



به نام یکتا مهندس هستی



سری عمران

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 نهم: طول مهاری و وصله

قسمت اول: طول مهاری میلگردها	۸
۱-۱- مقدمه	۸
۲-۱- روش مهار میلگردها	۸
۳-۱- طول مهاری میلگردها و سیم‌های آجدار تحت کشش	۹
۴-۱- طول مهاری میلگردهای با قلاب استاندارد تحت کشش	۱۵
۵-۱- ضوابط قلاب استاندارد	۱۶
۶-۱- طول مهاری میلگردهای آجدار سردار در کشش	۲۲
۷-۱- طول مهاری شبکه آرماتور سیمی جوشی آجدار و ساده در کشش	۲۴
۸-۱- طول مهاری میلگردها و سیم‌های آجدار تحت فشار	۲۷
۹-۱- کاهش طول مهاری برای آرماتور اضافی	۲۸
قسمت دوم: وصله میلگردها	۲۹
۱-۱- مقدمه	۲۹
۲-۱- ضوابط وصله‌های پوششی	۲۹
۳-۱- وصله پوششی میلگردها و سیم‌های آجدار تحت کشش	۳۰
۴-۱- وصله پوششی شبکه آرماتور سیمی آجدار جوش شده در کشش	۳۵
۵-۱- وصله پوششی شبکه آرماتور سیمی ساده جوش شده در کشش	۳۶
۶-۱- وصله پوششی میلگردهای آجدار تحت فشار	۳۶
۷-۱- وصله‌های اتکایی	۳۸
۸-۱- وصله‌های مکانیکی و جوشی میلگردهای آجدار در کشش و فشار	۳۸
قسمت سوم: ضوابط گروه میلگردها	۳۹
۱-۱- ضوابط گروه میلگردها	۳۹
قسمت چهارم: ضوابط قطع میلگردها	۴۳
۱-۱- مقدمه	۴۳
۲-۱- ضوابط عمومی قطع میلگردها	۴۳
۳-۱- ضوابط خاص قطع میلگردها	۴۵

## فصل دهم: طراحی اتصالات اعضای بتن آرمه

قسمت اول: طراحی اتصال تیر به ستون	۵۶
۱-۱- مقدمه	۵۶
۲-۱- تعریف ناحیه اتصال	۵۶
۳-۱- طراحی ناحیه اتصال	۵۷
۴-۱- میلگردگذاری عرضی ناحیه اتصال	۶۳
۵-۱- ضوابط میلگردهای طولی در ناحیه اتصال	۶۵
قسمت دوم: انتقال نیروی محوری ستون از طریق سیستم کف	
۱-۱- انتقال نیروی محوری ستون از طریق سیستم کف	۷۲

## فصل یازدهم: ضوابط لرزه‌ای قاب‌های خمشی

قسمت اول: تعریف شکل پذیری و شرح مفاهیم اولیه	۷۴
۱-۱- مقدمه	۷۴
۲-۱- آشنایی با سطوح شکل پذیری	۷۴
۳-۱- ضوابط مصالح مصرفی	۷۵
قسمت دوم: ضوابط سازه‌های با سطح شکل پذیری کم	۷۷
۱-۱- مقدمه	۷۷
۲-۱- ضوابط تیرها	۷۷
۳-۱- ضوابط ستون‌ها	۷۷
۴-۱- اتصالات تیر به ستون	۷۹
۵-۱- ضوابط دیوارها	۷۹
قسمت سوم: ضوابط سازه‌های با سطح شکل پذیری متوسط	۸۳
۱-۱- مقدمه	۸۳
۲-۱- ضوابط تیرها	۸۳
۳-۱- ضوابط ستون‌ها	۹۷
۴-۱- ضوابط ناحیه اتصال تیر به ستون	۱۰۴
قسمت چهارم: ضوابط سازه‌های با سطح شکل پذیری زیاد	۱۰۶
۱-۱- مقدمه	۱۰۶
۲-۱- ضوابط تیرها	۱۰۶
۳-۱- ضوابط ستون‌ها	۱۲۲
۴-۱- حداقل مقاومت خمشی ستون‌ها	۱۴۱
۵-۱- ضوابط اتصالات تیر به ستون	۱۴۶
۶-۱- طول مهاری میلگردهای کششی	۱۵۹

## فصل دوازدهم: بررسی ضوابط لرزه‌ای دیوارها

قسمت اول: آشنایی کلی با طراحی دیوارها	۱۶۲
۱-۱- مقدمه	۱۶۲
۲-۱- ضوابط طراحی دیوار	۱۶۲
قسمت دوم: ضوابط طراحی دیوارهای برشی	۱۶۴
۱-۱- مقدمه	۱۶۴
۲-۱- ضوابط هندسی دیوار	۱۶۴
۳-۱- ضوابط آرماتورگذاری دیوار	۱۶۶
قسمت سوم: طراحی اجزای مرزی دیوار	۱۷۵
۱-۱- مقدمه	۱۷۵
۲-۱- کنترل لزوم وجود عضو مرزی ویژه	۱۷۵
۳-۱- طراحی اجزای مرزی ویژه	۱۸۴
۴-۱- طراحی اجزای مرزی غیر ویژه	۱۸۷
قسمت چهارم: طراحی دیوار تحت نیروی برشی داخل صفحه	۱۹۶
۱-۱- طراحی دیوار تحت نیروی برشی	۱۹۶
قسمت پنجم: دیوار پایه‌ها	۲۰۲
۱-۱- مقدمه	۲۰۲
۲-۱- ضوابط طراحی دیوار پایه‌ها	۲۰۲

