

# ۳ فیزیک دوازدهم

رشته علوم تجربی

مؤلفین:

امید برزویی

علی پیمانی

علیرضا رضانی

احمد سیدی

مهدی شیرزاد

ناظر علمی: غلامعلی محمودزاده



این همه نقش عجب بردردیوار وجود  
هر که فکرت نکند، نقش بود بر دیوار



«همه شناخت جهان از یک واقع‌گرایی کودکانه شروع می‌شود با این باور که هر چیزی دقیقاً همان است که دیده می‌شود. فکر می‌کنیم، سبزه، سبز است، سنگ، سفت است و برف، سرد است. اما فیزیک، درک و تجربه‌ای را برای سبزی، سفتی و سردی ایجاد می‌کند که با درک کودکانه اولیه بسیار فاصله دارد.» «برتراند راسل»

### باور به افسانه‌ها: بخشی از فرهنگ عمومی

در داستانی که نقل می‌کنند، «ادموند هالی» (یار غار اسحاق نیوتون و هم او که دنباله‌دار هالی به نام او نامگذاری شده است)؛ از ملاقات خود با نیوتون یاد می‌کند و عنوان می‌دارد که نیوتون از فروافتادن سیبی از درخت با شگفتی به «قانون جهانی گرانش» پی برده است. ولی واقعیت این نیست.

نیوتون هیچ‌گاه از سقوط سیب تعجب نکرد. شگفتی او این بود که چرا ماه روی زمین سقوط نمی‌کند! ولی تمایل مردم، بیشتر به دانستن «علت سقوط سیب» بود تا «علت عدم سقوط ماه».

نیوتون نشان داد علت آن سقوط و علت این عدم سقوط، هر دو یکی است.

### انبساط دنیای طبیعی، انقباض دنیای انسانی:

منشأ کیهان یک «مهبانگ<sup>۱</sup> یا انفجار بزرگ» است. طبق یافته‌های کیهان‌شناسی، دنیا در حال انبساط و تورم است. ولی در مقابل، دنیای انسانی در حال انقباض و مینیا توری شدن است. «مارشال مک لوهان»<sup>۲</sup> در نیمه دوم قرن بیستم، با توجه به رواج رادیو و تلویزیون و البته در زمانی که هنوز اینترنت به این درجه از رشد و نفوذ نرسیده بود، عنوان «دهکده جهانی» را به کار برد و جهان با این عظمت را در حکم یک دهکده دانست.<sup>۳</sup> در این دهکده جهانی، «نوشتن» کاری سهل و ممتنع است. یعنی هم کاری آسان و در عین حال کاری دشوار است. به دلیل دسترسی سریع و آسان به انواع منابع و مراجع، می‌توان رو صدساله را یک شبه پیمود و از خیلی دستاوردهای قبل به سرعت و آسانی بهره گرفت. در مقابل در این دهکده جهانی و دنیای شیشه‌ای، کوچک‌ترین خبط و خطای نویسندگان به سرعت برق و باد و پیش از آن که مجال تصحیح آن پیدا شود، منتشر می‌شود تا «سیه روی شود هر که در او غش باشد!!»

### چرا تألیف گروهی؟

یک تألیف «واقعاً گروهی» باید دارای مشخصه‌ای باشد که در علوم اجتماعی به آن ظهور ویژگی‌های جدید Emergence می‌گویند. یعنی چه؟ برای توضیح مطلب از یک توضیح کاملاً فیزیکی استفاده می‌کنیم.

فرض می‌کنیم دمای اتاقی که در آن درس می‌خوانید ۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد. از شما می‌پرسیم که این دما دقیقاً به چه معنا است؟ احتمالاً پاسخ می‌دهید که این دما حاصل حرکت مولکول‌های هوا است و به نوعی به انرژی جنبشی مولکول‌های هوا مرتبط است. حالا اگر «فقط» یک مولکول از این مولکول‌ها را انتخاب کنیم، دمای آن مولکول چند درجه است؟ و شما به درستی پاسخ خواهید داد که: یک مولکول به تنهایی، دما ندارد. اصلاً دما، برای مولکول‌های منفرد تعریف نمی‌شود. دما برای تعداد زیادی از مولکول‌ها قابل تصور است.

حالا کمی رندی می‌کنیم. واقعاً هر یک مولکول چه سهمی در دمای ۲۵°C دارد؟ اگر بخواهیم صادقانه جواب دهیم، واقعاً هیچ سهمی ندارد. در واقع اگر شما دیواری در میانه اتاق بکشید و اتاق را به دو نیمه بخش کنید، دمای هر نیمه هنوز ۲۵°C است. حالا می‌پرسیم، اگر هر مولکول به تنهایی نقشی در دمای اتاق ندارد، پس اگر تمام مولکول‌های هوا را از اتاق خارج کنیم، آیا باز

هم اتاق  $25^{\circ}\text{C}$  است؟ اینجاست که شما متوجه رندی ما می شوید و به سرعت جواب می دهید که این دیگر درست نیست. اگر مولکول‌های هوا نباشند، داستان متفاوت می شود، چون اصلاً دما به نوعی به انرژی جنبشی مولکول‌های هوا وابسته است. در واقع دما، یک «ویژگی سطح بالا» یا «سطح کلان» است که بر اثر تک تک اعضای سیستم قابل مشاهده است. کافی است شما، دمای گاز را با کمیت دیگری مثل «جرم گاز» مقایسه کنید. جرم یک «ویژگی سطح پایین» است. در واقع سهم هر مولکول گاز در جرم کل گاز، سر راست و مشخص است. اگر شما اتاق را به دو نیمه مساوی تقسیم کنید، دقیقاً جرم گاز را به دو نیمه مساوی تقسیم کرده‌اید. یک تألیف گروهی، باید چیزی مشابه یک «ویژگی سطح بالا» باشد؛ در واقع باید اثری از مجموعه بروز کند که «مساوی مجموع اثرات تک تک اعضا نباشد» این که یک نفر درسنامه بنویسد، نفر دیگر سؤال بنویسد، احیاناً کسی هم سؤالات را حل کند و اشخاصی هم تست و جواب آن را فراهم کنند و سپس این موارد سرهم بندی شود، اصلاً شایسته و بایسته یک تألیف گروهی نیست. در یک کار گروهی باید ویژگی‌هایی بروز کند که در کار تک تک افراد به تنهایی قابل مشاهده و ردگیری نیست. در این کتاب‌ها، سعی کرده‌ایم تا حد ممکن، در اثر تعامل و چالش و بعضاً بحث و گفتگوهای نفس گیر، کتابی فراهم آوریم که واجد ویژگی‌هایی باشد که صرفاً سرجمع کار چند مؤلف نباشد؛ بلکه ویژگی تعاملی در همه بخش‌های کتاب جاری و ساری باشد.

اهداف اصلی کتاب را می توان در موارد زیر شماره کرد:

- (۱) ارایه درسنامه‌ای دقیق، روان و بی‌پیرایه با انطباق کامل با کتاب نونگاشت درسی. گرچه مؤلفین نسبت به بعضی روش‌ها و سلیقه‌های کتاب درسی جدید، انتقاداتی دارند ولی به جد بر این باور هستند که مبنای اصلی باید همین کتاب درسی باشد و اساساً درگیر نمودن دانش‌آموزان مخاطب این کتاب با بحث‌های چالشی و اختلافی، کاری عبث و بی‌فایده می‌باشد.
- (۲) حل مسایل فراوان مفهومی و محاسباتی در قالب یک شیب آموزشی منطقی.
- هدف‌گیری ارائه مسایل، تعلیم فیزیک است نه خودنمایی بی‌معنا یا درگیر نمودن دانش‌آموز با مسایل بی‌هدف و پراکنده.
- (۳) درگیر نمودن دانش‌آموزان با آزمون‌های تشریحی (با توجه به اهمیت بیشتری که امتحانات نهایی پیدا کرده‌اند).
- (۴) طراحی تست‌های «واقعاً تالیفی» مطابق با رویکرد جدید ارائه مطالب (خصوصاً در فصل (۳) (نوسان و موج) و فصل (۴) (برهم‌کنش امواج)) و پرهیز از ساخت تست‌های تصنعی و تکراری.
- (۵) ارائه مطالب جذاب و خواندنی در قالب تاریخ علم، فناوری و مطالب طنزآمیز همراه با گرافیکی چشم‌نواز

مؤلفین نهایت سعی خود را کرده‌اند، که اثری مفید و بی‌غلط ارائه کنند. امیدواریم که سعی ما اثری خوب و شایسته را رقم زده باشد. در اینجا بر خود لازم می‌دانیم از راهنمایی‌های ارزنده جناب استاد غلامعلی محمودزاده به عنوان معلمی پیشکسوت و نویسنده‌ای چیره‌دست و صاحب سبک در حوزه آموزش فیزیک، قدردانی نماییم. همچنین از زحمات اعضای محترم واحد طراحی و تایپ، سرکار خانم‌ها، «سمانه ایمانفرد»، «حمیده نوروزی»، «ملیحه محمدی آندرس» و «رضیه صفریان» بسیار سپاسگزاریم. در خاتمه مراتب تشکر و قدردانی ویژه‌ای از مدیریت توانمند و محترم مجموعه وزین مبتکران جناب آقای یحیی دهقانی به جهت حمایت ویژه و فراهم نمودن کلیه امکانات در نشر این کتاب، ابراز می‌داریم.

