فصل اول

مثال صفحه ۴: ثابت کنید عضو صفر از $\mathbb{R}$ منحصر به فرد است.

پاسخ: فرض کنیم O_1 و O_2 عضو صفر یعنی عضو خنثی عمل جمع باشد. در این صورت:

$$\begin{aligned} O_1 &= O_1 + O_2 && (\text{همانی بودن } O_2) \\ &= O_2 + O_1 && \text{جابه‌جایی} \\ &= O_2 && (\text{همانی بودن } O_1) \end{aligned}$$

مثال صفحه ۴: ثابت کنید عضو قرینه هر عدد حقیقی منحصر به فرد است.

پاسخ: فرض کنیم x عددی دلخواه و y_1 و y_2 قرینه‌ی آن باشد. در این صورت:

$$\begin{aligned} y_2 &= y_2 + 0 && (\text{خاصیت عضو همانی}) \\ &= y_2 + (x + y_1) && (\text{خاصیت عضو قرینه}) \\ &= (y_2 + x) + y_1 && (\text{خاصیت شرکت‌پذیری}) \\ &= 0 + y_1 && (\text{خاصیت عضو قرینه}) \\ &= y_1 && (\text{خاصیت عضو همانی}) \end{aligned}$$

تمرین در کلاس صفحه ۵:

۱- ثابت کنید برای هر عدد حقیقی x، $-(-x) = x$

پاسخ: بنا به تعریف عضو قرینه برای $(-x)$، $(-x) + [-(-x)] = [-(-x)] + (-x) = 0$. همچنین $x + (-x) = (-x) + x = 0$. حال با توجه به منحصر به فرد بودن عضو قرینه (مثال بالا) نتیجه می‌شود $-(-x) = x$.

۲- برای هر سه عدد حقیقی x و y و z اگر $x + z = y + z$ آن‌گاه $x = y$ (قانون حذف).

پاسخ:

$$\begin{aligned} x &= x + 0 && \text{عضو خنثی} \\ &= x + (y - y) && \text{عضو قرینه} \\ &= (x + y) + (-y) && \text{شرکت‌پذیری} \\ &= (y + z) + (-y) && \text{طبق فرض} \\ &= (z + y) + (-y) && \text{جابه‌جایی} \\ &= z + (y - y) && \text{شرکت‌پذیری} \\ &= z + 0 && \text{عضو قرینه} \\ &= z && \text{عضو خنثی} \end{aligned}$$

مثال صفحه ۶: وارون هر عدد حقیقی (غیرصفر) منحصر به فرد است.

پاسخ: فرض کنیم y_1 و y_2 هر دو وارون x باشند، بنابراین: $xy_1 = 1$ و $xy_2 = 1$.

$$y_1 = y_1 \times 1 = y_1(xy_2) = (y_1 x)y_2 = (xy_1)y_2 = 1 \times y_2 = y_2$$

مثال صفحه ۶: وارون وارون x برابر x است، به زبان نِمادی $x = (x^{-1})^{-1}$.

پاسخ: فرض کنیم y وارون x^{-1} باشد. پس $y = (x^{-1})^{-1}$ و $(x^{-1})y = 1$. از طرفی $(x^{-1})x = 1$. پس بنا به منحصر به فرد بودن عضو وارون (مثال قبلی) $x = y = (x^{-1})^{-1}$ می‌باشد.

تمرین در کلاس صفحه ۷:

۱- ثابت کنید برای هر سه عدد حقیقی x و y و z، $x(y - z) = xy - xz$

پاسخ: ابتدا نشان می‌دهیم $x(y - z) + xz = xy$.

$$x(y-z)+xz=x[(y-z)+z]=x[(y+(-z))+z]=x[y+((-z)+z)]=x[y+0]=xy \Rightarrow x(y-z)+xz+(-xz)=xy+(-xz)$$
$$\Rightarrow x(y-z)=xy-xz$$

۲- ثابت کنید هرگاه $xy=0$ آن‌گاه $x=0$ یا $y=0$ و عکس این حکم برقرار است.

پاسخ: ابتدا نشان می‌دهیم اگر $x=0$ یا $y=0$، آن‌گاه $xy=0$:

$$x=0 \Rightarrow xy=0\times y=(0+0)y=0\times y+0\times y \xrightarrow{\text{با توجه به تعریف عضو خنثی}} 0xy=0 \Rightarrow xy=0$$
$$y=0 \Rightarrow xy=x\times 0=x(0+0)=x\times 0+x\times 0 \Rightarrow x\times 0=0 \Rightarrow xy=0$$

برعکس، نشان می‌دهیم اگر $xy=0$، آن‌گاه $x=0$ یا $y=0$. اگر $x=0$ باشد طبق مطالب بالا، حکم ثابت است، پس فرض می‌کنیم $x\neq 0$. بنابراین x^{-1} موجود است و داریم:

$$xy=0 \Rightarrow x^{-1}(xy)=x^{-1}\times 0 \Rightarrow (x^{-1}x)y=0 \Rightarrow y=0$$

۳- برای هر دو عدد حقیقی x و y:

الف) $x(-y)=(-x)y=-(xy)$

پاسخ:

$$\left.\begin{array}{l} x(-y)+xy=x(-y+y)=x\times 0=0 \Rightarrow x(-y)=-(xy) \\ (-x)y+xy=y(-x)+yx=y(-x+x)=y\times 0=0 \Rightarrow (-x)y=-(xy) \end{array}\right\} \Rightarrow x(-y)=(-x)y=-(xy)$$

ب) $(-x)(-y)=xy$

پاسخ:

$$(-x)(-y)\overset{\text{بنا به قسمت الف}}{=\!=\!=}-[x(-y)]\overset{\text{قسمت الف}}{=\!=\!=}-[-(xy)]=xy$$

قضیه (اَعمال با قدرمطلق): هرگاه a و b اعداد حقیقی بوده و n عدد صحیح مثبتی باشد، آن‌گاه خواص زیر برقرار می‌باشند:

۱) $|a.b|=|a||b|$ ۲) $\left|\frac{a}{b}\right|=\frac{|a|}{|b|}, b\neq 0$ ۳) $|a^n|=|a|^n$

پاسخ: با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف علامت a و b، روابط ۱ و ۲ ثابت می‌شود. در این‌جا مورد (۱) را ثابت می‌کنیم:

$$\left\{\begin{array}{l} a\geq 0, b\geq 0 \Rightarrow ab\geq 0 \Rightarrow |ab|=ab=|a|.|b| \\ a\geq 0, b\leq 0 \Rightarrow ab\leq 0 \Rightarrow |ab|=-ab=a(-b)=|a||b| \\ a\leq 0, b\geq 0 \Rightarrow ab\leq 0 \Rightarrow |ab|=-ab=(-a)b=|a||b| \\ a\leq 0, b\leq 0 \Rightarrow ab\geq 0 \Rightarrow |ab|=ab=(-a)(-b)=|a|.|b| \end{array}\right. \xrightarrow{\text{در همه حالات}} |a.b|=|a|.|b|$$

مورد (۲) نیز به طور مشابه اثبات می‌شود. برای اثبات مورد (۳) از استقرا استفاده می‌کنیم:

$n=1 : |a^1|=|a|^1$ ✓

فرض : $n=k : |a^k|=|a|^k$ ✓

حکم : $n=k+1 : |a^{k+1}|=|a|^k$

$$|a^{k+1}|=|a^k.a^1|\overset{\text{طبق (۱)}}{=\!=\!=}|a^k|.|a|\overset{\text{طبق فرض استقرا}}{=\!=\!=}|a|^k.|a|=|a|^{k+1} \checkmark$$

قضیه (نامساوی‌ها و قدرمطلق): هرگاه a و b اعداد حقیقی بوده و k مثبت باشد، خواص زیر برقرار می‌باشند:

۱) $-|a|\leq a\leq |a|$ ۲) $|a|\leq k$ اگر و فقط اگر $-k\leq a\leq k$

۳) $|a|\geq k$ اگر و فقط اگر $a\geq k$ یا $a\leq -k$ ۴) نامساوی مثلثی: $|a+b|\leq |a|+|b|$

خواص ۲ و ۳ در صورت تعویض ≤ با > نیز درست‌اند. این احکام را برحسب > بنویسید.

پاسخ:

اثبات (۱):

$$\left\{\begin{array}{l} a\geq 0 \Rightarrow |a|=a \Rightarrow a\leq |a| \xrightarrow[a\geq 0]{-|a|<0} -|a|\leq a\leq |a| \\ a<0 \Rightarrow |a|=-a \Rightarrow -|a|=a \Rightarrow -|a|\leq a \xrightarrow[a<0]{|a|>0} -|a|\leq a\leq |a| \end{array}\right. \xrightarrow{\text{در هر دو حالت}} -|a|\leq a\leq |a|$$

اثبات (۲):

اگر $|a|\le k \Rightarrow -k\le -|a|\le a\le |a|\le k \Rightarrow -k<a<k$

برعکس : اگر $-k\le a\le k \Rightarrow \begin{cases} a>0 \Rightarrow |a|=a \Rightarrow -k\le |a|\le k \\ a<0 \Rightarrow |a|=-a \xrightarrow[k\ge -a]{-k\le a} k\ge |a| \end{cases} \xrightarrow{\text{در هر دو حالت}} |a|\le k$

اثبات (۳): ابتدا فرض می‌کنیم $|a|\ge k$ در این صورت:

$$\left.\begin{matrix} \text{اگر } a\ge 0 \Rightarrow |a|=a \Rightarrow a\ge k \\ \text{اگر } a<0 \Rightarrow |a|=-a \Rightarrow -a\ge k \Rightarrow a\le -k \end{matrix}\right. \Rightarrow a\ge k \ \text{یا}\ a\le -k$$

برعکس: اگر $a\ge k$ یا $a\le -k$ در این صورت:

$$\left.\begin{matrix} a\ge k \xrightarrow{k>0} a>0\ ,\ |a|=a \Rightarrow |a|\ge k \\ a\le -k \xrightarrow{k>0} a<0\ ,\ |a|=-a \Rightarrow -a\ge k \Rightarrow |a|\ge k \end{matrix}\right. \xrightarrow{\text{در هر دو حالت}} |a|\ge k$$

اثبات (۴): با استفاده از (۱) داریم:

$$\begin{cases} -|a|\le a\le |a| \\ -|b|\le b\le |b| \end{cases} \Rightarrow -(|a|+|b|)\le a+b\le |a|+|b| \xrightarrow{\text{بنا بر (۲)}} |a+b|\le \big||a|+|b|\big| \xrightarrow{|a|+|b|\ge 0} |a+b|\le |a|+|b|$$

بیان احکام را برحسب >:

$|a|<k$ اگر و فقط اگر $-k<a<k$

$|a|>k$ اگر و فقط اگر $a>k$ یا $a<-k$

مثال صفحه ۱۶: نشان دهید برای هر دو عدد حقیقی a و b، $|a|-|b|\le |a-b|\le |a|+|b|$

پاسخ:

$$\left.\begin{matrix} \text{بنا بر نامساوی مثلثی : } |a|=|a-b+b|\le |a-b|+|b| \Rightarrow |a|-|b|\le |a-b| \\ \text{از طرف دیگر : } |a-b|=|a+(-b)|\le |a|+|-b|=|a|+|b| \end{matrix}\right\} \Rightarrow |a|-|b|\le |a-b|\le |a|+|b|$$

تمرین در کلاس صفحه ۱۶: نامساوی مثلثی را برای سه عدد a_1، a_2 و a_3 بیان و اثبات کنید. آیا صورت کلی‌تری (برای n عدد) از این نامساوی می‌توانید بیان کنید؟

پاسخ: نامساوی مثلثی برای سه عدد a_1 و a_2 و a_3:

$$|a_1+a_2+a_3|\le |a_1|+|a_2|+|a_3|$$

اثبات: با توجه به نامساوی مثلثی برای دو عدد داریم:

$$|a_1+a_2+a_3|=|(a_1+a_2)+a_3|\le |a_1+a_2|+|a_3|\le |a_1|+|a_2|+|a_3|$$

در حالت کلی برای n عدد $a_1,a_2,\dots,a_n$ داریم:

$$|a_1+a_2+\cdots+a_n|\le |a_1|+|a_2|+\cdots+|a_n|$$

مسائل صفحه ۱۶:

۱- نامعادله $-\frac{2}{x}<\frac{5}{x-1}$ را حل کرده و مجموعه جواب آن را روی خط حقیقی نشان دهید.

پاسخ:

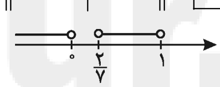
$$\frac{5}{x-1}<-\frac{2}{x} \Rightarrow \frac{5}{x-1}+\frac{2}{x}<0 \Rightarrow \frac{5x+2(x-1)}{x(x-1)}<0 \Rightarrow \frac{7x-2}{x(x-1)}<0$$

$$\begin{cases} 7x-2=0 \Rightarrow x=\frac{2}{7} \\ x(x-1)=0 \Rightarrow x=0, x=1 \\ \text{علامت جمله‌ی پرتوان : } \frac{+7x}{+x^2}=\frac{\boxed{+}7}{x} \quad x \end{cases} \xrightarrow{\text{تعیین علامت}}$$

x	$-\infty$		0		$\frac{2}{7}$		1	
$\frac{7x-2}{x(x-1)}$		$-$	$\Vert$	$+$	0	$-$	$\Vert$	$\boxed{+}$

$\Rightarrow x\in(-\infty,0)\cup(\frac{2}{7},1)$

مجموعه جواب:



۲- جواب نامعادله‌های زیر را به صورت بازه و یا اجتماعی از بازه‌ها پیدا کنید.

پاسخ:

الف) $3x+5\le 8 \Rightarrow 3x\le 3 \Rightarrow x\le 1 \Rightarrow x\in(-\infty,1]$

ب) $5x-3\le 7-3x \Rightarrow 5x+3x\le 7+3 \Rightarrow 8x\le 10 \Rightarrow x\le\frac{5}{4} \Rightarrow x\in(-\infty,\frac{5}{4}]$

ج) $x^2<9 \Rightarrow |x|<3 \Rightarrow -3<x<3 \Rightarrow x\in(-3,3)$

د) $\frac{1}{2-x}<3 \Rightarrow \frac{1}{2-x}-3<0 \Rightarrow \frac{1-3(2-x)}{2-x}<0 \Rightarrow \frac{1-6+3x}{2-x}<0 \Rightarrow \frac{3x-5}{2-x}<0 \Rightarrow x<\frac{5}{3}$ یا $x>2$

$\Rightarrow x\in(-\infty,\frac{5}{3})\cup(2,+\infty)$

۳- هر یک از نامساوی‌های زیر یک بازه را مشخص می‌سازد. این بازه را بنویسید.

الف) $|x-2|\le 2$

پاسخ: $\Rightarrow -2\le x-2\le 2 \Rightarrow 0\le x\le 4 \Rightarrow x\in[0,4]$

ب) $|2x+5|<1$

پاسخ: $\Rightarrow -1<2x+5<1 \Rightarrow -6<2x<-4 \Rightarrow -3<x<-2 \Rightarrow x\in(-3,-2)$

پ) $\left|2-\frac{x}{2}\right|<\frac{1}{2}$

پاسخ: $\Rightarrow -\frac{1}{2}<2-\frac{x}{2}<\frac{1}{2} \Rightarrow -\frac{5}{2}<-\frac{x}{2}<-\frac{3}{2} \Rightarrow 3<x<5 \Rightarrow x\in(3,5)$

ت) $|3x-7|<2$

پاسخ: $\Rightarrow -2<3x-7<2 \Rightarrow 5<3x<9 \Rightarrow \frac{5}{3}<x<3 \Rightarrow x\in(\frac{5}{3},3)$

ث) $|2x+5|<1$

پاسخ: $\Rightarrow -1<2x+5<1 \Rightarrow -6<2x<-4 \Rightarrow -3<x<-2 \Rightarrow x\in(-3,-2)$

۴- جواب‌هایی از نابرابری $|x^2-4|<1$ را به دست آورید که در بازه متقارن $(2-\frac{1}{10},2+\frac{1}{10})$ قرار داشته باشند.

پاسخ:

$|x^2-4|<1 \Rightarrow -1<x^2-4<1 \Rightarrow 3<x^2<5 \Rightarrow -\sqrt{5}<x<-\sqrt{3}$ یا $\sqrt{3}<x<\sqrt{5}$

حال از آن‌جا که می‌خواهیم جواب‌ها در بازه‌ی $(1/9,2/1)$ باشد، پس $-\sqrt{5}<x<-\sqrt{3}$ قابل قبول نیست.

$\sqrt{3}<x<\sqrt{5} \xrightarrow[1/9<x<2/1]{\text{اشتراک با شرط}} 1/9<x<2/1$

۵- جواب‌هایی از نابرابری $|x^2-9|<\frac{1}{1000}$ را به دست آورید که در بازه متقارن $(2,4)$ قرار داشته باشند.

پاسخ:

$|x^2-9|<\frac{1}{1000} \Rightarrow -\frac{1}{1000}<x^2-9<\frac{1}{1000} \Rightarrow 8/999<x^2<9/001 \Rightarrow -\sqrt{9/001}<x<-\sqrt{8/999}$ یا $\sqrt{8/999}<x<\sqrt{9/001}$

حال با توجه به این که $2<x<4$ است، پس $-\sqrt{9/001}<x<-\sqrt{8/999}$ قابل قبول نیست. همچنین اشتراک دو شرط $2<x<4$ و $\sqrt{8/999}<x<\sqrt{9/001}$ برابر $\sqrt{8/999}<x<\sqrt{9/001}$ می‌باشد.

۶- جواب‌هایی از نابرابری $\frac{1}{x^2}<\frac{1}{10^4}$ را به دست آورید که در بازه $(3,+\infty)$ قرار دارند.

پاسخ: $\frac{1}{x^2}<\frac{1}{10^4} \Rightarrow x^2>10^4 \Rightarrow |x|>10^2 \Rightarrow x>100$ یا $x<-100$

از طرفی $x\in(3,+\infty)$ پس باید $x>3$ باشد، پس $x<-100$ غیرقابل قبول است و اشتراک بین شرطهای $x>3$ و $x>100$، $x>100$ می‌شود.

۷- جواب‌هایی از نابرابری $\sqrt{x^2-9}<\frac{1}{100}$ را به دست آورید که در بازه متقارن $(3-\frac{1}{10},3+\frac{1}{10})$ قرار دارند.

پاسخ:

$$\sqrt{x^2-9}<\frac{1}{100} \Rightarrow 0\le x^2-9<\frac{1}{10000} \Rightarrow 9\le x^2<9/0001 \Rightarrow -\sqrt{9/0001}<x\le -3 \text{ یا } 3\le x<\sqrt{9/0001}$$

از طرفی $x\in(3-\frac{1}{10},3+\frac{1}{10})$ یعنی $2/9<x<3/1$ ، پس اشتراک جواب‌ها برابر است با:

$$3\le x<\sqrt{9/0001}$$

۸- فرض کنیم $a<x<b$، ثابت کنید $|x|<\mathrm{Max}\{|a|,|b|\}$ (منظور از Max، ماکسیمم مقدار مجموعه است.) آیا عکس این حکم درست است؟

پاسخ: ابتدا قرار می‌دهیم $k=\mathrm{Max}\{|a|,|b|\}$ در این صورت:

$$\begin{cases} |a|\le k \Rightarrow -k\le a\le k \xrightarrow{a<x} -k<x \\ |b|\le k \Rightarrow -k\le b\le k \xrightarrow{x<b} x<k \end{cases} \Rightarrow -k<x<k \Rightarrow |x|<k$$

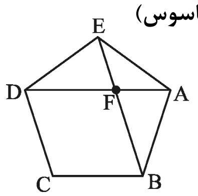
عکس این حکم برقرار نیست. مثال: $x=-2\,,\,b=4\,,\,a=3$.

۹- فرض کنیم برای هر عدد مثبت h، $0\le a<h$ ثابت کنید $a=0$.

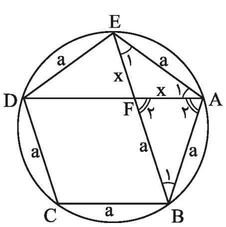
پاسخ: برهان خلف: فرض کنیم $a\neq 0$. بنابراین $\frac{a}{2}>0$. همچنین طبق فرض برای عدد مثبت $h=\frac{a}{2}$ داریم $0\le a<\frac{a}{2}$ که یک تناقض است. پس فرض خلف باطل و $a=0$ می‌باشد.

۱۰- ثابت کنید در هر پنج ضلعی منتظم با طول ضلع a، نسبت طول قطر به طول ضلع، عددی گنگ است. (قضیه هیپاسوس)

راهنمایی: ابتدا نشان دهید دو مثلث ABE و FEA در شکل زیر متشابه‌اند.



پاسخ: این پنج ضلعی منتظم است، پس می‌توان دایره‌ای محیطی از رئوس آن، مانند مقابل گذراند که در این حالت اندازه‌ی زاویه‌ی هر کمان 72° خواهد شد $\left(\frac{360^\circ}{5}=72^\circ\right)$.



حال بر اساس آن‌چه در هندسه پایه فرا گرفتید، معلوم می‌گردد که اندازه هرکدام از **زاویه‌های محاطی E_1، A_1 و B_1 مساوی نصف کمان مقابل آن‌ها،** یعنی 36° خواهدبود $(\hat{B}_1=\hat{A}_1=\hat{E}_1=36^\circ)$. پس مثلث FEA متساوی‌الساقین بوده و $FA=FE$. از طرفی زاویه A_2 **زاویه‌ای محاطی و مقابل به دو کمان است،** پس $\hat{A}_2=2\times36^\circ=72^\circ$. حال واضح می‌گردد که زاویه F_2 نیز در مثلث BFA مساوی $180-(72+36)=72^\circ$ خواهد بود و از آن‌جا مثلث BFA متساوی‌الساقین بوده و $BA=BF$. حال با فرض $FA=FE=x$ و $FB=BA=a$ ادامه می‌دهیم. دو مثلث AEB و FEA به دلیل برابری دو زاویه با یکدیگر متشابه هستند و در نتیجه:

$$\overset{\Delta}{FEA}\sim\overset{\Delta}{AEB} \Rightarrow \frac{AB}{AF}=\frac{EB}{EA} \Rightarrow \frac{a}{x}=\frac{a+x}{a} \Rightarrow x^2+ax-a^2=0$$

$$\Rightarrow x=\frac{-a\pm\sqrt{a^2+4a^2}}{2}=\frac{-a\pm\sqrt{5a^2}}{2}=\frac{-1\pm\sqrt{5}}{2}a \xrightarrow[\text{پس } x>0 \text{ است.}]{\text{مسئله هندسی است،}} \boxed{x=\frac{-1+\sqrt{5}}{2}a}$$

اکنون نسبت طول قطر به طول پنج ضلعی را محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{EB}{EA}=\frac{x+a}{a}=\frac{x}{a}+1=\frac{-1+\sqrt{5}}{2}+1=\frac{\sqrt{5}+1}{2}$$

که عددی گنگ می‌باشد. (به $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$ نسبت طلایی یا عدد φ می‌گویند که کاربرد فراوانی در طبیعت، بدن انسان و ... دارد.)

۱۱- ثابت کنید $\sqrt{3}$ عددی گنگ است.

پاسخ: برهان خلف: فرض کنیم $\sqrt{3}$ گنگ نباشد، پس گویاست و اعداد صحیح a و $b\neq 0$ وجود دارند به طوری که $\sqrt{3}=\frac{a}{b}$ و $(a,b)=1$ باشد.

(یعنی $\frac{a}{b}$ تحویل‌ناپذیر و ساده‌نشدنی باشد). در این صورت:

$$\sqrt{3}=\frac{a}{b} \Rightarrow 3=\frac{a^2}{b^2} \Rightarrow a^2=3b^2$$

چون $3b^2$ بر ۳ بخش‌پذیر است، پس a^2 نیز بر ۳ بخش‌پذیر است و بنا بر قضیه‌ای که در جبر و احتمال داشتیم، a نیز بر ۳ بخش‌پذیر می‌شود.

(قضیه: اگر a^2 بر عدد اول p بخش‌پذیر باشد، a نیز بر p بخش‌پذیر است.) پس $a=3k$ که $k\in\mathbb{Z}$ بنابراین:

$$a^2=3b^2 \Rightarrow (3k)^2=3b^2 \Rightarrow 9k^2=3b^2 \Rightarrow 3k^2=b^2$$

به طور مشابه b^2 نیز بر ۳ بخش‌پذیر و بنابراین b نیز بر ۳ بخش‌پذیر است که این مطلب با $(a,b)=1$ در تناقض است. پس فرض خلف باطل و $\sqrt{3}$ گنگ می‌باشد.

۱۲- ثابت کنید $\log 3$ گویا نیست.

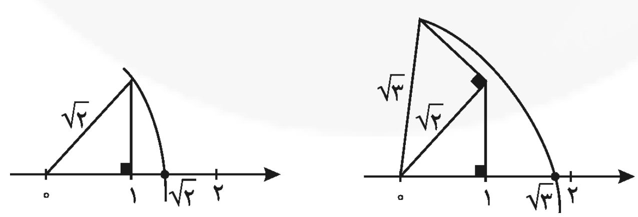
پاسخ: برهان خلف: فرض کنیم $\log 3$ گویا باشد. در این صورت اعداد صحیح a و $b\neq 0$ وجود دارند که $\log 3=\frac{a}{b}$:

$$\log 3=\frac{a}{b} \Rightarrow 10^{\frac{a}{b}}=3 \Rightarrow 10^a=3^b$$

از طرفی 3^b بر ۳ بخش‌پذیر و عددی فرد است، در صورتی که 10^a بر ۲ و ۵ بخش‌پذیر است وعددی زوج است که بر ۳ بخش‌پذیر نمی‌باشد.

۱۳- اعداد $\sqrt{2}$ و $\sqrt{3}$ را روی محور اعداد نشان دهید. (به کمک رسم مثلث قائم‌الزاویه)

پاسخ:



فصل دوم

تمرین در کلاس ۲۵:

به دنباله‌های زیر توجه کنید.

الف) $1,2,4,8,16,32,64,\dots,n^2,\dots$

ب) $\frac{1}{3},\frac{1}{9},\frac{1}{27},\frac{1}{81},\frac{1}{243},\dots,\frac{1}{3^n},\dots$

ج) $2,\frac{3}{2},\frac{4}{3},\frac{5}{4},\frac{6}{5},\frac{7}{6},\dots,\frac{n+1}{n},\dots$

د) $2,(\frac{3}{2})^2,(\frac{4}{3})^3,(\frac{5}{4})^4,(\frac{6}{5})^5,\dots,(\frac{n+1}{n})^n,\dots$

اکنون مشخص کنید کدام دنباله صعودی و کدامیک نزولی است.

الف) $1,2,4,8,16,32,64,\dots,n^2,\dots$ **پاسخ:** صعودی

ب) $\frac{1}{3},\frac{1}{9},\frac{1}{27},\frac{1}{81},\frac{1}{243},\dots,\frac{1}{3^n},\dots$ **پاسخ:** نزولی

ج) $2,\frac{3}{2},\frac{4}{3},\frac{5}{4},\frac{6}{5},\frac{7}{6},\dots,\frac{n+1}{n},\dots$ **پاسخ:** نزولی

د) $2,(\frac{3}{2})^2,(\frac{4}{3})^3,(\frac{5}{4})^4,(\frac{6}{5})^5,\dots,(\frac{n+1}{n})^n,\dots$ **پاسخ:** صعودی

مسائل صفحه ۲۵:

۱- چهار دنباله زیر را در نظر بگیرید:

الف) $\{n+1\}_{n=1}^{\infty}$ ب) $\{(-1)^{n+1}\}_{n=1}^{\infty}$ ج) $\left\{\frac{n}{n+1}\right\}_{n=1}^{\infty}$ د) $\left\{1+\left(-\frac{1}{2}\right)^n\right\}_{n=1}^{\infty}$

ابتدا تعدادی از جملات هر دنباله را بنویسید. این که چه تعداد از جمله‌های نخست را انتخاب می‌کنید، به خودتان بستگی دارد. سپس مشخص کنید که کدام یک صعودی و کدام یک نزولی‌اند. هم‌چنین تجمع احتمالی جملات هر دنباله را حول یک عدد معین بررسی کنید.

پاسخ:

الف) $\{n+1\}_{n=1}^{\infty}:\ a_1=2,a_2=3,a_3=4,a_4=5$

نشان می‌دهیم این دنباله صعودی می‌باشد:

$a_{n+1}-a_n=(n+1)+1-(n+1)=1>0 \Rightarrow a_{n+1}>a_n$ دنباله اکیداً صعودی

ب) $\{(-1)^{n+1}\}_{n=1}^{\infty}:\ a_1=1,a_2=-1,a_3=1,a_4=-1,\dots$ دنباله غیریکنوا و جملات حول ۱ و ۱- تجمع می‌یابند

ج) $\left\{\frac{n}{n+1}\right\}_{n=1}^{\infty}:a_1=\frac{1}{2},a_2=\frac{2}{3},a_3=\frac{3}{4},a_4=\frac{4}{5},\dots$

نشان می‌دهیم دنباله صعودی و جملات حول عدد ۱ تجمع می‌یابند (دنباله به عدد ۱ همگراست).

در دنباله‌ی $a_n=\frac{n}{n+1}=\frac{n+1-1}{n+1}=1-\frac{1}{n+1}$، با افزایش n، $\frac{1}{n+1}$ کوچک‌تر شده، پس $1-\frac{1}{n+1}$ بزرگ‌تر می‌شود. پس دنباله صعودی است. هم‌چنین با افزایش n، مقدار $\frac{1}{n+1}$ به صفر میل می‌کند، پس $a_n=1-\frac{1}{n+1}$ به ۱ میل می‌کند.

$$a_{n+1} > a_n \Leftrightarrow \frac{n+1}{n+2} > \frac{n}{n+1} \Leftrightarrow (n+1)^2 > n(n+2) \Leftrightarrow n^2+2n+1 > n+2n \Leftrightarrow 1>0 \checkmark$$

بنابراین $\{a_n\}$ صعودی می‌باشد.

د) $\left\{1+\left(-\frac{1}{2}\right)^n\right\}_{n=1}^{\infty}$: $a_1=\frac{1}{2}, a_2=\frac{5}{4}, a_3=\frac{7}{8}, \dots$ غیریکنوا

جملات در اطراف نقطه‌ی ۱ تجمع می‌یابند.

۲- یک دنباله بسازید که کراندار باشد اما صعودی نباشد.

پاسخ: $\{(-1)^n\}_{n=1}^{\infty}$

۳- یک دنباله بسازید که هم کراندار و هم نزولی باشد.

پاسخ: $\left\{\frac{1}{n}\right\}_{n=1}^{\infty}$

۴- نشان دهید که هیچ‌کدام از دو جمله از دنباله $\left\{\frac{1}{n}\right\}$ برابر نیستند.

پاسخ: برهان خلف: فرض کنیم a_m و a_n دو جمله‌ی دلخواه از دنباله باشند به طوری که $n \neq m$ و $a_n = a_m$ باشد در این صورت:

$$a_n = a_m \Rightarrow \frac{1}{n} = \frac{1}{m} \Rightarrow n = m$$

که تناقض است پس فرض خلف باطل و هیچ دو جمله‌ی متمایزی با هم برابر نیستند.

۵- ده عدد گویا معرفی کنید که بین دو عدد $\frac{1}{10}$ و $\frac{1}{11}$ واقع باشند.

پاسخ:

$$\frac{1}{11} = \frac{1\times 11}{11\times 11} = \frac{11}{121}, \quad \frac{1}{10} = \frac{1\times 11}{10\times 11} = \frac{11}{110}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{11} < \frac{11}{120} < \frac{11}{119} < \frac{11}{118} < \frac{11}{117} < \frac{11}{116} < \frac{11}{115} < \frac{11}{114} < \frac{11}{113} < \frac{11}{112} < \frac{11}{111} < \frac{11}{110}$$

۶- دنباله‌ای از اعداد گویا بسازید که بین دو عدد $\frac{1}{10}$ و $\frac{1}{11}$ واقع باشند.

پاسخ: ادعا می‌کنیم جملات دنباله‌ی $\left\{\frac{n+1}{10n+11}\right\}_{n=1}^{\infty}$ بین دو عدد $\frac{1}{10}$ و $\frac{1}{11}$ قرار دارد:

$$\frac{1}{10} = \frac{n+1}{10(n+1)} = \frac{n+1}{10n+10} > \frac{n+1}{10n+11} \quad (1)$$

$$\frac{1}{11} = \frac{n+1}{11n+11} < \frac{n+1}{10n+11} \quad (2)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{11} < \frac{n+1}{10n+11} < \frac{1}{10}$$

۷- با بررسی جملات (اولیه) دنباله‌های زیر رفتار آن‌ها را حدس زده و حدس خود را توضیح دهید.

