# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס



# תוכן העניינים


1. מבוא למספרים מרוכבים ..... 1
2. טופולוגיה במישור המרוכב ..... 17
3. פונקציות אלמנטריות ..... 21
4. פונקציות אנליטיות ..... 28
5. אינטגרציה מרוכבת ..... 36
6. תכונות של פונקציות אנליטיות ..... 49
7. טורים ..... 59
8. נקודות סינגולריות ..... 68
9. משפט השארית ..... 75
10. התמרת לפלס ..... 93
11. טורי פורייה ..... 105
12. התמרת פורייה ..... 124
13. מיון משוואות דיפרנציאליות חלקיות מסדר שני ..... (ללא ספר)
14. בעיות שטורם ליוביל ..... 144
15. מרחבי מכפלה פנימית ומרחבים נורמיים ..... 149

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 1 - מבוא למספרים מרוכבים

### תוכן העניינים


1. הגדרת המספר המרוכב ..... 1
2. המספר הצמוד ..... 4
3. חקירת משוואה ריבועית מרוכבת ..... 7
4. מישור גאוס והצגה קוטבית של מספר מרוכב ..... 8
5. נוסחת דה-מואבר למציאת שורשים של מספר מרוכב ..... 12
6. שאלות בסדרות עם מספרים מרוכבים ..... 14
7. שאלות שונות עם מספרים מרוכבים ..... 15

# הגדרת המספר המרוכב:

## סיכום כללי:

### הגדרות כלליות:

ע"י הסימון: $i=\sqrt{-1}$ מגדירים את המספר מהצורה: $z=a+bi$ כמספר מרוכב בעל חלק ממשי $a$ וחלק מדומה $b$. המספרים $a$ ו- $b$ הם ממשיים.

$a$ נקרא הרכיב הממשי של $z$ ומסומן גם $\mathrm{Re}(z)$ (מלשון: Real).

$b$ נקרא הרכיב המדומה של $z$ ומסומן גם $\mathrm{Im}(z)$ (מלשון: Imaginary).

## שאלות:

**1)** רשום עם $i$:

א. $\sqrt{-1}=$ ב. $\sqrt{-4}=$ ג. $\sqrt{-25}=$

ד. $\sqrt{-3}=$ ה. $\sqrt{-5}=$

**2)** חשב:

א. $i=$ ב. $i^2=$ ג. $i^3=$

ד. $i^4=$ ה. $i^5=$ ו. $i^{17}=$

**3)** רשום את ערכם של $a$ ו- $b$ בעבור המספרים המרוכבים הבאים:

א. $2+5i$ ב. $3-i$ ג. $\frac{\sqrt{3}}{2}-\frac{1}{2}i$

ד. $7i$ ה. $-4$ ו. $0$

**4)** כתוב מספר מרוכב $z$ לפי הדרישות הבאות:

א. $\mathrm{Re}(z)=-3\ ,\ \mathrm{Im}(z)=2$.

ב. $\mathrm{Re}(z)=\mathrm{Im}(z)=\frac{\sqrt{2}}{2}$.

**5)** מספר מרוכב מסוים $z$ מקיים: $\mathrm{Re}(z)+\mathrm{Im}(z)=4$ ו- $\mathrm{Re}(z)-\mathrm{Im}(z)=-1$.
מצא את $z$.

**6)** פתור את המשוואות הבאות:

א. $x^2=-1$ ב. $x^2+36=0$ ג. $x^2-2x+5=0$

**7)** פתור את המשוואה הבאה: $x^2+x+1=0$.

**8)** פתור את המשוואה הבאה: $z^2+iz+6=0$.

**9)** נתון: $z_2=5-2i$ , $z_1=2+3i$. חשב את ערכי הביטויים המרוכבים הבאים:

א. $z_1+z_2=$ ב. $z_1-z_2=$ ג. $z_1\cdot z_2=$

**10)** חשב את ערכי הביטויים הבאים:

א. $(-2+6i)+(1-i)$ ב. $(4+4i)-\left(3+\frac{1}{2}i\right)$

ג. $\left(\frac{1}{2}-\frac{\sqrt{3}}{2}i\right)-\left(\frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}i\right)$ ד. $5-(3-2i)$

ה. $(i-3)+6i$ ו. $(i+2)-(3i-2)+(7-5i)$

**11)** חשב את ערכי הביטויים הבאים:

א. $(1+4i)\cdot(8-2i)$ ב. $\left(\frac{\sqrt{2}}{2}-\frac{\sqrt{2}}{2}i\right)\cdot\left(\frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}i\right)$

ג. $(4i-3)\cdot(4i+3)$ ד. $i\cdot(i-1)$

ה. $(2i+3)\cdot i$ ו. $(5i-1)^2$

**12)** נתונים שני מספרים מרוכבים $z_1 = a_1 + b_1 i$ ו- $z_2 = a_2 + b_2 i$ .

ידוע כי $z_1 + z_2$ הוא ממשי וכי $z_1 - z_2$ הוא מדומה.

א. מצא קשר בין $a_1$ ל- $a_2$ וקשר בין $b_1$ ו- $b_2$.

ב. הראה כי המכפלה $z_1 \cdot z_2$ היא ממשית.

## תשובות סופיות:

**1)** א. $i$ ב. $2i$ ג. $5i$ ד. $\sqrt{3}i$ ה. $\sqrt{5}i$.

**2)** א. $i$ ב. $-1$ ג. $-i$ ד. $1$ ה. $i$ ו. $i$.

**3)** א. $a=2\ ,\ b=5$ ב. $a=3\ ,\ b=-1$ ג. $a=\frac{\sqrt{3}}{2}\ ,\ b=-\frac{1}{2}$

ד. $a=0\ ,\ b=7$ ה. $a=-4\ ,\ b=0$ ו. $a=0\ ,\ b=0$.

**4)** א. $z=-3+2i$ ב. $z=\frac{\sqrt{2}}{2}+\frac{\sqrt{2}}{2}i$.

**5)** $z=1.5+2.5i$.

**6)** א. $x=\pm i$ ב. $x=\pm 6i$ ג. $x=1+2i\ ,\ 1-2i$.

**7)** $z=-\frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}i\ ,\ -\frac{1}{2}-\frac{\sqrt{3}}{2}i$.

**8)** $z=2i\ ,\ -3i$.

**9)** א. $7+i$ ב. $-3+5i$ ג. $16+11i$.

**10)** א. $-1+5i$ ב. $1+3\frac{1}{2}i$ ג. $-\sqrt{3}i$ ד. $2+2i$ ה. $-3+7i$ ו. $11-7i$

**11)** א. $16+30i$ ב. $\frac{\sqrt{6}+\sqrt{2}}{4}+i\left(\frac{\sqrt{6}-\sqrt{2}}{4}\right)$ ג. $-25$ ד. $-1-i$

ה. $-2+3i$ ו. $-24-10i$.

**12)** א. $a_1=a_2\ ,\ b_1=-b_2$ ב. הוכחה.

# המספר הצמוד:

## סיכום כללי:

**צמוד קומפלקסי (מרוכב):**

לכל מספר מרוכב $z=a+bi$ קיים מספר צמוד המסומן ב- $\bar{z}$ וערכו: $\bar{z}=a-bi$.

## שאלות:

**13)** רשום את המספר הצמוד של המספרים המרוכבים הבאים:

א. $2+5i$ ב. $3-i$ ג. $\frac{\sqrt{3}}{2}-\frac{1}{2}i$

ד. $7i$ ה. $-4$ ו. $0$

**14)** חשב:

א. $\frac{11+2i}{2-i}$ ב. $\frac{3+7i}{2-5i}$ ג. $\frac{19-9i}{2-3i}$

**15)** נתון מספר $z=5-2i$. חשב את ערכי הביטויים הבאים:

א. $\frac{1}{z}$ ב. $\frac{z}{z+3}$ ג. $\frac{z+i}{z-i}$

**16)** המספר $\frac{3+4i}{a-i}$ הוא ממשי טהור. מצא את $a$.

**17)** נתונים שני מספרים מרוכבים $z_1=a_1+b_1i$ ו- $z_2=a_2+b_2i$.

הראה כי כדי שתוצאת החילוק $\frac{z_1}{z_2}$ תהיה ממשית טהורה, צריך להתקיים: $\frac{a_1}{a_2}=\frac{b_1}{b_2}$.

**18)** פתור את המשוואה הבאה: $3z-11=iz-7i$.

**19)** פתור את המשוואה הבאה: $iz+5=4i$.

**20)** פתור את מערכת המשוואות הבאה ($z$ ו-$w$ משתנים מרוכבים): $\begin{cases}3z+iw=5-4i\\5iz-2w=5+8i\end{cases}$.

**21)** פתור את המשוואות הבאות שבהן $a$ ו-$b$ ממשיים:

א. $2a-3i=10+bi$ ב. $3a-8+5bi=2b-ai-3i$

**22)** פתור את המשוואה הבאה: $2z+7i=iz+\bar{z}-3$.

**23)** חשב את ערכי המספרים המרוכבים הבאים:

א. $\sqrt{5-12i}$ ב. $\sqrt{8+6i}$

**24)** פתור את המשוואות הריבועיות הבאות:

א. $(1-i)z^2-2z+i+1=0$.

ב. $(-2+i)z^2-(6+12i)z+10-25i=0$.

**25)** פתור את המשוואה הבאה: $iz^2-2(1-i)z+6+15i=0$.

**26)** פתור את המשוואה הבאה: $z^2-i\bar{z}+6=0$.

## תשובות סופיות:

**13)** א. $2-5i$ ב. $3+i$ ג. $\frac{\sqrt{3}}{2}+\frac{1}{2}i$ ד. $-7i$ ה. $-4$ ו. $0$.

**14)** א. $4+3i$ ב. $-1+i$. ג. $5+3i$.

**15)** א. $\frac{5}{29}+\frac{2}{29}i$ ב. $\frac{11}{17}-\frac{3}{34}i$ ג. $\frac{14}{17}+\frac{5}{17}i$.

**16)** $a=-\frac{3}{4}$.

**17)** שאלת הוכחה.

**18)** $z=4-i$.

**19)** $z=4+5i$.

**20)** $w=5+i$ , $z=2-3i$.

**21)** א. $a=5$ , $b=-3$ ב. $a=2$ , $b=-1$.

**22)** $z=-\frac{1}{2}-2\frac{1}{2}i$.

**23)** א. $z=\pm(3-2i)$ ב. $z=\pm(3+i)$.

**24)** א. $z_{1,2}=i$ , $1$ ב. $z_{1,2}=-2-i$ , $2-5i$.

**25)** $z_1=-2-5i$ , $z_2=3i$.

**26)** $z_1=-3i$ , $z_2=2i$.

# חקירת משוואה ריבועית מרוכבת:

## שאלות:

**27)** נתונה המשוואה הבאה: $(mi-2)z^2-2(m+2i)z+1=0$

מצא לאלו ערכים של הפרמטר המרוכב $m$ למשוואה:

א. יש פתרון יחיד.

ב. אין פתרון.

## תשובות סופיות:

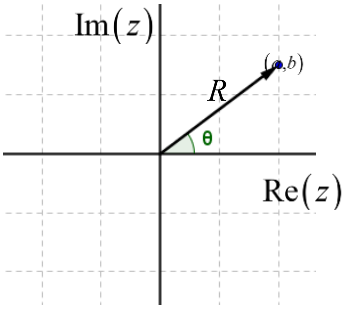
**27)** א. $m=-i$ ב. $m=-2i$.

# מישור גאוס והצגה קוטבית של מספר מרוכב:

## סיכום כללי:

ניתן לאפיין מספר מרוכב $z$ ע"י הצגתו במישור שבו ציר ה-$x$ מייצג את $a$, גודל הערך הממשי של $z$, וציר ה-$y$ מייצג את $b$, גודל הערך המדומה של $z$.

מישור זה נקרא מישור גאוס ומופיע באיור הסמוך.




במישור גאוס ניתן לאפיין כל נקודה ע"י הזוג: $(a,b)$

או ע"י הערך המוחלט של המספר (מרחקו מ-$(0,0)$)

והזווית שלו בין הקרן החיובית של הציר הממשי לרדיוס.

הצמד הנ"ל מוגדר כהצגה קוטבית של מספר מרוכב

ויסומן: $(R,\theta)$. מספר מרוכב בהצגה קוטבית:

$z = R\cos\theta + i\cdot R\sin\theta = R(\cos\theta + i\sin\theta) = R\text{cis}\theta$.

### נוסחאות ומעברים:

- מעבר מהצגה קוטבית לקרטזית (אלגברית): $\tan\theta = \frac{b}{a}$ , $R = \sqrt{a^2+b^2}$.
- מעבר מהצגה קרטזית לקוטבית: $a = R\cos\theta$ , $b = R\sin\theta$.
- גודל של מספר מרוכב $z$ יסומן: $|z|$ ויחושב: $|z| = R = \sqrt{a^2+b^2}$.

### פעולות חשבון בהצגה קוטבית:

- כפל מספרים מרוכבים: $z_1\cdot z_2 = (R_1\text{cis}\theta_1)\cdot(R_2\text{cis}\theta_2) = R_1R_2\text{cis}(\theta_1+\theta_2)$.
- חילוק מספרים מרוכבים: $\frac{z_1}{z_2} = \frac{R_1\text{cis}\theta_1}{R_2\text{cis}\theta_2} = \frac{R_1}{R_2}\text{cis}(\theta_1-\theta_2)$.

## שאלות:

**28)** כתוב את המספרים המרוכבים הבאים בהצגה אלגברית:

א. $2\text{cis}60°$ ב. $6\text{cis}135°$ ג. $4\text{cis}330°$

ד. $4\text{cis}(-30°)$ ה. $4\text{cis}690°$ ו. $8\text{cis}90°$

ז. $3\text{cis}270°$ ח. $\text{cis}180°$ ט. $\text{cis}0°$

**29)** הפוך להצגה קוטבית:

א. $1+i$ ב. $\sqrt{3}-i$ ג. $-\frac{1}{2}-\frac{\sqrt{3}}{2}i$

ד. $3+4i$ ה. $6i$ ו. $-i$

ז. $4$ ח. $-1$ ט. $1$

י. $0$

**30)** חשב את ערכי הביטויים הבאים:

א. $2\text{cis}120°\cdot 3\text{cis}60°$ ב. $\text{cis}210°\cdot 5\text{cis}(-40°)$

ג. $\frac{12\text{cis}315°}{3\text{cis}90°}$ ד. $\frac{1}{2\text{cis}40°}$

ה. $6\text{cis}30°+2\text{cis}210°$

**31)** נתון המספר המרוכב $z=R\text{cis}\theta$. הבע באמצעות $R$ ו-$\theta$ את המספרים:

א. $\overline{z}$ ב. $1/z$ ג. $-z$

ד. $-\frac{1}{z}$ ה. $iz$ ו. $z\cdot\overline{z}$

**32)** הראה כי המספרים הבאים הם ממשיים טהורים:

א. $z+\overline{z}$ ב. $z\cdot\overline{z}$ ג. $\frac{z}{\overline{z}}+\frac{\overline{z}}{z}$

**33)** הראה כי המספרים הבאים הם מדומים טהורים:

א. $z^2-\overline{z}^2$ ב. $\frac{1}{\overline{z}}-\frac{1}{z}$

**34)** הוכח את הטענות הבאות:

א. $z-i\overline{z}=\overline{\overline{z}+iz}$ ב. $z\cdot\overline{z}=|z|^2$

**35)** מצא את קדקודיו של ריבוע החסום במעגל קנוני שרדיוסו $\sqrt{2}$ במישור גאוס אם ידוע שצלעותיו מקבילות לצירים.

**36)** ריבוע חסום במעגל קנוני במישור גאוס. אחד מקודקודי הריבוע הוא $1+\sqrt{3}i$.
מצא את קדקודיו האחרים.

**37)** משולש שווה צלעות חסום במעגל קנוני במישור גאוס.
אחד מקודקודי המשולש הוא $1+\sqrt{3}i$. מצא את קדקודיו האחרים.

**38)** משולש שווה שוקיים, שזווית הבסיס שלו היא $30°$ חסום במעגל קנוני במישור גאוס. קדקוד הראש של המשולש הוא $1+\sqrt{3}i$. מצא את קדקודיו האחרים.

**39)** $z$ הוא מספר מרוכב במישור גאוס הנמצא מחוץ למעגל היחידה.
קבע אם המספרים הבאים נמצאים בתוך מעגל היחידה, עליו או מחוץ לו:

א. $\overline{z}$ ב. $\frac{1}{z}$ ג. $\frac{z}{\overline{z}}$ ד. $z\cdot\overline{z}$

## תשובות סופיות:

**28)** א. $1+\sqrt{3}i$ ב. $-3\sqrt{2}+3\sqrt{2}i$ ג. $2\sqrt{3}-2i$ ד. $2\sqrt{3}-2i$
ה. $2\sqrt{3}-2i$ ו. $8i$ ז. $-3i$ ח. -1 ט. 1.

**29)** א. $\sqrt{2}\text{cis}45°$ ב. $2\text{cis}330°$ ג. $\text{cis}240°$ ד. $5\text{cis}53.13°$
ה. $6\text{cis}90°$ ו. $\text{cis}270°$ ז. $4\text{cis}0°$ ח. $\text{cis}180°$
ט. $\text{cis}0°$ י. 0.

**30)** א. $-6$ ב. $5\text{cis}170°$ ג. $4\text{cis}225°$ ד. $\frac{1}{2}\text{cis}(-40°)$
ה. $4\text{cis}30°$.

**31)** א. $R\text{cis}(-\theta)$ ב. $\frac{1}{R}\text{cis}(-\theta)$ ג. $R\text{cis}(180°+\theta)$
ד. $\frac{1}{R}\text{cis}(180°+\theta)$ ה. $R\text{cis}(90°+\theta)$ ו. $R^2$.

**32)** שאלת הוכחה.

**33)** שאלת הוכחה.

**34)** שאלת הוכחה.

**35)** $1-i\ ,\ -1-i\ ,\ -1+i\ ,\ 1+i$.

**36)** $\sqrt{3}-i\ ,\ -1-\sqrt{3}i\ ,\ -\sqrt{3}+i$.

**37)** $-2\ ,\ 1-\sqrt{3}i\ ,\ 1+\sqrt{3}i$.

**38)** $2\ ,\ -1+\sqrt{3}i\ ,\ 1+\sqrt{3}i$.

**39)** א. מחוץ למעגל. ב. בתוך המעגל ג. על המעגל
ד. מחוץ למעגל.

# נוסחת דה-מואבר למציאת שורשים של מספר מרוכב:

## סיכום כללי:

**משפט דה-מואבר:**

כדי להעלות מספר מרוכב $z$ בחזקת $n$ נעזר בקשר: $\left(R\text{cis}\theta\right)^n = R^n\text{cis}\left(n\theta\right)$.

**שורשים של מספר מרוכב:**

כדי להוציא שורש $n$-י של מספר מרוכב $z$ השווה למספר מרוכב אחר $z_0 = R_0\text{cis}\theta_0$

נבצע: $1 \le k \le n$ : $z^n = z_0 = R_0\text{cis}\theta_0 \;/\; \sqrt[n]{\;} \quad \Rightarrow \quad z_k = \sqrt[n]{R_0}\cdot\text{cis}\left(\frac{\theta_0}{n}+\frac{2\pi k}{n}\right)$.

## שאלות:

**40)** חשב את ערכי הביטויים הבאים תוך שימוש בנוסחת דה-מואבר:

א. $\left(2\text{cis}30°\right)^3$ ב. $\left(2\text{cis}14°\right)^5$ ג. $\left(1+i\right)^4$

ד. $\left(\sqrt{3}-i\right)^3$ ה. $\left(-\frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}i\right)^{12}$

**41)** פתור את המשוואות הבאות:

א. $z^2 = 36\text{cis}120°$ ב. $z^4 = \left(9\text{cis}80°\right)^2$ ג. $z^5 = \frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}i$

**42)** מצא את סכום ומכפלת שורשי היחידה מסדר 4.

**43)** נתון המספר המרוכב $z = x+iy$.

מצא את המקום הגאומטרי במישור גאוס המתקבל בעבור המשוואה: $|z| = 2$.

**44)** נתון המספר המרוכב $z=x+iy$ .
מצא את המקום הגאומטרי במישור גאוס המתקבל בעבור המשוואה : $|z-3i|=5$ .

**45)** נתון המספר המרוכב $z=x+iy$ . מצא את המקום הגאומטרי במישור גאוס המתקבל בעבור המשוואה : $|z+i|+|\bar{z}+i|=|1+3i|$ .

## תשובות סופיות:

**40)** א. $8i$ ב. $32\text{cis}70°$ ג. $-4$ ד. $-8i$ ה. $1$.

**41)** א. $z_0=6\text{cis}60° \ , \ z_1=6\text{cis}240°$ .

ב. $z_0=3\text{cis}40° \ , \ z_1=3\text{cis}130° \ , \ z_2=3\text{cis}220° \ , \ z_3=3\text{cis}310°$ .

ג. $z_0=\text{cis}12° \ , \ z_1=\text{cis}84° \ , \ z_2=\text{cis}156° \ , \ z_3=\text{cis}228° \ , \ z_4=\text{cis}300°$ .

**42)** סכום : 0 , מכפלה : -1 .

**43)** $x^2+y^2=4$ .

**44)** $x^2+(y-3)^2=25$ .

**45)** $\frac{2x^2}{3}+\frac{2y^2}{5}=1$ .

# שאלות בסדרות עם מספרים מרוכבים:

## שאלות:

**46)** בסדרה חשבונית האיבר השביעי הוא $a_7=13+3i$ והאיבר השלישי הוא $a_3=5-9i$. מצא את סכום עשרת האיברים הראשונים בסדרה.

