

# פונקציות מרוכבות



## תוכן העניינים

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 1. מבוא למספרים מרוכבים        | (ללא ספר) |
| 2. טופולוגיה במישור המרוכב     | 1         |
| 3. פונקציות אלמנטריות          | 5         |
| 4. פונקציות אנליטיות           | 12        |
| 5. אינטגרציה מרוכבת            | 20        |
| 6. תכונות של פונקציות אנליטיות | 35        |
| 7. טורים                       | 45        |
| 8. נקודות סינגולריות           | 54        |
| 9. משפט השארית                 | 62        |
| 10. עקרון הארגומנט             | 81        |
| 11. העתקות מתקדמות             | 88        |
| 12. הלמה של שוורץ              | 93        |
| 13. שאלות מסכמות ברמת בחינה    | 96        |

# פונקציות מרוכבות

פרק 1 - מבוא למספרים מרוכבים

תוכן העניינים

1. מספרים מרוכבים ..... (ללא ספר)

# פונקציות מרוכבות

פרק 2 - טופולוגיה במישור המרוכב

תוכן העניינים

1. סדרות של מספרים מרוכבים.....1
2. מושגים טופולוגיים בסיסיים.....3

## סדרות של מספרים מרוכבים:

שאלות:

(1) נתון  $z_n = \frac{1}{n} + i \left( \frac{n-2}{n} \right)$ . חשב את הגבול  $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n$ .

(2) נתון  $z_n = \frac{n^2 + n + 1}{3n^2 + 2} + i \left( \frac{n-1}{2n} \right)$ . חשב את הגבול  $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n$ .

(3) נגדיר  $z_n = (i)^{2n} n^3$ . הוכיחו כי  $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = \infty$ .

(4) נגדיר  $z_n = \frac{i^n}{n}$ . הוכיחו כי  $\lim_{n \rightarrow \infty} |z_n| = 0$ .

(5) נתון  $z_n = \frac{(1+i)^n}{n}$ . חשב את הגבול  $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n$ .

(6) בדקו את התכנסות הסדרה  $z_n = n \cdot z^n$  כאשר  $z \in \mathbb{C}$ .

א. כאשר  $|z| \geq 1$ .

ב. כאשר  $0 < |z| < 1$ .

(7) נאמר כי סדרת מספרים מרוכבים  $z_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} L$  אם ורק אם  $\lim_{n \rightarrow \infty} |z_n - L| = 0$ .

הוכיחו כי אם  $z_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} z$  ו-  $w_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} w$  אזי  $z_n + w_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} z + w$ .

(8) בדקו האם הסדרות הבאות מתכנסות, אם כן חשבו את גבולן.

א.  $z_n = \frac{1+n}{1-2n} + \frac{n-10}{n^2} i$

ב.  $z_n = \cos(\pi n) + n \sin\left(\frac{1}{n}\right) i$

ג.  $z_n = \left(1 + \frac{2}{n}\right)^{-n} + \sqrt[n]{3^n + 4^n} \cdot i$

ד.  $z_n = \left(\frac{1 + \sqrt{3}i}{2}\right)$

## תשובות סופיות:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = i \quad (1)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = \frac{1}{3} + i \cdot \frac{1}{2} \quad (2)$$

(3) הוכחה.

(4) הוכחה.

(5)  $\infty$ (6) א.  $\infty$  ב. 0

(7) הוכחה.

(8) ראו סרטון.

## מושגים טופולוגיים בסיסיים:

### שאלות:

(1) שרטטו את הקבוצה  $|z-i| + |z+i| < 4$ .

א. האם היא פתוחה/סגורה?

ב. האם זה תחום?

ג. האם זה תחום פשוט קשר?

(2) שרטטו את הקבוצה, עבור  $a$  ממשי  $\operatorname{Re}\left[\frac{z-a}{z+a}\right] = 0$ .

א. האם היא פתוחה?

ב. האם זה תחום?

ג. האם זה תחום פשוט קשר?

(3) שרטטו את הקבוצה  $\operatorname{Im}\left[\frac{z-1}{z+1}\right] = 0$ .

א. האם היא פתוחה?

ב. האם זה תחום?

ג. האם זה תחום פשוט קשר?

(4) שרטטו את הקבוצה  $|z+i| = 2|z-i|$ .

א. האם היא פתוחה?

ב. האם זה תחום?

ג. האם זה תחום פשוט קשר?

(5) ענו על הסעיפים הבאים:

א. הראו כי  $|z \pm w|^2 = |z|^2 \pm 2\operatorname{Re}(z \cdot \bar{w}) + |w|^2$ .

ב. עבור  $z_1, z_2 \in \mathbb{C}$  ו- $\lambda > 0$  הראו כי המשוואה  $|z - z_1| = \lambda|z - z_2|$  מתארת ישר או מעגל.

**תשובות סופיות:**

- (1) ראו סרטון.
- (2) ראו סרטון.
- (3) ראו סרטון.
- (4) ראו סרטון.
- (5) ראו סרטון.



# פונקציות מרוכבות

## פרק 3 - פונקציות אלמנטריות

### תוכן העניינים

1. סינוס מרוכב..... 5
2. קוסינוס מרוכב..... 6
3. אקספוננט מרוכב..... 7
4. העתקות אלמנטריות..... 8
5. לוגריתם מרוכב, פונקציות רב-ערכיות ושורשים..... 9

## סינוס מרוכב:

### שאלות:

- (1) פתרו את המשוואה  $\sin(z) = 2$ .
- (2) הוכיחו כי  $\sin(z) = \sin(x + iy) = \sin(x)\cosh(y) + i\cos(x)\sinh(y)$ .
- (3) פתרו את המשוואה  $\sin(z) = 5$ .

### תשובות סופיות:

- (1) כל הפתרונות הם מהצורה הבאה:  $z_n = \frac{\pi}{2} + 2\pi n + i \ln(2 \pm \sqrt{3})$ , כאשר  $n$  מספר שלם.
- (2) הוכחה.
- (3)  $z_k = \frac{\pi}{2} + 2\pi k - i \ln(5 \pm 2\sqrt{6})$

## קוסינוס מרוכב:

### שאלות:

(1) הוכיחו כי  $\cos(z) = \cos(x + iy) = \cos(x) \cosh(y) - i \sin(x) \sinh(y)$ .

(2) פתרו את המשוואה  $\cos(z) = 2$ .

(3) האם  $|\cos(z)| \leq 1$  לכל  $z$ ?

(4) פתרו את המשוואה  $\cos(\pi z) + \frac{3}{4}i = 0$ .

(5) הוכיחו כי לכל  $z \in \mathbb{C}$  מתקיים  $|\cos(z)| \leq \frac{e^y + e^{-y}}{2}$  כאשר  $y = \operatorname{Im}(z)$ .

(6) פתרו את המשוואה  $\tan(z) = \frac{i}{3}$ .

### תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

(2)  $z_n = 2\pi n + i \ln(2 \pm \sqrt{3})$

(3) לא.

(4)  $z_k = -\frac{1}{2} + 2k - i \frac{1}{\pi} \ln(2)$

(5) הוכחה.

(6)  $z_k = \pi k + i \frac{1}{2} \ln(2)$

## אקספוננט מרוכב:

### שאלות:

- (1) פתרו את המשוואה  $e^z = -1$ .
- (2) הוכיחו כי לכל  $x$  ממשי מתקיים  $|e^{ix}| = 1$ .
- (3) ענו על הסעיפים הבאים:  
א. הראו כי אם  $\operatorname{Im}(z) \geq 0$  אז  $|e^{iz}| \leq 1$ .  
ב. הראו כי  $|e^z| = 1$  אם ורק אם  $\operatorname{Re}(z) = 0$ .
- (4) פתרו את המשוואה  $e^z = 1$ .
- (5) פתרו את המשוואה  $e^z = i$ .
- (6) פתרו את המשוואה  $e^z = 1 + i$ .
- (7) האם הפונקציה  $f(z) = e^z$  היא חח"ע?

### תשובות סופיות:

- (1)  $z = i \cdot \pi [2n + 1]$
- (2)  $\sqrt{\cos^2(x) + \sin^2(x)} = 1$
- (3) א.  $|e^{iz}| = e^{-y} = \frac{1}{e^y} \leq \frac{1}{e^0} = 1$ . ב. הוכחה.
- (4)  $z_k = 2\pi i k \quad k \in \mathbb{Z}$
- (5)  $z_k = i\pi \left( 2k + \frac{1}{2} \right) \quad k \in \mathbb{Z}$
- (6)  $z_k = \frac{1}{2} \ln(2) + i\pi \left( 2k + \frac{1}{4} \right) \quad k \in \mathbb{Z}$
- (7) לא.

## העתקות אלמנטריות:

### שאלות:

(1) מצאו את התמונה  $f(U)$  של התחום  $U = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$

תחת ההעתקה  $f(z) = z + 1$ .

(2) מצאו את התמונה  $f(U)$  של התחום  $U = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$

תחת ההעתקה  $f(z) = 5z$ .

(3) מצאו את התמונה  $f(U)$  של התחום  $U = \left\{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Arg}(z) = \frac{\pi}{4}\right\}$

תחת ההעתקה  $f(z) = z^3$ .

(4) מהי תמונת התחום  $A = \{z \in \mathbb{C} \mid 0 < \operatorname{Im}(z) < \pi\}$  תחת העתקה  $f(z) = e^z$ .

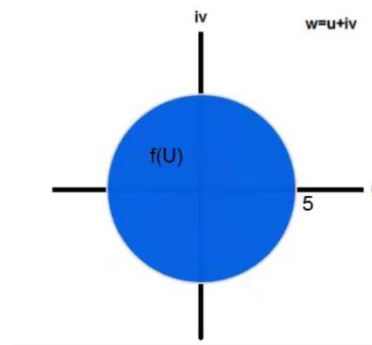
(5) מהי תמונת התחום  $A = \{z \in \mathbb{C} \mid 0 < \operatorname{Im}(z) < 2\pi\}$  תחת העתקה  $f(z) = e^z$ .

(6) מהי תמונת התחום  $A = \left\{z \in \mathbb{C} \mid -\infty < \operatorname{Re}(z) < 0, 0 < \operatorname{Im}(z) < \frac{\pi}{2}\right\}$  תחת העתקה  $f(z) = e^z$ .

### תשובות סופיות:

$$(1) |w-1| < 1$$

$$(2) w = u + iv$$



$$(3) \frac{3\pi}{4} \approx 135^\circ$$

$$(4) f(z) = e^x e^{iy} \equiv \operatorname{Re}^{i\alpha} \quad 0 < R < \infty \quad 0 < \alpha < \pi$$

$$(5) f(z) = e^x e^{iy} \equiv \operatorname{Re}^{i\alpha} \quad 0 < R < \infty \quad 0 < \alpha < 2\pi$$

$$(6) f(z) = e^x e^{iy} \equiv \operatorname{Re}^{i\alpha} \quad 0 < R < 1 \quad 0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$$

## לוגריתם מרוכב, פונקציות רב-ערכיות ושורשים:

### שאלות:

(1) חשבו את הגדלים הבאים :

א.  $\text{Arg}(1+i)$

ב.  $\text{Arg}\left(2e^{i\frac{3\pi}{2}}\right)$

(2) חשבו את הגדלים הבאים :

א.  $\text{Log}(1+i)$

ב.  $\text{Log}\left(2e^{i\frac{3\pi}{2}}\right)$

(3) מצאו את כל הערכים האפשריים של  $\sqrt{i}$ .

(4) מצאו את כל הערכים האפשריים של  $i^i$ .

(5) מצאו את כל הערכים האפשריים של  $2^{\frac{1}{9} + \frac{i}{50}}$ .

(6) חשבו את הערך  $(2+2i)^{5i}$  עבור 3 ענפים שונים לבחירתכם. כמה תשובות אפשריות יש לערך זה.

(7) מצאו את תמונת התחום  $A = \{z = re^{i\theta} \mid R_1 < r < R_2, -\pi < \theta < \pi\}$  תחת העתקה  $\text{Log}(z)$  (הענף הראשי של הלוג).

(8) מצאו תחום בו הפונקציה  $\log\left(\frac{z-a}{z-b}\right)$  אנליטית. כאשר  $a, b \in \mathbb{C}$ ,  $a \neq b$ .  
הערה: תרגיל זה דורש ידע בהעתקות מוביוס.

(9) הראו כי  $|a^z| = a^{\text{Re}(z)}$  עבור  $a$  ממשי חיובי בתחום  $\mathbb{C} \setminus (-\infty, 0)$  כאשר פונקציית החזקה מוגדרת ע"י ענף הראשי של הלוג, כלומר:  $a^z = e^{z \cdot \text{Log}(a)}$ .

**(10)** הוכיחו ישירות כי העתקה  $\sqrt{z}$  איננה רציפה בתחום  $\mathbb{C}$  אם מגדירים את  $\sqrt{z}$  באופן הבא:  $\sqrt{z} = \sqrt{r}e^{i\frac{\theta}{2}}$  כאשר  $z = re^{i\theta}$  ,  $\theta \in [0, 2\pi]$  .

**(11)** מצאו את כל הערכים האפשריים של  $\log(\log(-1))$  .

**(12)** נניח כי  $\log(z)$  זה ענף רציף של הלוגריתם בתחום  $\mathbb{C} \setminus \{z = x + iy, x \geq 0, y = \sin(x)\}$  ,  $\log(1) = 0$  , ונניח שבענף זה מתקיים  $\log(i)$  ,  $\log(-i)$  ,  $\log\left(\frac{5\pi}{2}\right)$  ,  $\log\left(\frac{3\pi}{2}\right)$  : חשבו בענף זה את הערכים:  $\log(-1)$  ,  $\log(i)$  ,  $\log(-i)$  ,  $\log\left(\frac{5\pi}{2}\right)$  ,  $\log\left(\frac{3\pi}{2}\right)$  .

**(13)** נגדיר  $\log_\alpha(z) = \ln|z| + i \cdot \arg(z)$  כאשר  $\alpha - 2\pi < \arg(z) \leq \alpha$  .  
 א. חשבו את הערכים:  $\log_{2\pi}(1)$  ,  $\log_\pi(1)$  ,  $\log_0(1)$  .  
 ב. מצאו את התמונה של  $\mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]$  תחת ההעתקה  $\log_\pi(z)$  .  
 ג. מצאו את התמונה של  $\mathbb{C} \setminus [0, \infty)$  תחת ההעתקה  $\log_0(z)$  .

**(14)** יהיו  $z_1, \dots, z_n$  מספרים מרוכבים כך ש-  $\operatorname{Re}(z_k) > 0$  לכל  $1 \leq k \leq n$  וגם  $\operatorname{Re}(z_1 \cdot z_2 \cdot \dots \cdot z_k) > 0$  לכל  $1 \leq k \leq n$  .  
 הוכיחו כי  $\operatorname{Log}(z_1 \cdot z_2 \cdot \dots \cdot z_n) = \operatorname{Log}(z_1) + \dots + \operatorname{Log}(z_n)$  , כאשר  $\operatorname{Log}(z)$  זה הענף הראשי של הלוגריתם.

**(15)** יהי  $U = \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]$  ויהי  $y > 0$  . חשבו את הגבול  $\lim_{y \rightarrow 0} [\log(a + iy) - \log(a - iy)]$  עבור  $a > 0$  ועבור  $a < 0$  .

**(16)** הוכיחו שלא קיים ענף אנליטי של  $\sqrt{z}$  ב-  $\mathbb{C}$  . כלומר, הראו שלא קיימת פונקציה אנליטית  $h(z)$  ב-  $\mathbb{C}$  כך ש-  $h^2(z) = z$  לכל  $z \in \mathbb{C}$  .

**(17)** הוכיחו שלא קיים ענף אנליטי של  $\sqrt[n]{z}$  ב-  $|z| < 1$  לכל  $n \geq 2$  .

**(18)** נניח כי  $f(z)$  ,  $g(z)$  הם שני ענפים אנליטיים של הלוג בקבוצה פתוחה וקשירה  $U$  . הוכיחו כי קיים קבוע  $k$  שלם כך ש-  $f(z) - g(z) = 2\pi i k$  לכל  $z \in U$  .

## תשובות סופיות:

$$(1) \quad \text{א. } \frac{\pi}{4} \quad \text{ב. } -\frac{\pi}{2}$$

$$(2) \quad \text{א. } \ln(\sqrt{2}) + i\frac{\pi}{4} \quad \text{ב. } \ln(2) - \frac{\pi}{2}$$

$$(3) \quad e^{\frac{\pi}{4}i}, k=0; \quad e^{\frac{5\pi}{4}i}, k=1$$

$$(4) \quad \left\{ e^{-\pi \frac{4k+1}{2}} \mid k \in \mathbb{Z} \right\}$$

$$(5) \quad \left\{ 2^{\frac{1}{9}} e^{-\frac{2\pi k}{50}} e^{i\left(\frac{\ln(2)}{50} + \frac{2\pi k}{9}\right)} \mid k \in \mathbb{Z} \right\}$$

$$(6) \quad \left\{ e^{-5 \cdot \frac{\pi}{4}} e^{i \cdot 5 \ln(\sqrt{8})}, e^{-5 \cdot \left(\frac{\pi}{4} + 2\pi\right)} e^{i \cdot 5 \ln(\sqrt{8})}, e^{-5 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - 2\pi\right)} e^{i \cdot 5 \ln(\sqrt{8})}, \dots \right\}$$

$$(7) \quad \ln(r) + i \cdot \theta$$

$$(8) \quad \frac{z-a}{z-b} \in \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0)$$

$$(9) \quad a^{\operatorname{Re}(z)}$$

$$(10) \quad \text{הוכחה.}$$

$$(11) \quad \ln(\pi + 2\pi k) + i \cdot \left( \frac{\pi}{2} + 2\pi m \right) \quad m \in \mathbb{Z}, k \geq 0$$

$$\ln(-\pi - 2\pi k) + i \cdot \left( -\frac{\pi}{2} + 2\pi m \right) \quad m \in \mathbb{Z}$$

$$(12) \quad -\pi i, -\frac{3\pi}{2}i, -\frac{\pi}{2}i, \ln\left(\frac{5\pi}{2}\right), \ln\left(\frac{3\pi}{2}\right) - 2\pi i$$

$$(13) \quad \text{א. } 2\pi i, 0, 0 \quad \text{ב. } \ln(r) + i\theta, \quad -\infty < \ln(r) < \infty, \quad \theta < r < \infty$$

$$\ln(r) + i\theta, \quad -\infty < \ln(r) < \infty, \quad 0 < \theta \leq 2\pi$$

$$(14) \quad \text{הוכחה.}$$

$$(15) \quad 2\pi i$$

$$(16) \quad \text{הוכחה.}$$

$$(17) \quad \text{הוכחה.}$$

$$(18) \quad \text{הוכחה.}$$



# פונקציות מרוכבות

## פרק 4 - פונקציות אנליטיות

### תוכן העניינים

|    |                                |
|----|--------------------------------|
| 12 | 1. פונקציות מרוכבות.....       |
| 13 | 2. גבולות מרוכבים ורציפות..... |
| 14 | 3. נגזרות מרוכבות.....         |
| 15 | 4. משוואות קושי-רימן.....      |
| 18 | 5. פונקציות הרמוניות.....      |

## פונקציות מרוכבות:

### שאלות:

- 1 רשמו את הפונקציה  $f(z) = z \cdot \operatorname{Re}(z)$  , בצורה  $f(z) = u(x, y) + i \cdot v(x, y)$ .
- 2 רשמו את הפונקציה  $f(z) = |z|^2$  , בצורה  $f(z) = u(x, y) + i \cdot v(x, y)$ .
- 3 רשמו את הפונקציה  $f(z) = 2|z|^2 + i(\bar{z})^2$  , בצורה  $f(z) = u(x, y) + i \cdot v(x, y)$ .
- 4 רשמו את הפונקציה  $f(z) = \frac{z}{1+|z|^2}$  , בצורה  $f(z) = u(x, y) + i \cdot v(x, y)$ .
- 5 רשמו את הפונקציה  $f(z) = z^2 + \bar{z}$  , בצורה  $f(z) = u(x, y) + i \cdot v(x, y)$ .
- 6 רשמו את הפונקציה  $f(x+iy) = \frac{x^3}{3} + i \cdot \left(-\frac{y^3}{3}\right)$  , בצורה  $f(z)$  , כאשר  $z = x+iy$ .

