda_{n+1}-\lambda_{n+1})}}u_n = \bar{0}$$

(*3)
$$\alpha_1(\lambda_1-\lambda_{n+1})u_1 + \alpha_2(\lambda_2-\lambda_{n+1})u_2 + \ldots + \alpha_n(\lambda_n-\lambda_{n+1})u_n = \bar{0}$$

לפי ההנחת האינדוקציה הוקטורים $u_1,\dots,u_n$ בת"ל. לכן

(*4)
$$\alpha_1(\lambda_1-\lambda_{n+1}) = 0 \ , \quad \dots \quad , \alpha_n(\lambda_n-\lambda_{n+1}) = 0 \ .$$

כל הערכים העצמיים שונים זה מזה, כלומר $\lambda_i - \lambda_{n+1} \neq 0$ לכל $i=1,\dots,n$. לכן

(*5)
$$\alpha_1 = 0 \ , \quad \dots \quad , \alpha_n = 0 \ .$$

נציב (*5) ב- (*) ונקבל

$$\alpha_1 u_1 = \bar{0}$$

$u_1 \neq 0$ כי הוא וקטור עצמי לכן $\alpha_1 = 0$. לכן (*) מצקיים רק אם כל המקודמים $\alpha_1, \quad \dots \quad, \alpha_{n+1} = 0$ לכן הוקטורים עצמיים $u_1, \quad \dots \quad, u_{n+1}$ בת"ל.

■

2.4 שימושים של לכסון מטריצה

משפט 2.17 חזקה של מטריצה הדומה למטריצה אלכסונית

אם A לכסינה, אז קיימת מטריצה אלכסונית D ומטריצה הפיכה P כך ש $D=P^{-1}AP$. לכן

$$A^n=PD^nP^{-1} \ .$$

הוכחה:

נוכיח את הטענה ע"י אינדוקציה.

<u>שלב הבסיס:</u>

עבור $n=1$, $D=P^{-1}AP \Leftarrow A=PDP^{-1}$.

<u>שלב האינדוקציה:</u>

נניש שעבור n מתקיים $A^n=PD^nP^{-1}$. אז

$$A^{n+1}=(PD^nP^{-1})\cdot PDP^{-1}=PD^{n+1}P^{-1}$$

■

דוגמה 2.11

נתונה המטריצה

$$A=\begin{pmatrix}0&1&1\\1&0&-1\\0&0&1\end{pmatrix}$$

1 מצאו את הערכים עצמיים והמרחבים עצמיים של A.

2 האם A לכסינה? אם כן רשמו מטריצה אלכסונית D ומטריצה הפיכה P כך ש $D=P^{-1}AP$.

3 חשבו את A^{1001}.

פתרון:

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

$\lambda=1$ מריבוי אלגברי 2.
$\lambda=-1$ מריבוי אלגברי 1.
<u>$\lambda=1$</u>

$$(A-I)=\begin{pmatrix}-1&1&1\\1&-1&-1\\0&0&0\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}-1&1&1\\0&0&0\\0&0&0\end{pmatrix}$$

פתרון:

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

מרחב עצמי:

$$V_1=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}1\\1\\0\end{pmatrix},\begin{pmatrix}1\\0\\1\end{pmatrix}\right\}$$

$\underline{\lambda=-1}$

$$(A+I)=\begin{pmatrix}1&1&1\\1&1&-1\\0&0&2\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&1&1\\0&0&-2\\0&0&2\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&1&1\\0&0&1\\0&0&0\end{pmatrix}$$

פתרון:

$$\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-y\\y\\0\end{pmatrix}=y\begin{pmatrix}-1\\1\\0\end{pmatrix}$$

מרחב עצמי:

$$V_{-1}=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}-1\\1\\0\end{pmatrix}\right\}$$

$$\text{dim}V_1+\text{dim}V_{-1}=2+1=3=\text{dim }\mathbb{R}^3$$

לכן A לכסינה.

