

لنگر ترک خوردگی در اعضای پس کشیده

وقتی آیین‌نامه‌های اصلی ساختمان با اعضای سازه‌ای خاص سازگاری نداشته باشند، سردرگمی و عدم قطعیت در میان مهندسان طراح به وجود می‌آید. در این شرایط، نیاز است که صنعت با مسئولان آیین‌نامه‌ای برای روشن شدن بیشتر مطلب تعامل داشته باشد.

در حال حاضر سه مسئله ویژه در خصوص طراحی اعضای پس کشیده وجود دارد که به طور متفاوتی در دستورالعمل‌ها و الزامات آیین‌نامه سازه‌های بتنی انجمن بتن آمریکا، (ACI 318(2014) و آیین‌نامه اروپایی (EC2)- بخش ۱-۱، طراحی سازه‌های بتنی در اروپا مورد بحث قرار گرفته‌اند. برای هر طراحی که در سطح بین‌المللی کار می‌کند، این دو آیین‌نامه (مورد اول و سوم) الزامات طراحی اعضای پس کشیده را تعیین می‌کنند. اگر به آیین‌نامه‌های مختلف و دستورالعمل‌های طراحی و تحلیل اعضای پس کشیده مراجعه کنید، خواهید دید که موارد ضد و نقیض زیادی دیده می‌شود.

اختلافات در زمینه‌های زیر مشاهده شده‌اند:

۱- مقدار لنگر خمشی که مقطع باید با توجه به آن طوری آرماتور گذاری شود که در آغاز ترک خوردگی ایمن باشد. این لنگر معمولاً "لنگر ترک خوردگی" مقطع، M_{cr} نامیده می‌شود.

۲- اینکه چه تدابیر در شروع ترک خوردگی ناشی از لنگر خمشی باید در اعضای مسلح دارای قید، بدون قید و یا کابل‌های پس کشیده قید دار و بدون قید؛ اعمال شود.

۳- اینکه تدابیر لازمه به کدام یک از سیستم‌های سازه‌ای تیر، دال‌های یک‌طرفه، دال‌های دوطرفه یا تمامی سیستم‌ها اعمال می‌شود.

با توجه به محبوبیت در حال رشد ساختمان‌های پس کشیده در سرتاسر جهان، لزوم انجام تلاشی برای استاندارد کردن این معیارهای طراحی منطقی به نظر می‌رسد.

مقدار لنگر ترک خوردگی

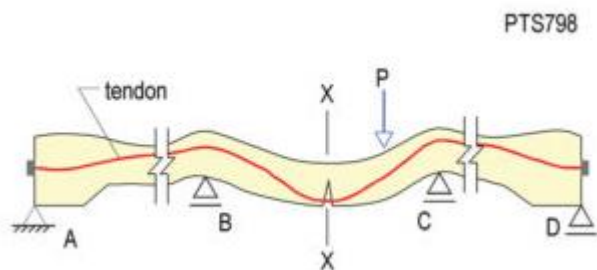
لنگر ترک خوردگی یک عضو پس کشیده به دو دلیل مورد توجه مهندسان سازه بوده است. اول اینکه بسته به کاربری ساختمان ممکن است نیاز باشد که ترک خوردگی به علت نگرانی‌های مربوط به قابلیت بهره برداری محدود باشد. در این مواقع هدف، جلوگیری از "شروع" ترک خوردگی می‌باشد. دلیل دوم "ایمنی" عضو است؛ در این مواقع صرف نظر از علت ترک خوردگی، هدف اطمینان از این است که مقطع در محلی که ترک به وجود می‌آید مقاومت کافی برای جلوگیری از گسیختگی را داشته باشد. هدف مربوط به قابلیت بهره برداری با کنترل شریطی که باعث ترک خوردگی می‌شوند، به دست می‌آید. تمرکز دو آیین‌نامه اصلی ساختمان، ACI 318 و آیین‌نامه اروپا (EC2)، در صورت وقوع ترک خوردگی بر روی ایمنی عضو است.

