

שיעור 4

קריפטו-אנליזה

4.1 סוגים של התקפת סייבר

נניח שאליס שולחת הודעה מוצפנת לבוב. ויש גורם עוין, אוסקר, שמנסה לצותת לשיחתם. אנחנו מניחים כי אוסקר מודע לקריפטו-מערכת (הצופן) שבאמצעותה אליס הצפינה את ההודעה. ההנחה הזאת נקראת עקרון קירשוף *Kercheoff's principle*.

המטרה בהרכבת צופן היא שהצופן מספיק בטוח כך שאוסקר לא יכול לפענח אפילו אם הוא יודע את הסוג של הצופן בשימוש.

ישנם 4 סוגים של התקפת סייבר.

(1) **התקפת טקסט מוצפן בלבד.**

למתקיף (אוסקר) יש מחרוזת של טקסט מוצפן y .

(2) **התקפת טקסט גלוי ידוע**

למתקיף יש מחרוזת של טקסט גלוי x יחד עם הטקסט מוצפן המתאים y .

(3) **התקפת טקסט גלוי נבחר**

למתקיף היכולת להשיג טקסטים גלויים x של טקסטים מוצפנים y כלשהם חפי בחירתו, שהוצפנו באמצעות הקריפטו-מערכת המותקפה.

(4) **התקפת טקסט מוצפן נבחר**

למתקיף היכולת להשיג טקסטים מוצפנים y של טקסטים גלויים x כלשהם חפי בחירתו, שהוצפנו באמצעות הקריפטו-מערכת המותקפה.

החלק הבא מתעסק עם התקפת טקסט מוצפן.

4.2 קבוצות אותיות הנפוצים ביותר בטקסט גלוי

התקפת טקסט מוצפן בלבד מבוסס על ההתדיקויות של אותיות בקטסט גלוי בשפה אנגלית.

כלל 4.1 פונקצית הסתברות של האותיות של האלפיבית

אות	הסתברות	אות	הסתברות
a	0.082	n	0.067
b	0.015	o	0.075
c	0.028	p	0.019
d	0.043	q	0.001
e	0.127	r	0.06
f	0.022	s	0.063
g	0.02	t	0.091
h	0.061	u	0.028
i	0.07	v	0.01
j	0.002	w	0.023
k	0.008	x	0.001
l	0.04	y	0.02
m	0.024	z	0.001

Becker ו- Piper סדרו את האותיות לחמש קבוצות שונות, לפי הסדר גודל של התדירות של האותיות בטקסט גלוי.

כלל 4.2 קבוצות תדירות של אותיות בטקסט גלוי

	אות	הסתברות
1.	e	$p = 0.127$
2.	t, a, o, i, n, s, h, r	$0.06 \lesssim p \lesssim 0.09$
3.	d, l	$p \approx 0.04$
4.	c, u, m, w, f, g, y, p, b	$0.015 \lesssim p \lesssim 0.028$
5.	v, k, j, x, q, z	$p < 0.01$

כלל 4.3 זוגות אותיות הנפוצים ביותר בטקסט גלוי

השלושים זוגות אותיות הנפוצים ביותר בטקסט גלוי רשומים בטבלה למטה:

th	he	in	er	an	re	ed	on	es	st
en	at	to	nt	ha	nd	ou	ea	ng	as
or	ti	is	et	it	ar	te	se	hi	of

כלל 4.4 קבוצות שלשת אותיות הנפוצים ביותר בטקסט גלוי

ה-12 שלשות של אותיות הנפוצים ביותר בטקסט גלוי רשומים בטבלה למטה:

the	ing	and	her	ere	ent
tha	nth	was	eth	for	dth

4.3 קריפטו-אנליזה של צופן האפיני

זו דוגמה של התקפת טקסט מוצפן בלבד.

4.1 דוגמה

נניח כי אליס שלחה הודעה מוצפנת לבוב ואוסקר השיג את ההודעה. הטקסט מוצפן הוא

KARSRROHVUKARPF^SSZFERXERFKREKAF^SKARSRROHVUKARURTVEKARVSR

אוסקר יודע כי אליס הצפינה את ההודעה באמצעות צופן איפיני אבל הוא לא יודע את המפתח. כעת הוא מנסה לפענח אותה. מצאו את הטקסט גלוי.