۳۱۳	قسمت دوم: طراحی دیافراگم
۳۱۳	۱-B- مدلسازی دیافراگم
۳۱۴	۲-B- طراحی دیافراگم
۳۱۹	۳-B- محدودیت آرماتورگذاری
۳۲۲	قسمت سوم: ضوابط اجزای جمع‌کننده
۳۲۲	۱-C- طراحی اجزای جمع‌کننده
۳۲۵	قسمت چهارم: ضوابط لرزه‌ای دال‌ها
۳۲۵	۱-D- مقدمه
۳۲۵	۲-D- انواع دیافراگم‌های قابل کاربرد
۳۲۵	۳-D- آرماتورگذاری
۳۲۷	۴-D- مقاومت طراحی دیافراگم

### فصل شانزدهم: طراحی شالوده

۳۳۰	قسمت اول: انواع شالوده‌ها
۳۳۰	۱-A- مقدمه
۳۳۰	۲-A- انواع شالوده‌ها
۳۳۰	۳-A- انواع شالوده‌های سطحی
۳۳۳	۴-A- شالوده‌های عمیق
۳۳۴	قسمت دوم: طراحی شالوده‌های سطحی
۳۳۴	۱-B- ضوابط کلی طراحی شالوده‌های سطحی
۳۳۵	۲-B- انواع شالوده‌های سطحی به لحاظ خمشی
۳۳۹	۳-B- طراحی شالوده‌های سطحی
۳۵۴	قسمت سوم: شالوده‌های عمیق
۳۵۴	۱-C- انواع روش‌های طراحی شمع
۳۵۴	۲-C- طراحی شمع به روش مقاومت مجاز
۳۵۶	۳-C- طراحی شمع به روش طرح مقاومت
۳۵۷	۴-C- ضوابط طراحی سرشمع‌ها
۳۶۴	قسمت چهارم: ضوابط لرزه‌ای شالوده‌ها
۳۶۴	۱-D- مقدمه
۳۶۴	۲-D- ضوابط کلی شالوده‌های سطحی و سرشمع‌ها
۳۶۵	۳-D- ضوابط لرزه‌ای شالوده‌های عمیق
۳۷۴	قسمت پنجم: ضوابط کلاف‌های رابط
۳۷۴	۱-E- ضوابط کلی طراحی کلاف رابط
۳۷۴	۲-E- ضوابط لرزه‌ای کلاف‌ها

### فصل هفدهم: ضوابط بهره‌برداری

۳۷۸	قسمت اول: محاسبه تغییر شکل در اعضای بتن آرمه
۳۷۸	۱-A- مقدمه
۳۷۸	۲-A- انواع تغییر شکل در سازه‌های بتن آرمه
۳۸۰	۳-A- محاسبه تغییر شکل اولیه
۳۸۶	۴-A- محاسبه تغییر شکل دراز مدت
۳۹۸	۵-A- کنترل تغییر مکان
۴۰۹	قسمت دوم: ترک خوردگی در اعضای بتن آرمه
۴۰۹	۱-B- مقدمه
۴۰۹	۲-B- ترک خوردگی در اعضای خمشی
۴۱۳	قسمت سوم: کنترل ارتعاش
۴۱۳	۱-C- مقدمه
۴۱۳	۲-C- کنترل ارتعاش کف‌ها

۲۰۷	قسمت ششم: تیرهای همبند
۲۰۷	۱-F- مقدمه
۲۰۷	۲-F- ضوابط طراحی تیر همبند
۲۰۸	۳-F- طراحی آرماتورهای قطری تیر همبند

### فصل سیزدهم: طراحی دال یک‌طرفه

۲۱۴	قسمت اول: آشنایی با انواع عملکرد دال‌ها
۲۱۴	۱-A- مقدمه
۲۱۶	۲-A- گستره کاربرد
۲۱۷	قسمت دوم: طراحی دال‌های یک‌طرفه تحت خمش
۲۱۷	۱-B- مقدمه
۲۱۷	۲-B- طراحی دال یک‌طرفه تحت خمش
۲۲۱	۳-B- آرماتور حداقل دال
۲۲۵	قسمت سوم: طراحی دال یک‌طرفه تحت برش
۲۲۵	۱-C- مقدمه
۲۲۵	۲-C- محاسبه برش نهایی دال
۲۲۶	۳-C- محاسبه برش مقاوم اسمی دال
۲۲۹	۴-C- آرماتورگذاری تحت برش
۲۳۴	قسمت چهارم: ضوابط آرماتورگذاری دال‌های یک‌طرفه
۲۳۴	۱-D- ضوابط آرماتورگذاری دال‌های یک‌طرفه

### فصل چهاردهم: طراحی دال‌های دوطرفه

۲۳۶	قسمت اول: آشنایی با دال‌های دوطرفه
۲۳۶	۱-A- مقدمه
۲۳۶	۲-A- انواع دال‌های دوطرفه
۲۳۷	۳-A- اجزای دال دوطرفه
۲۴۰	قسمت دوم: طراحی خمشی دال‌های دوطرفه
۲۴۰	۱-B- انواع روش‌های طراحی دال
۲۴۰	۲-B- روش طراحی مستقیم
۲۵۴	۳-B- روش قاب معادل
۲۶۲	قسمت سوم: طراحی برشی دال
۲۶۲	۱-C- مقدمه
۲۶۲	۲-C- انواع برش در دال‌ها
۲۶۳	۳-C- مقاومت برشی دال در حالت یک‌طرفه
۲۶۷	۴-C- مقاومت برشی دال در حالت دوطرفه
۲۹۰	۵-C- انتقال لنگر خمشی ضریب‌دار در اتصالات دال به ستون
۳۰۲	قسمت چهارم: ضوابط لرزه‌ای دال‌ها
۳۰۲	۱-D- ضوابط لرزه‌ای دال‌ها
۳۰۴	قسمت پنجم: ضوابط بازشوها
۳۰۴	۱-E- بازشو در دال

