

کمیت‌های سینماتیکی

موقعیت، جابه‌جایی، سرعت و شتاب

مقدمه

به‌طور کلی حرکت متداول‌ترین پدیده مورد بررسی انسان به سه بخش انتقالی، دورانی و ترکیبی تقسیم می‌شود. حرکات متداول یا عام به‌طور کلی در ورزش و الگوهای حرکتی عمومیت بیشتری دارد. مفاهیم متعددی برای بررسی اندازه و چگونگی حرکت به کار می‌روند از جمله مسافت، جابه‌جایی، سرعت و شتاب در محور افقی و عمودی.

حرکت (Motion)

حرکت اجسام یکی از آشنادترین پدیده‌ها برای بشر در طول تاریخ بوده است، زیرا انسان در زندگی روزمره خود همواره با آن سر و کار داشته است. از این رو بشر از دیرباز کوشیده است تا حرکات‌های مختلف اجسام را بررسی و تحلیل کند و در هر مورد علت آن را بیابد.

حرکت در علم فیزیک به معنی تغییر مکان جسم در ارتباط با زمان است. حرکت در فیزیک از نیرو ناشی می‌شود و با مفاهیم سرعت، شتاب، جابه‌جایی و زمان مرتبط است.

«حرکت را می‌توان جابه‌جا شدن یا انتقال جسم از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر نسبت به یک مرجع دانست».

انواع حرکت

به‌طور کلی هر حرکتی ممکن است انتقالی (Translation)، دورانی / چرخشی (Rotation) و ترکیبی یا متداول (General Motion) باشد.

۱. حرکت انتقالی (Translation)

حرکتی که تمام اجزای یک جسم دقیقاً مسافت یکسانی را در جهت و زمان مشابهی طی کرده باشد. واحد اندازه‌گیری حرکت انتقالی سانتی‌متر (cm) و متر (m) و کیلومتر (km) است.

حرکات انتقالی به دو صورت مستقیم الخط و منحنی الخط صورت می‌گیرد. در حرکت انتقالی مسیر حرکت روی خط مستقیم است. مانند حرکت یک جسم روی یک سطح صاف و در مسیر مستقیم، یا حرکت اسکیت بازی که بدون تغییر وضعیت قسمت‌های مختلف بدنش در مسیر مستقیم حرکت می‌کند. در حرکت انتقالی منحنی الخط مسیر حرکت منحنی شکل است.

الف) حرکت انتقالی مستقیم الخط (Rectilinear)، جسم در یک مسیر خطی مستقیم حرکت می‌کند.

ب) حرکت انتقالی منحنی (Curvilinear) جسم (بخش یا کل آن) مسیری منحنی شکل را طی می‌کند.

۲. حرکت دورانی (Rotation)

در حرکت دورانی یا چرخشی جسم حول محوری ثابت به حرکت در می‌آید به‌طوری که تمام اجزای آن جسم در محدوده یک زاویه مشخص و در جهت و زمان مشابهی حرکت کنند. خط محوری که

جسم حول آن می‌چرخد ممکن است جزئی از جسم و یا خارج از جسم باشد. به عبارت دیگر حرکتی که تمام اجزای یک جسم در زمان و جهت یکسان حول یک محور (داخل بدن یا خارج از بدن) زاویه برابر را طی کند، واحد اندازه‌گیری حرکات دورانی درجه یا رادیان یا چرخش است.

۳. حرکت عام یا متداول (General Motion)

ترکیب دو حرکت انتقالی و دورانی که به طور کلی در ورزش و الگوهای حرکتی متداول و عمومیت بیشتری دارد. حرکت دوچرخه‌سواری را در نظر بگیرید که بالاتنه او حرکت انتقالی و پاهای او که کار رکاب زدن را به صورت حرکت دورانی انجام می‌دهد در مجموع حرکت عام یا متداول و یا ترکیبی را انجام می‌دهد. در سیکل راه رفتن بالاتنه فرد حرکت انتقالی و مفاصل ران و زانو به همراه مچ پا حرکت دورانی حول مفصل خود دارند که در مجموع کل حرکت را می‌توان جزو حرکات متداول یا عام دانست.

مکان (Location)

موقعیت یک ذره یا جسم در فضا، یکی از اساسی‌ترین مفاهیم در سینماتیک است.

برای تعیین موقعیت یک ذره یا جسم، سه فاکتور باید تعیین شود:

- نقطه مرجع (مبدأ)،
 - فاصله از نقطه مرجع
 - و جهت خط مستقیمی که در فضا، نقطه مرجع و ذره یا جسم را به هم متصل می‌کند.
- نبود هر یک از این سه مورد، بیان موقعیت را ناقص می‌کند.