פתרון:

שלב 1 נרשום את התדירויות של האותיות המופיעות בטקסט מוצפן:

A	6	N	0
B	0	O	2
C	0	P	1
D	0	Q	0
E	4	R	14
F	4	S	5
G	0	T	1
H	2	U	3
I	0	V	4
J	0	W	0
K	7	X	1
L	0	Y	0
M	0	Z	1

שלב 2) נרשום את האותיות הנפוצות ביותר:

- R מופיעה 14 פעמים.
- K מופיעה 7 פעמים.
- A מופיעה 6 פעמים.
- S מופיעה 5 פעמים.
- E, F, V מופיעות 4 פעמים.
- U מופיעה 3 פעמים.

שלב 3) ננסה למצוא את המפתח $k = (a, b)$ של $(a, b \in \mathbb{Z}_{26})$ של הכלל מצפין של הצופן אפיני

$$e_k(x) = ax + b ,$$

לכל $x \in \mathbb{Z}_{26}$ על ידי התאמת אותיות הכי נפוצים.

- נניח כי

$$e \xrightarrow{e_k} R , \quad t \xrightarrow{e_k} K .$$

- ז"א

$$e_k(4) = 17$$

$$e_k(19) = 10 .$$

- נציב $e_k = ax + b$ ונקבל

$$4a + b = 17 ,$$

$$19a + b = 10 .$$

כעת נפתור את המערכת מעל \mathbb{Z}_{26} :

$$\left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 19 & 1 & 10 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2 \rightarrow R_2 - R_1} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & -7 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & 19 \end{array} \right)$$

$$\xrightarrow{R_2 \rightarrow 15^{-1}R_2 = 7R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 133 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 3 \end{array} \right)$$

$$\xrightarrow{R_1 \rightarrow R_1 - 4R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 5 \\ 1 & 0 & 3 \end{array} \right)$$

$$.a = 3, b = 5$$

$$\gcd(a, 26) = 1 \text{ אז המפתח } k = (3, 5) \text{ תקין.}$$

• נבנה את הכלל מפענח עם המפתח המתקבל:

$$\begin{aligned} d_k(y) &= a^{-1}(y - b) \pmod{26} \\ &= 3^{-1}(y - 5) \\ &= 9(y - 5) \pmod{26} \\ &= 9y - 45 \pmod{26} \\ &= 9y + 7. \end{aligned}$$

שלב 4 ננסה לפענח את הטקסט מצפון עם הכלל מפענח

$y \in C$	K	A	R	S	R	R	O	H	V	U	K	A	R	P	F	S	Z	F	E	R
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	10	0	17	18	17	17	14	7	21	20	10	0	17	15	5	18	25	5	4	17
$x = d_k(y) \in \mathbb{Z}_{26}$	19	7	4	13	4	4	3	18	14	5	19	7	4	12	0	13	24	0	17	4
$x \in P$	t	h	e	n	e	e	d	s	o	t	t	h	e	m	a	n	y	a	r	e

$y \in C$	X	E	R	F	K	R	E	K	A	F	S	K	A	R	S	R	R	O	H
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	23	4	17	5	10	17	4	10	0	5	18	10	0	17	18	17	17	14	7
$x = d_k(y) \in \mathbb{Z}_{26}$	6	17	4	0	19	4	17	19	7	0	13	19	7	4	13	4	4	3	18
$x \in P$	g	r	e	a	t	e	r	t	h	a	n	t	h	e	n	e	e	d	s

$y \in C$	V	U	K	A	R	U	R	T	V	E	K	A	R	V	S	R
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	21	20	10	0	17	20	17	19	21	4	10	0	17	21	18	17
$x = d_k(y) \in \mathbb{Z}_{26}$	14	5	19	7	4	5	4	22	14	17	19	7	4	14	13	4
$x \in P$	o	f	t	h	e	f	e	w	o	r	t	h	e	o	n	e

■

דוגמה 4.2

נניח כי אליס שלחה הודעה מוצפנת לבוב ואוסקר השיג את ההודעה. הטקסט מוצפן הוא

FMXVEDKAPHFERBNDKRXRSREFMORUDSDKDVSHVUFEDKAPRKDLYEVLRRHHRH

אוסקר יודע כי אליס השתמשה בצופן איפניי אבל אינו יודע את המפתח. כעת הוא מנסה לפענח אותה. מצאו את הטקסט גלוי.