بخش‌های زیر هر دو مسئله ایمنی و اهداف مربوط به قابلیت بهره برداری را توضیح می‌دهند و همچنین توضیحات کاربردی در خصوص محاسبه لنگر ترک خوردگی ارائه می‌شود.

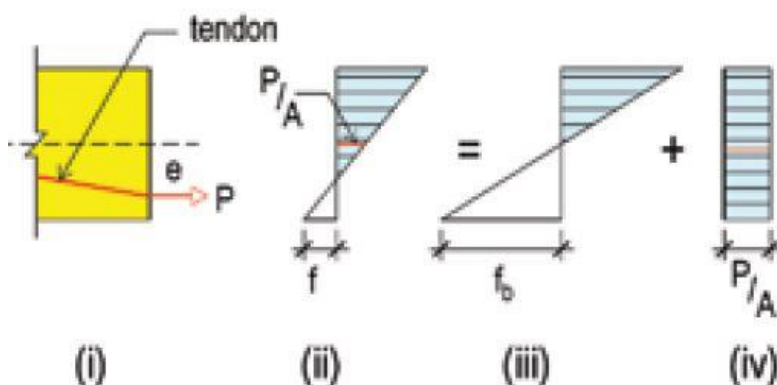
شرایط بهره برداری

ترک خوردگی زمانی آغاز می‌شود که تنش در آخرین تار کششی عضو به مقدار مدول گسیختگی f_r مقطع برسد. ACI 318 پیشنهاد می‌کند که f_r برای بتن از رابطه $f_r = 7.5\sqrt{f_c}$ (معادله ۱) محاسبه شود. با در نظر گرفتن شرایطی که باعث می‌شود مقطع مشخصی مانند مقطع X-X از یک عضو پس کشیده نشان داده شده در شکل 1a ترک بخورد، تاندون‌های پس کشیده در این مقطع توزیع تنشی مانند شکل 1b دارند. P/A پیش تنیدگی ناشی از نیروی پس کشیدگی P است که بر روی مقطعی با مساحت مقطع عرضی A اثر می‌کند و f_b تنش آخرین تار ناشی از لنگر پس کشیدگی است که معادله آن به این صورت، $f_b = M_{pt} / S$ (معادله ۲) می‌باشد. M_{pt} لنگر ناشی از پس کشیدگی و S مدول مقطع است. M_{pt} به عنوان لنگر متعادل نیز شناخته می‌شود زیرا پس کشیدگی عموماً برای متعادل کردن درصد مشخصی از بار مرده طراحی می‌شود. شدت M_{pt} بستگی به هندسه و شرایط تکیه گاهی عضو و نیز پروفیل تاندون و نیروی پس کشیدگی آن دارد. این لنگر هر دو لنگر اولیه (P_e) و لنگرهای پیراستاتیک (ثانویه) ناشی از عکس‌العمل‌های تکیه‌گاه‌ها بر اثر پس کشیدگی را در بردارد.

برای تشکیل ترک در مقطع X-X، نیروهای وارده بر عضو باید از تنش‌های ترکیبی فشاری آخرین تار ناشی از پیش تنیدگی، f_b و P/A بیشتر شده تا تنش کششی به مقدار f_r برسد؛ بنابراین لنگر مورد نیاز در آغاز ترک خوردگی در مقطع که از اصول تعادل استاتیکی محاسبه می‌شود، برابر خواهد بود با: $M = \left(f_r + \frac{P}{A}\right)S + M_{pt}$ (معادله ۳).



شکل 1a. جزئی از مقطع ارتفاعی؛ عضو پیوسته‌ای که با نیروهای پس کشیدگی مسلح شده است و شروع ترک خوردگی در مقطع X-X بستگی به هندسه کلی سازه، ویژگی‌های تاندون‌های پس کشیده آن و بار اعمالی دارد (PTS798).