### תשובות סופיות:

- 1  $f(z) = x^2 + i \cdot xy$
- 2  $f(z) = x^2 + y^2 + i \cdot 0$
- 3  $f(z) = 2[x^2 + xy + y^2] + i(x^2 - y^2)$
- 4  $f(z) = \frac{x}{1+x^2+y^2} + i \cdot \frac{y}{1+x^2+y^2}$
- 5  $f(z) = x^2 + x - y^2 + i \cdot (2xy - y)$
- 6  $f = \frac{2z^3 + 6z(\bar{z})^2}{24}$

## גבולות מרוכבים ורציפות:

### שאלות:

מצאו את הגבולות הבאים (אם קיימים):

$$\lim_{z \rightarrow 0} \frac{\bar{z}}{z} = ? \quad (1)$$

$$\lim_{z \rightarrow 0} \frac{z^4}{|z|^4} = ? \quad (2)$$

$$\lim_{z \rightarrow 0} e^{\frac{-1}{z^2}} = ? \quad (3)$$

$$\lim_{z \rightarrow 0} e^{\frac{-1}{z^4}} = ? \quad (4)$$

### תשובות סופיות:

$$\frac{1-ik}{1+ik} \quad (1)$$

$$\frac{(1+ik)^4}{(1+k)^2} \quad (2)$$

(3) הגבול תלוי במסלול ולכן אינו קיים.

(4) הגבול תלוי במסלול ולכן אינו קיים.

## נגזרות מרוכבות:

### שאלות:

(1) מצאו את כל הנקודות בהן הפונקציה  $f(z) = \bar{z}$  גזירה. הראו עפ"י הגדרת הנגזרת כי  $f(z) = \bar{z}$  אינה גזירה ב- $z_0$  לכל  $z_0 \in \mathbb{C}$ .

(2) מצאו את כל הנקודות בהן הפונקציה  $f(z) = \operatorname{Re}(z)$  גזירה.

(3) מצאו את כל הנקודות בהן הפונקציה  $f(z) = |z|^2$  גזירה.

(4) הוכיחו את משפט לופיטל:  $\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z)}{g(z)} = \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{g(z) - g(z_0)}$

### תשובות סופיות:

- (1) הפונקציה לא גזירה.  
הגבול תלוי במסלול ולכן אינו קיים.
- (2) הפונקציה לא גזירה.
- (3) בראשית הצירים, והנגזרת שלה היא 0.
- (4) הוכחה.

## משוואות קושי-רימן:

### שאלות:

(1) הראו כי  $f(z) = z^2 + \text{Im}(z)$  אינה גזירה לכל  $z$ .

(2) הראו כי  $f(z) = xy + i(x^2 + y^2)$  אינה גזירה בכל הנקודות בהן  $z \neq 0$ , אך כן גזירה בנקודה  $z = 0$  (לפי הגדרה).

(3) מצאו מספרים ממשיים  $a, b$  כך שהפונקציה  $f(z) = e^{ax} \cos(3y) + i(-e^{-3x} \sin(by))$  תהיה גזירה בכל נקודה.

(4) נתון כי  $f(z) = \frac{z}{z}$  אינה רציפה ב  $z = 0$ .

מצאו את כל הנקודות (אם קיימות) בהן הפונקציה גזירה.

### משפט קושי-רימן: הוכחה (הפתרון בסרטון)

אם  $f(z) = u(x, y) + i \cdot v(x, y)$  גזירה ב-  $z_0 = x_0 + iy_0$ ,

אז מתקיימות משוואות קושי-רימן בנקודה זו, כלומר:

$$u_x(x_0, y_0) = v_y(x_0, y_0)$$

$$u_y(x_0, y_0) = -v_x(x_0, y_0)$$

(5) נניח כי  $f(z)$  גזירה בתחום  $D$ , ונניח כי  $\text{Re}\{f(z)\} = 0$  לכל  $z \in D$ . הוכיחו כי  $f(z)$  קבועה.

(6) נניח כי  $f(z)$  פונקציה גזירה שאינה קבועה בתחום  $D$ .

נגדיר  $g(z) = \overline{f(z)}$  לכל  $z \in D$ .

הוכיחו כי  $g(z)$  אינה גזירה בכל  $D$ .

(7) נתונה הפונקציה  $f(z) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{z^4}} & z \neq 0 \\ 0 & z = 0 \end{cases}$  הוכיחו את הטענות הבאות:

א. הפונקציה אינה רציפה בראשית.

ב. משוואות קושי-רימן מתקיימות בראשית.

(8) נניח כי  $f(z)$  אנליטית בתחום  $H^+ = \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Im}(z) > 0\}$ .

הוכיחו כי  $g(z) = \overline{f(\bar{z})}$  אנליטית בתחום  $H^+ = \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Im}(z) < 0\}$ .

(9) הוכיחו כי  $f(z) = e^{\operatorname{Re}(z)}$  אינה גזירה בשום נקודה במישור המרוכב.

(10) נתונה הפונקציה  $f(z) = cx^2 - xy + ixy^2$ , כאשר  $c$  קבוע מרוכב כלשהו.

נתון כי  $f(z)$  גזירה בנקודה  $1+i$ .

מצאו את הקבוע  $c$  ואת כל הנקודות בהן הפונקציה גזירה.

(11) נתונה הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2) + i \cdot \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$ .

קבעו האם הפונקציה  $f(z)$  אנליטית בחצי המישור הימני  $H = \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Re}(z) > 0\}$ .

(12) נתונה הפונקציה  $f(z) = e^{\frac{x^2-y^2}{2}} [\cos(xy) + i \cdot a \sin(xy)]$ .

עבור אילו ערכי  $a$  זוהי פונקציה הולומורפית (אנליטית) בכל המישור?

(13) נניח כי  $g(z)$  הולומורפית בתחום  $\overline{D(0,1)} = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq 1\}$ ,

ומקיימת  $\forall |z| \leq 1 \quad |g(z)| = 1$ .

הוכיחו כי  $g(z)$  קבועה.

הדרכה: ניתן לכתוב את  $g(z)$  באופן הבא:  $g(z) = e^{i \cdot h(x,y)}$ .

(14) נניח כי  $R > 0$  ונתונה הפונקציה  $f: D(0,R) \rightarrow \mathbb{C}$  גזירה בכל התחום.

נגדיר:  $g(z) = \overline{f\left(\frac{R}{\bar{z}}\right)}$ .

מצאו תחום בו  $g(z)$  מוגדרת, ובדקו אם היא גזירה שם.

## תשובות סופיות:

$$u'_y = -2y + 1, \quad v'_x = 2y \quad (1)$$

$$\begin{cases} y = 0 \\ x = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$a = -3, \quad b = 3 \quad (3)$$

$$x = 0, \quad y = 0 \quad (4)$$

(5) הוכחה

(6) הוכחה

(7) א. הוכחה ב. הוכחה

(8) הוכחה

(9) הוכחה

$$y = 0, \quad y = 1, \quad y = 0.5$$

$$x = 0, \quad x = 1, \quad x = 0.25, \quad c = a + i \cdot b = \frac{3}{2} \quad (10)$$

$$z = 0, \quad z = 1 + i, \quad z = 0.25 + 0.5 \cdot i$$

$$u_x = \frac{x}{x^2 + y^2}; \quad u_y = \frac{y}{x^2 + y^2} \quad (11)$$

$$a = 1 \quad (12)$$

(13) הוכחה

$$A = \{z \mid |z| > 1\} \quad (14)$$

## פונקציות הרמוניות:

### שאלות:

- (1) הראו כי הפונקציה  $x^3 - 3xy^2$ , היא פונקציה הרמונית בכל המישור.
- (2) הראו כי הפונקציה  $x^2 - y^2$ , היא פונקציה הרמונית בכל המישור, ומצאו לה צמודה הרמונית.
- (3) הראו כי הפונקציה  $f(z) = xy + i(x^2 + y^2)$ , היא פונקציה גזירה בראשית-הצירים, אך החלק המדומה שלה אינו פונקציה הרמונית. האם  $f(z)$  הולומורפית בראשית?
- (4) הראו כי הפונקציה  $u(x, y) = \sin(x) \cosh(y)$ , היא פונקציה הרמונית בכל המישור, ומצאו את הצמודה ההרמונית שלה  $v(x, y)$  המקיימת  $v(0, 0) = 2$ .  
רמז:  $f(z) = \sin(z)$ .
- (5) הראו כי הפונקציה  $u(x, y) = \cos(x) \sinh(y)$ , היא פונקציה הרמונית בכל המישור, ומצאו פונקציה הולומורפית כך שמתקיים  $u(x, y) = \operatorname{Re}\{f\}$ .
- (6) הראו כי הפונקציה  $v(x, y) = e^y \sin(x)$ , היא פונקציה הרמונית במישור, מצאו לה פונקציה צמודה הרמונית  $u(x, y)$  ופונקציה שלמה  $f(z)$ , כך שמתקיים:  $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$ .
- (7) הראו כי הפונקציה  $u(r, \theta) = \left(r + \frac{1}{r}\right) \cos(\theta)$ , היא פונקציה הרמונית בתחום  $r \neq 0$ .  
רמז:  $u(r, \theta)$  תקרא הרמונית אם היא מקיימת  $r^2 u_{rr}'' + r u_r' + u_{\theta\theta}'' = 0$ .
- (8) נתון כי  $u(r, \theta) = \left(r + \frac{1}{r}\right) \cos(\theta)$  היא פונקציה הרמונית בתחום  $r \neq 0$ . מצאו לה צמודה הרמונית בתחום זה.



(9) הוכיחו כי  $u(x, y) = 2x - x^3 + 3xy^2$ , היא פונקציה הרמונית ומצאו לה צמודה הרמונית.

(10) תהי  $f(z) = u(x, y) + i \cdot v(x, y)$  פונקציה שלמה. הוכיחו כי  $g(x, y) = u(x, y)^2 - v(x, y)^2$  פונקציה הרמונית.

(11) תהי  $f(z) = u(x, y) + i \cdot v(x, y)$  פונקציה שלמה. הוכיחו כי  $g(x, y) = \sin[u(x, y)] \cdot \cosh[v(x, y)]$  פונקציה הרמונית.

(12) האם קיימות פונקציות הרמוניות מהצורה  $u(x, y) = \varphi\left(\frac{x^2 + y^2}{x}\right)$

(כאשר  $\varphi \in C^2$  פונקציה לא ידועה)?  
אם כן, מצאו אותן.

(13) האם קיימות פונקציות הרמוניות מהצורה  $u(x, y) = \varphi\left(\frac{x}{y}\right)$

(כאשר  $\varphi \in C^2$  פונקציה לא ידועה)?  
אם כן, מצאו אותן.

(14) הראו כי הפונקציה  $\sinh(x) \cos(y)$  היא פונקציה הרמונית בכל המישור, ומצאו את הצמודה ההרמונית שלה.

### תשובות סופיות:

ראה פתרונות מלאים בסרטוני וידאו.

# פונקציות מרוכבות

## פרק 5 - אינטגרציה מרוכבת

### תוכן העניינים

|    |                                             |
|----|---------------------------------------------|
| 20 | 1. אינטגרל ממשי של פונקציה מרוכבת           |
| 21 | 2. אינטגרל מרוכב של פונקציה מרוכבת          |
| 22 | 3. משפט קושי גורסט                          |
| 23 | 4. נוסחת האינטגרל של קושי                   |
| 26 | 5. נוסחת האינטגרל המוכללת של קושי           |
| 28 | 6. משפט הערכה                               |
| 29 | 7. תרגילים מסכמים                           |
| 31 | 8. פונקציות קדומות                          |
| 33 | 9. התכנסות במש של סדרת פונקציות הולומורפיות |
| 34 | 10. משפט מוררה                              |

## אינטגרל ממשי של פונקציה מרוכבת:

שאלות:

(1) חשבו את האינטגרל  $\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{inx} e^{-imx} dx$  לכל  $m, n \in \mathbb{Z}$ .

(2) לכל  $z \in \mathbb{C}$ , המקיים  $\operatorname{Re}(z) < 0$ , פתרו את האינטגרל  $\int_0^{\infty} e^{zt} dt$ .

תשובות סופיות:

$$\begin{cases} 1 & n = m \\ 0 & n \neq m \end{cases} \quad (1)$$

$$-\frac{1}{z} \quad (2)$$

## אינטגרל מרוכב של פונקציה מרוכבת:

### שאלות:

(1) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=1} z^n dz$ , כאשר  $n \in \mathbb{Z}$ .

(2) חשבו את האינטגרל  $\int_{\gamma} \frac{z+2}{z} dz$ , כאשר  $\gamma = \{z = 2e^{i\theta} \mid 0 \leq \theta \leq \pi\}$ .

(3) חשבו את האינטגרל  $\int_{\gamma} (z-1) dz$ , כאשר  $\gamma = \{z = 1 + e^{i\theta} \mid \pi \leq \theta \leq 2\pi\}$ .

(4) חשבו את האינטגרל  $\oint_{\gamma} \pi e^{\pi \bar{z}} dz$ , כאשר  $\gamma$  מסילת קווים ישרים,

העוברת בנקודות  $0 \rightarrow 1 \rightarrow 1+i \rightarrow i \rightarrow 0$ .

(5) חשבו את אורך המסילה  $\gamma = [z_1, z_2]$ , כאשר  $\gamma = [z_1, z_2]$  היא מסילת הקו הישר המחברת בין  $z_1$  ל- $z_2$ .

(6) חשבו את אורך המסילה  $\gamma(t) = \{(t - \sin t) + i(1 - \cos t) \mid 0 < t < 1\}$ .

(7) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=1} \bar{z} dz$ .

### תשובות סופיות:

(1) 
$$\begin{cases} 0 & n \neq -1 \\ 2\pi i & n = -1 \end{cases}$$

(2)  $2\pi i - 4$

(3)  $0$

(4)  $4e^{\pi} - 4$

(5)  $\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$

(6)  $\approx 0.48$

(7)  $2\pi i$

## משפט קושי גורסט:

שאלות:

$$(1) \quad \text{חשבו את האינטגרל } \int_0^{2+\frac{i\pi}{4}} e^z dz$$

$$(2) \quad \text{הוכיחו כי } \int_4^{1+i} \frac{1}{2\sqrt{z}} dz = \sqrt[4]{2} \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) - 2 + i\sqrt[4]{2} \sin\left(\frac{\pi}{8}\right)$$

כאשר  $\sqrt{z}$  הינו הענף העיקרי של פונקציית השורש.

תשובות סופיות:

$$(1) \quad \frac{e^2[1+i]}{\sqrt{2}} - 1$$

$$(2) \quad \text{הוכחה.}$$

## נוסחת האינטגרל של קושי:

שאלות:

(1) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=1} \frac{\cos(z)}{z} dz$ .

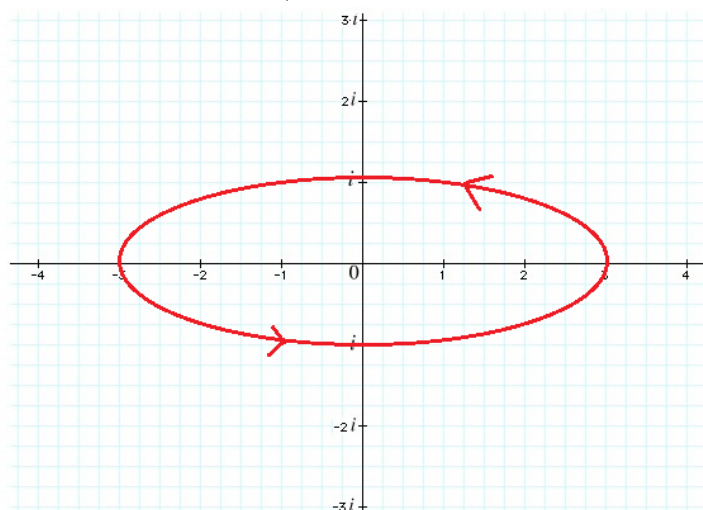
(2) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z-2|=1} \frac{e^z}{z-2} dz$ .

(3) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z-2|=1} \frac{\sin(z^2)}{z(z-2)} dz$ .

(4) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=1} \frac{e^z + e^{-z}}{z(z-2)(z-3)} dz$ .

(5) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=1.5} \frac{e^z}{z(z-1)(z-2)} dz$ .

(6) חשבו את האינטגרל  $\oint_{\gamma} \frac{\sin(z)}{z(z-2)(z-4)} dz$ , עבור המסילה שבציור:



(7) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=2} \frac{z^2 - e^{z^2}}{z(z^2 - 1)(z + 3)} dz$

(8) תהי  $f(z)$  פונקציה הולומורפית בתחום  $D$ .

נניח כי  $z_0 \in D$  וכי הדיסק  $D(z_0, R) = \{ |z - z_0| \leq R \}$  מוכל כולו ב- $D$ .