פתרון:

שלב 1 נרשום את התדירויות של האותיות המופיעות בטקסט מוצפן:

A	2	N	1
B	1	O	1
C	0	P	2
D	7	Q	0
E	5	R	8
F	4	S	3
G	0	T	0
H	5	U	2
I	0	V	4
J	0	W	0
K	5	X	2
L	2	Y	1
M	2	Z	0

שלב 2 נרשום את האותיות הנפוצות ביותר:

- R מופיעה 8 פעמים.
- D מופיעה 7 פעמים.
- E, H, K מופיעות 5 פעמים.
- F, V מופיעה 4 פעמים.

שלב 3 ננסה למצוא את המפתח $k = (a, b)$ של הכלל מצפין של הצופן אפיני

$$e_k(x) = ax + b,$$

לכל $x \in \mathbb{Z}_{26}$ על ידי התאמת אותיות הכי נפוצים.

- נניח כי

$$e \xrightarrow{e_k} R, \quad t \xrightarrow{e_k} D.$$

- ז"א

$$e_k(4) = 17$$

$$e_k(19) = 3.$$

- נציב $e_k = ax + b$ ונקבל

$$4a + b = 17,$$

$$19a + b = 3.$$

כעת נפתור את המערכת מעל \mathbb{Z}_{26} :

$$\left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 19 & 1 & 3 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2 \rightarrow R_2 - R_1} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & -14 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & 12 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2 \rightarrow 15^{-1}R_2 = 7R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 84 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 6 \end{array} \right)$$

$$\xrightarrow{R_1 \rightarrow R_1 - 4R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & -7 \\ 1 & 0 & 6 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 19 \\ 1 & 0 & 6 \end{array} \right)$$

ז"א $a = 6, b = 19$ המפתח הזה לא תקין בגלל ש- $\gcd(a, 26) = 2 \neq 1$.

- עכשיו נחזור וננסה

$$e \xrightarrow{e_k} R, \quad t \xrightarrow{e_k} E.$$

- ז"א

$$e_k(4) = 17$$

$$e_k(19) = 4.$$

• נציב $e_k = ax + b$ ונקבל

$$\begin{aligned} 4a + b &= 17, \\ 19a + b &= 4. \end{aligned}$$

כעת נפתור את המערכת מעל \mathbb{Z}_{26} :

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 19 & 1 & 4 \end{array} \right) &\xrightarrow{R_2 \rightarrow R_2 - R_1} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & -13 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & 13 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2 \rightarrow 15^{-1}R_2 = 7R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 91 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 13 \end{array} \right) \\ &\xrightarrow{R_1 \rightarrow R_1 - 4R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & -35 \\ 1 & 0 & 13 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 13 \end{array} \right) \end{aligned}$$

ז"א $a = 13, b = 17$ המפתח הזה גם לא תקין בגלל ש- $\gcd(a, 26) = 2 \neq 1$.

עכשיו נחזור וננסה

$$e \xrightarrow{e_k} R, \quad t \xrightarrow{e_k} H.$$

• ז"א

$$\begin{aligned} e_k(4) &= 17 \\ e_k(19) &= 7. \end{aligned}$$

• נציב $e_k = ax + b$ ונקבל

$$\begin{aligned} 4a + b &= 17, \\ 19a + b &= 7. \end{aligned}$$

כעת נפתור את המערכת מעל \mathbb{Z}_{26} :

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 19 & 1 & 7 \end{array} \right) &\xrightarrow{R_2 \rightarrow R_2 - R_1} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & -10 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & 16 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2 \rightarrow 15^{-1}R_2 = 7R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 112 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 8 \end{array} \right) \\ &\xrightarrow{R_1 \rightarrow R_1 - 4R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & -15 \\ 1 & 0 & 8 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 11 \\ 1 & 0 & 13 \end{array} \right) \end{aligned}$$

ז"א $a = 8, b = 11$ המפתח הזה גם לא תקין בגלל ש- $\gcd(a, 26) = 2 \neq 1$.

עכשיו נחזור וננסה

$$e \xrightarrow{e_k} R, \quad t \xrightarrow{e_k} K.$$

• ז"א

$$\begin{aligned} e_k(4) &= 17 \\ e_k(19) &= 10. \end{aligned}$$

• נציב $e_k = ax + b$ ונקבל

$$\begin{aligned} 4a + b &= 17, \\ 19a + b &= 10. \end{aligned}$$

כעת נפתור את המערכת מעל \mathbb{Z}_{26} :

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 19 & 1 & 10 \end{array} \right) &\xrightarrow{R_2 \rightarrow R_2 - R_1} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & -7 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 15 & 0 & 19 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2 \rightarrow 15^{-1}R_2 = 7R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 133 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & 17 \\ 1 & 0 & 3 \end{array} \right) \\ &\xrightarrow{R_1 \rightarrow R_1 - 4R_2} \left(\begin{array}{cc|c} 0 & 1 & 5 \\ 1 & 0 & 3 \end{array} \right) \end{aligned}$$

ז"א $a = 3, b = 5$.

