

# فصل صفر

## یادآوری مفاهیم پایه

### جبر اعداد حقیقی

در این فصل به مرور مهم‌ترین مطالبی می‌پردازیم که در مباحث حساب دیفرانسیل و انتگرال بدان محتاج هستیم، این مطالب مشتمل بر مسووری مجدد بر خواص اعداد حقیقی است که دانش‌آموزان از دوره دبستان به بعد با آن آشنا شده‌اند، چنانچه شما در مطالعه حسابان و دروس پیش از آن به اندازه کافی با این مباحث آشنا شده باشید، می‌توانید آنها را به سرعت مرور کنید، با این حال باید یادآوری کنیم که تسلط بر این مفاهیم، به‌ویژه خواص ترتیبی اعداد لازمه و پیش‌شرط درک بهتر و مؤثر مفاهیم و مباحث این درس می‌باشد.

در واقع درک علمی این درس، که خود مقدمه دروس عالی‌تر ریاضیات نظیر آنالیز ریاضی است، بر دو مؤلفه مهم استوار است، یکی تسلط بر خواص نابرابری‌ها و دیگری آشنا شدن با شیوه‌های این درس که مبتنی بر روش‌های تجزیه و تحلیل و ترکیب منطق‌وار داده و نتایج آنها است.

### ۱-۰- اعداد حقیقی و خط حقیقی

می‌دانیم که حسابان بر خواص دستگاه اعداد حقیقی استوار است. منظورمان از دستگاه اعداد حقیقی، مجموعه اعداد حقیقی، اعمال جمع و ضرب این مجموعه و خواص جبری آن است. اعداد حقیقی اعدادی هستند که بتوان آنها را به صورت اعشاری بیان کرد. برای نمونه هر یک از اعداد ذیل یک عدد حقیقی است.

$$5 = 5/000000 \dots, \quad \frac{-3}{4} = -0/75000000 \dots$$

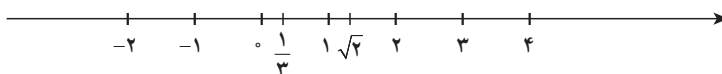
$$\frac{1}{3} = 0/33333 \dots, \quad \sqrt{2} = 1/4142 \dots, \quad \pi = 3/14159 \dots$$

در هر حالت، منظور از سه نقطه «...» آن است که دنباله ارقام همیشه ادامه دارد. البته وقتی دنباله ارقام تکراری و از جایی به بعد همیشه برابر صفر باشند از نوشتن آنها صرف نظر می‌گردد.

$$5 = 5, \quad \frac{3}{4} = 0.75$$

اما برای سه عدد بعدی چنین نیست. تفاوت اساسی در باب این اعداد وجود دارد، برای سه‌تای اولی الگوی تکرار ارقام بدیهی و روشن است و دنباله ارقام بر ما معلوم می‌باشد، لیکن برای  $\sqrt{2}$  و  $\pi$  هیچ الگوی شناخته شده‌ای برای روند تکرار ارقام وجود ندارد. سه عدد نخست را گویا و دوتای آخر یعنی  $\sqrt{2}$  و  $\pi$  را گنگ یا اصم می‌نامیم. بنابراین اعداد حقیقی به دو دسته بزرگ یعنی اعداد گویا و اعداد گنگ تقسیم می‌شوند. نکته جالب‌تر آن است که هر دو دسته به گونه‌ای بسیار فشرده و در کنار هم باهم به نوعی تنیده شده‌اند.

به زبان هندسی، اعداد حقیقی را می‌توانیم به صورت نقاط یک خط مستقیم نشان دهیم. چنین خط مستقیمی را خط حقیقی یا محور حقیقی می‌نامیم. هر عدد حقیقی، چه گویا و چه گنگ، متناظر نقطه‌ای بر این خط است و برعکس هر نقطه این خط نظیر یک و تنها یک عدد حقیقی است. (شکل زیر)



خواص اعداد حقیقی را می‌توان در سه رده دسته‌بندی کرد، (۱) خواص جبری (۲) خواص ترتیب، (۳) خواص مربوط به پیوستاری اعداد حقیقی.

شما در طول تحصیلات خود، حتی از دوره ابتدایی با خواص جبری اعداد حقیقی آشنایی دارید. اما باید گفت که این آشنایی شما بیشتر جنبه تجربی داشته تا صورت ریاضی! چرا؟ برای نمونه، شما می‌دانید که مثلاً جمع اعداد خاصیت جابه‌جایی دارد.

$$2 + 3 = 3 + 2$$

$$-1 + 4 = 4 + (-1) = 4 - 1$$

$$2 + (\sqrt{3} + \frac{1}{4}) = (2 + \sqrt{3}) + \frac{1}{4} \quad \text{و یا آنکه}$$

اما برقراری این گونه تساوی‌ها از راه تجربه حاصل شده است. در واقع تساوی‌های موردی مانند تساوی‌های فوق نیاز به برهان و استدلال نداشته است. اما وقتی این گونه خواص اعداد را بخواهیم در قالب یک کلیت و به شکل یک حکم کلی ریاضی بیان کنیم دیگر با تجربه درستی آنها بر ما معلوم نخواهد شد. چرا؟

