

## مشتق پذیری و پیوستگی

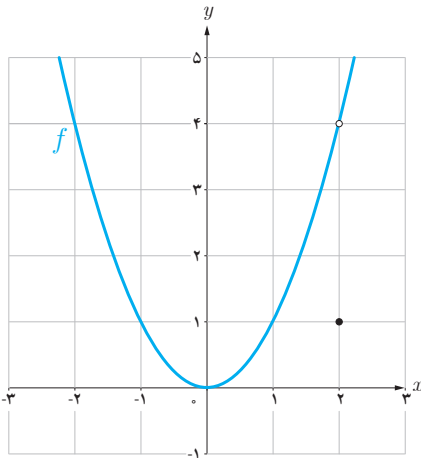
در درس گذشته مشتق تابع  $f$  در نقطه‌ای به طول  $x_0$  به یکی از دو صورت زیر تعریف شد:

$$f'(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} \quad \text{یا} \quad f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$$

در صورت وجود حد (متناهی) فوق گفته می‌شود که  $f$  در  $x_0$  مشتق پذیر است. در مطالعه رفتار یک تابع، مشخص کردن نقاطی که تابع در آن نقاط مشتق پذیر نیست دارای اهمیت است. در فعالیت زیر با یکی از حالت‌هایی که یک تابع در آن مشتق پذیر نیست آشنا می‌شوید.

### فعالیت

نمودار تابع  $f(x) = \begin{cases} x^2 & x \neq 2 \\ 1 & x = 2 \end{cases}$  (شکل مقابل) را در نظر می‌گیریم:



الف) چگونه به کمک نمودار تابع و تعریف مشتق به عنوان شیب خط مماس می‌توانید استدلال کنید که  $f'(2)$  وجود ندارد؟

اگر برای بررسی مشتق پذیری این تابع در  $x = 2$  تعریف مشتق  $f$  در  $x = 2$  را به کار گیریم:

$$\lim_{x \rightarrow 2} \frac{f(x) - f(2)}{x - 2} = \lim_{x \rightarrow 2} \frac{x^2 - 1}{x - 2} =$$

حد صورت کسر برابر ۳ است و حد مخرج کسر برابر صفر است. وقتی  $x \rightarrow 2$ ، داریم:

$$\text{حد راست} = \lim_{x \rightarrow 2^+} \frac{x^2 - 1}{x - 2} = +\infty$$

$$\text{حد چپ} = \lim_{x \rightarrow 2^-} \frac{x^2 - 1}{x - 2} = -\infty$$

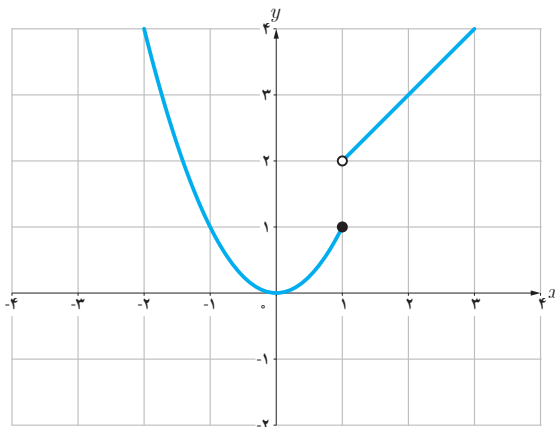
بنابراین  $\lim_{x \rightarrow 2} \frac{f(x) - f(2)}{x - 2}$  موجود (و متناهی) نیست، پس  $f'(2)$  وجود ندارد.

ب) نقطه دیگری (به جز  $x = 2$ ) در نظر بگیرید. آیا تابع در این نقطه مشتق پذیر است؟ پاسخ خود را با پاسخ دوستانتان مقایسه کنید.

### کارد کلاس

تابع  $g$  (شکل زیر) را به صورت 
$$g(x) = \begin{cases} x^2 & x \leq 1 \\ x + 1 & x > 1 \end{cases}$$
 در نظر می‌گیریم.

چرا  $g'(1)$  موجود نیست؟



توابع  $f$  و  $g$  فعالیت و کار در کلاس قبل به ترتیب در  $x = 2$  و  $x = 1$  ناپیوسته بودند و همان گونه که مشاهده کردید،  $f'(2)$  و  $g'(1)$  موجود نبودند. بنابراین به نظر می‌رسد که اگر تابعی در یک نقطه مشتق پذیر باشد، الزاماً در آن نقطه باید پیوسته باشد. این مطلب را به عنوان یک قضیه ثابت می‌کنیم.

**قضیه:** اگر تابع  $f$  در  $x = a$  مشتق پذیر باشد آن گاه  $f$  در  $a$  پیوسته است.

**اثبات:** کافی است نشان دهیم:  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$

$$\lim_{x \rightarrow a} (f(x) - f(a)) = \lim_{x \rightarrow a} ((x - a) \left( \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \right)) =$$

$$\lim_{x \rightarrow a} (x - a) \cdot \lim_{x \rightarrow a} \left( \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \right) = 0 \cdot f'(a) = 0$$

بنابراین  $\lim_{x \rightarrow a} (f(x) - f(a)) = 0$  و از آنجا  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$  (چرا؟)

با توجه به این قضیه به طور منطقی می توان نتیجه گرفت که:

اگر تابع  $f$  در  $x = a$  پیوسته نباشد، آن گاه  $f$  در  $x = a$  مشتق پذیر هم نیست.

مثال بعد نشان می دهد که عکس قضیه درست نیست، یعنی حتی با وجود پیوستگی تابع در یک نقطه، لزوماً نمی توان مشتق پذیری تابع در آن نقطه را نتیجه گرفت.