کریمه شام و سحر، شکر که ضایع نگشت

قطره بارانِ ما، کوهر یکدانه شد



۹	فصل اول: حرکت‌شناسی
۱۱	بردار مکان - جابه‌جایی
۱۶	مسافت
۱۷	تندی متوسط - سرعت متوسط
۱۷	حرکت بر خط راست
۲۸	حرکت با سرعت ثابت
۳۹	حرکت با شتاب ثابت بر خط راست
۶۳	خلاصه فصل (۱)
۶۶	آزمون‌های تشریحی با پاسخ
۸۴	تست‌های تألیفی فصل (۱)
۹۴	پاسخ تست‌های تألیفی فصل (۱)
۱۱۱	فصل دوم: دینامیک
۱۱۳	نیروهای متوازن
۱۱۴	قانون‌های نیوتون دربارهٔ حرکت
۱۲۷	معرفی برخی از نیروهای خاص
۱۵۷	نیروی گرانش
۱۶۲	خلاصه فصل ۲
۱۶۵	آزمون‌های تشریحی با پاسخ
۱۸۲	تست‌های تألیفی فصل (۲)
۱۹۰	پاسخ تست‌های تألیفی فصل (۲)
۲۰۳	فصل سوم: نوسان و امواج
۲۰۴	انواع نوسان
۲۱۰	نیرو در حرکت هماهنگ ساده
۲۱۷	آونگ ساده



۲۲۰	حرکت نوسانی میرا
۲۲۳	موج: موج مکانیکی
۲۳۲	موج: موج الکترومغناطیسی
۲۳۸	موج طولی
۲۴۵	ادراک شنوایی
۲۵۱	اثر دوپلر برای موج‌های مکانیکی
۲۵۶	بازتاب موج
۲۶۸	شکست موج
۲۸۴	خلاصه فصل ۱۱
۲۹۰	آزمون‌های تشریحی با پاسخ
۳۱۷	تست‌های تألیفی فصل (۳)
۳۳۴	پاسخ تست‌های تألیفی فصل (۳)
۳۵۷	<b>فصل چهارم: آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای</b>
۳۵۸	مقدمه
۲۵۹	اثر فوتوالکتریک و فوتون
۳۶۳	طیف خطی و طیف پیوسته
۳۶۹	الگوهای اتمی
۳۷۸	لیزر
۳۷۹	سافتار هسته
۳۸۳	پرتوزایی طبیعی
۳۸۸	نیمه عمر
۳۹۱	خلاصه فصل پنجم
۳۹۸	مسائل تکمیلی فیزیک جدید
۴۰۴	آزمون‌های تشریحی با پاسخ
۴۲۶	تست‌های تألیفی فصل (۶)
۴۳۷	پاسخ تست‌های تألیفی فصل (۶)
۴۵۵	آزمون‌های تشریحی با پاسخ تشریحی
	جدول تناوبی عناصر

# حرکت شناسی

## فصل ۱



«یوسین بولت» از جامایکا رکورددار دو ۱۰۰ متر، این مسافت را در ۹/۵۸ ثانیه دویده است؛ اگر ۳ ثانیه اول با شتاب ثابت و در ادامه با سرعت ثابت دویده باشد، شتاب ابتدای دویدن او چقدر است؟

**این یک مسئله حرکت شناسی است.**



در تصویر مقابل چه می‌بینید؟! ... در نگاه اول یک پول سکه‌ای به چشم می‌خورد. ولی منظور، آن تراشه کوچکی است که وسط این سکه، قرار گرفته است. منظور از این تصویر، بیان کوچکی این تراشه است ... ولی این تراشه چیست؟

با «سامانه جهانی مکان‌یابی» GPS آشنایی دارید. کاربرد این سامانه، مبتنی بر ارتباط گیرنده GPS با ماهواره‌های مربوطه است، و هرکجا که این ارتباط قطع شود، تعیین موقعیت از کار می‌افتد. برای بعضی متحرک‌ها (مثل زیردریایی‌ها) که اساساً کاربرد GPS ناممکن است. سامانه بدیل دیگری که برای تعیین موقعیت هیچ نیازی به ارتباط با ماهواره یا رادار خارجی ندارد، سامانه INS است:

«سامانه ناوبری لخت» Inertial Navigation System اساس عملکرد INS مبتنی بر این است که با دانستن: «مکان اولیه»، «سرعت اولیه» و «شتاب متحرک در هر لحظه» می‌توان تمام مسیر آینده متحرک را پیدا کرد... به همین دلیل کافی است، سیستم متحرک، مجهز به یک شتاب‌سنج دقیق باشد. البته برای حرکت‌های دوبعدی و سه‌بعدی برای آگاهی از چرخش و تغییر متحرک، ژيروسکوپ هم لازم است ... سیستم‌های اولیه INS خیلی بزرگ و جاگیر بودند ولی امروزه در ابعاد مینیاتوری (مشابه تراشه وسط سکه در شکل بالا) ساخته می‌شوند ... هرجا که کاربرد GPS عملی نباشد، استفاده از INS الزامی می‌شود. ایده INS از مفاهیم اولیه سینماتیک، گرفته شده است.

## مقدمه

از طلوع تا غروب خورشید، پرواز پرندگان، شنا کردن ماهیان در دریا، تعیین و محاسبه مسیرتوپ بیسبال یا سفینه فضایی و ... به‌طور کلی، بررسی چگونگی حرکت یک جسم، همواره مورد توجه بشر بوده است. در علم فیزیک نیز، شناخت و توصیف حرکت اجسام، یکی از مباحث مهمی است که به آن پرداخته می‌شود و زمینه‌ساز درک بهتر دیگر بخش‌های علم فیزیک و به‌ویژه، مکانیک است. آشنایی با حرکت اجسام را **حرکت‌شناسی** (سینماتیک<sup>۱</sup>) می‌گویند که مهم‌ترین شاخه علوم فیزیکی است. حرکت‌شناسی به تحلیل و بررسی حرکت‌های مختلف جسم می‌پردازد؛ بدون آن‌که به عامل ایجادکننده این حرکت‌ها (نیرو) توجه کند. با استفاده از رابطه‌های حاکم در حرکت‌شناسی، می‌توانیم ویژگی‌های حرکت یک جسم را تحلیل کنیم. این ویژگی‌ها عبارتند از کمیت‌هایی که به وسیله دو کمیت بنیادی **مکان** و **زمان** تعریف می‌شوند. در این فصل، چگونگی حرکت یک جسم در مدل‌های ساده‌ای که اغلب حرکت‌های طبیعی را شامل می‌شود؛ با استفاده از این کمیت‌ها بررسی خواهیم کرد.

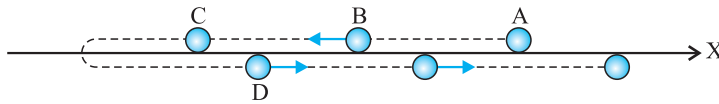
## شناخت حرکت

اگر ذره با گذشت زمان، مکان استقرار خود را ترک کند، حرکت ایجاد می‌شود. رد پای مکان متحرک از آغاز تا پایان حرکت، شکلی را ایجاد می‌کند که مسیر حرکت و به اختصار «مسیر» نامیده می‌شود. در واقع مسیر حرکت، مجموعه نقاطی است که متحرک در هنگام حرکت از آن‌ها عبور می‌کند. حرکت اتومبیل در رمپ پارکینگ طبقاتی، نمونه‌ای از حرکت ذره در مسیر سه‌بعدی (فضایی) است. هم‌چنین حرکت یک برگ جدا شده از درخت به دلیل وزش باد، در مسیر سه‌بعدی پیچیده‌ای انجام می‌شود. (البته بررسی چنین حرکت‌هایی از این نوع، خارج از برنامه این کتاب است). هر نقطه از مسیر حرکت یک جسم، **مکان** جسم نام دارد. تعیین مکان جسم فقط با وجود «مبدأ مکان» امکان‌پذیر است.