$\gcd(a, 26) = 1$ אז המפתח $k = (3, 5)$ תקין.

• נבנה את הכלל מפענח עם המפתח המתקבל:

$$\begin{aligned} d_k(y) &= a^{-1}(y - b) \pmod{26} \\ &= 3^{-1}(y - 5) \\ &= 9(y - 5) \pmod{26} \\ &= 9y - 45 \pmod{26} \\ &= 9y + 7. \end{aligned}$$

שלב 4 ננסה לפענח את הטקסט מציפון עם הכלל מפענח

$y \in C$	F	M	X	V	E	D	K	A	P	H	F	E	R	B	N	D	K	R	X	R
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	5	12	23	21	4	3	10	0	15	7	5	4	17	1	13	3	10	17	23	17
$x = d_k(y) \in \mathbb{Z}_{26}$	0	11	6	14	17	8	19	7	12	18	0	17	4	16	20	8	19	4	6	4
$x \in P$	a	l	g	o	r	i	t	h	m	s	a	r	e	q	u	i	t	e	g	e

$y \in C$	S	R	E	F	M	O	R	U	D	S	D	K	D	V	S	H	V	U	F	E
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	18	17	4	5	12	14	17	20	3	18	3	10	3	21	18	7	21	20	5	4
$x = d_k(y) \in \mathbb{Z}_{26}$	13	4	17	0	11	3	4	5	8	13	8	19	8	14	13	18	14	5	0	17
$x \in P$	n	e	r	a	l	d	e	f	i	n	i	t	i	o	n	s	o	f	a	r

$y \in C$	D	K	A	P	R	K	D	L	Y	E	V	L	R	H	H	R	H
$y \in \mathbb{Z}_{26}$	3	10	0	15	17	10	3	11	24	4	21	11	17	7	7	17	7
$x = d_k(y) \in \mathbb{Z}_{26}$	8	19	7	12	4	19	8	2	15	17	14	2	4	18	18	4	18
$x \in P$	i	t	h	m	e	t	i	c	p	r	o	c	e	s	s	e	s

■

4.4 קריפטו-אנליזה של צופן היל

זו דוגמה של התקפת טקסט גלוי ידוע.

משפט 4.1

נניח שלמתקין יש מחרוזת טקסט גלוי x ומחרוזת טקסט מוצפן שלו. נניח כי המתקין יודע כי הטקסט הוצפן באמצעות צופן היל עם מפתח של סדר m .

נניח שיש למתקין לפחות m טקסטים גלויים וטקסטים מוצפנים. של הטקסט גלוי:

$$x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$$

-1

$$y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj})$$

$1 \leq j \leq m$ כך ש-

$$y_j = e_k(x_j).$$

נגדיר שתי מטריצות

$$X = (x_{i,j}), \quad Y = (y_{i,j}).$$

אם X הפיכה אז

$$Y = XK \Leftrightarrow K = X^{-1}Y.$$

כאשר $K \in \mathbb{Z}_{26}^{m \times m}$ המפתח של הצופן היל.

דוגמה 4.3

נתון הטקסט גלוי

friday

אשר הוצפן באמצעות צופן היל עם מפתח של סדר $m = 2$. נניח כי הטקסט מוצפן הינו

PQCFKU

מצאו את המפתח של הצופן.

פתרון:

$$(f, r) \xrightarrow{e_k} (P, Q), \quad (i, d) \xrightarrow{e_k} (C, F), \quad (a, y) \xrightarrow{e_k} (K, U)$$

ז"א

$$e_k(5, 17) = (15, 16), \quad e_k(8, 3) = (2, 5), \quad e_k(0, 24) = (10, 20).$$

נקח את שני טקסטים גלויים וטקסטים מוצפנים המתאימים נגדיר את המטריצות

$$X = \begin{pmatrix} 5 & 17 \\ 8 & 3 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} 15 & 16 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}.$$

אזי

$$K = X^{-1}Y.$$

נחשב את ההופכית X^{-1} באמצעות נוסחת קיילי $X^{-1} = |X|^{-1} \text{adj}(X)$.