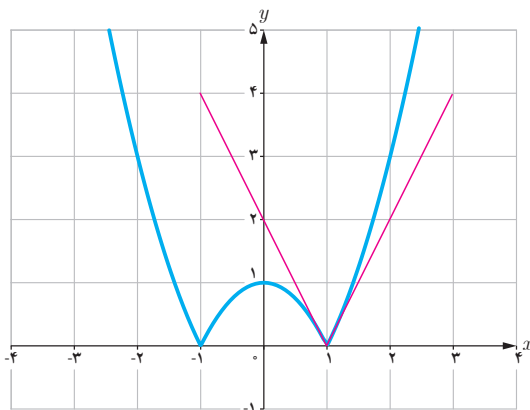
❁ **مثال:** مشتق پذیری تابع  $f(x) = |x^2 - 1|$  را در  $x = 1$  بررسی کنید.

$$\lim_{x \rightarrow 1} \frac{f(x) - f(1)}{x - 1} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{|x^2 - 1| - 0}{x - 1}$$

برای محاسبه  $f'(1)$  ناچاریم حدهای راست و چپ را به دست آوریم.

$$\text{حد راست} = \lim_{x \rightarrow 1^+} \frac{|x^2 - 1|}{x - 1} = \lim_{x \rightarrow 1^+} \frac{x^2 - 1}{x - 1} = 2$$

$$\text{حد چپ} = \lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{|x^2 - 1|}{x - 1} = \lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{-(x^2 - 1)}{x - 1} = -2$$



بنابراین  $f'(1)$  موجود نیست. به عبارت دیگر خط مماس بر منحنی در نقطه  $x = 1$  وجود ندارد. اما حدهای یک طرفه فوق را می توان با وجود نیم خط های مماس بر منحنی در نقطه  $x = 1$  توجیه کرد. اگر از سمت راست به نقطه  $x = 1$  نزدیک شویم، شیب نیم خط مماس بر منحنی در این نقطه برابر ۲ و اگر از سمت چپ به  $x = 1$  نزدیک شویم، شیب نیم خط مماس بر منحنی در این نقطه برابر  $-2$  است. حدهای راست و چپ بالا را به ترتیب مشتق های راست و چپ  $f$  در  $x = 1$  می نامیم و با  $f'_+(1)$  و  $f'_-(1)$  نمایش می دهیم.

در مثال قبل  $f$  در  $x=1$  پیوسته است ولی  $f$  در آن مشتق پذیر نیست.

نیم خط‌های مماس راست و چپ را به اختصار، نیم مماس راست و چپ می‌نامیم.

در حقیقت:

$$f'_-(1) = \text{شیب نیم مماس چپ}$$

$$f'_+(1) = \text{شیب نیم مماس راست}$$

معادله این نیم مماس‌ها نیز به ترتیب عبارت‌اند از:

$$y - 0 = 2(x-1) \quad \text{یا} \quad y = 2x - 2, \quad x \geq 1$$

$$y - 0 = -2(x-1) \quad \text{یا} \quad y = -2x + 2, \quad x \leq 1$$

### کاردرکلاس

نشان دهید که مشتق تابع  $f$  در مثال قبل در  $x=-1$  نیز موجود نیست.  
در صورت امکان معادله نیم مماس‌های راست و چپ در  $x=-1$  را بنویسید.

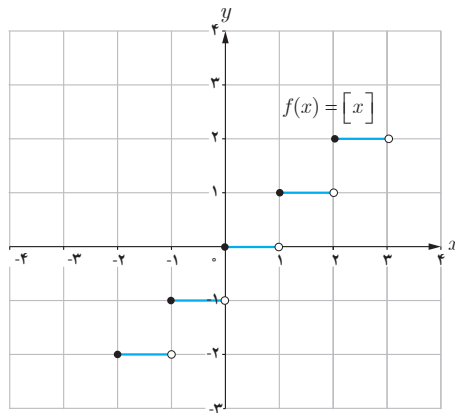
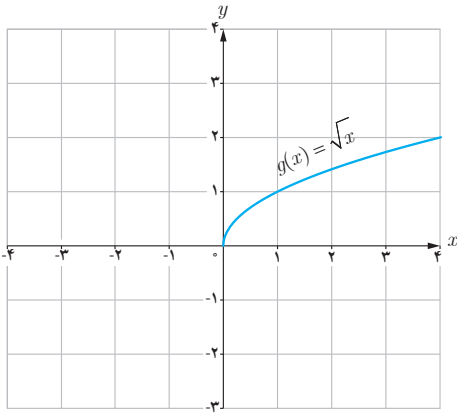
**تعریف:** مشتق راست و مشتق چپ تابع  $f$  در  $x=a$  را با  $f'_+(a)$  و  $f'_-(a)$  نمایش می‌دهیم و آن را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$f'_+(a) = \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}, \quad f'_-(a) = \lim_{x \rightarrow a^-} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$$

یا به طور معادل:

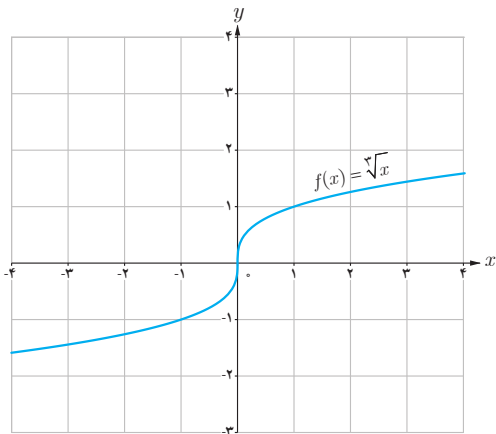
$$f'_+(a) = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}, \quad f'_-(a) = \lim_{h \rightarrow 0^-} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}$$

❁ **مثال:** توابع  $f(x) = [x]$  و  $g(x) = \sqrt{x}$  در صفر پیوسته نیستند. بنابراین  $f'(0)$  و  $g'(0)$  موجود نیستند.



اکنون به بررسی حالت دیگری می پردازیم که در آن تابع مشتق پذیر نیست.