## مبدأ مکان

هنگامی که از مبدأ مکان صحبت می‌شود در یک دیدگاه رایج، ممکن است دو واژه «مبدأ» و «شروع» هم مفهوم تلقی شوند. به فرض اگر متحرکی مطابق شکل داده شده از نقطه A شروع به حرکت کرده و در طی مسیر حرکت از نقاط B و C و D و ... عبور کرده باشد، ممکن است، پرسش شود: «مبدأ مکان متحرک کجاست؟» و نیز ممکن است در یک لحظه نقطه A را به عنوان مبدأ مکان در نظر بگیریم.

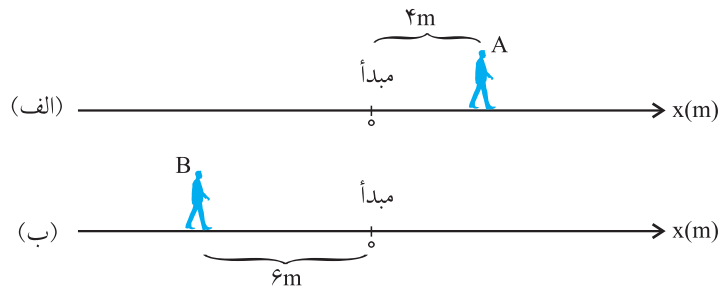


واقعیت این است که این تصور اشتباه است. هر نقطه دلخواهی را به عنوان مبدأ مکان می‌توان در نظر گرفت. برای این که مکان متحرک را در هر لحظه بتوان مشخص کرد، از مبدأ مکان کمک می‌گیریم.

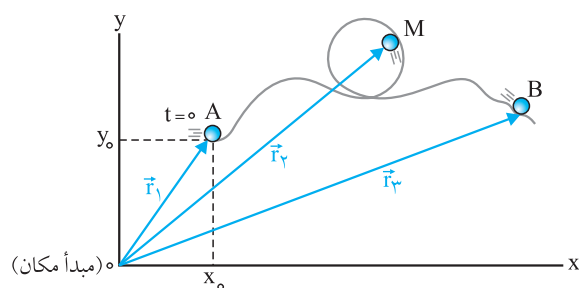
**توجه:** در حرکت ذره بر روی خط راست، مسیر حرکت یک خط راست (و نه لزوماً افقی) است. که می‌توان همین مسیر را به عنوان یک محور فرض کرد (محور x).

**توجه:** مبدأ مکان، لزوماً مکان اولیه جسم نیست. مکان اولیه متحرک، مکان جسم در لحظه شروع بررسی حرکت جسم است. به مکان متحرک در  $t = 0$ ، مکان اولیه گفته می‌شود و با  $x_0$  نمایش می‌دهند.

با این دیدگاه در شکل زیر، اگر لحظه بررسی حرکت جسم را در شکل الف)، مکان A و در شکل ب) مکان B در نظر بگیریم، با توجه به مبدأ مکان مشخص شده در هر شکل، مکان اولیه دو متحرک به ترتیب  $x_{0A} = +4\text{m}$  و  $x_{0B} = -6\text{m}$  می‌باشد.



**توجه:** ممکن است مسیر حرکت ذره در دو بُعد و یا به عبارتی حرکت در صفحه باشد. حرکت را در صفحه‌ای در نظر می‌گیریم که از دو محور عمود بر هم  $x$  و  $y$  تشکیل شده باشد. مبدأ مکان پنین دستگاهی (دستگاه کارترین یا دکارتی)، محل تلاقی دو محور  $x$  و  $y$  است.



نمایش مسیر در پنین صفحه‌ای را نمایش مسیر در مختصات دکارتی می‌نامیم. شکل روبه‌رو، مسیر حرکت ذره‌ای را از نقطه A تا B نشان می‌دهد. مبدأ حرکت (مکان اولیه) نقطه A است به طوری که  $x_0 = x$  و  $y_0 = y$  است.

زیرنویس ۰ (صفر) نشان‌دهنده آغاز حرکت است.

## بردار مکان

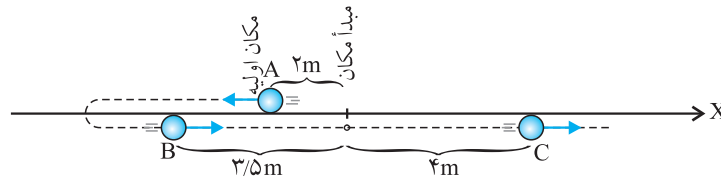
امیر در وسط یک سالن ایستاده است و چشمان امیر (در یک نوع بازی گروهی) بسته است. فرض کنید با راهنمایی هم‌تیمی‌هایش، امیر با چشمان بسته قرار است مکان یکی از اعضای تیم حریف را مشخص کند. یکی از هم‌تیمی‌های امیر به او می‌گوید: بردیا (از تیم حریف) در فاصله ۲ متری او قرار دارد. به نظر شما آیا امیر می‌تواند دقیقاً محل او را تشخیص دهد؟

به یقین پاسخ منفی است. با کمی تأمل درمی‌یابیم برای تعیین مکان یک جسم، غیر از فاصله، به جهت نیز نیاز داریم. بنابراین احتیاج داریم تا مکان یک جسم را با یک «بردار» مشخص کنیم. این بردار را «بردار مکان» می‌گوییم.

بردار مکان برداری است که ابتدای آن مبدأ مکان و انتهای آن نقطه‌ای از مسیر حرکت است که جسم (یا ذره) در آن مکان قرار دارد. بردار مکان را با  $\vec{r}$  نمایش می‌دهند. در شکل بالا  $\vec{r}_1 = \vec{OA}$  بردار مکان اولیه ذره است.  $\vec{r}_2 = \vec{OM}$  و  $\vec{r}_3 = \vec{OB}$  بردارهای مکان متحرک در نقطه‌های M و B است.

**مثال:** مطابق شکل زیر، بردار مکان متحرک را برای نقاط A و B و C بنویسید:

پاسخ:

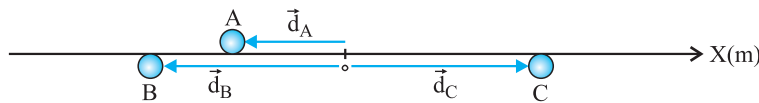


(۱) بردار مکان جسم در نقطه A برابر است با:  $\vec{r}_A = \vec{r}_0 = -2\vec{i}$

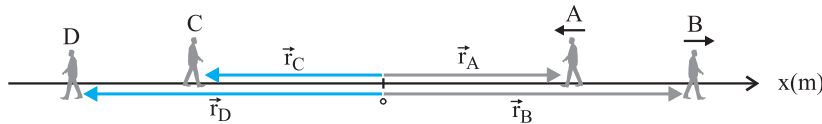
(۲) بردار مکان جسم در نقطه B برابر است با:  $\vec{r}_B = -3/5\vec{i}$

(۳) بردار مکان جسم در نقطه C برابر است با:  $\vec{r}_C = +4\vec{i}$

در حرکت یک بعدی (حرکت بر خط راست) می‌توانیم برای سهولت بردار مکان را با  $d = x\vec{i}$  نمایش دهیم. x می‌تواند مثبت، صفر یا منفی باشد.



**توجه:** در شکل زیر، بردارهای مکان متحرک در لحظه‌های مختلف نمایش داده شده است. دقت کنید که جهت حرکت ذره، لزوماً در جهت بردار مکان ذره نیست.



جهت حرکت متحرک در این مکان	علامت مکان x	مکان
در جهت منفی محور x	مثبت	A
در جهت مثبت محور x	مثبت	B
در جهت مثبت محور x	منفی	C
در جهت منفی محور x	منفی	D

**مبدأ زمان ( $t = 0$ )**

بررسی این موضوع را با طرح یک پرسش کلیدی، آغاز می‌کنیم:

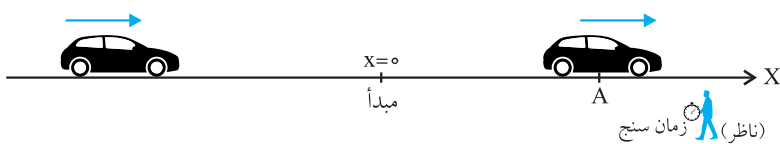
**پرسش:** آیا  $t = 0$  لحظه شروع حرکت است؟

**پاسخ:** خیر؛ لحظه  $t = 0$  (مبدأ زمان) یعنی لحظه شروع بررسی حرکت جسم. فرض کنید، ما به عنوان شخصی (ناظر) که می‌خواهد حرکت جسم را مورد بررسی قرار دهد یک زمان سنج (کرونومتر) در دستان خود داریم. در یک لحظه زمان سنج را به کار می‌اندازیم. لحظه شروع به کار این زمان سنج را مبدأ زمان گفته و با  $t = 0$  نشان می‌دهیم.

