

שיעור 1

תורת המספרים

1.1 הגדרות בסיסיות

1.1 הגדרה

יהיו a, b מספרים שלמים. אומרים כי b מחלק את a אם קיים מספר שלם q כך ש-

$$a = qb.$$

כלומר $\frac{a}{b}$ שווה למספר שלם q .

הסימון $a \mid b$ אומר כי b מחלק את a .

1.1 דוגמה

א) $3 \mid 6$ בגלל שקיים מספר שלם $q = 2$ כך ש- $6 = 3q$.

ב) $7 \nmid 42$ בגלל שקיים מספר שלם $q = 6$ כך ש- $42 = 7q$.

ג) $5 \nmid 8$ בגלל שלא קיים מספר שלם q כך ש- $8 = 5q$.

1.2 הגדרה יחס שקילות בין a ל- b

נניח כי $a, b \in \mathbb{Z}$ מספרים שלמים ו- m מספר שלם חיובי. היחס

$$a \equiv b \pmod{m}$$

אומר כי m מחלק את ההפרש $a - b$, כלומר $m \mid a - b$.

בנסוח שקול, $a \equiv b \pmod{m}$ אם קיים שלם q כך ש- $a = qm + b$.

לעתים אומרים כי " a שקול ל- b מודולו m ".

1.2 דוגמה

הוכיחו כי

$$5 \equiv 2 \pmod{3} \quad \text{א}$$

$$43 \equiv 23 \pmod{10} \quad \text{ב}$$

$$7 \not\equiv 2 \pmod{4} \quad \text{ג}$$

פתרון:

(א)

$$5 - 2 = 3 = 1 \cdot 3 \Rightarrow 3 \mid 5 - 2 \Rightarrow 5 \equiv 2 \pmod{3}.$$

(ב)

$$43 - 23 = 20 = 2 \cdot 10 \Rightarrow 10 \mid 43 - 23 \Rightarrow 43 \equiv 23 \pmod{10}.$$

$$7 - 2 = 5 \quad (ג)$$

לא קיים שלם q כך ש- $7 - 2 = 4q$ לכן $7 - 2 \nmid 4$

$$7 \not\equiv 2 \pmod{4}.$$

הגדרה 1.3 השארית

נתונים מספרים שלמים $a, b \in \mathbb{Z}$, היחס

$$a \% b$$

מציין את השארית בחלוקת a ב- b .

דוגמה 1.3

$$43 \% 10 = 3.$$

$$13 \% 4 = 1.$$

$$8 \% 2 = 0.$$

$$-10 \% 3 = -1.$$

משפט 1.1 משפט החילוק של אוקלידס

יהיו a, b מספרים שלמים $b \neq 0$. קיימים מספרים שלמים q, r יחידים כך ש-

$$a = qb + r$$

כאשר $0 \leq r < |b|$.

• b נקרא ה מודולו,

• q נקראת המנה

• ואילו r נקרא השארית.

שימו לב: $r = a \% b$.

דוגמה 1.4

עבור המספרים $a = 46, b = 8$ מצאו את הפירוק האוקלידי $a = bq + r$.

פתרון:

עבור $b = 8$ ו- $a = 46$ מתקיים

$$46 = 8 \cdot 5 + 6 \Rightarrow q = 5, r = 6.$$

1.5 דוגמה

עבור $b = 8$ ו- $a = -46$ מתקיים

$$-46 = 8 \cdot (-6) + 2 \Rightarrow q = -6, r = 2.$$

משפט 1.2 נוסחת השארית

נתונים $a, b > 0$ מספר שלמים.

$$a \% b = a - b \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor \quad (\text{א})$$

$$(-a) \% b = b - (a \% b) = b \left\lceil \frac{a}{b} \right\rceil - a \quad (\text{ב})$$

הוכחה:

(א) לפי משפט החילוק של אוקלידס 1.1, קיימים שלמים q, r כך ש-

$$a = qb + r \quad (*)1$$

כאשר $0 \leq r < b$ ו- $r = a \% b$. נחלק ב- b ונקבל

$$\frac{a}{b} = q + \frac{r}{b} \quad (*)2$$

נשים לב כי $0 < \frac{r}{b} < 1$, לכן לפי (*)2

$$\left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor = q.$$

נציב זה ב- (*)1 ונקבל

$$a = \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor b + r \Rightarrow r = a - b \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor. \quad (*)3$$

