

## שיעור 5

### צופן RSA

#### 5.1 משפט השאריות הסיני

##### משפט 5.1 משפט השאריות הסיני

יהיו  $m_1, m_2, \dots, m_r$  שלמים אשר זרים בזוגות ויהיו  $a_1, a_2, \dots, a_r$  שלמים. למערכת של יחסים שיקולות

$$\begin{aligned} x &= a_1 \pmod{m_1}, \\ x &= a_2 \pmod{m_2}, \\ &\vdots \\ x &= a_r \pmod{m_r}, \end{aligned}$$

קיים פתרון ייחד מודולו  $M = m_1 m_2 \cdots m_r$  שנייתן על ידי

$$x = \sum_{i=1}^r a_i M_i y_i \pmod{M}$$

כאשר  $1 \leq i \leq r$   $y_i = M_i^{-1} \pmod{m_i}$  ו  $M_i = \frac{M}{m_i}$

##### דוגמה 5.1

היעזרו במשפט השאריות הסיני כדי לפתור את המערכת

$$\begin{aligned} x &= 22 \pmod{101}, \\ x &= 104 \pmod{113}. \end{aligned}$$

**פתרון:**

$$a_1 = 22, \quad a_2 = 104, \quad m_1 = 101, \quad m_2 = 113.$$

$$M = m_1 m_2 = 11413, \quad M_1 = \frac{M}{m_1} = 113, \quad M_2 = \frac{M}{m_2} = 101.$$

$$y_1 = M_1^{-1} \pmod{m_1} = 113^{-1} \pmod{101}, \quad y_2 = M_2^{-1} \pmod{m_2} = 101^{-1} \pmod{113}.$$

כדי לחשב את האיברים ההופכיים נשתמש באלגוריתם המוכפל של אוקlid.

$$\text{נסמן } a = 113, b = 101$$

$$\begin{array}{ll} r_0 = a = 113, & r_1 = b = 101, \\ s_0 = 1, & s_1 = 0, \\ t_0 = 0, & t_1 = 1. \end{array}$$

$q_1 = 1$	$t_2 = 0 - 1 \cdot 1 = -1$	$s_2 = 1 - 1 \cdot 0 = 1$	$r_2 = 113 - 1 \cdot 101 = 12$	$:k = 1$
$q_2 = 4$	$t_3 = 1 - 8 \cdot (-1) = 9$	$s_3 = 0 - 8 \cdot 1 = -8$	$r_3 = 101 - 8 \cdot 12 = 5$	$:k = 2$
$q_3 = 2$	$t_4 = -1 - 2 \cdot (9) = -19$	$s_4 = 1 - 2 \cdot (-8) = 17$	$r_4 = 12 - 2 \cdot 5 = 2$	$:k = 3$
$q_4 = 2$	$t_5 = 9 - 2 \cdot (-19) = 47$	$s_5 = -8 - 2 \cdot 17 = -42$	$r_5 = 5 - 2 \cdot 2 = 1$	$:k = 4$
$q_5 = 2$	$t_6 = -19 - 2 \cdot (47) = -113$	$s_6 = 17 - 2 \cdot (-42) = 101$	$r_6 = 2 - 2 \cdot 1 = 0$	$:k = 5$

$$\gcd(a, b) = r_5 = 1 , \quad s = s_5 = -42 , \quad t = t_5 = 47 .$$

$$ta + sb = -42(113) + 47(101) = 1 .$$

מכאן

$$101^{-1} \equiv 47 \pmod{113}$$

-1

$$.113^{-1} \equiv -42 \pmod{101} = 59 \pmod{101}$$

לכן

$$y_1 = M_1^{-1} \pmod{m_1} = 113^{-1} \pmod{101} = 59$$

-1

$$y_2 = M_2^{-1} \pmod{m_2} = 101^{-1} \pmod{113} = 47$$

$$\begin{aligned} x &= a_1 M_1 y_1 + a_2 M_2 y_2 \pmod{M} \\ &= 22 \cdot 113 \cdot 59 + 104 \cdot 111 \cdot 47 \pmod{11413} \\ &= 640362 \pmod{11413} \\ &= 1234 . \end{aligned}$$



## 5.2 משפטים של מספרים ראשוניים

### משפט 5.2 קיימים אינסוף מספרים ראשוניים

קיימים אינסוף מספרים ראשוניים.

הוכחה: נוכיח הטענה דרך השלילה.

