

فَطْر

۲

مفهوم ایمنی در سازه

ایمنی و طراحی

بطور کلی هدف از طراحی در سازه، فراهم نمودن ایمنی در برابر تمامی بارهای اعمالی ناگهانی و عملکرد مناسب در موقع استفاده می‌باشد. ایمنی در یک سازه به این معنی است که، تغییر شکل‌های بوجود آمده از مقدار مجاز بالاتر نرود و در مقابل تمام بارهای وارده، مقاومت سازه کافی باشد.

خدمت‌پذیری

در یک ساختمان، خدمت‌پذیری بمعنی عدم تجاوز تغییر شکل‌ها و عرض ترک‌ها از مقدار مجاز و رسیدن لرزش موجود در ساختمان به کمترین مقدار خود می‌باشد.

حاشیه اطمینان

در صورتیکه بتوان مقاومت واقعی یک سازه را بصورت دقیق محاسبه و مقدار بارهای وارده، از جمله خمش، برش و نیروهای محوری را بصورت دقیق مشخص نمود، می‌توان یک سازه ایمن را ایجاد نمود ولی در این میان برخی عوامل غیرقطعی وجود دارد که برقراری یک حاشیه اطمینان را ضروری می‌نماید که در زیر به برخی از این عوامل غیرقطعی پرداخته شده است:

- ۱- تفاوت بارهای فرض شده در طراحی با بارهای اعمالی واقعی در سازه.
- ۲- تفاوت توزیع بارگذاری صورت گرفته در طراحی با توزیع واقعی بار.
- ۳- عدم استفاده از ساده‌سازی مناسب در طراحی.
- ۴- مشخصات مصالح مورد استفاده در ساختمان با مشخصات در نظر گرفته شده در طراحی یکسان نباشد.
- ۵- عدم قرارگیری مناسب میلگردها در محل صحیح خود.

اساس طراحی

در ایران براساس آیین‌نامه روش طراحی در حالت حدی می‌باشد. در این روش طراحی، سازه با یک ایمنی معین، تحت هیچ یک از شرایط نامساعد بارگذاری به هیچکدام از حالات حدی نمی‌رسد. منظور از حالات حدی، حالاتی هستند که سازه یا قسمت‌هایی از آن تا قبل از رسیدن به آن، وظیفه خود را بصورت کامل انجام داده ولی بعد از رسیدن به آن حالات، دیگر قادر به انجام وظیفه خود نباشد. حالت‌های حدی به دو گروه عمده تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف: حالت حدی نهایی

در این حالت حداکثر ظرفیت باربری عضو فرا رسیده و به دو صورت حد نهایی گسیختگی و حد نهایی کمناش یا از بین رفتن تعادل سازه دیده می‌شود.

ب: حالت حدی بهره‌برداری

در این حالت معیارهایی چون تغییر شکل سازه، لرزش، ترک‌خوردگی، پوسته شدن و یا از هم پاشیدن به حداکثر مقدار مجاز رسیده باشد.

ضرایب و ترکیبات بار

براساس آیین‌نامه آبا، ضرایب جزئی تشدید بار و روابط ترکیب در جدول (۲-۱) آورده شده است. آیین‌نامه بتن ایران به نیروهای داخلی حاصل از بارهای نهایی یا ضریب‌دار، تلاش‌های (نیروهای داخلی یا لنگرهای داخلی) ضریب‌دار می‌گوید.

جدول ۲-۱. ضرایب و ترکیبات بار مطابق دستورات آیین‌نامه بتن ایران برای حالت مدی نهایی