الف) $\left\{1+\left(\frac{1}{2}\right)^n\right\}$

پاسخ: $\Rightarrow a_1 = 1+\frac{1}{2} = \frac{3}{2}, \ a_2 = 1+\frac{1}{4} = \frac{5}{4}, \ a_3 = 1+\frac{1}{8} = \frac{9}{8}, \ \dots \to 1$

جملات دنباله همگی مثبت‌اند، پس از پایین کراندارند. از طرفی جملات دنباله نزولی است. زیرا با افزایش n، $\left(\frac{1}{2}\right)^n$ کاهش می‌یابد. بنابراین بر اساس قضیه همگراست. همچنین با افزایش n، $\left(\frac{1}{2}\right)^n$ به صفر نزدیک می‌شود. بنابراین جملات دنباله به ۱ نزدیک می‌شود.

ب) $\left\{\frac{n^{۲}}{۲n}\right\}$

پاسخ: $\Rightarrow \ a_۱=\frac{۱}{۲}\ ,\ a_۲=۱\ ,\ a_۳=\frac{۳}{۲}\ ,\ a_۴=۲,\ldots$

$a_n=\frac{n^۲}{۲n}=\frac{n}{۲}$، بنابراین دنباله صعودی است و با بزرگ‌تر شدن n، جملات دنباله بزرگ و بزرگ‌تر می‌شود.

ج) $\{۱+(-۱)^n\}$

پاسخ: $\Rightarrow \ a_۱=۰\ ,\ a_۲=۲\ ,\ a_۳=۰\ ,\ a_۴=۲,\ldots$

دنباله غیریکنواست و جملات حول ۰ و ۲ جمع می‌شوند.

د) $\left\{\left(۱+\frac{۱}{n}\right)^n\right\}$

پاسخ: $\Rightarrow \ a_۱=۲\ ,\ a_۲=\frac{۹}{۴}\ ,\ a_۳=\frac{۶۴}{۲۷}\ ,\ \ldots$

دنباله صعودی است در قضایای ۳ و ۴ صفحه‌ی ۴۸ صعودی و کراندار بودن دنباله را ثابت می‌کنیم.

هـ) $\left\{\cos\left(\frac{n\pi}{۲n}\right)\right\}$

پاسخ: $\Rightarrow \ a_۱=۰\ ,\ a_۲=۰\ ,\ a_۳=۰\ ,\ a_۴=۰,\ldots$

دنباله ثابت صفر است پس هم صعودی و هم نزولی می‌باشد.

ز) $\left\{\left(۱+\frac{۱}{n}\right)^{n+۱}\right\}$

پاسخ: $\Rightarrow \ a_۱=۴\ ,\ a_۲=\frac{۲۷}{۸}\ ,\ a_۳=\frac{۱۲۸}{۸۱}\ ,\ldots$

دنباله نزولی می‌باشد که در مثال صفحه ۴۹ این مطلب را اثبات می‌کنیم.

۸- دنباله $a_n=\frac{n}{n+۱}$ را در نظر می‌گیریم: $\frac{۱}{۲},\frac{۲}{۳},\frac{۳}{۴},\frac{۴}{۵},\ldots,\frac{n}{n+۱},\ldots$ اکنون ۵ جمله نخست آن را تعویض می‌کنیم و دنباله جدید را $\{b_n\}$ می‌نامیم؛ بنابراین، برای مثال، $b_۱=۱, b_۲=۵, b_۳=۱۰, b_۴=۱۰, b_۵=-۱۵$ و برای $n\geq ۶$ قرار می‌دهیم $b_n=a_n$. رفتار دو دنباله $\{a_n\}$ و $\{b_n\}$ را مقایسه کنید. چه نتیجه کلی از این بررسی عایدتان می‌شود؟ آن را بیان کنید.

پاسخ: دنباله $\{a_n\}$ صعودی و دنباله $\{b_n\}$ غیر یکنواست ولی هر دو دنباله همگرا به ۱ می‌شوند. پس اگر تعداد متناهی جمله از دنباله حذف کنیم یا اضافه یا تعویض کنیم، هیچ تأثیری در همگرایی یا واگرایی دنباله ندارد ولی ممکن است یکنوایی و غیریکنوایی را تغییر دهد.

۹- دنباله $c_n:۱,۱,۲,۳,۵,۸,۱۳,۲۱,۳۴,\ldots$ را در نظر می‌گیریم. رابطه بین جملات متوالی این دنباله را پیدا کنید. $\{c_n\}$ یک نمونه از دنباله‌هایی است که به دنباله‌های فیبوناتچی معروف‌اند.

پاسخ: $a_۱=۱, a_۲=۱, a_۳=۲, a_۴=۳,\ldots \ \Rightarrow \ a_n=a_{n-۱}+a_{n-۲}$

یعنی هر جمله مجموع دو جمله قبلی است.

۱۰- ثابت کنید هرگاه دنباله $\{a_n\}$ کراندار باشد، عدد مثبتی مانند M هست به قسمی که برای هر n، $|a_n|\leq M$ و بالعکس.

پاسخ: فرض کنیم $\{a_n\}$ کراندار باشد. در این صورت اعداد حقیقی k و k' موجودند به طوری که برای هر n، $k\leq a_n\leq k'$ باشد. حال قرار می‌دهیم $M=\max\{|k|,|k'|\}$. در این صورت:

$$-M\leq -|k|\leq k\leq a_n\leq k'\leq |k'|\leq M \ \Rightarrow |a_n|\leq M$$

بالعکس واضح است که اگر عدد مثبت M ای باشد که برای هر n، $|a_n|\leq M$، در این صورت برای هر n، $-M\leq a_n\leq M$ می‌شود و در نتیجه $\{a_n\}$ کراندار است.

۱۱- برای چندین جمله اولیه، فاصله جملات دنباله $\left\{\frac{۲n}{n+۱}\right\}$ را تا ۲ حساب کنید. n از چه عددی باید بزرگ‌تر باشد تا نابرابری $\left|\frac{۲n}{n+۱}-۲\right|<۰/۰۰۰۱$ برقرار باشد.

پاسخ:

$$\begin{cases} a_۱=\frac{۲}{۲}=۱\ ,\ |a_۱-۲|=|۱-۲|=۱ \\ a_۲=\frac{۴}{۳}\ ,\ |a_۲-۲|=\left|\frac{۴}{۳}-۲\right|=\frac{۲}{۳} \\ a_۳=\frac{۶}{۴}=\frac{۳}{۲}\ ,\ |a_۳-۲|=\left|\frac{۳}{۲}-۲\right|=\frac{۱}{۲} \end{cases}$$

$$\left|\frac{۲n}{n+۱}-۲\right|<۰/۰۰۰۱ \Rightarrow \left|\frac{۲n-۲n-۲}{n+۱}\right|<\frac{۱}{۱۰۰۰۰} \Rightarrow \left|\frac{-۲}{n+۱}\right|<\frac{۱}{۱۰۰۰۰} \Rightarrow \frac{۲}{n+۱}<\frac{۱}{۱۰۰۰۰} \Rightarrow n>۱۹۹۹۹$$

۱۲- یک دنباله نوسانی تعریف کنید که کراندار باشد، دو دنباله نوسانی تعریف کنید که کراندار نباشند.

پاسخ: دنباله‌ی نوسانی کراندار: $\{(-۱)^n\}$ ، دو دنباله‌ی نوسانی بی‌کران: $\{(-n)^n\}$ و $\{(-۱)^n n\}$

پرسش‌های مفهومی صفحه ۲۷ :

۱- پرسش‌های زیر را بررسی کنید، اگر فکر می‌کنید درست‌اند، آن‌ها را توضیح دهید و اگر فکر می‌کنید نادرست‌اند، مثالی ارائه دهید.

الف) هرگاه n جمله نخست یک دنباله را تغییر دهیم، در رفتار آن تغییری حاصل نمی‌شود.

پاسخ: ممکن است یکنوایی را تغییر دهد ولی همگرایی یا واگرایی یک دنباله تحت تأثیر جملات آخر دنباله است و جملات ابتدایی هیچ‌گونه نقشی در همگرایی یا واگرایی یک دنباله ندارند.

ب) هرگاه $\{a_n\}$ دنباله‌ای صعودی و C عدد ثابتی باشد، دنباله $\{Ca_n\}$ نیز صعودی است.

پاسخ: نادرست است. $\{a_n\}=\{n\}$:صعودی ، $C=-۱ \Rightarrow \{Ca_n\}=\{-n\}$ دنباله‌ای نزولی است.

ج) هرگاه $\{a_n\}$ دنباله‌ای نزولی و C عدد ثابتی باشد، دنباله $\{Ca_n\}$ نیز صعودی است.

پاسخ: نادرست است. $\{a_n\}=\{-n\}$:نزولی ، $C=۲ \Rightarrow \{Ca_n\}=\{-۲n\}$ دنباله‌ای نزولی است.

د) هرگاه $\{a_n\}$ دنباله‌ای یکنوا و C عدد ثابتی باشد، دنباله $\{Ca_n\}$ نیز یکنوا است.

پاسخ: درست است. اگر دنباله‌ی $\{a_n\}$ صعودی (نزولی) باشد و $C>۰$، $\{Ca_n\}$ صعودی (نزولی) است. اگر $C<۰$ باشد، $\{Ca_n\}$ نزولی (صعودی) است و اگر $C=۰$ باشد، $\{Ca_n\}$ نیز دنباله‌ی ثابت صفر است که هم صعودی و هم نزولی است. پس در هر صورت $\{Ca_n\}$ یکنوا می‌باشد.

یکی از حالتها را اثبات می‌کنیم. فرض کنیم $\{a_n\}$ صعودی باشد و $C<۰$. در این صورت :

$\forall n: a_{n+۱}\ge a_n \xrightarrow{C<۰} Ca_{n+۱}\le Ca_n \Rightarrow$ نزولی است $\{Ca_n\}$

تمرین در کلاس صفحه ۳۴:

۱- توضیح دهید که چرا دنباله $a_n=۲n+۱$ همگرا نمی‌باشد.

پاسخ: برهان خلف: فرض کنیم $\{۲n+۱\}$ همگرا به L باشد و $\varepsilon_\circ>۰$ دلخواه باشد. در این صورت عدد طبیعی M وجود دارد که برای $n\ge M$، $|۲n+۱-L|<\varepsilon_\circ$ باشد. در این صورت:

$$n\ge M:\ |۲n+۱-L|<\varepsilon_\circ \Rightarrow -\varepsilon_\circ<۲n+۱-L<\varepsilon_\circ \Rightarrow -\varepsilon_\circ+L-۱<۲n<\varepsilon_\circ+L-۱ \Rightarrow n<\frac{\varepsilon_\circ+L-۱}{۲}$$

که یک تناقض است. چون اعداد طبیعی از بالا کراندار نیستند.

۲- دنباله $۱,-\frac{۱}{۲},۲,-\frac{۲}{۳},۳,-\frac{۳}{۴},۴,-\frac{۴}{۵},۵,-\frac{۵}{۶},\ldots$ را در نظر بگیرید. ابتدا ضابطه این دنباله را معلوم کنید، سپس از این دنباله دو دنباله استخراج کنید که یکی همگرا و دیگری واگرا باشد.

پاسخ:

$$a_n=\begin{cases}-\dfrac{n}{n+۲} & n\ \text{زوج}\\[2mm] \dfrac{n+۱}{۲} & n\ \text{فرد}\end{cases}$$

دنباله‌ی واگرا $\{n\}$ و دنباله‌ای همگرا $\left\{\frac{-n}{n+۱}\right\}$ است که همگرا به ۱- می‌باشد.

مثال صفحه ۳۵: همگرایی دنباله $\left\{۳-\left(\frac{۱}{۲}\right)^n\right\}_{n=۱}$ را بررسی کنید.

پاسخ: با توجه به این که با افزایش n، $\left(\frac{۱}{۲}\right)^n$ به صفر نزدیک می‌شود، حدس می‌زنیم $\left\{۳-\left(\frac{۱}{۲}\right)^n\right\}$ به ۳ همگرا باشد. درستی حدس خود را نشان می‌دهیم. فرض کنیم $\varepsilon>۰$ عدد دلخواهی باشد، به دنبال عدد طبیعی M هستیم، به طوری که برای هر $n\geq M$، رابطه‌ی $\left|۳-\left(\frac{۱}{۲}\right)^n-۳\right|<\varepsilon$ برقرار باشد. از طرفی $\left|۳-\left(\frac{۱}{۲}\right)^n-۳\right|=\left(\frac{۱}{۲}\right)^n$، پس کافی است $\left(\frac{۱}{۲}\right)^n<\varepsilon$ و در نتیجه $۲^n>\frac{۱}{\varepsilon}$ و $n>\log_۲^{\frac{۱}{\varepsilon}}$. چون می‌خواهیم M عدد طبیعی باشد، کافی است M را به صورت $M=[\log_۲^{\frac{۱}{\varepsilon}}]+۱$ معرفی کنیم تا همه‌ی روابط موردنظر برقرار باشد.

مثال صفحه ۳۶: آیا دنباله $\{a_n\}$ با ضابطه $a_n=\sin\frac{n\pi}{۲}$ همگراست؟

پاسخ: خیر، با نوشتن جملات این دنباله خواهیم دید که جملاتش در اطراف یک عدد تجمع نمی‌کنند. $\left\{\sin\frac{n\pi}{۲}\right\}=۱,۰,-۱,۰,\ldots$

با برهان خلف این مطلب را ثابت می‌کنیم. برهان خلف: فرض کنیم دنباله‌ی $\left\{\sin\frac{n\pi}{۲}\right\}$ همگرا به L باشد. در این صورت طبق تعریف همگرایی داریم:

$$\forall\varepsilon>۰,\exists M\in\mathbb{N},\ n\geq M\ \Rightarrow\left|\sin\frac{n\pi}{۲}-L\right|<\varepsilon$$

با فرض $\varepsilon=\frac{۱}{۲}$، $M_۱$ای موجود است که برای $n\geq M_۱$، $\left|\sin\frac{n\pi}{۲}-L\right|<\frac{۱}{۲}$. بنابراین:

$$\left.\begin{array}{l} n\geq M_۱\ ,\ n=۲k\,(k\in\mathbb{N}):\sin\dfrac{n\pi}{۲}=۰\ \Rightarrow\ |۰-L|<\dfrac{۱}{۲}\\[2mm] n\geq M_۱\ ,\ n=۴k+۱\ (k\in\mathbb{N}):\sin\dfrac{n\pi}{۲}=۱\ \Rightarrow\ |۱-L|<\dfrac{۱}{۲}\end{array}\right\}\Rightarrow ۱=|۱-L+L|\leq|۱-L|+|L|<\frac{۱}{۲}+\frac{۱}{۲}=۱$$

که یک تناقض است. بنابراین فرض خلف باطل و $\left\{\sin\frac{n\pi}{۲}\right\}$ همگرا نمی‌باشد.

مسائل صفحه ۳۸:

۱- ابتدا حد دنباله $\left\{\frac{n-۱}{n}\right\}_{n=۱}$ را حدس بزنید و سپس حدس خود را به روش ε اثبات کنید.

پاسخ: $\frac{n-۱}{n}=۱-\frac{۱}{n}$ با افزایش n، $\frac{۱}{n}$ به صفر نزدیک می‌شود، در نتیجه حدس می‌زنیم $۱-\frac{۱}{n}$ به ۱ نزدیک شود. باید نشان دهیم:

$$\forall\varepsilon>۰\ ,\exists M\in\mathbb{N}:n\geq M\ \Rightarrow\left|\frac{n-۱}{n}-۱\right|<\varepsilon\Rightarrow\left|\frac{-۱}{n}\right|<\varepsilon\Rightarrow\ \frac{۱}{n}<\varepsilon\Rightarrow\ n>\frac{۱}{\varepsilon}$$

پس کافی است $M=\left[\frac{۱}{\varepsilon}\right]+۱$ باشد تا روابط فوق برقرار باشد.

۲- فرض کنیم $\{a_n\}_{n=1}$ یک دنباله همگرا باشد. همچنین فرض کنیم k عدد صحیح و ثابت است به قسمی که $n+k \geq 1$، دنباله $\{b_n\}_{n=1}$ را چنین تعریف می‌کنیم: $b_n = a_{n+k}$ برای مثال هرگاه $k = 2$ و $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots$ دنباله $\{a_n\}$ باشد، دنباله $\{b_n\}$ چنین است: $b_1 = a_3 , b_2 = a_4 , b_3 = a_5 , \dots , b_n = a_{n+2} , \dots$

یعنی: $a_3 , a_4 , a_5 , \dots , a_{n+2} , \dots$

همان دنباله $\{b_n\}_{n=1}$ است. ثابت کنید هرگاه $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = L$ ، آن‌گاه $\lim\limits_{n\to\infty} b_n = L$.

پاسخ: در واقع جملات دنباله‌ی b_n به صورت $a_{n+k} , a_{n+k+1} , \dots$ می‌باشد. برای نشان دادن این که $\lim\limits_{n\to\infty} b_n = L$،باید نشان دهیم که برای هر $\varepsilon > 0$، عدد طبیعی M وجود دارد به طوری که برای $n \geq M$ ، $|b_n - L| < \varepsilon$ باشد. فرض کنیم $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = L$ بنابراین:

$$\forall \varepsilon > 0 \ \exists M_1 \in \mathbb{N} : n \geq M_1 \Rightarrow |a_n - L| < \varepsilon$$

بنابراین :

$$n \geq M_1 - k \Rightarrow n+k \geq M_1 \Rightarrow |a_{n+k} - L| < \varepsilon \Rightarrow \xrightarrow{b_n = a_{n+k}} |b_n - L| < \varepsilon$$

پس کافیست $M = M_1 - k$ را در نظر بگیریم.

۳- فرض کنیم $\{P_n\}_{n=1}$ یک دنباله همگرا و $P_{n+1} = \dfrac{bP_n}{a + P_n}$ که در آن a و b اعدادی ثابت‌اند. با استفاده از مسأله ۷ حد دنباله $\{P_n\}_{n=1}$ را به دست آورید.

پاسخ: فرض کنیم $\lim\limits_{n\to\infty} P_n = L$ در این صورت طبق مسئله قبلی $\lim\limits_{n\to\infty} P_{n+1} = L$ و :

$$\lim_{n\to\infty} P_{n+1} = \lim_{n\to\infty} \frac{bP_n}{a+P_n} \Rightarrow L = \frac{\lim\limits_{n\to\infty} (bP_n)}{\lim\limits_{n\to\infty} (a+P_n)} \Rightarrow L = \frac{b(\lim\limits_{n\to\infty} P_n)}{a + \lim\limits_{n\to\infty} P_n} \Rightarrow L = \frac{bL}{a+L} \Rightarrow aL + L^2 = bL$$

$$\Rightarrow L^2 + (a-b)L = 0 \Rightarrow L(L + (a-b)) = 0 \Rightarrow \begin{cases} L = 0 \\ L = b-a \end{cases}$$

۴- کدام یک از دنباله‌های زیر همگراست؟ آن‌هایی را که فکر می‌کنید همگرا نیستند، واگرایی دنباله را توضیح دهید.

الف) $\left\{\left(\dfrac{1}{3}\right)^{n-1}\right\}_{n=1}$

پاسخ: دنباله‌ی هندسی با قدرنسبت $-1 < q < 1$ پس به صفر همگرا است.

ب) $\{3^n\}_{n=1}$

پاسخ: دنباله‌ی هندسی با قدرنسبت $q > 1$، واگراست.

$$\forall k > 0 \ , \ \exists M \in \mathbb{N} : n \geq M \Rightarrow 3^n > k \Rightarrow n\log_3^3 > \log_3 k \Rightarrow n > \log_3^k \Rightarrow M = [\log_3^k] + 1$$

ج) $\{\log n\}_{n=1}$

پاسخ: واگراست.

$$\forall k > 0 \ , \ \exists M \in \mathbb{N} : \ n \geq M \Rightarrow \log n > k \Rightarrow n > 10^k \Rightarrow M = [10^k] + 1$$

د) $\left\{\log \dfrac{1}{n}\right\}_{n=1}$

پاسخ: واگراست.

$$\forall k < 0 \ \exists M \in \mathbb{N} : n \geq M \Rightarrow \log\frac{1}{n} < k \Rightarrow \frac{1}{n} < 10^k \Rightarrow n > \frac{1}{10^k} \Rightarrow M = \left[\frac{1}{10^k}\right] + 1$$

تمرین در کلاس صفحه ۴۰:

ابتدا با حدسیه‌سازی مشخص کنید که کدام یک از دنباله‌ها واگرا به $+\infty$ یا واگرا به $-\infty$ است و سپس حدس خود را ثابت کنید.

۱) $\{n^2\}_{n=1}^{\infty}$

پاسخ: با بزرگ‌تر شدن n، n^2 نیز بزرگ و بزرگ‌تر می‌شود و حدس می‌زنیم $\lim\limits_{n\to\infty} n^2=+\infty$

$$\forall k>0\ \exists M\in\mathbb{N}, n\ge M \Rightarrow a_n>k \Rightarrow n^2>k \Rightarrow n>\sqrt{k}$$

پس کافی است $M=[\sqrt{k}]+1$ باشد تا روابط فوق صحیح شود.

۲) $\{1000-n^2\}_{n=1}^{\infty}$

پاسخ: با بزرگ‌تر شدن n، n^2 بزرگ و بزرگ‌تر می‌شود و $-n^2$ کوچک و کوچک‌تر می‌شود. پس حدس می‌زنیم $\lim\limits_{n\to\infty} 1000-n^2=-\infty$:

$$\forall k<0\ ,\ \exists M\in\mathbb{N}: n\ge M \Rightarrow a_n<k \Rightarrow 1000-n^2<k \Rightarrow n^2>1000-k \Rightarrow n>\sqrt{1000-k}$$

پس کافی است $M=[\sqrt{1000-k}]+1$ باشد.

۳) $\left\{\frac{1}{10^6}(n+1)\right\}_{n=1}^{\infty}$

پاسخ: وقتی n بزرگ می‌شود، $n+1$ نیز بزرگ و بزرگ‌تر می‌شود. پس حدس می‌زنیم $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{10^6}(n+1)=+\infty$

$$\forall k>0\ \exists M\in\mathbb{N}: n\ge M \Rightarrow a_n>k \Rightarrow \frac{n+1}{10^6}>k \Rightarrow n>10^6k-1$$

پس کافی است $M=[10^6k-1]+1$ که همان $[10^6k]$ است، انتخاب شود.

مسائل صفحه ۴۱:

۱- ثابت کنید:

الف) $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{n^2+1}{n}=\infty$.

پاسخ:

$$\forall k>0\ \exists M\in\mathbb{N}: n\ge M \Rightarrow a_n>k$$

اگر $n>k$ باشد، در اینصورت $n+\frac{1}{n}>n>k$ است، پس کافی است $M=[k]+1$ باشد.

ب) $\lim\limits_{n\to\infty}(-1)^n\frac{n^2+1}{n}$ **موجود نیست.**

پاسخ: چون جملات با اندیس فرد به $-\infty$ و با اندیس زوج به $+\infty$ میل می‌کنند، پس حد دنباله وجود ندارد.

۲- ثابت کنید هرگاه $\lim\limits_{n\to\infty}a_n=\infty$ آن‌گاه $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{a_n}=0$.

پاسخ: کافی است نشان دهیم:

$$\forall\varepsilon>0\ \exists M\in\mathbb{N}: n\ge M \quad \left|\frac{1}{a_n}-0\right|<\varepsilon$$

طبق فرض $\lim\limits_{n\to\infty}a_n=\infty$ بنابراین برای $k=\frac{1}{\varepsilon}$، عدد طبیعی M هست که برای $n\ge M$، $a_n>k$. پس برای همین M داریم: $|a_n|\ge a_n>\frac{1}{\varepsilon}$

و در نتیجه $\left|\frac{1}{a_n}\right|<\varepsilon$ پس $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{a_n}=0$.

۳- فرض کنیم همواره $a_n>0$ و $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{a_n}=0$. ثابت کنید $\lim\limits_{n\to\infty}a_n=\infty$.

پاسخ: کافی است نشان دهیم

$$\forall k>0\ \exists M\in\mathbb{N}: n\ge M \Rightarrow a_n>k$$

فرض کنیم $k>0$ باشد. چون $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{a_n}=0$ پس برای $\varepsilon=\frac{1}{k}$ عدد طبیعی M موجود است که $\forall n\geq M \Rightarrow \left|\frac{1}{a_n}-0\right|<\frac{1}{k}$ باشد. پس برای همین M داریم:

$$\frac{1}{a_n}=\left|\frac{1}{a_n}\right|<\frac{1}{k}\xrightarrow{a_n>0}a_n>k$$

۴- فرض کنیم همواره $a_n<0$ و $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{a_n}=0$. ثابت کنید $\lim\limits_{n\to\infty}a_n=-\infty$.

پاسخ: باید نشان دهیم $\forall k<0\ ,\ \exists M\in\mathbb{N}: n\geq M\Rightarrow a_n<k$. می‌دانیم $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{a_n}=0$. بنابراین به ازای $\varepsilon=-\frac{1}{k}>0$، $M\in\mathbb{N}$ موجود است، به طوری که برای $n\geq M$ داشته باشیم:

$$\left|\frac{1}{a_n}-0\right|<-\frac{1}{k}\xrightarrow{a_n<0}-\frac{1}{a_n}<-\frac{1}{k}\Rightarrow\frac{1}{a_n}>\frac{1}{k}\xrightarrow{a_n<0}a_n<k$$

پس برای همین M روابط برقرار است.

۵- فرض کنیم $a_n=\frac{5n^2-3n+11}{2n+1}$، $b_n=\frac{n^2-1}{6n^3+1}$، $c_n=\frac{3n^2+1}{2n^2+7}$ دنباله‌هایی از اعداد باشند. ثابت کنید:

$$\lim_{n\to\infty}a_n=\infty$$

پاسخ: کافی است نشان دهیم $\forall k>0\ \exists M\in\mathbb{N}:n\geq M\ \Rightarrow\ a_n>k$.

$$\frac{5n^2-3n+11}{2n+1}>k\Rightarrow\frac{(\frac{5}{2}n-\frac{11}{4})(2n+1)+\frac{33}{4}}{2n+1}>k\Rightarrow\frac{5}{2}n-\frac{11}{4}+\frac{33}{4(n+1)}>k$$

کافیست $\frac{5}{2}n-\frac{11}{4}>k$ باشد زیرا در اینصورت $\frac{5}{2}n-\frac{11}{4}+\frac{33}{4(n+1)}>\frac{5}{2}n-\frac{11}{4}>k$ می‌شود. بنابراین $\frac{5}{2}n>k+\frac{11}{4}$ و در نتیجه $n>\frac{2k}{5}+\frac{11}{10}$

پس با قرار دادن $M=[\frac{2k}{5}+\frac{11}{10}]+1$ همه روابط برقرار می‌شود.

$$\lim_{n\to\infty}b_n=0$$

پاسخ: کافی است نشان دهیم $\forall\varepsilon>0\ \exists M\in\mathbb{N}:n\geq M\Rightarrow\ |b_n-0|<\varepsilon$.

$$|b_n-0|<\varepsilon\Rightarrow\left|\frac{n^2-1}{6n^3+1}\right|<\varepsilon$$

کافیست $\left|\frac{n^2}{6n^3}\right|<\varepsilon$ باشد. زیرا $\left|\frac{n^2-1}{6n^3+1}\right|<\left|\frac{n^2}{6n^3+1}\right|<\left|\frac{n^2}{6n^3}\right|=\left|\frac{1}{6n}\right|$ پس $6n>\frac{1}{\varepsilon}$ و در نتیجه $n>\frac{1}{6\varepsilon}$ می‌شود. کافی است $M=[\frac{1}{6\varepsilon}]+1$ باشد.

$$\lim_{n\to\infty}c_n=\frac{3}{2}$$

پاسخ: کافی است نشان دهیم $\forall\varepsilon>0\ \exists M\in\mathbb{N}:n\geq M\Rightarrow\left|c_n-\frac{3}{2}\right|<\varepsilon$.

$$\left|c_n-\frac{3}{2}\right|<\varepsilon\Rightarrow\left|\frac{3n^2+1}{2n^2+7}-\frac{3}{2}\right|<\varepsilon\Rightarrow\left|\frac{6n^2+2-6n^2-21}{2(2n^2+7)}\right|<\varepsilon\Rightarrow\left|\frac{19}{2(2n^2+7)}\right|<\varepsilon\Rightarrow 2n^2+7>\frac{2\varepsilon}{19}\Rightarrow n>\sqrt{\frac{1}{2}(\frac{19}{2\varepsilon}-7)}$$

پس با قرار دادن $M=[\sqrt{\frac{1}{2}(\frac{19}{2\varepsilon}-7)}]+1$ همه روابط برقرار می‌شود.

تمرین در کلاس ۴۳:

الف) در مورد احکام زیر فکر کنید، می‌توانید با مثال‌ها کار کنید. اگر فکر می‌کنید درست‌اند، آن‌ها را توضیح دهید. و اگر فکر می‌کنید نادرست‌اند، نیز توضیح دهید.

۱- هر مجموعه از بالا کراندار دارای کوچک‌ترین کران بالا است.

پاسخ: اگر مجموعه‌ی مرجع به عنوان مثال $\mathbb{R}$ یا $\mathbb{N}$ یا $\mathbb{Z}$ باشد، این جمله درست می‌باشد. ولی اگر مثلاً $\mathbb{Q}$ باشد، برقرار نیست. مثال: $\{x\in\mathbb{Q}\,|\,x<\sqrt{x}\}$ از بالا کراندار است، ولی کوچک‌ترین کران بالا در $\mathbb{Q}$ ندارد.

۲- هر مجموعه از پایین کراندار دارای بزرگ‌ترین کران پایین است.

پاسخ: شبیه مورد ۱ اگر مجموعه‌ی مرجع مثلاً $\mathbb{R}$ یا $\mathbb{Z}$ یا $\mathbb{N}$ باشد، این جمله درست است ولی اگر $\mathbb{Q}$ باشد این جمله برقرار نیست. مثال: $\{x\in\mathbb{Q}\,|\,x>\sqrt{2}\}$ در $\mathbb{Q}$ کران پایین است، ولی بزرگ‌ترین کران پایین در $\mathbb{Q}$ ندارد.

۳- هرگاه A یک مجموعه کراندار و ناتهی باشد، هم کوچک‌ترین کران بالا و هم بزرگ‌ترین کران پایین دارد.

پاسخ: همواره درست نیست، مثلاً $\{x\in\mathbb{Q}\,|\,x^2<2\}$ در $\mathbb{R}$ و $\mathbb{Z}$ کوچک‌ترین کران بالا و بزرگ‌ترین کران پایین دارد، ولی در $\mathbb{Q}$ ندارد.

۴- هرگاه $B\subseteq A\neq\phi$ و $U\in B$ یک کران بالای B باشد، U یک کران بالای A نیز می‌باشد.

پاسخ: باید نشان دهیم $\forall x\in A: x\leq U$. می‌دانیم U یک کران بالای B است. بنابراین:

$$\forall x\in A \xrightarrow{A\subset B} x\in B \xrightarrow{\text{کران بالا برای } B\ U} x\leq U$$

(البته مسئله نیازی به شرط $U\in B$ ندارد.)

۵- حکمی نظیر ۴ در باب کران‌های پایین بیان کنید.

پاسخ: هرگاه $B\subseteq A\neq\phi$ و U یک کران پایین B باشد، U یک کران پایین A نیز است.