بهرتر است صورت کلی چنین تساوی‌هایی را بیان داریم. به ناچار محتاج استفاده از حروف خواهیم شد.

$$a + b = b + a \text{ همواره}$$

یا آنکه بگوییم

$$a + b = b + a, \text{ برای هر دو عدد } a \text{ و } b$$

به زبان عادی منظورمان این است که برای هر دو عدد حقیقی  $a$  و  $b$ ، حاصل جمع  $a$  با  $b$  با حاصل جمع  $b$  با  $a$  برابر است. به عبارت «برای هر دو عدد حقیقی  $a$  و  $b$ » توجه کنید. اگر ما برای یکصد زوج از اعداد حقیقی با یک میلیون زوج از اعداد  $a$  و  $b$ ، حاصل دوطرف را حساب کرده و متوجه درستی تساوی‌ها شویم، درستی حکم کلی را محقق نساخته‌ایم. دلیل آن نامتناهی بودن و یا به اصطلاح عامیانه بی‌پایان بودن مجموعه اعداد حقیقی است. یکصد سال، یک میلیون سال و یا چند میلیارد سال که وقت صرف کنیم و تجربه کنیم ادعایمان محقق نمی‌شود زیرا مجموعه اعداد حقیقی بی‌پایان و نامتناهی است. زیاد ناراحت نباشید! ظاهراً راه حل ساده‌ای وجود دارد و آن وضع تئوری‌وار مجموعه اعداد حقیقی به صورت سامان‌یافته می‌باشد که آن را دستگاه اعداد حقیقی می‌نامیم. این راه حل ساده از این قرار است که وقتی برای درستی یک حکم بتوانیم دلیلی مستدل و منطقی اقامه کنیم و یا آنکه به عللی اصولاً نخواهیم دلیلی بیاوریم، آن حکم را تحت عنوان اصل موضوع (اصل) مطرح می‌کنیم. بنابراین اصل موضوع حکم یا گزاره‌ای است که آن را بدون دلیل و برهان می‌پذیریم. البته شواهد تجربی برای بسیاری از موارد الهام‌بخش ریاضیدانان و واضح‌کننده تئوری‌ها در انتخاب اصل‌های آن تئوری است. خلاصه کلام آنکه شما تاکنون با خواص جبری اعداد حقیقی به صورت تجربی آشنا شده‌اید، چنین خواصی مدعی‌اند که اعداد حقیقی را می‌توان باهم جمع کرد و حاصل عددی حقیقی خواهد بود. اعداد حقیقی را می‌توان باهم ضرب کرد و حاصل عددی حقیقی است. همچنین قواعد معمول حساب، از جمله دو قاعده فوق‌الاشاره، برقرارند. اینک برخی از این احکام را در قالب اصل موضوع (اصل) بیان می‌داریم.

مجموعه اعداد حقیقی را در مابقی این کتاب به  $R$  نشان می‌دهیم.

## ۲-۰- اصل‌های جمعی

(ج ۱) در  $R$  یک عمل دوتایی وجود دارد که آن را جمع می‌نامیم. این عمل که در واقع یک تابع است با نماد  $+$  نشان داده می‌شود. مقدار این تابع را به ازای زوج مرتب  $(a, b)$  به  $a + b$  نشان می‌دهیم که در آن  $a, b$  و  $a + b$  اعداد حقیقی‌اند. لذا حاصل عمل جمع بر هر زوج از اعداد حقیقی خود یک

عدد حقیقی است.

$$(ج ۲) \text{ برای هر دو عدد حقیقی } x \text{ و } y \text{ داریم } x + y = y + x$$

این اصل را خاصیت جابه‌جایی جمع می‌نامیم.

$$(ج ۳) \text{ برای هر سه عدد حقیقی } x \text{ و } y \text{ و } z \text{ داریم: } (x + y) + z = x + (y + z)$$

این اصل را خاصیت شرکت‌پذیری  $R$  می‌نامیم.

(ج ۴) وجود عضو همانی جمع،  $R$  شامل عددی است به نام  $0$  (صفر)، به طوری که به ازای هر

$$\text{عدد حقیقی } x, x + 0 = x$$

(ج ۵) وجود عضو قرینه، به ازای هر عدد حقیقی  $x$ ، عضوی از  $R$  مانند  $y$  وجود دارد به طوری

$$\text{که } x + y = 0$$

با استفاده از این پنج اصل، می‌توانیم خواص دیگری از مجموعه اعداد حقیقی را به دست آوریم، اکنون در واقع ما با یک دستگاه جبری سروکار داریم، یعنی مجموعه اعداد حقیقی  $R$  به انضمام یک عمل دو تایی که در اصل‌های فوق صدق می‌کند. اینک به عنوان نمونه برخی نتایج منطقی را در باب  $R$  اثبات می‌کنیم.

❖ **مثال:** ثابت کنید عضو صفر از  $R$  منحصر به فرد است.

✍ **حل:** فرض کنیم  $O_1$  و  $O_2$  هر دو نقش صفر یعنی عضو همانی جمع  $R$  را داشته باشند در این صورت

$$O_1 = O_1 + O_2 \quad (\text{با توجه به همانی بودن } O_2)$$

$$= O_2 + O_1 \quad (\text{با توجه به خاصیت جابه‌جایی})$$

$$= O_2 \quad (\text{با توجه به همانی بودن } O_1)$$

شما نیز می‌توانید برخی از خواص اعداد حقیقی را ثابت کنید.