مسافت (Distance) و جابه‌جایی (Displacement)

مسافت و جابه‌جایی کمیت‌هایی هستند که عموماً برای توصیف اندازه حرکت به کار می‌روند. وقتی جسمی از یک نقطه به نقطه دیگر نقل مکان می‌کند، مسافتی که طی کرده برابر است با کل مسیری که طی کرده و مقدار جابه‌جایی برابر طول خط مستقیمی که از نقطه شروع به پایان داشته است. به عبارت دیگر کوتاه‌ترین فاصله بین نقطه شروع و نقطه پایان حرکت یک جسم، جابه‌جایی جسم است و کل مسیری که جسم طی کرده است مسافت نامیده می‌شود.

اختلاف بین مسافت و جابه‌جایی در اندازه و جهت است. برای مسافت فقط کافی است که طول مسیر اندازه گرفته شود. در جابه‌جایی هم جهت و هم اندازه مهم است.

تندی (Speed) و سرعت (Velocity)

به میزان جابه‌جایی متحرک در بازه زمانی صرف شده، سرعت می‌گویند. لازم به توجه است که ممکن است جهت حرکت در یک مسیر بارها تغییر کند ولی جابه‌جایی به معنای فاصله میان نقطه آغاز و نقطه پایان است و میزان مسافت طی شده در یک بازه زمانی را تندی می‌گویند.

تفاوت تندی و سرعت چیست؟

در علم فیزیک میان واژه تندی و سرعت تفاوت وجود دارد. زمانی که از واژه تندی استفاده می‌کنیم، جهت حرکت برای ما مبهم است ولی سرعت، هم تندی را به ما می‌گوید و هم جهت حرکت را مشخص می‌کند؛ در حقیقت تندی کمیتی عددی است ولی سرعت یک کمیت برداری است.

انواع سرعت

○ سرعت متوسط

○ سرعت لحظه‌ای

تفاوت سرعت لحظه‌ای و سرعت متوسط، تصور کنید یک بازیکن در زمین فوتبال توپ را در اختیار گرفته و از سمت چپ استارت می‌زند. در چند ثانیه از نقطه شروع به نقطه مورد نظر رفته و آماده شوت کردن می‌شود. در طول مسیر قطعاً سرعت بازیکن یکنواخت نبوده، گاهی آرام و گاهی سریع گام برمی‌دارد. اگر به این تغییر سرعت در طول مسیر توجه نکنیم و فقط کل جابه‌جایی را نسبت به زمان نقطه آغاز تا پایان بررسی کنیم؛ مفهوم سرعت متوسط را تعریف و بررسی کرده‌ایم، اما اگر سرعت بازیکن را در هر لحظه که بازیکن در حال دویدن هست در نظر بگیریم، سرعت لحظه‌ای را بررسی کرده‌ایم.

سرعت متوسط

با توجه به تعریف‌ها سرعت متوسط مقدار جابه‌جایی تقسیم بر زمان است. اندازه‌گیری دقیق سرعت ثابت در ورزش‌های مختلف وجود دارد و این کار در آزمایشگاه‌های بیومکانیک و به‌وسیله دستگاه‌ها و در آنالیز حرکتی انجام می‌گردد.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

$$\text{سرعت} = \frac{\text{جابه‌جایی تغییرات}}{\text{تغییرات زمان}}$$

Δt : جابه‌جایی جسم بر حسب متر Δx ، تغییرات زمان بر حسب ثانیه
و به عبارت دیگر $v = d / t$:

جابه‌جایی را با حرف d نشان داده و واحد آن متر است.

و زمان را با حرف t نشان داده و واحد آن ثانیه است.

سرعت متوسط را با حرف v نشان داده و واحد آن متر بر ثانیه است.

$$km/h = 1000 \, m / 3600 \, s$$

$$km/h = \frac{1000}{3600} \, m/s$$

- اگر کمیت بر حسب km/h باشد، برای تبدیل آن به m/s باید آن را بر 3.6 تقسیم کرد.

- اگر کمیت بر حسب m/s باشد، برای تبدیل آن به km/h باید آن را در ۳.۶ ضرب کرد.