(ב) לפי משפט החילוק של אוקלידס 1.1, קיימים שלמים q', r' כך ש-

$$-a = q'b + r'$$

כאשר $r' = (-a) \% b$ מכאן

$$a = -q'b - r' = -q'b - b + b - r' = -(q' + 1)b + (b - r'). \quad (*)4$$

נשים לב כי $b - r' \geq 0$. אבל לפי (*)1 כאשר $r = a \% b$ ו- r יחיד. לכן

$$r = b - r' \Rightarrow r' = b - r \stackrel{(*)3}{=} b - a + b \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor = b - \left(a - b \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor \right) = b - (a \% b). \quad (*)5$$

לכן $r' = (-a) \% b = b - (a \% b)$

הזהות השני מנובע מ- (*)5:

$$r = b - r' \Rightarrow r' = b - r \stackrel{(*)3}{=} b - a + b \left\lfloor \frac{a}{b} \right\rfloor - a + \left\lceil \frac{a}{b} \right\rceil.$$

לכן $r' = (-a) \% b = -a + \left\lceil \frac{a}{b} \right\rceil$

דוגמה 1.6

מצאו את $101 \% 7$.

פתרון:

$$b = 7, a = 101$$

$$101 \% 7 = 101 - 7 \left\lfloor \frac{101}{7} \right\rfloor = 101 - 7(14) = 3 .$$

דוגמה 1.7

מצאו את $-101 \% 7$.

פתרון:

$b = 7, -a = -101$. נשתמש בנוסחה $(-a) \% b = b - (a \% b)$. מדוגמה הקודמת: $(101 \% 7) = 3$ לפיכך

$$(-101) \% 7 = 7 - (101 \% 7) = 7 - 3 = 4 .$$

הגדרה 1.4 המחלק המשותף הגדול ביותר gcd

נתונים שני מספרים שלמים $a, b > 0$. המחלק המשותף הגדול ביותר של a ו- b מסומן $\gcd(a, b)$ (greatest common divisor) ומוגדר להיות המספר שלם הגדול ביותר שמחלק גם a וגם b .

דוגמה 1.8

$$\gcd(2, 6) = 2 ,$$

$$\gcd(3, 6) = 3 ,$$

$$\gcd(24, 5) = 1 ,$$

$$\gcd(20, 10) = 10 ,$$

$$\gcd(14, 12) = 2 ,$$

$$\gcd(8, 12) = 4 .$$

הגדרה 1.5 כפולה משותפת קטנה ביותר

נתונים שני מספרים שלמים $a, b > 0$. הכפולה המשותפת הקטנה ביותר מסומן $\text{lcm}(a, b)$ (lowest common multiple) ומוגדר להיות המספר השלם החיובי הקטן ביותר ש a ו- b מחלקים אותו.

דוגמה 1.9

$$\text{lcm}(6, 21) = 42 ,$$

$$\text{lcm}(3, 6) = 6 ,$$

$$\text{lcm}(24, 5) = 120 ,$$

$$\text{lcm}(20, 10) = 20 ,$$

$$\text{lcm}(14, 12) = 84 ,$$

$$\text{lcm}(8, 12) = 24 .$$

הגדרה 1.6 מספרים זרים

נניח כי $a \geq 1$ ו- $b \geq 2$ מספרים שלמים. אומרים כי a ו- b **מספרים זרים** אם

$$\gcd(a, b) = 1 .$$

במילים פשוטות, שני מספרים שלמים נקראים **מספרים זרים** אם המחלק המשותף המקסימלי שלהם הוא 1, כלומר, אין אף מספר גדול מאחת שמחלק את שניהם.