❖ **مثال:** ثابت کنید عضو قرینه هر عدد حقیقی منحصر به فرد است.

❖ **برهان:** فرض کنیم  $y_1$  و  $y_2$  هر دو قرینه عدد حقیقی  $x$  باشند. در این صورت

$$y_2 = y_2 + 0 \quad (\text{با توجه به ج ۴})$$

$$= y_2 + (x + y_1) \quad (\text{با توجه به ج ۵})$$

$$= (y_2 + x) + y_1 \quad (\text{با توجه به ج ۳})$$

$$= 0 + y_1 \quad (\text{با توجه به ج ۵})$$

$$= y_1 \quad (\text{با توجه به ج ۲ و ج ۳})$$

معمولاً قرینه عدد حقیقی  $x$  را با نماد  $-x$  و همچنین حاصل جمع  $x + (-y)$  را به شکل ساده  $x - y$  می‌نویسیم و آن را تفاضل  $x$  و  $y$  می‌نامیم.

به عنوان مثال دیگری از خواص اعداد حقیقی به مثال زیر توجه می‌کنیم.

❖ **مثال:** برای هر دو عدد حقیقی  $x$  و  $y$  ثابت کنید .  $-(x + y) = -x - y$

**حل:** منظور از  $-(x + y)$  قرینه  $x + y$  است. پس باید نشان دهیم که :

$$(x + y) + (-x - y) = 0$$

داریم :

$$x + y + (-x - y) = (y + x) + (-x - y) \quad (\text{جاب‌جایی جمع})$$

$$= y + [(x - x) - y] \quad (\text{شرکت‌پذیری})$$

$$= y + (0 - y)$$

$$= y + (-y)$$

$$= 0$$



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

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

### ۳- ضرب اعداد حقیقی

از تجربیاتمان می‌دانیم که ضرب دو عدد حقیقی، عددی حقیقی است. این ویژگی را به عنوان یک اصل می‌پذیریم، به علاوه برخی از ویژگی‌های دیگر اعداد حقیقی را در رابطه با عمل ضرب نیز به

عنوان اصل می‌پذیریم از آن جمله برای هر دو عدد حقیقی  $x$  و  $y$ ،  $xy = yx$

برای هر سه عدد حقیقی  $x$  و  $y$  و  $z$ ،  $x(yz) = (xy)z$

عددی به نام یک (با نماد ۱) وجود دارد به قسمی که  $1 \neq 0$  و برای هر عدد حقیقی  $x$ ، برای هر عدد حقیقی غیر صفر مانند  $x$ ، عددی حقیقی مانند  $y$  وجود دارد به قسمی که  $y$  را وارون  $x$  می‌نامیم.

$$xy = 1$$

در رابطه با عمل جمع، خاصیت زیر، به عنوان خاصیت توزیع‌پذیری ضرب روی جمع برقرار

است

$$(*) \quad x(y + z) = xy + xz$$

البته منظورمان حکم کلی است و گرنه در باب اعداد خاص، بارها درستی (\*) را تجربه کرده ایم. به طور کلی وقتی حکمی مانند (\*) بر حسب حروف بیان می شود منظور حکم کلی است. در واقع (\*) صورت ساده تر حکم زیر است.

برای هر سه عدد حقیقی  $x$  و  $y$  و  $z$  ،  $x(y+z) = xy + xz$  ،

اکنون، با داشتن این احکام می توانیم برخی دیگر از ویژگی های ضرب  $R$  را ثابت کنیم.

❖ **مثال:** وارون هر عدد حقیقی (غیرصفر) منحصر به فرد است.

✍ **حل:** فرض کنیم  $y_1$  و  $y_2$  هر دو وارون  $x$  باشند، پس

$$xy_1 = 1 \quad , \quad xy_2 = 1$$

می نویسیم :

$$y_1 = y_1 \times 1 = y_1 (xy_2) = (y_1x)y_2 = (xy_1)y_2 = 1y_2 = y_2$$

بنابراین حق داریم وارون  $x$  را با نماد  $x^{-1}$  نشان دهیم، گاهی وارون  $x$  را با  $\frac{1}{x}$  نیز نشان

می دهیم.

❖ **مثال:** وارون وارون  $x$  برابر  $x$  است، به زبان نمادی

$$(x^{-1})^{-1} = x$$

✍ **حل:** باید نشان دهیم  $(x^{-1})x = 1$  تا طبق تعریف،  $x$  نقش وارون  $x^{-1}$  را داشته باشد، اما این تساوی خود طبق تعریف وارون برقرار است.

قرارداد: حاصل ضرب  $\frac{1}{y} \cdot x$  را به شکل ساده تر  $\frac{x}{y}$  می نویسیم، در واقع حاصل تقسیم

$x$  بر  $y$  می باشد.

