



طراحی سازه‌های بتنی

سری کتابهای کمک آموزشی کارشناسی ارشد

مجموعه عمران

مؤلف: ابراهیم حصیری

سرشناسه: تقی‌زاده، حامد
عنوان: پی‌سازی
مشخصات نشر: تهران، مشاوران صعود ماهان، ۱۴۰۴
مشخصات ظاهری: ۲۳۴ صفحه
فروست: سری کتاب‌های کمک آموزشی کارشناسی ارشد
شابک: 978-600-458-825-6
وضعیت فهرست‌نویسی: فبیای مختصر
یادداشت: این مدارک در آدرس <http://opac.nlai.ir> قابل دسترسی است.



www.Mahan.ac.ir

انتشارات ماهان ۴-۸۸۱۰۰۱۱۳

خیابان ولیعصر/ بالاتر از تقاطع مطهری/ روبروی قنادی هتل بزرگ تهران/ جنب بانک ملی/ پلاک ۲۰۵۰

نام کتاب:..... پی‌سازی
مدیران مسئول:..... هادی سیاری، مجید سیاری
مؤلف:..... حامد تقی‌زاده
مدیر تولید محتوا:..... سمیه بیگی
ناشر:..... مشاوران صعود ماهان
نوبت و تاریخ چاپ:..... دوم / ۱۴۰۳
تیراژ:..... ۱۰۰۰ نسخه
قیمت:..... ۴/۱۱۰/۰۰۰ ریال
شابک:..... ISBN:978-600-458-825-6



«ن والقلم و ما یسطرون»

کلمه نزد خدا بود و خدا آن را با قلم بر ما نازل کرد.

به پاس تشکر از چنین موهبت الهی، موسسه ماهان درصدد برآمده است تا در راستای انتقال دانش و مفاهیم با کمک اساتید مجرب و مجموعه کتب آموزشی خود برای شما داوطلبان ادامه تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد گام موثری بردارد. امید است تلاش‌های خدمتگزاران شما در این موسسه پایه‌گذار گام‌های بلند فردای شما باشد. مجموعه کتاب‌های کمک آموزشی ماهان به‌منظور استفاده داوطلبان کنکور کارشناسی ارشد سراسری و آزاد تالیف شده‌اند. در این کتاب‌ها سعی کرده‌ایم با بهره‌گیری از تجربه اساتید بزرگ و کتب معتبر داوطلبان را از مطالعه کتاب‌های متعدد در هر درس بی‌نیاز کنیم.

دیگر تالیفات ماهان برای سایر دانشجویان به‌صورت ذیل می‌باشد.

کتاب‌های سوال و پاسخ تشریحی کنکور مدیریت که شامل سوالات و پاسخ تشریحی چند سال اخیر کنکور سراسری ارشد می‌باشد.

بدین‌وسیله از مجموعه اساتید، مولفان و همکاران محترم خانواده بزرگ ماهان که در تولید و به‌روزرسانی تالیفات ماهان نقش موثری داشته‌اند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نماییم.

دانشجویان عزیز و اساتید محترم می‌توانند هرگونه انتقاد و پیشنهاد درخصوص تالیفات ماهان را از طریق سایت ماهان به آدرس Entesharatmahan@yahoo.com با ما در میان بگذارند.

موسسه آموزش عالی آزاد ماهان



سخن مؤلف



کتاب حاضر مجموعه‌ای کامل و مفید از مطالب و نکات فنی درس طراحی سازه های بتنی مقطع کارشناسی رشته مهندسی عمران می‌باشد. این کتاب همچنین شامل پرسشهای چهارگزینه‌ای کنکورهای سراسری و آزاد و تست های تالیفی به همراه پاسخ تشریحی آنها می‌باشد و در قالب توضیح و تفسیر مطالب آمده است و فهم مباحث را آسان نموده است. با توجه به میزان سوالاتی که در کنکور ارشد عمران از درس طراحی بتنی طرح می گردد، بنابراین کتابی به شکل مختصر و با تحت پوشش قرار دادن سوالات کنکورهای گذشته و سوالات آزمون نظام مهندسی و همچنین ارائه پاسخ های مبسوط تشریحی و نکات مهم شرح درس تهیه گردید. مطالب به شکل مرحله به مرحله و در ۶ فصل ارائه شده است و شامل کلیه مطالب مورد نیاز آزمون کارشناسی ارشد می باشد.

امیدوارم که دانشجویان گرامی و همه مهندسين عمران با مطالعه این کتاب، علاوه بر بالا بردن سطح علمی خود در طراحی سازه های بتنی، آمادگی لازم را جهت شرکت در آزمون سراسری کسب نمایند.

گرچه سعی بر این بوده است که این کتاب با دقت و حوصله فراوان طرح و ویرایش گردد، اما خالی از خطا و اشتباه نیست. لذا از عزیزان و خوانندگان محترم تقاضا می‌کنم که نظرات و پیشنهادات سازنده خود را در جهت بهتر شدن و رفع اشکالات این مجموعه، به وسیله پست الکترونیکی ارسال فرمایید.

با تقدیم احترام



صفحه	عنوان
۷.....	فصل اول: کلیات بتن.....
۹.....	خواص بتن.....
۱۲.....	روش‌های طراحی سازه‌های بتن آرمه.....
۱۶.....	سوالات چهارگزینه‌ای فصل اول.....
۱۸.....	پاسخ سوالات چهارگزینه‌ای فصل اول.....
۲۱.....	فصل دوم: طراحی خمشی.....
۲۳.....	تحلیل مقطع تحت خمش و طراحی آرماتور کششی.....
۲۸.....	انواع گسیختگی مقاطع تحت خمش.....
۳۰.....	طراحی آرماتورهای فشاری (مقاطع دابل آرمه).....
۳۱.....	طراحی مقاطع بالدار (T شکل).....
۳۴.....	سوالات چهارگزینه‌ای فصل دوم.....
۴۵.....	پاسخ سوالات چهارگزینه‌ای فصل دوم.....
۵۸.....	فصل سوم: طراحی برشی.....
۶۰.....	طراحی برشی تیرهای بتنی.....
۶۱.....	انواع تیر از لحاظ برش و تسلیح برشی.....
۶۲.....	مقاومت برشی تیرهای بتن آرمه.....
۶۲.....	انواع ترک.....
۶۷.....	ضوابط مربوط به شکل پذیری زیاد، شکل پذیری متوسط و شکل پذیری کم در ساختمان بتن آرمه.....
۶۹.....	سوالات چهارگزینه‌ای فصل سوم.....
۷۵.....	پاسخ سوالات چهارگزینه‌ای فصل سوم.....
۸۲.....	فصل چهارم: طراحی پیچشی.....
۸۴.....	پیچش در مقاطع مختلف.....
۸۵.....	مکانیزم پیچش در بتن مسلح.....
۸۶.....	طراحی پیچشی تیرها.....
۸۸.....	سوالات چهارگزینه‌ای فصل چهارم.....
۹۲.....	پاسخ سوالات چهارگزینه‌ای فصل چهارم.....
۹۶.....	فصل پنجم: طول مهاری و پیوستگی، قطع و وصله میلگردها.....
۹۸.....	پیوستگی میلگرد به بتن.....
۹۹.....	طول مهاری.....

۱۰۲.....	وصله میلگردها
۱۰۲.....	قطع میلگردها
۱۰۳.....	عرض ترک
۱۰۴.....	سوالات چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۱۱۱.....	پاسخ سوالات چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۱۲۱.....	فصل ششم: طراحی ستون‌ها
۱۲۳.....	منحنی اندرکنش ستون
۱۲۵.....	انواع ستون
۱۲۶.....	طراحی ستونهای کوتاه
۱۲۶.....	طراحی ستونهای لاغر
۱۲۹.....	سوالات چهارگزینه‌ای فصل ششم
۱۳۷.....	پاسخ سوالات چهارگزینه‌ای فصل ششم
۱۴۱.....	فصل هفتم: طراحی دال‌ها ، ترک و خیز
۱۴۲.....	سیستم دال
۱۴۴.....	ضوابط و اصول دال‌های یک طرفه
۱۴۵.....	ضوابط و اصول دال‌های دو طرفه
۱۴۷.....	شالوده (پی) و ضوابط طراحی
۱۴۹.....	سوالات چهارگزینه‌ای فصل هفتم
۱۵۳.....	پاسخ سوالات چهارگزینه‌ای فصل هفتم
۱۵۶.....	سوالات و پاسخ تشریحی کنکور کارشناسی ارشد عمران از سال ۸۹ الی ۱۴۰۲
۲۳۱.....	منابع

کلیات بتن

عناوین اصلی

- ❖ خواص بتن
- ❖ فولاد و میلگرد
- ❖ روشهای طراحی سازههای بتن آرمه

فصل اول

کلیات بتن

خواص بتن

بتن (concrete) ترکیبی از موادی مانند سیمان، شن، ماسه، آب و افزودنی‌ها است که درصد هر کدام از این مصالح با توجه به کارکرد، محل و شرایط محیطی که بتن در آن استفاده می‌شود و همچنین نوع مقاومت مورد نیاز تعیین می‌شود. از آن به «طرح اختلاط بتن» یاد می‌شود. امروزه یکی از ملاکهای پیشرفت و توسعه یافتگی کشورها، تکنولوژی بتن آنهاست. در یک تقسیم بندی نوع بتن ساخته شده به بتن سازه‌ای و غیر سازه‌ای اطلاق می‌شود.

بتن آرمه: Reinforced Concrete بتنی که توسط فولاد تقویت می‌شود. (تقویت کششی)

مزایای بتن:

۱- شکل پذیری منحصر به فرد آن که شکل قالب به خود می‌گیرد.