נניח כי  $\{p_1, \dots, p_n\}$  הוא הקבוצה של כל הראשוניים שקיים וקבוצה זו נוצרת סופית.

נגידר המשפט  $M = (p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n) + 1$ .

לפי משפט הפירוק לזרים (ראו משפט 1.4 לעילאו או משפט 5.3 למטה)  $M$  הוא מספר ראשוני או שווה למכפלה של זרים.

$M$  לא מספר ראשוני בגלל ש-  $p_i > M$  לכל  $n \leq i \leq 1$ . הרי גם לא קיים מספק ראשוני  $p_i$  אשר מחלק את  $M$ .

$$M \% p_i = 1 \Rightarrow p_i \nmid M .$$

הגענו לסתירה של המשפט הפירוק לראשוניים, שכן קיימים אינסוף מספרים ראשוניים.

### משפט 5.3 משפט הפירוק לראשוניים

(ראו משפט 1.4) לכל מספר שלם  $n$  קיימים שלמים  $e_i$  ורפואיים  $p_i$  כך ש-

$$n = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \cdots p_k^{e_k}$$

הוכחה: אינדוקציה.

### משפט 5.4

אם  $a, b$  שלמים זרים (כלומר  $\gcd(a, b) = 1$ ) אז

$$\phi(m \cdot n) = \phi(m) \cdot \phi(n) .$$

הוכחה: (להעשרה בלבד)

### משפט 5.5

אם  $p$  מספר ראשוני אז

$$\phi(p^n) = p^n - p^{n-1} .$$

הוכחה: נתבונן על  $\gcd(p^n, m)$  כאשר  $m$  שלם ו-  $p$  ראשוני.

האפשרויות היחידות של המחלק המשותף הגדול ביותר ( $\gcd(p^n, m)$ ) הן  $1, p, p^2, \dots, p^n$ . בסה"כ יש  $p^n$  אפשרויות.

רק אם  $\gcd(p^n, m) > 1$   $\gcd(p^n, m) \in \{p, 2p, 3p, \dots, p^{n-1}p\}$ .

מכאן קיימים  $p^n - p^{n-1}$  שלמים עבורם  $\gcd(p^n, m) = 1$ .

### משפט 5.6 נוסחה לפונקציית אוילר

(ראו משפט ??) לכל מספר שלם  $n$  בעל פירוק לראשוניים

$$n = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \cdots p_k^{e_k}$$

פונקציית אוילר ניתנת על ידי

$$\phi(n) = \prod_{i=1}^k (p_i^{e_i} - p_i^{e_i-1}) = (p_1^{e_1} - p_1^{e_1-1})(p_2^{e_2} - p_2^{e_2-1}) \cdots (p_k^{e_k} - p_k^{e_k-1})$$

הוכחה: משפט 5.4 ו- 5.5.

**דוגמה 5.2**חשבו את  $\phi(24)$ **פתרון:**

$$24 = 2^3 \cdot 3^1 .$$

לכן

$$\phi(24) = (2^3 - 2^2)(3^1 - 3^0) = (8 - 4)(3 - 1) = 8 .$$

**משפט 5.7**אם  $p$  מספר ראשוני אז

$$\phi(p) = p - 1 .$$

הוכחה: משפט 5.4 ו- 5.5

**משפט 5.8**אם  $p$  ו-  $q$  מספרים ראשוניים שונים אז

$$\phi(p \cdot q) = (p - 1)(q - 1) .$$

הוכחה: תרגיל בית.

**משפט 5.9 המשפט הקטן של פרמה**אם  $p$  מספר ראשוני ו-  $a \in \mathbb{Z}_p$ . אז התנאים הבאים מתקיימים:

$$a^p \equiv a \pmod{p} . \mathbf{1}$$

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p} . \mathbf{2}$$

$$a^{-1} \equiv a^{p-2} \pmod{p} . \mathbf{3}$$

הוכחה:

טענה 1. נוכח באינדוקציה.

בסיס:עבור  $0 \pmod{p}$  הטענה  $a = 0 \pmod{p}$  מתקיימת.מעבר:נניח כי הטענה מתקיימת עבור  $a$ .

$$(a + 1)^p = a^p + pa^{p-1} + \frac{p(p-1)}{2}a^{p-2} + \cdots + pa + 1 \equiv a^p + 1 \pmod{p}$$

הנחה האינדוקציה אומרת ש-  $a^p \equiv a \pmod{p}$  נכון

$$(a+1)^p \pmod{p} \equiv a^p + 1 \pmod{p} \equiv (a+1) \pmod{p}$$

כנדרש.