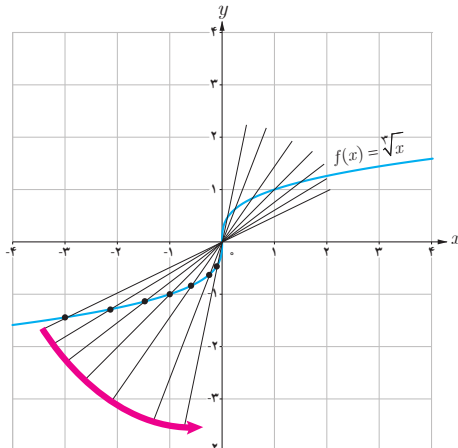
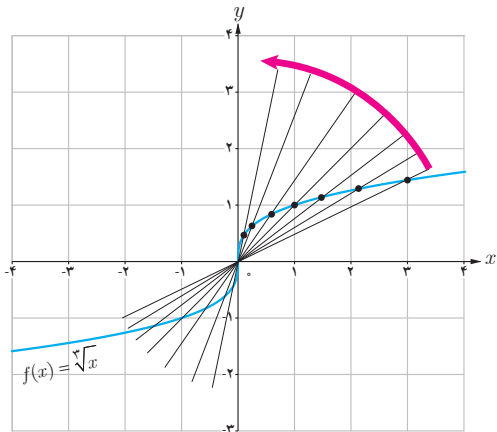
❁ **مثال:** تابع  $f(x) = \sqrt[3]{x}$  را در نظر می گیریم. مشتق پذیری این تابع را در  $x = 0$  بررسی کنید.



$$f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sqrt[3]{x} - 0}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sqrt[3]{x}}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{\sqrt[3]{x^2}} = +\infty$$

بنابراین تابع  $f$  در صفر مشتق پذیر نیست. شکل ها نشان می دهند که وقتی از سمت راست یا چپ به نقطه صفر نزدیک می شویم خط های قاطع به خط  $x = 0$  نزدیک می شوند.

تابع  $f(x) = \sqrt[3]{x}$  در  $x = 0$  مشتق پذیر نیست. خط  $x = 0$  را «مماس قائم» منحنی می نامیم.



اگر تابع  $f$  در  $x = a$  پیوسته باشد و در این نقطه مشتق چپ و راست نامتناهی داشته باشد در این صورت خط  $x = a$  را «مماس قائم» بر منحنی  $f$  در نقطه  $(a, f(a))$  می‌نامیم. بدیهی است  $f'(a)$  در این حالت وجود ندارد.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت:

اگر تابع  $f$  در  $x = a$  هر یک از شرایط زیر را داشته باشد، در این صورت در این نقطه مشتق پذیر نیست.

۱ در  $f$  پیوسته نباشد.

۲ در  $f$  پیوسته باشد و مشتق راست و مشتق چپ در  $x = a$ :

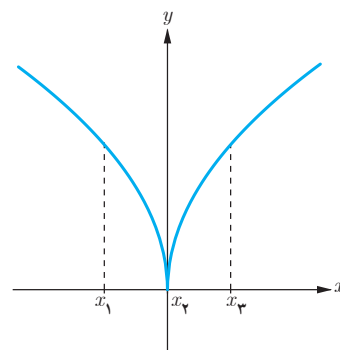
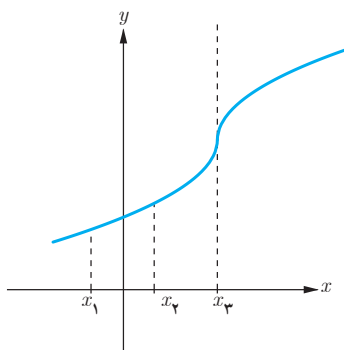
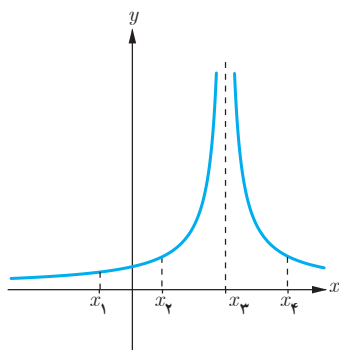
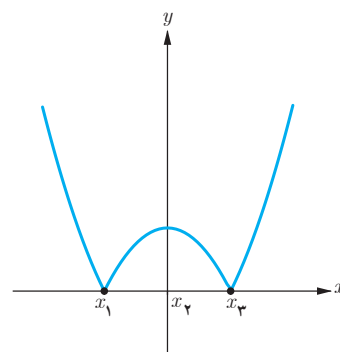
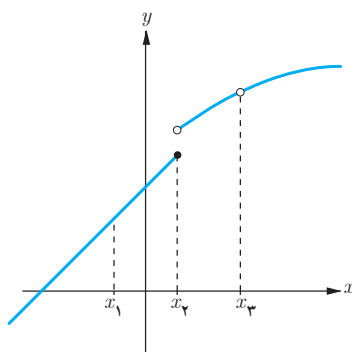
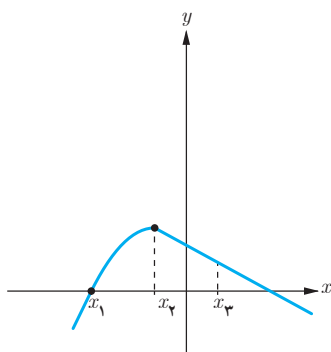
(الف) هر دو موجود (متناهی) ولی نابرابر باشند (نقطه گوشه‌ای).

(ب) یکی متناهی و دیگری نامتناهی باشد (نقطه گوشه‌ای).

(پ) هر دو نامتناهی باشند.

### کاردرکلاس

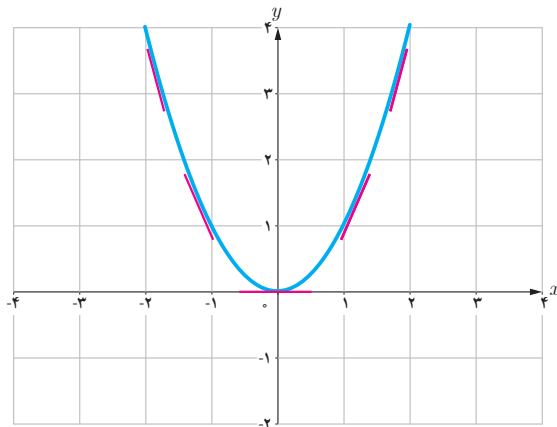
در شکل‌های زیر مشخص کنید که هر تابع در کدام نقطه یا نقاط مشخص شده مشتق پذیر نیست.



## تابع مشتق

تاکنون با مفهوم مشتق تابع در یک نقطه (معین) آشنا شده‌اید. حال به دنبال یافتن رابطه‌ای بین مجموعه نقاط متعلق به دامنه یک تابع و مشتق تابع در آن نقاط هستیم.

### فعالیت



تابع  $f(x) = x^2$  را در نظر می‌گیریم.

جدول زیر را کامل کنید (مشتق تابع در برخی نقاط حساب شده‌اند).