$$D=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&-1\end{pmatrix}\ ,\qquad P=\begin{pmatrix}1&1&-1\\1&0&1\\0&1&0\end{pmatrix}$$

$$A^{1001}=PD^{1001}P^{-1}$$

נמצא את P^{-1}:

$$\left(\begin{array}{ccc|ccc}1&1&-1&1&0&0\\1&0&1&0&1&0\\0&1&0&0&0&1\end{array}\right)\to\left(\begin{array}{ccc|ccc}1&0&0&\frac{1}{2}&\frac{1}{2}&-\frac{1}{2}\\1&0&1&0&0&1\\0&1&0&-\frac{1}{2}&\frac{1}{2}&\frac{1}{2}\end{array}\right)$$

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

לכן $D^{1001}=\begin{pmatrix}1^{1001}&0&0\\0&1^{1001}&0\\0&0&(-1)^{1001}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&-1\end{pmatrix}$.

$$A^{1001}=\begin{pmatrix}1&1&-1\\1&0&1\\0&1&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&-1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\frac{1}{2}&\frac{1}{2}&-\frac{1}{2}\\0&0&1\\-\frac{1}{2}&\frac{1}{2}&\frac{1}{2}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&1&1\\1&0&-1\\0&0&1\end{pmatrix}$$

משפט 2.18

אם u וקטור עצמי של A השייך לערך עצמי λ, כלומר $A\cdot u=\lambda u$ אז

$$A^n u=\lambda^n u\ .$$

הוכחה: נוכיח את הטענה ע"י אינדוקציה.

<u>שלב הבסיס:</u>

עבור $n=1$, $A\cdot u=\lambda u$ מתקיים כי נתון ש- u וקטור עצמי של A.

<u>שלב האינדוקציה:</u>

נניח שעבור $n>1$, $A^n u=\lambda^n u$. אז

$$A^{n+1}u = A\left(A^n u\right) = A\lambda^n u = \lambda^n A u = \lambda^n\cdot\lambda u = \lambda^{n+1}u\ .$$

■

דוגמה 2.12

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

א מצאו את הערך עצמי ווקטור עצמי של A.

ב האם A לכסינה? אם כן רשמו מטריצה אלכסונית D ומטריצה הפיכה P כך ש $D=P^{-1}AP$.

ג חשבו את $A^{2023}\begin{pmatrix}2\\1\\0\end{pmatrix}$

פתרון:

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

$\lambda=1$ מריבוי אלגברי 1.

$\lambda=-2$ מריבוי אלגברי 2.

<u>$\lambda=-2$</u>

$$(A+2I)=\begin{pmatrix}2&-4&0\\1&-2&0\\1&-2&3\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&-2&0\\1&-2&3\\0&0&0\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&-2&0\\0&0&1\\0&0&0\end{pmatrix}$$

פתרון:

$$\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}2y\\y\\0\end{pmatrix}=y\begin{pmatrix}2\\1\\0\end{pmatrix}$$

מרחב עצמי:

$$V_{-2}=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}2\\1\\0\end{pmatrix}\right\}$$

<u>$\lambda=1$</u>

$$(A-I)=\begin{pmatrix}-1&-4&0\\1&-5&0\\1&-2&0\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}-1&-4&0\\0&-9&0\\0&-6&0\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&4&0\\0&1&0\\0&0&0\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&0\end{pmatrix}$$

פתרון:

$$\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\0\\z\end{pmatrix}=z\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix}$$

מרחב עצמי:

$$V_1=\text{span}\left\{\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix}\right\}$$

$$\text{dim}V_1+\text{dim}V_{-2}=1+1=2<\text{dim }\mathbb{R}^3$$

לכן A לא לכסינה.

