مدرسان شریف

فصل اول

«مفاهیم و الزامات سازه‌ای»

مقدمه

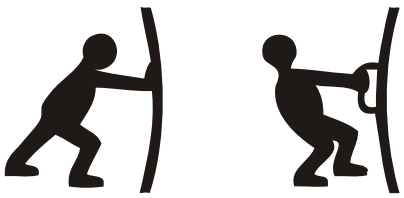
استاتیک یا **ایستایی** شاخه‌ای از علم مکانیک و علوم مهندسی است که به بحث و مطالعه درباره یک سیستم یا سامانه فیزیکی در حال تعادل و ایستایی استاتیکی می‌پردازد. تعادل و ایستایی استاتیکی، حالتی است که در آن اجسام یا سازه‌های تحت تأثیر نیروهای خارجی، تغییر مکان نسبی نداده و در حالت ایستایی و سکون باقی بمانند. در حالت تعادل ایستا که در علوم مهندسی به «تعادل استاتیکی» موسوم است، سیستم مورد نظر در حال سکون است. در فصل اول به مفاهیم پایه‌ای در این علم اشاره خواهد شد.

در بخش اول به مفاهیم اولیه در شناخت سازه و تحلیل رفتار آن پرداخته می‌شود. هدف از این فصل دانستن مفاهیم زیر است:

۱ـ مفهوم نیرو ۲ـ انواع نیرو ۳ـ سازه ۴ـ مفهوم بار ۵ـ انواع تکیه‌گاه‌ها ۶ـ معین بودن یا نامعین بودن یک سازه ۷ـ وضعیت‌های اساسی تنش.

درسنامه (۱): مفاهیم اساسی سازه

نیرو (Force)



نیرو، عاملی است که باعث ایجاد کشش، فشار، حرکت و تراکم در اجسام می‌شود. نیرو را به‌طور شهودی می‌توان با کشیدن یا هُل‌دادن توصیف کرد. (شکل روبه‌رو) واحد اصلی نیرو در سیستم بین‌المللی آحاد (SI) نیوتن است. یک نیوتن برابر با نیرویی است که در جرمی به وزن یک کیلوگرم شتابی معادل یک متر بر مجذور ثانیه $(\frac{m}{s^2})$ ایجاد نماید.

انواع نیرو از نظر محلی که نیرو به آن وارد می‌شود، عبارت‌اند از:

۱) نیروی متمرکز

بر یک نقطه از جسم وارد می‌شود.

۲) نیروی گسترده

بر سطحی مشخص از جسم وارد می‌شود که به این نیرو، فشار نیز می‌گویند.

انواع نیرو از نظر اثر حرکتی که روی جسم می‌گذارند، عبارت‌اند از:

۱) نیروی عمودی

نیرویی که بر سطحی عمود بر سطح مورد نظر وارد می‌شود؛ که خود می‌تواند شامل نیروی کششی و فشاری باشد.

۲) نیروی خمشی

نیرویی که سبب ایجاد خمش در یک جسم می‌شود؛ مانند نیروی وارد به تیرهای افقی ساختمان. در علوم مهندسی به آن لنگر خمشی نیز می‌گویند.

۳) نیروی پیچشی

نیرویی که سبب پیچش و گردش یک جسم حول محورش می‌شود؛ مانند نیرویی که هوا بر ملخ هواپیما وارد می‌کند.

۴) نیروی کمانشی

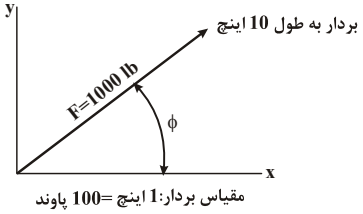
اعمال نیرو به یک جسم دراز در جهت محور طولی آن؛ مانند نیروی وارد بر تیرهای عمودی ساختمان یا نیروی وارد بر تیر چراغ برق.

کمیت برداری

نیرو به علت داشتن بزرگی (مقدار) و جهت، یک کمیت برداری محسوب می‌شود، از این‌رو نیروها را می‌توان برآیندگیری نمود یا به مؤلفه‌هایی تقسیم کرد.

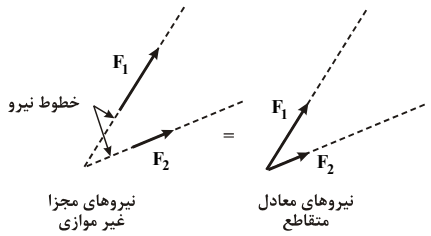
مشخصه‌های بردار عبارت‌اند از:

۱) دارای راستا یا خط عمل است. ۲) دارای جهت است. ۳) دارای اندازه است. ۴) نقطه اثر، یعنی اندازه بردار یا به عبارتی: $|\vec{A}| \Rightarrow A$



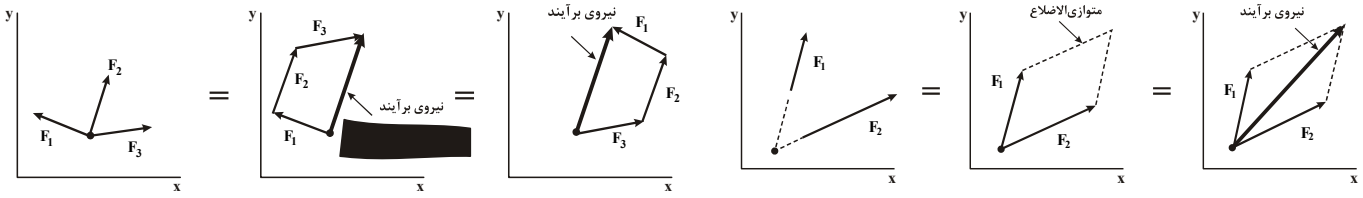
نمایش برداری نیرو

در صورتی که دو یا چند نیرو در یک نقطه تلاقی نمایند، نیروهای متقاطع نامیده می‌شوند. به علت خاصیت انتقال‌پذیری نیرو می‌توان نیروهای غیرمتقاطع و غیرموازی را معادل نیروهای متقاطع در نظر گرفت.



نیروهای مجزای غیرموازی و نیروهای معادل متقاطع

برآیند نیروها: تعیین برآیند چند نیرو ساده‌ترین شیوه برای نشان دادن اثر چند نیرو بر روی یک جسم می‌باشد.

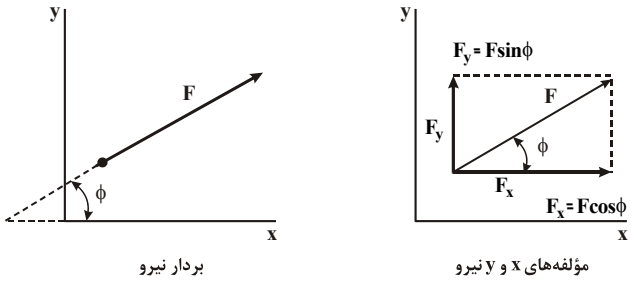


روش متوازی‌الاضلاع (برای دو نیرو) **روش ترسیمی (برای سه یا چند نیرو)**

روش‌های تعیین برآیند نیروهای چندتایی

مؤلفه‌های نیرو: از آنجایی که نیرو کمیت برداری است، قابل تجزیه به مؤلفه‌های افقی و عمودی است.

برای مثال، نیروی F را می‌توان به دو مؤلفه در امتداد محورهای x و y به صورت زیر تجزیه کرد:



تجزیه نیرو به مؤلفه‌های آن در جهت عمودی و افقی

نکته۱: اندازه بردار برآیند از روش زیر محاسبه می‌شود:

$$F^2 = F_x^2 + F_y^2 + 2F_xF_y\cos\phi$$

مثال۱: اگر برآیند دو نیروی مساوی $F_1 = F_2 = P$ برابر $\sqrt{3}P$ باشد، زاویه بین دو نیرو چند درجه است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۶)

۱) ۳۰ ۲) ۴۵ ۳) ۶۰ ۴) ۹۰

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» برآیند ۲ نیروی a و b که باهم زاویه θ دارند از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$R = \sqrt{(a^2 + b^2 + 2ab\times\cos\theta)}$$

با توجه به مقادیر داده‌شده داریم:

$$\sqrt{3}P = \sqrt{(P^2 + P^2 + 2P\times P\times\cos\theta} = \sqrt{(P^2(1+1+2\cos\theta))} = P\sqrt{(1+1+2\cos\theta)}$$

مقدار P از طرفین معادله حذف می‌شود و داریم:

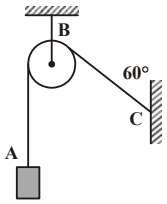
$$\sqrt{۳}=\sqrt{(۱+۱+۲\cos\theta)}$$

زمانی این تساوی برقرار است که زیر رادیکال‌ها باهم برابر باشند:

$$۳=۱+۱+۲\cos\theta \Rightarrow ۲\cos\theta=۳-۱-۱ \Rightarrow ۲\cos\theta=۱ \Rightarrow \cos\theta=۰/۵$$

بنابراین زاویه بین ۲ نیرو، ۶۰ درجه است.

مثال۲: دستگاه زیر، در حال تعادل است. اگر وزنه A، ۱۰ نیوتن باشد، نیروی کشش کابل BC چند نیوتن است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۳)



۱) ۱۵

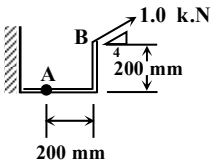
۲) ۱۰

۳) ۸/۶۶

۴) ۱۷/۲۴

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» وجود قرقره فقط باعث تغییر جهت کابل می‌شود و این تغییر جهت هیچ تغییری در نیرو به وجود نمی‌آورد، بنابراین نیروی کابل هم همان ۱۰ نیوتن خواهد بود.

مثال۳: در شکل زیر، گشتاور نیروی 1kN حول نقطه A چند کیلونیوتن میلی‌متر است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۰)



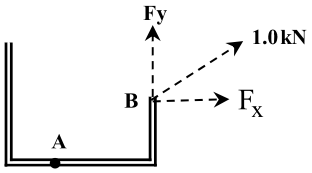
۱) $۱۰۰\sqrt{۲}$

۲) ۲۸۰

۳) ۴۰

۴) صفر

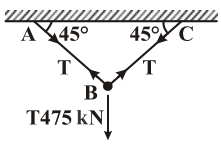
☑ **پاسخ:** گزینه «۳» گشتاور نیروها معمولاً به‌وسیله مشخص کردن گشتاور مؤلفه‌های آن حول محورهای x و y و z تعیین می‌گردد. گشتاور نیرو حول یک نقطه برابر با جمع جبری گشتاور مؤلفه‌های آن نیرو است.



$$M_a=F(r)=F_x(r_x)+F_y(r_y)$$

$$M_A=-\frac{۴}{۵}\times۱\times۲۰۰+\frac{۳}{۵}\times۱\times۲۰۰=-۱۶۰+۱۲۰=-۴۰$$

مثال۴: در شکل زیر نیروی ایجادشده در هر یک از میله‌های AB و BC برابر با چند کیلونیوتن است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۸۸)



۱) $\frac{۴۷۵}{۲\sqrt{۲}}$

۲) $\frac{۴۷۵}{۲}$

۳) $\frac{۴۷۵}{\sqrt{۲}}$

۴) $۴۷۵\sqrt{۲}$

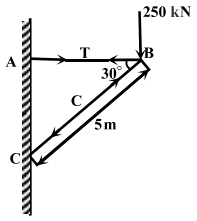
☑ **پاسخ:** گزینه «۳» با توجه به شکل صورت سؤال داریم:

$$\sum Fx \overset{\curvearrowleft}{=} ۰ \Rightarrow -ABCos۴۵=BCCos۴۵ \Rightarrow AB=BC$$

$$\sum Fy \overset{\curvearrowleft}{=} ۰ \Rightarrow -ABSin۴۵+ACSin۴۵=۴۷۵$$

$$AB=AC=T \Rightarrow ۲TSin۴۵=۴۷۵ \Rightarrow ۲T\frac{\sqrt{۲}}{۲}=۴۷۵ \Rightarrow T=\frac{۴۷۵}{\sqrt{۲}}$$

مثال۵: کدام عبارت در مورد شکل زیر صحیح است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۸۷)



۱) $C = ۲۵۰\,kN$

۲) $T = ۲۵۰\,kN$

۳) $C = ۵۰۰kN$

۴) $T = ۵۰۰kN$

☑ **پاسخ:** گزینه «۳»

$C\sin ۳۰ = ۲۵۰ \qquad T = C\cos ۳۰$

$C(\frac{۱}{۲}) = ۲۵۰ \qquad T = ۵۰۰(\frac{\sqrt{۳}}{۲})$

$C = ۵۰۰ \qquad T = ۲۵۰\sqrt{۳}$

قوانین حرکت نیوتن

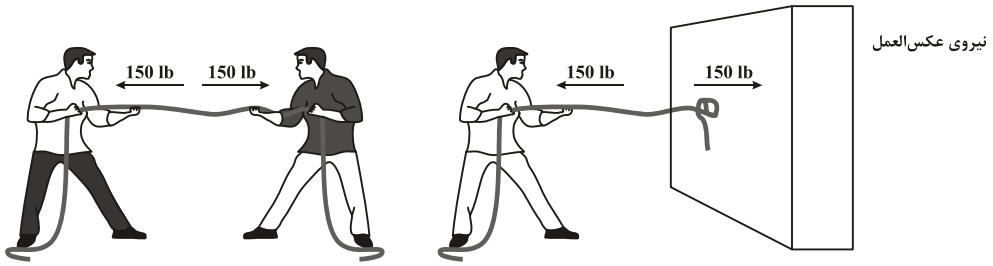
نیوتن سه قانون حرکت ارائه کرده است که رابطه‌ای مستقیم با چگونگی توصیف نیروها در فیزیک دارند.

قانون اول نیوتن: قانون اول نیوتن درباره شرایط لازم برای سکون بحث می‌کند؛ به ویژه «اینرسی» را تعریف می‌کند که به جرم یک جسم مربوط است. قانون اول بیانگر این است که اشیاء به حرکت خود در حالت سرعت ثابت ادامه خواهند داد، مگر اینکه تحت تأثیر یک نیروی نامتعادل خارجی قرار گیرند.

قانون دوم نیوتن: قانون دوم نیوتن، نیرو را به صورت حاصلضرب جرم m در شتاب a معرفی می‌کند: $F = ma$

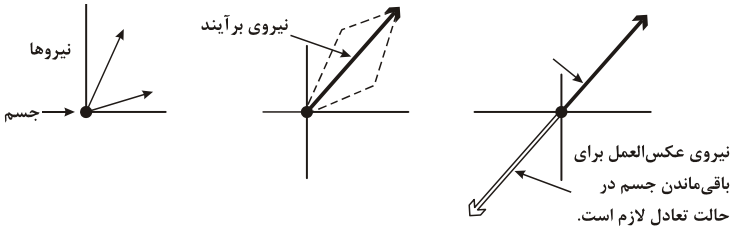
قانون سوم نیوتن: هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم نیرویی با همان اندازه و در جهت مخالف به جسم اول وارد می‌کند. این قانون بیان می‌کند که نیروها همواره به صورت عمل و عکس‌العمل رخ می‌دهند.

نیروی عکس‌العمل: بر اساس قانون سوم نیوتن: «برای هر عملی، عکس‌العملی برابر و در خلاف جهت وجود دارد». بر اساس این قانون می‌توان حالت‌های مختلف تعادل را بررسی نمود.

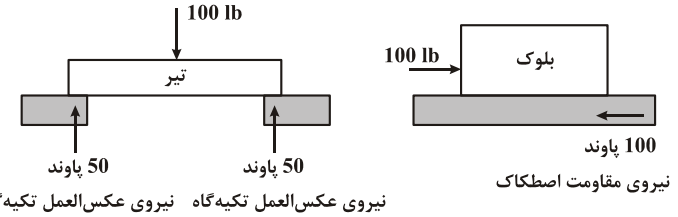


نیروی اعمال‌شده توسط فرد سمت راست همان اثر نیروی عکس‌العمل را دارد.

تعادل انتقالی: هنگامی که نیرو به یک جسم اثر می‌کند، باید نیرویی برابر و در جهت عکس نیروی عمل‌کننده وجود داشته باشد تا جسم در حالت تعادل باقی بماند. اگر تعادل انتقالی برقرار نباشد، جسم در حالت حرکت خواهد بود.



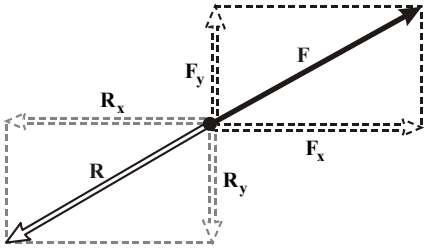
دو نیرو که بر یک جسم صلب اثر می‌کنند، برآیند آنها و نیروی عکس‌العمل مورد نیاز برای باقی ماندن جسم در حالت تعادل.



در تعادل انتقالی، مجموع نیروها در هر بُعد باید برابر صفر باشد.

در آنالیز نیروها، باید آنها را به مؤلفه‌های x و y و z در مختصات کارتزین تجزیه کرد. برای قرار داشتن اجسام در حالت تعادل انتقالی، جمع جبری بردارهای نیرو و عکس‌العمل آن در هر سه بُعد دستگاه مختصات باید صفر باشد:

$$\Sigma F_x = \circ \quad , \quad \Sigma F_y = \circ \quad , \quad \Sigma F_z = \circ$$

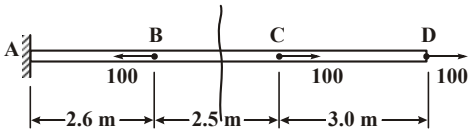


محاسبه مؤلفه‌های نیروی عکس‌العمل

$$F_x = F\cos\theta$$
$$F_y = F\sin\theta$$
$$\Sigma F_x = R_x + F_x = \circ$$
$$R_x = -F_x$$
$$\Sigma F_x = R_y - F_y = \circ$$
$$R_y = -F_y$$

$$R_x = R\cos\theta \ , \ R_y = R\sin\theta \Rightarrow R = \frac{R_x}{\cos\theta} \ , \ \frac{R_y}{\sin\theta}$$

مثال۶: میزان و نوع نیروی محوری در ناحیه BC از میله نشان داده‌شده در شکل چقدر است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۱)



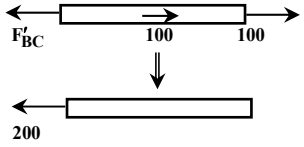
۱) صفر

۲) ۱۰۰ فشاری

۳) ۱۰۰ کششی

۴) ۲۰۰ کششی

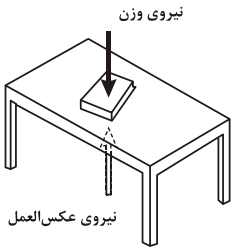
☑ **پاسخ:** گزینه «۴» برای تعیین اندازه و نوع نیروی محوری در ناحیه BC در آن ناحیه، برش می‌زنیم.



$$\Sigma F_x = \circ \Rightarrow -F'_{BC} + ۱۰۰ + ۱۰۰ = \circ \ \Rightarrow F'_{BC} = ۲۰۰$$

در ناحیه BC ذرات میله تحت نیروهای وارده تمایل به کشیدگی و جدا شدن دارند، در نتیجه میله در آن ناحیه تحت نیروی کششی است.

قانون هوک ـ عکس‌العمل ارتجاعی تکیه‌گاه



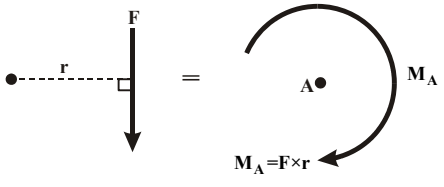
عکس‌العمل فنری‌شکل

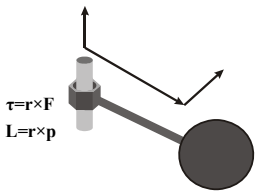
هنگامی که جسمی مانند یک کتاب به زمین سقوط می‌کند، به دلیل آن است که هیچ نیروی عکس‌العملی در برابر آن وجود ندارد. ولی اگر کتاب بر روی یک تکیه‌گاه مانند یک میز قرار گیرد، به علت فراهم‌شدن این نیروی عکس‌العمل توسط میز سقوط اتفاق نمی‌افتد و جسم به حالت تعادل باقی می‌ماند. تأثیر این نیروی عکس‌العمل قابل دیدن نیست، زیرا سطح میز سخت است و تأثیر نیروی وزن کتاب بر آن دیده نمی‌شود. ولی در واقع سطح بالای میز دارای قابلیت ارتجاعی بوده و به‌طور خیلی جزئی، مانند یک فنر در زیر بار، تغییر شکل می‌دهد.

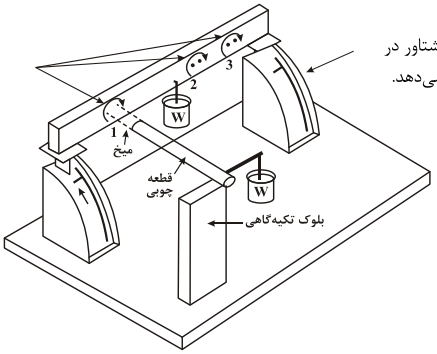
گشتاور

گشتاور نیرو، تمایل آن برای ایجاد چرخش در جسم است و برای یک نقطه معین در سازه برابر است با: فاصله عمودی نقطه مورد نظر تا راستای نیرو ضربدر بزرگی نیرو. گشتاور یک کمیت برداری است و یکای آن در سامانه بین‌المللی یکاها، نیوتن متر است. گشتاور حول نقطه A به صورت M_A نشان داده می‌شود.

$$M_A = F \times r$$



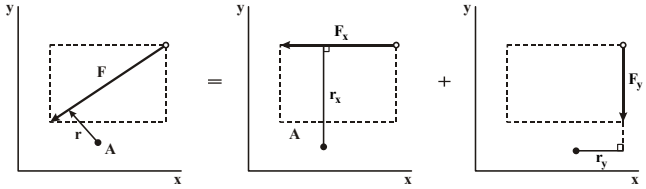




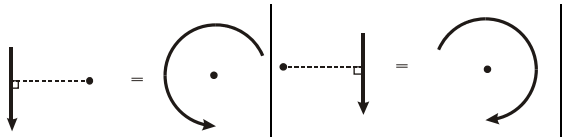
مدل نشان‌دهنده اثرات یک گشتاور که بدون ارتباط با محل اعمال در یک جسم ثابت باقی می‌ماند.

به صورت قراردادی { + گشتاور مثبت: حرکت در خلاف جهت عقربه‌های ساعت
− گشتاور منفی: حرکت در جهت عقربه‌های ساعت

ـ تعیین جهت مثبت و منفی اختیاری است و در هر صورت نتیجه کار یکسان است.



$$M_A = F(r) = F_x(r_x) + F_y(r_y)$$



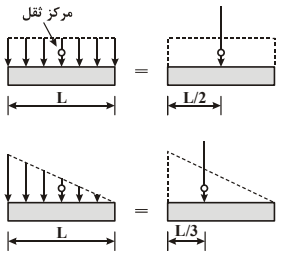
گشتاور منفی (تمایل به چرخش در جهت عقربه‌های ساعت)

گشتاور مثبت (تمایل به چرخش در خلاف جهت عقربه‌های ساعت)

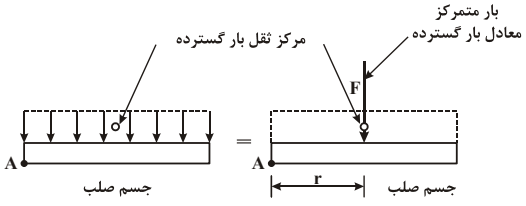
علامت‌های قراردادی گشتاور

نیروهای گسترده

نیرو می‌تواند به صورت گسترده در یک طول یا در یک سطح معین عمل نماید. واحد نیروهای گسترده واردشونده بر طول یک جسم نیوتن بر متر $(\frac{N}{m})$ و نیروهای وارد بر سطح نیوتن بر متر مربع $(\frac{N}{m^2})$ می‌باشد. نیروهای گسترده می‌توانند **یکنواخت** یا **غیریکنواخت** باشند. برای تعیین اثر نیروی گسترده بر یک جسم صلب، نیروی برآیند برابر با جمع بزرگی نیروها در گرانیگاه جسم در نظر گرفته می‌شود. گشتاور یک بار گسترده، برابر گشتاور نیروی متمرکز معادل آن است.