۲- مقاومت فشاری بالا

۳- مقاومت خوب در برابر آتش سوزی

معایب بتن:

۱- مقاومت کششی پایین: بتن «تاب کششی» کمی دارد. (مقاومت کششی بتن حدود ۰/۱ برابر مقاومت فشاری آن می‌باشد).

۲- بتن با گذشت زمان و بدون اعمال بار اضافی، به دلیل پدیده افت و خزش، دچار ترک خوردگی و خیز می‌شود.

مزایای بتن مسلح:

۱- چسبندگی مناسب بین بتن و میلگرد آجدار که باعث عملکرد یکپارچه آنها می‌شود.

۲- ضریب انبساط حرارتی بتن و فولاد تقریباً برابر است، لذا تغییرات دما در سازه های بتن مسلح، تنش پسماند زیادی ایجاد نمی‌کند.

۳- پوشش بتنی روی میلگردها یک لایه محافظ در برابر عوامل جوی و خوردگی می‌باشد.

معایب سازه های بتن مسلح:

۱- افزایش وزن سازه به دلیل بزرگ بودن مقاطع و زیاد بودن وزن مخصوص بتن

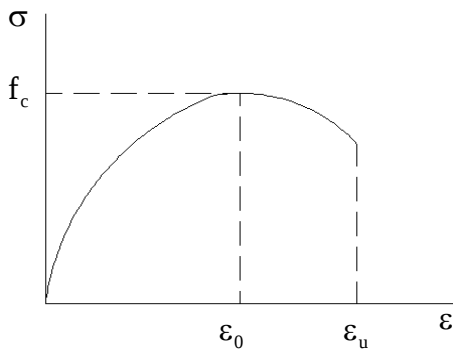
۲- هزینه ساخت بالا به دلیل استفاده از قالب بندی و مهاربندها

۳- کنترل کیفیت بتن به دلیل اجرای کارگاهی مشکل می‌باشد.

در ادامه به بعضی از خواص و خصوصیات بتن و فولاد اشاره می‌کنیم.

منحنی تنش و کرنش بتن: تحت آزمایش فشار تک محوره، منحنی تغییرات تنش بر حسب کرنش غیرخطی می‌باشد و دلیل آن

وجود ترکهای ریز در بتن است که با افزایش تنش، بیشتر می شود. تا اینکه به تنش حداکثر f_c برسد. این تنش معادل با کرنش ϵ_0 می باشد (این کرنش برای انواع بتن ها ثابت و برابر 0.002 می باشد) و پس از آن این شرایط ادامه می یابد تا به کرنش حداکثر، $\epsilon_u = 0.003 - 0.0035$ ، برسد. (معیار خرابی بتن)



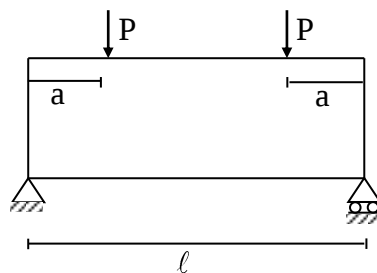
عوامل موثر بر منحنی تنش کرنش:

- ۱- مقاومت فشاری بتن: هر چه بیشتر شود کرنش نهایی شکست کمتر خواهد شد و جذب انرژی بتن کاهش می یابد، حداکثر تنش فشاری افزایش یافته و رفتار تردتری دارد. در این حالت مدول الاستیسیته افزایش و سطح زیر نمودار تنش-کرنش، کاهش می یابد.
- ۲- محصور شدگی: با محصور شدگی بتن، مقاومت فشاری و کرنش نظیر آن و کرنش نهایی شکست، افزایش می یابد.
- ۳- سرعت بارگذاری: با افزایش سرعت بارگذاری، حداکثر تنش فشاری افزایش و کرنش اولیه و کرنش شکست، کاهش می یابند.

مقاومت فشاری مشخصه بتن: (f'_c) به عنوان مقاومت ۲۸ روزه بتن نیز یاد می شود. وقتی نمونه استوانه ای بتن با ابعاد استاندارد پس از ۲۸ روز عمل آوری تحت فشار تک محوره قرار گیرد، مقدار تنش لازم برای غلبه بر نیروی بین ذرات آن تحت فشار، مقاومت فشاری آن نام دارد.

عوامل موثر بر این مقاومت: سرعت بارگذاری، اندازه نمونه، شکل نمونه (مقاومت نمونه مکعبی بیشتر از استوانه ای است)، درصد و نوع مصالح تشکیل دهنده، نسبت آب به سیمان، رطوبت و دما، اثر محصور شدگی، سن بتن و ...

مقاومت کششی بتن: یک تیر دو سر ساده را با بارهای P که به فواصل مساوی از دو انتهای تیر قرار دارند و به تیر اعمال شده اند در نظر بگیرید. در این حالت با افزایش نیروی P ، در حوالی وسط تیر یک ترک به وجود می آید و تیر گسیخته می شود. مقدار تنش کششی در دورترین تار کششی از رابطه $\sigma = \frac{MC}{I}$ به دست می آید.



و به ازای σ (تنش) گسیختگی، یک f_r داریم که مدول گسیختگی بتن نام دارد.

توزیع تنش کششی در بتن مطابق منحنی تنش و کرنش بتن غیرخطی است. یک رابطه تجربی برای f_r وجود دارد:

$$f_r = 2\sqrt{f'_c}$$

f'_c : مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن نام دارد.

آزمایش دیگر برای تعیین مقاومت کششی بتن تحت کشش خالص، آزمایش شکافت یا آزمایش برزبلی است که نمونه استوانه ای را به صورت جانبی درون دستگاه قرار می دهند و با وارد کردن نیرو سبب گسیختگی آن می شود. (تحت کشش)

مدول الاستیسیته بتن: (E_c) مانند فولاد که برای آن مدول الاستیسیته تعریف می‌کنیم و جزء خواص مصالح است. برای بتن هم به همین شکل تعریف می‌شود. ولی منحنی تنش و کرنش بتن، غیرخطی است و باید شکل ایده آل آن را در نظر بگیریم و مقدار آن با رابطه ($E_c = 15100\sqrt{f'_c}$ (kg/cm^2) محاسبه می‌شود. مدول الاستیسیته فولاد در آنالیز خطی که در واقع شیب نمودار تنش و کرنش فولاد مطابق قانون هوک است برابر ($E_s = 2 \times 10^6$ (kg/cm^2) می‌باشد.

* عوامل افزایش دهنده مدول الاستیسیته:

۱- افزایش مقاومت مشخصه

۲- افزایش سرعت بارگذاری

۳- افزایش محصور شدگی

ضریب پواسون: (ν) خاصیتی که در آن بتن، تغییر شکل اعمالی در یک جهت را در جهات دیگر توزیع می‌کند. بتن نسبت به فولاد ضریب پواسون کمتری دارد چون نمی‌تواند این کرنش را به خوبی در راستاهای دیگر توزیع نماید با این حال مقدار آن برای بتن عددی بین صفر تا 0.2 است (معمولاً 0.15) ← برای فولاد ضریب پواسون 0.3 است.

مدول برشی بتن: (G_c)

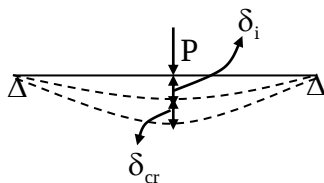
$$\left\{ \begin{array}{l} G_c = \frac{E_c}{2.5(1+\nu)} \rightarrow \text{برای مقاطع ترک نخورده} \\ G_c = \frac{E_c}{1.5(1+\nu)} \rightarrow \text{برای مقاطع ترک خورده} \end{array} \right.$$

ν : ضریب پواسون

E_c : مدول الاستیسیته بتن

خزش بتن Creep: وارفتگی بتن هم نامیده می‌شود با گذشت زمان تحت اثر بارگذاری، یک سری کرنش‌هایی به وجود می‌آید و این کرنش ماندگار است و کرنش پسماند نام دارد که از آن به کرنش ناشی از خزش یاد می‌شود. این کرنش در دراز مدت می‌تواند باعث تخریب سازه شود. $\epsilon_{cr} = (2.5 \sim 3)\epsilon_i$ که ϵ_i کرنش لحظه‌ای است و ϵ_{cr} (ناشی از خزش) می‌تواند تا ۳ برابر کرنش اولیه، رشد پیدا کند.

مطابق شکل روبرو با بارگذاری مداوم، خیز تیر بیشتر می‌شود.



با افزایش عمر بتن، مقاومت فشاری (f'_c) و مدول الاستیسیته (E_c) افزایش می‌یابد و این کرنش کمتر می‌شود ولی همواره وجود دارد. محاسبه خزش از روی مفهوم ضریب خزش مخصوص و از مفهوم ضریب خزش می‌باشد که در اینجا بحث نمی‌شود. افت بتن (shrinkage): پدیده جمع شدگی و کاهش حجم (انقباض) بتن در اثر از دست رفتن آب بتن که آن را آب رفتگی هم می‌نامند. راه جلوگیری از این پدیده عمل آوری بتن می‌باشد که باید سطح آن را مرطوب نگه داشت تا افت آن به حداقل برسد. عوامل موثر بر افزایش افت بتن: خمیر سیمان (افزایش نسبت آب به سیمان، افت بتن را افزایش می‌دهد)، کاهش رطوبت محیط و افزایش افزودنی‌ها به بتن.

