

سپاس خداوند متعال را که در این سالها لطف خود را از مؤسسه سری عمران دریغ نکرده و به ما انگیزه‌ای دو چندان داده است تا با **تولید کتاب‌ها، دی‌وی‌دی‌های آموزشی** و **برگزاری کلاس‌های ویژه آزمون نظام مهندسی**، آزمون کارشناسی رسمی، آموزش حرفه‌ای نرم‌افزار و آزمون کارشناسی ارشد، قدمی هر چند کوچک برای موفقیت شما مهندسیین عزیز برداریم.

پس از ایجاد تغییرات اساسی در آیین‌نامه‌های رسمی کشور (مقررات ملی ساختمان)، تصمیم گرفتیم که با تلاش شبانه‌روزی، فعالیت‌های مؤسسه سری عمران را در زمینه تولید کتاب، تولید دی‌وی‌دی‌های آموزشی و برگزاری کلاس‌های آزمون نظام مهندسی ارتقاء دهیم که خلاصه این فعالیت‌ها به شرح زیر است:

با تألیف نسل جدید کتاب‌های نظام مهندسی توسط اساتید برجسته و ممتاز، تلاش کرده‌ایم که مجموعه‌ای کم نقص در اختیار شما قرار گیرد. در این کتاب‌ها که با عنوان «کتاب‌های نگاه حرفه‌ای به آزمون نظام مهندسی» منتشر می‌شوند، ما به دنبال ویژگی‌های زیر بوده‌ایم:

۱- با بیانی ساده و روان، کلیه مفاهیم مورد نیاز را آموزش داده و در کنار آن درک و قضاوت مهندسی شما را افزایش دهیم.

۲- با توجه به ابهامات نسبتاً زیاد در آیین‌نامه‌های جدید، با حساسیت خاصی بندهای آیین‌نامه‌ها را شرح داده و سعی کرده‌ایم که کاربرد این بندها، با ارائه مثال‌های متنوع، کاملاً شفاف و واضح شوند.

۳- در یک فرایند سخت و دشوار، تست‌های آزمون سال‌های گذشته (از سال ۸۰ به بعد) را که بر مبنای آیین‌نامه‌های قدیم بوده است، با کمترین تغییر ممکن بر مبنای ویرایش جدید آیین‌نامه‌ها حل کرده و پاسخ تشریحی آنها را نیز با توضیحات کامل آورده‌ایم.

۴- با ارائه فهرست مطالب همراه با جزئیات کامل آن در ابتدای کتاب، عملاً به داوطلبان کمک کرده‌ایم تا در جلسه آزمون، سریعتر مطالب مورد نیاز خود را برای حل سؤالات پیدا کنند. همانطور که می‌دانید این آزمون به صورت کتاب باز (open book) برگزار می‌شود و با استفاده از این فهرست، می‌توانید در کوتاهترین زمان ممکن، مطلب مورد نیاز خود در کتاب را پیدا کنید.

در سال‌های اخیر شاهد استقبال فراوان و بی‌نظیر مهندسیین عزیز از کلاس‌های حضوری آمادگی آزمون نظام مهندسی مؤسسه سری عمران و همچنین نتایج درخشان قبولی شرکت‌کنندگان در این کلاس‌ها بوده‌ایم. در همین راستا و با توجه به درخواست‌های بسیار زیاد شما مهندسیین عزیز برای استفاده از کلاس‌های مؤسسه سری عمران، برنامه‌ریزی دقیق و هدفمندی را جهت تولید کلاس‌های ویدئویی صرفاً تا ۱۰۰ (دی‌وی‌دی‌های آموزشی به علاوه کلاس‌های آنلاین) ویژه آمادگی آزمون‌های محاسبات، نظارت و اجرا انجام داده‌ایم. شاخص‌ترین ویژگی این کلاس‌ها به شرح زیر است:

۱- تمامی مطالب مورد نیاز جهت آزمون نظام مهندسی، توسط اساتید برجسته کشور، به طور کامل تدریس می‌شوند و شیوه تدریس اساتید به گونه‌ای است که شما می‌توانید در کمترین زمان ممکن، به مطالب احاطه پیدا کنید.

۲- با آموزش نکات و مفاهیم تستی برای پاسخ‌دهی سریع به سؤالات، عملاً یک گام جلوتر از سایر داوطلبین هستید.

۳- با حل کلیه تست‌های آزمون‌های نظام مهندسی سالیان گذشته و همچنین حل تست‌های تألیفی مکمل، دید بسیار خوبی از نحوه طرح سؤال در آزمون پیدا می‌کنید.

تمامی مهندسیین عزیز می‌توانند از هر نقطه‌ای از کشور در این کلاس‌ها شرکت کرده و از تدریس برترین اساتید استفاده کنند. با این کلاس‌ها برنامه مطالعه شما مهندسیین عزیز در اختیار خودتان بوده و می‌توانید با مشاهده چندین باره این کلاس‌ها و استفاده از پشتیبانی فنی و کلاس‌های آنلاین رفع اشکال، راه قبولی در آزمون نظام مهندسی را هرچه بیشتر کوتاه نمایید.

امید است که تلاش مؤسسه سری عمران مورد قبول مهندسان گرامی قرار گیرد. ارائه پیشنهادها، سازنده شما دوستان و همراهان گرامی، مجموعه را بهتر و پربارتر کرده و ما را که به دنبال کیفیت برتر هستیم یاری می‌کند.

فصل اول: مقدمات طراحی

- قسمت اول: مشخصات مکانیکی بتن مورد استفاده در طراحی
- سازه ۸
- ۱-A- مشخصات مکانیکی بتن ۸
- ۲-A- مدول الاستیسیته بتن E_c ۱۱
- ۳-A- مدول گسیختگی بتن f_r ۱۲
- ۴-A- تحلیل نمودار تنش-کرنش بتن ۱۲
- قسمت دوم: مشخصات مکانیکی فولاد مورد استفاده در طراحی سازه ۱۴
- ۱-B- طبقه‌بندی آرماتورها از نظر شکل پذیری ۱۴
- ۲-B- ویژگی‌های کششی آرماتورها ۱۶
- ۳-B- تنش تسلیم مورد استفاده در محاسبات برای آرماتورها ۱۷
- قسمت سوم: نکات مفهومی روش‌های تحلیل در آیین‌نامه ۲۱
- ۱-C- خصوصیات یک روش تحلیل مناسب ۲۱
- ۲-C- تعاریف کلی اعضای میله‌ای، صفحه‌ای و سه‌بعدی در آیین‌نامه ۲۲
- ۳-C- تعاریف کلی دهانه مؤثر در تحلیل اعضا ۲۳
- ۴-C- لحاظ کردن اثر ترک خوردگی اعضا در تحلیل سازه ۲۴
- ۵-C- مرور کلی بر روش‌های تحلیل مجاز در آیین‌نامه ۲۷
- ۶-C- بازپخش لنگرها در اعضای خمشی ممتد ۲۸
- قسمت چهارم: بررسی کلی روش طراحی در مبحث نهم ویرایش ۹۹ ۳۱
- ۱-D- تفکر کلی مبحث نهم در طراحی سازه‌های بتن آرمه ۳۱
- ۲-D- بررسی کلی ترکیب بارهای طراحی ۳۲
- ۳-D- ضرایب کاهش مقاومت ϕ ۳۴

فصل دوم: خمش در مقاطع تک‌آرمه

- قسمت اول: مفاهیم اولیه خمش ۴۰
- ۱-A- بررسی ضرورت استفاده از آرماتور ۴۰
- ۲-A- فرضیات اصلی خمش در مقاطع بتن آرمه ۴۱
- ۳-A- تحلیل نمودار لنگر انحناء در یک تیر تحت خمش ۴۳
- ۴-A- تعریف نوع گسیختگی برای لحظه شکست ۴۵
- ۵-A- فرضیات اصلی طراحی در ناحیه پلاستیک ۴۸
- قسمت دوم: بررسی فولاد بالانس، فولاد حداقل و فولاد حداکثر در یک مقطع تک‌آرمه مستطیلی ۵۳
- ۱-B- مقدمه ۵۳
- ۲-B- حالت بالانس یا متعادل در مقاطع بتن آرمه ۵۳
- ۳-B- محاسبه مساحت حداقل آرماتور کششی ۶۰
- ۴-B- محاسبه مساحت حداکثر آرماتور کششی ۶۱
- قسمت سوم: بررسی وضعیت مقطع در حالت شکست نرم .. ۶۷
- ۱-C- تعریف حالت پلاستیک ۶۷
- ۲-C- محاسبه مقاومت خمشی اسمی مقطع در حالت شکست نرم ۶۷
- ۳-C- محاسبه انحناء و شعاع انحناء در مسائل خمش ۷۴

- ۴-C- بررسی مثال‌های متنوع تراز خمش ۷۶
- ۵-C- شرح روش طرح مقاومت در کنترل خمش وارد بر مقطع ۸۱
- ۶-C- محاسبه درصد آرماتور مورد نیاز مقطع ۸۴
- قسمت چهارم: بررسی رفتار مقطع بتن آرمه در حالت الاستیک و الاستوپلاستیک ۹۱
- ۱-D- تحلیل دقیق ناحیه الاستیک ۹۱
- ۲-D- نحوه محاسبه تقریبی لنگر ترک خوردگی ۹۳
- ۳-D- تحلیل دقیق ناحیه الاستوپلاستیک ۹۸
- قسمت پنجم: محدودیت‌های آرماتورگذاری در اعضای خمشی ۱۰۲
- ۱-E- مقدمه ۱۰۲
- ۲-E- حداقل فاصله میلگردها ۱۰۲
- ۳-E- حداکثر فاصله میلگردها ۱۰۲
- ۴-E- ضوابط گروه میلگردها ۱۰۳
- ۵-E- حداقل پوشش بتن روی آرماتور ۱۰۵
- ۶-E- آرماتورگذاری جلدی (گونه) در تیرها ۱۰۷