$$\begin{aligned} |X| &= 15 - 136 \pmod{26} \\ &= -121 \pmod{26} \\ &= -4(26) - 17 \pmod{26} \\ &= -17 \pmod{26} \\ &= 9 \pmod{26}. \end{aligned}$$

לכן

$$|K|^{-1} \pmod{26} = 9^{-1} \pmod{26} = 3.$$

המטריצת הקופקטורים של X היא $C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix}$ כאשר

$$C_{11} = 3, \quad C_{12} = -8, \quad C_{21} = -17, \quad C_{22} = 5.$$

לכן

$$C = \begin{pmatrix} 3 & -8 \\ -17 & 5 \end{pmatrix} \Rightarrow \text{adj}(X) = C^t = \begin{pmatrix} 3 & -17 \\ -8 & 5 \end{pmatrix} \pmod{26} = \begin{pmatrix} 3 & 9 \\ 18 & 5 \end{pmatrix}.$$

לבסוף נקבל

$$X^{-1} = 3 \begin{pmatrix} 3 & 9 \\ 18 & 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9 & 27 \\ 54 & 15 \end{pmatrix} \pmod{26} = \begin{pmatrix} 9 & 1 \\ 2 & 15 \end{pmatrix}.$$

לפיכך

$$\begin{aligned}
 K &= \begin{pmatrix} 9 & 1 \\ 2 & 15 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 15 & 16 \\ 2 & 5 \end{pmatrix} \pmod{26} \\
 &= \begin{pmatrix} 137 & 149 \\ 60 & 107 \end{pmatrix} \pmod{26} \\
 &= \begin{pmatrix} 7 & 19 \\ 8 & 3 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

■

דוגמה 4.4

נתון הטקסט גלוי

theresnoplacelikehome

אשר הוצפן באמצעות צופן היל עם מפתח של סדר $m = 3$. נניח כי הטקסט מוצפן הינו

FHVTUTGQVRWPCPSFGGAMG

מצאו את המפתח של הצופן.

פתרון:

$$(t, h, e) \xrightarrow{e_k} (F, H, V), \quad (r, e, s) \xrightarrow{e_k} (T, U, T), \quad (n, o, p) \xrightarrow{e_k} (G, Q, V)$$

ז"א

$$e_k(19, 7, 4) = (5, 7, 21), \quad e_k(17, 4, 18) = (19, 20, 19), \quad e_k(13, 14, 15) = (6, 16, 21).$$

נקח את שני טקסטים גלויים וטקסטים מוצפנים המתאימו נגדיר את המטריצות

$$X = \begin{pmatrix} 19 & 7 & 4 \\ 17 & 4 & 18 \\ 13 & 14 & 15 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} 5 & 7 & 21 \\ 19 & 20 & 19 \\ 6 & 16 & 21 \end{pmatrix}.$$

אזי

$$K = X^{-1}Y.$$

נחשב את ההופכית X^{-1} באמצעות נוסחת קיילי $X^{-1} = |X|^{-1} \text{adj}(X)$.

$$\begin{aligned}
 |X| &= 15 - 136 \pmod{26} \\
 &= -3051 \pmod{26} \\
 &= 17.
 \end{aligned}$$

לכן

$$|K|^{-1} \pmod{26} = 17^{-1} \pmod{26} = 23.$$

המטריצת הקופקטורים של X היא

$$C = \begin{pmatrix} -192 & -21 & 186 \\ -49 & 233 & -175 \\ 110 & -274 & -43 \end{pmatrix} \pmod{26} = \begin{pmatrix} 16 & 5 & 4 \\ 3 & 25 & 7 \\ 6 & 12 & 9 \end{pmatrix}$$

לכן

$$\text{adj}(X) = C^t = \begin{pmatrix} 16 & 3 & 6 \\ 5 & 25 & 12 \\ 4 & 7 & 9 \end{pmatrix}.$$

לבסוף נקבל

$$X^{-1} = 23 \begin{pmatrix} 16 & 3 & 6 \\ 5 & 25 & 12 \\ 4 & 7 & 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 368 & 69 & 138 \\ 115 & 575 & 276 \\ 92 & 161 & 207 \end{pmatrix} \bmod 26 = \begin{pmatrix} 4 & 17 & 8 \\ 11 & 3 & 16 \\ 14 & 5 & 25 \end{pmatrix}.$$