### فصل پانزدهم: طراحی دیافراگم

۳۱۰	قسمت اول: آشنایی با مفهوم کلی دیافراگم
۳۱۰	۱-A- مقدمه
۳۱۰	۲-A- انواع دیافراگم‌ها
۳۱۱	۳-A- نیروهای طراحی دیافراگم



## 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](mailto: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 مهندسين گرامی در آزمون بزرگتر زندگی»

### D-1- مقدمه

در سازه‌هایی که سطح شکل‌پذیری آنها در طراحی زیاد در نظر گرفته می‌شود، مقدار نیروی زلزله به دلیل امکان جذب و استهلاک زیاد انرژی توسط اجزا با در نظر گرفتن ضریب رفتار بزرگتر، کاهش داده شده و نهایتاً نیروی استاتیکی کمتری جهت طراحی بر سازه اعمال می‌شود. به همین دلیل برای پایداری و انسجام سازه در اثر تغییرشکل‌های ناشی از زلزله و همچنین صحت فرضیات طراحی در برآورد نیروهای اعمالی، ضوابط لرزه‌ای سخت‌گیرانه‌ای برای طراحی و اجرای اجزای مختلف سازه باید در نظر گرفته شود، که در ادامه آنها را با هم بررسی می‌کنیم.

### D-2- ضوابط تیرها

در سازه‌های با حد شکل‌پذیری زیاد، ضوابط مشخصی در خصوص هندسه و آرماتورگذاری، مشابه آنچه در قسمت گذشته خواندیم، وجود دارد. با این تفاوت که این ضوابط در بسیاری از موارد بیشتر و سخت‌گیرانه‌تر می‌باشد. در ادامه هر کدام از این موارد به تفکیک ارائه شده است.

### محدودیت‌های هندسی

در اعضای خمشی محدودیت‌های زیر باید رعایت شوند:

۱) ارتفاع مؤثر مقطع نباید بیشتر از یک‌چهارم طول دهانه آزاد باشد.

$$d \leq \frac{l_n}{4}$$

۲) عرض مقطع نباید کمتر از سدهم ارتفاع آن و ۲۵۰ میلی‌متر باشد.

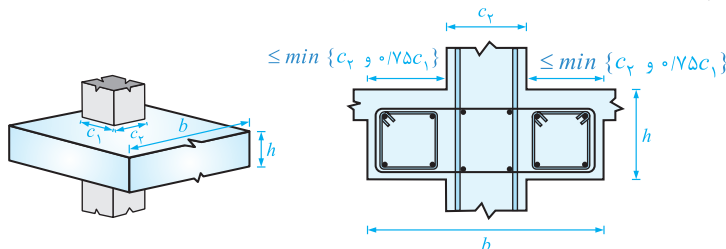
$$b \geq \max \{0.14h, 250 \text{ mm}\}$$

۳) عرض مقطع نباید بیشتر از عرض عضو تکیه‌گاهی در صفحه عمود بر محور طولی عضو خمشی، به اضافه کمترین مقدار  $c_2$  و  $0.175c_1$  در هر طرف عضو تکیه‌گاهی باشد.

$$b \leq \min \{c_2 + 2c_2, c_2 + 2 \times 0.175c_1\}$$

$c_1$ : بعد ستون در راستای محور طولی تیر،

$c_2$ : بعد ستون عمود بر راستای محور طولی تیر.



بر منطبق با استاندارد ۲۸۰۰-۱۳-۱-۱

زیرشاخه‌های قسمت چهارم:

D-1- مقدمه

D-2- ضوابط تیرها

D-3- ضوابط ستون‌ها

D-4- حداقل مقاومت خمشی ستون‌ها

D-5- ضوابط اتصالات تیر به ستون

D-6- طول مهار میگردهای کششی

آرماتورهای طولی

ضوابط مربوط به حداقل آرماتورهای طولی در سازه‌های با حد شکل‌پذیری زیاد کاملاً مشابه با آنچه در فصل خمش آموختیم، می‌باشد. با این تفاوت که در تیرهای با سطح شکل‌پذیری زیاد مقدار حداقل فولاد برای هر دو ردیف آرماتورهای فوقانی و تحتانی یعنی آرماتورهای کششی و فشاری مقطع باید کنترل گردد:

$$A_{s,min} = \max \left\{ \frac{1/4}{f_y} b_w d, 0.25 \frac{\sqrt{f_c'}}{f_y} b_w d \right\} \quad (11-14)$$

همچنین لازم است حداقل دو میلگرد با قطر  $12\text{ mm}$  هم در پایین و هم در بالای مقطع در سراسر طول عضو خمشی به کار رود.

**یادآوری:** در مقاطع بالداری که بال مقطع تحت کشش قرار دارد، مقدار  $b_w$  با  $b_e$  که برابر عرض مؤثر بوده و مطابق رابطه  $b_e = \min \{ b_f, 2b_w \}$  به دست می‌آید، جایگزین می‌شود. از طرفی نسبت حداکثر آرماتورهای کششی مقطع به صورت زیر کنترل می‌شود:

$$f_y \leq 420\text{ MPa} \Rightarrow \rho_{max} = 0.025$$

$$f_y = 520\text{ MPa} \Rightarrow \rho_{max} = 0.020$$

در خصوص آرماتورگذاری طولی تیر و مقاومت خمشی در مقاطع مختلف، لازم است موارد زیر در نظر گرفته شوند:

۱) مقاومت خمشی مثبت در مقاطع بر تکیه‌گاه‌ها، حداقل برابر نصف مقاومت خمشی منفی آن تکیه‌گاه باشد.