فصل سوم: خمش در اعضای بالدار و دوبله آرمه

- قسمت اول: ضوابط هندسی مقاطع T شکل ۱۱۲
- ۱-A- مقدمه ۱۱۲
- ۲-A- انواع مقاطع بالدار و بررسی ضوابط هندسی ۱۱۲
- قسمت دوم: محدودیت مساحت میلگردها ۱۱۷
- ۱-B- مساحت حداقل میلگردهای کششی ۱۱۷
- ۲-B- مساحت حداکثر فولاد خمشی ۱۱۸
- قسمت سوم: بررسی حالت بالانس در مقاطع بالدار ۱۲۵
- ۱-C- محاسبه فولاد بالانس در تیرهای T شکل ۱۲۵
- قسمت چهارم: ظرفیت خمشی مقاطع T شکل ۱۲۹
- ۱-D- مقدمه ۱۲۹
- ۲-D- مفهوم عملکرد مقطع T شکل ۱۲۹
- ۳-D- روش جداسازی مقاطع T شکل ۱۳۰
- قسمت پنجم: ضوابط تیرچه‌ها ۱۳۵
- ۱-E- طراحی تیرچه‌ها ۱۳۵
- قسمت ششم: ظرفیت خمشی مقاطع با آرماتور فشاری ۱۳۸
- ۱-F- مقدمه ۱۳۸
- ۲-F- ظرفیت خمشی مقاطع دوبله آرمه ۱۳۸
- ۳-F- کنترل جاری شدن فولادهای فشاری در مقطع دوبله آرمه ۱۴۰
- قسمت هفتم: محاسبه فولاد بالانس، حداقل و حداکثر در مقطع دوبله آرمه ۱۴۵
- ۱-G- حالت بالانس در مقاطع با آرماتور فشاری ۱۴۵
- ۲-G- مساحت حداقل و حداکثر میلگرد کششی ۱۴۹

فصل چهارم: برش در اعضای بتن آرمه

- قسمت اول: آشنایی با انواع ترک خوردگی در اعضای خمشی بتن آرمه ۱۵۲
- ۱-A- مقدمه ۱۵۲
- ۲-A- بررسی ترک خوردگی در یک المان بتنی ۱۵۲

۲۵۷	۴-A- تعیین محل مرکز پلاستیک
۲۶۲	قسمت دوم: ستون تحت اثر بار محوری و لنگر خمشی یک طرفه
۲۶۲	۱-B- مقدمه
۲۶۲	۲-B- ستون تحت نیروی محوری و لنگر خمشی یک طرفه
۲۶۵	۳-B- منحنی اندرکنش بار محوری - لنگر خمشی
۲۶۹	۴-B- انواع شکست ستون
۲۷۵	۵-B- تقریب نمودار اندرکنش به صورت دو خطی
۲۷۵	۶-B- نمودار اندرکنش تحت نیروی کششی و لنگر خمشی
۲۷۸	قسمت سوم: ستون تحت بار محوری و لنگر خمشی دو طرفه
۲۷۸	۱-C- مفاهیم اولیه
۲۷۹	۲-C- روش بار متقابل یا روش برس لر
۲۸۱	قسمت چهارم: محدودیت میلگردها و ضوابط آرماتورگذاری
۲۸۱	۱-D- مقدمه
۲۸۱	۲-D- محدودیت مساحت آرماتورهای طولی
۲۸۲	۳-D- محدودیت فواصل میلگردهای طولی
۲۸۴	۴-D- ضوابط میلگردهای عرضی

فصل هفتم: طراحی ستون‌های لاغر

۲۹۲	قسمت اول: محاسبه ضریب لاغری ستون‌ها
۲۹۲	۱-A- آشنایی با مفاهیم اولیه
۲۹۴	۲-A- محاسبه ضریب لاغری
۳۰۶	۳-A- صرف نظر از اثر لاغری
۳۰۹	قسمت دوم: تشدید لنگر خمشی
۳۰۹	۱-B- ضریب تشدید لنگر خمشی
۳۱۱	۲-B- لنگر تشدید یافته
۳۱۶	قسمت سوم: خروج از مرکزیت حداقل
۳۱۶	۱-C- خروج از مرکزیت حداقل

فصل هشتم: طراحی دیوار

۳۲۰	قسمت اول: طراحی دیوار تحت بار محوری
۳۲۰	۱-A- مقدمه
۳۲۰	۲-A- محاسبه مقاومت مورد نیاز دیوار
۳۲۳	۳-A- حداقل ضخامت دیوار
۳۲۶	۴-A- طول مؤثر دیوار تحت اثر بار متمرکز
۳۲۸	قسمت دوم: طراحی دیوار تحت اثر نیروی برشی
۳۲۸	۱-B- طراحی دیوار تحت نیروی برشی درون صفحه
۳۳۱	۲-B- مقاومت برشی خارج از صفحه دیوار
۳۳۷	قسمت سوم: محدودیت آرماتورگذاری دیوار
۳۳۷	۱-C- محدودیت درصد آرماتورها
۳۳۸	۲-C- محدودیت فواصل آرماتورگذاری
۳۴۳	۳-C- تکیه‌گاه جانبی آرماتورهای طولی
۳۴۴	۴-C- ضوابط خاص آرماتورگذاری اطراف بازشوها
۳۴۵	قسمت چهارم: روش جایگزین برای طراحی دیوارهای لاغر
۳۴۵	۱-D- مقدمه
۳۴۵	۲-D- کنترل شرایط لاغری
۳۴۶	۳-D- ضوابط مدل‌سازی دیوارهای لاغر
۳۴۷	۴-D- محاسبه لنگر ضریب بار در دیوارهای لاغر باروش جایگزین
۳۴۷	۵-D- تغییر شکل خارج از صفحه دیوار تحت بارهای بهره‌بردار در روش جایگزین

۱۵۴	۳-A- مروری بر مفاهیم تنش‌های اصلی و نحوه ترک خوردگی در یک تیر دو سر مفصل
۱۵۵	۴-A- کلیات مفهومی میلگردهای برشی در یک تیر بتنی
۱۵۸	قسمت دوم: محاسبه مقاومت برشی
۱۵۸	۱-B- مقاومت برشی اسمی مقاطع
۱۵۸	۲-B- مقاومت برشی حاصل از بتن
۱۶۹	۳-B- محاسبه مقاومت برشی حاصل از آرماتورهای عرضی
۱۸۲	۴-B- اثر همزمان نیروی برشی در دو جهت
۱۸۴	قسمت سوم: ضوابط طراحی در برابر برش
۱۸۴	۱-C- مقدمه
۱۸۴	۲-C- ضوابط طراحی در برابر برش
۱۹۲	قسمت چهارم: ضوابط برش اصطکاکی
۱۹۲	۱-D- مقدمه
۱۹۲	۲-D- محاسبه مقاومت برشی اصطکاکی
۱۹۳	۳-D- ضوابط کنترل برش اصطکاکی
۱۹۷	قسمت پنجم: طراحی تیرهای عمیق
۱۹۷	۱-E- مقدمه
۱۹۷	۲-E- تعریف تیرهای عمیق
۱۹۸	۳-E- طراحی برشی تیر عمیق
۱۹۹	۴-E- محدودیت میلگردهای خمشی تیر عمیق

فصل نهم: پیچش در اعضای بتن آرمه

۲۰۲	قسمت اول: مفهوم پیچش در اعضای بتن آرمه
۲۰۲	۱-A- مقدمه
۲۰۲	۲-A- انواع لنگر پیچشی ایجاد شده در اعضای بتن آرمه
۲۰۵	قسمت دوم: پیچش آستانه و پیچش ترک خوردگی
۲۰۵	۱-B- مقدمه
۲۰۵	۲-B- لنگر پیچشی ترک خوردگی
۲۰۷	۳-B- لنگر پیچشی آستانه
۲۱۳	قسمت سوم: ضوابط طراحی مقاطع تحت پیچش
۲۱۳	۱-C- مقدمه
۲۱۳	۲-C- کنترل لزوم طراحی مقطع تحت اثر پیچش
۲۱۴	۳-C- محاسبه مقاومت پیچشی مقطع
۲۲۱	۴-C- تعیین لنگر پیچشی طراحی
۲۲۶	قسمت چهارم: بررسی ضوابط آرماتورگذاری پیچشی
۲۲۶	۱-D- ضوابط آرماتورهای پیچشی طولی
۲۲۷	۲-D- ضوابط آرماتورهای پیچشی عرضی
۲۳۱	قسمت پنجم: اندرکنش پیچش با سایر عوامل
۲۳۱	۱-E- کنترل ابعاد مقطع تحت برش و پیچش
۲۳۸	۲-E- حداقل آرماتورگذاری عرضی تحت اثر مشترک پیچش و برش
۲۴۱	۳-E- اثر مشترک پیچش و خمش

فصل نهم: ستون

۲۴۶	قسمت اول: ستون تحت بار محوری خالص
۲۴۶	۱-A- مقدمه
۲۴۶	۲-A- ستون تحت بار محوری خالص فشاری
۲۴۹	۳-A- محاسبه حداکثر مقاومت کششی محوری اسمی ستون



سخن مؤلف

به نام یکتا مهندس هستی ...

سازه‌های بتن‌آرمه یکی از مهمترین دروس رشته مهندسی عمران است که یادگیری مفهومی و عمیق آن، برای موفقیت در آزمون نظام مهندسی لازم و ضروری می‌باشد. پس از ایجاد تغییرات اساسی در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان در سال ۹۹، کمبود یک منبع قوی که بندهای آیین‌نامه را به شکل کاربردی و مثال‌محور بررسی کند، احساس می‌شد. از این‌رو تصمیم گرفتیم تا با یک کار گروهی منسجم، کتابی در دو جلد به شما عزیزان ارائه کنیم.