$x$	-۳	-۲	-۱	۰	$\frac{1}{2}$	$\sqrt{3}$	۲
$f'(x)$		-۴		۰		$2\sqrt{3}$	۴

$$f'(-2) = \lim_{x \rightarrow -2} \frac{f(x) - f(-2)}{x - (-2)} = \lim_{x \rightarrow -2} \frac{x^2 - 4}{x + 2} = \lim_{x \rightarrow -2} (x - 2) = -4$$

$$f'(\sqrt{3}) = \lim_{x \rightarrow \sqrt{3}} \frac{f(x) - f(\sqrt{3})}{x - \sqrt{3}} = \lim_{x \rightarrow \sqrt{3}} \frac{x^2 - 3}{x - \sqrt{3}} = \lim_{x \rightarrow \sqrt{3}} \frac{(x + \sqrt{3})(x - \sqrt{3})}{x - \sqrt{3}} = 2\sqrt{3}$$

$$f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(0)}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2}{x} = 0$$

می‌دانیم مشتق تابع در یک نقطه (در صورت وجود) برابر شیب خط مماس بر منحنی در آن نقطه است و از طرفی مماس بر منحنی در هر نقطه یکتاست، بنابراین  $f'(x)$  تابعی از  $x$  است. حدس می‌زنید در چه نقاطی مشتق تابع  $f(x) = x^2$  وجود دارد؟

اگر  $x$  عضوی از دامنه تابع  $f$  باشد، تابع مشتق  $f$  در  $x$  را با  $f'(x)$  نمایش می‌دهیم و آن را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$$

مشروط بر آنکه حد فوق موجود باشد. مجموعه تمام نقاطی از دامنه  $f$  که برای آنها  $f'$  موجود باشد را دامنه  $f'$  می‌نامیم.

به طور مثال برای تابع  $f(x) = x^2$ ، دامنه تابع  $f'$ ، مجموعه اعداد حقیقی است. روش محاسبه ضابطه تابع  $f'$  نیز، در ادامه ارائه شده است.

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^2 - x^2}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x^2 + 2hx + h^2 - x^2}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h(2x+h)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} (2x+h) = 2x \end{aligned}$$

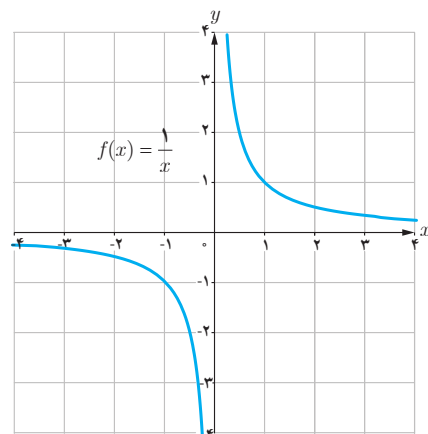
بنابراین  $f'(x) = 2x$ . همان گونه که قبلاً ذکر شد دامنه تابع  $f'$ ، مجموعه اعداد حقیقی است. به کمک این دستور مقدار مشتق تابع  $f(x) = x^2$  در هر نقطه را می‌توان حساب کرد، به طور مثال:

$$f'(-\frac{1}{5}) = -\frac{2}{5}, f'(\sqrt{7}) = 2\sqrt{7} \text{ و } f'(5^\circ) = 10^\circ$$

❖ **مثال:** اگر  $f(x) = \frac{1}{x}$ ، تابع مشتق و دامنه آن را به دست آورید. سپس  $f'(3)$  را مشخص نمایید.

**حل:**  $f'(0)$  وجود ندارد. دامنه  $f'$  برابر  $\mathbb{R} - \{0\}$  است. اگر  $x \neq 0$  داریم:

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{x+h} - \frac{1}{x}}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x - x - h}{hx(x+h)} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-h}{hx(x+h)} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-1}{x(x+h)} = -\frac{1}{x^2} \end{aligned}$$





با استفاده از دستور فوق داریم:  $f'(3) = \frac{-1}{9}$  البته مشتق  $f$  در هر نقطه دیگر ( $x \neq 0$ ) را نیز به کمک این دستور می‌توان

محاسبه کرد، به طور مثال:  $f'(\sqrt{5}) = \frac{-1}{5}$  و  $f'(-2) = -\frac{1}{4}$ ،  $f'(3)$  را به طور مستقیم نیز می‌توان حساب کرد:

$$f'(3) = \lim_{x \rightarrow 3} \frac{f(x) - f(3)}{x - 3} = \lim_{x \rightarrow 3} \frac{\frac{1}{x} - \frac{1}{3}}{x - 3} = \lim_{x \rightarrow 3} \frac{\frac{3-x}{3x}}{x-3} = \lim_{x \rightarrow 3} \frac{-(x-3)}{3x(x-3)} = -\frac{1}{9}$$

در عمل هنگام حل مسائل با توجه به شرایط هر یک از دو روش فوق ممکن است مورد استفاده قرار گیرد.

## کارد کلاس

اگر  $f(x) = \begin{cases} 5x & x \neq 1 \\ 2 & x = 1 \end{cases}$  دامنه  $f$  و دامنه  $f'$  را محاسبه کنید و ضابطه  $f'$  را به دست آورید. نمودار  $f$  و نمودار  $f'$  را رسم کنید.

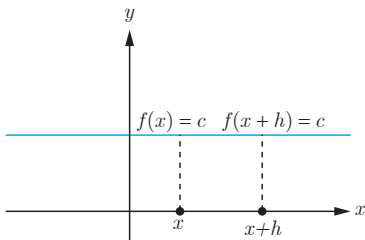
اکنون آماده هستیم که برای برخی از توابع، تابع مشتق را محاسبه کنیم.

## محاسبه تابع مشتق برخی توابع

۱ اگر  $f(x) = c$  آن‌گاه  $f'(x) = 0$ . به عبارت دیگر مشتق تابع ثابت در هر نقطه برابر صفر است.

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{c - c}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{0}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} 0 = 0$$

به طور مثال اگر  $f(x) = 7$  و  $g(x) = -\frac{2}{5}$  آن‌گاه  $f'(x) = 0$  و  $g'(x) = 0$ .



