

תרגילים 2: חוגים וצפנים בסיסיים

שאלה 1 בחוגים הבאים מצאו את איברים יש עבורם קיים איבר הופכי:

(א) \mathbb{Z}_{200}

(ב) \mathbb{Z}_{400}

(ג) \mathbb{Z}_{1000}

(ד) \mathbb{Z}_{263}

(ה) \mathbb{Z}_{2521}

שאלה 2 מצאו את ההופכית של

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 5 & 0 \\ 2 & 0 & 3 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_{26}^{3 \times 3}.$$

שאלה 3 מצאו את ההופכית של

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_{26}^{3 \times 3}.$$

שאלה 4 חשבו את האיבר ההופכי של 19 ב- \mathbb{Z}_{26} .

שאלה 5 הטקסט מוצפן הבא מוצפן על ידי צופן הזה (צופן קיסר).

VWDUZDUV

מצאו את המפתח של הצופן ומצאו את הטקסט גלוי (רמז: חיפוש ממצה).

שאלה 6 מצאו את מספר המפתחות של צופן האפיני מעל החוגים הבאים:

(א) \mathbb{Z}_{30}

(ב) \mathbb{Z}_{100}

(ג) \mathbb{Z}_{1225}

שאלה 7

שאלה 8 נתונה התמורה הבאה:

$$\pi = (4 \ 1 \ 6 \ 2 \ 7 \ 3 \ 8 \ 5)$$

(א) מצאו את התמורה ההופכית.

(ב) פענחו את הטקסט מוצפן הבא

TGEEMNELNNTDROEOAAHDOETCSHAEIRLM

שאלה 9 נתון המפתח

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

של הצופן היל. לכל טקסט מוצפן למטה מתון את הטקסט גלוי

(א) VAZMJR

(ב) NDIMZZEMV

שאלה 10

נתון הטקסט מוצפן

FPHOEMJSUPSZZYJ

אשר מוצפן על ידי צופן היל עם המפתח

$$k = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix}.$$

מצאו את הטקסט גלוי.

שאלה 11

נתון את הטקסט מוצפן

YGSOYNGSUUTOYZNKHKYZIURRKMKOTOYXGKR

אשר מוצפן על ידי צופן קיסר. מצאו את המפתח ואת הטקסט גלוי.

שאלה 12 נניח כי $K = (5, 21)$ הוא מפתח של צופן האפיני מעל החוג \mathbb{Z}_{29} .(א) מצאו את האיברים a', b' בכלל מפענח

$$d_K(y) = a'y + b'$$

כאשר $a', b' \in \mathbb{Z}_{29}$.(ב) הוכיחו כי $d_K(e_K(x)) = x$ לכל $x \in \mathbb{Z}_{29}$.

פתרונות

שאלה 1 לכל a בחוג \mathbb{Z}_m קיים איבר הופכי a^{-1} אם ורק אם $\gcd(a, m) = 1$. נניח כי הפירוק לראשוניים של a הוא $\prod_{i=1}^n p_i^{e_i}$. אז מספר האיברים עבורם $\gcd(a, m) = 1$ ניתן ע"י הנסוחה

$$\phi(m) = \prod_{i=1}^n (p_i^{e_i} - p_i^{e_i-1}) .$$

(א) \mathbb{Z}_{200}

$$200 = 2^3 5^2$$

לכן

$$\phi(200) = (2^3 - 2^2) (5^2 - 5^1) = 80 .$$

(ב) \mathbb{Z}_{400}

$$400 = 2^4 5^2$$

לכן

$$\phi(400) = (2^4 - 2^3) (5^2 - 5^1) = 160 .$$

(ג) \mathbb{Z}_{1000}

$$1000 = 2^3 5^3$$

לכן

$$\phi(1000) = (2^3 - 2^2) (5^3 - 5^2) = 400 .$$

(ד) \mathbb{Z}_{263} שימו לב 263 מספר ראשוני לכן הפירוק לראשוניים שלו הוא $263 = 263^1$ ו-

$$\phi(263) = 263^1 - 263^0 = 263 - 1 = 262 .$$

(בכללי, אם p מספר ראשוני אז $\phi(p) = p - 1$.)(ה) \mathbb{Z}_{2521} שימו לב 2521 מספר ראשוני לכן הפירוק לראשוניים שלו הוא $2521 = 2521^1$ ו-

$$\phi(2521) = 2521^1 - 2521^0 = 2521 - 1 = 2520 .$$

(בכללי, אם p מספר ראשוני אז $\phi(p) = p - 1$.)