قضیه ۱ صفحه ۴۴: **فرض کنیم $\{a_n\}$ یک دنباله صعودی و از بالا کراندار باشد، در این صورت $\lim\limits_{n\to\infty} a_n$ وجود دارد. به عبارت دیگر هر دنباله صعودی و از بالا کراندار همگراست.**

پاسخ: اثبات: S را مجموعه مقادیر برد دنباله یعنی $S=\{a_n\,|\,n\in\mathbb{N}\}$ قرار می‌دهیم. واضح است که $S\neq\phi$ و چون $\{a_n\}$ از بالا کراندار است، پس S کران بالایی مانند K دارد. بنا بر اصل موضوع تمامیت S دارای کوچک‌ترین کران بالاست که آن را L می‌نامیم. نشان می‌دهیم $\lim\limits_{n\to\infty} a_n=L$. برای این منظور باید نشان دهیم $\forall\varepsilon>0\ ,\ \exists M\in\mathbb{N}: n\geq M: |a_n-L|<\varepsilon$. می‌دانیم به ازای هر n، $a_n\leq L$. فرض کنیم $\varepsilon>0$ عدد دلخواهی باشد. چون L کوچک‌ترین کران بالای S است، پس $L-\varepsilon$ یک کران بالای S نیست، زیرا $L-\varepsilon<L$. پس حداقل عضوی مانند a_N است که $L-\varepsilon<a_N$. چون دنباله‌ی $\{a_n\}$ صعودی است، پس برای هر $n\geq N$، $a_n\geq a_N>L-\varepsilon$ از طرف دیگر برای هر n داشتیم $a_n<L$ پس برای هر n که $n\geq N$ داریم:

$$L-\varepsilon<a_N\leq a_n\leq L<L+\varepsilon \ \Rightarrow |a_n-L|<\varepsilon$$

یعنی: $\lim\limits_{n\to\infty} a_n=L$

مثال صفحه ۴۴: **ثابت کنید دنباله $\left\{\sin\frac{\pi}{2n}\right\}_{n=1}$ همگراست.**

پاسخ: چون $n\geq 1$ است، پس $0<\frac{\pi}{2n}\leq\frac{\pi}{2}$. از طرفی تابع $\sin x$ در ناحیه اول صعودی و $\frac{\pi}{2n}$ دنباله‌ای نزولی است. پس $\sin\frac{\pi}{2n}$ دنباله‌ای نزولی می‌شود که جملات آن همگی مثبت است، پس صفر یک کران پایین آن می‌باشد. بنابراین دنباله‌ای نزولی و از پایین کراندار است پس همگراست.

تمرین در کلاس صفحه ۴۵:

۱- ابتدا نشان دهید که دنباله‌های زیر همگرا هستند.

الف) $\left\{1+\frac{1}{n^2+1}\right\}$ **ب)** $\left\{1-\frac{1}{n}\right\}$

سپس حد آن‌ها را حساب کنید.

پاسخ:

الف) $\left\{1+\frac{1}{n^{2}+1}\right\}: a_{1}=\frac{3}{2}, a_{2}=\frac{6}{5}, a_{3}=\frac{11}{10}, \ldots$

دنباله کراندار است، زیرا: $\forall n \in \mathbb{N}: n^{2} \geq 0 \Rightarrow n^{2}+1 \geq 1 \Rightarrow \frac{1}{n^{2}+1} \leq 1 \Rightarrow 1+\frac{1}{n^{2}+1} \leq 2 \Rightarrow a_{n} \leq 2 \xrightarrow{a_{n}>0} |a_{n}| \leq 2$

از طرفی دنباله نزولی است، زیرا:

$a_{n+1} \leq a_{n} \Leftrightarrow 1+\frac{1}{(n+1)^{2}+1} \leq 1+\frac{1}{n^{2}+1} \Leftrightarrow \frac{1}{n^{2}+2n+2} \leq \frac{1}{n^{2}+1} \Leftrightarrow n^{2}+2n+2 \geq n^{2}+1 \Leftrightarrow 2n \geq -1$ ✓ (همواره برقرار است.)

پس بنا بر قضیه ۱، دنباله همگراست. نشان می‌دهیم حد آن برابر ۱ است.

ادعا: $\lim\limits_{n \to \infty} 1+\frac{1}{n^{2}+1}=1$

$\forall \varepsilon>0\ \exists M \in \mathbb{N}: n \geq M \Rightarrow \left|1+\frac{1}{n^{2}+1}-1\right|<\varepsilon \Rightarrow \left|\frac{1}{n^{2}+1}\right|<\varepsilon \Rightarrow n^{2}+1>\frac{1}{\varepsilon} \Rightarrow n^{2}>\frac{1}{\varepsilon}-1 \Rightarrow n>\sqrt{\frac{1}{\varepsilon}-1}$

پس کافی است قرار دهیم $M=\left[\sqrt{\frac{1}{\varepsilon}-1}\right]+1$. (دقت کنید که اگر $\frac{1}{\varepsilon}-1$ عددی منفی باشد، M می‌تواند ۱ در نظر گرفته شود.)

ب) $\left\{1-\frac{1}{n}\right\}: a_{1}=0, a_{2}=\frac{1}{2}, a_{3}=\frac{2}{3}, \ldots$

دنباله کراندار است، زیرا: $\frac{1}{n} \geq 0 \Rightarrow -\frac{1}{n} \leq 0 \Rightarrow 1-\frac{1}{n} \leq 1 \Rightarrow |a_{n}| \leq 1$

از طرفی دنباله صعودی است، زیرا:

$a_{n} \leq a_{n+1} \Leftrightarrow 1-\frac{1}{n} \leq 1-\frac{1}{n+1} \Leftrightarrow \frac{1}{n} \geq \frac{1}{n+1} \Leftrightarrow n \leq n+1 \Leftrightarrow 0 \leq 1$ ✓ (همواره برقرار است.)

پس بنا بر قضیه‌ی ۱، این دنباله همگراست. نشان می‌دهیم حد آن ۱ می‌باشد:

ادعا: $\lim\limits_{n \to \infty} 1-\frac{1}{n}=1$

$\forall \varepsilon>0\ \exists M \in \mathbb{N}: n \geq M \Rightarrow |a_{n}-1|<\varepsilon \Rightarrow \left|1-\frac{1}{n}-1\right|<\varepsilon \Rightarrow \left|-\frac{1}{n}\right|<\varepsilon \Rightarrow \frac{1}{n}<\varepsilon \Rightarrow n>\frac{1}{\varepsilon}$

کافی است $M=\left[\frac{1}{\varepsilon}\right]+1$ باشد.

۲- دنباله $\{a_{n}\}$ چنین تعریف شده است: $(n=1,2,3,\ldots)$ $\quad a_{1}=1, a_{n+1}=\sqrt{7+a_{n}}$

الف) ثابت کنید که این دنباله همگراست.

پاسخ: نشان می‌دهیم دنباله صعودی و کران‌دار است. با کمک استقرا نشان می‌دهیم ۴ کران بالایی برای a_n است.

$n=1: a_{1}=1<4$ ✓

فرض استقراء: $n=k: a_{k} \leq 4$

حکم: $n=k+1: a_{k+1}<4$

اثبات: $a_{k+1}=\sqrt{7+a_{k}} \leq \sqrt{7+4}<\sqrt{16} \Rightarrow a_{k+1} \leq 4$

از طرفی $\frac{a_{n+1}}{a_{n}}=\frac{\sqrt{7+a_{n}}}{a_{n}}=\sqrt{\frac{7}{a_{n}}+1}>1$ پس $\{a_{n}\}$ صعودی است. پس در کل همگراست.

ب) حد این دنباله را به دست آورید.

پاسخ:

$$\lim_{n \to \infty} a_{n+1}=\lim_{n \to \infty} \sqrt{7+a_{n}}=\sqrt{7+\lim_{n \to \infty} a_{n}} \Rightarrow L=\sqrt{7+L} \Rightarrow L^{2}-L-7=0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} L=\frac{1+\sqrt{29}}{2} \\ L=\frac{1-\sqrt{29}}{2} \end{cases}$$ غ.ق.ق چون جملات $\{a_n\}$ همگی مثبت‌اند

قضیه صفحه ۴۵: هر عدد حقیقی حد دنباله‌ای از اعداد گویا است.

پاسخ: اثبات: فرض کنیم u عدد حقیقی دلخواهی باشد. دو حالت را در نظر می‌گیریم: ۱- u عددی گویا باشد. ۲- u عددی گنگ باشد. حالت اول: u عددی گویاست. برای هر n قرار می‌دهیم $u_n = u$. پس $\{u_n\}$ دنباله‌ای ثابت و متشکل از اعداد گویای u بوده و واضح است که $\lim\limits_{n\to\infty} u_n = u$.

حالت دوم: u عددی گنگ است. بسط اعشاری u را در نظر می‌گیریم: $u = u_0/u_1u_2u_3\ldots u_n\ldots$

که در آن u_0 جزء صحیح u است و عددی صحیح می‌باشد و چون u گنگ است، پس بسط اعشاری u نامتناهی و البته نامنظم (متناوب نیست) می‌باشد. قرار می‌دهیم:

$$r_1 = u_0/u_1$$
$$r_2 = u_0/u_1u_2$$
$$\vdots$$
$$r_n = u_0/u_1u_2\ldots u_n$$

در واقع $\{r_n\}$ دنباله‌ی تقریبات اعشاری عدد u می‌باشد. هر r_n عددی گویاست، زیرا بسط اعشاری مختوم دارد.

از طرفی $0 < u - r_n = 0/\underbrace{00\cdots0}_{\text{n تا}}u_{n+1}u_{n+1}\cdots$ در نتیجه:

$$10^n\,|u-r_n| = 0/u_{n+1}u_{n+2}\cdots < 1 \Rightarrow 0 < |u-r_n| < \frac{1}{10^n}$$

چون $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{10^n}=0$، به ازای هر عدد دلخواه $\varepsilon>0$، Nای هست که برای هر $n\geq N$، $\frac{1}{10^n}<\varepsilon$. در نتیجه برای هر n که $n\geq N$ باشد، $|u-r_n|<\frac{1}{10^n}<\varepsilon$ یعنی $\lim\limits_{n\to\infty} r_n = u$.

قضیه ۲ صفحه ۴۷: دنباله $\{b_n\}$ با ضابطه $b_n=\left(1-\frac{1}{n}\right)^n$ صعودی است.

پاسخ: اثبات: نشان می‌دهیم برای هر n، $\frac{b_{n+1}}{b_n}>1$.

$$\frac{b_{n+1}}{b_n}=\frac{\left(1-\frac{1}{n+1}\right)^{n+1}}{\left(1-\frac{1}{n}\right)^n}=\frac{\left(1-\frac{1}{n+1}\right)^{n+1}}{\left(1-\frac{1}{n}\right)^{n+1}}\times\left(1-\frac{1}{n}\right)=\left(\frac{\frac{n}{n+1}}{\frac{n-1}{n}}\right)^{n+1}\left(1-\frac{1}{n}\right)=\left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)^{n+1}\left(1-\frac{1}{n}\right)=\left(1+\frac{1}{n^2-1}\right)^{n+1}\left(1-\frac{1}{n}\right)$$

از طرفی طبق نامساوی برنولی داریم: $\left(1+\frac{1}{n^2-1}\right)^{n+1}>1+(n+1)\left(\frac{1}{n^2-1}\right)$ بنابراین:

$$\frac{b_{n+1}}{b_n}=\left(1+\frac{1}{n^2-1}\right)^{n+1}\left(1-\frac{1}{n}\right)>\left(1+\frac{n+1}{n^2-1}\right)\left(1-\frac{1}{n}\right)\Rightarrow\frac{b_{n+1}}{b_n}>\left(1+\frac{1}{n-1}\right)\left(1-\frac{1}{n}\right)=1$$

قضیه ۳ صفحه ۴۸: دنباله $\{b_n\}$ با ضابطه $a_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^n$ صعودی است.

پاسخ: کافی است ثابت کنیم برای هر n، $\frac{a_{n+1}}{a_n}>1$. داریم:

$$\frac{a_{n+1}}{a_n}=\frac{\left(1+\frac{1}{n+1}\right)^{n+1}}{\left(1+\frac{1}{n}\right)^{n}}=\left(\frac{1+\frac{1}{n+1}}{1+\frac{1}{n}}\right)^{n+1}\times\left(1+\frac{1}{n}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{a_{n+1}}{a_n}=\left(\frac{\frac{n+2}{n+1}}{\frac{n+1}{n}}\right)^{n+1}\left(1+\frac{1}{n}\right)=\left(\frac{n^2+2n}{(n+1)^2}\right)^{n+1}\left(1+\frac{1}{n}\right)=\left(1-\frac{1}{(n+1)^2}\right)^{n+1}\left(1+\frac{1}{n}\right)$$

بنا بر نامساوی برنولی $\left(1-\frac{1}{(n+1)^2}\right)^{n+1}>\left(1-\frac{n+1}{(n+1)^2}\right)$ بنابراین:

$$\frac{a_{n+1}}{a_n}=\left(1-\frac{1}{(n+1)^2}\right)^{n+1}\left(1+\frac{1}{n}\right)>\left(1-\frac{n+1}{(n+1)^2}\right)\left(1+\frac{1}{n}\right)=1$$

قضیه ۴ صفحه ۴۸: دنباله $\{b_n\}$ با ضابطه $a_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^n$ از بالا کراندار است.

پاسخ: بنا بر قضیه ۲ داریم دنباله‌ی $\{b_n\}$ با ضابطه $b_n=\left(1-\frac{1}{n}\right)^n$ صعودی می‌باشد. از طرفی چون $b_2=\frac{1}{4}$ پس برای هر n، $b_n>\frac{1}{\varepsilon}$. پس برای هر n، $a_nb_n>a_n\times\frac{1}{\varepsilon}$ از طرفی:

$$a_nb_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^n\left(1-\frac{1}{n}\right)^n=\left(1-\frac{1}{n^2}\right)^n<1$$

بنابراین $\frac{1}{\varepsilon}a_n<a_nb_n<1$ پس $a_n<\varepsilon$ و $\{a_n\}$ از بالا کراندار است.

مثال صفحه ۴۹: ثابت کنید که دنباله $\left\{\left(1+\frac{1}{n}\right)^{n+1}\right\}$ نزولی است.

پاسخ: کافی است ثابت کنیم که $\frac{a_n}{a_{n+1}}>1$، داریم:

$$\frac{a_n}{a_{n+1}}=\frac{\left(1+\frac{1}{n}\right)^{n+1}}{\left(1+\frac{1}{n+1}\right)^{n+2}}=\left(\frac{1+\frac{1}{n}}{1+\frac{1}{n+1}}\right)^{n+1}\times\frac{1}{1+\frac{1}{n+1}}=\left(1+\frac{1}{n(n+2)}\right)^{n+1}\times\frac{1}{1+\frac{1}{n+1}}$$

و اما طبق نامساوی برنولی داریم:

$$\left(1+\frac{1}{n(n+2)}\right)^{n+1}\geq 1+\frac{n+1}{n(n+2)}>1+\frac{n+1}{(n+1)^2}=1+\frac{1}{n+1}$$

بنابراین:

$$\frac{a_n}{a_{n+1}}>\left(1+\frac{1}{n+1}\right)\times\frac{1}{\left(1+\frac{1}{n+1}\right)}=1$$

و یا:

$$\frac{a_n}{a_{n+1}}>1$$

تمرین در کلاس صفحه ۴۹:

۱- حد دنباله‌های زیر را حدس بزنید.

$$a_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^{2n}\qquad b_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^{3n}\qquad c_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^{\frac{n}{2}}$$

راهنمایی: از قاعده توان‌های مکرر استفاده کنید: $[(a)^{\alpha}]^{\beta}=(a)^{\alpha\beta}$

پاسخ:

$$a_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^{2n} \Rightarrow \lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^{2n}=\left(\lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^{n}\right)^{2}=e^{2}$$

$$b_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^{3n} \Rightarrow \lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^{3n}=\left(\lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^{n}\right)^{3}=e^{3}$$

$$c_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^{\frac{n}{2}} \Rightarrow \lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^{\frac{n}{2}}=\left(\lim\left(1+\frac{1}{n}\right)^{n}\right)^{\frac{1}{2}}=e^{\frac{1}{2}}=\sqrt{e}$$

۲- از ماشین حساب و یا رایانه خود استفاده کرده و عدد e را تا ۱۰ رقم اعشار به دست آورید.

پاسخ:

$e=2/7182818284$

۳- حاصل $(1+0/01)^{100}$ را به دست آورید و با عدد e مقایسه کنید.

پاسخ:

$(1+0/01)^{100}=2/7048138$

قضیه ۶ (قضیه فشردگی) صفحه ۵۰: فرض کنیم $\{a_n\}$ و $\{b_n\}$ دو دنباله و $\lim_{n\to\infty} a_n=\lim_{n\to\infty} b_n=L$ ، همچنین فرض کنیم $\{c_n\}$ دنباله‌ای باشد به قسمی که برای هر n ، $a_n\le c_n\le b_n$. در این صورت $\{c_n\}$ نیز همگراست و $\lim_{n\to\infty} c_n=L$.

پاسخ: اثبات: فرض کنیم $\varepsilon>0$ عدد حقیقی دلخواهی باشد. چون $\lim_{n\to\infty} b_n=L$ بنابراین عدد $M_1\in\mathbb{N}$ وجود دارد، به طوری که برای هر $n\ge M_2$ داشته باشیم $|a_n-L|<\varepsilon$. حال فرض می‌کنیم $M=Max\{M_1,M_2\}$ باشد و $n\ge M$. چون $M\ge M_1$ و $M\ge M_2$ بنابراین $n\ge M_1$ و $n\ge M_2$ و داریم $|b_n-L|<\varepsilon$ و $|a_n-L|<\varepsilon$. بنابراین $L-\varepsilon<b_n<L+\varepsilon$ و $L-\varepsilon<a_n<L+\varepsilon$. از طرفی برای هر n، $a_n\le c_n\le b_n$ پس برای هر $n\ge M$، $L-\varepsilon<a_n\le c_n\le b_n<L+\varepsilon$ یعنی $|c_n-L|<\varepsilon$ و بنابراین $\lim_{n\to\infty} c_n=L$

مثال صفحه ۵۱: می‌دانیم $\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n^k}=0$ که در آن k عددی طبیعی است در همگرایی دنباله‌های زیر بحث کنید.

الف) $\left\{\frac{2n^2-n-1}{5n^2+n-3}\right\}$

پاسخ: داریم:

$$\frac{2n^2-n-1}{5n^2+n-3}=\frac{2-\frac{1}{n}-\frac{1}{n^2}}{5+\frac{1}{n}-\frac{3}{n^2}}$$

اما:

$$\lim_{n\to\infty}\left(2-\frac{1}{n}-\frac{1}{n^2}\right)=\lim_{n\to\infty}2-\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}-\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n^2}=2-0=2$$

$$\lim_{n\to\infty}\left(5+\frac{1}{n}-\frac{3}{n^2}\right)=\lim_{n\to\infty}5+\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}-3\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n^2}=5+0-0=5$$

در نتیجه:

$$\lim_{n\to\infty}\frac{2n^2-n-1}{5n^2+n-3}=\frac{2}{5}$$

ب) $\left\{\frac{\cos n}{n}\right\}$

پاسخ: می‌دانیم همواره $-1 \le \cos x \le 1$ در نتیجه برای هر عدد طبیعی n، $\frac{-1}{n} \le \frac{\cos n}{n} \le \frac{1}{n}$. از طرفی چون $\lim_{n\to\infty}\frac{-1}{n} = \lim_{n\to\infty}\frac{1}{n} = 0$ پس طبق قضیه فشردگی $\lim_{n\to\infty}\frac{\cos n}{n} = 0$.

مسائل صفحه ۵۲:

در هر یک از تمرین‌های زیر مشخص کنید که آیا دنباله موردنظر:

الف) (از بالا یا پایین) کراندار است.

ب) جملات دنباله مثبت یا منفی‌اند.

ج) صعودی یا نزولی و یا نوسانی‌اند.

د) همگرا یا واگراست؛ و اگر واگراست به $+\infty$ و یا واگرا به $-\infty$ و یا هیچ یک.

۱- $\left\{\frac{5n^2}{n^2+1}\right\}$

پاسخ: $a_n = \frac{5n}{n^2+1} = \frac{5n^2+5-5}{n^2+1} = \frac{5(n^2+1)-5}{n^2+1} = 5-\frac{5}{n^2+1} \Rightarrow |a_n| \le 5 \Rightarrow$ a_n کراندار است

از طرفی جملات دنباله همگی مثبت‌اند و همچنین واضح است که در $a_n = 5-\frac{5}{n^2+1}$، با افزایش n، n^2+1 افزایش پس $\frac{5}{n^2+1}$ کاهش می‌یابد.

پس $a_n = 5-\frac{5}{n^2+1}$ افزایش می‌یابد. پس a_n صعودی است و $\lim_{n\to\infty} a_n = \lim_{n\to\infty}\frac{5n^2}{n^2+1} = \lim_{n\to\infty}\frac{5}{1+\frac{1}{n^2}} = \frac{5}{1+\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n^2}} = 5$.

۲- $\left\{\frac{2n}{n^2+1}\right\}$

پاسخ: جملات دنباله مثبت‌اند، از طرفی $\frac{2}{n+\frac{1}{n}} = \frac{2n}{n(n+\frac{1}{n})} = \frac{2n}{n^2+1}$ و می‌دانیم که جمع هر عدد مثبت و معکوس آن بزرگتر یا مساوی ۲ است پس

$n+\frac{1}{n} \ge 2 \Rightarrow \frac{2}{n+\frac{1}{n}} \le 1$ بنابراین $0 < a_n \le 1$ است و دنباله‌ای کراندار است، همچنین با افزایش n مخرج بزرگ و بزرگتر می‌شود پس حس می‌زنیم دنباله نزولی و همگرا به صفر است.

$$a_n \le a_{n+1} \Leftrightarrow \frac{2}{n+\frac{1}{n}} \le \frac{2}{n+1+\frac{1}{n+1}} \Leftrightarrow n+\frac{1}{n} \ge n+1+\frac{1}{n+1} \Leftrightarrow \frac{1}{n}-\frac{1}{n+1} < 1 \Leftrightarrow \frac{1}{n(n+1)} < 1 \Leftrightarrow n(n+1) > 1 \checkmark$$ (همواره برقرار است.)

$$\lim_{n\to\infty} a_n = \lim_{n\to\infty}\frac{2}{n+\frac{1}{n}} = 0$$

۳- $\left\{4+\frac{(-1)^n}{n}\right\}$

پاسخ: جملات دنباله مثبت، و چون $-1 \le \frac{(-1)^n}{n} \le 1$ پس $3 \le 4+\frac{(-1)^n}{n} \le 5$ و دنباله کراندار است، همچنین دنباله غیریکنوا و همگرا به ۴ است.

$$\lim_{n\to\infty} a_n = \lim_{n\to\infty} 4+\frac{(-1)^n}{n} = 4+\lim_{n\to\infty}\frac{(-1)^n}{n} = 4$$

۴- $\left\{\sin\frac{1}{n}\right\}$

پاسخ: جملات دنباله مثبت و دنباله کراندار است زیرا $1 > \sin\frac{1}{n} > 0 \Leftarrow \frac{\pi}{2} > 1 \geq \frac{1}{n} > 0$، همچنین با افزایش n و کاهش $\frac{1}{n}$، مقدار $\sin\frac{1}{n}$ در ناحیه اول کاهش می‌یابد و دنباله نزولی می‌باشد. دنباله همگرا به صفر است زیرا : $\lim\limits_{n\to\infty} \sin\frac{1}{n} = \sin(\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{n}) = \sin(0) = 0$.

۵- $\left\{\frac{n^2-1}{n}\right\}$

پاسخ: در این دنباله $a_n \geq 0$ است. پس جملات نامنفی و دنباله از پایین کراندار است. از طرفی $\frac{n^2-1}{n} = n - \frac{1}{n}$ و $\{n\}$ و $\{-\frac{1}{n}\}$ هر دو صعودی‌اند. پس دنباله $\left\{\frac{n^2-1}{n}\right\}$ صعودی است. از روش مشتق نیز می‌توان صعودی بودن دنباله را نشان داد. همچنین $n - \frac{1}{n} > n$ پس دنباله از بالا کراندار نیست و $\lim\limits_{n\to\infty} \frac{n^2-1}{n} = \lim\limits_{n\to\infty}(n-\frac{1}{n}) = \infty$.

۶- $\left\{\frac{\sin n}{n}\right\}$

پاسخ: $-1 \leq -\frac{1}{n} \leq \frac{\sin n}{n} \leq \frac{1}{n} \leq 1$ بنابراین دنباله کراندار است و چون با افزایش n کمان n در ناحیه‌های مختلف قرار می‌گیرد، جملات آن مثبت و منفی می‌شود. پس دنباله غیریکنوا است و چون $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{1}{n} = \lim\limits_{n\to\infty} -\frac{1}{n} = 0$ ، طبق قضیه فشردگی $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{\sin n}{n} = 0$ و دنباله همگراست.

۷- $\left\{n\cos\frac{n\pi}{2}\right\}$

پاسخ: با نوشتن چند جمله از این دنباله داریم $0, -2, 0, 4, 0, -6, 0, \dots$ پس دنباله بی‌کران، با جملات مثبت و منفی (غیریکنوا) و واگراست.

۸- $\left\{n\sin\frac{n\pi}{2}\right\}$

پاسخ: باز هم چند جمله اول آن را می‌نویسیم: $1, 0, -3, 0, 5, 0, -7, 0, \dots$ پس دنباله بی‌کران، با جملات مثبت و منفی (غیریکنوا) و واگراست.

۹- $\left\{n\cos\frac{(-1)^n}{n}\right\}$

پاسخ: می‌دانیم $\left\{n\cos\frac{(-1)^n}{n}\right\} = \left\{n\cos\frac{1}{n}\right\}$ زیرا $\cos(-x) = \cos x$ **و چون** $\cos\frac{1}{n} > 0$ **پس** $n\cos\frac{1}{n} > 0$ **و** جملات مثبت و دنباله از پایین کراندار می‌شود و چون $\{n\}$ و $\left\{\cos\frac{1}{n}\right\}$ هر دو صعودی‌اند($\left\{\cos\frac{1}{n}\right\}$ ترکیب دو تابع نزولی $\left\{\frac{1}{x}\right\}, \cos x$ است. پس صعودی می‌باشد.)، پس حاصل‌ضرب آن‌ها نیز صعودی است.. در ادامه نشان می‌دهیم دنباله از بالا کراندار نیست. چون در ناحیه اول $\sin x \leq x$ **بنابراین** $\sin(\frac{1}{2n}) \leq \frac{1}{2n}$ و

$$a_n = n\cos\frac{1}{n} = n(1-2\sin^2(\frac{1}{2n})) \xrightarrow[\sin(\frac{1}{2n})\leq\frac{1}{2n}]{\sin x \leq x} n(1-2\sin^2(\frac{1}{2n})) \geq n(1-2(\frac{1}{2n})^2) \Rightarrow a_n \geq n - \frac{1}{2n}$$

از طرفی چون $\lim\limits_{n\to\infty} n - \frac{1}{2n} = +\infty$ پس $\{a_n\}$ از بالا کراندار نیست.

۱۰- ثابت کنید $\lim\limits_{n\to\infty}\sqrt{n} = +\infty$. آیا از این می‌توان نتیجه گرفت که $\lim\limits_{n\to\infty}\sqrt{n+1} = +\infty$ ؟

پاسخ:

$$\lim_{n\to\infty}\sqrt{n} = \infty \Rightarrow \forall k > 0, \exists M \in \mathbb{N} : n \geq M \Rightarrow \sqrt{n} > k \xrightarrow{\sqrt{n+1} > \sqrt{n}} \sqrt{n+1} \geq k$$

$$\Rightarrow \forall k > 0\ \exists M \in \mathbb{N} : n \geq M \Rightarrow \sqrt{n+1} > k \Rightarrow \lim_{n\to\infty}\sqrt{n+1} = +\infty$$

۱۱- همگرایی، واگرایی و واگرایی به $+\infty$ یا $-\infty$ دنباله‌های زیر را بررسی کنید.

الف) $\left\{\frac{n^2-1}{n}\right\}$

پاسخ:
$$\lim_{n\to\infty}\frac{n^2-1}{n}=\lim_{n\to\infty}\frac{n^2\left(1-\frac{1}{n^2}\right)}{n}=\lim_{n\to\infty}\frac{n^2}{n}=+\infty$$

ب) $\left\{(-1)^n\frac{n+1}{n}\right\}$

پاسخ: دنباله واگرا. زیردنباله‌ی جملات زوج به $+\infty$ و زیردنباله جملات فرد به $-\infty$ واگراست.

ج) $\left\{\frac{n}{\sqrt{n+1}}\right\}$

پاسخ:
$$\lim_{n\to\infty}\frac{n}{\sqrt{n+1}}=\lim_{n\to\infty}\frac{n}{\sqrt{n}\left(\sqrt{1+\frac{1}{n}}\right)}=\lim_{n\to\infty}\frac{n}{\sqrt{n}}=+\infty$$

۱۲- فرض کنیم $\{a_n\}$ یک دنباله همگرا و برای هر n داشته باشیم $100a_n=452+a_n$. حد این دنباله را پیدا کنید.

پاسخ:
$$100a_n=452+a_n \Rightarrow 99a_n=452 \Rightarrow a_n=\frac{452}{99}$$

بنابراین $\{a_n\}$ دنباله ثابت می‌باشد و $\lim_{n\to\infty}a_n=\frac{452}{99}$.

۱۳- فرض کنیم دنباله $\{p_n\}$ همگرا و a و b دو عدد ثابت باشند، به قسمی که $p_{n+1}=\frac{bp_n}{a+p_n}$، حد دنباله $\{p_n\}$ را حساب کنید.

پاسخ: (**قبلا حل شده است.**) فرض کنیم $\{p_n\}$ به L همگرا باشد. در این صورت $\lim_{n\to\infty}p_n=\lim_{n\to\infty}p_{n+1}=L$. بنابراین:

$$\lim_{n\to\infty}p_{n+1}=\lim_{n\to\infty}\frac{bp_n}{a+p_n}\Rightarrow L=\frac{\lim_{n\to\infty}(bp_n)}{\lim_{n\to\infty}(a+p_n)}\Rightarrow L=\frac{b(\lim_{n\to\infty}p_n)}{a+\lim_{n\to\infty}p_n}\Rightarrow L=\frac{bL}{a+L}\Rightarrow aL+L^2=bL$$

$$\Rightarrow L^2+(a-b)L=0 \Rightarrow L(L+(a-b))=0 \Rightarrow \begin{cases}L=0\\ L=b-a\end{cases}$$

۱۴- حد دنباله‌های روبه‌رو را به دست آورید. $\left\{\left(1+\frac{1}{n}\right)^{\frac{n}{2}}\right\}$ و $\left\{\left(1+\frac{1}{n}\right)^{2n}\right\}$

راهنمایی: **از این قضیه که هرگاه $\lim_{n\to\infty}a_n=\alpha$ (دنباله $\{a_n\}$ با مقادیر مثبت همگرا به عدد مثبت α باشد) و $\lim_{n\to\infty}b_n=\beta$ یعنی $\{a_n\}$ و $\{b_n\}$ دو دنباله همگرا باشند، دنباله $\{a_n^{b_n}\}$ نیز همگراست و $\lim_{n\to\infty}(a_n^{b_n})=(\lim_{n\to\infty}a_n)^{\lim_{n\to\infty}b_n}=\alpha^\beta$ استفاده کنید. ($\alpha>0$ و β دو عدد حقیقی‌اند.)**

پاسخ:

$$\lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^{\frac{n}{2}}=\lim_{n\to\infty}\left[\left(1+\frac{1}{n}\right)^n\right]^{\frac{1}{2}}=\left[\lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^n\right]^{\frac{1}{2}}=e^{\frac{1}{2}}=\sqrt{e}$$

$$\lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^{2n}=\lim_{n\to\infty}\left[\left(1+\frac{1}{n}\right)^n\right]^2=\left[\lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^n\right]^2=e^2$$

فصل سوم

تمرین در کلاس صفحه ۵۷:

تابع $f(x)=\frac{x^۳-۱}{x-۱}$ را در نظر می‌گیریم.

۱- پنج جمله‌ی اول هر کدام از دنباله‌های $\{۱-(۰/۱)^{n-۱}\}$ و $\{۱+(۰/۱)^{n-۱}\}$ را بنویسید و حدس بزنید هر کدام از دو دنباله به چه عددی همگرا هستند؟

پاسخ:

$\{۱-(۰/۱)^{n-۱}\}: a_۱=۱, a_۲=۰/۹, a_۳=۰/۹۹, a_۴=۰/۹۹۹, a_۵=۰/۹۹۹۹$

$\{۱+(۰/۱)^{n-۱}\}: b_۱=۱, b_۲=۱/۱, b_۳=۱/۰۱, b_۴=۱/۰۰۱, b_۵=۱/۰۰۰۱$

هر دو دنباله به عدد ۱ نزدیک می‌شوند.