משפט 1.3 משפט הפירוק לראשוניים

המשפט היסודי של האריתמטיקה או **משפט הפירוק לראשוניים** קובע כי כל מספר טבעי ניתן לרשום כמכפלה יחידה של מספרים ראשוניים. ז"א, יהי $a \in \mathbb{N}$ כל מספר טבעי. אז

$$a = p_1^{e_1} \times p_2^{e_2} \times \cdots \times p_n^{e_n} .$$

כאשר p_1, \dots, p_n מספרים ראשוניים ו- $e_1, \dots, e_n \in \mathbb{N}$, והפירוק הזה יחיד.

דוגמה 1.10

$$60 = 2^2 \times 3^2 \times 5 ,$$

דוגמה 1.11

$$98 = 2^1 \times 7^2 .$$

הגדרה 1.7 פונקציית אוילר

יהי m מספר שלם.

הפונקציית אוילר מסומנת ב- $\phi(m)$ ומוגדרת להיות השלמים שקטנים ממש מ- m וזרים ביחס ל- m .

$$\phi(m) := \{a \in \mathbb{N} \mid \gcd(a, m) = 1, a < m\} .$$

דוגמה 1.12

מכיוון ש- $26 = 2 \times 13$, הערכים של a עבורם $\gcd(a, 26) = 1$ הם
 $\{1, 3, 5, 7, 9, 11, 15, 17, 19, 21, 23, 25\}$.

ז"א יש בדיוק 12 ערכים של a עבורם $\gcd(a, 26) = 1$.

$$\phi(26) = 12.$$

משפט 1.4 הפירוק לראשוניים של פונקציית אוילר

נתון מספר טבעי m . נניח כי הפירוק למספרים ראשוניים שלו הוא

$$m = \prod_{i=1}^n p_i^{e_i},$$

כאשר p_i מספרים ראשוניים שונים ו- $e_i > 0$ מספרים שלמים ו- $1 \leq i \leq n$. אז

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

דוגמה 1.13

מצאו את $\phi(60)$.

פתרון:

$$60 = 2^2 \times 3^1 \times 5^1 \text{ לכן}$$

$$\phi(60) = (2^2 - 2^1) (3^1 - 3^0) (5^1 - 5^0) = (2)(2)(4) = 16.$$

משפט 1.5 שיטה לחישוב gcd

נתונים השלמים a, b כך שהפירוק לראשוניים שלהם הם:

$$a = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \dots p_k^{e_k}, \quad b = p_1^{f_1} p_2^{f_2} \dots p_n^{f_n}$$

וללא הגבלה כלליות נניח כי $k \leq n$. אז ה- \gcd נתון על ידי

$$\gcd(a, b) = p_1^{\min(e_1, f_1)} p_2^{\min(e_2, f_2)} \dots p_k^{\min(e_k, f_k)}$$

הוכחה:

דוגמה 1.14

מצאו את $\gcd(19200, 320)$.

פתרון:

$$19200 = 2^8 3^1 5^2, \quad 320 = 2^6 5^1 = 2^6 3^0 5^1.$$

$$\gcd(19200, 320) = 2^{\min(8,6)} 3^{\min(1,0)} 5^{\min(2,1)} = 2^6 3^0 5^1 = 320.$$

דוגמה 1.15

מצאו את $\gcd(154, 36)$.

פתרון:

$$154 = 2^1 7^1 11^1, \quad 36 = 2^2 3^2.$$

ז"א

$$154 = 2^1 3^0 7^1 11^1, \quad 36 = 2^2 3^2 7^0 11^0.$$

$$\gcd(154, 36) = 2^{\min(1,2)} 3^{\min(0,2)} 7^{\min(1,0)} 11^{\min(1,0)} = 2^1 3^0 7^0 11^0 = 2.$$

משפט 1.6 שיטה לחישוב lcm

נתונים השלמים a, b כך שהפירוק לראשוניים שלהם הם:

$$a = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \dots p_k^{e_k}, \quad b = p_1^{f_1} p_2^{f_2} \dots p_n^{f_n}$$

וללא הגבלה כלליות נניח כי $k \leq n$. אז ה- lcm נתון על ידי

$$\text{lcm}(a, b) = p_1^{\max(e_1, f_1)} p_2^{\max(e_2, f_2)} \dots p_k^{\max(e_k, f_k)}$$

הוכחה:

משפט 1.7

$$\gcd(a, b) \text{lcm}(a, b) = ab.$$

הוכחה:

$$\min(a, b) + \max(a, b) = a + b.$$

1.2 האלגוריתם של אוקליד

משפט 1.8 האלגוריתם של אוקליד

יהיו a, b משפרים שלמים חיוביים ($a, b \in \mathbb{Z}, a > 0, b > 0$). קיים אלגוריתם אשר נותן את $d = \gcd(a, b)$. האלגוריתם הינו מתואר להלן. נגדיר

$$r_0 = a, \quad r_1 = b.$$

לפי משפט החילוק 1.1 קיימים שלמים q_1 ו- $0 \leq r_2 < |b|$ עבורם $a = bq_1 + r_2$ כלומר

$$r_0 = r_1q_1 + r_2.$$

באותה מידה, לפי משפט החילוק קיימים שלמים q_2 ו- $0 \leq r_3 < |r_2|$ עבורם

$$r_1 = r_2q_2 + r_3.$$

התהליך ממשיך עד שנקבל $r_{n+1} = 0$ בשלב ה- n -ית.

$$0 \leq r_2 < |b| \quad a = bq_1 + r_2 \quad \text{שלב } k=1$$

$$0 \leq r_3 < |r_2| \quad b = r_2q_2 + r_3 \quad \text{שלב } k=2$$

$$0 \leq r_4 < |r_3| \quad r_2 = r_3q_3 + r_4 \quad \text{שלב } k=3$$

\vdots

$$0 \leq r_n < |r_{n-1}| \quad r_{n-2} = r_{n-1}q_{n-1} + r_n \quad \text{שלב } k=n-1$$

$$r_{n+1} = 0 \quad r_{n-1} = r_nq_n \quad \text{שלב } k=n$$

התהליך מסתיים בשלב ה- n -ית אם $r_{n+1} = 0$ ואז

$$r_n = \gcd(a, b).$$

דוגמה 1.16

מצאו את ה- $\gcd(1071, 462)$.

פתרון:

$$a = 1071, b = 462$$

נגדיר $r_0 = a = 1071$ ו- $r_1 = b = 462$.

נבצע את האלגוריתם $r_{k-1} = q_k r_k + r_{k+1}$ עד השלב ה- n -ית שבו $r_{n+1} = 0$.

שלב		q_k	r_{k+1}
$k=1$	$1071 = 2 \cdot 462 + 147$	$q_1 = 2$	$r_2 = 147$
$k=2$	$462 = 3 \cdot 147 + 21$	$q_2 = 3$	$r_3 = 21$
$k=3$	$147 = 7 \cdot 21 + 0$	$q_3 = 7$	$r_4 = 0$

לפיכך $\gcd(1071, 462) = r_3 = 21$.

דוגמה 1.17

מצאו את $\gcd(26, 11)$.

פתרון:

$$a = 26, b = 11$$

נגדיר $r_0 = a = 26$ ו- $r_1 = b = 11$.

נבצע את האלגוריתם $r_{k-1} = q_k r_k + r_{k+1}$ עד השלב ה- n -ית שבו $r_{n+1} = 0$.

שלב		q_k	r_{k+1}
$k = 1$	$26 = 2 \cdot 11 + 4$	$q_1 = 2$	$r_2 = 4$
$k = 2$	$11 = 2 \cdot 4 + 3$	$q_2 = 2$	$r_3 = 3$
$k = 3$	$4 = 1 \cdot 3 + 1$	$q_3 = 1$	$r_4 = 1$
$k = 4$	$3 = 3 \cdot 1 + 0$	$q_4 = 3$	$r_5 = 0$

לכן $\gcd(26, 11) = r_4 = 1$.

משפט 1.9 משפט בזו (Bezout's identity)

יהיו a, b שלמים ויהי $d = \gcd(a, b)$. קיימים שלמים s, t כך שניתן לרשום ה- $\gcd(a, b)$ כצירוף לינארי של a ו- b :

$$sa + tb = d.$$

משפט 1.10 האלגוריתם של אוקליד המוכלל (שיטה 1)

יהיו a, b שלמים חיוביים. קיים אלגוריתם אשר נותן שלמים s, t עבורם

$$d = sa + tb$$

כאשר $d = \gcd(a, b)$, כמפורט להלן.