ویژگی‌های این کتاب

- ۱- ارائه یک نگاه جدید در درس بتن که با طبقه‌بندی دقیق آیین‌نامه همراه با درسنامه‌های مفهومی، باعث افزایش سرعت یادگیری شما می‌شود.
- ۲- ایجاد یک روند جدید در آموزش مطالب، با کمک پرسیدن چند سؤال مفهومی در شروع هر بحث که درک شما را از مطالب بسیار بالا می‌برد.
- ۳- جمع‌آوری مثال‌های بسیار متنوع تالیفی در هر فصل که باعث افزایش چشمگیر مهارت شما در حل مسائل می‌شود.
- ۴- آوردن کلیه سؤالات غیرتکراری آزمون‌های نظام مهندسی گذشته، همراه با تغییر آنها منطبق بر آیین‌نامه جدید.
- ۵- ارائه دیدهای مهندسی کاربردی و ارجاع مطالب به بندهای آیین‌نامه.

به شما اطمینان می‌دهیم که با مطالعه این کتاب متوجه خواهید شد که بتن‌آرمه درسی جذاب است و با نگاه جدید ارائه شده، می‌توان سؤالات آن را به خوبی در آزمون نظام مهندسی تحلیل کرد. در پایان خاطر نشان می‌گردد در این کتاب تلاش بی‌وقفه‌ای در خصوص اطمینان از صحت مطالب، نحوه نگارش و ترسیم اشکال انجام شده است، اما با این وجود خوانندگان عزیز می‌توانند هرگونه پیشنهاد، تصحیحات و نظرات سازنده خود را به نشانی مؤسسه سری عمران و یا آدرس ایمیل serieomran@yahoo.com ارسال نمایند. در پایان از جناب آقای دکتر محمد آهنگر که با ارائه پیشنهادات سازنده نظارت علمی کتاب را بر عهده داشته و همچنین آقایان مهندس مسیح مرادی و مهندس رضا رحمانی که در ویرایش این کتاب مشارکت نموده‌اند، سپاسگزارم.

در ادامه فهرست مهمترین مراجع مورد استفاده در نگارش این کتاب ارائه شده است:

۱. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، «طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه»، ویرایش پنجم، وزارت راه و شهرسازی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۹.
۲. مستوفی نژاد، داود، «سازه‌های بتن‌آرمه براساس روش طرح مقاومت (ACI-318-14) و طراحی در حالات حدی»، ویراست ۲، انتشارات ارکان دانش، اصفهان، ۱۳۹۴.

3. ACI Committee 318-19, "Building code requirements for structural concrete", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2019.
4. Mc Cormac, J.C, Brown, R.H, Ninth Edition, "Design of Reinforced Concrete", John Wiley & Sons, Inc. New York, 2014.
5. Nilson, A.H., Darwin, D and Dolan, C.W., Fifteenth edition, "Design of Concrete Structures", McGraw-Hill, USA, 2015.
6. Wight, J.K., MacGregor, J.G., "Reinforced Concrete Mechanics & Design", Seventh Edition, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2012.

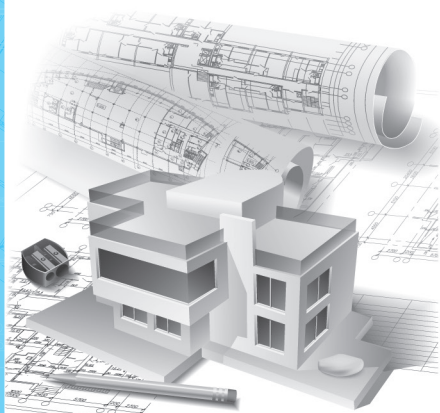
«با آرزوی موفقیت روزافزون شما مهندسیین گرامی در آزمون بزرگتر زندگی»

ندا بزرگی - بهمن ۱۳۹۹



سری عمران

فصل اول مقدمات طراحی



قسمت اول: مشخصات مکانیکی بتن مورد استفاده در طراحی سازه

قسمت دوم: مشخصات مکانیکی فولاد مورد استفاده در طراحی سازه

قسمت سوم: نکات مفهومی روش‌های تحلیل در آیین‌نامه

قسمت چهارم: بررسی کلی روش طراحی در مبحث نهم ویرایش ۹۹

مقدمات طراحی

1-A-1- مشخصات مکانیکی بتن

در شروع این فصل، در مورد مشخصات مکانیکی بتنی که در طراحی سازه‌ها مورد نیاز است، بحث خواهیم کرد. در مورد بتن مصرفی در سازه، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱ رده‌بندی بتن مجاز مورد استفاده در سازه‌ها، براساس مقاومت مشخصه آن معمولاً به ترتیب زیر است:

$C10, C12, C16, C20, C25, C30, C35, C40,$
 $C45, C50, C55, C60, C65, C70$

اعداد بعد از C ، بیانگر مقاومت فشاری مشخصه بتن (f_c') برحسب مگاپاسکال می‌باشند.

۲ مقاومت فشاری مشخصه بتن که با f_c' نمایش داده می‌شود، باید براساس آزمایش‌های ۲۸ روزه بر روی حداقل دو نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر یا حداقل سه نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر تعیین شود. در صورتی که طراح سازه سن دیگری برای آزمایش نمونه‌ها مورد نظرش باشد، این موضوع باید در مدارک ساخت ذکر گردد.

۳ با توجه به آیین‌نامه، استفاده از بتن‌های معمولی و سبک در سازه‌ها مجاز است. چگالی بتن معمولی در محاسبات برابر با ۲۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب منظور می‌شود. چگالی بتن سبک سازه‌ای نیز باید براساس نتایج آزمایش تعیین شود، ولی مقدار آن نباید کمتر از ۱۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شود.

۴ برای در نظر گرفتن مشخصات بتن‌های سبک، کلیه روابط آیین‌نامه که در آن‌ها از $\sqrt{f_c'}$ استفاده شده است، در ضریب λ ضرب می‌گردد. به عنوان مثال، ضریب λ در محاسبات مقاومت کششی بتن و محاسبات مقاومت برشی بتن به‌طور مستقیم کاربرد داشته که در ادامه مطالب کتاب آن را مشاهده خواهیم کرد.

۵ ضریب λ در آیین‌نامه، بر مبنای دو معیار ترکیب دانه‌ها و چگالی بتن تعیین می‌شود که جداول و نکات مربوط به آن را در ادامه مشاهده خواهیم کرد.

بر مبنای بند (۹-۳-۱)

بر مبنای بند (۹-۳-۱)

بر مبنای بند (۹-۳-۱)

بر مبنای بند (۹-۳-۱)

زیر شاخه‌های قسمت اول:

1-A-1- مشخصات مکانیکی بتن

2-A-2- مدول الاستیسیته بتن (E_c)

3-A-3- مدول گسیختگی بتن (f_r)

4-A-4- تحلیل نمودار تنش - کرنش بتن

تعیین ضریب λ برای بتن‌های سبک

۱ ضریب λ برای انواع بتن‌ها، با توجه به ترکیب دانه‌ها، با استفاده از جدول زیر تعیین می‌شود:

جدول ۱-۱، ضریب اصلاح λ با توجه به ترکیب دانه‌ها

λ	ترکیب دانه‌ها	بتن
۰/۷۵	ریزدانه و درشت‌دانه : سبک	تمام سبک دانه
۰/۷۵ تا ۰/۸۵	ریزدانه : ترکیب معمولی و سبک درشت‌دانه : سبک	نیمه سبک‌دانه [۱]
۰/۸۵	ریزدانه : معمولی درشت‌دانه : سبک	
۰/۸۵ تا ۱/۰۰	ریزدانه : معمولی درشت‌دانه : ترکیب معمولی و سبک	
۱/۰۰	ریزدانه و درشت‌دانه : معمولی	

[۱] برای بتن‌های نیمه سبک‌دانه ترکیبی، مقدار λ از درون یابی خطی بین ۰/۷۵ و ۰/۸۵ با توجه به نسبت حجم ریزدانه معمولی به حجم کل سنگدانه و بین ۰/۸۵ تا ۱/۰۰ با توجه به نسبت حجم درشت دانه معمولی به حجم کل مواد سنگی به دست می‌آید. این موضوع به سه حالت زیر انجام می‌شود*:

حالت ۱: ترکیب ریزدانه ترکیب معمولی و سبک به همراه درشت‌دانه سبک:

$$m = \frac{\text{حجم ریزدانه معمولی}}{\text{حجم کل سنگدانه از نوع ریزدانه}} \Rightarrow \lambda = 0.75 + 0.1 m$$

$$\text{بررسی حالت‌های مرزی:} \begin{cases} \text{کل ریزدانه سبک باشد} \Rightarrow m = 0 \Rightarrow \lambda = 0.75 \\ \text{کل ریزدانه معمولی باشد} \Rightarrow m = 1 \Rightarrow \lambda = 0.85 \end{cases}$$

حالت ۲: برای بتن با ریزدانه معمولی به همراه درشت‌دانه سبک:

$$\lambda = 0.85$$

حالت ۳: ترکیب ریزدانه معمولی به همراه درشت‌دانه ترکیب معمولی و سبک:

$$n = \frac{\text{حجم درشت دانه معمولی}}{\text{حجم کل سنگدانه از نوع درشت‌دانه}} \Rightarrow \lambda = 0.85 + 0.15 n$$

$$\text{بررسی حالت‌های مرزی:} \begin{cases} \text{کل درشت‌دانه معمولی باشد} \Rightarrow n = 1 \Rightarrow \lambda = 1 \\ \text{کل درشت‌دانه سبک باشد} \Rightarrow n = 0 \Rightarrow \lambda = 0.85 \end{cases}$$



* منظور آیین‌نامه از حجم کل سنگدانه، حجم کل سنگدانه‌ای است که ترکیب معمولی و سبک دارد. این موضوع با توجه به حالت‌های مرزی بررسی شده کاملاً مشخص است و در آیین‌نامه *ACI* نیز به همین شکل مطرح شده است.