$\begin{pmatrix}2\\1\\0\end{pmatrix}$ וקטור עצמי השייך ל $\lambda=-2$, לכן

$$A^{2023}\begin{pmatrix}2\\1\\0\end{pmatrix}=(-2)^{2023}\begin{pmatrix}2\\1\\0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}(-2)^{2024}\\-2^{2023}\\0\end{pmatrix}$$

2.5 משפטים נוספים הקשורים ללכסון של מטריצה

משפט 2.19 דטרמיננטה של מטריצה משולשית שווה למכפלה של איברי האלכסון הראשי

תהי $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$ מטריצה משולשית עליונה או משולשית תחתונה. הדטרמיננטה של A שווה למכפלה של האיברים על האלכסון הראשי. כלומר

$$\begin{pmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}&\ldots&a_{1n}\\0&a_{22}&a_{23}&\ldots&a_{2n}\\0&0&a_{33}&\ldots&a_{3n}\\\vdots&\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\0&0&0&\ldots&a_{nn}\end{pmatrix}\ ,\qquad |A|=a_{11}\cdot a_{22}\cdot a_{33}\ldots a_{nn}\ .$$

הוכחה: אידוקציה על n.

שלב הבסיס:

עבור $n=1$ הטענה נכונה באופן טריוויאלי.
כלומר נתון $A\in\mathbb{F}^{1\times1}$. נסמן $A=(a)$ כאשר a האיבר היחיד במטריצה A.

$$|A|=a\ .$$

A מטריצה משולשית, והאיבר היחיד על האלכסון הראשי הוא a. לכן המכפלה של האיברים על האלכסון ראשי פשוט שווה ל- a. לכן $|A|$ שווה למכפלה של האיברים על האלכסון הראשי של A.

שלב האינקודציה:

נניח שהטענה נכונה עבור $n=N$ (הנחת האינדוקציה). נוכיח אותה עבור $n=N+1$.

תהי $A\in\mathbb{F}^{N\times N}$ מטריצה משולשית עליונה:

$$A=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1,N} & a_{1,N+1}\\ 0 & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2,N} & a_{2,N+1}\\ 0 & 0 & a_{33} & \dots & a_{3,N} & a_{3,N+1}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{N,N} & a_{N,N+1}\\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{N+1,N+1}\end{pmatrix}$$

נחשב הדטרמיננטה על השורה האחרונה:

$$|A|=a_{N+1,N+1}\cdot\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1,N}\\ 0 & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2,N}\\ 0 & 0 & a_{33} & \dots & a_{3,N}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{N,N}\end{vmatrix}$$

לפי ההנחת האינדוקציה הדטרמיננטה של מטריצה $N\times N$ משולשית עליחונה שווה למכפלה של האיברים על האלכסון הראשי, לכן

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1,N}\\ 0 & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2,N}\\ 0 & 0 & a_{33} & \dots & a_{3,N}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{N,N}\end{vmatrix}=a_{11}\cdot a_{22}\dots a_{N,N}\ .$$

לכן

$$|A|=a_{11}\cdot a_{22}\dots a_{N,N}\cdot a_{N+1,N+1}$$

■

משפט 2.20 ערכים העצמיים של מטריצה משולשית

הערכים העצמיים של מטריצה משולשית עליונה (או משולשית תחתונה) הם האיברים הנמצאים על האלכסון הראשי.

הוכחה: תהי $A\in\mathbb{F}^{n\times n}$ משולשית, ויהיו $\{\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_n\}$ האיברים על האלכסון הראשי. אז

$$\lambda I-A$$

גם מטריצה משולשית והאיברים על האלכסון הראשי הם $\{\lambda-\alpha_1,\lambda-\alpha_2,\dots,\lambda-\alpha_n\}$. הדטרמיננטה של מטריצה משולשית היא המכפלה של האיברים על האלכסון הראשי, לכן לכן

$$|\lambda I-A|=(\lambda-\alpha_1)\cdot(\lambda-\alpha_2)\dots(\lambda-\alpha_n)$$

לכן הפולינום האופייני הוא

$$p_A(\lambda) = (\lambda - \alpha_1) \cdot (\lambda - \alpha_2) \ldots (\lambda - \alpha_n) = 0 \ .$$

