

# חדוא 1

פרק 29 - אינטגרביליות, המשפטים היסודיים ומשפטי ערך הביניים  
לאינטגרלים (הפרק באנגלית)

תוכן העניינים

1. אינטגרביליות..... 1
2. המשפט היסודי של החדוא, משפט ערך הביניים לאינטגרלים וסכומי רימן..... 10
3. נפח שטח מעטפת ומשפט פאפוס..... 15

## אינטגרליות

### שאלות

- (1) תהי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  פונקציה חסומה.  
נניח שקיימת חלוקה  $P$  של  $[a, b]$ , כך ש- $L(P, f) = U(P, f)$ .  
הוכח ש- $f$  פונקציה קבועה.
- (2) בכל אחד מהמקרים הבאים, הערך את האינטגרל העליון והתחתון של  $f$ ,  
הראה ש- $f$  אינטגרלית ומצא את האינטגרל של  $f$ .  
א. לכל  $\alpha \in \mathbb{R}$ , נגדיר  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ , על ידי  $f(x) = \alpha$  לכל  $x \in [a, b]$ .  
ב. כאשר  $f(x) = 0$ ,  $0 \leq x < \frac{1}{2}$ ,  $f\left(\frac{1}{2}\right) = 10$  ו- $f(x) = 1$  כאשר  $\frac{1}{2} < x \leq 1$ .  
ג.  $f(x) = x$  לכל  $x \in [0, 1]$ .
- (3) תהי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  חסומה ותהי  $(P_n)$  חלוקה,  
כך ש- $U(P_n, f) - L(P_n, f) \rightarrow 0$ .  
א. הראה ש- $f$  אינטגרלית.  
ב. הוכח כי:  $\lim_{n \rightarrow \infty} U(P_n, f) = \lim_{n \rightarrow \infty} L(P_n, f) = \int_a^b f(x) dx$ .
- (4) בכל אחד מהמקרים הבאים, הראה ש- $f$  אינטגרלית בעזרת קריטריון רימן:  
א.  $f(x) = x$  ב- $[0, 1]$ .  
ב.  $f(x) = x^2$  ב- $[0, 1]$ .  
ג.  $f(x) = \frac{1}{x}$  ב- $[1, 2]$ .
- (5) יהיו  $f, f_1, f_2$  פונקציות חסומות ב- $[0, 1]$ , כך ש- $f_1(x) \leq f(x) \leq f_2(x)$  לכל  $x \in [0, 1]$ .  
הנח כי  $f_1$  ו- $f_2$  אינטגרליות וכן  $\int_0^1 f_1(x) dx = \int_0^1 f_2(x) dx = I$ .  
הראה כי  $f$  אינטגרלית ומצא את  $\int_0^1 f(x) dx$ .

(6) תהי פונקציה  $f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ , כך ש- $f(x) = x$  לכל  $x$  רציונלי, ו- $f(x) = 0$  לכל  $x$  אי-רציונלי. הערך את האינטגרל העליון והתחתון של  $f$ , והראה כי  $f$  אינה אינטגרלית.

(7) תהי  $f: [0,1] \rightarrow [0,1]$ , מוגדרת באופן הבא:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{q} & \text{אם } x = \frac{p}{q} \neq 1, \text{ כאשר } p, q \in \mathbb{N}, \text{ ול-} p, q \text{ אין גורמים משותפים} \\ 0 & \text{אם } x \text{ אי-רציונלי או } x=0 \text{ או } x=1 \end{cases}$$

א. תהי  $A_N$  מוגדרת באופן הבא, לכל  $N \in \mathbb{N}$ :  $A_N = \left\{ x \in (0,1) \mid x = \frac{p}{q} \right\}$

כאשר  $p, q \in \mathbb{N}$ ,  $q \leq N$  ול- $p, q$  אין גורמים משותפים. הראה שהקבוצה  $A_N$  סופית.

ב. ל- $N \in \mathbb{N}$  ו- $\varepsilon > 0$ , נתונים, הראה כי קיימים קטעים

$$: \text{כך ש } [x_1, x_2], [x_3, x_4], \dots, [x_{2m-1}, x_{2m}]$$

$$, 0 < x_1 < x_2 < x_3 < x_4 < \dots < x_{2m-1} < x_{2m} < 1$$

$$, A_N \subseteq (x_1, x_2) \cup (x_3, x_4) \cup \dots \cup (x_{2m-1}, x_{2m})$$

$$\cdot |x_1 - x_2| + |x_3 - x_4| + \dots + |x_{2m-1} - x_{2m}| \leq \frac{\varepsilon}{2}$$

ג. הראה ש- $f$  אינטגרלית.

