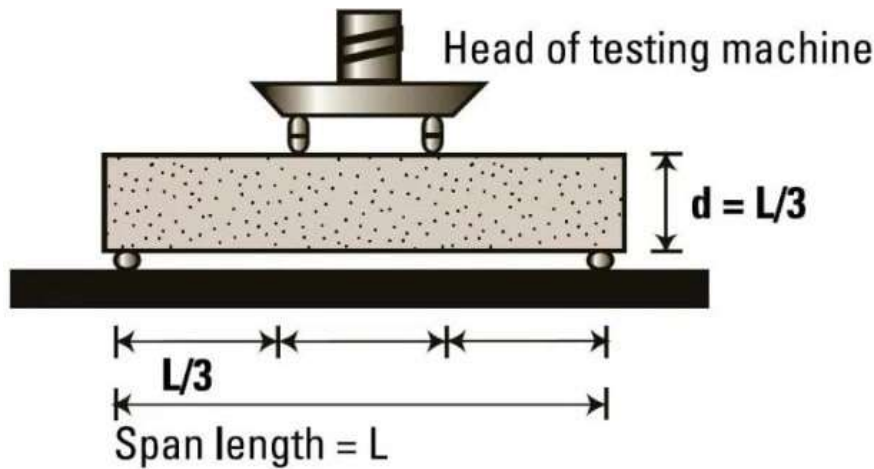


## آزمایش مقاومت خمشی بتن

در این مقاله به توضیح آزمایش خمشی بتن بر اساس استانداردهای ASTM می‌پردازیم.



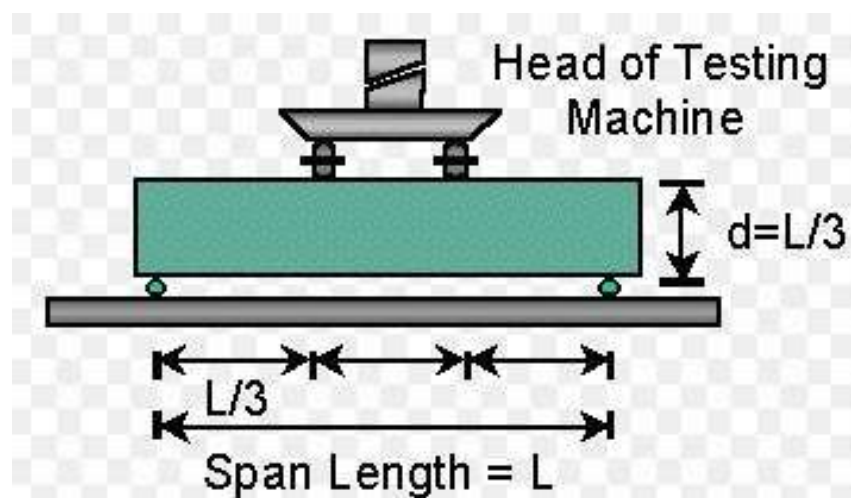
شکل ۱. آزمایش مقاومت خمشی روی بتن (آزمایش بارگذاری سه نقطه‌ای)

### آزمایش خمشی بتن چیست؟

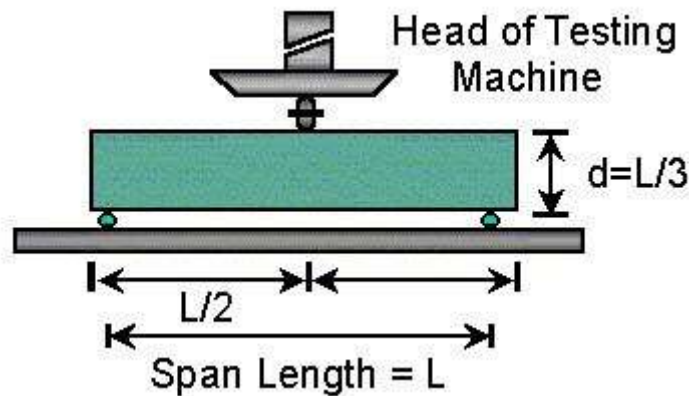
در آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت غیرمستقیم به ارزیابی مقاومت کششی بتن پرداخته می‌شود. این آزمایش قابلیت تیر یا دال بتنی غیرمسلح را به لحاظ مقاومت در برابر شکست ناشی از خمش مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

نتایج آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت یک مدول گسیختگی بیان می‌شود و با MR و واحد مگا پاسکال یا پوند بر اینچ مربع نشان داده می‌شود.

آزمایش خمشی بتن را می‌توان با استفاده از آزمایش سه بار نقطه‌ای (ASTM C78) یا آزمایش بار نقطه‌ای مرکزی (ASTM C293) انجام داد. هر دو آزمایش در شکل ۲ و ۳ به ترتیب نشان داده شده‌اند. روش آزمایشی که در این مقاله توصیف شده بر ASTM C78 استوار است.