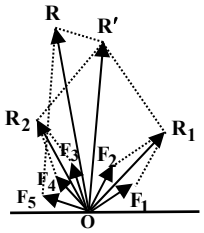
نیروهای گسترده و نیروهای متمرکز معادل که بر یک جسم صلب عمل می‌کنند.



$M_A = F(r)$

گشتاور یک بار گسترده

مثال ۷: در شکل زیر برآیند کل نیروهای وارده (F_1 تا F_5) عبارت است از: (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۸۷)



۱) R

۲) R'

۳) $R + R'$

۴) $R_1 + R_2$

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» هرگاه نیروهای F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 بر نقطه O وارد شده باشد، برای به‌دست آوردن برآیند آن‌ها از طریق ترسیم، نخست برآیند دو نیروی F_1 و F_2 را از قانون متوازی‌الاضلاع به‌دست می‌آوریم و آن را R_1 می‌نامیم و بعد برآیند دو نیروی F_3 و F_4 را به‌دست آورده و آن را R_2 می‌نامیم، سپس برآیند دو نیروی R_1 و R_2 را به‌دست آورده و آن را R' می‌نامیم و در نهایت برآیند دو نیروی R' و F_5 را به‌دست می‌آوریم و آن را R می‌نامیم. R عبارت است از: برآیند کل نیروهای F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 و در نتیجه نقطه O در جهت و راستای R شروع به حرکت تندشونده می‌کند.

مدرسان شریف

فصل دوم

«خرپا»

درسنامه (۱): مفاهیم بنیادی خرپا

تعریف خرپا

خرپا از اتصال میله‌های سبک به صورت مثلثی با اتصالات مفصلی به یکدیگر به وجود می‌آید.

خرپا، سازه‌ای صلب از واحدهای مثلثی‌شکل است که از اتصال اجزای باریک و بلند ساخته شده است. خرپاها توانایی تحمل نیروهای کششی و فشاری را دارند و در سقف‌ها، پل‌ها و سازه‌های هوا و فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این گونه سازه‌ها به علت عدم وجود نیروی برشی و لنگر خمشی، اتصالات باید به صورت مفصلی مدل شوند.

تعریف خرپای دوبُعدی: خرپا برحسب تعریف از مجموعه‌ای از اعضایی به وجود می‌آید که همگی در یک صفحه قرار داشته و ترکیب آنها یک شبکه مثلثی ایجاد نماید؛ چون در خرپاها فرض می‌شود که شکل مثلثی تنها شکل پایدار است.

نیروهای وارد بر خرپا باید در محل اتصالات (مفصل‌ها) به خرپا وارد شوند. در خرپا، بارها به وسیله ترکیبات مثلثی از اعضا به تکیه‌گاه‌ها منتقل می‌شود. همان‌طور که گفته شد، در اعضای خرپا فقط کشش و فشار (نه برش و نه خمش) ایجاد می‌شود و تمام نیروهای رانشی به صورت داخلی در آن خنثی می‌شوند. اعضای بالا و پایین خرپا میله‌های فوقانی و تحتانی خرپا نامیده می‌شود. تمامی اعضا بین میله فوقانی و تحتانی، **اعضای جان** خرپا نامیده می‌شوند.

نکات مهم

ـ در اتصال مفصلی امکان چرخش در نقاط انتهایی وجود دارد.

ـ در اعضای خرپا، تنها کشش و فشار ایجاد می‌شود.

ـ نیروها در خرپا به مفصل‌ها وارد می‌شوند (گره‌ها).

ـ خرپا مجموعه‌ای مثلثی است که بارها را به‌وسیله ترکیبی از اعضای با اتصالات مفصلی به تکیه‌گاه انتقال می‌دهد و بار در اعضای آن از نوع محوری است.

اتصالات خرپا به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱) صلب (ویرندیل) که مثلث نیست. ۲) مفصلی که به صورت مثلث است.

مثال۱: کدام مورد، نقش اساسی در رفتار خرپاها دارد؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۶)

۱) هندسه مثلثی‌شکل
۲) وارد نشدن نیرو بر اتصالات
۳) وجود مقاومت برشی مناسب در همه اعضا
۴) وجود مقاومت خمشی مناسب در همه اعضا

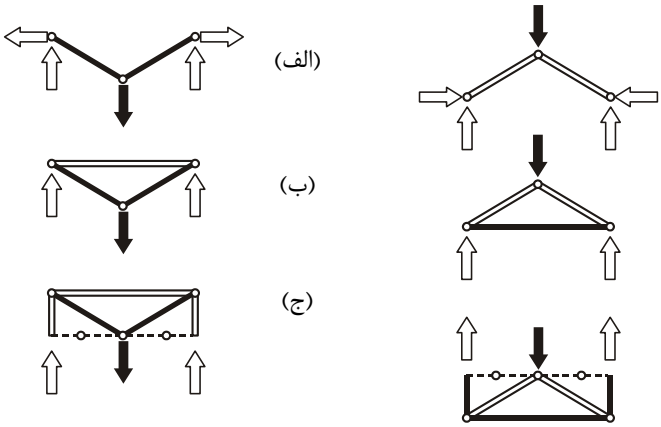
☑ **پاسخ:** گزینه «۱» خرپا (Truss) سازه‌ای صلب و مثلثی‌شکل است که اعضای آن مستقیم و بدون انحنا بوده و اتصال اعضای آن با یکدیگر به‌صورت مفصل (لولا) است. اگر اعضای خرپا همگی در یک صفحه موجود باشند به آن خرپا، خرپای صفحه‌ای می‌گویند. خرپاها توانایی تحمل نیروهای کششی و فشاری را دارند و تحت اثر نیروهای واردشده، تغییر هندسی نمی‌دهند مگر آنکه یکی از اعضای آن خم شود یا بشکند. به دلیل نوع اتصال اعضای خرپا به‌صورت مفصل با یکدیگر نیروی گشتاور در خرپا تأثیری ندارد و به همین دلیل خرپاها جزء سازه‌های ساده باربر محسوب می‌شوند که در پل‌ها، سقف‌ها، در سوله‌ها با دهانه‌های بلند و سازه‌های هوافضا کاربرد دارند. خرپاها به دلیل سه‌عضوی و مثلثی‌شکل بودنشان پایدار می‌باشند.

◆ ◆ ◆ ◆

مثال۲: چرا خرپا یک «سازه پربازده» محسوب می‌شود؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۸۹)

۱) زیرا می‌توان سقف‌های خرپایی را با پوشش‌های سبک پوشاند.
۲) چون در سقف‌های خرپایی امکان نورگیری در سقف وجود دارد.
۳) زیرا حاصل رفتار خرپا کشش و فشار در اعضای آن می‌باشد.
۴) به دلیل آنکه امکان مهاربندی سقف خرپایی در برابر نیروهای جانبی زلزله وجود دارد.

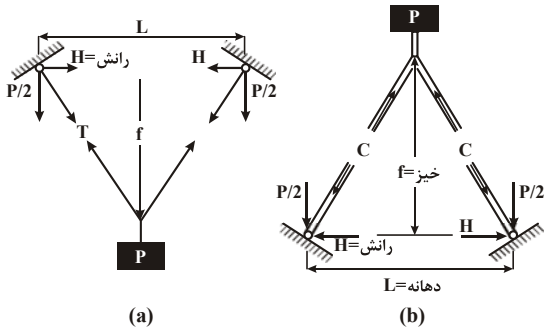
☑ **پاسخ:** گزینه «۳» خرپا مجموعه‌ای مثلثی‌شکل است که بارها را به‌وسیله ترکیبی مثلثی‌شکل از اعضا با اتصال مفصلی به تکیه‌گاه‌ها منتقل می‌نماید. در اعضای خرپا فقط فشار و کشش (نه برش و نه خمش) ایجاد می‌شود و تمامی نیروهای رانشی به‌صورت داخلی در آن خنثی می‌گردد.



خرپاها از میله‌های اتصال و گره‌ها حاصل می‌شوند. تمامی اتصالات در آن‌ها مفصلی هستند. میله‌ها تحت فشار و کابل‌ها تحت کشش می‌باشند. خرپاهای سمت راست معکوس خرپاهای سمت چپ هستند، توجه داشته باشید به دلیل اینکه نیروها در اعضا معکوس هستند، میله‌ها به تیرهای اتصال و vice versa تبدیل می‌شوند: (الف) واحد بنیادی کامل، (راست) تعادل معکوس یک قوس سه‌مفصلی اصلی، (ب) خرپای ساده که با افزودن میله افقی در برابر رانش درونی مقاوم گردیده است. (راست) خرپای معادل با افزودن میله افقی در برابر رانش خارجی مقاوم گردیده است، (ج) همین آرایش می‌تواند به وسیله تیرهای انتهایی به صورت عمودی ایجاد گردد (اعضای میله جدید تحتانی مستقیماً تحت تنش نبوده ولی به مقاومت جانبی نیازمند هستند).

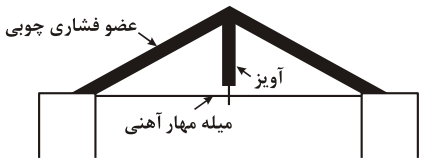
ساده‌ترین خرپا

یک کابل انعطاف‌پذیر که باری در وسط دهانه را تحمل می‌کند، یک سازه کششی محض است. اگر کابل را به طرف بالا ببریم و میله را سخت نماییم تا آمادگی تحمل نیروی فشاری را داشته باشد، ساده‌ترین خرپا را ایجاد نموده‌ایم.



خرپای مثلثی

در این خرپا می‌توان با پشت‌بندهایی از مصالح فشاری مانند مصالح بنایی یا به وسیله یک عنصر کششی، مانند میله رابط فولادی یا چوبی، رانش‌ها را جذب کرد. با بزرگ‌ترشدن دهانه، استفاده از یک آویز کارایی بهتری برای خرپا ایجاد می‌کند.
از چنین خرپاهای اولیه برای سقف و معابد یونان باستان و در قرون وسطی در کلیساها استفاده شده است.



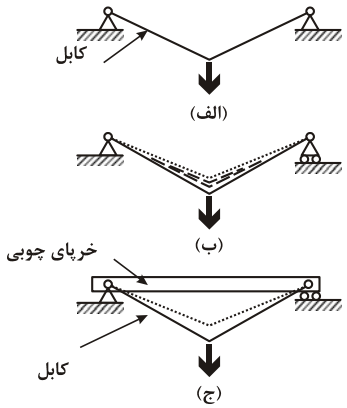
خرپای چوب آهن

اگر کابلی بین دو نقطه کشیده شده باشد، نیروی افقی به وسیله تکیه‌گاه‌ها (که ثابت شده‌اند) خنثی می‌شود. اگر یکی از تکیه‌گاه‌ها مفصلی و تکیه‌گاه دیگر غلتکی شوند، سیستم غیرپایدار می‌گردد؛ زیرا هر دو تکیه‌گاه می‌توانند عکس‌العمل نیروی عمودی را تحمل نمایند ولی تکیه‌گاه غلتکی به وسیله نیروی افقی کابل به سمت مرکز کشیده خواهد شد. ولی با وجود یک میله افقی، این مجموعه به عنوان یک خرپای ساده با هندسه مثلثی و دارای اتصالات گیردار و مقاومت درونی عمل می‌کند.

پایدار: تکیه‌گاه‌های مفصلی در برابر رانش مقاومت می‌کنند.

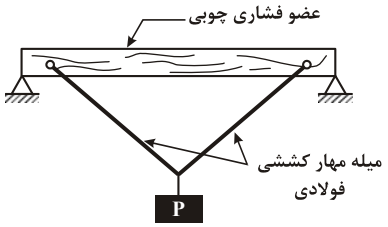
ناپایدار: با جایگزین‌شدن تکیه‌گاه‌های غلتکی مقاومت در برابر رانش از بین می‌رود.

پایدار: میله مهار چوبی با تشکیل یک خرپای ساده در برابر رانش داخلی مقاومت می‌نماید.



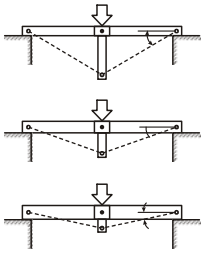
کابل بارگذاری‌شده در مرکز با (الف) تکیه‌گاه‌های مفصلی (پایدار)، (ب) تکیه‌گاه‌های غلتکی ـ مفصلی ناپایدار (به دلیل حرکت غلتک و عدم وجود مقاومت در برابر رانش افقی)، (ج) تکیه‌گاه‌های غلتکی مفصلی با میله افقی برای مقاومت در برابر رانش (پایدار).

خرپای چوب ـ آهن می‌تواند با افت مثبت ساخته شود و در آن از میله فولادی برای اعضای کششی و از چوب برای اعضای فشاری استفاده گردد.



خرپا با عضو رابط فشاری

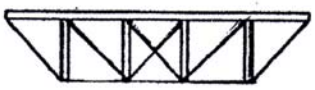
مثال ۳: تصاویر زیر نشان‌دهنده آن است که: (معماری ـ سراسری ۹۳)



۱) ترکیب کابل و چوب موجب کاهش نیروها در خرپاها می‌شود.
۲) ترکیب کابل و چوب موجب افزایش نیروها در خرپاها می‌شود.
۳) در خرپاها ارتفاع بیشتر به معنی نیروی کمتر و اقتصادی‌تر بودن سازه است.
۴) در خرپاها ارتفاع بیشتر به معنی افزایش نیروها و اقتصادی‌تر بودن سازه است.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» آنچه دیده می‌شود، یک خرپای ساده است که وزن بار در آن توسط عنصر عمودی به زنجیر منتقل می‌شود و زنجیر بار را به تکیه‌گاه‌های انتهایی منتقل می‌کند. عناصر، فقط پایداری در برابر رانش افقی وارده را بر عهده دارند. پس اگر ارتفاع عنصر عمودی کاهش یابد، زاویه زنجیر کم شده و نیروی رانش افقی و کشش زنجیر افزایش خواهد یافت. لذا باید یک زنجیر ضخیم‌تر و عنصر افقی با ارتفاع بیشتر استفاده شود ولی عنصر عمودی در مرکز خرپا باز هم فقط نیرویی برابر بار وارده را تحمل می‌کند. پس در صورتی که ارتفاع عنصر عمودی افزایش یابد، نیروهای داخلی کمتر، ضخامت تیر و زنجیر کمتر و خرپا بهینه‌تر خواهد بود.

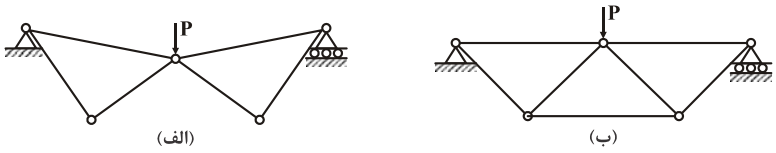
مثال ۴: در سازه‌های متشکل از چوب، عنصر سازه‌ای زیر چه نامیده می‌شود؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۰)



۱) تیر مرکب فولادی ـ چوبی
۲) قاب مرکب فولادی ـ چوبی
۳) خرپای مرکب فولادی ـ چوبی
۴) سقف چوبی مهارشده با فولاد

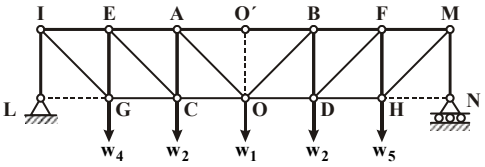
☑ **پاسخ:** گزینه «۳» شکل نشان داده‌شده یکی از گزینه‌های مختلف برای اعضای سازه‌ای چوبی در سیستم تیر ـ ستونی است.

خرپاهای متشکل از اعضای فشاری و کششی که برای پوشاندن دهانه‌های بزرگ به‌کار رفته‌اند، از ترکیب خرپاهای مثلثی اولیه به‌دست می‌آیند که اتصال اعضای آن‌ها مفصلی است؛ یعنی امکان چرخش در نقاط انتهایی آن‌ها وجود دارد. برای مثال، دو خرپای مثلثی با رئوس رو به پایین که در یکی از نقاط دیگرشان به هم متصل شده‌اند (شکل الف) قادر به تحمل باری نیستند، مگر اینکه میله‌ای کششی مانع از دور شدن دو رأس مثلث‌ها از هم شود و خرپایی با مثلث به‌دست می‌آید که قادر به پوشاندن دهانه بزرگ‌تری است (شکل ب).



خرپای ساخته‌شده از دو خرپای مثلثی

یک خرپای مثلثی که به‌طور مشابه ساخته شده است با اعضای فوقانی و اعضای قائم تحت فشار و اعضای تحتانی و اقطار تحت کشش در شکل مقابل نشان داده شده است. بار W_1 در وسط دهانه در امتداد اقطار کششی به نقاط A و B انتقال می‌یابد. عضو قائم OO' باری تحمل نمی‌کند.

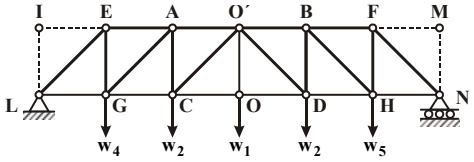


خرپای مثلثی با اعضای مورب کششی

همان‌طور که مشخص است، تفاوت در نوع تنش تحملی اعضای مورب به دلیل جهت‌گیری آن‌ها است.

نکته ۱: از خرپای مورب کششی معمولاً در پل‌های راه‌آهن استفاده می‌شود.

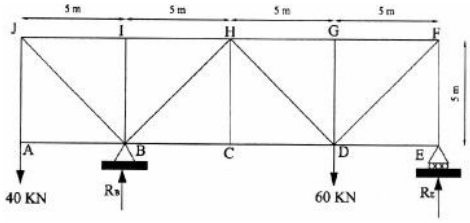
در صورتی که جهت اعضای قطری را معکوس کنیم، اعضای عمودی به‌صورت کششی و اقطار به‌طور فشاری کار می‌کنند.



خرپای مثلثی با اعضای مورب فشاری

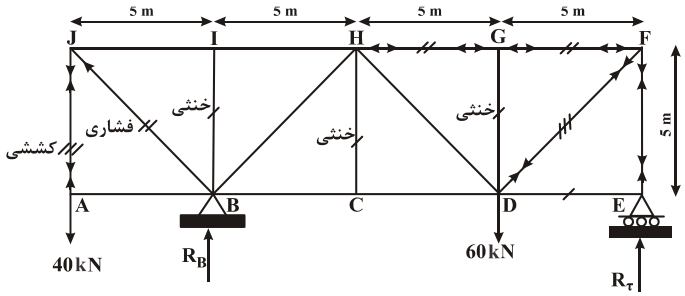
نکته ۲: از خرپای مورب فشاری معمولاً در پل‌های اتوبان استفاده می‌شود.

مثال۵: تمام موارد در خصوص خرپای شکل زیر صحیح هستند، به‌جز: (معماری ـ سراسری ۹۶)



۱) اعضای JB و JI از نوع کششی می‌باشند.
۲) مقدار نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه B از تکیه‌گاه E بیشتر است.
۳) عضو کششی AJ نیرویی برابر ۴۰ کیلونیوتن را تحمل می‌کند.
۴) تعداد سه عضو از اعضای عمودی خرپا، هیچ نیروی داخلی را تحمل نمی‌کنند.

☑ **پاسخ:** گزینه «۱»



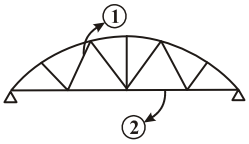
$$R_E = (۴۰+۶۰) - ۷۳/۳ = ۲۶/۷$$

$$R_B = \frac{۶۰\times۵ + ۴۰\times۲۰}{۱۵} = \frac{۱۱۰۰}{۱۵} = ۷۳/۵۳$$

در گره A ، $J_A = ۴۰kw$ ، $F_y = ۰$

عضو JB، HC، GD خنثی هستند. عضو JB عضو فشاری است.

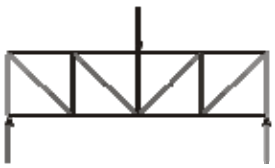
مثال۶: با توجه به شکل، در صورتی که بارهای قائم یکسان بر گره‌های پایینی خرپا وارد شوند، کدام عبارت در مورد اعضا شماره ۱ و ۲ صحیح است؟
(هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۶)



۱) هر دو عضو فشاری هستند.
۲) هر دو عضو کششی هستند.
۳) عضو یک کششی و عضو دو فشاری است.
۴) عضو یک فشاری و عضو دو کششی است.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» با اعمال بارهای قائم بر گره‌های پایینی خرپا، تمامی اعضای زیرین، تحت فشار و تمامی اعضای مورب، تحت کشش قرار می‌گیرند.

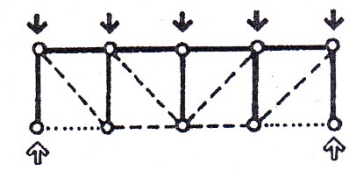
مثال۷: با توجه به تصویر زیر کدام عبارت صحیح است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۴)



۱) تمامی اعضای عمودی تحت کشش هستند.
۲) تمامی اعضای مورب تحت کشش هستند.
۳) تمامی اعضای مورب تحت فشار هستند.
۴) عضو با نیروی صفر وجود ندارد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» در این خرپا تمامی اعضای مورب کششی، اعضای عمودی فشاری و اعضای افقی بالا و پایین نیز به ترتیب فشاری و کششی هستند. باید این خرپا را در ابتدا شبیه به یک تیر در نظر بگیرید. اعضای مورب در اینجا شبیه به کابل و اعضای عمودی در اینجا شبیه به ستون فشاری عمل می‌کنند.

مثال۸: در خرپای زیر تمامی اعضای ..... هستند. (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۱)



۱) فوقانی دارای نیروی فشاری
۲) تحتانی تحت تأثیر تنش کششی
۳) مورب دارای نیروی فشاری
۴) قائم تحت تأثیر تنش کششی

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» چنانچه خرپا را مانند یک تیر تحت همان بارگذاری مدل‌سازی کنیم، با مشاهده تغییر شکل تیر مشخص است که کلیه اعضای فوقانی دارای نیروی فشاری هستند. گزینه (۲) نادرست است؛ زیرا دو عضو از اعضای تحتانی صفر نیرویی هستند.

درسنامه (۲): انواع خرپا

خرپاها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود:

۱ـ خرپای ساده

سازه‌ای دوبُعدی است که در آن انتقال بار در مجموعه‌های مثلثی و به شکل فشار یا کشش در اعضا صورت می‌گیرد. اعضای بالا و پایین خرپا به‌ترتیب میله فوقانی و تحتانی خرپا نامیده می‌شوند. تمامی اعضای بین میله‌های فوقانی و تحتانی اعضای جان خرپا هستند. خرپاهای مسطح تمامی اعضا در یک سطح قرار دارند.

۲ـ سازه‌های فضاکار

سازه فضاکار، خرپای سه‌بُعدی است.

