פתרון ממ"ן 11 – חשבון אינפיניטסימלי 2 (20475)

15 ביולי 2023

שאלה 1

סעיף א'

נוכיח כי

$$\frac{2}{3\pi} \leq \int_{2\pi}^{3\pi} \frac{\sin x}{x} dx \leq \frac{1}{\pi}$$

הוכחה. תחילה נגדיר

$$f(x) = \frac{\sin x}{x}$$

זוהי כמובן פונקציה רציפה ולכן אינטגרבילית. נגדיר גם $g(x) = \frac{x^2}{2\pi}$ ונראה כי מתקיים $g(x) \geq f(x)$ לכל $x \geq 2\pi$. ממשפט 1.26 נובע כי

$$\int_{2\pi}^{3\pi} f(x)dx \leq \int_{2\pi}^{3\pi} g(x)dx = \frac{x}{\pi}\Big|_{2\pi}^{3\pi} = \frac{1}{\pi}$$

נגדיר גם

$$h(x) = \frac{\sin x}{3\pi}$$

כמובן שבתחום האינטגרל המונה של f ו־h זהים, אך $x \leq 3\pi$ בתחום, ולכן גם $h(x) \leq f(x)$ לכל התחום, ומתקיים

$$\int_{2\pi}^{3\pi} f(x)dx \geq \int_{2\pi}^{3\pi} h(x)dx = \frac{-\cos x}{3\pi}\Big|_{2\pi}^{3\pi} = \frac{2}{3\pi}$$

אז מצאנו כי

$$\frac{2}{3\pi} \leq \int_{2\pi}^{3\pi} \frac{\sin x}{x} dx \leq \frac{1}{\pi}$$

מש"ל

סעיף ב'

תהי $f(x)$ פונקציה רציפה בקטע $[0, 2]$. לכל $n \in \mathbb{N}$ נגדיר

$$a_n = \int_{1/n}^{2/n} f(x)dx$$

נוכיח כי $\lim_{n\to\infty} na_n = f(0)$

הוכחה. נגדיר $F(x)$ הפונקציה הקדומה של $f(x)$, לכן על־פי הנוסחה היסודית של החשבון האינפיניטסמלי מתקיים

$$\int_{1/n}^{2/n} f(x)dx = a_n = F(2/n) - F(1/n)$$

מהגדרת הגבול לפי היינה ועל־פי משפט הרכבת פונקציות בגבול מאינפי 1 נקבל עבור הרכבת הפונקציה $g(t) = \frac{1}{t}$

$$\begin{aligned}
\lim_{n\to\infty} na_n &= \lim_{t\to 0} \frac{F(2t) - F(t)}{t} \\
&= \lim_{t\to 0} \frac{F(2t) - F(2\cdot 0) - F(t) + F(0)}{t} \\
&= \lim_{t\to 0} 2\frac{F(2t) - F(2\cdot 0)}{2t} - \lim_{t\to 0} \frac{F(t) - F(0)}{t} \\
&= 2f(0) - f(0)
\end{aligned}$$

$$\lim_{n\to\infty} na_n = f(0)$$

מש"ל

סעיף ג'

נגדיר

$$f(x) = \int_x^{x+1} \sqrt{\arctan t}\, dt$$

נוכיח כי $f(x) < \sqrt{\arctan(x+1)}$ לכל $x \geq 0$.

הוכחה. ידוע כי $g(x) = \sqrt{\arctan x}$ היא פונקציה עולה וחסומה, לכן $g(x) < g(x+1)$
להסביר למה המשיק לפונקציה g תמיד מעל הפונקציה עצמה.