**טענה 2.**  $\gcd(a, p) = 1$  לפיכך קיים איבר הופכי  $a^{-1} \in \mathbb{Z}_p$  ב-  $a^p \equiv 1 \pmod{p}$  אשר הוכחנו בסעיף הקודם:

$$a^{-1}a^p \equiv a^{-1} \cdot a \pmod{p} \Rightarrow a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}.$$

**טענה 3.**

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p} \Leftrightarrow 1 \equiv a^{p-1} \pmod{p} \Rightarrow a^{-1} \equiv a^{p-2} \pmod{p}.$$

### משפט 5.10 משפט אוילר

אם  $a, n$  שלמים ו-  $\gcd(a, n) = 1$  אז

$$a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n}.$$

### משפט 5.11

אם  $a, n$  שלמים ו-  $\gcd(a, n) = 1$  אז

$$a^{-1} \equiv a^{\phi(n)-1} \pmod{n}.$$

### דוגמה 5.3

חשבו את האיבר הופכי ל- 5 ב-  $\mathbb{Z}_{11}$ .

**פתרון:**

לפי משפט פרימט 5.9:

$$5^{-1} = 5^{11-2} \pmod{11} = 5^9 \pmod{11}.$$

לפי הנוסחת לשארית ?? :

$$5^9 \% 11 = 5^9 - 11 \left\lfloor \frac{5^9}{11} \right\rfloor = 9$$

לכן  $5^{-1} \in \mathbb{Z}_{11} = 9$ .

## 5.3 אלגוריתם RSA

צופן RSA הומצא בשנת 1977 על ידי Ron Rivest, Adi Shamir and Len Adleman

### הגדרה 5.1 צופן RSA

יהי  $pq = n$  כאשר  $p, q$  מספרים ראשוניים שונים. תהיו הקבוצת טקסט גלי  $P = \mathbb{Z}_n$ , והקבוצת טקסט מוצפן  $C = \mathbb{Z}_n$ . נגדיר קבוצת המפתחות

$$K = \left\{ (n, p, q, a, b) \mid ab = 1 \pmod{\phi(n)} \right\}$$

לכל  $K$ ,  $k = (n, p, q, a, b) \in K$  ו-  $y \in C$  ו-  $x \in P$  נגידר כלל מצפין

$$e_k(x) = x^b \pmod{n},$$

ונגידר כלל מפענה

$$d_k(x) = y^a \pmod{n}.$$

הערכים של  $n$  ו-  $b$  הם ערכים ציבוריים בעוד  $p, q, a$  ערכים סודיים.

### משפט 5.12 קריפטו-מערכת RSA ניתן לפענוח

יהי  $p, q = n$  מספרים ראשוניים שונים,  $a, b \in \mathbb{Z}$  שלמים חיוביים כך ש-

אם  $x \in \mathbb{Z}_n$

$$(x^b)^a = x \pmod{n}.$$

הוכחה: נתון כי  $.ab = 1 \pmod{\phi(n)}$

לפי משפט 5.8,  $\phi(n) = \phi(pq) = (p-1)(q-1)$  אז

$$ab = 1 \pmod{\phi(n)} = 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$$

לכן קיים  $t \in \mathbb{Z}$  כך ש-

$$ab - 1 = t(p-1)(q-1).$$

לכל  $z \in \mathbb{Z}$  לפי משפט 5.9  $z^{p-1} = 1 \pmod{p}$ . בפרט

$$x^{ab-1} = x^{t(p-1)(q-1)} = (x^{t(q-1)})^{p-1} = y^{p-1}$$

כasher  $x^{ab-1} = 1 \pmod{p}$ . מכאן  $y = x^{t(q-1)}$

משיקולות של סימטריה באותה מידה  $x^{ab-1} = 1 \pmod{q}$

לכן  $x^{ab-1} - 1 = 0 \pmod{q}$  ו-  $x^{ab-1} - 1 = 0 \pmod{p}$

מכיוון ש-  $p$  ו-  $q$  זרים אז

$$x^{ab-1} - 1 = 0 \pmod{(pq)}.$$

לפיכך

$$x^{ab-1} = 1 \pmod{(pq)}.$$

נכפיל ב-  $x$  ונקבל

$$(x^a)^b = x \pmod{(pq)}.$$

ז"א הוכחנו כי לכל טקסט גליי  $x$ , אם נצפין אותו וואז אחר כך נפענה את הטקסט מוצפן המתקבל מאלגוריתם RSA, קיבל אותו טקסט גליי המקורי בחזרה.