ردیف	توضیح	رابطه ترکیب بار (U)
۱	بار مرده D + بار زنده L	$1.25D + 1.5L$
۲	بار مرده D + بار زنده L + بار باد W	$D + 1.2L \pm 1.2W^*$
۳	همان ردیف ۲ وقتی که بار مرده اثر بار باد را خنثی می‌کند	$0.85D \pm 1.2W$
۴	بار مرده D + بار زنده L + بار زلزله E	$D + 1.2L \pm 1.2E^*$
۵	همانند ردیف ۴ وقتی که بار مرده اثر بار زلزله را خنثی می‌کند	$0.85D \pm 1.2E$
۶	بار مرده D + بار زنده L + فشار جانبی خاک یا فشار ناشی از آب‌های تحت‌الارضی H	$1.25D + 1.5L + 1.5H$
۷	همانند ردیف ۶ وقتی که بار مرده اثر فشار جانبی خاک را خنثی می‌کند	$0.85D + 1.5H$
۸	بار مرده D + بار زنده L + فشار جانبی مایع با وزن مخصوص و ارتفاع مشخص F	$1.25D + 1.5L + 1.25F$
۹	همانند ردیف ۸ وقتی که بار مرده اثر فشار جانبی مایع را خنثی می‌کند	$0.85D + 1.25F$
۱۰	فشار قائم مایع همانند بار مرده در نظر گرفته می‌شود	
۱۱	اثر بار ضربه به هر نحو که باشد، در بار زنده در نظر گرفته می‌شود	
۱۲	وقتی که اثرات T نشست، خزش، افت و یا تغییرات درجه حرارت مهم باشند	$D + 1.2L \pm T$
۱۳	همانند ردیف ۱۲ وقتی که بار مرده اثرات نشست، خزش، افت و یا تغییرات درجه حرارت را خنثی می‌کند	$1.25D \pm 1.25T$
۱۴	در هیچ موردی U نباید کوچکتر از ردیف ۱ باشد	

اساس کار برای طراحی حالت حدی نهایی و بعداً کنترل برای حالت حدی بهره‌برداری می‌باشد.

طراحی در حالت حدی نهایی

طراحی سازه در این حالت طوری صورت می‌گیرد که مقاومت نهایی عضو در مقطع دلخواه از نیروهای داخلی (تلاش‌های) در آن مقطع در اثر بارهای نهایی بزرگتر یا برابر باشد.

$$S_u \leq S_r$$

در محاسبه مقاومت نهایی مقطع، ضرایب ایمنی جزئی زیر در مقاومت مشخصه بتن و فولاد اعمال می‌شود:

$$\phi_c = 0.6 \text{ (بتن)} \quad \phi_s = 0.85 \text{ (فولاد)}$$

کنترل در حالت حدی بهره‌برداری

کنترل حالت حدی سازه در این حالت در دو حالت حدی تغییر شکل و ترک‌خوردگی صورت می‌گیرد. اساس کار بر کنترل تغییر شکل‌ها و عرض ترک ایجاد شده از مقدار کمتر از حد مجاز می‌باشد. در محاسبه مقاومت نهایی، ضرایب ایمنی جزئی بار برابر $\gamma_f = 1$ و ضرایب جزئی ایمنی مقاومت مصالح برابر $\phi_m = 1$ می‌باشد.

فَطْر

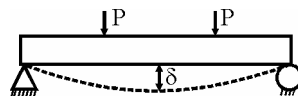
۳

طراحی برای خمش

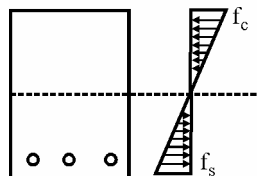
همانطور که در مبحث مقاومت مصالح به تحلیل خمش در تیرها پرداخته می‌شود در خصوص تیرهای بتن مسلح که از دو ماده کاملاً متفاوت تشکیل شده نیز به تحلیل خمش پرداخته می‌شود. در صورتیکه یک تیر تحت تأثیر گشتاور خمشی قرار گیرد در یک قسمت کاهش طول یعنی تنش فشاری و در قسمت دیگر افزایش طول یعنی تنش کششی بوجود می‌آید و در این حالت سطحی موازی دو قسمت فوق وجود دارد که هیچگونه تنش و کرنشی به آن وارد نمی‌شود که به آن تار خنثی می‌گویند. تنش‌های ایجاد شده را تنش خمش می‌گویند.

بررسی رفتار یک تیر بتن مسلح تحت خمش

برای تحلیل اثر خمش بر روی یک تیر بتن مسلح بارگذاری مطابق شکل زیر را در نظر می‌گیریم.



در لحظات اولیه بارگذاری بدلیل مقدار کم تنش‌های کششی و فشاری در بتن، رفتار آن بصورت خطی و الاستیک بوده و هیچگونه ترک در مقطع مشاهده نمی‌شود. (قسمت AB نمودار)



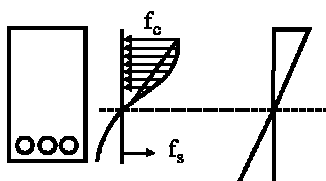
با افزایش تدریجی بار بدلیل ثابت ماندن تنش در تار انتهایی منطقه کششی، تارهای بیشتری در دورترین تار کششی مقطع به مقاومت کششی بتن می‌رسند و توزیع تنش بصورت غیرخطی می‌شود. با افزایش مقدار بار، بتن به مقاومت کششی رسیده و مقطع ترک می‌خورد. این وضعیت بر روی نمودار در نقطه C می‌باشد.