לפיכך

$$\begin{aligned} K &= X^{-1} \cdot Y \bmod 26 \\ &= \begin{pmatrix} 4 & 17 & 8 \\ 11 & 3 & 16 \\ 14 & 5 & 25 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 & 7 & 21 \\ 19 & 20 & 19 \\ 6 & 16 & 21 \end{pmatrix} \bmod 26 \\ &= \begin{pmatrix} 391 & 496 & 575 \\ 208 & 393 & 624 \\ 315 & 598 & 914 \end{pmatrix} \bmod 26 \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 3 & 0 \\ 3 & 0 & 4 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

■

4.5 מדד צירוף המקרים

הגדרה 4.1 מדד צירוף המקרים I_c

נתון מחרוזת של טקסט גלוי $x = x_1x_2 \cdots x_n$ של אורך n .

המדד צירוף המקרים של x מסומן $I_c(x)$ ומוגדר להיות ההסתברות ששתי אותיות הנבחרות באקראי מתוך x יהיו זהות.

משפט 4.2 נוסחה לחישוב המדד צירוף המקרים

נתון מחרוזת של טקסט גלוי $x = x_1x_2 \cdots x_n$ של אורך n .
יהי f_k מספר הפעמים שהאות מספר k באלפבית מופיעה במחרוזת x . למשל, f_0 מסמן את מספר הפעמים שהאות a מופיעה, f_1 מסמן את מספר הפעמים שהאות b מופיעה, וכן הלאה.

מספר הדרכים לבחור שתי אותיות מתוך n אותיות של x ללא החזרה ניתן על ידי

$$\binom{n}{2}.$$

לכן לכל $0 \leq k \leq 25$ יש $\binom{f_k}{2}$ דרכים לבחור שתי אותיות k מתוך x .

המדד צירוף המקרים של הטקסט גלוי x נתון על ידי הנוסחה

$$I_c(x) = \frac{\sum_{k=0}^{25} \binom{f_k}{2}}{\binom{n}{2}} = \frac{\sum_{k=0}^{25} f_k (f_k - 1)}{n(n-1)} .$$

משפט 4.3 מדד צירוף המקרים בטקסט גלוי

נניח כי $x = x_1 x_2 \dots x_n$ הוא טקסט של n אותיות. נסמן ב- p_0, p_1, \dots, p_{25} ההסתברויות של האותיות כמפורט למטה:

אות	p_i
a	0.082
b	0.015
c	0.028
d	0.043
e	0.127
f	0.022

אות	p_i
g	0.02
h	0.061
i	0.07
j	0.002
k	0.008
l	0.04

אות	p_i
m	0.024
n	0.067
o	0.075
p	0.019
q	0.001
r	0.06

אות	p_i
s	0.063
t	0.091
u	0.028
v	0.01
w	0.023
x	0.001
y	0.02
z	0.001

המדד צירוף המקרים מצופה להיות

$$I_c(x) \approx \sum_{k=0}^{25} p_k^2 = 0.065 .$$

4.6 קריפטו-אנליזה של צופן ויז'נר - מבחן פרידמן

4.5 דוגמה

נתון הטקסט מוצפן

MOKSMNXBIUCMQXGCAXOFXMUWLNRRNSFMIQBHNCF CGDTAHANTTIJNIERGCHURYHOGGSWTMP
CCOYISKOGXLQAFMVXNFEDAEMHQTNAAQXUDIXXRSILCIZKGWEFLAWGUJAOAUPLXRQTGATPS
MKLQSWRGTXJNPXEUNSYIACRGWLQEIMDUBQQGAEEYULEEWXDLIIDUHQOFXWEAZJTUOFXWKS
MTNAAFXTTMFPMUWLNRRNSFMOBIIJTUSFPRMRVBLMQXXRURKCAZGWCWAAGADECGDMMMCZJVQS
NNRTISADILALHOEFWOF TGBSUF DHMZWNK WAPNUJALAZGWCOKSMXRMRQXNQMFHOGVGAGMR
AIAFMGWC MRQXUMJXXRPXGCAWILQAFGZJNOIQXUMVWZUUXWAISSLVIE XWABARVHOG EJNWAV
LQMAVWCOYISUIHIK

שהוצפן באמצעות צופן ויז'נר עם מפתח של אורך 5. מצאו את המפתח ואת הטקסט גלוי.