$$M_n^+ \geq \frac{M_n^-}{2} \quad \text{مقطع تکیه‌گاه}$$

۲) حداقل مقاومت خمشی مثبت و منفی در هر مقطع در سراسر طول تیر برابر یک چهارم حداکثر مقاومت خمشی مقاطع بر تکیه‌گاهی در دو انتهای عضو در نظر گرفته می‌شود.

$$M_n^+, M_n^- \geq \frac{1}{4} M_{n,max} \quad \text{تکیه‌گاه}$$

۳) استفاده از وصله پوششی در محل‌های زیر مجاز نمی‌باشد:

الف) اتصال تیر به ستون،

ب) در طولی معادل دو برابر ارتفاع مقطع تیر از بر تکیه‌گاه،

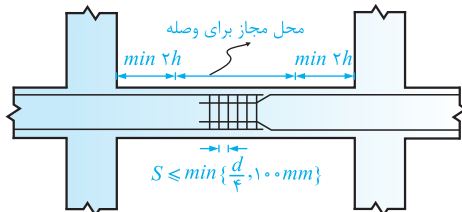
ج) طولی معادل دو برابر ارتفاع مقطع تیر از مقاطع بحرانی که در آنها در اثر تغییرمکان جانبی غیرالاستیک امکان وقوع تسلیم آرماتور (محل بروز حداکثر تنش‌ها) وجود دارد.

۴) استفاده از وصله پوششی در میلگردهای طولی تیرها فقط هنگامی مجاز است که در تمام ناحیه وصله،

آرماتور عرضی از نوع دورگیر و یا دورپیچ تعبیه گردد.

حداکثر فاصله آرماتورهای عرضی در طول وصله برابر

کوچکترین مقدار یک چهارم ارتفاع مؤثر مقطع و ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد.





۵ وصله‌های مکانیکی در صورتی که ضوابط کلی وصله را مطابق فصل نهم رعایت نمایند، می‌توانند در مقطع مورد استفاده قرار بگیرند، به شرط آنکه وصله مکانیکی در فاصله‌ای کمتر از دو برابر ارتفاع مقطع تیر از بر تیر یا ستون و یا مقاطع بحرانی که در آنها احتمال تسلیم آرماتورها وجود دارد (یعنی مقاطع دارای حداکثر لنگر خمشی)، قرار نگرفته باشد.

۶ در صورتی که از وصله‌های مکانیکی مطابق ضوابط فصل نهم استفاده می‌شود، به نحوی که وصله‌ها قادر به تحمل مقاومت گسیختگی کششی اسمی آرماتورهای وصله شده می‌باشند (یعنی نیرویی معادل  $T_n = A_s F_u$  که در آن  $A_s$  مساحت کل آرماتورهای وصله شده و  $F_u$  تنش گسیختگی میلگرد می‌باشد)، چنانچه رده میلگردها  $S 420$  و  $S 400$  باشد و تیر نیز پیش‌ساخته نباشد، می‌توان در هر مقطعی از وصله استفاده نمود. در سایر رده‌های مصرفی شرایط استفاده از وصله مطابق مورد (۵) باید رعایت گردد.

۷ وصله‌های جوشی در میلگردهایی که نیروهای ناشی از زلزله را تحمل می‌کنند، در صورتی که وصله ضوابط کلی را مطابق فصل نهم رعایت نماید، مجاز بوده، به شرط آنکه وصله در فاصله‌ای بیشتر از دو برابر ارتفاع مقطع عضو از بر اتصال تیر به ستون و یا مقاطع بحرانی که در آنها احتمال تسلیم آرماتورها وجود دارد، قرار گرفته باشد.

۸ هرگونه جوش کاری در خاموت‌ها، تنگ‌ها، قطعات جایگذاری شده و مشابه چنین مواردی به آرماتورهای طولی که کاربرد محاسباتی دارند، مجاز نمی‌باشد.

**تمرین ۱۶:** یک قاب خمشی بتن آرمه را در نظر بگیرید که مطابق ضوابط سازه‌های با حد شکل‌پذیری زیاد طراحی شده است. در یکی از قاب‌های اصلی این سازه با فاصله محور تا محور برابر ۶ متر، تیری به عرض  $b$  و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر بکار رفته است. در صورتی که ابعاد ستون‌ها برابر  $400 \times 400$  میلی‌متر، مصالح مصرفی بتن  $C 30$  و فولاد  $S 400$  و پوشش بتن تا مرکز آرماتورها برابر ۵۵ میلی‌متر باشد، به هر یک از سؤالات زیر پاسخ دهید.  
الف) مقدار حداقل عرض مجاز این تیر چقدر می‌باشد؟  
ب) در صورتی که اتصال میانی تیر به ستون در نظر باشد، حداکثر عرض تیر قابل استفاده را محاسبه کنید.

• حل:

الف) با توجه به کنترل ضوابط هندسی تیرهای با حد شکل‌پذیری زیاد، مقدار حداقل عرض مقطع به صورت زیر به دست می‌آید:

$$b \geq \max \{0.13h, 250 \text{ mm}\}$$

$$b \geq \max \{0.13 \times 600, 250\} = 250 \text{ mm}$$

ب) در صورتی که اتصال میانی مورد نظر باشد، تیر می‌تواند نسبت به هر دو وجه ستون دارای بیرون‌زدگی باشد. بنابراین داریم:

$$b \leq \min \{c_p + 2c_p, c_p + 2 \times 0.175c_1\}$$

با توجه به مربعی بودن مقطع ستون  $c_1 = c_p = 400 \text{ mm}$ ، بنابراین داریم:

$$b \leq \min \{400 + 2 \times 400, 400 + 2 \times 0.175 \times 400\} = 1000 \text{ mm}$$

بنابراین حداکثر عرض مجاز تیر نیز برابر ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد.