**47)** בסדרה הנדסית האיבר החמישי הוא $a_5=32+16i$ והאיבר השני הוא $a_2=2-4i$.

א. מצא את האיבר הראשון בסדרה ואת מנת הסדרה, אם נתון שמנת הסדרה היא מספר מרוכב הנמצא על הציר המדומה במישור גאוס.

ב. מצא את סכום חמשת האיברים הראשונים בסדרה.

**48)** נתונים שלושה איברים סמוכים בסדרה הנדסית. האיבר הראשון ביניהם הוא 2. נתון כי אם מוסיפים לאיבר השלישי $4i$ מתקבלים שלושה איברים סמוכים בסדרה חשבונית. מצא את שלושת איברי הסדרה ההנדסית (שתי אפשרויות).

## תשובות סופיות:

**46)** $S_{10}=100-15i$.

**47)** א. $a_1=2+i\ ,\ q=-2i$ ב. $S_5=20+25i$.

**48)** $-2\ ,\ 2i\ ,\ 2$ או $6-8i\ ,\ 4-2i\ ,\ 2$.

# שאלות שונות עם מספרים מרוכבים:

## שאלות:

**49)** פתור את המשוואה: $z-\bar{z}+|z|=|2-i|^2-4i+\mathrm{Im}(z)$.

**50)** פתור את המשוואה: $\left|2-3^{x^2-x-1}i\right|=\sqrt{13}$.

**51)** פתור את המשוואה: $z^3=\bar{z}$.

**52)** הוכח: אם מקדמי משוואה ריבועית הם מספרים ממשיים ואין למשוואה פתרונות ממשיים אז פתרונות המשוואה הם שני מספרים צמודים.

**53)** נתונים שני מספרים מרוכבים שאינם ממשיים טהורים.
הוכח: אם סכום המספרים ממשי ומכפלתם ממשית אז המספרים צמודים.

**54)** נתון מספר מרוכב $z$, שאינו ממשי טהור ואינו מדומה טהור.
הוכח כי אם $z-\frac{1}{\bar{z}}$ ממשי אז $z$ על מעגל היחידה.

**55)** הוכח את הנוסחה הבאה: $R_1\mathrm{cis}\theta_1\cdot R_2\mathrm{cis}\theta_2=R_1R_2\mathrm{cis}(\theta_1+\theta_2)$.

**56)** $z$ הוא מספר מרוכב על מעגל היחידה ברביע הראשון.
נתון: $\left|z^4-z^3\right|=\sqrt{2-\sqrt{3}}$. מצא את $\arg(z)$.

**57)** $z$ הוא מספר מרוכב על מעגל היחידה.
מצא את ערך הביטוי $z+iz$, אם ידוע שהוא ממשי.

**58)** $z_1$ ו- $z_2$ הם פתרונות המשוואה הבאה: $z^2-2\cos\theta\cdot z+1=0$.
הבע באמצעות $\theta$ את גודל הזווית $\sphericalangle z_1Oz_2$ (O ראשית הצירים).

## תשובות סופיות:

**49)** $z_1=3-4i$ , $z_2=-3-4i$.

**50)** $x=2$ , $-1$.

**51)** $z_1=0$ , $z_2=i$ , $z_3=-i$ , $z_4=1$ , $z_5=-1$.

**52)** שאלת הוכחה.

**53)** שאלת הוכחה.

**54)** שאלת הוכחה.

**55)** שאלת הוכחה.

**56)** $\arg(z)=30°$.

**57)** $z+iz=\sqrt{2}$ , $-\sqrt{2}$.

**58)** $2\theta$.

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 2 - טופולוגיה במישור המרוכב

### תוכן העניינים

1. סדרות של מספרים מרוכבים ..... 17
2. מושגים טופולוגיים בסיסיים ..... 19

# סדרות של מספרים מרוכבים:

## שאלות:

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

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

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

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

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

**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 $z_n\xrightarrow{n\to\infty}L$ אם ורק אם $\lim_{n\to\infty}|z_n-L|=0$.

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

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



לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

## תשובות סופיות:

1) $\lim_{n\to\infty} z_n = i$

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

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 $\mathrm{Re}\left[\frac{z-a}{z+a}\right]=0$ .

א. האם היא פתוחה?

ב. האם זה תחום?

ג. האם זה תחום פשוט קשר?

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

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 $|z\pm w|^2=|z|^2\pm 2\,\mathrm{Re}\left(z\cdot\overline{w}\right)+|w|^2$.

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.

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 3 - פונקציות אלמנטריות

### תוכן העניינים

1. אקספוננט מרוכב ..... 21
2. סינוס מרוכב ..... 22
3. קוסינוס מרוכב ..... 23
4. העתקות אלמנטריות ..... 24
5. לוגריתם מרוכב, פונקציות רב-ערכיות ושורשים ..... 25

# אקספוננט מרוכב:

## שאלות:

1) פתרו את המשוואה $e^z=-1$.
2) הוכיחו כי לכל $x$ ממשי מתקיים $\left|e^{ix}\right|=1$.
3) ענו על הסעיפים הבאים:
   א. הראו כי אם $\mathrm{Im}(z)\geq 0$ אז $\left|e^{iz}\right|\leq 1$.
   ב. הראו כי $\left|e^z\right|=1$ אם ורק אם $\mathrm{Re}(z)=0$.
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. $\left|e^{iz}\right|=e^{-y}=\frac{1}{e^y}\leq\frac{1}{e^0}=1$ ב. הוכחה.
4) $z_k=2\pi ik \quad k\in\mathbb{Z}$
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.

# 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: $z_n=\frac{\pi}{2}+2\pi n+i\ln\left(2\pm\sqrt{3}\right)$,
כאשר $n$ מספר שלם.
2) הוכחה.
3) $z_k=\frac{\pi}{2}+2\pi k-i\ln\left(5\pm2\sqrt{6}\right)$

# קוסינוס מרוכב:

## שאלות:

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

2) פתרו את המשוואה $\cos(z)=2$.

3) האם $|\cos(z)|\le 1$ לכל $z$ ?

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

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

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

## תשובות סופיות:

1) הוכחה.

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

3) לא.

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

5) הוכחה.

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

# העתקות אלמנטריות:

## שאלות:

1) מצאו את התמונה $f(U)$ של התחום $U=\{z\in\mathbb{C}\,|\,|z|<1\}$,
תחת ההעתקה $f(z)=z+1$.

2) מצאו את התמונה $f(U)$ של התחום $U=\{z\in\mathbb{C}\,|\,|z|<1\}$,
תחת ההעתקה $f(z)=5z$.

3) מצאו את התמונה $f(U)$ של התחום $U=\left\{z\in\mathbb{C}\,|\,Arg(z)=\frac{\pi}{4}\right\}$,
תחת ההעתקה $f(z)=z^3$.

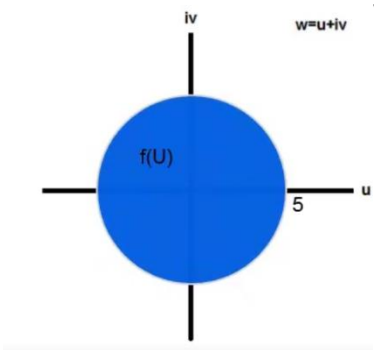
4) מהי תמונת התחום $A=\{z\in\mathbb{C}\,|\,0<\mathrm{Im}(z)<\pi\}$ תחת העתקה $f(z)=e^z$.

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

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

## תשובות סופיות:

1) $|w-1|<1$

2) 


3) $\frac{3\pi}{4}\simeq 135°$

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

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

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

# לוגריתם מרוכב, פונקציות רב-ערכיות ושורשים:

## שאלות:

**1)** חשבו את הגדלים הבאים:

א. $Arg(1+i)$

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

**2)** חשבו את הגדלים הבאים:

א. $Log(1+i)$

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

**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 $Log(z)$ (הענף הראשי של הלוג).

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

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

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

**13)** נגדיר $\log_\alpha(z)=\ln|z|+i\cdot\arg(z)$ כאשר $\alpha-2\pi<\arg(z)\leq\alpha$.
א. חשבו את הערכים: $\log_0(1)$, $\log_\pi(1)$, $\log_{2\pi}(1)$.
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 $z_1$ , ... , $z_n$ מספרים מרוכבים כך ש-$\mathrm{Re}(z_k)>0$ לכל $1\leq k\leq n$ וגם $\mathrm{Re}(z_1\cdot z_2\cdot\ldots\cdot z_k)$ לכל $1\leq k\leq n$.
הוכיחו כי $Log(z_1\cdot z_2\cdot\ldots\cdot z_n)=Log(z_1)+\ldots+Log(z_n)$, כאשר $Log(z)$ זה הענף הראשי של הלוגריתם.

**15)** יהי $U=\mathbb{C}\setminus(-\infty,0]$ ויהי $y>0$. חשבו את הגבול $\lim_{y\to 0}\left[\log(a+iy)-\log(a-iy)\right]$ 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-$f(z)-g(z)=2\pi ik$ לכל $z\in U$.

## תשובות סופיות:

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

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

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

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

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

6) $\left\{e^{-5\cdot\frac{\pi}{4}}e^{i\cdot5\ln\left(\sqrt{8}\right)}\ ,\ e^{-5\left(\frac{\pi}{4}+2\pi\right)}e^{i\cdot5\ln\left(\sqrt{8}\right)}\ ,\ e^{-5\left(\frac{\pi}{4}-2\pi\right)}e^{i\cdot5\ln\left(\sqrt{8}\right)}\ ,\ ..\right\}$

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

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

9) $a^{\mathrm{Re}(z)}$

10) הוכחה.

11) $\ln(\pi+2\pi k)+i\cdot\left(\frac{\pi}{2}+2\pi m\right)\quad m\in\mathbb{Z}\ ,\ k\geq0$

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

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

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

ג. $\ln(r)+i\theta\ \ ,\ \ -\infty<\ln(r)<\infty\ \ ,\ \ 0<\theta\leq2\pi$

14) הוכחה.

15) $2\pi i$

16) הוכחה.

17) הוכחה.

18) הוכחה.

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 4 - פונקציות אנליטיות

### תוכן העניינים

1. פונקציות מרוכבות ..... 28
2. גבולות מרוכבים ורציפות ..... 29
3. נגזרות מרוכבות ..... 30
4. משוואות קושי-רימן ..... 31
5. פונקציות הרמוניות ..... 34

# פונקציות מרוכבות:

## שאלות:

1) רשמו את הפונקציה $f(z)=z\cdot \mathrm{Re}(z)$ 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) $f(z)=2\left[x^2+xy+y^2\right]+i\left(x^2-y^2\right)$

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):

**1)** $\lim_{z\to 0}\frac{\bar{z}}{z}=?$

**2)** $\lim_{z\to 0}\frac{z^4}{|z|^4}=?$

**3)** $\lim_{z\to 0}e^{\frac{-1}{z^2}}=?$

**4)** $\lim_{z\to 0}e^{\frac{-1}{z^4}}=?$

## תשובות סופיות:

**1)** $\frac{1-ik}{1+ik}$

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

**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 $f(z)=\mathrm{Re}(z)$ גזירה.

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

**4)** הוכיחו את משפט לופיטל: $\lim\limits_{z\to z_0}\dfrac{f(z)}{g(z)}=\lim\limits_{z\to z_0}\dfrac{f(z)-f(z_0)}{g(z)-g(z_0)}$

## 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 $f(z)=z^2+\mathrm{Im}(z)$ 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 $f(z)=e^{ax}\cos(3y)+i\left(-e^{-3x}\sin(b\,y)\right)$
תהיה גזירה בכל נקודה.

**4)** נתון כי $f(z)=\frac{z}{\bar{z}}$ 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: $\begin{matrix}u_x(x_0,y_0)=v_y(x_0,y_0)\\ u_y(x_0,y_0)=-v_x(x_0,y_0)\end{matrix}$.

**5)** נניח כי $f(z)$ גזירה בתחום $D$, ונניח כי $\mathrm{Re}\{f(z)\}=0$ 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 $H^+ = \{z \in \mathbb{C} \mid \mathrm{Im}(z) > 0\}$.
הוכיחו כי $g(z) = \overline{f(\bar{z})}$ אנליטית בתחום $H^+ = \{z \in \mathbb{C} \mid \mathrm{Im}(z) < 0\}$.

**9)** הוכיחו כי $f(z) = e^{\mathrm{Re}(z)}$ 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 $f(z) = \frac{1}{2}\ln(x^2+y^2) + i \cdot \arctan(\frac{y}{x})$.
קבעו האם הפונקציה $f(z)$ אנליטית בחצי המישור הימני $H = \{z \in \mathbb{C} \mid \mathrm{Re}(z) > 0\}$.

**12)** נתונה הפונקציה $f(z) = e^{\frac{x^2-y^2}{2}}\left[\cos(xy) + i \cdot a\sin(xy)\right]$.
עבור אילו ערכי $a$ זוהי פונקציה הולומורפית (אנליטית) בכל המישור?

**13)** נניח כי $g(z)$ הולומורפית בתחום $\overline{D(0,1)} = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \le 1\}$,
ומקיימת $|g(z)| = 1 \quad \forall |z| \le 1$.
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 $f : D(0,R) \to \mathbb{C}$ 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:

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

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

**3)** $a=-3 \ , \ b=3$

**4)** $x=0 \ , \ y=0$

**5)** הוכחה

**6)** הוכחה

**7)** א. הוכחה ב. הוכחה

**8)** הוכחה

**9)** הוכחה

**10)** $y=0 \ , \ y=1 \ , \ y=0.5$
$x=0 \ , \ x=1 \ , \ x=0.25 \quad , \quad c=a+i\cdot b=\frac{3}{2}$
$z=0 \ , \ z=1+i \ , \ z=0.25+0.5\cdot i$

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

**12)** $a=1$

**13)** הוכחה

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

# 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 $f(z)=xy+i\left(x^2+y^2\right)$ , 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 $v\left(x,y\right)$ המקיימת $v\left(0,0\right)=2$ .
רמז: $f(z)=\sin(z)$ .

**5)** הראו כי הפונקציה $u(x,y)=\cos(x)\sinh(y)$ , היא פונקציה הרמונית בכל המישור,
ומצאו פונקציה הלומורפית כך שמתקיים $u(x,y)=\mathrm{Re}\{f\}$ .

**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 $r^2u''_{rr}+ru'_r+u''_{\theta\theta}=0$ .

**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 $g(x,y)=\sin\left[u(x,y)\right]\cdot\cosh\left[v(x,y)\right]$ 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 הוידאו.

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 5 - אינטגרציה מרוכבת

### תוכן העניינים

1. אינטגרל ממשי של פונקציה מרוכבת ..... 36
2. אינטגרל מרוכב של פונקציה מרוכבת ..... 37
3. משפט קושי גורסט ..... 38
4. נוסחת האינטגרל של קושי ..... 39
5. נוסחת האינטגרל המוכללת של קושי ..... 42
6. משפט הערכה ..... 44
7. פונקציות קדומות ..... 45
8. תרגילים מסכמים ..... 47

# אינטגרל ממשי של פונקציה מרוכבת:

## שאלות:

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

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

## תשובות סופיות:

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

**2)** $-\frac{1}{z}$

# 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 $\gamma = \left\{ z = 2e^{i\theta} \mid 0 \le \theta \le \pi \right\}$ .

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

4) חשבו את האינטגרל $\oint_{\gamma} \pi e^{\pi \bar{z}} dz$ , כאשר $\gamma$ מסילת קווים ישרים, העוברת בנקודות $\gamma : 0 \to 1 \to 1+i \to i \to 0$ .

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 $\gamma(t) = \left\{ (t - \sin t) + i \cdot (1 - \cos t) \mid 0 < t < 1 \right\}$ .

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)** חשבו את האינטגרל $\int_0^{2+\frac{i\pi}{4}} e^z dz$ .

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

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

## תשובות סופיות:

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

**2)** הוכחה.

# נוסחת האינטגרל של קושי:

## שאלות:

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

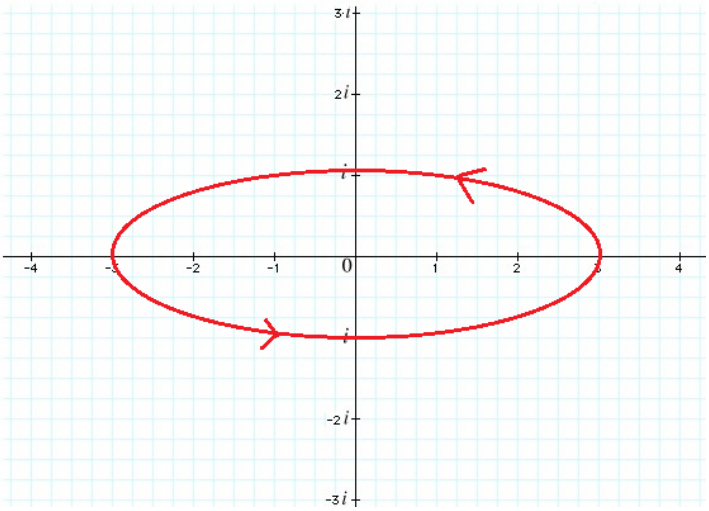
2) חשבו את האינטגרל $\oint_{|z-2|=1} \frac{e^z}{z-2}dz$ .

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 $D(z_0, R) = \{|z - z_0| \le R\}$ מוכל כולו ב- $D$.
הוכיחו כי $f(z_0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f\left(z_0 + R \cdot e^{i\theta}\right) d\theta$.

**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 $C = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 2,\ \mathrm{Im}(z) \ge 0\}$.

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

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

**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 $\int_0^{2\pi} u^2\left(re^{i\theta}\right) d\theta = \int_0^{2\pi} v^2\left(re^{i\theta}\right) d\theta$.

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

## תשובות סופיות:

1) $2\pi i$
2) $2\pi e^2 i$
3) $2\pi i \cdot \frac{\sin\left(2^2\right)}{2}$
4) $2\pi i \cdot \frac{1}{3}$
5) $\pi i - 2\pi e i$
6) $-\frac{\sin(2)\pi i}{2}$
7) $\pi i \cdot \left(\frac{17}{12} - \frac{3e}{4}\right)$
8) הוכחה.
9) $\frac{\pi}{\sqrt{3}}$
10) הוכחה.
11) $\pi i$
12) $\frac{2\pi}{\sqrt{a^2 - b^2}}$
13) 0
14) הוכחה.
15) הוכחה.

# 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:

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

2) $-\pi i$

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

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

5) $-2\pi^2 i$

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

7) 0

# אי-שיוויונות אינטגרליים (משפט הערכה):

## שאלות:

הוכיחו את אי השוויונות הבאים:

**1)** $\left|\int_C \frac{z^3}{z^2+1}dz\right| \le \frac{81\pi}{8}$, כאשר $C:\{|z|=3 \ , \ \mathrm{Re}(z)>0\}$.

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

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

**4)** $\left|\int_C \frac{z^2}{\sin(z)}dz\right| \le \frac{\pi^2}{2}+2$, כאשר C הוא הקטע הישר המתחיל בנקודה $\frac{\pi}{2}+i$ ומסתיים בנקודה $\frac{\pi}{2}-i$.

## תשובות סופיות:

ראה פתרונות מלאים בסרטוני הוידאו.

# 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 $f(z)=\frac{1}{z\left(z^2-\pi^2\right)}$ יש קדומה בתחום $D=\left\{z\in\mathbb{C}\mid |z|>\pi\right\}$.

**6)** נסמן $I=\int_{\Gamma}\frac{2z}{z^2+1}dz$ כאשר $\Gamma=\left\{z\in\mathbb{C}\mid |z|=2\ ,\ \mathrm{Im}(z)\geq 0\right\}$ בכיוון החיובי.

א. האם לאינטגרינד $\frac{2z}{z^2+1}$ יש פונקציה קדומה בתחום פשוט קשר המכיל את $\Gamma$?

ב. חשבו את $I$.

**7)** נניח כי $a$ , $b$ מספרים מרוכבים בחצי המישור השמאלי, כלומר $\mathrm{Re}(b)<0$ , $\mathrm{Re}(a)<0$.
הוכיחו כי $\left|e^a-e^b\right|<|a-b|$ , $(a\neq b)$.

**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: $f(z)=\cos\left(h[z]\right)\mid g(z)=\sin\left(h[z]\right)$.

## 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.

# תרגילים מסכמים:

## שאלות:

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

2) הוכיחו כי $\int_0^{\infty} e^{-x^2}\cos\left(x^2\right)dx=\frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt[4]{2}}\cos\left(\frac{\pi}{8}\right)$ ו- $\int_0^{\infty} e^{-x^2}\sin\left(x^2\right)dx=\frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt[4]{2}}\sin\left(\frac{\pi}{8}\right)$.

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

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

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

6) תהי $f(z)=\frac{1}{(1+az)^2}+\frac{1}{(1+bz)^2}$ כאשר $a,b\in\mathbb{C}$ קבועים המקיימים $|a|<1$, $|b|<1$ שונים מאפס. נניח כי $|f(z)|\le 3$ לכל $|z|=1$. הוכיחו כי $|a^n+b^n|\le\frac{3}{n+1}$ לכל $n\ge 0$.

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

## תשובות סופיות:

**1)** הוכחה.

**2)** הוכחה.

**3)** הוכחה.

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

**5)** הוכחה.

**6)** הוכחה.

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 6 - תכונות של פונקציות אנליטיות

### תוכן העניינים

1. משפט ליוביל ..... 49
2. עקרון היחידות ..... 52
3. עקרון המקסימום והמינימום ..... 55

# 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 $v\le 0$ (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 $u\le 0$ (לכל $z$).
רמז: התבוננו בפונקציה $e^{f(z)}$.