שאלה 2

$$|A| = 1 \cdot \begin{vmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{vmatrix} + 0 \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 2 & 3 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 0 & 5 \\ 2 & 0 \end{vmatrix} = 1 \cdot 15 + 1 \cdot (-10) = 5 .$$

$\gcd(15, 26) = 1$ לכן המטריצה הפיכה ב- \mathbb{Z}_{26} .

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} & \overline{3} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{11} = (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{0} & \overline{3} \end{vmatrix} = 15 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} & \overline{3} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{12} = (-1)^{1+2} \begin{vmatrix} \overline{0} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{3} \end{vmatrix} = 0 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} & \overline{3} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{13} = (-1)^{1+3} \begin{vmatrix} \overline{0} & \overline{5} \\ \overline{2} & \overline{0} \end{vmatrix} = -10 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} & \overline{3} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{21} = (-1)^{2+1} \begin{vmatrix} \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{3} \end{vmatrix} = 0 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} & \overline{3} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{22} = (-1)^{2+2} \begin{vmatrix} \overline{1} & \overline{1} \\ \overline{2} & \overline{3} \end{vmatrix} = 1 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} & \overline{3} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{23} = (-1)^{2+3} \begin{vmatrix} \overline{1} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} \end{vmatrix} = 0 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} & \overline{3} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{31} = (-1)^{3+1} \begin{vmatrix} \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{5} & \overline{0} \end{vmatrix} = -5 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} & \overline{3} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{32} = (-1)^{3+2} \begin{vmatrix} \overline{1} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{0} \end{vmatrix} = 0 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{5} & \overline{0} \\ \overline{2} & \overline{0} & \overline{3} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{33} = (-1)^{3+3} \begin{vmatrix} \overline{1} & \overline{0} \\ \overline{0} & \overline{5} \end{vmatrix} = 5 .$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 & 0 & -10 \\ 0 & 1 & 0 \\ -5 & 0 & 5 \end{pmatrix}$$

$$\text{adj}(A) = C^t = \begin{pmatrix} 15 & 0 & -5 \\ 0 & 1 & 0 \\ -10 & 0 & 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15 & 0 & 21 \\ 0 & 1 & 0 \\ 16 & 0 & 5 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_{26}^{3 \times 3} .$$

$$A^{-1} = |A|^{-1} \text{adj}(A) .$$

$$|A|^{-1} = 5^{-1} = 21 \in \mathbb{Z}_{26}$$

לפיכך

$$A^{-1} = |A|^{-1} \text{adj}(A) = 21 \cdot \begin{pmatrix} 15 & 0 & 21 \\ 0 & 1 & 0 \\ 16 & 0 & 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 315 & 0 & 441 \\ 0 & 21 & 0 \\ 336 & 0 & 105 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_{26}^{3 \times 3} .$$

$$315 \% 26 = 315 - 26 \cdot \left\lfloor \frac{315}{26} \right\rfloor = -23 \equiv 3 \pmod{26} \Rightarrow 315 \equiv 3 \pmod{26} .$$

$$441 \% 26 = 441 - 26 \cdot \left\lfloor \frac{441}{26} \right\rfloor = 25 \Rightarrow 441 \equiv 25 \pmod{26} .$$

$$336 \% 26 = 336 - 26 \cdot \left\lfloor \frac{336}{26} \right\rfloor = 24 \Rightarrow 336 \equiv 24 \pmod{26} .$$

$$105 \% 26 = 105 - 26 \cdot \left\lfloor \frac{105}{26} \right\rfloor = 1 \Rightarrow 105 \equiv 1 \pmod{26} .$$

לפיכך

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 25 \\ 0 & 21 & 0 \\ 24 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_{26}^{3 \times 3} .$$

בדיקה:

$$A \cdot A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 5 & 0 \\ 2 & 0 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 0 & 25 \\ 0 & 21 & 0 \\ 24 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 27 & 0 & 26 \\ 0 & 105 & 0 \\ 78 & 0 & 53 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \pmod{26} .$$

שאלה 3 נחשב את הדטרמיננטה לפי השורה האחרונה:

$$|A| = 0 \cdot \begin{vmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} - 0 \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 3 & 5 \end{vmatrix} + 7 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 3 & 1 \end{vmatrix} = 7 \cdot 1 = 7 .$$

 $\gcd(7, 26) = 1$ לכן המטריצה הפיכה ב- \mathbb{Z}_{26} .