**توجه:** دقت کنید که ممکن است، متحرک، حرکت خود را پیش از این لحظه ( $t = 0$ )، آغاز کرده باشد، ولی ما از  $t = 0$  حرکت آن را مورد بررسی قرار

می‌دهیم. مثلاً در شکل زیر متحرکی بر روی محور x در حال حرکت است. هنگامی که ناظر زمان سنج خود را به کار می‌اندازد، متحرک را در نقطه A می‌بیند

این لظه را مبدأ زمان ( $t = 0$ ) می‌نامیم و مکان متحرک در این لظه را «مکان اولیه متحرک» می‌گوییم؛ چون مکان اولیه مربوط به لظه ( $t = 0$ ) است. مکان اولیه را با  $x_0$  نشان می‌دهیم.

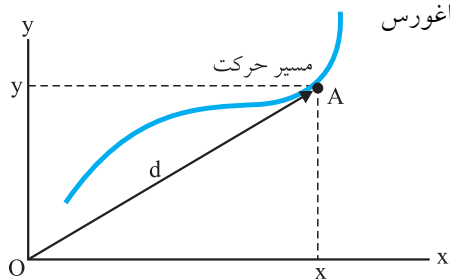


**توجه:** طول بردار مکان، فاصله ذره تا مبدأ مکان را نشان می‌دهد. این فاصله را معمولاً با  $d$  نشان می‌دهیم.

طول بردار مکانی ذره متحرک در صفحه مختصات دکارتی، بر اساس رابطه فیثاغورس به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2}$$

که در آن  $x$  و  $y$  مختصات مکان ذره است.



**مثال:** شکل مقابل، مسیر حرکت ذره را در صفحه مختصات دکارتی نشان

می‌دهد. نقطه  $A$  مکان اولیه ذره است.

الف) بردار مکان اولیه جسم را برحسب بردارهای  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  بنویسید.

ب) بردار مکان ذره را در نقطه  $B$  برحسب بردارهای  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  بنویسید.

پ) فاصله اولیه ذره تا مبدأ مکان چه مقدار است؟

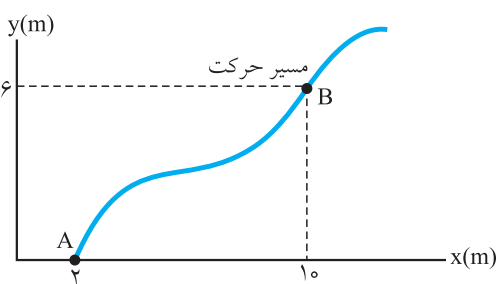
ت) فاصله ذره در نقطه  $B$  تا مکان اولیه را محاسبه کنید.

**پاسخ:** الف) حرکت در  $t = 0$  از نقطه  $A$  شروع شده است. بنابراین

ب)

پ)

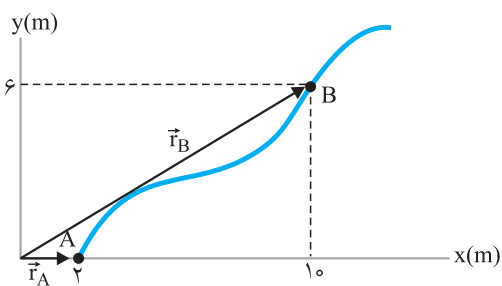
ت)



$$\vec{r}_0 = \vec{r}_A = x_0 \vec{i} + y_0 \vec{j} = 2\vec{i}$$

$$\vec{r}_B = x_B \vec{i} + y_B \vec{j} = 10\vec{i} + 6\vec{j}$$

$$d_A = |\vec{r}_0| = 2 \text{ m}$$



$$d = \sqrt{6^2 + (10-2)^2} = 10 \text{ m}$$

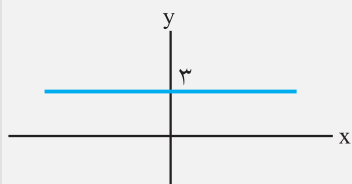
**توجه:** معادله مسیر ذره در صفحه به شکل  $y = f(x)$  است.

**یادآوری ریاضی:**

به نمونه‌هایی از معادله ساده مسیر حرکت ذره در صفحه توجه کنید:

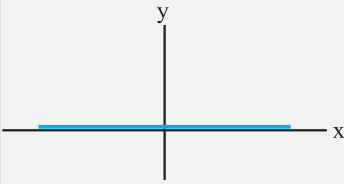
$$y = +3 \text{ m (الف)}$$

مسیر حرکت خط راست افقی مطابق شکل روبه رو است:



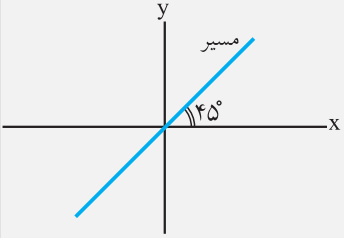
(ب)  $y = 0$

مسیر حرکت، منطبق بر محور  $x$  است.



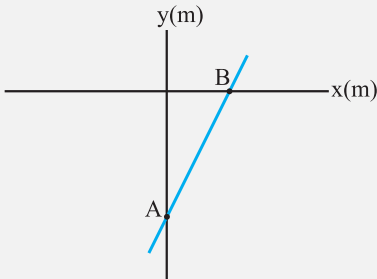
(پ)  $y = x$

مسیر حرکت، خط راست منطبق بر نیمساز  $(y - x)$  است.



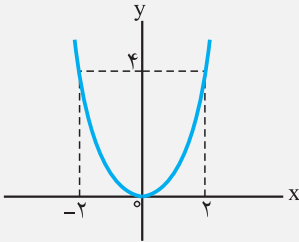
(ت)  $y = 2x - 4$

مسیر حرکت، خط راستی است که از دو نقطه  $A \begin{vmatrix} 0 \\ -4 \end{vmatrix}$  و  $B \begin{vmatrix} +2 \\ 0 \end{vmatrix}$  عبور می‌کند.



(ث)  $y = x^2$

مسیر حرکت سهمی شکل است.



(ج)  $y = -x^2 + 7x - 10$

$$y = -x^2 + 7x - 10 = -(x^2 - 7x + 10) = -(x - 2)(x - 5)$$

مسیر حرکت سهمی شکل است. از آنجا که ضریب  $x^2$ ، مقدار منفی است سهمی دارای قله (ماکزیمم) است.

$$x = 0 \rightarrow y = -10 \text{ m}$$

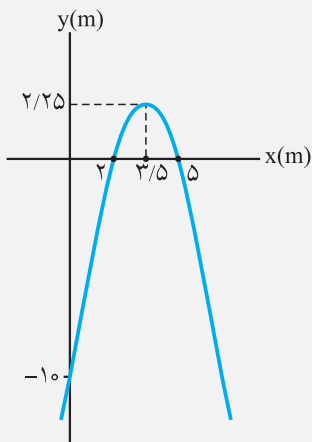
$$y = 0 \rightarrow x_1 = 2 \text{ m}, x_2 = 5 \text{ m}$$

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{2 + 5}{2} = 3.5$$

طول رأس سهمی

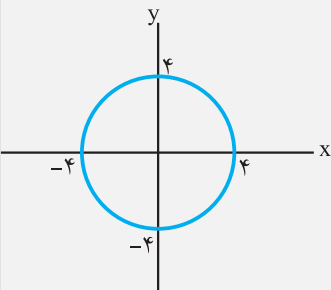
$$\rightarrow y = -(x - 2)(x - 5) \Rightarrow y = -(3.5 - 2)(3.5 - 5) = +2.25$$

$$x = 3.5 \text{ m} \rightarrow y = 2.25 \text{ m}$$



(چ)  $x^2 + y^2 = 16$

مسیر حرکت، دایره‌ای با شعاع  $4 \text{ m}$  و مرکز دایره مبدأ مختصات می‌باشد.



## بردار مکان

بردار  $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j}$  بردار مکان متحرک را در صفحه مختصات دکارتی نشان می‌دهد. اگر  $x$  و  $y$  به صورت تابعی از زمان تعریف شده باشند، بردار مکان به صورت  $\vec{r} = f(t)\vec{i} + g(t)\vec{j}$  نشان داده می‌شود. در این صورت  $x = f(t)$  و  $y = g(t)$  است. اگر بتوانیم از حل معادله‌های  $x = f(t)$  و  $y = g(t)$ ، رابطه‌ای مستقل از زمان بین  $x$  و  $y$  بیابیم به طوری که  $y$  را به صورت تابعی از  $x$  بنویسیم، به معادلهٔ اخیر، معادلهٔ مسیر حرکت می‌گوییم!