הוכיחו כי  $f(z_0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(z_0 + R \cdot e^{i\theta}) d\theta$

(9) חשבו את האינטגרל  $\int_0^\pi \frac{1}{2 + \sin(2\theta)} d\theta$

(10) הוכיחו:  $n \in \mathbb{N} : \int_0^{2\pi} \cos^{2n}(\theta) d\theta = \frac{2\pi}{2^{2n}} \binom{2n}{n}$

(11) חשבו את האינטגרל  $\int_C \frac{z}{z^2 + 1} dz$  כאשר  $C = \{ z \in \mathbb{C} \mid |z| = 2, \operatorname{Im}(z) \geq 0 \}$

(12) חשבו את האינטגרל  $\int_0^{2\pi} \frac{dx}{(a + b \cos x)}$  כאשר  $a > b > 0$

(13) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=1} \frac{\operatorname{Log}\left(1 + \frac{z}{3}\right)}{z} dz$

(14) תהי  $f(z) = u + iv$  הולומורפית בתחום  $|z| < 1$  כך ש- $u^2(0) = v^2(0)$

הוכיחו כי לכל  $0 < r < 1$  מתקיים  $\int_0^{2\pi} u^2(re^{i\theta}) d\theta = \int_0^{2\pi} v^2(re^{i\theta}) d\theta$

(15) תהי  $f(z) = u + iv$  הולומורפית בתחום  $D = \{ z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1 \}$

הוכיחו כי לכל  $0 < r < 1$  ולכל  $0 < |a| < r$  מתקיים

$$\oint_{|z|=r} \frac{\operatorname{Re}(z)}{z-a} f(z) dz = \pi i \cdot \left( \left[ a + \frac{r^2}{a} \right] f(a) - \frac{r^2}{a} \cdot f(0) \right)$$

### תשובות סופיות:

$$2\pi i \quad (1)$$

$$2\pi e^2 i \quad (2)$$

$$2\pi i \cdot \frac{\sin(2^2)}{2} \quad (3)$$

$$2\pi i \cdot \frac{1}{3} \quad (4)$$

$$\pi i - 2\pi e i \quad (5)$$

$$-\frac{\sin(2)\pi i}{2} \quad (6)$$

$$\pi i \cdot \left( \frac{17}{12} - \frac{3e}{4} \right) \quad (7)$$

$$\text{הוכחה.} \quad (8)$$

$$\frac{\pi}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$\text{הוכחה.} \quad (10)$$

$$\pi i \quad (11)$$

$$\frac{2\pi}{\sqrt{a^2 - b^2}} \quad (12)$$

$$0 \quad (13)$$

$$\text{הוכחה.} \quad (14)$$

$$\text{הוכחה.} \quad (15)$$



## נוסחת האינטגרל המוכללת של קושי:

שאלות:

(1) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z-i|=1} \frac{\sin(z)}{(z-i)^3} dz$ .

(2) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=1} \frac{\cos(z)}{z^3} dz$ .

(3) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=4} \frac{\cos(z)}{(z-\pi)^2} dz$ .

(4) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z-1|=1} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4}z\right)}{(z-1)^2(z-3)} dz$ .

(5) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=\frac{1}{2}} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{z+1}\right)}{z^3} dz$ .

(6) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=6} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4}z\right)}{(z-1)^2(z-3)} dz$ .

(7) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=5} \frac{1}{(z-2)^2(z-4)} dz$ .

## תשובות סופיות:

$$\frac{\pi}{2} \left( e - \frac{1}{e} \right) \quad (1)$$

$$-\pi i \quad (2)$$

$$-2\pi i \cdot \sin(\pi) \quad (3)$$

$$-\frac{\pi+4}{4\sqrt{2}} \pi i \quad (4)$$

$$-2\pi^2 i \quad (5)$$

$$-\frac{\pi i}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \right) \quad (6)$$

$$0 \quad (7)$$

## אי-שיויונות אינטגרליים (משפט הערכה):

### שאלות:

הוכיחו את אי השווינויות הבאים:

$$(1) \quad \left| \int_C \frac{z^3}{z^2+1} dz \right| \leq \frac{81\pi}{8} \quad \text{כאשר } C: \{ |z|=3, \operatorname{Re}(z)>0 \}$$

$$(2) \quad \left| \int_{|z|=3} \frac{1}{z^2-1} dz \right| \leq \frac{6\pi}{8}$$

$$(3) \quad \left| \int_C e^{z^2} dz \right| \leq \sqrt{8} \quad \text{כאשר } C \text{ הינה מסילת הקו הישר מ-} 0 \text{ עד } 2+2i.$$

$$(4) \quad \left| \int_C \frac{z^2}{\sin(z)} dz \right| \leq \frac{\pi^2}{2} + 2 \quad \text{כאשר } C \text{ הוא הקטע הישר המתחיל בנקודה } \frac{\pi}{2} + i$$

$$\text{ומסתיים בנקודה } \frac{\pi}{2} - i.$$

### תשובות סופיות:

ראה פתרונות מלאים בסרטוני הוידאו.

## תרגילים מסכמים:

### שאלות:

$$(1) \text{ הוכיחו כי } \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} \cos(2bx) dx = \sqrt{\pi} e^{-b^2} \text{ עבור } b > 0.$$

$$(2) \text{ הוכיחו כי } \int_0^{\infty} e^{-x^2} \sin(x^2) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \text{ ו- } \int_0^{\infty} e^{-x^2} \cos(x^2) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \cos\left(\frac{\pi}{8}\right)$$

$$(3) \text{ הוכיחו כי } \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2(x)}{x^2} dx = \pi$$

$$(4) \text{ חשבו את האינטגרל } \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^6(x)}{x^6} dx$$

$$(5) \text{ הוכיחו כי } \int_0^{2\pi} \frac{1}{(a + b \cos \theta)^2} d\theta = 2\pi \cdot \frac{a}{(a^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}} \text{ עבור } a > b > 0.$$

$$(6) \text{ תהי } f(z) = \frac{1}{(1+az)^2} + \frac{1}{(1+bz)^2} \text{ כאשר } a, b \in \mathbb{C} \text{ קבועים המקיימים } |a| < 1, |b| < 1$$

$$\text{שונים מאפס. נניח כי } |f(z)| \leq 3 \text{ לכל } |z|=1. \text{ הוכיחו כי } |a^n + b^n| \leq \frac{3}{n+1} \text{ לכל } n \geq 0.$$

$$\text{רמז: התבוננו ב- } |f^{(n)}(0)|.$$

**תשובות סופיות:**

(1) הוכחה.

(2) הוכחה.

(3) הוכחה.

(4)  $\frac{11\pi}{20}$ 

(5) הוכחה.

(6) הוכחה.

## פונקציות קדומות:

### שאלות:

- (1) האם הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{z}$  אנליטית בתחום  $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ ? האם יש לה קדומה שם?
- (2) האם הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{z^n}$  ( $n \geq 2$ ) אנליטית בתחום  $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ ? האם יש לה קדומה שם?
- (3) האם הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{z^2 + 1}$  אנליטית בתחום  $\mathbb{C} \setminus \{i, -i\}$ ? האם יש לה קדומה שם?
- (4) האם הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{z^2 + 1}$  אנליטית בתחום  $\mathbb{C} \setminus \{-i, i\}$ ? האם יש לה קדומה שם?
- (5) הוכיחו כי לפונקציה  $f(z) = \frac{1}{z(z^2 - \pi^2)}$  יש קדומה בתחום  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| > \pi\}$ .
- (6) נסמן  $I = \int_{\Gamma} \frac{2z}{z^2 + 1} dz$  כאשר  $\Gamma = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 2, \operatorname{Im}(z) \geq 0\}$  בכיוון החיובי.
  - א. האם לאינטגרנד  $\frac{2z}{z^2 + 1}$  יש פונקציה קדומה בתחום פשוט קשר המכיל את  $\Gamma$ ?
  - ב. חשבו את  $I$ .
- (7) נניח כי  $a, b$  מספרים מרוכבים בחצי המישור השמאלי, כלומר  $\operatorname{Re}(a) < 0, \operatorname{Re}(b) < 0$ . הוכיחו כי  $|e^a - e^b| < |a - b|$ ,  $(a \neq b)$ .
- (8) נניח כי  $f(z), g(z)$  פונקציות שלמות המקיימות  $f^2(z) + g^2(z) = 1$  לכל  $z \in \mathbb{C}$ . הוכיחו כי קיימת פונקציה שלמה  $h(z)$  כך שמתקיים:  $f(z) = \cos(h[z]) \mid g(z) = \sin(h[z])$ .

### תשובות סופיות:

- (1)  $2\pi i$
- (2) לפונקציה אנליטית  $f(z)$  בתחום  $\Omega$  תהיה קיימת קדומה בתחום אם ורק אם  $\oint_{\gamma} f(z) dz = 0$  לכל מסלול סגור  $\gamma$  המוכל בתחום  $\Omega$ .
- (3)  $\pi$
- (4) לפונקציה אנליטית  $f(z)$  בתחום  $\Omega$  תהיה קיימת פונקציה קדומה בתחום אם ורק אם  $\oint_{\gamma} f(z) dz = 0$  לכל מסלול סגור בתחום.
- (5) הוכחה.
- (6) א. לפונקציה אנליטית  $f(z)$  בתחום  $\Omega$  תהיה קיימת פונקציה קדומה בתחום אם ורק אם  $\oint_{\gamma} f(z) dz = 0$  לכל מסלול סגור בתחום. ב.  $2\pi i$
- (7) הוכחה.
- (8) הוכחה.

## התכנסות במש של סדרת פונקציות הולומורפיות:

### שאלות:

(1) יהי  $a > 0$ . הוכיחו כי הפונקציה  $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-a \cdot n^2 z}$  הולומורפית ב- $\text{Re}(z) > 0$ .

(2) יהי  $a > 0$ . הוכיחו כי הפונקציה  $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(a+n)^z}$  הולומורפית ב- $\text{Re}(z) > 1$ .

הערה:  $(a+n)^z = e^{z \cdot \text{Log}(a+n)}$  מוגדרת באופן הבא  $n^z = e^{z \cdot \text{Log}(n)}$  ו- $\text{Log}(z)$  זה הענף הראשי של הלוג.

(3) פונקציית זטא של רימן מוגדרת כך  $\zeta(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^z}$ .

הראו כי היא הולומורפית בתחום  $\text{Re}(z) > 1$ .

הערה:  $n^z = e^{z \cdot \text{Log}(n)}$  מוגדרת באופן הבא:  $n^z = e^{z \cdot \text{Log}(n)}$  ו- $\text{Log}(z)$  זה הענף הראשי של הלוג.

(4) תהי  $f(x): (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה וחסומה. נגדיר  $L[f](z) = \int_0^{\infty} f(x) e^{-z \cdot x} dx$ .

נתון כי  $L[f](z)$  רציפה בתחום  $\text{Re}(z) > 0$ , הוכיחו כי היא הולומורפית שם.

### תשובות סופיות:

ראו פתרונות מלאים בסרטוני הוידאו.



## משפט מוררה:

שאלה:

(1) תהי  $f_n(z)$  סדרת פונקציות אנליטיות המתכנסת במ"ש לפונקציה  $f(z)$

בתחום  $D$  פשוט קשר. הוכיחו כי :

א.  $f(z)$  אנליטית בתחום  $D$ .

ב. מתקיים  $\lim_{n \rightarrow \infty} f'_n(z) = f'(z) \quad \forall z \in D$

הערה: תחום זה קבוצה פתוחה וקשירה.

תשובה סופית:

ראו פתרון מלא בסרטון הוידאו.

# פונקציות מרוכבות

פרק 6 - תכונות של פונקציות אנליטיות

תוכן העניינים

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. משפט ליוביל.....              | 35 |
| 2. עקרון היחידות.....            | 38 |
| 3. עקרון המקסימום והמינימום..... | 41 |

## משפט ליוביל:

**רקע:**

**משפט:**

אם  $f(z)$  פונקציה שלמה (אנליטית בכל  $\mathbb{C}$ ) וחסומה ב- $\mathbb{C}$  (כלומר קיים  $M > 0$  כך ש- $|f(z)| < M$   $\forall z \in \mathbb{C}$ ) אז  $f(z)$  פונקציה קבועה.

**שאלות:**

(1) מצאו פונקציה שלמה, המקיימת את אי-השוויון  $|\sin(z) - z \cdot f(z)| < 2$   $\forall z \in \mathbb{C}$ .

(2) הוכיחו כי קיים  $z \in \mathbb{C}$  עבורו  $|\cos(z)| > 1$  ע"י שימוש במשפט ליוביל.

(3) נתונה פונקציה שלמה  $f(z) = u + iv$ , המקיימת  $v \leq 0$  (לכל  $z$ ).

הוכיחו כי  $f(z)$  קבועה.

רמז: התבוננו בפונקציה  $e^{-i \cdot f(z)}$ .

(4) מצאו את כל הפונקציות השלמות  $f(z) = u + iv$ , המקיימות  $u \leq 0$  (לכל  $z$ ).

רמז: התבוננו בפונקציה  $e^{f(z)}$ .

(5) מצאו את כל הפונקציות השלמות  $f(z) = u + iv$ , המקיימות  $u \geq 0$  (לכל  $z$ ).

רמז: התבוננו בפונקציה  $e^{-f(z)}$ .

(6) מצאו את כל הפונקציות השלמות  $f(z) = u + iv$ , המקיימות  $v \geq 0$  (לכל  $z$ ).

(7) נתונה פונקציה שלמה  $f(z)$ , המקיימת  $|f(z)| \geq 1$  לכל  $z$ .

הוכיחו כי  $f(z)$  קבועה.

רמז: התבוננו בפונקציה  $\frac{1}{f(z)}$ .

(8) מצאו את כל הפונקציות השלמות  $f(z) = u + iv$ , המקיימות  $v \leq 0$  (לכל  $z$ ).

רמז: התבוננו בפונקציה  $e^{-i \cdot f(z)}$ .

(9) הוכיחו כי כל הפונקציות השלמות  $f(z)$ , המקיימות  $\forall z \in \mathbb{C} \quad |f(z)| \leq 4 + 5|z|^{\frac{4}{5}}$  הן פונקציות קבועות.

(10) נתון כי  $f(z)$  שלמה, המקיימת  $\forall z \in \mathbb{C} \quad |f(z)| \geq e^{\operatorname{Re}(z)}$ . הוכיחו שקיים קבוע  $C$  מרוכב, כך ש- $f(z) = C \cdot e^z$ .

(11) נתון כי  $f(z)$  שלמה, המקיימת  $f(0) = 0$  ו- $f(1) = 1$ . הוכיחו שקיים  $C$  מרוכב, כך ש- $|f(c)| > 2$ .

(12) נתון כי  $f(z)$  שלמה, המקיימת  $\lim_{z \rightarrow \infty} f(z) = 2$ . הוכיחו כי  $f(z) \equiv 2$ .

(13) נתון כי  $f(z) = u + iv$  שלמה המקיימת  $u \cdot v \geq 0$  לכל  $z \in \mathbb{C}$ . הוכיחו כי  $f(z)$  פונקציה קבועה.

(14) נתון כי  $f(z) = u + iv$  שלמה המקיימת  $u \geq v$  לכל  $z \in \mathbb{C}$ . הוכיחו כי  $f(z)$  פונקציה קבועה.

(15) האם קיימת פונקציה אנליטית בתחום  $\mathbb{C} \setminus \{0\}$  כך ש-

$$\forall z \in \mathbb{C} \setminus \{0\} \quad |f(z)| \geq \frac{1}{\sqrt{|z|}}$$

הערה: ניתן להשתמש במשפט רימן אם  $g(z)$  אנליטית בסביבה נקובה של  $z_0$  וחסומה שם אז היא אנליטית גם ב- $z_0$ .  
(הכוונה שניתן להגדיר אותה ב- $z_0$  כך שתהיה אנליטית שם).

(16) הוכח או הפרד: אם  $f(z)$  שלמה שאינה קבועה אז קיים  $z \in \mathbb{C}$  כך ש- $\operatorname{Re} f(z) > |f(z)|^2$ .

(17) הוכיחו כי אם  $f(z)$  שלמה שאינה קבועה התמונה  $f[\mathbb{C}]$  צפופה ב- $\mathbb{C}$ .  
הגדרה: קבוצה  $A \subseteq \mathbb{C}$  תקרא צפופה ב- $\mathbb{C}$  אם ורק אם לכל  $z_0 \in \mathbb{C}$  ולכל  $R > 0$  מתקיים  $D(z_0, R) \cap A \neq \emptyset$ .

- (18) ידוע כי קיימת פונקציה  $T(z): \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0] \rightarrow D(0,1)$  אנליטית המקיימת  $T'(z) \neq 0$  לכל  $z \in \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]$ . הוכיחו כי כל פונקציה שלמה  $f(z)$  המקיימת  $f(z) \in \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]$  לכל  $z \in \mathbb{C}$  הינה פונקציה קבועה.
- (19) נניח כי  $f(z)$  שלמה ומקיימת  $f(z) = f(z+1) = f(z+i)$  לכל  $z \in \mathbb{C}$ . הוכיחו כי  $f(z)$  קבועה.

### תשובות סופיות

$$f(z) = \begin{cases} \frac{\sin(z)}{z} & z \neq 0 \\ 1 & z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

- (2) הוכחה.  
 (3) הוכחה.  
 (4) ראו וידאו.  
 (5) ראו וידאו.  
 (6) ראו וידאו.  
 (7) הוכחה.  
 (8) ראו וידאו.  
 (9) הוכחה.  
 (10) הוכחה.  
 (11) הוכחה.  
 (12) הוכחה.  
 (13) הוכחה.  
 (14) הוכחה.  
 (15) לא קיימת.  
 (16) הוכחה.  
 (17) הוכחה.  
 (18) הוכחה.  
 (19) הוכחה.