### הגדרה 5.2 אלגוריתם RSA

#### שלב הרכבת המפתח

נניח שאليس ( $A$ ) שולחת הודעה לבוב ( $B$ ).

[1]  $B$  יוצר שני מספרים ראשוניים גדולים שונים,  $p$  ו-  $q$  בסדר גודל של 100 ספרות דצמליות.

[2]  $B$  מחשב  $\phi(n) = (p-1)(q-1)$  ו-  $n = pq$

[3]  $B$  בוחר במספר שלם באופן מקרי  $(0 \leq b \leq \phi(n))$  כך ש-  $\gcd(b, \phi(n)) = 1$ .

[4]  $B$  מחשב  $a$  כך ש-  $a = b^{-1} \pmod{\phi(n)}$  בעזרת האלגוריתם של אוקלידס, (ראו כלל 1.12) ולכון  $.0 \leq a < \phi(n)$ .

[5]  $B$  שומר את המפתח הציבורי  $(n, b)$  בכתב קובץ ציבורי, ושומר על המפתח פענוח הפרטי  $(a, p, q)$  סודי.

בנייה מפתח עשוי פעם אחת.

### שלב הצפנה

[6] אליס ( $A$ ) קוראת את המפתח הצפנה ( הציבורי )  $k = (b, n)$  בכתב קובץ ציבורי.

[7] ב כדי להצפין הודעה  $x$ ,  $y = x^b \pmod{n}$  מחשבת  $n$  אליס ( $A$ )

[8]  $A$  שלוחת טקסט מוצפן ל-  $B$ .

[9] ב כדי לפענוח את הטקסט מוצפן  $y$ , בוב ( $B$ ) משתמש במפתח הפרטי שלו  $k^{-1} = (a, p, q)$ ,

$$x = y^a \pmod{n}$$

## דוגמה 5.4

בוב בונה צופן RSA עם המפתח הציבורי  $(b = 47, p = 127, q = 191)$

א) חשבו את  $n$  ו-  $a$ .

ב) אליס קוראת את המפתח הציבורי  $(n, b)$  ומשתמש בה כדי להצפין את המסר 2468. מהי הטקסט מוצפן שהוא שלוחת לבוב?

ג) כעת בוב מפענח את הטקסט מוצפן שהוא קיבל מאليس בעזרת המפתח  $(a, p, q)$ . בדקו כי הפענוח של הטקסט מוצפן מסעיף ב' זהה לטקסט גלי אשר אליס שלחה.

**פתרונות:**

**סעיף א)**

$$n = pq = 191 \times 127 = 24257$$

$$\phi(n) = \phi(pq) = (p-1)(q-1) = 190 \times 126 = 23940 .$$

נשתמש באלגוריתם של אוקלידס:  $a = 47^{-1} \pmod{23940}$

שיטת 1

$$.a = 23940, b = 47$$

$$\begin{array}{ll} r_0 = a = 23940 , & r_1 = b = 47 , \\ s_0 = 1 , & s_1 = 0 , \\ t_0 = 0 , & t_1 = 1 . \end{array}$$

$q_1 = 509$	$t_2 = 0 - 509 \cdot 1 = -509$	$s_2 = 1 - 509 \cdot 0 = 1$	$r_2 = 23940 - 509 \cdot 47 = 17$	: $k = 1$ שלב 1
$q_2 = 2$	$t_3 = 1 - 2 \cdot (-509) = 1019$	$s_3 = 0 - 2 \cdot 1 = -2$	$r_3 = 47 - 2 \cdot 17 = 13$	: $k = 2$ שלב 2
$q_3 = 1$	$t_4 = -509 - 1 \cdot (1019) = -1528$	$s_4 = 1 - 1 \cdot (-2) = 3$	$r_4 = 17 - 1 \cdot 13 = 4$	: $k = 3$ שלב 3
$q_4 = 3$	$t_5 = 1019 - 3 \cdot (-1528) = 5603$	$s_5 = -2 - 3 \cdot (3) = -11$	$r_5 = 13 - 3 \cdot 4 = 1$	: $k = 4$ שלב 4
$q_5 = 4$	$t_6 = -1528 - 4 \cdot (5603) = -23940$	$s_6 = 3 - 4 \cdot (-11) = 47$	$r_6 = 4 - 4 \cdot 1 = 0$	: $k = 5$ שלב 5