**مثال:** بردار مکان ذره‌ای که در صفحهٔ مختصات  $xOy$  حرکت می‌کند در SI به صورت  $\vec{r} = (-t^2 + 2t + 6)\vec{i} + (3t^2 - 6t + 9)\vec{j}$  است. مسیر حرکت این ذره، در کدام گزینه به درستی بیان شده است؟

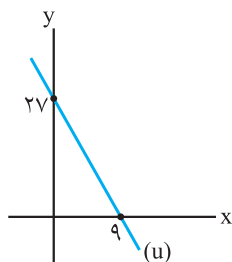
(۴) خط راست

(۳) بیضی

(۲) سهمی

(۱) دایره

**پاسخ:** گزینهٔ ۴ صحیح است.



$$x = -t^2 + 2t + 6 \rightarrow 3x = -3t^2 + 6t + 18$$

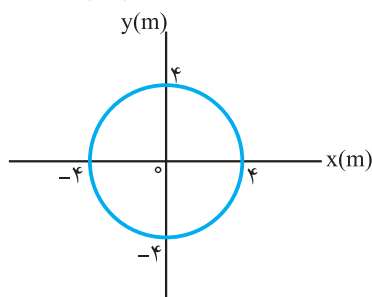
$$y = 3t^2 - 6t + 9 \rightarrow y = 3t^2 - 6t + 9$$

$$3x + y = 27 \Rightarrow y = -3x + 27 \rightarrow \text{مسیر حرکت خط است}$$

خط (u) مسیر حرکت ذره در صفحه است.

**مثال:** بردار مکان ذره‌ای که در صفحه حرکت می‌کند، در SI به صورت  $\vec{r} = (4 \sin 2t)\vec{i} + (4 \cos 2t)\vec{j}$  است. معادلهٔ مسیر حرکت را به دست آورید و شکل مسیر را در دستگاه مختصات رسم کنید.

**پاسخ:**

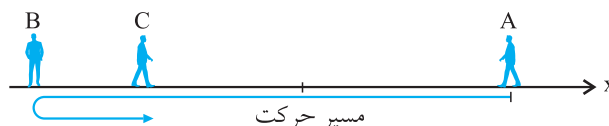


$$\begin{aligned} x &= 4 \sin 2t \\ y &= 4 \cos 2t \end{aligned} \Rightarrow x^2 + y^2 = 4^2 [\sin^2(2t) + \cos^2(2t)] \Rightarrow x^2 + y^2 = 4^2$$

مسیر حرکت دایره‌ای به شعاع ۴ متر و مرکز  $(0,0)$  است.

**توجه:** وقتی حرکت در یک بُعد باشد، مسیر حرکت را یکی از محورهای مختصات می‌گیریم. مثلاً در شکل زیر مسیر حرکت متحرکی که ابتدا از مکان A

به B و سپس به C رفته با رنگ آبی مشخص شده است:



## جابه‌جایی

در شکل رو به رو، مسیر حرکت متحرکی را در صفحهٔ مختصات  $xOy$

مشاهده می‌کنیم. این متحرک در لحظهٔ  $t_1$  از نقطهٔ A و در لحظهٔ  $t_2$

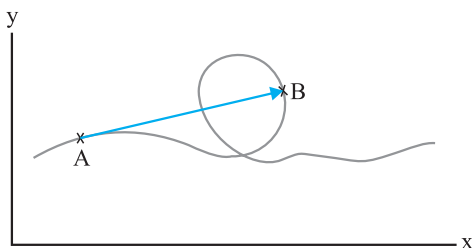
( $t_2 > t_1$ ) از نقطهٔ B عبور کرده است. بردار  $\vec{AB}$ ، بردار جابه‌جایی متحرک از

لحظهٔ  $t_1$  تا لحظهٔ  $t_2$  است.

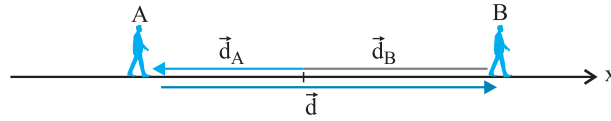
«بردار جابه‌جایی» متحرک در بازهٔ زمانی  $t_1$  تا  $t_2$  عبارت است از برداری

که ابتدای آن، مکان ذره در لحظهٔ  $t_1$  و انتهای آن مکان ذره در لحظهٔ  $t_2$

باشد. ابتدا و انتهای بردار جابه‌جایی روی مسیر حرکت قرار دارد.



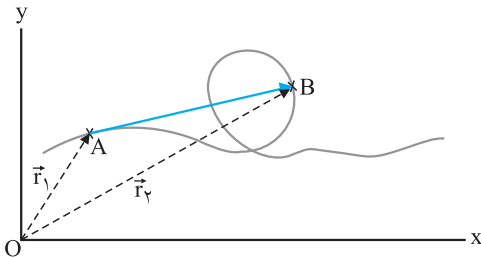
**توجه:** اگر مسیر حرکت ذره بر روی خط راست باشد، بردار جابه‌جایی در هر بازه زمانی، منطبق بر مسیر حرکت خواهد بود. فرض کنید که در شکل بالا متحرکی از مکان A روی محور x تا مکان B روی محور جابه‌جا شده باشد. در این صورت بردار جابه‌جایی از A تا B به صورت زیر است:



$\vec{d}_A$  بردار مکان جسم در نقطه A

$\vec{d}_B$  بردار مکان جسم در نقطه B

$\vec{d} = \vec{d}_B - \vec{d}_A$  بردار جابه‌جایی جسم از A تا B



**توجه:** در نمودار بالا، می‌توانیم بردار جابه‌جایی ذره را توسط بردارهای مکانی ذره بنویسیم.

$$\vec{OA} + \vec{AB} = \vec{OB} \Rightarrow \vec{r}_1 + \vec{AB} = \vec{r}_2 \Rightarrow \vec{AB} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = \Delta \vec{r}$$

**توجه:** اگر بردارهای  $\vec{r}_1$  و  $\vec{r}_2$  بر حسب بردارهای یک‌گانه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  داده شوند:

$$t = t_1 : \vec{r}_1 = x_1 \vec{i} + y_1 \vec{j} \Rightarrow \text{بردار جابه‌جایی} = \Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = \Delta x \vec{i} + \Delta y \vec{j}$$

$$t = t_2 : \vec{r}_2 = x_2 \vec{i} + y_2 \vec{j}$$

به عنوان مثال اگر  $\vec{r}_1 = -2\vec{i} + 3\vec{j}$  و  $\vec{r}_2 = 4\vec{i} - \vec{j}$  (SI) باشند، بردار جابه‌جایی به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = (4\vec{i} - \vec{j}) - (-2\vec{i} + 3\vec{j}) \Rightarrow \Delta \vec{r} = 6\vec{i} - 4\vec{j}$$

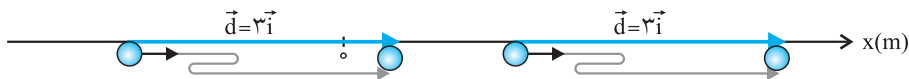
**توجه:** در حرکت بر خط راست بردارهای مکانی ذره را با  $\vec{d}_1$  و  $\vec{d}_2$  بردار جابه‌جایی را با  $\vec{d}$  نمایش می‌دهیم. به عنوان نمونه، در حرکت بر روی محور x اگر بردار مکان

ذره در لحظه  $t_1 = 2s$  برابر  $\vec{d}_1 = -6\vec{i}$  و در لحظه  $t_2 = 5s$  برابر  $\vec{d}_2 = 4\vec{i}$  باشد بردار جابه‌جایی جسم (در مدت 3 ثانیه از  $t_1$  تا  $t_2$ ) برابر است با:

$$\vec{d} = \vec{d}_2 - \vec{d}_1 = (4\vec{i}) - (-6\vec{i}) = 10\vec{i}$$

**توجه:** وقتی می‌گوییم بر روی محور x بردار جابه‌جایی  $\vec{d} = +3\vec{i}$  (است یعنی متحرک به اندازه 3 m در جهت مثبت محور x جابه‌جا شده است.

(این‌که متحرک در این جابه‌جایی تغییر جهت داده باشد یا نه، در مسافت جابه‌جایی تأثیری ندارد.)



شکل بالا نشان می‌دهد که بردار جابه‌جایی ذره، مستقل از نوع دستگاه مختصات انتخابی است و به شکل مسیر حرکت بستگی ندارد.