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{3} \\ \overline{3} & \overline{1} & \overline{5} \\ \overline{0} & \overline{0} & \overline{7} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{11} = (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} \overline{1} & \overline{5} \\ \overline{0} & \overline{7} \end{vmatrix} = 7 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{3} \\ \overline{3} & \overline{1} & \overline{5} \\ \overline{0} & \overline{0} & \overline{7} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{12} = (-1)^{1+2} \begin{vmatrix} \overline{3} & \overline{5} \\ \overline{0} & \overline{7} \end{vmatrix} = -21 .$$

$$\begin{pmatrix} \overline{1} & \overline{0} & \overline{3} \\ \overline{3} & \overline{1} & \overline{5} \\ \overline{0} & \overline{0} & \overline{7} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{13} = (-1)^{1+3} \begin{vmatrix} \overline{3} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{0} \end{vmatrix} = 0 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{21} = (-1)^{2+1} \begin{vmatrix} 0 & 3 \\ 0 & 7 \end{vmatrix} = 0 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{22} = (-1)^{2+2} \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 7 \end{vmatrix} = 7 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{23} = (-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = 0 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{31} = (-1)^{3+1} \begin{vmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = -3 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{32} = (-1)^{3+2} \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 3 & 5 \end{vmatrix} = 4 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{33} = (-1)^{3+3} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 3 & 1 \end{vmatrix} = 1 .$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 & -21 & 0 \\ 0 & 7 & 0 \\ -3 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{adj}(A) = C^t = \begin{pmatrix} 7 & 0 & -3 \\ -21 & 7 & 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 & 0 & 23 \\ 5 & 7 & 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_{26}^{3 \times 3} .$$

$$A^{-1} = |A|^{-1} \text{adj}(A) .$$

$$|A|^{-1} = 7^{-1} = 15 \in \mathbb{Z}_{26}$$

לפיכך

$$A^{-1} = |A|^{-1} \text{adj}(A) = 15 \cdot \begin{pmatrix} 7 & 0 & 23 \\ 5 & 7 & 4 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 105 & 0 & 345 \\ 75 & 105 & 60 \\ 0 & 0 & 15 \end{pmatrix} .$$

$$105 \% 26 = 105 - 26 \cdot \left\lfloor \frac{105}{26} \right\rfloor = 1 .$$

$$345 \% 26 = 345 - 26 \cdot \left\lfloor \frac{345}{26} \right\rfloor = 7 .$$

$$75 \% 26 = 75 - 26 \cdot \left\lfloor \frac{75}{26} \right\rfloor = 23 .$$

$$60 \% 26 = 60 - 26 \cdot \left\lfloor \frac{60}{26} \right\rfloor = 8 .$$

לפיכך

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 7 \\ 23 & 1 & 8 \\ 0 & 0 & 15 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_{26}^{3 \times 3} .$$

בדיקה:

$$A \cdot A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 7 \\ 23 & 1 & 8 \\ 0 & 0 & 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 52 \\ 26 & 1 & 104 \\ 0 & 0 & 105 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \pmod{26} .$$

שאלה 4 נשתמש באלגוריתם של אוקליד המוכלל כדי למצוא שלמים s, t, d עבורם $26s + 19t = d$.

השיטה של האלגוריתם איוקליד המוכלל

$$.a = 26, b = 19$$

$$\begin{aligned} r_0 &= a = 26, & r_1 &= b = 19, \\ s_0 &= 1, & s_1 &= 0, \\ t_0 &= 0, & t_1 &= 1. \end{aligned}$$

$q_1 = 1$	$t_2 = 0 - 1 \cdot 1 = -1$	$s_2 = 1 - 1 \cdot 0 = 1$	$r_2 = 26 - 1 \cdot 19 = 7$	שלב $k = 1$
$q_2 = 2$	$t_3 = 1 - 2 \cdot (-1) = 3$	$s_3 = 0 - 2 \cdot 1 = -2$	$r_3 = 19 - 2 \cdot 7 = 5$	שלב $k = 2$
$q_3 = 1$	$t_4 = -1 - 1 \cdot (3) = -4$	$s_4 = 1 - 1 \cdot (-2) = 3$	$r_4 = 7 - 1 \cdot 5 = 2$	שלב $k = 3$
$q_4 = 2$	$t_5 = 3 - 2 \cdot (-4) = 11$	$s_5 = -2 - 2 \cdot 3 = -8$	$r_5 = 5 - 2 \cdot 2 = 1$	שלב $k = 4$
$q_5 = 2$			$r_6 = 2 - 2 \cdot 1 = 0$	שלב $k = 5$