ד. מצא שתי פונקציות אינטגרליות,  $g$  ו- $h$  ב- $[0,1]$ ,

כך שההרכבה  $g \circ h$  אינה אינטגרלית.

(8) תהי  $f: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}$  אינטגרלית וכן  $[c,d] \subseteq [a,b]$ .

הראה ש- $f$  אינטגרלית ב- $[c,d]$ .

(9) ענה על הסעיפים הבאים:

א. תהי  $f$  חסומה ב- $[c,d]$ , ונתון:

$$M = \sup \{ f(x) \mid x \in [c,d] \}, \quad M' = \sup \{ |f(x)| \mid x \in [c,d] \}$$

$$m = \inf \{ f(x) \mid x \in [c,d] \}, \quad m' = \inf \{ |f(x)| \mid x \in [c,d] \}$$

הוכח כי  $M' - m' \leq M - m$ .

ב. תהי  $f: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}$  אינטגרלית.

הוכח כי  $|f|$  ו- $f^2$  אינטגרליות.

**(10)** מצא דוגמה לפונקציה  $f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ , כך שמתקיים:

א.  $|f|$  אינטגרבילית, אבל  $f$  אינה אינטגרבילית.

ב.  $f^2$  אינטגרבילית, אבל  $f$  אינה אינטגרבילית.

**(11)** תהינה  $f$  ו- $g$  שתי פונקציות אינטגרביליות ב- $[a,b]$ .

א. הוכח כי אם  $f(x) \leq g(x)$  לכל  $x \in [a,b]$ , אז  $\int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b g(x) dx$ .

ב. הוכח כי  $\left| \int_a^b f(x) dx \right| \leq \int_a^b |f(x)| dx$ .

ג. הוכח כי אם  $m \leq f(x) \leq M$  לכל  $x \in [a,b]$ ,

אז  $m(b-a) \leq \int_a^b f(x) dx \leq M(b-a)$ .

היעזר באי-שוויון זה כדי להראות ש- $\frac{\sqrt{2}}{6} \leq \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{3}} \frac{\sin x}{x} dx \leq \frac{\sqrt{3}}{8}$ .

**(12)** תהי  $f: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$  (כלומר,  $f(x) \geq 0$ ).

א. הוכח כי אם  $f$  רציפה וכן  $\int_a^b f(x) dx = 0$ , אז  $f(x) = 0$  לכל  $x \in [a,b]$ .

ב. הבא דוגמה לפונקציה  $f$ , אינטגרבילית ב- $[a,b]$ , כאשר  $\int_a^b f(x) dx = 0$ ,

אבל קיים  $x_0 \in [a,b]$ , עבורו  $f(x_0) > 0$ .

הערה:  $f$  לא תהיה רציפה.

**(13)** תהי  $f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$  פונקציה חסומה.

נניח שלכל  $c \in (0,1)$ , הפונקציה  $f$  אינטגרבילית ב- $[c,1]$ .

א. הוכח כי  $f$  אינטגרבילית ב- $[0,1]$ .

ב. היעזר בסעיף א', והוכח כי  $f(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ \sin \frac{1}{x} & x \in (0,1] \end{cases}$  אינטגרבילית ב- $[0,1]$ .

**(14)** תהי  $f: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}$  פונקציה חסומה.

נניח שכאשר המכפלה  $fg$  אינטגרבילית ב- $[a,b]$ , עבור פונקציה אינטגרבילית

כלשהי  $g$ , מתקיים  $\int_a^b (fg)(x) dx = 0$ .

הוכח כי  $f(x) \equiv 0$  (כלומר,  $f(x) = 0$  לכל  $x \in [a,b]$ ).

**15** ענה על הסעיפים הבאים :

א. יהיו  $x, y \geq 0$ .

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x^n + y^n)^{\frac{1}{n}} = \max\{x, y\} \text{ הוכח כי}$$

ב. תהי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$  רציפה.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \int_a^b (f(x))^n dx \right)^{\frac{1}{n}} = \sup\{f(x) \mid x \in [a, b]\} \text{ הוכח כי}$$

**16** [אי-שוויון קושי-שוורץ]

א. יהיו  $x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n \in \mathbb{R}$ .

$$\left| \sum_{i=1}^n x_i y_i \right| \leq \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{ הוכח כי}$$

$$\text{רמז: } \sum_{i=1}^n (tx_i + y_i)^2 \geq 0 \text{ לכל } t \in \mathbb{R}$$

ב. תהיינה  $f, g$  שתי פונקציות אינטגרליות ב- $[a, b]$ .

$$\left| \int_a^b f(x) g(x) dx \right| \leq \left( \int_a^b (f(x))^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \left( \int_a^b (g(x))^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \text{ הוכח כי}$$

$$\text{רמז: } \int_a^b [tf(x) + g(x)]^2 dx \geq 0 \text{ לכל } t \in \mathbb{R}$$

**17** תהי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  פונקציה אינטגרלית.

משנים את הערכים של  $f$  במספר סופי של נקודות.