**تذکر مهم:** باید توجه داشت که عدد  $0$  وارون ندارد، بنابراین نوشتن عبارتهایی نظیر  $\frac{1}{0}$ ،  $\frac{2}{0}$ ، یا  $\frac{x}{0}$  و کلاً کسرهایی با مخرج صفر بی معنی بوده و از آن باید مؤکداً احتراز گردد. تفسیرهای غلطی که در خصوص این گونه عبارتها از قبیل اینکه  $\frac{1}{0} = \infty$  می شود ناشی از عدم توجه کسانی است که با فرایند مفهوم سازی و صورت بندی تئوری ریاضی آشنایی کافی ندارند.

البته در بخش های بعد خواهید دید که مثلاً  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} = \infty$  (به معنی حدی)، اما باید گفت که این

تساوی تنها به مفهوم حدی برقرار است تا آنکه در حدگیری  $\frac{1}{x}$  را با  $\frac{1}{0}$  جایگزین کرده و از این غلط فاحش استفاده کنیم و آن را برابر  $\infty$  قلمداد نماییم!

- ۱- ثابت کنید برای هر سه عدد حقیقی  $x, y, z$  ،  $x(y-z) = xy - xz$  ،  
 ۲- ثابت کنید هرگاه  $xy = 0$  آنگاه  $x = 0$  یا  $y = 0$  و عکس این حکم برقرار است.

۳- برای هر دو عدد حقیقی  $x$  و  $y$

الف)  $x(-y) = (-x)y = -(xy)$

ب)  $(-x)(-y) = xy$

### ۴- بسط اعشاری اعداد گویا

بسط اعشاری یک عدد گویا، یک عدد اعشاری پایان پذیر نظیر

$$\frac{3}{2} = 1.5, \quad \frac{3}{4} = 0.75$$

و یا یک بسط اعشاری پایان ناپذیر متناوب ساده یا مرکب است نظیر

$$\frac{2}{3} = 0.666\dots = 0.\overline{6} \text{ بسط اعشاری متناوب ساده}$$

$$\frac{5}{6} = 0.8333\dots = 0.\overline{83} \text{ بسط اعشاری متناوب مرکب}$$

در بسط اعشاری متناوب ساده و یا مرکب، دسته ارقامی که مرتب تکرار می شوند را دوره گردش عدد نامند. و بالای ارقامی که دوره گردش اند خط کشیده شده است و تعدادی رقم که بین دوره گردش و ممیز قرار دارند ارقام غیرگردش نامیده می شوند.

$$\frac{7}{13} = 0.\overline{538461}, \quad \frac{1}{56} = 0.0017857142$$

❖ نتیجه: اگر یک بسط اعشاری متناوب (ساده یا مرکب) داشته باشید، می توانید از فرمول زیر، کسر یا عدد گویای مساوی آن را به دست آورید.

فرض کنید  $a_1 a_2 \dots a_m$  ارقام غیرگردش و  $b_1 b_2 \dots b_n$  ارقام دوره گردش عدد باشند، در این

$$\frac{0.a_1 a_2 \dots a_m \overline{b_1 b_2 \dots b_n}}{0.a_1 a_2 \dots a_m} = \frac{a_1 a_2 \dots a_m \overline{b_1 b_2 \dots b_n} - a_1 a_2 \dots a_m}{\underbrace{99\dots 9}_{n \text{ تا ه}} \underbrace{0\dots 0}_{m \text{ تا صفر}}}$$

صورت (۱)

مثال های زیر، نحوه استفاده از فرمول (۱) را نشان می دهند.

$$0.\overline{6} = \frac{6}{9} = \frac{2}{3} \quad 0.0\overline{1785} = \frac{1785 - 1}{99900} = \frac{446}{24975}$$

هر عدد حقیقی که بسط اعشاری آن، پایان ناپذیر ولی متناوب نباشد، گنگ یا اصم نامیده می‌شود. بنابراین اعداد گنگ، اعدادی هستند که بسط اعشاری آنها بی‌پایان است ولی متناوب نیستند مانند:

$$\sqrt{2} = 1/414213562\dots$$

$$\pi = 3/141592653\dots$$

$$e = 2/7182818284\dots$$

❖ **قضیه ۱:** اگر  $a$  عددی گویا و غیر صفر باشد و  $b$  عددی گنگ، اعداد  $a \pm b$  و  $ab$  و  $\frac{a}{b}$  و  $\frac{b}{a}$  گنگ هستند.

همان‌طور که می‌دانید در مجموعه اعداد گویا، هر دو عدد گویا را باهم جمع یا تفریق و یا درهم ضرب کنیم حاصل عددی است گویا (اصطلاحاً گوییم مجموعه اعداد گویا، نسبت به عمل جمع و ضرب و تفریق بسته است) و اما مجموعه اعداد گنگ نسبت به هیچ‌یک از اعمال جمع، تفریق، ضرب و تقسیم بسته نیست زیرا:

$$\sqrt{2} \text{ عددی گنگ است و بنابر قضیه ۱، اعداد } \sqrt{2} - 3 \text{ و } \sqrt{2} + 3 \text{ و } \sqrt{2} - \sqrt{2} \text{ و } 3\sqrt{2} = \sqrt{18}$$

گنگ هستند ولی

$$(3 + \sqrt{2}) + (3 - \sqrt{2}) = 6 \in \mathbb{Q}$$

$$(3 + \sqrt{2})(3 - \sqrt{2}) = 7 \in \mathbb{Q}$$

$$\frac{\sqrt{18}}{\sqrt{2}} = 3 \in \mathbb{Q}$$

### ابوریحان بیرونی

اصم گر بود زیرا جواب ندهد، جوینده را آلا به تقرب مثل  $\sqrt{10}$  که برای آن هرگز نتوان عددی یافت که اگر آن را در خود زنی  $10$  بود.