נשים לב כי x ערך קבוע באינטגרל

$$\begin{aligned}
\int_x^{x+1} g(t)\, dt &\leq \int_x^{x+1} g'(x+1)(t-x-1) + g(x+1)\, dt \\
&= g'(x+1)\frac{t^2}{2} - g'(x+1)(x+1)t + g(x+1)t\Big|_x^{x+1} \\
&= g'(x+1)(2x+1)/2 - g'(x+1)(x+1) + g(x+1) \\
&= \frac{-g'(x+1)}{2} + g(x+1) \\
&< g(x+1)
\end{aligned}$$

מצאנו כי $f(x) < g(x+1)$. **מש"ל**

שאלה 2

נחשב את

$$\lim_{x\to\infty} \frac{\int_0^{\sqrt{x}} t^2 \arctan(e^t)dt}{\sqrt{x^3}}$$

אנו יודעים כי $\arctan t$ היא פונקציה עולה וחסומה, ואנו יודעים כי $\lim_{t\to\infty} \arctan t = \frac{\pi}{2}$, לכן לכמעט כל x מתקיים $\frac{\alpha\pi}{2} < \arctan t$ כאשר $0 < \alpha < 1$.

אז לכמעט כל x מתקיים גם $\frac{\alpha\pi}{2}t^2 \leq t^2 \arctan(e^t) \leq \frac{\pi}{2}t^2$ וממשפט 1.26 נובע

$$\int_0^{\sqrt{x}} \frac{\alpha\pi}{2}t^2 dt \leq \int_0^{\sqrt{x}} t^2 \arctan(e^t)dt \leq \int_0^{\sqrt{x}} \frac{\pi}{2}t^2 dt$$

ידוע כי $(t^3/3)' = t^2$ ולכן מהמשפט היסודי של החשבון האינפיניטסמלי נובע

$$\frac{\alpha\pi}{2}\sqrt{x^3} \leq \int_0^{\sqrt{x}} t^2 \arctan(e^t)dt \leq \frac{\pi}{2}\sqrt{x^3}$$

עתה נבחין כי ערך α המקסימלי תלוי ב־x, ובשל הגדרתו כאשר $x \to \infty$ מתקיים גם $\alpha \to 1$.

לכן ממשפט הסנדוויץ' לגבולות נובע כי

$$\lim_{x\to\infty} \frac{\frac{\alpha\pi}{2}\sqrt{x^3}}{\sqrt{x^3}} = \lim_{x\to\infty} \frac{\int_0^{\sqrt{x}} t^2 \arctan(e^t)dt}{\sqrt{x^3}} = \lim_{x\to\infty} \frac{\frac{\pi}{2}\sqrt{x^3}}{\sqrt{x^3}} = \frac{\pi}{2}$$

שאלה 3

תהי $f(x)$ פונקציה אינטגרבילית בכל קטע סגור חלקי ל־$\mathbb{R}$, ולכל $x \in \mathbb{R}$ מתקיים

$$f(x) = \int_0^x f(t)dt$$

נוכיח כי $f \equiv 0$ ב־$\mathbb{R}$.

הוכחה. ידוע כי f אינטגרבילית בכל קטע סגור ב־$\mathbb{R}$ ולכן בכל קטע כזה נוכל להגדיר בעזרת המשפט היסודי כי $f(x) = F'(x)$ כאשר F פונקציה קדומה של f. ידוע כי $f(x) = F(x) - F(0)$. נשים לב כי $f(0) = F(0) - F(0) = 0$.

נגזור את הביטוי ונקבל כי $f(x) = f'(x)$, דהינו f גזירה אינסוף פעמים וכל נגזרותיה שוות 0 ב־0.

לכן בכל סביבת 0 מתקיים $f(x) = 0$, ובשל כך עבור כל x מתקיים $f(x) = 0$. **מש"ל**

שאלה 4

נגדיר

$$f(x)=\begin{cases}\lfloor\cos\pi x\rfloor & 0\le 0\le 1\\ |x-2| & x>1\end{cases}$$

סעיף א'

נוכיח כי f אינטגרבילית בקטע $[0,3]$ אך אין לה פונקציה קדומה בקטע זה.