### مسافت

«مسافت پیموده شده»، طول مسیر حرکت است که همواره به صورت یک کمیت نرده‌ای و مثبت بیان می‌شود.

**توجه:** اگر جهت حرکت تغییر نکند مسافت پیموده شده در هر بازه زمانی با اندازه جابه‌جایی متحرک در آن بازه زمانی، برابر است.

**توجه:** مسافت پیموده شده را با نماد L و اندازه بردار جابه‌جایی را با نماد d نمایش می‌دهیم و در حالت کلی:  $L \geq d$  است.

### ایستگاه زمان

به چند مطلب و کلیدواژه‌های متداول توجه کنید:

(1) منظور از بازه زمانی بین دو لحظه  $t_1$  تا  $t_2$  یعنی:  $\Delta t = t_2 - t_1$

(2) منظور از «ثانیه n ام حرکت، حرکت در مدت یک ثانیه از  $t_1 = n - 1$  تا  $t_2 = n$  ثانیه است.

به عنوان نمونه، حرکت در ثانیه پنجم یعنی بازه زمانی  $4s \leq t \leq 5s$



۳)  $T$  ثانیه  $n$  ام حرکت یعنی بازه زمانی حرکت به مدت  $T$  ثانیه از  $t_1 = (n-1)T$  تا  $t_2 = nT$  است. به عنوان نمونه، حرکت در ۳ ثانیه پنجم یعنی: بازه زمانی به مدت ۳ ثانیه که از  $t_1 = 12_s$  تا  $t_2 = 15_s$  است.

### تندی متوسط

مسافت طی شده در واحد زمان، تندی متوسط متحرک است:  $S_{av} = \frac{L}{\Delta t}$

در این رابطه،  $S_{av}$  تندی متوسط (برحسب  $\frac{m}{s}$ )  
 $L$  مسافت طی شده (برحسب متر)

$\Delta t$  بازه زمانی (برحسب ثانیه) است که متحرک در طی آن، مسافت  $L$  را پیموده است.

**توجه:** تندی متوسط یک کمیت زده ای همواره مثبت است.

### سرعت متوسط

سرعت متوسط متحرک برابر است با نسبت بردار جابه جایی به زمان انجام این جابه جایی:  $\vec{v}_{av} = \frac{\vec{d}}{\Delta t}$

در این رابطه،  $\vec{d} = \vec{AB}$  بردار جابه جایی متحرک، از نقطه  $A$  تا نقطه  $B$  است و  $\Delta t$  مدت زمانی است که در طی آن، مسیر حرکت  $A$  تا  $B$  انجام شده است.

سرعت متوسط  $\vec{v}_{av}$  کمیتی برداری و در SI با یکای متر بر ثانیه ( $\frac{m}{s}$ ) است.

**توجه:** اگر حرکت متحرک روی محور  $x$  (تغیاب کنیم، سرعت متوسط به صورت زیر خواهد شد:

$$\vec{d} = \Delta x \vec{i} \Rightarrow \vec{v}_{av} = \frac{\vec{d}}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right) \vec{i}$$

(الف) مکان های متحرک در این دو لحظه مثبت است.

(ب) در این حالت، جابه جایی مثبت است، گرچه مکان های متحرک در این دو لحظه منفی است.

(پ) در این حالت، جابه جایی تا لحظه  $t'$  مثبت و از  $t'$  تا  $t_2$  منفی است ولی جابه جایی در بازه زمانی  $t_1$  تا  $t_2$  منفی است.

(ت) در این حالت، متحرک ۳ بار تغییر جهت داده است و جابه جایی در بازه زمانی  $t_1$  تا  $t_2$  مثبت است.

**توجه:** اگر مسیر حرکت خط راست بوده و تغییر جهت نداشته باشیم، اندازه سرعت متوسط همان تندی متوسط است.

## حرکت بر خط راست

### معادله مکان - زمان

فرض کنید ذره ای بر روی محور  $x$ ، در حال حرکت باشد. به طوری که در هر لحظه دلخواه، مکان متحرک قابل اندازه گیری باشد. به این ترتیب  $x$  تابعی از زمان  $(t)$  قابل بیان خواهد بود و می توان مکان متحرک را به شکل  $x=f(t)$  معرفی کرد.

معادله مکان - زمان  $x = f(t)$  به هر شکل ریاضی (ساده یا پیچیده) باشد، مسیر حرکت متحرک بر روی خط راست است.

به عنوان نمونه به مثال های زیر توجه کنید:

۱)  $x = t + 2$

۲)  $x = t^2 - 5t + 6$

۳)  $x = 3 \sin t$

شکل مسیر حرکت در مورد (۱)، نیم خطی افقی است که از  $x = +2$  آغاز می شود.

شکل مسیر حرکت در مورد (۲) از مکان  $x_0 = +6$  آغاز می شود.

در مورد (۳)،  $x = 3 \sin t$  در SI نشان می دهد که مسیر حرکت ذره پاره خطی به طول  $6 \text{ m}$  از  $x_1 = -3 \text{ m}$  تا  $x_2 = +3 \text{ m}$  است. (چرا؟)

**توجه:** به کمک معادله مکان - زمان می توان مکان اولیه جسم، و مکان جسم در هر لحظه، مسافت طی شده و جابه جایی در هر بازه زمانی دلفواره را

مشخص کرد و همچنین می توان سرعت متوسط و تندی متوسط را در هر بازه زمانی دلفواره مناسبه نمود.

**مثال:** معادله مکان - زمان متحرکی که بر روی محور  $x$  حرکت می کند در SI به صورت  $x = t^2 - 5t + 6$  است.

الف) در چه لحظه یا لحظه هایی متحرک از مبدأ مکان عبور می کند؟

ب) مکان اولیه متحرک در SI چه قدر است؟

پ) جابه جایی متحرک در ثانیه دوم چند متر است؟

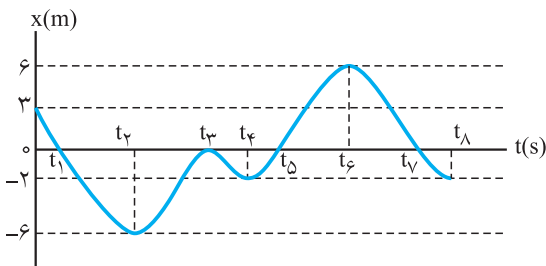
**پاسخ:**

الف)  $x = 0 \Rightarrow t^2 - 5t + 6 = 0 \Rightarrow t = 2 \text{ s}, t = 3 \text{ s}$  (مبدأ مکان)

ب)  $t = 0 \Rightarrow x_0 = +6 \text{ m}$

پ)  $1 \text{ s} \leq t \leq 2 \text{ s} \Rightarrow \begin{cases} t_1 = 1 \text{ s} \Rightarrow x_1 = 2 \text{ m} \\ t_2 = 2 \text{ s} \Rightarrow x_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \Delta x = 0 - 2 \Rightarrow \Delta x = -2 \text{ m}$  (جابه جایی)

### نمودار مکان - زمان



فرض کنید متحرکی بر روی محور  $x$  حرکت می کند. می توان مکان و

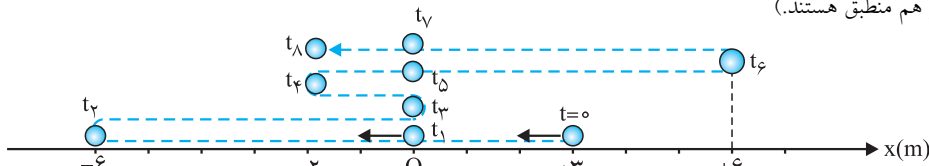
موقعیت حرکت این متحرک را، در یک نمودار که محور عمودی آن

$x$  (مکان متحرک) و محور افقی  $t$  (زمان) باشد، نمایش داد. مانند

نمودار مکان - زمان در شکل روبه رو.

وضعیت حرکت متحرک را با گذشت زمان روی محور  $x$  ها نشان می دهیم:

(تمام مسیرهای خط چین بر هم منطبق هستند.)



متحرک در لحظه های  $t_1, t_2, t_3, t_4$  و  $t_6$  تغییر جهت می دهد.

متحرک در لحظه های  $t_1, t_5$  و  $t_7$  از مبدأ عبور می کند.