## ۵-۰ - تقریب اعداد گنگ

می‌دانیم که بسط اعشاری هر عدد گنگ به صورت کسری اعشاری با ارقام نامتناهی و بی‌پایان است که در آن این ارقام طبق هیچ ضابطه و نظم معینی رخ می‌دهند. به لحاظ تاریخی  $\sqrt{2}$  و  $\pi$  (عدد ارشمیدس) مشهورترین اعداد گنگ‌اند.  $\sqrt{2}$  در رابطه با محاسبه طول قطر یک مربع به ضلع واحد



پدیدار گشت و  $\pi$  توسط ارشمیدس به عنوان ثابت دایره کشف گردید. همه دواير موجود در عالم، چه کوچک و چه بزرگ، درگیر عدد  $\pi$  هستند، بدین معنی که نسبت محیط هر دایره بر طول قطر آن عددی است که به  $\pi$  نشان داده می‌شود. قرار دادن حرف  $\pi$  برای چنین عددی خود مبین این واقعیت است که این عدد گویا نیست. در طول تاریخ ریاضی محاسبه جزء اعشاری  $\pi$ ، یعنی شناخت ارقام اعشاری آن، یکی از جذاب‌ترین فعالیت‌های ریاضی به‌شمار رفته است، علت این امر را می‌توانیم در چند جهت مطرح کنیم. مثلاً استفاده از  $\pi$  در محاسبه مساحت و محیط دایره.

داشتن تقریبات بهتر  $\pi$  برای استفاده در محاسبات دقیق‌تر نجومی است، به هر حال ارقام اعشاری  $\pi$  بی‌هیچ نظمی ادامه دارد و بشر طالب آن است که تا آنجا که برایش مقدور است، این ارقام را شناسایی کند.

در ریاضیات عالی به‌صورتی تئوریک ثابت می‌شود که  $\pi$  گنگ است.

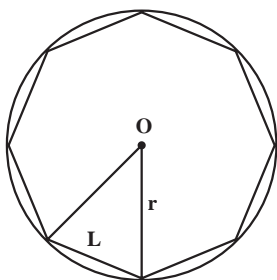
محاسبات ارقام اعشاری  $\pi$  طی چندین قرن گذشته مؤید این نتیجه مهم است و لذا می‌توان ادعا کرد که قدرت تئوری پردازي ریاضی مبتنی بر پیش‌بینی پدیده‌های ریاضی با تجربیات پیچیده محاسباتی سازگاری تام و تمام دارد و این یکی از زیبایی‌های علوم ریاضی است. ذیلاً به اختصار محاسبه و تولید ارقام اعشاری  $\pi$  را به لحاظ تاریخی جهت آشنایی مرور می‌کنیم: ارشمیدس، که در قرن سوم قبل از میلاد می‌زیسته، نشان داد که:

$$\frac{223}{71} < \pi < \frac{22}{7}$$

وی این امر را با استفاده از ۹۶ ضلعی‌های منتظم ثابت کرد که درون دایره به شعاع واحد محاط می‌شدند.

سپس پتولمی<sup>۱</sup> در قرن سوم بعد از میلاد، با استفاده از ۳۶۰ ضلعی منتظم مقدار ۳/۱۴۱۶۶۶... را برای  $\pi$  به دست آورد که تا سه رقم اعشار صحیح می‌باشد در سال ۲۶۳ بعد از میلاد لیوهوی<sup>۲</sup> با استفاده از ۹۶ ضلعی منتظم و یک ۱۹۲ ضلعی منتظم و محاسبه میانگین مقادیر به دست آمده عدد ۳/۱۴۱۸۶۴ را برای  $\pi$  به دست آورد که خطای این تقریب کمتر از ۰/۰۱ می‌باشد.

## غیاث‌الدین جمشید کاشانی



کاشانی ریاضیدان مسلمان ایرانی، به‌جای محاسبه  $\pi$  به محاسبه  $2\pi$  پرداخته است. روش کاشانی درج چندضلعی‌های منظم و محاسبه تقریبی محیط آنها و سپس استخراج نسبت این محیط به شعاع دایره مربوطه بوده است برای مثال هرگاه یک هشت‌ضلعی منظم را درون دایره به شعاع  $r$  محاط کنیم و طول ضلع این هشت‌ضلعی را  $L$  بنامیم، نسبت مربوطه برابر  $\frac{8L}{r} \approx 2\pi$  خواهد بود.

کاشانی ارقام  $2\pi$  را تا ۱۶ رقم دقیقاً محاسبه کرده است و این محاسبه بسیار بسیار دقیقتر از محاسبه ارقام  $\pi$  بوده است که قبل از او به‌دست آمده است. دقت محاسبات کاشانی به‌گونه‌ای است که تا ۲۰۰ سال بعد از او توسط هیچ‌کس از او پیشی نگرفته بود و فقط لودوف<sup>۱</sup> توانست ۲۰۰ سال بعد از او عدد  $\pi$  را تا ۲۰۰ رقم اعشار محاسبه کند. ماکزیم خطای کاشانی در محاسبه کمتر از  $\frac{1}{9}$  است. و این بدان معنی است که کاشانی عدد  $2\pi$  را تا ۱۶ رقم اعشار بعد از ممیز دقیقاً به دست آورده است که با محاسبات رایانه‌های امروزی تطابق دارد!