הוכח שהפונקציה שמתקבלת אינטגרלית.

## 18 סעיף א'

$$1. \text{ הוכח כי } b^n - a^n = (b-a)(b^{n-1} + b^{n-2}a + b^{n-3}a^2 + \dots + b^{n-2}a^{n-2} + a^{n-1})$$

כאשר  $n \in \mathbb{Z}^+$  וכן  $a, b \in \mathbb{R}$ .

$$2. \text{ הוכח כי } k^n < \frac{(k+1)^{n+1} - k^{n+1}}{n+1} < (k+1)^n \text{ כאשר } k, n \in \mathbb{Z}^+$$

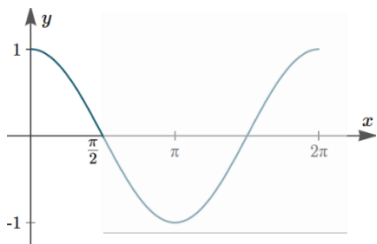
$$3. \text{ הוכח כי } \sum_{k=1}^{m-1} k^n < \frac{m^{n+1}}{n+1} < \sum_{k=1}^m k^n$$

$$\text{כלומר, } 1^n + 2^n + \dots + (m-1)^n < \frac{m^{n+1}}{n+1} < 1^n + 2^n + \dots + (m-1)^n + m^n$$

## סעיף ב'

תהי  $f(x) = x^n$  מוגדרת בתחום  $[0, 1]$ , כאשר  $n \in \mathbb{N}$ .

בעזרת סכומי רימן, הוכח כי  $f$  אינטגרלית ב- $[0, 1]$ , וחשב  $\int_0^1 f(x) dx$ .  
רמז: חלק את הקטע  $[0, 1]$  ל- $m$  קטעים שווים והיעזר בסעיף א' להערכת הסכומים העליונים והתחתונים.



19 תהי  $f(x) = \cos x$  מוגדרת ב- $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ , כאשר  $n \in \mathbb{N}$ .

השתמש בסכומי רימן והוכח ש- $f$  אינטגרלית

ב- $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ , וחשב את  $\int_0^{\pi/2} f(x) dx$ .

רמז 1: חלק את  $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$  ל- $n$  קטעים שווים, והנח כי  $n \rightarrow \infty$ .

רמז 2: השתמש בזהות הטריגונומטרית הבאה, כאשר  $k \in \mathbb{Z}^+$  ו- $\theta \in \mathbb{R}$ ,

$$\sin \frac{\theta}{2} \cos k\theta = \frac{1}{2} \left[ \sin \frac{(2k+1)\theta}{2} - \sin \frac{(2k-1)\theta}{2} \right]$$

$$\sin \frac{\theta}{2} \sum_{k=1}^n \cos k\theta = \frac{1}{2} \left[ \sin \frac{(2n+1)\theta}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \right]$$

20 חשב את  $\int_1^2 f(x) dx$ , בעזרת החלוקה  $P_n = \left\{ x_0, x_1, \dots, x_n \right\}$  כאשר  $x_0 = 1$  ו- $x_n = 2$ .

כאשר  $x_i = 2^{\frac{i}{n}}$  ( $0 \leq i \leq n$ ) וגם:

$$P_4 = \left\{ 1, 2^{\frac{1}{4}}, 2^{\frac{2}{4}}, 2^{\frac{3}{4}}, 2 \right\} \quad \text{א. } f(x) = \frac{1}{x^2} \quad \text{ב. } f(x) = \frac{1}{x}$$

(21) תהיינה  $f, g$  שתי פונקציות אינטגרליות בקטע  $[a, b]$ . הוכח:

א. אם  $f(x) \leq g(x)$  לכל  $x \in [a, b]$ , אז  $\int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b g(x) dx$ .

ב. אם  $m \leq f(x) \leq M$  לכל  $x \in [a, b]$ , אז  $m(b-a) \leq \int_a^b f(x) dx \leq M(b-a)$ .