۲ به عنوان یک روش ساده‌تر، ضریب λ با توجه به چگالی بتن نیز می‌تواند با استفاده از جدول زیر مشخص شود:

جدول ۲-۱، ضریب اصلاح λ با توجه به چگالی بتن

λ	چگالی بتن، w_c کیلوگرم بر مترمکعب
۰/۷۵	$w_c \leq 1600$
$\lambda = 0/00046 w_c \leq 1/00$	$1600 < w_c \leq 2160$
۱/۰۰	$w_c > 2160$

$$\text{مثال: } w_c = 1800 \frac{kg}{m^3} \Rightarrow \lambda = 0/00046 \times 1800 = 0/828$$

تذکره ۱: با توجه به جدول فوق، مقدار λ برای بتن با چگالی معمولی برابر ۱/۰ منظور می‌گردد.

تذکره ۲: در محاسبات طول گیرایی آرماتورها، ضریب λ برای انواع بتن‌های سبک باید برابر با ۰/۷۵ منظور شود. این موضوع در فصل طول مهاری از اهمیت زیادی برخوردار است.

۶ **ضریب پواسون بتن (۷):** در بتن معمولی، ضریب پواسون را می‌توان برابر با ۰/۲ فرض کرد و یا مقدار آن را از طریق آزمایش‌های معتبر به دست آورد. همچنین در بتن‌های سبک، ضریب پواسون باید براساس آزمایش تعیین شود.

۷ **ضریب انبساط حرارتی بتن:** در بتن‌های معمولی، ضریب انبساط حرارتی را می‌توان با توجه به نوع سنگ‌دانه‌ها و با تقریب ۲۰ درصد، برابر با 10×10^{-6} در هر درجه‌ی سلسیوس منظور کرد. همچنین در بتن‌های سبک، ضریب انبساط حرارتی را باید با توجه به نوع بتن سبک از طریق آزمایش به دست آورد.

تجربین ۱: چه محدودیت‌هایی در بحث انتخاب بتن، باید توسط طراح پروژه مدنظر قرار گیرد؟

● **هاله:** طراح سازه در انتخاب مقدار f_c' ، باید محدودیت‌های زیر را در نظر بگیرد:

- الف)** حداقل مقدار آن برای انواع بتن‌های معمولی و سبک برابر با ۲۰ مگاپاسکال و حداکثر آن ۵۰ مگاپاسکال است.
- ب)** در ساختمان‌های بلندتر از ۲۰ طبقه از روی شالوده، با تأمین شرایط بند (پ)، می‌توان حداکثر مقاومت را در بتن‌های معمولی تا ۷۰ مگاپاسکال افزایش داد.
- پ)** با پیش‌بینی تدابیر ویژه برای کنترل کیفیت بتن، نشان داده شود که به دست آوردن چنین مقاومتی در اجرا امکان‌پذیر است.
- ت)** در سازه‌های لرزه‌بر ویژه مطرح شده در فصل ضوابط لرزه‌ای (جلد دوم کتاب)، حداقل مقدار f_c' برای بتن‌های معمولی و سبک برابر ۲۵ مگاپاسکال و حداکثر آن برای بتن‌های سبک برابر ۳۵ مگاپاسکال می‌باشد.
- ث)** در کلیه موارد، حداقل مقدار f_c' نباید از آنچه برای دوام بتن (طبق ضوابط پیوست ۹-پ-۱ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان) تعیین شده، کمتر در نظر گرفته شود.



تجربین ۲: در طراحی سازه یک ساختمان ۱۰ طبقه با قاب لرزه‌بر ویژه به همراه دیوار برشی، طراح سازه از بتن معمولی با رده $C60$ استفاده کرده است. طراحی این ساختمان:

(۱) قابل قبول است.

(۲) در صورت لحاظ کردن ضوابط ویژه در طراحی دیوارهای برشی آن قابل قبول است.

(۳) در صورت وجود تیم کنترل کیفیت بتن در محل کارگاه قابل قبول است.

(۴) قابل قبول نمی‌باشد.

● **هله:** با توجه به این که با یک ساختمان ۱۰ طبقه روبرو هستیم، حداکثر مقدار f'_c برای آن با توجه به استفاده از بتن معمولی، برابر $50 MPa$ است و طراحی پروژه نادرست است. دقت شود که اگر تعداد طبقات ساختمان بیشتر از ۲۰ طبقه از روی شالوده باشد، با داشتن تیم کنترل کیفیت بتن، می‌توانستیم از بتن تا رده $C70$ نیز استفاده کنیم و در مجموع گزینه (۴) صحیح است.

A-۲- مدول الاستیسیته بتن (E_c)

مدول الاستیسیته بتن را می‌توان با استفاده از یکی از دو رابطه زیر محاسبه کرد:

۱) ضریب الاستیسیته بتن‌های با چگالی بتن (w_c) بین 1440 و 2560 کیلوگرم بر مترمکعب:

$$E_c = 0.043 w_c^{1/5} \sqrt{f'_c} \quad (1-1)$$

۲) رابطه فوق برای بتن‌های معمولی با چگالی 2300 کیلوگرم بر مترمکعب، به صورت رابطه تقریبی زیر نوشته می‌شود:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (2-1)$$

E_c : مدول الاستیسیته بتن، مگاپاسکال،

w_c : چگالی بتن، کیلوگرم بر مترمکعب،

f'_c : مقاومت فشاری بتن، مگاپاسکال.

تذکر: مدول الاستیسیته بتن را می‌توان بر مبنای آزمایش بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه بتن در آزمایشگاه نیز تعیین کرد، به شرط آنکه این پارامتر نیز در طرح مخلوط بتن منظور شده و نتایج آزمایش‌های تعیین E_c در مدارک ساخت ارائه شوند.

تجربین ۳: برای بتن $C25$ با وزن مخصوص $\frac{kg}{m^3}$ 2300 ، مدول الاستیسیته بتن و مدول برشی بتن را به دست آورید.

● **هله:** با توجه به روابط آیین‌نامه، مقدار E_c برابر است با:

$$E_c = 0.043 w_c^{1/5} \sqrt{f'_c} = 0.043 \times (2300)^{1/5} \times \sqrt{25} = 23715.4 MPa$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \times \sqrt{25} = 23500 MPa$$

همان‌طور که مشاهده می‌کنید به ازای $w_c = 2300 \frac{kg}{m^3}$ ، دو رابطه ارائه شده توسط آیین‌نامه، انطباق نسبتاً



مناسبی با یکدیگر دارند. از طرفی با فرض $\nu = 0.2$ برای بتن، مقدار مدول برشی برابر است با:

$$G = \frac{E_c}{2(1+\nu)} = \frac{23715/4}{2 \times (1+0.2)} = 9881/4 \text{ MPa}$$

رابطه دقیق تر

$$G = \frac{E_c}{2(1+\nu)} = \frac{23500}{2 \times (1+0.2)} = 9791/7 \text{ MPa}$$

رابطه تقریبی

دید مهندسی

پارامتر E_c در روابط ویرایش ۹۹ آیین‌نامه نسبت به روابط ویرایش ۹۲، کمی بزرگ‌تر است (حدود یک الی پنج درصد به ازای مقادیر مختلف f'_c). این موضوع باعث افزایش سختی سازه شده و بر روی پارامترهایی مانند زمان تناوب، تغییرشکل‌های جانبی سازه و خیز تیرها نیز تأثیرگذار است.

A-3- مدول گسیختگی بتن (f_r)

مدول گسیختگی بتن که معادل با مقاومت کششی آن نیز می‌باشد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_r = 0.162 \lambda \sqrt{f'_c}$$

(۳-۱)

f_r : مدول گسیختگی بتن، مگاپاسکال،

λ : ضریب در نظر گرفتن بتن سبک،

f'_c : مقاومت فشاری بتن، مگاپاسکال.

تمرین ۴: مقاومت کششی بتن سبک با وزن مخصوص $\frac{kg}{m^3}$ ۱۸۰۰ و مقاومت فشاری 20 MPa ، چند

مگاپاسکال است؟

(۴) ۱/۸

(۳) ۲

(۲) ۲/۳

(۱) ۲/۷

● **هله:** ضریب λ برای این بتن برابر است با:

$$1600 < w_c \leq 2160 \Rightarrow \lambda = 0.00046 w_c \leq 1 \Rightarrow \lambda = 0.00046 \times 1800 = 0.828 \leq 1$$

$$f_r = 0.162 \lambda \sqrt{f'_c} = 0.162 \times 0.828 \times \sqrt{20} = 2/3 \text{ MPa}$$

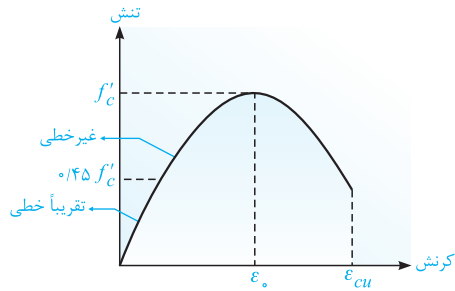
بنابراین گزینه (۲) صحیح است.

A-4- تحلیل نمودار تنش - کرنش بتن

نمودار تنش - کرنش - کرنش مهمترین نموداری است که در طراحی به آن احتیاج داریم. این نمودار رفتار بتن در هنگام بارگذاری را شرح می‌دهد. در مورد این نمودار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ابتدا باید دقت شود که پارامتر مقاومت فشاری (f'_c)، مهمترین پارامتر در طراحی یک سازه بتنی و همچنین رسم نمودار تنش - کرنش است که برای محاسبه آن باید از نتایج تست‌های آزمایشگاهی استفاده شود. به همین منظور باید آزمایشی ساده از طرف آیین‌نامه ارائه شود تا به سادگی بتوان این پارامتر را محاسبه نمود (یعنی آزمایش‌های پیچیده که امکان انجام آن در محیط کارگاه وجود ندارد، توصیه نمی‌شود).