## עקרון היחידות:

### שאלות:

- (1) הוכיחו כי אם  $f(z)$  שלמה ומקיימת  $f\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{1}{n}$ ,  $\forall n \in \mathbb{N}$ , אז  $f(z) \equiv z$ .
- (2) נניח כי  $f(z)$  אנליטית ב- $D = \{z \mid |z| < 1\}$  ומקיימת  $f\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{1}{n+1}$ ,  $\forall n \in \mathbb{N}$ . מצאו את  $f(z)$ .
- (3) נניח כי  $f(z)$  אנליטית ב- $D = \{z \mid |z| < 1.5\}$  ומקיימת  $f\left(\frac{1}{2n}\right) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z|=1} \frac{nz}{nz-0.5} dz$ ,  $\forall n \in \mathbb{N}$ . מצאו את  $f(z)$ .
- (4) כמה פונקציות אנליטיות  $f(z)$  ב- $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$  מקיימות  $f\left(\frac{1}{3n-1}\right) = \frac{2}{n}$ ,  $\forall n \geq 2$ ?
- (5) מצאו את כל הפונקציות האנליטיות  $f(z)$  ב- $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$  המקיימות  $f\left(\frac{1}{n}\right) = \sin(\pi n)$ ,  $\forall n \geq 4$ .
- (6) מצאו (אם ישנן) את כל הפונקציות האנליטיות  $f(z)$  ב- $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$  המקיימות  $f\left(\frac{1}{n}\right) = \begin{cases} \frac{1}{n+1} & n = 2k \\ \frac{1}{n+2} & n = 2k+1 \end{cases}$ ,  $\forall n \in \mathbb{N}$ .
- (7) הוכח או הפרד: לא קיימת פונקציה אנליטית  $f(z)$  בעיגול היחידה הפתוח  $D$ , בעלת אינסוף אפסים ב- $D$ , שאינה פונקציית האפס.

(8) הוכח או הפרך :

קיימת פונקציה אנליטית בתחום  $1 < |z| < 3$  כך שלכל  $x$  ממשי המקיים

$$f(x) = |x|^3 \quad 1 < |x| < 3.$$

(9) נתונות  $f(z), g(z)$  אנליטיות בתחום  $D$  ויהיו  $a, b \in D$ .הוכיחו כי אם  $(f(z) - a)(g(z) - b) = 0$  לכל  $z \in D$  אז בהכרח  $f(z) \equiv a$  או  $g(z) \equiv b$ .(10) נניח כי  $f(z)$  אנליטית בתחום  $D(z_0, R)$  עבור  $z_0 \in \mathbb{C}$  ו- $R > 0$ .נניח בנוסף כי  $f'(z_0) \neq 0$ .

$$\frac{2\pi i}{f'(z_0)} = \oint_{|z-z_0|=r} \frac{1}{f(z) - f(z_0)} dz \quad \text{כך ש-} r > 0$$

הערה: תרגיל זה דורש שימוש במשפט השארית.

(11) הוכח או הפרך :

$$D = \{z \in \mathbb{C} \mid 0 < |z| < 1\}$$

נניח כי  $f(z)$  אנליטית ב- $D$  כך ש- $f\left(\frac{1}{n}\right) = n$  לכל  $n > 1$  וכי  $f(z)$ בעלת קוטב ב- $z = 0$  אז בהכרח  $f(z) = \frac{1}{z}$  לכל  $z \in D$ .

הערה: תרגיל זה דורש ידע על נקודות סינגולריות.

(12) הוכח או הפרך :

נתונה  $f(z)$  אנליטית בתחום  $|z| > 1$  ונתון כי לכל  $z \in (1, \infty)$  מתקיים ש- $f(z)$  ממשי.אז בהכרח גם לכל  $z \in (-\infty, -1)$  מתקיים ש- $f(z)$  ממשי.

$$(13) \quad \text{נניח כי } f(z) \text{ רציפה ב-} |z| < 1 \text{ ומקיימת } f\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{1}{n^2} \text{ ו-} f\left(\frac{i}{2}\right) = 0.$$

הוכיחו כי  $f(z)$  אינה אנליטית ב- $|z| < 1$ .

(14) (אתגר)

נניח כי  $f(z)$  רציפה ב- $\overline{D(0,1)}$  ואנליטית ב- $D(0,1)$  המקיימת.

$$|f(z)| = 1 \quad \forall |z| = 1 \quad \text{הוכיחו כי יש מספר סופי בלבד של נקודות ב-} D(0,1)$$

בהן  $f(z)$  מתאפסת.

רמז: היעזרו במשפט בולצאנו ויארשטראס.

## תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

(2)  $f(z) = \frac{z}{1+z}$

(3)  $f(z) = z$

(4)  $f(z) = 6 \frac{z}{z+1}$

(5) ראו בוידאו.

(6) לא קיימות כאלו פונקציות.

(7) הפרכה. דוגמא נגדית:  $f(z) = \sin\left(\frac{\pi}{1-z}\right)$

(8) לא קיימת כזו פונקציה.

(9) הוכחה.

(10) הוכחה.

(11) הוכחה.

(12) הוכחה.

(13) הוכחה.

(14) הוכחה.



## עקרון המקסימום והמינימום:

### שאלות:

- (1) מצאו (אם קיים) ערך מקסימלי של  $|f(z)|$ , כאשר  $f(z) = e^{-z^2}$  בתחום  $D = \{z \mid |z| < 1\}$ .
- (2) מצאו (אם קיים) ערך מקסימלי של  $|f(z)|$ , כאשר  $f(z) = e^{-z^2}$  בתחום  $D = \{z \mid |z| \leq 3\}$ .
- (3) מצאו (אם קיים) ערך מקסימלי של  $|f(z)|$ , כאשר  $f(z) = \cos(z)$  בתחום  $D = \{z \mid 0 \leq \operatorname{Re}\{z\} \leq 2\pi, 0 \leq \operatorname{Im}\{z\} \leq 2\pi\}$ .
- (4) מצאו (אם קיים) ערך מקסימלי של  $|f(z)|$ , כאשר  $f(z) = e^{z^2}$  בתחום  $D = \{z \mid |z| \leq 1\}$  ואת כל הנקודות בהן הוא מתקבל.
- (5) תהי  $f(z)$  אנליטית בעיגול  $|z| \leq R$  ומקיימת  $|f(z)| > a$   $\forall |z| = R$ . הוכיחו כי אם  $|f(0)| < a$  אז בעיגול  $|z| < R$  יש לפחות אפס אחד של  $f(z)$ .
- (6) (עקרון המינימום)  
תהי  $f(z)$  אנליטית בתחום (קבוצה פתוחה וקשירה)  $U$  ומקיימת  $|f(z)| > 0$ . הוכיחו:  
א. אם  $f(z)$  אינה קבועה אז לא קיימת נקודה  $z_0 \in U$  כך שהפונקציה  $|f(z)|$  מקבלת מינימום ב- $z_0$ .  
ב. אם  $|f(z)|$  מקבלת מינימום ב- $U$  אז היא קבועה.  
ג. הערך המינימלי של  $|f(z)|$  בתחום קומפקטי  $\Omega$  מתקבל על השפה בהנחה כי  $f(z)$  אנליטית ולא מתאפסת ב- $\Omega$ .
- (7) תהי  $f(z)$  אנליטית ב- $|z| \leq 1$  ונניח שאינה מתאפסת שם. נניח גם כי לכל  $|z| = 1$  מתקיים  $|f(z)| = 1$ .  
א. הוכיחו כי  $f(z)$  קבועה.  
ב. האם סעיף א' נכון גם ללא הנחה ש- $f(z)$  אינה מתאפסת ב- $|z| \leq 1$ ?

(8) (עקרון המקסימום לפונקציות הרמוניות).

נניח כי  $f(z) = u + iv$  אנליטית בתחום קומפקטי  $\Omega$ .

הוכיחו כי  $u(x, y)$  מקבלת ערך מקסימלי על השפה  $\partial\Omega$ .

(9) (עקרון המינימום לפונקציות הרמוניות).

נניח כי  $f(z) = u + iv$  אנליטית בתחום קומפקטי  $\Omega$ .

הוכיחו כי  $u(x, y)$  מקבלת ערך מינימלי על השפה  $\partial\Omega$ .

(10) נניח גם כי  $f(z)$ ,  $g(z)$  אנליטיות ב-  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq 1\}$ .

נניח כי לכל  $|z| = 1$  מתקיים  $\operatorname{Re}[f(z)] = \operatorname{Re}[g(z)]$ .

הוכיחו כי קיים קבוע  $c \in \mathbb{C}$  כך ש-  $f(z) = g(z) + c$  לכל  $z \in D$ .

(11) יהי  $p(z) = \sum_{k=0}^{k=n} a_k z^k$  פולינום ממעלה  $n$  ( $a_n \neq 0$ ).

נתון כי לכל  $|z| = 1$  מתקיים  $|p(z)| \leq 1$ .

הראו כי לכל  $|z| \geq 1$  מתקיים  $|p(z)| \leq |z|^n$ .

רמז: הראו כי הפונקציה  $f(z) = z^n p\left(\frac{1}{z}\right)$  היא פונקציה שלמה ומצאו לה חסם

בדיסק היחידה.

הערה: ניתן להשתמש בעובדה: אם  $f(z)$  אנליטית בסביבה נקובה של  $z_0$

והגבול  $\lim_{z \rightarrow z_0} f(z)$  קיים וסופי אזי  $f(z)$  אנליטית גם ב-  $z_0$ .

(הכוונה שניתן להגדיר אותה ב-  $z_0$  כך שתהיה אנליטית שם).

(12) יהי  $R > 0$  ונניח כי  $f(z)$  אנליטית בתחום:

$$A = \{z = x + iy \mid -R \leq x \leq R, -R \leq y \leq R\}$$

נסמן את שפות התחום כך:

$$l_1 = \{z = R + iy \mid -R \leq y \leq R\} \quad l_3 = \{z = -R + iy \mid -R \leq y \leq R\}$$

$$l_2 = \{z = x + iR \mid -R \leq x \leq R\} \quad l_4 = \{z = x - iR \mid -R \leq x \leq R\}$$

הוכיחו כי  $|f(0)| \leq \frac{1}{4} (\max_{l_1} |f(z)| + \max_{l_2} |f(z)| + \max_{l_3} |f(z)| + \max_{l_4} |f(z)|)$

רמז: התבוננו בפונקציה  $g(z) = \frac{1}{4} (f(z) + f(-z) + f(iz) + f(-iz))$ .

**(13) (אתגר)**

הוכיחו כי משפט ההעתקה הפתוחה: אם  $A \subset \mathbb{C}$  קבוצה פתוחה ו-  $f(z)$  אנליטית ולא קבועה ב-  $A$  אז התמונה  $f[A]$  פתוחה.

**(14) נסמן  $D(0,1) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$  ונניח כי:**

-  $f(z)$  הולומורפית ב-  $D(0,1)$ .

- לכל  $z \in D(0,1)$  מתקיים  $|f(z)| \leq 1$ .

-  $f(0) = 0$ .

הוכיחו כי לכל  $z \in D(0,1)$  וכי  $|f'(0)| \leq 1$  ואת ההערה הבאה.

הערה: אם בנוסף ידוע כי קיימת נקודה  $z_0 \in D(0,1)$  (שאינה אפס)

כך ש-  $|f(z_0)| = |z_0|$  אז קיים קבוע  $c \in \mathbb{C}$  כך ש-  $f(z) = c \cdot z$ .

**(15) נניח כי  $f(z)$  הולומורפית בתחום  $\overline{D(0,1)} = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq 1\}$** 

ומקיימת  $|f(z)| = 1$  לכל  $|z| = 1$ .

נניח בנוסף כי  $f(z) = 0$  אם ורק אם  $z = 0$ .

הוכיחו כי קיימים קבועים  $c$  ו-  $k$  כך ש-  $f(z) = c \cdot z^k$ .

הערה: ניתן להשתמש בעקרון המינימום.

**(16) (נכון או לא נכון)**

נגדיר  $A = \{z \in \mathbb{C} \mid 1 < |z| < 2\}$  ונניח כי  $f(z)$  אנליטית ב-  $A$  ורציפה ב-  $\bar{A}$ .

נתון כי:

$$\begin{aligned} \forall |z| = 1 & \quad |f(z)| = 1 \\ \forall |z| = 2 & \quad |f(z)| = 8 \end{aligned}$$

אזי בהכרח  $|f(z)| \leq |z|^3$  לכל  $z \in A$ .

**(17) נניח כי  $f(z)$  אנליטית ב-  $|z| \leq 1$  ומקיימת:**

-  $|f(z)| \leq 1$   $\forall z \in \{ \operatorname{Im}(z) \geq 0, |z| = 1 \}$

-  $|f(z)| \leq 3$   $\forall z \in \{ \operatorname{Im}(z) \geq 0, |z| = 2 \}$

הוכיחו כי  $|f(0)| \leq \sqrt{6}$ .

רמז: התבוננו בביטוי  $f(z)f(-z)$ .

(18) יהי  $r > 0$ .נגדיר  $C_r = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = r\}$  ויהיו  $z_1, \dots, z_n \in C_r$ .הוכיחו כי קיים  $z \in C_r$  כך ש- $\prod_{k=1}^n |z - z_k| > r^n$ .**תשובות סופיות:**

(1) לא קיים.

(2)  $e^9$ 

(3) 268

(4)  $|f(1)| = |f(-1)| = e$ 

(5) הוכחה.

(6) הוכחה.

(7) א. הוכחה. ב. לא.

(8) הוכחה.

(9) הוכחה.

(10) הוכחה.

(11) הוכחה.

(12) הוכחה.

(13) הוכחה.

(14) הוכחה.

(15) הוכחה.

(16) נכון.

(17) הוכחה.

(18) הוכחה.

## פונקציות מרוכבות

פרק 7 - טורים

תוכן העניינים

|    |                                            |
|----|--------------------------------------------|
| 45 | 1. טורי טיילור ומקלורן.....                |
| 46 | 2. טורי לורן.....                          |
| 50 | 3. טורים כלליים.....                       |
| 51 | 4. טורים מספריים.....                      |
| 52 | 5. מבחן ויירשטראס להתכנסות במידה שווה..... |
| 53 | 6. קריטריון קושי-הדמרד.....                |

## טורי טיילור ומקלורן:

### שאלות:

(1) מצאו טור טיילור עבור  $f(z) = \sin(z+1)$  סביב  $z=0$  ומצאו תחום התכנסות.

(2) מצאו טור טיילור עבור  $f(z) = \frac{1}{z}$  סביב  $z=i$  וציינו את רדיוס ההתכנסות.

(3) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{2i}{2+i+z}$  סביב  $z_0 \neq -(2+i)$  בתחום  $|z-z_0| < |2+i+z_0|$ .

(4) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{(1-z)^3}$  לטור חזקות סביב  $z_0 \neq 1$  בתחום  $|z-z_0| < |1-z_0|$ .

(5) נניח כי  $f(z)$  שלמה ומתאפסת רק בנקודה  $z=0$  ומתקיים  $f'(0)=1$ .

חשבו את  $\oint_{|z|=1} \frac{\cos(z)}{f(z)} dz$ .

### תשובות סופיות:

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \left( \cos(1) \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} z^{2n+1} + \sin(1) \frac{(-1)^n}{(2n)!} z^{2n} \right) \quad z \in \mathbb{C} \quad (1)$$

$$f(z) = \frac{1}{i} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{-1}{i} \right)^n (z-i)^n \quad |z-i| < 1 \quad (2)$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2i(-1)^n}{(2+i+z_0)^{n+1}} (z-z_0)^n \quad (3)$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2} \frac{(n+1)(n+2)}{(1-z_0)^{n+3}} (z-z_0)^n \quad (4)$$

$$2\pi i \quad (5)$$

## טורי לורן:

## שאלות:

(1) פתחו את הפונקציה לטור לורן סביב  $z_0 = 0$  בכל התחומים האפשריים  $f(z) = \frac{1}{1-z}$ .

(2) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{1-\frac{z}{2}}$  לטור לורן סביב  $z_0 = 0$  בתחום  $|z| < 2$  ובתחום  $|z| > 2$ .

(3) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{(z+1)(z+3)}$  לטור לורן סביב  $z_0 = -1$  בתחומים הבאים:  $0 < |z+1| < 2$  ו-  $|z+1| > 2$ .

(4) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{(z+2)(z+3)}$  לטור לורן סביב  $z_0 = -3$  בכל התחומים האפשריים.

(5) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{(z+1)(z+3)}$  לטור לורן סביב  $z_0 = 0$  בתחום  $1 < |z| < 3$ . רמז: פירוק לשברים חלקיים.

(6) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{(z+1)(z+3)}$  לטור לורן סביב  $z_0 = 0$  בתחום  $|z| > 3$ . רמז: פירוק לשברים חלקיים.

(7) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{(z+1)(z+3)}$  לטור לורן סביב  $z_0 = 0$  בתחום  $|z| < 1$ .

(8) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{1+z^2}$  לטור לורן סביב  $z_0 = 0$  בתחום  $|z| < 1$  ומצאו את המקדם  $a_{-1}$ .

(9) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{1+z^2}$  לטור לורן סביב  $z_0 = i$  בתחום  $0 < |z-i| < 2$  ומצאו את המקדם  $a_{-1}$ .

(10) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{1+z^2}$  לטור לורן סביב  $z_0 = i$  בתחום  $|z-i| > 2$ .

(11) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{z}{(z-1)(z-4)}$  לטור לורן סביב  $z_0 = 1$  כך שיתכנס בתחום המכיל את  $z = 5$ .

(12) פתחו את הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{z^2 - 5z + 6}$  לטור לורן סביב  $z_0 = 0$  כך שיתכנס בתחום המכיל את  $1-3i$ .

(13) נניח כי  $|a| < 1$  ונגדיר את הפונקציה  $f(z) = \frac{a}{z-a}$  (כאשר  $a$  מספר ממשי).

א. פתחו פונקציה זו לטור לורן בטבעת  $|a| < |z| < \infty$ .

ב. הוכיחו את הזהות  $\sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(n\theta) = \frac{a \cos(\theta) - a^2}{1 - 2a \cos(\theta) + a^2}$ .

(14) תהי  $a \in \mathbb{C}$  ונניח כי  $f(z)$  אנליטית בתחום  $\mathbb{C} \setminus \{a\}$  ונניח כי

$$\lim_{z \rightarrow a} (z-a) f(z) = 0$$

הוכיחו כי לכל  $r > 0$  מתקיים  $f(a) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z-a|=r} \frac{f(z)}{z-a} dz$ .

(15) נסמן  $\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n z^n$  פיתוח לטור לורן של  $f(z) = \frac{z}{e^{z^2} - 1}$  סביב  $z_0 = 0$  בתחום  $0 < |z| < r$ .

א. מצאו מהו ה- $r$  המקסימלי.

ב. מצאו את  $a_n$  לכל  $n \leq 4$ .

הערה: תרגיל זה דורש ידע בסיווג של נקודות סינגולריות.

(16) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=1} z^3 \cos\left(\frac{1}{z}\right) dz$ .

תזכורת: מקדמי לורן נתונים ע"י הנוסחה  $a_n = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\gamma} \frac{f(z)}{(z-z_0)^{n+1}} dz$ .

(17) חשבו את האינטגרל  $\oint_{|z|=1} e^{\frac{1}{z}} dz$ .