השורשים הם

$$\lambda = \alpha_1, \quad \lambda = \alpha_2, \quad \ldots \quad \lambda = \alpha_n \ .$$

ז"א הערכים עצמיים שווים לאיברים על האלכסון הראשי. ■

הגדרה 2.9 הגדרת דמיון בין מטריצות

תהיינה $A, B \in \mathbb{F}^{n\times n}$. נאמר ש- A ו- B דומות אם קיימת מטריצה הפיכה $P \in \mathbb{F}^{n\times n}$ כך ש-

$$B = P^{-1}AP \ .$$

משפט 2.21 פולינום האופייני של מטריצות דומות

אם A ו- B דומות אז יש להן אותו פולינום אופייני, ולכן אותם ערכים עצמיים.

הוכחה:

$$\begin{aligned}
f_B(x) &= |xI - B| \\
&= \left|xI - P^{-1}AP\right| \\
&= \left|P^{-1}xIP - P^{-1}AP\right| \\
&= \left|P^{-1}\left(xI - A\right)P\right| \\
&= \left|P^{-1}\right| |xI - A| \, |P| \\
&= |P|^{-1} |xI - A| \, |P| \\
&= |xI - A| \, |P|^{-1} |P| \\
&= |xI - A| \\
&= f_A(x)
\end{aligned}$$

■

משפט 2.22 קיום ווקטור עצמי של אופרטור ליניארית

יהי V מרחב וקטורי נוצר סופית מעל שדה $\mathbb{F}$ ותהי $T : V \to V$ העתקה ליניארית.
קיים לפחות וקטור עצמי אחד של T.

הוכחה: נניח ש- $\dim(V) = n$. יהי $u_1 \neq \bar{0} \in V$. הקבוצה

$$\left\{u_1, T\left(u_1\right), T^2\left(u_1\right), \ldots, T^n\left(u_1\right)\right\}$$

תלויה לינארית כי יש בה $n+1$ וקטורים. לכן הצירוף ליניארי הבא מתקיים רק אם אחד המקדמים $a_0, \ldots, a_n$ שונה מאפס:

$$a_0u_1 + a_1T\left(u_1\right) + a_2T^2\left(u_1\right) + \ldots + a_nT^n\left(u_1\right) = \bar{0} \ . \tag{*1}$$

נרשום את זה בצורה

$$\left(a_0 + a_1T + a_2T^2 + \ldots + a_nT^n\right) u_1 = \bar{0} \ .$$

בצד שמאל יש הצבת העתקה בפולינום מסדר n. לפי המשפט היסודי של האלגברה יש לפולינום הזה פירוק לגורמים לינאריים:

$$a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \ldots + a_n z^n = c(z - \lambda_1) \ldots (z - \lambda_n)$$

$c \neq 0 \in \mathbb{C}$, $\lambda_i \in \mathbb{C}$, $1 \leq i \leq n$. לכן ניתן לפרק את (1*) כ:

$$a_0 u_1 + a_1 T (u_1) + a_2 T^2 (u_1) + \ldots + a_n T^n (u_1) = c (T - \lambda_1 I) \ldots (T - \lambda_n I) u_1 = \bar{0} \ . \tag{*2}$$

$c \neq 0 \in \mathbb{C}$. אם קיים פתרון $u_1 \neq 0$ למשוואה הומוגונית ב- (2*) אז בהכרח הדטרמיננטה של המטריצה שמכפילה u_1 שווה לאפס. לפיכך

$$|c (T - \lambda_1 I) \ldots (T - \lambda_n I)| = c |T - \lambda_1 I| \ldots |T - \lambda_n I| = 0 \ . \tag{*3}$$

לכן קיים i ($1 \leq i \leq n$) עבורו $|T - \lambda_i I| = 0$ לכן ל- T יש לפחות ערך עצמי אחד.

■