۲- جدول زیر را تکمیل کنید.

x از چپ به عدد ۱ نزدیک می‌شود — **x از راست به عدد ۱ نزدیک می‌شود**

x	۰	۰/۹	۰/۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۱	۱/۰۰۰۱	۱/۰۰۱	۱/۰۱	۱/۱	۱
f(x)	۱	۲/۹۷۱	۲/۹۷۰۱	۲/۹۹۷۰۰۱	۲/۹۹۹۷۰۰۰۱	؟	۳/۰۰۰۳۰۰۰۱	۳/۰۰۳۰۰۱	۳/۰۳۰۱	۳/۳۱	۳

f(x) به عدد ۳ نزدیک می‌شود — **f(x) به عدد ۳ نزدیک می‌شود**

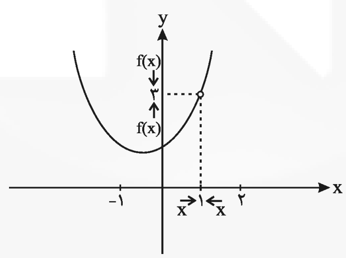
۳- نمودار تابع f را در صفحه‌ی مختصات رسم کنید و سپس به کمک نمودار تابع حدس بزنید که اگر x با مقادیر بزرگ‌تر از ۱ به ۱ نزدیک شود و هم‌چنین x را با مقادیر کوچک‌تر از ۱ به ۱ نزدیک کنیم، f(x) به چه عددی نزدیک خواهدشد؟

پاسخ: ۳

برای رسم تابع ابتدا آن را ساده‌تر می‌نویسیم:

$$f(x)=\frac{x^۳-۱}{x-۱}=x^۲+x+۱ \qquad x\neq ۰$$

$$x_{min}=\frac{-b}{۲a}=\frac{-۱}{۲}, f(-\frac{۱}{۲})=\frac{۳}{۴}$$



تمرین در کلاس صفحه ۶۰:

ویژگی‌ها و وضعیت مقادیر تابع $f(x)=\frac{x}{\sqrt{x+۱}-۱}$ به ازای چهار جمله‌ی اول دنباله‌های $\{(۰/۱)^n\}$ و $\{-(۰/۱)^n\}$ را در نزدیکی $x=۰$ با تنظیم جدول و رسم نمودار تابع توصیف کنید و سپس $\lim_{x\to ۰} f(x)$ را تخمین بزنید.

پاسخ:

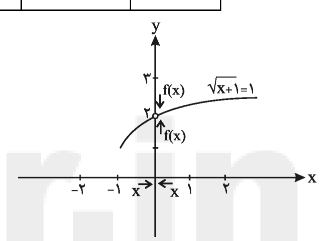
$\{(۰/۱)^n\}: a_۱=۰/۱, a_۲=۰/۰۱, a_۳=۰/۰۰۱, a_۴=۰/۰۰۰۱$

$\{-(۰/۱)^n\}: b_۱=-۰/۱, b_۲=-۰/۰۱, b_۳=-۰/۰۰۱, b_۴=-۰/۰۰۰۱$

x	۰/۱	-۰/۰۱	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۰۱	۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۱
f(x)	۱/۹۴۹	۱/۹۹۴	۱/۹۹۹۴	۱/۹۹۹۹۴	؟	۲/۰۰۰۰۴	۲/۰۰۰۴	۲/۰۰۴	۲/۰۴۸

$$f(x)=\frac{x}{\sqrt{x+۱}-۱}\overset{x\neq ۰}{=\!=}\frac{x(\sqrt{x+۱}+۱)}{(\sqrt{x+۱}-۱)(\sqrt{x+۱}+۱)}=\frac{x(\sqrt{x+۱}+۱)}{x}=\sqrt{x+۱}+۱$$

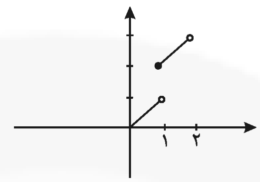
$$\lim_{x\to ۰} f(x)=۲$$



تمرین در کلاس صفحه ۶۱:

ابتدا نمودار تابع $f(x)=x+[x]$ را در بازه $[0,2)$ رسم کنید و سپس مقادیر $\lim\limits_{x\to 1^-} f(x)$ و $\lim\limits_{x\to 1^+} f(x)$ را تخمین بزنید. آیا $\lim\limits_{x\to 1} f(x)$ وجود دارد؟

پاسخ:



$f(x)=x+[x] \qquad D=[0,2)$

$0\le x<1 \Rightarrow [x]=0 \Rightarrow f(x)=x$

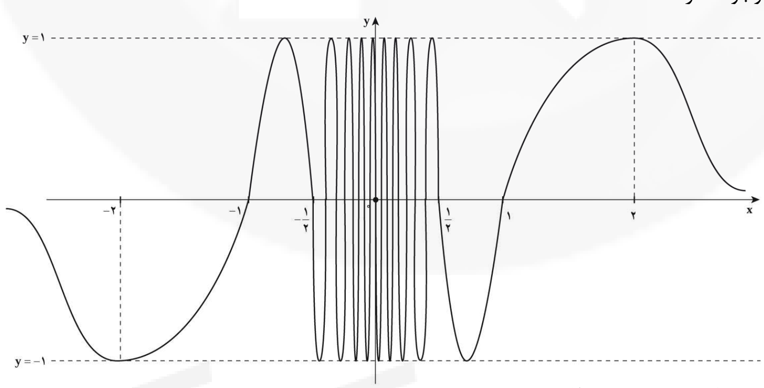
$1\le x<2 \Rightarrow [x]=1 \Rightarrow f(x)=x+1$

$\left.\begin{array}{l}\lim\limits_{x\to 1^-} f(x)=1\\ \lim\limits_{x\to 1^+} f(x)=2\end{array}\right\} \Rightarrow \lim\limits_{x\to 1} f(x)$ وجود ندارد.

طرح یک مسأله صفحه ۶۰:

وجود حدهای $\lim\limits_{x\to 0^+}\sin\frac{\pi}{x}$ و $\lim\limits_{x\to 0^-}\sin\frac{\pi}{x}$ را بررسی کنید. (اصطلاحاً گوییم رفتار تابع $f(x)=\sin\frac{\pi}{x}$ را در مجاورت $x=0$ بررسی کنید.)

پاسخ: برای بررسی $\lim\limits_{x\to 0^+}\sin\frac{\pi}{x}$، دنباله‌هایی را در نظر می‌گیریم که با مقادیر بزرگ‌تر از صفر به صفر میل کند. دو دنباله‌ی $a_n=\frac{1}{n}$ و $b_n=\frac{2}{4n+1}$ را در نظر می‌گیریم. $\{a_n\}$ همگرا به صفر است و جملات دنباله‌ی $\{f(a_n)\}$ همگی برابر صفر هستند. پس این دنباله همگرا به صفر است. از طرفی $\{b_n\}$ نیز همگرا به صفر است، در صورتی که جملات دنباله‌ی $\{f(b_n)\}$ همگی برابر ۱ می‌باشد. پس این دنباله به ۱ همگراست. بنابراین $\{a_n\}$ و $\{b_n\}$ هر دو با مقادیر مثبت همگرا به صفر هستند، در صورتی که دنباله‌های به دست آمده برای مقادیر تابع به یک عدد ثابت و مشخص همگرا نیستند. پس $\lim\limits_{x\to 0^+}\sin\frac{\pi}{x}$ وجود ندارد.



به طور مشابه با در نظر گرفتن $a_n=-\frac{1}{n}$ و $b_n=-\frac{2}{4n+1}$، دنباله‌های $\{a_n\}$ و $\{b_n\}$ با مقادیر منفی به صفر نزدیک می‌شوند، در صورتی که $\{f(a_n)\}$ به 0 و $\{f(b_n)\}$ به -1 همگراست. پس $\lim\limits_{x\to 0^-}\sin\frac{\pi}{x}$ نیز وجود ندارد.

تمرین در کلاس صفحه ۶۶:

نشان دهید که $\lim\limits_{x\to 0}\left(-\frac{1}{x^2}\right)=-\infty$

پاسخ: فرض کنیم $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه با مقادیر غیرصفر باشد، به طوری که $\lim\limits_{n\to\infty} a_n=0$. در این صورت:
$f(x)=-\frac{1}{x^2} \Rightarrow f(a_n)=\frac{-1}{a_n^2}$

از طرفی طبق مسائل صفحه ۴۱، سؤال ۴، $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{-۱}{a_n^۲}=-\infty$. بنابراین $\lim\limits_{x\to ۰}\left(-\frac{۱}{x^۲}\right)=-\infty$. (دقت کنید که همواره $-\frac{۱}{a_n^۲}<۰$ و $\lim\limits_{n\to\infty}a_n^۲=۰$ $=-\lim\limits_{n\to\infty}\frac{۱}{-\frac{۱}{a_n^۲}}$. پس می‌توان از سؤال ۴ استفاده کرد.)

تمرین در کلاس صفحه ۶۷:

نشان دهید که $\lim\limits_{x\to ۱}\frac{-۱}{(x-۱)^۲}=-\infty$

پاسخ: فرض کنیم $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه با مقادیر مخالف یک باشد، به طوری که $\lim\limits_{n\to\infty}a_n=۱$. در این صورت:

$$f(x)=\frac{-۱}{(x-۱)^۲}\ \Rightarrow\ f(a_n)=\frac{-۱}{(a_n-۱)^۲}$$

و با توجه به سؤال ۴ مسائل صفحه ۴۱، $\lim\limits_{n\to\infty}\frac{۱}{(a_n-۱)^۲}=-\infty$. بنابراین $\lim\limits_{x\to ۱}\frac{-۱}{(x-۱)^۲}=-\infty$.

تمرین در کلاس صفحه ۶۸:

دبیر: $\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{x}{x+۱}$ **را حدس بزنید.**

پاسخ: محسن این‌گونه مسأله را بررسی کرده است: در رابطه با حدسیه‌سازی $\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{x}{x+۱}$ با مقادیر بزرگ و بزرگ‌تر x سروکار داریم، پس عدد ۱ و یا هر عدد ثابت دیگری در مقابل x ناچیز است. پس اگر $x+۱$ مخرج کسر را با x تقریب کنیم، مقادیر تابع با $\frac{x}{x}=۱$ تقریب می‌گردند. بنابراین مقادیر این تابع برای xهای بزرگ، عددهای نزدیک ۱ هستند. در نتیجه حدس می‌زنیم $\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{x}{x+۱}=۱$. آیا استدلال و تفکر شهودی محسن درست است؟ بله می‌توانید دنباله‌های $\{a_n\}$ و $\{b_n\}$ با ضابطه‌های $a_n=n$ و $b_n=n^۲+۱$ را که هر دو به $+\infty$ واگرا هستند، محک بزنید. در مورد مقدار $\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{x}{x+۱}$ چگونه فکر می‌کنید؟

در بی‌نهایت $n+۱$ را با n تقریب می‌کنیم:

$$a_n=n\ \Rightarrow\ \lim_{n\to\infty}\frac{a_n}{a_n+۱}=\lim_{n\to\infty}\frac{n}{n+۱}=\lim_{n\to+\infty}\frac{n}{n}=۱$$

$$b_n=n^۲+۱\ \Rightarrow\ \lim_{n\to+\infty}\frac{b_n}{b_n+۱}=\lim_{n\to+\infty}\frac{n^۲+۱}{n^۲+۲}\ \xrightarrow[\text{تقریب می‌کنیم } n^۲ \text{ را با } n^۲+۲ \text{ و } n^۲+۱]{n\to+\infty\ \Rightarrow\ n^۲\to+\infty}\ \lim_{n\to+\infty}\frac{n^۲}{n^۲}=۱$$

تمرین در کلاس صفحه ۶۹:

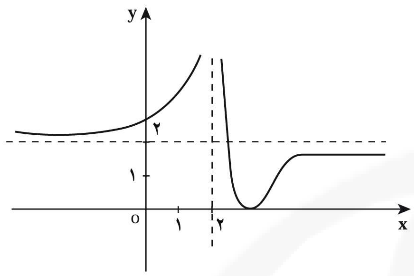
۱- مقدارهای $\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{x}{\sqrt{x^۲+۱}}$ **و** $\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{x}{\sqrt{x^۲+۱}}$ **را در صورت وجود، حدس بزنید.**

پاسخ:

$$\lim_{x\to+\infty}\frac{x}{\sqrt{x^۲+۱}}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x}{\sqrt{x^۲}}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x}{|x|}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x}{x}=۱$$

$$\lim_{x\to-\infty}\frac{x}{\sqrt{x^۲+۱}}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x}{\sqrt{x^۲}}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x}{|x|}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x}{-x}=-۱$$

۲- نمودار تابع f در شکل زیر نشان داده شده است. حدهای زیر را حدس بزنید.



الف) $\lim\limits_{x\to ۲^-} f(x)$

پاسخ: $+\infty$

ب) $\lim\limits_{x\to ۲^+} f(x)$

پاسخ: $+\infty$

پ) $\lim\limits_{x\to -\infty} f(x)$

پاسخ: ۲

ت) $\lim\limits_{x\to +\infty} f(x)$

پاسخ: ۲

۳- تابع $f(x)=\frac{x+۱}{x}$ و دنباله $\{a_n\}$ با ضابطه $a_n=-۱۰^n$ را در نظر بگیرید.

الف) وقتی x مقادیر این دنباله را طبق جدول زیر اختیار کند، f(x) را محاسبه کنید.

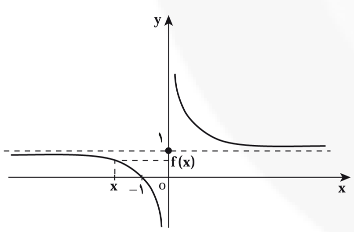
پاسخ:

a_n	-۱۰	-۱۰۰	-۱۰۰۰	-۱۰۰۰۰
$f(a_n)$	۰/۹	۰/۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۹

ب) آیا $\lim\limits_{x\to -\infty} f(x)$ وجود دارد؟

پاسخ: بله، $\lim\limits_{x\to -\infty} f(x)=۱$

جواب خود را با توجه به نمودار $f(x)=\frac{x+۱}{x}$ که در شکل روبه‌رو آمده نیز توجیه کنید. $\left(f(x)=\frac{x+۱}{x}=۱+\frac{۱}{x}\right)$

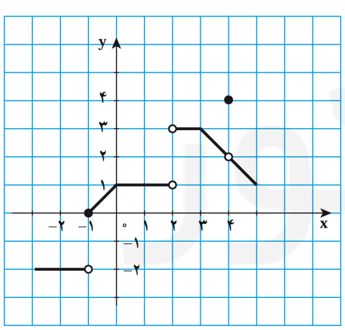


پاسخ:

$$\lim_{x\to -\infty} f(x)=\lim_{x\to -\infty}\frac{x+۱}{x}=\lim_{x\to -\infty}\left(۱+\frac{۱}{x}\right)\overset{\lim\limits_{x\to\infty}\frac{۱}{x}=۰}{=\!=\!=\!=}۱$$

مسائل صفحه ۷۰:

۱- با استفاده از نمودار f که در زیر داده شده است، مقدار هر یک از عبارت‌های زیر را، در صورت وجود، مشخص کنید. اگر این مقدار وجود ندارد، توضیح دهید که چرا وجود ندارد.



الف) $\lim\limits_{x\to -۱} f(x)$

پاسخ: ۰

ب) $\lim\limits_{x\to ۰} f(x)$

پاسخ: ۱

پ) $\lim\limits_{x\to ۲} f(x)$

پاسخ: وجود ندارد، زیرا $\lim\limits_{x\to ۲^+} f(x)=۳$ و $\lim\limits_{x\to ۲^-} f(x)=۱$ یعنی حد چپ و راست با هم برابر نیستند. پس تابع در ۲ حد ندارد.

ت) $\lim\limits_{x\to ۴} f(x)$

پاسخ: ۴

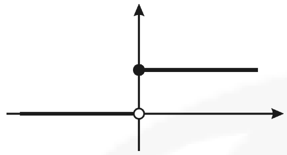
۲- تابع هِوی‌ساید (Heaviside) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(t)=\begin{cases}1 & , \ t\geq 0\\ 0 & , \ t<0\end{cases}$$

از این تابع در مدارهای الکتریکی برای نشان دادن هجوم ناگهانی جریان الکتریکی، یا ولتاژ، در لحظه زدن کلید استفاده می‌شود.

الف) نمودار تابع هوی‌ساید را رسم کنید.

پاسخ:



ب) مقدار عبارت‌های $\lim\limits_{t\to 0^-} H(t)$ و $\lim\limits_{t\to 0^+} H(t)$ را مشخص کنید.

پاسخ:

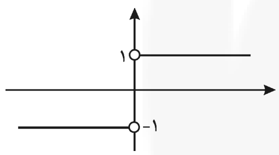
$$\lim_{t\to 0^-} H(t)=0 \ , \ \lim_{t\to 0^+} H(t)=1$$

۳- تابع علامت (یا تابع signum) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\operatorname{sgn}(s)=\frac{x}{|x|}=\begin{cases}1 & , \ x>0\\ -1 & , \ x<0\\ & , \ x=0\end{cases}$$

الف) نمودار تابع علامت را رسم کنید.

پاسخ:



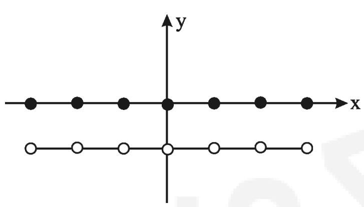
ب) مقدار عبارت‌های $\lim\limits_{x\to 0^-} \operatorname{sgn}(x)$ و $\lim\limits_{x\to 0^+} \operatorname{sgn}(x)$ را مشخص کنید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to 0^+} \operatorname{sgn}(x)=1$$
$$\lim_{x\to 0^-} \operatorname{sgn}(x)=-1$$

۴- نمودار تابع $f(x)=[x]+[-x]$ را رسم نموده و حدهای زیر را مشخص کنید.

$$f(x)=[x]+[-x]=\begin{cases}0 & x\in\mathbb{Z}\\ -1 & x\notin\mathbb{Z}\end{cases}$$



الف) $\lim\limits_{x\to 1^-} f(x)$

پاسخ: ۱-

ب) $\lim\limits_{x\to 1^+} f(x)$

پاسخ: ۱-

پ) $\lim\limits_{x\to 1} f(x)$

پاسخ: ۱-

آیا می‌توان نوشت: $\lim\limits_{x\to a} f(x)=-1$ (به ازای هر a عضو R ؟

پاسخ: بله

۵- با رسم نمودار تابع $f(x)=\dfrac{x}{[x]}$ در بازه $[-1,1]$، مقدار هر یک از عبارت‌های زیر را، در صورت وجود، مشخص کنید.

الف) $\lim\limits_{x\to 0^-}\dfrac{x}{[x]}$ ب) $\lim\limits_{x\to 0^+}\dfrac{x}{[x]}$ ([ ] علامت جزء صحیح است.)

پاسخ:

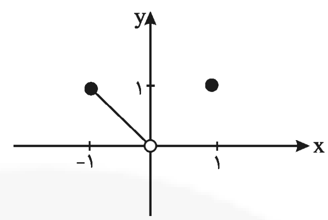
$f(x)=\dfrac{x}{[x]} \qquad D:[-1,1]$

$-1\le x<0 \Rightarrow [x]=-1 \Rightarrow f(x)=-x$

$0\le x<1 \Rightarrow [x]=0 \Rightarrow f(x)$: تعریف نشده

$x=1 \Rightarrow [x]=1 \Rightarrow f(x)=\dfrac{1}{1}=1$

$\lim\limits_{x\to 0^-}\dfrac{x}{[x]}=0 \quad , \quad \lim\limits_{x\to 0^+}\dfrac{x}{[x]}$ وجود ندارد.



۶- مقدار $\lim\limits_{x\to 0}\left[\dfrac{\sin x}{x}\right]$ را پیدا کنید.

پاسخ: می‌دانیم وقتی $x>0$، آن‌گاه $0<\sin x<x$ و در نتیجه $0<\dfrac{\sin x}{x}<1$ بنابراین $\left[\dfrac{\sin x}{x}\right]=0$ و $\lim\limits_{x\to 0^+}\left[\dfrac{\sin x}{x}\right]=0$. از طرفی وقتی $x<0$، در این صورت $-x>0$ و $0<\sin(-x)<-x$ ، بنابراین $0<\dfrac{\sin(-x)}{-x}<1$ و :

$$0<\frac{\sin(-x)}{-x}<1 \Rightarrow 0<\frac{-\sin x}{-x}<1 \Rightarrow 0<\frac{\sin x}{x}<1$$

پس در این حالت نیز $\left[\dfrac{\sin x}{x}\right]=0$ و در نتیجه $\lim\limits_{x\to 0^-}\left[\dfrac{\sin x}{x}\right]=0$. با توجه به مطالب گفته شده $\lim\limits_{x\to 0}\left[\dfrac{\sin x}{x}\right]=0$ می‌باشد.

مثال صفحه ۷۴: به کمک تعریف ثابت کنید: $\lim\limits_{x\to 1}\dfrac{x^2-1}{x-1}=2$

پاسخ: تابع $f(x)=\dfrac{(x-1)(x+1)}{x-1}$ به ازای $x=1$ تعریف نشده است و برای هر $x\neq 1$ داریم $f(x)=x+1$. از طرفی برای هر دنباله $\{a_n\}$ که $a_n\neq 1$ و همگرا به ۱ باشد، داریم:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to+\infty}(a_n+1)=1+1=2$$

بنابراین:

$$\lim_{x\to 1} f(x)=2$$

تمرین در کلاس صفحه ۷۵:

به کمک تعریف ثابت کنید:

۱- c عدد ثابت، $\lim\limits_{x\to a} c=c$ و $\lim\limits_{x\to a} x=a$.

پاسخ: الف) فرض کنیم $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه باشد که $a_n\neq a$ و همگرا به a باشد. در این صورت:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to+\infty} c=c \Rightarrow \lim_{x\to a} c=c$$

پس: $\lim\limits_{n\to a} c=c$.

ب) فرض کنیم $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه و همگرا به a باشد، به طوری که $a_n\neq a$. در این صورت:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to+\infty} a_n=a \Rightarrow \lim_{x\to a} x=a$$

۲- $\lim\limits_{x\to 0} x\sin\dfrac{\pi}{x}=0$

پاسخ: فرض کنیم $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه با مقادیر مخالف صفر و همگرا به صفر باشد. در این صورت:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to+\infty} a_n.\sin\frac{\pi}{a_n}=0\times \text{کراندار}=0 \Rightarrow \lim_{x\to 0} x\sin\frac{\pi}{x}=0$$

۳- $\lim\limits_{x\to a} x^2=a^2$

پاسخ: فرض کنیم $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه و با مقادیر مخالف a باشد که همگرا به a می‌باشد. در این صورت:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to+\infty}(a_n)^۲=a^۲ \Rightarrow \lim_{x\to a} x^۲=a^۲$$

۴- $\lim_{x\to a}\sqrt[n]{x}=\sqrt[n]{a}$ ، n عددی است طبیعی (اگر n زوج باشد، $a\geq ۰$).

پاسخ: فرض کنیم $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه با مقادیر مخالف a و همگرا به a باشد. در این صورت:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to+\infty}\sqrt[n]{a_{n۵}}=\sqrt[n]{a} \Rightarrow \lim_{n\to a}\sqrt[n]{x}=\sqrt[n]{a}$$

مسأله صفحه ۷۵: به کمک تعریف ثابت کنید تابع $f(x)=\sin\frac{\pi}{x}$ در نقطه $x=۰$ **حد ندارد.**

پاسخ: دنباله‌های $\{a_n\}$ با ضابطه‌ی $a_n=\frac{۱}{n}$ و $\{b_n\}$ با ضابطه‌ی $b_n=\frac{۱}{۲n+\frac{۱}{۲}}$ هر دو مخالف صفر ولی به صفر همگرا هستند. از طرفی:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to+\infty}\sin n\pi=\lim_{n\to+\infty}۰=۰$$

$$\lim_{n\to+\infty} f(b_n)=\lim_{n\to+\infty}\sin\left(۲n\pi+\frac{\pi}{۲}\right)=\lim_{n\to+\infty}۱=۱$$

چون حد دنباله در صورت وجود یکتاست و در این‌جا $\lim_{n\to+\infty} f(a_n)\neq\lim_{n\to+\infty} f(b_n)$ ، پس بنا به تعریف $\lim_{x\to۰}\sin\frac{\pi}{x}$ وجود ندارد.

تمرین در کلاس صفحه ۷۵:ثابت کنید:

۱- $\lim_{x\to۰}\cos\frac{۱}{x}$ وجود ندارد.

پاسخ: فرض کنیم $f(x)=\cos\frac{۱}{x}$ باشد. در این صورت دو دنباله‌ی $\{a_n\}$ با ضابطه‌ی $a_n=\frac{۱}{۲n\pi}$ و $\{b_n\}$ با ضابطه‌ی $b_n=\frac{۱}{۲n\pi+\frac{\pi}{۲}}$ را در نظر می‌گیریم. هر دو دنباله مخالف صفر و همگرا به صفر هستند. از طرفی:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to+\infty}\cos ۲n\pi=۱$$

$$\lim_{n\to+\infty} f(b_n)=\lim_{n\to+\infty}\cos\left(۲n\pi+\frac{\pi}{۲}\right)=۰$$

چون $\lim_{n\to+\infty} f(a_n)\neq\lim_{n\to+\infty} f(b_n)$ ، پس طبق تعریف حد، $\lim_{x\to۰}\cos\frac{۱}{x}$ وجود ندارد.

۲- تابع f با ضابطه $f(x)=\begin{cases}x^۲ & , x<۰\\ x-۱ & , x>۰\end{cases}$ **در نقطه صفر دارای حد نیست.**

پاسخ: دنباله‌ی $\{a_n\}$ با ضابطه‌ی $a_n=-\frac{۱}{n}$، از مقادیر کم‌تر از صفر به صفر نزدیک می‌شود.

هم‌چنین دنباله‌ی $\{b_n\}$ با ضابطه‌ی $b_n=\frac{۱}{n}$، با مقادیر بیشتر از صفر به صفر نزدیک می‌شود. از طرفی:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to\infty}\left(-\frac{۱}{n}\right)^۲=۰$$

$$\lim_{n\to\infty} f(b_n)=\lim_{n\to\infty}\left(\frac{۱}{n}-۱\right)=-۱$$

چون $\lim_{n\to+\infty} f(a_n)\neq\lim_{n\to+\infty} f(b_n)$ ، پس بنا به تعریف حد، $\lim_{x\to۰} f(x)$ وجود ندارد.

قضیه ۱ صفحه ۷۶: فرض کنیم **D** زیرمجموعه‌ای از $\mathbb{R}$ باشد و $f,g:D\to\mathbb{R}$ **تابع‌هایی باشند که** $\lim_{x\to a} g(x)=L_۲$ و $\lim_{x\to a} f(x)=L_۱$.

در این صورت:

الف) $\lim\limits_{x\to a}(f+g)(x)=L_1+L_2$

ب) $\lim\limits_{x\to a}(f-g)(x)=L_1-L_2$

پ) $\lim\limits_{x\to a}(cf)(x)=cL_1$ **که c عددی ثابت است.**

ت) $\lim\limits_{x\to a}(f.g)(x)=L_1L_2$

ث) اگر $L_2\neq 0$**، آن‌گاه** $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{f(x)}{g(x)}=\dfrac{L_1}{L_2}$.

پاسخ: اثبات قضیه ۱:

دنباله دلخواه $\{a_n\}$، همگرا به a را که $a_n\neq a$ است، در نظر می‌گیریم. چون $\lim\limits_{n\to+\infty}f(a_n)=L_1$ و $\lim\limits_{n\to+\infty}g(a_n)=L_2$ ، پس:

$$\lim_{n\to+\infty}(f(a_n)\pm g(a_n))=\lim_{n\to+\infty}f(a_n)\pm\lim_{n\to+\infty}g(a_n)=L_1\pm L_2$$

در نتیجه:

$$\lim_{x\to a}(f\pm g)(x)=L_1\pm L_2$$

$$\lim_{n\to+\infty}cf(a_n)=c\lim_{n\to+\infty}f(a_n)=cL_1$$

$$\lim_{n\to+\infty}f(a_n)g(a_n)=\lim_{n\to+\infty}f(a_n)\lim_{n\to+\infty}g(a_n)=L_1L_2$$

در نتیجه:

$$\lim_{x\to a}cf(x)=cL_1\quad,\quad\lim_{x\to a}(f.g)(x)=L_1L_2$$

$$\lim_{n\to+\infty}\frac{f(a_n)}{g(a_n)}=\frac{\lim\limits_{n\to+\infty}f(a_n)}{\lim\limits_{n\to+\infty}g(a_n)}=\frac{L_1}{L_2}\quad,\ L_2\neq 0$$

در نتیجه:

$$\lim_{x\to a}\frac{f(x)}{g(x)}=\frac{L_1}{L_2}\quad,\quad L_2\neq 0$$

مثال صفحه ۷۶: نشان دهید:

الف) $\lim\limits_{x\to a}x^n=a^n$

ب) اگر $P(x)$ **یک چندجمله‌ای دلخواه باشد، آن‌گاه** $\lim\limits_{x\to a}P(x)=P(a)$

پ) اگر $P(x)$ **و** $Q(x)$ **دو چندجمله‌ای دلخواه باشند و** $Q(a)\neq 0$**، آن‌گاه:** $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{P(x)}{Q(x)}=\dfrac{P(a)}{Q(a)}$

پاسخ: الف)

$$\lim_{x\to a}x^n=(\lim_{x\to a}x)\cdots(\lim_{x\to a}x)=(\lim_{x\to a}x)^n=a^n$$

ب) اگر $P(x)=a_nx^n+a_{n-1}x^{n-1}+\cdots+a_0$ آن‌گاه طبق قسمت الف و قسمت پ قضیه (۱) داریم:

$$\lim_{x\to a}P(x)=a_n\lim_{x\to a}x^n+a_{n-1}\lim_{x\to a}x^{n-1}+\cdots+\lim_{x\to a}a_0=a_na^n+a_{n-1}a^{n-1}+\cdots+a_0.=P(a)$$

پ) طبق قسمت (ث) قضیه (۱) و قسمت (ب) داریم:

$$\lim_{x\to a}\frac{P(x)}{Q(x)}=\frac{\lim\limits_{x\to a}P(x)}{\lim\limits_{x\to a}Q(x)}=\frac{P(a)}{Q(a)}$$

تمرین در کلاس صفحه ۷۷:

۱- به کمک قضیه (۱) ثابت کنید:

$\lim\limits_{x\to a}f(x)=L$ **اگر و تنها اگر** $\lim\limits_{x\to a}(f(x)-L)=0$.