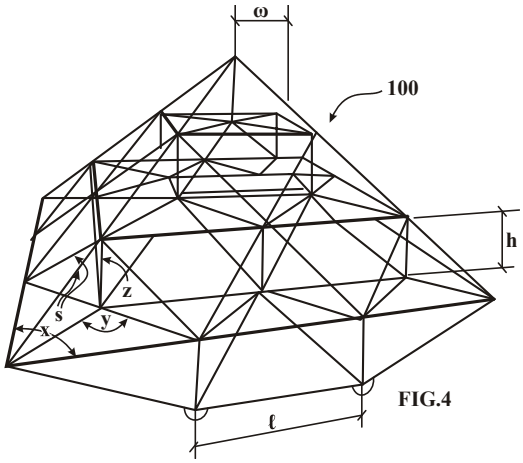
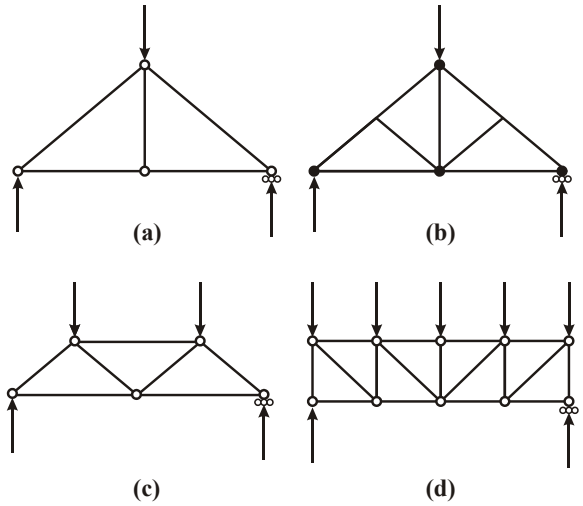
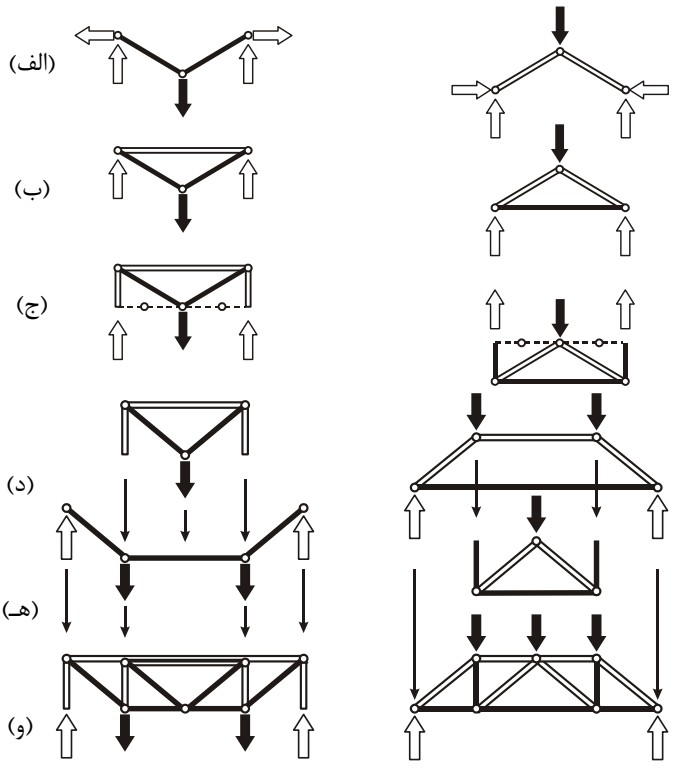


FIG.4



خرپای ساده



سازه‌های فضاکار

روش زیر پیچیده‌تر کردن و تکامل مرحله به مرحله خرپا را نشان می‌دهد:

در شکل مقابل خرپاهای سمت راست و چپ معکوس یکدیگرند.

الف: واحد بنیادی کابل و تعادل معکوس آن در یک قوس سه‌مفصلی.

ب: خرپای ساده که با افزودن میله افقی برای مقاومت در برابر نیروی رانش مقاوم گردیده است.

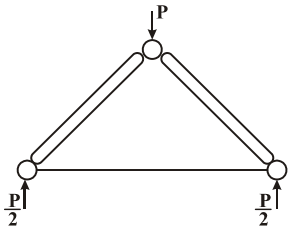
ج: آرایش حالت (ب) می‌تواند به وسیله تیرهای انتهایی به صورت عمودی ایجاد شود. اعضای میله جدید تحتانی مستقیماً تحت تنش نبوده ولی به مقاومت جانبی نیاز دارند.

د: با فرض اینکه کل مجموعه نشان داده‌شده در حالت (ج) با تیر اتصالی دیگری حمل شوند، می‌توان خرپا را پیچیده‌تر نمود، زیرا به میله افقی دیگری برای مقاومت در برابر رانش‌های تیر اتصالی جدید نیاز است.

هـ: این مراحل را می‌توان تکرار نمود.

و: بزرگ‌ترین نیروها در میله‌های فوقانی و تحتانی در میانه دهانه واقع می‌شوند که در آن‌ها میله‌های منفرد یکی می‌شود.

مثال۹: در تصویر زیر، کدام عبارت در مورد نحوه تحمل نیروها صحیح است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۴)



۱) نیروی برشی فقط در تکیه‌گاه‌ها

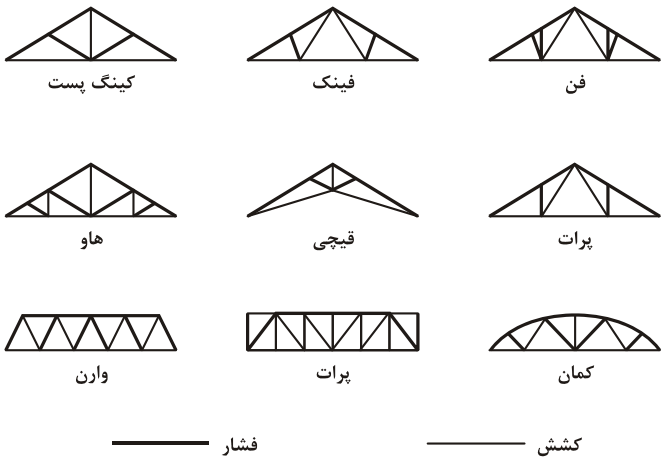
۲) نیروی عمودی در تیر مایل و نیروی برشی در تکیه‌گاه‌ها

۳) نیروی افقی در تکیه‌گاه‌ها و نیروی کششی در تیر اتصالی

۴) نیروی عمودی در تیر مایل و نیروی کششی در تیر اتصالی

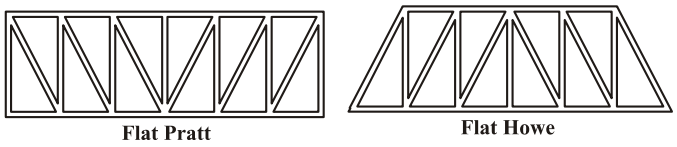
☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در این سازه تیر مایل تحت فشار (نیروی عمودی) است اما علاوه بر آن متأثر از نیروی P و عکس‌العمل‌های تکیه‌گاه که در جهت خلاف هم هستند، تحت تنش برشی نیز می‌باشند. عنصر افقی که به تیر اتصالی خطاب شده، رانش رو به بیرون را کنترل می‌کند که تحت تأثیر این رانش رو به بیرون تحت تنش کششی است.

اسامی خرپاهای معروف



انواع خرپاها

مثال۱۰: در اثر وارد شدن نیروهای عمودی بر خرپاهای زیر، اعضای مورب کدام خرپا همواره تحت کشش قرار می‌گیرند؟(هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۳)



۱) Flat Pratt

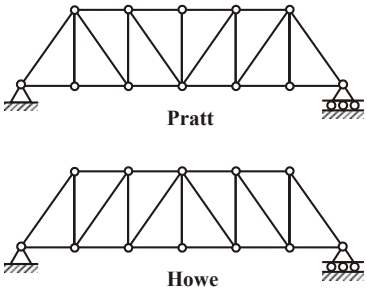
۲) Flat Howe

۳) هر دو خرپا

۴) هیچ‌یک از این دو خرپا

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» فرض کنید اعضای موربی را که تحت کشش هستند، کابل انتخاب می‌کنیم و اعضای مورب تحت فشار را قوس؛ حالا می‌توانید با نگاه دوباره به دو خرپا ببینید که اعضای مورب خرپای Flat Howe شبیه قوس هستند و اعضای مورب خرپای Flat pratt شبیه کابل می‌باشند.

مثال۱۱: اعضای مورب کدام‌یک از خرپاهای زیر در اثر نیروهای قائم (عمودی) تحت کشش قرار می‌گیرند؟ (معماری ـ سراسری ۹۴)



۱) Pratt

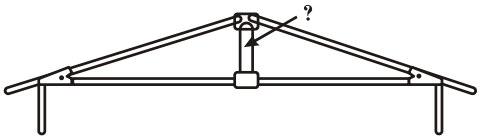
۲) Howe

۳) هر دو خرپا

۴) در بعضی موارد خرپای Howe و در بعضی موارد خرپای Pratt

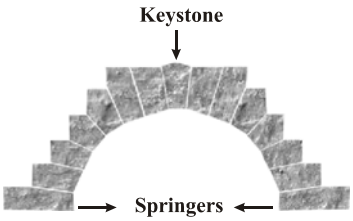
☑ **پاسخ:** گزینه «۱» اگر به اعضای مورب خرپای Pratt نگاه کنید، شبیه کابل می‌باشند و اعضای مورب خرپای Howe شبیه قوس‌اند و می‌توان حدس زد که به ترتیب کششی و فشاری هستند. اما به این نکته باید دقت کرد که برای تمامی اعضا صدق نمی‌کند. اعضای مورب راست و چپ خرپای پرات فشاری هستند اما از آنجایی‌که غالب اعضای مورب آن کششی می‌باشند، بنابراین گزینه (۱) صحیح است.

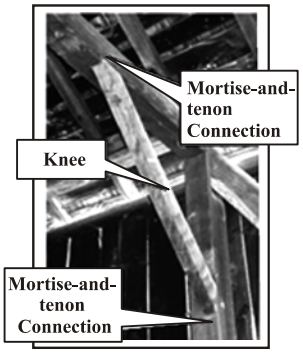
مثال ۱۲: کدام اصطلاح، باید در محل علامت سؤال قرار گیرد؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۸)

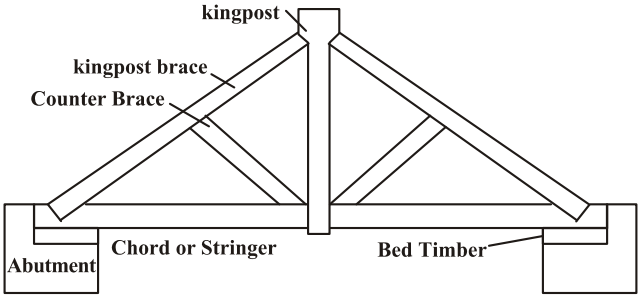


۱) King Post
۲) Knee Brace
۳) Key Stone
۴) Ceiling Joist

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» با توجه به تصاویر ارائه‌شده، گزینه (۱) یعنی King post صحیح است.
Ceiling Joist مربوط به اتصالات سقف است، Key Stone مربوط به سنگ کلیدی یا همان سنگ تاج در سقف‌هایی با متریال سنگ است و Knee Brace هم مربوط به زانویی زیر تیر سقف است (رد گزینه‌های ۲ ، ۳ و ۴).



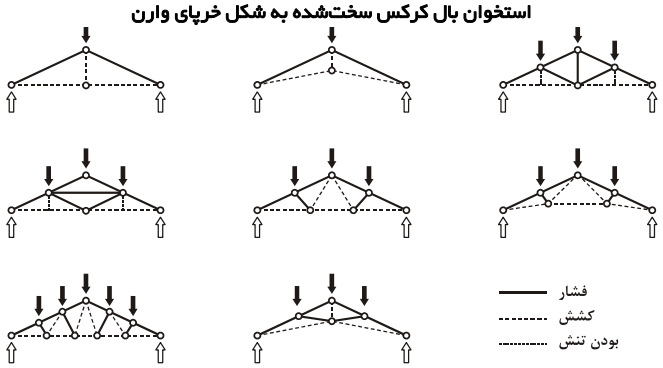




نمونه‌ای از خرپا در طبیعت در شکل مقابل نشان داده شده است:

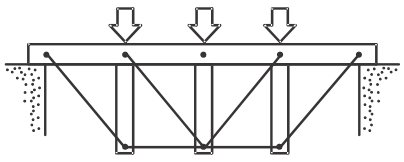
استخوان بال کرکس سخت‌شده به شکل خرپای وارن

اعضای کششی و فشاری در یک خرپای ساده در شکل مقابل نشان داده شده است:



اعضای کششی و فشاری در خرپاهای مثلثی

مثال ۱۳: در سازه زیر اعضای قطری ..... هستند. (معماری ـ سراسری ۹۲)



۱) همگی فشاری
۲) هم کششی و هم فشاری
۳) دارای نیروی صفر
۴) همگی کششی

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» یک خرپای ایده‌آل برای سه بار متمرکز به طریق مشابهی می‌تواند توسعه یابد. این خرپا از نظر مکانیکی بسیار باصرفه‌تر است اما اگر تمام عناصر عمودی دارای طول یکسان باشند، ساختن آن آسان‌تر خواهد بود و می‌توان آن را با عناصر اتصالی قطری یا عناصر عمودی در هر بخش از خرپا برای اطمینان از ایجاد تعادل جایگذاری کرد. دقت کنید که هر عضو قطری ممکن است با یک عضو کششی یا یک عنصر عمودی فشاری جایگزین شود. با توجه به جهتی که به هر عضو داده می‌شود، یک عضو باید در قطر مخالف هر قسمت به نسبت دیگری قرار گیرد.

مدرسان شریف

فصل سوم

«سیستم‌های کششی (کابلی و پارچه‌ای)»

مقدمه

اصطلاح سازه‌های کششی به سازه‌های معلق یا کششی پارچه‌ای بازمی‌گردد که در آن‌ها، عناصر کششی وظیفه تحمل بارها و انتقال آن‌ها به تکیه‌گاه‌ها را دارد. اجزای اصلی که همان کابل‌ها هستند، به صورت کششی عمل می‌کنند. در این سازه یک دکل قائم یا مایل به صورت متقارن یا نامتقارن وظیفه مهار نیروی کششی کابل‌ها و تبدیل آنها به تنش فشاری و انتقال آن به پی را به عهده دارد.

در بین تمامی سازه‌های موجود، سازه‌های کابلی گسترده‌ترین دهانه را با طول بیش از ۵۰۰ متر پوشش می‌دهد. سازه‌های کابلی بخشی از سیستم‌های سازه با عملکرد کششی هستند. این سازه برای طراحی پل‌ها پوشش دهانه‌های بزرگ، سقف‌ها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دسته از سازه‌های انعطاف‌پذیر با اتصالات غیر صلب‌اند که در آنها نیروها از طریق طراحی فرم ویژه و پایدارسازی فرم مشخصه توزیع می‌شوند.

اجزای اصلی سازه‌های کابلی همواره تحت تأثیر یکی از انواع تنش‌های محوری عمود بر سطح قرار دارند: الف) تنش فشاری ب) تنش کششی.

کابل، عضو کششی نازکی است که ضمن مقاومت کششی در مقابل نیروهای فشاری مقاومتی ندارد، مانند: سیم فلزی یا طناب.

کابل‌ها انعطاف‌پذیرند، زیرا قطر آن‌ها در مقابل طولشان خیلی کوچک است. انعطاف‌پذیری نمایانگر مقاومت خمشی محدود است، زیرا انعطاف‌پذیری از تنش‌های نامساوی حاصل از خمش جلوگیری کرده و بارهای کششی را به طور یکسان میان رشته‌های کابل تقسیم می‌کند. این کار موجب می‌شود رشته‌های کابل تا حد مجازشان تحت تأثیر تنش واقع گردند. مقاومت کششی زیاد فولاد همراه با کارایی کشش ساده باعث می‌شود که کابل فولادی به عنوان یک عنصر سازه‌ای ایده‌آل برای پوشاندن دهانه‌های بزرگ استفاده شود.

با بیان این مقدمه در بخش اول این فصل به مفاهیم سازه‌های کابلی و تحلیل رفتار آن پرداخته می‌شود. هدف از این فصل، دانستن مفاهیم زیر است:

۱ـ ویژگی‌های عمومی سازه‌های کابلی، ۲ـ سازه‌های کابلی با فرم خطی، ۳ـ تشخیص نوع سازه کابلی در مطالعات موردی.

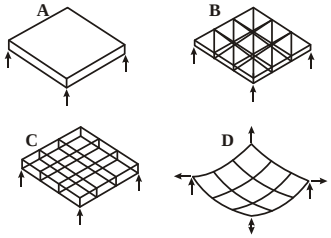
درسنامه (۱): انواع فرم‌های سازه‌های کابلی و بررسی رفتار آن‌ها

سازه‌های کابلی را به دو حالت کلی می‌توان تقسیم نمود:

۱ـ کابل‌های خطی: بار به صورت نقطه‌ای بر آن‌ها وارد می‌شود.

۲ـ کابل‌های معلق با فرم منحنی طنابی: کابل‌هایی که بار به طور یکنواخت بر طول آن‌ها وارد می‌شود، زنجیروار نامیده می‌شوند.

مثال۱: کدام طرح، به‌ترتیب معرف شبکه کابل و سازه فضاکار است؟ (معماری ـ سراسری ۹۵)

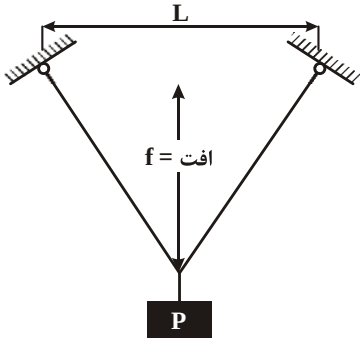


۱) B و D
۲) C و D
۳) B و A
۴) D و A

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» شکل D دارای سه ویژگی اصلی شبکه کابلی می‌باشد که شامل: ۲ بعدی بودن، خطوط متقاطع که یک شبکه را تشکیل می‌دهند و در نهایت لبه‌های بیرونی منحنی که از تنش کششی حداکثر در این بخش سازه به‌وجود آمده‌اند، تشکیل می‌شود. با توجه به ویژگی‌های مذکور، شکل D از نوع شکل کابلی است. اما سازه فضاکار سه‌بُعدی است و هندسه تشکیل‌دهنده آن مثلث است تا اعضا تحت نیروهای فشاری و کششی باشد و متعاقباً تمامی اتصالات آن مفصلی باشد. بنابراین با توجه به چنین ویژگی‌های ساختاری، شکل B می‌تواند یک سازه فضاکار باشد. اما سازه C با توجه به هندسه مربع مستطیل، از نوع قاب سه‌بُعدی با اتصال صلب و سازه A یک دال دوبُعدی بتنی می‌باشد.

کابل‌های خطی

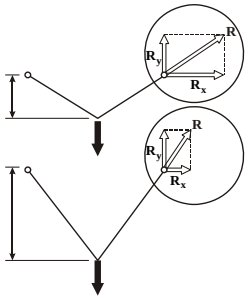
سیم‌های فلزی، رشته‌ها و میله‌های باریک مثال‌هایی از اعضای کششی هستند که رفتاری مانند کابل دارند. این نوع سازه‌ها ضمن مقاومت کششی در برابر نیروها، در برابر فشار مقاومتی ندارند. کابل‌ها، انعطاف‌پذیرند چون قطر آن‌ها در مقابل طولشان خیلی کوچک است. برای درک مکانیزم تحمل بارهای عمودی توسط کابل، اولین حالتی که در نظر می‌گیریم، کابل کشیده‌شده میان دو نقطه ثابت هم‌تراز است که یک بار متمرکز را در وسط دهانه تحمل می‌کند.



بار متقارن بر کابل

در زیر چنین باری کابل از وسط خم می‌شود و هر نیمه از کابل نیمی از وزن بار را توسط کشش ساده به تکیه‌گاه منتقل می‌کند.

با توجه به اینکه وزن کابل در برابر بار وارده ناچیز است، کابل شکل V به خود می‌گیرد. اگر تکیه‌گاه‌ها به یکدیگر نزدیک شوند و شیب کابل هم زیاد باشد، نیروی کششی در کابل تقریباً برابر نصف بار وارده خواهد بود. نیروی مؤلفه عمودی ثابت و افقی با نزدیک‌شدن شیب به خط افق افزایش پیدا می‌کند. غالب سیستم‌های مهارشده با کابل به گونه‌ای طراحی می‌شوند که دکل‌های نگهدارنده آن‌ها با اتصال صلب به پی متصل شده‌اند. توجه کنید که مجموعه مؤلفه‌های عمودی عکس‌العمل بدون توجه به شیب ثابت باقی می‌ماند (مجموع آن‌ها با بار عمودی برابر است). مؤلفه اصلی عکس‌العمل (رانش) با نزدیک شدن شیب به خط افق، افزایش می‌یابد. نیروی کششی در کابل همیشه برابر برآیند مؤلفه‌های عمودی و افقی نیروی عکس‌العمل است.



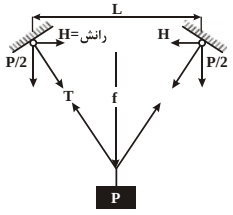
افت کمتر رانش افقی بزرگ‌تر (R_X) عکس‌العمل عمودی (R_Y) ثابت باقی می‌ماند.

افت بیشتر رانش افقی کمتر (R_X) عکس‌العمل عمودی (R_Y) ثابت باقی می‌ماند.

کابل با شیب زیاد، متوسط و کم

بدون افت، کابل نمی‌تواند باری را تحمل کند؛ زیرا در آن صورت نیروهای کششی ایجادشده در کابل، افقی خواهد بود و هیچ نیروی افقی نمی‌تواند با یک نیروی عمودی در تکیه‌گاه متعادل شود. نیروی مایل در کابل در محل هر تکیه‌گاه می‌تواند به صورت ترکیب دو نیرو در نظر گرفته شود:

۱ـ یک نیروی عمودی که برابر نصف بار است، ۲ـ یک کشش افقی درونی یا رانش.

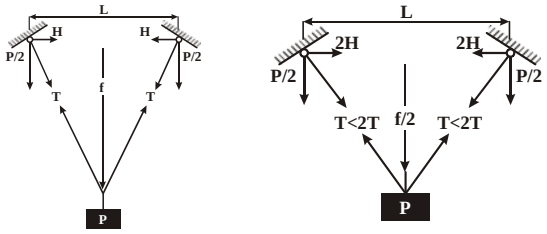


رانش کابل

نکته ۱: اگر تکیه‌گاه‌ها در برابر جابه‌جایی‌های افقی ثابت نبودند، تحت تأثیر نیروهای رانش به داخل حرکت می‌کردند و دو نیمه کابل به‌صورت عمودی قرار می‌گرفتند.

نکته ۲: رانش نسبت معکوس با افت دارد. با نصف کردن افت، رانش نخ دو برابر می‌شود.

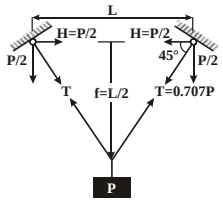
برای ایجاد تعادل عمودی، کشش عمودی هر نیمه کابل همواره برابر با نصف بار و مستقل از افت است.



تغییرات رانش کابل با افت

افت بیشتر طول کابل را افزایش می‌دهد، اما نیروی کششی را در کابل کاهش می‌دهد و از این رو سطح مقطع آن کم می‌شود. افت کمتر، موجب کاهش طول کابل می‌گردد، اما به سطوح مقطع بزرگ‌تری احتیاج دارد؛ زیرا نیروی کششی بیشتری در کابل ایجاد می‌شود.

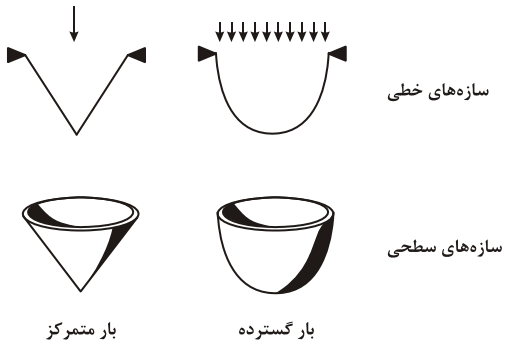
اقتصادی‌ترین یا بهترین افت برای یک دهانه افقی مشخص بین دو تکیه‌گاه ثابت برابر نصف دهانه و به صورت قرینه است. در این حالت، کابل شکلی مثلثی با زاویه ۴۵ درجه پیدا می‌کند و رانش نخ برابر با نیمی از بار است.



بهترین افت

سازه معلق با فرم منحنی طنابی

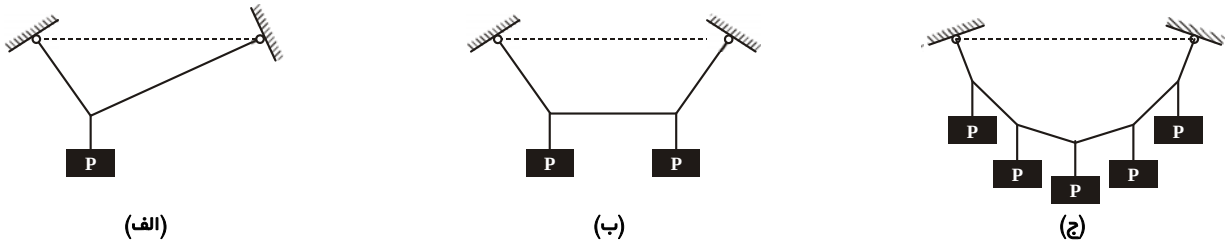
کابل‌هایی که بار به‌طور یکنواخت بر طول آن‌ها وارد می‌شود، زنجیروار نامیده می‌شوند.



سازه‌های معلق با فرم منحنی طنابی

اگر بار را از وسط دهانه به نقاط دیگری انتقال دهیم، شکل کابل تغییر می‌کند. کابل برای تحمل بار به‌صورت کششی لازم است با بارگذاری‌های متفاوت خود را وفق دهد که این کار را با به‌دست آوردن امتدادهای مختلف و اضلاع مستقیم (برای تحمل کشش) انجام می‌دهد (شکل الف). اگر دو بار یکسان در دو مکان قرینه روی کابل قرار گیرند، کابل دوباره خود را با بارگذاری جدید وفق می‌دهد و بارها را با به‌دست آوردن سه ضلع مستقیم تحمل می‌کند (شکل ب).

اگر تعداد بارهای متصل به یک کابل افزایش یابد، کابل ترکیب متعادل تازه‌ای به خود می‌گیرد که دارای اضلاع مستقیم بین بارها و تغییر جهت در نقطه بارهاست. شکل به‌دست آمده کابل، تحت تأثیر بارهای متمرکز را **چندضلعی طنابی** می‌گویند (شکل ج). با افزایش تعداد بارهای وارده بر کابل، تعداد اضلاع نیز افزایش یافته و در نهایت شکل کابل به یک منحنی پیوسته نزدیک خواهد شد. اگر بتوان بر کابل تعداد نامتناهی از بارهای بی‌نهایت کوچک وارد کرد، چندضلعی طنابی به **منحنی طنابی** تبدیل می‌شود.



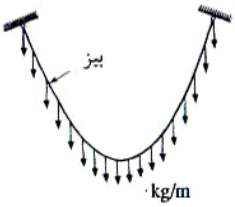
چندضلعی‌های طنابی

چندضلعی طنابی تحت تأثیر مجموعه‌ای از بارهای یکنواخت که در جهت افقی هم‌فاصله هستند، به منحنی سهمی نزدیک می‌شود.

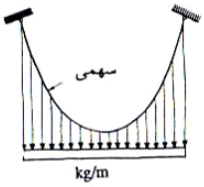
اگر بارها به جای اینکه به طور افقی هم‌فاصله باشند، در طول کابل در فواصل مساوی قرار گیرند، منحنی بیز یا زنجیروار خواهد بود که شکل آن اندکی با سهمی متفاوت است. همچنین فرم منحنی طنابی برای یک کابل **بدون بارگذاری** که فقط تحت تأثیر وزن کابل می‌باشد، **زنجیروار** خواهد بود.

در عمل عبارت زنجیروار برای هر عضو معلق منحنی‌شکل که در طول آن بارگذاری شده، صرف نظر از نحوه توزیع بارها به کار می‌رود.

(ج)
مقایسه سهمی و بیز



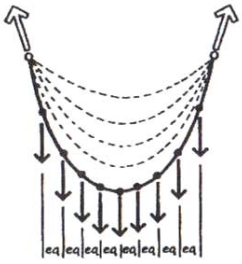
(ب)
بارگذاری یکنواخت با فواصل مساوی در طول کابل



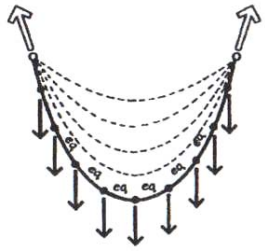
(الف)
بارهای یکنواخت با فواصل مساوی در جهت افقی

منحنی‌های طنابی

در منحنی بیز، فاصله بارها در طول کابل برابر است. در جایی که نسبت دهانه به خیز بیشتر از ۵ است، هر دو فرم سهمی و زنجیرواره به‌طور نزدیکی یکسان و شبیه هستند.



(ب) سهمی



(الف) زنجیرواره

فرم منحنی‌های طنابی برای بارهای گسترده بر روی کابل‌های معلق: (الف) زنجیرواره برای بارهایی که در طول منحنی کابل یکنواخت هستند و (ب) سهمی برای بارهایی که به صورت یکنواخت در یک دهانه افقی وارد می‌شوند.

مثال ۲: در شکل زیر منحنی سهمی و منحنی بیز به ترتیب ناشی از تأثیر کدام نیروها بر کابل است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۰)

۱) بارهای یکنواخت در طول افقی و بارهای یکنواخت در طول کابل

۲) بارهای یکنواخت در طول کابل و بارهای یکنواخت در طول افقی

۳) بارهای گسترده با توزیع سهمی و بارهای گسترده با توزیع یکنواخت

۴) بارهای گسترده با توزیع مثلثی و بارهای گسترده با توزیع سهمی

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» شکل چندضلعی طنابی تحت تأثیر بارهای یکنواخت که در جهت افقی هم‌فاصله هستند، سهمی و اگر بارهای یکسان در طول کابل در فواصل یکسان قرار گیرند، شکل چندضلعی طنابی بیز می‌باشد.

نکته ۳: محدودیت در کاربرد کابل‌ها به طور مستقیم به این علت است که با تغییر بار، شکل آن‌ها نیز تغییر می‌کند.

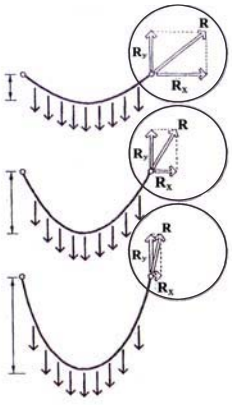
نکته ۴: کابل‌ها ناپایدار هستند و یکی از الزامات اساسی در سیستم‌های ساختمانی پایداری است، بنابراین از کابل‌ها در سازه‌های کوچک استفاده نمی‌شود. خرپای آویزان از کابل‌های پل معلق، نه‌تنها به منظور تحمل سواره‌رو بلکه به‌عنوان مهارکننده حرکت‌های ناشی از تغییر بار در کابل‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نکته ۵: سازه‌های مهارشده با کابل، معمولاً دهانه‌های افقی ساختمان‌ها را به‌وسیله کابل‌های قطری معلق از یک تکیه‌گاه بلندتر می‌پوشانند.

رانش در سازه‌های کششی

برای یک بارگذاری معین، میزان خیز در یک سازه کششی از نوع زنجیرواره، مقدار رانش افقی ایجادشده به سمت داخل را تعیین می‌کند. هرچه انحنا کمتر باشد، رانش درونی بیشتر خواهد شد.

نیروهای کابلی نسبت عکس با خیز دارند. با کاهش طول کابل، قطر آن باید افزایش یابد. یک کابل کوتاه با حداقل خیز، به علت وجود نیروهای کششی بسیار بزرگ به قطر زیادی نیاز دارد. برعکس یک کابل با خیز بسیار زیاد می‌تواند قطر کوچکی برای تحمل نیروهای کششی کم داشته باشد.



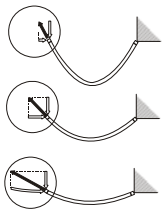
حداقل خیز
حداکثر رانش افقی (R_x)
عکس‌العمل عمودی (R_y)
ثابت باقی می‌ماند

حداقل خیز
حداکثر رانش افقی (R_x)
عکس‌العمل عمودی (R_y)
ثابت باقی می‌ماند

عکس‌العمل‌های رانشی و فشاری نسبت عکس با عمق میزان خیز کابل دارد.

مثال ۳: در سازه‌های کابلی با کاهش خیز کابل، به ترتیب مؤلفه عمودی عکس‌العمل و مؤلفه افقی چه تغییری می‌یابند؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۶)

۱) ثابت ـ کاهش ۲) ثابت ـ افزایش ۳) کاهش ـ کاهش ۴) کاهش ـ افزایش

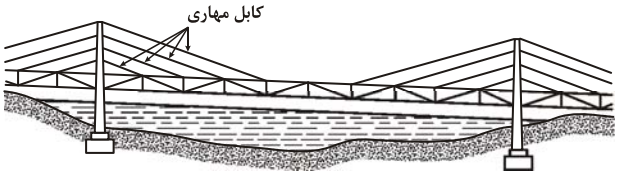


☑ **پاسخ:** گزینه «۲» در سازه‌های کابلی با کاهش خیز کابل، مؤلفه عمودی عکس‌العمل ثابت باقی مانده و مؤلفه افقی افزایش می‌یابد.

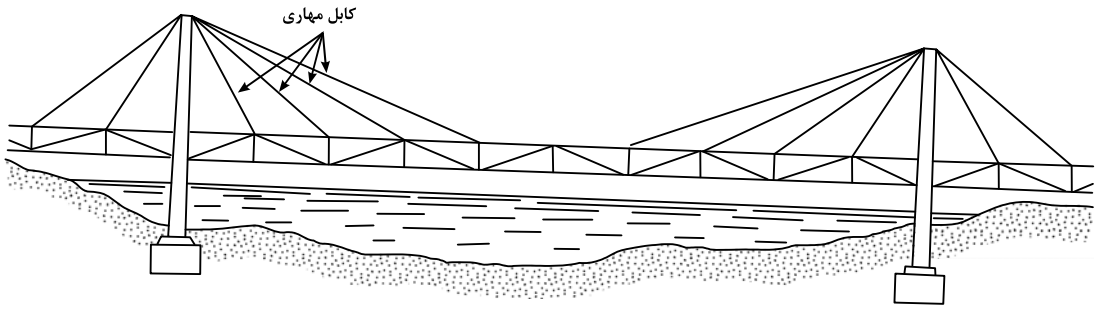
پل‌های مهارشده با کابل

در پل‌های مهارشده با کابل، کابل‌ها نقش مضاعف تحمل خرپا و نیز پایدارکردن آن را به عهده دارند.

خرپاهای تقویت‌کننده معمولاً در جهت محور پل سخت هستند اما نسبت به جهت عرضی سختی کمتری دارند. جابه‌جایی‌های نسبتاً زیاد پل‌های معلق در اثر بادهای جانبی به همین علت است. برای جلوگیری از خطرات در پل‌های مدرن از سیستم‌های مهار تقویت‌کننده و نیز افزایش سختی خمشی و پیچشی سطح مقطع سواره‌رو استفاده می‌شود.



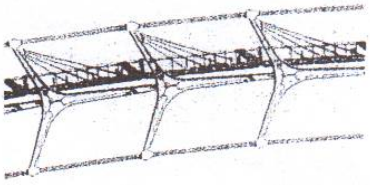
الف) نوع چنگ



ب) نوع بادبزنی

پل‌های مهارشده با کابل

مثال ۴: تصویر زیر نشان‌دهنده چه نوع پلی است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۴)



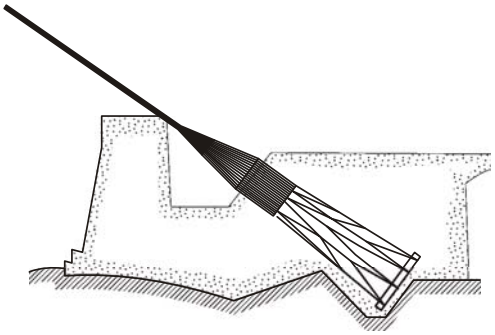
۱) خرپایی
۲) شیشه‌ای
۳) طره‌ای
۴) متحرک

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» سازه از نوع کابل مهارکننده با آرایش بادبزنی است که کابل‌ها به یک سازه طره‌شده بتن مسلح در زیر خود کمک می‌کنند.

بلوک‌های مهارکننده سنگین از جنس بتن مسلح که معمولاً در زمین‌های سنگی ریخته می‌شوند، هم در مقابل کشش به وسیله تأثیر وزن خودشان و هم به وسیله واکنش زمین و صخره‌ای که در آن مستقر شده‌اند، مقاومت می‌کنند.

فشار در برج‌ها، خمش در خرپاها و برش در بلوک‌های مهارکننده تحمل می‌شوند.

در پل‌های خود مهارکننده، کابل‌ها به انتهای خرپاهای تقویت‌کننده مهار شده‌اند و در نتیجه آن‌ها را تحت فشار قرار می‌دهند، در حالی که انتهای خرپاها به پایه‌های پل مهار شده‌اند تا واکنش‌های رو به پایین ایجاد کنند.



مهارکردن کابل‌های پل معلق

مثال ۵: تمام موارد جزء روش‌های پایدارسازی سازه‌های کابلی هستند، به‌جز: (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۶)

۱) کاهش بار مرده کابل ۲) استفاده از کابل ثانویه ۳) اتصال کابل به زمین ۴) استفاده از دمپر

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» سازه‌های کابلی به دلیل سبک بودن، مستعد لرزش و ناپایداری هستند. برای مقابله با ناپایداری سیستم‌های کابلی از روش‌های زیر استفاده می‌شود: ۱ـ سنگین کردن سقف ۲ـ پیش‌تنیده کردن ۳ـ مهار کابل به زمین ۴ـ استفاده از کابل ثانویه.

نمونه‌های موردی کابل‌های خطی

پت سنتر (P.A.Technology Center)

ایده‌های اصلی این طرح عبارت‌اند از:

ـ استفاده از یک ستون فقرات مرکزی و ایجاد مجموعه‌ای از سازه‌های A شکل با نمای شیشه‌ای

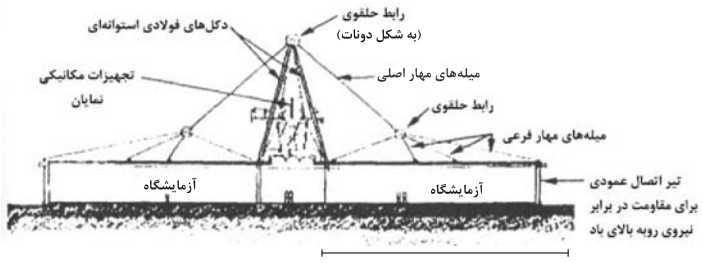
ـ نقش اصلی قاب A شکل نگه‌داشتن سیستم‌های تأسیساتی روی قسمت‌های مرکزی است.

ـ برای انعطاف‌پذیری لازم، سازه کابلی انتخاب شد.

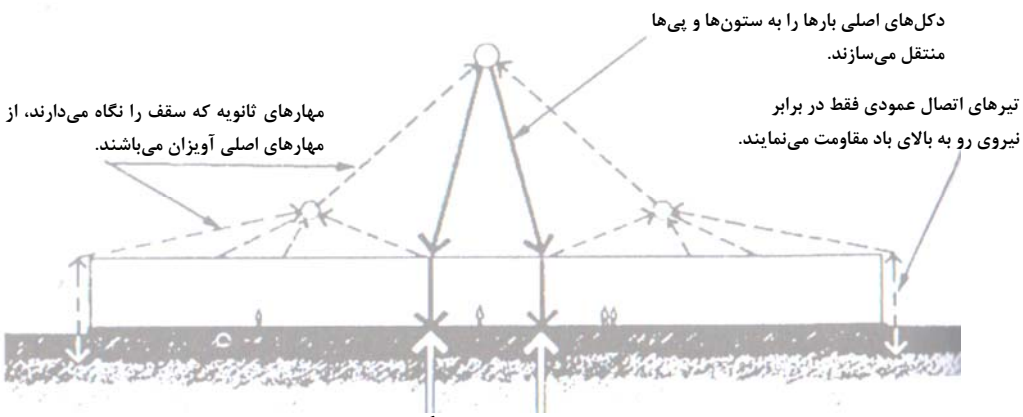
ـ در سازه اصلی یک قاب مستطیل است که پایه‌ای برای قاب A شکل و به عنوان تکیه‌گاه عمودی اصلی است.

ـ کابل‌های عمودی متصل به پی در انتهای دهانه در برابر نیروی باد مقاومت می‌کنند.

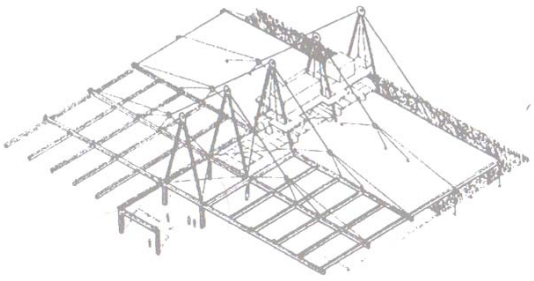
ـ پایداری طولی نه‌تنها به وسیله مهاربندی‌های ضربدری بلکه به وسیله اتصالات صلب بین تیرهای نگه‌دارنده سیستم‌های تأسیساتی و سازه A شکل تـأمین می‌گردد و در نتیجه هر دکل به طور مستقل رفتار می‌نماید.



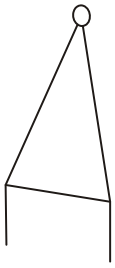
پت سنتر، مقطع



پت سنتر، نمودار مسیر بارگذاری

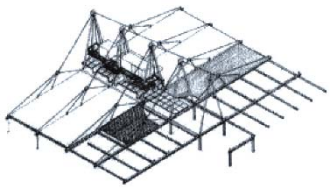


پت سنتر، مقطع آگزونومتریک



قاب A شکل

مثال ۶: در ساختمان زیر پایداری طولی سازه، چگونه تأمین شده است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۶)



۱) اتصالات صلب

۲) اتصالات صلب و قاب‌های A شکل

۳) اتصالات صلب و مهاربندی ضربدری

۴) مهاربندی ضربدری و کابل‌های عمودی متصل به پی

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» در ساختمان پت سنتر، ترکیب سازه A شکل، ۹ مرتبه تکرار شده است. کابل‌های عمودی متصل به پی در انتهای دهانه‌ها در برابر نیروی رو به بالای باد مقاومت می‌کنند. برای حفظ وضوح بصری این سیستم، پایداری طولی نه‌تنها به‌وسیله مهاربندی‌های ضربدری، بلکه به‌وسیله اتصالات صلب بین تیرهای نگه‌دارنده سیستم‌های تأسیساتی و سازه A شکل ساختمان تأمین شده است.

مدرسان شریف

فصل چهارم

«قوس و طاق»

مقدمه

قوس‌ها، عناصری هستند که نیرو را به صورت فشاری انتقال می‌دهند. عناصر نیروی کشش در قوس قابل صرف‌نظر کردن است. خمیدگی‌های طبیعی قوس‌ها و قابلیت آن در پخش بار به سمت بیرون به مقدار زیادی میزان اثر کشش را در قسمت پایین قوس کاهش می‌دهد.

بیشترشدن درجه انحنای قوس (نیم‌دایره بزرگ‌تری از قوس)، میزان اثر کشش در قسمت پایین قوس را افزایش می‌دهد.

همان‌طور که ذکر شد، قوس به خودی خود شکلی را می‌گیرد که لازم است به طور مؤثر بار را از مرکز عرشه پل به پایه‌ها پخش کند. همانند پل‌های خرپایی، محدودیت‌های مربوط به اندازه قوس به میزان مقاومت طبیعی قوس بستگی دارد.

قوس، مهیج‌ترین شکل ساختمانی است که برای ایجاد فرم‌های جدید و قابل تصور، بیشترین استعداد و توانایی را دارد.

طبق گفته **اندی رونی**، قوس از دو منحنی تشکیل شده که تمایل به فروریختن دارند.

طاق‌زدن: طاق‌زدن، حد واسط بین طره و قوس واقعی است که متشکل از ردیف‌های متوالی آجر است که روی یکدیگر در دو طرف بازشو قرار گرفته‌اند و به تدریج به هم نزدیک می‌شوند تا با هم تلاقی نمایند. قواعد کلی آن در ۲۷۰۰ سال قبل از میلاد به وسیله سومری‌ها و مصری‌ها شناخته شده بود. شکل یک قوس واقعی، ساخته‌شده از سنگ (سنگ‌های بریده‌شده به شکل گوه و چیده‌شده در یک نیم‌دایره) به وسیله مصری‌ها و اهالی بین‌النهرین تقریباً همزمان با طاق‌زدن شناخته شده بود. برای ایجاد تعادل، زاویه طاق‌زنی باید کمتر از ۴۵ درجه باشد.

در این بخش به مفاهیم مربوط به قوس‌ها و طاق‌ها و تحلیل رفتار آن پرداخته می‌شود. هدف از این فصل دانستن مفاهیم زیر است:

۱ـ تعریف و درک رفتار قوس و طاق،

۲ـ توانایی تحلیل رابطه قوس و کابل و چگونگی شکل‌گیری آن‌ها،

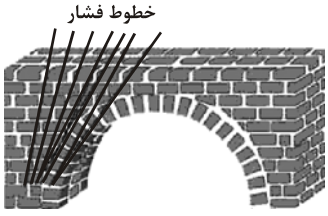
۳ـ شناخت انواع طاق و قوس،

۴ـ تشخیص سیستم سازه‌ای قوس در انواع ساختمان و پل.

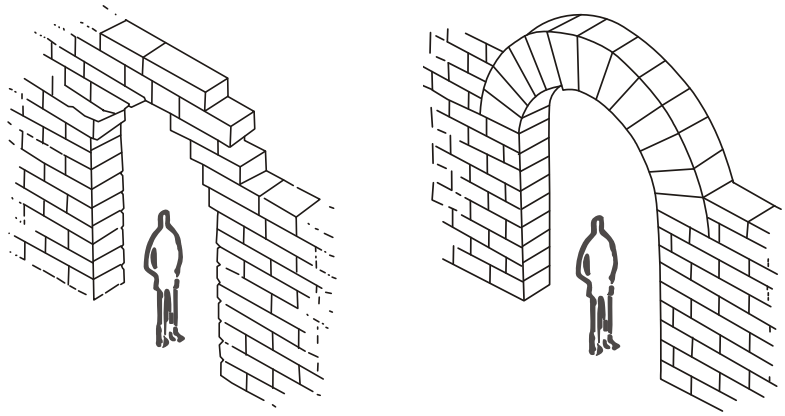
درسنامه (۱): مفاهیم اساسی قوس

قوس

قوس‌ها نیرو را به‌صورت فشاری انتقال می‌دهند. نیروی فشار در طول خمیدگی قوس به سمت بیرون به طرف پایه انتقال می‌یابد.



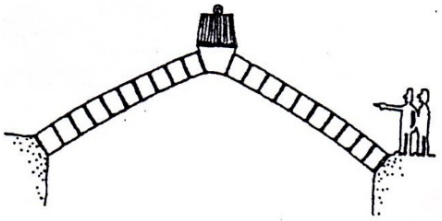
برای هر نوع شرایط بارگذاری روی یک کابل معلق، فرم منحنی طنابی متناظری وجود دارد که کابل به طور طبیعی آن را می‌پذیرد. قوس با فرم منحنی طنابی، معادل نیروهای فشاری معکوس در یک کابل معلق عمل نموده و فقط فشار محوری را تحمل می‌نماید. به عبارت دیگر در شرایط بارگذاری به خصوص قوسی که به شکل وارونه ساخته شده است، مانند یک کابل معلق فقط تحت فشار خواهد بود و در آن هیچ‌گونه نیروی خمشی مورد مطالعه قرار نمی‌گیرد. این امر برای بارهای گسترده و بارهای متمرکزی صادق است که ممکن است طول و محل قرارگیری آن‌ها متفاوت باشد.



(ب) طاق سنگی (الف) تیر پیش‌آمده

بازشوهایی با مصالح بنایی

مثال۱: کدام گزینه در مورد رفتار قوس‌ها صحیح است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۸۸)



۱) قوس‌های باریک قابلیت تحمل وزن خود را ندارند.

۲) قوس هنگام قرار گرفتن در کشش، به دلیل کمانش فرو می‌ریزد.

۳) قوس‌ها همواره دارای اتصالات غلتکی بوده و امکان حرکت افقی دارند.

۴) قوس معمولاً صلب بوده و نمی‌تواند خود را مانند کابل با تغییرات بارگذاری تطبیق دهد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» یک قوس قرینه یک کابل است که آن را قوس زنجیره‌ای می‌نامند و به‌طوری شکل داده شده که بار وارده به وسیله فشار خالص داخل و بین سنگ‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. قوس نشان داده‌شده در سؤال برای حمل بارهای منفرد و متمرکز ساخته می‌شود. از نظر جنبه‌های مهم ظاهری، قوس به‌طور دقیق مانند زنجیر نیست، قوس صلب بوده و نمی‌تواند خود را با تغییرات بارگذاری مانند زنجیر تطبیق دهد. اگر قوس‌ها در فشار توأم با نیروی کمانش قرار گیرند، احتمالاً فرو می‌ریزند.

مثال۲: اقتصادی‌ترین سازه قوسی، کدام است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۴)

۱) ارتفاع قوس با دهانه آن برابر باشد.

۲) ارتفاع قوس $\sqrt{۲}$ برابر دهانه آن باشد.

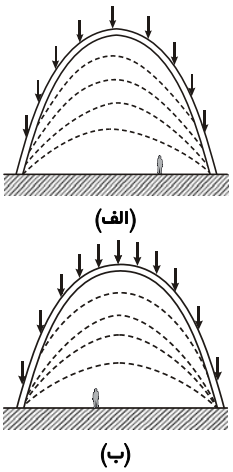
۳) قوس منطبق بر لنگر خمشی باشد.

۴) خیز قوس $\frac{\sqrt{۲}}{۲}$ لنگر خمشی باشد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» وقتی می‌گوییم سازه قوسی، منظور از همه نوع آن است، با مصالح بنایی یا فولادی و ... . وقتی قوس با مصالحی مثل فولاد و بتن مسلح است، وزن بار مرده اهمیت پیدا می‌کند و قوس با مسئله خمش مواجه است و در این حالت اگر قوس در نقاط بحرانی خمش تقویت شود و به عبارتی با نمودار گشتاور خمشی منطبق گردد، می‌تواند در بخشی که خمش بحرانی نیست، مصالح را کاهش دهد و آن را اقتصادی کند.

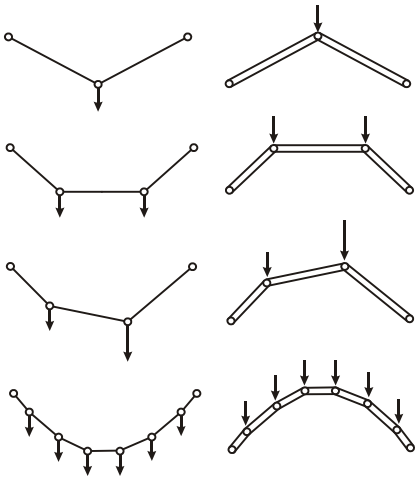
اگر در یک کابل معلق، بارگذاری به صورت گسترده یکنواخت در طول افقی دهانه باشد، فرم منحنی طنابی به صورت **سهمی** است و اگر بارگذاری گسترده یکنواخت در طول منحنی قوس باشد، فرم منحنی طنابی به شکل **زنجیره‌وار** است.

فرم منحنی طنابی برای بازشوی قوسی‌شکل در یک دیوار با مصالح بنایی، چیزی بین دو فرم سهمی و زنجیرواره است.

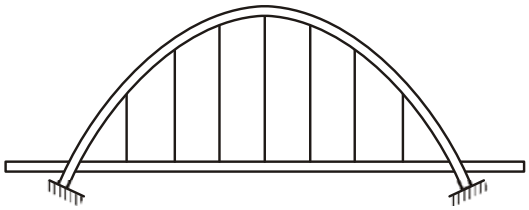


اشکال قوس‌های با فرم منحنی طنابی برای توزیع بار: (الف) فرم زنجیرواره برای بارگذاری یکنواخت در امتداد منحنی قوس و (ب) سهمی برای بارگذاری یکنواخت در طول دهانه افقی

می‌توان با برگرداندن یک شکل سهموی که به وسیله کابل کششی (تحت تأثیر بارهای قائم با توزیع یکنواخت در جهت افقی) تشکیل می‌گردد، شکل ایده‌آل یک قوس را به‌دست آورد. در این صورت تحت تأثیر بار گسترده یکنواخت قائم فقط نیروی فشاری در سازه ایجاد می‌شود.



کابل‌های معلق با فرم منحنی طنابی و قوس‌های متناظر



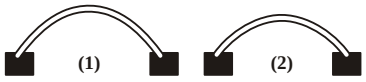
قوس طنابی

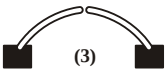
مثال ۳: منحنی طنابی مناسب برای یک قوس، چگونه حاصل می‌شود؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۶)

۱) با ترسیم چندضلعی نیروهای وارد بر قوس
۲) وارونه منحنی طنابی یک کابل تحت همان بارگذاری
۳) به وسیله ترسیم برآیند نیروی وزن قوس و نیروهای جانبی
۴) قرینه فرم منحنی نیروی برش یک تیر در همان دهانه

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» می‌توان با برگرداندن یک شکل سهموی که به‌وسیله کابل کششی تشکیل می‌گردد، شکل ایده‌آل قوس را به دست آورد. در این صورت تحت تأثیر بار گسترده یکنواخت قائم، فقط نیروی فشاری در سازه ایجاد می‌شود.

مثال ۴: کدام عبارت، با توجه به تصویر زیر صحیح است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۴)

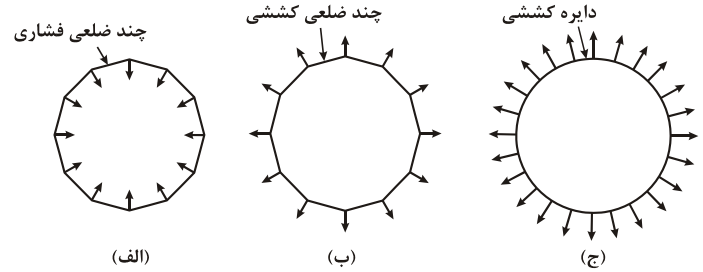




۱) در قوس شماره ۲، خمش در وسط دهانه به حداقل می‌رسد.
۲) در قوس شماره ۳، خمش فقط در تکیه‌گاه‌ها ایجاد می‌شود.
۳) در قوس شماره ۳، خمش قابل توجه در کل دهانه ایجاد می‌گردد.
۴) قوس شماره ۱، در اثر هر گونه تغییر شکل و انبساط حرارتی دچار خمش می‌شود.

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در قوس‌های صلب (شماره ۱) همیشه سه نقطه بحرانی خمش موضعی وجود دارد. این سه منطقه در پایه‌ها و در رأس وجود دارد که تحت تأثیر تنش‌های حرارتی یا نشست نامتقارن شکل می‌گیرند. این مسئله با استفاده از مفصل قابل توضیح است. در قوس دومفصلی (شماره ۲) این خمش موضعی در رأس همچنان موجود است اما در قوس سه مفصلی (شماره ۳) کاملاً برطرف شده است.

چندضلعی طنابی برای یک‌سری بارهای مساوی که با فواصل مساوی به سوی یک نقطه مشترک متقارب هستند یا از یک نقطه مشترک منشعب می‌شوند، یک چندضلعی منتظم معمولی است که مرکز آن همان نقطه مشترک می‌باشد (شکل الف و ب). وقتی که بارها بی‌نهایت زیاد و خیلی کوچک شوند، برای یک فشار یا کشش شعاعی، چندضلعی طنابی تبدیل به منحنی طنابی می‌شود که یک دایره است (شکل ج).



چندضلعی طنابی برای بارهای شعاعی مساوی

از آنجا که قوس‌ها، منحنی طنابی مجموعه‌ای از بارها هستند، نتیجه می‌گیریم که دایره نمی‌تواند برای یک بارگذاری عمودی که به‌طور یکنواخت (در امتداد افق یا قوس دایره) توزیع می‌شود، به‌عنوان منحنی طنابی تلقی گردد. بنابراین در قوس رومی مقداری خمش ایجاد می‌شود و با اینکه سازه فشاری است، اما فشار به‌صورت یکنواخت در مقطع آن توزیع نشده است.

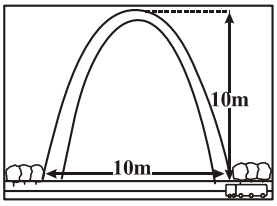
مثال۵: کدام قوس، بیشترین ظرفیت باربری را دارا است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۸)

۱) دسته سبدی
۲) شاخ بزی (قوس تیز)
۳) پنج او هفت پابلند متکی بر ستون‌های کوتاه
۴) معادل معکوس حاصل از کابل آویخته بین دو تکیه‌گاه

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» قوس زمانی بهترین حالت خود را دارد که منحنی آن نزدیک به قوس منحنی طنابی آن باشد. برای به‌دست آوردن منحنی طنابی یک قوس، در ابتدا یک طناب را بین دو تکیه‌گاه قرار می‌دهند، به‌طوری‌که طول طناب بیشتر از طول دهانه باشد و طناب را رها می‌کنند تا به فرم منحنی طنابی دربیاید. اگر این طناب را منجمد کنیم و به حالت معکوس درآوریم، در این صورت قوس متناظر آن به‌دست می‌آید که این عمل را می‌توان در کارهای آنتونی گائودی مشاهده نمود. با توجه به مطالب مذکور و از آنجا که قوس‌های ذکرشده در گزینه‌های (۱)، (۲) و (۳) مورد آنالیز سازه‌ای قرار نگرفته‌اند و هر کدام از آن‌ها تلاشی برای نزدیک‌نمودن منحنی قوس به منحنی طنابی قوس می‌باشد، گزینه (۴) صحیح است.

◆ ◆ ◆ ◆

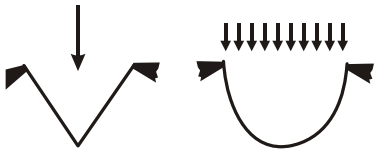
مثال۶: در تصویر زیر، از کدام فرم برای اجرای قوس استفاده شده است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۸)



۱) منحنی طنابی
۲) قوس کربل
۳) شبدری تند
۴) طاق رومی

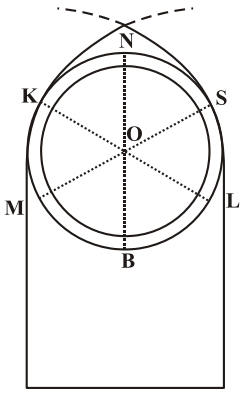
☑ **پاسخ:** گزینه «۱» سازه‌های با فرم منحنی طنابی (شناخته‌شده با عنوان فرم‌های فعال) سازه‌هایی هستند که در برابر بارهای وارده از شکل و ترکیبی استفاده می‌کنند که تنش‌های داخلی حاصله فقط به صورت فشار و کشش مستقیم باشد. کابلی را در نظر بگیرید که بین ۲ تکیه‌گاه کشیده شده و باری را تحمل می‌کند. کابل تحت باری که از پایین وارد می‌شود، شکل V به خود می‌گیرد و فقط تحت کشش واقع می‌شود. اگر بار دیگری به آن اضافه شود، شکل بارگذاری تغییر کرده و به صورت سه بخش که هر یک قسمتی از بار را تحمل می‌کنند، تقسیم می‌شود. بارهای اضافی دیگر تعداد تقسیمات را افزایش داده تا به فرم منحنی کامل که عمل توزیع را بر عهده دارد، تبدیل شود.

سازه‌های سطحی

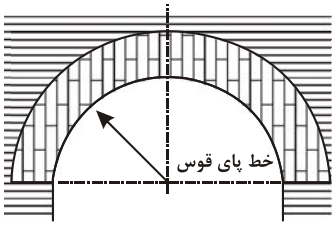


سازه‌های خطی (منحنی طنابی)

اگر این منحنی طنابی را در کابل معکوس کنیم، قوس منحنی طنابی به‌دست خواهد آمد. از این‌رو فرم منحنی طنابی برای اجرای قوس استفاده شده و سایر گزینه‌ها با فرم سازه ارائه‌شده متفاوت است.

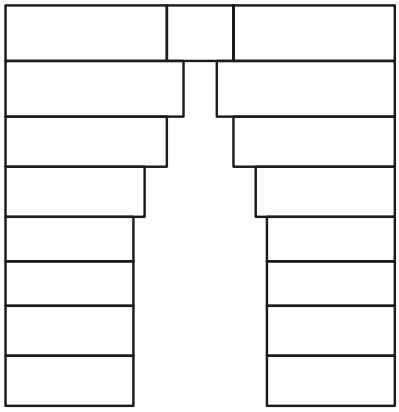


قوس شبدری تند



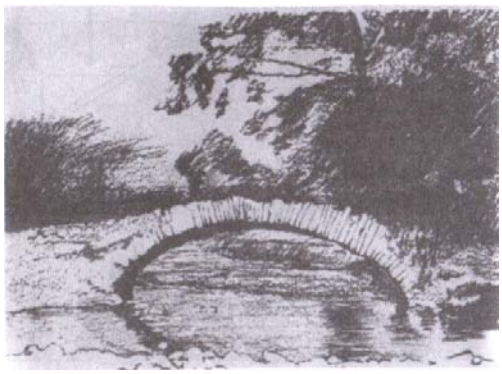
قوس رومی
(نیم‌دایره)

قوس رومی



قوس کربل

درسنامه (۲): نمونه‌های اولیه قوس (قوس‌ها با مصالح بنایی)



پل پک هورس (کامبریا، انگلستان) یک قوس سنگی ابتدایی با خصوصیات طاق‌های سنگی

ایوان پیش‌آمده معبد کلایتمنسترا

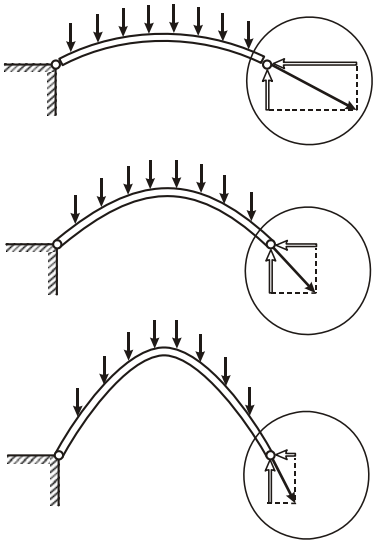
نکات سازه‌ای شکل‌های فوق

۱ـ دارای قوس کربل (Corbel) است؛ کربل به معنای پیش‌آمدگی است و تیر پیش‌آمده نیز به آن می‌گویند.

۲ـ زاویه قوس‌زنی باید کمتر از ۴۵ درجه باشد.

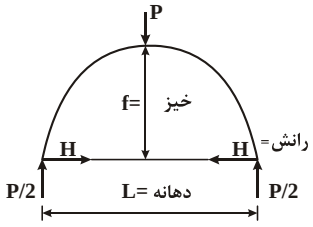
رفتار سازه‌ای قوس

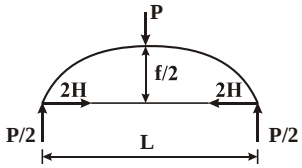
مشابه کابل، در قوس کم‌خیزتر رانش جانبی تولیدشده در اثر بارگذاری بیشتر خواهد بود.



عکس‌العمل رانشی نسبت عکس با ارتفاع قوس دارد.

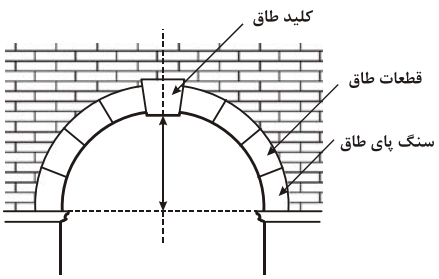
در شکل‌های زیر، تناسب رانش قوس با خیز آن مشاهده می‌شود. رانش قوس متناسب با کل بارها و طول دهانه می‌باشد و با خیز قوس نسبت معکوس دارد.





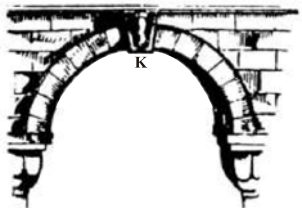
تناسب رانش قوس با خیز

برخلاف طاق که در آن مصالح بنایی طره‌شده تحت خمش (و کشش) قرار می‌گیرند، یک قوس واقعی با مصالح بنایی از فرم گوه‌ای سنگ‌ها برای انتقال بار جانبی به طور کامل به وسیله فشار بهره می‌برد.



بخش‌های یک قوس با مصالح بنایی

مثال۷: سنگ میانی قوس در شکل زیر (نشان داده‌شده با حرف K)، چه نامیده می‌شود؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۷)



۱) Lantern

۲) Keystone

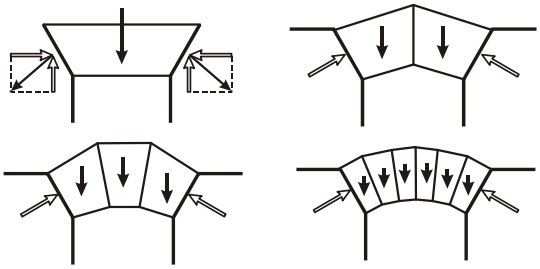
۳) Arch Roof

۴) Arch Bone

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» در معماری به سنگ تیزه تاق سنگ تاج (Keystone) گفته می‌شود. سنگ تاج، قطعه‌سنگ ذوزنقه‌شکل یا گوه‌ای است که در اوج یا تاجگاه قوس قرار می‌گیرد. نام‌های دیگر سنگ تاج عبارت‌اند از: قطاع کاکُل، تاج قوس و تاج‌مُهره. سنگ تاج در تاج قوس قرار می‌گیرد و سبب استحکام سازه می‌شود یا صرفاً نقش تزئینی دارد.

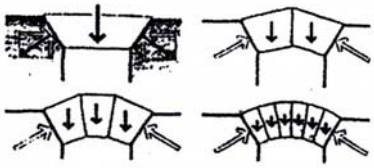
◆ ◆ ◆ ◆

فرم گوه‌ای به قوس‌ها این امکان را می‌دهد که بارهای عمودی را فقط با استفاده از فشار به هر جهت انتقال دهند. توجه داشته باشید، از آنجایی که فرم گوه‌ای سنگ‌ها تمایل به رانش سطوح تکیه‌گاهی جدا در نتیجه بار عمودی وارده دارند، این امر سبب نیروهای عکس‌العمل در هر جهت عمود بر اتصال می‌گردد (اگر این نیروها عمود بر اتصالات نباشند، لغزش در اتصالات اتفاق می‌افتد). مؤلفه‌های این نیروها به سبب نیروی وزن، بار عمودی هستند و به سبب نیروی رانش، نیروهای افقی می‌باشند.



فرم گوه‌ای در قوس‌ها و تأثیر آن

مثال۸: شکل زیر نشان‌دهنده آن است که ..... در قوس‌ها سبب می‌شود بارهای عمودی با استفاده از ..... منتقل شوند. (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۸۹)



۱) استفاده از آجر ـ رانش افقی

۲) فرم گوه‌ای ـ تنش‌های فشاری

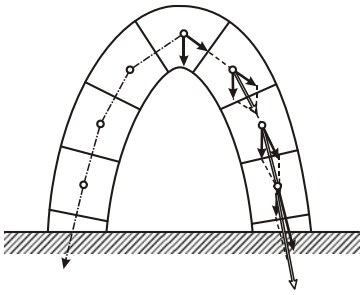
۳) استفاده از سنگ ـ تنش‌های برشی

۴) اجرای مرحله به مرحله ـ کوتاه‌ترین مسیر

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» فرم گوه‌ای به قوس‌ها این امکان را می‌دهد که بارهای عمودی را فقط با استفاده از فشار به هر جهت انتقال دهند.

◆ ◆ ◆ ◆

فرم منحنی طنابی یک قوس بر خط رانش آن منطبق می‌گردد. خط رانش قوس از مجموعه برآیندهای حاصل از نیروی رانش و وزن هر بخش از قوس تشکیل می‌شود. برای حذف کامل خمش در یک قوس، باید خط رانش آن با محور قوس بر هم منطبق باشد.



خط رانش قوس، مجموعه‌ای است از برآیند نیروهای رانش و وزن هریک از بخش‌های قوس که بر بخش زیرین وارد می‌شود.

مثال۹: کدام مورد، علت اصلی افزایش ضخامت قوس‌های رومی است؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۶)

۱) تأمین زیبایی قوس

۲) مهار رانش افقی قوس

۳) کاهش انحنای خط فشار زنجیرواره

۴) ایجاد خط فشار زنجیرواره در داخل ضخامت قوس

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» برای حذف کامل خمش در یک قوس، باید خط رانش آن با محور قوس بر هم منطبق باشند.

مدرسان شریف

فصل پنجم

«پوسته‌ها و سازه‌های ورق تاشده (surface structures)»

درسنامه (۱): مفاهیم پایه‌ای پوسته‌ها

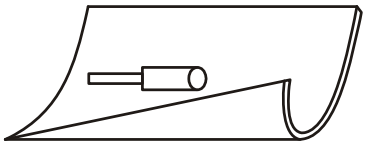
مقدمه

پوسته‌ها، یکی از فراوان‌ترین و متنوع‌ترین انواع فرم‌های ساختمانی هستند که در دنیای فیزیکی اطراف ما یافت می‌شوند. فرم‌های پوسته‌ای از لحاظ هندسی، سطوحی هستند که حجمی از فضا را از بقیه جدا می‌کنند.

سازه‌های پوسته‌ای در بیشتر موارد با استفاده از بتن مسلح ساخته می‌شوند؛ به همین دلیل سازه‌های بتن پوسته‌ای نیز نامیده می‌شوند. ضمن آنکه واژه پوسته تداعی‌کننده اشکال موجود در طبیعت مانند تخم پرندگان و پوسته نرم‌تنان است، این لغت یک نمود ذهنی با دو ویژگی خاص را مجسم می‌سازد که این دو ویژگی عبارت‌اند از: ۱) الهام از طبیعت ۲) سطوح منحنی.

پوسته‌ها محکم و منحنی‌شکل هستند و سطوح صاف و مسطح هرگز در بهترین حالت (یک سلول یا جعبه)، نمی‌توانند یک پوسته را تشکیل دهند. اغنا، مهم‌ترین عامل برتری پوسته‌ها است.

عملکرد کلی پوسته‌ها



یک ورق کاغذ، به طور عادی در دست خم می‌شود و حتی توانایی تحمل وزن خود را هم ندارد، اما اگر به قسمت میانی کاغذ اندکی فشار وارد شود، به طوری که گوشه‌های آن کمی رو به بالا خم شوند، این فرم علاوه بر وزن خود، مقداری بار اضافی نیز تحمل می‌کند.

این افزایش ظرفیت تحمل بار توسط سازه، به دلیل استفاده از فرم مناسب است. انحنای رو به بالا، سختی و ظرفیت تحمل بار کاغذ را افزایش می‌دهد؛ زیرا این فرم موجب می‌شود مقداری از مصالح دور از مرکز ثقل جسم قرار بگیرد، بنابراین با خم‌کردن ورق کاغذ مقاومت خمشی جسم افزایش می‌یابد.

معیارهای تقسیم‌بندی پوسته‌ها

پوسته‌ها بر اساس نوع شکل‌گیری، فرم و هندسه طبقه‌بندی می‌شوند. در این تقسیم‌بندی، هدف ارائه رفتار و عکس‌العمل‌های یکسان در گروه‌های مختلف پوسته‌هاست.

۱) تقسیم‌بندی از نظر نوع شکل‌گیری: پوسته‌ها از نظر شکل‌گیری به پوسته‌های دورانی (Rotational) و پوسته‌های انتقالی (Transational) تقسیم می‌شوند. در پوسته‌های دورانی، شکل‌گیری پوسته ناشی از دوران یک منحنی حول یک محور و در پوسته‌های انتقالی ناشی از انتقال یک منحنی در طول یک خط یا یک منحنی است.

۲) تقسیم‌بندی از نظر فرم پوسته‌ها: پوسته‌ها از نظر نوع انحنا به دو گروه پوسته‌های سین‌کلاستیک و آنتی‌کلاستیک تقسیم می‌شوند. پوسته‌های سین‌کلاستیک دو منحنی دارند و خطوط انحنا در هر جهت آن‌ها یکسان است. رایج‌ترین نوع این سیستم، گنبد است. پوسته‌های آنتی‌کلاستیک (زین‌اسبی) انحنای مضاعف و خطوط انحنا در جهت‌های مخالف دارند، مانند سهموی هذلولی.

۳) تقسیم‌بندی از نظر هندسه: پوسته‌ها از نظر هندسه به پوسته‌های قابل توسعه و پوسته‌های غیرقابل توسعه تقسیم می‌شوند.

پوسته‌های قابل توسعه پوسته‌هایی هستند که بتوان سطح هندسی آن‌ها را بدون ایجاد بریدگی، تنش یا تغییر شکل، به شکل صفحه مستوی درآورد؛ مانند پوسته‌های استوانه‌ای. پوسته‌های گهواره‌ای که فقط در یک جهت انحنا دارند و از دوران یک منحنی در طول مسیر مستقیم شکل می‌گیرند، پوسته‌های قابل توسعه‌اند. در این پوسته‌ها اغلب از اشکال نیم‌دایره و سهمی استفاده می‌شود و تکیه‌گاه‌ها فقط در گوشه‌ها هستند و در جهت طولی و انحنا دهانه را می‌پوشانند.

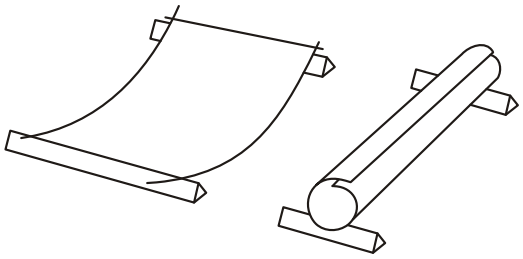
پوسته‌های قابل توسعه خود به چند بخش تقسیم می‌شوند:

الف) پوسته‌های استوانه‌ای که به پوسته‌های استوانه‌ای کوتاه و پوسته‌های استوانه‌ای بلند تقسیم می‌شوند.

ب) پوسته‌های متقاطع که به پوسته‌های متقاطع دوبخشی، پوسته‌های متقاطع چندبخشی و مخروط‌ها و شبه‌مخروط‌ها تقسیم می‌شوند.

پوسته‌های استوانه‌ای

این پوسته‌ها در طبیعت به ندرت یافت می‌شوند. می‌توان به فرم لوله‌ای ساقه گیاهانی مانند بامبو اشاره کرد. جزء اصلی تشکیل‌دهنده استوانه، شکل کلی پوسته است. یک ورقه کاغذ به طور طبیعی تقریباً قادر به هیچ‌گونه مقاومتی در مقابل خمش نیست، اما با لوله‌کردن مقاومت آن بیشتر می‌شود.



عدم مقاومت کاغذ در برابر وزن خود و افزایش مقاومت در آن با لوله کردن

الف) پوسته‌های استوانه‌ای کوتاه: این پوسته‌ها کوتاه‌ترین نوع پوسته‌ها محسوب می‌شوند و اغلب در گوشه‌ها دارای تکیه‌گاه هستند و در یکی از دو جهت یا ترکیبی از هر دو جهت عمل می‌کنند. اولین مورد استفاده از این نوع پوسته‌ها، عملکرد پوسته به عنوان دال است که فاصله بین قوس‌ها را می‌پوشاند؛ در این حالت هر انتها را می‌توان به وسیله یک قوس سخت و مقاوم کرد. دومین روش برای آنکه لبه طولی پایین‌تر به وسیله یک تیر سخت شود، آن است که از پوسته‌های نازک‌تر که مانند مجموعه‌ای از قوس‌های مجاور هم رفتار می‌کنند و فاصله بین تیرهای کناری را می‌پوشانند، استفاده کرد.

ب) پوسته‌های استوانه‌ای بلند: این پوسته‌ها بلندترین نوع پوسته‌ها محسوب می‌شوند و در آنها نیز اغلب تکیه‌گاه‌ها در گوشه‌ها هستند و مانند تیرهای بزرگ در جهت طولی عمل می‌کنند، در نتیجه تنش‌ها در این گونه پوسته‌ها مشابه تنش‌های خمشی در یک تیر است. بخش بالایی در سرتاسر طول پوسته، تحت فشار است در حالی که بخش پایینی تحت کشش است.

پوسته‌های متقاطع

الف) پوسته‌های متقاطع دوبخشی: تقاطع راست گوشه پوسته‌های دوبخشی با مقطع دایره‌ای‌شکل نوعی طاق چهاربخشی را ایجاد می‌کند که قسمت مقعر ایجادشده میان بخش‌های متقاطع با یک منحنی تاخورده قابل مقایسه است.

ب) پوسته‌های متقاطع چندبخشی: چندین تقاطع با بخش‌های بیشتر است. اگر تعداد برآمدگی‌ها (خط‌الرأس‌ها) از خط‌القعرها بیشتر باشد، نتیجه، ساختار گنبدی‌شکل خواهد بود.

ج) مخروط‌ها و شبه‌مخروط‌ها: سطوح مخروطی با حرکت یک خط صاف بر روی خط صاف دیگر و یک منحنی به دست می‌آیند. این حقیقت که مخروط‌ها انحنای دوگانه دارند و با استفاده از خطوط صاف ساخته می‌شوند، به طور طبیعی آن‌ها را برای طراحی پوسته‌ها مناسب می‌سازد.

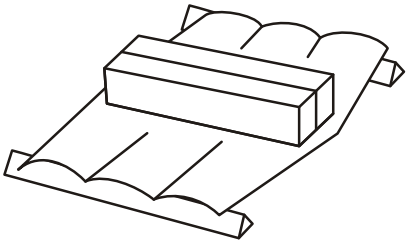
پوسته‌های غیرقابل توسعه (مانند پوسته‌های کروی)

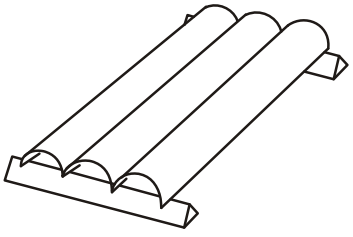
سازه‌ها با فرم پایدار، مقاومتشان را به وسیله شکل‌گرفتن مطابق با باری که باید تحمل کنند، به دست می‌آورند.

غشاها که بارها را به کمک انحنا و چرخش تحمل می‌کنند نیز متعلق به گروه سازه‌های با فرم پایدار کاملاً کششی می‌باشند.

پوسته‌های نازک، سازه‌هایی با فرم پایدار است که به قدری نازک هستند که تنش خمشی در آن‌ها پدید نمی‌آید و به اندازه کافی ضخیم هستند که توانایی تحمل بار با ایجاد کشش و برش را داشته باشند.

اگر کاغذ با فواصل معینی تاخورده باشد، می‌توان به مجموعه‌ای از پوسته‌های استوانه‌ای چندبخشی نسبتاً محکمی دست یافت. این کاغذ تحت بارهای وارده سنگین فرو می‌ریزد. اگر نوارهای باریک مقوایی به انتهای هرکدام از آن‌ها چسبانده شود، شکل پوسته را می‌گیرد و قدرت آن‌ها را افزایش می‌دهد.





با ایجاد خمیدگی، ورق کاغذ به بخش‌های مجزا و صلب با مقاومت زیاد تبدیل می‌شود.

پوسته‌های با فرم پایدار، پوسته‌هایی هستند که مقاومت خود را در برابر بار وارده به دست می‌آورند و تمام پوسته‌هایی که بار را به وسیله انحنا تحمل می‌کنند، کاملاً کششی هستند.

پوسته‌های نازک عناصر سازه‌ای بسیار کارآمد با بازدهی سازه‌ای زیاد هستند و شکل آن‌ها را باید از همان ابتدا بر اساس اصول سازه طراحی و تعریف کرد.

ضخامت پوسته باید به گونه‌ای طراحی شود که از کمانش جلوگیری کند.

پیش‌ساختگی قطعات تشکیل‌دهنده پوسته غالباً با پیش‌تنیدگی صورت می‌گیرد.

نمونه چین‌خوردگی‌های طبیعی صدف دریایی و سازه ورق تاشده

استفاده از چوب چندلایه در ساخت سازه‌های پوسته‌ای

استفاده از فرم‌های طبیعی در سازه‌های پوسته‌ای

مثال۱: کدام روش، می‌تواند یک فرم یکپارچه، دارای انحنا و منسجم ایجاد کند؟ (معماری ـ سراسری ۹۶)

۱) سازه‌های هوانشین ۲) سازه‌های تنسگریتی ۳) سازه با پوسته سخت ۴) سازه‌های خمیده بتنی

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» سازه‌های پوسته‌ای در بیشتر موارد با استفاده از بتن مسلح ساخته می‌شوند؛ به همین دلیل سازه‌های بتن پوسته‌ای نیز نامیده می‌شوند. واژه پوسته یک نمود ذهنی با دو ویژگی را مجسم می‌سازد: ۱) الهام از طبیعت، ۲) سطوح منحنی.

پوسته‌ها محکم و منحنی شکل‌اند و سطوح صاف و مسطح هرگز در بهترین حالت (یک سلول یا جعبه)، نمی‌توانند یک پوسته را تشکیل دهند.

سازه‌های بادی (هوانشین): این سازه‌ها نیروها را از طریق پوسته‌هایی با تنظیم داخلی به وسیله هوا منتقل می‌کنند. این سازه‌ها فقط نیروهای کشش را از طریق سطح پوسته انتقال می‌دهند. وقتی که پوسته‌ها یک حجم یا تعدادی از احجام جداگانه را کاملاً احاطه می‌کنند، می‌توانند به‌تنهایی به وسیله فشار داخلی خود پیش‌تنیده شوند؛ در این حالت به آن‌ها سازه‌های هوایی یا بادی گفته می‌شود.

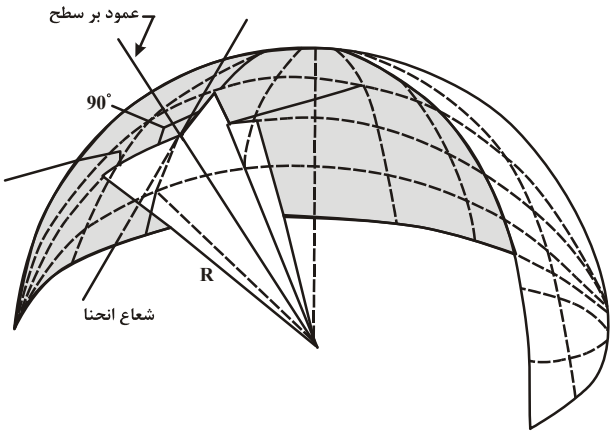
در عین اینکه استفاده از پوسته‌های قابل ارتجاع برای مدل‌های مطالعاتی مفید است، در واقعیت تمامی سازه‌های بزرگ پوسته‌ای از مصالح با حداقل کشش در زیر بار ساخته می‌شوند. شکل نهایی به‌وسیله شکل‌گیری پانل‌های پارچه‌ای یک لایه قبل از ساخت، تقریباً با همان حالتی که چادرها شکل می‌گیرند، تعیین می‌شود.

سازه‌های کابلی (کش‌بستی): در این نوع سیستم، کابل‌ها جزء اصلی سازه هستند که به صورت کششی عمل می‌کنند.

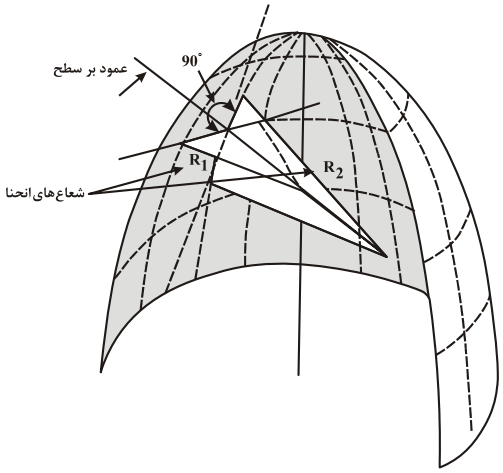
برای پوشش سقف نیز می‌توان از کابل‌های منفرد جهت ایجاد پوشش سبک روی دهانه‌های بزرگ استفاده کرد. مهم‌ترین ویژگی‌های سازه‌های کابلی سبک‌وزن بودن، سهولت در حمل، نصب و تخریب، هزینه نصب پایین و تطبیق فرم با میزان بار می‌باشد.

در یک گنبد کروی انحناهای برابر و رو به پایین برای همه برش‌ها در شکل (الف) نشان داده شده است.

برای گنبد غیرکروی انحنا از حداکثر تا حداقل تغییر می‌کند (شکل ب).



(الف) انحناهای یک گنبد کروی



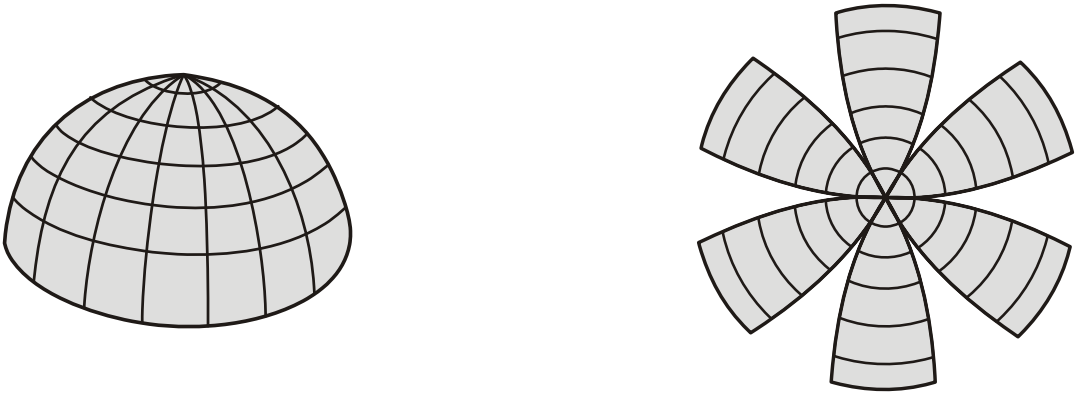
(ب) انحناهای یک گنبد سهموی

انواع سطوح

۱ـ قابل گسترش و ۲ـ غیرقابل گسترش

سطوح غیرقابل گسترش

در تمام نقاط دارای انحنای مثبت یا منفی هستند؛ زیرا نمی‌توان آن‌ها را بدون کشیدن یا برش‌دادن (که معمولاً تعداد این برش‌ها بی‌نهایت است) بر سطح صافی گسترد.



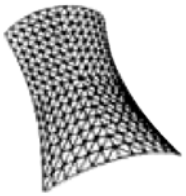
گسترش سطوح با برش‌های هم‌جهت

درسنامه (۲): انواع پوسته

۱ـ سین‌کلاستیک: دارای دو منحنی و خطوط منحنی شبیه به هم (گنبدها) (Synclastic)
۲ـ قابل توسعه: دارای یک انحنا و یک خط مستقیم (مخروط و استوانه) (Developable)
۳ـ آنتی‌کلاستیک: دارای انحنای مضاعف و خطوط انحنا در جهت‌های مخالف (مخروطی، سهموی ـ هذلولی، شبه‌هذلولی) (Anticlastic)
۴ـ فرم آزاد: از محاسبات ریاضی مشتق نمی‌شوند (Free Form).

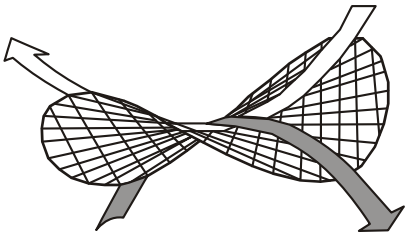
انواع پوسته

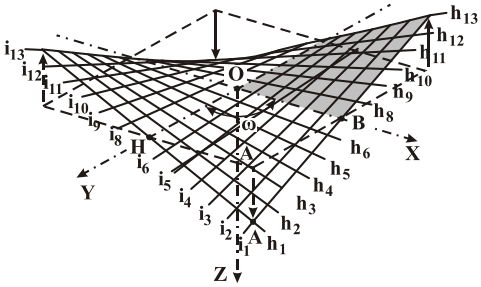
مثال ۲: شکل زیر، کدام‌یک از انواع سازه‌های فضاکار را نشان می‌دهد؟



۱) چلیک
۲) چلیک گنبد
۳) فرم آنتی‌کلاستیک
۴) فرم باز و بسته‌شونده

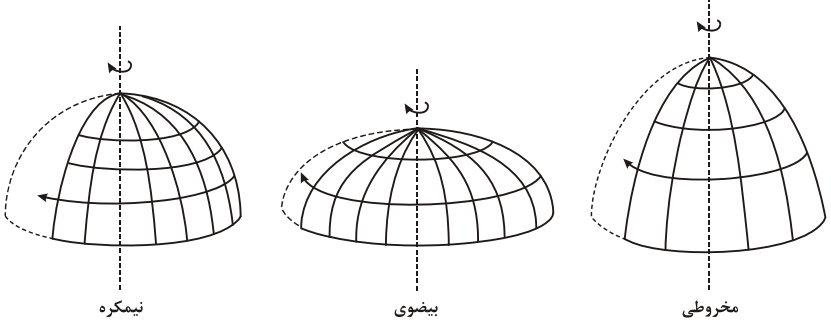
☑ **پاسخ:** گزینه «۳» سازه فضاکار یک سیستم خرپای سه‌بُعدی است که دهانه‌های آن در دو جهت گسترش یافته‌اند و اعضای آن فقط تحت تأثیر کشش و فشار قرار دارند. این سازه‌ها از مدول‌های یکسان و تکرارشونده با لایه‌های موازی در بالا و پایین (مشابه میله‌های فوقانی و تحتانی خرپا) تشکیل می‌شوند. سازه‌های فضاکار به دلیل فرم‌پذیری بالا به شکل‌های مختلف قابل تبدیل هستند؛ بنابراین سازه فضاکار به لحاظ فرمی به اشکال قابل توسعه (تخت، مخروط، قوسی، استوانه‌ای، هرمی و ...)، اشکال سین‌کلاستیک (گنبدها یا همان پوسته‌های شکل‌ناپذیر)، اشکال آنتی‌کلاستیک (اشکال زین‌اسبی) و اشکال آزاد قابل تقسیم است. اشکال آنتی‌کلاستیک (اشکال زین‌اسبی شامل: مخروطی، سهموی ـ هذلولی و شبه‌هذلولی) دارای انحنای مضاعف هستند که خطوط انحنا در جهت مخالف یکدیگر می‌باشند.





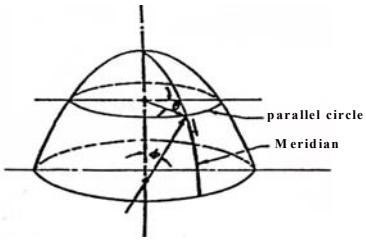
پوسته‌های گنبدی سین‌کلاستیک

پوسته‌های کروی (سطوح دوران‌یافته):
گنبدها سطوح دوران‌یافته یک خط منحنی حول یک محور بوده که شناخته‌شده‌ترین شکل آن کره است. سطح آن به‌وسیله چرخش یک قوس از یک دایره حول محور عمودی به‌دست می‌آید. بخش‌های عمودی پوسته، خطوط قوسی طولی و بخش‌های افقی به‌صورت حلقه‌های موازی هستند. بزرگ‌ترین بخش روی ربع دایره قرار دارد.



سطوح دوران‌یافته

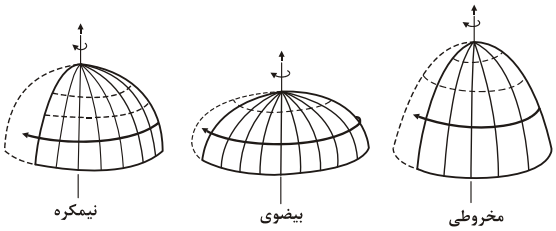
مثال۳: شکل زیر نشان‌دهنده کدام‌یک از انواع پوسته‌هاست؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۸۹)



۱) لاملا
۲) دورانی
۳) کروی
۴) قابل توسعه

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» شکل آورده‌شده در سؤال، از نوع پوسته‌های دورانی است.

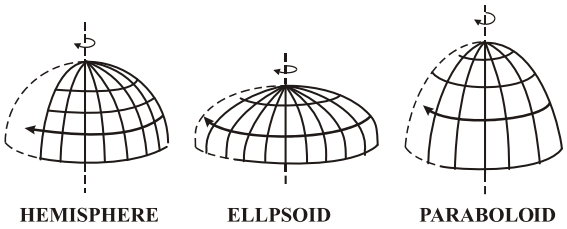
مثال۴: اشکال زیر نشان‌دهنده گنبدهای ..... می‌باشد. (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۱)



۱) دوار پوسته‌ای
۲) مشبک فضایی
۳) انتقالی خمشی متقارن
۴) ژئودزیک یک لایه با اتصالات مفصلی

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» گنبدهای دوار پوسته‌ای ناشی از سطوح دوران‌یافته یک خط منحنی حول یک محور هستند.