کاشانی این مقدار دقت را با محاسبه محیط یک  $3 \times 2 \times 10^{18}$  ضلعی منظم به‌دست آورده است و در دوره بعد، که با پیشرفت حسابان پیشرفته (آنالیز ریاضی) اتفاق افتاد محاسبه ارقام اعشاری  $\pi$  با استفاده از فرمول‌های آنالیزی میسر گردید، همچنین لئونارد اویلر فرمول  $\pi = 2 \tan^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) + 8 \tan^{-1}\left(\frac{3}{\sqrt{49}}\right)$  را به‌دست آورد.

روش‌های محاسبه  $\pi$  با استفاده از رایانه از سال ۱۹۶۱ شروع گردید. این روش‌ها مؤثرترین و کارآمدترین روش‌های محاسبه  $\pi$  را با استفاده از تئوری‌های ریاضی و حساب‌گرهای فوق‌مدرن عرضه می‌کنند.

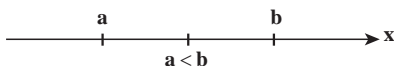
<sup>۱</sup> - Ludolph van culen



## ۶-۰- ترتیب و نامساوی‌ها

یکی از خواص مهم اعداد حقیقی مرتب بودن آنها است.

تعریف ترتیب خط حقیقی: هرگاه  $a$  و  $b$  اعداد حقیقی باشند، آنگاه  $a$  کوچکتر از  $b$  است اگر  $b - a$  مثبت باشد. این ترتیب را با نامساوی  $a < b$  (یا  $b > a$ ) نشان می‌دهیم. علامت  $a \leq b$  یعنی  $a$  کوچکتر یا مساوی  $b$



عبارت  $b$  بزرگتر از  $a$  است. هم‌ارز  $a$  کوچکتر از  $b$  است. خواص زیر اغلب در نامساوی‌ها به کار می‌روند. اگر  $<$  را با  $\leq$  و  $>$  را با  $\geq$  عوض کنیم، خواص مشابهی به دست می‌آیند.

### خواص نامساوی‌ها

- (۱) هرگاه  $a < b$  و  $b < c$ ، آنگاه  $a < c$ .
- (۲) هرگاه  $a < b$  و  $c < d$ ، آنگاه  $a + c < b + d$ .
- (۳) هرگاه  $a < b$  و  $c$  عددی حقیقی باشد، آنگاه  $a + c < b + c$ .
- (۴) هرگاه  $a < b$  و  $c > 0$ ، آنگاه  $ac < bc$ .
- (۵) هرگاه  $a < b$  و  $c < 0$ ، آنگاه  $ac > bc$ .
- (۶) (اگر  $a$  و  $b$  مثبت باشند)  $a < b \Leftrightarrow \frac{1}{a} > \frac{1}{b}$ . [ $\Leftrightarrow$  به معنی هم‌ارزی است.]
- (۷) (اگر  $a$  و  $b$  مثبت باشند)  $a < b \Leftrightarrow a^2 < b^2$ .

❖ **تبصره:** توجه کنید که نامساوی‌ها با ضرب در عددی منفی تغییر جهت می‌دهد. مثلاً، هرگاه  $x < 5$ ، آنگاه  $-3x > -15$ . این ویژگی در تقسیم بر عددی منفی نیز صادق است. مثلاً، هرگاه  $-3x > 9$ ، آنگاه  $x < -3$ .

اگر سه عدد حقیقی  $a$ ،  $b$ ،  $c$  چنان باشند که  $a < b$  و  $b < c$ ، می‌گوییم  $b$  بین  $a$  و  $c$  است و می‌نویسیم  $a < b < c$ .

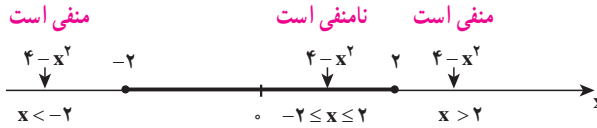
## ۷-۰- بازدهای اعداد

در حساب دیفرانسیل و انتگرال اغلب تعیین مثبت، صفر یا منفی بودن عبارات اهمیت دارد مثلاً برای معادله  $y = \sqrt{4 - x^2}$  که متغیر  $y$  را بر حسب متغیر  $x$  بیان می‌کند، چون جذر یک عدد منفی در  $\mathbb{R}$  بی‌معنی است، باید برای حقیقی بودن  $y$  شرط  $(4 - x^2) \geq 0$  اعمال شود. این

شرط معادل عبارت زیر است.

$$-2 \leq x \leq 2$$

در نتیجه، مجموعه اعداد نموده شده با  $x$  بازه‌ای است با نقاط انتهایی  $\pm 2$  بر خط حقیقی (شکل زیر)



نظیر شکل فوق اغلب زیر مجموعه‌های خط حقیقی یعنی مجموعه اعدادی که یک متغیر را نمایش می‌دهند بازه یا اجتماعی از بازه‌ها می‌باشند.