پاسخ: ابتدا ثابت می‌کنیم اگر $\lim\limits_{x\to a}f(x)=L$ ، آن‌گاه $\lim\limits_{x\to a}(f(x)-L)=0$:

$$\lim_{x\to a}(f(x)-L)=\lim_{x\to a}f(x)-\lim_{x\to a}L=L-L=۰$$

برعکس: فرض کنیم $\lim_{x\to a}(f(x)-L)=۰$. در این صورت:

$$\lim_{x\to a}f(x)=\lim_{x\to a}(f(x)-L+۱)=۰ \Rightarrow \lim_{x\to a}(f(x)-L+\lim_{x\to a}L=۰+L=L$$

۲- به کمک قضیه (۱) ثابت کنید:

الف) $\lim_{x\to ۲}۹x^{۲}=۳۶$

ب) $\lim_{x\to ۲}\frac{x^{۲}}{x+۱}=\frac{۴}{۳}$

پ) $\lim_{x\to ۱}(x^{۲}+۱)(x^{۲}+x)=۴$

پاسخ:

الف) $\lim_{x\to ۲}۹x^{۲}=(\lim_{x\to ۲}۹)(\lim_{x\to ۲}x)^{۲}=۹\times ۲^{۲}=۳۶$

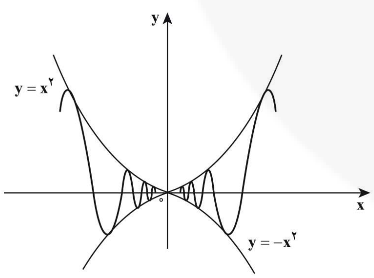
ب) $\lim_{x\to ۲}\frac{x^{۲}}{x+۱}=\frac{\lim_{x\to ۲}x^{۲}}{\lim_{x\to ۲}(x+۱)}=\frac{(\lim_{x\to ۲}x)^{۲}}{\lim_{x\to ۲}(x)+\lim_{x\to ۲}۱}=\frac{۲^{۲}}{۲+۱}=\frac{۴}{۳}$

پ) $\lim_{x\to ۱}(x^{۲}+۱)(x^{۲}+x)=\lim_{x\to ۱}(x^{۲}+۱).\lim_{x\to ۱}(x^{۲}+x)=(\lim_{x\to ۱}x^{۲}+\lim_{x\to ۱}۱)(\lim_{x\to ۱}x^{۲}+\lim_{x\to ۱}x)=((\lim_{x\to ۱}x)^{۲}+۱)((\lim_{x\to ۱}x)^{۲}+۱)$

$=(۱+۱)(۱+۱)=۴$

مثال صفحه ۷۸: **نشان دهید:** $\lim_{x\to ۰}x^{۲}\sin\frac{۱}{x}=۰$

پاسخ: ابتدا توجه کنید که چون $\lim_{x\to ۰}\sin\frac{۱}{x}$ موجود نیست، نمی‌توان گفت:

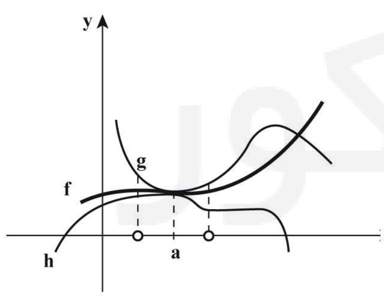


$$\lim_{x\to ۰}x^{۲}\sin\frac{۱}{x}=\lim_{x\to ۰}x^{۲}\times\lim_{x\to ۰}x^{۲}\times\lim_{x\to ۰}\sin\frac{۱}{x}$$

ولی به علت این که $-۱\le\sin\frac{۱}{x}\le ۱$ ، پس همان‌طور که در شکل روبه‌رو هم مشاهده می‌شود، $-x^{۲}\le x^{۲}\sin\frac{۱}{x}\le x^{۲}$ می‌باشد. از طرفی می‌دانیم $\lim_{x\to ۰}x^{۲}=\lim_{x\to ۰}(-x)^{۲}=۰$ پس طبق قضیه فشردگی نتیجه می‌گیریم:

$$\lim_{x\to ۰}x^{۲}\sin\frac{۱}{x}=۰$$

قضیه ۲ صفحه ۷۸: **هرگاه به ازای هر x در بازه‌ی بازی شامل a ، (به جز احتمالاً در خود a)** $h(x)\le f(x)\le g(x)$ **و نیز** $\lim_{x\to a}h(x)=L=\lim_{x\to a}g(x)$ **آن‌گاه:** $\lim_{x\to a}f(x)=L$.



پاسخ: اثبات قضیه فشردگی: باید نشان دهیم که برای هر دنباله دلخواه $\{a_n\}$ که همگرا به a است و $a_n\neq a$ ، دنباله $\{f(a_n)\}$ به L همگراست.

می‌دانیم برای هر دنباله $\{a_n\}$ که به a همگراست، به ازای nهای به اندازه کافی بزرگ، a_n در یک همسایگی محذوف a قرار می‌گیرد. بنابراین:

$$\lim_{n\to +\infty}h(a_n)=\lim_{n\to +\infty}g(a_n)=L\ ,\ h(a_n)\le f(a_n)\le g(a_n)$$

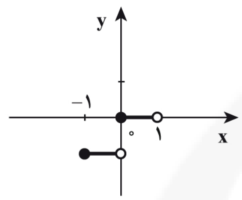
پس طبق قضیه فشردگی در دنباله‌ها داریم: $\lim\limits_{n\to+\infty} f(a_n)=L$ ، بنابراین $\lim\limits_{x\to a} f(x)=L$.

مثال صفحه ۷۹: مثال‌هایی از توابع کراندار:

الف) تابع $f(x)=\sin\frac{۱}{x}$ در دامنه‌اش کراندار است، زیرا به ازای هر $x\in D_f$ ، $\left|\sin\frac{۱}{x}\right|\le ۱$

ب) تابع $f(x)=[x]$ بر مجموعه $A=\{x\in\mathbb{R}\,, -۱<x<۱\}$ کراندار است، زیرا به ازای هر $x\in A$ ، $f(x)$ یا صفر است و یا ۱- ، پس $|f(x)|\le ۱$.

پاسخ:



تمرین در کلاس صفحه ۷۹: نشان دهید تابع $f(x)=\sqrt{۱-x^۲}$ در دامنه‌اش کراندار است.

پاسخ: ابتدا دامنه‌ی $f(x)$ را تعیین می‌کنیم: $۱-x^۲\ge ۰ \Rightarrow x^۲\le ۱ \Rightarrow -۱\le x\le ۱$

بنابراین $D_f=[-۱,۱]$ ، از طرفی:

$$x\in D_f \Rightarrow -۱\le x\le ۱ \Rightarrow ۰\le x^۲\le ۱ \Rightarrow ۰\ge -x^۲\ge -۱ \Rightarrow ۱\ge ۱-x^۲\ge ۰ \Rightarrow ۰\le\sqrt{۱-x^۲}\le ۱ \Rightarrow ۰\le f(x)\le ۱$$

یعنی تابع $f(x)$ در دامنه‌اش کراندار می‌باشد.

قضیه ۳ صفحه ۸۰: اگر $\lim\limits_{x\to a} f(x)=۰$ و تابع g در یک همسایگی محذوف a کراندار باشد، آن‌گاه $\lim\limits_{x\to a} f(x)g(x)=۰$

پاسخ: اثبات قضیه ۳: طبق تعریف حد به ازای هر دنباله $\{a_n\}$ که همگرا به a باشد و $a_n\ne a$ داریم $\lim\limits_{n\to+\infty} f(a_n)=۰$ و برای تابع g که در یک همسایگی محذوف a کراندار است، عدد مثبتی مانند M وجود دارد که $|g(a_n)|\le M$ پس طبق قضیه فشردگی نتیجه می‌شود که دنباله $\{f(a_n)g(a_n)\}$ همگرا به صفر است. بنابراین $\lim\limits_{x\to a} f(x)g(x)=۰$.

مثال صفحه ۸۰: بنا بر قضیه (۳) داریم:

۱) $\lim\limits_{x\to ۱}(x-۱)^۲\sin\frac{۱}{x-۱}=۰$

زیرا: $\lim\limits_{x\to ۱}(x-۱)^۲=۰$ و $-۱\le\sin\frac{۱}{x-۱}\le ۱$ **یعنی تابع $g(x)=\sin\frac{۱}{x-۱}$ کراندار است.**

۲) $\lim\limits_{x\to ۰} x^۲[x]=۰$

زیرا: $\lim\limits_{x\to ۰}x^۲=۰$ **و تابع $g(x)=[x]$ در یک همسایگی محذوف صفر و به شعاع مثلاً $r=۱$ کراندار است.**

تمرین در کلاس صفحه ۸۰:

۱- نشان دهید که اگر $\lim\limits_{x\to a}|f(x)|=۰$ ، آن‌گاه $\lim\limits_{x\to a} f(x)=۰$

پاسخ: می‌دانیم $-|f(x)|\le f(x)\le|f(x)|$. از طرفی طبق فرض $\lim\limits_{x\to a}|f(x)|=۰$ و در نتیجه $\lim\limits_{x\to a}-|f(x)|=۰$ می‌شود. پس بنا به قضیه فشردگی $\lim\limits_{x\to a}f(x)=۰$ است.

۲- اگر به ازای هر $x\ne ۰$ داشته باشیم $۳-x^۲\le f(x)\le ۳+x^۲$ ، مطلوب است $\lim\limits_{x\to ۰}f(x)$.

پاسخ: چون $۳-x^۲\le f(x)\le ۳+x^۲$ و $\lim\limits_{x\to ۰}۳-x^۲=\lim\limits_{x\to ۰}۳+x^۲=۳$ پس طبق قضیه‌ی فشردگی $\lim\limits_{x\to ۰}f(x)=۳$ می‌باشد.

۳- تابع دیریکله با ضابطه $D(x)=\begin{cases}۱ & , \text{x گویا} \\ ۰ & , \text{x اصم}\end{cases}$ **داده شده است. ثابت کنید** $\lim\limits_{x\to ۰} xD(x)=۰$.

پاسخ: چون تابع دیریکله کراندار است $(|D(x)|\leq ۱)$ و $\lim\limits_{x\to ۰} x=۰$ طبق قضیه ۳ داریم:

$$\lim_{x\to ۰} xD(x)=۰\times \text{کراندار}=۰$$

مثال صفحه ۸۱: طبق قاعده ریشه‌گیری داریم:

$$۱)\ \lim_{x\to ۳}\sqrt{\frac{x-۲}{۳x^۲-۲}}=\sqrt{\frac{۱}{۲۵}}=\frac{۱}{۵}$$

$$۲)\ \lim_{x\to ۵}\sqrt[۳]{\frac{x-۶}{x^۲+۲}}=\sqrt[۳]{\frac{-۱}{۲۷}}=\frac{-۱}{۳}$$

تمرین در کلاس صفحه ۸۱: مقدار $\lim\limits_{x\to ۱}\sqrt[۴]{\frac{x+۱۵}{۲x^۲-۱}}$ را به دست آورید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۱}\sqrt[۴]{\frac{x+۱۵}{۲x^۲-۱}}=\sqrt[۴]{\lim_{x\to ۱}\frac{x+۱۵}{۲x^۲-۱}}=\sqrt[۴]{\frac{\lim\limits_{x\to ۱}(x+۱۵)}{\lim\limits_{x\to ۱}(۲x^۲-۱)}}=\sqrt[۴]{\frac{۱۶}{۱}}=۲$$

مثال صفحه ۸۲: تابع $f(x)=\begin{cases}۲x-۱ & , x\leq ۱ \\ x^۲+۱ & , x>۱\end{cases}$ **را در نظر بگیرید. به کمک تعریف حد راست ثابت کنید** $\lim\limits_{x\to ۱^+} f(x)=۲$.

پاسخ: فرض کنید $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه و همگرا به ۱ باشد $(a_n\neq ۱)$ که مقادیر آن همگی از ۱ بزرگ‌تر باشند، آن‌گاه:

$$\lim_{n\to +\infty} f(a_n)=\lim_{n\to +\infty}(a_n^۲+۱)=۱+۱=۲$$

پس طبق تعریف $\lim\limits_{x\to ۱^+} f(x)=۲$

تمرین در کلاس صفحه ۸۳: به کمک تعریف حد راست ثابت کنید: $\lim\limits_{x\to ۰^+}\frac{|x|}{x}=۱$

پاسخ: فرض کنیم $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه باشد که تمام جملاتش مثبت است $(a_n>۰)$ و $\lim\limits_{n\to +\infty} a_n=۰$ در این صورت:

$$\lim_{n\to +\infty} f(a_n)=\lim_{n\to +\infty}\frac{|a_n|}{a_n}\overset{a_n>۰}{=\!=}\lim_{n\to +\infty}\frac{a_n}{a_n}=۱$$

پس بنا به تعریف حد راست، $\lim\limits_{x\to ۰^+}\frac{|x|}{x}=۱$.

مثال صفحه ۸۳: تابع $f(x)=\begin{cases}۲x-۱ & , x\leq ۱ \\ x^۲+۱ & , x>۱\end{cases}$ **را در نظر گرفته و** $\lim\limits_{x\to ۱^-} f(x)$ **را به کمک تعریف حد چپ به دست آورید.**

پاسخ: فرض کنید $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه و همگرا به ۱ باشد $(a_n\neq ۱)$ که مقادیر آن همگی از ۱ کوچک‌تر باشند، آن‌گاه:

$$\lim_{n\to +\infty} f(a_n)=\lim_{n\to +\infty}(۲a_n-۱)=۲-۱=۱$$

پس طبق تعریف $\lim\limits_{x\to ۱^-} f(x)=۱$

تمرین در کلاس صفحه ۸۳: **به کمک تعریف ثابت کنید که اگر** $\lim\limits_{x\to a^+} f(x)$ **و** $\lim\limits_{x\to a^-} f(x)$ **موجود و مساوی عدد حقیقی L باشند، آن‌گاه** $\lim\limits_{x\to a} f(x)$ **موجود و مساوی L است.**

پاسخ: چون $\lim\limits_{x\to a^+} f(x)$ موجود است پس برای هر دنباله $\{a_n\}$ دنباله دلخواه که همگرا به ۱ باشد و $a_n > a$ دنباله $\{f(a_n)\}$ به L همگراست و چون $\lim\limits_{x\to a^-} f(x)$ پس برای هر دنباله $\{a_n\}$ دنباله دلخواه که همگرا به ۱ باشد و $b_n < a$ دنباله $\{f(b_n)\}$ به L همگراست. حال فرض کنید $\{c_n\}$ دنباله‌ای دلخواه و همگرا به ۱ باشد $(c_n \neq 1)$ چه جملات $\{c_n\}$ کوچکتر از a باشد و چه بزرگتر با توجه به مطالب فوق $\{f(c_n)\}$ به L همگرا می‌شود. بنابراین $\lim\limits_{x\to a} f(x)$ موجود و برابر L می‌باشد.

مثال صفحه ۸۴: ثابت کنید $\lim\limits_{x\to 0} x\left[\frac{1}{x}\right] = 1$ ، که در آن، $\left[\frac{1}{x}\right]$ جزء صحیح $\frac{1}{x}$ است.

پاسخ: می‌دانیم به ازای هر عدد حقیقی S ، $S-1<[S]\le S$ و با انتخاب $S=\frac{1}{x}$ ، $x\neq 0$ داریم:

$$\frac{1}{x}-1<\left[\frac{1}{x}\right]\le\frac{1}{x} \quad (1)$$

رابطه (۱) را برای دو حالت زیر در نظر می‌گیریم:

۱) طرفین نامساوی‌های (۱) را در $x>0$ ضرب می‌کنیم.

$$1-x<x\left[\frac{1}{x}\right]\le 1$$

چون $\lim\limits_{x\to 0^+} 1=1$ و $\lim\limits_{x\to 0^+}(1-x)=1$ ، بنا بر قضیه فشردگی داریم:

$$\lim_{x\to 0^+} x\left[\frac{1}{x}\right]=1$$

۲) طرفین نامساوی‌های (۱) را در $x<0$ ضرب می‌کنیم.

$$1\le x\left[\frac{1}{x}\right]<1-x$$

چون $\lim\limits_{x\to 0^-} 1=1$ و $\lim\limits_{x\to 0^-}(1-x)=1$ ، بنابراین طبق قضیه فشردگی داریم:

$$\lim_{x\to 0^-} x\left[\frac{1}{x}\right]=1$$

در نتیجه $\lim\limits_{x\to 0} x\left[\frac{1}{x}\right]=1$

تمرین در کلاس صفحه ۸۴: نشان دهید: $\lim\limits_{x\to 0}\frac{|x|}{x}$ موجود نیست.

پاسخ: فرض کنیم $\{a_n\}$ با ضابطه‌ی $a_n=\frac{1}{n}$ و $\{b_n\}$ با ضابطه‌ی $b_n=-\frac{1}{n}$ باشد، در این صورت $\{a_n\}$ و $\{b_n\}$ به صفر همگرا هستند. از طرفی:

$$\lim_{n\to+\infty} f(a_n)=\lim_{n\to+\infty}\frac{|a_n|}{a_n}=\lim_{n\to\infty}\frac{\frac{1}{n}}{\frac{1}{n}}=1$$

$$\lim_{n\to+\infty} f(b_n)=\lim_{n\to+\infty}\frac{|b_n|}{b_n}=\lim_{n\to+\infty}\frac{-\frac{1}{n}}{\frac{1}{n}}=-1$$

و چون حدها با هم برابر نشد، پس بنا به تعریف حد $\lim\limits_{x\to 0}\frac{|x|}{x}$ وجود ندارد.

نتیجه صفحه ۸۴: نامساوی $|\sin x|\le|x|$ به ازای هر x (برحسب رادیان) برقرار است.

برهان: نامساوی به ازای $x=0$ می‌شود $0\le 0$ که این هم درست است و به ازای $0<|x|<\frac{\pi}{2}$ ، نامساوی به خاطر (۱) برقرار می‌باشد و نامساوی به ازای $|x|\ge\frac{\pi}{2}$ نیز واضح است که برقرار است، زیرا $|\sin x|\le 1$

مثال صفحه ۸۵: به کمک تعریف حد ثابت کنید: اگر a یک عدد حقیقی باشد، آن‌گاه $\lim\limits_{x\to a}\sin x=\sin a$

پاسخ: اثبات: دنباله دلخواه $\{a_n\}$ که همگرا به a است و برای هر عدد طبیعی n، $a_n \neq a$ را در نظر بگیرید؛ در این صورت:

$$|\sin a_n-\sin a|=۲\left|\sin\frac{a_n-a}{۲}\cos\frac{a_n-a}{۲}\right|\leq ۲\left|\sin\frac{a_n-a}{۲}\right|\leq|a_n-a|$$

بنابراین $\lim\limits_{n\to+\infty}\sin a_n=\sin a$ در نتیجه طبق تعریف حد، $\lim\limits_{x\to a}\sin x=\sin a$.

تمرین در کلاس صفحه ۸۵:

۱- ثابت کنید: $\lim\limits_{x\to a}\cos x=\cos a$

پاسخ: دنباله‌ی دلخواه $\{a_n\}$ که $a_n\neq a$ و $\lim\limits_{n\to+\infty}a_n=a$ را در نظر می‌گیریم:

$$|\cos a_n-\cos a|=\left|-۲\sin\frac{a_n-a}{۲}\sin\frac{a_n+a}{۲}\right|\leq ۲\left|\sin\frac{a_n-a}{۲}\right|\leq ۲\left|\frac{a_n-a}{۲}\right|=|a_n-a|$$

چون دنباله‌ی $\{a_n\}$ به a همگراست، پس برای هر $\varepsilon>۰$، $M\in\mathbb{N}$ موجود است که برای $n\geq M$، $|a_n-a|<\varepsilon$ بنابراین برای همین M، $|\cos a_n-\cos a|<\varepsilon$ و در نتیجه $\lim\limits_{n\to\infty}\cos a_n=\cos a$ و بنا به تعریف حد:

$$\lim_{x\to a}\cos x=\cos x$$

۲- ثابت کنید:

الف) $\lim\limits_{x\to a}\tan x=\tan a$ و $a\neq k\pi+\frac{\pi}{۲}$

ب) $\lim\limits_{x\to a}\cot x=\cot a$ و $a\neq k\pi$ (k عدد صحیح است.)

پاسخ:

الف) $$\lim_{x\to a}\tan x=\lim_{x\to a}\frac{\sin x}{\cos x}=\frac{\lim\limits_{x\to a}\sin x}{\lim\limits_{x\to a}\cos x}=\frac{\sin a}{\cos a}=\tan a$$

ب) $$\lim_{x\to a}\cot x=\lim_{x\to a}\frac{۱}{\tan x}=\frac{۱}{\lim\limits_{x\to a}\tan x}\overset{\text{با توجه به الف}}{=\!=\!=}\frac{۱}{\tan a}=\cot a$$

اکنون به کمک قضیه فشردگی درستی تساوی $\lim\limits_{x\to ۰}\frac{\sin x}{x}=۱$ را ثابت می‌کنیم.

اثبات: می‌دانیم $\lim\limits_{x\to ۰}\cos x=\cos ۰=۱$ و برای هر x که $۰<|x|<\frac{\pi}{۲}$، $\cos x<\frac{\sin x}{x}<۱$ و یا:

$$۰<۱-\frac{\sin x}{x}<۱-\cos x$$

از طرفی $\lim\limits_{x\to ۰}۰=۰$ و $\lim\limits_{x\to ۰}(۱-\cos x)=۱-۱=۰$ پس بنا بر قضیه فشردگی داریم:

$$\lim_{x\to ۰}\left(۱-\frac{\sin x}{x}\right)=۰$$

در نتیجه: $\lim\limits_{x\to ۰}\frac{\sin x}{x}=۱$

مثال صفحه ۸۶: حد تابع $f(x)=\frac{\sin ax}{bx}$ را وقتی $x\to ۰$ بیابید. $(a,b\neq ۰)$

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۰}\frac{\sin ax}{bx}=\lim_{x\to ۰}\frac{a}{b}\times\frac{\sin ax}{ax}=\frac{a}{b}\lim_{x\to ۰}\frac{\sin ax}{ax}=\frac{a}{b}\lim_{t\to ۰}\frac{\sin t}{t}$$

زیرا، وقتی $x\to ۰$، $t=ax\to ۰$ و اما $\lim\limits_{t\to ۰}\frac{\sin t}{t}=۱$

در نتیجه:

$$\lim_{x\to ۰}\frac{\sin ax}{bx}=\frac{a}{b}$$

مثال صفحه ۸۶: حد تابع $f(x)=\dfrac{\sin(\sin x)}{x}$ را وقتی $x\to ۰$ بیابید.

پاسخ: می‌دانیم $\lim\limits_{x\to ۰}\sin x=۰$ که در این تساوی $x\neq ۰$ و $\sin x\neq ۰$ بنابراین:

$$A=\lim_{x\to ۰}\frac{\sin(\sin x)}{x}=\lim_{x\to ۰}\frac{\sin(\sin x)}{\sin x}\times\frac{\sin x}{x}=\lim_{t\to ۰}\frac{\sin t}{t}\times\lim_{x\to ۰}\frac{\sin x}{x}=۱$$

زیرا اگر $x\to ۰$ داریم $t=\sin x\to ۰$

تمرین در کلاس صفحه ۸۶: مقدار $\lim\limits_{x\to ۰}\dfrac{\tan ۲x}{۳x}$ را حساب کنید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۰}\frac{\tan ۲x}{۳x}=\lim_{x\to ۰}\frac{\sin ۲x}{۳x(\cos ۲x)}=\lim_{x\to ۰}\frac{\sin ۲x}{۲x\times\frac{۳}{۲}\times\cos ۲x}=۱\times\lim_{x\to ۰}\frac{۱}{\frac{۳}{۲}\cos x}=\frac{۲}{۳}$$

مثال صفحه ۸۷: $\lim\limits_{x\to -۲}\dfrac{۲x^۲+۵x+۲}{x+۲}$ را بیابید.

پاسخ: چون $\lim\limits_{x\to -۲}(x+۲)=\lim\limits_{x\to -۲}(۲x^۲+۵x+۲)=۰$ بنابراین به ازای $x\neq -۲$ و یا $x+۲\neq ۰$ داریم:

$$\frac{۲x^۲+۵x+۲}{x+۲}=\frac{\cancel{(x+۲)}(۲x+۱)}{\cancel{(x+۲)}}=۲x+۱$$

در نتیجه:

$$\lim_{x\to -۲}\frac{۲x^۲+۵x+۲}{x+۲}=\lim_{x\to -۲}(۲x+۱)=-۴+۱=-۳$$

تمرین در کلاس صفحه ۸۷: مطلوب است محاسبه $\lim\limits_{x\to ۱}\dfrac{x^۳-۱}{x^۲-۱}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۱}\frac{x^۳-۱}{x^۲-۱}=\lim_{x\to ۱}\frac{(x-۱)(x^۲+x+۱)}{(x-۱)(x+۱)}=\lim_{x\to ۱}\frac{x^۲+x+۱}{x+۱}=\frac{۳}{۲}$$

مثال صفحه ۸۷: مقدار $\lim\limits_{x\to ۰}\dfrac{x^۲}{\sqrt{x^۲+۹}-۳}$ را بیابید.

پاسخ: اگر x به صفر میل کند، صورت و مخرج کسر به صفر میل می‌کنند. بنابراین به ازای $x\neq ۰$ داریم:

$$\frac{x^۲}{\sqrt{x^۲+۹}-۳}=\frac{x^۲(\sqrt{x^۲+۹}+۳)}{(\sqrt{x^۲+۹}-۳)(\sqrt{x^۲+۹}+۳)}=\frac{x^۲(\sqrt{x^۲+۹}+۳)}{x^۲+۹-۹}=۳+\sqrt{x^۲+۹}$$

در نتیجه:

$$\lim_{x\to ۰}\frac{x^۲}{\sqrt{x^۲+۹}-۳}=\lim_{x\to ۰}(۳+\sqrt{x^۲+۹})=۳+\sqrt{۹}=۶$$

تمرین در کلاس صفحه ۸۷: مقدار $\lim\limits_{x\to ۱}\dfrac{x^۲-۱}{\sqrt[۳]{x}-۱}$ را بیابید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۱}\frac{x^۲-۱}{\sqrt[۳]{x}-۱}=\lim_{x\to ۱}\frac{(x-۱)(x+۱)(\sqrt[۳]{x^۲}+\sqrt[۳]{x}+۱)}{(\sqrt[۳]{x}-۱)(\sqrt[۳]{x^۲}+\sqrt[۳]{x}+۱)}=\lim_{x\to ۱}\frac{(x-۱)(x+۱)(\sqrt[۳]{x^۲}+\sqrt[۳]{x}+۱)}{x-۱}=\lim_{x\to ۱}(x+۱)(\sqrt[۳]{x^۲}+\sqrt[۳]{x}+۱)=۲\times ۳=۶$$

مثال صفحه ۸۸: مقدار $\lim\limits_{x\to \pi}\dfrac{۱+\cos^۳ x}{\sin^۲ x}$ را بیابید.

پاسخ: وقتی x به π میل کند، صورت و مخرج کسر به صفر میل می‌کنند، پس به ازای $x \neq \pi$ (حد را در یک همسایگی محذوف π حساب می‌کنیم.)

$$\frac{1+\cos^3 x}{\sin^2 x} = \frac{\cancel{(1+\cos x)}(1-\cos x+\cos^2 x)}{\cancel{(1+\cos x)}(1-\cos x)} = \frac{1-\cos x+\cos^2 x}{1-\cos x}$$

عامل $(1+\cos x) \neq 0$ از صورت و مخرج ساده شده است، زیرا $x \neq \pi$ است. در نتیجه:

$$\lim_{x\to\pi}\frac{1+\cos^3 x}{\sin^2 x} = \lim_{x\to\pi}\frac{1-\cos x+\cos^2 x}{1-\cos x} = \frac{1+1+1}{1-(-1)} = \frac{3}{2}$$

تمرین در کلاس صفحه ۸۸: مقدار $\lim\limits_{x\to\frac{\pi}{2}}\frac{1-\sin x}{\cos^2 x}$ را محاسبه کنید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to\frac{\pi}{2}}\frac{1-\sin x}{\cos^2 x} = \lim_{x\to\frac{\pi}{2}}\frac{1-\sin x}{1-\sin^2 x} = \lim_{x\to\frac{\pi}{2}}\frac{1-\sin x}{(1-\sin x)(1+\sin x)} = \lim_{x\to\frac{\pi}{2}}\frac{1}{1+\sin x} = \frac{1}{2}$$

مسائل صفحه ۸۸:

۱- به کمک تعریف دنباله‌ای حد، ثابت کنید:

الف) $\lim\limits_{x\to 2} x^3 = 8$

پاسخ: فرض: $\{a_n\}\to 2$ دلخواه و $a_n \neq 2$: $\lim\limits_{n\to\infty} a_n^3 = 2^3 = 8 \Rightarrow \lim\limits_{x\to 2} x^3 = 8$

ب) $\lim\limits_{x\to 3}\frac{x^2-9}{x-3} = 6$

پاسخ: فرض: $\{a_n\}\to 3$ دلخواه ، $a_n \neq 3$

$$\lim_{n\to\infty}\frac{a_n^2-9}{a_n-3} = \lim_{n\to\infty}\frac{(a_n-3)(a_n+3)}{a_n-3} = 3+3 = 6 \Rightarrow \lim_{x\to 3}\frac{x^2-9}{x-3} = 6$$

ت) $\lim\limits_{x\to a}\sqrt{x} = \sqrt{a}$ ، $a \geq 0$

پاسخ: فرض: $\{a_n\}\to a$ دلخواه ، $a_n \neq a$

$$\lim_{n\to\infty}\sqrt{a_n} = \sqrt{a} \Rightarrow \lim_{x\to a}\sqrt{x} = \sqrt{a}$$

پ) $\lim\limits_{x\to 1}\sqrt{x-1} = 0$

پاسخ: فرض: $\{a_n\}\to 1$ دلخواه ، $a_n \neq 1$

$$\lim_{n\to\infty}\sqrt{a_n-1} = 0 \Rightarrow \lim_{x\to 1}\sqrt{x-1} = 0$$

ث) $\lim\limits_{x\to\frac{1}{2}^+} x^2[x] = 0$

پاسخ: فرض: $\{a_n\}\to\frac{1}{2}$ ، $a_n > \frac{1}{2}$

$$\lim_{n\to\infty} a_n^2[a_n] = 0 \times \text{کراندار} = 0 \Rightarrow \lim_{x\to\frac{1}{2}^+} x^2[x] = 0$$

۲- الف) دو تابع به نام‌های f و g مثال بزنید که $\lim\limits_{x\to a}(f(x)+g(x))$ وجود داشته باشد، ولی نه $\lim\limits_{x\to a} f(x)$ وجود داشته باشد نه $\lim\limits_{x\to a} g(x)$.

پاسخ:

$$f(x)=\begin{cases}۱ & x>۱\\ -۱ & x\le -۱\end{cases}\quad,\quad g(x)=\begin{cases}-۱ & x>۱\\ ۱ & x\le -۱\end{cases}$$

ب) دو تابع به نام‌های f و g مثال بزنید که $\lim\limits_{x\to a} f(x)g(x)$ وجود داشته باشد، ولی نه $\lim\limits_{x\to a} f(x)$ وجود داشته باشد، نه $\lim\limits_{x\to a} g(x)$.

پاسخ:

$$f(x)=\begin{cases}۱ & x>۱\\ -۱ & x\le -۱\end{cases}\ ,\ g(x)=\begin{cases}-۱ & x>۱\\ ۱ & x\le -۱\end{cases}$$

۳- با استفاده از قضایای حد، حدهای زیر را در صورت وجود حساب کنید:

الف) $\lim\limits_{x\to ۰}\dfrac{(x+۳)^۲-۹}{x}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۰}\frac{(x+۳)^۲-۹}{x}=\lim_{x\to ۰}\frac{(x+۳-۳)(x+۳+۳)}{x}=۶$$

ب) $\lim\limits_{x\to ۴}\dfrac{x-۴}{\sqrt{x}-۲}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۴}\frac{x-۴}{\sqrt{x}-۲}=\lim_{x\to ۴}\frac{(x-۴)(\sqrt{x}+۲)}{(\sqrt{x}-۲)(\sqrt{x}+۲)}=\lim_{x\to ۴}\frac{(x-۴)(\sqrt{x}+۲)}{x-۴}=۴$$

پ) $\lim\limits_{x\to ۰}\tan x\cot x$

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۰}\tan x\cot x=\lim_{x\to ۰}\frac{\sin x}{\cos x}\times\frac{\cos x}{\sin x}=۱$$

ت) $\lim\limits_{x\to ۰^-}(۱-x+[x]-[۲x])$

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۰^-}(۱-x+[x]-[۲x])=\lim_{x\to ۰^-}(۱-۰+(-۱)-(-۱))=۱$$

۴- آیا عددی مانند a وجود دارد که مقدار $\lim\limits_{x\to ۲}\dfrac{x+۱-\sqrt{۴x+۱}}{۲x^۲+ax-۴}$ ، عددی مخالف صفر باشد؟ مقدار a و مقدار این حد را پیدا کنید.

پاسخ: چون صورت کسر به ازای $x=۲$ برابر صفر است و حد می‌خواهد غیرصفر باشد، پس باید مخرج نیز به ازای $x=۲$ صفر شود. بنابراین $۲(۲^۲)+۲a-۴=۰$ و در نتیجه $a=-۲$. حال تابع را بازنویسی می‌کنیم:

$$\lim_{x\to ۲}\frac{x+۱-\sqrt{۴x+۱}}{۲x^۲-۲x-۴}\times\frac{x+۱+\sqrt{۴x+۱}}{x+۱+\sqrt{۴x+۱}}=\lim_{x\to ۲}\frac{(x+۱)^۲-(۴x+۱)}{۲(x+۱)(x-۲)(x+۲\sqrt{۴x+۱})}$$

۵- عددهای a و b را چنان انتخاب کنید که $\lim\limits_{x\to ۰}\dfrac{\sqrt{ax+b}-۲}{x}=۱$

پاسخ:

$$\sqrt{ax+b}-۲=۰\xrightarrow{x=۰}\sqrt{b}-۲=۰\Rightarrow b=۴$$

$$\lim_{x\to ۰}\frac{\sqrt{ax+b}-۲}{x}\times\frac{\sqrt{ax+b}+۲}{\sqrt{ax+b}+۲}=\lim_{x\to ۰}\frac{ax+b-۴}{x(\sqrt{ax+b}+۲)}=\lim_{x\to ۰}\frac{ax}{x(\sqrt{ax+۴}+۲)}=\frac{a}{۴}\Rightarrow\frac{a}{۴}=۱\Rightarrow a=۴$$

۶- $\lim\limits_{x\to ۰}\dfrac{|۳x-۱|-|۳x+۱|}{x}$ را حساب کنید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۰}\frac{|۳x-۱|-|۳x+۱|}{x}=\lim_{x\to ۰}\frac{-(۳x-۱)-(۳x+۱)}{x}=\lim_{x\to ۰}\frac{-۳x+۱-۳x-۱}{x}=-۶$$

۷- $\lim\limits_{x\to 0}\frac{1}{x}\left(1-x\left[\frac{1}{x}\right]\right)$ را حساب کنید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to 0}\frac{1}{x}\left(1-x\left[\frac{1}{x}\right]\right)=\lim_{x\to 0}\left(\frac{1}{x}-\left[\frac{1}{x}\right]\right)\xlongequal[t=\frac{1}{x}]{}\lim_{t\to\infty}(t-[t])$$ وجود ندارد.