מגדירים את הפרמטרים ההתחלתיים:

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

אז מבצעים את השלבים הבאים:

$(0 \leq r_2 < r_1)$	$t_2 = t_0 - q_1 t_1$	$s_2 = s_0 - q_1 s_1$	$r_2 = r_0 - q_1 r_1$	שלב 1:
$(0 \leq r_3 < r_2)$	$t_3 = t_1 - q_2 t_2$	$s_3 = s_1 - q_2 s_2$	$r_3 = r_1 - q_2 r_2$	שלב 2:
				\vdots
$(0 \leq r_{k+1} < r_k)$	$t_{k+1} = t_{k-1} - q_k t_k$	$s_{k+1} = s_{k-1} - q_k s_k$	$r_{k+1} = r_{k-1} - q_k r_k$	שלב k:
				\vdots
$(0 \leq r_n < r_{n-1})$	$t_n = t_{n-2} - q_{n-1} t_{n-1}$	$s_n = s_{n-2} - q_{n-1} s_{n-1}$	$r_n = r_{n-2} - q_{n-1} r_{n-1}$	שלב n-1:
			$r_{n+1} = 0$	שלב n:

$$d = \gcd(a, b) = r_n, \quad s = s_n, \quad t = t_n.$$

דוגמה 1.18 (אלגוריתם איוקליד המוכלל)

מצאו את $d = \gcd(240, 46)$ ומצאו שלמים s, t עבורם $d = 240s + 46t$.

פתרון:

פתרון לדוגמה 1.18 עם השיטה במשפט 1.10 של האלגוריתם איוקליד המוכלל

$$a = 240, b = 46$$

$$\begin{aligned} r_0 &= a = 240, & r_1 &= b = 46, \\ s_0 &= 1, & s_1 &= 0, \\ t_0 &= 0, & t_1 &= 1. \end{aligned}$$

$q_1 = 5$	$t_2 = 0 - 5 \cdot 1 = -5$	$s_2 = 1 - 5 \cdot 0 = 1$	$r_2 = 240 - 5 \cdot 46 = 10$	שלב k=1:
$q_2 = 4$	$t_3 = 1 - 4 \cdot (-5) = 21$	$s_3 = 0 - 4 \cdot 1 = -4$	$r_3 = 46 - 4 \cdot 10 = 6$	שלב k=2:
$q_3 = 1$	$t_4 = -5 - 1 \cdot (21) = -26$	$s_4 = 1 - 1 \cdot (-4) = 5$	$r_4 = 10 - 1 \cdot 6 = 4$	שלב k=3:
$q_4 = 1$	$t_5 = 21 - 1 \cdot (-26) = 47$	$s_5 = -4 - 1 \cdot 5 = -9$	$r_5 = 6 - 1 \cdot 4 = 2$	שלב k=4:
$q_5 = 2$	$t_6 = -26 - 2 \cdot (47) = -120$	$s_6 = 5 - 2 \cdot (-9) = 23$	$r_6 = 4 - 2 \cdot 2 = 0$	שלב k=5:

$$\gcd(a, b) = r_5 = 2, \quad s = s_5 = -9, \quad t = t_5 = 47.$$

$$ta + sb = -9(240) + 47(46) = 2.$$

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

פתרון לדוגמה 1.18 עם השיטה השניה של האלגוריתם איוקליד המוכלל

לשיטה הזאת יש 2 שלבים. בשלב הראשון מבצעים האלגוריתם של אוקליד במשפט 1.8.

$$\boxed{240} = 5 \cdot \boxed{46} + \boxed{10} \quad (*0)$$

$$\boxed{46} = 4 \cdot \boxed{10} + \boxed{6} \quad (*1)$$

$$\boxed{10} = 1 \cdot \boxed{6} + \boxed{4} \quad (*2)$$

$$\boxed{6} = 1 \cdot \boxed{4} + \boxed{2} \quad (*3)$$

$$\boxed{4} = 2 \cdot \boxed{2} + 0 \quad (*4)$$

לכן $d = \gcd(240, 46) = 2$.