$$\gcd(a, b) = r_5 = 1, \quad s = s_5 = -8, \quad t = t_5 = 11 .$$

$$sa + tb = -8(26) + 11(19) = 1 .$$

$$19^{-1} \in \mathbb{Z}_{26} \text{ ולכן } d = \gcd(26, 19) = 1$$

$$-8(26) + 11(19) = 1 \Rightarrow 11(19) = 1 + 8(26) \Rightarrow 11(19) = 1 \pmod{26} \Rightarrow 19^{-1} = 11 \pmod{26} .$$



יש שיטה נוספת למציאת המקדמים s, t במשפט בזו. נתאר אותה על ידי הדוגמה הקודמת.

פתרון עם השיטה השנייה של האלגוריתם איוקליד המוכלל

לשיטה הזאת יש 2 שלבים. בשלב הראשון מבצעים האלגוריתם של אוקליד במשפט ??.

$$\begin{aligned}\boxed{26} &= 1 \cdot \boxed{19} + \boxed{7} \\ \boxed{19} &= 2 \cdot \boxed{7} + \boxed{5} \\ \boxed{7} &= 1 \cdot \boxed{5} + \boxed{2} \\ \boxed{5} &= 2 \cdot \boxed{2} + \boxed{1} \\ \boxed{2} &= 2 \cdot \boxed{1}\end{aligned}$$

$$d = \gcd(26, 19) = 1 \text{ לכן}$$

בשלב השני רושמים 1 כצירוף לינארי של 26 ו-19 באמצעות המשוואות למעלה:

$$\begin{aligned}\boxed{1} &= \boxed{5} - 2 \cdot \boxed{2} \\ &= \boxed{5} - 2 \cdot (\boxed{7} - 1 \cdot \boxed{5}) \\ &= 3 \cdot \boxed{5} - 2 \cdot \boxed{7} \\ &= 3 \cdot (\boxed{19} - 2 \cdot \boxed{7}) - 2 \cdot \boxed{7} \\ &= 3 \cdot \boxed{19} - 8 \cdot \boxed{7} \\ &= 3 \cdot \boxed{19} - 8 \cdot (\boxed{26} - 1 \cdot \boxed{19}) \\ &= 11 \cdot \boxed{19} - 8 \cdot \boxed{26}.\end{aligned}$$

$$sa + tb = -8(26) + 11(19) = 1.$$

$$19^{-1} \in \mathbb{Z}_{26} \text{ ולכן קיים } d = \gcd(26, 19) = 1.$$

$$-8(26) + 11(19) = 1 \Rightarrow 11(19) = 1 + 8(26) \Rightarrow 11(19) = 1 \pmod{26} \Rightarrow 19^{-1} = 11 \pmod{26}.$$



שאלה 5

$y \in C$	V	W	D	U	Z	D	U	V
$y \in C$	21	22	3	20	25	3	20	21
$x = y - 0 \in P$	21	22	3	20	25	3	20	21
$x \in P$	v	w	d	u	z	d	u	v
$x = y - 1 \in P$	20	21	2	19	24	2	19	20
$x \in P$	u	v	c	t	y	c	t	u
$x = y - 2 \in P$	19	20	1	18	23	1	18	19
$x \in P$	t	u	b	s	x	b	s	t
$x = y - 3 \in P$	18	19	0	17	22	0	17	18
$x \in P$	s	t	a	r	w	a	r	s

המפתח הוא 3 והטקסט גלוי הוא

starwars

שאלה 6 הצופן האפיני מעל \mathbb{Z}_m מכיל כלל מצפין

$$e_k(x) = ax + b \pmod{m}$$

וכלל המפענח

$$d_k(y) = a^{-1}(y - b) \pmod{m}.$$

הכלל מצפין $e_k(x)$ הפיך, כלומר קיים כלל מפענח $d_k(y) = a^{-1}(y - b) \pmod{m}$ אם קיים איבר הופכי $a^{-1} \in \mathbb{Z}_m$.
קיים איבר הופכי a^{-1} רק אם $\gcd(a, m) = 1$.