۲ اگر  $n \in \mathbb{N}$  و  $f(x) = x^n$  آن گاه:  $f'(x) = nx^{n-1}$ .

این دستور کاربرد زیادی دارد. قبلاً ثابت کردیم که اگر  $f(x) = x^2$ ، آن گاه  $f'(x) = 2x$ . همچنین اگر  $f(x) = x^3$ ، به کمک این دستور نشان می‌دهیم که:  $f'(x) = 3x^2$ . ابتدا این رابطه آخر را ثابت می‌کنیم و از روش ارائه شده برای اثبات دستور مشتق  $f(x) = x^n$  استفاده می‌کنیم. اگر  $f(x) = x^3$  داریم:

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^3 - x^3}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h-x)[(x+h)^2 + x(x+h) + x^2]}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h[(x+h)^2 + x(x+h) + x^2]}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} [(x+h)^2 + x(x+h) + x^2] = x^2 + x^2 + x^2 = 3x^2 \end{aligned}$$

اکنون اگر  $f(x) = x^n$ ، محاسبات کمی دشوارتر می‌شود، اما در عوض دستور مهم‌تری را ثابت کرده‌ایم.

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x+h)^n - x^n}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(\cancel{x} + h - \cancel{x})[(x+h)^{n-1} + (x+h)^{n-2}x + \dots + (x+h)x^{n-2} + x^{n-1}]}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} [(x+h)^{n-1} + (x+h)^{n-2}x + \dots + (x+h)x^{n-2} + x^{n-1}] \\ &= \underbrace{x^{n-1} + x^{n-1} + \dots + x^{n-1} + x^{n-1}}_{n} = nx^{n-1} \end{aligned}$$

۲ به طور کلی اگر  $n$  یک عدد صحیح باشد و  $f(x) = x^n$  آن گاه:  $f'(x) = nx^{n-1}$ .

❖ مثال: اگر  $f(x) = \frac{1}{x}$  و  $x \neq 0$  قبلاً دیدید که  $f'(x) = -\frac{1}{x^2}$ .

همچنین با استفاده از دستور اخیر داریم:  $f(x) = \frac{1}{x} = x^{-1} \Rightarrow f'(x) = -x^{-1-1} = -x^{-2} = -\frac{1}{x^2}$

\* ۲ اگر  $f(x) = \sqrt{x}$  و  $x > 0$  آن گاه  $f'(x) = \frac{1}{2\sqrt{x}}$ .

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sqrt{x+h} - \sqrt{x}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(\sqrt{x+h} - \sqrt{x})(\sqrt{x+h} + \sqrt{x})}{h(\sqrt{x+h} + \sqrt{x})} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x+h-x}{h(\sqrt{x+h} + \sqrt{x})} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h}{h(\sqrt{x+h} + \sqrt{x})} = \frac{1}{2\sqrt{x}} \end{aligned}$$

\* در مورد توابع رادیکالی در این کتاب فقط مشتق تابع  $\sqrt{f(x)}$  و  $\sqrt[3]{f(x)}$  که  $f(x)$  گویاست، مورد نظر است، رعایت این موضوع در ارزشیابی‌ها الزامی است.

۵ اگر  $f(x) = \sqrt{ax+b}$  و  $ax+b > 0$  آن گاه  $f'(x) = \frac{a}{2\sqrt{ax+b}}$ .

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sqrt{a(x+h)+b} - \sqrt{ax+b}}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(\sqrt{a(x+h)+b} - \sqrt{ax+b})(\sqrt{a(x+h)+b} + \sqrt{ax+b})}{h(\sqrt{a(x+h)+b} + \sqrt{ax+b})} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{ax+ah+b - ax-b}{h(\sqrt{a(x+h)+b} + \sqrt{ax+b})} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{a}{\sqrt{a(x+h)+b} + \sqrt{ax+b}} = \frac{a}{2\sqrt{ax+b}} \end{aligned}$$

۶ اگر  $f(x) = \sqrt[3]{x}$  آن گاه  $f'(x) = \frac{1}{3\sqrt[3]{x^2}}$ .

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x+h} - \sqrt[3]{x}}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(\sqrt[3]{x+h} - \sqrt[3]{x})(\sqrt[3]{(x+h)^2} + \sqrt[3]{x(x+h)} + \sqrt[3]{x^2})}{h(\sqrt[3]{(x+h)^2} + \sqrt[3]{x(x+h)} + \sqrt[3]{x^2})} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x+h-x}{h \cdot A} = \frac{1}{3\sqrt[3]{x^2}} \end{aligned}$$

۷ اگر توابع  $f$  و  $g$  در  $x = a$  مشتق پذیر باشند، آن گاه توابع  $kf$  ( $k \in \mathbb{R}$ )،  $f \pm g$ ،  $fg$  و  $\frac{f}{g}$  ( $g(a) \neq 0$ ) نیز در  $x = a$  مشتق پذیرند و داریم:

الف)  $(f \pm g)'(a) = f'(a) \pm g'(a)$

ب)  $(kf)'(a) = kf'(a)$

پ)  $(fg)'(a) = f'(a)g(a) + f(a)g'(a)$

ت)  $\left(\frac{f}{g}\right)'(a) = \frac{f'(a)g(a) - g'(a)f(a)}{(g(a))^2}$

به کمک تعریف مشتق هر یک از روابط بالا را می توان ثابت نمود، اما در این کتاب به اثبات آنها نمی پردازیم. ❀ مثال: مشتق چند تابع محاسبه شده است.

الف)  $f(x) = -\frac{2}{3}x^3 \Rightarrow f'(x) = -\frac{2}{3}x^2$

ب)  $g(x) = x^5 + 4x^3 - \sqrt{2}x + 1 \Rightarrow g'(x) = 5x^4 + 12x^2 - \sqrt{2}$

پ)  $h(x) = (2x^3+1)(-x^2+7x-2) \Rightarrow h'(x) = 6x^2(-x^2+7x-2) + (2x^3+1)(-2x+7)$

ت)  $t(x) = \frac{x^2-4}{3x+1} \Rightarrow t'(x) = \frac{2x(3x+1) - 3(x^2-4)}{(3x+1)^2}$

۱ مشتق تابع‌های زیر را به دست آورید:

الف)  $f(x) = \frac{1}{x-4}$

ب)  $g(x) = \sqrt{x}(3x^2 + 5)$

پ)  $h(x) = \frac{x}{2x^2 + x - 1}$

۲ اگر  $f$  و  $g$  توابع مشتق پذیر باشند و  $f(2) = 3$ ،  $f'(2) = 5$ ،  $g(2) = 8$  و  $g'(2) = -6$  مقدار  $(fg)'(2)$  و  $(\frac{f}{g})'(2)$  را به دست آورید.