۸- $\lim\limits_{x\to 0}\left(\frac{3x-4}{x^2-2x}-\frac{x+2}{x^2+x}\right)$ را حساب کنید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to 0}\frac{3x-4}{x^2-2x}-\frac{x+2}{x^2+x}=\lim_{x\to 0}\frac{3x-4}{x(x-2)}-\frac{x+2}{x(x+1)}=\lim_{x\to 0}\frac{3x^2-x-4-x^2+4}{x(x-2)(x+1)}=\lim_{x\to 0}\frac{x(2x-1)}{x(x-2)(x+1)}$$

۹- مقدار $\lim\limits_{x\to 0^+}\sin 4x(\cot 2x-\cot x)$ را بیابید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to 0^+}\sin 4x(\cot 2x-\cot x)=\lim_{x\to 0^+}\sin 4x\left(\frac{\cos 2x}{\sin 2x}-\frac{\cos x}{\sin x}\right)=\lim_{x\to 0^+}\sin 4x\left(\frac{\sin x\cos 2x-\sin 2x\cos x}{\sin 2x.\sin x}\right)$$

$$=\lim_{x\to 0^+}\sin 4x\left(\frac{\sin(x-2x)}{\sin 2x.\sin x}\right)=\lim_{x\to 0^+}\frac{\sin 4x(-\sin x)}{\sin 2x.\sin x}=\lim_{x\to 0^+}\frac{-\sin 4x}{\sin 2x}=-2$$

۱۰- مقدار $\lim\limits_{x\to \frac{1}{2}^+}\frac{|\cos\pi x|}{1-\sqrt{2x}}$ را بیابید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to \frac{1}{2}^+}\frac{|\cos\pi x|}{1-\sqrt{2x}}=\lim_{x\to \frac{1}{2}^+}\frac{\left|\sin\left(\frac{\pi}{2}-\pi x\right)\right|(1+\sqrt{2x})}{(1-\sqrt{2x})(1+\sqrt{2x})}=\lim_{x\to \frac{1}{2}^+}\frac{-\left(\frac{\pi}{2}-\pi x\right)(1+\sqrt{2x})}{1-2x}=-4\pi$$

۱۱- تابع $f(x)=\left[\frac{4x^2+3}{x^2+1}\right]$ در چند نقطه دارای حد است؟ (چرا؟)

پاسخ:

$$f(x)=\left[\frac{4x^2+3}{x^2+1}\right]=\left[\frac{4(x^2+1)-1}{x^2+1}\right]=\left[4-\frac{1}{x^2+1}\right]=3$$

یعنی تابع $f(x)=3$ می‌باشد که در تمام نقاط دارای حد است.

۱۲- حدهای زیر را بیابید.

الف) $\lim\limits_{x\to 0}\frac{1-\cos x}{x^2}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to 0}\frac{1-\cos x}{x^2}\times\frac{1+\cos x}{1+\cos x}=\lim_{x\to 0}\frac{1-\cos^2 x}{x^2(1+\cos x)}=\lim_{x\to 0}\frac{\sin^2 x}{x^2(1+\cos x)}=\frac{1}{2}$$

ب) $\lim\limits_{x\to \frac{\pi}{4}}\frac{1-\tan x}{\sin x-\cos x}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to\frac{\pi}{۴}}\frac{۱-\tan x}{\sin x-\cos x}=\lim_{x\to\frac{\pi}{۴}}\frac{۱-\frac{\sin x}{\cos x}}{\sin x-\cos x}=\lim_{x\to\frac{\pi}{۴}}\frac{\frac{\cos x-\sin x}{\cos x}}{\sin x-\cos x}=-\frac{۱}{\frac{\sqrt{۲}}{۲}}=-\sqrt{۲}$$

پ) $\lim_{x\to ۰}\frac{\cos ۳x-\cos x}{x^۲}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۰}\frac{\cos ۳x-\cos x}{x^۲}=\lim_{x\to ۰}\frac{-۲\sin ۲x.\sin x}{x^۲}=\lim_{x\to ۰}-۲\frac{\sin ۲x}{\frac{۱}{۲}\times ۲x}\cdot\frac{\sin x}{x}=-۴$$

ت) $\lim_{x\to ۴}(۲-\sqrt{x})\tan\frac{\pi x}{۸}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۴}(۲-\sqrt{x})\tan\frac{\pi x}{۸}\overset{t=x-۴}{=\!=}\lim_{t\to ۰}(۲-\sqrt{t+۴})\tan\frac{\pi(t+۴)}{۸}=\lim_{t\to ۰}(۲-\sqrt{t+۴})\times\left(-\cot\left(\frac{t\pi}{۸}\right)\right)=\lim_{t\to ۰}\frac{t}{۲+\sqrt{t+۴}}\times\frac{\cos\left(\frac{t\pi}{۸}\right)}{\sin\frac{t\pi}{۸}}$$

$$=\lim_{t\to ۰}\frac{t}{۲+\sqrt{t+۴}}\times\cos\frac{t\pi}{۸}\times\frac{\frac{t\pi}{۸}}{\sin\frac{t\pi}{۸}}\times\frac{۱}{\frac{t\pi}{۸}}=\frac{۲}{\pi}$$

۱۳- با استفاده از قضیه فشردگی مقدار $\lim_{x\to ۰}x^۲\cos\frac{۱}{x}$ را بیابید (می‌توانید راه‌حل ساده‌تری برای این مسأله، ارائه دهید؟)

پاسخ: می‌دانیم تابع cos کراندار است و $-۱\le\cos\frac{۱}{x}\le+۱$ بنابراین $-x^۲\le x^۲\cos\frac{۱}{x}\le x^۲$ می‌باشد. از طرفی $\lim_{x\to ۰}-x^۲=\lim_{x\to ۰}x^۲=۰$

بنابراین طبق قضیه فشردگی $\lim_{x\to ۰}x^۲\cos\frac{۱}{x}=۰$.

راه دوم: $\lim_{x\to ۰}x^۲\cos\frac{۱}{x}=۰\times\text{کراندار}=۰$

۱۴- با فرض این که $f(x)=\left[x+\frac{۱}{۳}\right]+[۳x]$، دنباله $\left\{f\left(\frac{۱}{۳}+\frac{۱}{n}\right)\right\}$ به چه عددی همگراست؟

پاسخ:

$$f\left(\frac{۱}{۳}+\frac{۱}{n}\right)=\left[\frac{۱}{۳}+\frac{۱}{n}+\frac{۱}{۳}\right]+\left[۱+\frac{۳}{n}\right]=\left[\frac{۱}{n}+\frac{۲}{۳}\right]+\left[۱+\frac{۳}{n}\right]\Rightarrow\lim_{n\to\infty}f\left(\frac{۱}{۳}+\frac{۱}{n}\right)=\lim_{n\to\infty}\left[\frac{۱}{n}+\frac{۲}{۳}\right]+\left[۱+\frac{۳}{n}\right]=۱$$

۱۵- به کمک تعریف دنباله‌ای حد، ثابت کنید تابع‌های زیر در نقطه‌ی داده شده، حدشان موجود نیست.

الف) $f(x)=\frac{|x-۱|}{x-۱}$ در نقطه‌ی $x=۱$

پاسخ:

$$a_n=۱+\frac{۱}{n}\Rightarrow\lim_{n\to\infty}\frac{\left|۱+\frac{۱}{n}-۱\right|}{۱+\frac{۱}{n}-۱}=۱$$

$$b_n=۱-\frac{۱}{n}\Rightarrow\lim_{n\to\infty}\frac{\left|۱-\frac{۱}{n}-۱\right|}{۱-\frac{۱}{n}-۱}=-۱$$

$\Rightarrow \lim_{x\to ۱}\frac{|x-۱|}{x-۱}$ موجود نمی‌باشد.

ب) $g(x)=\cos\frac{1}{x-1}$ در نقطه‌ی $x=1$

پاسخ:

$$a_n=1+\frac{1}{2n\pi}\Rightarrow \lim_{n\to\infty}\cos\left(\frac{1}{\frac{1}{2n\pi}+1-1}\right)=\cos 2n\pi=1$$

$$b_n=\frac{1}{2n\pi+\frac{\pi}{2}}+1\Rightarrow \lim_{n\to\infty}\cos\left(\frac{1}{\frac{1}{2n\pi+\frac{\pi}{2}}+1-1}\right)=\cos(2n\pi+\frac{\pi}{2})=0 \quad \Rightarrow \lim_{x\to1}\cos\frac{1}{x-1}$$ موجود نمی‌باشد.

۱۶- به کمک تعریف دنباله‌ای حد، ثابت کنید، تابع زیر (تابع دیریکله) در هیچ نقطه‌ای دارای حد نیست.

$$D(x)=\begin{cases}0 & ,\ x \text{ گویا}\\ 1 & ,\ x \text{ گنگ}\end{cases}$$

پاسخ: فرض کنیم a عددی دلخواه باشد. طبق قضیه صفحه ۴۵ دنباله‌ای مانند $\{u_n\}$ از اعداد گویا وجود دارد که $u_n\to a$. در این صورت $D(u_n)=0\Rightarrow D(u_n)\to 0$. با فرض $b_n=u_n+\frac{\sqrt{2}}{n}$ همه جملات این دنباله گنگ می‌شوند و $D(b_n)=1$ و در نتیجه $D(b_n)\to 1$. بنابراین $\lim_{x\to a}D(x)$ موجود نمی‌باشد.

۱۷- به کمک تعریف دنباله‌ای حد، نشان دهید تابع زیر در نقطه‌ی $x=\frac{1}{2}$، دارای حد است و مقدار حد را مشخص کنید.

$$f(x)=\begin{cases}x+2 & ,\ x \text{ گویا}\\ 3x+1 & ,\ x \text{ گنگ}\end{cases}$$

پاسخ:

فرض: $\{a_n\}\to\frac{1}{2}$ دلخواه ، $a_n\neq\frac{1}{2}$

$$f(a_n)=\begin{cases}a_n+2 & ,\ a_n \text{ گویا}\\ a_nx+1 & ,\ a_n \text{ گنگ}\end{cases}$$

بنابراین وقتی u_n گویا باشد $\lim_{n\to\infty}f(a_n)=\lim_{n\to\infty}(a_n+2)=\frac{5}{2}$ و وقتی u_n گنگ باشد $\lim_{n\to\infty}f(a_n)=\lim_{n\to\infty}(3a_n+1)=\frac{5}{2}$.

بنابراین $\lim_{n\to\infty}f(a_n)=\frac{5}{2}$ و در نتیجه $\lim_{x\to\frac{1}{2}}f(x)=\frac{5}{2}$ موجود می‌باشد.

مثال صفحه ۹۲: آیا مقداری برای m یافت می‌شود که تابع $f(x)=\begin{cases}\frac{|x|}{x} & ,\ x\neq 0\\ m & ,\ x=0\end{cases}$ در $x=0$ پیوسته باشد؟

پاسخ: می‌دانیم $\lim_{x\to0^+}\frac{|x|}{x}=1$ و $\lim_{x\to0^-}\frac{|x|}{x}=-1$ ، در نتیجه $\lim_{x\to0}\frac{|x|}{x}$ وجود ندارد. لذا m را هر عددی که بگیریم، شرط (ب) در تعریف پیوستگی برقرار نیست و نمی‌توان تابع f را در $x=0$ پیوسته کرد.

تمرین در کلاس صفحه ۹۲: پیوستگی تابع $f(x)=\begin{cases}\frac{x^2-1}{x-1} & ,\ x\neq 1\\ 4 & ,\ x=1\end{cases}$ را در $x=1$ بررسی کنید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to1}f(x)=\lim_{x\to1}\frac{x^2-1}{x-1}=\lim_{x\to1}x+1=2$$
$$f(1)=4$$
$\Rightarrow$ f در $x=1$ پیوسته نیست.

مثال صفحه ۹۳: نشان دهید تابع $f(x)=\begin{cases}\dfrac{\sin x}{x} & , \quad x\neq ۰\\ ۱ & , \quad x=۰\end{cases}$ در نقطه $x=۰$ پیوسته است.

پاسخ: $x=۰$ نقطه درونی دامنه f است و $\lim\limits_{x\to ۰} f(x)=f(۰)=۱$ پس تابع f در $x=۰$ پیوسته است.

تمرین در کلاس صفحه ۹۳: نشان دهید تابع $f(x)=\sqrt{۴-x^۲}$ در نقطه‌ی $x=۱$ پیوسته است.

پاسخ:

$$\left.\begin{array}{l}\lim\limits_{x\to ۱} f(x)=\lim\limits_{x\to ۱}\sqrt{۴-x^۲}=\sqrt{۳}\\ f(۱)=\sqrt{۴-۱}=\sqrt{۳}\end{array}\right\}\Rightarrow \lim\limits_{x\to ۱} f(x)=f(۱) \Rightarrow$$ f در $x=۱$ پیوسته است.

مثال صفحه ۹۴: تابع $f(x)=[x]$ در هر عدد صحیح n از راست پیوسته است اما از چپ ناپیوسته است.

پاسخ: زیرا:

$$\lim\limits_{x\to n^+} f(x)=\lim\limits_{x\to n^+}[x]=n=f(n)$$

اما:

$$\lim\limits_{x\to n^-} f(x)=\lim\limits_{x\to n^-}[x]=n-۱\neq f(n)$$

تمرین در کلاس صفحه ۹۴: پیوستگی تابع $f(x)=[\sin x]$ را در نقطه $x=\pi$ بررسی کنید. (پیوستگی راست و چپ)

پاسخ:

$$\lim\limits_{x\to \pi^+} f(x)=\lim\limits_{x\to \pi^+}[\sin x]=[۰^-]=-۱$$

$$\lim\limits_{x\to \pi^-} f(x)=\lim\limits_{x\to \pi^-}[\sin x]=[۰^+]=۰$$

$f(\pi)=[\sin\pi]=۰ \Rightarrow$ f در $x=\pi$ پیوستگی چپ دارد.

تمرین در کلاس صفحه ۹۵: پیوستگی تابع $f(x)=x-\sqrt{۴-x^۲}$ را در نقاط انتهایی دامنه آن بررسی کنید.

پاسخ: دامنه‌ی این تابع $[-۲,۲]$ می‌باشد. پس منظور از پیوستگی f در نقاط انتهایی، بررسی پیوستگی راست در $x=-۲$ و پیوستگی چپ در $x=۲$ می‌باشد.

$$\left.\begin{array}{l}\lim\limits_{x\to -۲^+} f(x)=\lim\limits_{x\to -۲^+} x-\sqrt{۴-x^۲}=-۲\\ f(-۲)=-۲\end{array}\right\}\Rightarrow$$ f در $x=-۲$ پیوستگی راست دارد.

$$\left.\begin{array}{l}\lim\limits_{x\to ۲^-} f(x)=\lim\limits_{x\to ۲^-} x-\sqrt{۴-x^۲}=۲\\ f(۲)=۲\end{array}\right\}\Rightarrow$$ f در $x=۲$ پیوستگی چپ دارد.

مثال صفحه ۹۵: پیوستگی تابع $f(x)=\sqrt{x}$ را در دامنه‌اش یعنی $[۰,+\infty)$ بررسی کنید.

پاسخ: تابع f در نقطه‌ی انتهایی چپ دامنه‌اش یعنی ۰ پیوسته است، زیرا در آن‌جا از راست پیوسته است ($\lim\limits_{x\to ۰^+}\sqrt{x}=f(۰)$) همچنین f در هر نقطه‌ی $c>۰$ پیوسته است، زیرا $\lim\limits_{x\to c}\sqrt{x}=\sqrt{c}$

تمرین در کلاس صفحه ۹۵: پیوستگی تابع $f(x)=\dfrac{۱}{\sqrt{x-۱}}$ را در دامنه‌اش بررسی کنید.

پاسخ: دامنه‌ی این تابع $(۱,+\infty)$ است. این تابع در تمام نقاط دامنه‌اش پیوسته است و $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{۱}{\sqrt{x-۱}}=\dfrac{۱}{\sqrt{a-۱}}$.

قضیه ۱ صفحه ۹۶ : فرض کنید D اشتراک دامنه تابع‌های f و g باشد و f و g هر دو در نقطه a پیوسته باشند و c عددی ثابت باشد، آن‌گاه

تابع‌های زیر نیز در a پیوسته‌اند.

الف) $f+g$ ب) $f-g$ پ) cf ت) $f.g$ ث) $\frac{f}{g}$ به شرطی که $g(a)\neq 0$

پاسخ:

برهان: همه‌ی حکم‌ها به سادگی از حکم‌های مشابه برای محاسبه حد مجموع و حاصل‌ضرب و خارج‌قسمت در قضیه (۱) نتیجه می‌شوند.

برای نمونه قسمت (ث) را ثابت می‌کنیم.به ازای هر دنباله دلخواه $\{x_n\}$ از نقاط D که همگرا به a است، داریم:

$$\lim_{n\to+\infty} f(x_n)=f(a)\quad,\quad \lim_{n\to+\infty} g(x_n)=g(a)$$

بنابراین:

$$\lim_{n\to+\infty}\frac{f(x_n)}{g(x_n)}=\frac{f(a)}{g(a)}\ ,\ g(a)\neq 0$$

پس طبق تعریف (۳) تابع $\frac{f}{g}$ در نقطه‌ی a پیوسته است.

نکته: عکس این قضیه همواره درست نیست.

مثال صفحه ۹۶: **تابع‌های $f(x)=\begin{cases}1 , & x \text{ گویا}\\ 0 , & x \text{ گنگ}\end{cases}$ و $g(x)=\begin{cases}0 , & x \text{ گویا}\\ 1 , & x \text{ گنگ}\end{cases}$ در $x=0$ حد ندارند و بنابراین در $x=0$ پیوسته نیستند. اما برای هر $x\in\mathbb{R}$ ، $(f.g)(x)=0$ و این تابع ثابت در هر نقطه‌اش، حد آن با مقدار تابع در آن نقطه برابر است، پس در تمام نقاط از جمله $x=0$ پیوسته است.**

مثال صفحه ۹۶: **دو تابع مثال بزنید که هر دو در نقطه‌ی a ناپیوسته باشند، ولی مجموع آن‌ها در a پیوسته باشد.**

پاسخ:

$$f(x)=\begin{cases}1 & x\le a\\ -1 & x>a\end{cases}\quad,\quad g(x)=\begin{cases}-1 & x\le a\\ 1 & x>a\end{cases}$$

قضیه ۲ صفحه ۹۷:

الف) هر چندجمله‌ای همه‌جا پیوست است، یعنی روی $\mathbb{R}=(-\infty,+\infty)$ پیوسته است.

ب) هر تابع گویا در هر نقطه از دامنه‌اش پیوسته است.

پاسخ:

برهان: الف) هرچندجمله‌ای تابعی است به شکل $P(x)=a_nx^n+a_{n-1}x^{n-1}+\cdots+a_1x+a_0$ که در آن $a_n,a_{n-1},\cdots,a_1,a_0$ عددهای ثابت‌اند.

می‌دانیم:

$$\lim_{x\to c} a_0=a_0$$

$$\lim_{x\to c} x^m=c^m\ ,\ m=1,2,3,\dots,n$$

این تساوی به معنی آن است که تابع $f(x)=x^m$ تابعی است پیوسته در نتیجه بنا بر قسمت (پ) قضیه (۱) $g(x)=ax^m$ نیز تابعی است پیوسته.

چون $P(x)$ مجموع تابع‌هایی پیوسته نظیر $g(x)=ax^m$ و تابعی ثابت است بنا بر قسمت الف قضیه (۱) نتیجه می‌شود تابع چندجمله‌ای در $\mathbb{R}$ پیوسته است.

ب) هر تابع گویا تابعی است به شکل $f(x)=\frac{P(x)}{Q(x)}$ که در آن $P(x)$ و $Q(x)$ چندجمله‌ای‌اند و دامنه f مجموعه $D=\{x\in\mathbb{R}\,|\,Q(x)\neq 0\}$ است.

از طرفی بنا بر قسمت الف قضیه (۲)، $P(x)$ و $Q(x)$ در همه جا پیوسته‌اند، در نتیجه طبق قسمت (ث) قضیه (۱) تابع f در تمام نقاط دامنه‌اش پیوسته است.

مثال صفحه ۹۸: تابع $f(x)=\dfrac{x^۳+۲x^۲-x+۱}{x^۲-۱}$ روی چه بازه‌هایی پیوسته است؟پاسخ: دامنه تابع f، مجموعه‌ی $D=\mathbb{R}-\{-۱,+۱\}$ است، بنابراین طبق قضیه (۱) تابع f به جز در نقاطی که مخرج آن صفر می‌شود، همه‌جا پیوسته است در نتیجه تابع روی بازه‌های $(-\infty,-۱)\cup(-۱,۱)\cup(۱,+\infty)$ پیوسته است.

تمرین در کلاس صفحه ۹۸: تابع $f(x)=\dfrac{۲}{x-۳}+\dfrac{x+۱}{x^۲+x+۱}$ روی چه بازه‌هایی پیوسته است؟

پاسخ: دامنه‌ی تابع برابر $\mathbb{R}-\{۳\}$ است.

$$\begin{cases} x-۳=۰ \Rightarrow x=۳ \\ x^۲+x+۱=۰ : \Delta<۰ \Rightarrow \text{ریشه ندارد.} \end{cases}$$

بنابراین تابع روی بازه‌های زیر پیوسته است: $(-\infty,۳)\,,(۳,+\infty)$

مثال صفحه ۹۸: فرض کنید $f(x)=\dfrac{\sin^۲x}{۱-\cos x}$، $f(۰)$ را چنان تعریف کنید که تابع f در $x=۰$ پیوسته باشد.

پاسخ:

$$\lim_{x\to ۰} f(x)=\lim_{x\to ۰}\frac{\sin^۲x}{۱-\cos x}=\lim_{x\to ۰}\frac{(۱-\cos x)(۱+\cos x)}{(۱-\cos x)}$$

وقتی x به صفر میل می‌کند، داریم $(۱-\cos x)\neq ۰$ پس:

$$\lim_{x\to ۰} f(x)=\lim_{x\to ۰}(۱+\cos x)=۱+۱=۲$$

با انتخاب $f(۰)=۲$ تابع f در صفر پیوسته می‌شود.

تمرین در کلاس صفحه ۹۹: تابع $f(x)=\dfrac{\tan x}{۱+\sin x}$ در چه نقاطی پیوسته است؟

پاسخ: $f(x)=\dfrac{\tan x}{۱+\sin x}=\dfrac{\frac{\sin x}{\cos x}}{۱+\sin x}=\dfrac{\sin x}{\cos x(۱+\sin x)}$ و می‌دانیم توابع $\sin x$ و $\cos x$ همواره پیوسته‌اند. پس کافی‌است ریشه‌های مخرج را محاسبه کنیم و آن‌ها را حذف کنیم:

$$\cos x(۱+\sin x)=۰ \Rightarrow \begin{cases} \cos x=۰ \Rightarrow x=k\pi+\dfrac{\pi}{۲} \\ \sin x=-۱ \Rightarrow x=۲k\pi-\dfrac{\pi}{۲} \end{cases} \longrightarrow x=k\pi+\frac{\pi}{۲}$$

بنابراین $f(x)$ در همه نقاط دامنه‌اش یعنی هوه نقاط به جز $x=k\pi+\dfrac{\pi}{۲}$ پیوسته است

مثال صفحه ۹۹: می‌دانیم تابع $f(x)=|x|$ همه‌جا پیوسته است و $\lim\limits_{x\to a} g(x)=b$ بنابراین طبق قضیه (۳) داریم:

$$\lim_{x\to a} f(g(x))=f(\lim_{x\to a} g(x))=f(b)=|b|$$

از قضیه (۳) نتیجه می‌گیریم که ترکیب دو تابع پیوسته، خود تابعی پیوسته است. و به بیان دقیق‌تر، اگر تابع g در نقطه a و تابع در g(a) پیوسته باشد، آن‌گاه تابع fog در نقطه a پیوسته است.

مثال صفحه ۹۹: نشان دهید تابع $y=\sqrt[۳]{\dfrac{x-۲}{x^۲+x+۱}}$ همه‌جا پیوسته است.

پاسخ: مخرج کسر زیر رادیکال همواره مخالف صفر است $(\Delta=۱-۴<۰)$. بنابراین تابع گویای $g(x)=\dfrac{x-۲}{x^۲+x+۱}$ همه‌جا پیوسته است.

از طرفی تابع $f(x)=\sqrt[3]{x}$ همواره پیوسته است $(\lim\limits_{x\to a} f(x)=\sqrt[3]{a})$.پس ترکیب دو تابع پیوسته f و g یعنی تابع $f(g(x))=\sqrt[3]{\dfrac{x-2}{x^2+x+1}}$ همه‌جا پیوسته است.

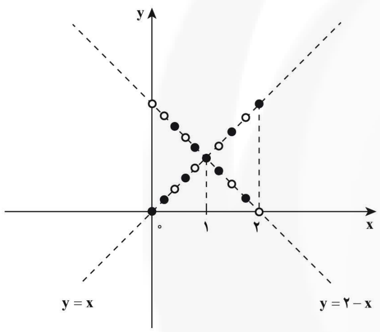
تمرین در کلاس صفحه ۱۰۰: **تابع $f(x)=\tan\sqrt{x}$ در چه نقاطی ناپیوسته است؟**

پاسخ: تابع $\tan x$ در همه نقاط به جز $x=k\pi+\dfrac{\pi}{2}$ و تابع $g(x)=\sqrt{x}$ در $x\ge 0$ پیوسته است بنابراین اگر $\sqrt{x}\ne k\pi+\dfrac{\pi}{2}, x\ge 0$ در این صورت ترکیب دو تابع یعنی تابع $f(x)=\tan\sqrt{x}$ در تمام این نقاط که دامنه‌اش است پیوسته است. (تابع در تمام نقاط دامنه پیوسته است. در نقاط دیگر تابع تعریف نمی‌شود.)

مثال صفحه ۱۰۰: **تابع $f:\mathbb{R}\to\mathbb{R}$ را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:**

$$f(x)=\begin{cases} x & , \text{x گویا} \\ 2-x & , \text{x گنگ} \end{cases}$$

نقاطی از تابع f را تعیین کنید که تابع در آن نقاط پیوسته باشد.



پاسخ: می‌دانیم که در هر بازه‌ی باز از اعداد حقیقی هم اعداد گویا وجود دارد و هم اعداد گنگ، بنابراین نقاط تابع f یا روی خط $y=x$ (وقتی که x گویا باشد) و یا روی خط $y=2-x$ (وقتی که x اصم باشد) قرار دارند.

با مشاهده نمودار به صورت نقطه‌چین تابع در شکل روبه‌رو هرچه‌قدر به نقطه‌ی $(1,1)$ نزدیک‌تر شویم، نقطه‌چین‌ها به هم متراکم‌تر خواهندشد و به نظر می‌رسد که تابع در $x=1$ حد دارد و برای اثبات درستی حدس خود، از تعریف حد به شرح زیر استفاده می‌کنیم.

فرض کنید $a\in R$، $\{a_n\}$ دنباله‌ای دلخواه از اعداد حقیقی باشد به طوری که $a_n\to a$ و زیردنباله‌ی $\{b_n\}$ که همه‌ی جملات آن از اعداد گویا و زیردنباله‌ی $\{c_n\}$ که همه‌ی جملات آن از اعداد گنگ تشکیل شده است را انتخاب می‌کنیم.

$f(b_n)=b_n \; , \; f(c_n)=2-c_n$

بنابراین: $\lim\limits_{n\to+\infty} f(b_n)=a \; , \; \lim\limits_{n\to+\infty} f(c_n)=2-a$

شرط این که $\lim\limits_{n\to+\infty} f(a_n)$ موجود باشد آن است که $a=2-a$ یا $a=1$ پس $\lim\limits_{n\to+\infty} f(a_n)=1$ و در نتیجه دنباله $\{f(a_n)\}$ به $f(1)=1$ همگراست و تابع f در نقطه‌ی $x=1$ پیوسته است.

برای حل مثال بالا از قضیه زیر استفاده شده است.

قضیه **اگر دنباله $\{a_n\}$ همگرا به a باشد، هر زیردنباله‌ی آن همگرا به a است و بالعکس.**

به عنوان مثال دنباله $\{a_n\}$ با ضابطه $a_n=\dfrac{n}{n+1}$ که به ۱ همگراست، هر زیردنباله آن مانند $\{a_{2n}\}$ و $\{a_{2n-1}\}$ نیز به ۱ همگراست

$$(\lim_{n\to+\infty}\frac{2n-1}{2n-1+1}=1 \; , \; \lim_{n\to+\infty}\frac{2n}{2n+1}=1)$$

تمرین در کلاس صفحه ۱۰۱: **ثابت کنید تابع $f(x)=\begin{cases} x^2 & , \text{x گویا} \\ 0 & , \text{x گنگ} \end{cases}$ در نقطه‌ی $x=0$ پیوسته است.**

پاسخ: اگر $a_n\to 0$ و a_n گویا باشد در این صورت $f(a_n)=a_n^2\to 0$ و اگر a_n گنگ باشد در این صورت $f(a_n)=0\to 0$ پس f در $x=0$ پیوسته است

مسائل صفحه ۱۰۲:

۱– نقاط ناپیوستگی تابع f را پیدا کنید.

$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{x^۲-۱}{x-۱} & , x>۱\\ x^۲ & , x\le ۱\end{cases}$$

پاسخ: پیوستگی تابع را در $x=۱$ بررسی می‌کنیم:

$$\lim_{x\to ۱^+} f(x)=\lim_{x\to ۱^+}(x+۱)=۲,\ \lim_{x\to ۱^-} f(x)=\lim_{x\to ۱^-}(x^۲)=۱, f(۱)=۱$$

بنابراین تابع f در تمام نقاطش به جز $x=۱$ پیوسته است.

۲- تابع $f(x)=\begin{cases}\dfrac{\sqrt[۳]{x+۸}-۲}{x} & , x\neq ۰\\ a & , x=۰\end{cases}$ **داده شده است. مقدار a را چنان انتخاب کنید که تابع در** $x=۰$ **پیوسته باشد.**

پاسخ:

$$a=f(۰)=\lim_{x\to ۰} f(x)=\lim_{x\to ۰}\frac{\sqrt[۳]{x+۸}-۲}{x}=\lim_{x\to ۰}\frac{x+۲-۲}{x(\sqrt[۳]{(x+۸)^۲}+۲\sqrt[۳]{x+۸}+۴)}=\frac{۱}{۴+۴+۴}=\frac{۱}{۱۲}$$

۳- به ازای چه مقدار a، تابع $f(x)=\begin{cases}\dfrac{|x|}{x}\sqrt{|x|} & , x\neq ۰\\ a & , x=۰\end{cases}$ **در** $x=۰$ **پیوسته است.**

پاسخ:

$$a=f(۰)=\lim_{x\to ۰} f(x)=\lim_{x\to ۰}\frac{|x|}{x}\sqrt{|x|}=\text{کراندار}\times ۰=۰$$

۴- عددهای a و b را چنان انتخاب کنید که تابع f در نقطه $x=۰$ **پیوسته باشد.**

$$f(x)=\begin{cases}a+[x] & , x<۰\\ b & , x=۰\\ \dfrac{\sin x}{\sqrt{۱-\cos x}} & , x>۰\end{cases}$$

پاسخ:

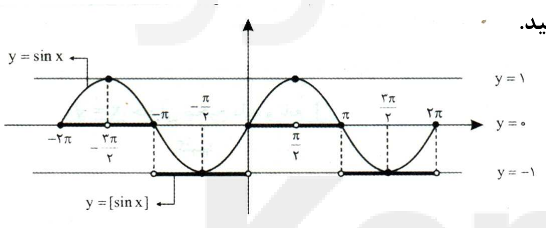
$$\lim_{x\to ۰^+} f(x)=\lim_{x\to ۰^+}\frac{\sin x}{\sqrt{۱-\cos x}}\times\frac{\sqrt{۱+\cos x}}{\sqrt{۱+\cos x}}=\lim_{x\to ۰^+}\frac{\sin x(\sqrt{۱+\cos x})}{\sqrt{۱-\cos^۲ x}}=\lim_{x\to ۰^+}\frac{\sin x(\sqrt{۱+\cos x})}{|\sin x|}=\lim_{x\to ۰^+}\sqrt{۱+\cos x}=\sqrt{۲}$$

$$\lim_{x\to ۰^-} f(x)=\lim_{x\to ۰^-}(a+[x])=a-۱\ ,\ f(۰)=b\Rightarrow a-۱=b=\sqrt{۲}\Rightarrow a=\sqrt{۲}+۱\ ,\ b=\sqrt{۲}$$

۵- تابع $f(x)=\left[\dfrac{x}{۲}\right]$ **در چه نقاطی ناپیوسته است؟**

پاسخ: میدانیم تابع براکتی در نقاط صحیح ناپیوسته است. بنابراین تابع $f(x)=\left[\dfrac{x}{۲}\right]$ در نقاط $x=۲k, k\in Z$ ناپیوسته است.