شکل ۲. آزمایش بار سه نقطه‌ای (ASTM C78)



شکل ۳. آزمایش بار نقطه‌ای مرکزی (ASTM C293)

باید توجه شود که مقدار مدول گسیختگی به دست آمده از آزمایش بار نقطه‌ای مرکزی، حدود ۱۵ درصد از مدول گسیختگی به دست آمده از آزمایش با سه بار نقطه‌ای کوچک‌تر است.

به‌علاوه مشاهدات نشان داده‌اند که هر چه نمونه‌های بتنی بزرگ‌تر باشند؛ مدول گسیختگی کمتر خواهد بود.

به‌علاوه مدول گسیختگی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری بتن است. این مدول تحت تأثیر نسبت‌های اختلاط، اندازه و مقدار سنگ‌دانه‌ی درشت استفاده شده برای ساخت نمونه قرار دارد.

در نهایت معادله‌ی زیر را می‌توان برای محاسبه‌ی مدول گسیختگی استفاده کرد، اما اگر این مدول در طراحی حائز اهمیت باشد باید این معادله را از طریق آزمایش تعیین کرد:

$$f_r = 7.5\sqrt{f'_c} \rightarrow \text{Equation-1}$$

که در این رابطه:

مدول گسیختگی =  $f_r$

مقاومت فشاری بتن =  $f'_c$



شکل ۴. ماشین آزمایش خمشی و نمونه‌ی بتنی (ASTM C78)

### کاربردهای آزمایش خمشی بتن

- تعیین مطابقت با استانداردها
- این آزمایش یکی از ضروریات در طرح اختلاط بتن است.
- از این آزمایش برای ارزیابی بتن در ساخت دال و روسازی‌ها استفاده می‌شود.

### چه عواملی باعث ایجاد تغییرات در نتایج آزمایش خمشی می‌شوند؟

- آماده‌سازی نمونه‌ی بتنی
- اندازه‌ی نمونه
- شرایط رطوبت نمونه‌ی بتنی
- عمل‌آوری نمونه‌ی بتنی
- و تغییر به دلیل قالب‌گیری یا بریده شدن نمونه به‌اندازه‌ی دلخواه

### اندازه‌ی نمونه‌ی آزمایش خمشی

بر اساس ASTM عرض، عمق و طول نمونه به ترتیب برابر است با: ۱۵۰ میلی‌متر، ۱۵۰ میلی‌متر، حداقل سه برابر عمق نمونه استاندارد هند اندازه‌ی نمونه را به‌صورت ۱۵۰ میلی‌متر عرض، ۱۵۰ میلی‌متر عمق و دهانه‌ی ۷۰۰ میلی‌متر، تعیین کرده است. همچنین این استاندارد بیان می‌کند در صورتی که حداکثر اندازه‌ی سنگ‌دانه بزرگ‌تر از ۱۹ میلی‌متر نباشد می‌توان از اندازه‌ی ۱۰۰ میلی‌متر عرض، ۱۰۰ میلی‌متر عمق و ۵۰۰ میلی‌متر دهانه استفاده کرد. استاندارد بریتانیا سطح مقطع مربعی ۱۰۰ میلی‌متری یا ۱۵۰ میلی‌متری و دهانه‌ی چهار تا پنج برابر عمق نمونه را تعیین کرده است.

با این وجود این استاندارد هم اندازه‌های ۱۵۰ میلی‌متر در ۱۵۰ میلی‌متر و دهانه‌ی ۷۵۰ میلی‌متر را ترجیح می‌دهد.

### وسایل آزمایش خمشی بتن

- قالب فولادی یا آهنی یا قالبی از جنس هر ماده غیر جاذب دیگر با اندازه‌ی ۱۵۰ میلی‌متر در ۱۵۰ میلی‌متر در ۷۵۰ میلی‌متر
- میله‌های ضربه زن: دو میله‌ی بزرگ (با قطر ۱۶ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متر) و یک میله‌ی کوچک (۱۰ میلی‌متر قطر و ۳۰۰ میلی‌متر طول) مطابق با ASTM
- ماشین آزمایش که قادر به اعمال بارها به‌صورت یکنواخت و بدون وقفه
- بیلچه
- ماله
- ترازو با دقت ۱ گرم
- مخلوط‌کن برقی بتن

- میز ویبره در صورتی که از ویبره برای متراکم کردن بتن در قالبها استفاده شود.