### مشتق توابع مثلثاتی

توابع  $f(x) = \sin x$  و  $g(x) = \cos x$  مشتق پذیر هستند و داریم:

$f'(x) = \cos x$  و  $g'(x) = -\sin x$

❁ **اثبات:** با استفاده از تعریف مشتق داریم:

$$\begin{aligned} f'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin(x+h) - \sin x}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin x \cos h + \cos x \sin h - \sin x}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin x(\cos h - 1) + \cos x \sin h}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \left( \sin x \frac{\cos h - 1}{h} \right) + \lim_{h \rightarrow 0} \left( \cos x \frac{\sin h}{h} \right) \end{aligned}$$

در حسابان (۱) دیدیم که:  $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos h - 1}{h} = 0$ ،  $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{h} = 1$

بنابراین:  $f'(x) = (\sin x)(0) + (\cos x)(1) = \cos x$  و در نتیجه

به طریق مشابه اگر  $g(x) = \cos x$  داریم:

$$\begin{aligned} g'(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(x+h) - g(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos(x+h) - \cos x}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos x \cos h - \sin x \sin h - \cos x}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos x(\cos h - 1) - \sin x \sin h}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \cos x \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(\cos h - 1)}{h} - \lim_{h \rightarrow 0} \sin x \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{h} \\ &= (\cos x)(0) - (\sin x)(1) = -\sin x \Rightarrow g'(x) = -\sin x \end{aligned}$$

با استفاده از دو دستور فوق می توان مشتق بسیاری از توابع مثلثاتی را به دست آورد.

❖ **مثال:** مشتق  $f(x) = \tan x$  را به دست آورید.

$$f(x) = \tan x = \frac{\sin x}{\cos x} \Rightarrow f'(x) = \frac{(\cos x)(\cos x) + (\sin x)(\sin x)}{\cos^2 x} = \frac{1}{\cos^2 x} = 1 + \tan^2 x$$

### کارد کلاس

مشتق توابع زیر را به دست آورید.

الف)  $f(x) = \sin x \tan x$       ب)  $g(x) = \frac{5 \cos x}{1 - \sin x}$

### مشتق تابع مرکب / قاعده زنجیری

اگر  $f$  و  $g$  دو تابع مشتق پذیر باشند، در این صورت تابع مرکب  $f \circ g$  مشتق پذیر است و داریم:

$$(f \circ g)'(x) = g'(x)f'(g(x))$$

❖ **مثال:** اگر  $h(x) = (x^2 + 3x + 1)^6$ ، مطلوب است  $h'(x)$ .

❖ **حل:** اگر  $f(x) = x^6$  و  $g(x) = x^2 + 3x + 1$ . آن گاه:  $h(x) = f(g(x))$

$$h'(x) = g'(x)f'(g(x)) = (2x+3)f'(g(x))$$

اگر  $g(x) = u$  آن گاه لازم است که  $f'(u)$  را پیدا کنیم.

$$f(u) = u^6 \Rightarrow f'(u) = 6u^5 = 6(g(x))^5 = 6(x^2 + 3x + 1)^5$$

بنابراین:

$$h'(x) = (2x+3)(6)(x^2 + 3x + 1)^5$$

دستور فوق را به صورت زیر نیز می توان ارائه کرد،

اگر  $f$  تابعی بر حسب  $u$  و  $u$  تابعی از  $x$  باشد:

$$y = f(u) \Rightarrow y' = u'f'(u)$$

❖ **مثال:** مشتق تابع  $y = \sin^2 x$  را به دست آورید.

❖ **حل:** با فرض  $\sin x = u$  داریم:  $y = u^2$  و از آنجا:

$$y' = u' \cdot 2u = (\cos x)(2)(\sin x) = 2 \sin x \cos x$$

مشتق تابع‌های زیر را به دست آورید.

الف)  $f(x) = (x^2 + 1)^2(5x - 1)$

ب)  $g(x) = \cos^2 x$

پ)  $h(x) = \sin(3x^2 + 5)$

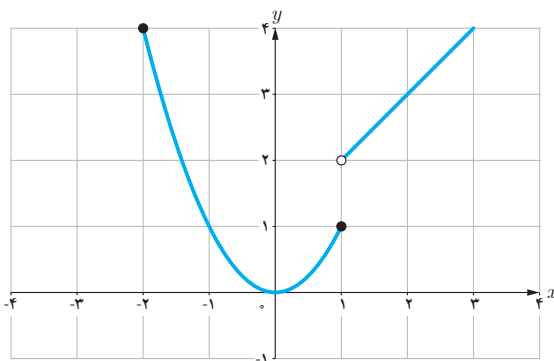
### مشتق‌پذیری روی یک بازه

تابع  $f$  روی بازه  $(a, b)$  مشتق‌پذیر است هرگاه، در هر نقطه این بازه مشتق‌پذیر باشد.  
تابع  $f$  روی بازه  $[a, b]$  مشتق‌پذیر است، هرگاه  $f$  در بازه  $(a, b)$  مشتق‌پذیر باشد و در نقطه  $a$  مشتق راست و در  $b$  مشتق چپ داشته باشد.

مشتق‌پذیری روی بازه‌های  $[a, b]$  و  $(a, b)$  را به طور مشابه تعریف کنید.

تابع  $f$  روی بازه  $[a, b]$  مشتق‌پذیر است هرگاه ...

تابع  $f$  روی بازه  $(a, b)$  مشتق‌پذیر است هرگاه ...