(22) כזכור, משפט ערך הביניים לאינטגרלים טוען כי:

אם  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה, אז קיים  $c \in (a, b)$ , כך ש-  $\int_a^b f(x) dx = f(c)(b-a)$ .  
הוכח שהמשפט נכשל, אם נחליף את המילה 'רציפה' במילה 'אינטגרלית'.

(23) נניח כי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  אינטגרלית אי-שלילית.

הוכח כי  $\sqrt{f}$  אף היא אינטגרלית ב- $[a, b]$ .

(24) נתונה הפונקציה  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ . הוכח או הפרך:

א. אם  $f$  אינטגרלית, אי-שלילית ולא שווה זהותית לאפס,

אז  $\int_a^b f(x) dx > 0$ .

ב. אם  $f$  רציפה, אי-שלילית ולא שווה זהותית לאפס, אז  $\int_a^b f(x) dx > 0$ .

ג. אם  $f$  אינטגרלית, אז כך גם  $f^2$ .

ד. אם  $|f|$  אינטגרלית, אז כך גם  $f$ .

(25) חשב את  $\int_{0.25}^{4.3} \lfloor x \rfloor dx$ , כאשר  $\lfloor x \rfloor = \max\{n \in \mathbb{Z} \mid n \leq x\}$  (פונקציית הערך השלם).

(26) הוכח כי אם  $f$  אינטגרלית ב- $[a, b]$  ו- $\alpha \in \mathbb{R}$ , אז  $\alpha f$  אינטגרלית ב- $[a, b]$ ,

וכן  $\int_a^b \alpha f(x) dx = \alpha \int_a^b f(x) dx$ .

רמז: הנח תחילה כי  $\alpha \geq 0$ , והיעזר בפונקציה  $-f$ , ל- $\alpha < 0$ .

(27) הוכח כי אם  $f, g$  אינטגרליות ב- $[a, b]$ , אז כך גם  $f + g$ ,

ובנוסף מתקיים  $\int_a^b (f + g) = \int_a^b f + \int_a^b g$ .

רמז: הוכח כי  $\int_a^b (f + g) \leq \int_a^b f + \int_a^b g$  וכן  $\int_a^b (f + g) \geq \int_a^b f + \int_a^b g$ .

**(28)** נניח כי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  אינטגרלית וכן שקיים  $c > 0$ , כך ש- $|f(x)| \geq c$  לכל

$x \in [a, b]$ . [לחלופין:  $f$  אינטגרלית ואינה אפס;  $\frac{1}{f}$  חסומה]

הוכח כי גם  $g = \frac{1}{f}$  אינטגרלית בקטע  $[a, b]$ .

**(29)** נניח כי  $f, g$  אינטגרליות ב- $[a, b]$ .

א. הוכח כי גם  $f \cdot g$  אינטגרלית ב- $[a, b]$ .

ב. הוכח כי אם  $|g(x)| \geq c > 0$  לכל  $x \in [a, b]$ ,

אז גם  $\frac{f}{g}$  אינטגרלית ב- $[a, b]$ .

**(30)** הנח כי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  וכן ש- $a < c < b$ , והוכח כי:

א. אם  $f$  אינטגרלית ב- $[a, b]$ , אז היא אינטגרלית גם ב- $[a, c]$  ו- $[c, b]$ .

ב. אם  $f$  אינטגרלית ב- $[a, c]$  ו- $[c, b]$ , אז היא אינטגרלית גם ב- $[a, b]$ .

ג. באיזה מהמקרים, בסעיפים א' ו-ב', מתקיים השוויון:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx$$

**(31)** נניח כי  $f, g$  אינטגרליות ב- $[a, b]$ .

נגדיר  $\varphi = \max\{f, g\}$  וכן  $\psi = \min\{f, g\}$ .

הוכח כי גם  $\varphi, \psi$  אינטגרליות ב- $[a, b]$ .

רמז:  $\max\{a, b\} = \frac{1}{2}[a + b + |a - b|]$ ,  $\min\{a, b\} = ?$

**(32)** תהי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  פונקציה חסומה.

בהינתן החלוקה  $P = \{x_0, \dots, x_n\}$  של  $[a, b]$  וכן  $\varepsilon > 0$ ,

נגדיר שתי תתי-קבוצות,  $A_\varepsilon(P)$  ו- $B_\varepsilon(P)$  של  $\{1, \dots, n\}$ , באופן הבא:

$i \in A_\varepsilon(P)$  אם  $M_i - m_i < \varepsilon$ , ו- $i \in B_\varepsilon(P)$  אם  $M_i - m_i \geq \varepsilon$ .