**توجه:** نقاط ماکزیمم و می نیمم در منحنی مکان - زمان، لحظه های تغییر جهت متحرک است.

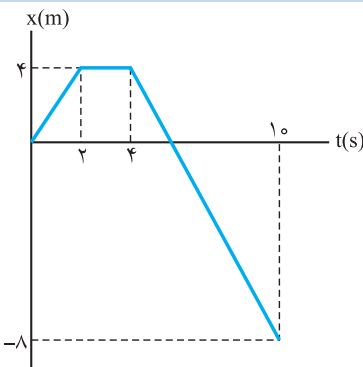
**مثال:** نمودار مکان - زمان متحرکی در SI به صورت شکل مقابل است.

الف) چه مدت، جسم ساکن بوده است؟

ب) در چه لحظه ای متحرک از مبدأ مکان عبور کرده است؟

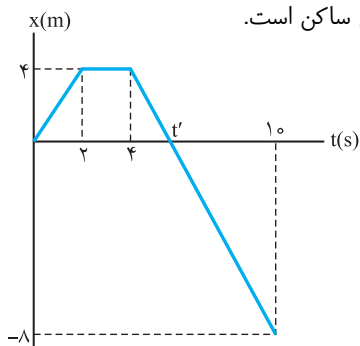
پ) جابه جایی متحرک در مدت  $10 \text{ s}$  ابتدایی حرکت چند متر است؟

ت) مسافت طی شده توسط متحرک در بازه زمانی  $t_1 = 0$  تا  $t_2 = 10 \text{ s}$  چند متر است؟

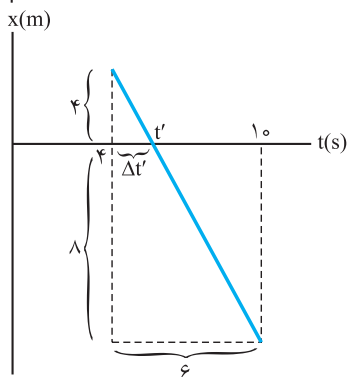




(الف) در بازه زمانی  $t_1 = 2s$  تا  $t_2 = 4s$  مکان متحرک  $x = +4m$  بوده و تغییر نکرده است. یعنی ساکن است.



(ب) در لحظه  $t = t'$  متحرک از مبدأ مکان عبور کرده است:



$$\frac{\Delta t'}{6} = \frac{4}{12} \Rightarrow \Delta t' = 2s \Rightarrow t' = 6s$$

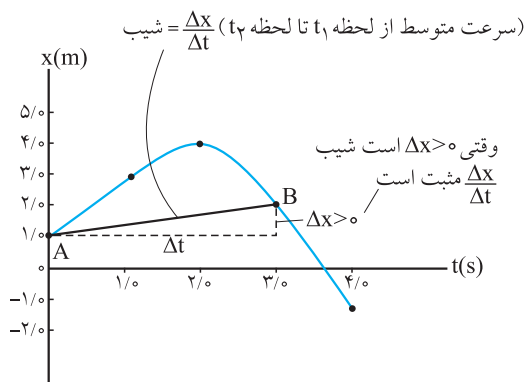
(پ)  $\Delta x = x_2 - x_1 = [(-8m) - (0)] = -8m$  در بازه زمانی  $t_1 = 0$  تا  $t_2 = 10s$

$$L = 4m + 12m = 16m$$

(ت) مسافت طی شده در بازه زمانی  $t_1 = 0$  تا  $t_2 = 10s$  برابر است با:

در بازه زمانی  $t_1 = 0$  تا  $t_2 = 4s$  در بازه زمانی  $t_1 = 4s$  تا  $t_2 = 10s$

### سرعت متوسط در نمودار (x-t)



نمودار مکان - زمان متحرکی مطابق شکل زیر داده شده است. پاره خط بین

دو نقطه A و B از نمودار مکان - زمان، رسم شده است. نسبت  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$  برابر شیب پاره خطی که این دو نقطه را به هم وصل می کند. این نسبت برابر با سرعت متوسط متحرک در بازه  $t_1$  تا  $t_2$  است. بنابراین:

سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان، برابر شیب پاره خطی است که نقاط نظیر آن دو لحظه در نمودار مکان - زمان را به یکدیگر وصل می کند.

**مثال:** نمودار مکان - زمان متحرکی که بر خط راست حرکت می کند مطابق شکل

روبرو است. سرعت متوسط متحرک را در هر یک از بازه های زمانی (0s تا 1s)، (1s تا 3s) تا (3s تا 5s)، محاسبه می کنید. نتایج به دست آمده را با هم مقایسه و تفسیر کنید.

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20 - 0}{1 - 0} = 20 \frac{m}{s}$$

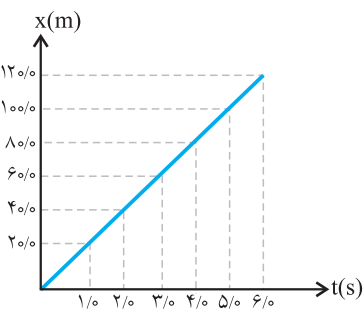
پاسخ: در بازه زمانی 0s تا 1s:

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{60 - 20}{3 - 1} = 20 \frac{m}{s}$$

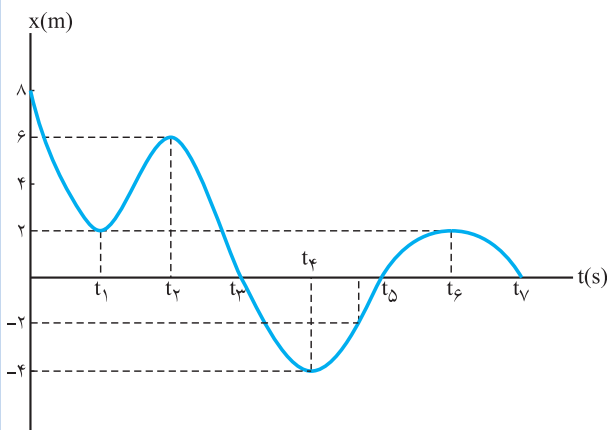
در بازه زمانی 1s تا 3s:

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{100 - 20}{5 - 1} = \frac{80}{4} = 20 \frac{m}{s}$$

در بازه زمانی 1s تا 5s:



**نتیجه:** از آنجا که شیب نمودار  $(x - t)$  ثابت است، اگر در هر بازه زمانی دلتوازه دیگری نیز سرعت متوسط متحرک را حساب کنیم، خواهیم دید که همین مقدار برای آن به دست می‌آید.



**مثال:** نمودار مکان - زمان شکل داده شده مربوط به متحرکی

است که بر روی محور  $x$  ها در حال حرکت است.

الف) در کدام بازه‌های زمانی، متحرک در حال دور شدن از مبدأ مکان است؟

ب) جهت حرکت چند بار و در چه لحظه‌هایی تغییر کرده است؟

پ) تندی متوسط متحرک در بازه زمانی  $t = 0$  تا  $t_6 = 10$  s چند

$\frac{m}{s}$  است؟

**پاسخ:** الف) در بازه‌های زمانی  $(t_1$  تا  $t_2)$ ،  $(t_3$  تا  $t_4)$ ،  $(t_5$  تا  $t_6)$

ب) ۴ بار در لحظات  $t_1$ ،  $t_2$ ،  $t_4$  و  $t_6$

پ) برای محاسبه تندی متوسط ابتدا باید مسافت طی شده در بازه زمانی  $t_1 = 0$  تا  $t_6 = 10$  s را بیابیم:

$$L = (8 - 2) + (6 - 2) + (6 - (-4)) + (2 - (-4)) = 26 \text{ m}$$

$$S_{av} = \frac{L}{\Delta t} = \frac{26 \text{ m}}{10 \text{ s}} = 2.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای

تندی متحرک در هر لحظه از زمان را **تندی لحظه‌ای** می‌نامند.

سرعت متحرک در هر لحظه از زمان را **سرعت لحظه‌ای** گویند. سرعت کمیت برداری است که تندی و جهت حرکت را نشان می‌دهد.

اندازه سرعت لحظه‌ای برابر تندی لحظه‌ای در آن لحظه است.

**توجه:** برای سادگی سرعت لحظه‌ای و تندی لحظه‌ای را به ترتیب به صورت سرعت و تندی بیان می‌کنیم.

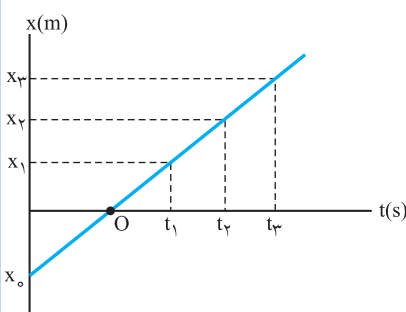
**توجه:** در حرکت جسم بر خط راست، سرعت لحظه‌ای را به جای  $\vec{v}$  به صورت  $v$  به کار می‌بریم. هرگاه متحرک در جهت مثبت محور  $x$  حرکت کند  $v > 0$

و هرگاه در جهت منفی محور حرکت کند  $v < 0$  است.