سرعت لحظه‌ای

سرعت لحظه‌ای میزان جابه‌جایی متحرک در یک لحظه مشخص است. برای محاسبه سرعت لحظه‌ای باید سرعت جسم را در لحظه بررسی کنیم. فرمول سرعت متوسط را به خاطر آورید: تغییرات مکان تقسیم بر تغییرات زمان؛ حال در محاسبه سرعت لحظه‌ای چون زمان به صفر تمایل پیدا می‌کند، پس داریم: تغییرات مکان تقسیم بر حد زمان که به صفر تمایل پیدا می‌کند.

نمودار مکان – زمان

نمودار مکان – زمان، مکان یک متحرک را نسبت به زمان نشان می‌دهد. در حقیقت این نمودار از دو محور تشکیل شده است. محور افقی زمان و محور عمودی مکان متحرک را نشان می‌دهد. با رسم نقطه‌هایی می‌توان نشان داد متحرک در هر زمان در چه مکانی قرار داشته است و در نهایت با اتصال نقاط نمودار مکان – زمان به دست می‌آید.

حرکت مستقیم الخط یکنواخت (Constant Linear motion)

اگر در یک مسیر مستقیم جابه‌جایی‌های مساوی در زمان مساوی انجام شود، به آن حرکت علاوه بر مستقیم الخط بودن، یکنواخت نیز می‌گویند. اگر حرکت یکنواخت باشد، نمودار مکان – زمان یک خط مستقیم است.

شیب نمودار مکان – زمان، سرعت متوسط متحرک را نشان می‌دهند. در حقیقت با توجه به فرمول سرعت متوسط، از نمودار مکان – زمان می‌توان سرعت را این‌گونه محاسبه کرد:

$$\text{سرعت متوسط} = \frac{\text{جابه‌جایی}}{\text{تغییرات زمان}} = \frac{\text{فاصله بین نقطه آغاز و پایان نمودار}}{\text{سرعت زمان حرکت نمودار}}$$

در این صورت علاوه بر سرعت متوسط می‌توان سرعت لحظه‌ای را نیز محاسبه کرد. برای به دست آوردن سرعت متحرک در هر لحظه می‌توان نموداری رسم کرد که محور افقی آن زمان و محور عمودی آن سرعت باشد، به این نمودار، نمودار سرعت – زمان می‌گویند. بدیهی است که اگر نمودار مکان – زمان یک خط مستقیم باشد، یعنی سرعت یکنواخت است. از این رو نمودار سرعت یک خط افقی خواهد شد.

شتاب (Acceleration)

نسبت تغییرات سرعت به زمان و یا به عبارت دیگر آهنگ تغییرات سرعت در واحد زمان را شتاب می‌گویند که با نماد a نمایش داده می‌شود. کمیتی برداری است و بر حسب متر بر مجذور ثانیه (m/s^2) اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به تعریف شتاب متوسط، برای به دست آوردن شتاب یک جسم می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\text{شتاب} = \frac{\text{تغییرات سرعت}}{\text{تغییرات زمان}}$$

Δv : تغییرات سرعت بر حسب متر بر ثانیه که از تفاضل سرعت ثانویه و سرعت اولیه متحرک به دست می‌آید.

Δt : تغییرات زمان بر حسب ثانیه که از تفاضل زمان ثانویه و زمان اولیه حرکت متحرک به دست می‌آید.

مثلاً اگر دوچرخه‌سواری از نقطه شروع ظرف مدت زمان ۲۰ ثانیه به سرعت ۵ متر بر ثانیه برسد، شتاب متوسط او ۰.۲۵ متر بر مجذور ثانیه خواهد بود. یعنی این دوچرخه‌سوار در هر ثانیه

$$\frac{1}{4}$$

متر بر ثانیه افزایش سرعت می‌دهد.

انواع شتاب

(الف) شتاب مثبت

- ۱- سرعت ثانویه بیش از سرعت اولیه است.
- ۲- شتاب به سمت مثبت محور اعداد است.
- ۳- شتاب و سرعت هم جهت هستند.

در این شرایط متحرک در طول زمان حرکت، افزایش سرعت می‌دهد و حرکتی تندشونده دارد.

(ب) شتاب منفی:

- ۱- سرعت اولیه، بیش از سرعت ثانویه است.
- ۲- شتاب به سمت منفی محور اعداد است.
- ۴- شتاب و سرعت خلاف جهت هم هستند.

در این شرایط سرعت متحرک در طول زمان کاهش یافته و حرکتی کندشونده دارد.

در حرکت کندشونده، سرعت به طور منظم در حال کم شدن است. در حرکت تندشونده، سرعت به طور منظم در حال افزایش است.