בשלב השני רושמים 2 כצירוף לינארי של 240 ו-46 באמצעות המשוואות למעלה:

$$\boxed{2} = \boxed{6} - 1 \cdot \boxed{4} \quad \text{לפי } (*3)$$

$$= \boxed{6} - 1 \cdot (\boxed{10} - 1 \cdot \boxed{6}) \quad \text{לפי } (*2)$$

$$= 2 \cdot \boxed{6} - 1 \cdot \boxed{10}$$

$$= 2 \cdot (\boxed{46} - 4 \cdot \boxed{10}) - 1 \cdot \boxed{10} \quad \text{לפי } (*1)$$

$$= 2 \cdot \boxed{46} - 9 \cdot \boxed{10}$$

$$= 2 \cdot \boxed{46} - 9 \cdot (\boxed{240} - 5 \cdot \boxed{46}) \quad \text{לפי } (*0)$$

$$= 47 \cdot \boxed{46} - 9 \cdot \boxed{240}.$$

דוגמה 1.19 (אלגוריתם איוקליד המוכלל)

מצאו את $d = \gcd(326, 78)$ ומצאו שלמים s, t עבורם $d = 326s + 78t$.

פתרון:

פתרון לדוגמה 1.19 עם השיטה במשפט 1.10 של האלגוריתם איוקליד המוכלל

$$a = 326, b = 78$$

$$r_0 = a = 326, \quad r_1 = b = 78,$$

$$s_0 = 1, \quad s_1 = 0,$$

$$t_0 = 0, \quad t_1 = 1.$$

$q_1 = 4$	$t_2 = 0 - 4 \cdot 1 = -4$	$s_2 = 1 - 4 \cdot 0 = 1$	$r_2 = 326 - 4 \cdot 78 = 14$	שלב $k = 1$
$q_2 = 5$	$t_3 = 1 - 5 \cdot (-4) = 21$	$s_3 = 0 - 5 \cdot 1 = -5$	$r_3 = 78 - 5 \cdot 14 = 8$	שלב $k = 2$
$q_3 = 1$	$t_4 = -4 - 1 \cdot (21) = -25$	$s_4 = 1 - 1 \cdot (-5) = 6$	$r_4 = 14 - 1 \cdot 8 = 6$	שלב $k = 3$
$q_4 = 1$	$t_5 = 21 - 1 \cdot (-25) = 46$	$s_5 = -5 - 1 \cdot 6 = -11$	$r_5 = 8 - 1 \cdot 6 = 2$	שלב $k = 4$
$q_5 = 3$			$r_6 = 6 - 3 \cdot 2 = 0$	שלב $k = 5$

$$\gcd(a, b) = r_5 = 2, \quad s = s_5 = -11, \quad t = t_5 = 46.$$

$$sa + tb = -11(326) + 46(78) = 2.$$

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

פתרון לדוגמה 1.19 עם השיטה השניה של האלגוריתם איוקליד המוכלל

לשיטה הזאת יש 2 שלבים. בשלב הראשון מבצעים האלגוריתם של אוקליד במשפט 1.8.

$$\boxed{326} = 4 \cdot \boxed{78} + \boxed{14} \quad (*)0$$

$$\boxed{78} = 5 \cdot \boxed{14} + \boxed{8} \quad (*)1$$

$$\boxed{14} = 1 \cdot \boxed{8} + \boxed{6} \quad (*)2$$

$$\boxed{8} = 1 \cdot \boxed{6} + \boxed{2} \quad (*)3$$

$$\boxed{4} = 3 \cdot \boxed{2} + 0 \quad (*)4$$

$$d = \gcd(326, 78) = 2 \quad \text{לכן}$$

בשלב השני רושמים 2 כצירוף לינארי של 326 ו-78 באמצעות המשוואות למעלה:

$$\boxed{2} = \boxed{8} - 1 \cdot \boxed{6} \quad \text{לפי } (*)3$$

$$= \boxed{8} - 1 \cdot (\boxed{14} - 1 \cdot \boxed{8}) \quad \text{לפי } (*)2$$