**5)** מצאו את כל הפונקציות השלמות $f(z)=u+iv$, המקיימות $u\ge 0$ (לכל $z$).
רמז: התבוננו בפונקציה $e^{-f(z)}$.

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

**7)** נתונה פונקציה שלמה $f(z)$, המקיימת $|f(z)|\ge 1$ 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 $v\le 0$ (לכל $z$).
רמז: התבוננו בפונקציה $e^{-i\cdot f(z)}$.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

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

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

**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 $\lim\limits_{z\to\infty} f(z)=2$ .
הוכיחו כי $f(z)\equiv 2$ .

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

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

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

$$|f(z)|\ge\frac{1}{\sqrt{|z|}}\qquad \forall z\in\mathbb{C}\setminus\{0\}\ ?$$

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 הפרך: אם $f(z)$ שלמה שאינה קבועה אז קיים $z\in\mathbb{C}$ כך ש- $\mathrm{Re}\, f(z)>|f(z)|^2$ .

**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 $D(z_0,R)\cap A\neq\varnothing$ .


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

**18)** ידוע כי קיימת פונקציה $T(z):\mathbb{C}\setminus(-\infty,0]\to D(0,1)$ 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

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

**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 הפרך:
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 $1<|x|<3$ מתקיים $f(x)=|x|^3$.

**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 $f'(z_0)\neq 0$.
הוכיחו כי קיים $r>0$ כך ש- $\oint_{|z-z_0|=r}\frac{1}{f(z)-f(z_0)}dz=\frac{2\pi i}{f'(z_0)}$.
הערה: תרגיל זה דורש שימוש במשפט השארית.

**11)** הוכח או הפרך:
נסמן $D=\{z\in\mathbb{C}\mid 0<|z|<1\}$.
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)** נניח כי $f(z)$ רציפה ב- $|z|<1$ ומקיימת $f\left(\frac{1}{n}\right)=\frac{1}{n^2}$ 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.
$\forall|z|=1\quad|f(z)|=1$ הוכיחו כי יש מספר סופי בלבד של נקודות ב- $D(0,1)$ בהן $f(z)$ מתאפסת.
רמז: היעזרו במשפט בולצאנו וייארשטראס.

## 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 בווידאו.
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 $D=\{z \mid |z|\le 3\}$.

**3)** מצאו (אם קיים) ערך מקסימלי של $|f(z)|$, כאשר $f(z)=\cos(z)$ בתחום $D=\{z \mid 0\le \mathrm{Re}\{z\}\le 2\pi \ , \ 0\le \mathrm{Im}\{z\}\le 2\pi\}$.

**4)** מצאו (אם קיים) ערך מקסימלי של $|f(z)|$, כאשר $f(z)=e^{z^2}$ בתחום $D=\{z \mid |z|\le 1\}$ ואת כל הנקודות בהן הוא מתקבל.

**5)** תהי $f(z)$ אנליטית בעיגול $|z|\le R$ ומקיימת $|f(z)|>a \quad \forall |z|=R$

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- $|z|\le 1$ 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- $|z|\le 1$?



לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

**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- $D=\{z\in\mathbb{C}\,|\,|z|\le 1\}$.
נניח כי לכל $|z|=1$ מתקיים $\mathrm{Re}[f(z)]=\mathrm{Re}[g(z)]$.
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 $|p(z)|\le 1$.
הראו כי לכל $|z|\ge 1$ מתקיים $|p(z)|\le|z|^n$.

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 $\lim_{z\to z_0}f(z)$ 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:
$A=\{z=x+iy\,|\,-R\le x\le R,-R\le y\le R\}$.
נסמן את שפות התחום כך:

$$l_1=\{z=R+iy\,|\,-R\le y\le R\}\qquad l_3=\{z=-R+iy\,|\,-R\le y\le R\}$$
$$l_2=\{z=x+iR\,|\,-R\le x\le R\}\qquad l_4=\{z=x-iR\,|\,-R\le x\le R\}$$

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

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

- $f(z)$ הולומורפית ב- $D(0,1)$.
- לכל $z\in D(0,1)$ מתקיים $|f(z)|\le 1$.
- $f(0)=0$.

הוכיחו כי $|f(z)|\le|z|$ לכל $z\in D(0,1)$ וכי $|f'(0)|\le 1$ 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 $\overline{D(0,1)}=\{z\in\mathbb{C}\,|\,|z|\le 1\}$

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

נתון כי: $|f(z)|=1$ $\forall|z|=1$, $|f(z)|=8$ $\forall|z|=2$

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

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

- $|f(z)|\le 1$ $\forall z\in\{\mathrm{Im}(z)\ge 0,|z|=1\}$
- $|f(z)|\le 3$ $\forall z\in\{\mathrm{Im}(z)\ge 0,|z|=2\}$

הוכיחו כי $|f(0)|\le\sqrt{6}$.

רמז: התבוננו בביטוי $f(z)f(-z)$.



לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

**18)** יהי $r>0$.

נגדיר $C_r=\{z\in\mathbb{C}\,|\,|z|=r\}$ ויהיו $z_1,\ldots,z_n\in C_r$.

הוכיחו כי קיים $z\in C_r$ כך ש- $\prod_{k=1}^{k=n}|z-z_k|>r^n$.

## 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.



לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 7 - טורים

### תוכן העניינים

1. טורים מספריים ..... 59
2. קריטריון קושי-הדמרד ..... 60
3. טורים כלליים ..... 61
4. מבחן ויירשטראס להתכנסות במידה שווה ..... 62
5. טורי טיילור ומקלורן ..... 63
6. טורי לורן ..... 64

# 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.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# קריטריון קושי – הדמרד:

## שאלות:

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

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

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

## תשובות סופיות:

1) $R=1$
2) $R=\infty$
3) $R=3$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# 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) $\mathrm{Re}(z) < 0$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

## מבחן ויירשטראס להתכנסות במידה שווה:

### שאלות:

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

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

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

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

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

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

### תשובות סופיות:

1) הוכחה.
2) הוכחה.
3) הוכחה.
4) הוכחה.
5) הוכחה.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# 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:

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

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

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

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

5) $2\pi i$.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# 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 מתקיים $\lim_{z\to a}(z-a)f(z)=0$.

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 $\sum_{-\infty}^{\infty}a_nz^n$ 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 $n\le 4$.

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 $a_n=\frac{1}{2\pi i}\oint_{\gamma}\frac{f(z)}{(z-z_0)^{n+1}}dz$.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

## תשובות סופיות:

**(1)**

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

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

**(2)**

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

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

**(3)**

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

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

**(4)**

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

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

**(5)**

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

**(6)**

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

**(7)**

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

**(8)**

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

$$a_{-1}=0$$

**(9)**

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

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

**(10)**

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

**(11)**

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

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

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

**14)** הוכחה.

**15)** א. $r=\sqrt{2\pi}$

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

**16)** $\frac{\pi i}{12}$

**17)** $2\pi i$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 8 - נקודות סינגולריות

### תוכן העניינים

1. אפסים של פונקציות אנליטיות ..... 68
2. מיון נקודות סינגולריות ..... 70
3. מיון נקודות סינגולריות באינסוף ..... 74

# 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 $n\geq m$ ו-$n<m$.
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 $f(z)=\frac{1}{z^2-1}\cos\left(\frac{\pi z}{z+1}\right)$.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

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

**10)** מצאו ומיינו את הנקודות הסינגולריות של $f(z)=\dfrac{1}{\sin\left(\dfrac{1}{z}\right)}$. 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 $-1\notin f\left[\mathbb{C}\setminus\{0\}\right]$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

**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 $\varphi(z_0)=r_0e^{i\alpha}$.

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

## 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) $z_k=2\pi ik$ 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.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# 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)** $\infty$ זה קוטב מסדר 1 של $f(z)$.

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 9 - משפט השארית

### תוכן העניינים

1. מציאת שארית ..... 75
2. אינטגרלים מרוכבים ..... 77
3. מסילת חצי-קשת מעגלית ..... 81
4. מסילת מעגל היחידה ..... 84
5. מסילת חור מנעול ..... 86
6. הלמה של זורדן ..... 87
7. מסילת משולש פיצה ..... 89
8. חצי מעגל מנוקב ..... 90
9. שימושים של משפט השארית בהתמרות אינטגרליות ..... 92

# מציאת שארית:

## שאלות:

חשבו את השאריות של הפונקציות בנקודות הבאות:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

**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)** $\operatorname{Res}\left[f(z),\pi\right]=\frac{2}{\pi^3}$ $\qquad$ $\operatorname{Res}\left[f(z),0\right]=-\frac{1}{2\pi}$

**10)** $\operatorname{Res}\left[\frac{f'(z)}{f(z)},z_k\right]=m_k$ כאשר $z_k$ אפס מסדר $m_k$ של $f(z)$.



לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# אינטגרלים מרוכבים :

## שאלות:

חשבו את האינטגרלים הבאים :

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

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

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

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

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

**6)** נניח כי $f(z)$ פונקציה שלמה.

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

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

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

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

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

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

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

**13)** $\oint_{|z|=1} z^4 \sin\left(\bar{z}\right)\,dz$

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

**15)** חשבו את המקדמים של החזקות השליליות בפיתוח של $f(z)=\frac{1}{\cos(z)-1}$ לטור לורן סביב $z_0=0$ בתחום $0<|z|<2\pi$.

הערה: אם $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n (z-z_0)^n$ טור לורן של $f(z)$ בתחום $R_1<|z-z_0|<R_2$ אז ניתן לקבל את המקדמים ע"י הנוסחה $a_n=\frac{1}{2\pi i}\oint_{|z-z_0|=r}\frac{f(z)}{(z-z_0)^{n+1}}dz$ כאשר $R_1<r<R_2$.

**16)** הוכיחו את עקרון הארגומנט:

אם $f(z)$ אנליטית בתחום $D$ פרט למספר סופי של קטבים ורציפה על השפה $\gamma$ ואינה מתאפסת שם על השפה אזי $\frac{1}{2\pi i}\oint_{\gamma}\frac{f'(z)}{f(z)}dz=N-P$ כאשר

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

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

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

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

## תשובות סופיות:

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

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

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

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

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

**6)** הוכחה.

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

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

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

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

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

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

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

**15)** $a_{-1} = -2$ , $a_{-2} = -2$ , $a_n = 0$ for $n \le -3$

**16)** הוכחה.

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# מסילת חצי קשת מעגלית:

## שאלות:

בכל התרגילים הבאים נסמן את המסלולים הבאים:

$$C_R=\left\{z=\mathrm{Re}^{i\theta}\,|\,0\le\theta\le\pi\right\}$$
$$\gamma=\left\{z=x\,|\,-R\le x\le R\right\}$$

**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 $\lim_{R\to\infty}\int_{C_R}\frac{1}{1+z^2}dz=0$

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

**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 $\lim_{R\to\infty}\int_{C_R}\frac{1}{1+z^4}dz=0$

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

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

הדרכה:

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

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

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

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

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

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

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

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

## תשובות סופיות:

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

ב) הוכחה.

ג) הוכחה.

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

ב) הוכחה.

ג) הוכחה.

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

ב) הוכחה.

ג) הוכחה.

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

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

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

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

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

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



לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# מסילת מעגל היחידה:

## שאלות:

חשבו את האינטגרלים הבאים:

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

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

3) חשבו את האינטגרל $\int_0^{2\pi} \frac{1}{a\cos(x)+b\sin(x)+c} dx$ עבור הפרמטרים הממשיים $a,b,c$ המקיימים $c>\sqrt{a^2+b^2}=1$.

<u>הערה:</u> ניתן להשתמש בעובדה כי $\left|\sqrt{c^2-1}-c\right|<1$

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

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

## תשובות סופיות:

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

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

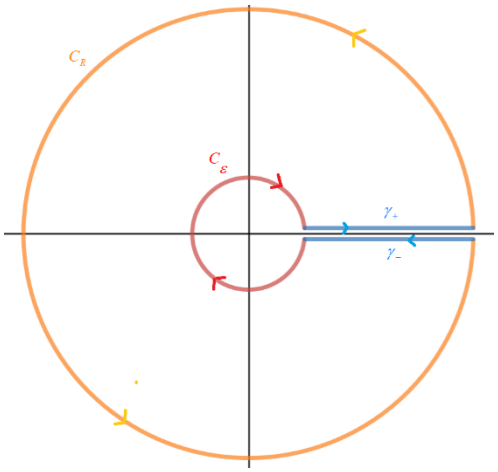
3) $\int_0^{2\pi} \frac{1}{a\cos(x)+b\sin(x)+c} dx = \frac{2\pi}{\sqrt{c^2-1}}$

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

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

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

# מסילת חור מנעול:




## שאלות:

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

הדרכה:

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

$$C_\varepsilon=\left\{z=\varepsilon e^{i\theta}\mid 0+<\theta<2\pi-\right\} \qquad C_R=\left\{z=\mathrm{R}\,e^{i\theta}\mid 0+<\theta<2\pi-\right\}$$

$$\gamma_-=\left\{z=xe^{2\pi i}\mid x:R\to\varepsilon\right\} \qquad \gamma_+=\left\{z=xe^{0\cdot i}\mid x:\varepsilon\to R\right\}$$

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

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

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

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

## תשובות סופיות:

**1)** הוכחה.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# הלמה של ז'ורדן:

## שאלות:

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

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

הדרכה:

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

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

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

הדרכה:

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

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

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

**4)** $\int_{0}^{\infty}\frac{x^2\cos(ax)}{(x^2+1)^2}dx$



לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

## תשובות סופיות:

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

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

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

4) $\int_{0}^{\infty}\frac{x^2\cos(ax)}{(x^2+1)^2}dx=\frac{\pi}{4}(1-a)e^{-a}$

# מסילת משולש פיצה:

## שאלה:

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

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

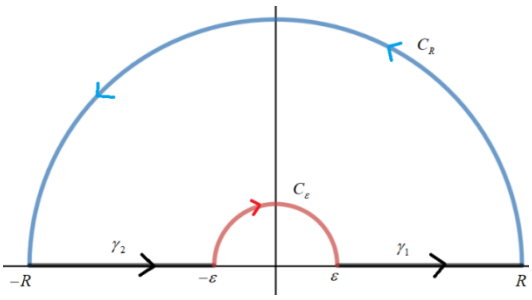
## תשובה סופית:

**1)** הוכחה.



לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# מסילת חצי מעגל מנוקב:




בתרגילים הבאים נסמן את המסלולים הבאים:

$$\gamma_1=\{z=x\,|\,\varepsilon\le x\le R\} \qquad C_R=\{z=Re^{i\theta}\,|\,0\le\theta\le\pi\}$$
$$\gamma_2=\{z=x\,|\,-R\le x\le-\varepsilon\} \qquad C_\varepsilon=\{z=\varepsilon e^{i\theta}\,|\,\theta:\pi\to 0\}$$
$$\gamma=\gamma_1+C_R+\gamma_2+C_\varepsilon$$

## שאלות:

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

הדרכה:

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

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

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

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

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

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


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

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

## תשובות סופיות:

1) הוכחה.

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

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

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

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

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

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 $F(s)=\frac{1}{\left(s^2+2s+5\right)^2}$.

## תשובות סופיות:

**1)** הוכחה.

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



לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו ל-www.GooL.co.il

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 10 - התמרת לפלס

### תוכן העניינים

1. התמרת לפלס ..... 93
2. התמרת לפלס ההפוכה ..... 96
3. פתרון מדר בעזרת התמרת לפלס ..... 100
4. נוסחאות - התמרת לפלס ..... 102

# התמרת לפלס

בסוף ספר הפרק יש דף נוסחאות להתמרת לפלס.

## שאלות

חשבו את התמרות לפלס בשאלות **1-12** בעזרת טבלת התמרות לפלס:

**1)** $L\left(t^2+4t-2\right)$

**2)** $L\left(\frac{1}{2}t^4+\frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{t}+1\right)$

**3)** $L\left(e^{-4t}+10e^{2t}\right)$

**4)** $L\left(\cosh 4t\right)$

**5)** $L\left(\sinh 10t\right)$

**6)** $L\left(\sin 2t\cos 2t\right)$

**7)** $L\left(\sin 2t\cos 3t\right)$

**8)** $L\left(\sin^2 t\right)$

**9)** $L\left(\cos^2 4t\right)$

**10)** $L\left(t^2\sin 4t\right)$

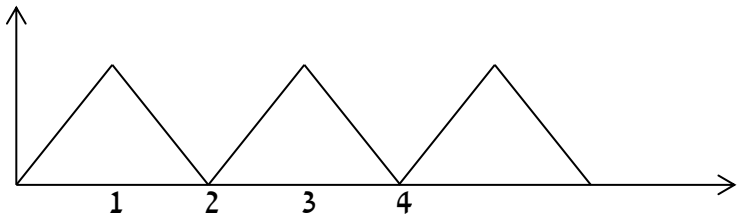
**11)** $L\left(t^4e^{2t}\right)$

**12)** $L\left(e^{2t}\sin 4t\right)$

**13)** מצאו את התמרת לפלס של הפונקציה $g(t)=\begin{cases}t & 0<t\le 1\\ 1 & t>1\end{cases}$.

**14)** מצאו את התמרת לפלס של הפונקציה $g(t)=\begin{cases}t & 0<t\le 1\\ 2-t & 1<t\end{cases}$.

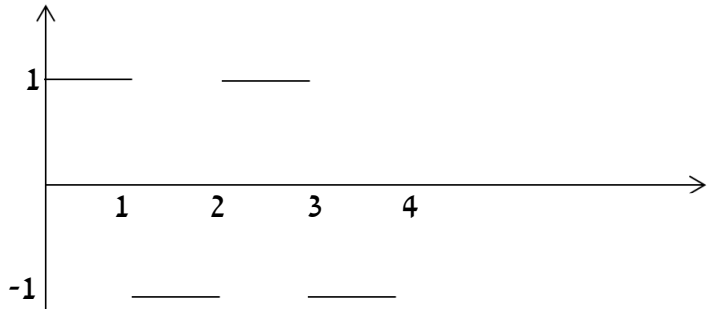
**15)** מצאו את התמרת לפלס של הפונקציה המחזורית הבאה:



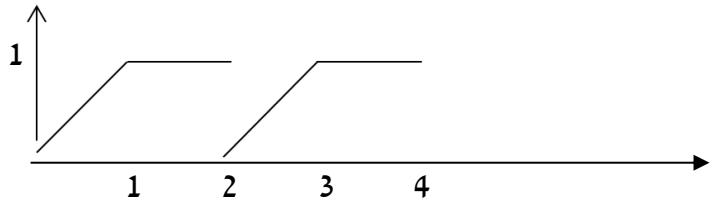


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

**16)** מצאו טרנספורם לפלס של הפונקציה המחזורית הבאה:




**17)** מצאו טרנספורם לפלס של הפונקציה המחזורית הבאה:




**18)** הגדירו ושרטט את פונקציית המדרגה $u(t)$ ואת ההזזה שלה $u(t-k)$.

**19)** שרטטו את הפונקציה $f(t)=u(t-2)-u(t-3)$, כאשר $u(t)$ פונקציית המדרגה.

**20)** רשמו את הפונקציה $f(t)=\begin{cases}0 & t\le 4\\ 1 & t>4\end{cases}$, בעזרת פונקציית המדרגה.

**21)** רשמו את הנוסחה להתמרת לפלס של פונקציית המדרגה $u(t)$,
של הפונקציה $u(t-k)$, ושל הפונקציה $f(t-k)u(t-k)$.

**22)** חשבו את התמרת לפלס של הפונקציה הבאה: $g(t)=\begin{cases}0 & t<4\\ (t-4)^2 & t\ge 4\end{cases}$.

**23)** חשבו את התמרת לפלס של הפונקציה הבאה: $g(t)=\begin{cases}0 & t<4\\ t^2 & t\ge 4\end{cases}$.

**24)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. הגדירו ושרטטו את פונקציית הדלתא $\delta(t)$.

ב. מהי התמרת לפלס של פונקציית הדלתא, ושל ההזזה שלה $\delta(t-a)$?


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

## תשובות סופיות

1) $\frac{2}{s^3}+\frac{4}{s^2}-\frac{2}{s}$

2) $\frac{12}{s^5}+s^{-3/2}+\frac{1}{s}$

3) $\frac{1}{s+4}+10\frac{1}{s-2}$

4) $\frac{1}{2}\left[\frac{1}{s-4}+\frac{1}{s+4}\right]$

5) $\frac{1}{2}\left[\frac{1}{s-10}-\frac{1}{s+10}\right]$

6) $\frac{1}{2}\frac{4}{s^2+16}$

7) $\frac{1}{2}\cdot\frac{5}{s^2+25}-\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{s^2+1}$

8) $\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{s}-\frac{1}{2}\cdot\frac{s}{s^2+4}$

9) $\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{s}+\frac{1}{2}\cdot\frac{s}{s^2+64}$

10) $\frac{8\left(3s^2-16\right)}{\left(s^2+16\right)^3}$

11) $\frac{24}{(s-2)^5}$

12) $\frac{4}{(s-2)^2+16}$

13) $\frac{1-e^{-s}}{s^2}$

14) $\frac{1-2e^{-s}}{s^2}$

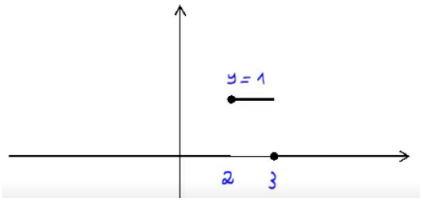
15) $\frac{1-2e^{-s}+e^{-2}}{s^2\left(1-e^{-2s}\right)}$

16) $\frac{1-e^{-s}}{s\left(1+e^{-s}\right)}$

17) $\frac{1-e^{-s}-se^{-2s}}{s^2(1-e^{-2s})}$

18) $u(t-k)=\begin{cases}0 & t<k\\ 1 & t\geq k\end{cases}$

19)




20) $f(t)=\begin{cases}0 & t\leq\\ 1 & t>4\end{cases}=u(t-4)$

21) $L=\left(u(t-k)\,f(t-k)\right)=e^{-ks}L\left(f(t)\right)$

22) א. $L\left((t-4)^2\cdot u(t-4)\right)=\frac{2e^{-4s}}{s^3}$

23) $e^{-4s}L\left(t^2\right)+8e^{-4t}L(t)+16\frac{e^{-4s}}{s}$

24) $L\left[\delta(t-2\pi)\right]=e^{-2\pi s}$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

# התמרת לפלס ההפוכה

## שאלות

חשבו את ההתמרות בשאלות **1-29**:

**1)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s}\right)$

**2)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s^4}\right)$

**3)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s-10}\right)$

**4)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s^2+4}\right)$

**5)** $L^{-1}\left(\frac{s}{s^2+4}\right)$

**6)** $L^{-1}\left(\frac{1}{(s-10)^2+4}\right)$

**7)** $L^{-1}\left(\frac{s}{(s-2)^2+4}\right)$

**8)** $L^{-1}\left(\frac{s}{(s^2+4)^2}\right)$

**9)** $L^{-1}\left(\frac{1}{(s^2+4)^2}\right)$

**10)** $L^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{s}}\right)$

**11)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s^2-4}\right)$

**12)** $L^{-1}\left(\frac{5-s}{s^2+5s}\right)$

**13)** $L^{-1}\left(\frac{s}{s^2+5s+6}\right)$

**14)** $L^{-1}\left(\frac{s^2+s-1}{s^3-s}\right)$

**15)** $L^{-1}\left(\frac{6s^2+4s-6}{s^3-7s-6}\right)$

**16)** $L^{-1}\left(\frac{10s}{s^4-13s^2+36}\right)$

**17)** $L^{-1}\left(\frac{8s}{(s-2)^2(s+2)}\right)$

**18)** $L^{-1}\left(\frac{5-s}{s^3+s^2}\right)$

**19)** $L^{-1}\left(\frac{9s+36}{s^3+6s^2+9s}\right)$

**20)** $L^{-1}\left(\frac{1}{(s^2-2s+1)(s^2-4s+4)}\right)$

**21)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s^2+2s+3}\right)$

**22)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s^2+s+1}\right)$

**23)** $L^{-1}\left(\frac{2s^2+s-1}{(s^2+1)(s-3)}\right)$

**24)** $L^{-1}\left(\frac{2s^2+2s+1}{(s^2+1)(s+2)}\right)$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

**25)** $L^{-1}\left(\frac{3}{(s^2+1)(s^2+4)}\right)$

**26)** $L^{-1}\left(\frac{25s^2}{(s-1)(s^2+4)^2}\right)$

**27)** $L^{-1}\left(\frac{3}{s}-\frac{4e^{-s}}{s^2}+\frac{4e^{-3s}}{s^2}\right)$

**28)** $L^{-1}\left(\frac{e^{-4s}}{s+1}+\frac{e^{-2s}}{s^2+1}\right)$

**29)** $L^{-1}\left(\frac{e^{-10s}}{(s-1)(s-2)}\right)$

*בשאלה **27** כתבו את התוצאה בצורה מפורטת ושרטטו אותה.

**30)** נתון $F(s)=\frac{e^{-s}+2}{s}$.

חשבו את $f(0)$ ו-$f(\infty)$, כאשר $f(t)=L^{-1}(F(s))$.

פתרו בשתי דרכים שונות.

הערה: $f(0)=\lim_{t\to 0} f(t)$ , $f(\infty)=\lim_{t\to\infty} f(t)$.

**31)** הסבירו והדגימו את משפט הקונוולוציה.

**השתמשו במשפט הקונוולוציה כדי לחשב את התרגילים הבאים:**

**32)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s^3(s-1)}\right)$

**33)** $L^{-1}\left(\frac{2}{s^2(s^2+4)}\right)$

**34)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s(s-4)^2}\right)$

**35)** $L^{-1}\left(\frac{1}{s(s^2+1)^2}\right)$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

## תשובות סופיות

1) $1$

2) $\frac{t^3}{3!}$

3) $e^{10t}$

4) $\frac{1}{3}\sin 2t$

5) $\cos 2t$

6) $e^{10t}\frac{1}{2}\sin 2t$

7) $e^{2t}\left\{\cos 2t+2\frac{1}{2}\sin 2t\right\}$

8) $\frac{1}{4}t\sin 2t$

9) $\frac{1}{4}t\sin 2t$

10) $\frac{1}{\sqrt{\pi}\sqrt{x}}$

11) $\frac{1}{4}e^{2t}-\frac{1}{4}e^{-2t}$

12) $1-2e^{-5t}$

13) $3e^{-3t}-2e^{-2t}$

14) $1+\frac{1}{2}e^{t}-\frac{1}{2}e^{-t}$

15) $e^{-t}+2e^{-2t}+3e^{3t}$

16) $e^{-3t}+e^{3t}-e^{-2t}-e^{2t}$

17) $e^{2t}+4te^{2t}-e^{-2t}$

18) $-6+5t+6e^{-2t}$

19) $4-4e^{-3t}-3te^{-3t}$

20) $2e^{t}+te^{t}-2e^{2t}+te^{2t}$

21) $\frac{1}{\sqrt{2}}e^{-t}\sin\sqrt{2}t$

22) $\frac{1}{\sqrt{0.75}}e^{-0.5t}\sin\sqrt{0.75}t$

23) $\sin t+2e^{3t}$

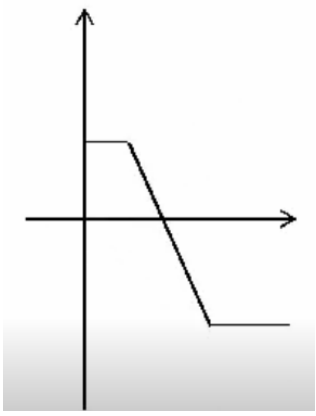
24) $\cos t+e^{-2t}$

25) $\sin t-\frac{1}{2}\sin 2t$

26) $e^{t}-\cos 2t-\frac{1}{2}\sin 2t+5t\sin 2t+\frac{5}{4}\left(\sin 2t-2t\cos 2t\right)$

27) א. $3-4u\left(t-1\right)\cdot\left(t-1\right)+4u\left(t-3\right)\cdot\left(t-3\right)$

ב. $\begin{cases}3 & t<1\\ 7-4t & 1<t<3\\ -5 & t\ge 3\end{cases}$ ; שרטוט:




לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

**28)** $u(t-4)e^{-(t-4)}+u(t+2)\sin(t+2)$

**29)** $u(t-10)\left(e^{t-10}-e^{2(t-10)}\right)$

**30)** $f(0)=2 \quad f(\infty)=3$

**31)** שאלת הסבר.

**32)** $-\frac{1}{2}\left(t^2+2t+2\right)+e^t$

**33)** $0.5t-\frac{1}{4}\sin 2t$

**34)** $\frac{1}{4}e^{4t}(t-1)+\frac{1}{4}$

**35)** $\frac{1}{2}\left(-2\cos t+2-t\sin t\right)$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

# פתרון מדר בעזרת התמרת לפלס

## שאלות

פתרו את המשוואות הבאות בעזרת התמרת לפלס:

**1)** $y(0)=0\ ;\ y'+4y=e^{-3t}$

**2)** $y(0)=-1\ ,\ y'(0)=4\ ;\ y''+4y'+4y=10e^{-2t}$

**3)** $y(0)=-1,\ y'(0)=-4\ ;\ y''-4y'=16$

**4)** $y(0)=y'(0)=0\ ;\ y''+4y'=8t+2$

**5)** $y(0)=y'(0)=\frac{1}{4}\ ;\ 4y''-4y'=te^{t}+e^{t}$

**6)** $y(0)=y'(0)=0\ ;\ y''-3y'+2y=u(t-4)$,

כאשר $u(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 1 & t\ge 0\end{cases}$ היא פונקציית המדרגה.

**7)** $y(0)=y'(0)=0\ ;\ y''+y'=f(t)$ כאשר $f(t)=\begin{cases}0 & t<1\\ 2 & t\ge 1\end{cases}$.

**8)** $y(0)=y'(0)=0\ ;\ y''+5y'+6y=h(t)$ כאשר $h(t)=\begin{cases}1 & 0<t<2\\ 0 & t\ge 2\end{cases}$.

**9)** $y(0)=y'(0)=0, y''(0)=3\ ;\ y'''+4y''+5y'+2y=10\cos t$

**10)** $y(0)=0,\ y'(0)=0\ ;\ y''+2y'+2y=\delta(t-\pi)$

**11)** $y(0)=2,\ y'(0)=-3\ ;\ y''+3y'-10y=4\delta(t-2)$

**12)** $y(0)=0,\ y'(0)=0\ ;\ -y''+4y=\delta(t-2\pi)-\delta(t-\pi)$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

## תשובות סופיות

**1** $y(t)=e^{-3t}-e^{-4t}$

**2** $y(t)=e^{-2t}(5t^2+2t-1)$

**3** $y(t)=-4t-1$

**4** $y(t)=t^2$

**5** $y(t)=\frac{1}{8}e^t(t^2+2)$

**6** $y(t)=u(t-4)\left(0.5-e^{t-4}+e^{2(t-4)}\right)$

**7** $y(t)=2u(t-1)\cdot\left(-1+(t-1)+e^{-(t-1)}\right)$

**8** $y(t)=\frac{1}{6}\left[1-3e^{-2t}+2e^{-3t}\right]-u(t-2)\frac{1}{6}\left[1-3e^{-2(t-2)}+2e^{-3(t-2)}\right]$

**9** $y(t)=-\cos t+2\sin t+2e^{-t}-2te^{-t}-e^{-2t}$

**10** $y(t)=-u(t-\pi)e^{-(t-\pi)}\sin(t)$

**11** $y(t)=\frac{4}{7}u(t-2)\left[e^{2(t-2)}-e^{-5(t-2)}\right]+e^{2t}+e^{-5t}$

**12** $y(t)=-\frac{1}{2}u(t-2\pi)\left[\sinh\left(2(t-2\pi)\right)\right]+\frac{1}{2}u(t-\pi)\left[\sinh\left(2(t-\pi)\right)\right]$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

# נוסחאות – התמרת לפלס

| $G(s)$ | $g(t)$ |
|---|---|
| $\frac{1}{s}$ | $1$ |
| $\frac{1}{s^2}$ | $t$ |
| $\frac{n!}{s^{n+1}}$ | $t^n \ \ (\text{for } n=1,2,3,\ldots)$ |
| $\frac{1}{s^n}$ | $\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} \ \ (\text{for } n=1,2,3,\ldots)$ |
| $\frac{1}{s-a}$ | $e^{at}$ |
| $\frac{1}{(s-a)^n}$ | $\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}e^{at}$ |
| $\frac{(n-1)!}{(s-a)^n}$ | $t^{n-1}e^{at}$ |
| $\frac{s}{s^2+a^2}$ | $\cos(at)$ |
| $\frac{a}{s^2+a^2}$ | $\sin(at)$ |
| $\frac{s}{s^2-a^2}$ | $\cosh(at)$ |
| $\frac{a}{s^2-a^2}$ | $\sinh(at)$ |
| $\frac{s}{(s^2-a^2)^2}$ | $\frac{t}{2a}\sin(at)$ |
| $\frac{s^2}{(s^2-a^2)^2}$ | $\frac{1}{2a}(\sin(at)+at\cos(at))$ |
| $\frac{a}{\left[(s+b)^2+a^2\right]}$ | $e^{-bt}\sin at$ |


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

| | |
|---|---|
| $e^{-bt}\cos at$ | $\frac{s+b}{\left[\left(s+b\right)^2+a^2\right]}$ |
| $t\sin at$ | $\frac{2sa}{\left(s^2+a^2\right)^2}$ |
| $t\cos at$ | $\frac{s^2-a^2}{\left(s^2+a^2\right)^2}$ |
| $te^{at}$ | $\frac{1}{\left(s-a\right)^2}$ |
| $\frac{1}{2a^3}\left(\sin\left(at\right)-at\cos\left(at\right)\right)$ | $\frac{1}{\left(s^2+a^2\right)^2}$ |
| $\sqrt{t}$ | $\frac{1}{2}\sqrt{\pi}s^{-\frac{3}{2}}$ |
| $\frac{1}{\sqrt{t}}$ | $\sqrt{\pi}s^{-\frac{1}{2}}$ |
| $u\left(t\right)$ | $\frac{1}{s}$ |
| $u\left(t-k\right)$ | $\frac{e^{-ks}}{s}$ |
| $u\left(t-k\right)f\left(t-k\right)$ | $e^{-ks}\cdot F\left(s\right)$ |
| $t^n g\left(t\right)$ | $\left(-1\right)^n\left(F\left(s\right)\right)^{(n)}$ |

**תוספות**

- נניח שנתונה התמרת לפלס ההפוכה $F\left(s\right)$, של פונקציה $f\left(t\right)$, ורוצים את $f\left(0\right)$ ו-$f\left(\infty\right)$.

אז במקום למצוא את $f\left(t\right)$ ולהציב, ניתן להיעזר בנוסחאות הבאות:

$$f\left(0\right)=\lim_{s\to\infty}s\cdot F\left(s\right)$$

$$f\left(\infty\right)=\lim_{s\to 0}s\cdot F\left(s\right)$$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

- קונוולציה:

$$f(t)*g(t)=\int_0^t f(x)g(t-x)dx$$

$$\boxed{L\left(f(t)*g(t)\right)=F(s)\cdot G(s)}$$

$$L^{-1}\left(F(s)\cdot G(s)\right)=\int_0^t f(x)g(t-x)dx \qquad L^{-1}\left(F(s)\cdot G(s)\right)=f(t)*g(t)$$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 11 - טורי פורייה

### תוכן העניינים

1. טור פורייה ממשי ..... 105
2. טור פורייה מרוכב ..... 106
3. משפט פרסבל ..... 107
4. רימן לבג ..... 110
5. משפט דיריכלה ..... 111
6. המשכה זוגית ואי זוגית ..... 113
7. גזירה ואינטגרציה של טורי פורייה ..... 114
8. טור פורייה בקטע כללי ..... 117
9. התכנסות במידה שווה של טורי פורייה ..... 119
10. משפט הקונבולוציה ..... 120
11. תרגילים מסכמים ..... 122

# טור פורייה ממשי:

## שאלות:

**1)** חשבו טור פורייה ממשי לפונקציה $f(x)=x$ בקטע $[-\pi,\pi]$.

**2)** מצאו טור פורייה של $f(x)$ בקטע $[-\pi,\pi]$ כאשר $f(x)=\begin{cases}1 & 0<x<\pi \\ 0 & -\pi<x<0\end{cases}$.

**3)** מצאו טור פורייה של $f(x)$ בקטע $[-\pi,\pi]$ כאשר $f(x)=\sin(|x|)$.

**4)** מצאו טור פורייה של $f(x)$ בקטע $[-\pi,\pi]$ כאשר $f(x)=\begin{cases}1 & |x|<1 \\ 0 & else\end{cases}$.

## תשובות סופיות:

**1)** $\sum_{n=1}^{20}-\frac{2}{n}(-1)^n\sin(nx)$

**2)** $f(x)\sim\frac{1}{2}+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2}{\pi(2k-1)}\sin((2k-1)x)$

**3)** $\sin(|x|)\sim\frac{2}{\pi}+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{4}{\pi}\frac{1}{1-(2k)^2}\cos(2kx)$

**4)** $f(x)\sim\frac{1}{\pi}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{\pi}\frac{\sin(n)}{n}\cos(nx)$

# טור פורייה מרוכב:

## שאלות:

1) חשבו טור פורייה מרוכב לפונקציה $f(x)=x$ בקטע $[-\pi,\pi]$.

2) מצאו טור פורייה של $f(x)$ בקטע $[-\pi,\pi]$ כאשר $f(x)=\begin{cases}-x & -\pi\le x<0\\ 0 & 0\le x<\pi\end{cases}$.

3) מצאו טור פורייה של $f(x)$ בקטע $[-\pi,\pi]$ כאשר $f(x)=\begin{cases}x & -\pi\le x<0\\ 2x & 0\le x<\pi\end{cases}$.

4) מצאו טור פורייה של $f(x)$ בקטע $[-\pi,\pi]$ כאשר $f(x)=\begin{cases}1 & -\pi\le x<0\\ -2 & 0\le x<\pi\end{cases}$.

5) מצאו טור פורייה מרוכב של $f(x)$ בקטע $[-\pi,\pi]$ כאשר $f(x)=\begin{cases}0 & -\pi\le x<0\\ \sin(x) & 0\le x<\pi\end{cases}$.

## תשובות סופיות:

1) $x\sim\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} i\frac{(-1)^n}{n}e^{inx}$

2) $f(x)\sim\frac{\pi}{4}+\sum_{\substack{-\infty\\ n\neq 0}}^{\infty}-\frac{1}{2\pi}\left\{-\pi\frac{(-1)^n}{in}+\frac{1-(-1)^n}{n^2}\right\}e^{inx}$

3) $f(x)\sim\frac{\pi}{4}+\sum_{\substack{-\infty\\ n\neq 0}}^{\infty}\frac{1}{2\pi}\left[-\frac{1}{n^2}+\frac{(-1)^n}{n^2}-3(-1)^n\frac{\pi}{in}\right]e^{inx}$

4) $f(x)\sim-\frac{1}{2}-\sum_{k=-\infty}^{k=\infty}\frac{3}{\pi i(2k-1)}e^{i(2k-1)x}$

5) $f(x)\sim\frac{1}{4i}e^{ix}-\frac{1}{4i}e^{-ix}+\sum_{k=-\infty}^{\infty}\frac{1}{\pi}\frac{1}{1-(2k)^2}e^{i[2k]x}$

## משפט פרסבל:

### שאלות:

**1)** באמצעות טור הפורייה $x\sim\sum_{n=1}^{\infty}-\frac{2}{n}(-1)^n\sin(nx)$ , חשבו את הסכום $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}$.

**2)** נתון כי טור הפורייה הממשי של $f(x)=\begin{cases}1 & 0<x<\pi\\ 0 & -\pi<x<0\end{cases}$ בקטע $[-\pi,\pi]$ הינו $\frac{1}{2}+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2}{\pi(2k-1)}\sin\left((2k-1)x\right)$. הוכיחו כי $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}=\frac{\pi^2}{8}$.

**3)** נתונות הפונקציות $f(x)=\begin{cases}0 & 0\le x\le\pi\\ x+\pi & -\pi\le x<0\end{cases}$ ו- $g(x)=x$.

מצאו להן טורי פורייה ממשיים והוכיחו באמצעותם כי $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n^2}=-\frac{\pi^2}{12}$.

**4)** מצאו טור פורייה מרוכב של הפונקציה $f(x)=\begin{cases}1 & 0<x\le\pi\\ 0 & -\pi<x\le 0\end{cases}$ ובאמצעותו חשבו את הסכום $\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}$.

**5)** נתונות הפונקציות $f(x)=\begin{cases}1 & 0\le x\le\pi\\ e^{x^2} & -\pi\le x<0\end{cases}$ ו- $g(x)=\begin{cases}0 & 1<x\le\pi\\ \frac{1}{x^2+1} & 0\le x\le 1\\ 0 & -\pi\le x<0\end{cases}$.

נסמן את טורי פורייה המרוכבים שלהם ב- $g\sim\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}g_ne^{inx}$ , $f\sim\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}f_ne^{inx}$.

הוכיחו כי $\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}f_n\cdot\overline{g_n}=\frac{1}{8}$.

**6)** נתונה פונקציה מחזורית עם מחזור $2\pi$:

$$f(x)=\sinh(x)=\frac{e^{x}-e^{-x}}{2}\quad,\quad -\pi\le x<\pi$$

א. שרטטו את גרף הפונקציה בקטע $-3\pi<x<3\pi$.

ב. פתחו את הפונקציה לטור פורייה ממשי.

ג. חשבו את סכום הטור $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n^2}{\left(1+n^2\right)^2}$.

**7)** הפונקציה $f(x)$ מוגדרת בקטע $[-\pi,\pi]$ על ידי הנוסחה: $f(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\sqrt{\frac{1}{n^2}-\frac{1}{(n+2)^2}}e^{inx}$.

חשבו $\int_{-\pi}^{\pi}\left|f(x+\pi)-f(x)\right|^2dx$.

**8)** היעזרו בפיתוח פורייה של הפונקציה $f(x)=\sin\left(\frac{px}{2}\right)$ בקטע $[-\pi,\pi]$ כאשר $p\neq 0$

כדי להוכיח את הזהות $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n^2}{\left(1-4n^2\right)^2}=\frac{\pi^2}{64}$.

**9)** היעזרו בפיתוח פורייה של הפונקציה $f(x)=\begin{cases}h^2 & h\le x\le\pi\\ 0 & -\pi\le x\le h\end{cases}$ בקטע $[-\pi,\pi]$

כאשר $0\neq h\in[-\pi,\pi]$ ובשוויון פרסבל כדי לחשב $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1-(-1)^n\cos(2n)}{n^2}$.

**10)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. מצאו טור פורייה מרוכב של $f(x)=\sin\left(\frac{x}{2}\right)$ בקטע $[-\pi,\pi]$.

ב. הוכיחו באמצעות הטור מסעיף א' כי $\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{n^2}{\left(1-4n^2\right)^2}=\frac{\pi^2}{32}$.

ג. הסיקו כי $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n^2}{\left(1-4n^2\right)^2}=\frac{\pi^2}{64}$.

## תשובות סופיות:

1) $\frac{\pi^2}{6}$

2) הוכחה.

3) הוכחה.

4) $\frac{\pi^2}{4}$

5) הוכחה.

6) א. ראו סרטון.

ב. $\sinh(x)\sim-\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2n}{n^2+1}\frac{\sinh(\pi)(-1)^n}{\pi}\sin(nx)$

ג. $\approx 0.769$

7) $8\pi$

8) הוכחה.

9) $\frac{\pi^2-4}{4}$

10) א. $\sin\left(\frac{x}{2}\right)\sim\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{4n(-i)(-1)^n}{\pi\left(1-4n^2\right)}e^{inx}$

ב. הוכחה.

ג. ראו סרטון.

# רימן לבג:

## שאלות:

1) חשבו $\lim_{n\to\infty}\int_{-\pi}^{\pi} e^{x^2+2x}\cos\left(\sqrt{|x|}\right)\sin(nx)\,dx$.

2) חשבו $\lim_{n\to\infty}\int_{-\frac{\pi}{n}}^{\frac{\pi}{n}} \frac{n}{(nt)^2+1}e^{i\cdot n^2 t}\,dt$.

3) הוכיחו כי $\lim_{n\to\infty}\left(n\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{x}\frac{se^{s^2}\,ds}{\sqrt{s^2+2017}}e^{inx}\,dx\right)=0$.

## תשובות סופיות:

1) 0
2) 0
3) הוכחה.

# משפט דיריכלה:

## שאלות:

**1)** בתרגיל קודם פיתחנו את הפונקציה $f(x)=x$ בקטע $[-\pi,\pi]$ לטור פורייה ממשי $x\sim\sum_{n=1}^{\infty}-\frac{2}{n}(-1)^n\sin(nx)$.

היעזרו בפיתוח זה כדי להוכיח $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k+1}}{2k-1}=\frac{\pi}{4}$.

רמז: הציבו $x=\frac{\pi}{2}$.

**2)** נתונה פונקציה מחזורית עם מחזור $2\pi$: $f(x)=\begin{cases}2+\frac{2x}{\pi} & -\pi<x<0\\ 2 & 0<x<\pi\end{cases}$.

א. שרטטו את גרף הפונקציה בתחום $[-3\pi,3\pi]$.

ב. פתחו את הפונקציה לטור פורייה ממשי.

ג. הוכיחו כי $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^2}=\frac{\pi^2}{8}$.

**3)** במרחב הפונקציות $L^2_{PC}[-\pi,\pi]$ נתונה הפונקציה $f(x)=x^2$.

א. חשבו את טור פורייה הממשי של $f(x)$.

ב. חשבו את הטור $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^4}$.

ג. חשבו את הטור $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n^2}$.

ד. חשבו את הטור $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}$.

**4)** היעזרו בפיתוח פורייה של הפונקציה $f(x)=\cos(ax)$ בקטע $[-\pi,\pi]$ כאשר $a$ אינו מספר שלם כדי להוכיח את הזהויות:

א. $\frac{1}{\sin(\pi a)}=\frac{1}{\pi a}+\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n\left[\frac{1}{\pi a+\pi n}+\frac{1}{\pi a-\pi n}\right]$

ב. $\cot(\pi\alpha)=\frac{1}{\pi\alpha}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{\pi\alpha+\pi n}+\frac{1}{\pi\alpha-\pi n}$

## תשובות סופיות:

**1)** הוכחה.

**2)** א. ראו סרטון.

ב. $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2(-1)^n}{\pi n}\sin(nx)+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{4}{\pi^2(2k-1)^2}\cos([2k-1]x)+\frac{3}{2}\sim f(x)$ ג. הוכחה.

**3)** א. $x^2\sim\frac{\pi^2}{3}+\sum_{n=1}^{\infty}4\frac{(-1)^n}{n^2}\cos(nx)$ ב. $\frac{\pi^4}{90}$ ג. $\frac{\pi^2}{-12}$ ד. $\frac{\pi^2}{6}$

**4)** א. הוכחה. ב. הוכחה.

## המשכה זוגית ואי זוגית:

### שאלות:

**1)** נתונה הפונקציה $f(x)=x$ בקטע $[0,\pi]$.

מצאו לה טור קוסינוסים: $f\sim\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}a_n\cos(nx)$ והוכיחו כי לכל $0<x<\pi$

מתקיים $x=\frac{\pi}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{-4}{\pi(2k-1)^2}\cos([2k-1]x)$.

**2)** נתונה הפונקציה $f(x)=1$ בקטע $[0,\pi]$.

מצאו לה טור סינוסים: $f\sim\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin(nx)$ והוכיחו כי:

א. לכל $0<x<\pi$ מתקיים $1=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{4}{\pi(2k-1)}\sin([2k-1]x)$

ב. $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(2k-1)}=-\frac{\pi}{4}$

### תשובות סופיות:

**1)** הוכחה.

**2)** א. הוכחה. ב. הוכחה.

# גזירה ואינטגרציה של טורי פורייה:

## שאלות:

**1)** תהי $f(x)$ פונקציה רציפה בקטע $[-\pi,\pi]$ המקיימת $f(-\pi)=f(\pi)$
ונניח כי היא גזירה למקוטעין ברציפות (כלומר נניח $f'(x)\in L^2_{PC}[-\pi,\pi]$).

נסמן $f(x)\sim\sum_{n=-\infty}^{\infty}c_ne^{inx}$ אזי הטור $\sum_{n=-\infty}^{\infty}c_ne^{inx}$ מתכנס בהחלט.

**2)** נתונה הפונקציה $f(x)=x(\pi-x)$ בקטע $[0,\pi]$.

א. פתחו את הפונקציה לטור סינוסים.

ב. לאיזו פונקציה מתכנס הטור?
שרטטו את גרף הפונקציה (לפחות 3 מחזורים).

ג. הוכיחו כי $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^6}=\frac{\pi^6}{960}$.

ד. הוכיחו כי $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k+1}}{(2k-1)^3}=\frac{\pi^3}{32}$.

ה. מצאו פיתוח לטור קוסינוסים של $g(x)=\frac{\pi x^2}{2}-\frac{x^3}{3}$ בקטע $[0,\pi]$.

ו. בעזרת הטור הקודם הוכיחו כי $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{(2k-1)^4}=\frac{\pi^4}{96}$. רמז: הציבו $x=0$.

**3)** נתונה הפונקציה $f(x)=e^{x^2}$ בקטע $[-\pi,\pi]$.

נסמן $f(x)\sim\sum_{-\infty}^{\infty}\left|c_ne^{inx}\right|$ פיתוח פורייה מרוכב.

א. האם הטור $\sum_{-\infty}^{\infty}|c_n|$ מתכנס?

ב. האם הטור $\sum_{-\infty}^{\infty}n|c_n|$ מתכנס?

ג. האם הטור $\sum_{-\infty}^{\infty}n^2|c_n|^2$ מתכנס?

**4)** נתבונן בטור הפורייה $f(x)=\sum_{n=0}^{\infty}e^{in(x+i)}$.

כמה פעמים ניתן לגזור את $f(x)$?

**5)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. הוכיחו כי $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(nx)}{n}=\frac{\pi-x}{2}$ בקטע $(0,2\pi)$.

ב. נסמן $g(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(nx)}{n^3}$. מצאו את $g(x)$ באופן מפורש (ללא טור) בקטע $(0,2\pi)$.

**6)** תהי $f(x)$ גזירה ברציפות $k-1$ פעמים בקטע $[-\pi,\pi]$, גזירה ברציפות למקוטעין $k$ פעמים כך שמתקיים $f^{(j)}(-\pi)=f^{(j)}(\pi)$ לכל $j=0,1,...k-1$. נסמן $f\sim\sum_{-\infty}^{\infty}c_n e^{inx}$.

הוכיחו כי $\lim_{n\to\infty}(n^k c_n)=0$.

**7)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. תהי $f(x)\in L^2{}_{PC}[-\pi,\pi]$ פונקציה גזירה ברציפות המקיימת $f(-\pi)=f(\pi)$ ו-$\int_{-\pi}^{\pi}f(x)dx=0$. הראו כי מתקיים $\int_{-\pi}^{\pi}|f(x)|^2dx\le\int_{-\pi}^{\pi}|f'(x)|^2dx$.

ב. תהי $f(x)\in L^2{}_{PC}[0,\pi]$ פונקציה גזירה ברציפות המקיימת $f(0)=f(\pi)=0$.

הראו כי מתקיים $\int_{0}^{\pi}|f(x)|^2dx\le\int_{0}^{\pi}|f'(x)|^2dx$.

**8)** נגדיר $f(x)=\sum_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{n^2+1}e^{in^2x}$.

א. הוכיחו כי $f(x)$ רציפה.

ב. הוכיחו כי $f(x)$ אינה גזירה ברציפות.

**9)** נגדיר $f(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^3+1}\sin(n^{2.5}x)$

א. הוכיחו כי $f(x)$ רציפה.

ב. הוכיחו כי $f(x)$ אינה גזירה ברציפות.

**10)** נסמן $f(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos(nx)}{n^{1.4}}+\frac{\sin(nx)}{n^{2.8}}$.

א. האם $f$ רציפה?

ב. האם $f$ גזירה ברציפות?

**11)** נגדיר $f(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(nx)}{n^4}$. הוכיחו כי $f(x)$ אינה גזירה 4 פעמים ברציפות.

**12)** נסמן $f(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{n^{3.1}+i\cdot n^{2.2}}\cdot e^{inx}$. הוכיחו כי $f$ גזירה ברציפות פעמיים.

## תשובות סופיות:

**1)** הוכחה.

**2)** א. $[0,\pi]$ $f(x)\sim\sum_{k=1}^{\infty}\frac{8}{\pi(2k-1)^3}\sin([2k-1]x)$

ב. ראו סרטון. ג. הוכחה. ד. הוכחה.

ה. $[0,\pi]$ $\frac{\pi x^2}{2}-\frac{x^3}{3}\sim\frac{\pi^3}{12}+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{-8}{\pi(2k-1)^4}\cos([2k-1]x)$ ו. הוכחה.

**3)** א. $\sum_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{1}{n}\cdot nc_n\right|\le\frac{1}{2}\sum_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{n^2}+\frac{1}{2}\sum_{-\infty}^{\infty}n^2|c_n|^2<\infty$ ב. $\sum_{-\infty}^{\infty}n|c_n|<\infty$

ג. $\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}|f'(x)|^2\,dx=\sum_{-\infty}^{\infty}n^2|c_n|^2$

**4)** ראו סרטון.

**5)** א. הוכחה. ב. $-\frac{\pi}{2}\frac{x^2}{2}+\frac{x^3}{12}+\frac{\pi^2}{6}x$

**6)** הוכחה.

**7)** א. הוכחה. ב. הוכחה.

**8)** א. הוכחה. ב. הוכחה.

**9)** א. הוכחה. ב. הוכחה.

**10)** א. $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^{.4}}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^{2.8}}<\infty$ ב. נניח בשלילה כי $f$ גזירה ברציפות.

**11)** הוכחה.

**12)** הוכחה.

# טור פורייה בקטע כללי:

## שאלות:

**1)** חשבו טור פורייה ממשי לפונקציה $f(x)=x^2$ בקטע $[0,2\pi]$.

**2)** תהי הפונקציה $f(x)=\min\{1,|x|\}$.

א. חשבו את מקדמי פורייה $a_n$ ו- $b_n$ של טור פורייה של $f(x)$ בקטע $[-2,2]$.

ב. חשבו את $\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{(2k+1)^2}$ , $\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{(2k+1)^4}$.

**3)** נתונה הפונקציה $f(x)=e^{\frac{x}{2}}$ בקטע $[0,2]$.

א. פתחו את הפונקציה לטור פורייה מרוכב.

ב. לאיזו פונקציה מתכנס הטור? שרטטו את גרף הפונקציה (לפחות 3 מחזורים).

ג. חשבו את סכום הטור $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{1+4\pi^2n^2}$.

**4)** פתחו את $f(x)=|x|$ לטור פורייה בקטע $[-1,1]$.

**5)** פתחו את $f(x)=\begin{cases}x & 0\le x\le 1\\ 2-x & 1<x<2\end{cases}$ לטור סינוסים בקטע $[0,2]$.

**6)** נתונה פונקציה $f(x)$ המקיימת $f(x)=f(x+2)$ ובנוסף $-1\le x<1$ $f(x)=2-|x|$.

א. פתחו את הפונקציה לטור פורייה ממשי.

ב. חשבו את סכום הטור $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{(2k-1)^4}$.

ג. חשבו את הסכום $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}$.

ד. האם טור הפורייה של $f(x)$ מתכנס במידה שווה בתחום $[-1,1]$?

**7)** מצאו טור קוסינוסים $f(x)=x$ בקטע $[0,3]$.

**8)** פתחו את $f(x)=\cos(2x)$ לטור סינוסים בקטע $[0,\pi]$.

## תשובות סופיות:

**1)** $0 \le x \le 2\pi$ $\quad x^2 \sim \frac{4\pi^2}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n^2} \cdot \cos nx - \frac{4\pi}{n} \cdot \sin nx$

**2)** א. $b_n = 0 \quad , \quad a_n = \begin{cases} \frac{-4}{\pi^2 [2k-1]^2} & n = 2k-1 \\ \frac{-8}{\pi^2 [4k-2]^2} & n = 4k-2 \\ 0 & else \end{cases}$

ב. $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{[2k-1]^4} = \frac{\pi^4}{96} \quad , \quad \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} = \frac{\pi^2}{8}$

**3)** א. $f(x) \sim \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(e-1)(1+2in\pi)}{1|\, 4n^2\pi^2} e^{in\pi x}$ ב. ראו סרטון. ג. $\frac{3-e}{4(e-1)}$

**4)** $|x| \sim \frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)^2} \cos\left(\pi [2k-1] x\right)$

**5)** $f(x) \sim \sum_{k=1}^{\infty} \frac{-8\cos(\pi k)}{\pi^2 [2k-1]^2} \sin\left(\frac{\pi [2k-1] x}{2}\right)$

**6)** א. $f(x) \sim \frac{3}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{(2k-1)^2 \pi^2} \cos\left([2k-1]\pi x\right)$ ב. $\frac{\pi^4}{96}$ ג. $\frac{\pi^2}{8}$

ד. אם $f$ רציפה בקטע $[a,b]$ , $f(a) = f(b)$ ו-$f'$ רציפה למקוטעין אזי טור פורייה של $f$ מתכנס במ"ש ל-$f$ בקטע $[a,b]$.

**7)** $f(x) \sim \frac{3}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{-12}{\pi^2 (2k-1)^2} \cos\left(\frac{\pi(2k-1)}{3} x\right)$

**8)** $\cos(2x) \sim -\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\pi} \frac{4[2k-1]}{4-[2k-1]^2} \sin\left([2k-1]x\right)$

# התכנסות במידה שווה של טורי פורייה:

## שאלות:

**1)** תהי הפונקציה $g(x)=\begin{cases}-x & -\pi\le x<0\\ \pi-x & 0\le x<\pi\end{cases}$

א. חשבו את טור פורייה הממשי של $g(x)$.

ב. עבור $-\pi\le x\le\pi$ נגדיר את הפונקציה $h(x)=a\sin\left(\frac{x}{2}\right)+\int_{-\pi}^{x}g(t)\,dt$

כאשר $g(x)$ מוגדרת בסעיף א'.

עבור אילו ערכים של $a$ מתכנס טור פורייה של $h(x)$ במידה שווה ל-$h(x)$ בקטע $[-\pi,\pi]$.

**2)** נגדיר פונקציה $f(x)=|\sin(x)|$ במרחב $L^2_{PC}([-\pi,\pi])$ ונסמן ב-$f'(x)$ את הנגזרת שלה.

א. חשבו את טורי הפורייה הממשיים של $f$ ושל $f'$.

ב. לאילו פונקציות מתכנסים נקודתית טורי הפורייה שחישבתם?

שרטטו את הגרפים של פונקציות אלו בתחום $[-3\pi,3\pi]$.

ג. באילו קטעים סגורים מתכנס טור הפורייה של $f$ במידה שווה?

ד. באילו קטעים סגורים מתכנס טור הפורייה של $f'$ במידה שווה?

## תשובות סופיות:

**1)** א. $g(x)\sim\frac{\pi}{2}+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k}\sin(2k\cdot x)$ ב. $a=-\frac{\pi^2}{2}$

**2)** א. $f(x)\sim\left(\frac{2}{\pi}\right)+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\pi}\left[\frac{-4}{(2k+1)(2k-1)}\right]\cos(2k\cdot x)$,

$f'(x)\sim\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\pi}\left[\frac{8k}{(2k+1)(2k-1)}\right]\sin(2k\cdot x)$ ב. $f'(x)=\begin{cases}\cos x & 0<x<\pi\\ -\cos x & -\pi<x<0\end{cases}$

ג. $f(x)$ פונקציה רציפה, מחזורית-$2\pi$, הנגזרת רציפה למקוטעין, ולכן טור פורייה שלה יתכנס אליה במידה שווה על פני כל הישר הממשי.

ד. טור פורייה של $f'(x)$ יתכנס אליה במידה שווה בכל תת-קטע סגור שאינו מכיל נקודות אי-רציפות של הפונקציה, כלומר בקטעים כאלו: $[\pi n+\delta,\pi(n+1)-\delta]$

לכל $0<\delta<\pi$ ולכל $n$ שלם.

# משפט הקונבולוציה:

## שאלות:

**1)** הוכח את הטענה כי אם $f(x)$ , $g(x)$ רציפות למקוטעין ומחזוריות-$2\pi$ אז $(f*g)_{(x)}$ מחזוריות-$2\pi$.

**2)** הוכח את הטענה כי אם $f(x)$ , $g(x)$ רציפות למקוטעין, מחזוריות-$2\pi$ ופונקציות זוגיות אז $(f*g)_{(x)}$ זוגית.

**3)** נתונה $f(x)$ רציפה למקוטעין ומחזורית-$2\pi$ כך שלכל $x\in[-\pi,\pi]$ מתקיים $f(x)=\sqrt{2\pi}\cdot\chi_{\left[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}\right]}(x)$.

חשבו לכל $x$ ממשי את הקונבולוציה $(f*f)_{(x)}$.

הערה: $\chi_{[a,b]}(x)=\begin{cases}1 & x\in[a,b]\\ 0 & else\end{cases}$.

**4)** נתונות $f(x)$ , $g(x)$ רציפות למקוטעין ומחזוריות-$2\pi$ כך שלכל $x\in[-\pi,\pi]$ מתקיים $f(x)=x^2$ , $g(x)=\cos(x)$.

חשבו לכל $x$ ממשי את הקונבולוציה $(f*g)_{(x)}$.

**5)** נתונות $f(x)$ , $g(x)$ רציפות למקוטעין ומחזוריות-$2\pi$ כך שלכל $x\in[-\pi,\pi]$ מתקיים $f(x)=x$ , $g(x)=\chi_{[0,1]}(x)$.

חשבו לכל $x$ ממשי את הקונבולוציה $(f*g)_{(x)}$.

## תשובות סופיות:

1) הוכחה.

2) הוכחה.

3) $\pi - x$

4) לכל $-\pi \le x \le \pi$ , $(f*g)_{(x)} = -2\cos(x)$

5) $$(f*g)_{(x)} = \begin{cases} \frac{1}{4\pi}\left(x^2 - (x-1)^2\right) & -\pi+1 \le x \le \pi \\ \frac{1}{4\pi}\left[x^2 - \left(x+(2\pi-1)\right)^2\right] & -\pi \le x \le -\pi+1 \end{cases}$$

# תרגילים מסכמים:

## שאלות:

**1)** טור פורייה:

א. מצאו טור פורייה של הפונקציה $f(t)=e^{i\alpha t}$ בתחום $-\pi \le t \le \pi$ כאשר $\alpha$ הוא מספר ממשי לא שלם.

ב. הראו שמתקיים $\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{(-1)^n\cdot 2\alpha}{\left[\alpha^2-n^2\right]}=\frac{\pi}{\sin(\pi\alpha)}-\frac{1}{\alpha}$.

ג. הראו שמתקיים $\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}\frac{1}{\left[\alpha-n\right]^2}=\frac{\pi^2}{\sin^2(\pi\alpha)}$.

ד. הראו שמתקיים $\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{(2n+1)\left((2n+1)^2-\alpha^2\right)}=\frac{\pi}{4\alpha^2}\left(\frac{1}{\cos\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right)}-1\right)$.

**2)** נגדיר $f(x)=|x|$ במרחב $L^2_{PC}([-\pi,\pi])$ ונסמן ב-$f'(x)$ את הנגזרת שלה.

א. חשבו טור פורייה ממשי של $f$.

ב. לאיזו פונקציה מתכנס הטור הבא נקודתית בתחום $(-\infty,\infty)$?

$$\sin(x)+\frac{1}{3}\sin(3x)+\frac{1}{5}\sin(5x)+\frac{1}{7}\sin(7x)+\ldots$$

ג. חשבו את הטור $\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{1}{2n+1}\right)^2$.

**3)** תהי $f\in L^2_{PC}([-\pi,\pi])$.

נסמן ב-$c_n$ את מקדמי פורייה (המרוכבים) של $f$.

נסמן $d_n=\mathrm{Re}\{c_n\}$ ובנוסף נתון כי:

- $f$ ממשית.
- $f$ מתאפסת על הקטע $[-\pi,0]$.
- מתקיים השיוויון $\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}d_n e^{inx}=x^2e^{|x|}\cos(x)$.

מצאו את $f$.

**4)** תהי $f$ פונקציה זוגית בעלת מחזור $2\pi$ המקיימת $f(x)=\cos(2x)$ בתחום $0\le x\le\frac{\pi}{2}$ ו-$f(x)=-1$ בתחום $\frac{\pi}{2}\le x\le\pi$.

מצאו את טור פורייה הממשי של $f$ וחשבו את הסכום $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{[2n-1][2n+3](2n+1)}$.

האם טור פורייה של $f$ מתכנס אליה במידה שווה? נמקו.

**5)** נתונה פונקציה $f(x)$ רציפה למקוטעין ומחזורית $2\pi$.

נסמן $f(x)\sim\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}f_n e^{inx}$ ויהי $h>0$ פרמטר כלשהו.

מצאו את מקדמי פורייה של $h(x)=\frac{1}{2h}\int_{-h}^{h}f(t+x)dt$ כתלות ב-$f_n$.

## תשובות סופיות:

**1)** א. $e^{i\alpha t}\sim\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}\frac{(-1)^n\sin(\pi\alpha)}{[\alpha-n]\pi}\cdot e^{in\cdot t}$ ב. הוכחה. ג. הוכחה. ד. הוכחה.

**2)** א. $f(x)\sim\frac{\pi}{2}+\sum_{k=0}^{\infty}-\frac{4}{\pi(2k+1)^2}\cos([2k+1]x)$

ב. $\begin{cases}\frac{\pi}{4} & \pi k<x<\pi(k+1)\\ -\frac{\pi}{4} & \pi(k-1)<x<\pi k\\ 0 & x=\pi k\end{cases}$, כאשר $k$ מספר שלם. ג. $\frac{\pi^2}{8}$

**3)** $f(x)=\begin{cases}2x^2e^{|x|}\cos(x) & 0<x<\pi\\ 0 & -\pi<x\le 0\end{cases}$

**4)** התכנסות במידה שווה בקטע $[-\pi,\pi]$- אם $f$ רציפה בקטע $[-\pi,\pi]$, $f(-\pi)=f(\pi)$ ו-$f'\in E[-\pi,\pi]$ אזי טור פורייה של $f$ מתכנס במ"ש ל-$f$ בקטע $[-\pi,\pi]$.

**5)** $f_0$

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 12 - התמרת פורייה

### תוכן העניינים

1. מבוא כללי ..... 124
2. נוסחת כיווץ והזזה ..... 126
3. נוסחת הנגזרת ..... 128
4. נוסחאות כפל באקספוננט ומודולציה ..... 129
5. נוסחת המומנט ..... 131
6. נוסחת ההתמרה ההפוכה ..... 133
7. נוסחת התמרה כפולה ..... (ללא ספר)
8. משפט פלנשראל ..... 134
9. משפט הקונבולוציה ..... 135
10. תרגילים מסכמים ..... 139

# מבוא כללי:

## שאלות:

1) חשבו את התמרת פורייה של $\chi_{[-1,1]}(x)=\begin{cases}1 & x\in[-1,1]\\ 0 & else\end{cases}$.

2) מצאו התמרת פורייה עבור $f(x)=\begin{cases}1-|x| & |x|<1\\ 0 & else\end{cases}$.

3) מצאו התמרת פורייה עבור $f(x)=\begin{cases}e^{-x} & x>0\\ 0 & else\end{cases}$.

4) מצאו התמרת פורייה עבור $f(x)=\begin{cases}1 & |x|\le 1\\ 2 & 1<|x|<2\\ 0 & else\end{cases}$.

5) הוכיחו כי התמרת פורייה של $f(x)=\begin{cases}e^{-ax} & x>0\\ e^{bx} & x\le 0\end{cases}$ כאשר $a,b>0$ קבועים הינה
$f(\omega)=\frac{1}{2\pi}\left[\frac{1}{b-i\omega}+\frac{1}{a+i\omega}\right]$.

6) מצאו התמרת פורייה של $f(x)=\begin{cases}1 & 0<x<1\\ 0 & else\end{cases}$.

7) מצאו התמרת פורייה עבור $f(x)=\begin{cases}1 & 0\le x<1\\ 2 & 1\le x<2\\ 0 & else\end{cases}$.

8) מצאו התמרת פורייה עבור $f(x)=\begin{cases}e^{-x} & 0\le x<1\\ 0 & else\end{cases}$.

9) הוכיחו התמרת פורייה של $f(x)=\begin{cases}e^{2ix} & -1<x<1\\ 0 & else\end{cases}$ הינה $f(\omega)=\frac{1}{\pi}\frac{\sin[2-\omega]}{2-\omega}$.

10) מצאו התמרת פורייה של $f(x)=\begin{cases}\sin(x) & -1<x<1\\ 0 & else\end{cases}$.

11) חשבו את התמרת פורייה של $f(x)=\begin{cases}x & |x|<a\\ 0 & else\end{cases}$ עבור $a>0$.

12) האם קיימת $f\in L^1_{PC}(\mathbb{R})$ כך ש- $f(\omega)=\begin{cases}1-|\omega| & |\omega|\le\frac{1}{2}\\ 0 & |\omega|>\frac{1}{2}\end{cases}$.

## תשובות סופיות:

1) $\frac{\sin(\omega)}{\pi\omega}$

2) $f(\omega)=\frac{1-\cos(\omega)}{\pi\omega^2}$

3) $f(\omega)=\frac{1}{2\pi(1+i\omega)}$

4) $f(\omega)=\frac{2\sin(2\omega)-\sin(\omega)}{\pi\omega}$

5) הוכחה.

6) $f(\omega)=\frac{1}{2\pi}\frac{\sin(\omega)+i\left[\cos(\omega)-1\right]}{\omega}$

7) $f(\omega)=\frac{1}{2\pi}\frac{1+e^{-i\omega}-2e^{-i2\omega}}{i\omega}$

8) $f(\omega)=\frac{1}{2\pi}\frac{e^{(1-i\omega)}-1}{1-i\omega}$

9) הוכחה.

10) $f(\omega)=-i\cdot\frac{1}{2\pi}\left\{\frac{\sin([1-\omega])}{1\quad\omega}-\frac{\sin([1+\omega])}{1\,|\,\omega}\right\}$

11) $f(\omega)=-\frac{1}{\pi}i\frac{\sin(\omega a)-\omega a\cos(\omega a)}{\omega^2}$

12) לא. אינה רציפה בנקודות $\omega=\pm\frac{1}{2}$.

## נוסחת כיווץ והזזה:

**שאלות:**

**1)** מצאו התמרת פורייה של $\chi_{[-r,r]}(x)=\begin{cases}1 & x\in[-r,r]\\ 0 & else\end{cases}$ כאשר $r>0$.

**2)** מצאו התמרת פורייה של $f(x)=e^{-4x^2-4x-1}$ על ידי שימוש בעובדה

כי $F\left\{e^{-x^2}\right\}=\frac{1}{2\sqrt{\pi}}e^{-\frac{\omega^2}{4}}$.

**3)** נתונה פונקציה $g(x)\in G(R)$ בעלת התמרת פוריה $g(\omega)$.

מצאו פונקציה $f(x)$ (כתלות ב-$g(x)$) בעלת התמרת פורייה $g(\omega)\cos(\omega)$.

**4)** מצאו התמרת פורייה של $f(x)=e^{-ax^2}$ כאשר $a>0$.

רמז: $F\left\{e^{-x^2}\right\}=\frac{1}{2\sqrt{\pi}}e^{-\frac{\omega^2}{4}}$

**5)** מצאו פונקציה שהתמרת פורייה שלה היא $f(\omega)=\cos(4\pi\omega)\cdot\frac{\sin(2\omega)}{\omega}$.

רמז: $F\left\{\chi_{[-1,1]}(x)\right\}=\frac{\sin(\omega)}{\pi\omega}$.

## תשובות סופיות:

1) $\frac{\sin(\omega \cdot r)}{\pi\omega}$

2) $f(\omega)=\frac{e^{i\frac{\omega}{2}}}{4\sqrt{\pi}}e^{-\frac{\omega^2}{16}}$

3) $f(x)=\frac{g(x+1)+g(x-1)}{2}$

4) $f(\omega)=\frac{1}{2\sqrt{\pi a}}e^{-\frac{(\omega)^2}{4a}}$

5) $f(x)=\frac{\pi}{2}\begin{cases}1 & 4\pi-2\le x\le 4\pi+2 \ \ or \ \ -4\pi-2\le x\le -4\pi+2 \\ 0 & else\end{cases}$

# נוסחת הנגזרת:

## שאלות:

**1)** נניח כי $f(x)\in G$ גזירה, מקיימת $\lim_{|x|\to\infty} f(x)=0$ , $f'(x)\in G$ ו- $f(\omega)=\frac{\omega}{1+\omega^{30}}$.
מצאו התמרת פורייה של $f'(x)\cos(2x)$.

**2)** יהי $a$ ממשי כלשהו. הוכיחו כי $F\left\{\frac{x}{\left(x^2+a^2\right)^2}\right\}_\omega=\left(-\frac{1}{2}\right)(i\omega)\frac{1}{2|a|}e^{-|\omega a|}$.

**3)** מצאו פונקציה שהתמרת פורייה שלה היא $f(\omega)=\omega^2e^{-|\omega|}$.
רמז: $F\left\{\frac{1}{1+x^2}\right\}=\frac{1}{2}e^{-|\omega|}$.

## תשובות סופיות:

**1)** $\frac{i\cdot\frac{(\omega-2)^2}{1+(\omega-2)^{30}}+i\cdot\frac{(\omega+2)^2}{1+(\omega+2)^{30}}}{2}$

**2)** הוכחה.

**3)** $f(x)=(-2)\frac{6x^2-2}{\left(1+x^2\right)^3}$

# נוסחאות כפל באקספוננט ומודולציה:

## שאלות:

**1)** הוכיחו כי התמרת פורייה של $F\left\{\sin(cx)e^{-|x|}\right\}_{(\omega)}=\frac{1}{\pi i}\frac{2c\cdot\omega}{\left[1+(\omega-c)^2\right]\left[1+(\omega+c)^2\right]}$.

**2)** מצאו פונקציה שהתמרת פורייה שלה היא $f(\omega)=\frac{\sin(\omega-1)}{\omega-1}-\frac{\sin(\omega+1)}{\omega+1}$.

**3)** הוכיחו כי התמרת פורייה של $g(x)=\begin{cases}\sin(ax)e^{-bx} & x>0\\ 0 & x\le 0\end{cases}$ כאשר $a,b>0$ קבועים,
הינה $g(\omega)=\frac{1}{4\pi}\left[\frac{1}{bi-(\omega-a)}-\frac{1}{bi-(\omega+a)}\right]$.

**4)** מצאו התמרת פורייה של $g(x)=e^{-|x|}\cos(2x)$ על ידי שימוש בנוסחת מודולציה ובעובדה
כי $F\left\{e^{-|x|}\right\}=\frac{1}{\pi(1+\omega^2)}$.

**5)** מצאו התמרת פורייה של $g(x)=e^{-|x|}\sin^2(3x)$ על ידי שימוש בנוסחת מודולציה
ובעובדה כי $F\left\{e^{-|x|}\right\}=\frac{1}{\pi(1+\omega^2)}$.

**6)** נניח כי $f(x)\in G(R)$ ונגדיר $g(x)=f(3x-2)\cdot\cos(x)$. בטאו את $g(\omega)$ על ידי $f(\omega)$.

**7)** מצאו פונקציה שהתמרת פורייה שלה היא $f(\omega)=e^{3i\omega}\cdot e^{-|\omega-2|}$. רמז: $F\left\{\frac{1}{1+x^2}\right\}=\frac{1}{2}e^{-|\omega|}$.

**8)** תהי $H(x)=\begin{cases}1 & x>0\\ 0 & x<0\end{cases}$.
חשבו את התמרת הפורייה של הפונקציות הבאות:

א. $H(x)e^{-ax}$ כאשר $a>0$.

ב. $H(x)e^{-ax}\cos(bx)$ כאשר $a,b>0$.

ג. $H(x)e^{-ax}\sin(bx)$ כאשר $a,b>0$.

## תשובות סופיות:

1) הוכחה.

2) $f(x)=2\pi i\cdot\chi_{[-1,1]}(x)\cdot\sin(x)$

3) הוכחה.

4) $$F\left\{e^{-|x|}\cos(2x)\right\}=\frac{1}{2\pi\left(1+\left[\omega+2\right]^2\right)}+\frac{1}{2\pi\left(1+\left[\omega-2\right]^2\right)}$$

5) $$g(\omega)=\frac{1}{2}\frac{1}{\pi\left(1+\omega^2\right)}-\left[\frac{1}{2\pi\left(1+\left[\omega+6\right]^2\right)}+\frac{1}{2\pi\left(1+\left[\omega-6\right]^2\right)}\right]$$

6) $$g(\omega)=\frac{1}{6}\left[e^{-i\frac{2}{3}(\omega+1)}f\left(\frac{\omega+1}{3}\right)+e^{-i\frac{2}{3}(\omega-1)}f\left(\frac{\omega-1}{3}\right)\right]$$

7) $$F\left\{e^{2i[x+3]}\frac{2}{1+\left[x+3\right]^2}\right\}$$

8) א. $$\frac{1}{2\pi(a+i\omega)}$$

ב. $$\frac{1}{4\pi}\left(\frac{1}{a+i\left[\omega-b\right]}+\frac{1}{a+i\left[\omega+b\right]}\right)$$

ג. $$\frac{1}{4\pi i}\left(\frac{1}{a+i\left[\omega-b\right]}+\frac{1}{a+i\left[\omega+b\right]}\right)$$

# נוסחת המומנט:

## שאלות:

**1)** מצאו התמרת פורייה של $g(x)=\begin{cases}x & x\in(-1,1)\\ 0 & else\end{cases}$ על ידי שימוש בנוסחה $F\{x\cdot f(x)\}=i\frac{d}{d\omega}f(\omega)$.

**2)** מצאו התמרת פורייה של $g(x)=x^2e^{-x^2}$ על ידי שימוש בנוסחת המומנט ובעובדה כי $F\left\{e^{-x^2}\right\}=\frac{1}{2\sqrt{\pi}}e^{-\frac{\omega^2}{4}}$.

**3)** מצאו התמרת פורייה של $g(x)=x\cdot e^{-|x|}$ על ידי שימוש בנוסחת המומנט ובעובדה כי $F\left\{e^{-|x|}\right\}=\frac{1}{\pi\left(1+\omega^2\right)}$.

**4)** מצאו את התמרת פורייה של $f(x)=e^{-x^2}$.

**5)** מצאו התמרת פורייה של $f(x)=8x^3e^{\frac{-4(x+1)^2+5}{3}}$.

**6)** תהי $f(x)=\begin{cases}\frac{1}{x^5} & x\geq 1\\ 0 & x<1\end{cases}$.

הוכיחו כי $f(\omega)$ גזירה ברציפות 3 פעמים.

**7)** נתון כי התמרת פורייה של $f\in L^1_{PC}(\mathbb{R})$ רציפה היא $f(\omega)=\frac{1}{1+|\omega|}$.

הוכיחו כי האינטגרל $\int_{-\infty}^{\infty}|x\cdot f(x)|dx$ מתבדר.

## תשובות סופיות:

1) $i\cdot\frac{\omega\cos\omega-\sin\omega}{\pi\omega^2}$

2) $F\left\{x^2e^{-x^2}\right\}=\frac{1}{4\sqrt{\pi}}\left(1-\frac{\omega^2}{2}\right)e^{-\frac{\omega^2}{4}}$

3) $F\left\{x\cdot e^{-|x|}\right\}=-\frac{i}{\pi}\frac{2\omega}{\left(1+\omega^2\right)^2}$

4) $f\left(\omega\right)=\frac{1}{2\sqrt{\pi}}e^{-\frac{\omega^2}{4}}$

5) $f\left(\omega\right)=\frac{1}{256}\sqrt{\frac{3}{\pi}}\left(27i\omega^3+216\omega^2-792i\omega-1088\right)e^{i\omega-\frac{3\omega^2}{16}-\frac{5}{3}}$

6) הוכחה.

7) הוכחה.

# נוסחת ההתמרה ההפוכה:

## שאלות:

**1)** חשבו $\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\cos(\omega x)}{\pi(1+\omega^2)}d\omega$ לכל $x$ ממשי על ידי שימוש במשפט התמרה הפוכה.

**2)** חשבו $\lim_{M\to\infty}\int_{-M}^{M}\frac{\sin(\omega)\cos(\omega x)}{\pi\omega}d\omega$ לכל $x$ ממשי על ידי שימוש במשפט התמרה הפוכה.

## תשובות סופיות:

**1)** ראו סרטון.

**2)**
$$\begin{cases}0 & |x|>1\\ 1 & |x|<1\\ \frac{1}{2} & x=1\ ,\ x=-1\end{cases}$$

# משפט פלנשראל:

## שאלות:

**1)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. חשבו התמרת פורייה של $f(x)=\chi_{[-a,a]}(x)$ עבור $a>0$.

ב. חשבו את האינטגרל $\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin(ax)}{x}\frac{\sin(bx)}{x}dx$ עבור $a,b>0$.

**2)** הוכיחו כי $\int_0^{\infty}\frac{e^{-x}\sin(x)}{x}dx=\frac{\pi}{4}$. תוכלו להיעזר בעובדה: $F\left\{\frac{1}{1+x^2}\right\}=\frac{1}{2}e^{-|\omega|}$.

**3)** הוכיחו כי $\int_0^{\infty}\frac{\sin(2x)}{x(1+4x^2)}dx=\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{1}{e}\right)$.

**4)** הוכיחו כי לא קיימת פונקציה $f(x)\in L^1_{PC}(\mathbb{R})\cap L^2_{PC}(\mathbb{R})$ כך ש- $f(\omega)=\frac{1}{\sqrt{1+|\omega|}}$.

## תשובות סופיות:

**1)** א. $f(\omega)=\frac{\sin(\omega a)}{\pi\omega}$ ב. $\pi\cdot\min\{a,b\}$

**2)** הוכחה.

**3)** הוכחה.

**4)** הוכחה.

# משפט הקונבולוציה:

## שאלות:

**1)** חשבו את הקונבולוציה $\left(\chi_{[-1,1]} * \chi_{[-1,1]}\right)_{(x)}$.

תזכורת: $\chi_{[-1,1]}(x) = \begin{cases} 1 & x \in [-1,1] \\ 0 & else \end{cases}$.

רמז: חלקו למקרים.

**2)** חשבו את הקונבולוציה $(f * f)_{(x)}$ כאשר $f(x) = \begin{cases} e^{-x} & x > 0 \\ 0 & x \le 0 \end{cases}$.

רמז: חלקו למקרים $x > 0$ ו- $x \le 0$.

**3)** מצאו פונקציה $f \in G$ כך ש- $f(\omega) = \left(\frac{\sin\omega}{\omega}\right)^2$.

**4)** נסמן ב- $E$ את מרחב הפונקציות הממשיות הגזירות פעמיים $f(t)$

המקיימות $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty$ וגם $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty$.

מצאו פונקציה $g(x)$ כך שלכל $f(t) \in E$ מתקיים השוויון.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left(f(t) - f''(t)\right) g(x-t)\, dt = 2f(x)$$

**5)** נגדיר $f(x) = \frac{1}{x^2+4}$ , $g(x) = \frac{1}{x^2+1}$. מצאו את הקונבולוציה $(f * g)_{(x)}$.

תזכורת: $F\left\{\frac{1}{x^2+a^2}\right\} = \frac{1}{2a} e^{-a|\omega|}$.

**6)** ענה על הסעיפים הבאים:

א. חשבו התמרת פורייה של $(1+|x|)e^{-|x|}$.

ב. פתרו את המשוואה האינטגרלית $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-|x-t|} f(t)\, dt = e^{-|x|} + |x| e^{-|x|}$.

**7)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. חשבו את הקונבולוציה $(f*f)_{(x)}$ כאשר $f(x)=\chi_{[0,1]}(x)$.

ב. הוכיחו כי $\int_{-\infty}^{\infty}\frac{(1-\cos x)^2}{x^4}dx=\frac{\pi}{3}$.

**8)** חשבו את הקונבולוציה $(f*f)_{(x)}$ כאשר $f(x)=\chi_{[1,2]}(x)$.

**9)** חשבו את הקונבולוציה $(f*f)_{(x)}$ כאשר $f(x)=\chi_{[0,2]}(x)$.

**10)** חשבו את הקונבולוציה $\left(\chi_{[0,1]}(x)*\chi_{[1,2]}(x)\right)_{(x)}$.

**11)** חשבו את הקונבולוציה $\left(e^{-x^2}*e^{-x^2}\right)_{(x)}$.

א. לפי ההגדרה.

ב. על ידי שימוש במשפט הקונבולוציה.

הערה: תוכלו להיעזר בעובדה $\int_{-\infty}^{\infty}e^{-x^2}dx=\sqrt{\pi}$.

**12)** מצאו פתרון למשוואה האינטגרלית $\int_{-\infty}^{\infty}f(t)f(x-t)dt=e^{\frac{-3(x+1)^2}{2}}$.

**13)** נניח כי $f(x)\in L^1_{PC}(\mathbb{R})$ רציפה ומקיימת את המשוואה האינטגרלית $\int_{-\infty}^{\infty}f(y)e^{-y^2}e^{2xy}dy\equiv 0$ הוכיחו כי $f(x)\equiv 0$.