**مثال:** از روی نمودار مکان - زمان توضیح دهید در چه صورت سرعت لحظه‌ای متحرک همواره با سرعت متوسط آن برابر است.

**پاسخ:** هرگاه نمودار  $(x - t)$  یک خط با شیب ثابت باشد، سرعت متوسط در تمام بازه‌های زمانی مقداری یکسان و ثابت است. مانند شکل زیر:

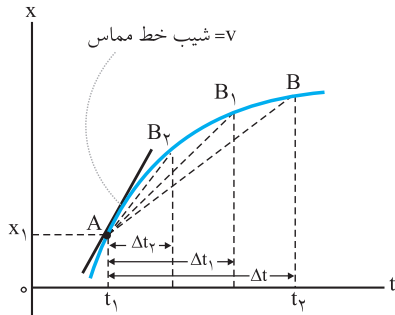


$$v(t) = \underbrace{v_{av}}_{\text{در هر بازه زمانی}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

بنابراین در حرکت با سرعت ثابت، سرعت متوسط در هر بازه زمانی برابر

با سرعت لحظه‌ای است.

## سرعت لحظه‌ای در نمودار مکان - زمان



سرعت متوسط بین هر دو لحظه دلخواه، برابر شیب پاره‌خطی است که نمودار مکان - زمان را در آن دو لحظه به هم وصل می‌کند. همان‌طور که در شکل روبه‌رو دیده می‌شود اگر  $\Delta t$  به تدریج کوچک و کوچک‌تر شود، نقطه  $B$  به نقطه  $A$  نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود. با کوچک شدن تدریجی  $\Delta t$ ، نقطه  $B$  به نقطه  $A$  نزدیک می‌شود. در این صورت پاره‌خطی واصل بین این دو نقطه، در حالتی که بازه زمانی  $\Delta t$  خیلی خیلی کوچک شود، به خط مماس بر نمودار نقطه  $A$  میل می‌کند.

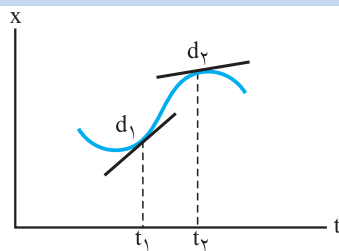
**سرعت لحظه‌ای:** حد سرعت متوسط است وقتی که بازه زمانی بسیار بسیار کوچک باشد و به سمت صفر میل کند.

در حرکت بر روی خط راست می‌توان نوشت:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} v_{av} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

در این حالت شیب خط مماس در نقطه  $A$ ، برابر سرعت متحرک در لحظه  $t_1$  است.

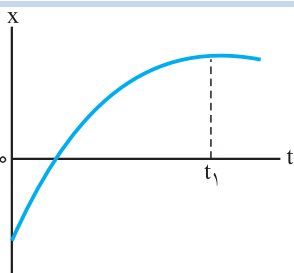
شیب خط مماس بر نمودار مکان - زمان در هر لحظه دلخواه  $t$  برابر سرعت در آن لحظه است.



**مثال:** شکل مقابل نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور  $x$  در حرکت است.  $d_1$  و  $d_2$  خطهای مماس بر منحنی را در دو لحظه متفاوت نشان می‌دهند. در کدام لحظه تندی متحرک بیش‌تر است؟

**پاسخ:** با توجه به شکل، اندازه شیب خط  $d_1$  بیش‌تر از اندازه شیب خط  $d_2$  است. بنابراین تندی متحرک در لحظه  $t_1$  بیش‌تر از تندی متحرک در لحظه  $t_2$  است.

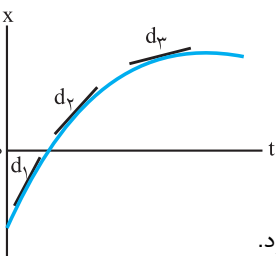
هم‌چنین شیب هر دو خط مثبت است بنابراین سرعت نیز در هر دو لحظه  $t_1$  و  $t_2$  مثبت است یعنی متحرک در جهت محور  $x$  حرکت کرده است.  
 $v_1 > v_2 > 0$



**مثال:** شکل مقابل، نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور  $x$  در حرکت است.

الف) از لحظه صفر تا لحظه  $t_1$  تندی متحرک رو به افزایش است یا کاهش؟

ب) اگر در لحظه  $t_1$  خط مماس بر منحنی موازی محور زمان باشد، تندی متحرک در این لحظه چه قدر است؟



**پاسخ:** الف) تندی متحرک در حال کاهش است. اگر شیب خطهای مماس را در نقطه‌های مختلف رسم کنیم، مشاهده می‌کنیم که اندازه شیب این خطها در حال کاهش است.

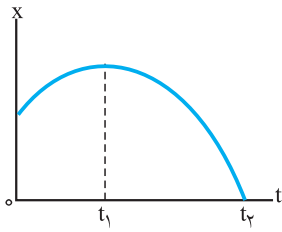
شیب خط  $d_1 < d_2 < d_3$

$$\Rightarrow v_1 < v_2 < v_3$$

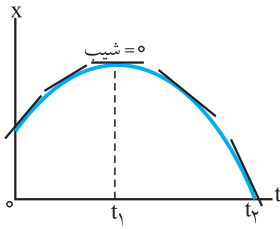
ب) در این لحظه خط مماس بر نمودار  $(x-t)$  افقی یا شیب صفر است. بنابراین سرعت متحرک صفر می‌شود.

## حرکت تندشونده - حرکت کندشونده

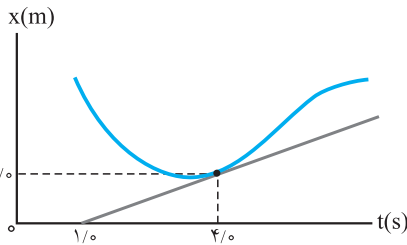
هرگاه با گذشت زمان، تندی رو به افزایش باشد، حرکت متحرک، تندشونده است.  
اگر با گذشت زمان، تندی کاهش یابد، حرکت متحرک، کندشونده است.



**مثال:** نمودار مکان - زمان یک متحرک که روی محور  $x$  حرکت می‌کند، مطابق شکل روبه‌رو است. نوع حرکت متحرک را در بازه‌های زمانی  $(0, t_1)$  و  $(t_1, t_2)$  بررسی کنید.



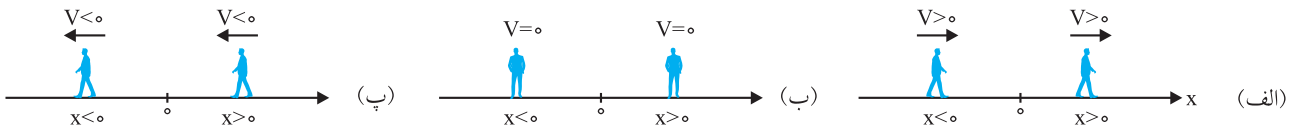
**پاسخ:** به شکل روبه‌رو توجه کنید. شیب نمودار مکان - زمان در چند نقطه رسم شده است. تندی متحرک در هر لحظه با اندازه شیب نمودار مکان - زمان برابر است. در بازه زمانی  $0$  تا  $t_1$  اندازه شیب در حال کاهش است و به مقدار صفر می‌رسد. در نتیجه در این بازه زمانی، حرکت کندشونده است. در بازه زمانی  $t_1$  تا  $t_2$ ، اندازه شیب، در حال افزایش است و در این بازه زمانی، حرکت تندشونده است.



**مثال:** شکل مقابل نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد. خط مماس بر منحنی در لحظه  $t = 4s$  رسم شده است. سرعت متحرک را در این لحظه پیدا کنید.

**پاسخ:** سرعت متحرک در هر لحظه برابر شیب خط مماس بر نمودار مکان - زمان است:  
$$v(t=4s) = \frac{6-0}{4-1} = 2 \frac{m}{s}$$

**توجه:** جهت حرکت جسم در هر لحظه، جهت سرعت در آن لحظه است و به علامت مکان متحرک بستگی ندارد.



**توجه:** علامت شیب خط مماس بر منحنی نمودار مکان - زمان، جهت سرعت جسم (جهت حرکت متحرک) است.

**به عنوان نمونه:** نمودار مکان - زمان متحرکی که بر روی محور  $x$  حرکت می‌کند به صورت شکل زیر است. به جهت حرکت متحرک در لحظات مشخص شده روی نمودار، دقت کنید.