۶- نقاط پیوستگی تابع $f(x)=[\sin x]$ **را در بازه‌ی** $[-۲\pi,۲\pi]$ **مشخص کنید.**



پاسخ: با توجه به نمودار تابع که در بازه‌ی $[-۲\pi,۲\pi]$ رسم شده است مشخص می‌شود که این تابع در نقاط $x=-\dfrac{۳\pi}{۲},-\pi,۰,\pi,۲\pi$ ناپیوسته است. پس مجموعه نقاط پیوستگی تابع برابر $[-۲\pi,۲\pi]-\{-\dfrac{۳\pi}{۲},-\pi,۰,\pi,۲\pi\}$ می‌باشد.

۷- اگر تابع f در نقطه‌ای پیوسته باشد، ثابت کنید تابع $|f|$ نیز در آن نقطه پیوسته است. آیا عکس این مطلب نیز درست است؟

پاسخ: فرض کنیم f در a پیوسته باشد. چون قدرمطلق تابعی پیوسته است، داریم:

$$\lim_{x\to a} f(x)=f(a) \Rightarrow \lim_{x\to a}|f(x)|=|\lim_{x\to a} f(x)|=|f(a)|$$

پس $|f|$ نیز در a پیوسته است.

۸- دو تابع مثال بزنید که هر دو در یک نقطه ناپیوسته باشند ولی مجموع آن‌ها در آن نقطه پیوسته باشد.

پاسخ:

$$f(x)=\begin{cases}۱ & x\ge a\\ -۱ & x<a\end{cases} \quad , \quad g(x)=\begin{cases}-۱ & x\ge a\\ ۱ & x<a\end{cases}$$

$$f(x)+g(x)=۰$$

۹- دو تابع مثال بزنید که هر دو در یک نقطه ناپیوسته باشند ولی ضرب آن‌ها در آن نقطه پیوسته باشد.

پاسخ: دو تابع f(x) و g(x) هر دو در $x=۱$ ناپیوسته‌اند ولی تابع $f(x).g(x)$ در $x=۱$ پیوسته است:

$$f(x)=[x]$$

$$g(x)=[x]-۱$$

$$f(x).g(x)=[x]([x]-۱) \xrightarrow{\text{شرایط پیوستگی را بررسی می‌کنیم}} \begin{cases}\lim_{x\to ۱^+} f(x)g(x)=۱(۱-۱)=۰\\ \lim_{x\to ۱^-} f(x)g(x)=۰(۰-۱)=۰\end{cases} , \ f(۱).g(۱)=۰$$

۱۰- با برهان خلف، ثابت کنید: اگر تابع f در نقطه‌ی a پیوسته و تابع g در نقطه‌ی a ناپیوسته باشد، آن‌گاه $f+g$ در a ناپیوسته است.

پاسخ: برهان خلف: فرض کنیم $f+g$ و f در $x=a$ پیوسته باشد. در این صورت تفاضل این دو تابع یعنی تابع g نیز در $x=a$ پیوسته می‌شود که خلاف فرض است. پس فرض خلف باطل و f+g در $x=a$ ناپیوسته می‌باشد.

۱۱- با استفاده از قضایای حد و پیوستگی ثابت کنید تابع $f(x)=[x]\sin\pi x$ روی $\mathbb{R}$ پیوسته است.

پاسخ:

اگر $a\notin Z$ در این صورت هر دو تابع $\sin\pi x$ و $[x]$ پیوسته می‌شوند پس حاصل‌ضرب آن‌ها یعنی $f(x)=[x]\sin\pi x$ پیوسته می‌شود و چون در اطراف هر عدد $[x]$ کراندار است می‌توان نوشت:

$$\lim_{x\to a} f(x)=\lim_{x\to a}[x]\sin\pi x=\text{کراندار}\times ۰=۰$$

اگر $a\in Z$ در این صورت هر دو تابع $\sin\pi x=۰$ و $\lim_{x\to a} f(x)=\lim_{x\to a}[x]\sin\pi x[a]\sin\pi a=a\times ۰=۰$.

بنابراین f همواره پیوسته ااست.

۱۲- تابع $f(x)=[x^۲]$ روی بازه $[۲,۲+k)$ پیوسته است. بزرگ‌ترین مقدار k را بیابید.

پاسخ: تابع براکت در نقاط غیر صحیح پیوسته نمی‌باشد پس کافی‌ست $x^۲$ در این بازه برابر هیچ عدد صحیحی نباشد. وقتی $x=۲$ دراین صورت $x^۲=۴$ می‌باشد. بنابراین $۲+k$ حداکثر برابر $\sqrt{۵}$ می‌باشد تا $x\in[۲,۲+k)\Rightarrow ۴\le x^۲<۵$ و در نتیجه $۲+k=\sqrt{۵}\Rightarrow k=\sqrt{۵}-۲$.

۱۳- تابع $f(x)=\begin{cases}۴ & , x^۲=|x|\\ x+۲ & , x^۲\ne|x|\end{cases}$ در چند نقطه از دامنه‌اش ناپیوسته است؟

پاسخ: ابتدا معادله $x^۲=|x|$ را حل می‌کنیم. با توجه به نمودار این دو تابع جواب‌های $x=۰,۱,-۱$ به دست می‌آید. بنابراین و با محاسبه حد f در این نقاط نتیجه می‌شود تابع در هر سه نقطه ناپیوسته است.

۱۴- تابع $f(x)=\dfrac{۴-\sqrt{x+۳}}{\sqrt[۳]{x+۱}-۱}$ در چند نقطه از دامنه‌اش پیوسته است؟

پاسخ:

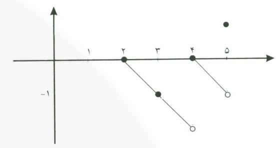
$$\begin{cases} x+3\geq 0 \Rightarrow x\geq -3 \\ \sqrt[3]{x+1}-1\neq 0 \Rightarrow x+1\neq 1 \Rightarrow x\neq 0 \end{cases} \Rightarrow D_f=[-3,0)\cup(0,+\infty)$$

و تابع در تمام نقاط دامنه‌اش پیوسته است.

۱۵- نمودار تابع $f(x)=[x]-x+\sin\left(\frac{\pi}{2}[x]\right)$ را در بازه‌ی $[2,5]$ رسم کرده و مشخص کنید، تابع در چند نقطه از این بازه ناپیوسته است.

پاسخ:

$$f(x)=[x]-x+\sin\left(\frac{\pi}{2}[x]\right)=\begin{cases} 2-x+\sin(\frac{\pi}{2}\times 2) & 2\leq x<3 \\ 3-x+\sin(\frac{3\pi}{2}\times 2) & 3\leq x<4 \\ 4-x+\sin(\frac{4\pi}{2}\times 2) & 4\leq x<5 \\ 1 & x=5 \end{cases} \Rightarrow f(x)=\begin{cases} 2-x & 2\leq x<3 \\ 2-x & 3\leq x<4 \\ 4-x & 4\leq x<5 \\ 1 & x=5 \end{cases}$$



بنابراین تابع در $x=4,5$ ناپیوسته است.

۱۶- پیوستگی تابع $f(x)=\begin{cases} x^2 & , \ x^2\geq 2|x| \\ 2|x| & , \ x^2<2|x| \end{cases}$ را روی $\mathbb{R}$ بررسی کنید.

پاسخ: ابتدا ناحیه‌ها را مشخص می‌کنیم. $x^2\geq 2|x| \Rightarrow |x|^2\geq 2|x| \Rightarrow |x|^2-2|x|\geq 0 \Rightarrow \begin{cases} |x|\leq 0 \\ |x|\geq 2 \end{cases}$. $|x|\leq 0$ فقط وقتی برقرار است که $x=0$ باشد و $|x|\geq 2$ وقتی برقرار است که $x\geq 2$ یا $x\leq -2$. بنابراین تابه به شکل زیر در می‌آید.

$$f(x)=\begin{cases} x^2 & , \ x\in(-\infty,-2)\cup\{0\}\cup(2,+\infty) \\ 2|x| & , \ x\in(-2,2)-\{0\} \end{cases}$$

با به دست آوردن حد تابع f در نقاط $x=0,-2,2$ دیده می‌شود که این تابع در همه جا پیوسته است.

۱۷- عددهای a و b را چنان انتخاب کنید که تابع $f(x)=(x^2-bx+a)\mathrm{sgn}(x^2+x-2)$ روی $\mathbb{R}$ پیوسته باشد. (sgn تابع علامت است.)

پاسخ:

ابتدا ظاهر تابع را کمی ساده‌تر می‌کنیم:

$$f(x)=(x^2-bx+a)\mathrm{sgn}(x^2+x-2)=\begin{cases} x^2-bx+a & x^2+x-2>0 \\ 0 & x^2+x-2=0 \\ -(x^2-bx+a) & x^2+x-2<0 \end{cases} \Rightarrow f(x)=\begin{cases} x^2-bx+a & x\in(-\infty,-2)\cup(1,+\infty) \\ 0 & x=1,-2 \\ -(x^2-bx+a) & -2<x<1 \end{cases}$$

تابع باید در نقاط $x=1,-2$ پیوسته باشد. بنابراین:

$$\begin{aligned} &\lim_{x\to 1^+} f(x)=\lim_{x\to 1^-} f(x)=f(1)\Rightarrow 1-b+a=-1+b-a=0 \\ &\lim_{x\to -2^+} f(x)=\lim_{x\to -2^-} f(x)=f(-2)\Rightarrow 4+2b+a=-4-2b-a=0 \end{aligned} \Rightarrow \begin{cases} b-a=1 \\ 2b+a=-4 \end{cases} \Rightarrow a=-2, b=-1$$

مثال صفحه ۱۰۴: با استفاده از قضیه بولزانو ثابت کنید معادله $x^4+x-3=0$ ریشه‌ای در بازه $(1,2)$ دارد.

پاسخ: تابع $f(x)=x^4+x-3$ را در نظر می‌گیریم. می‌دانیم که تابع چند جمله f که در هر نقطه از $\mathbb{R}$ یا بازه $(-\infty,+\infty)$ پیوسته است، پس در بازه $[1,2]$ نیز پیوسته است. از طرفی $f(1)f(2)<0$ (چرا؟) بنابراین طبق قضیه بولزانو دست کم یک عدد c در بازه باز $(1,2)$ وجود دارد که $f(c)=0$ یعنی c ریشه معادله $x^4+x-3=0$ است.

تمرین در کلاس صفحه ۱۰۴: نشان دهید معادله $x-\cos x=0$، ریشه‌ای در بازه $(0,1)$ دارد.

پاسخ:

$f(x)=x-\cos x$

$f(۰)=-۱\ ,\ f(۱)=۱-\cos ۱>۰\ \Rightarrow\ f(۰)f(۱)<۰ \xrightarrow{\text{طبق قضیه بولزانو}}$ f حداقل یک ریشه در $(۰,۱)$ دارد

مثال صفحه ۱۰۴: **اگر تابع f در بازه $[a,b]$ پیوسته و k عددی بین $f(a)$ و $f(b)$، $(f(a)<f(b))$ و $g(x)=f(x)-k$. نشان دهید، وجود دارد $c\in(a,b)$ که $g(c)=۰$.**

پاسخ: طبق فرض داریم $g(a)=f(a)-k<۰$ و $g(b)=f(b)-k>۰$ و تابع g در بازه $[a,b]$ پیوسته است. (چرا؟) پس بنا بر قضیه بولزانو وجود دارد $c\in(a,b)$ که $g(c)=۰$ و یا $f(c)=k$ ایده مثال فوق قضیه‌ی مقدار میانی است که در زیر بیان می‌شود.

مثال صفحه ۱۰۵: **نشان دهید که خط $y=۲$ نمودار تابع $f(x)=(x-۱)^۲(x-۳)^۲+x$ را قطع می‌کند.**

پاسخ: چون تابع چندجمله‌ای f در بازه $(-\infty,+\infty)$ پیوسته است، پس f در بازه $[۱,۳]$ نیز پیوسته است. از طرفی $f(۱)=۱$ و $f(۳)=۳$.

بنابراین طبق قضیه مقدار میانی خط $y=۲$ که بین خطوط $y=۱$ و $y=۳$ قرار دارد نمودار f را قطع می‌کند.

تمرین در کلاس صفحه ۱۰۵:

آیا تابع $f(x)=\frac{x^۳}{۴}+\sin\pi x+۴$ در بازه $[-۲,۲]$ مقدار ۵ را می‌تواند داشته باشد؟

پاسخ:

$$\left.\begin{matrix} f(x)=\frac{x^۳}{۴}+\sin\pi x+۴ \\ y=۵ \end{matrix}\right\}\Rightarrow\ \frac{x^۳}{۴}+\sin\pi x+۴=۵\ \Rightarrow\ \frac{x^۳}{۴}+\sin\pi x-۱=۰$$

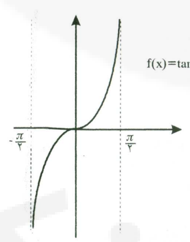
با فرض $g(x)=\frac{x^۳}{۴}+\sin\pi x-۱$ در بازه‌ی $[-۲,۲]$ داریم:

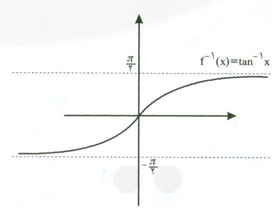
$$\begin{matrix} g(-۲)=-۲+۰-۱=-۳ \\ g(۲)=۲+۰-۱=۱ \end{matrix}\ \Rightarrow\ g(-۲)g(۲)<۰\ \Rightarrow$$ g حداقل یک ریشه در بازه‌ی $[-۲,۲]$ دارد، بنابراین تابع f می‌تواند مقدار ۵ داشته باشد.

تمرین در کلاس صفحه ۱۰۶:

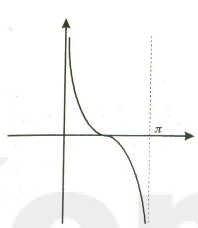
۱-نمودار و دامنه تابع وارون توابع زیر را در صفحه مختصات رسم کنید.

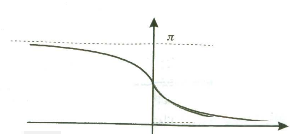
الف) $f(x)=\tan x\ ,\ -\frac{\pi}{۲}<x<\frac{\pi}{۲}$





ب) $g(x)=\cot x,\ ۰<x<\pi$

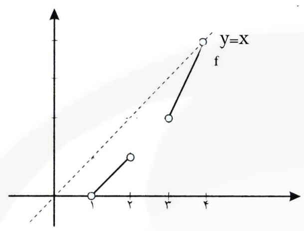


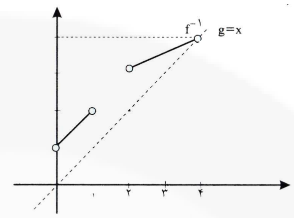


۱-فرض کنید $f(x)=\begin{cases} x-1 & , \quad 1<x<2 \\ 2x-4 & , \quad 3<x<4 \end{cases}$ **، تابع** f^{-1} **در چند نقطه از دامنه‌اش ناپیوسته است؟ نمودار** f^{-1} **را رسم کنید.**

f در $(1,2)\cup(3,4)$ پیوسته و یک به یک می‌باشد بنابراین تابع f^{-1} نیز پیوسته است.

$f(x)=\begin{cases} x-1 & , \quad 1<x<2 \\ 2x-4 & , \quad 3<x<4 \end{cases}$





با توجه به نمودار مشخص می‌شود که f^{-1} در تمام نقاط دامنه‌اش $(0,1)\cup(2,4)$ پیوسته می‌باشد.

۲-نشان دهید که معادله $x^3-x-1=0$ **در بازه** $[1,2]$ **جواب دارد.**

فرض کنیم $f(x)=x^3-x-1$ **در این صورت تابع** f **در همه جا پیوسته و در نتیجه در بازه** $[1,2]$ **نیز پیوسته می‌باشد. همچنین** $f(1)=1-1-1=-1<0$ **و** $f(2)=8-2-1=5>0$ **پس طبق قضیه بولزانو عددی مانند c موجود است که** $f(c)=0 \Rightarrow c^3-c-1=0$.

۳- نشان دهید معادله $x^5+x^4+2x^3-x+2=0$ **در بازه** $[-2,0]$ **دارای جواب است.**

پاسخ:

$$f(x)=x^5+x^4+2x^3-x+2$$

$$\left.\begin{array}{l} f(-2)=-32+16-16+2+2<0 \\ f(0)=2>0 \end{array}\right\} \Rightarrow f(-2)f(0)<0 \Rightarrow$$ f یک ریشه در بازه‌ی $[-2,0]$ دارد.

۴- ثابت کنید معادله‌ی $\sin x-x^2+x+1=0$ **حداقل دو ریشه در بازه** $[-\pi,\pi]$ **دارد.**

پاسخ:

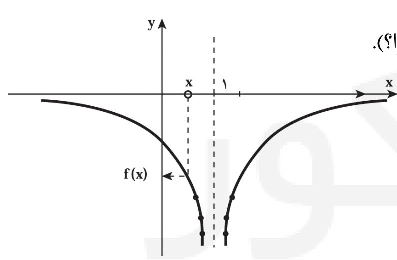
$$f(x)=\sin x-x^2+x+1$$

$$\left.\begin{array}{l} f(-\pi)=\sin(-\pi)-(-\pi)^2+(-\pi)+1=-\pi^2-\pi+1<0 \\ f(0)=1>0 \end{array}\right\} \Rightarrow$$ f یک ریشه در بازه‌ی $[-\pi,0]$ دارد.

۵- ثابت کنید که اگر P(x) یک چندجمله‌ای از درجه‌ی فرد باشد، آن‌گاه معادله $P(x)=0$ **حداقل دارای یک ریشه حقیقی است.**

پاسخ: فرض کنید **P(x)** یک چندجمله‌ای از درجه فرد باشد. این تابع در همه جا پیوسته و بدون آنکه به کلیت مسئله خللی وارد شود می‌توان فرض کرد ضریب جمله‌ی پرتوان مثبت باشد. بنابراین $\lim_{x\to+\infty} P(x)=+\infty$ و $\lim_{x\to-\infty} P(x)=-\infty$. بنابراین اعداد a و b وجود دارند که $P(a)>0$ و $P(a).P(b)<0$. پس بنا به قضیه بولزانو $P(x)$ دارای یک ریشه است.

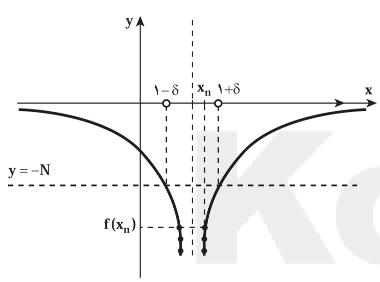
مثال صفحه ۱۰۹: به کمک تعریف ثابت کنید: $\lim_{x\to 0}\frac{1}{x^2}+\infty$



پاسخ: به ازای هر دنباله $\{x_n\}$، $(x_n\neq 0)$ همگرا به صفر، دنباله $\{f(x_n)\}$ واگرا به $+\infty$ است (چرا؟).

اگر رفتار تابع $f(x)=\frac{-1}{(x-1)^2}$ را در نزدیکی ۱ بررسی نماییم (شکل زیر) به این نتیجه می‌رسیم که وقتی x با مقادیر بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از ۱ به ۱ نزدیک می‌شود، مقدار $\frac{-1}{(x-1)^2}$ بدون هیچ محدودیتی و با مقادیر منفی کاهش می‌یابد.

و یا f(x) را می‌توان از هر عدد منفی کوچک‌تر کرد (f(x) به $-\infty$ میل می‌کند) به شرطی که x به اندازه کافی به ۱ نزدیک شود.



این وضعیت تابع را در مجاورت $x=1$، روی نمودار تابع توضیح می‌دهیم. فرض کنید N یک عدد مثبت دلخواه است با رسم هر خط افقی $y=-N$ در شکل روبه‌رو یک همسایگی محذوف ۱ و به

شعاع $\delta>0$ ایجاد می‌شود که برای هر $x_n \in D_f$ که در این همسایگی صدق کند، $f(x_n)<-N$ (x_n مقدار جمله‌ی nام دنباله $\{x_n\}$ است که به ۱ همگراست.)

اکنون به صورت رسمی به تعریف حد نامتناهی (حد منهای بی‌نهایت) می‌پردازیم.

مثال صفحه ۱۱۰: به کمک تعریف (۲) ثابت کنید: $\lim_{x\to 2}\frac{-1}{(x-2)^2}=-\infty$

پاسخ: برای هر دنباله دلخواه $\{x_n\}$ که همگرا به ۲ است و $x_n \neq 2$ داریم:

$$\lim_{n\to+\infty} f(x_n)=\lim_{n\to+\infty}\frac{-1}{(x_n-2)^2}=-\infty$$

زیرا وقتی دنباله $\{x_n\}$ به ۲ همگرا باشد، دنباله $\{(x_n-2)^2\}$ با مقادیر مثبت به صفر همگراست. بنابراین دنباله $\{f(x_n)\}$ به $-\infty$ واگراست.

اگر به ازای هر دنباله $\{x_n\}$ همگرا به a که $x_n>a$، $\lim_{n\to+\infty} f(x_n)=-\infty$ آن‌گاه $\lim_{x\to a^+} f(x)=-\infty$.

تمرین در کلاس صفحه ۱۱۰: عبارت‌های ۱ و ۳ و ۴ را مشابه تعریف ۱ و ۲ تعریف کنید.

پاسخ:

فرض $D\subset R$ دامنه تابع f باشد. اگر به ازای هر دنباله از نقاط دامنه مانند $\{x_n\}$ که $\{x_n\}\to a$ و $x_n>a$ داشته باشیم $\lim_{n\to+\infty} f(x_n)=-\infty$ آن‌گاه $\lim_{x\to a^+} f(x)=-\infty$.

اگر به ازای هر دنباله از نقاط دامنه مانند $\{x_n\}$ که $\{x_n\}\to a$ و $x_n>a$ داشته باشیم $\lim_{n\to+\infty} f(x_n)=-\infty$ آن‌گاه $\lim_{x\to a^+} f(x)=-\infty$.

فرض $D\subset R$ دامنه تابع f باشد. اگر به ازای هر دنباله از نقاط دامنه مانند $\{x_n\}$ که $\{x_n\}\to a$ و $x_n<a$ داشته باشیم $\lim_{n\to+\infty} f(x_n)=+\infty$ آن‌گاه $\lim_{x\to a^-} f(x)=+\infty$.

فرض $D\subset R$ دامنه تابع f باشد. اگر به ازای هر دنباله از نقاط دامنه مانند $\{x_n\}$ که $\{x_n\}\to a$ و $x_n<a$ داشته باشیم $\lim_{n\to+\infty} f(x_n)=-\infty$ آن‌گاه $\lim_{x\to a^-} f(x)=-\infty$.

مثال صفحه ۱۱۱: حدهای نامتناهی زیر را مشخص کنید.

الف) $\lim_{x\to 0}\frac{\sqrt{x+1}}{x^2}$ ب) $\lim_{x\to 1^-}\frac{x^2+x+1}{x^2+3x-4}$

پاسخ: الف) وقتی $x\to 0$، حد صورت کسر و حد مخرج کسر صفر است و مخرج کسر یعنی x^2 در یک همسایگی محذوف صفر مثبت است. بنابراین طبق قسمت الف قضیه (۱) داریم:

$$\lim_{x\to 0}\frac{\sqrt{x+1}}{x^2}=+\infty$$

ب) وقتی x با مقادیر بزرگ‌تر از ۱ به ۱ میل کند، حد صورت کسر ۳ است و حد مخرج کسر یعنی $(x-1)(x+4)$ صفر است و مخرج کسر به ازای $x<1$، مثلاً در بازه باز $(1-\delta,1)$ منفی است، بنابراین طبق قسمت ب قضیه (۱) داریم:

$$\lim_{x\to 1^-}\frac{x^2+x+1}{x^2+3x-4}=-\infty$$

تمرین در کلاس صفحه ۱۱۲: حدهای زیر را حدس زده و با استفاده از قضیه (۱) جواب حد را پیدا کنید.

۱) $\lim_{x\to(-2)^+}\frac{x+1}{x+2}$ ۲) $\lim_{x\to 1^-}\frac{[x]-1}{x^2-1}$ ۳) $\lim_{x\to\frac{\pi}{2}^-}\tan x$ ۴) $\lim_{x\to 0^+}\cot x$

پاسخ:

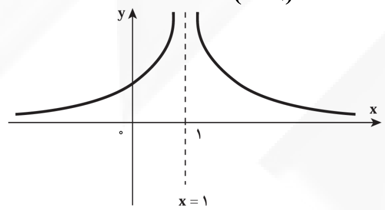
$$1)\ \lim_{x\to(-2)^+}\frac{x+1}{x+2}=\frac{-2+1}{0^+}=-\infty$$

$$2)\ \lim_{x\to1^-}\frac{[x]-1}{x^2-1}=\frac{-1}{0^-}=+\infty$$

$$3)\ \lim_{x\to\frac{\pi}{2}^-}\tan x=\lim_{x\to\frac{\pi}{2}^-}\frac{\sin x}{\cos x}=\frac{1}{0^+}=+\infty$$

$$4)\ \lim_{x\to0^+}\cot x=\lim_{x\to0^+}\frac{\cos x}{\sin x}=\frac{0^+}{1}=0$$

مثال صفحه ۱۱۳: خط $x=1$ مجانب قائم تابع $f(x)=\frac{1}{(x-1)^2}$ است، زیرا $\lim_{x\to1}f(x)=+\infty$



تمرین در کلاس صفحه ۱۱۳:

۱- مجانب‌های تابع $f(x)=\frac{1}{\sqrt{x}}+\frac{1}{\sqrt{x-1}}$ را در صورت وجود به دست آورید.

پاسخ:

$$\begin{cases}x>0\\ x-1>0\Rightarrow x>1\end{cases}\xrightarrow{\text{اشتراک}}x>1\Rightarrow D_f=(1,+\infty)$$

$$\lim_{x\to1^+}f(x)=\frac{1}{\sqrt{1}}+\frac{1}{0^+}=+\infty$$

پس $x=1$ مجانب قائم تابع است.

۲- مجانب‌های قائم تابع‌های زیر را به دست آورید.

الف) $f(x)=\frac{x+1}{x^2-1}$ ب) $g(x)=\tan x\ ,\ -\pi\le x\le\pi$

پاسخ:

الف) $f(x)=\frac{x+1}{x^2-1}$

ابتدا ریشه‌های مخرج را به‌دست می‌آوریم:

$$x^2-1=0\Rightarrow x=\pm1$$

$\lim_{x\to1^+}f(x)=\lim_{x\to1^+}\frac{x+1}{(x-1)(x+1)}=\frac{1}{0^+}=+\infty\Rightarrow$ $x=1$ مجانب قائم است.

$\lim_{x\to-1}f(x)=\lim_{x\to-1}\frac{x+1}{(x-1)(x+1)}=-\frac{1}{2}\Rightarrow$ $x=-1$ مجانب قائم نیست

دقت کنید که دیگر نیازی به محاسبه $\lim_{x\to1^-}f(x)$ نداریم.

ب) $g(x)=\tan x\ ,\ -\pi\le x\le\pi$

$$\tan x = \frac{\sin x}{\cos x} \Rightarrow \cos x = ۰ \xrightarrow{-\pi \le x \le \pi} x = -\frac{\pi}{۲}, \frac{\pi}{۲}$$

$$\lim_{x \to \frac{\pi}{۲}^+} \tan x = \frac{۱}{۰^-} = -\infty \quad , \quad \lim_{x \to -\frac{\pi}{۲}^+} \tan x = \frac{-۱}{۰^+} = -\infty$$

بنابراین $x = \frac{\pi}{۲}$ و $x = -\frac{\pi}{۲}$ مجانب قائم است

تمرین در کلاس صفحه ۱۱۴: تعریف مشابه برای حد در منفی بی‌نهایت را فرمول‌بندی کنید.

پاسخ: فرض کنید f تابعی باشد که در بازه $(-\infty, c)$ تعریف شده و L عدد حقیقی باشد. گوییم حد تابع f وقتی x به $-\infty$ میل می‌کند برابر L است و می‌نویسیم $\lim_{x \to -\infty} f(x) = L$ ، هرگاه به ازای هر دنباله از نقاط f مانند $\{x_n\}$ واگرا به $-\infty$، دنباله $\{f(x_n)\}$ واگرا به L باشد.

مثال صفحه ۱۱۴: ثابت کنید، اگر r یک عدد گویای مثبت باشد، آن‌گاه:

الف) $\lim_{x \to +\infty} \frac{۱}{x^r} = ۰$ ب) $\lim_{x \to -\infty} \frac{۱}{x^r} = ۰$

پاسخ: الف) برای هر دنباله دلخواه $\{x_n\}$ که واگرا به $+\infty$ است، داریم: $f(x_n) = \frac{۱}{(x_n)^r}$

دنباله $\{f(x_n)\}$ همگرا به صفر است. پس $\lim_{x \to +\infty} \frac{۱}{x^r} = ۰$.

ب) برای هر دنباله دلخواه $\{x_n\}$ که واگرا به $-\infty$ است، داریم: $f(x_n) = \frac{۱}{(x_n)^r}$

و $\lim_{n \to +\infty} f(x_n) = ۰$. بنابراین $\lim_{x \to -\infty} \frac{۱}{x^r} = ۰$.

مثال صفحه ۱۱۵: مقدار $\lim_{x \to +\infty} \frac{۲x^۲ + ۵x + ۱}{۳x^۲ - x}$ را حساب کنید.

پاسخ: وقتی x بزرگ می‌شود صورت و مخرج کسر هر دو بزرگ می‌شود، در نتیجه معلوم نیست مقادیر این کسر چگونه تغییر می‌کنند. بنابراین تابع کسری را به شکل دیگری می‌نویسیم. ابتدا بزرگترین درجه x را از صورت و مخرج فاکتور گرفته و با هم ساده می‌کنیم، (چون مقدارهای بزرگ x برای محاسبه این حد به کار می‌روند پس می‌توان فرض کرد $x \neq ۰$). در نتیجه:

$$\lim_{x \to +\infty} \frac{۲x^۲ + ۵x + ۱}{۳x^۲ - x} = \lim_{x \to +\infty} \frac{x^۲\left(۲ + \frac{۵}{x} + \frac{۱}{x^۲}\right)}{x^۲\left(۳ - \frac{۱}{x}\right)} = \frac{\lim_{x \to +\infty}\left(۲ + \frac{۵}{x} + \frac{۱}{x^۲}\right)}{\lim_{x \to +\infty}\left(۳ - \frac{۱}{x}\right)} = \frac{\lim_{x \to +\infty} ۲ + ۵\lim_{x \to +\infty} \frac{۱}{x} + \lim_{x \to +\infty} \frac{۱}{x^۲}}{\lim_{x \to +\infty} ۳ - \lim_{x \to +\infty} \frac{۱}{x}}$$

$$= \frac{۲ + ۰ + ۰}{۳ - ۰} = \frac{۲}{۳}$$

مثال صفحه ۱۱۶: $\lim_{x \to +\infty} (\sqrt{x^۲ + x} - x)$ را حساب کنید.