انواع حرکت بر اساس سرعت و شتاب (ارتباط سرعت و شتاب):
 اگر شتاب یک جسم صفر باشد، آنگاه سرعت در طی زمان ثابت است و حرکت یکنواخت نامیده می‌شود. در غیر این صورت حرکت غیریکنواخت است.
 اگر شتاب مخالف صفر اما ثابت باشد، حرکت را حرکت با شتاب ثابت گوییم. «و از آن سو» اگر شتاب متغیر باشد، حرکت را حرکت با شتاب متغیر گوییم.
 برای مثال شناگری را در نظر بگیرید که طول استخر را شنا می‌کند. سرعت شنا کردن او نیم متر در ثانیه است. ناگهان سرعت او در ۳۰ ثانیه از نیم متر در ثانیه به ۲ متر در ثانیه می‌رسد. به این تغییرات سرعت در بازه زمانی ۳۰ ثانیه شتاب می‌گویند.

شتاب لحظه‌ای

اگر تغییر سرعت یک متحرک را در یک بازه زمانی بینهایت کوچک (لحظه‌ای) بررسی کنیم، به آن شتاب لحظه‌ای می‌گوییم. فرمول شتاب لحظه‌ای مشتق سرعت نسبت به زمان است:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$\text{شتاب لحظه‌ای} = \frac{\text{تغییرات سرعت}}{\text{زمان}}$$

حرکت مستقیم الخط غیریکنواخت

اگر در یک مسیر مستقیم، مسافت‌های مساوی در زمان مساوی طی نشود به آن حرکت مستقیم الخط غیریکنواخت می‌گویند، سرعت اولیه و نهایی برابر نیستند به عبارت دیگر سرعت ثابت نیست.

$$(V_2 \neq V_1)$$

$$v = v_0 + at \quad \text{سرعت- زمان}$$

$$V = \text{سرعت ثانوی / نهایی جسم} \quad \text{مکان} - \text{زمان} = \frac{(v + v_0)t}{2}$$

$$V = \text{سرعت اولیه جسم} \quad \text{مکان} - \text{زمان} = \frac{1}{2}at^2 + v_0t$$

$$x = vt + x_0 \quad \text{مستقل از شتاب}$$

$$a = \text{شتاب حرکت جسم در طول مسیر}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2ax(x - x_0) \quad \text{مستقل از زمان}$$

$$x = \text{مقدار جابجایی جسم در اثر حرکت}$$

سقوط آزاد (Free Fall)

در بررسی حرکات مستقیم الخط در راستای عمود، حرکت را با مفهوم سقوط آزاد بررسی می‌کنند. در واقع از طرف زمین نیرویی به تمام اجسام و موجوداتی که بر روی زمین هستند وارد می‌شود، این نیرو سبب کشیده شدن اجسام به سمت زمین می‌شود. این نیرو همان نیروی گرانش زمین (Gravity) است که شتاب ناشی از آن برابر 9.8 m/s^2 است. در حرکت در راستای عمود یا سقوط آزاد شتاب گرانش زمین به عنوان شتاب حرکت در نظر گرفته می‌شود.

اگر حرکت رو به بالا باشد $-g$	اگر حرکت رو به پایین باشد $+g$
$v = v_0 - gt$	$v = v_0 + gt$
$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 t$	$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_0 t$
$v^2 - v_0^2 = -2gy$	$v^2 - v_0^2 = +2gy$

هنگامی که جسمی از ارتفاعی رها می‌شود شتاب می‌گیرد و سرعتش از مقدار صفر افزایش می‌یابد. در حالت پایین آمدن شتاب در جهت حرکت است. در ورزش‌هایی مانند چتربازی، پاراگلایدر، پرش با نیزه، پرتاب دیسک، پرتاب نیزه، شیرجه، پرش بانجی و در آنالیز حرکتی هم می‌توان در قسمت‌هایی از ورزش‌های دیگر سقوط آزاد را مشاهده کرد.

ارتفاع اوج: حداکثر ارتفاع جسم در حرکت به سمت بالا

$$y = \frac{x_0}{2a}$$

زمان اوج: زمان رسیدن به حداکثر ارتفاع اوج

$$t = \frac{v_0}{g}$$

سرعت در نقطه اوج برابر با صفر است.

نکته: اگر جسم از نقطه‌ای پرتاب شود و پس از بالا رفتن دوباره به نقطه پرتاب برسد، زمان کل دو برابر زمان اوج است

$$t = 2t$$

منبع: کتابی، شاهین. (۱۴۰۲)، *مقدمات مکانیک حرکت انسان*، تهران، نشر ورزش.