כמו כן, נגדיר  $s_\varepsilon(P) = \sum_{i \in B_\varepsilon(P)} \Delta x_i$ .

הוכח כי פונקציה חסומה  $f$  אינטגרלית ב- $[a, b]$  אם ורק אם

לכל  $\varepsilon > 0$  ולכל  $\tau > 0$  קיים  $\delta > 0$ , כך שלכל  $P$  כנ"ל  $\|P\| < \delta \Rightarrow s_\varepsilon(P) < \tau$ .

**33** נניח כי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  חסומה ותהי  $P = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$  חלוקה של  $[a, b]$ .

א. האם תמיד נוכל לבחור תגיות  $C = \{c_1, \dots, c_n\}$  ל- $P$ ,

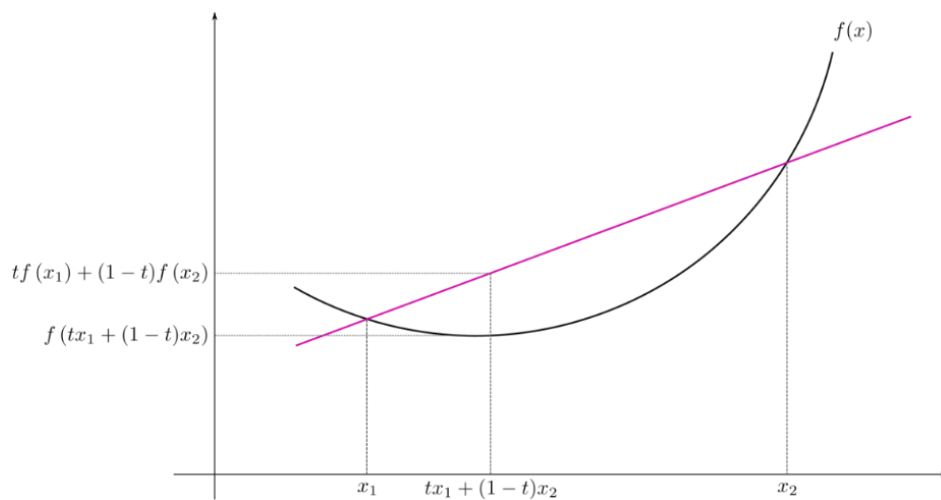
כך ש- $S(f; P, C) = L(f, P)$  ? נמק.

הערה: ב"תגיות" הכוונה ש- $x_{i-1} < c_i < x_i$ .

ב. האם תשובתך תשתנה אם יינתן גם כי  $f$  רציפה?

**34** זכור כי פונקציה  $f$  על קטע  $I$  תיקרא קמורה, אם לכל  $a, b \in I$ , ולכל  $t \in [0, 1]$ ,

$$f(t \cdot a + (1-t) \cdot b) \leq t \cdot f(a) + (1-t) \cdot f(b)$$



א. תהי  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  קמורה.

הוכח כי לכל  $t_1, \dots, t_n \in [0, 1]$  המקיימים  $\sum_{i=1}^n t_i = 1$ , מתקיים אי-השוויון

$$f\left(\sum_{i=1}^n t_i a_i\right) \leq \sum_{i=1}^n t_i f(a_i)$$

ב. (אי-שוויון ינסון)

תהי  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  קמורה ורציפה, ותהי  $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה.

$$f\left(\int_0^1 g(x) dx\right) \leq \int_0^1 f(g(x)) dx$$

**35** תהי  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה ותהי  $F(x) = \int_0^x f(t) dt$ .

א. הוכח כי  $f$  אי-זוגית אם ורק אם  $F$  זוגית.

ב. הוכח כי  $f$  זוגית אם ורק אם  $F$  אי-זוגית.

(36) תהי  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה ותהי  $F(x) = \int_0^x f(t) dt$ .

א. הוכח כי אם  $F$  מחזורית, אז גם  $f$  מחזורית.

ב. מצא דוגמה שבה  $f$  מחזורית אבל  $F$  לא-מחזורית.

(37) תהי  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה, תהי  $F(x) = \int_0^x f(t) dt$  ויהי  $p \in \mathbb{R}, p \neq 0$ .

הוכח ששני התנאים הבאים שקולים:

1.  $f(x+p) = f(x) \quad \forall x \in \mathbb{R}$ .

2. קיים  $c \in \mathbb{R}$ , כך ש-  $\int_x^{x+p} f(t) dt = c \quad \forall x \in \mathbb{R}$ .

(38) תהי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  אינטגרלית.

הוכח שקיים  $c \in [a, b]$ , כך ש-  $\int_a^c f(x) dx = \int_c^b f(x) dx$ .

(39) תהי  $A$  קבוצת כל הפונקציות  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , שהן אינטגרליות בכל  $[a, b]$ ,

ומקיימות את השוויון הבא לכל  $x \in \mathbb{R}$ :  $\int_0^x f(t) dt = f(x) - 1$ .

א. מצא דוגמה לפונקציה ב- $A$ .

ב. הוכח כי אם  $f \in A$ , אז  $f$  גזירה ב- $\mathbb{R}$ .

(רמז: תחילה הראה ש- $f$  רציפה).

ג. מצא את כל הפונקציות  $f$  ב- $A$ .

(40) א. נגדיר פונקציה  $f: (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  באופן הבא:  $f(x) = \int_0^x \frac{dt}{1+t^2} + \int_0^{\frac{1}{x}} \frac{dt}{1+t^2}$ .

הוכח כי  $f$  פונקציה קבועה, ומצא את  $C \in \mathbb{R}$ , כך ש-  $f(x) \equiv C$ .

תוכל להשתמש ב:  $\int_0^x \frac{dt}{1+t^2} = \arctan x$ .

ב. נגדיר  $g: \left(0, \frac{\pi}{2}\right) \rightarrow \mathbb{R}$ , על ידי  $g(x) = \int_{-\cos x}^{\sin x} \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}}$ .

הוכח ש- $g$  פונקציה קבועה.

## המשפט היסודי של החדו"א, משפט ערך הביניים לאינטגרלים וסכומי רימן

### שאלות

(1) ענה על הסעיפים הבאים:

- א. הראה כי כל פונקציה רציפה בקטע סגור וחסום היא נגזרת.  
ב. הראה כי פונקציה אינטגרלית בקטע סגור וחסום אינה בהכרח נגזרת.

(2) תהי  $f: [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$  מוגדרת כך:  $f(x) = \begin{cases} 0 & -1 \leq x < 0 \\ 1 & 0 \leq x \leq 1 \end{cases}$ ,

ונגדיר את  $F(x) = \int_{-1}^x f(t) dt$  עבור  $-1 \leq x \leq 1$ .

שרטט את הגרפים של  $f$  ו- $F$ , בהינתן:

א.  $f$  אינה רציפה (ב-0), אבל  $F$  רציפה.

ב.  $F$  אינה גזירה ב-0.

ג. תן דוגמה לפונקציה  $f: [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ , כך ש- $f$  אינה רציפה ב-0,

אבל  $F(x) = \int_{-1}^x f(t) dt$  גזירה ב-0.

(3) תהי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  אינטגרלית.

הוכח כי  $\int_a^b f(t) dt = \lim_{x \rightarrow b^-} \int_a^x f(t) dt$ .

(4) הוכח את 'משפט ערך הביניים השני לאינטגרלים', בהנחה שהפונקציות רציפות (ולא אינטגרליות):

תהי  $f$  רציפה ב- $[a, b]$ .

אם קיימת פונקציה גזירה  $F$  ב- $[a, b]$ , כך ש- $F' = f$ ,

אז  $\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$ .

$$(5) \text{ נגדיר } f: [-1,1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ באופן הבא: } f(x) = \begin{cases} 2x \sin \frac{1}{x^2} - \frac{2}{x} \cos \frac{1}{x^2} & x \neq 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases}$$

$$\text{ונגדיר } F: [-1,1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ כך: } F(x) = \begin{cases} x^2 \sin \frac{1}{x^2} & x \neq 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases}$$

הוכח כי  $F' = f$ , אבל האינטגרל  $\int_{-1}^1 f(t) dt$  לא קיים.

$$(6) \text{ תהי } f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ רציפה, כך ש-} \int_0^x f(t) dt = |f(x)| \text{ לכל } x \in [0,1].$$

הוכח כי  $f(x) = 0$  לכל  $x \in [0,1]$ .

$$(7) \text{ תהי } f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \text{ רציפה. נגדיר } g(x) = \int_0^x (x-t) f(t) dt \text{ לכל } x \in \mathbb{R}.$$

הוכח כי  $g'' = f$ .

$$(8) \text{ תהי } f \text{ רציפה ב-} \mathbb{R} \text{ ויהי } \alpha \neq 0.$$

$$\text{נגדיר } g(x) = \frac{1}{\alpha} \int_0^x f(t) \sin[\alpha(x-t)] dt.$$

הראה כי  $f(x) = g''(x) + \alpha^2 g(x)$ .