**تجربین ۱۷:** یک تیر بتن آرمه مستطیلی به عرض ۳۵۰ و ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر را که متعلق به یک سازه با حد شکل‌پذیری زیاد است، در نظر بگیرید. در صورتی که عمق مؤثر مقطع برابر ۳۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود، مساحت حداکثر و حداقل میلگردهای خمشی در این مقطع مطابق کدام‌یک از گزینه‌های زیر می‌باشد؟ بتن مصرفی از رده C ۴۰ و فولادها S ۵۲۰ می‌باشند.

- (۱)  $320 \text{ mm}^2$  ,  $2380 \text{ mm}^2$   
 (۲)  $2975 \text{ mm}^2$  ,  $362 \text{ mm}^2$   
 (۳)  $2975 \text{ mm}^2$  ,  $320 \text{ mm}^2$   
 (۴)  $2380 \text{ mm}^2$  ,  $362 \text{ mm}^2$

● حل:

$$A_{s, \min} = \max \left\{ \frac{1}{f_y} b_w d, \frac{0.125 \sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \right\}$$

$$A_{s, \min} = \max \left\{ \frac{1}{520} \times 350 \times 340, \frac{0.125 \times \sqrt{40}}{520} \times 350 \times 340 \right\} = 361.8 \text{ mm}^2$$

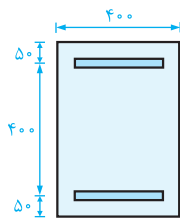
$$S 520 \Rightarrow \rho_{\max} = 0.02$$

$$A_{s, \max} = \rho_{\max} b_w d$$

$$A_{s, \max} = 0.02 \times 350 \times 340 = 2380 \text{ mm}^2$$

**تذکره:** به منظور محاسبه درصد آرماتور حداکثر می‌توان از جدول ارائه شده در انتهای فصل دوم از جلد اول کتاب استفاده نمود. اما دقت شود به دلیل تفاوت مقدار  $\rho_{\max}$  در تیرهای معمولی و تیرهای با حد شکل‌پذیری زیاد، مقادیر  $\rho_{\max}$  ارائه شده در آن جدول را در سازه‌های با حد شکل‌پذیری زیاد نباید بکار برد. بنابراین گزینه (۴) صحیح است.

**تجربین ۱۸:** در یک تیر تک دهانه مطابق شکل زیر با بارگذاری گسترده متقارن که با ضوابط سازه‌های با حد شکل‌پذیری زیاد طراحی شده است، مقدار مقاومت خمشی اسمی حداکثر تحت لنگر منفی در مقطع بر تکیه‌گاه برابر ۴۱۲ کیلونیوتن متر به دست آمده است. در صورتی که از اثر آرماتورهای فشاری صرف نظر شود، کدام‌یک از گزینه‌های زیر را می‌توان به عنوان حداکثر آرماتورهای خمشی منفی (فوقانی) در مقطع وسط دهانه بکار برد؟ مصالح مصرفی C ۳۰ و S ۴۰۰ بوده و اندازه‌های مشخص شده در شکل برحسب میلی‌متر می‌باشند.



- (۱)  $3 \Phi 20$   
 (۲)  $3 \Phi 18$   
 (۳)  $3 \Phi 16$   
 (۴)  $3 \Phi 25$

● **حل:** همان‌طور که خواندیم، مقدار حداکثر مقاومت خمشی مثبت و منفی در مقاطعی غیر از تکیه‌گاه، حداکثر باید یک چهارم مقاومت خمشی حداکثر تکیه‌گاه‌ها باشد. در این صورت در وسط دهانه داریم:

$$M_n^- \geq \frac{M_{n, \max}}{4} \Rightarrow M_n^- \geq \frac{412}{4} = 103 \text{ kN.m}$$

$$M_n = \rho f_y b d^2 \left(1 - 0.15 \frac{\rho f_y}{\alpha_1 f_c'}\right) \quad \text{در ادامه با توجه به روابط خمش داریم:}$$

$$d = 450 \text{ mm}$$

$$103 \times 10^6 = \rho \times 400 \times 400 \times 450^2 \times \left(1 - 0.15 \times \frac{\rho \times 400}{0.185 \times 30}\right)$$

$$\rho = 0.0033 \Rightarrow A_s = \rho b d = 0.0033 \times 400 \times 450 = 594 \text{ mm}^2$$

نکته مهمی که باید به آن توجه نمایید این است که هر چند می‌خواهیم مساحت آرماتورهای مورد نیاز را مطابق محدودیت‌های مقاومت خمشی به دست آوریم، اما لازم است که مقدار آرماتورهای به دست آمده با مقادیر حداقل و حداکثر نیز کنترل شود. با توجه به مقدار به دست آمده،  $\rho \leq \rho_{max}$  بوده و مساحت آرماتور حداقل به صورت زیر کنترل می‌شود.

$$A_{s, min} = \max \left\{ \frac{1}{4} \frac{bd}{f_y}, \frac{0.125 \sqrt{f_c'}}{f_y} bd \right\}$$

$$A_{s, min} = \max \left\{ \frac{1}{4} \times 400 \times 450, \frac{0.125 \times \sqrt{30}}{400} \times 400 \times 450 \right\} = 630 \text{ mm}^2$$

$$A_{s, min} = 630 \text{ mm}^2 \geq A_s = 594 \text{ mm}^2$$

بنابراین حداقل مساحت میلگردهای خمشی در قسمت فوقانی وسط دهانه برابر  $630 \text{ mm}^2$  در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در تمام گزینه‌ها از سه عدد آرماتور استفاده شده است، داریم:

$$3 \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \geq 630 \Rightarrow d_b \geq 16.14 \text{ mm}$$

بنابراین گزینه (۲) صحیح است.