- ۲ مطابق توضیحات ابتدای فصل، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، برای بررسی مقاومت فشاری تک‌محوری بتن از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر جهت تعیین مقاومت فشاری استفاده می‌کند.
- ۳ با تحت فشار قرار دادن نمونه‌های بتنی، نمودار تنش - کرنش بتن تا لحظه گسیختگی نمونه مطابق شکل زیر به دست می‌آید:



نکته مهم و کاربردی

- نقاط مهم بر روی محورهای قائم و افقی در نمودار تنش - کرنش بتن عبارتند از:
- ۱ f'_c : بیشترین مقاومت فشاری نمونه،
 - ۲ $0.45 f'_c$: حد تنش خطی که در این ناحیه نمودار را با تقریب مناسبی می‌توان به صورت یک خط در نظر گرفت (این موضوع یعنی دقیقاً خط نیست). دقت شود که در برخی از مراجع، این حد برابر $0.15 f'_c$ در نظر گرفته شده است.
 - ۳ ϵ_s : کرنش نمونه در مقاومت فشاری حداکثر (f'_c) است. این پارامتر در محدوده ۰/۰۰۱۵ الی ۰/۰۰۲ قرار دارد.
 - ۴ ϵ_{cu} : کرنش ایجاد شده در لحظه گسیختگی نمونه است. این پارامتر معمولاً در محدوده ۰/۰۰۳ الی ۰/۰۰۵ قرار دارد که در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۹۹، مقدار آن برای انواع بتن برابر ۰/۰۰۳ در نظر گرفته می‌شود.

B-1- طبقه‌بندی آرماتورها از نظر شکل‌پذیری

در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، آرماتورهای فولادی شامل میلگردها و سیم‌ها بوده که میلگردها از نوع گرم نوردشده و سیم‌های فولادی از نوع سرد نوردشده می‌باشند. از طرفی این آرماتورها، می‌توانند به صورت ساده یا آجدار تولید شوند.

به‌طور کلی رده‌بندی آرماتورها براساس تنش حد تسلیم یا مقاومت تسلیم آن‌ها مطابق جدول زیر است:

جدول ۱-۳، رده آرماتور

رده آرماتور	نوع میلگرد یا سیم
S ۲۴۰	میلگرد ساده
S ۳۴۰	میلگرد آجدار ^[۱]
S ۳۵۰	میلگرد آجدار ^[۱]
S ۴۰۰	میلگرد آجدار ^[۱]
S ۴۲۰	میلگرد آجدار ^[۱]
S ۵۰۰	میلگرد آجدار ^[۱]
S ۵۲۰	میلگرد آجدار ^[۱]
S ۵۰۰C	سیم‌های ساده و یا آجدار ^[۲]

بر مبنای جدول ۱-۳ (۱)

[۱] شکل آج مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۳۱۳۲،

[۲] شکل آج مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۵۵۸.

تذکره ۱: اعداد بعد از S در جدول فوق، بیانگر تنش تسلیم یا مقاومت تسلیم آرماتورها (f_y)، برحسب مگاپاسکال بوده که مجاز به استفاده از آن‌ها در طراحی می‌باشیم. به عنوان مثال در میلگرد $S ۴۰۰$ مقدار تنش تسلیم برابر $f_y = ۴۰۰ MPa$ در طراحی در نظر گرفته می‌شود.

تذکره ۲: در صورتی که در فرآیند ساخت تغییراتی در ترکیبات شیمیایی و یا در روش ساخت با اهداف مشخص ایجاد شوند، در سمت راست رده آرماتور، یک حرف لاتین اضافه می‌شود. حرف C که برای رده $S ۵۰۰C$ به کار برده شده، مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۱۵۵۸، برای همین منظور است.

زیر شاخه‌های قسمت دوم:

B-1- طبقه‌بندی آرماتورها از نظر

شکل‌پذیری

B-2- ویژگی‌های کششی آرماتورها

B-3- تنش تسلیم مورد استفاده در

محاسبات برای آرماتورها

آرماتورهای فولادی از نظر شکل پذیری به سه دسته تقسیم می‌شوند:

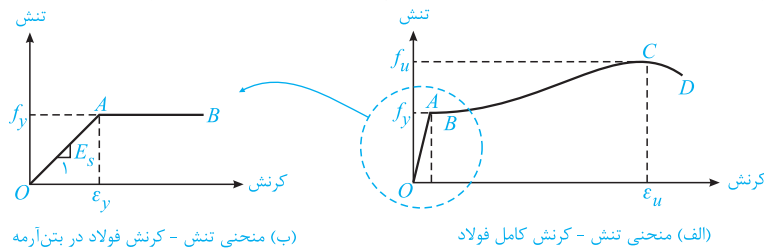
الف) فولاد نرم (S_{240})، که منحنی تنش-کرنش آن دارای پله تسلیم مشهود است.

ب) فولاد نیمه سخت ($S_{340}, S_{350}, S_{400}, S_{420}$)، که منحنی تنش-کرنش آن دارای پله تسلیم بسیار محدود است.

پ) فولاد سخت (S_{500}, S_{520})، که منحنی تنش-کرنش آن فاقد پله تسلیم است.

در توضیح کامل‌تر مطلب ارائه شده، باید به موارد زیر اشاره نمود:

۱) نمودار تنش-کرنش میلگرد با فولاد نرم، مطابق شکل (الف) بوده که در طراحی مطابق شکل (ب) در نظر گرفته می‌شود. قسمت AB عملاً به عنوان پله تسلیم در این نمودار محسوب می‌شود.



۲) در نمودار تنش-کرنش مصالح فولادی، پنج پارامتر مهم زیر وجود دارد:

- ۱) مدول الاستیسیته فولاد (E_s)،
- ۲) تنش تسلیم یا تنش جاری شدن فولاد (f_y)،
- ۳) کرنش نظیر تنش تسلیم فولاد (ϵ_y)،
- ۴) تنش نهایی فولاد (f_u)،
- ۵) کرنش نظیر تنش نهایی فولاد (ϵ_u)،

در حالت کلی به دلیل اینکه از نمودار (ب) در شکل فوق برای طراحی سازه‌های بتن آرمه استفاده می‌شود، سه پارامتر اول یعنی E_s ، f_y و ϵ_y دارای بیشترین اهمیت هستند.

۳) در طراحی تحت بارگذاری‌های متداول، هیچگاه تغییرشکل از نقطه B فراتر نمی‌رود و به همین دلیل، نمودار تنش-کرنش مطابق شکل (ب) در طراحی لحاظ می‌شود.

۴) با توجه به نمودار (ب)، در کرنش‌های کمتر یا مساوی با کرنش حد تسلیم نقطه (ϵ_y, f_s) ، تنش فولاد (f_s) با توجه به نمودار و براساس روابط زیر به دست می‌آید.

$$\begin{cases} f_s = E_s \epsilon_y & \epsilon_s \leq \epsilon_y \\ f_s = f_y & \epsilon_s > \epsilon_y \end{cases} \quad (14-1)$$

مدول الاستیسیته (E_s) برای انواع آرماتورها برابر با 200000 مگاپاسکال ($2 \times 10^5 \text{ MPa}$) است.

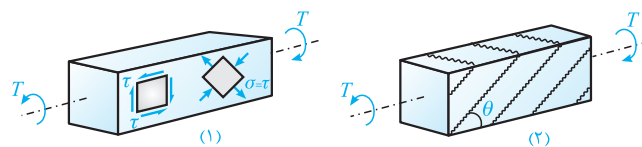
۵) ضریب انبساط حرارتی برای کلیه آرماتورها برابر با 12×10^{-6} به ازای هر درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود.

۱-B- مقدمه

در بخش قبل با نحوه ایجاد لنگر پیچشی در مقاطع بتن آرمه و به ویژه موارد کاربرد و انواع آن آشنا شدیم. نکته‌ای که باید در این قسمت به آن توجه نمود، نحوه رفتار مقطع بتن آرمه در برابر لنگر پیچشی و تنش‌های برشی ناشی از آن می‌باشد. به عبارت دیگر لازم است حد مقاومت بتن مقطع در برابر تنش‌های وارده به نحو مناسبی مشخص گردد. از این رو در این بخش می‌خواهیم به معرفی دو پارامتر لنگر پیچشی ترک خوردگی و لنگر پیچشی آستانه بپردازیم و با حل مثال‌های متنوع، بر روی آنها مسلط شویم.

۲-B- لنگر پیچشی ترک خوردگی

همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، لنگر پیچشی باعث ایجاد تنش‌های برشی بر روی وجوه خارجی مقطع می‌گردد. از طرفی همان‌طور که در فصل برش نیز خواندیم، با توجه به دایره مورالمان، در المان‌های تحت اثر تنش برشی خالص، با چرخش ۴۵ درجه‌ای المان راستای تنش‌های کششی و فشاری اصلی به وجود می‌آید. در واقع در این حالت تنش‌های برشی ناشی از پیچش باعث ایجاد تنش‌های کششی قطری در عضو می‌شوند. در صورتی که مقدار این تنش‌های کششی از تنش کششی قابل تحمل بتن فراتر رود، مقطع بتن آرمه تحت کشش دچار ترک خوردگی شده و این ترک‌ها تحت زوایای در حدود ۴۵ درجه به سرعت در وجوه پیرامونی المان گسترش می‌یابند. در شکل‌های زیر تنش‌های ایجاد شده در یک تیر بتن آرمه و نحوه ترک خوردگی آن در اثر ایجاد تنش‌های کششی بیش از مقدار قابل تحمل بتن، نمایش داده شده است.