شکل 1b. توزیع تنش ناشی از پس کشیدگی وارد بر یک مقطع. P/A میانگین نیروی پیش تنیدگی است؛ f_b تنش آخرین تار ناشی از لنگر پس کشیدگی، M_{pt} است. P نیروی پس کشیدگی و e خروج از مرکزیت بار نسبت به مرکز ثقل مقطع است.

شرایط ایمنی

موضوع مهم دیگر در رابطه با لنگر ترک خوردگی، "ایمنی" عضو است. برخلاف قابلیت بهره برداری که مربوط به قبل از ترک خوردگی عضو می‌باشد، هدف ایمنی نیاز به ملاحظات مقطع مربوطه پس از ترک خوردگی دارد. در هنگامی که ترک خوردگی اتفاق افتاده است، هدف مورد نظر این است که مقطع در محلی که ترک تشکیل می‌شود صرف نظر از علت ترک خوردگی، مقاومت کافی برای جلوگیری از گسیختگی را داشته باشد.

اگرچه که تمرکز ACI318 و آیین‌نامه EC2 اروپا بر ضرایب قابلیت بهره برداری است، اما هردو آیین‌نامه مطالبی را در مورد نیازهای ایمنی پس از ترک خوردگی دربردارند.

ایمنی یک مقطع پس از آغاز ترک خوردگی با تأمین آرماتور گذاری کافی به دست می‌آید. آرماتور گذاری باید لنگری را ایجاد کند که کمتر از لنگری که باعث آغاز ترک خوردگی شده است، نباشد. توزیع تنش‌ها در هنگام ترک خوردگی در مقطع بدون توجه به ویژگی‌های کلی عضو مانند تعداد دهانه‌ها یا بارهای وارد بر عضو در شکل 1b(ii) نشان داده شده است.

لنگر متناسب با این توزیع، M_{cr} برابر است با: $M_{cr} = \left(f_r + \frac{P}{A}\right)S$ (معادله ۴). تفاوت بین مقادیر عددی در دو موقعیت بهره برداری و ایمنی این است که شرایط بهره برداری، لنگر پس کشیدگی M_{pt} را به همراه لنگرهای هایپرستاتیک (که به نام لنگرهای ثانویه نیز شناخته می‌شوند) که جزئی از آن هستند در بردارد. در صورتی که لنگر M_{cr} در شرایط ایمنی، تنها پیش فشردگی (P/A) ناشی از پیش تنیدگی را در بردارد.

به طور خلاصه، برای جلوگیری از گسیختگی یک مقطع در آغاز ترک خوردگی، آرماتور گذاری مقطع باید ظرفیت لنگر M_n را تأمین کند به طوری که کمتر از M_{cr} لنگر آغاز ترک خوردگی، نباشد. ضرایب ایمنی برای کاهش M_n و افزایش M_{cr} باید اعمال شود. K که ضریب ایمنی برای M_{cr} است بستگی به آیین‌نامه ساختمان مورد استفاده دارد؛ ACI 318 ضریب ایمنی را برابر با ۱٫۲ پیشنهاد می‌کند.

$$\phi M_n \geq K M_{cr} \quad (\text{معادله ۵})$$

که در آن ϕ ضریب کاهش مقاومت است.

یک تفاوت محتمل بین محاسبات دو شرایط بهره برداری و ایمنی می‌تواند تفسیر کلمات استفاده شده در ACI 318-14 باشد که در آن الزامات نه برای لنگر ترک خوردگی بلکه برای "بار ترک خوردگی" معرفی شده است. آیین‌نامه EC2 اروپا الزامات را برای "لنگر ترک خوردگی" بیان می‌کند.

ارزیابی لنگر ترک خوردگی

ACI 318-14 ارزیابی لنگر ترک خوردگی را برای دال‌های مسلح شده با تاندون‌های مقید (شکل 2b) - برای هردو سیستم‌های یک طرفه و دوطرفه با استفاده از ضریب ایمنی $K=1.2$ ضروری می‌داند.