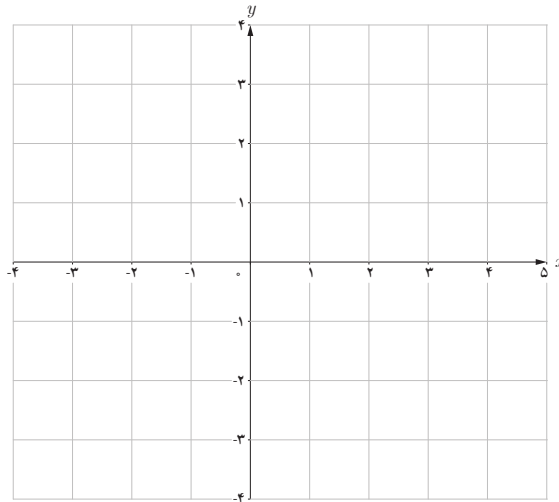
اگر  $D_f = \mathbb{R}$  و  $f$  در هر عدد حقیقی مشتق‌پذیر باشد،  
گوئیم  $f$  روی بازه  $(-\infty, +\infty)$  مشتق‌پذیر است.

❖ **مثال:** تابع  $f(x) = \begin{cases} x^2 & -2 \leq x \leq 1 \\ x+1 & x > 1 \end{cases}$  را در نظر  
می‌گیریم.

$f$  روی بازه‌های  $[-2, 1]$  و  $(1, \infty)$  مشتق‌پذیر است. ولی  
 $f$  روی بازه  $[1, 2]$  مشتق‌پذیر نیست (چرا؟)

$$f(x) = \begin{cases} 2x+4 & x < -1 \\ x^2-1 & -1 \leq x < 2 \\ -x+5 & 2 < x < 5 \end{cases} \text{ اگر } f(x) \text{ نمودار } f \text{ را رسم کنید و مشتق پذیری } f \text{ را روی بازه‌های } [-1, 1], (2, 5) \text{ و } [-2, 0]$$

بررسی کنید.



### مشتق مرتبه دوم

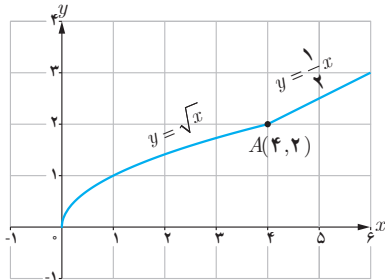
مشتق تابع  $y = f(x)$  با نماد  $y' = f'(x)$  نمایش داده شد. به همین ترتیب اگر تابع مشتق، مشتق پذیر باشد، مشتق مرتبه دوم  $y = f(x)$  را به  $y'' = f''(x)$  نمایش می‌دهیم و برای محاسبه آن از تابع  $y' = f'(x)$  نسبت به  $x$  مشتق می‌گیریم.

❖ **مثال:** اگر  $y = 3x^4 + 2x^2 - 1$  آن گاه:

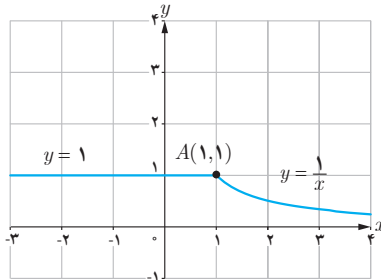
$$y' = 12x^3 + 4x, \quad y'' = 36x^2 + 4$$

۱ دو تابع مختلف مانند  $f$  و  $g$  مثال بزنید که هر دو در  $x = 2$  پیوسته باشند ولی در این نقطه مشتق پذیر نباشند.

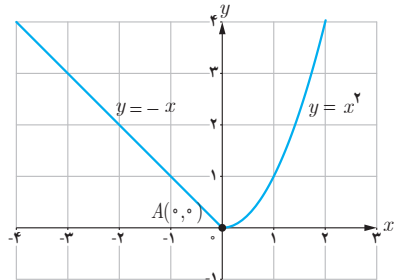
۲ با محاسبه مشتق راست و مشتق چپ توابع داده شده در نقطه  $A$ ، نشان دهید که این توابع در نقطه  $A$  مشتق پذیر نیستند.



(ب)



(ب)



(الف)

۳ تابع  $f(x) = \begin{cases} 5x - 4 & x < 0 \\ x^2 & 0 \leq x \leq 3 \\ x + 6 & x > 3 \end{cases}$  داده شده است.

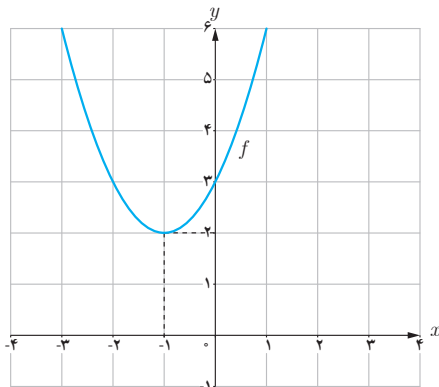
(ب) با توجه به نمودار تابع  $f$  بگویید که چرا  $f'(0)$  و  $f'(3)$  وجود ندارند؟  
(ت) نمودار تابع  $f'$  را رسم کنید.

(الف) نمودار تابع  $f$  را رسم کنید.  
(پ) ضابطه تابع مشتق را بنویسید.

۴ نمودار تابعی را رسم کنید که مشتق آن

(ب) در  $x = 2$  برابر ۳ شود.  
(ت) در تمام نقاط یکسان باشد.

(الف) در یک نقطه برابر صفر شود.  
(پ) در تمام نقاط مثبت باشد.  
(ث) در تمام نقاط منفی باشد.



۵ (الف) با استفاده از نمودار تابع  $f(x) = x^2 + 2x + 3$  (شکل

مقابل) مقادیر زیر را به ترتیب صعودی مرتب کنید.

$f'(3)$  و  $f'(0)$  و  $f'(-1)$  و  $f'(2)$

(ب) صحت ادعای خود در (الف) را با محاسبه مشتق تابع

$f(x) = x^2 + 2x + 3$  بررسی کنید.

(پ) تابع مشتق را رسم کنید.