הוכחה. נשים לב כי בשל הגדרתה מתקיים

$$f(x)=\begin{cases}1 & x=0\\ 0 & 0<x\le\frac{1}{2}\\ -1 & \frac{1}{2}<x\le 1\\ 2-x & 1<x<2\\ x-2 & 2\le x\le 3\end{cases}$$

אז על־פי הגדרה 1.15 הפונקציה f מונוטונית למקוטעין בקטע $(0,3]$ ולכן ממשפט 1.17 נובע כי היא אינטגרבילית בקטע זה.
מלמה 1.25 עבור הפונקציה $f(x)$ והפונקציה המוגדרת על־ידי

$$g(x)=\begin{cases}0 & x=0\\ f(x) & x>0\end{cases}$$

נובע כי $f(x)$ אינטגרבילית בקטע הסגור $[0,3]$.
נניח בשלילה כי קיימת פונקציה קדומה $F(x)$ ל־$f(x)$, ממשפט 8.12 באינפי 1 נובע כי כלל נקודות אי־הרציפות של f הן ממין שני.
נבחין כי $x=1$ היא נקודת אי־רציפות ב־$f(x)$ ממין ראשון, בסתירה לטענה, ולכן לא קיימת פונקציה F כזו. **מש"ל**

סעיף ב'

ידוע כי בתחום $[0,\frac{1}{2}]$ מתקיים

$$F(x)=\int_0^x f(x)dx=\int_0^x g(x)dx=\int_0^x 0dx=0\Big|_0^x=0$$

בתחום $(\frac{1}{2},1]$ מתקיים $f(x)=-1$ ולכן

$$F(x)=\int_0^x f(x)dx=\int_0^{\frac{1}{2}} f(x)dx+\int_{\frac{1}{2}}^x -1dx=-x\Big|_{\frac{1}{2}}^x=-x+\frac{1}{2}$$

בתחום $(1,2)$ מתקיים $f(x)=2-x$ ובהתאם

$$F(x)=\int_0^x f(x)dx=F(1)+\int_1^x(2-x)dx=2x-\frac{x^2}{2}\Big|_1^x+F(1)=-\frac{x^2}{2}+2x-2$$

בתחום $[2,3]$ ידוע כי $f(x)=x-2$ ולכן

$$F(x)=\int_0^x f(x)dx=F(2)+\int_2^x(x-2)dx=\frac{x^2}{2}-2x\Big|_2^x+F(2)=\frac{x^2}{2}-2x+4$$

שאלה 5

סעיף א'

נוכיח כי אם f,g פונקציות לא יורדות ואי־שליליות בקטע $[a,b]$ אז fg אינטגרבילית ב־$[a,b]$.

הוכחה. לכל $x,y\in[a,b]$ מתקיים $0<f(x)\le f(y)$ וגם $0<g(x)\le g(y)$ ולכן בהתאם גם $0<f(x)g(x)\le f(y)g(y)$.
אז גם fg היא עולה במובן הרחב וממשפט 1.15 נובע כי היא אינטגרבילית ב־$[a,b]$. **מש"ל**

סעיף ב'

נפריך את הטענה כי אם $f(x)$ פונקציה רציפה ב־$[a,b]$ המקיימת $\int_a^b f(x)dx=0$ אז קיימת נקודה $c\in(a,b)$ כך ש־$f(c)=0$ בעזרת דוגמה נגדית.

הוכחה. נגדיר $f(x)=1$, בקטע $[0,0]$, קטע מנוון אך מוגדר מקיים

$$\int_0^0 f(x)dx=0$$

אך אין נקודה $c\in\mathbb{R}$ כך ש־$f(c)=0$, ובפרט אין נקודה כזו ב־$[0,0]$. **מש"ל**

סעיף ג'

תהי $f(x)$ פונקציה אינטגרבילית בקטע $[a,b]$ ונגדיר $F(x)=\int_a^x f(t)dt$, ידוע כי F איננה גזירה בקטע.
נוכיח כי אין ל־f פונקציה קדומה בקטע $[a,b]$

הוכחה. נניח בשלילה כי $G(x)$ היא פונקציה המקיימת $G'(x)=f(x)$, דהינו G היא פונקציה קדומה של f.
אז ממשפט 1.31 נובע כי הפונקציה G ו־F נבדלות ביניהן בקבוע, $F(x)=G(x)+C$.
אבל ידוע כי F איננה גזירה ולכן גם $G(x)+C$ איננה גזירה בסתירה להנחה כי $G'(x)=f(x)$. **מש"ל**

סעיף ד'

תהי $f(x)$ מוגדרת בקטע $[a,b]$ ואינטגרבילית בקטע $[c,b]$ לכל $c\in(a,b)$.
נוכיח כי f אינטגרבילית בקטע $[a,b]$.