תזכורת: מקדמי לורן נתונים ע"י הנוסחה  $a_n = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\gamma} \frac{f(z)}{(z-z_0)^{n+1}} dz$ .



## תשובות סופיות:

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} z^n \quad |z| < 1 \quad (1)$$

$$f(z) = -\left(\frac{1}{z}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{z}\right)^n \quad |z| > 1$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z}{2}\right)^n \quad |z| < 2 \quad (2)$$

$$f(z) = -\left(\frac{2}{z}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{2}{z}\right)^n \quad |z| > 2$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^{n+1}} (z+1)^{n-1} \quad 0 < |z+1| < 2 \quad (3)$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-2)^n}{(z+1)^{n+2}} \quad |z+1| > 2$$

$$f(z) = -\frac{1}{(z+3)} \sum_{n=0}^{\infty} (z+3)^n \quad 0 < |z+3| < 1 \quad (4)$$

$$f(z) = \frac{1}{(z+3)^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(z+3)^n} \quad |z+3| > 1$$

$$f(z) = \frac{1}{2z} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{z^n} - \frac{1}{6} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n z^n}{3^n} \quad 1 < |z| < 3 \quad (5)$$

$$f(z) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{z^{n+1}} - \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-3)^n}{z^{n+1}} \quad |z| > 3 \quad (6)$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{6 \cdot 3^n} \right] z^n \quad |z| < 1 \quad (7)$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n z^{2n} \quad |z| < 1 \quad (8)$$

$$a_{-1} = 0$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{1}{2i}\right)^{n+1} (z-i)^{n-1} \quad 0 < |z-i| < 2 \quad (9)$$

$$a_{-1} = \frac{1}{2i}$$

$$f(z) = \frac{1}{(2-i)^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{-2i}{z-i}\right)^n \quad 2 < |z-i| \quad (10)$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3^n}{(z-1)^{n+1}} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3^n}{(z-1)^{n+2}} \quad |z-1| > 3 \quad (11)$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3^n}{z^{n+1}} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n}{z^{n+1}} \quad |z| > 3 \quad (12)$$

$$f(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^n}{z^n} \quad |a| < |z| < \infty \quad \text{א.} \quad (13)$$

ב. הוכחה.

(14) הוכחה.

$$r = \sqrt{2\pi} \quad \text{א.} \quad (15)$$

$$\text{ב. } a_4 = 0, \quad a_3 = \frac{1}{12}, \quad a_2 = 0, \quad a_1 = -\frac{1}{2}, \quad a_0 = 0, \quad a_{-1} = 1, \quad \forall n \leq -2 \quad a_n = 0.$$

$$\frac{\pi i}{12} \quad (16)$$

$$2\pi i \quad (17)$$

## טורים כלליים:

### שאלות:

- (1) מצאו תחום התכנסות עבור הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} z^{-n}$ .
- (2) מצאו תחום התכנסות עבור הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^{-n}}{(1-i)^n}$ .
- (3) מצאו תחום התכנסות עבור הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{4^n (z-1)^n}$ .
- (4) מצאו תחום התכנסות עבור הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{2}{z}\right)^n + \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z}{4}\right)^n$ .
- (5) מצאו תחום התכנסות עבור הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} e^{nz}$ .

### תשובות סופיות:

- (1)  $|z| > 1$
- (2)  $|z| > \frac{1}{\sqrt{2}}$
- (3)  $|z| > \frac{1}{\sqrt{2}}$
- (4)  $2 < |z| < 4$
- (5)  $\operatorname{Re}(z) < 0$

## טורים מספריים:

### שאלות:

(1) בדקו את התכנסות הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(in)}{2^n}$ .

(2) בדקו את התכנסות הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{n \sin(in)}{3^n}$ .

(3) בדקו את התכנסות הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{2+i}{\sqrt{5}} \right)^n$ .

(4) בדקו את התכנסות הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2+i^n}$ .

(5) בדקו את התכנסות הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2 + i^n}$ .

### תשובות סופיות:

(1) מתבדר.

(2) מתכנס.

(3) מתבדר.

(4) מתבדר.

(5) מתכנס.

## מבחן ויירשטראס להתכנסות במידה שווה:

### שאלות:

(1) הוכיחו כי הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} z^n$  מתכנס במידה שווה ב-  $U = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < r\}$  כאשר  $0 < r < 1$ .

(2) הוכיחו כי הטור  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n^2}$  מתכנס במידה שווה ב-  $U = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq 1\}$ .

(3) הוכיחו כי הטור  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(z^2 - 1)^n}$  מתכנס במידה שווה ב-  $U = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \geq 2\}$ .

(4) הוכיחו כי הטור  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^{2n}}{z^n + 1}$  מתכנס במידה שווה ב-  $U = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq r\}$  כאשר  $0 < r < 1$ .

(5) הוכיחו כי הטור  $\sum_{n=1}^{\infty} n^{-z}$  מתכנס במידה שווה ב-  $U = \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Re}(z) \geq 2\}$ ,

(כאשר  $n^{-z}$  מוגדרת על ידי הענף הראשי של הלוג).

### תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

(2) הוכחה.

(3) הוכחה.

(4) הוכחה.

(5) הוכחה.

## קריטריון קושי – הדמרד:

שאלות:

$$(1) \quad \sum_{n=0}^{\infty} e^{in} z^n \quad \text{מצאו רדיוס התכנסות עבור הטור}$$

$$(2) \quad \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{z}{in} \right)^n \quad \text{מצאו רדיוס התכנסות עבור הטור}$$

$$(3) \quad \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{3^n (2n+1)} (z-3n)^n \quad \text{מצאו רדיוס התכנסות עבור הטור}$$

תשובות סופיות:

$$R=1 \quad (1)$$

$$R=\infty \quad (2)$$

$$R=3 \quad (3)$$

# פונקציות מרוכבות

פרק 8 - נקודות סינגולריות

תוכן העניינים

|    |                                   |
|----|-----------------------------------|
| 54 | 1. אפסים של פונקציות אנליטיות     |
| 56 | 2. מיון נקודות סינגולריות         |
| 60 | 3. מיון נקודות סינגולריות באינסוף |
| 61 | 4. משפט קסורטי ויירשטראס          |

## אפסים של פונקציות אנליטיות:

### שאלות:

- (1) קבעו את סדר האפס של הפונקציה  $f(z) = z \sin(z)$  בנקודה  $z = 0$ .
- (2) קבעו את סדר האפס של הפונקציה  $f(z) = z \sin(z^3)$  בנקודה  $z = 0$ .
- (3) נניח כי הפונקציה  $f(z)$  אנליטית ב- $z_0$  ומתאפסת שם מסדר  $n$ .  
 נניח כי הפונקציה  $g(z)$  אנליטית ב- $z_0$  ומתאפסת שם מסדר  $m$ .  
 הוכיחו כי הפונקציה  $h(z) = f(z)g(z)$  אנליטית ב- $z_0$  ומתאפסת שם מסדר  $n+m$ .
- (4) מצאו סדר אפס עבור הפונקציה  $h(z) = z^{20} \sin(z)$  בנקודה  $z_0 = 0$ .
- (5) מצאו סדר אפס עבור הפונקציה  $f(z) = e^{\sin(z)} - \sin^2(z) - 1$  בנקודה  $z_0 = 0$ .
- (6) נניח כי לפונקציה  $f(z)$  יש אפס מסדר 7 בנקודה  $z_0 = 0$ .  
 נניח כי לפונקציה  $g(z)$  יש אפס מסדר 3 בנקודה  $z_0 = 0$ .  
 מצאו את סדר האפס של הפונקציה  $h(z) = f(z) + g(z)$ .
- (7) מצאו סדר אפס עבור הפונקציה  $h(z) = 6 \sin(z^3) + z^{12}(z^6 - 6)$  בנקודה  $z_0 = 0$ .
- (8) הוכיחו כי לא קיימת  $f(z)$  אנליטית ב- $B_1(0)$  כך ש- $f\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{1}{\sqrt{n}}$  לכל  $n \in \mathbb{N}$ .



**תשובות סופיות:**

- (1)  $N = 2$
- (2)  $N = 2$
- (3) הוכחה.
- (4)  $N = 21$
- (5)  $N = 1$
- (6)  $N = 3$
- (7)  $N = 3$
- (8) הוכחה.

## מיון נקודות סינגולריות:

### שאלות:

(1) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של הפונקציה  $f(z) = \frac{1}{1-z}$ .

(2) נניח כי  $h(z) = \frac{f(z)}{g(z)}$  כאשר  $f(z)$  ו- $g(z)$  אנליטיות בסביבת  $z=0$ .

נניח כי  $z=0$  זה אפס מסדר 7 של  $f(z)$ .

נניח כי  $z=0$  זה אפס מסדר 11 של  $g(z)$ .

מהו סוג הסינגולריות של  $h(z)$  ב- $z=0$ ?

(3) נניח כי  $h(z) = \frac{f(z)}{g(z)}$  כאשר  $f(z)$  ו- $g(z)$  אנליטיות בסביבת  $z_0$ .

נניח כי  $z_0$  זה אפס מסדר  $n$  של  $f(z)$ .

נניח כי  $z_0$  זה אפס מסדר  $m$  של  $g(z)$ .

מהו סוג הסינגולריות של  $h(z)$  ב- $z_0$ ? חלקו למקרים  $n < m$  ו- $n \geq m$ .

א. מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = \frac{1 - \cos(z)}{z^2}$ .

ב. מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = z \sin\left(\frac{1}{z}\right)$ .

(4) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = ze^{\frac{1}{z}}$ .

(5) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = z \cos\left(\frac{1}{z}\right)$ .

(6) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = \frac{1}{e^{-z}-1} + \frac{1}{z}$ .

(7) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = \frac{\sin(z)}{\cos(z)}$ .

(8) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = \frac{1}{z^2-1} \cos\left(\frac{\pi z}{z+1}\right)$ .

(9) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = e^{\frac{z}{z-2}}$ .

(10) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = \frac{1}{\sin\left(\frac{1}{z}\right)}$ . האם הן מבודדות?

(11) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = z \cot(z)$ .

(12) נתון כי הפונקציה  $f(z)$  אנליטית בתחום  $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ .

נניח כי 0 זה קוטב מסדר  $m$  של  $f(z)$  ובנוסף נניח כי  $-1 \notin f[\mathbb{C} \setminus \{0\}]$ .

מצאו ומיינו את כל הנקודות הסינגולריות של  $g(z) = \frac{f(z)-1}{f(z)+1}$ .

(13) מצאו את הקטבים והאפסים בתחום  $|z| < 4$  של הפונקציה  $f(z) = \frac{(z-2)^2}{(e^{2z}-1)^2 z^3}$ .

(14) מיינו את הנקודות  $z=0$  ו-  $z = \frac{\pi}{4}$  עבור  $f(z) = \frac{\tan(z)}{z^2 - \frac{\pi}{4}z}$ .

(15) תהיינה  $f, g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  פונקציות שלמות שאינן קבועות.

נניח כי לכל  $z \in \mathbb{C}$  מתקיים  $|f(z)| \leq |g(z)|$ .

א. הוכיחו שכל נקודה סינגולרית של  $\frac{f(z)}{g(z)}$  הינה סליקה.

ב. הוכיחו כי  $f(z) = c \cdot g(z)$  כאשר  $c$  קבוע המקיים  $|c| \leq 1$ .

(16) מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של  $f(z) = \frac{\left(z^2 - \frac{1}{4}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{z}\right)}$ .

(17) הוכיחו כי הנקודה  $z_0 = i$  היא נקודה סינגולרית עיקרית של  $f(z) = \cos\left(\frac{1}{z^2+1}\right)$ .

(18) תהי  $f(z): D \rightarrow \mathbb{C}$  אנליטית כאשר  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid 0 < |z - z_0| < 1\}$ .

נניח כי מתקיים  $|z - z_0|^a |f(z)| \leq 1$  לכל  $z \in D$  עבור  $0 \leq a < 1$ .

הוכיחו כי  $z_0$  נקודה סינגולרית סליקה של  $f(z)$ .

(19) (אתגר)

נתונה  $f(z)$  אנליטית בתחום  $0 < |z| < 1$  המקיימת  $f\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{1}{n!}$ .  
הוכיחו כי  $z=0$  זו נקודה סינגולרית עיקרית של  $f(z)$ .

(20) (אתגר)

הוכיחו כי אם  $z_0$  זה קוטב של  $f(z)$  אז היא בהכרח עיקרית של  $g(z) = e^{f(z)}$ .

רמז: רשמו את  $f(z)$  באופן הבא  $f(z) = \frac{\varphi(z)}{(z-z_0)^m}$  כאשר  $\varphi(z_0) = r_0 e^{i\alpha}$ .

התבוננו בסדרות הבאות:  $z_n = z_0 + \frac{1}{n} e^{i\frac{\alpha}{m}}$ ,  $w_n = z_0 + \frac{1}{n} e^{i\frac{\pi+\alpha}{m}}$ .

## תשובות סופיות:

- (1)  $z=1$  קוטב מסדר 1.
- (2)  $z=0$  קוטב מסדר 4.
- (3) אם  $n \geq m$  אז  $z_0$  נקודה סינגולרית מסוג סליקה של  $h(z)$ .  
ואם  $n < m$  אז  $z_0$  קוטב מסדר  $m-n$  של  $h(z)$ .
- (4)  $z=0$  עיקרית.
- (5)  $z=0$  עיקרית.
- (6)  $z_k = 2\pi i k$  קטבים מסדר 1.
- (7)  $z_k = \frac{\pi}{2} + \pi k$  קטבים מסדר 1.
- (8)  $z = -1$  עיקרית ו-  $z=1$  קוטב מסדר 1.
- (9)  $z=2$  עיקרית.
- (10)  $z=0$  לא מבודדת ו-  $z_k = \frac{1}{\pi k}$  קטבים מסדר 1.
- (11)  $z=0$  סליקה ו-  $z_k = \pi k \neq 0$  קטבים מסדר 1.
- (12)  $z=0$  סליקה.
- (13)  $z=2$  אפס מסדר 2,  $z=0$  קוטב מסדר 5,  $z = \pm \pi i$  קטבים מסדר 2.
- (14)  $z=0$  סליקה,  $z = \frac{\pi}{4}$  קוטב מסדר 1.
- (15) א) הוכחה  
ב) הוכחה
- (16)  $z=0$  לא מבודדת.
- $z_k = \frac{1}{k}$  ( $k \neq 0, 2, -2$ ) קטבים מסדר 1.
- $z = \pm \frac{1}{2}$  סליקות.
- (17) הוכחה.
- (18) הוכחה.
- (19) הוכחה.
- (20) הוכחה.

## מיון נקודות סינגולריות באינסוף:

### שאלות:

(1) מיינו את הנקודה הסינגולרית  $\infty$  של הפונקציה  $f(z) = \frac{z^2}{1+z}$ .

(2) מיינו את הנקודה הסינגולרית  $\infty$  של הפונקציה  $f(z) = e^z$ .

### תשובות סופיות:

(1) זה קוטב מסדר 1 של  $f(z)$ .

(2) זאת נקודה סינגולרית עיקרית של  $f(z)$ .

## משפט קסורטי – וייארשטרס:

### שאלות:

(1) ענה על הסעיפים הבאים:

א. הוכיחו כי הנקודה  $z_0 = i$  היא נק' סינגולרית עיקרית של  $f(z) = \cos\left(\frac{1}{z^2 + 1}\right)$ .

ב. הסיקו כי קיים מספר  $z \in \mathbb{C}$  כך ש- $\left|\cos\left(\frac{1}{z^2 + 1}\right) - 100 \tan^2(z) + e^{-z^2} - 5i\right| < 1$ .

### תשובות סופיות:

(1) א. הוכחה.

ב. הוכחה.

# פונקציות מרוכבות

## פרק 9 - משפט השארית

### תוכן העניינים

|    |                                                   |
|----|---------------------------------------------------|
| 62 | 1. מציאת שארית.....                               |
| 64 | 2. אינטגרלים מרוכבים.....                         |
| 68 | 3. מסילת חצי-קשת מעגלית.....                      |
| 71 | 4. מסילת מעגל היחידה.....                         |
| 73 | 5. מסילת חור מנעול.....                           |
| 74 | 6. הלמה של זורדן.....                             |
| 76 | 7. מסילת משולש פיצה.....                          |
| 77 | 8. חצי מעגל מנוקב.....                            |
| 79 | 9. שימושים של משפט השארית בהתמרות אינטגרליות..... |
| 80 | 10. שארית באינסוף.....                            |



## מציאת שארית:

### שאלות:

חשבו את השאריות של הפונקציות בנקודות הבאות:

$$\operatorname{Res}\left(\frac{z+3}{z+2}, z=-2\right) \quad (1)$$

$$\operatorname{Res}\left(\frac{1}{z^2+9}, z=3i\right) \quad (2)$$

$$\operatorname{Res}\left(\frac{z+2}{z^4+2z^3-2z-1}, z=1\right) \quad (3)$$

$$\operatorname{Res}\left(\frac{z+2}{z^4+2z^3-2z-1}, z=-1\right) \quad (4)$$

$$(5) \quad \text{נניח כי לפונקציה } \frac{f(z)}{g(z)} \text{ יש קוטב פשוט ב- } z_0 \text{ כאשר ונניח כי } g'(z_0) \neq 0.$$

$$\text{הוכיחו כי } \operatorname{Res}\left(\frac{f(z)}{g(z)}, z_0\right) = \frac{f(z_0)}{g'(z_0)}$$

$$\operatorname{Res}\left(\frac{\cos(z)}{z}, 0\right) \quad (6)$$

$$\operatorname{Res}\left(\frac{\sin(z+1)}{z}, 0\right) \quad (7)$$

$$(8) \quad \text{חשבו את השאריות בנקודות הסינגולריות (הסופיות) של הפונקציה } f(z) = \frac{\tan(z)}{z^2 - \frac{\pi}{4}z}$$

$$(9) \quad \text{חשבו את השאריות בנקודות הסינגולריות (הסופיות) של הפונקציה } f(z) = \frac{1 - \cos(z)}{z^3(z - \pi)}$$

- (10) נניח כי  $f(z)$  פונקציה שלמה בעלת  $n$  אפסים בדיוק. הוכיחו שכל הנקודות הסינגולריות של  $\frac{f'(z)}{f(z)}$  הן קטבים פשוטים וחשבו את השאריות בנקודות אלו.