**تمرین ۱۹:** در یک تیر بتن آرمه مستطیلی درجا به ابعاد  $b \times h$  که مطابق ضوابط سازه‌های با حد شکل‌پذیری زیاد طراحی شده است، از وصله‌های مکانیکی برای میلگردهای طولی استفاده شده است به نحوی که مقاومت وصله بیست درصد بیشتر از مقاومت گسیختگی کششی میلگردها به دست آمده است. کدام یک از گزینه‌های زیر در خصوص محل مقطع وصله در میلگردهای این تیر صحیح می‌باشد؟

(۱) با استفاده از میلگردهای  $S 400$ ، حتماً باید وصله خارج از فاصله دو برابر  $h$  از بر تکیه‌گاه باشد.

(۲) با استفاده از میلگردهای  $S 520$ ، می‌توان میلگردها را در هر مقطعی وصله نمود.

(۳) در تمام رده‌های میلگرد مصرفی لازم است وصله خارج از فاصله دو برابر  $h$  از بر تکیه‌گاه قرار بگیرد.

(۴) با استفاده از میلگردهای  $S 520$ ، محل وصله باید خارج از فاصله دو برابر  $h$  از بر تکیه‌گاه باشد.

● **هله:** همان‌طور که خواندیم، در تیرهایی که در آنها از وصله مکانیکی استفاده می‌شود، وصله‌ها نباید در فاصله دو برابر ارتفاع مقطع از بر تکیه‌گاه قرار بگیرند. در صورتی که مقاومت وصله حداقل برابر مقاومت گسیختگی کششی آرماتورهای وصله شده باشد، فقط در میلگردهای  $S 400$  و  $S 420$  در صورت پیش‌ساخته نبودن تیر، می‌توان وصله را در هر مقطعی در نظر گرفت. دقت شود در صورت استفاده از میلگردهای  $S 520$ ، باید محدودیت  $2h$  از بر تکیه‌گاه رعایت شود. بنابراین گزینه (۴) صحیح است.



## آرماتورهای عرضی

در تیرهای مربوط به سازه‌های با حد شکل‌پذیری زیاد، در نواحی که دارای تنش حداکثر هستند، تغییر شکل‌های غیرالاستیک و در نتیجه نیروی برشی نسبتاً بزرگی اتفاق می‌افتد. در این نواحی به منظور اطمینان از عملکرد مناسب تیر، ایجاد محصوریت برای بتن مقطع، جلوگیری از کمانش آرماتورهای طولی و تأمین مقاومت برشی مقطع، لازم است آرماتور عرضی از نوع دورگیر بکار برده شود. نواحی مستعد در این تعریف که نواحی بحرانی نامیده می‌شوند، شامل دو مورد زیر می‌باشند:

- ۱ طولی معادل دو برابر ارتفاع مقطع از هر تکیه‌گاه به سمت وسط دهانه،
- ۲ دو برابر ارتفاع مقطع در دو سمت مقطعی که در آن امکان تشکیل مفصل پلاستیک در اثر تغییر مکان جانبی غیرالاستیک قاب وجود داشته باشد.

در نواحی بحرانی عضو خمشی از آرماتورهای عرضی از نوع دورگیر با ضوابط زیر استفاده می‌کنیم:

- ۱ حداقل قطر دورگیرها با توجه به قطر میلگردهای طولی، به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$d_b \leq 32 \text{ mm} \Rightarrow d_v \geq 10 \text{ mm}$$

$$d_b \geq 34 \text{ mm} \Rightarrow d_v \geq 12 \text{ mm}$$

$d_b$ : قطر میلگرد طولی،  $d_v$ : قطر میلگرد دورگیر.

- ۲ فاصله دورگیرها از یکدیگر بیشتر از مقادیر یک‌چهارم ارتفاع مؤثر مقطع، ۶ برابر قطر کوچکترین میلگرد طولی برای فولاد با مقاومت تسلیم  $420$  مگاپاسکال و کمتر و ۵ برابر قطر کوچک‌ترین میلگرد طولی برای میلگردهای با مقاومت تسلیم  $520$  مگاپاسکال (به جز میلگردهای طولی جلدی) و  $150$  میلی‌متر در نظر گرفته نشود.

$$f_y \leq 420 \text{ MPa} \Rightarrow S_{max} = \min \left\{ \frac{d}{4}, 6 d_{b_{min}}, 150 \text{ mm} \right\}$$

$$f_y = 520 \text{ MPa} \Rightarrow S_{max} = \min \left\{ \frac{d}{4}, 5 d_{b_{min}}, 150 \text{ mm} \right\}$$

- ۳ فاصله اولین دورگیر از بر تکیه‌گاه بیشتر از  $50$  میلی‌متر نباشد.

در قسمت‌هایی از طول تیر که به دورگیر نیاز است، میلگردهای طولی اصلی در مجاورت رویه‌های کششی و فشاری عضو باید دارای تکیه‌گاه عرضی مطابق آنچه در خصوص مهار میلگردهای طولی ستون‌ها در فصل ۶ از جلد اول کتاب خواندیم، باشند. باید توجه شود این دورگیرها باید برای نیروی برشی وارد بر تیر مطابق آنچه در ادامه این بخش خواهیم خواند، طراحی شوند.

## یادآوری

به منظور یادآوری شرایط تکیه‌گاه عرضی به شرح زیر می‌باشد.

(الف) میلگردهای طولی واقع در گوشه مقطع و سایر میلگردهای طولی به صورت یک در میان توسط خم با زاویه کمتر یا مساوی  $135$  درجه مهار شوند.