הוכחה. לכל קטע $[a,c]$ ניתן להגדיר $[a,\frac{a+c}{2}]$ קטע חלקי ממש לקטע הראשון ואשר ידוע כי $[\frac{a+c}{2},b]\subseteq(\frac{a+c}{2},c)$.
דהינו בהפרש הקטעים ידוע כי f אינטגרבילית. נוכל אם כן לבנות סדרת קטעים אינסופית של קטעים מוכלים ממש אשר בהפרשם f אינטגרבילית.
על־פי הלמה של קנטור בחיתוך סדרת הקטעים נמצא ערך יחיד c_0, וידוע כי f אינטגרבילית בכל הקטע $[a,b]$ מלבד ב־c_0.
עוד נשים לב כי בכל קטע מתקיים $a\in[a,c]$ ולכן נוכל להניח כי $a=c_0$, אז מלמה 1.25 נובע כי f אינטגרבילית בכל הקטע. **מש"ל**

שאלה 6

תהיינה

$$f(x)=\sin x, g(x)=\begin{cases} x & 0\le x<\frac{\pi}{2} \\ \pi-x & \frac{\pi}{2}\le x<\frac{3\pi}{2} \\ x-2\pi & \frac{3\pi}{2}\le x\le 2\pi \end{cases}$$

נחשב את השטחה הכלוא בין הגרפים של הפונקציות עבור $0\le x\le 2\pi$.

נחשב את האינטגרלים הלא מסוימים תחילה

$$F(x)=\int_0^x f(x)dx=-\cos x$$

נחשב את האינטגרל של g על־פי חלקיו:

$$G(x)=\int_0^x g(x)=\begin{cases} \frac{x^2}{2} & 0\le x<\frac{\pi}{2} \\ \pi x-\frac{x^2}{x} & \frac{\pi}{2}\le x<\frac{3\pi}{2} \\ \frac{x^2}{2}-2\pi x & \frac{3\pi}{2}\le x\le 2\pi \end{cases}$$

עוד נשים לב כי

$$\max\{F(x),G(x)\}=\begin{cases} G(x) & 0\le x<\frac{\pi}{2} \\ F(x) & \frac{\pi}{2}\le x<\pi \\ G(x) & \pi\le x<\frac{3\pi}{2} \\ F(x) & \frac{3\pi}{2}\le x\le 2\pi \end{cases}$$

ולכן השטח הכלוא בין הגרפים הוא

$$\begin{aligned} S&=\int_0^{\frac{\pi}{2}}(g(x)-f(x))dx+\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}(f(x)-g(x))dx+\int_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}}(g(x)-f(x))dx+\int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi}(f(x)-g(x))dx \\ &=[G(x)-F(x)]_0^{\frac{\pi}{2}}+[F(x)-G(x)]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}+[G(x)-F(x)]_{\pi}^{\frac{3\pi}{2}}+[F(x)-G(x)]_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} \\ &=G(\frac{\pi}{2})-F(\frac{\pi}{2})-G(0)+F(0)+F(\pi)-G(\pi)-F(\frac{\pi}{2})+G(\frac{\pi}{2}) \\ &+G(\frac{3\pi}{2})-F(\frac{3\pi}{2})-G(\pi)+F(\pi)+F(2\pi)-G(2\pi)-F(\frac{3\pi}{2})+G(\frac{3\pi}{2}) \\ &=2G(\frac{\pi}{2})-2F(\frac{\pi}{2})-G(0)+F(0)+2F(\pi)-2G(\pi)+2G(\frac{3\pi}{2})-2F(\frac{3\pi}{2})+F(2\pi)-G(2\pi) \end{aligned}$$