$$\gcd(a, b) = r_5 = 1 , \quad x = s_5 = -11 , \quad y = t_5 = 5603 .$$

$$sa + tb = -11(23940) + 5603(47) = 1 .$$

מכאן

$$5603(47) = 1 + 11(23940) \Rightarrow 5603(47) = 1 \pmod{23940} \Rightarrow 47^{-1} = 5603 \pmod{23940} .$$

## שיטת 2

$$23940 = 509(47) + 17$$

$$47 = 2(17) + 13$$

$$17 = 13 + 4$$

$$13 = 3(4) + 1$$

$$4 = 4(1) + 0 .$$

$$1 = 13 - 3(4)$$

$$= 13 - 3(17 - 13)$$

$$= 4(13) - 3(17)$$

$$= 4(47 - 2(17)) - 3(17)$$

$$= 4(47) - 11(17)$$

$$= 4(47) - 11(23940 - 509(47))$$

$$= 5603(47) - 11(23940)$$

$$\text{לכן } a^{-1} = 5603$$

**סעיף ב)** אליס שולחת את הודעה  $2468^{47} \pmod{24257}$ . כדי לחשב זה משתמש בשיטת ריבועים:

$$47 = 32 + 8 + 4 + 2 + 1$$

$$(2468)^2 \equiv 2517 \pmod{24257}$$

$$(2468)^4 \equiv (2517)^2 \equiv 4212 \pmod{24257}$$

$$(2468)^8 \equiv (4212)^2 \equiv 9077 \pmod{24257}$$

$$(2468)^{16} \equiv (9077)^2 \equiv 15157 \pmod{24257}$$

$$(2468)^{32} \equiv (15157)^2 \equiv 20859 \pmod{24257}$$

לכן

$$\begin{aligned} 246847 &= (2468)^{32} \times (2468)^8 \times (2468)^4 \times (2468)^2 \times 2468 \pmod{24257} \\ &= 20859 \times 9077 \times 4212 \times 2517 \times 2468 \pmod{24257} \\ &= 10642 \pmod{24257}. \end{aligned}$$

לכן הtekסט מוצפן הוא  $y = 10642$ סעיף ג)  $y = 10642$ 

$$y \pmod{p} = 10642 \pmod{127} = 101, \quad a \pmod{(p-1)} = 5603 \pmod{126} = 59.$$

לכן

$$\begin{aligned} x_1 &= (y \pmod{p})^a \pmod{(p-1)} \pmod{p} = 101^{59} \pmod{127} = 55 \\ (\text{ניתן לחשב זה לפי}) \quad &101^{32} \times 101^{16} \times 101^8 \times 101^2 \times 101 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (101)^2 &\equiv 41 \pmod{127} \\ (101)^4 \equiv (41)^2 &\pmod{127} \equiv 30 \pmod{127} \\ (101)^8 \equiv (30)^2 &\pmod{127} \equiv 11 \pmod{127} \\ (101)^{16} \equiv (11)^2 &\pmod{127} \equiv 121 \pmod{127} \\ (101)^{32} \equiv (121)^2 &\pmod{127} \equiv 36 \pmod{127} \end{aligned}$$

לכן

$$101^{59} \pmod{127} = (101)(41)(11)(121)(36) \pmod{127} = 55.$$

$$y \pmod{q} = 10642 \pmod{191} = 137, \quad a \pmod{(p-1)} = 5603 \pmod{190} = 93.$$

לכן

$$\begin{aligned} x_2 &= (y \pmod{q})^a \pmod{(q-1)} \pmod{q} = 137^{93} \pmod{191} = 176 \\ (\text{ניתן לחשב זה לפי}) \quad &137^{64} \times 137^{16} \times 137^8 \times 137^4 \times 137 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (137)^2 &\equiv 51 \pmod{191} \\ (137)^4 \equiv (51)^2 &\pmod{191} \equiv 118 \pmod{191} \\ (137)^8 \equiv (118)^2 &\pmod{191} \equiv 172 \pmod{191} \\ (137)^{16} \equiv (172)^2 &\pmod{191} \equiv 170 \pmod{191} \\ (137)^{32} \equiv (170)^2 &\pmod{191} \equiv 59 \pmod{191} \\ (137)^{64} \equiv (59)^2 &\pmod{191} \equiv 43 \pmod{191} \end{aligned}$$