אם הפירוק למספרים ראשוניים של m הוא $m = \prod_{i=1}^n p_i^{e_i}$ אז מספר האברים ב- \mathbb{Z}_m עבורם $\gcd(a, m) = 1$ נתון על ידי הפונקציית אוילר

$$\phi(m) = \prod_{i=1}^n (p_i^{e_i} - p_i^{e_i-1}).$$

לכן, יש $\phi(m)$ אפשרויות ל- a ו- m אפשרויות ל- b . בסך הכל קיימים $\phi(m)$ מפתחות של צופן אפיני מעל \mathbb{Z}_m .

$$(א) \quad 30 = 2^1 \times 3^1 \times 5^1 \quad \text{לכן}$$

$$\phi(30) = (2^1 - 2^0)(3^1 - 3^0)(5^1 - 5^0) = (1)(2)(4) = 8.$$

לכן לצופן האפיני מעל \mathbb{Z}_{30} יש $30 \times 8 = 240$ מפתחות.

$$(ב) \quad 100 = 2^2 \times 5^2 \quad \text{לכן}$$

$$\phi(100) = (2^2 - 2^1)(5^2 - 5^1) = (2)(20) = 40.$$

לכן לצופן האפיני מעל \mathbb{Z}_{100} יש $100 \times 40 = 4000$ מפתחות.

$$(ג) \quad 1225 = 5 \times 245 = 5^2 \times 49 = 5^2 \times 7^2 \quad \text{לכן}$$

$$\phi(1225) = (5^2 - 5^1)(7^2 - 7^1) = (20)(42) = 840.$$

לכן לצופן האפיני מעל \mathbb{Z}_{1225} יש $1225 \times 840 = 1,029,000$ מפתחות.

שאלה 7**שאלה 8**

$y \in C$	T	G	E	E	M	N	E	L	N	N	T	D	R	O	E	O
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	19	6	4	4	12	13	4	11	13	13	19	3	17	14	4	14

$y \in C$	A	A	H	D	O	E	T	C	S	H	A	E	I	R	L	M
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	0	0	7	3	14	4	19	2	18	7	0	4	8	17	11	12

נפרק את האותיות לתת-קבוצות מאורך $m = 8$ (לפי האורך של התמורה).
נפעיל את התמורה ההופכית:

$y \in C$	T	G	E	E	M	N	E	L	N	N	T	D	R	O	E	O
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	19	6	4	4	12	13	4	11	13	13	19	3	17	14	4	14

$y \in C$	A	A	H	D	O	E	T	C	S	H	A	E	I	R	L	M
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	0	0	7	3	14	4	19	2	18	7	0	4	8	17	11	12

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$\pi^{-1}(i)$	2	4	6	1	8	3	5	7

$y \in C$	T	G	E	E	M	N	E	L	N	N	T	D	R	O	E	O
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	19	6	4	4	12	13	4	11	13	13	19	3	17	14	4	14
$x = \pi^{-1}(y)$	6	4	13	19	11	4	12	4	13	3	14	13	14	19	17	4

$y \in C$	A	A	H	D	O	E	T	C	S	H	A	E	I	R	L	M
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	0	0	7	3	14	4	19	2	18	7	0	4	8	17	11	12
$x = \pi^{-1}(y)$	0	3	4	0	2	7	14	19	7	4	17	18	12	0	8	11

$y \in C$	T	G	E	E	M	N	E	L	N	N	T	D	R	O	E	O
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	19	6	4	4	12	13	4	11	13	13	19	3	17	14	4	14
$x = \pi^{-1}(y)$	6	4	13	19	11	4	12	4	13	3	14	13	14	19	17	4
$x \in P$	g	e	n	t	l	e	m	e	n	d	o	n	o	t	r	e

$y \in C$	A	A	H	D	O	E	T	C	S	H	A	E	I	R	L	M
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	0	0	7	3	14	4	19	2	18	7	0	4	8	17	11	12
$x = \pi^{-1}(y)$	0	3	4	0	2	7	14	19	7	4	17	18	12	0	8	11
$x \in P$	a	d	e	a	c	h	o	t	h	e	r	s	m	a	i	l

gentlemandonotreadeachothersmail

שאלה 9

$$|k| = 1 \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} - 3 \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 3 & 1 \end{vmatrix} + 0 \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 3 & 0 \end{vmatrix} = 9.$$

$\gcd(9, 26) = 1$ לכן המטריצה הפיכה ב- \mathbb{Z}_{26} .