در شکل شماره (۱) پارامتر τ بیانگر تنش برشی ناشی از پیچش بوده و σ نیز معرف تنش‌های کششی و فشاری اصلی المان دوران یافته تحت زاویه ۴۵ درجه می‌باشد. توجه شود که مقدار σ به لحاظ مقداری برابر تنش برشی τ بوده و مقدار آن تحت کشش برابر $\tau +$ و تحت فشار $\tau -$ می‌باشد. با توجه به تنش‌های کششی و فشاری ایجاد شده در شکل (۱)، نحوه ترک خوردگی مقطع در شکل (۲) نمایش داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود این ترک‌ها در راستای عمود بر جهت تنش‌های کششی اصلی (و یا در راستای تنش‌های فشاری) و با زاویه‌ای (θ) در حدود ۴۵ درجه در وجوه خارجی مقطع ایجاد می‌شوند.

زیر شاخه‌های قسمت دوم:

۱-B- مقدمه

۲-B- لنگر پیچشی ترک خوردگی

۳-B- لنگر پیچشی آستانه

لنگری که باعث ایجاد اولین ترک‌های پیچشی در مقطع می‌شود، لنگر پیچشی ترک‌خوردگی نامیده شده و با T_{cr} نمایش داده می‌شود. مقدار لنگر پیچشی ترک‌خوردگی در مقاطع توپر و توخالی بتن آرمه براساس وجود یا عدم وجود نیروی محوری، براساس روابط زیر به دست می‌آید.

۱ بدون وجود نیروی محوری:

$$T_{cr} = 0.133 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^y}{P_{cp}} \right) \quad (1-5)$$

۲ با وجود نیروی محوری:

$$T_{cr} = 0.133 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^y}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0.133 A_g \lambda \sqrt{f'_c}}} \quad (2-5)$$

T_{cr} : لنگر پیچشی ترک خوردگی، نیوتن - میلی‌متر،

λ : ضریب در نظر گرفتن بتن سبک مطابق فصل اول،

f'_c : مقاومت فشاری مشخصه بتن، مگاپاسکال،

A_{cp} : سطح مقطع محصور به محیط پیرامونی عضو، میلی‌متر مربع،

P_{cp} : محیط خارجی مقطع، میلی‌متر،

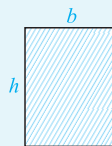
A_g : سطح مقطع ناخالص عضو که در صورت وجود بازشدگی، مساحت آن کسر می‌گردد، میلی‌متر مربع،

N_u : نیروی محوری ضریبدار مقطع که همزمان با پیچش اعمال می‌شود، نیوتن.

تذکره: چنانچه نیروی محوری به صورت فشاری بر مقطع اعمال شود، با علامت مثبت و در صورت کششی بودن با علامت منفی در رابطه (۲-۵) جایگزین می‌گردد.

نکته بسیار مهم در خصوص محاسبه مساحت مقطع تحت پیچش

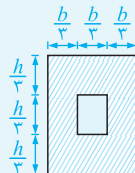
همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، تنش‌های برشی ناشی از لنگر پیچشی در وجوه خارجی مقطع توزیع می‌گردند. بنابراین سطح مرکزی مقطع و بتن این ناحیه، نقش ناچیزی در تحمل تنش‌های ناشی از پیچش دارند. به همین علت چنانچه مقطع دارای بازشدگی باشد، اثر آن در محاسبات پیچش لحاظ نشده و همان‌طور که در تعریف A_{cp} گفته شد، مساحت A_{cp} شامل مساحت محصور به اضلاع خارجی مقطع می‌باشد. برای درک بهتر این موضوع به نحوه محاسبه A_{cp} در شکل‌های زیر توجه کنید:



$$A_{cp} = b \times h$$

$$P_{cp} = 2(b + h)$$

(۱)



$$A_{cp} = b \times h$$

$$P_{cp} = 2(b + h)$$

(۲)



همان‌طور که مشاهده می‌شود، با وجود اینکه مقطع شماره (۲) دارای بازشو است، مساحت A_{cp} در آن با شکل شماره (۱) یکسان است. به این نکته مهم توجه داشته باشید که اثر بازشو در محاسبه A_g که برای لحاظ کردن اثر نیروی محوری وارد بر مقطع بکار می‌رود، در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی خواهیم داشت:

$$A_{g1} = b \times h$$

$$A_{g2} = b \times h - \frac{b}{3} \times \frac{h}{3} = \frac{8}{9} bh$$

۳-B- لنگر پیچشی آستانه

حال که با لنگر پیچشی ترک‌خوردگی در مقطع و نحوه محاسبه آن آشنا شدید، می‌خواهیم پارامتر دیگری را به عنوان لنگر پیچشی آستانه یا T_{th} معرفی نماییم. لنگر پیچشی آستانه یا مختصراً پیچش آستانه، بیانگر حد لنگر پیچشی است که مقطع بدون در نظر گرفتن آرمان‌گذاری پیچشی و بدون اینکه دچار ترک‌خوردگی و گسیختگی گردد، می‌تواند تحمل کند. در واقع لنگر ϕT_{th} به عنوان مرز طراحی مقطع در برابر لنگر پیچشی اعمالی بکار برده می‌شود. مقدار پارامتر T_{th} در حدود یک چهارم لنگر پیچشی ترک‌خوردگی بوده و مطابق روابط (۳-۵) و (۴-۵) براساس حضور یا عدم حضور نیروی محوری در مقاطع توپر محاسبه می‌شود.

۱ مقطع توپر بدون وجود نیروی محوری:

$$T_{th} = 0.1083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (3-5)$$

۲ مقطع توپر در صورت وجود نیروی محوری:

$$T_{th} = 0.1083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0.133 A_g \lambda \sqrt{f'_c}}} \quad (4-5)$$

در این خصوص تعریف پارامترها مطابق توضیحات روابط (۱-۵) و (۲-۵) می‌باشد.

نکته بسیار مهم: در مقاطع قوطی شکل و مقطعی که دارای بازشو هستند، به دلیل کاهش مقاومت مقطع تحت اثر اندرکنش تنش‌های کششی و برشی، در محاسبه لنگر پیچشی آستانه، پارامتر A_g که برابر مساحت کل با کسر کردن سطح حفره‌ها از مساحت کلی مقطع است، جایگزین پارامتر A_{cp} می‌گردد.^۱ در واقع اثر این کاهش مقاومت با کاهش مساحت تحت تأثیر لحاظ می‌گردد. در این صورت پیچش آستانه در مقاطع قوطی شکل براساس روابط (۵-۵) و (۶-۵) به صورت صفحه بعد بازنویسی می‌شود.

۱. با توجه به توصیه آیین‌نامه بتن آمریکا (ACI)، تمام مقطعی که در آنها سطح بازشو بیشتر از ۵ درصد سطح بتنی مقطع است، شامل این ضابطه می‌شوند. اما در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۹۹، ضابطه مشابهی در خصوص شرط جایگزینی پارامتر A_{cp} با A_g در مقاطع با بازشو ارائه نشده است.

۱ مقطع توخالی بدون وجود نیروی محوری:

$$T_{th} = 0.1083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_g^2}{P_{cp}} \right) \quad (5-5)$$

۲ مقطع توخالی در صورت وجود نیروی محوری:

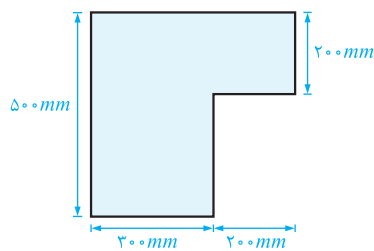
$$T_{th} = 0.1083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_g^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0.133 A_g \lambda \sqrt{f'_c}}} \quad (6-5)$$

نکته: در محاسبات مربوط به پیچش، مقدار حداکثر $\sqrt{f'_c}$ به $8/3$ مگاپاسکال محدود می‌شود. این محدودیت در بتن‌هایی با مقاومت فشاری مشخصه بیشتر از 70 مگاپاسکال تعیین‌کننده خواهد بود.

$$\sqrt{f'_c} \leq 8/3 \text{ MPa}$$

تمرین ۲: لنگر پیچشی ترک‌خوردگی مقطع مطابق شکل در صورتی که رده بتن $C 25$ باشد، برحسب کیلونیوتن متر به کدام یک از مقادیر زیر نزدیک‌تر است؟

(مماسیات - اسفند ۹۱، با تغییر)



۲۴ (۱)

۲۲ (۲)

۱۶ (۳)

۳۰ (۴)

● **هله:** با توجه به عدم حضور نیروی محوری در مقطع خواهیم داشت:

$$T_{cr} = 0.133 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right)$$

$$\lambda = 1/0 \Rightarrow \text{بتن معمولی}$$

$$A_{cp} = 300 \times 500 + 200^2 = 190000 \text{ mm}^2$$

$$P_{cp} = 2 \times 500 + 2 \times 200 + 2 \times 300 = 2000 \text{ mm}$$

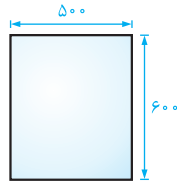
$$T_{cr} = 0.133 \times 1/0 \times \sqrt{25} \times \frac{190000^2}{2000} \times 10^{-6}$$

$$T_{cr} = 29/8 \text{ kN.m}$$

بنابراین گزینه (۴) صحیح می‌باشد.



تمرین ۳: مقطع بتن آرمه مستطیلی مطابق شکل زیر را در نظر بگیرید. در صورتی که بتن مصرفی از رده ۲۵ C باشد، به سؤالات زیر پاسخ دهید. (ابعاد مقطع برحسب میلی‌متر هستند).