פתרון:

שלב 1: נפרק את הטקסט לעמודות של 3 אותיות

Y_1	M	N	C	C	X	N	M	N	D	N	N	C	H	W	C	K	Q	X	A	T	X	X	C	W	W	O	X	A	K	R	...
Y_2	O	X	M	A	M	R	I	C	T	T	I	H	O	T	O	O	A	N	E	N	U	R	I	E	G	A	R	T	L	G	...
Y_3	K	B	Q	X	U	N	Q	F	A	T	E	U	G	M	Y	G	F	F	M	A	D	S	Z	F	U	U	Q	P	Q	T	...
Y_4	S	I	X	O	W	S	B	C	H	I	R	R	G	P	I	X	M	E	H	A	I	I	K	L	J	P	T	S	S	X	...
Y_5	M	U	G	F	L	F	H	G	A	J	G	Y	S	C	S	L	V	D	Q	Q	X	L	G	A	A	L	G	M	W	J	...

שלב 2: נחשב את המדד המשותף של כל שורה

יהיו f_i התדירויות של האותיות במחרוזת Y_i ונניח כי האורך של Y_i הוא n . אזי הפונקציות הסתברות של האותיות ב- Y_i הן

$$\frac{f_0}{n}, \dots, \frac{f_{25}}{n}.$$

כל רצף אותיות Y_i מתקבל על ידי הזזה קבועה של k_i מקומות של הטקסט גלוי. לפי זה, הפונקציות הסתברות של האותיות המוזזות,

$$\frac{f_{k_i}}{n}, \dots, \frac{f_{25+k_i}}{n},$$

תהיו קרובות להסתברויות p_0, \dots, p_{25} של אותיות בטקסט גלוי. כעת נגדיר את המדד המשותף

$$M_g(Y_i) = \sum_{i=0}^{25} \frac{p_i f_{i+g}}{n}.$$

לכל $0 \leq g \leq 25$. אם $g = k_i$ אז

$$M_g(Y_i) \approx \sum_{i=0}^{25} p_i^2 = 0.065.$$

על פי זה נבדוק את המדד המשותף לכל Y_i ולכל $0 \leq g \leq 25$:

Y_1

a	0.0336437	b	0.0285977	c	0.0381264	d	0.0335977
e	0.0374943	f	0.0414023	g	0.0374138	h	0.034046
i	0.0388046	j	0.0647931	k	0.0382184	l	0.0352414
m	0.0347586	n	0.0328391	o	0.0302759	p	0.0468161
q	0.0384253	r	0.0272184	s	0.0344828	t	0.0484253
u	0.0454598	v	0.0395747	w	0.0457011	x	0.0391839
y	0.0390345	z	0.0374253				

Y_2

a	0.0602644	b	0.0361839	c	0.0321264	d	0.0373333
e	0.0423333	f	0.0316092	g	0.0397816	h	0.0383333
i	0.0391954	j	0.0425057	k	0.0407586	l	0.0352759
m	0.037	n	0.0468046	o	0.0396092	p	0.0426207
q	0.0327931	r	0.0309655	s	0.0317816	t	0.0412529
u	0.0371609	v	0.0383218	w	0.0422989	x	0.0324828
y	0.0340575	z	0.0381494				

Y₃

a	0.0396092	b	0.046931	c	0.0417011	d	0.0312299
e	0.0352069	f	0.0387701	g	0.0417816	h	0.0348161
i	0.0475402	j	0.0337356	k	0.0285977	l	0.030977
m	0.0625517	n	0.0407816	o	0.0315977	p	0.029931
q	0.0469885	r	0.0332989	s	0.0376782	t	0.042977
u	0.041954	v	0.0300115	w	0.036069	x	0.0395287
y	0.039931	z	0.0368046				

Y₄

a	0.0459655	b	0.0364483	c	0.0323908	d	0.0362184
e	0.0632644	f	0.0395747	g	0.0334598	h	0.0316092
i	0.0438276	j	0.0342414	k	0.0386437	l	0.0336092
m	0.0323333	n	0.0371379	o	0.045092	p	0.0466207
q	0.0363448	r	0.0403678	s	0.0388851	t	0.0392874
u	0.035954	v	0.0374253	w	0.0336207	x	0.0362069
y	0.0372529	z	0.0352184				