مثال۵: با توجه به تصویر زیر، کدام پوسته قابلیت کمانشی بیشتری دارد؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۷)

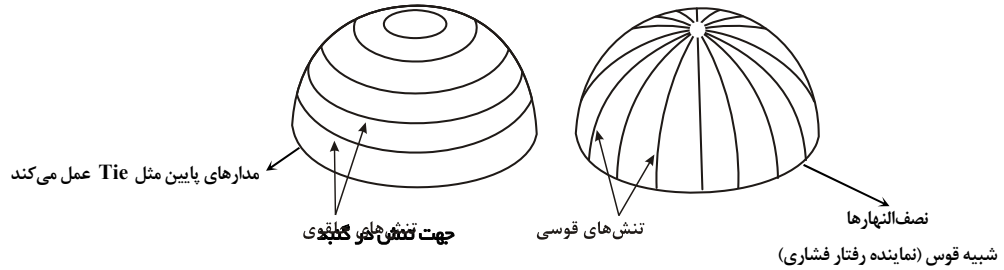


۱) نیمکره
۲) مخروطی
۳) بیضوی
۴) بیضوی و مخروطی

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» گنبدهای بیضوی به وسیله یک نیم‌بیضی که حول محور قائمش دوران می‌کند، ایجاد می‌شوند. کارایی این گنبدها به اندازه گنبدهای کروی نیست؛ زیرا قله پوسته در آن‌ها مسطح‌تر است و کاهش انحنا، قابلیت کمانش را در یک پوسته ایجاد می‌کند.

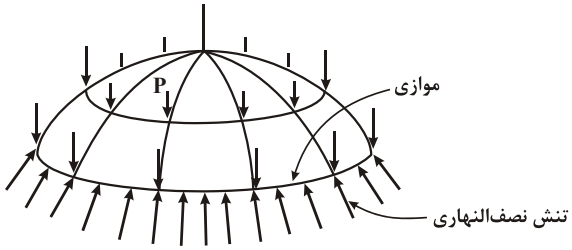
پوسته‌ها با انواع رفتار

در زیر بار یکنواخت، گنبد تحت فشار در طول خطوط قوسی در هر نقطه می‌باشد. در گنبد نیم‌کره‌ای، به علت اینکه خطوط قوسی‌شکل به صورت نیم‌دایره هستند، گنبد تمایل برای پایداری در بالا ندارد ولی خمشی رو به بالا در بخش پایین‌تر وجود دارد.



شبیه قوس (نماینده رفتار فشاری)

تنش‌های فشاری در طول محورها به خاطر قرینگی محورها، ثابت است. هر نصف‌النهار به شکل یک قوس طنابی برای نیروهای وارده عمل کرده و به عبارت ساده‌تر بارها را بدون ایجاد تنش خمشی تحمل می‌کند.



تنش‌های نصف‌النهاری در مدار یک گنبد کروی

پوسته‌های گنبدی علاوه‌بر تحمل فشار، تحمل کششی را نیز دارند و این ویژگی باعث ایجاد رفتاری متفاوت با گنبدهای سنتی می‌شود؛ زیرا گنبدهای سنتی نمی‌توانند در برابر کشش مقاومت کنند و احتیاج به وزن اضافی برای ممانعت از خمش رو به بالا دارند.

در یک گنبد پوسته‌ای تمایل به کمانش رو به بالا به‌وسیله تنش کششی در طول خطوط حلقوی در زیر زاویه ۴۵ درجه بالای خط افق مهار می‌شود. به همین دلیل، گنبدهای نیم‌کره توخالی تحت تأثیر فشار حلقوی می‌باشند، در حالی که گنبدهای کروی عمیق‌تر تحت تأثیر فشار حلقوی بالای ۴۵ درجه و تحت تأثیر کشش حلقوی در قسمت پایین‌تر قرار دارند.

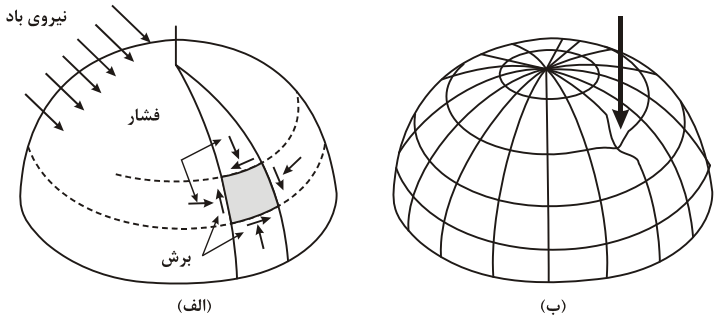
نکته ۱: زاویه براساس بارگذاری متغیر است و در صورتی که فقط بار وزن گنبد وجود داشته باشد، این زاویه برابر ۳۸ درجه در بالای خط افق خواهد بود.

گنبدهای بیضوی در بخش بالایی نسبت به بخش پایینی مسطح‌تر می‌باشند و تمایلی برای خمش رو به بالا دارند؛ بنابراین به وسیله حلقه کششی در پایه گنبد برای جلوگیری از خمش رو به بالا مهار می‌شوند. برعکس، گنبدهای سهموی منحنی‌های تیزتری در بالا و نرم‌تر در پایین دارند که به فرم منحنی طنابی نزدیک‌تر است؛ همچنین تمایل کمتری به خمش داشته و حلقه فشاری کمتری ایجاد می‌کنند.

(ب) (الف)

تغییر شکل در پوسته‌های کروی نیم‌دایره و ربع دایره

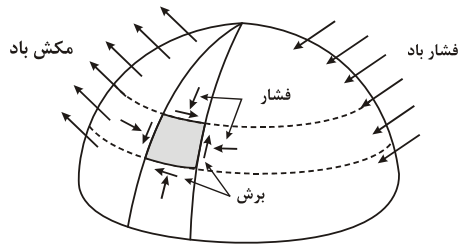
الف) گنبد توخالی به طور کامل تحت فشار قرار می‌گیرد و ب) بخش پایین تر گنبد تمایل به خمش به بالا داشته و به وسیله حلقه کششی در برابر آن مقاومت می‌شود.



گنبد: الف) مقاومت برشی در برابر نیروهای جانبی مانند باد و ب) تنش‌های خمشی ناحیه‌ای به سبب بار متمرکز (ضعف پوسته در برابر بار متمرکز پوسته را پانچ می‌کند)

گنبد مقابل با مکانیزم برش در برابر نیروی باد مقاومت می‌کند.

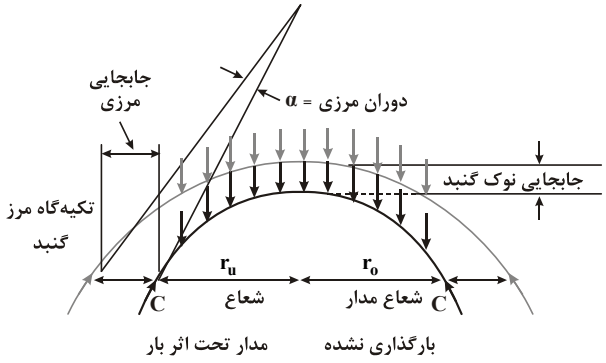
با در نظر گرفتن مکانیزم برشی، می‌توان تحت هر بارگذاری گنبد را سازه طنابی به شمار آورد و بنابراین گنبد عملاً در هر موقعیتی یک سازه پایدار است. برای مثال، گنبد بارهای جانبی مانند فشار و مکش باد را با ایجاد هر سه نوع تنش غشایی تحمل می‌کند.



مکانیزم برش در گنبد تحت اثر بار باد

تأثیر مدارها در رفتار طنابی گنبد با توجه به تغییر شکل نصف‌النهارها تحت اثر بارهای وارده مشخص می‌شود. در یک گنبد با خیز کم نصف‌النهارها به علت بروز فشار کوتاه می‌شوند و تحت اثر بارها حرکت کرده و به سمت محور گنبد یعنی به داخل متمایل می‌گردند.

در گنبدهای با خیز کم تنش‌های فشاری هم در جهت نصف‌النهارها و هم در جهت مدارها ایجاد می‌شوند، در این حالت می‌توان این قبیل سازه‌ها را از موادی که قابلیت تحمل تنش‌های کششی ندارند (مثل آجر یا مصالح بنایی) ساخت.



تغییر شکل گنبد کروی با خیز کم تحت اثر بار گسترده

مدرسان شریف

فصل ششم

«مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

مقدمه

با بررسی سؤالات سال‌های اخیر کنکور کارشناسی ارشد مجموعه هنرهای ساخت و معماری، درمی‌یابیم که گاهی سؤال‌های مربوط به ایستایی و فن ساختمان از سرفصل‌هایی که به طور مشخص به این مبحث مربوط نبوده (مانند مبحث مواد و مصالح) انتخاب می‌شوند؛ لذا لازم است که متقاضیان این فصل را از دید استاتیکی نیز مطالعه کرده و به درجه سختی تست‌های مطرح‌شده در این فصل توجه کنند.

در این فصل به موارد زیر اشاره خواهد شد:

عملیات خاکی ـ شفته ـ بتن و بتن‌آرمه ـ کارهای فلزی ـ عایق‌کاری ـ بنایی ـ نماسازی ـ اندودکاری ـ بندکشی ـ کارهای چوبی ـ کاشی‌کاری و سرامیک ـ پوشش‌های کف و پله ـ پوشش‌های کاذب و جداکننده ـ شیشه و نصب آن ـ درزهای ساختمانی و ... .

درسنامه (۱): عملیات خاکی

به عملیاتی از قبیل: تمیزکردن بستر و حریم از درختان و ریشه گیاهان، برداشت خاک‌های نباتی، خاک‌برداری، گودبرداری، خاکریزی و کوبیدن خاک و کارهای حفاظتی، عملیات خاکی گفته می‌شود.

خاک‌برداری

در زمین‌های چمنی با پوشش نازک علفی، برداشت تا ۱۵ سانتی‌متر خاک نباتی توصیه می‌شود، ولی در زمین‌های جنگلی عملیات تا برداشت کامل ریشه و کنده درختان و رسیدن به بستر مناسب ادامه می‌یابد.

عملیات خاک‌برداری و رگلاژ سطوح بدون پوشش، باید به طور همزمان صورت گیرد. کارهای بعدی باید بلافاصله پس از خاک‌برداری صورت پذیرد و در هر حالت نباید سطوح خاک‌برداری‌شده بیش از ۷۲ ساعت در معرض عوامل جوّی و باران قرار گیرند.

پی‌کنی و گودبرداری: در محل‌هایی که در آن پی‌سازی پیش‌بینی شده، در صورت تأیید دستگاه نظارت می‌تواند طوری صورت گیرد که تا حد امکان به قالب‌بندی نیاز نبوده و بتوان از جبهه خاک‌برداری‌شده با استفاده از پلاستیک یا روش‌های مشابه تأییدشده استفاده کرد.

عملیات خاکی

در صورتی که نتوان از جبهه خاک‌برداری‌شده برای اجرای کارهای بتنی استفاده کرد و بستن قالب اجتناب‌ناپذیر باشد، می‌توان با تأیید دستگاه نظارت به میزان مورد نیاز و حداکثر تا ۷۰ سانتی‌متر در پایین‌ترین نقطه به ابعاد پی‌کنی اضافه نمود.

پی‌کنی و گودبرداری باید تا رسیدن به بستر مناسب ادامه یابد. به‌طور کلی باید مصالح نامناسب و سست با مصالح مناسب و تأییدشده جایگزین شود.

چنانچه عملیات گودبرداری با ماشین انجام شود، گودبرداری باید تا ۱۵ سانتی‌متر مانده به رقوم نهایی انجام شده و مابقی به صورت دستی و طبق نقشه‌های اجرایی انجام شود.

محل‌های پی‌کنی باید از نفوذ آب برف، یخ یا پرشدن با هرگونه مصالح و ضایعات مصون بماند.

برای جلوگیری از نفوذ آب، باید از روش‌های متداول نظیر احداث آب‌بند پلاستیک، سپرکوبی، انحراف مسیر آب زهکشی، پمپاژ و غیره استفاده کرد. تخریب با استفاده از مواد منفجره در فاصله‌ای کمتر از صد متر از ساختمان‌های ساخته‌شده یا نیمه‌تمام و اماکن مسکونی به هیچ وجه مجاز نیست. پیمانکار باید حداقل یک ساعت قبل از اجرای عملیات، دستگاه نظارت را از محل و وسعت انفجار مطلع نماید.

مثال۱: معمولاً در یک خاک‌برداری صحیح، چند سانتی‌متر از سطح خاک به عنوان خاک نباتی برداشته می‌شود؟

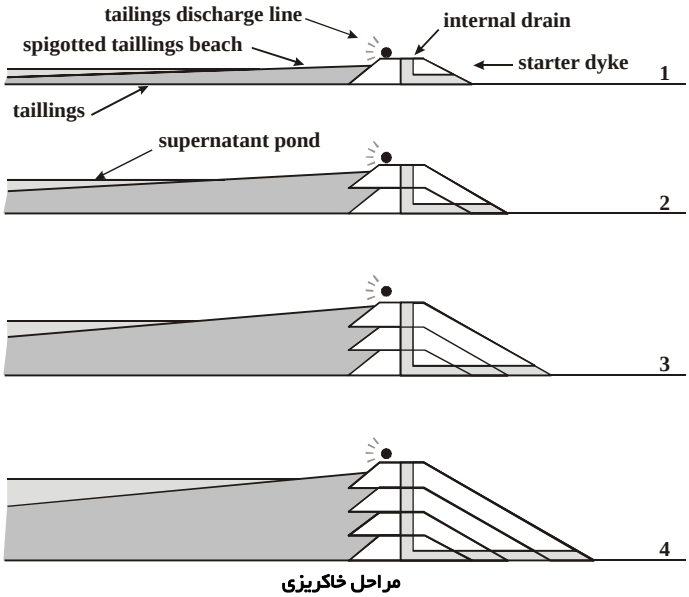
(هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۶)

۱) ۵۰ ۲) ۳۰ ۳) ۷۰ ۴) ۱۰۰

☑ **پاسخ:** «هیچ‌یک از گزینه‌ها صحیح نمی‌باشد». خاک‌های فرسوده یا نباتی سطحی به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که برای تحمل بارهای وارده از طرف سازه مناسب نباشند. لایه‌های خاک حاوی مواد آلی شامل ریشه‌های پوسیده گیاهان و درختان و نظایر آن جزء خاک‌های نباتی محسوب می‌شوند. خاک‌های فرسوده یا نباتی برای خاکریزها، غیرقابل مصرف بوده و باید از تمام قسمت‌های عملیات خاک‌برداری، گودبرداری و محل قرضه‌ها، جمع‌آوری و در محل‌های تعیین‌شده توسط دستگاه نظارت ریخته شوند. در زمین‌های چمنی با پوشش نازک علفی، برداشت تا ۱۵ سانتی‌متر خاک نباتی توصیه می‌شود، ولی در زمین‌های لجن گلی عملیات تا برداشت کامل ریشه و کنده درختان و رسیدن به بستر مناسب ادامه می‌یابد.
با توجه به توضیحات ارائه‌شده، حداقل برداشت خاک نباتی تا عمق ۱۵ سانتی‌متر است، اما در گزینه‌ها کمترین عدد ۳۰ سانتی‌متر ذکر شده است.

خاکریزی

مصالح خاکریزی: تمامی خاک‌هایی که در گروه‌های هفت‌گانه A-1 تا A-7 استاندارد M-145 اشتو قرار گیرند، جزء خاک‌های قابل قبول برای خاکریزی محسوب می‌شوند. خاک‌های یادشده به دو طبقه به شرح زیر تقسیم می‌شوند:
۱) خاک‌های درشت‌دانه گروه A_1, A_2, A_3 ۲) خاک‌های ریزدانه گروه A_4, A_5, A_6, A_7
استفاده از خاک‌های ذکرشده با توجه به شرایط اجرای کار، نوع بهره‌برداری و بارگذاری بر روی خاکریز و همچنین میزان مصالح ریزدانه (گذرنده از الک نمره ۲۰۰) توسط دستگاه نظارت و در صورت لزوم تأیید آزمایشگاه مورد تأیید کارفرما تعیین و به پیمانکار ابلاغ می‌شود.



مراحل خاکریزی

چنانچه به علت نبودن خاک مناسب از خاک رس قابل تورم استفاده شود، می‌توان رطوبت را به میزان (۱%) تا (۲%) بیشتر از رطوبت بهینه در نظر گرفت. برای کم‌کردن خاصیت خمیری این خاک‌ها می‌توان از آهک استفاده کرد. میزان آهک، درصد تراکم و رطوبت، باید توسط آزمایشگاه مورد تأیید کارفرما، تعیین و توسط دستگاه نظارت به پیمانکار ابلاغ شود.
اضافه‌نمودن آهک علاوه بر کنترل پلاستیسیته خاک رس، باعث بالابردن کارایی سیلت و رس با درصد رطوبت بیشتر از میزان رطوبت بهینه خواهد شد.
کاهش آب آزاد خاک ضمن آبگیری آهک، باعث بهبود مقاومت خاک خواهد شد. در صورتی که ظرفیت باربری زیادی از خاک مورد نظر باشد، به کار بردن سیمان پرتلند یا اضافه کردن آهک نیز به بهبود ظرفیت باربری خاک کمک می‌کند. میزان و روش اختلاط و نحوه اجرای کار، باید توسط دستگاه نظارت به پیمانکار ابلاغ شود.

انواع خاکریزی

بسته به نوع استفاده و عملکرد، خاکریزی به دو بخش **خاکریز باربر** و **خاکریز پرکننده** تقسیم می‌شود.

خاکریزهای باربر: خاکریز باربر به خاکریزی اطلاق می‌شود که بارهای استاتیکی وارده از شالوده و کف ساختمان و نیز بارهای دینامیکی حاصل از ماشین‌آلات و تأسیسات را تحمل کند. این خاکریزها باید در طول بهره‌برداری از ساختمان بارهای وارده را به بستر خود منتقل نمایند.
نکات مهمی که در اجرای خاکریزهای باربر باید رعایت شوند:
ـ ضمن توجه به نوع خاک و انتخاب ماشین‌آلات مناسب، تراکم خاک به نحو مطلوب انجام شود.
ـ بستر آماده‌شده خاکریزی باید دارای ظرفیت باربری کافی برای تحمل بارهای وارده باشد.

ـ خاکریز بدون نشست یا در صورت امکان نشست آن در حد مجاز باشد.

ـ اجرای خاکریزی بر روی بسترهایی که خاک‌های قابل انقباض دارند، مجاز نیست و این خاک‌ها باید با مصالح مناسب جایگزین شوند.

ـ به‌کار بردن رس‌هایی با خاصیت خمیری و قابلیت تورم زیاد در خاکریزی مجاز نیست.

ـ کنترل بستر خاکریزی با رعایت مندرجات مشخصات فنی خصوصی قبل از اجرای عملیات خاکریزی ضروری است.

خاکریزهای پرکننده: برای پرکردن اطراف پی ساختمان‌ها، دیوارهای حایل، ترانشه لوله‌ها و مشابه آن از خاکریزهای پرکننده استفاده می‌شود. خاک‌های حاصل از گودبرداری و عملیات خاکی، باید در صورت مناسب‌بودن به مصرف برسند، در غیر این صورت باید با نظر و تأیید دستگاه نظارت از خاک قرضه مناسب برای خاکریزی استفاده شود. در صورت عدم دسترسی به خاک مناسب با تأیید قبلی دستگاه نظارت می‌توان از مصالحی نظیر بتن سبک و شفته آهکی استفاده نمود.

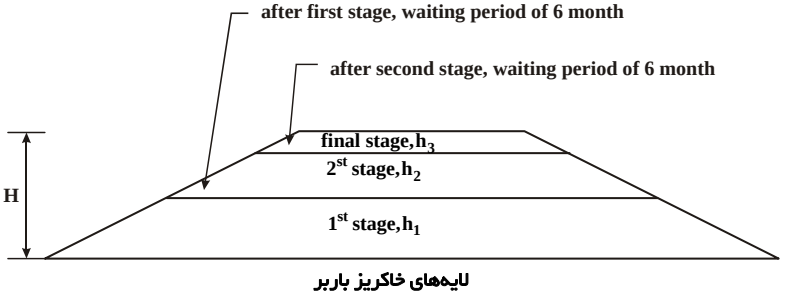
کنترل رطوبت خاکریزها

خاکریزهای با مصالح ریزدانه: قبل از اجرای عملیات تراکم در خاکریزها، مصالح ریزدانه باید دارای رطوبت بهینه باشد. رطوبت بهینه بایستی بر اساس روش پروکتور استاندارد کنترل شود. بهتر است رطوبت در محل قرضه به خاک اضافه شده و پس از حمل و پخش، رطوبت در محل کنترل شود. اضافه‌نمودن آب برای تأمین رطوبت در محل اجرا با توجه به نوع مصالح باید مورد موافقت دستگاه نظارت قرار گیرد. برای اندازه‌گیری وزن مخصوص خاک در محل باید از روش مخروط ماسه مطابق استاندارد (T ـ ۱۹۱) استفاده شود. تعیین رطوبت بهینه و تراکم به روش پروکتور استاندارد صورت می‌گیرد.

در صورت تأیید دستگاه نظارت می‌توان درصد رطوبت را در مورد خاک‌های چسبنده، (۱%) تا (۲%) کمتر و در مورد خاک‌های قابل تورم، (۱%) تا (۲%) بیشتر از رطوبت بهینه اختیار کرد. در هر حالت عملیات تراکم تا حصول وزن مخصوص مورد نظر ادامه می‌یابد.

خاکریزهای باربر

پخش لایه‌ها: عملیات خاکریزی باید به صورت لایه‌های افقی صورت گیرد. نحوه توزیع و پخش مصالح در لایه‌های خاکریزی، باید چنان باشد که در هیچ قسمت از کار، حفره و سوراخ به وجود نیاید و مصالح به صورت یکنواخت پخش شود. عبور و مرور وسایل نقلیه و تجهیزات کارگاه از منطقه خاکریزی که موجب برهم خوردن تراز کار و ایجاد شیار در اثر عبور چرخ ماشین‌آلات می‌شود، مجاز نیست. با توجه به ضخامت، جنس و میزان تراکم، مصالح خاکریزی باید در محل و فواصل معین به نحوی تخلیه شود که بتوان آن را به راحتی در سطح کار پخش نمود. تنظیم و پخش باید به نحوی صورت گیرد که پس از عمل تراکم، سطح و ضخامتی کاملاً یکنواخت حاصل شود و در جسم خاکریز، فضاهای خالی با رگه‌های مجزا و دانه‌بندی غیرپیوسته مشاهده نشود. لایه‌های افقی باید به صورتی ریخته شوند که هر لایه بعد از خاتمه عمل کوبیدن لایه قبلی ریخته شود. ضخامت این لایه باید به نحوی انتخاب شود که پس از عمل کوبیدن و تحصیل تراکم مورد نظر، هیچ‌گاه ضخامت لایه تمام‌شده از ۱۵ سانتی‌متر تجاوز نکند. حداکثر ضخامت خاک قبل از کوبیدن با توجه به نوع خاک، ماشین‌آلات به‌کار گرفته‌شده و تجربیات کارگاهی با روش سعی و خطا مشخص می‌شود، ولی هیچ‌گاه نباید ضخامت لایه خاک نکوبیده ریزدانه از ۳۰ سانتی‌متر تجاوز نماید. در مورد خاک‌های درشت‌دانه و مصالح سنگی، حداکثر ضخامت با تأیید دستگاه نظارت معین می‌شود. چنانچه دستگاه نظارت تشخیص دهد که بعد از اتمام عمل کوبیدن سطح کار بسیار صاف و آیینه‌ای بوده و در نتیجه اتصال با لایه بعدی دچار اشکال خواهد شد، دستور شخم‌زدن سطح کار قبل از ریختن لایه بعدی را صادر خواهد کرد. در مورد خاکریزی با مصالح سیلتی و رسی در صورتی که سطح خاکریز خیلی خشک یا بیشتر از حد لازم مرطوب باشد، باید مقدار رطوبت را قبل از اجرا کنترل کرد.