ارزیابی لنگر ترک خوردگی برای دال‌های مسلح شده با تاندون‌های غیرمقید لازم نیست، این تصمیم براین اساس گرفته شده است که چون هیچ قیدی بین استرندها و بتن وجود ندارد افزایش ناگهانی کرنش موضعی در محل ترک در طول استرندهای که از ترک عبور می‌کند توزیع خواهد شد، لذا از افزایش موضعی کرنش در استرندها و گسیختگی آن جلوگیری خواهد کرد (شکل 2a).

آیین‌نامه EC2 اروپا نیز ارزیابی لنگر ترک خوردگی را تنها برای تیرهای مسلح شده با تاندون‌های غیرمقید لازم می‌داند. طبق EC2 ضریب ایمنی ۱,۱۵ مورد نیاز است. ACI 318-14 نیز ضریب ایمنی ۱,۲ را برای تیرهای مسلح شده با تاندون‌های مقید لازم می‌داند. همان‌طور که مشخص است، عدم توافقی مبنی بر استفاده از ضریب ایمنی برای تاندون‌های بدون قید یا مقید وجود دارد.

توجه کنید که توزیع لنگر در عمق تیرها و دال‌های یک‌طرفه لزوماً در جهت عرضی دهانه یکنواخت است. آغاز ترک خوردگی در یک نقطه باعث گسترش ترک در سرتاسر عرض تیر یا دال می‌شود؛ اما برای دال‌های دو طرفه‌ای که توسط ستون‌ها پشتیبانی می‌شوند، به علت توزیع غیریکنواخت تنش (شکل ۳) و کمبود ظرفیت به علت ترک خوردگی در محل تقاضای لنگر حداکثر، باعث باز توزیع لنگر به مناطقی که دارای ظرفیت است می‌شود، لذا خاصیت فنریت بیشتری را برای سیستم‌های دال دوطرفه تأمین می‌کند. علت احتمالی خاصیت باز توزیع لنگر در سیستم دو طرفه این موضوع است که در آیین‌نامه اروپا نیاز به کنترل ایمنی در آغاز ترک خوردگی وجود ندارد.



شکل ۲. ساخت دال دوطرفه با تاندون‌های پس کشیده بدون قید و مقید. (a) ساخت دال با تاندون‌های بدون قید. هیچ کدام ACI و EC2 نیاز به کنترل مقاومت در آغاز ترک خوردگی (ح ۹۹۸) ندارند. (b) ساخت دال با تاندون‌های مقید، ACI نیاز به کنترل مقاومت در شروع ترک خوردگی داشته و EC2 نیاز به این کنترل ندارد (P999).

تفاوت‌های موجود

ACI 318-14 تنها برای دال‌های دوطرفه مسلح شده با پس کشیدگی مقید ضریب اعمال می‌کند:

۸,۶,۲,۲,۲. برای دال‌های با تقویت مقید پیش تنیده، مقدار کلی A_s و A_{ps} باید برای توسعه بار ضریب دار حداقل ۱,۲ برابر بار ترک خوردگی که بر مبنای f_r تعریف شده در ۱۹,۲,۳ محاسبه شده است، کافی باشند.

توجه: مقدار f_r که در بخش ۱۹,۲,۳ تعریف شده است، در معادله ۱ فوق داده شده است.

EC2 (آیین نامه اروپا) تنها برای تیرها ضریب اعمال می کند.

EN 1992-1-1: 2004, بخش (4) 9.2.1-1 بیان می کند:

برای اعضای پیش تنیده شده با تاندون های دائماً بدون قید یا کابل های پیش تنیدگی خارجی، باید مطمئن شد که ظرفیت خمشی نهایی بیشتر از لنگر خمشی ترک خوردگی است. ظرفیتی ۱,۱۵ برابر لنگر ترک خوردگی کافی می باشد.