پس از بوجود آمدن اولین ترک در نقطه C ترک‌های بعدی با افزایش بار در حوالی تار خنثی بوجود می‌آید که در این ناحیه رفتار آن بصورت غیرخطی می‌شود که در این ناحیه تار خنثی به اندازه‌ای به سمت بالا منتقل شده که در شکل زیر این مسئله نشان داده شده است.

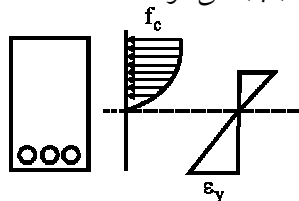


جابجایی ممور منتهی پس از ایجاد ترک

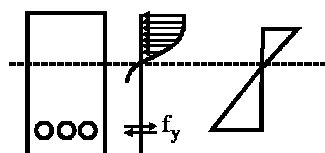
در قسمت DE نمودار، تعداد ترک‌ها متوقف شده و فقط عمق ترک‌ها افزایش می‌یابد و مجدداً رفتار قطعه بصورت خطی خواهد بود. در این ناحیه تمام نیروی کششی بطور تقریبی توسط فولادهای کششی تحمل شده و در قسمت فشاری مقطع تا زمانیکه تنش در دورترین تار فشاری هنوز از نصف مقاومت فشاری بتن بالاتر نرفته، رفتار تنش بصورت خطی می‌باشد. به این مرحله که قسمت کششی بتن ترک خورده ولی رفتار خطی دارد مرحله «الاستو - پلاستیک» می‌گویند.



در قسمت EF نمودار، مقدار تنش حداکثر در دورترین تار فشاری بتن از نصف مقاومت فشاری بتن بالاتر رفته و لذا رفتار بتن غیرخطی می‌باشد. در این ناحیه تنش فولاد در ناحیه کشش هنوز به مقدار تسلیم نرسیده است. پس در نقطه F بدلیل تنش غیرخطی فشاری و رسیدن مقدار کرنش به کرنش تسلیم در ناحیه کشش وضعیت تار خنثی به سمت بالا جابجا می‌شود.

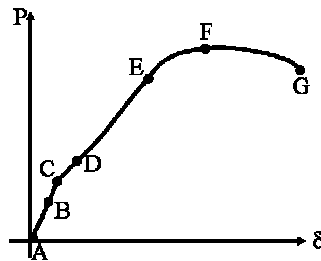


در قسمت FG، وقتی فولاد به حد جاری شدن (تسلیم) می‌رسد، مقدار کرنش در فولاد افزایش می‌یابد در این حالت تار خنثی در محل ترک‌ها بالا می‌رود. در این حالت نیروی فشاری ثابت بوده و فقط با افزایش کرنش فشاری بتن، تغییر مکان‌های قابل توجهی دیده می‌شود و هیچگونه افزایشی در میزان بار دیده نمی‌شود که این مطلب عامل هشدار دهنده‌ای قبل از خرابی کلی تیر می‌باشد.



در نقطه G با افزایش بیشتر خیز، مقدار کرنش در دورترین تار فشاری به مقدار کرنش شکست ϵ_{cu}

می‌رسد و در نتیجه بتن دچار گسیختگی می‌شود.



نمودار نیرو - تغییر مکان قطعه خمشی بتن مسلح

در کل گسیخته شدن یک بتن مسلح ابتدا با جاری شدن فولاد شروع و با خرد شدن بتن فشاری به آخر می‌رسد. می‌توان گفت که سه مرحله رفتاری بتن مسلح در مقابل خمش شامل مرحله الاستیک (قبل از پیدایش ترک کششی)، مرحله الاستو - پلاستیک (بعد از وقوع ترک کششی و قبل از تسلیم فولاد یعنی جابجایی) و مرحله پلاستیک (پس از جاری شدن فولاد تا گسیختگی نهایی) می‌تواند یک ویژگی مطلوب برای بتن بدلیل تغییر شکل‌های بزرگ در این مراحل و زنگ هشدار برای تخریب و کمک به تخلیه افراد و اموال باشد.

تحلیل مقطع ترک نخورده در حالت الاستیک

در این حالت، مقطع بتن مسلح بصورتی می‌باشد که با اعمال بار حداکثر، ترک خوردگی در آن دیده نمی‌شود. و مقطع همانند یک مقطع مرکب تحت خمش قرار دارد و برای تحلیل بتن در این شرایط از روابط رایج در مقاومت مصالح استفاده می‌شود.