لایه‌های خاکریز باربر

تسطیح و تنظیم: پیمانکار باید دقت کند که شیب شیروانی‌ها به طور مرتب، رگلاژ و تسطیح شده و آثار بی‌نظمی یا رد ماشین‌آلات در آن‌ها دیده نشود. مقاطع طولی و عرضی باید دقیقاً بر اساس قواره‌های لازم، اجرا و تنظیم شده و ناهمواری‌های خاکریز در محور طولی شمشه ۵ متری، نباید از ۳ سانتی‌متر تجاوز نماید.

پخش مصالح: پس از اجرای عملیات ساختمانی سازه‌ها، پی ساختمان‌ها، دیوارهای حایل اطراف آن، باید از مواد اضافی و خارجی کاملاً تمیز و سپس فضاهای خالی با خاک مناسب از خاک‌برداری یا منابع قرضه لایه لایه ریخته، رگلاژ و کوبیده شود. پخش لایه‌ها و کوبیدن با توجه به وضعیت سازه، باید با روش‌های سبک دستی به نحوی صورت گیرد که هیچ‌گونه صدمه‌ای به سازه وارد نیاید. پخش لایه‌ها به‌صورت افقی بوده و ضخامت آن پس از کوبیدن نباید از ۱۵ سانتی‌متر تجاوز نماید.

درسنامه (۲): شفته‌ریزی

رعایت نکات زیر به هنگام ساخت و اجرا الزامی است:

الف: قبل از شفته‌ریزی باید محل گودبرداری‌ها و خاک‌برداری‌ها با توجه به دستورات دستگاه نظارت و مشخصات فنی خصوصی آماده شود. شفته‌ریزی باید بعد از کنترل ابعاد و رقوم، با اجازه دستگاه نظارت انجام شود.

ب: برای ساخت و عمل‌آوردن شفته باید در محل کار، مکان‌های مناسبی با تأیید دستگاه نظارت برای اختلاط دوغاب آهک و خاک فراهم شود. آهک باید در محل‌های مناسب و دور از اثرات عوامل جوّی، دپو و به هنگام مصرف به محل ساخت حمل شود.

آهک

مقدار آهک بستگی کامل به نوع خاک مصرفی دارد. بهترین خاک برای ساختن شفته آهکی، خاک با دانه‌بندی پیوسته است که ریزدانه آن از (۲۵%) و خاک رس آن از (۱۵%) وزن خاک کمتر نباشد؛ علاوه بر آن، میزان آهک مصرفی بستگی کامل به نوع آهک خواهد داشت. اگر جنس آهک خوب باشد و بیش از (۵۰%) از میزان آهک آزاد CaO در آب حل شود، بسته به میزان خاک رس موجود در جسم خاک، میزان آهک از ۱۰۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم آهک در مترمکعب شفته آهک می‌باشد.

شفته آهکی که با دوغاب ساخته و خوب عمل‌آوری شده باشد، دارای مقاومت ۷ روزه معادل ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تاب ۲۸ روزه در حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع خواهد بود که این مقاومت برای بستر پی ساختمان یا راه کاملاً مناسب می‌باشد.

کاربرد

شفته آهکی برای اصلاح و تثبیت خاک پی ساختمان و زیرسازی راه‌های ارتباطی به منظور تقلیل هزینه‌ها، مورد توجه و توصیه است. به علت سهولت در امر دستیابی به مصالح و بالابودن ظرفیت باربری شفته آهکی، کاربرد آن رایج است.

لازم به ذکر است که برای مصارف مختلف و شرایط متنوع باید آهک‌هایی به شرح جدول زیر انتخاب شود:

نوع آهک	موارد مصرف
خمیر یا گرد آهک شکفته‌ای که به صورت دوغاب درآمده باشد. (آهک سفید)	ملات‌های ماسه‌آهک، گل‌آهک، گچ‌آهک و باتارد. پایدارکردن خاک در راهسازی، خشت‌های پایدارشده با آهک، شفته آهکی، پی‌سازی در خاک‌های معمولی، بتن آهکی سنگین و متخلخل
آهک‌های آبی	ملات و اندود ساختمان‌های دریایی، پی‌سازی در خاک‌های سولفات‌دار با سولفات زیاد
آهک‌های نیمه‌آبی (خاکستری)	پی‌سازی در خاک‌های سولفات‌دار با سولفات کم
آهک زنده کلسیومی پرمایه	پایدارکردن خاک در راهسازی، آجر ماسه آهکی، بتن آهکی سنگین و متخلخل، سیمان آهک پوزولان و آهک سرباره
دوغاب آهک کم‌مایه	شفته پی‌سازی ساختمان‌های کم‌ارتفاع

مثال۲: برای پی‌سازی در خاک‌های با سولفات زیاد، استفاده از چه نوع آهکی توصیه می‌شود؟ (هنرهای ساخت و معماری ـ سراسری ۹۷)

۱) دوغاب آهک ۲) آهک سفید ۳) آهک آبی ۴) آهک زنده

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» آهک یکی از مواد چسباننده ساختمان است؛ به عبارتی دیگر، نوعی سیمان هوایی به‌شمار می‌رود. فرمول شیمیایی آهک زنده خالص، اکسید کلسیم یا CaO است. معمولاً آهک را از پختن سنگ آهک یا کربنات‌کلسیم در یکی از انواع کوره‌های دستی (یا سنتی)، قائم و افقی گردنده به‌دست می‌آورند. ملات و اندود ساختمان‌های دریایی، پی‌سازی در خاک‌های سولفات‌دار با سولفات زیاد توسط آهک‌های آبی انجام می‌شود.

مثال ۳: منظور از آهک شکفته:

۱) ترکیب سنگ آهک با آب می‌باشد.

۲) سنگ آهک حرارت‌دیده که CO_2 از آن جدا شده، می‌باشد.

۳) ترکیب‌شده اکسید کلسیم با آب می‌باشد.

۴) ترکیب ماسه، خاک رس، آب، آهک

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» آهک زنده میل ترکیبی زیادی با آب داشته و در تماس با آن می‌شکفد یا هیدراته می‌شود و به هیدروکسید کلسیم یا آهک شکفته تبدیل می‌گردد. در این واکنش مقدار زیادی گرما تولید می‌شود و حجم آن نیز افزایش می‌یابد. برای تهیه آهک هیدراته روش‌های دستی و صنعتی به شرح زیر وجود دارد:

الف) روش‌های دستی:

این روش‌ها از قدیم معمول بوده و هم‌اکنون نیز در کارگاه‌های کوچک رواج دارد.

۱ـ روش تر یا آهک‌شویی: در این روش کلوخه‌های سنگ آهک پخته را در حوضچه‌هایی ریخته و به آن آب اضافه می‌کنند و به هم می‌زنند تا شکفته شود و به صورت شیر آهک درآید. حوضچه دارای دریچه‌ای با تور سیمی می‌باشد که با کشوی چوبی مسدود شده است. پس از شکفتن آهک، کشو را بالا می‌کشند تا شیر آهک از دریچه و تور سیمی عبور کرده و به سمت گودالی که در جلو آن حفر شده روان شود. ناخالصی‌ها در روی تور باقی می‌مانند که آن‌ها را برمی‌دارند و حوضچه را برای آهک‌شویی مجدد آماده می‌سازند. قسمتی از آب شیر آهک در زمین اطراف گودال فرو رفته و در بخشی از آن ترک‌هایی به پهنای ۲ تا ۳ سانتی‌متر ایجاد شده، آن را به مدت ۶ تا ۸ هفته در گودال می‌خوابانند تا کاملاً شکفته شده و برای مصرف در ملات و شفته آماده شود.

۲ـ روش خشک: در این روش کلوخه‌های آهک زنده را در لایه‌های ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر روی سطح تمیزی چیده و روی آن آب می‌پاشند و زیر و رو می‌کنند تا بشکفد. با اضافه کردن لایه‌های جدید و آبپاشی، این عمل تکرار می‌شود تا ارتفاع کلوخه‌های انباشته به حدود یک متر برسد. روی توده آهک شکفته را با کاهگل اندود می‌کنند و می‌گذارند تا بشکفد و به صورت گرد درآید. پس از سرند کردن و گرفتن ناخالصی‌ها، آن را به مصرف می‌رسانند.

ب) روش‌های صنعتی:

این روش‌ها به خاطر کاهش دستمزد و بالا رفتن بازده کار و کاهش خطر ابداع شده و به قرار زیرند:

۱ـ استفاده از هیدراتور: هیدراتور استوانه‌ای است که به صورت افقی یا قائم، کار گذارده شده و درون آن همزن‌هایی نصب شده است. خرده سنگ یا گرد سنگ آهک زنده را در هیدراتور ریخته و پس از بستن در هیدراتور و افزودن آب، محتویات آن را به هم می‌زنند. بسته به مقدار آب از شیر آهک تا گرد آهک شکفته به دست می‌آید.

۲ـ شکفتن آهک با بخار آب: کلوخه‌های ریز یا گرد زنده را در اتوکلاو قرار داده و با دمیدن بخار آب با فشار ۳ـ۴ اتمسفر آن‌ها را هیدراته می‌کنند. این روش بیشتر برای تسریع در شکفتن آهک و هیدراته کردن آهک‌هایی که ناخالصی بیشتری دارند، به کار برده می‌شود و محصول آن گرد آهک شکفته است.

در روش‌های صنعتی، آهک شکفته به دست‌آمده را آسیاب کرده و با سرند کردن یا ایجاد گردباد، آن را دانه‌بندی و سپس بسته‌بندی می‌کنند. آهک شکفته چنانچه در مجاورت هوا قرار گیرد، با دی‌اکسید کربن موجود در هوا ترکیب شده و دوباره سنگ آهک یا کربنات کلسیم به وجود می‌آید.

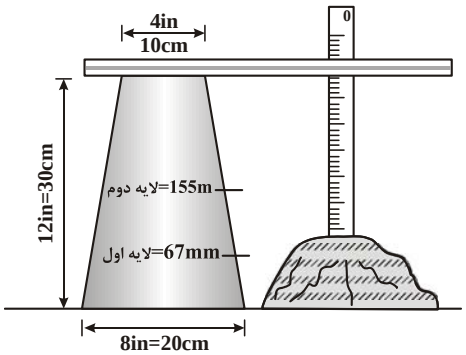
درسنامه (۳): بتن و بتن‌آرمه

ویژگی‌های مهم بتن

عملیات بتن‌ریزی

بتن با کارایی و دوام زیاد به بتنی اطلاق می‌شود که بتواند به راحتی ریخته شود، در مقابل شرایط محیطی خورنده و بارهای وارد بر آن به خوبی مقاومت کند و مشخصات آن تغییر نکند. ویژگی‌هایی که باید مورد توجه پیمانکار قرار گیرد به شرح زیر است:

کارایی بتن: بتن کارا، بتنی است که بتوان به راحتی آن را ساخت، حمل کرد، در قالب مورد نظر ریخت و متراکم نمود، بدون اینکه در یکنواختی آن در طول مراحل فوق تغییری حاصل شود. کارایی بتن بستگی به عوامل مختلفی داشته و پیمانکار ملزم به رعایت آن می‌باشد.



آزمایش اسلامپ

اسلامپ: کارایی به میزان اسلامپ و روانی بتن ساخته‌شده بستگی دارد. بتن‌هایی که به هنگام ریختن، اسلامپ‌شان با مشخصات خواسته‌شده مطابقت ننماید، مردود بوده، باید از مصرف آن خودداری شده و از کارگاه خارج شوند. اضافه‌کردن آب برای بالا بردن اسلامپ بتن‌های سفت‌شده پس از ساخت به هیچ‌وجه مجاز نیست و انجام این امر باعث تغییرات کلی در مشخصات بتن ساخته‌شده خواهد شد. بسته به میزان اسلامپ و نوع کاربرد، بتن به ۴ گروه سفت، خمیری، شل و آبکی تقسیم می‌شود. میزان اسلامپ برای اعضا و قطعات مختلف بر اساس جدول زیر توصیه می‌شود.

میزان اسلامپ برای اعضا و قطعات بتنی

ردیف	نوع عضو یا قطعه بتنی	اسلامپ به میلی‌متر	
		حداقل	حداکثر
۱	شالوده‌ها و پی دیوارهای بتن‌آرمه	۲۵	۷۵
۲	شالوده‌های با بتن ساده، صندوقه‌ها و دیوارهای زیر سازه‌ها	۲۵	۷۵
۳	تیرها و دیوارهای بتن‌آرمه	۲۵	۱۰۰
۴	ستون‌ها	۲۵	۱۰۰
۵	دال‌ها و پیاده‌روهای بتنی	۲۵	۷۵
۶	بتن حجیم	۲۵	۵۰

نکته ۱: سیمان با نرمی زیاد باعث بالا بردن کارایی بتن می‌شود.

نکته ۲: بتن از سه جزء اساسی تشکیل شده است: ۱) سیمان ۲) سنگدانه که خود به دو دسته ریزدانه و درشت‌دانه تقسیم می‌شود و ۳) آب.

نکته ۳: در صورتی که لرزش و ارتعاش با روش‌های دستی انجام شود به مقدار حداکثر می‌توان ۲۵ میلی‌متر اضافه کرد، آنگاه حداقل اسلامپ ۲۵ و حداکثر اسلامپ ۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

هرچه نسبت آب کمتری در بتن مصرف شود، مقاومت و دوام آن بیشتر می‌شود. در صورتی که آب بیشتری در بتن مصرفی به کار رود، روانی (کارایی بتن) بیشتر شده ولی مقاومت و دوام آن کاهش می‌یابد.

آب مصرفی در بتن باید فاقد هرگونه مواد آلی و معدنی باشد؛ به این دلیل، آب مصرفی شهری باید استفاده شود. همچنین هر آبی که pH (حالت بازی یا قلیایی) آن بین ۵ تا ۸ بوده و طعم شوری نداشته باشد، برای اختلاط در بتن مناسب است.

نسبت آب به سیمان با توجه با شرایط رویارویی بتن

شرایط رویارویی	نسبت آب به سیمان
۱ـ بتن با شرایط نفوذناپذیر	
الف ـ در رویارویی با آب صاف	۰/۵
ب ـ در رویارویی با آب لب شور و آب دریا	۰/۴۵
۲ـ بتن در معرض شرایط جوّی مرطوب و یخ زدن	
الف ـ جدول، آبرو، جان‌پناه و مقاطع با ضخامت کم	۰/۴۵
ب ـ سایر مقاطع	۰/۵
ج ـ بدون به کار بردن مواد یخزدا	۰/۴۵
۳ـ برای حفاظت بتن‌آرمه در برابر خوردگی هنگام رویارویی با نمک‌های یخزدا و آب‌های لب شور، آب دریا و ترشحات حاصل از آن	۰/۴۵

نسبت آب به سیمان در بتن با حباب هوا، نباید در هیچ مورد از ۰/۵ تجاوز کند. برای بتن‌های طبقه C30 و بالاتر می‌توان میزان هوای مندرج در جدول زیر را تا (۱%) کاهش داد. در مواردی که میزان هوای موجود در بتن، (۴%) تا (۶%)است، باید به میزان اولیه سیمان ۵۰ کیلوگرم در مترمکعب اضافه نمود. در مواردی که به تشخیص دستگاه نظارت میزان هوای بیشتری مورد نیاز باشد، باید به ازای هر (۱%) هوای اضافه ۲۵ کیلوگرم سیمان به مترمکعب بتن اضافه شود.

مقدار درصد هوای توصیه‌شده برای بتن‌های با حباب هوا مقاوم در برابر یخزدگی

ردیف	حداکثر اندازه شن میلی‌متر (اینچ)	مقدار کل درصد هوای موجود در بتن با حباب هوا	
		شرایط محیطی شدید	شرایط محیطی معتدل
۱	۵/۹($\frac{۳}{۸}$)	۵/۷	۶
۲	۵/۱۲($\frac{۱}{۲}$)	۷	۵/۵
۳	۱۹($\frac{۳}{۴}$)	۶	۵
۴	۲۵(۱)	۶	۵/۴
۵	۵/۳۷($\frac{۱}{۲۱}$)	۵/۵	۵/۴
۶	۵۰(۲)	۵	۵/۴

خاکستر بادی: ماده‌ای است که از سوختن زغال‌سنگ حاصل شده و توسط فیلترهای مخصوص به صورت غبار جمع‌آوری می‌شود. حدود ۸۵ درصد ذرات این ماده از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیم، آهن، کلسیم و منیزیم تشکیل می‌شود. آثار مطلوب این ماده در بهبود خواص بتن تازه و سخت‌شده، باعث مصرف روزافزون آن در دنیا شده است.

مصرف این ماده باعث افزایش کارایی بتن تازه می‌شود، همچنین افزایش دمای اولیه بتن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ بنابراین مصرف آن در بتن‌ریزی‌های حجیم رایج است. عملکرد این ماده در افزایش دوام بتن در مقابل محیط‌های مهاجم اثبات شده است. نفوذپذیری کمتر، عملکرد مناسب در برابر پدیده کربناتاسیون، مقاومت در برابر سولفات و کلرید و نیز کنترل واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها از مزایای استفاده از این ماده به جای سیمان است؛ اگرچه تمام مزایای ذکرشده تحت‌تأثیر انتخاب مناسب نسبت آب به سیمان، عمل‌آوری کافی، کیفیت مطلوب خاکستر بادی و میزان مناسب جایگزین این ماده به جای سیمان است. در صورت انطباق مشخصات این ماده با الزامات استاندارد مقدار جایگزینی ۲۰ تا ۵۰ درصد انتخاب مناسبی است، اگرچه در بعضی موارد جایگزینی با مقادیر بیشتر نیز به‌کار می‌رود.

مثال ۴: استفاده از خاکستر بادی در ترکیب بتن، باعث ایجاد کدام ویژگی می‌شود؟ (معماری ـ سراسری ۹۶)

۱) افزایش نفوذپذیری
۲) افزایش مصرف سیمان
۳) کاهش پایداری زیست‌محیطی
۴) کاهش سرعت کسب مقاومت اولیه

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» مصرف این ماده باعث افزایش کارایی بتن تازه شده که این عمل سبب کاهش سرعت کسب مقاومت اولیه می‌شود.

بتن مقاوم در برابر سایش

بتن مقاوم در برابر سایش بتنی است که بتواند به نحوی در برابر اثرات فرسایشی عبور و مرور، تردد ماشین‌آلات، ضربه، سرخوردن مواد یا اسباب و لوازم بر روی آن مقاومت کند. در ساخت بتن مقاوم به سایش و فرسایش، باید عوامل زیر مورد توجه قرار گیرد:

الف) مقاومت فشاری: یکی از مهم‌ترین عواملی که اثر مستقیم بر فرسایش بتن دارد، مقاومت فشاری است. مقاومت فشاری یا مقاومت سایشی بتن با کم‌شدن فضای خالی بتن و پایین بودن نسبت آب به سیمان تأمین می‌شود. حداقل بتن مقاوم در برابر سایش، بتن طبقه C25 است.

ب) دانه‌بندی مصالح: دانه‌بندی مصالح بتن باید پیوسته بوده و با توجه به مشخصات فنی سنگدانه‌ها در صورت امکان از نوع مصالح با مقاومت زیاد انتخاب شود. حداکثر قطر مصالح سنگی در بتن‌های مقاوم به سایش، ۲۵ میلی‌متر توصیه می‌شود.

ج) اسلامپ: حداکثر اسلامپ برای بتن مقاوم در برابر سایش، ۷۵ میلی‌متر است. توصیه می‌شود اسلامپ بتن برای لایه روکش و مقاوم در برابر سایش، در حدود ۲۵ میلی‌متر اختیار شود.

د) میزان هوا: برای بتن‌های داخل ساختمان که در معرض یخزدن و تغییرات جوّی نیستند، حداکثر هوای موجود در بتن (۳%) اختیار می‌شود.

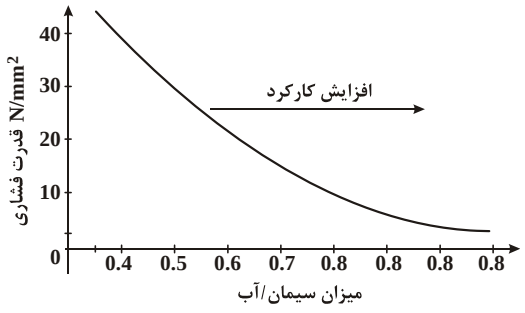
هـ) چنانچه امکان فرسایش سطح بتن با توجه به نوع مصرف بسیار زیاد باشد، توصیه می‌شود که بتن اصلی با یک رویه از طبقه C30 که حداکثر قطر دانه‌های آن ۱۲/۵ میلی‌متر باشد، روکش شود.

و) پرداخت سطح بتن: معمولاً برای صافکاری بتن حداقل ۲ ساعت زمان بعد از ریختن آن لازم است، لذا تا زمانی که آب سطح بتن کاملاً محو نشده است، باید از ماله‌کشی سطح بتن پرهیز شود. بدین منظور ممکن است از روش‌های خاصی برای جمع‌آوری آب سطح استفاده شود.

ز) عمل آوردن: عمل آوردن بتن باید به سرعت پس از بتن‌ریزی آغاز شود. رعایت اصول و مندرجات این نشریه و نیز دستورالعمل‌های تکمیلی دستگاه نظارت الزامی است. منظور از مقاومت فشاری بتن، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و دمای آزمایش ۲۳±۱/۷ درجه سلسیوس است. برای بتن با حباب هوا و مقاومت بیش از ۳۲ مگاپاسکال و بتن معمولی با مقاومت بیش از ۳۵ مگاپاسکال، باید نسبت آب به سیمان با توجه به طرح اختلاط و توسط آزمایشگاه معتبر مشخص شود. حداکثر قطر مصالح سنگی ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر فرض شده که با ثابت‌بودن نسبت آب به سیمان، مقاومت بتن با کم کردن قطر حداکثر شن، زیاد خواهد شد.

سیمان

نوع سیمان: در شرایط مساوی و هنگام ساخت بتن با مصالح سنگی مشخص، اسلامپ، تراکم و مقاومت بتن تابعی از میزان سیمان و نوع آن است. درصد مقاومت فشاری بتن با توجه به نوع سیمان مصرفی در جدول زیر آورده شده است.



درصد مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف با سیمان‌های گوناگون نسبت به سیمان نوع ۱

نوع سیمان	مقاومت ۱ روزه	مقاومت ۳ روزه	مقاومت ۷ روزه	مقاومت ۲۸ روزه
نوع ۱ (سیمان معمولی)	-	۶۴	۱۰۰	۱۴۳
نوع ۲ (اصلاح‌شده سیمان ۱)	-	۵۴	۸۹	۱۴۳
نوع ۳ (بسیار زودگیر)	۶۴	۱۲۵	-	-
نوع ۴ (گرمازایی بسیار کمی دارد)	-	-	۳۶	۸۹
نوع ۵ (ضد سولفات)	-	۴۳	۷۹	۱۰۷