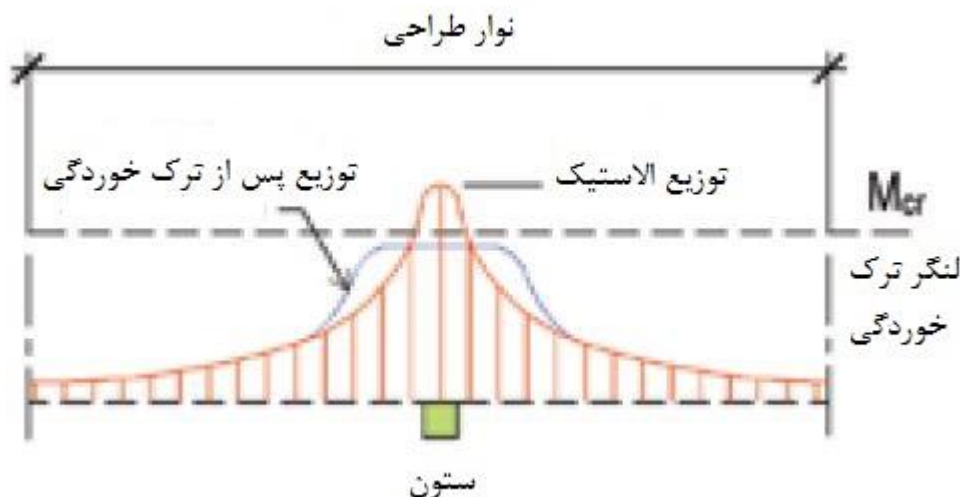
دستورالعمل طراحی PTI نسخه پنجم، بخش ۵,۳,۳,۵ کاربرد عبارت ACI 318 برای محاسبه مقاومت اعضا بعد از ترک خوردگی را به صورت زیر توضیح می دهد:

... این الزام برای جلوگیری از گسیختگی خمشی ناگهانی بلافاصله بعد از ترک خوردگی می باشد ... این الزام معمولاً در صورت نیاز در هر مقطعی به صورت رابطه زیر تأمین می شود:

$$\phi M_n = 1.2(7.5\sqrt{f'_c} S + \frac{SF}{A} + M_{bal}) \quad (3-1)$$

این رابطه مشابه معادله ۳ فوق است که ضریب ایمنی (۱,۲) پیشنهادی ACI 318 به آن اضافه شده است و M_{bal} نشان دهنده لنگر پس کشیدگی M_{pt} است و F نیروی پس کشیدگی می باشد.

رابطه PTI (3-1) نیز به صورت مکرر برای ایمنی مقطع پس از ترک خوردگی استفاده می شود.



شکل ۳. پلان - ناحیه تکیه گاه ستون در ساخت دال دوطرفه (نوار طراحی). توزیع لنگر در سطح ستون قبل و بعد از ترک خوردگی. کمبود ظرفیت به علت ترک خوردگی، ترک را توزیع می کند و مقاومت دال را به مقدار فراتر از ستون بسیج می کند (PTS761).

نتایج

علاوه بر تفاوت های موجود در آیین نامه ها و استانداردها در خصوص محاسبه نیروهای تقاضا برای ایمنی یک مقطع در آغاز ترک خوردگی، الزامات درباره اینکه چه زمانی لنگرهای ترک خوردگی باید برای اطمینان از ایمنی ارزیابی شوند در ACI 318 و EC2 متفاوت است.

بررسی هزاران ساختمان طبق این آیین نامه ها و گسیختگی های اندک گزارش شده در اثر این تدابیر، می توانند گواه این مطلب باشند که این الزامات در طراحی اعضای پس کشیده بحرانی نیست؛ اما در صورتی که نیازی به توجه زیادی ندارند پس چرا در این آیین نامه ها آورده شده اند؟ با این حال، در سایه محبوبیت در حال رشد ساختمان های ساخته شده با سیستم پس کشیدگی، الزامات ایمنی اعضای پس کشیده در آغاز ترک خوردگی باید بازبینی شوند.

مترجم: علی برزگر

منبع:

<https://www.structuremag.org/?p=10514>