### آماده‌سازی نمونه‌ی بتنی

- نسبت‌های مصالح شامل سیمان، ماسه، سنگ‌دانه و آب را تعیین کنید.
- مصالح را با استفاده از دست یا با استفاده از مخلوط‌کن مناسب مخلوط کنید.
- اسلایپ هر نمونه از بتن را بعد از مخلوط کردن اندازه بگیرید.
- قالبها را روی سطح افقی قرار داده و سطح داخلی را با ماده‌ی مناسب روغن کاری کنید، از روغن کاری بیش از حد اجتناب کنید.
- بتن تازه را در سه لایه داخل قالب بریزید.
- هر لایه را با میله‌ی ۱۶ میلی‌متری و با ۲۵ ضربه متراکم کنید یا کل قالب را در یک مرحله پر کرده و آن را با استفاده از میز ویبره متراکم کنید.
- بتن اضافی را از بالای قالب برداشته و بدون اعمال فشار آن را صاف کنید.
- روی نمونه‌ها را بپوشانید و آنها را در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت نگهداری کنید.
- قالبها را برداشته و نمونه‌ها را در دمای  $23 \pm 2$  درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت عمل‌آوری کنید.
- سن آزمایش ۱۴ و ۲۸ روز است و سه نمونه از هر سن باید آماده شود (طبق استاندارد هندی، نمونه در آب با دمای ۲۴ تا ۳۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت انبار شده و سپس آزمایش می‌شود).

### فرآیند آزمایش خمشی بتن

- آزمایش باید بر روی نمونه بلافاصله بعد از خارج شدن از شرایط عمل‌آوری انجام داد تا از خشک شدن سطح نمونه که مقاومت خمشی را کاهش می‌دهد جلوگیری شود.
- نمونه را در نقاط بارگذاری قرار دهید. سطح پرداخت شده با دست نمونه نباید در تماس با نقاط بارگذاری باشد. این کار باعث می‌شود که نمونه تماس قابل قبولی با نقاط بارگذاری داشته باشد.
- سیستم بارگذاری را نسبت به نیروی وارده در مرکز قرار دهید.
- بلوک‌های اعمال‌کننده‌ی نیرو را در نقاط بارگذاری با سطح نمونه تماس دهید.
- بارهای اعمالی بین ۲ تا ۶ درصد بار نهایی محاسبه‌شده باشد.
- از فیلر گیج‌های ۰,۱ میلی‌متر و ۰,۳۸ میلی‌متر استفاده کنید تا مشخص کنید که آیا فاصله‌ی بین نمونه و محل اعمال بار یا فاصله نمونه تا بلوک‌های تکیه‌گاهی بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از فاصله‌ی گیج‌ها در فاصله‌ی ۲۵ میلی‌متر یا بیشتر است.
- هر فاصله‌ی بیش از ۱۰ میلی‌متر را با استفاده از درزگیرهای چرمی از بین ببرید (ضخامت ۶,۴ میلی‌متر و طول ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر) و این کار باید در تمام عرض نمونه انجام شود.
- برای حذف فاصله‌های بیش از ۰,۳۸ میلی‌متر باید از اندودکاری استفاده کرد.
- نمونه را بدون شوک و به‌صورت پیوسته تا نقطه‌ی شکست با نرخ ثابت بارگذاری کنید (استاندارد هندی نرخ بارگذاری ۴۰۰ کیلوگرم در دقیقه برای نمونه‌ی ۱۵۰ میلی‌متری و ۱۸۰ کیلوگرم بر دقیقه برای نمونه‌ی ۱۰۰ میلی‌متری را پیشنهاد می‌کنند، نرخ افزایش تنش  $0.04-0.06$  نیوتون بر میلی‌متر مربع هم بر اساس استاندارد بریتانیایی پیشنهاد شده است).

- نرخ بارگذاری طبق استاندارد ASTM را می‌توان با معادله‌ی زیر به دست آورد:

$$r = \frac{Sbd^2}{L} \rightarrow \text{Equation-2}$$

که در این رابطه:

R، نرخ بارگذاری

S، نرخ افزایش

b، عرض نمونه‌ی میانگین

d، عمق نمونه‌ی میانگین

L، طول دهانه

- در نهایت سطح مقطع نمونه‌ی آزمایش شده در هر انتها و مرکز را اندازه گرفته و ارتفاع و عرض میانگین را محاسبه می‌کنیم.

### محاسبه‌ی مدول شکست

فرمول زیر برای تخمین مدول شکست استفاده می‌شود:

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2} \rightarrow \text{Equation-3}$$

که در آن:

MR: مدول شکست

P: بار اعمالی نهایی نشان داده شده در ماشین آزمایش

L: طول دهانه

b: عرض میانگین نمونه در شکست

d: عمق میانگین نمونه در شکست

مترجم: علی اکبر خلیلی

منبع:

<https://theconstructor.org/concrete/flexural-test-concrete-procedure-applications//۱۸۵۷۶>