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_c = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ ضریب انبساط حرارتی بتن} \\ \alpha_s = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ ضریب انبساط حرارتی فولاد ساختمانی} \end{array} \right\} \text{خواص حرارتی بتن:}$$

فولاد و میلگرد

در سازه های بتن مسلح جهت تأمین مقاومت کششی لازم از میلگرد یا آرماتور استفاده می شود. میلگردها به دو نوع ساده و آجدار تقسیم بندی می شوند که در سازه های بتن مسلح نوع آجدار آن (بدلیل چسبندگی بیشتر با بتن) را باید بکار برد. نوع ساده یا صاف آن جهت آرماتور حرارتی و همچنین در دورپیچ ستونها کاربرد دارد.

انواع میلگردهای متداول در سه نوع AI، AII و AIII مطابق جدول زیر تولید می شود. شاخه ها ۱۲ متری و از قطرهای ۶ تا ۳۲ میلیمتر تولید می شوند.

نوع میلگرد	نامگذاری در آیین نامه بتن ایران	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش گسیختگی (مگاپاسکال)
AI	S220	220	380
AII	S300	300	500
AIII	S400	400	800

عدد بعد از S بیانگر حداقل مقاومت تسلیم فولاد بر حسب مگاپاسکال (نیوتن بر میلیمترمربع) می باشد.

روشهای طراحی سازه های بتن آرمه

منظور از طراحی یک عضو سازه ای (تیر، ستون و ...) یا یک سازه، ایجاد ایمنی کافی آن در برابر تخریب، زوال، فرو ریختگی و تضمین عملکرد مناسب آن در بهره برداری و همچنین ملاحظات اقتصادی می باشد. برای یک عضو سازه ای نمی توان به طور دقیق شرایطی که ایمنی سازه را تضمین کند در نظر گرفت که عوامل زیادی در این باره دخالت دارند که به اختصار به آنها می پردازیم:

الف- ماهیت مصالح: در عمل و در اجرای کار ممکن است مشخصات مکانیکی مصالح متفاوت تر از آن چیزی باشد که ما در آزمایش به دست آورده ایم، به عبارت دیگر مصالح ما ضعیف تر از آن چیزی هستند که ما در طراحی آنها لحاظ کرده ایم.

ب- نمی توان به طور دقیق نوع و ماهیت و مقدار بارهای وارد بر سازه را تعیین کرد؛ بنابراین نمی توان به طور دقیق توزیع بارها را روی سازه مدلسازی کرد.

ج- تحلیل سازه و تعیین تنش و کرنش در اعضاء معمولاً به طور دقیق نیست چون بیشتر با تئوری های فرضی صورت می گیرد. تئوری هایی که برای ساده سازی در آنها از فرضیاتی استفاده شده است که در عمل به طور کامل برقرار نیست.

د- مهمترین عامل هم می توان به خطای انسانی در اجرا به ویژه در سازه های بتن مسلح اشاره کرد که خروجی های طراحی در عمل به طور دقیق اجرا نخواهد شد.

با توجه به موارد گفته شده بایستی شرایط بارگذاری را دست بالا و شرایط مقاومت اجزاء را دست پایین در نظر بگیریم. این کار در جهت تأمین ضریب اطمینان کافی مصالح انجام می شود. امروزه به روشهای گوناگونی طراحی را انجام می دهند. در سازه های بتن مسلح ۳ روش عمده وجود دارد. اصول همه این روشها و در نهایت یک طرح مناسب، باید با اصل ایمنی کافی و اقتصاد طرح مطابقت داشته باشد.

ایمنی: یعنی مقاومت کافی سازه در برابر بارهای اعمالی به آن.

خدمت پذیری: یعنی عدم تجاوز تغییر شکلها و عرض ترکها از مقادیر مجاز و حداقل بودن لرزش ساختمان.

انواع روشهای طراحی:

- ۱- روش تنش مجاز (WSD) یا روش تنش بهره برداری
- ۲- روش مقاومت نهایی (USD)
- ۳- روش حالات حدی یا روش طراحی بر مبنای ضریب بار و مقاومت (LRFD)

روش سوم روش طراحی در آیین نامه بتن ایران (آبا) می باشد.

۱- روش تنش مجاز: Allowable Stress Design

در این روش اعضای سازه چنان طراحی می شوند که حداکثر تنش اعضاء در کلیه حالات بارگذاری، کمتر از تنش های مجاز باشند. تنش های مجاز در این روش در محدوده الاستیک (حالت بازگشت پذیر که مصالح ماهیت اولیه خود را از دست ندهند) بوده و از تقسیم تنش تسلیم فولاد یا بتن به ضریب اطمینان، تعیین می شوند.

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_r}{F.S}$$

ضریب اطمینان در این روش با توجه به مورد بین 1.65 تا 2 می‌باشد و این ضریب اطمینان در یک مرحله روی مقاومت‌ها می‌شود و بارها بدون ضریب در محاسبات اعمال می‌شوند.

* ضریب اطمینان Factor of Safety: در اکثر موارد احتمال اضافه بار یا کاهش بار در اجرا نسبت به آنچه در نظر گرفته‌ایم وجود دارد و یا همانطور که بیان کردیم مقاومت مصالح متفاوت با آنچه در طراحی مدنظر داشته‌ایم بوده است مثلاً بتن صحیح ساخته نشود و یا قرارگیری فولادها مناسب نباشد که برای دیدن این کاستی‌ها یک ضریب اطمینان برای سازه و طراحی آن منظور می‌کنیم و در محاسبات وارد می‌نمائیم.

* معایب این روش:

• استفاده از یک ضریب اطمینان برای خطاهای گفته شده کافی نیست.

• برای ستونهای لاغر مناسب نمی‌باشد.

۲- روش مقاومت نهایی: Ultimate Stress Design

در این روش باید اثرات بارهای افزایش یافته از مقاومت نهایی کاهش یافته کمتر باشد. یعنی بارها را در ضریب افزایشی (بزرگتر از ۱) مثل Ψ_L و مقاومت‌ها را در ضریب کاهشی (کوچکتر از ۱) مثل Ψ_s ضرب کنیم.

$$\Psi_L \leq \Psi_s \quad (\text{مقاومت نهایی})$$

$$S_u \leq \phi S_n$$

اثرات بارهای افزایش یافته S_u

مقاومت اسمی یا نهایی S_n

ضریب کاهش ϕ

تحلیل سازه در این روش بر اساس روش تحلیل الاستیک خطی می‌باشد و بارگذاری بر اساس بارهای ضریب دار انجام می‌شود و این روش مبنای طراحی در آیین نامه ACI می‌باشد.

* باید تمام اثرات بار محوری، خمشی، پیچشی، برشی ارضاء شوند تا بتوان عضوی ایمن داشت.

$$S_u \leq \phi S_n \Rightarrow \begin{cases} P_u \leq \phi P_n & (\text{بار محوری}) \\ M_u \leq \phi M_n & (\text{خمشی}) \\ T_u \leq \phi T_n & (\text{پیچشی}) \\ V_u \leq \phi V_n & (\text{برش}) \end{cases}$$

مقدار ϕ برای اثرات بارهای گوناگون متفاوت است که به ذکر چند نمونه می‌پردازیم:

ضریب کاهش مقاومت: ϕ

ϕ	اثرات بارها
0.9	خمشی تیرها
0.9	خمشی و کششی
0.7, 0.75	(در ستونها) خمشی و فشار
0.85	برش
0.85	پیچشی
0.65	بتن غیر مسلح

* انواع بارهای وارد بر ساختمان:

۱- بار مرده Dead Load (D): این بار همیشه وجود دارد و ناشی از وزن مرده ساختمان است و برابر وزن کل مصالح به کار رفته درون آن می‌باشد که به صورت ثقلی به اعضاء وارد می‌شود.

۲- بار زنده Live Load (L): این بار با توجه به وجود اشیاء و افراد بر روی اعضاء و یا کف ساختمان، به سقف‌ها وارد می‌شود.

این بارها هم به صورت ثقلی هستند ولی مقادیر آنها متفاوت است.

- ۳- بار زلزله (Earthquake (E): این بار ناشی از حرکات زمین که به صورت موج می‌باشد به ساختمان اعمال می‌شود و به صورت افقی به تمام طبقات می‌رسد. از مهمترین بارهای وارد بر ساختمان در طراحی‌ها می‌باشد.
- ۴- بار باد (Wind (w): باری که توسط باد به قسمتهای مختلف ساختمان وارد می‌شود و مقدار و توزیع آن طبق آئین نامه بارگذاری (مبحث ششم مقررات ملی ساختمان) در نظر گرفته می‌شود. این بار در طراحی ساختمانهای خیلی بلند، تاثیر عمده دارد.
- ۵- بار حرارتی (Tempreture (T): این بار بر اثر گرما و حرارت در سازه‌های نامعین، تولید تنش می‌کند.
- ۶- بارهای دیگر از جمله بار جریان مایع (Flow) و فشار خاک که به صورت افقی به سازه‌ها مثل دیوار حائل یا نگهدارنده وارد می‌شود. (H)

ترکیبات بار در روش مقاومت نهایی

- 1) $1.4D + 1.7L$ اثر بار مرده و زنده
- 2) $0.75(1.4D + 1.7L \pm 1.87E)$
- 3) $0.75(1.4D + 1.7L \pm 1.7w)$
- 4) $0.9D \pm 1.43E$
- 5) $0.9D \pm 1.3w$

ترکیب بارهای دیگری هم وجود دارد ولی این چند ترکیب بار از مهمترین‌ها می‌باشند. ضرایب این بارها طبق آئین نامه آبا ایران متفاوت است که در زیر به ذکر چند نمونه می‌پردازیم.

- طبق آبا :
- 1) $1.25D + 1.5L$
 - 2) $D + 1.2L \pm 1.2(E \text{ or } N)$
 - 3) $1.25D + 1.5L + 1.5H$
 - 4) $0.85D + 1.5H$
 - 5) $D + 1.2L \pm T$
 - 6) $0.85D + 1.2E$

* معایب این روش: در نظر گرفتن یک ضریب کاهش مقاومت یکسان برای بتن و فولاد صحیح نیست.

۳- روش حالات حدی:

این روش در آیین نامه بتن ایران بکار گرفته شده است. مطابق این روش، عضو تا رسیدن به این حالات حدی، وظایف خود را به درستی انجام می‌دهد ولی پس از آن زوال پیدا می‌کند. در این روش تمهیداتی اندیشیده شده است که عضو به این حالات حدی نرسد.

الف- حد مقاومت نهایی: بایستی مقاومت نهایی عضو در مقطع مورد نظر، بزرگتر از اثرات بار تحت تاثیر بارهای ضریب دار باشد. این ضرایب به قرار زیر است که در مقاومت بتن و فولاد ضرب می‌شوند.

$$\phi_c = 0.6 \text{ : ضریب جزئی مقاومت بتن}$$

$$\phi_s = 0.85 \text{ : ضریب جزئی مقاومت فولاد}$$

ب) حالت حد بهره برداری سازه: این مقوله در دو حالت حدی تغییر شکل سازه (حد بهره برداری خیز) و حالت حدی ترک خوردگی (حد بهره برداری عرض ترک) که به هر کدام از این حدود، حدود خدمت پذیری می‌گویند تعریف می‌شود. یعنی اینکه ما تغییر شکلهای ایجاد شده یا میزان باز شدگی ترکها را محدود کنیم. در این روش از بارهای سرویس (بدون ضریب) استفاده می‌شود و همچنین در تنش‌های موجود در بتن و فولاد، ضرایب جزئی مقاومت و ضرایب جزئی بارها را برابر ۱ می‌گیریم.

نکته: ترکیبات بارگذاری که به کار بردیم می‌توان در مورد ترکیب لنگر و برش هم به کار برد به طور مثال:

$$M_u = 1.4M_D + 1.7M_L$$

$$M_u = 0.75(1.4M_D + 1.7M_L \pm 1.87M_E)$$

حال با این ترکیبات لنگر، اگر لنگر یک عضو مقدارحداکثر منفی و مقدار حداکثر مثبت برای آن به دست آمد باید برای هر دو لنگر طراحی کنیم چون لنگر مثبت، پایین تیر و لنگر منفی، تارهای بالای تیر را به کشش می‌اندازد و باید برای هر دو لنگر، میلگرد

لازمه را در بالا و پایین قرار دهیم.

چند نکته:

- * مقاومت مشخصه فولاد: مقاومتی که حداکثر ۵ درصد مقادیر مقاومت نمونه‌های اندازه گیری شده برای تنش تسلیم از آن کمتر باشد.
- * مقاومت فشاری مشخصه بتن هم بر اساس مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای تعیین می‌شود.
- * مدول الاستیسیته بتن، تابعی از مقاومت فشاری و چگالی (وزن مخصوص) بتن است.
- * در اعضای سازه ای و بتن مسلح، تمام آرماتورها باید آجدار باشند جز در دورپیچ ستونها و آرماتورهای حرارتی که می توان از آرماتور صاف استفاده کرد.
- * معیار خرابی بتن رسیدن کرنش آن به کرنش شکست است و نه مقاومت فشاری آن. لذا با گذر زمان تحت فشار کمتر از مقاومت مشخصه هم بتن می تواند گسیخته شود.

سوالات چهار گزینه‌ای فصل اول

۱- مدول گسیختگی در بتن:

- (۱) مدول مماسی بتن در هنگام گسیختگی فشاری
(۲) مقاومت کششی بتن تحت خمش خالص
(۳) مقاومت کششی بتن تحت کشش غیرمستقیم
(۴) مدول مماسی بتن در هنگام گسیختگی کششی

۲- کدام یک از مشخصات زیر تقریباً برای میلگردهای مختلف یکسان است؟

- (۱) مدول الاستیسیته
(۲) کرنش نهایی
(۳) تنش نهایی
(۴) تنش تسلیم

۳- دلیل اصلی رفتار غیرخطی در منحنی تنش - کرنش بتن چیست؟

- (۱) تشکیل ریز ترکها
(۲) تغییرات سرعت بارگذاری نمونه
(۳) رفتار غیرخطی فولادهای مسلح کننده
(۴) رفتار غیرخطی سنگدانه ها

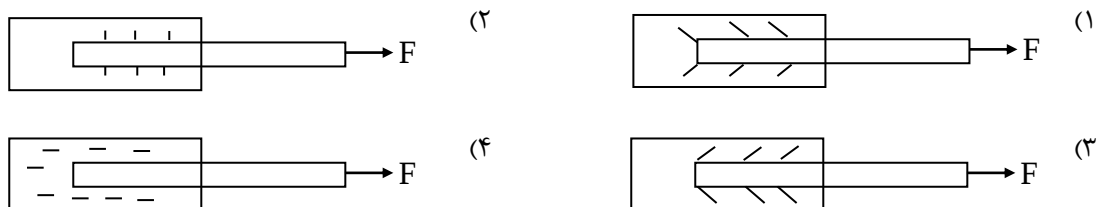
۴- تغییر حجم بتن در طی زمان بدون وابستگی به تاثیر نیروهای خارجی و ، تغییر شکل بتن در طی زمان در اثر بارهای دراز مدت می باشد.

- (۱) خزش - جمع شدگی
(۲) گسیختگی - خزش
(۳) جاری شدن - جمع شدگی
(۴) جمع شدگی - خزش

۵- کدام گزینه نادرست است؟

- (۱) هزینه اجرای سازه های بتنی زیاده‌تر از فولادی است.
(۲) سازه های فولادی تاب فشاری کمتری نسبت به سازه های بتنی دارند.
(۳) سازه های بتنی، تغییرات حجمی وابسته به زمان دارند.
(۴) تنش پسماند در هر دو سازه بتنی و فولادی ایجاد می شود.

۶- با توجه به اصول چسبندگی موجود بین فولاد و بتن، کدام شکل درست تر است؟



۷- در طراحی مقاطع بتن آرمه تحت خمش در کدام یک از حالات زیر، نمودار کرنش‌ها به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود؟

- (۱) حالات حدی
(۲) مقاومت نهایی
(۳) تنش‌های مجاز
(۴) هر سه روش مذکور

۸- کدام یک از گزینه‌های زیر به بیان حالت حدی بهره برداری در سازه‌های بتن آرمه مربوط نمی‌شود؟

- (۱) کنترل تغییر شکل بیش از حد سازه
(۲) کنترل عرض ترک حداکثر
(۳) کنترل تبدیل شدن سازه یا قسمتی از آن به مکانیزم
(۴) کنترل لرزش بیش از حد سازه

۹- کدامیک از گزینه‌های زیر منعکس کننده علت کاربرد ضرائب تقلیل مقاومت، در طراحی در حالت حد نهایی مقاومت نمی‌باشد؟

- (۱) عدم اطمینان از نحوه توزیع تنش در مقطع
(۲) عدم اطمینان از مقاومت بتن و فولاد مورد استفاده در سازه
(۳) عدم اطمینان از ابعاد صحیح مقاطع و اعضاء
(۴) عدم اطمینان از موقعیت قرارگیری صحیح فولادها

۱۰- کدامیک از پارامترهای زیر اثر بیشتری برای مقاومت فشاری بتن دارد؟

- (۱) سن بتن
(۲) ابعاد نمونه بتنی
(۳) نسبت آب به سیمان
(۴) نحوه به عمل آوردن بتن

۱۱- کدامیک از روشهای زیر را می‌توان در تحلیل سازه‌های بتن آرمه به کار گرفت؟

- (۱) آنالیز خطی
(۲) آنالیز غیرخطی
(۳) آنالیز پلاستیک
(۴) هر سه مورد

۱۲- وجه تمایز کنترل حالت حدی نهائی و حالات حدی بهره برداری چیست؟

- (۱) وجه تمایزی ندارند.
- (۲) حالت حدی بهره برداری به ازای بارهای زنده و حالت حدی نهایی به ازای مجموع کلیه بارها کنترل می‌شوند.
- (۳) برای کنترل حالت بهره برداری از آنالیز خطی و برای کنترل حالت حدی نهایی از آنالیز پلاستیک استفاده می‌شود.
- (۴) در حالات حدی بهره برداری بارهای بدون ضریب و در حالت حدی نهایی بارهای ضریب دار ملاک محاسبه هستند.

۱۳- کدام گزینه در مورد خزش و افت صحیح می باشد؟

- (۱) هر دو پدیده تحت اثر بارهای ثابت اتفاق می افتند.
 - (۲) افت با کاهش حجم بتن همراه است ولی خزش در اثر کرنش های تدریجی اتفاق می افتد.
 - (۳) با عمل آوری خوب بتن پس از ساخت می توان خزش آن را کنترل کرد.
 - (۴) هر چه افت بتن بیشتر باشد خزش آن هم بیشتر خواهد شد.
- ۱۴- نمونه بتنی را در یک رینگ آلومینیومی قرار داده و زیر دستگاه فشار تک محوره می گذاریم. نمودار تنش -

کرنش آن چه تغییری نسبت به حالت بدون رینگ دارد؟

- (۱) شیب منحنی تنش - کرنش در ناحیه خطی افزایش می یابد.
- (۲) کرنش نظیر مقاومت فشاری ثابت مانده ولی کرنش نهایی شکست افزایش می یابد.
- (۳) مقاومت فشاری بیشتر و کرنش نهایی شکست کمتر خواهد شد.
- (۴) در این منحنی، ناحیه خطی نخواهیم داشت.

پاسخ سؤالات چهار گزینه‌ای فصل اول

- ۱- گزینه ۲ صحیح است.
طبق تعریف، مدول گسیختگی همان مقاومت کششی بتن تحت خمش خالص می باشد.
- ۲- گزینه ۱ صحیح است.
مدول الاستیسیته برای انواع میلگردها، ثابت و برابر $2 \times 10^5 MPa$ می باشد.
- ۳- گزینه ۱ صحیح است.
طبق توضیحات درس، دلیل اصلی رفتار غیر خطی منحنی، تشکیل ریز ترکها می باشد.
- ۴- گزینه ۴ صحیح است.
جمع شدگی پدیده کاهش حجم بدون اثر بار خارجی و به لحاظ از دست رفتن آب بتن می باشد و خزش در واقع افزایش تغییر شکل و خیز در اثر بارهای دراز مدت در طول زمان می باشد.
- ۵- گزینه ۲ صحیح است.
تاب فشاری هر دو سازه بتنی و فولادی به نوع مصالح و نحوه بارگذاری آن بستگی دارد و در شرایط مختلف متفاوت خواهد بود. لازم به توضیح است بتن مقاومت کششی پایینی دارد.
- ۶- گزینه ۳ صحیح است.
در این حالت و تحت اثر کشش فولاد، بازوهای فشاری بتنی در محل اتصال بتن و آج میلگرد تشکیل می شوند و نیروی فشاری خلاف جهت به بتن و آرماتور وارد می کنند و این پدیده چسبندگی را افزایش می دهد. صحیح ترین شکل در گزینه ۳ وجود دارد.
- ۷- گزینه ۴ صحیح است.
دیاگرام کرنش بتن به صورت خطی، یک فرض اساسی در حل مسئله است و ربطی به روش خاصی ندارد و در تمام روشها این فرض در نظر گرفته می شود. هرچند نمودار تنشها در حالت حدی و مقاومت نهایی غیرخطی است و در حالت تنش مجاز خطی می باشد ولی نمودار کرنش همواره خطی است.
- ۸- گزینه ۳ صحیح است.
با توجه به متن درس گزینه های ۱ و ۲ و ۴ مربوط به حالت حدی بهره برداری می باشد و تبدیل شدن سازه به مکانیزم یعنی به وجود آمدن مفصل خمشی در سازه، جزء حالت حدی نهایی می باشد.
- ۹- گزینه ۳ صحیح است.
در اینجا در واقع می توان گفت هر چهار گزینه داده شده از دلایل کاربرد ضرائب کاهنده مقاومت می باشند و با توجه به این تست گزینه ۳، حساسیت کمتری دارد یعنی ابعاد صحیح مقاطع معمولاً در اجرا اگر صحیح رعایت نشود تا حدودی بوسیله رواداریها قابل قبول است. بهتر بود که سوال به گونه ای دیگر مطرح شود ولی در اینجا جواب صحیح همان عدم اطمینان از ابعاد صحیح مقاطع و اعضا می باشد.
- ۱۰- گزینه ۳ صحیح است.
مقاومت فشاری (f'_c) یک بتن با افزایش سن بتن، بیشتر می شود تا به مقاومت ۲۸ روزه برسد و نحوه عمل آوردن بتن که با پیشرفت عمل هیدراسیون در آن همراه است، مقاومت آن را افزایش می دهد. ابعاد نمونه هم تاثیر گذار است ولی عامل اصلی و پارامتر اساسی همان نسبت آب به سیمان است که اثر مهمی روی مقاومت فشاری دارد.
- ۱۱- گزینه ۴ صحیح است.
آنالیز غیر خطی و پلاستیک آنالیزهای دقیق تر و پیشرفته تر نسبت به آنالیز خطی هستند. در تحلیل های زمانی و تاریخچه زمانی زلزله و ... از آنالیزهای غیر خطی و پلاستیک کمک می گیرند ولی تحلیل با هر سه نوع انجام می گیرد.

۱۲- گزینه ۴ صحیح است.

هر دو حالت به ازای مجموع بارها و شیوه آنالیز آنها با هم یکی است ولی تمایز آنها همانگونه که گفته شده است در ضریب دار بودن بارهاست.

۱۳- گزینه ۲ صحیح است.

پدیده افت بدون اعمال بارهای خارجی و بخاطر از دست رفتن آب بتن است که با عمل آوری مناسب می توان این پدیده را کاهش داد. خزش ربطی به افت بتن ندارد و دو پدیده کاملاً جدا از هم هستند.

۱۴- گزینه ۱ صحیح است.

با قرار دادن نمونه درون رینگ، محصور شدگی آن افزایش یافته، لذا مقاومت فشاری نمونه به دلیل مقاومت جانبی آن، افزایش می‌یابد. کرنش نظیر این مقاومت و همچنین کرنش نهایی شکست هم افزایش خواهند یافت. شیب ناحیه خطی این نمودار معرف مدول الاستیسیته است که با افزایش محصور شدگی، افزایش می‌یابد.

طراحی خمشی

عناوین اصلی

- ❖ تحلیل مقطع تحت خمش و طراحی آرماتور کششی
- ❖ انواع گسیختگی مقاطع تحت خمش
- ❖ طراحی آرماتورهای فشاری (مقاطع دابل آرمه)
- ❖ طراحی مقاطع بالدار (T شکل)

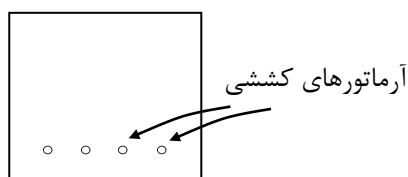
فصل دوم

طراحی خمشی

تحلیل مقطع تحت خمش و طراحی آرماتور کششی

به طور کلی بتن، قدرت تحمل کشش را ندارد. به همین لحاظ هر جا که بتن به نحوی در کشش قرار می‌گیرد، برای رفع این نقص بایستی از عاملی استفاده کنیم که بتواند کشش را تحمل کند این عامل آرماتور است که از آن برای تحمل کشش در بتن استفاده می‌کنند.

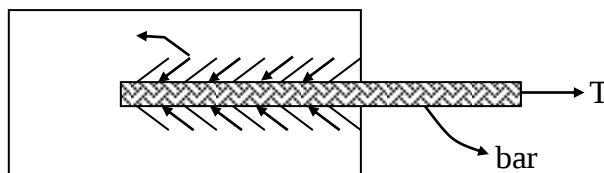
بایستی در همسایگی بتن و میلگرد، کرنش یکی باشد که لازمه این امر این است که بتن و میلگرد به طرز مناسبی به یکدیگر چسبیده باشند تا با هم کار کنند. خطی بودن کرنش در اینجا یک فرض اساسی است.



* چسبندگی بین بتن و فولاد ناشی از عوامل زیر است:

۱- در داخل بتن و در اطراف میلگرد در اثر نیروی کشش آرماتور یک سری ترک‌هایی به وجود می‌آید و از آن به بازوهای فشاری بتنی یاد می‌کنیم که این بتن بین ترک‌ها نیرویی به میلگرد وارد می‌کنند و باعث می‌شود فشار وارد بر میلگرد بیشتر شده و این چسبندگی به وجود آید.

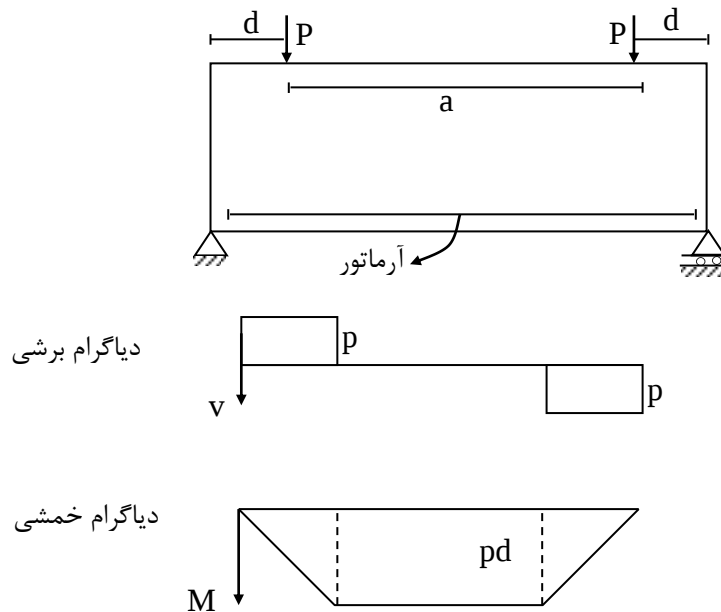
بازوهای فشاری بتنی که نیرویی به میلگرد از نوع فشاری وارد می‌کنند.



۲- زیر بودن جداره: ناشی از خلل و فرج فولاد که نوعی چسبندگی بین بتن و این ناهمواری‌ها به وجود می‌آید.

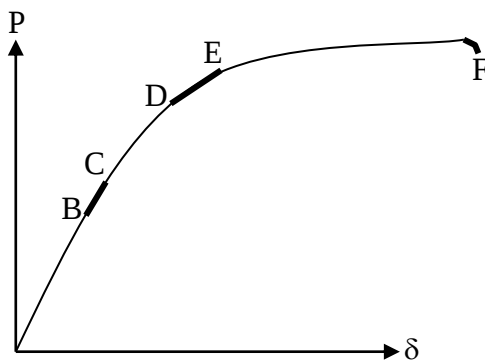
۳- اثر آج آرماتور: که باعث درگیر شدن بتن به آج‌های میلگردها می‌شود و یکی از دلایل چسبندگی است. وقتی یک تیر بتن آرمه تحت خمش قرار می‌گیرد بسته به میزان لنگر خمشی وارده، تیر بتنی می‌تواند وارد مرحله الاستیک، الاستو پلاستیک یا پلاستیک شود که در ادامه به این مباحث می‌پردازیم.

یک تیر ساده را در نظر می‌گیریم که توسط دو نیروی P که به فاصله a از یکدیگر قرار دارند، بارگذاری شده است با توجه به دیاگرام لنگر خمشی در فاصله بین دو نیروی P فقط خمش خالص داریم و نیروی برشی وجود ندارد.

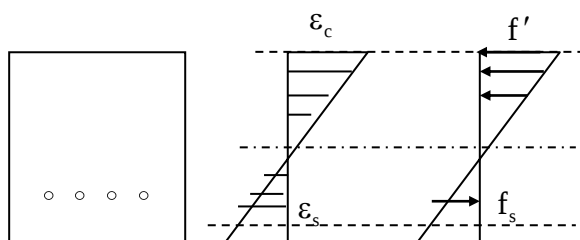


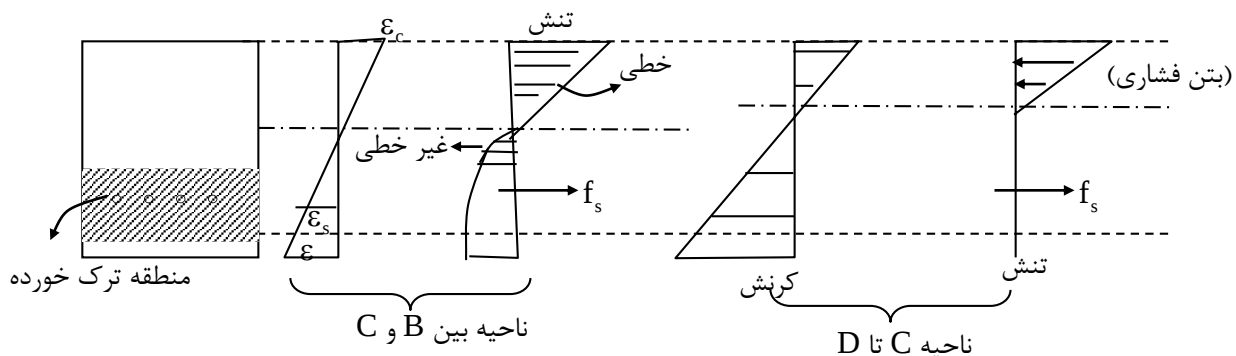
- فرضیات: ۱- تحت اثر خمش، تار خنثی هیچ گونه تغییر طولی نخواهد داشت چون نیروی محوری در تار خنثی صفر است.
۲- مقاطع مسطح و عمود بر میان تار بعد از تغییر شکل عضو، باز هم به صورت مسطح و عمود بر میان تار تغییر شکل یافته، باقی می‌مانند.
۳- کرنش‌ها در ارتفاع مقطع همواره به صورت خطی تغییر می‌کنند حال آنکه تنش به این صورت نیست.

با افزایش P در شکل مربوطه، δ (جابجایی وسط تیر) هم افزایش می‌یابد و مطابق نمودار زیر است.



در ناحیه AB ، در محدوده تغییر شکل‌های الاستیک (ارتجاعی) قرار داریم و تنش و کرنش خطی هستند و این حالت با افزایش نیروی P ، ادامه می‌یابد تا اینکه برای اولین بار در نقطه B ، تنش کششی در دورترین نقطه تیر به f_t رسیده است (یعنی تشکیل اولین ترک) و این ترک به سمت بالا حرکت می‌کند و در نقطه C ، گسترش ترک کامل شده و در قسمت کششی بتن تغییر شکل‌های پلاستیک افزایش یافته و میلگردها به کار می‌افتند و در آنها نیروی f_s به وجود می‌آید. از نقطه C به بعد پایین تار خنثی ترک خورده فرض می‌شود.

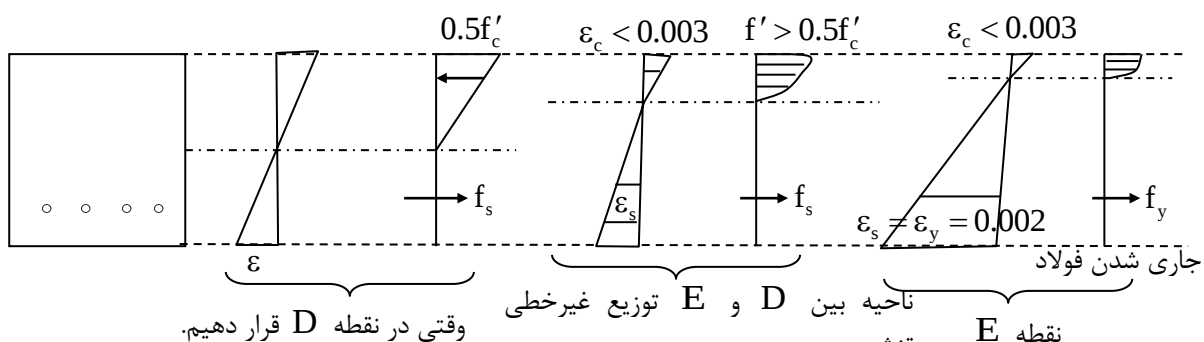




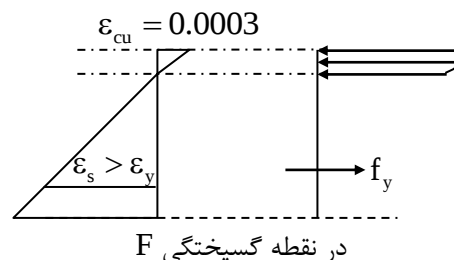
از نقطه C به بعد، یک بخش بتن فشاری داریم که توزیع تنش در آن خطی است و یک آرماتور کششی و بقیه بتن ترک خورده است.

با افزایش نیروی P، کرنش زیادتر می‌شود و تار خنثی، ثابت می‌ماند. این حالت ادامه می‌یابد تا اینکه در نقطه D نمودار که مرز بین حالت خطی و غیر خطی تنش در بتن فشاری است که مقدار این تنش مرزی برابر $0.5f'_c$ است به عبارت دیگر وقتی تنش در تار بالایی بتن فشاری به $0.5f'_c$ برسد تنش از حالت خطی وارد رنج غیرخطی می‌شود.

پس از این حالت و با افزایش P اگر کرنش فولاد به 0.002 برسد، فولادها جاری می‌شوند و بتن زمانی پودر می‌شود که کرنش آن به 0.003 برسد، نقطه E جایی است که کرنش فولاد به 0.002 می‌رسد و فولادهای کششی جاری می‌شوند.

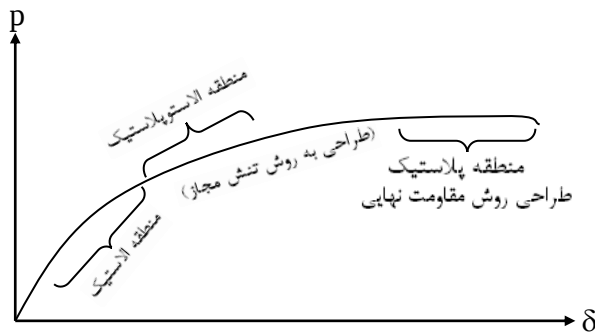


پس از جاری شدن فولاد، تار خنثی به سرعت به سمت بالا حرکت می‌کند تا در مقطع تعادل را جبران و در ناحیه E تا F، نمودار تقریباً خط افقی است به دلیل اینکه فولادها جاری شده‌اند و با اندک نیروی اضافی P، تغییر شکلهای زیادی صورت می‌گیرد و کرنش‌ها هم در فولاد کششی و هم در بتن فشاری افزایش می‌یابد. افزایش کرنش فولاد تأثیری روی نیروی آرماتورها ندارد چون آنها جاری شده‌اند. در قسمت بتن فشاری، با افزایش کرنش بتن، تنش فشاری افزایش می‌یابد و بایستی تار خنثی به سمت بالا حرکت کند تا جبران تعادل در مقطع را بکند و در نقطه‌ای مانند F، کرنش بتن هم به 0.003 می‌رسد و مقطع گسیخته می‌شود.



توجه: افتادگی کوچکی که در انتهای نمودار در نقطه F به وجود می‌آید به دلیل سخت شدگی فولاد است.