(الف) مقدار لنگر پیچشی ترک‌خوردگی تیر را برحسب $kN.m$ به دست آورید.
 (ب) در صورتی که نیروی محوری فشاری به مقدار $300 kN$ به تیر اعمال گردد، مقدار لنگر پیچشی ترک‌خوردگی چگونه تغییر می‌کند؟
 (ج) در صورتی که بازشویی به ابعاد 200×200 میلی‌متر به صورت هم‌مرکز با مقطع در آن تعبیه گردد، مقدار لنگر پیچشی ترک‌خوردگی در حالتی که نیروی محوری ناچیز است، چگونه تغییر می‌کند؟

● **هال؟**

(الف) لنگر پیچشی ترک‌خوردگی مطابق رابطه (۵-۱) برابر است با:

$$T_{cr} = 0.133 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right)$$

$\lambda = 1.0$: بتن معمولی

$$T_{cr} = 0.133 \times 1.0 \times \sqrt{25} \times \frac{(500 \times 600)^2}{2 \times (500 + 600)} \times 10^{-6}$$

$$T_{cr} = 67.15 \text{ kN.m}$$

(ب) در حالتی که نیروی محوری نیز به مقطع اعمال می‌شود، مطابق رابطه (۵-۲) خواهیم داشت:

$$T_{cr} = 0.133 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0.133 A_g \lambda \sqrt{f'_c}}}$$

$$T_{cr} = 0.133 \times 1.0 \times \sqrt{25} \times \frac{(500 \times 600)^2}{2 \times (500 + 600)} \times \sqrt{1 + \frac{300 \times 10^3}{0.133 \times 500 \times 600 \times 1.0 \times \sqrt{25}}} \times 10^{-6}$$

$$T_{cr} = 85.54 \text{ kN.m}$$

بنابراین در اثر اعمال نیروی محوری فشاری، مقدار لنگر پیچشی ترک‌خوردگی تیر افزایش می‌یابد. همان‌طور که در توضیحات درسنامه گفته شد، وجود بازشو در مقطع تأثیری در محاسبه A_{cp} ندارد. بنابراین چنانچه بازشویی در مقطع تعبیه گردد، در حالت $N_u = 0$ ، مقادیر A_{cp} و P_{cp} ثابت بوده و در نتیجه مقدار لنگر پیچشی ترک‌خوردگی مطابق حالت (الف) خواهد بود.

تمرین ۴: یک تیر بتن آرمه با مقطع مستطیل شکل و به ابعاد $b = 400 \text{ mm}$ و $h = 500 \text{ mm}$ را در نظر بگیرید. پس از تحلیل تیر مشخص شده است که در اثر بارهای وارده، نیروی محوری نهایی 250 kN به صورت فشاری به مقطع اعمال می‌گردد. چنانچه با تغییر بارگذاری، این نیرو به صورت کششی به مقطع اعمال شود، لنگر پیچشی ترک‌خوردگی مقطع چگونه تغییر می‌کند؟ (مصالح مصرفی $C 30$ در نظر گرفته می‌شود).

(۱) در حدود ۴۳ درصد افزایش می‌یابد.

(۲) در حدود ۵۷ درصد کاهش می‌یابد.

(۳) در حدود ۴۳ درصد کاهش می‌یابد.

(۴) نیروی محوری تأثیری در مقدار لنگر پیچشی ترک‌خوردگی مقطع ندارد.

● **هله:** مطابق رابطه (۲-۵) در سنامه، می‌دانیم نیروی محوری فشاری با علامت مثبت و نیروی محوری کششی با علامت منفی در محاسبه مقدار لنگر پیچشی ترک‌خوردگی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به این نکته، با تغییر جهت اعمال نیروی محوری قطعاً مقدار لنگر پیچشی ترک‌خوردگی مقطع تغییر خواهد کرد. مقدار این تغییر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{cr} = 0.133 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^T}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0.133 A_g \lambda \sqrt{f'_c}}}$$

$$T_{cr_1} = 0.133 \times 1.0 \times \sqrt{30} \times \frac{(400 \times 500)^2}{2 \times (400 + 500)} \times \sqrt{1 + \frac{250 \times 10^3}{0.133 \times 400 \times 500 \times 1.0 \times \sqrt{30}}} \times 10^{-6}$$

$$T_{cr_1} = 52.2 \text{ kN.m}$$

$$T_{cr_2} = 0.133 \times 1.0 \times \sqrt{30} \times \frac{(400 \times 500)^2}{2 \times (400 + 500)} \times \sqrt{1 + \frac{(-250 \times 10^3)}{0.133 \times 400 \times 500 \times 1.0 \times \sqrt{30}}} \times 10^{-6} = 22.3 \text{ kN.m}$$

$$\text{درصد تغییر: } \frac{T_{cr_2} - T_{cr_1}}{T_{cr_1}} \times 100 = \frac{22.3 - 52.2}{52.2} \times 100 = -57\%$$

بنابراین گزینه (۲) صحیح می‌باشد.

● **تجربین ۵:** یک مقطع بتن آرمه مستطیلی با ابعاد 400×500 میلی‌متر را در نظر بگیرید. تحت بارگذاری‌های وارده، نیروی محوری فشاری ضریبدار مقطع برابر 400 kN به دست آمده است. چنانچه بخواهیم با تعبیه بازشویی دایروی به قطر 150 mm به طور هم مرکز با مقطع، این تیر را به صورت یک مقطع باز در آوریم، در حالت جدید لنگر پیچشی آستانه مقطع چقدر خواهد بود؟ (بتن مصرفی با سنگدانه‌های معمولی و از رده $C 30$ می‌باشد.)

$$12.5 \text{ kN.m} \quad (2) \qquad 8.5 \text{ kN.m} \quad (1)$$

$$15 \text{ kN.m} \quad (4) \qquad 23.2 \text{ kN.m} \quad (3)$$

● **هله:** با توجه به وجود بازشو در مقطع و همچنین حضور نیروی محوری، مطابق رابطه (۲-۵) در سنامه داریم:

$$T_{th} = 0.1083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_g^T}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0.133 A_g \lambda \sqrt{f'_c}}}$$

$$A_g = 400 \times 500 - \frac{\pi}{4} \times 150^2 = 182328.15 \text{ mm}^2$$

$$T_{th} = 0.1083 \times 1.0 \times \sqrt{30} \times \frac{182328.15^2}{2 \times (400 + 500)} \times \sqrt{1 + \frac{400 \times 10^3}{0.133 \times 182328.15 \times 1.0 \times \sqrt{30}}}$$

$$T_{th} = 12.5 \text{ kN.m}$$

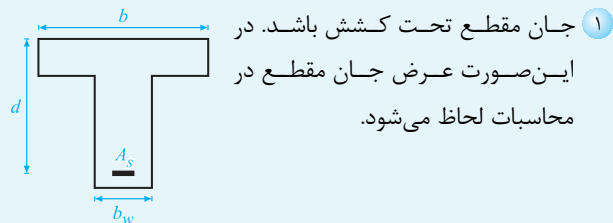
بنابراین گزینه (۲) صحیح می‌باشد.

B-1- مساحت حداقل میلگردهای کششی

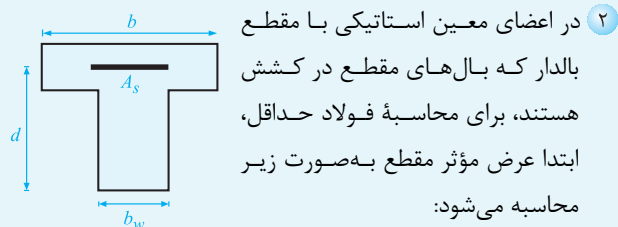
در مقاطع T شکل نیز مطابق آنچه در خصوص مقاطع مستطیلی گفته شد، لازم است مقدار حداقل آرماتور خمشی به منظور اطمینان از عملکرد مناسب مقطع در برابر بارهای اعمالی کنترل گردد. برای این منظور از همان رابطه ارائه شده در فصل قبل استفاده می‌شود، اما در این حالت یک تفاوت مهم وجود دارد.

نکته بسیار مهم در خصوص مقاطع T شکل

در مقاطع بالدار یا T شکل با توجه به اینکه ناحیه کششی در بال‌های مقطع واقع می‌شود و یا در جان، عرض مؤثر مقطع در محاسبات مربوط به مساحت آرماتور کششی حداقل، مطابق دو حالت زیر به دست می‌آید:



$$A_{s,min} = \max \left\{ \frac{1}{4} b_w d, \frac{0.125 \sqrt{f_c'}}{f_y} b_w d \right\} \quad (5-3)$$



$$b_e = \min \{ 2b_w, b \} \quad (6-3)$$

$$A_{s,min} = \max \left\{ \frac{1}{4} b_e d, \frac{0.125 \sqrt{f_c'}}{f_y} b_e d \right\} \quad (7-3)$$

تذکره: مثال رایج برای حالت دوم در آزمون‌های نظام مهندسی، مقطع تیرهای طره می‌باشد. در تیرهای طره تحت بارهای ثقلی، لنگر خمشی منفی ایجاد شده و بال‌های مقطع تحت کشش قرار می‌گیرند.

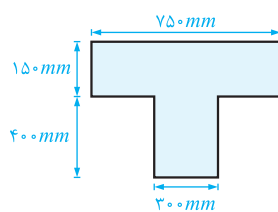
- زیر شاخه‌های قسمت دوم:
- B-1- مساحت حداقل میلگردهای کششی
 - B-2- مساحت حداکثر فولاد خمشی

تذکره ۲: در تیرهای T شکل نیز چنانچه مساحت فولاد به کار رفته در مقطع از $1/33$ برابر فولاد مورد نیاز محاسبه شده براساس بارگذاری بیشتر باشد، می توان از محاسبه مقدار حداقل فولاد مقطع صرف نظر نمود.