پاسخ: وقتی x بزرگ می‌شود، $\sqrt{x^۲ + x}$ نیز بزرگ می‌شود و مقدار تفاضل آن‌ها را نمی‌توان به آسانی تشخیص داد، به همین دلیل ابتدا تابع را کمی تغییر شکل می‌دهیم. برای این کار تابع را در مزدوج صورت یعنی $(\sqrt{x^۲ + x} + x) \neq ۰$ ضرب و تقسیم می‌کنیم:

$$\lim_{x\to+\infty}\left(\frac{\sqrt{x^2+x}-x}{1}\right)=\lim_{x\to+\infty}\frac{(\sqrt{x^2+x}-x)(\sqrt{x^2+x}+x)}{1\times(\sqrt{x^2+x}+x)}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x}{\sqrt{x^2+x}+x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x}{x\sqrt{1+\frac{1}{x}}+x}\quad (|x|=x\,,\,x>0)$$

$$=\lim_{x\to+\infty}\frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{x}}+1}=\frac{1}{\sqrt{1+0}+1}=\frac{1}{2}$$

تمرین در کلاس صفحه ۱۱۶:

۱- مطلوبست محاسبه:

الف) $\lim_{x\to-\infty}\frac{5x^3+x+1}{x^3-x+2}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to-\infty}\frac{5x^3+x+1}{x^3-x+2}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x^3\left(5+\frac{1}{x^2}+\frac{1}{x^3}\right)}{x^3\left(1-\frac{1}{x^2}+\frac{2}{x^3}\right)}=5$$

ب) $\lim_{x\to+\infty}\frac{\sqrt{3x^2+1}}{2x-3}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to+\infty}\frac{\sqrt{3x^2+1}}{2x-3}=\lim_{x\to+\infty}\frac{|x|\sqrt{3+\frac{1}{x^2}}}{2x-3}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x\sqrt{3}}{2x}=\frac{\sqrt{3}}{2}$$

پ) $\lim_{x\to-\infty}\cos\frac{1}{x}$

پاسخ:

$$\lim_{x\to-\infty}\cos\frac{1}{x}=\cos(0^-)=1$$

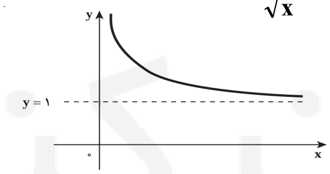
۲- اگر به ازای هر $x>10$، $\frac{2x-1}{x}<f(x)<\frac{2x^2+3x}{x^2}$ را پیدا کنید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to+\infty}\frac{2x-1}{x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{2x^2+3x}{x^2}=2$$

و با توجه به این که برای $x>10$، $\frac{2x-1}{x}<f(x)<\frac{2x^2+3x}{x^2}$ است، پس بنا بر قضیه‌ی فشردگی $\lim_{x\to+\infty}f(x)=2$ می‌باشد.

مثال صفحه ۱۱۷: خط $y=1$ مجانب افقی تابع $f(x)=1+\frac{1}{\sqrt{x}}$ است که در شکل زیر نشان داده شده است. زیرا: $\lim_{x\to+\infty}\left(1+\frac{1}{\sqrt{x}}\right)=1$



پرسش صفحه ۱۱۷: خط مجانب قائم تابع $y=1+\frac{1}{\sqrt{x}}$ را به دست آورید.

پاسخ:

$x\geq 0$

$$\lim_{x\to 0^+}1+\frac{1}{\sqrt{x}}=1+\frac{1}{0^+}=+\infty\ \Rightarrow\ x=0$$ معادله مجانب قائم

تمرین در کلاس صفحه ۱۱۸:

مجانب‌های افقی تابع‌های زیر را به دست آورید.

۱) $y=\frac{2x+1}{x-2}$ ۲) $y=\frac{x}{\sqrt{x^2+1}}$ ۳) $y=\frac{\sin x}{x}$

پاسخ:

$$1)\ \lim_{x\to\infty}\frac{2x+1}{x}=2 \Rightarrow y=2$$ مجانب افقی

$$2)\ \lim_{x\to+\infty}\frac{x}{\sqrt{x^2+1}}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x}{|x|\sqrt{1+\frac{1}{x^2}}}=1 \Rightarrow y=1$$ مجانب افقی

$$\lim_{x\to-\infty}\frac{x}{\sqrt{x^2+1}}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x}{|x|\sqrt{1+\frac{1}{x^2}}}=-1 \Rightarrow y=-1$$ مجانب افقی

$$3)\ \lim_{x\to\infty}\frac{\sin x}{x}=\lim_{x\to\infty}\left(\frac{1}{x}\right)(\sin x)=0\times \text{کراندار}=0 \Rightarrow y=0$$ مجانب افقی

تمرین در کلاس صفحه ۱۱۹:

با توجه به تعریف ۶، نمادهای $\lim\limits_{x\to-\infty} f(x)=-\infty$ و $\lim\limits_{x\to-\infty} f(x)=+\infty$ و $\lim\limits_{x\to+\infty} f(x)=-\infty$ را به طور مشابه تعریف کنید.

پاسخ:

$\lim\limits_{x\to-\infty} f(x)=-\infty$ هرگاه به ازای هر دنباله از نقاط دامنه f مانند $\{x_n\}$ واگرا به $-\infty$، دنباله $\{f(x_n)\}$ واگرا به $-\infty$ باشد.

$\lim\limits_{x\to-\infty} f(x)=+\infty$ هرگاه به ازای هر دنباله از نقاط دامنه f مانند $\{x_n\}$ واگرا به $-\infty$، دنباله $\{f(x_n)\}$ واگرا به $+\infty$ باشد.

$\lim\limits_{x\to+\infty} f(x)=-\infty$ هرگاه به ازای هر دنباله از نقاط دامنه f مانند $\{x_n\}$ واگرا به $+\infty$، دنباله $\{f(x_n)\}$ واگرا به $-\infty$ باشد.

مثال صفحه ۱۱۹: به کمک تعریف ثابت کنید: $\lim\limits_{x\to-\infty} cx^2=-\infty$ ، (c عدد ثابت منفی)

پاسخ: به ازای هر دنباله دلخواه $\{x_n\}$ از دامنه تابع $f(x)=cx^2$ که واگرا به $-\infty$ است، داریم: $f(x_n)=cx_n^2$

می‌دانید که دنباله $\{f(x_n)\}$ واگرا به $-\infty$ است ($c<0$ و دنباله $\{x_n^2\}$ واگرا به $+\infty$ است) بنابراین: $\lim\limits_{x\to-\infty} cx^2=-\infty$

مثال صفحه ۱۱۹: $\lim\limits_{x\to-\infty}(\sqrt{x^2+1}-x)$ را محاسبه کنید.

پاسخ:

$$\lim_{x\to-\infty}(\sqrt{x^2+1}-x)=\lim_{x\to-\infty}\left(|x|\sqrt{1+\frac{1}{x^2}}-x\right)=\lim_{x\to-\infty}-x\left(\sqrt{1+\frac{1}{x^2}}+1\right)=\lim_{x\to-\infty}-2x=+\infty$$

تذکر مهم: همواره نمی‌توان از قاعده‌های حدگیری برای حدهای نامتناهی استفاده کرد. زیرا $+\infty$ و یا $-\infty$ عدد نیستند.

مثلاً نوشتن این که $\lim\limits_{x\to+\infty} x^3-x=\lim\limits_{x\to+\infty} x^3-\lim\limits_{x\to+\infty} x=+\infty-\infty$ غلط است ($+\infty-\infty$ را نمی‌توان تعریف کرد). با این وجود، می‌توان نوشت:

$$\lim_{x\to+\infty} x^3-x=\lim_{x\to+\infty} x(x^2-1)=+\infty$$

مثال صفحه ۱۲۱: مجانب مایل تابع $f(x)=\frac{x^3-3x^2+1}{x^2+x-1}$ را (در صورت وجود) به دست آورید.

پاسخ: چون درجه صورت یعنی ۳ بزرگ‌تر از درجه مخرج کسر است، ابتدا عبارت صورت را بر مخرج تقسیم می‌کنیم.

$$\begin{array}{l|l} x^{۳}-۳x^{۲}+۱ & x^{۲}+x-۱ \\ \pm x^{۳}\pm x^{۲}\pm x & \overline{x-۴} \\ \hline -۴x^{۲}+x+۱ & \\ \pm ۴x^{۲}\pm ۴x\pm ۴ & \\ \hline ۵x-۳ & \end{array}$$

در نتیجه $f(x)=x-۴+\dfrac{۵x-۳}{x^{۲}+x-۱}$

چون $\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{۵x-۳}{x^{۲}+x-۱}=۰$ (چرا؟) پس $\lim\limits_{x\to+\infty}[f(x)-(x-۴)]=۰$ (همین نتیجه برای حالت $x\to-\infty$ نیز درست است.)

بنابراین خط $y=x-۴$ مجانب مایل تابع f می‌باشد.

پرسش صفحهٔ ۱۲۱: با توجه به راه‌حل مثال بالا، آیا می‌توان نتیجه گرفت یک تابع کسری گویا با چه شرایطی مجانب مایل دارد؟ و سپس راه‌حلی کوتاه برای محاسبه مجانب مایل تابع کسری گویا بیان کنید.

پاسخ: وقتی درجه صورت از مخرج دقیقاً ۱ واحد بیشتر باشد مجانب مایل داریم. برای به دست آوردن این مجانب صورت را بر مخرج تقسیم می‌کنیم. عبارت خارج‌قسمت همان مجانب مایل است.

مثال صفحهٔ ۱۲۲: معادله مجانب مایل تابع $f(x)=۲x+\sqrt{x^{۲}+۳}$ را وقتی $x\to+\infty$ به دست آورید.

پاسخ:

$$m=\lim_{x\to+\infty}\frac{f(x)}{x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{۲x+\sqrt{x^{۲}+۳}}{x}=\lim_{x\to+\infty}\left(۲+\frac{|x|}{x}\sqrt{۱+\frac{۳}{x^{۲}}}\right)=۳$$

$$b=\lim_{x\to+\infty}(f(x)-mx)=\lim_{x\to+\infty}(۲x+\sqrt{x^{۲}+۳}-۳x)=\lim_{x\to+\infty}(\sqrt{x^{۲}+۳}-x)=\lim_{x\to+\infty}\frac{x^{۲}+۳-x^{۲}}{\sqrt{x^{۲}+۳}+x}=۰$$

بنابراین خط $y=۳x$ مجانب مایل تابع است.

تمرین در کلاس صفحهٔ ۱۲۲: در مثال بالا معادله مجانب مایل را وقتی $x\to-\infty$، به دست آورید.

پاسخ:

$$m=\lim_{x\to-\infty}\frac{f(x)}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{۲x+\sqrt{x^{۲}+۳}}{x}=\lim_{x\to+\infty}\left(۲+\frac{|x|}{x}\sqrt{۱+\frac{۳}{x^{۲}}}\right)=۲-۱=۱$$

$$b=\lim_{x\to-\infty}(f(x)-mx)=\lim_{x\to-\infty}(۲x+\sqrt{x^{۲}+۳}-x)=\lim_{x\to-\infty}(x+\sqrt{x^{۲}+۳})=\lim_{x\to-\infty}\frac{x^{۲}-x^{۲}-۳}{x-\sqrt{x^{۲}+۳}}$$

$$=\lim_{x\to-\infty}\frac{-۳}{x-|x|\sqrt{۱+\frac{۳}{x^{۲}}}}=\lim_{x\to-\infty}\frac{-۳}{۲x}=۰$$

مسائل مجانب‌ها صفحهٔ ۱۲۲:

الف) معادله مجانب‌های مایل و افقی تابع‌های زیر را به دست آورید.

۱) $y=\dfrac{x^{۲}}{\sqrt{x^{۲}-۱}}$ ۲) $y=x-\sqrt{x^{۲}+۲x}$ ۳) $y=\dfrac{x^{۳}+x+۱}{x^{۲}+۳}$ ۴) $y=x+\sqrt{۴x^{۲}+x+۱}$

پاسخ:

۱) $y=\dfrac{x^{۲}}{\sqrt{x^{۲}-۱}}\Rightarrow\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{x^{۲}}{\sqrt{x^{۲}-۱}}=\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{x^{۲}}{|x|\sqrt{۱-\frac{۱}{x^{۲}}}}=+\infty$

$$\lim_{x\to-\infty}\frac{x^{2}}{\sqrt{x^{2}-1}}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x^{2}}{|x|\sqrt{1-\frac{1}{x^{2}}}}=-\infty$$

پس مجانب افقی ندارد. در ادامه مجانب مایل را محاسبه می‌کنیم:

$$m=\lim_{x\to+\infty}\frac{f(x)}{x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{\frac{x^{2}}{\sqrt{x^{2}-1}}}{x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{\frac{x^{2}}{|x|\sqrt{1-\frac{1}{x^{2}}}}}{x}=1$$

$$b=\lim_{x\to+\infty}(f(x)-mx)=\lim_{x\to+\infty}\left(\frac{x^{2}}{\sqrt{x^{2}-1}}-x\right)=\lim_{x\to+\infty}\frac{x^{2}-1+1}{\sqrt{x^{2}-1}}-x=\lim_{x\to+\infty}\sqrt{x^{2}-1}-x+\frac{1}{\sqrt{x^{2}-1}}$$

$$=\lim_{x\to+\infty}\left(\frac{x^{2}-1-x^{2}}{\sqrt{x^{2}-1}+x}+\frac{1}{\sqrt{x^{2}-1}}\right)=0$$

بنابراین خط $y=x$ مجانب مایل تابع در $+\infty$ است. همچنین:

$$m=\lim_{x\to-\infty}\frac{f(x)}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{\frac{x^{2}}{\sqrt{x^{2}-1}}}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{\frac{x^{2}}{|x|\sqrt{1-\frac{1}{x^{2}}}}}{x}=-1$$

$$b=\lim_{x\to-\infty}(f(x)-mx)=\lim_{x\to-\infty}\left(\frac{x^{2}}{\sqrt{x^{2}-1}}-x\right)=\lim_{x\to-\infty}\frac{x^{2}-1+1}{\sqrt{x^{2}-1}}-x=\lim_{x\to-\infty}\sqrt{x^{2}-1}-x+\frac{1}{\sqrt{x^{2}-1}}$$

$$=\lim_{x\to-\infty}\left(\frac{x^{2}-1-x^{2}}{\sqrt{x^{2}-1}+x}+\frac{1}{\sqrt{x^{2}-1}}\right)=0$$

بنابراین خط $y=-x$ هم مجانب مایل تابع در $-\infty$ است.

۲) $y=x-\sqrt{x^{2}+2x}\Rightarrow\lim_{x\to+\infty}\left(\frac{x^{2}-(x^{2}+2x)}{x+\sqrt{x^{2}+2x}}\right)=\lim_{x\to+\infty}\left(\frac{-2x}{x+|x|\sqrt{1+\frac{2}{x}}}=-1\right)$

پس مجانب افقی تابع $y=-1$ است. از طرفی $\lim_{x\to-\infty}x-\sqrt{x^{2}+2x}=\lim_{x\to+\infty}x-|x|\sqrt{1+\frac{2}{x}}=-\infty$ پس ممکن است تابع در $-\infty$ مجانب مایل داشته باشد:

$$m=\lim_{x\to-\infty}\frac{f(x)}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x-\sqrt{x^{2}+2x}}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x-|x|\sqrt{1+\frac{2}{x}}}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{2x}{x}=2$$

$$b=\lim_{x\to-\infty}(f(x)-mx)=\lim_{x\to-\infty}(x-\sqrt{x^{2}+2x}-2x)=\lim_{x\to-\infty}-x-\sqrt{x^{2}+2x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x^{2}-\left(x^{2}+2x\right)}{-x+\sqrt{x^{2}+2x}}=\lim_{x\to-\infty}\frac{-2x}{-x+|x|\sqrt{1+\frac{2}{x}}}$$

$$=\lim_{x\to-\infty}\frac{-2x}{-2x}=1$$

بنابراین خط $y=2x+1$ مجانب مایل تابع در $-\infty$ است.

۳) $\mathbf{y=\frac{x^{3}+x+1}{x^{2}+3}}$

چون درجه صورت از مخرج دقیقاً ۱ واحد بیشتر است، پس مجانب مایل داریم. برای به دست آوردن این مجانب صورت را بر مخرج تقسیم می‌کنیم:

$$\begin{array}{r|l} x^۳+x+۱ & x^۲+۳ \\ \cline{2-2} \pm x^۳ \pm ۳x & x \\ \hline -۲x+۱ & \end{array}$$

در نتیجه $y=x+\frac{-۲x+۱}{x^۲+۳}$

چون $\lim\limits_{x\to\pm\infty}\frac{-۲x+۱}{x^۲+۳}=۰$ پس خط $y=x$ مجانب مایل تابع f می‌باشد و مجانب افقی نداریم.

۴) $y=x+\sqrt{۴x^۲+x+۱}$

$$m=\lim_{x\to+\infty}\frac{f(x)}{x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x+\sqrt{۴x^۲+x+۱}}{x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x+|۲x|\sqrt{۱+\frac{۱}{۴x}+\frac{۱}{۴x^۲}}}{x}=۳$$

$$b=\lim_{x\to+\infty}(f(x)-mx)=\lim_{x\to+\infty}(x+\sqrt{۴x^۲+x+۱}-۳x)=\lim_{x\to+\infty}(\sqrt{۴x^۲+x+۱}-۲x)=\lim_{x\to+\infty}\frac{۴x^۲+x+۱-۴x^۲}{\sqrt{۴x^۲+x+۱}+۲x}$$

$$=\lim_{x\to+\infty}\frac{x}{|۲x|+۲x}=\frac{۱}{۴}$$

بنابراین خط $y=۳x+\frac{۱}{۴}$ مجانب مایل تابع در $+\infty$ است. همچنین:

$$m=\lim_{x\to-\infty}\frac{f(x)}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x+\sqrt{۴x^۲+x+۱}}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x+|۲x|\sqrt{۱+\frac{۱}{۴x}+\frac{۱}{۴x^۲}}}{x}=-۱$$

$$b=\lim_{x\to-\infty}(f(x)-mx)=\lim_{x\to-\infty}(x+\sqrt{۴x^۲+x+۱}+x)=\lim_{x\to-\infty}(۲x+\sqrt{۴x^۲+x+۱})=\lim_{x\to-\infty}\frac{۴x^۲-۴x^۲-x+۱}{۲x-\sqrt{۴x^۲+x+۱}}$$

$$=\lim_{x\to-\infty}\frac{-x}{۲x-|۲x|}=-\frac{۱}{۴}$$

پس خط $y=-x-\frac{۱}{۴}$ هم مجانب مایل تابع در $-\infty$ است.

ب) اندازه زاویه بین دو خط مجانب مایل تابع $y=\sqrt{x^۲+۴x}$ را حساب کنید.

پاسخ:

ابتدا شیب مجانب‌های مایل تابع را محاسبه می‌کنیم:

$$m_۱=\lim_{x\to+\infty}\frac{f(x)}{x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{\sqrt{x^۲+۴x}}{x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{|x|\sqrt{۱+\frac{۴}{x}}}{x}=۱$$

$$m_۲=\lim_{x\to-\infty}\frac{f(x)}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{\sqrt{x^۲+۴x}}{x}=\lim_{x\to-\infty}\frac{|x|\sqrt{۱+\frac{۴}{x}}}{x}=-۱$$

چون حاصل‌ضرب شیب‌ها برابر ۱- است پس مجانب‌ها بر هم عمودند.

مسائل صفحه ۱۲۳:

۱- حدهای زیر را به دست آورید.

الف) $\lim\limits_{x\to ۲^+}\frac{\sqrt{x^۲-۴}}{x-۲}$ ب) $\lim\limits_{x\to ۲^-}\frac{[x]-۲}{x-۲}$ پ) $\lim\limits_{x\to\pi^+}\cot x$

ت) $\lim\limits_{x\to \frac{3\pi}{2}^-} \tan x$ ث) $\lim\limits_{x\to 4^-} \dfrac{x-2}{x^2-2x-8}$ ج) $\lim\limits_{x\to 2} \dfrac{(-1)^{[x]+1}}{x^2-4}$

چ) $\lim\limits_{x\to \frac{\pi}{2}^-} \dfrac{\tan x}{\cot x}$ ح) $\lim\limits_{x\to 0}\left(\dfrac{1}{x}-\dfrac{1}{x^2}\right)$

پاسخ:

الف) $\lim\limits_{x\to 2^+} \dfrac{\sqrt{x^2-4}}{x-2} = \lim\limits_{x\to 2^+} \dfrac{\sqrt{x+2}\sqrt{x-2}}{x-2} = \lim\limits_{x\to 2^+} \dfrac{\sqrt{x+2}}{\sqrt{x-2}} = \dfrac{2}{0^+} = +\infty$

ب) $\lim\limits_{x\to 2^-} \dfrac{[x]-2}{x-2} = \lim\limits_{x\to 2^-} \dfrac{1-2}{x-2} = \lim\limits_{x\to 2^-} \dfrac{-1}{x-2} = \dfrac{-1}{0^-} = +\infty$

پ) $\lim\limits_{x\to \pi^+} \cot x = \lim\limits_{x\to \pi^+} \dfrac{\cos x}{\sin x} = \dfrac{-1}{0^-} = +\infty$

ت) $\lim\limits_{x\to \frac{3\pi}{2}^-} \tan x = \lim\limits_{x\to \frac{3\pi}{2}^-} \dfrac{\sin x}{\cos x} = \dfrac{-1}{0^-} = +\infty$

ث) $\lim\limits_{x\to 4^-} \dfrac{x-2}{x^2-2x-8} = \lim\limits_{x\to 4^-} \dfrac{x-2}{(x-4)(x+2)} = \dfrac{2}{0^-\,(6)} = -\infty$

ج) $\lim\limits_{x\to 2} \dfrac{(-1)^{[x]+1}}{x^2-4} : \begin{cases} \lim\limits_{x\to 2^+} \dfrac{(-1)^{[x]+1}}{x^2-4} = \lim\limits_{x\to 2^+} \dfrac{(-1)^3}{(x+2)(x-2)} = \dfrac{-1}{0^+} = -\infty \\ \lim\limits_{x\to 2^-} \dfrac{(-1)^{[x]+1}}{x^2-4} = \lim\limits_{x\to 2^-} \dfrac{(-1)^2}{(x+2)(x-2)} = \dfrac{1}{0^-} = -\infty \end{cases} \Rightarrow \lim\limits_{x\to 2} \dfrac{(-1)^{[x]+1}}{x^2-4} = -\infty$

چ) $\lim\limits_{x\to \frac{\pi}{2}^-} \dfrac{\tan x}{\cot x} = \lim\limits_{x\to \frac{\pi}{2}^-} \dfrac{\sin^2 x}{\cos^2 x} = \dfrac{1}{0^+} = +\infty$

ح) $\lim\limits_{x\to 0}\left(\dfrac{1}{x}-\dfrac{1}{x^2}\right) = \lim\limits_{x\to 0} \dfrac{x-1}{x^2} = \dfrac{-1}{0^+} = -\infty$

۲- در نظریه‌ی نسبیت جرم ذره‌ای با سرعت v برابر است با $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$ **که در آن m جرم سکون ذره است و c سرعت نور وقتی که** $v \to c^-$ **چه اتفاقی می‌افتد؟**

پاسخ: وقتی $v \to c^-$ آن‌گاه $1-\dfrac{v^2}{c^2} \to 0^+$ میل می‌کند. پس مخرج به صفر نزدیک شده و در نتیجه کل کسر بسیار بزرگ شده و به $+\infty$ میل می‌کند. یعنی با نزدیک شدن سرعت ذره به سرعت نور، جرم ذره نیز افزایش می‌یابد و به بی‌نهایت میل می‌کند!

۳- حدود زیر را محاسبه کنید.

الف) $\lim\limits_{x\to +\infty} \dfrac{2x+1}{x-3}$ ب) $\lim\limits_{x\to -\infty} \dfrac{x^2+5x-1}{2x^2-1}$ پ) $\lim\limits_{x\to -\infty} \dfrac{2x+1}{x^2+3x-1}$

ت) $\lim\limits_{x\to +\infty} (x-\sqrt{x^2+2x})$ ث) $\lim\limits_{x\to -\infty} (\sqrt{x^2+3x}-\sqrt{x^2-3x})$ ج) $\lim\limits_{x\to +\infty} \left[\dfrac{x^2+x+1}{x^2+x+3}\right]$

چ) $\lim\limits_{x\to -\infty} \dfrac{x\tan^{-1} x}{2-x}$ ح) $\lim\limits_{x\to -\infty} (\sqrt[3]{8x^3+2x^2}-2x)$ خ) $\lim\limits_{x\to -\infty} \dfrac{x+\sqrt{x^2+1}}{x+\sqrt{x^2+3}}$

د) $\lim\limits_{x\to +\infty} (\sin\sqrt{x+1}-\sin\sqrt{x})$

پاسخ:

الف) $\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{۲x+۱}{x-۳}=\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{x\left(۲+\frac{۱}{x}\right)}{x\left(۱-\frac{۳}{x}\right)}=۲$

ب) $\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{x^{۲}+۵x-۱}{۲x^{۲}-۱}=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{x^{۲}\left(۱+\frac{۵}{x}-\frac{۱}{x^{۲}}\right)}{x^{۲}\left(۲-\frac{۱}{x^{۲}}\right)}=\frac{۱}{۲}$

پ) $\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{۲x+۱}{x^{۲}+۳x-۱}=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{x\left(۲+\frac{۱}{x}\right)}{x^{۲}\left(۱+\frac{۳}{x}-\frac{۱}{x^{۲}}\right)}=۰$

ت) $\lim\limits_{x\to+\infty}(x-\sqrt{x^{۲}+۲x})=\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{(x-\sqrt{x^{۲}+۲x})(x+\sqrt{x^{۲}+۲x})}{x+\sqrt{x^{۲}+۲x}}=\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{x^{۲}-(x^{۲}+۲x)}{x+\sqrt{x^{۲}+۲x}}=\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{-۲x}{x+|x|\sqrt{۱+\frac{۲}{x}}}$

$=\lim\limits_{x\to+\infty}\frac{-۲x}{۲x}=-۱$

ث) $\lim\limits_{x\to-\infty}(\sqrt{x^{۲}+۳x}-\sqrt{x^{۲}-۳x})=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{(\sqrt{x^{۲}+۳x}-\sqrt{x^{۲}-۳x})(\sqrt{x^{۲}+۳x}+\sqrt{x^{۲}-۳x})}{\sqrt{x^{۲}+۳x}+\sqrt{x^{۲}-۳x}}=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{(x^{۲}+۳x)-(x^{۲}-۳x)}{|x|\sqrt{۱+\frac{۳}{x}}+|x|\sqrt{۱-\frac{۳}{x}}}$

$=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{۶x}{-۲x}=-۳$

ج) $\lim\limits_{x\to+\infty}\left[\frac{x^{۲}+x+۱}{x^{۲}+x+۳}\right]=\lim\limits_{x\to+\infty}\left[\frac{x^{۲}+x+۳-۲}{x^{۲}+x+۳}\right]=\lim\limits_{x\to+\infty}\left[۱-\frac{۲}{x^{۲}+x+۳}\right]=[۱^{-}]=۰$

چ) $\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{x\tan^{-۱}x}{۲-x}=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{x\left(-\frac{\pi}{۲}\right)}{۲-x}=\frac{\pi}{۲}$

ح) $\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{(\sqrt[۳]{۸x^{۳}+۲x^{۲}}-۲x)(\sqrt[۳]{(۸x^{۳}+۲x^{۲})^{۲}}+۲x\sqrt[۳]{۸x^{۳}+۲x^{۲}}+۴x^{۲})}{\sqrt[۳]{(۸x^{۳}+۲x^{۲})^{۲}}+۲x\sqrt[۳]{۸x^{۳}+۲x^{۲}}+۴x^{۲}}=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{۸x^{۳}+۲x^{۲}-۸x^{۳}}{\sqrt[۳]{۶۴x^{۶}+۳۲x^{۵}+۴x^{۴}}+۲x(۲x)\sqrt{۱+\frac{۱}{۴x}}+۴x^{۲}}$

$=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{۲x^{۲}}{۴x^{۲}+۴x^{۲}+۴x^{۲}}=\frac{۱}{۶}$

خ) $\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{x+\sqrt{x^{۲}+۱}}{x+\sqrt{x^{۲}+۳}}\times\frac{x-\sqrt{x^{۲}+۱}}{x-\sqrt{x^{۲}+۱}}\times\frac{x-\sqrt{x^{۲}+۳}}{x-\sqrt{x^{۲}+۳}}=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{(x^{۲}-(x^{۲}+۱))(x-\sqrt{x^{۲}+۳})}{(x^{۲}-(x^{۲}+۳))(x-\sqrt{x^{۲}+۱})}=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{-۱\left(x-|x|\sqrt{۱+\frac{۳}{x^{۲}}}\right)}{-۳\left(x-|x|\sqrt{۱+\frac{۱}{x^{۲}}}\right)}$

$=\lim\limits_{x\to-\infty}\frac{-(x+x)}{-۳(x+x)}=\frac{۱}{۳}$

د) $\lim\limits_{x\to+\infty}\sin\sqrt{x+۱}-\sin\sqrt{x}=\lim\limits_{x\to+\infty}۲\sin\frac{\sqrt{x+۱}-\sqrt{x}}{۲}\cos\frac{\sqrt{x+۱}+\sqrt{x}}{۲}=\lim\limits_{x\to+\infty}۲\sin\frac{۱}{۲(\sqrt{x+۱}+\sqrt{x})}\cos\frac{\sqrt{x+۱}+\sqrt{x}}{۲}=۰$

زیرا $\cos$ تابعی کراندار است و $\lim\limits_{x\to+\infty}\sin\frac{۱}{۲(\sqrt{x+۱}+\sqrt{x})}=۰$. دقت کنید که از فرمول مثلثاتی $\sin a-\sin b=۲\sin\frac{a-b}{۲}\cos\frac{a+b}{۲}$ استفاده کردیم.

۴- حدود زیر را پیدا کنید.

الف) $\lim\limits_{x\to-\infty}\dfrac{2x^3-x+1}{x^2+x-1}$ ب) $\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{x^2+x+1}{\sqrt{x^2+2x-1}}$

پاسخ:

الف) $$\lim_{x\to-\infty}\frac{2x^3-x+1}{x^2+x-1}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x^3\left(2-\frac{1}{x^2}+\frac{1}{x^3}\right)}{x^2\left(1+\frac{1}{x}-\frac{1}{x^2}\right)}=\lim_{x\to-\infty}\frac{x(2-0+0)}{(1+0-0)}=-\infty$$

ب) $$\lim_{x\to+\infty}\frac{x^2+x+1}{\sqrt{x^2+2x-1}}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x^2\left(1+\frac{1}{x}+\frac{1}{x^2}\right)}{|x|\sqrt{1+\frac{2}{x}-\frac{1}{x^2}}}=\lim_{x\to+\infty}\frac{x^2}{x}=+\infty$$

۵- ثابت کنید که اگر $\lim\limits_{x\to a}f(x)=+\infty$ و g در یک همسایگی محذوف a کراندار باشد، آن‌گاه $\lim\limits_{x\to a}(f(x)+g(x))=+\infty$ و سپس $\lim\limits_{x\to 0^+}\left(\frac{1}{x}+[x]\right)$ را پیدا کنید.

پاسخ: فرض کنیم g در یک همسایگی محذوف a کراندار باشد. بنابراین در این همسایگی اعداد t و t' موجودند، به طوری که $t<g(x)<t'$ باشد. از طرفی چون $\lim\limits_{x\to a}f(x)=+\infty$ ، پس برای دنباله‌ی دلخواه $\{a_n\}$ که همگرا به a و $a_n\neq a$ است، داریم $\lim\limits_{n\to+\infty}f(a_n)=+\infty$. بنابراین:

$$\forall k>0\ \exists M\in\mathbb{N}:n\geq M\ \Rightarrow\ f(a_n)>k+|t|\ \Rightarrow\ f(a_n)+g(a_n)>k+|t|+g(a_n)>k+|t|+t\geq k$$

پس $\lim\limits_{n\to+\infty}f(a_n)+g(a_n)=+\infty$. پس بنا به تعریف حد، $\lim\limits_{x\to a}(f(x)+g(x))=+\infty$.

$$\lim_{x\to 0^+}\left(\frac{1}{x}+[x]\right)=+\infty$$

زیرا $[x]$ در همسایگی ۰ کراندار است و $\lim\limits_{x\to 0^+}\frac{1}{x}=+\infty$ است.