## תשובות סופיות:

- (1) 1  
(2)  $\frac{1}{6i}$   
(3)  $\frac{3}{8}$   
(4)  $-\frac{3}{8}$   
(5) הוכחה.  
(6) 1  
(7)  $\sin(1)$   
(8) 
$$\operatorname{Res}\left[f(z), \frac{\pi}{2} + \pi k\right] = -\frac{1}{\left[\frac{\pi}{2} + \pi k\right]\left[\frac{\pi}{4} + \pi k\right]}$$
  
(9) 
$$\operatorname{Res}[f(z), 0] = -\frac{1}{2\pi} \quad \operatorname{Res}[f(z), \pi] = \frac{2}{\pi^3}$$
  
(10) 
$$\operatorname{Res}\left[\frac{f'(z)}{f(z)}, z_k\right] = m_k$$
 כאשר  $z_k$  אפס מסדר  $m_k$  של  $f(z)$ .

## אינטגרלים מרוכבים :

### שאלות:

חשבו את האינטגרלים הבאים :

$$\oint_{|z|=1} z \tan(\pi z) dz \quad (1)$$

$$\oint_{|z|=2} \frac{e^z}{z^3(z+1)} dz \quad (2)$$

$$\oint_{|z-i|=3} \frac{e^{z^2}-1}{z^3-iz^2} dz \quad (3)$$

$$\oint_{|z|=1} z^2 \sin\left(\frac{1}{z}\right) dz \quad (4)$$

$$\oint_{|z|=1} \sin\left(\frac{1}{z^2}\right) + e^{z^2} \cos(z) dz \quad (5)$$

(6) נניח כי  $f(z)$  פונקציה שלמה.

הוכיחו כי לכל מסלול  $C$  פשוט וסגור שאינו חותך את הראשית, מתקיים  $\oint_C f\left(\frac{1}{z^2}\right) dz = 0$ .

$$\oint_{|z-a|=a} \frac{z}{z^4-1} dz \quad (a > 1) \quad (7)$$

$$\oint_{|z|=1} \frac{(1+z)^5 \sinh(z)}{z^6} dz \quad (8)$$

$$\oint_{|z|=5} \frac{e^z-1}{z(z-1)(z-i)^2} dz \quad (9)$$

$$\oint_{|z|=6} \cot(z) dz \quad (10)$$

$$\oint_{|z|=1} \sin(z) \sin\left(\frac{3}{z}\right) \cos\left(e^{z^2+\pi} + \ln(2)\right) dz \quad (11)$$

(12) נניח כי  $f(z)$  פונקציה שלמה ומתאפסת רק בנקודה  $z=0$  שם יש לה אפס מסדר 2 ומתקיים  $f''(0)=7$ .

$$\oint_{|z|=1} \frac{\sin(z)}{f(z)} dz \quad \text{חשבו}$$

$$\oint_{|z|=1} z^4 \sin(\bar{z}) dz \quad (13)$$

$$\oint_{|z|=1} \sin(z) \sin\left(\frac{1}{z}\right) dz \quad (14)$$

$$f(z) = \frac{1}{\cos(z)-1} \quad (15) \quad \text{חשבו את המקדמים של החזקות השליליות בפיתוח של}$$

לטור לורך סביב  $z_0=0$  בתחום  $0 < |z| < 2\pi$ .

הערה: אם  $\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n (z-z_0)^n$  טור לורך של  $f(z)$  בתחום  $R_1 < |z-z_0| < R_2$  אז ניתן

$$\text{לקבל את המקדמים ע"י הנוסחה} \quad a_n = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z-z_0|=r} \frac{f(z)}{(z-z_0)^{n+1}} dz \quad \text{כאשר } R_1 < r < R_2.$$

(16) הוכיחו את עקרון הארגומנט:

אם  $f(z)$  אנליטית בתחום  $D$  פרט למספר סופי של קטבים ורציפה על

$$\text{השפה } \gamma \text{ ואינה מתאפסת שם על השפה אזי } \frac{1}{2\pi i} \oint_{\gamma} \frac{f'(z)}{f(z)} dz = N - P$$

$N$  - מספר האפסים של  $f(z)$  כולל ריבוי בתחום  $D$ .

$P$  - מספר הקטבים של  $f(z)$  כולל ריבוי בתחום  $D$ .

$$(17) \quad \text{אם } n \in \mathbb{N} \text{ ו- } r > 0 \text{ כך ש- } n < r^2 < n+1 \text{ חשבו את האינטגרל } \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z|=r} \frac{z}{e^{2\pi i z^2} - 1} dz$$

$$(18) \text{ חשבו } \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{e^z}{(z+1)^4} dz$$

הערה:  $\int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{e^z}{(z+1)^4} dz = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{-iR}^{iR} \frac{e^z}{(z+1)^4} dz$  <sup>definition</sup> כאשר המסילה באינטגרל הימני היא מסילת הקו הישר מ- $-iR$  ל- $iR$ .

### תשובות סופיות:

$$\oint_{|z|=1} z \tan(\pi z) dz = 0 \quad (1)$$

$$\oint_{|z|=2} \frac{e^z}{z^3(z+1)} dz = 2\pi i \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{e} \right) \quad (2)$$

$$\oint_{|z-i|=3} \frac{e^{z^2}-1}{z^3-iz^2} dz = 2\pi i \left( 1 - \frac{1}{e} \right) \quad (3)$$

$$\oint_{|z|=1} z^2 \sin\left(\frac{1}{z}\right) dz = -\frac{\pi i}{3} \quad (4)$$

$$\oint_{|z|=1} \sin\left(\frac{1}{z^2}\right) + e^{z^2} \cos(z) dz = 0 \quad (5)$$

(6) הוכחה.

$$\oint_{|z-a|=a} \frac{z}{z^4-1} dz = \frac{\pi i}{2} \quad (7)$$

$$\oint_{|z|=1} \frac{(1+z)^5 \sinh(z)}{z^6} dz = \frac{267}{20} \pi i \quad (8)$$

$$\oint_{|z|=5} \frac{e^z-1}{z(z-1)(z-i)^2} dz = \pi [-3i \cdot e^i + 2i - e] \quad (9)$$

$$\oint_{|z|=6} \cot(z) dz = 6\pi i \quad (10)$$

$$\oint_{|z|=1} \sin(z) \sin\left(\frac{3}{z}\right) \cos(e^{z^2+\pi} + \ln(2)) dz = 0 \quad (11)$$

$$\oint_{|z|=1} \frac{\sin(z)}{f(z)} dz = \frac{4\pi i}{7} \quad (12)$$

$$\oint_{|z|=1} z^4 \sin(\bar{z}) dz = \frac{2\pi i}{5!} \quad (13)$$

$$\oint_{|z|=1} \sin(z) \sin\left(\frac{1}{z}\right) dz = 0 \quad (14)$$

$$a_{-1} = -2, \quad a_{-2} = -2, \quad a_n = 0 \text{ for } n \leq -3 \quad (15)$$

(16) הוכחה.

$$\frac{1}{2\pi i} \oint_{|z|=r} \frac{z}{e^{2\pi i z^2} - 1} dz = 2n+1 \quad (17)$$

$$\int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{e^z}{(z+1)^4} dz = \frac{\pi i}{3e} \quad (18)$$

## מסילת חצי קשת מעגלית:

### שאלות:

בכל התרגילים הבאים נסמן את המסלולים הבאים:

$$C_R = \{z = Re^{i\theta} \mid 0 \leq \theta \leq \pi\}$$

$$\gamma = \{z = x \mid -R \leq x \leq R\}$$

(1) חשבו את  $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1+x^2} dx$  על ידי משפט השארית.

הדרכה:

א. חשבו את האינטגרל  $\oint_{C_R+\gamma} \frac{1}{1+z^2} dz$

ב. הוכיחו כי  $\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} \frac{1}{1+z^2} dz = 0$

ג. הסיקו מהסעיף הקודם כי  $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1+x^2} dx = \lim_{R \rightarrow \infty} \oint_{C_R+\gamma} \frac{1}{1+z^2} dz$

(2) הוכיחו כי  $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1+x^4} dx = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$  על ידי משפט השארית.

הדרכה:

א. חשבו את האינטגרל  $\oint_{C_R+\gamma} \frac{1}{1+z^4} dz$

ב. הוכיחו כי  $\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} \frac{1}{1+z^4} dz = 0$

ג. הסיקו מהסעיפים הקודמים כי  $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1+x^4} dx = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$

$$(3) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2+1}{x^4+1} dx = \pi\sqrt{2} \quad \text{הוכיחו כי}$$

הדרכה:

א. חשבו את האינטגרל  $\oint_{C_R+\gamma} \frac{z^2+1}{z^4+1} dz$

ב. הוכיחו כי  $\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} \frac{z^2+1}{z^4+1} dz = 0$

ג. הסיקו מהסעיפים הקודמים כי  $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2+1}{x^4+1} dx = \pi\sqrt{2}$

$$(4) \quad \text{חשבו את האינטגרל } \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(x^2+1)^3} dx$$

$$(5) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^4+6}{x^6+1} dx$$

$$(6) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2}{(x^2+4)^2} dx$$

$$(7) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x}{(x^2+4x+13)^2} dx$$

$$(8) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2}{(x^2+9)^2} dx$$

$$(9) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{(x^2+1)^2(x^2+9)}$$



## תשובות סופיות:

$$\oint_{C_R+\gamma} \frac{1}{1+z^2} dz = \pi \quad \text{א} \quad (1)$$

(ב) הוכחה.

(ג) הוכחה.

$$\oint_{C_R+\gamma} \frac{1}{1+z^4} dz = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \quad \text{א} \quad (2)$$

(ב) הוכחה.

(ג) הוכחה.

$$\oint_{C_R+\gamma} \frac{z^2+1}{z^4+1} dz = \pi\sqrt{2} \quad \text{א} \quad (3)$$

(ב) הוכחה.

(ג) הוכחה.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(x^2+1)^3} dx = \frac{3\pi}{8} \quad (4)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^4+6}{x^6+1} dx = \frac{14\pi}{3} \quad (5)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2}{(x^2+4)^2} dx = \frac{\pi}{4} \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x}{(x^2+4x+13)^2} dx = -\frac{\pi}{27} \quad (7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2}{(x^2+9)^2} dx = \frac{\pi}{6} \quad (8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{(x^2+1)^2(x^2+9)} = \frac{5}{96}\pi \quad (9)$$

## מסילת מעגל היחידה:

שאלות:

חשבו את האינטגרלים הבאים:

$$\int_0^{2\pi} \frac{1}{(2 + \cos(\theta))^2} d\theta \quad (1)$$

$$\int_0^\pi \frac{1}{2 + \cos(3x)} dx \quad (2)$$

$$(3) \quad \text{חשבו את האינטגרל } \int_0^{2\pi} \frac{1}{a \cos(x) + b \sin(x) + c} dx \quad \text{עבור הפרמטרים}$$

הממשיים  $a, b, c$  המקיימים  $c > \sqrt{a^2 + b^2} = 1$ .

הערה: ניתן להשתמש בעובדה כי  $|\sqrt{c^2 - 1} - c| < 1$

$$(4) \quad \text{חשבו את האינטגרל } \int_0^\pi \frac{1}{(a + b \cos \varphi)^2} d\varphi \quad \text{עבור } a > b > 0$$

$$(5) \quad \text{חשבו את האינטגרל } \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{a + \sin^2 x} dx \quad \text{עבור } |a| > 1$$

$$(6) \quad \text{חשבו לכל } n \in \mathbb{N} \text{ את } \int_0^{2\pi} (1 + 2 \cos \theta)^n \cos(n\theta) d\theta$$

## תשובות סופיות:

$$\int_0^{2\pi} \frac{1}{(2 + \cos(\theta))^2} d\theta = \frac{4\pi}{3\sqrt{3}} \quad (1)$$

$$\int_0^\pi \frac{1}{2 + \cos(3x)} dx = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

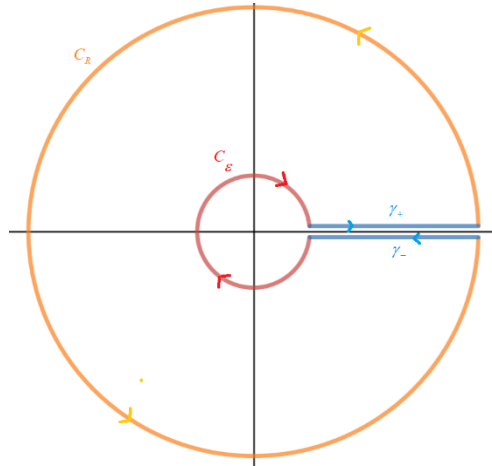
$$\int_0^{2\pi} \frac{1}{a \cos(x) + b \sin(x) + c} dx = \frac{2\pi}{\sqrt{c^2 - 1}} \quad (3)$$

$$\int_0^\pi \frac{1}{(a + b \cos \varphi)^2} d\varphi = \frac{\pi ab}{(a^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{a + \sin^2 x} dx = \frac{\pi}{\sqrt{a^2 + a}} \quad (5)$$

$$\int_0^{2\pi} (1 + 2 \cos \theta)^n \cos(n\theta) d\theta = 2\pi \quad (6)$$

## מסילת חור מנעול:



שאלות:

$$(1) \quad \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{x}(1+x)} dx = \pi \quad \text{הוכיחו כי}$$

הדרכה:

נגדיר את המסלולים (כאשר  $R > 1$  ו-  $0 < \epsilon < 1$ ).

$$C_R = \{z = R e^{i\theta} \mid 0 < \theta < 2\pi -\}$$

$$C_\epsilon = \{z = \epsilon e^{i\theta} \mid 0 < \theta < 2\pi -\}$$

$$\gamma_+ = \{z = x e^{0 \cdot i} \mid x: \epsilon \rightarrow R\}$$

$$\gamma_- = \{z = x e^{2\pi i} \mid x: R \rightarrow \epsilon\}$$

א. הוכיחו כי  $\oint_{\gamma_+ + C_R + \gamma_- + C_\epsilon} \frac{1}{\sqrt{z}(1+z)} dz = 2\pi$  כאשר  $\sqrt{z}$  מוגדר בתחום  $\mathbb{C} \setminus [0, \infty)$ .

ב. הוכיחו כי  $\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} \frac{1}{\sqrt{z}(1+z)} dz = 0$

ג. הוכיחו כי  $\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{C_\epsilon} \frac{1}{\sqrt{z}(1+z)} dz = 0$

ד. הסיקו מהסעיפים הקודמים כי  $\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{x}(1+x)} dx = \pi$

תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

## הלמה של ז'ורדן:

### שאלות:

חשבו את האינטגרלים הבאים על ידי שימוש בהלמה של ז'ורדן:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos(x)}{1+x^2} dx \quad (1)$$

הדרכה:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos(x)}{1+x^2} dx = \operatorname{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{ix}}{1+x^2} dx \right\} \quad \text{א. הוכיחו כי}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{ix}}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{e} \quad \text{ב. הוכיחו כי}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x^3+5x)\sin(x)}{x^4+10x^2+9} dx \quad (2)$$

הדרכה:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x^3+5x)\sin(x)}{x^4+10x^2+9} dx = \operatorname{Im} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x^3+5x)e^{ix}}{x^4+10x^2+9} dx \right\} \quad \text{א. הוכיחו כי}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x^3+5x)e^{ix}}{x^4+10x^2+9} dx = \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{e} + \frac{1}{e^3} \right) \cdot i \quad \text{ב. הוכיחו כי}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(x)}{x^4+1} dx \quad (3)$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x^2 \cos(ax)}{(x^2+1)^2} dx \quad (4)$$

## תשובות סופיות:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos(x)}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{e} \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x^3 + 5x)\sin(x)}{x^4 + 10x^2 + 9} dx = \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{e} + \frac{1}{e^3} \right) \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(x)}{x^4 + 1} dx = 0 \quad (3)$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x^2 \cos(ax)}{(x^2 + 1)^2} dx = \frac{\pi}{4} (1-a) e^{-a} \quad (4)$$

## מסילת משולש פיצה:

שאלה:

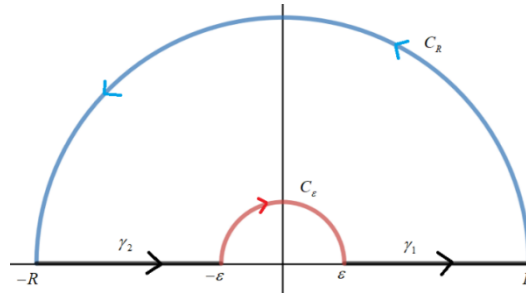
$$(1) \quad \int_0^{\infty} \frac{1}{1+x^{2016}} dx = \frac{\pi}{2016} \cdot \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{2016}\right)} \quad \text{כי הוכיחו כי}$$

רמז: התבוננו בפונקציה  $f(z) = \frac{1}{1+z^{2016}}$  ובגזרת מעגל בזווית  $\frac{2\pi}{2016}$ .

תשובה סופית:

(1) הוכחה.

## מסילת חצי מעגל מנוקב:



בתרגילים הבאים נסמן את המסלולים הבאים:

$$\begin{aligned} C_R &= \{z = Re^{i\theta} \mid 0 \leq \theta \leq \pi\} & \gamma_1 &= \{z = x \mid \varepsilon \leq x \leq R\} \\ C_\varepsilon &= \{z = \varepsilon e^{i\theta} \mid \theta: \pi \rightarrow 0\} & \gamma_2 &= \{z = x \mid -R \leq x \leq -\varepsilon\} \\ \gamma &= \gamma_1 + C_R + \gamma_2 + C_\varepsilon \end{aligned}$$

### שאלות:

$$(1) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2(x)}{x^2} dx = \pi \quad \text{הוכיחו כי}$$

הדרכה:

$$א. \quad \frac{\sin^2(x)}{x^2} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1 - e^{i2x}}{2x^2} \right\} \quad \text{הוכיחו כי}$$

$$ב. \quad \oint_{\gamma} f(z) dz = 0 \quad \text{והסבירו מדוע} \quad f(z) = \frac{1 - e^{i2z}}{2z^2}$$

$$ג. \quad \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \int_{C_\varepsilon} f(z) dz = -\pi \quad \text{ו} \quad \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} f(z) dz = 0 \quad \text{הוכיחו כי}$$

$$(2) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^6(x)}{x^6} dx \quad \text{חשבו את האינטגרל}$$

$$(3) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(x)}{x^3 + \pi^2 x} dx \quad \text{חשבו את האינטגרל}$$

$$(4) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 - \cos(x)}{x^2} dx \quad \text{חשבו את האינטגרל}$$



$$(5) \quad \text{חשבו את האינטגרל } \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 - \cos(\alpha x)}{x^2 (x^2 + \beta^2)} dx \text{ לכל } \alpha, \beta > 0.$$

### תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

$$(2) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin^6(x)}{x^6} dx = \frac{88}{5 \cdot 2^5} \pi$$

$$(3) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(x)}{x^3 + \pi^2 x} dx = \frac{1}{2\pi} - \frac{e^{-\pi}}{\pi}$$

$$(4) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 - \cos(x)}{x^2} dx = \pi$$

$$(5) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 - \cos(\alpha x)}{x^2 (x^2 + \beta^2)} dx = \frac{\pi}{\beta^2} \left( \alpha - \frac{1 - e^{-\alpha\beta}}{\beta} \right)$$

## שימושים של משפט השארית בהתמרות אינטגרליות:

### שאלות:

(1) נתונה  $F(s) = \frac{p(s)}{q(s)}$  מנת פולינומים כאשר  $\deg(q) \geq \deg(p) + 1$ .