$$= 2 \cdot \boxed{8} - 1 \cdot \boxed{14}$$

$$= 2 \cdot (\boxed{78} - 5 \cdot \boxed{14}) - 1 \cdot \boxed{14} \quad \text{לפי } (*)1$$

$$= 2 \cdot \boxed{78} - 11 \cdot \boxed{14}$$

$$= 2 \cdot \boxed{78} - 11 \cdot (\boxed{326} - 4 \cdot \boxed{78}) \quad \text{לפי } (*)0$$

$$= 46 \cdot \boxed{78} - 11 \cdot \boxed{326}.$$

1.3 משפטים של מספרים ראשוניים

משפט 1.11 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 שקיימים וקבוצה זו נוצרת סופי.

נגדיר השלם $M = (p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n) + 1$.

לפי משפט הפירוק לראשוניים (ראו משפט 1.3 למעלה או משפט 5.3 למטה) M הוא מספר ראשוני או שווה למכפלה של ראשוניים.

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

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

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

משפט 1.12 משפט הפירוק לראשוניים

(ראו משפט 1.3) לכל מספר שלם n קיימים שלמים e_i וראשוניים p_i כך ש-

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

הוכחה: אינדוקציה.

משפט 1.13 נוסחה לפונקציית אוילר

(ראו משפט 1.4) 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

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

דוגמה 1.20

חשבו את $\phi(24)$

פתרון:

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

לכן

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

משפט 1.14

אם p מספר ראשוני אז

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

הוכחה: תרגיל בית.

משפט 1.15

אם p מספר ראשוני אז

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

הוכחה: תרגיל בית.

משפט 1.16

אם s, t שלמים זרים (כלומר $\gcd(s, t) = 1$) אז

$$\phi(s \cdot t) = \phi(s) \cdot \phi(t) .$$

הוכחה: תרגיל בית.

משפט 1.17

אם p ו- q מספרים ראשוניים שונים אז

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

הוכחה: תרגיל בית.

משפט 1.18 המשפט הקטן של פרמה

אם p מספר ראשוני ו- $a \in \mathbb{Z}_p$ אז התנאים הבאים מתקיימים:

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

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

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

הוכחה:

טענה 1. נוכיח באינדוקציה.

בסיס:

עבור $a = 0$ הטענה $0^p \equiv 0 \pmod{p}$ מתקיימת.

מעבר:

נניח כי הטענה מתקיימת עבור a .

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

ההנחת האינדוקציה אומרת ש- $a^p \equiv a \pmod{p}$ לכן

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

כנדרש.

טענה 2. $\gcd(a, p) = 1$ לפיכך קיים איבר הופכי $a^{-1} \in \mathbb{Z}_p$. נכפיל ב- a^{-1} 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 1.19 משפט אוילראם a, n שלמים ו- $\gcd(a, n) = 1$ אז

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

משפט 1.20אם a, n שלמים ו- $\gcd(a, n) = 1$ אז

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

דוגמה 1.21חשבו את האיבר ההופכי ל-5 ב- \mathbb{Z}_{11} .**פתרון:**

לפי משפט פרמט 5.9:

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

לפי הנוסחת לשארית 1.2:

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

לכן $5^{-1} \in \mathbb{Z}_{11} = 9$.**1.4 משפט השאריות הסיני****משפט 1.21 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 שקילות

$$x = a_1 \pmod{m_1},$$

$$x = a_2 \pmod{m_2},$$

$$\vdots$$

$$x = a_r \pmod{m_r},$$

קיים פתרון יחיד מודולו $M = m_1 m_2 \dots m_r$ שניתן על ידי

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

כאשר $M_i = \frac{M}{m_i}$ ו- $y_i = M_i^{-1} \pmod{m_i}$ לכל $1 \leq i \leq r$.**דוגמה 1.22**

היעזרו במשפט השאריות הסיני כדי לפתור את המערכת

$$x = 22 \pmod{101},$$

$$x = 104 \pmod{113}.$$

פתרון:

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

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

בעזרת הקוד-פיתון modularinverse.py

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

$$x = 22 \cdot \left(\frac{101 \cdot 113}{101} \right).$$

-1

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

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