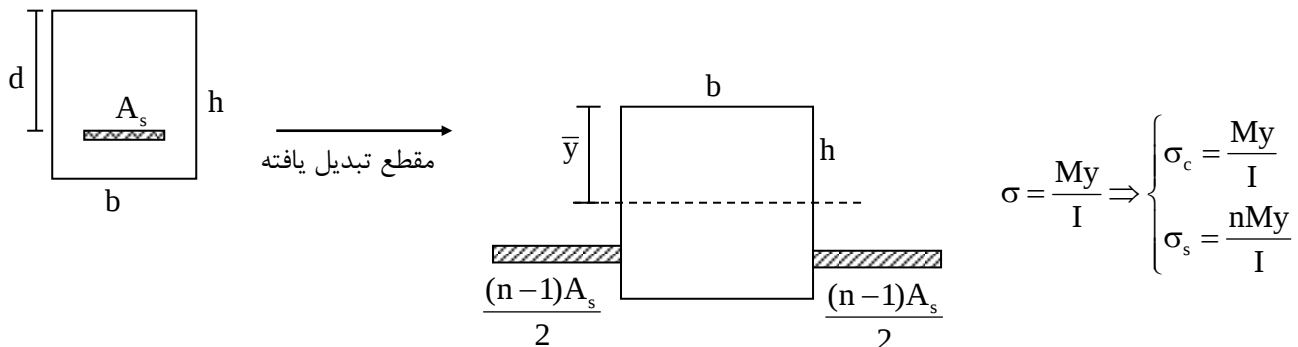
الف) تحلیل مقطع خمشی در ناحیه الاستیک



با توجه به مقاومت مصالح، بتن آرمه از مقاطعی است که از دو ماده مختلف بتن و فولاد با E متفاوت تشکیل شده است و بایستی مقطع را به یک جنس تبدیل کنیم (در اینجا مقطع را کلاً به بتن تبدیل می‌کنیم (با ضریب تبدیل n)). در مقاطع با رفتار خطی رابطه $\sigma = \frac{My}{I}$ برای تنش نرمال خمشی برقرار است. اگر تنش در دورترین تار کششی از مدول گسیختگی بتن (f_r) کمتر باشد، مقطع در مرحله رفتار الاستیک می‌باشد.

$$f_r = 2\sqrt{f'_c} \quad , \quad E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \quad , \quad E_c = 15100\sqrt{f'_c} \quad , \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$

d : فاصله تار فشاری بالا تا مرکز سطح آرماتورها (ارتفاع موثر)



توجه: برای به دست آوردن d ، اگر در چند لایه آرماتور داشتیم باید مرکز سطح آنها را حساب کنیم.
 $I, \bar{y}$ مربوط به مقطع تبدیل یافته است.

$$f_s = n\sigma_c = nM \frac{(d - \bar{y})}{I}$$

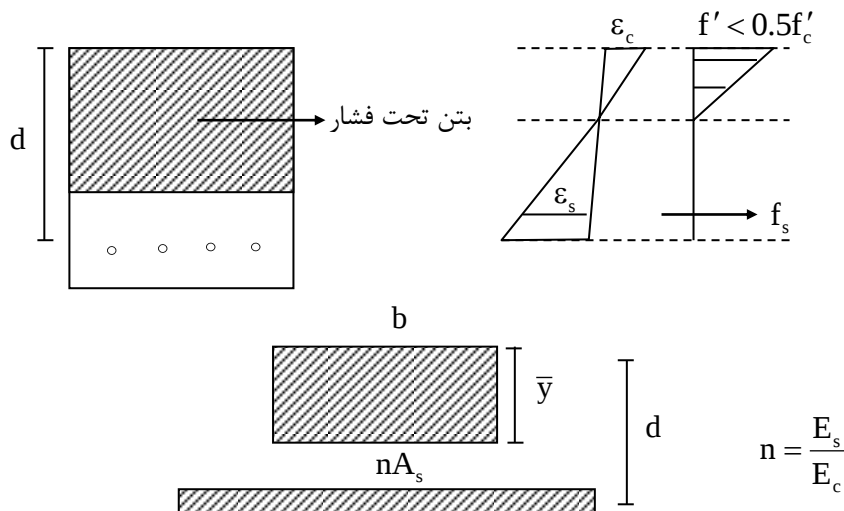
$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{h - \bar{y}} \quad , \quad f_r = 2\sqrt{f'_c} \quad , \quad I_g \text{ ممان اینرسی مقطع خالص بتنی}$$

M_{cr} : مقدار لنگری است که اگر لنگری بیشتر از آن به مقطع وارد شود مقطع ترک می‌خورد.

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{h/2}$$

ب) تحلیل مقطع خمشی در حالت الاستو پلاستیک

در این ناحیه بتن کششی از بین رفته است، فولادها موجودند (هنوز جاری نشده‌اند) و بتن در قسمت فشاری به حد گسیختگی نرسیده است و ارتفاع موثر همان d است.



در اینجا فرض می‌شود تار خنثی به فاصله $\bar{y}$ از بالاترین تار فشاری قرار دارد پس داریم:

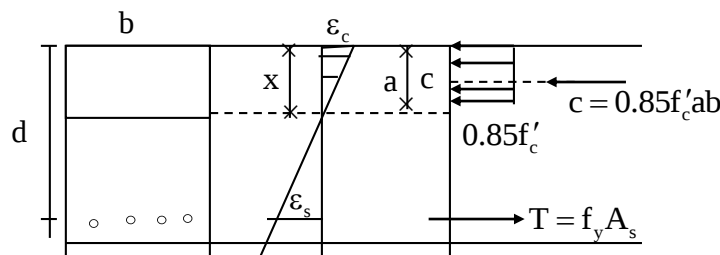
$$\bar{y} = \frac{(b\bar{y})\frac{\bar{y}}{2} + (nA_s)d}{b\bar{y} + nA_s}$$

$$I = \frac{b\bar{y}^3}{12} + (b\bar{y})\left(\frac{\bar{y}}{2}\right)^2 + nA_s(d - \bar{y})^2$$

$$\text{تنش‌ها: } \begin{cases} f_c = \frac{M\bar{y}}{I} < 0.5f'_c \\ f_c = \frac{nM(d - \bar{y})}{I} < f_y \end{cases}$$

ج) تحلیل مقطع خمشی در حالت پلاستیک

اگر $f_s > f_y$ و $f_c > 0.5f'_c$ آنگاه مقطع وارد مرحله پلاستیک می‌شود چون هم فولادهای کششی جاری شده‌اند و هم بتن به تنش گسیختگی رسیده است. در این حالت باز هم دیاگرام کرنش خطی است ولی تنش‌ها غیر خطی می‌باشند. در این حالت برای ساده سازی حل، تنش‌ها را با یک بلوک مستطیلی تنش شبیه سازی می‌کنیم. ابعاد این بلوک مستطیلی تنش، $0.85f'_c$ و a هستند.



$$\sum F = 0 \Rightarrow C = T \Rightarrow 0.85f'_c ab = A_s f_y \Rightarrow a = \frac{A_s f_y}{0.85f'_c b}$$

مقاومت اسمی مقطع: مقدار لنگری است که در حالت پلاستیک به مقطع وارد می‌شود و با M_n نشان می‌دهیم و مقدار آن برابر است با:

$$\sum M_c \text{ حول نقطه } = 0 \Rightarrow M_n = T(d - \frac{a}{2}) = A_s f_y \left[d - \frac{A_s f_y}{2 \times 0.85 f'_c b} \right]$$

$$\boxed{a = \beta_1 x}, x: \text{ عمق تار خنثی} \rightarrow \beta_1 \text{ (طبق آبا)} : \begin{cases} 0.85, & f'_c \leq 300 \text{ kg/cm}^2 \\ 0.85 - 0.008(f'_c - 300) \geq 0.65, & f'_c > 300 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

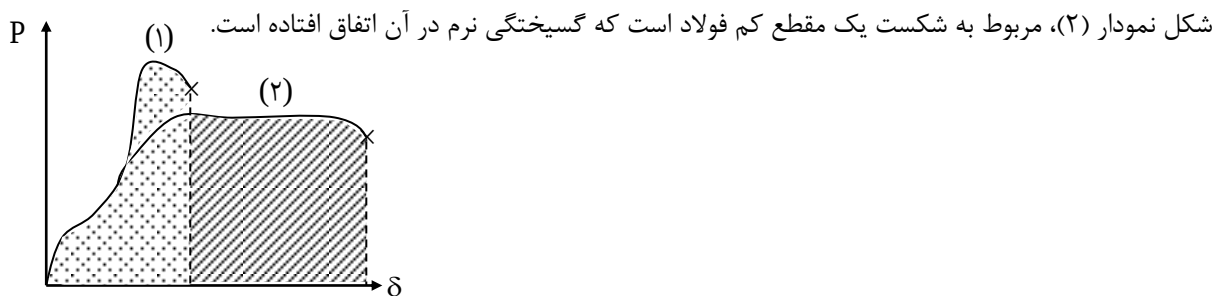
در طراحی مقاطع خمشی، باید مقدار آرماتور کششی مقطع را طوری انتخاب کنیم که گسیختگی نرم داشته باشیم.

انواع گسیختگی مقاطع تحت خمش

- ۱- **گسیختگی نرم:** نوعی از گسیختگی است که تغییر شکلها در آن قابل ملاحظه هستند یعنی گسیختگی با اطلاع قبلی است. هر چه تغییر شکلها بیشتر باشند انرژی جذب شده توسط سازه بیشتر است و در هنگام زلزله، انرژی بیشتری را جذب می‌کند.
- ۲- **گسیختگی ترد:** شکست بتن قبل از جاری شدن فولادهای کششی رخ می‌دهد. این نوع گسیختگی مربوط به مقاطع پر فولاد است و مطلوب نمی‌باشد.

مثال:

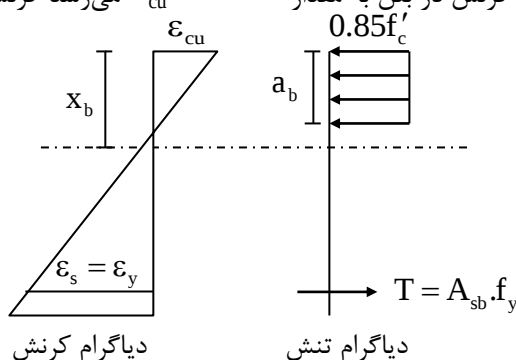
با توجه به نمودار ذیل، نمودار (۱) مربوط به گسیختگی یک مقطع پر فولاد است. در این مقطع که فولاد کششی زیادی دارد قبل از اینکه این فولادها جاری شوند کرنش بتن به حدود ۰.۰۰۳ تا ۰.۰۰۳۵ می‌رسد و بتن فشاری گسیخته می‌شود در حالی که فولادهای کششی جاری نشده‌اند. (گسیختگی ترد)



انرژی گسیختگی: سطح زیر نمودار $P - \delta$ برابر با انرژی جذب شده است به عبارت دیگر، مقطع به اندازه سطح زیر نمودار انرژی جذب می‌کند یا انرژی نیاز دارد تا گسیخته شود. ملاحظه می‌شود که انرژی گسیختگی مربوط به گسیختگی نرم، شکل (۲) بیشتر می‌باشد.