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{11} = (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \cancel{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{12} = (-1)^{1+2} \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 3 & 1 \end{vmatrix} = 3 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \cancel{3} & \cancel{0} \\ 0 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{13} = (-1)^{1+3} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 3 & 0 \end{vmatrix} = 0 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ \cancel{0} & \cancel{0} & 1 \\ 3 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{21} = (-1)^{2+1} \begin{vmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = -3 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & \cancel{0} & 1 \\ 3 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{22} = (-1)^{2+2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 3 & 1 \end{vmatrix} = 1 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & \cancel{1} \\ 3 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{23} = (-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 3 & 0 \end{vmatrix} = 9 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \cancel{3} & \cancel{0} & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{31} = (-1)^{3+1} \begin{vmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 3 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \cancel{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 3 & \cancel{0} & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{32} = (-1)^{3+2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = -1 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & \cancel{1} \end{pmatrix} \Rightarrow C_{33} = (-1)^{3+3} \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = 0 .$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 0 \\ -3 & 1 & 9 \\ 3 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{adj}(A) = C^t = \begin{pmatrix} 0 & -3 & 3 \\ 3 & 1 & -1 \\ 0 & 9 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26} = \begin{pmatrix} 0 & 23 & 3 \\ 3 & 1 & 25 \\ 0 & 9 & 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_{26}^{3 \times 3} .$$

$$A^{-1} = |A|^{-1} \text{adj}(A) .$$

$$|A|^{-1} = 9^{-1} = 3 \in \mathbb{Z}_{26}$$

לפיכך

$$\begin{aligned}
 A^{-1} &= |A|^{-1} \text{adj}(A) \\
 &= 3 \cdot \begin{pmatrix} 0 & 23 & 3 \\ 3 & 1 & 25 \\ 0 & 9 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 & 69 & 9 \\ 9 & 3 & 75 \\ 0 & 27 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 & 17 & 9 \\ 9 & 3 & 23 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

(א) שלב 1:נעביר את האותיות של הטקסט גלוי לערכים של \mathbb{Z}_{26} :

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|}
 y \in C & V & A & Z & M & J & R \\
 \hline
 y \in \mathbb{Z}_{26} & 21 & 0 & 25 & 12 & 9 & 17
 \end{array}$$

שלב 2:

נפרק את הטבלה של התווים של הטקסט מוצפן יחד עם הערכים המתאימים של \mathbb{Z}_{26} לתת-קבוצות של $m = 3$ תווים:

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|}
 y \in C & V & A & Z & M & J & R \\
 \hline
 y \in \mathbb{Z}_{26} & 21 & 0 & 25 & 12 & 9 & 17
 \end{array}$$

שלב 3:

עבור כל תת-קבוצה המתקבל נחשב

$$\begin{aligned}
 (x_1 \ x_2 \ x_3) &= (y_1 \ y_2 \ y_3) k^{-1} \pmod{26} \\
 &= (y_1 \ y_2 \ y_3) \begin{pmatrix} 0 & 17 & 9 \\ 9 & 3 & 23 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26}
 \end{aligned}$$

עבור התת-קבוצה הראשונה נקבל

$$\begin{aligned}
 (x_1 \ x_2 \ x_3) &= (21 \ 0 \ 25) \begin{pmatrix} 0 & 17 & 9 \\ 9 & 3 & 23 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26} \\
 &= (0 \ 382 \ 189) \pmod{26} \\
 &= (0 \ 18 \ 7)
 \end{aligned}$$

עבור התת-קבוצה השנייה נקבל

$$\begin{aligned}
 (x_1 \ x_2 \ x_3) &= (12 \ 9 \ 17) \begin{pmatrix} 0 & 17 & 9 \\ 9 & 3 & 23 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26} \\
 &= (81 \ 248 \ 315) \pmod{26} \\
 &= (3 \ 14 \ 3)
 \end{aligned}$$

$y \in C$	V	A	Z	M	J	R
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	21	0	25	12	9	17
$x \in \mathbb{Z}_{26}$	0	18	7	3	14	3

שלב 5:

נעבור את הערכים $y \in \mathbb{Z}_{26}$ לאותיות של הטקסט מוצפן:

$y \in C$	V	A	Z	M	J	R
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	21	0	25	12	9	17
$x \in \mathbb{Z}_{26}$	0	18	7	3	14	3
$x \in \mathbb{Z}_{26}$	a	s	h	d	o	d

הטקסט גלוי המתקבל הוא

ashdod

שלב 1:

(ב)

נעביר את האותיות של הטקסט גלוי לערכים של \mathbb{Z}_{26} :

$y \in C$	N	D	I	M	Z	Z	E	M	V
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	13	3	8	12	25	25	4	12	21

שלב 2:

נפרק את הטבלה של התווים של הטקסט מוצפן יחד עם הערכים המתאימים של \mathbb{Z}_{26} לתת-קבוצות של $m = 3$ תווים:

$y \in C$	N	D	I	M	Z	Z	E	M	V
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	13	3	8	12	25	25	4	12	21

שלב 3:

עבור כל תת-קבוצה המתקבל נחשב

$$\begin{aligned} (x_1 \ x_2 \ x_3) &= (y_1 \ y_2 \ y_3) k^{-1} \pmod{26} \\ &= (y_1 \ y_2 \ y_3) \begin{pmatrix} 0 & 17 & 9 \\ 9 & 3 & 23 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26} \end{aligned}$$

עבור התת-קבוצה הראשונה נקבל

$$\begin{aligned} (x_1 \ x_2 \ x_3) &= (13 \ 3 \ 8) \begin{pmatrix} 0 & 17 & 9 \\ 9 & 3 & 23 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26} \\ &= (27 \ 238 \ 186) \pmod{26} \\ &= (1 \ 4 \ 4) \end{aligned}$$

עבור התת-קבוצה השנייה נקבל

$$\begin{aligned}
 (x_1 \ x_2 \ x_3) &= (12 \ 25 \ 25) \begin{pmatrix} 0 & 17 & 9 \\ 9 & 3 & 23 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26} \\
 &= (225 \ 304 \ 683) \pmod{26} \\
 &= (17 \ 18 \ 7)
 \end{aligned}$$

עבור התת-קבוצה השלישית נקבל

$$\begin{aligned}
 (x_1 \ x_2 \ x_3) &= (4 \ 12 \ 21) \begin{pmatrix} 0 & 17 & 9 \\ 9 & 3 & 23 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \pmod{26} \\
 &= (108 \ 125 \ 312) \pmod{26} \\
 &= (4 \ 21 \ 0)
 \end{aligned}$$

$y \in C$	N	D	I	M	Z	Z	E	M	V
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	13	3	8	12	25	25	4	12	21
$x \in \mathbb{Z}_{26}$	1	4	4	17	18	7	4	21	0

שלב 5:

נעבור את הערכים $y \in \mathbb{Z}_{26}$ לאותיות של הטקסט מוצפן:

$y \in C$	N	D	I	M	Z	Z	E	M	V
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	13	3	8	12	25	25	4	12	21
$x \in \mathbb{Z}_{26}$	1	4	4	17	18	7	4	21	0
$x \in P$	b	e	e	r	s	h	e	v	a

הטקסט גלוי המתקבל הוא

beersheva

שאלה 10

$y \in C$	F	P	H	O	E	M	J	S	U	P	S	Z	Z	Y	J
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	5	15	7	14	4	12	9	18	20	15	18	25	25	24	9

דטרמיננטה של k היא $k = -3 \pmod{26} = 23$.
 $\gcd(23, 26) = 1$ לכן המטריצה הפיכה ב- \mathbb{Z}_{26} .

$$\begin{pmatrix} \overset{1}{\cancel{1}} & \overset{2}{\cancel{2}} & \overset{3}{\cancel{3}} \\ 4 & 5 & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{11} = (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} 5 & 6 \\ 9 & 8 \end{vmatrix} \pmod{26} = -14 \pmod{26} = 12.$$