לכן

$$137^{93} \pmod{191} = (137)(118)(172)(170)(43) \pmod{191} = 176.$$

בנוסח

$$y \pmod{q} = 9625 \pmod{127} = 100, \quad a \pmod{(q-1)} = 5603 \pmod{126} = 59.$$

לכן

$$x_2 = (y \pmod{q})^a \pmod{(q-1)} \pmod{q} = 100^{59} \pmod{127} = 87$$

לכן עליינו לפתור את המערכת

$$\begin{aligned} x &= x_1 \pmod{p} = 55 \pmod{127} \\ x &= x_2 \pmod{q} = 176 \pmod{191} \end{aligned}$$

בעזרת המשפט השאריות הסיני. נסמן

$$M = m_1 m_2 = (191)(127) = 24257, \quad M_1 = \frac{M}{m_1} = 191, \quad M_2 = \frac{M}{m_2} = 127.$$

כעת נחשב  $y_2 = M_2^{-1} \pmod{m_2} = 127^{-1} \pmod{191}$  ו-  $y_1 = M_1^{-1} \pmod{m_1} = 191^{-1} \pmod{127}$

### שיטת 1

$$a = 191, b = 127$$

$$\begin{aligned} r_0 &= a = 191, & r_1 &= b = 127, \\ s_0 &= 1, & s_1 &= 0, \\ t_0 &= 0, & t_1 &= 1. \end{aligned}$$

$q_1 = 1$	$t_2 = 0 - 1 \cdot 1 = -1$	$s_2 = 1 - 1 \cdot 0 = 1$	$r_2 = 191 - 1 \cdot 127 = 64$	: $k = 1$ שלב
$q_2 = 1$	$t_3 = 1 - 1 \cdot (-1) = 2$	$s_3 = 0 - 1 \cdot 1 = -1$	$r_3 = 127 - 1 \cdot 64 = 63$	: $k = 2$ שלב
$q_3 = 1$	$t_4 = -1 - 1 \cdot (2) = -3$	$s_4 = 1 - 1 \cdot (-1) = 2$	$r_4 = 64 - 1 \cdot 63 = 1$	: $k = 3$ שלב
$q_4 = 63$	$t_5 = 2 - 63 \cdot (-3) = 191$	$s_5 = -1 - 63 \cdot (2) = -127$	$r_5 = 63 - 63 \cdot 1 = 0$	: $k = 4$ שלב

$$\gcd(a, b) = r_4 = 1, \quad s = s_4 = 2, \quad t = t_4 = -3.$$

$$sa + tb = 2(191) - 3(127) = 1.$$

לכן

$$\begin{aligned} 191^{-1} &\equiv 2 \pmod{127} \\ 127^{-1} &\equiv (-3) \pmod{191} \equiv 188 \pmod{191}. \end{aligned}$$

### שיטת 2

נחשב  $127 \pmod{191}$  ו-  $y_2 = 127^{-1} \pmod{191}$  ו-  $y_1 = 191^{-1} \pmod{127}$  בעזרת האלגוריתם של אוקליד:

$$\begin{aligned} 191 &= 127 \cdot 1 + 64 \\ 127 &= 64 \cdot 1 + 63 \\ 64 &= 63 \cdot 1 + 1 \\ 63 &= 1 \cdot 63 + 0. \end{aligned}$$

$$\text{לכן } \gcd(191, 127) = 1$$

$$\begin{aligned}
 1 &= 64 - 63 \cdot 1 \\
 &= 64 - (127 - 64 \cdot 1) \\
 &= 64 \cdot 2 - 127 \cdot 1 \\
 &= (191 - 127 \cdot 1) \cdot 2 - 127 \\
 &= 191 \cdot 2 + 127 \cdot (-3).
 \end{aligned}$$

לכן

$$\begin{aligned}
 y_1 &= M_1^{-1} \pmod{m_1} = 127^{-1} \pmod{191} \equiv 188 \pmod{191} \\
 y_2 &= M_2^{-1} \pmod{m_2} = 191^{-1} \pmod{127} \equiv 2 \pmod{127}.
 \end{aligned}$$