بازه‌ها چند نوع‌اند، که هر یک نمادی خاص خود دارد.

مثلاً، بازه باز  $(a, b) = \{x: a < x < b\}$  تمام اعداد حقیقی بزرگتر از  $a$  و کوچکتر از  $b$  است، که در آن  $a$  و  $b$  نقاط انتهایی بازه نام دارند و این نقاط انتهایی در بازه باز قرار ندارند.

بازه‌هایی که شامل نقاط انتهایی خود باشند بازه بسته نام داشته و با نماد  $[a, b] = \{x: a \leq x \leq b\}$  نموده

می‌شوند. در جدول (۱) نه بازه اصلی روی خط حقیقی نموده شده‌اند. که چهارتای اول را بازه‌های کراندار و پنج‌تای دیگر را بازه‌های بی‌کران می‌نامند.

جدول (۱)

نمودار روی خط	نماد مجموعه	نماد بازه	نام
	$\{x: a < x < b\}$	$(a, b)$	بازه باز
	$\{x: a \leq x \leq b\}$	$[a, b]$	بازه بسته
	$\{x: a \leq x < b\}$	$[a, b)$	بازه‌های نیم‌باز
	$\{x: a < x \leq b\}$	$(a, b]$	
	$\{x: x \leq a\}$	$(-\infty, a]$	بازه‌های نامحدود
	$\{x: x < a\}$	$(-\infty, a)$	
	$\{x: b < x\}$	$(b, +\infty)$	
	$\{x: b \leq x\}$	$[b, +\infty)$	
	$\{x \text{ عددی حقیقی است} : x\}$	$(-\infty, +\infty)$	

❖ **تبصره:** علائم  $+\infty$  و  $-\infty$  نمایش اعدادی حقیقی نبوده و فقط با آنها می‌توان شرایط بی‌کران

را خلاصه‌تر بیان کرد.

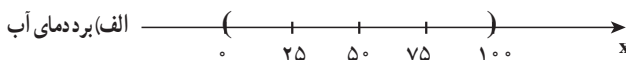
مثلاً بازه  $[b, +\infty)$  از راست بی کران است. زیرا شامل همهٔ اعداد حقیقی بزرگتر یا مساوی  $b$  است.

❖ **مثال:** با فرض اینکه فشار هوا یک اتمسفر است بازه‌هایی از خط حقیقی را توصیف کنید که نظیر بُرد دمای (به درجهٔ سلسیوس) آب در دو حالت زیر باشند.

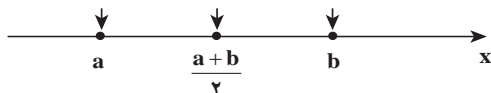
**حل:** الف) مایع (ب) بخار

الف) چون آب در شرایط مایع دمایی بیش از  $0^\circ$  و کمتر از  $100^\circ$  دارد بازهٔ  $\{x: 0 < x < 100\} = (0, 100)$  را مثل شکل زیر قسمت (الف)، خواهیم داشت.

ب) چون آب در شرایط گاز (بخار) دمایی بزرگتر یا مساوی  $100^\circ$  دارد بازهٔ  $\{x: 100 \leq x\} = [100, +\infty)$  را مثل شکل زیر قسمت (ب) خواهیم داشت.

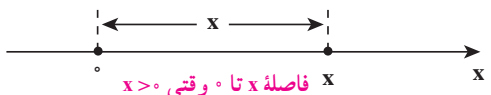


بازه متقارن: فرض کنیم  $(a, b)$  یک بازه باشد. معلوم است که عدد  $\frac{a+b}{2}$  به این بازه تعلق دارد (چرا؟) این نقطه را نقطه میانی بازه می‌نامیم زیرا فاصله آن تا نقاط انتهایی  $a$  و  $b$  یکسان است.

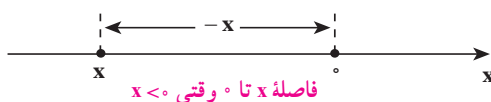


هرگاه  $\delta > 0$ ، بازه  $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$  بازه‌ای با نقطه میانی  $x_0$  و شعاع  $\delta$  است. چنین بازه‌هایی را بازه متقارن نیز می‌نامیم.

اغلب دانستن اینکه نقطهٔ  $x$  از خط حقیقی چقدر تا مبدأ فاصله دارد مهم است. همان‌طور که شکل زیر نشان داده، اولین حدس ممکن است  $x$  باشد.



اما اگر  $x < 0$ ، فاصله  $x$  نیست بلکه  $-x$  است (شکل زیر) مثلاً اگر  $x = -5$ ، فاصله  $-x = -(-5) = 5$  می‌باشد. توضیح اینکه فاصله همیشه عددی نامنفی است.



برای بیان مقدار  $\sqrt{x^2}$  می‌توان برحسب حالات، چنین نوشت:

$$\sqrt{x^2} = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ -x, & x < 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{اگر} \\ \text{اگر} \end{array}$$

علامت دیگر استفاده از  $|x|$  است که در تعریف زیر دقیقاً عرضه شده است.