Y₅

a	0.0288046	b	0.0362529	c	0.0446322	d	0.0437586
e	0.037069	f	0.0421839	g	0.0347931	h	0.0410805
i	0.0387126	j	0.036977	k	0.0274253	l	0.0331839
m	0.0445172	n	0.0405172	o	0.0408391	p	0.0345977
q	0.0306897	r	0.0342759	s	0.064046	t	0.0436322
u	0.0348161	v	0.0311494	w	0.0374368	x	0.0362414
y	0.0438046	z	0.0395632				

ננסה לפענח את הטקסט מוצפן עם המפתח

JAMES

ונקבל את התשובה

doyouexpectmetotalknomisterbondiexpectyoutodiethereisnothingyoucantalk
tomeaboutthatidontalreadyknowyoureforgettingonethingififailtoreportdou
bleoeightreplacesmeitrusthewilllbemoresuccessfulwellheknowswhatiknowyou
knownothingmisterbondoperationgrandslamforinstancetwowordsyoumayhaveov
erheardwhichcannotpossiblyhaveanysignificancetoyouoranyoneinyourorgani
zationcanyouaffordtotakethatchanceyouarequiterightmisterbondyouarewort
hmoretomealives

עם רווחים וסימני פיסוק:

Do you expect me to talk? No, Mister Bond, I expect you to die. There
is nothing you can talk to me about that I don't already know. You're
forgetting one thing: if I fail to report, Double-O Eight replaces me.
I trust he will be more successful. Well, he knows what I know. You
know nothing, Mister Bond. Operation Grand Slam, for instance. Two
words you may have overheard, which cannot possibly have any
significance to you or anyone in your organization. Can you afford to
take that chance? You are quite right, Mister Bond. You are worth more
to me alive.

```

1 def letterToZ26(a):
2     if a.isalpha():
3         if a.isupper():
4             return ord(a) - 65
5         if a.islower():
6             return ord(a) - 97
7
8 def Z26ToUpperLetter(a):
9     return chr(a+65)
10
11 def Z26ToLowerLetter(a):
12     return chr(a+97)
13
14 probabilities = [0.082, 0.015, 0.028, 0.043, 0.127, 0.022, 0.02, 0.061, 0.07, 0.002,
15                 0.008, 0.04, 0.024, 0.067, 0.075, 0.019, 0.001, 0.06, 0.063, 0.091, 0.028, 0.01,
16                 0.023, 0.001, 0.02, 0.001]
17
18 alphabetLower = ['a', 'b', 'c', 'd', 'e', 'f', 'g', 'h', 'i', 'j', 'k', 'l', 'm', 'n', 'o', 'p', 'q',
19                 'r', 's', 't', 'u', 'v', 'w', 'x', 'y', 'z']
20 alphabetUpper = ['A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'H', 'I', 'J', 'K', 'L', 'M', 'N', 'O', 'P', 'Q',
21                 'R', 'S', 'T', 'U', 'V', 'W', 'X', 'Y', 'Z']
22
23 def P(a):
24     i = alphabetLower.index(a)
25     return probabilities[i]
26
27 cipherText = "
28     MOKSMNXBIUCMQXGCAXOFXMUWLNRRNSFMIQBHNCFCGDTAHANTTIJNIERGCHURYHOGGSWTMPCCOYISKOGXLQAFMVXNFEDAE
29     "
30
31 cipherTextList = list(cipherText)
32
33 y= [None]*5
34 for i in range(0,6):
35     y[i] = cipherTextList[i::5]
36

```

```
31 print( len(y[0]) == len(y[1]) == len(y[2]) == len(y[3]) == len(y[4]) )
32
33 f = [None]*26
34
35 n = len(y[0])
36
37 My = [None]*5
38
39 for k, yi in enumerate(y):
40     for i,X in enumerate(alphabetUpper):
41         f[i] = yi.count(X)
42
43     A = [None]*26
44
45     for g in range(0,26):
46         Sum = 0;
47         b = alphabetLower[g]
48
49         for i in range(0,26):
50             a = alphabetLower[i]
51             Sum += P(a)*f[(i+g) % 26]
52
53         Sum = Sum / n
54
55         A[g] = [b , Sum ]
56
57     My[k] = A
58
59 keyWord = 'james'
60
61 keyZ26 = [letterToZ26(a) for a in list(keyWord)]
62
63 Y = [letterToZ26(a) for a in cipherTextList]
64
65 X = []
66
67 for i,y in enumerate(Y):
68     x = ( y - keyZ26[ i%5 ] ) % 26
69     X.append(x)
70
71 plainTextList = [Z26ToLowerLetter(a) for a in X]
72 plainText = ''.join(plainTextList)
```