$$(9) \text{ תהי } f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ גזירה ב-} [0,1].$$

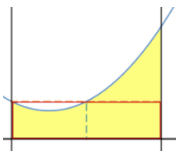
$$\text{הראה כי קיים } c \in (0,1) \text{ כך ש-} \int_0^1 f(x) dx = f(0) + \frac{1}{2} f'(c).$$

$$(10) \text{ תהי } f: [0,1] \rightarrow \mathbb{R} \text{ רציפה ונניח כי } \int_0^1 f(x) dx = 1.$$

$$\text{הראה כי קיים } c \in (0,1) \text{ כך ש-} f(c) = 3c^2.$$

$$(11) \text{ תהי } f: \left[0, \frac{\pi}{4}\right] \rightarrow \mathbb{R} \text{ רציפה.}$$

$$\text{הראה כי קיים } c \in \left[0, \frac{\pi}{4}\right] \text{ כך ש-} 2 \cos 2c \int_0^{\frac{\pi}{4}} f(t) dt = f(c).$$



**(12)** תהי  $f: [0, a] \rightarrow \mathbb{R}$  פונקציה, כך ש-  $f''(x) > 0$  לכל  $x \in [0, a]$ .

$$\text{הוכח כי } \int_0^a f(x) dx > af\left(\frac{a}{2}\right).$$

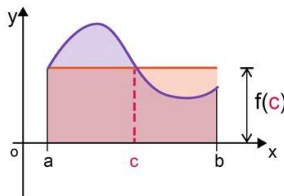
**(13)** תהי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה, ונניח כי  $\int_a^x f(t) dt = \int_x^b f(t) dt$  לכל  $x \in [a, b]$ .

$$\text{הוכח כי } f(x) = 0 \text{ לכל } x \in [a, b].$$

**(14)** תהיינה  $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  אינטגרליות, ונניח כי  $f$  עולה ו- $g$  אי-שלילית.

$$\text{הוכח כי קיים } c \in [a, b]$$

$$\text{כך ש- } \int_a^b f(x)g(x)dx = f(b)\int_a^c g(x)dx + f(a)\int_c^b g(x)dx.$$



משפט ערך הביניים הראשון לאינטגרלים

אם  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה, אז קיים  $c \in (a, b)$ ,

$$\text{כך ש- } \int_a^b f(x)dx = f(c)(b-a).$$

משפט ערך הביניים של לגראנז'

אם  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה, וכן גזירה ב- $(a, b)$ , אז קיים  $c \in (a, b)$ ,

$$\text{כך ש- } f(b) - f(a) = f'(c)(b-a).$$

**(15)** ענה על הסעיפים הבאים:

א. בהנחה שמשפט ערך הביניים של לגראנז' מתקיים,

הוכח את משפט ערך הביניים הראשון לאינטגרלים.

ב. בהנחה שמשפט ערך הביניים הראשון לאינטגרלים מתקיים, הוכח את

משפט ערך הביניים של לגראנז' לפונקציות עם נגזרת ראשונה רציפה.

**(16)** השתמש במשפט ערך הביניים הראשון לאינטגרלים,

$$\text{והוכח כי } \int_n^{n+1} \frac{1}{x} dx < \frac{1}{n} \text{ לכל } n \in \mathbb{N}.$$

**(17)** תהיינה  $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  רציפות, ונתון כי  $\int_a^b f(x)dx = \int_a^b g(x)dx$ .

$$\text{הוכח כי קיים } c \in [a, b] \text{ כך ש- } f(c) = g(c).$$

משפט ערך הביניים השני לאינטגרלים

תהי  $f$  רציפה ו- $g$  אינטגרלית ב- $[a, b]$ .אם  $g(x) \geq 0$  (או  $g(x) \leq 0$ ) ב- $[a, b]$ , אז קיים  $c \in [a, b]$  כך ש-

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = f(c) \int_a^b g(x)dx$$

$$(18) \text{ הוכח כי } \frac{\pi^2}{9} \leq \int_{\pi/6}^{\pi/2} \frac{x}{\sin x} dx \leq \frac{2\pi^2}{9}$$

(19) תהי  $f: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^1 x^n f(x) dx = 0 \text{ הוכח כי}$$

(20) תהי  $f: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^1 f(x^n) dx = f(0) \text{ הוכח כי}$$

(21) תהי  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה.