B-۲- مساحت حداکثر فولاد خمشی

ضوابط این قسمت دقیقاً مشابه آنچه در قسمت $B-۴$ از فصل دوم گفته شد، می باشد. یعنی در این حالت نیز مقدار حداقل کرنش در دورترین فولاد کششی در حالت کشش - کنترل برابر $0.003 + \epsilon_y$ در نظر گرفته شده و مساحت آرماتور حداکثر در حالتی که مقدار نیروی محوری فشاری وارد بر مقطع کوچکتر از $0.1 f_c' A_g$ باشد، مطابق ضوابط حالت کشش - کنترل به دست می آید. این موضوع را در تمرین های بعد بررسی خواهیم کرد.

تمرین ۶: شکل زیر مقطع یک تیر طره را تحت بارگذاری ثقلی نمایش می دهد. چنانچه مساحت فولادهای کششی لازم در مقطع دو برابر مقدار حداقل باشد، کدام یک از آرماتورگذاری های زیر را می توان در این مقطع به کار برد؟ مصالح مصرفی بتن $C 30$ و فولاد $S 400$ می باشد. عمق مؤثر مقطع برابر 500 mm می باشد.



۱) $5 \Phi 16$

۲) $5 \Phi 25$

۳) $5 \Phi 20$

۴) $5 \Phi 28$

● **هله:** با توجه به اینکه تیر طره است، تحت بارهای ثقلی لنگر خمشی منفی در آن ایجاد می شود. بنابراین بال های مقطع تحت کشش بوده، در این صورت مساحت حداقل فولاد مقطع برابر است با:

$$A_{s,min} = \max \left\{ \frac{1}{f_y} b_e d, \frac{0.125 \sqrt{f_c'}}{f_y} b_e d \right\}$$

$$b_e = \min \{ 2b_w, b \} = \min \{ 2 \times 300, 750 \} = 600 \text{ mm}$$

$$A_{s,min} = \max \left\{ \frac{1}{400} \times 600 \times 500, \frac{0.125 \times \sqrt{30}}{400} \times 600 \times 500 \right\} = 1050 \text{ mm}^2$$

در این تیر مساحت فولاد کششی لازم برای مقطع دو برابر فولاد حداقل می باشد، بنابراین آرماتور مورد نیاز مقطع به صورت زیر به دست می آید:

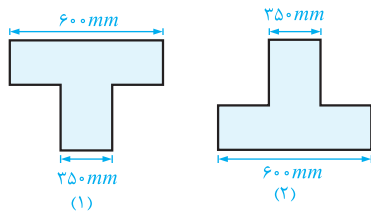
$$A_s = 2A_{s,min} = 2 \times 1050 = 2100 \text{ mm}^2$$

با توجه به کار در تمام گزینه ها از ۵ عدد آرماتور استفاده شده است، داریم:

$$5 \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \geq 2100 \Rightarrow d_b \geq 23.1 \text{ mm}$$

بنابراین گزینه (۲) صحیح می باشد.

تجربین ۷: یک مهندس طراح تیر طره‌ای را تحت بارهای ثقلی به شکل مقطع (۱) طراحی نموده است. مصالح مصرفی به کار برده شده در این تیر شامل بتن از رده C ۳۵ و فولاد از رده S ۴۰۰ می‌باشد. چنان‌چه این طراح بخواهد از مقطع دوران یافته مطابق شکل (۲) استفاده نماید، مساحت حداقل آرماتورهای کششی بدون توجه به نیاز محاسباتی چند برابر حالت اول خواهد بود؟ عمق مؤثر مقطع در هر دو حالت برابر 550 mm در نظر گرفته می‌شود.



(۱) ۰/۴۶

(۲) ۰/۵۸

(۳) ۱/۷

(۴) ۱/۵

● **هله:** با توجه به طره بودن مقطع، در هر دو حالت تحت بار ثقلی، خمش منفی بر مقطع اعمال می‌شود. بنابراین در هر دو مقطع ناحیه کششی در قسمت فوقانی و ناحیه فشاری در قسمت تحتانی اتفاق می‌افتد. در واقع در مقطع (۱) بال‌ها تحت کشش و در مقطع (۲) جان تحت کشش می‌باشد. با توجه به یکسان بودن مشخصات مصالح و سایر ابعاد مقطع، نسبت مساحت آرماتورهای کششی در این دو حالت برابر نسبت عرض‌های مؤثر آنها می‌باشد. در این صورت داریم:

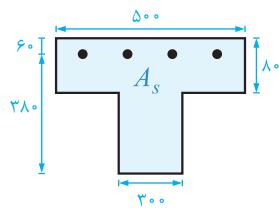
$$b_{e1} = \min \{ 2b_w, b \} = \min \{ 2 \times 350, 600 \} = 600 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = b_w = 350 \text{ mm}$$

$$\frac{A_{s,min2}}{A_{s,min1}} = \frac{b_{e2}}{b_{e1}} \Rightarrow \frac{A_{s,min2}}{A_{s,min1}} = \frac{350}{600} = 0.58$$

بنابراین گزینه (۲) صحیح می‌باشد.

تجربین ۸: مقطع تیر طره AB مطابق شکل زیر را در نظر بگیرید. در صورتی که $f_c' = 25 \text{ MPa}$ و $f_y = 400 \text{ MPa}$ باشد، در خصوص مقدار حداقل و حداکثر آرماتورهای طولی فوقانی (A_s)، کدام‌یک از گزینه‌های زیر صحیح می‌باشد؟ (ابعاد مشخص شده در شکل برحسب میلی‌متر می‌باشند.)


 (۱) 9.3 cm^2 و 14.3 cm^2

 (۲) 4.7 cm^2 و 15.6 cm^2

 (۳) 6.7 cm^2 و 19.3 cm^2

 (۴) 12.3 cm^2 و 24.7 cm^2

● **هله:** باتوجه به این که تیر طره است، بنابراین تحت بارهای ثقلی تحت خمش منفی قرار گرفته و بال‌های مقطع تحت کشش قرار دارند، در این صورت داریم:

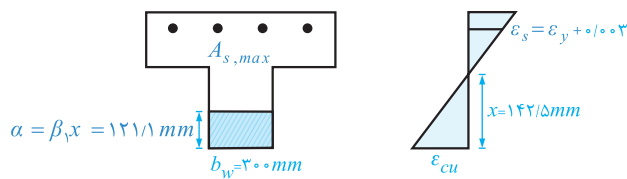
$$A_{s,min} = \max \left\{ \frac{1.4}{f_y} b_e d, \frac{0.125 \sqrt{f_c'}}{f_y} b_e d \right\}$$

$$b_e = \min \{2b_w, b\} \Rightarrow b_e = \min \{2 \times 300, 500\} = 500 \text{ mm}$$

$$d = 60 + 320 = 380 \text{ mm}$$

$$A_{s,min} = \max \left\{ \frac{1/4}{400} \times 500 \times 380, \frac{0/25 \times \sqrt{25}}{400} \times 500 \times 380 \right\} = 665 \text{ mm}^2 = 6.65 \text{ cm}^2$$

در خصوص مساحت حداکثر فولاد خمشی، لازم است شرایط مقطع کشش - کنترل برقرار باشد؛ یعنی در لحظه نهایی مقدار حداقل کرنش فولاد برابر $\varepsilon_y + 0/003$ باشد. در این صورت با استفاده از نمودار کرنش‌ها داریم:



$$x = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_s} d \Rightarrow x = \frac{0/003}{0/003 + 0/002 + 0/003} \times 380 = 142/5 \text{ mm}$$

$$f'_c = 25 \text{ MPa} \Rightarrow \alpha_1 = \beta_1 = 0/85 \Rightarrow a = \beta_1 x = 0/85 \times 142/5 = 121/8 \text{ mm}$$

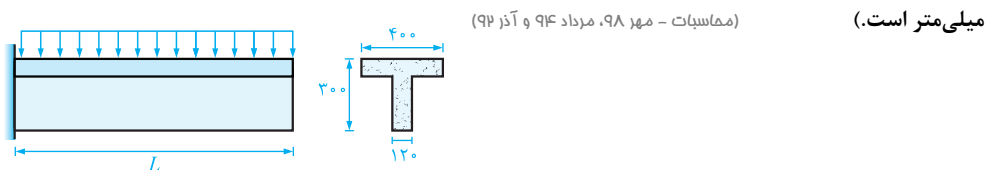
با توجه به اینکه ناحیه تحتانی مقطع تحت فشار قرار دارد، لذا آرماتور حداکثر مقطع برابر است با:

$$f_y A_{s,max} = \alpha_1 f'_c a b_w$$

$$A_{s,max} = \frac{\alpha_1 f'_c a b_w}{f_y} \Rightarrow A_{s,max} = \frac{0/85 \times 25 \times 121/8 \times 300}{400} = 1930 \text{ mm}^2 = 19/3 \text{ cm}^2$$

بنابراین گزینه (۳) صحیح می‌باشد.

تمرین ۹: در تیر طره بتنی با مقطع T مطابق شکل زیر، حداقل مقدار آرماتور کششی ناشی از خمش در تکیه‌گاه چقدر است؟ (نوع بتن $C 30$ و نوع آرماتور $S 400$ و ارتفاع مؤثر مقطع 275 میلی‌متر فرض شود. اندازه‌ها در شکل به



(مماسیات - مهر ۹۸، مرداد ۹۴ و آذر ۹۶)

میلی‌متر است.)

- (۱) 220 میلی‌متر مربع یا $1/33$ برابر آرماتور کششی لازم ناشی از خمش، هر کدام کمتر است.
- (۲) $115/5$ میلی‌متر مربع یا $1/33$ برابر آرماتور کششی لازم ناشی از خمش، هر کدام کمتر است.
- (۳) 385 میلی‌متر مربع یا $1/33$ برابر آرماتور کششی لازم ناشی از خمش، هر کدام کمتر است.
- (۴) 231 میلی‌متر مربع یا $1/33$ برابر آرماتور کششی لازم ناشی از خمش، هر کدام کمتر است.