## ۰ - ۸ - قدر مطلق

هرگاه  $x \in \mathbb{R}$ ، قدر مطلق  $x$  عبارت است از:

$$|x| = \sqrt{x^2} = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ -x, & x < 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{اگر} \\ \text{اگر} \end{array}$$

❖ **مثال:** با استفاده از دو قسمت تعریف، قدر مطلق  $-5$  را بیابید.

$$|-5| = \sqrt{(-5)^2} = \sqrt{25} = 5$$

حل: 

قضایای زیر چند خاصیت مفید قدر مطلق را بیان می‌دارند.

**قضیه (اعمال با قدر مطلق):** هرگاه  $a$  و  $b$  اعداد حقیقی بوده و  $n$  عدد صحیح مثبتی باشد،

آنگاه خواص زیر برقرار می‌باشند.

$$|a^n| = |a|^n \quad (۳) \qquad \frac{|a|}{|b|} = \frac{|a|}{|b|}, \quad b \neq 0 \quad (۲) \qquad |a \cdot b| = |a| |b| \quad (۱)$$

اثبات به عهده دانش‌آموز.

**قضیه (نامساوی‌ها و قدر مطلق):** هرگاه  $a$  و  $b$  اعدادی حقیقی بوده و  $k$  مثبت باشد، خواص

زیر برقرار می‌باشند.

$$-|a| \leq a \leq |a| \quad (۱)$$

$$|a| \leq k \quad \text{اگر و فقط اگر} \quad -k \leq a \leq k \quad (۲)$$

$$|a| \geq k \quad \text{اگر و فقط اگر} \quad a \geq k \quad \text{یا} \quad a \leq -k \quad (۳)$$

$$|a + b| \leq |a| + |b| \quad \text{نامساوی مثلثی} \quad (۴)$$

خواص ۲ و ۳ در صورت تعویض  $\leq$  با  $>$  نیز درست‌اند. این احکام را برحسب  $<$  بنویسید.

❖ **برهان:** خاصیت‌های ۲ و ۴ را ثابت کرده و اثبات دو خاصیت دیگر را به عنوان تمرین به

عهده دانش‌آموز می‌گذاریم.

برای برهان خاصیت ۲، فرض کنید  $|a| \leq k$ ، چون  $|a| \leq a \leq |a|$  نتیجه می‌شود

$$-k \leq -|a| \leq a \leq |a| \leq k$$

$$-k \leq a \leq k$$

یعنی

حال فرض کنید  $-k \leq a \leq k$ ، اگر  $a \geq 0$ ،  $|a| = a \leq a$  و اگر  $a \leq 0$ ،  $|a| = -a \leq a$  از این رو در هر حالت  $|a| \leq k$ .

اثبات (۴) چون  $|a| \leq a \leq |a|$  و  $-|b| \leq b \leq |b|$  بنابراین  $-(|a| + |b|) \leq a + b \leq |a| + |b|$  و بنابر قضیه  $|a + b| \leq |a| + |b|$

❖ مثال: نشان دهید برای هر دو عدد حقیقی  $a$  و  $b$

$$|a| - |b| \leq |a - b| \leq |a| + |b|$$

$$|a| = |a - b + b| \leq |a - b| + |b|$$

$$|a| - |b| \leq |a - b| \quad (۱)$$

حل: طبق نامساوی مثلثی

پس

از طرف دیگر طبق نامساوی مثلثی

$$|a - b| = |a + (-b)| \leq |a| + |-b| = |a| + |b| \quad (۲)$$

$$|a| - |b| \leq |a - b| \leq |a| + |b|$$

و از (۱) و (۲) نتیجه می‌شود

## تمرین در کلاس

نامساوی مثلثی را برای سه عدد  $a_1, a_2, a_3$  بیان و اثبات کنید. آیا صورت کلی تری (برای  $n$  عدد) از این نامساوی می‌توانید بیان کنید؟

## مسائل

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

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

الف)  $3x + 5 \leq 8$       ب)  $5x - 3 \leq 7 - 3x$

ج)  $x^2 < 9$       د)  $\frac{1}{2-x} < 3$

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

الف)  $|x - 2| \leq 2$       ب)  $|2x + 5| < 1$       پ)  $\left| 2 - \frac{x}{2} \right| < \frac{1}{2}$

ت)  $|3x - 7| < 2$       ث)  $|5 - 3x| < 3$



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

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

۶- ثابت کنید که اگر  $a < 1$  و  $n \in \mathbb{N}$  آنگاه  $a^n < a$ .

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

۸- فرض کنیم  $a < x < b$ ، ثابت کنید  $|x| < \text{Max}\{|a|, |b|\}$

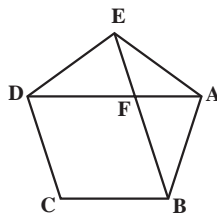
(منظور از Max، ماکسیمم مقدار مجموعه است)

آیا عکس این حکم درست است؟

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

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.



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

۱۲- ثابت کنید  $\log_3 3$  گویا نیست.

۱۳- ثابت کنید:

نامساوی زیر (نامساوی برنولی) به ازای هر عدد طبیعی  $n$  و هر عدد حقیقی  $x \geq -1$  برقرار است.

$(1+x)^n \geq 1+nx$  (راهنمایی: استقرا)