$$\lim_{\|P\| \rightarrow 0} S(P, f) = \int_a^b f(x) dx \text{ הוכח כי}$$

$$\text{סימונים: } P = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \text{ , } x_0 = a, x_n = b, S(P, f) = \sum_{i=1}^n f(c_i) \Delta x_i, \Delta x_i = x_i - x_{i-1}, \\ \|P\| = \max_{1 \leq i \leq n} \{\Delta x_i\}, c_i \in [x_{i-1}, x_i]$$

$$(22) \text{ תהי } a_n = \ln \left( \frac{(n!)^{\frac{1}{n}}}{n} \right) \text{ לכל } n \in \mathbb{N}$$

המר את  $a_n$  לסכום רימן ומצא את  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ .(23) תהיינה  $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  כך ש- $f'$  ו- $g'$  רציפות ב- $[a, b]$ .

$$\int_a^b f(x)g'(x)dx = [f(x)g(x)]_a^b - \int_a^b f'(x)g(x)dx \text{ הוכח כי}$$

(24) תהי  $\phi: [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}$  גזירה ברציפות, ותהי  $f$  רציפה בטווח של  $\phi$ .

$$\int_{\alpha}^{\beta} f(\phi(t))\phi'(t)dt = \int_{\phi(\alpha)}^{\phi(\beta)} f(x)dx \text{ הוכח כי}$$

**25** תהי  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  רציפה ויהיו  $u, v : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  גזירות.

הוכח כי אם הטווחים של  $u$  ו- $v$  מוכלים ב- $[a, b]$ ,

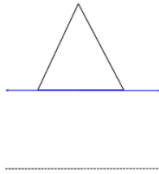
$$\text{אז } \frac{d}{dx} \int_{u(x)}^{v(x)} f(t) dt = f(v(x)) \frac{dv}{dx} - f(u(x)) \frac{du}{dx}$$

**26** נגדיר את  $f : [1, \infty)$  באופן הבא :  $f(x) = \int_1^x \frac{\ln t}{1+t} dt$ .

$$\text{פתור את השוויון } f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right) = 2$$

## נפח שטח מעטפת ומשפט פאפוס

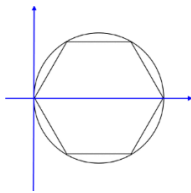
### שאלות



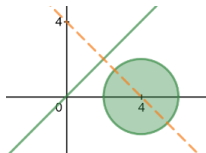
- (1) נתון משולש שווה צלעות עם בסיס המתלכד עם ציר ה- $x$ .  
אורך צלע המשולש  $a$ .  
השתמש במשפט פאפוס על מנת לחשב את נפח הגוף,  
הנוצר על ידי סיבוב המשולש סביב הישר  $y = -a$ .



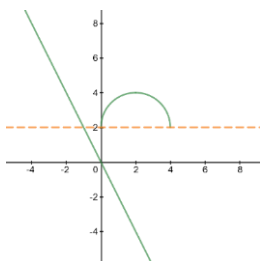
- (2) השתמש במשפט פאפוס ומצא את מרכז הכובד של התחום  
 $D = \{(x, y) \mid x^2 + y^2 = 4, x \geq 0 \text{ and } y \geq 0\}$   
רמז: נפח כדור בעל רדיוס  $r$ , הוא  $\frac{4}{3}\pi r^3$ .



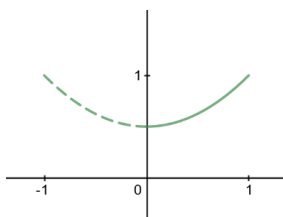
- (3) נתון משושה החסום במעגל  $(x-2)^2 + y^2 = 1$ .  
המשושה מסתובב סביב ציר ה- $y$ .  
מצא את שטח הפנים של השטח שנוצר,  
ואת נפח הגוף שנוצר.



- (4) הדיסק המעגלי  $(x-4)^2 + y^2 \leq 4$  מסתובב סביב הציר  $y = x$ .  
מצא את נפח הגוף שנוצר.



- (5) נתבונן בקשת המעגלית  $(x-2)^2 + (y-2)^2 = 4, y \geq 2$ .  
הקשת מסתובבת סביב הציר  $y + 2x = 0$ .  
מצא את שטח הפנים של הגוף שנוצר.



- (6) יהיו  $(\bar{x}, \bar{y})$  מרכז העקום  $y = \frac{1}{2}(x^2 + 1), 0 \leq x \leq 1$ .  
מצא את  $\bar{x}$  בעזרת משפט פאפוס.