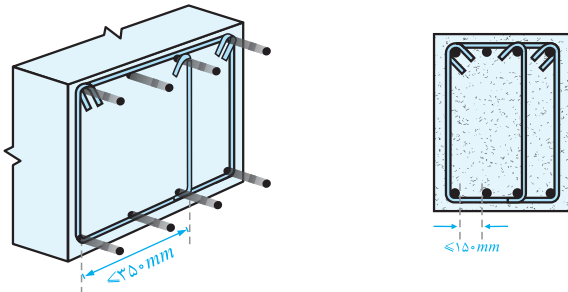
(ب) حداکثر فاصله آزاد میلگردهای طولی بدون مهار جانبی از یکدیگر برابر  $150$  میلی‌متر می‌باشد.

(پ) مهار تنگ‌ها در مقطع مستطیلی توسط قلاب استاندارد که میلگردهای طولی را در بر می‌گیرد، انجام می‌شود.

(ت) استفاده از مجموعه میلگردهای سردار به عنوان تنگ مجاز نیست.

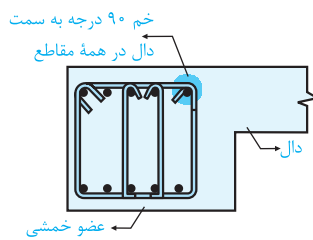
دقت شود در این خصوص محدودکننده‌ترین ضوابط مربوط به برش و ضوابط دورگیر در نواحی بحرانی ملاک عمل خواهد بود.

دقت شود فاصله مرکز تا مرکز میلگردهای خمشی که دارای تکیه‌گاه جانبی هستند، بیشتر از ۳۵۰ میلی‌متر نباشد.



در خصوص میلگردهای جلدی که وجود آنها در تیرهای با ارتفاع بیشتر از ۹۰۰ میلی‌متر ضروری می‌باشد (مطابق ضوابط فصل دوم از جلد اول کتاب)، لزومی به رعایت ضوابط تکیه‌گاه عرضی نیست.

دورگیر تیرها را می‌توان توسط دو قطعه میلگرد ساخت. در این صورت از یک میلگرد  $U$  شکل که در دو انتها دارای قلاب لرزه‌ای باشد، استفاده شده که توسط میلگرد دیگری به شکل سنجاقی با میلگرد اول یک دورگیر بسته را تشکیل می‌دهند. در این خصوص خم ۹۰ درجه سنجاقی‌های متوالی که یک میلگرد طولی را در بر می‌گیرند، باید به‌طور یک در میان در دو سمت تیر قرار داده شوند. در صورتی که عضو خمشی در مجاورت دال قرار داشته و میلگردهای طولی که توسط سنجاقی مهار شده‌اند، در ناحیه دال واقع شوند و دال فقط در یک سمت عضو خمشی قرار گرفته باشد، خم ۹۰ درجه سنجاقی‌ها می‌تواند در دال واقع شود.

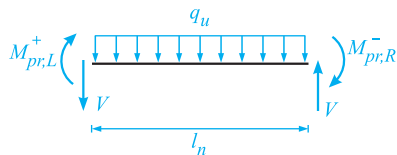


در قسمت‌هایی از طول تیر که نیازی به وجود دورگیر نمی‌باشد، خاموت‌ها باید در دو انتها دارای قلاب لرزه‌ای باشند. در این قسمت‌ها حداکثر فاصله بکارگیری خاموت‌ها برابر نصف عمق مؤثر تیر در نظر گرفته می‌شود. دقت شود در این مورد ضوابط برش رعایت می‌شود.

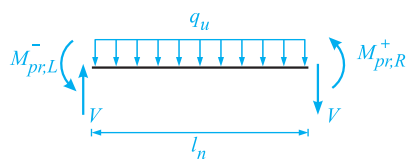
در صورتی که نیروی محوری فشاری ضریب‌دار تیرها بیشتر از  $0.1 A_g f'_c$  باشد، عملکرد تیر مشابه ستون‌ها در نظر گرفته شده، لذا آرماتورگذاری عرضی نواحی بحرانی در آنها مانند ستون‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این تیرها در سایر نواحی غیر از نواحی بحرانی، فاصله آرماتورهای عرضی در صورت استفاده از آرماتورهای با مقاومت حد تسلیم ۴۲۰ مگاپاسکال و کمتر، به کمترین مقدار ۶ برابر قطر کوچک‌ترین آرماتور طولی تیر و ۱۵۰ میلی‌متر محدود می‌شود. در صورتی که مقاومت تسلیم آرماتورها ۵۲۰ مگاپاسکال باشد، محدودیت فوق برابر کمترین مقدار حاصل از ۵ برابر قطر کوچک‌ترین میلگرد طولی و ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. در مواردی که پوشش بتن روی آرماتورهای عرضی از ۱۰۰ میلی‌متر بیشتر است، باید از آرماتورهای عرضی اضافی با پوشش بتن کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و با فواصل حداکثر ۳۰۰ میلی‌متر استفاده نمود.

محاسبه برش در تیرها

باتوجه به اینکه در سازه‌های با حد شکل‌پذیری زیاد، اعضاء باید قادر به تحمل نیروهای رفت و برگشتی و همچنین دوران‌های نسبتاً زیاد باشند و نمی‌خواهیم مقطع دچار گسیختگی برشی شود، باید ظرفیت برش مقطع را آنقدر افزایش دهیم (به میزان برش متناظر با پلاستیک شدن خمشی) تا اطمینان حاصل کنیم که مقطع در برش غیرخطی نخواهد شد. به همین جهت به‌منظور محاسبه نیروی برشی وارد بر تیرها، با در نظر گرفتن بارهای قائم ضریب‌دار و با فرض اینکه لنگر دو انتهای تیر به مقدار لنگر خمشی مقاوم محتمل ( $M_{pr}$ ) رسیده باشد، مقدار برش عضو محاسبه می‌شود. دقت شود همان‌طور که در بخش‌های پیش خواندیم، جهت لنگرهای خمشی باید به نحوی در نظر گرفته شود که نیروی برشی ایجاد شده در تیر حداکثر باشد. باتوجه به این توضیحات، برش نهایی تیرها با در نظر گرفتن دو حالت زیر به‌دست می‌آید:



$$V_{e_1} = \frac{M_{pr,L}^+ + M_{pr,R}^- + q_u l_n}{2} \quad (15-11)$$



$$V_{e_2} = \frac{M_{pr,L}^- + M_{pr,R}^+ + q_u l_n}{2} \quad (16-11)$$

$$V_e = \max \{ V_{e_1}, V_{e_2} \} \quad (17-11)$$

$V_e$ : نیروی برشی طراحی تیر،

$M_{pr,R}^-$ ,  $M_{pr,L}^+$ : لنگرهای خمشی مقاوم محتمل مثبت و منفی در تکیه‌گاه سمت راست،

$M_{pr,L}^-$ ,  $M_{pr,R}^+$ : لنگرهای خمشی مقاوم محتمل مثبت و منفی در تکیه‌گاه سمت چپ،

$l_n$ : طول آزاد تیر،

$q_u$ : بارگذاری قائم ضریب‌دار وارد بر تیر که با توجه به جدول ترکیب بار، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q_u = 1/2 q_D + 1/0 q_L + 0/2 q_S + 1/0 q_E$$

که در این رابطه  $q_D$ ،  $q_L$  و  $q_S$ ، بارهای قائم مرده، زنده و برف بوده و  $q_E$  نیز بار قائم ناشی از زلزله می‌باشد.

لنگر خمشی مقاوم محتمل

لنگر خمشی مقاوم محتمل در واقع تخمینی از مقاومت مورد انتظار مقطع با در نظر گرفتن فراتر رفتن تنش میلگردها از مقاومت حد تسلیم به علت بروز پدیده سخت‌شدگی بوده و روش محاسبه آن به‌طور کلی مشابه محاسبه لنگر خمشی مقاوم اسمی است، با این تفاوت که در این حالت مقاومت تسلیم آرماتورهای طولی برابر  $1/25 f_y$  در نظر گرفته شده و از طرفی مقدار ضریب کاهش مقاومت  $\phi$  نیز برابر  $1/0$  می‌باشد. با توجه به این نکته و روابط ارائه شده در فصل خمش، پارامترهای محاسباتی لنگر خمشی مقاوم محتمل در یک مقطع مستطیلی



به شرح زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$a = \frac{1/25 A_s f_y}{\alpha_1 f'_c b} \quad (18-11)$$

$$M_{pr} = 1/25 A_s f_y \left( d - \frac{a}{\gamma} \right) \quad (19-11)$$

$$M_{pr} = 1/25 \rho f_y b d^2 \left( 1 - 0.1625 \frac{\rho f_y}{\alpha_1 f'_c} \right) \quad (20-11)$$

### طراحی تیر تحت برش

طراحی برشی تیرهای با حد شکل‌پذیری زیاد، مانند سایر اعضای بتن‌آرمه، براساس کنترل نامساوی زیر انجام می‌شود:

$$V_u \leq \phi V_n$$

از طرفی در صورتی که دو شرط زیر به‌طور همزمان برقرار باشد، از مقاومت برشی حاصل از بتن در ناحیه بحرانی تیر صرف‌نظر می‌شود. در این صورت آرماتورهای عرضی در ناحیه بحرانی باید برای تحمل کل نیروی برشی حاصل از رابطه (۱۱-۱۷) طراحی شوند.

۱) نیروی برشی همساز با لنگر خمشی مقاوم محتمل بزرگتر یا مساوی نصف مقاومت برشی حداکثر در مقاطع بحرانی باشد.

۲) بار محوری فشاری ضریب‌دار وارد بر مقطع که شامل اثر زلزله نیز می‌باشد، از مقدار  $0.105 A_g f'_c$  کمتر باشد.

### جمع‌بندی

با توجه به توضیحات فوق، به‌طور خلاصه، طراحی برشی مقطع تیرهای با حد شکل‌پذیری زیاد، به‌صورت زیر انجام می‌شود:

$$V_u \leq \phi V_n$$

$$\text{حالت (۱):} \begin{cases} \frac{M_{pr,L} + M_{pr,R}}{l_n} \geq \frac{1}{\gamma} \left( \frac{M_{pr,L} + M_{pr,R}}{l_n} + \frac{q_u l_n}{\gamma} \right) \\ N_u < 0.105 A_g f'_c \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_c = 0 \\ V_n = V_s \end{cases}$$

$$\text{حالت (۲):} \Rightarrow V_n = V_c + V_s \text{ در صورت عدم برقراری دو شرط فوق به‌طور همزمان}$$

**تجربین ۲۰:** برای مقطع تیر بتن‌آرمه به عرض ۵۰۰ میلی‌متر و ارتفاع مؤثر ۶۰۰ میلی‌متر و با ۴ میلگرد کششی به قطر ۲۵ میلی‌متر و  $f_y = 400 \text{ MPa}$  و با فرض توزیع تنش یکنواخت عمود بر مقطع در قسمت فشاری بتن برابر  $24 \text{ MPa}$ ، نسبت  $M_{pr}$  (لنگر خمشی مقاوم محتمل) به  $M_n$  (لنگر خمشی مقاوم اسمی) به کدام مقدار

(مماسیات - بهمن ۹۷)

نزدیک‌تر است؟ (در محاسبات از اثر آرماتور فشاری صرف‌نظر شود.)

۱/۰۵ (۴)

۱/۲۳ (۳)

۱/۲۷ (۲)

۱/۳۵ (۱)