برای این کار با توجه به نسبت مدولی الاستیسیته بتن و فولاد، تمامی مقطع را به یک جنس تبدیل می‌کنند. معمولاً کل مقطع بتن در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که یکسان‌سازی جنس براساس نسبت مدولی $\left(n = \frac{E_s}{E_c}\right)$ جنس‌های مختلف در جهت موازی تار خشی صورت می‌گیرد. به مقطع بوجود آمده «مقطع تبدیل یافته» گفته می‌شود.

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum Ay}{\sum A}$$

$$I_n = \sum I_g + \sum Ay^2 - \frac{(\sum Ay)^2}{\sum A}$$

محاسبه تار خشی:

محاسبه ممان اینرسی:

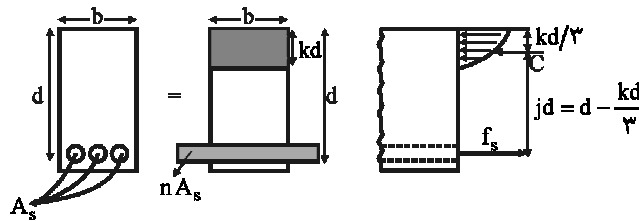
$$f_{cc} = \frac{M\bar{y}}{I_n} \quad \text{تنش فشاری در تار خارجی بتن:}$$

$$f_{ct} = \frac{M(d-\bar{y})}{I_n} \quad \text{تنش کششی در تار خارجی بتن:}$$

$$f_s = n \frac{My}{I} \quad \text{تنش در فولاد:}$$

تحلیل مقطع ترک خورده در حالت الاستیک:

در صورتیکه تنش فشاری بتن از نصف مقاومت بتن $0.5f_c$ کمتر باشد، بتن رفتاری خطی و الاستیک در قسمت فشاری دارد. در این حالت بتن ناحیه کششی، ترک خورده و بتن ناحیه فشاری در حالت الاستیک قرار دارد. برای تحلیل در این حالت از روش مقطع تبدیل یافته ترک خورده استفاده می‌شود. مقطع تبدیل یافته، از بتن ناحیه فشاری (بالای محور خنثی) و به اندازه نسبت مدولی $n = \frac{E_s}{E_n}$ در پایین تار خنثی سطح فولاد تشکیل می‌شود.



$$b \frac{(kd)^3}{3} - nA_s (d - kd) = 0 \quad \text{ارتفاع تار خنثی } kd:$$

$$C = \frac{bkd}{3} f_{cc} \quad \text{برآیند نیروی فشاری بتن:}$$

$$T = A_s f_s \quad \text{برآیند نیروی کششی فولاد:}$$

از معادلات تعادل داریم:

$$M = Tj = A_s f_s j$$

$$M = Cj = \frac{bkd}{3} f_{cc} j = \frac{f_{cc}}{3} k j b d^3$$

از روی شکل $Jd = d - \frac{kd}{3}$ می‌باشد پس در خصوص تنش در فولاد کششی و بتن فشاری داریم:

$$f_s = \frac{M}{A_s j}$$

$$f_{cc} = \frac{3M}{b(kd)(Jd)}$$

تحلیل مقطع ترک خورده در حالت حد نهایی یا گسیختگی

در این حالت وضعیت مقطع بتن با افزایش لنگر خمشی از حالت‌های قبلی عبور کرده و به مرحله گسیخته شدن می‌رسد. چنانچه میزان فولاد در مقطع کم باشد، ابتدا فولاد تسلیم شده و سپس مقطع گسیخته

می‌شود، در صورتیکه میزان فولاد در مقطع بالا باشد بدون رسیدن فولاد به حد تسلیم مقطع گسیخته می‌شود. برای تحلیل مقاطع در این شرایط بصورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\rho = \frac{A_s}{bd}$$

درصد فولاد:

$$\rho_b = 0.6\beta_1 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right)$$

درصد فولاد متعادل:

در رابطه فوق β_1 ضریبی است که براساس روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$f_c < 30 \text{ MPa} \Rightarrow \beta_1 = 0.85$$

$$f_c > 30 \text{ MPa} \Rightarrow \beta_1 = 0.85 - 0.008(f_c - 30) \geq 0.65$$

در رابطه فوق f_{cd} و f_{yd} به ترتیب مقاومت مشخصه طرح بتن و مقاومت مشخصه طرح فولاد بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$f_{cd} = \phi_c f_c \quad , \quad f_{yd} = \phi_s f_y$$