הוכיחו כי  $L^{-1}\{F(s)\} = \frac{1}{2\pi i} \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{\sigma - iR}^{\sigma + iR} e^{st} F(s) ds = \sum_{k=1}^n \text{Res}[e^{st} F(s), s_k]$

כאשר  $s_k$  אלו הנקודות הסינגולריות של הפונקציה  $F(s)$  והקו  $\text{Re}(s) = \sigma$  נמצא מצד ימין לכל הנקודות הסינגולריות.

(2) חשבו התמרת לפלס הפוכה של  $F(s) = \frac{1}{(s^2 + 2s + 5)^2}$ .

### תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

(2)  $f(t) = \frac{e^{-t}}{16} (\sin(2t) - 2t \cos(2t))$

## שארית באינסוף:

## שאלות:

(1) נניח כי  $\infty$  הינה נקודה סינגולרית מבודדת של  $f(z)$ .

$$\text{הוכיחו כי } \operatorname{Res}\left[f(z), \infty\right] = -\operatorname{Res}\left[\frac{1}{z^2} f\left(\frac{1}{z}\right), 0\right].$$

(2) נניח כי  $f(z)$  אנליטית במישור המרוכב פרט למספר סופי של נקודות

$$z_1, \dots, z_n \in \mathbb{C}.$$

הוכיחו כי:

$$\operatorname{Res}\left[f(z), z_1\right] + \operatorname{Res}\left[f(z), z_2\right] + \dots + \operatorname{Res}\left[f(z), z_n\right] + \operatorname{Res}\left[f(z), \infty\right] = 0$$

$$(3) \text{ חשבו } \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z|=10} \frac{e^{\sin\left(\sin\left(\frac{1}{z}\right)\right)} \cos\left(\frac{1}{z}\right)}{z^2 - 1} dz$$

$$(4) \text{ חשבו } \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z|=1} \frac{\sin\left(\frac{1}{z}\right)}{z^2 - 4} dz$$

## תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

(2) הוכחה.

$$(3) \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z|=10} \frac{e^{\sin\left(\sin\left(\frac{1}{z}\right)\right)} \cos\left(\frac{1}{z}\right)}{z^2 - 1} dz = 0$$

$$(4) \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z|=1} \frac{\sin\left(\frac{1}{z}\right)}{z^4 - 1} dz = -\frac{\sin\left(\frac{1}{2i}\right)}{2i}$$

# פונקציות מרוכבות

פרק 10 - עקרון הארגומנט

תוכן העניינים

|    |                                         |
|----|-----------------------------------------|
| 81 | 1. עקרון הארגומנט                       |
| 83 | 2. משפט רושה                            |
| 85 | 3. קיום פונקציות לוגריתמיות ושורשים     |
| 86 | 4. משפט הורוויץ                         |
| 87 | 5. המשמעות הגיאומטרית של עקרון הארגומנט |

## עקרון הארגומנט:

## שאלות:

חשבו את האינטגרלים הבאים על ידי שימוש בעקרון הארגומנט:

$$\int_{|z|=2} \frac{2z}{z^2+1} dz \quad (1)$$

$$f(z) = \frac{(z+3)(z+1)}{z^2} \quad \text{כאשר} \quad \int_{|z|=2} \frac{f'(z)}{f(z)} dz \quad (2)$$

$$\int_{|z|=1} \frac{3\sin(2z)}{\sin^2(z)-0.5} dz \quad (3)$$

$$(4) \quad \text{א) מצאו את הקטבים והאפסים של } f(z) = \frac{(z-2)^2}{(e^{2z}-1)^2 z^3} \quad \text{בתחום } |z| < 4.$$

$$(b) \quad \text{חשבו את האינטגרל } I = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z|=4} \frac{f'(z)}{f(z)} dz$$

$$(5) \quad \text{א) מצאו את הקטבים והאפסים של } f(z) = \frac{\cos(z)}{\sin(z)(1-\cos(z))^2} \quad \text{בתחום } \mathbb{C}.$$

$$(b) \quad \text{חשבו את האינטגרל } I = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z|=1} \frac{f'(z)}{f(z)} dz$$

(6) (אתגר)

נתבונן במסילה  $\gamma(t): [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{C}$  המוגדרת על ידי:

$$\gamma(t) = \frac{\left[ \cos(2t) - \cos(t) + i(\sin(2t) - \sin(t)) + \frac{1}{4} e^{\frac{\cos(t)-2-i\sin(t)}{5-4\cos(t)}} \right]}{\sin(\cos(t) + i\sin(t)) - i\sin(t) - \cos(t)}$$

כמה פעמים היא מקיפה את הראשית? (נגד כיוון השעון)

הערה: מספר הפעמים שמסילה סגורה (לאו דווקא פשוטה) מקיפה את  $z_0$

$$\text{נתון ע"י: } \eta(\gamma, z_0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\gamma} \frac{1}{z - z_0} dz$$

## תשובות סופיות:

$$\int_{|z|=2} \frac{2z}{z^2+1} dz = 4\pi i \quad (1)$$

$$\int_{|z|=2} \frac{f'(z)}{f(z)} dz = -2\pi i \quad (2)$$

$$\int_{|z|=1} \frac{\sin(2z)}{\sin^2(z)-0.5} dz = 12\pi i \quad (3)$$

(4) א)  $z=0$  קוטב מסדר 5,  $z=\pm\pi i$  קטבים מסדר 2.  
ב)  $I=-7$

(5) א)  $z = \frac{\pi}{2} + \pi k$  אפסים מסדר 1 (פשוטים).

$z = 2\pi k$  קטבים מסדר 3.

$z = \pi(2k+1)$  קטבים מסדר 1.

ב)  $I = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z|=1} \frac{f'(z)}{f(z)} dz = 0-5$

(6) -1 (כלומר סיבוב אחד עם כיוון השעון)

## משפט רושה:

## שאלות:

(1) כמה אפסים יש לפונקציה  $h(z) = z^4 + 5z + 1$  בעיגול היחידה  $D(0,1) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$ ?

(2) כמה אפסים יש לפונקציה  $h(z) = 5z^4 + z + 1$  בעיגול היחידה  $D(0,1) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$ ?

(3) כמה אפסים יש לפונקציה  $h(z) = z^4 + 5z + 4$  בעיגול  $D(0,2) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 2\}$ ?

(4) כמה פתרונות יש למשוואה  $z^5 + 3z + 1 = 0$  בתחום  $D(0,1) = \{z \in \mathbb{C} \mid 1 < |z| < 2\}$ ?

(5) כמה אפסים יש לפונקציה  $h(z) = z^4 - 10z + 1$  בתחום  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid 1 < |z| < 3\}$ ?

(6) כמה אפסים יש לפונקציה  $h(z) = \frac{1}{2}z^6 - 5z^4 + 7z$  בתחום  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$ ?

(7) כמה אפסים יש לפונקציה  $h(z) = \frac{1}{2}z^6 - 5z^4 + 7z$  בתחום  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid 1 < |z| < 3\}$ ?

(8) יהי  $m \geq 2$  טבעי. מצאו את מספר האפסים של  $h(z) = ze^{m-z} - 1$  ב- $|z| < 1$ .

(9) יהי  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$  עיגול היחידה ויהיו  $a_1, \dots, a_n \in D$  נקודות שונות.

$$B(z) = \prod_{j=1}^n \frac{z - a_j}{1 - \overline{a_j} \cdot z}$$

נסמן

הוכיחו כי לכל  $z_0 \in D$  למשוואה  $B(z) = z_0$  יש  $n$  פתרונות.

רמז: הוכיחו קודם כי ההעתקה  $\varphi_j(z) = \frac{z - a_j}{1 - \overline{a_j}z}$  מעתיקה את מעגל היחידה לעצמו.

(10) הוכיחו כי קיים מספר  $N_0 \in \mathbb{N}$  כך שלכל  $n > N_0$  יש בדיוק פתרון אחד למשוואה

$$\sin(z) = z^n \quad \text{בדיסק} \quad D\left(0, \frac{1}{2}\right) = \left\{z \in \mathbb{C} \mid |z| < \frac{1}{2}\right\}$$

- (11) לפי הגדרה, נקודת שבת של  $f$  היא נקודה  $z_0$  כך ש- $f(z_0) = z_0$ .  
 הוכיחו כי אם  $f$  אנליטית בעיגול היחידה הסגור כך שלכל  $|z|=1$  מתקיים  $|f(z)| < 1$   
 אז קיימת ל- $f$  נקודת שבת אחת בדיוק בעיגול היחידה הפתוח.

### תשובות סופיות:

- (1) 1
- (2) 4
- (3) 4
- (4) 4
- (5) 3
- (6) 1
- (7) 3
- (8) 1
- (9) הוכחה
- (10) הוכחה
- (11) הוכחה



## קיום פונקציות לוגריתמיות ושורשים:

### שאלות:

(1) הוכיחו כי בתחום  $\mathbb{C} \setminus \{(-\infty, -1] \cup [1, \infty)\}$  לפונקציה  $f(z) = \frac{z-1}{z+1}$  קיים לוגריתם אנליטי.

(2) הוכיחו:

א. כי בתחום  $\mathbb{C} \setminus [-i, i]$  לפונקציה  $f(z) = \frac{z-i}{z+i}$  קיים לוגריתם אנליטי.

ב. כי בתחום  $\mathbb{C} \setminus [-i, i]$  לפונקציה  $f(z) = z^2 \frac{z-i}{z+i}$  קיימת פונקציית שורש אנליטית מסדר 2.

(3) הוכיחו:

א. הוכיחו כי בתחום  $\mathbb{C} \setminus [-1, 1]$  לפונקציה  $f(z) = 1 - z^2$  לא קיים לוגריתם אנליטי.

ב. הוכיחו כי בתחום  $\mathbb{C} \setminus [-1, 1]$  לפונקציה  $f(z) = 1 - z^2$  קיימת פונקציית שורש אנליטית מסדר 2.

(4) הוכיחו כי  $|z| > 4$  לפונקציה  $f(z) = (z-2)^2 - 4$  לא קיים לוגריתם אנליטי אך כן קיימת פונקציית שורש מסדר 2.

### תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

(2) הוכחה.

(3) הוכחה.

(4) הוכחה.

## משפט הורוויץ:

שאלות:

$$(1) \quad \text{הוכיחו כי קיים } N_0 \in \mathbb{N} \text{ כך שלכל } n > N_0 \text{ למשוואה: } z - \frac{z^3}{3!} + \frac{z^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!} = 0$$

יש פתרון אחד בדיוק בתחום  $|z - \pi| < 1$ .

$$(2) \quad \text{הוכיחו כי לכל } R > 0 \text{ קיים } N_0 \in \mathbb{N} \text{ כך שלכל } n > N_0 \text{ למשוואה}$$

$$1 + z + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^3}{3!} + \dots + \frac{z^n}{n!} = 0$$

אין פתרון ב-  $D(0, R) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < R\}$ .

תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

(2) הוכחה.

## המשמעות הגיאומטרית של עקרון הארגומנט:

### שאלות:

- (1) מצאו ע"י עקרון הארגומנט את  $N$  - מספר האפסים (כולל ריבוי) של הפולינום  $p(z) = z^2 + 1$  בחצי המישור העליון  $\text{Im}(z) > 0$ .  
(הכוונה בלי לפתור את המשוואה  $z^2 + 1 = 0$ ).

- (2) מצאו ע"י עקרון הארגומנט את  $N$  - מספר האפסים (כולל ריבוי) של הפולינום  $p(z) = z^4 + 8z^3 + 3z^2 + 8z + 3$  בחצי המישור הימני  $\text{Re}(z) > 0$ .

### תשובות סופיות:

(1) 1

(2) 2

# פונקציות מרוכבות

פרק 11 - העתקות מתקדמות

תוכן העניינים

|    |                           |
|----|---------------------------|
| 88 | 1. העתקות קונפורמיות..... |
| 90 | 2. העתקות מוביוס.....     |

## העתקות קונפורמיות:

### שאלות:

- (1) הוכיחו כי ההעתקה  $T(z) = z + 1$  מעתיקה את התחום  $A = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$  אל התחום  $B = \{w \in \mathbb{C} \mid |w - 1| < 1\}$ .

- (2) חשבו את  $f(-6)$ ,  $f(6)$ ,  $f(6i)$ ,  $f(-6i)$  כאשר  $f(z) = e^{\frac{i\pi}{2}} \cdot z$ . מהי המשמעות הגיאומטרית של ההעתקה?

- (3) מצאו את תמונת מעגל היחידה תחת ההעתקה כאשר  $f(z) = 2z$ . מהי המשמעות הגיאומטרית של ההעתקה?

- (4) מצאו העתקה ליניארית המעתיקה את החצי המישור העליון  $H^+ = \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im}(z) > 0\}$  אל החצי מישור התחתון  $H^- = \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im}(z) < 0\}$ .

- (5) מצאו העתקה ליניארית המעתיקה את הרביע הראשון  $\{z \in \mathbb{C} \mid \text{Re}(z) > 0, \text{Im}(z) > 0\}$  אל הרביע השלישי  $\{z \in \mathbb{C} \mid \text{Re}(z) < 0, \text{Im}(z) < 0\}$ .

- (6) מצאו את תמונת הקבוצה  $A = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 2\}$  תחת ההעתקה  $f(z) = \frac{1}{z}$ .

- (7) מצאו את התמונה של  $A = \left\{z = re^{\frac{i\pi}{4}} \mid r \geq 0\right\}$  תחת ההעתקה  $f(z) = z^2$ .

- (8) מצאו את התמונה של  $A = \{z = e^{i\theta} \mid 0 \leq \theta \leq \pi\}$  תחת העתקת

$$f(z) = \frac{1}{2} \left( z + \frac{1}{z} \right) \text{ יוקובסקי}$$

(9) מצאו את התמונה של  $A = \{z = x + iy \mid -\pi < y \leq \pi, 0 \leq x \leq 1\}$  תחת ההעתקה  $f(z) = e^z$ .

(10) מצאו את התמונה של  $C \setminus (-\infty, 0]$  תחת ההעתקה  $w = \text{Log}(z)$ .

(11) מצאו את התמונה של  $\{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\} \setminus (-\infty, 0]$  תחת ההעתקה  $w = \text{Log}(z)$ .

(12) מצאו את התמונה של  $\{z = x + iy \mid 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$  תחת ההעתקה  $w = z^2$ .

### תשובות סופיות:

(1) הוכחה.

$$(2) \quad f(-6) = -6i, f(6) = 6i, f(6i) = -6, f(-6i) = 6$$

(3) 2

$$(4) \quad f(z) = e^{-i\frac{\pi}{2}z}$$

$$(5) \quad f(z) = e^{i\pi}z$$

(6) ראו סרטון.

$$(7) \quad \left[ re^{i\frac{\pi}{4}} \right]^2$$

(8) ראו סרטון.

(9) ראו סרטון.

(10) ראו סרטון.

(11) ראו סרטון.

(12) ראו סרטון.

## העתקות מוביוס:

### שאלות:

(1) תרגיל זה מחולק ל-2 סעיפים:

א. הוכיחו כי הרכבת העתקות מוביוס הינה העתקה מוביוס,

כלומר אם  $f(z) = \frac{az+b}{cz+d}$  ו-  $g(z) = \frac{Az+B}{Cz+D}$  אז  $f \circ g(z)$  גם העתקה מוביוס.

ב. חשבו את כפל המטריצות:

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

מה הקשר להרכבת העתקות מוביוס?

(2) הוכיחו כי העתקת מוביוס  $w = f(z) = \frac{az+b}{cz+d}$  היא פונקציה קבועה כאשר  $ad - bc = 0$ .

(3) מצאו את התמונה של  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$  תחת ההעקקה  $f(z) = \frac{z-1}{z+1}$ .

הדרכה: ניתן להשתמש בעובדות הבאות:

א. העתקת מוביוס מעבירה קווים ישרים/מעגלים לקווים ישרים/מעגלים.

ב. רק קו ישר מכיל את נקודת האינסוף.

(4) מצאו את התמונה של  $H^+ = \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im}(z) > 0\}$  תחת ההעקקה  $f(z) = \frac{z-1}{z+1}$ .

(5) מצאו את התמונה של  $H^+ = \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im}(z) > 0\}$  תחת ההעקקה  $f(z) = \frac{z+i}{z-i}$ .

(6) מצאו את התמונה של  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$  תחת ההעקקה  $f(z) = \frac{z+i}{z-i}$ .

(7) מצאו את התמונה של  $H^+ = \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im}(z) > 0\}$  תחת ההעקקה  $f(z) = \frac{z-a}{z-\bar{a}}$

כאשר  $a \in H^+$ .

(8) מצאו העתקה מהתחום  $\{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Re}(z) > 0, \operatorname{Im}(z) > 0\}$  אל עיגול היחידה  $\{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$ .

(9) מצאו וציירו את תמונת התחום  $\begin{cases} |z-i| \leq 1 \\ \operatorname{Re}(z) > 0 \end{cases}$  תחת העתקה  $f(z) = \frac{z}{z-2i}$ .

(10) מצאו העתקה חח"ע ועל בין  $D(0,1) \setminus [0,1)$  ו-  $D(0,1)$ .

(11) מצאו העתקה חח"ע ועל בין  $A = \{z \in \mathbb{C} : 0 < \operatorname{Im}(z) < 1\}$  והרביע הראשון.

(12) מצאו העתקה חח"ע ועל בין  $A = \left\{z = re^{i\theta} : r > 0, 0 < \theta < \frac{\pi}{4}\right\}$  ו-  $B = \{z \in \mathbb{C} : 0 < \operatorname{Im}(z) < 1\}$ .

(13) מצאו העתקה חח"ע ועל בין  $A = \left\{z = re^{i\theta} : r > 0, 0 < \theta < \frac{\pi}{4}\right\}$  ו-  $B = D(0,1)$ .