$$\begin{pmatrix} \overset{1}{\cancel{1}} & \overset{2}{\cancel{2}} & \overset{3}{\cancel{3}} \\ 4 & \overset{5}{\cancel{5}} & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{12} = (-1)^{1+2} \begin{vmatrix} 4 & 6 \\ 11 & 8 \end{vmatrix} \pmod{26} = 24 \pmod{26} = 8.$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{13} = (-1)^{1+3} \begin{vmatrix} 4 & 5 \\ 11 & 9 \end{vmatrix} \pmod{26} = -19 \pmod{26} = 7 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{21} = (-1)^{2+1} \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 9 & 8 \end{vmatrix} = 11 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{22} = (-1)^{2+2} \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 11 & 8 \end{vmatrix} \pmod{26} = -25 \pmod{26} = 1 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{23} = (-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 11 & 9 \end{vmatrix} = 13 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{31} = (-1)^{3+1} \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 6 \end{vmatrix} \pmod{26} = -3 \pmod{26} = 23 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{32} = (-1)^{3+2} \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 4 & 6 \end{vmatrix} = 6 .$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 11 & 9 & 8 \end{pmatrix} \Rightarrow C_{33} = (-1)^{3+3} \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 5 \end{vmatrix} \pmod{26} = -3 \pmod{26} = 23 .$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -14 & 34 & -19 \\ 11 & -25 & 13 \\ -3 & 6 & -3 \end{pmatrix} \pmod{26} = \begin{pmatrix} 12 & 8 & 7 \\ 11 & 1 & 13 \\ 23 & 6 & 23 \end{pmatrix} .$$

$$\text{adj}(A) = C^t = \begin{pmatrix} 16 & 3 & 18 \\ 9 & 9 & 1 \\ 21 & 5 & 20 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_{26}^{3 \times 3} .$$

$$k^{-1} = |k|^{-1} \text{adj}(k) .$$

$$|k|^{-1} = 23^{-1} = 17 \in \mathbb{Z}_{26}$$

$$k^{-1} = 17 \begin{pmatrix} 16 & 3 & 18 \\ 9 & 9 & 1 \\ 21 & 5 & 20 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 204 & 187 & 391 \\ 136 & 17 & 102 \\ 119 & 221 & 391 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 22 & 5 & 1 \\ 6 & 17 & 24 \\ 15 & 13 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(5, 15, 7) \cdot k^{-1} = (19, 7, 8) , \quad (14, 4, 12) \cdot k^{-1} = (18, 8, 18) , \quad (9, 18, 20) \cdot k^{-1} = (8, 13, 19) ,$$

$$(15, 18, 25) \cdot k^{-1} = (7, 4, 4) , \quad (25, 24, 9) \cdot k^{-1} = (23, 0, 12) .$$

$y \in C$	F	P	H	O	E	M	J	S	U	P	S	Z	Z	Y	J
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	5	15	7	14	4	12	9	18	20	15	18	25	25	24	9
$x \in \mathbb{Z}_{26}$	19	7	8	18	8	18	8	13	19	7	4	4	23	0	12
$x \in P$	t	h	i	s	i	s	i	n	t	h	e	e	x	a	m

שאלה 11

$y \in C$	Y	G	S	O	Y	N	G	S	U	U	T	O	Y	Z	N	K	H	K	Y	Z
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	24	6	18	14	24	13	6	18	20	20	19	14	24	25	13	10	7	10	24	25
$d_6(y)$	18	0	12	8	18	7	0	12	14	14	13	8	18	19	7	4	1	4	18	19
$x \in P$	s	a	m	i	s	h	a	m	o	o	n	i	s	t	h	e	b	e	s	t

$y \in C$	I	U	R	R	K	M	K	O	T	O	Y	X	G	K	R
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	8	20	17	17	10	12	10	14	19	14	24	23	6	10	17
$d_6(y)$	2	14	11	11	4	6	4	8	13	8	18	17	0	4	11
$x \in P$	c	o	l	l	e	g	e	i	n	i	s	r	a	e	l

שאלה 12

(א) נתון המפתח $a = 5, b = 21$ בכלל מצפין $e_k(x) = ax + b$. אז הכלל מפענח הינו

$$d_k(y) = a^{-1}(y - b) = 5^{-1}(y - 21) .$$

ב- \mathbb{Z}_{29} , $5^{-1} = 6$ מכיוון ש- $5 \cdot 6 \mod 29 = 30 \mod 29 = 1$. לפיכך

$$d_k(y) = 6(y - 21) = 6y - 126 \mod 29 = 6y - 4 \cdot 29 - 10 \mod 29 = 6y - 10 \mod 29 = 6y + 19 .$$

$$.a' = 6, b' = 19 \text{ לפיכך}$$

(ב)

$$d_k(e_k(x)) = 6(5x + 21) + 19 \mod 29 = 30x + 126 + 19 \mod 29 = 1 \cdot x + 145 \mod 29 = x + 5 \cdot 29 \mod 29 = x .$$