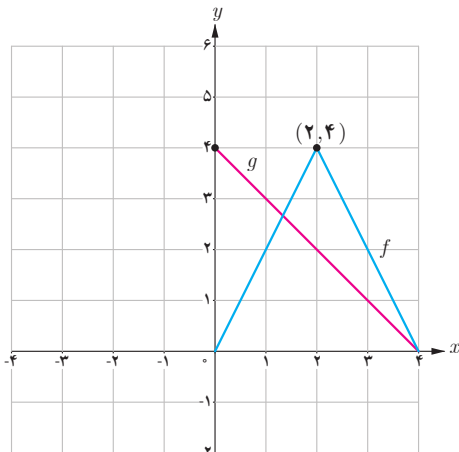
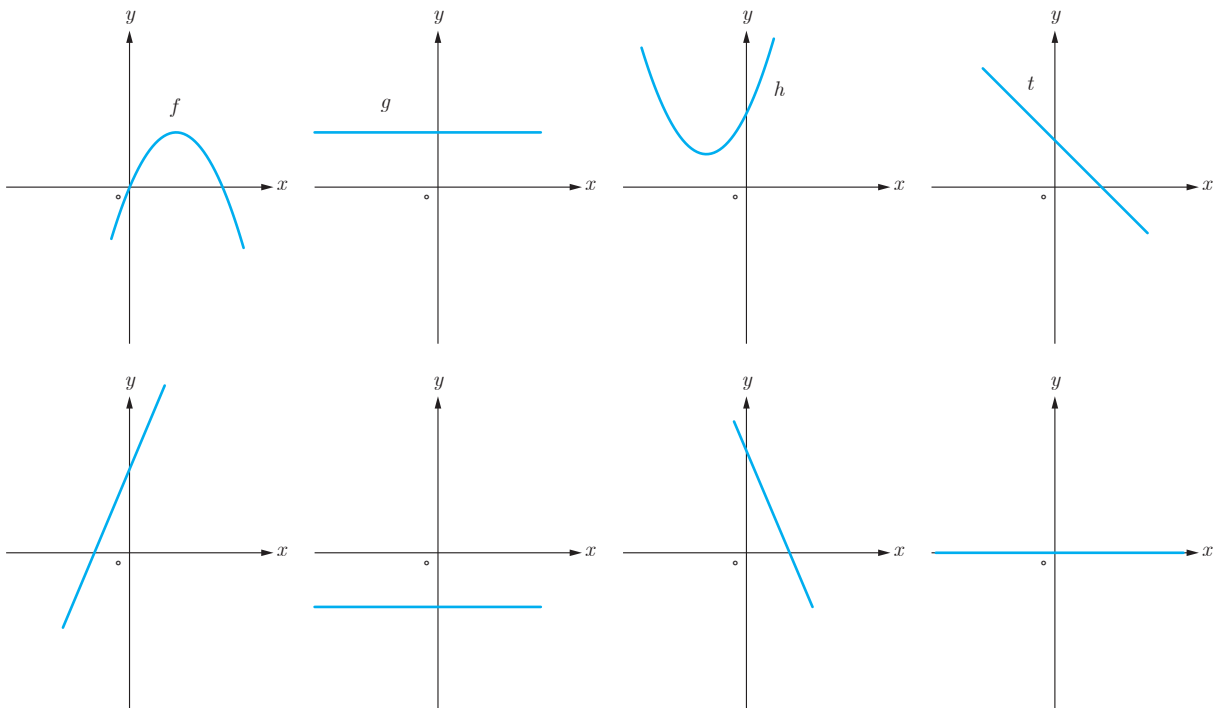
۶ مشتق پذیری تابع  $f(x) = \begin{cases} x^2 + 3 & x \geq 1 \\ 2x & x < 1 \end{cases}$  را در نقطه  $x=1$  بررسی کنید.

۷ سه تابع مختلف مثال بزنید که مشتق آنها با هم برابر باشند.

۸ اگر  $f(x) = |x^2 - 4|$  به کمک تعریف مشتق، مشتق پذیری  $f$  را در نقاط به طول های ۲ و -۲ بررسی کنید.

۹ مشتق تابع  $f(x) = \sqrt[3]{x^2}$  را به دست آورده و مشخص کنید در چه نقطه ای مماس قائم دارد؟

۱۰ نمودار توابع  $f$  و  $g$  و  $h$  و  $t$  را به نمودار مشتق آنها، نظیر کنید.



۱۱ نمودار توابع  $f$  و  $g$  را در شکل مقابل در نظر بگیرید.

الف) اگر  $h(x) = f(x) \cdot g(x)$  مطلوب است  $h'(1)$ ،  $h'(2)$  و  $h'(3)$

ب) اگر  $k(x) = \frac{f(x)}{g(x)}$  مطلوب است،  $k'(1)$ ،  $k'(2)$  و  $k'(3)$

۱۲ اگر  $f'(1) = 3$  و  $g'(1) = 5$  مطلوب است،  $(f+g)'(1)$  و  $(3f+2g)'(1)$

۱۳ اگر  $f(x) = \begin{cases} x^2 & x \leq 0 \\ x & x > 0 \end{cases}$  نشان دهید  $f'_+(0)$  و  $f'_-(0)$  موجودند ولی  $f'(0)$  موجود نیست.

۱۴ مشتق توابع داده شده را به دست آورید.

الف)  $f(x) = (3x^2 - 4)(2x - 5)^2$

پ)  $f(x) = (\sqrt{3x+2})(x^3 + 1)$

ب)  $f(x) = \frac{x^2 - 3x + 1}{-3x + 2}$

ت)  $f(x) = \frac{9x - 2}{\sqrt{x}}$

۱۵ مشتق توابع مثلثاتی زیر را به دست آورید.

الف)  $f(x) = \sin^2 x + \cos^2 x$

پ)  $f(x) = \tan^2 x - 2 \cos x$

ب)  $f(x) = \frac{1 - \sin x}{1 + \sin x}$

ت)  $f(x) = \sin x \cos^2 x$

۱۶ اگر  $f(x) = \sin^2 x - \cos^2 x$ ، مقادیر زیر را حساب کنید.

الف)  $f''\left(\frac{\pi}{6}\right)$

ب)  $f''\left(\frac{\pi}{4}\right) - f'\left(\frac{\pi}{4}\right)$

### خواندنی

مشتق پذیری در یک نقطه به صورت شهودی می تواند برحسب رفتار تابع در نزدیکی نقطه  $A(a, f(a))$  تعبیر شود. اگر نمودار تابع را در نزدیک نقطه  $A$  در نظر بگیریم و مرتباً از نمای نزدیک تری به نمودار نگاه کنیم، هنگامی که  $f$  در  $a$  مشتق پذیر باشد، نمودار منحنی شبیه یک خط راست می شود.