נחשב

$$y_1 = M_1^{-1} \pmod{m_1} = 127^{-1} \pmod{191} = 188, \quad y_2 = M_2^{-1} \pmod{m_2} = 191^{-1} \pmod{127} = 2.$$

לכן

$$\begin{aligned}
 y &= a_1 M_1 y_1 + a_2 M_2 y_2 \\
 &= 55(191)(2) + 176(127)(188) \pmod{24257} \\
 &= 4223186 \pmod{24257} \\
 &= 2468.
 \end{aligned}$$

**משפט 5.13**

יהיו  $p, q$  מספרים ראשוניים ויהי  $n = pq$ . יהיו

$$\lambda(n) = \frac{(p-1)(q-1)}{\gcd(p-1, q-1)}.$$

נגיד צוף חדש אשר זהה RSA לא  $\phi(n)$  הוחלף עם  $\lambda(n)$  כך ש- RSA. איזי הקrifpto-  
מערכת ניתנת לפענה.

**הוכחה:****שלב 1)** רושמים את הצופן:

$$\left. \begin{array}{l} e_k(x) = x^b \pmod{n} \\ d_k(y) = y^a \pmod{n} \end{array} \right\} \quad n = pq, \quad ab \equiv 1 \pmod{\lambda(n)}.$$

**שלב 2)** נתון כי  $(1-d) \cdot d = \gcd(p-1, q-1)$ . ז"א שקיימים  $p'$  שלם כך ש-

$$p-1 = p'd \Leftrightarrow \frac{p-1}{d} = p' \Leftrightarrow d = \frac{p-1}{p'}.$$
 (#1)

באותה מידה קיימים  $q'$  שלם כך ש-

$$q-1 = q'd \Leftrightarrow \frac{q-1}{d} = q' \Leftrightarrow d = \frac{q-1}{q'}.$$
 (#2)

**שלב 3)**

$$\lambda(n) = \frac{(p-1)(q-1)}{\gcd(p-1, q-1)} = \frac{(p-1)(q-1)}{d}.$$

$$\lambda(n) \stackrel{(\#1)}{=} \frac{(p-1)(q-1)}{\binom{p-1}{p'}} = p'(q-1) . \Leftrightarrow d = \frac{p-1}{p'} . \quad (1*)$$

$$\lambda(n) \stackrel{(\#2)}{=} \frac{(p-1)(q-1)}{\binom{q-1}{q'}} = q'(p-1) . \Leftrightarrow d = \frac{p-1}{p'} . \quad (2*)$$

**שלב 4)** נתנו  $ab \equiv 1 \pmod{\lambda(n)}$  לכן קיים  $t$  שולם כך ש-

$$ab = 1 + t\lambda(n) \stackrel{(2*)}{=} 1 + t(p-1)q' .$$

לכן  

$$ab - 1 = t(p-1)q' .$$

מכאן  

$$x^{ab-1}x^{tq'(p-1)} = y^{p-1} \stackrel{\text{פרמי}}{\equiv} 1 \pmod{p}$$

כאשר  $y = x^{tq'}$  והשווינו השני מתקיים בغالל ש-  $p$  מספר ראשוני. לפיכך

$$x^{ab-1} \equiv 1 \pmod{p} .$$

**שלב 5)** נתנו  $ab \equiv 1 \pmod{\lambda(n)}$  לכן קיים  $t$  שולם כך ש-

$$ab = 1 + t\lambda(n) \stackrel{(1*)}{=} 1 + t(q-1)p' .$$

לכן  

$$ab - 1 = t(q-1)p' .$$

מכאן  

$$x^{ab-1}x^{tp'(q-1)} = z^{q-1} \stackrel{\text{פרמי}}{\equiv} 1 \pmod{q}$$

כאשר  $z = x^{tp'}$  והשווינו השני מתקיים בغالל ש-  $q$  מספר ראשוני. לפיכך

$$x^{ab-1} \equiv 1 \pmod{q} .$$

**שלב 6)** מכיוון ש-  $q, p$  ראשוניים אז

$$\left. \begin{array}{l} x^{ab-1} \equiv 1 \pmod{q} \\ x^{ab-1} \equiv 1 \pmod{p} \end{array} \right\} \Rightarrow x^{ab-1} \equiv 1 \pmod{pq}$$

לפיכך  

$$x^{ab-1} \equiv 1 \pmod{n} \Rightarrow (x^b)^a \equiv x \pmod{n}$$

כנדרש.