نکته: گسیختگی تیر ساده که تحت بارهای P اتفاق می‌افتد به این صورت است که یک سری ترکهایی به موازات هم در زیر تیر به وجود می‌آید و در لحظه گسیختگی، از وسط تیر یکی از ترکها به قسمت بالا می‌رسد و عملاً گسیختگی بتن ابتدا از وسط تیر شروع می‌شود. در این حالت به دلیل اینکه در محدوده ترک، محور خنثی در بالای ترکها و در قسمت‌های ترک نخورده، محور خنثی پایین‌تر است؛ بنابراین محور خنثی (N.A) کلی به صورت یک خط صاف نیست و یک خط موج دار منحنی می‌باشد. با گسترش ترکها، I (ممان اینرسی تیر) روند کاهشی دارد و سختی تیر هم چون به I وابسته است با افزایش نیرو کاهش می‌یابد.

حالت متوازن یا بالانس در مقطع: حالتی است که در لحظه‌ای که کرنش در بتن به مقدار $\epsilon_{cu} = 0.003$ می‌رسد کرنش فولاد هم به ϵ_y برسد یعنی فولادها هم جاری شوند.



$$\left. \begin{aligned} \phi_c &= 0.6 \\ \phi_s &= 0.85 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{ضرایب جزئی ایمنی} \\ &\text{طبق آیین نامه آبا} \end{aligned}$$

در حالت بالانس، $(\epsilon_s = \epsilon_y)$ و گسیختگی از نوع نرم می‌باشد و مقدار آرماتور مورد نیاز از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad \text{درصد فولاد مقطع}$$

$$x_b = \frac{0.003}{0.003 + \epsilon_y} \cdot d$$

$$\rho_b = 0.85\beta_1 \frac{0.003}{0.003 + \epsilon_y} \cdot \frac{f'_c}{f_y} \quad \rho_b = 0.85\beta_1 \frac{6000}{6000 + f_y} \cdot \frac{f'_c}{f_y}$$

* درصد فولاد متوازن مقطع فقط به f'_c و f_y که از خصوصیات مصالح هستند بستگی دارد و ربطی به سطح مقطع ندارد.

حالت دیگر: $\rho > \rho_b$ و یا $\epsilon_s < \epsilon_y$ (در این حالت شکست ترد رخ می‌دهد) که از لحاظ طراحی مناسب نیست زیرا شکست بتن به طور ناگهانی و بدون هیچ خطاری صورت می‌گیرد. محل محور خنثی با بلوک تنشی مستطیلی فوق به دست می‌آید

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow A_s f_s = 0.85 f'_c ab, \quad f_s = E \epsilon_s, \quad a = \beta_1 x$$

a: عمق بلوک مستطیلی معادل تنش

X: عمق محور خنثی

$$M_u = A_s f_s \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad \text{ظرفیت نهایی مقطع}$$

چون فولادها جاری نشده‌اند f_s قرار می‌دهیم.

حالت دیگر: وقتی که $\epsilon_s > \epsilon_y$ که در این حالت $\rho < \rho_b$ می‌شود. این حالت شکل پذیری زیادی قبل از شکست انجام می‌دهد و لنگر خمشی نهایی اسمی مقطع در این حالت با رابطه روبرو قابل محاسبه است.

$$M_n = \rho b d^2 f_y \left[1 - 0.59 \rho \frac{f_y}{f'_c}\right] \quad \text{و} \quad M_u = \phi M_n \quad (\text{لنگر خمشی نهایی}) \quad \phi = 0.9 \quad \text{برای خمش}$$

مطابق آیین نامه حداکثر مقدار فولاد که می‌توان در مقطع قرار داد برای آنکه شرایط گسیختگی نرم ارضاء شود برابر $\rho_{\max} = 0.75 \rho_b$ می‌باشد. (طبق ACI) و طبق آیین نامه آبا $\rho_{\max} = \rho_b$ برای تضمین داشتن گسیختگی نرم، بایستی حداقل درصد فولاد مقطع نیز کنترل شود. چون امکان دارد لنگر ترک خوردگی مقطع (M_{cr}) در مواردی بیشتر از مقاومت اسمی مقطع (M_n) شود و تیر به محض ترک خوردگی به دلیل اینکه قبلاً فولادهای کششی جاری شده‌اند، دچار گسیختگی ترد شود. در این حالت باید حداقل درصد فولاد را در مقطع رعایت کنیم و این حداقل آرماتور از برابر قرار دادن $M_{cr} = M_n$ به دست می‌آید.

$$\Rightarrow \frac{f_r I_g}{\frac{h}{2}} = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) \Rightarrow \rho_{\min} = \max\left(\frac{1.4}{f_y}, \frac{0.25 \sqrt{f'_c}}{f_y}\right) \quad (\text{طبق آبا})$$

* مطابق آیین نامه اگر ρ محاسباتی از $\rho_{\min}$ کمتر باشد می‌توان ρ محاسباتی را تا ۳۳٪ افزایش داد و به شرطی که از $\rho_{\min}$ کمتر نباشد، در مقطع قرار داد.

نکته: در مقاطع پر فولاد ($\rho < \rho_{\max}$)، طبق آیین نامه حداکثر آرماتور بایستی $\rho_{\max}$ باشد. در این حالت داریم:

$$A_{s\max} = \rho_{\max} b d, \quad a = \frac{A_{s\max} f_y}{0.85 f'_c b} \quad \text{درصد فولاد موجود}$$

$$\Rightarrow M_n = A_{s\max} f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad \text{مقاومت اسمی مقطع پر فولاد}$$

مقاومت گسیختگی مقطع پر فولاد: $M'_n = 0.85f'_c ab(d - \frac{a}{2})$; $\rho > \rho_b$

* طراحی مقطع مستطیلی تحت خمش براساس آبا:

اگر طراحی فولاد با فرض معلوم بودن ابعاد مقطع مدنظر باشد با فرضیات:

$$R_n = \frac{M_u}{bd^2}, \quad m = \frac{\phi_s f_y}{0.85\phi_c f'_c}$$

که این ρ را می‌توان به A_s تبدیل کرد و در مقطع قرار داد.

طراحی آرماتورهای فشاری (مقاطع دابل آرمه)

در مواردی لنگر خمشی آنقدر بزرگ است که حتی با قرار دادن ρ_{max} ظرفیت خمشی لازم تامین نمی‌شود. یا اینکه ابعاد مقاطع محدود است. راه حل این خاصیت استفاده از فولاد فشاری (فولاد مضاعف) در قسمت بتن فشاری و اضافه کردن معادل ظرفیت این فولادهای فشاری به فولادهای کششی مقطع است.

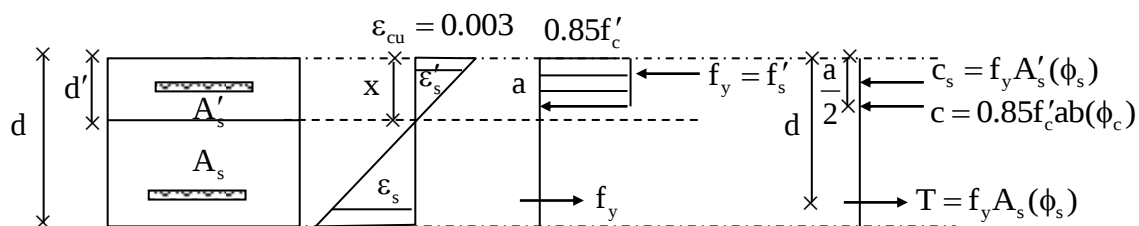
دلایل استفاده از فولاد فشاری

۱- افزایش شکل پذیری مقطع

۲- کاهش خیز دراز مدت تیر ناشی از خزش

۳- ایجاد تکیه گاه برای اجرای خاموت‌های برشی که در این حالت مقدار ρ_b افزایش می‌یابد. (مقاطع دابل آرمه)

۴- اگر جهت ممان خمشی عوض شود این میلگردها مقاومت کششی را تأمین می‌کنند.



ضرایب ایمنی که در پرانتز نوشته شده‌اند طبق (آبا) در مقادیر ضرب می‌شوند ولی بر اساس ACI دیگر این ضرایب وجود ندارند. در حالت فوق فرض می‌شود که هم آرماتورهای کششی جاری شده‌اند و آرماتورهای فشاری ممکن است جاری شده باشند یا به حد تسلیم نرسیده باشند.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow C + C_s = T \Rightarrow a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b}$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd}, \quad \rho' = \frac{A'_s}{bd}$$

مقدار آرماتور فشاری مقطع: ρ'

$$\Rightarrow f_{sb} = 6000 - \frac{d'}{d}(6000 + f_y) \leq f_y$$

$\leftarrow$ کششی $\rightarrow$ فشاری

f_{sb} : تنش در آرماتور فشاری

$$\rho'_b = \rho_b + \rho' \frac{f_{sb}}{f_y}$$

$\leftarrow$ آرماتور کششی

طبق آیین نامه ρ'_{max} در مقاطع دابل آرمه: $\rho'_{max} = \rho_{max} + \rho' \frac{f_{sb}}{f_y}$

مربوط به آرماتور کششی $0.75\rho_b$