## תשובות סופיות:

**1)** $\left(\chi_{[-1,1]} * \chi_{[-1,1]}\right)_{(x)} = \begin{cases} 2+x & x\in[-2,0] \\ 2-x & x\in[0,2] \\ 0 & else \end{cases}$

**2)** $(f*f)_{(x)} = \begin{cases} xe^{-x} & x>0 \\ 0 & x\le 0 \end{cases}$

**3)** $f(x) = \begin{cases} \frac{\pi}{2}(2+x) & x\in[-2,0] \\ \frac{\pi}{2}(2-x) & x\in[0,2] \\ 0 & else \end{cases}$

**4)** $g(x) = e^{-|x|}$

**5)** $\frac{3}{2}\cdot\frac{\pi}{x^2+9}$

**6)** א. $\frac{2}{\pi\left(1+\omega^2\right)^2}$ ב. $f(x) = e^{-|x|}$

**7)** א. $(f*f)_{(x)} = \begin{cases} 0 & x>2 \\ 2-x & 1<x<2 \\ x & 0<x<1 \\ 0 & x<0 \end{cases}$ ב. הוכחה.

**8)** $(f*f)_{(x)} = \begin{cases} 0 & x>4 \\ 4-x & 3<x<4 \\ x-2 & 2<x<3 \\ 0 & x<2 \end{cases}$

**9)** $$(f*f)_{(x)}=\begin{cases}0 & x>4\\ 4-x & 2<x<4\\ x & 0<x<2\\ 0 & x<0\end{cases}$$

**10)** $$\left(\chi_{[0,1]}(x)*\chi_{[1,2]}(x)\right)_{(x)}=\begin{cases}0 & x>3\\ 3-x & 2<x<3\\ x-1 & 1<x<2\\ 0 & x<1\end{cases}$$

**11)** א. $\sqrt{\frac{\pi}{2}}\cdot e^{-\frac{x^2}{2}}$ ב. $\frac{\sqrt{\pi}}{2}e^{-\frac{x^2}{2}}$

**12)** $$f(x)=\sqrt[4]{\frac{6}{\pi}}e^{-3\left(x+\frac{1}{2}\right)^2}$$

**13)** הוכחה.

# תרגילים מסכמים:

## שאלות:

**1)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. חשבו התמרת פורייה של הפונקציה $f(x)=\begin{cases}\sin(x) & |x|\le\pi\\ 0 & else\end{cases}$.

ב. חשבו התמרת פורייה של הפונקציה $g(x)=\begin{cases}\cos(x) & |x|\le\pi\\ 0 & else\end{cases}$.

ג. חשבו את האינטגרל $\int_0^\infty \frac{\sin(\pi x)\sin(x)}{(1-x^2)}dx$.

ד. חשבו את האינטגרל $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2}{(1-x^2)^2}\sin^2(\pi x)dx$.

**2)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. חשבו התמרת פורייה של $f(x)=x\cdot e^{-|x|}$.

ב. מצאו את כל הפונקציות $h(y)$ המקיימות $\int_{-\infty}^{\infty} h'(y)e^{-|x-y|}dy = x\cdot e^{-|x|}$.

**3)** יהי $A>0$ קבוע. נגדיר $f(x)=\begin{cases}x & 0\le x\le A\\ 0 & else\end{cases}$.

ידוע כי ישנה פונקציה $g(x)\in G$ המקיימת $g(\omega)=f(\omega)f(-\omega)$.

מצאו במפורש את $g(x)$.

**4)** נניח כי $f(x)\in C^2(-\infty,\infty)$ כך ש-$f'(x), x\cdot f'(x), f''(x)\in L^1_{PC}(-\infty,\infty)$

ומתקיים $f''(x)+x\cdot f'(x)+f(x)=0$ לכל $x$ ממשי.

א. הוכיחו כי $f(x)\in L^1_{PC}(-\infty,\infty)$.

ב. חשבו את $f(\omega)$ אם נתון כי $f(0)=1$.

ג. מצאו את $f(x)$.

**5)** תהי $f(x)=\begin{cases}2 & |x|\le 1\\ 4 & 1\le|x|\le 2\\ 0 & else\end{cases}$.

א. חשבו את $f(\omega)$.

ב. חשבו את האינטגרל $\int_0^\infty \frac{\left[2\sin(2t)-\sin(t)\right]^2}{t^2}dt$.

ג. חשבו את האינטגרל $\lim_{M\to\infty}\int_{-M}^{M}\frac{2\sin(2t)-\sin(t)}{\pi t}\cos(t)\,dt$.

**6)** ענו על הסעיפים הבאים:

א. חשבו התמרת פורייה של הפונקציה $f(x)=\begin{cases}1-\frac{x^2}{\pi^2} & |x|\le\pi\\ 0 & else\end{cases}$.

ב. חשבו את האינטגרלים: $\int_0^\infty\left(\frac{\sin(\pi x)-\pi x\cos(\pi x)}{\pi^3x^3}\right)^2dx$

ו- $\int_0^\infty\frac{\sin(\pi x)-\pi x\cos(\pi x)}{\pi^3x^3}\cos(x)\,dx$.

**7)** נגדיר $\phi(x)=\frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$. הוכיחו כי המערכת $\{\phi(x-n)\}_{n=-\infty}^{n=\infty}$ מהווה מערכת אורותונורמלית ב- $L^2_{PC}(-\infty,\infty)$.

**8)** תהי $f\in G$ פונקציה כך ש- $f'\in G$ פונקציה רציפה. מצאו פונקציה $g\in G$ המקיימת את המשוואה $g(t)=\int_{-\infty}^{t}e^{u-t}g(u)\,du+f'(t)$.

**9)** מצאו פונקציה שהתמרת פורייה שלה היא $f(\omega)=\frac{1}{\left(1+\omega^2\right)^2}$.

**10)** פתרו את המשוואה האינטגרלית $\int_{-\infty}^{\infty}\frac{f(t)}{(x-t)^2+b^2}dt=\frac{x}{\left(x^2+a^2\right)^2}$.

**11)** נגדיר $f(x)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\chi_{\left[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}\right]}(\omega-t)\chi_{\left[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}\right]}(t)e^{i\omega x}dtd\omega$.

מצאו ביטוי מפורש (ללא אינטגרלים) עבור $f(x)$.

תזכורת: $\chi_{[a,b]}(t)=\begin{cases}1 & t\in[a,b]\\ 0 & else\end{cases}$.

**12)** השתמשו במשפט פלנשראל על מנת לחשב את האינטגרל $\int_{-\infty}^{\infty}\frac{x^2}{\left(a^2+x^2\right)\left(x^2+b^2\right)}dx$

כאשר $a,b>0$.

**13)** מצאו את התמרת הפורייה של $f(x)=e^{-\left(x^2+2x+5\right)}$.

**14)** הוכיחו כי $\int_0^{\infty}e^{-ax^2}\cos(bx)dx=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{a}}e^{-\frac{b^2}{4a}}$ לכל $a,b>0$ קבועים.

**15)** הוכיחו כי $\int_0^{\infty}\frac{\sin^2(x)\cos(x)}{1+x^2}dx=\frac{\pi}{8e}\left(1-\frac{1}{e^2}\right)$.

**16)** הוכיחו כי $\int_0^{\infty}\sin^3(x)xe^{-x}dx=\frac{9}{25}$.

## תשובות סופיות:

**1)** א. $f(\omega)=-i\cdot\frac{1}{2\pi}\cdot\sin(\omega\pi)\cdot\frac{2}{1-\omega^2}$ ב. $g(\omega)=\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{2\omega\sin(\omega\pi)}{1-\omega^2}$

ג. $\frac{\pi}{2}\sin(1)$ ד. $\frac{\pi^2}{2}$

**2)** א. $-\frac{2i\omega}{\pi\left(1+\omega^2\right)^2}$ ב. $h(y)=-e^{-|y|}$ , $-h(y)=e^{-|y|}$

**3)** $$g(x)=\begin{cases}\frac{1}{2\pi}\left(\frac{(A+x)^3}{3}-\frac{(A+x)^2}{2}x\right) & -A<x<0\\ \frac{1}{2\pi}\left(\frac{A^3}{3}-\frac{A^2}{2}x+\frac{x^3}{6}\right) & 0<x<A\\ 0 & else\end{cases}$$

**4)** א. הוכחה. ב. $e^{-\frac{\omega^2}{2}}$ ג. $\sqrt{2\pi}\cdot e^{-\frac{x^2}{2}}$

**5)** א. $\frac{4\cdot\sin(2\omega)-2\cdot\sin(\omega)}{\pi\omega}$ ב. $\frac{5\pi}{2}$ ג. $\frac{3\pi}{2}$

**6)** א. $2\frac{\sin(\pi\omega)-\pi\omega\cos(\pi\omega)}{\pi^3\omega^3}$ ב. $\frac{1}{15}$ ו- $\frac{1}{4}\left(1-\frac{1}{\pi^2}\right)$

**7)** הוכחה.

**8)** $g(t)=f(t)+f'(t)$

**9)** $$f(x)=\begin{cases}\frac{\pi}{2}e^{x}(1-x) & x<0\\ \frac{\pi}{2}e^{-x}(1+x) & x>0\end{cases}$$

**10)** $f(x)=\frac{1}{\pi}\frac{b}{a}\frac{(a-b)x}{\left(x^2+(a-b)^2\right)^2}$

**11)** $f(x)=4\cdot\frac{\sin^2\left(\frac{\pi x}{2}\right)}{x^2}$

**12)** $\frac{\pi}{a+b}=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\omega}{a^2+\omega^2}\frac{\omega}{b^2+\omega^2}d\omega$

**13)** $f(\omega)=\frac{1}{e^4}\cdot e^{i\omega}\cdot\frac{1}{2\sqrt{\pi}}e^{-\frac{\omega^2}{4}}$

**14)** הוכחה.

**15)** הוכחה.

**16)** הוכחה.

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 13 - מיון משוואות דיפרנציאליות חלקיות מסדר שני

### תוכן העניינים

1. מיון משוואות דיפרנציאליות חלקיות מסדר שני ..... (ללא ספר)

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 14 - בעיות שטורם ליוביל

### תוכן העניינים

1. בעיות שטורם ליוביל ..... 144
2. טורי קוסינוסים וסינוסים ..... (ללא ספר)

# בעיות שטורם-ליוביל

## שאלות

**1)** הביאו כל אחת מהמשוואות הבאות לתבנית
$\left(p(x)y'(x)\right)'+\left(\lambda r(x)-q(x)\right)y(x)=0$.

א. $y''-2xy'+\lambda y=0$ (משוואת הרמיט)

ב. $x^2y''+xy'+(x^2-\lambda)y=0$ (משוואת בסל)

**2)** הראו שהבעיה הבאה היא בעיית שטורם-ליוביל רגולרית:

$$\begin{cases} e^{2x}y''+e^{2x}y'+\lambda y=0 \ , \ 0<x<1 \\ y(0)+4y'(0)=0 \\ y'(1)=0 \end{cases}$$

**3)** הראו שהבעיה הבאה היא בעיית שטורם-ליוביל רגולרית:

$$\begin{cases} (x+2)y''+4y'+xy+\lambda e^x y=0 \ , \ 0<x<1 \\ y(0)=0 \\ y'(1)=0 \end{cases}$$

פתרו את בעיות שטורם-ליוביל בשאלות **4-7**:

(עבור כל בעיה יש למצוא ערכים עצמיים ופונקציות עצמיות)

**4)** $\begin{cases} y''+\lambda y=0, & 0<x<1 \\ y'(0)=0 \\ y'(1)=0 \end{cases}$

**5)** $\begin{cases} y''+\lambda y=0, & 0<x<\pi \\ y(0)-y'(0)=0 \\ y(\pi)-y'(\pi)=0 \end{cases}$

**6)** $\begin{cases} y''+\lambda y=0, & 0<x<1 \\ y(0)=0 \\ y(1)+y'(1)=0 \end{cases}$

**7)** $\begin{cases} y''+\lambda y=0, & 0<x<1 \\ y(0)+y'(0)=0 \\ y(1)=0 \end{cases}$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

**8)** נתונה הבעיה הבאה: $\begin{cases} y''-2y'+(1+\lambda)y=0, & 0<x<1 \\ y(0)=0 \\ y(1)=0 \end{cases}$.

א. הוכיחו שהבעיה היא בעיית שטורם-ליוביל רגולרית.

ב. פתרו את הבעיה.

**9)** פתרו את בעיית שטורם-ליוביל הבאה:

א. $\begin{cases} y''+\lambda y=0 \ , \ 0<x<\ell \\ y(0)=0 \\ y'(\ell)=0 \end{cases}$.

ב. נציב $\ell=1$ בבעיה מסעיף א', ונקבל: $\begin{cases} y''+\lambda y=0 \ , \ 0<x<1 \\ y(0)=0 \\ y'(1)=0 \end{cases}$.

1. פתחו את הפונקציה $f(x)=1 \ , \ 0\le x\le 1$ לטור פונקציות עצמיות של בעיית שטורם-ליוביל זו.
התחל את הטור מ-$n=1$.
2. מה סכום הטור ב-$x=0$?
האם הוא שווה לערך הפונקציה ב-$x=0$?

ג. נציב $\ell=2$ בבעיה מסעיף א', ונקבל: $\begin{cases} y''+\lambda y=0 \ , \ 0<x<2 \\ y(0)=0 \\ y'(2)=0 \end{cases}$.

פתחו את הפונקציה $f(x)=x \ , \ 0\le x\le 2$ לטור פונקציות עצמיות של בעיית שטורם-ליוביל זו.

**10)** פתרו את בעיית שטורם-ליוביל הבאה:

א. $\begin{cases} y''+\lambda y=0 \ , \ 0<x<\pi \\ y'(0)=0 \\ y(\pi)=0 \end{cases}$.

ב. פתחו את הפונקציה $f(x)=e^x, 0\le x\le \pi$ לטור פונקציות עצמיות של הבעיה מסעיף א.
התחילו את הטור מ-$n=1$.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

**11)** נתונה הבעיה: $\begin{cases} x^2y''+xy'+\lambda y=0 \ , \ 0<x<e \\ y(1)=0 \\ y'(e)=0 \end{cases}$.

א. הוכיחו שהבעיה הנתונה היא אכן בעיית שטורם-ליוביל רגולרית.

ב. מצאו את הערכים עצמיים והפונקציות העצמיות של הבעיה.

ג. הראו שהפונקציות העצמיות אורתוגונליות ביחס לפונקציית המשקל של הבעיה.

ד. פתחו את $f(x)=\begin{cases} 1 & 1\le x\le \sqrt{e} \\ 0 & \sqrt{e}\le x\le e \end{cases}$ , לטור פונקציות עצמיות.

הראו שסכום הטור וערך הפונקציה עבור $x=1$ שונים.

ה. חשבו את סכום הטור מסעיף ד', עבור $x=2$ , $x=1.5$ , $x=\sqrt{e}$.

**זהויות שכדאי להכיר:**

$$\sin\left((2n+1)\frac{\pi}{2}\right)=\cos(\pi n)=(-1)^n$$

$$\sin\left((2n+1)\frac{\pi}{2}\right)=\sin(\pi n)=0$$

$$n=0,1,2,\ldots$$


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

## תשובות סופיות

**1)** א. $\left(e^{-x^2}y'\right)'+\left(\lambda e^{-x^2}-0\right)y=0$ ב. $\left(xy'\right)'+\left(\lambda\left(-\frac{1}{x}\right)-\left(-x\right)\right)y=0$

**2)** שאלת הוכחה.

**3)** שאלת הוכחה.

**4)** פונקציות עצמיות: $\varphi_n(x)=\cos(n\pi x),\ n=1,2,3,\ldots$,

ערכים עצמיים: $\lambda_n=(\omega_n)^2=(n\pi)^2\quad n=1,2,3,\ldots$.

**5)** פונקציות עצמיות: $\phi_n(x)=n\cos nx+\sin nx\qquad n=1,2,3,\ldots$,

ערכים עצמיים: $\lambda_n=n^2,\quad n=1,2,3,\ldots$; בנוסף, $\lambda=-1$ הוא ע"ע של הבעיה,

המתאים לפונקציה העצמית $\varphi(x)=e^x$.

**6)** פונקציות עצמיות: $\varphi_n(x)=\sin(\omega_n x),\ n=1,2,3,\ldots$,

ערכים עצמיים: $\lambda_n=(\omega_n)^2\qquad n=1,2,3,\ldots$.

**7)** פונקציות עצמיות: $y_n(x)=\sin(\omega_n x)-\omega_n\cos(\omega_n x)\qquad n=1,2,3,\ldots$,

ערכים עצמיים: $\lambda_n=(\omega_n)^2\qquad n=1,2,3,\ldots$.

בנוסף, $\lambda_0=0$ הוא ע"ע של הבעיה, המתאים לפונקציה העצמית $\varphi(x)=x-1$.

**8)** א. שאלת הוכחה. ב. פונקציות עצמיות: $\varphi_n(x)=e^x\sin n\pi x,\qquad n=1,2,3,\ldots$.

ערכים עצמיים: $\lambda_n=(\omega_n)^2=(n\pi)^2\qquad n=1,2,3,\ldots$.

**9)** א. פונקציות עצמיות: $\varphi_n(x)\sin\left(\left(2n+1\right)\frac{\pi}{2l}x\right)\qquad n=0,1,2,\ldots$.

ערכים עצמיים: $\lambda_n=(\omega_n)^2=\left(\left(2n+1\right)\frac{\pi}{2l}\right)^2\qquad n=0,1,2,\ldots$.

ב. סכום הטור ב-$x=0$ הוא 0, והוא אינו שווה לערך הפונקציה ב-$x=0$.

ג. $f(x)=\sum_{n=0}^{\infty}C_n\varphi_n x=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{16(-1)^n}{\pi^2\left(2n+1\right)^2}\sin\left(\left(2n+1\right)\frac{\pi}{4}x\right)$, כאשר $(0<x<2)$.

**10)** א. פונקציות עצמיות: $\varphi_n(x)=\cos\frac{2n+1}{2}x\qquad n=0,1,2,\ldots$.

ערכים עצמיים: $\lambda_n=(\omega_n)^2=\left(\frac{2n+1}{2}\right)^2\qquad n=0,1,2,\ldots$.

ב. $e^x=\frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{\pi}\left(n-\frac{1}{2}\right)(-1)^{n+1}-1}{1^2+\left(n-\frac{1}{2}\right)^2}\cos\left(\left(n-\frac{1}{2}\right)x\right)$, כאשר $0<x<\pi$.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

**11)** א. שאלת הוכחה.

ב. פונקציות עצמיות: $n=0,1,2,\ldots$ $\varphi_n(x)=\sin\left(\left(\frac{1}{2}+n\right)\pi\ln x\right)$.

ערכים עצמיים: $n=0,1,2,\ldots$ $\lambda_n=\pi^2\left(\frac{1}{2}+n\right)^2$.

ג. שאלת הוכחה.

ד. $f(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2-2\cos\left(\left(\frac{1}{2}+n\right)\frac{\pi}{2}\right)}{\left(\frac{1}{2}+n\right)\pi}\sin\left(\left(\frac{\pi}{2}+\pi n\right)\ln x\right)$

ה. סכום הטור ב- $x=\sqrt{e}$ הוא $\frac{1}{2}$; ב- $x=1.5$ הוא 1; וב- $x=2$ הוא 0.


לפתרון מלא בסרטוני וידאו היכנסו לאתר www.GooL.co.il
כתב ופתר – גיא סלומון ©

# אנליזה מתקדמת פורייה לפלאס

## פרק 15 - מרחבי מכפלה פנימית ומרחבים נורמיים

### תוכן העניינים

1. מרחבי מכפלה פנימית ומרחבים נורמיים ..... 149
2. התכנסויות של פונקציות במרחביים נורמיים ..... 151
3. מערכות אורתונורמליות ..... 155
4. מערכת אורתונורמלית סגורה ..... 159

# מרחבי מכפלה פנימית ומרחבים נורמיים:

## שאלות:

**1)** יהי $V$ מרחב כל הפונקציות הרציפות בקטע $[a,b]$.

הוכיחו כי $\|f\|=\int_a^b|f(x)|dx$ מהווה נורמה במרחב זה.

**2)** יהי $V$ מרחב כל הפונקציות הרציפות בקטע $[a,b]$.

הוכיחו כי $\|f\|=\max_{[a,b]}|f(x)|$ מהווה נורמה במרחב זה.

**3)** יהי $V=R_{\le 2}[x]$ המרחב הוקטורי של כל הפולינומים ממעלה קטנה / שווה מ-2 מעל הממשיים.

לכל שני פולינומים $p(x),q(x)$ ב- $V$ נגדיר:

$\langle p(x),q(x)\rangle=p(-1)q(-1)+p(0)q(0)+p(1)q(1)$.

הוכיחו כי $\langle\cdot,\cdot\rangle$ הינה מכפלה פנימית.

**4)** נגדיר את המרחב $V=C^1[-1,1]$ (מרחב הפונקציות הגזירות ברציפות בקטע $[-1,1]$).

נגדיר: $\langle f(x),g(x)\rangle=\int_{-1}^{1}f(x)\overline{g(x)}dx+\int_{-1}^{1}f'(x)\overline{g'(x)}dx$.

הוכיחו כי $\langle\cdot,\cdot\rangle$ הינה מכפלה פנימית.

**5)** הוכיחו כי בכל מרחב מכפלה פנימית $E$ מתקיים לכל $f,g\in E$:

א. $\langle u,f+g\rangle=\langle u,f\rangle+\langle u,g\rangle$ $\forall u\in E$.

ב. $\mathrm{Re}\langle f,g\rangle=\frac{1}{4}\left(\|f+g\|^2-\|f-g\|^2\right)$.

ג. $\mathrm{Im}\langle f,g\rangle=\frac{1}{4}\left(\|f+ig\|^2-\|f-ig\|^2\right)$.

ד. $\|f+g\|^2+\|f-g\|^2=2\left\{\|f\|^2+\|g\|^2\right\}$ (שוויון המקבילית).

**6)** יהי $V$ מרחב מכפלה פנימית.

נסמן $w=u+v$ וקטורים במרחב.

הוכיחו כי אם $\langle u,v\rangle=0$ אזי $\|w\|^2=\|u\|^2+\|v\|^2$.

**7)** נגדיר את המרחב $V$ להיות מרחב הפונקציות $f(x)$ הממשיות הגזירות ברציפות פעמיים בקטע $[a,b]$ (כלומר $f''(x)$ רציפה ב-$[a,b]$).

בדקו האם $\langle f,g\rangle=\int_a^b f''(x)g''(x)dx$ מהווה מכפלה פנימית במרחב זה.

**8)** נגדיר את המרחב $V$ להיות מרחב של פונקציות $f(x)$ ממשיות וגזירות ברציפות בקטע $[-1,1]$ (כלומר הנגזרת $f'(x)$ רציפה בקטע $[-1,1]$) כך ש- $f(-1)=0$.

נגדיר $\langle f,g\rangle=\int_{-1}^{1} f'(x)g'(x)dx$.

הוכיחו כי $\langle f,g\rangle$ מהווה מכפלה פנימית במרחב $V$.

**9)** יהי $V$ מרחב הפונקציות הרציפות המרוכבות בקטע $[a,b]$.

הוכיחו כי $\|f\|=\int_a^b|f(x)|dx+\max_{[a,b]}|f(x)|$ מהווה נורמה במרחב $V$.

## תשובות סופיות:

**1)** הוכחה.
**2)** הוכחה.
**3)** הוכחה.
**4)** הוכחה.
**5)** הוכחה.
**6)** הוכחה.
**7)** $f(x)=1$
**8)** הוכחה.
**9)** הוכחה.

# התכנסויות במרחבים נורמיים:

## שאלות:

**1)** הוכיחו:

א. הוכיחו כי לכל $f\in C[a,b]$ מתקיים $\left|\int_a^x f(t)\,dt\right|\le\sqrt{x-a}\cdot\|f\|_{L_2[a,b]}$.

תזכורות: $\|f\|_{L_2[a,b]}=\sqrt{\int_a^b|f(t)|^2\,dt}$ ו- $\langle f,g\rangle_{L_2[a,b]}=\int_a^b f(t)\overline{g(t)}dt$.

ב. הוכיחו כי אם $f_n\to f$ בנורמה $\|\cdot\|_{L_2[a,b]}$ במרחב $C[a,b]$

אזי גם $f_n\to f$ בנורמה $\|\cdot\|_{L_1[a,b]}$.

תזכורת: $\|f\|_{L_1[a,b]}=\int_a^b|f(t)|dt$.

ג. האם ההיפך נכון? אם כן, הוכיחו. אם לא, תנו דוגמה נגדית.

**2)** יהי $V$ מרחב נורמי.

א. הוכיחו כי לכל $u,v\in V$ מתקיים $\|u-v\|\ge\big|\|u\|-\|v\|\big|$ (אי שיוויון המשולש ההפוך).

ב. הוכיחו כי אם $f_n\xrightarrow{n\to\infty}f$ בנורמה של $V$ אזי $\|f_n\|\xrightarrow{n\to\infty}\|f\|$.

**3)** נתונה סדרת הפונקציות הבאה:

$$f_n(x)=\begin{cases}n\sqrt{n}\cdot x & 0\le x\le\frac{1}{n}\\ 2\sqrt{n}-n\sqrt{n}\cdot x & \frac{1}{n}<x<\frac{2}{n}\\ 0 & \frac{2}{n}\le x\end{cases}$$

א. האם $f_n(x)$ מתכנסת נקודתית ב-$[0,10]$?

ב. האם $f_n(x)$ מתכנסת במידה שווה ב-$[0,10]$?

ג. האם $f_n(x)$ מתכנסת ב-$L^1[0,10]$?

ד. האם $f_n(x)$ מתכנסת ב-$L^2[0,10]$?

**4)** נתונה סדרת פונקציות $f_n(x)=n(1-x)x^n$ .

א. האם $f_n(x)$ מתכנסת נקודתית ב-$[0,1]$? אם כן, מצאו את הפונקציה הגבולית.

ב. האם $f_n(x)$ מתכנסת במידה שווה ב-$[0,1]$?

ג. האם $f_n(x)$ מתכנסת בנורמת $L^1[0,1]$?

ד. האם $f_n(x)$ מתכנסת בנורמת $L^2[0,1]$?

**5)** נתונה $f_n(x)=\begin{cases}1 & x\in\left[n,n+\frac{1}{n}\right] \\ 0 & else\end{cases}$

א. האם $f_n(x)$ מתכנסת נקודתית על הישר הממשי?

ב. האם $f_n(x)$ מתכנסת במידה שווה על הישר הממשי?

ג. האם $f_n(x)$ מתכנסת בנורמת $L^1(-\infty,\infty)$?

ד. האם $f_n(x)$ מתכנסת בנורמת $L^2(-\infty,\infty)$?

**6)** יהי $V$ מרחב וקטורי של פונקציות רציפות בקטע $[a,b]$ וגזירות שם למעט מספר סופי של נקודות, כאשר הנגזרת רציפה למקוטעין עם מכפלה פנימית $\langle f,g\rangle=f(a)g(a)+\int_a^b f'(x)g'(x)dx$.

א. לכל $x_0\in[a,b]$ נגדיר את הפונקציה $g_{x_0}(x)=\begin{cases}x-a+1 & a\le x\le x_0 \\ x_0-a+1 & x_0\le x\le b\end{cases}$

הוכיחו כי לכל $f\in V$ מתקיים $\langle f(x),g_{x_0}(x)\rangle=f(x_0)$.

ב. הוכיחו כי לכל $f\in V$ ולכל $x_0\in[a,b]$ מתקיים $|f(x_0)|\le\sqrt{b-a+1}\cdot\|f\|$.

ג. נניח כי $f_n(x)\in V$ סדרת פונקציות המתכנסת בנורמת $V$ אל $f\in V$ .
הוכיחו כי ההתכנסות היא במידה שווה.

**7)** נגדיר את סדרת הפונקציות $f_n(x)=\left[1-\chi_n(x)\right]\left(x+\frac{1}{n}\right)^{-1}+n^{\alpha}\cdot\chi_n(x)$

כאשר $\chi_n(x)=\begin{cases}1 & x\in\left(n-\frac{1}{n^2},n+\frac{1}{n^2}\right)\\ 0 & else\end{cases}$.

א. מהם ערכי הפרמטר $\alpha$ עבורם סדרת הפונקציות $f_n(x)$ מתכנסת נקודתית ב-$[1,\infty)$?

אם הסדרה מתכנסת נקודתית, מהי הפונקציה הגבולית?

ב. מהם ערכי הפרמטר $\alpha$ עבורם סדרת הפונקציות $f_n(x)$ מתכנסת במידה שווה ב-$[1,\infty)$?

ג. מהם ערכי הפרמטר $\alpha$ עבורם סדרת הפונקציות $f_n(x)$ בנורמת $L^1[1,\infty)$?

**8)** נגדיר את סדרת הפונקציות $f_n(x)=\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{k^2}\cdot\chi_{\left[2^k,2^k+k\right]}(x)$

כאשר $\chi_{[a,b]}(x)=\begin{cases}1 & x\in[a,b]\\ 0 & else\end{cases}$.

א. האם סדרת הפונקציות $f_n(x)$ מתכנסת בנורמת $L^1(-\infty,\infty)$?

ב. האם סדרת הפונקציות $f_n(x)$ מתכנסת בנורמת $L^2(-\infty,\infty)$?

**9)** נגדיר את סדרת הפונקציות הבאה במרחב $L^2[-\pi,\pi]$ : $f_n(x)=\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{\sqrt{k}}\sin(kx)$.

א. האם סדרת הפונקציות $f_n(x)$ מתכנסת בנורמת $L^2[-\pi,\pi]$ לפונקציה כלשהי?

ב. האם סדרת הפונקציות $f_n(x)$ מתכנסת במידה שווה בקטע $[-\pi,\pi]$?

נגדיר $h_n(x)=\int_0^x f_n(t)\,dt$.

ג. האם $h_n(x)$ מתכנסת במידה שווה בקטע $[-\pi,\pi]$?

ד. האם $h_n(x)$ מתכנסת בנורמת $L^2[-\pi,\pi]$?

## תשובות סופיות:

**1)** הוכחה.

**2)** הוכחה.

**3)** א. $f(x)=0$ ב. $\sup_{[0,10]}|f_n(x)|\geq\sqrt{n}\xrightarrow{n\to\infty}\infty$

ג. $\frac{1}{2\sqrt{n}}\xrightarrow{n\to\infty}0$ ד. $\frac{2}{\sqrt{3}}\not\xrightarrow{n\to\infty}0$

**4)** א. $f(x)=0$ ב. $\left(\frac{n}{n+1}\right)\frac{1}{\left(1+\frac{1}{n}\right)^n}\xrightarrow{n\to\infty}\frac{1}{e}$

ג. $\frac{n}{(n+1)(n+2)}\xrightarrow{n\to\infty}0$ ד. $\frac{2n^2}{(2n+1)(2n+2)(2n+3)}\xrightarrow{n\to\infty}0$

**5)** א. $f(x)=0$ ב. $1\xrightarrow{n\to\infty}1$

ג. $\frac{1}{n}\xrightarrow{n\to\infty}0$ ד. $\frac{1}{n}\xrightarrow{n\to\infty}0$

**6)** הוכחה.

**7)** א. לכל ערך של $\alpha$ ממשי יש התכנסות נקודתית ב-$[1,\infty)$ והפונקציה הגבולית הינה $\frac{1}{x}$.

ב. $\max\left\{n^{\alpha}-\frac{1}{n+\frac{1}{n^2}}\ ,\ \frac{1}{n+1}\right\}$

ג. אין התכנסות בנורמה כיוון שסדרת הפונקציות כלל אינה שייכת למרחב הנורמי.

**8)** א. לא, סדרת הנורמות שואפת לאינסוף.

ב. $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k^3}<\infty$

**9)** א. לא, סדרת הנורמות שואפת לאינסוף.

ב. לא, כי אם הייתה התכנסות במידה שווה אז הייתה התכנסות בנורמת $L^2[-\pi,\pi]$ (בקטע הקומפקטי).

ג. $\sup_{[-\pi,\pi]}\left|\sum_{k=n+1}^{\infty}\frac{1-\cos(kx)}{k^{1.5}}\right|\leq\sum_{k=n+1}^{\infty}\frac{2}{k^{1.5}}\xrightarrow{n\to\infty}0$

ד. כן, כי התכנסות במידה שווה (בקטע סופי) גוררת התכנסות בנורמת $L^2[-\pi,\pi]$ (בקטע סופי).

# מערכות אורתונורמליות:

## שאלות:

**1)** נתבונן במערכת $\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ כאשר $\varphi_n(x)=\cos(nx)$ במרחב $L^2[-\pi,\pi]$ עם המכפלה הפנימית $\langle f,g\rangle=\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\overline{g(x)}dx$.

הוכיחו כי המערכת $\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ הינה מערכת אורתונורמלית.

**2)** נתבונן במערכת $\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ כאשר $\varphi_n(x)=\sin(nx)$ במרחב $L^2[0,\pi]$ עם המכפלה הפנימית $\langle f,g\rangle=\frac{2}{\pi}\int_{0}^{\pi} f(x)\overline{g(x)}dx$.

הוכיחו כי המערכת $\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ הינה מערכת אורתונורמלית .

**3)** יהי מרחב מכפלה פנימית $V$ ותהי $\{\varphi_n(x)\}_{n=0}^{\infty}$ מערכת של פולינומים כך ש-$\varphi_n(x)$ הינו פולינום ממעלה $n$.

נניח כי לכל $n,m$ טבעיים כך ש- $m<n$ מתקיים $\langle\varphi_n(x),x^m\rangle=0$.

הוכיחו כי המערכת $\{\varphi_n(x)\}_{n=0}^{\infty}$ אורתוגונלית במרחב זה.

**4)** יהי $V$ מרחב כל הפונקציות הרציפות למקוטעין בקטע $\left[e^{-\pi},e^{\pi}\right]$ עם המכפלה הפנימית $\langle f,g\rangle=\int_{e^{-\pi}}^{e^{\pi}} f(x)\overline{g(x)}\frac{1}{x}dx$ נגדיר $\varphi_n(x)=\sin\left(n\ln(x)\right)$ .

הוכיחו כי המערכת $\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ אורתוגונלית במרחב זה.

**5)** נניח כי המערכת $\{\varphi_n(x)\}_{n=0}^{\infty}$ הינה מערכת אורתונורמלית סגורה במרחב $L^2[a,b]$ עם המכפלה הפנימית $\langle f,g\rangle_1=\int_a^b f(x)\overline{g(x)}dx$. יהיו $c>0$ ו- $d$ ממשי כלשהוא.

הוכיחו כי המערכת $\{\psi_n(x)\}_{n=0}^{\infty}$ כאשר $\psi_n(x)=\sqrt{c}\cdot\varphi_n(c\cdot x+d)$ הינה מערכת אורתונורמלית סגורה במרחב $L^2\left[\frac{a-d}{c},\frac{b-d}{c}\right]$ עם המכפלה הפנימית $\langle f,g\rangle_2=\int_{\frac{a-d}{c}}^{\frac{b-d}{c}} f(x)\overline{g(x)}dx$.

**6)** יהי $V$ מרחב מכפלה פנימית ותהי $\{e_n\}_{n=1}^{N}$ מערכת אורתונורמלית סופית.

הוכיחו כי לכל $v\in V$ מתקיים $\left\|\sum_{n=1}^{N}\langle v,e_n\rangle e_n\right\|^2=\sum_{n=1}^{N}\left|\langle v,e_n\rangle\right|^2$.

**מערכת פולינומי צ'בישב:**

**7)** יהי $K$ מרחב כל הפונקציות המרוכבות הרציפות למקוטעין על הקטע $(-1,1)$

ונגדיר ב- $K$ מכפלה פנימית: $\langle f,g\rangle=\int_{-1}^{1} f(x)\overline{g(x)}\cdot\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}dx$.

הוכיחו כי אוסף הפונקציות $\{T_n(x)\}_{n=0}^{\infty}$ כאשר $T_n(x)=\cos\left[n\cdot\arccos(x)\right]$ (הנקראת גם פולינומי צ'בישב) הינה מערכת אורתוגונלית ב- $K$ ומצאו קבועים $\alpha_n$ כך שהמערכת $\{\alpha_n T_n(x)\}_{n=0}^{\infty}$ היא מערכת אורתונורמלית.

**מערכת פולינומי הרמיט:**

**8)** יהי $K$ מרחב כל הפונקציות המרוכבות המוגדרות על הישר הממשי שהן רציפות למקוטעין ומקיימות את התנאי $\int_{-\infty}^{\infty}\left|f(x)\right|^2\cdot e^{-x^2}dx<\infty$.

נגדיר על $K$ מכפלה פנימית $\langle f,g\rangle=\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\overline{g(x)}\cdot e^{-x^2}dx$.

הוכיחו כי פולינומי הרמיט, המוגדרים על ידי הנוסחה $H_n(x)=(-1)^n e^{x^2}\frac{d^n}{dx^n}\left[e^{-x^2}\right]$ (נוסחת רודריגז) מהווים מערכת אורתוגונלית במרחב $K$ ומצאו להם קבועי נרמול.

רמז: הראו תחילה כי מספיק להוכיח כי לכל $n,k$ טבעיים כך ש- $k<n$ מתקיים $\langle H_n, x^k\rangle = 0$. ניתן להיעזר בעובדה כי $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2}dx = \sqrt{\pi}$.

**מערכת פולינומי לג'נדר:**

**9)** יהי $K$ מרחב כל הפונקציות המרוכבות הרציפות למקוטעין על הקטע $(-1,1)$ ונגדיר ב- $K$ מכפלה פנימית: $\langle f,g\rangle = \int_{-1}^{1} f(x)\overline{g(x)}dx$.

הוכיחו כי פולינומי לג'נדר, הנתונים על ידי נוסחת רודריגז $P_n(x) = \frac{1}{2^n n!}\frac{d^n}{dx^n}\left[\left(x^2-1\right)^n\right]$ מהווים מערכת אורתוגונלית ב- $K$ וכי $\langle P_n, P_n\rangle = \frac{2}{2n+1}$ לכל $n$ טבעי.

רמז: הראו תחילה כי מספיק להוכיח שלכל $n,k$ טבעיים כך ש- $k<n$ מתקיים $\langle P_n, x^k\rangle = 0$.

**מערכת פולינומי לגר:**

**10)** יהי $K$ מרחב כל הפונקציות המרוכבות המוגדרות על הישר הממשי שהן רציפות למקוטעין ומקיימות את התנאי $\int_0^{\infty} |f(x)|^2 \cdot e^{-x}dx < \infty$.

נגדיר על $K$ מכפלה פנימית $\langle f,g\rangle = \int_0^{\infty} f(x)\overline{g(x)}e^{-x}dx$.

הוכיחו כי פולינומי לגר, המוגדרים על ידי הנוסחה $L_n(x) = \frac{1}{n!}e^x\frac{d^n}{dx^n}\left[x^n e^{-x}\right]$ (נוסחת רודריגז) מהווים מערכת אורתונורמלית במרחב $K$.

רמז: הראו תחילה כי מספיק להוכיח שלכל $n,k$ טבעיים כך ש- $k<n$ מתקיים $\langle L_n, x^k\rangle = 0$.

ניתן להיעזר בנוסחה $\int_0^{\infty} x^n e^{-x}dx = n!$.

## תשובות סופיות:

1) הוכחה.
2) הוכחה.
3) הוכחה.
4) הוכחה.
5) הוכחה.
6) הוכחה.
7) מערכת פולינומי צ'בישב: הוכחה.
8) מערכת פולינומי הרמיט: הוכחה.
9) מערכת פולינומי לג'נדר: הוכחה.
10) מערכת פולינומי לגר: הוכחה.

# מערכת אורתונורמלית סגורה:

## שאלות:

**1)** יהי $V$ מרחב מכפלה פנימית ותהי $\{e_n\}_{n=1}^{\infty}$ מערכת אורתונורמלית אינסופית.

א. האם קיים $v\in V$ כך ש- $\langle u,e_n\rangle=\frac{1}{\sqrt{n}}$?

ב. נניח כי $\{e_n\}_{n=1}^{\infty}$ היא מערכת אורתונורמלית סגורה.

יהיו $u,v\in V$ כך ש- $\langle u,e_n\rangle=\frac{1}{n}$ ו- $\langle v,e_n\rangle=\frac{1}{n+1}$. חשבו את $\langle u,v\rangle$.

**2)** יהי $V$ מרחב מכפלה פנימית ותהי $\{e_n\}_{n=1}^{\infty}$ מערכת אורתונורמלית אינסופית.

א. יהי $u\in V$ כך ש- $\langle u,e_n\rangle=\frac{1}{\sqrt{n(n+2)}}$.

מצאו את הקירובים המיטביים $u_1,u_2,u_3$ ל- $u$ בתת המרחבים $W_1=span\{e_1\}$ , $W_2=span\{e_1,e_2\}$ , $W_3=span\{e_1,e_2,e_3\}$ בהתאמה.

ב. נניח כי $\{e_n\}_{n=1}^{\infty}$ היא מערכת אורתונורמלית סגורה.

חשבו $\|u-u_1\|$, $\|u-u_2\|$, $\|u-u_3\|$ כאשר $u_1,u_2,u_3$ הם הקירובים המיטביים מהסעיף הקודם.

**3)** יהי $V$ מרחב מכפלה פנימית ותהי $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ מערכת אורתונורמלית סגורה ב- $V$.

נגדיר $g_{2n}(x)=\frac{1}{\sqrt{2}}[f_{2n-1}-f_{2n}]$ , $g_{2n-1}(x)=\frac{1}{\sqrt{2}}[f_{2n-1}+f_{2n}]$.

א. הוכיחו כי המערכת $\{g_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ הינה מערכת אורתונורמלית ב- $V$.

ב. הוכיחו כי המערכת $\{g_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ הינה מערכת אורתונורמלית סגורה ב- $V$.

## תשובות סופיות:

**1)** א. $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}=\sum_{n=1}^{\infty}|\langle u,e_n\rangle|^2\le\|u\|^2<\infty$ ב. $\langle u,v\rangle=1$

**2)** א. $u_1=\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot e_1$ , $u_2=\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot e_1+\frac{1}{\sqrt{8}}\cdot e_2$ , $u_3=\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot e_1+\frac{1}{\sqrt{8}}\cdot e_2+\frac{1}{\sqrt{15}}\cdot e_3$

ב. $\|u-u_1\|=\sqrt{\frac{5}{12}}$ , $\|u-u_2\|=\sqrt{\frac{7}{24}}$ , $\|u-u_3\|=\sqrt{\frac{9}{40}}$

**3)** א. הוכחה. ב. הוכחה.