(15) נגדיר  $H^+ = \{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Im}(z) > 0\}$ . בהינתן זוג נקודות  $z_1, z_2 \in H^+$ , מצאו שקילות בין חצי המישור לעצמו כך ש-  $f(z_1) = z_2$ .



## תשובות סופיות:

$$(1) \text{ א. הוכחה. ב. } \begin{pmatrix} aA+bC & aB+bD \\ cA+bC & cB+bD \end{pmatrix}$$

$$(2) \text{ הוכחה.}$$

$$(3) f(-1) = \infty$$

$$(4) f(0) = -1, f(1) = 0, f(-1) = \infty, f(i) = i$$

$$(5) f(2i) = 3$$

$$(6) f(-i) = 0, f(0) = -1$$

$$(7) \text{ ראו סרטון.}$$

$$(8) g(z) = \frac{z-i}{z+i}, T(z) = \frac{z^2-i}{z^2+i}$$

$$(9) f(2i) = \infty, f(0) = 0, f(1+i) = i, f(i) = -1$$

$$(10) f_1(z) = e^{\frac{1}{2}\log(z)}, f_2(z) = \frac{z-1}{z+1}, f_3(z) = e^{-i\frac{\pi}{2}z}, f_4(z) = z^2, f_5(z) = \frac{z-i}{z+i}$$

$$(11) f_1(z) = \frac{\pi}{2}z, f_2(z) = e^{\frac{\pi}{2}z}$$

$$(12) f_1(z) = \ln(r) + i\theta, f_2(z) = \frac{4}{\pi}x + i\frac{4}{\pi}y$$

$$(13) f_1(z) = z^4, f_2(z) = \frac{z-i}{z+i}$$

$$(15) f(z) = f_2^{-1} \circ f_1(z)$$

# פונקציות מרוכבות

פרק 12 - הלמה של שוורץ

תוכן העניינים

1. הלמה של שוורץ.....93

## הלמה של שוורץ:

### שאלות:

(1) נתונות  $f(z): D(0,1) \rightarrow D(0,1)$ ,  $g(z): D(0,1) \rightarrow D(0,1)$  פונקציות הולומורפיות חח"ע ועל בנוסף, ידוע כי  $f(z_1) = 0$  ו- $g(0) = z_1$  כאשר  $z_1 \in D(0,1)$ . הוכיחו כי  $|f(z)| \leq |g^{-1}(z)|$  כאשר  $g^{-1}(z)$  הינה הפונקציה ההופכית של  $g(z)$ .

(2) נתונות  $f(z): D(0,1) \rightarrow D(0,1)$ ,  $g(z): D(0,1) \rightarrow D(0,1)$  פונקציות הולומורפיות חח"ע ועל בנוסף, ידוע כי  $f(z_1) = 0$  ו- $g(z_1) = 0$  כאשר  $z_1 \in D(0,1)$ .  
א. הוכיחו כי  $|f(z)| \leq |g(z)|$  לכל  $z \in D(0,1)$ .  
ב. הסיקו כי  $|f(z)| = |g(z)|$  לכל  $z \in D(0,1)$ .

(3) נתונה  $f(z): D(0,1) \rightarrow D(0,1)$  ו- $a \in D(0,1)$  קבוע כלשהוא כך ש- $f(a) = 0$ .  
א. הוכיחו כי אם  $|z| \leq 1$  אז  $\left| \frac{z-a}{1-\bar{a}z} \right| \leq 1$ .  
ב. הוכיחו כי  $\forall z \in D(0,1) \rightarrow |f(z)| \leq \left| \frac{z-a}{1-\bar{a}z} \right|$ .

(4) נתונה  $f(z): H^+ \rightarrow D(0,1)$  כאשר  $H^+ = \{z \mid \text{Im}(z) > 0\}$  ו- $a \in H^+$  קבוע כלשהוא כך ש- $f(a) = 0$ .

א. הוכיחו כי אם  $a \in H^+$  אז  $\left| \frac{z-a}{z-\bar{a}} \right| \leq 1$ .  
ב. הוכיחו כי  $\forall z \in H^+ \rightarrow |f(z)| \leq \left| \frac{z-a}{z-\bar{a}} \right|$ .

(5) הוכיחו הכללה של הלמה של שוורץ:

תהי  $f(z)$  הולומורפית ב- $D(0,1)$  (עיגול היחידה) המקיימת כי לכל  $z \in D(0,1)$  מתקיים  $|f(z)| \leq 1$  ובנוסף  $f(0) = f^{(1)}(0) = \dots = f^{(m-1)}(0) = 0$ ,  
הוכיחו כי בהכרח מתקיים  $|f(z)| \leq |z|^m$  לכל  $z \in D(0,1)$ , כאשר  $m \geq 1$  טבעי כלשהוא.

(6) בתרגיל זה נסמן  $H^r = \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Re}(z) > 0\}$  ו-  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$ .

א. יהי  $\alpha \in H^r$  קבוע כלשהוא. הוכיחו כי ההעתקה  $\varphi(z) = \frac{z - \alpha}{z + \alpha}$  מעבירה

את החצי המישור הימני  $H^r$  אל עיגול היחידה  $D$ , כלומר  $\varphi(H^r) = D$ .

ב. תהי  $f: H^r \rightarrow D$  אנליטית ונניח שקיימת  $\alpha \in H^r$  כך ש-  $f(\alpha) = f'(\alpha) = 0$ .

הוכיחו כי לכל  $w \in H^r$  מתקיים  $|f(w)| \leq \left| \frac{w - \alpha}{w + \alpha} \right|^2$ .

ג. תהי  $f: H^r \rightarrow D$  אנליטית ונניח שקיימות  $\alpha, \beta \in H^r$  שונות, כלומר  $\alpha \neq \beta$

כך שמתקיים  $f(\alpha) = f(\beta) = 0$ .

הוכיחו כי לכל  $w \in H^r$  מתקיים  $|f(w)| \leq \left| \frac{w - \alpha}{w + \alpha} \right| \cdot \left| \frac{w - \beta}{w + \beta} \right|$ .

(7) נסמן  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$ .

תהי  $f: D \rightarrow D$  פונקציה אנליטית.

א. הוכיחו כי לכל  $z_1, z_2 \in D$  מתקיים  $\left| \frac{f(z_1) - f(z_2)}{1 - \overline{f(z_1)}f(z_2)} \right| \leq \left| \frac{z_1 - z_2}{1 - \overline{z_1}z_2} \right|$ .

ב. הוכיחו כי לכל  $z \in D$   $\frac{|f'(z)|}{1 - |f(z)|^2} \leq \frac{1}{1 - |z|^2}$ .

רמז: התבוננו בהעתקה  $\varphi_a(z) = \frac{z - a}{1 - \overline{a}z}$  כאשר  $a \in D$ .

(8) נסמן  $H^+ = \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Im}\{z\} > 0\}$  ו-  $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$ .

תהי  $f: H^+ \rightarrow H^+$  פונקציה אנליטית ויהי  $z_0 \in H^+$  נקודה כלשהיא.

הוכיחו כי לכל  $z \in H^+$  מתקיים  $\left| \frac{f(z) - f(z_0)}{f(z) - \overline{f(z_0)}}.$

רמז: ההעתקה  $\varphi_a(z) = \frac{z - a}{z - \overline{a}}$  מקיימת  $\varphi_a(H^+) = D$  כאשר  $a \in H^+$ .

(9) נניח כי  $f: D(0,1) \rightarrow D(0,1)$  אנליטית וכי קיימות 2 נקודות שונות  $\alpha, \beta \in D(0,1)$

כך ש-  $f(\alpha) = \alpha$  ו-  $f(\beta) = \beta$ . הוכיחו כי  $f(z) \equiv z$ .

(10) נניח כי  $f: D(0,1) \rightarrow D(0,1)$  אנליטית. הוכיחו כי  $|f'(z)| \leq \frac{1}{1 - |z|^2}$  לכל  $z \in D(0,1)$ .

**תשובות סופיות:**

- (1) הוכחה.
- (2) א. הוכחה. ב. ראו סרטון.
- (3) א. הוכחה. ב. הוכחה.
- (4) א. הוכחה. ב. הוכחה.
- (5) הוכחה.
- (6) א. הוכחה. ב. הוכחה. ג. הוכחה.
- (7) א. הוכחה. ב. הוכחה.
- (8) הוכחה.
- (9) הוכחה.
- (10) הוכחה.

# פונקציות מרוכבות

פרק 13 - שאלות מסכמות ברמת בחינה

תוכן העניינים

1. תרגילים ..... 96

## שאלות מסכמות ברמת בחינה:

### שאלות:

(1) האם קיימת  $f$  אנליטית ב-  $B_1(0) = \{z \mid |z| < 1\}$  כך ש-  $|f(z)| = \ln(2 + |z|)$  לכל  $z \in B_1(0)$ ?

(2) נניח כי  $f(z)$  אנליטית בטבעת  $0 < |z| < \infty$  ונניח כי קיים מספר  $\alpha$  ממשי שאינו שלם כך שלכל  $R > 0$  מתקיים:  $\int_0^{2\pi} |f(Re^{i\theta})| d\theta \leq 2\pi R^\alpha$ . הוכיחו כי:  $f(z) = 0$  בטבעת.

(3) יהי  $|a| < 1$ . כמה פתרונות יש למשוואה:  $e^{z+2} = \left(\frac{z-a}{1-\bar{a} \cdot z}\right)^{2020}$  ב-  $B_1(0)$ ?

(4) הוכח / הפרד:

קיימת פונקציה  $f(z)$  אנליטית ב-  $B_{1+\varepsilon}(0)$  כך ש-  $\frac{1}{n^2} + \frac{1}{n^3} = f\left(\frac{1}{n}\right) + f\left(-\frac{1}{n}\right)$  לכל  $n \in \mathbb{N}$ .

(5) הראו כי הטור:  $\sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{e^z - i}{e^z + i}\right)^n$  מתכנס בהחלט ברצועה:  $U = \{z \in \mathbb{C} \mid 0 < \operatorname{Im}(z) < \pi\}$ .

(6) נניח כי:  $f = u + iv$  שלמה כך ש-  $v(x, y) = \cosh[u(x, y)]$ . הוכיחו כי  $f(z)$  קבועה.

(7) הוכיחו כי לכל  $R > 0$  קיים  $N \in \mathbb{N}$  כך שלכל  $n > N$  למשוואה:  $1 + z + \frac{z^2}{2} + \dots + \frac{z^n}{n!} = 0$  אין פתרון ב-  $B_R(0)$ .

(8) הוכח / הפרד :

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n a_n}{(2k+1)^n} = 0 \text{ ו- } \sum_{n=1}^{\infty} |a_n| < \infty \text{ ש- } a_n \in \mathbb{C}, \{a_n\}_{n=1}^{\infty} \text{ קיימת סדרה : } \forall k \in \mathbb{N}.$$

$$(9) \text{ הוכיחו כי לכל } t \in \mathbb{R} \text{ מתקיים : } \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{2t \cos(\theta)} d\theta = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^{2n}}{(n!)^2}$$

$$(10) \text{ נניח כי } f(z) \text{ אנליטית ב- } B_1(0). \text{ הוכיחו כי קיים } n \in \mathbb{N} \text{ כך ש- } f\left(\frac{1}{n}\right) \neq \frac{1}{n+2}.$$

$$(11) \text{ חשבו את האינטגרל : } \int_0^{\infty} \frac{1}{x^3 + 1}$$

(12) הוכח / הפרד :

$$\text{קיימת פונקציה שלמה } f(z) \text{ כך ש- } |z^2 \cdot f(z) + e^z| \leq 1 \text{ לכל } |z| < 1.$$

$$(13) \text{ נניח כי } f(z) \text{ אנליטית בטבעת } 0 < |z| < 2 \text{ כך שלכל } n \geq 0 \text{ מתקיים :}$$

$$\oint_{|z|=1} z^n f(z) dz = 0 \text{ . הוכיחו כי } \lim_{z \rightarrow 0} f(z) \text{ קיים וסופי.}$$

(14) הוכח / הפרד :

$$\text{קיימת פונקציה שלמה } f(z) \text{ כך ש- } f\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{(-1)^n}{n} \text{ לכל } n \in \mathbb{N}.$$

(15) האם קיימת  $f$  שלמה המקיימת :

$$f(x) = \begin{cases} x^4 & x \in \mathbb{R}, x > 0 \\ -x^4 & x \in \mathbb{R}, x < 0 \end{cases}$$



(16) ענו על הסעיפים הבאים:

א. הראו כי:  $\lim_{\substack{z \rightarrow 0 \\ z \in \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]}} |\operatorname{Log}(z)| = \infty$

ב. הראו כי:  $\lim_{\substack{z \rightarrow 0 \\ z \in \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0]}} |z \cdot \operatorname{Log}(z)| = 0$

ג. האם הפונקציה:  $f(z) = \begin{cases} z \cdot \operatorname{Log}(z) & z \neq 0 \\ 0 & z = 0 \end{cases}$  אנליטית ב- $z=0$ ?

(17) חשבו את האינטגרל:  $\int_0^\infty \frac{\sqrt{x}}{1+x^2} dx$

(18) פתחו את הפונקציה:  $f(z) = \frac{1}{(z^2+1)^4}$  לטור לורן בטבעת  $0 < |z-i| < 2$ .

(19) נתון כי  $f(z)$  אנליטית בטבעת  $0 < |z| < 1$  וזוגית (כלומר:  $f(z) = f(-z)$ ).

חשבו:  $\oint_{|z|=\frac{1}{2}} f(z) dz$

(20) נניח כי:  $f(z): B_2(0) \rightarrow \mathbb{C}$  אנליטית ונניח כי בתחום:  $U = \{1 < |z| < 2\}$  היא

חח"ע. הוכיחו כי  $f(z)$  חח"ע ב- $B_2(0)$ .

רמז: המשמעות הגיאומטרית של עקרון הארגומנט.

(21) נניח כי  $f(z)$  אנליטית ב- $B_1(0)$ . הוכיחו כי קיים  $n \in \mathbb{N}$  כך ש-

$f\left(\frac{1}{n}\right) \cdot f\left(\frac{1}{n+1}\right) \neq \frac{1}{n}$

(22) תהי:  $h(z) = z^2 - 4 - e^{-3z}$ . מצאו את מספר האפסים של  $h(z)$  בחצי המישור

הימני:  $\operatorname{Re}(z) > 0$ .

(23) מצאו את התמונה של הרביע הראשון:  $A = \{z \mid \operatorname{Re}(z) > 0, \operatorname{Im}(z) > 0\}$  תחת

ההעתקה:  $f(z) = \frac{(1+z^2) - i(1-z^2)}{(1+z^2) + i(1-z^2)}$

(24) יהי:  $P(z) = z^n + a_{n-1}z^{n-1} + \dots + a_1z + a_0$  פולינום מתוקן.  $n \in \mathbb{N}$ .  
הוכיחו כי כל שורשי הפולינום נמצאים בעיגול:

$$|z| < \sqrt{1 + |a_{n-1}|^2 + \dots + |a_1|^2 + |a_0|^2}$$

$$\text{רמז: אי שוויון קושי שוורץ: } \left| \sum_{k=0}^{k=n-1} a_k \bar{b}_k \right| \leq \sqrt{\left( \sum_{k=0}^{k=n-1} |a_k|^2 \right) \left( \sum_{k=0}^{k=n-1} |b_k|^2 \right)}$$

(25) תהי:  $f: B_1(0) \rightarrow \mathbb{C}$  לאו דווקא רציפה.

נניח כי:  $f^2(z)$  ו- $f^3(z)$  אנליטיות ב- $B_1(0)$ .

הוכיחו כי  $f(z)$  אנליטית ב- $B_1(0)$ .

(26) הוכח / הפרך:

אם:  $f: B_1(0) \rightarrow \mathbb{C}$  לאו דווקא רציפה ו- $f^2(z)$  ו- $f^6(z)$  אנליטיות ב- $B_1(0)$

אז  $f(z)$  בהכרח אנליטית ב- $B_1(0)$ .

$$(27) \text{ חשבו את האינטגרל: } \oint_{|z|=1} \frac{1}{z^2} \frac{1}{e^z - 1} dz$$

$$(28) \text{ חשבו את האינטגרל: } \oint_{|z|=1} \frac{\frac{1}{z^2} \cos\left(e^{\frac{1}{z}}\right)}{z-2} dz$$

$$(29) \text{ נסמן: } f(z) = \tan(z) \text{ ו- } A = \left\{ z \in \mathbb{C}, -\frac{\pi}{4} < \operatorname{Re}(z) < \frac{\pi}{4} \right\}. \text{ מצאו את } f[A].$$

$$(30) \text{ נניח כי: } f(z) = u + iv \text{ אנליטית ב- } B_1(0) \text{ וכי: } |u(x, y)| + |v(x, y)| = 1 \text{ ב- } B_1(0).$$

הוכיחו כי  $f(z)$  קבועה.

## תשובות סופיות:

(1) לא.

(2) הוכחה.

(3) אין פתרונות.

(4) הוכחה.

(5) הוכחה.

(6) הוכחה.

(7) הוכחה.

(8) הוכחה.

(9) הוכחה.

(10) הוכחה.

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{x^3+1} dx = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{1}{\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)} \quad (11)$$

(12) הוכחה.

(13) הוכחה.

(14) הוכחה.

(15) לא קיימת.

(16) א. הוכחה. ב. הוכחה. ג. לא.

$$\int_0^{\infty} \frac{\sqrt{x}}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

$$a_k = \begin{cases} (-1)^{k+4} \frac{(k+7)(k+6)(k+5)}{6(2i)^{k+8}} & k \geq -4 \\ 0 & k \leq -5 \end{cases} \quad (18)$$

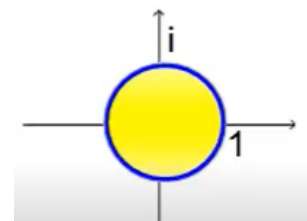
$$\oint_{|z|=\frac{1}{2}} f(z) dz = 2\pi i \cdot \text{Res}[f(z), 0] = 0 \quad (19)$$

(20) הוכחה.

(21) הוכחה.

(22) 1.

(23) להלן רביע ראשון:



(24) הוכחה.

(25) הוכחה.

(26) הוכחה.

$$\oint_{|z|=1} \frac{1}{z^2} \frac{1}{e^z - 1} dz = 2\pi i \quad (27)$$

$$\oint_{|z|=1} \frac{\frac{1}{z^2} \cos\left(e^{\frac{1}{z}}\right)}{z-2} dz = -\frac{\pi i}{2} \cos(\sqrt{e}) \quad (28)$$

(29) ראו סרטון.

(30) הוכחה.