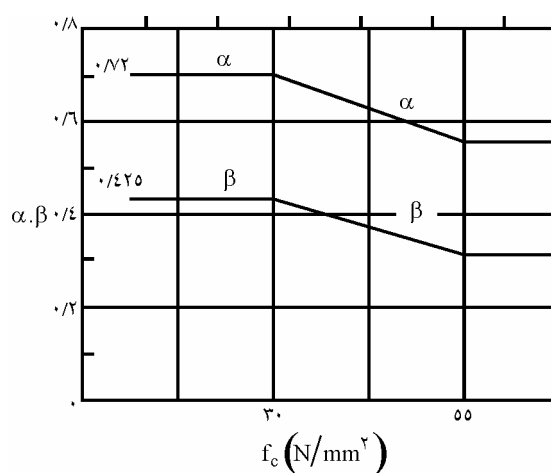
ϕ_c ضریب تقلیل ظرفیت بتن برابر ۰/۶ و ϕ_s ضریب تقلیل فولاد برابر ۰/۸۵ می‌باشد. در صورتیکه شکست مقطع ناشی از گسیختگی فولادهای کششی باشد داریم:

$$x = \frac{\rho(f_{yd})}{\alpha f_{cd}} d$$

لنگر خمشی مقاوم نهایی (خرابی ناشی از فولاد)

$$M_r = A_s f_{yd} d \left(1 - \frac{\beta f_{yd}}{\alpha f_{cd}} \rho \right)$$

مقدار β و α در رابطه فوق از نمودار زیر قابل محاسبه است.



نمودار ۳-۱- مقادیر α و β

در خصوص شکست فشاری یعنی قبل از رسیدن فولاد به حد جاری شدن در مورد فولاد متعادل داریم:

$$\rho_b = \beta_1 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right)$$

$$A_{sb} = \rho_b \beta_1 \frac{f_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) bd$$

در صورتیکه ρ کوچکتر از ρ_b باشد مقطع با فولاد کم خواهد بود. پس داریم:

$$C = T \Rightarrow 0.85 f_{cd} ba = A_s f_{yd} \Rightarrow a = \frac{A_s f_{yd}}{0.85 f_{cd} b}$$

در رابطه فوق $x = \frac{600}{600 + f_y}$ معادل تار خنثی می‌باشد. در خصوص لنگر خمشی نهایی داریم:

$$M_r = A_s f_{yd} (d - \beta x) = A_s f_{yd} \left(d - \frac{a}{\gamma} \right)$$

پس از محاسبه درصد فولاد متعادل مقدار فولاد متعادل بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$A_{sb} = \rho_b bd$$

پس از محاسبه مقدار فولاد متعادل در خصوص لنگر مقاوم نهایی داریم:

$$A_{sb} \geq A_s \Rightarrow M_r = \rho_b d^2 f_{yd} \left(1 - 0.5 \rho \frac{f_{yd}}{0.85 f_{cd}} \right)$$

$$A_{sb} \leq A_s \Rightarrow M_r = \rho_b d^2 f_{yd} \left(1 - 0.5 \rho_b \frac{f_{yd}}{0.85 f_{cd}} \right)$$

طراحی در حالت حدی نهایی مقطع

در این قسمت به طراحی مقطع در حالت حدی نهایی می‌پردازیم. برای اینکار ابتدا ضرایب تشدید بار و تقلیل محاسبه می‌شود. پس از تحلیل سازه نیروی داخلی نهایی یا ضریب‌دار که شامل نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی می‌باشد محاسبه می‌شوند و ضرایب تشدید در بارهای بهره‌برداري مؤثر سازه ضرب می‌شوند. لنگر خمشی داخلی نهایی مقطع M_u بعنوان مثال بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M_u = 1.25 M_D + 1.5 M_L$$

برای ایمنی سازه مقدار لنگر خمشی نهایی مقطع M_r از M_u باید بزرگتر باشد.

$$M_r \geq M_u$$

طراحی مقطع‌های مستطیلی در حالت حدی نهایی

بمنظور اطمینان از ایمنی، مقدار لنگر خمشی مقطع M_r را حداقل با مقدار لنگر خمشی نهایی M_u برابر قرار می‌دهیم پس داریم:

$$M_u = M_r$$

از رابطه فوق در مورد حداقل مقدار bd^2 داریم: