به‌نام یکتا مهندس هستی...

سخن مؤلفان

سازه‌های بتن‌آرمه یکی از مهمترین دروس رشتهٔ مهندسی عمران است که یادگیری مفهومی و عمیق آن، برای یک مهندس عمران لازم و ضروری می‌باشد.

پس از انتشار کتاب سازه‌های فولادی مؤسسه سری عمران، درخواست‌های بسیار زیاد شما عزیزان مبنی بر انتشار کتاب سازه‌های بتنی توسط این مؤسسه، نشان می‌داد که شما نیز بر اهمیت زیاد این درس واقفید. از این‌رو تصمیم گرفتیم تا با تشکیل قوی‌ترین تیم ممکن، کتابی در دو جلد به شما ارائه کنیم.

ویژگی‌های این کتاب

۱- ارائهٔ یک نگاه جدید در درس بتن که حاصل تجربهٔ بسیار زیاد هر یک از مؤلفین این کتاب در تدریس است.

۲- طبقه‌بندی دقیق هر فصل به بخش‌های مجزا و کوچکتر که باعث افزایش سرعت یادگیری شما می‌شود.

۳- 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 (قسمت بررسی چند سؤال).

۴- جمع‌آوری مثال‌های بسیارخوب و متنوع در قسمت ادراک و تسلط بیشتر در انتهای هر بخش، که باعث افزایش چشمگیر مهارت شما بر مطالب می‌شود.

۵- آوردن کلیهٔ سؤالات کنکور سراسری، آزاد و همچنین سؤالات تألیفی به منظور تکمیل مطالب درسی.

۶- آوردن آزمون در انتهای هر فصل که به کمک آن می‌توانید میزان توانایی خود را در حل سؤالات بسنجید.

به شـما اطمینان می‌دهیم که با مطالعهٔ این کتاب متوجه خواهید شـد که بتن آرمه درسـی جذاب اسـت و با نگاه جدید ارائه شده، می‌توان سـؤالات آن را به خوبی در کنکور تحلیل کرد.

در خاتمه لازم اسـت از جناب آقای دکتر شـریفیان مدیریت مؤسسه سری عمران و عوامل اجرایی مؤسسـه جناب آقای فرزانه، سـرکار خانم نجفی و ... کـه تمام تلاش خود را در جهـت ارائه هر چه بهتر این مجموعـه به‌کار گرفتند و همچنیـن خانواده‌های صبورمان، نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

در آخر علیرغم تلاش فراوانی که برای بازبینی این کتاب شـده است، وجود اشکال در آن غیرممکن نبوده و از اساتید گرانقدر و دانشجویان گرامی تقاضا می‌شود، پیشنهادات و انتقادات خود را در تالار گفتگوی سایت (www.serieomran.ir) مطرح نمایند.

(توفیق رفیق راهتان)

جلد ۱

فهـــــرست

فصل اول: معرفی بتن

قسمت اول: آشنایی با ویژگی‌های بتن ۸
قسمت دوم: آشنایی با اتفاقاتی که بر روی بتن رخ می‌دهد ۲۰
قسمت سوم: آشنایی با دیدگاه‌های طراحی سازه‌های بتن‌آرمه ۳۴
تست‌های فصل اول ۴۱
آزمون ۱ ..... ۴۷

فصل دوم: خمش در اعضاء با آرماتور کششی

قسمت اول: مفاهیم اولیهٔ خمش و آشنایی با تعاریف ۵۲
قسمت دوم: مقطع بتن‌آرمه در حالت الاستیک و الاستوپلاستیک ۶۵
قسمت سوم: مقطع بتن‌آرمه در حالت پلاستیک و بررسی حالت بالانس ۷۷
قسمت چهارم: شکست نرم و ترد در یک مقطع بتن‌آرمه ۹۲
قسمت پنجم: نمودار لنگر ـ انحناء و مفاهیم شکل‌پذیری در یک مقطع بتن‌آرمه ۱۰۷
تست‌های فصل دوم ۱۱۳
آزمون ۱ ..... ۱۲۸
آزمون ۲ ..... ۱۳۲

فصل سوم: خمش ۲ (مقاطع دوبله‌آرمه، T شکل و ...)

قسمت اول: مقطع دوبله‌آرمه ۱۴۰
قسمت دوم: بررسی مقاطع T شکل ۱۵۸
قسمت سوم: سایر مقاطع بالدار ۱۷۵
تست‌های فصل سوم ۱۸۱
آزمون ۱ ..... ۱۹۷
آزمون ۲ ..... ۲۰۳

فصل چهارم: طراحی ستون‌های بتن‌آرمه

قسمت اول: ستون تحت بار محوری خالص ۲۱۰
قسمت دوم: ستون تحت بار محوری و لنگر خمشی یک‌طرفه ۲۲۱
قسمت سوم: ستون تحت بار محوری و لنگر خمشی دوطرفه ۲۴۴
قسمت چهارم: ستون‌های لاغر و مفهوم تشدید لنگر در یک ستون بتن‌آرمه ۲۴۹
قسمت پنجم: ضوابط آرماتورگذاری ستون‌ها و شکل‌پذیری ۲۵۶
تست‌های فصل چهارم ۲۶۳
آزمون ۱ ..... ۲۸۱
آزمون ۲ ..... ۲۸۶

سری عمران

فصل اول:

معرفی بتن

مروری بر آنچه خواهیم خواند:

بتن به عنوان یک مادهٔ ساختمانی بسیار پرکاربرد در مهندسی عمران، از یکپارچه شدن مصالح دانه‌ای با کمک آب و سیمان ساخته می‌شود. در بتن از شن، ماسه، خرده سنگ یا مواد مصنوعی سبک به عنوان مصالح دانه‌ای استفاده می‌شود و به دلیل ماهیت متخلخل این مصالح ساختمانی، مقاومت فشاری این ماده بالا بوده و مقاومت کششی آن پایین است.

در این فصل که آغاز مطالعهٔ این کتاب است، می‌خواهیم مفاهیم اولیه و بسیار جالبی را در مورد بتن و بتن آرمه یاد بگیریم که درک ما را از آن کاملتر می‌کند. به همین منظور، فصل اول کتاب را مطابق نمودار درختی زیر ارائه کرده‌ایم:

- معرفی بتن
  - قسمت اول: آشنایی با ویژگی‌های بتن
  - قسمت دوم: آشنایی با اتفاقاتی که بر روی بتن رخ می‌دهد
  - قسمت سوم: آشنایی با دیدگاه‌های طراحی سازه‌های بتن‌آرمه

انتشارات سری عمران
www.serieomran.ir

مقدمه

همان‌طور که در پیش فصل نیز بیان کردیم، مقاطع بتنی در تحمل کشش ضعف دارند و تحت اثر نیروی کششی کوچک ترک خورده و خراب می‌شوند. برای جبران این ضعف، در ناحیهٔ کششی مقطع میلگردگذاری می‌شود. با این ابتکار، فولاد موجود در ناحیهٔ کششی مقطع بتنی به عنوان عامل مقاومی در برابر نیروهای کششی وارد شده مقاومت کرده و ظرفیت مقطع را افزایش می‌دهد.*

سوال: معمولاً بیان می‌شود که بتن و فولاد در کنار یکدیگر جسم مرکبی را تشکیل می‌دهند که سازگاری مناسبی دارند. علت این موضوع را بررسی کنید.

پاسخ: این موضوع دلایل زیادی دارد که چند مورد از آن به شرح زیر است:

۱- به دلیل خواص شیمیایی بتن و فولاد، چسبندگی مناسبی بین آنها ایجاد می‌شود. ایجاد برآمدگی بر روی میلگرد (آج) نیز به افزایش این چسبندگی کمک زیادی می‌کند.

۲- ضریب انبساط حرارتی بتن و فولاد بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و در اثر تغییرات دما، تغییر طول آنها تقریباً یکسان است و این موضوع یعنی تغییر دما نمی‌تواند باعث ایجاد تنش‌های قابل توجه در آنها شود.

۳- پوشش (*cover*) بتنی موجود بر روی میلگردها، نقش حفاظتی برای آن‌ها را دارد و بعضی از نقاط ضعف فولاد از جمله زنگ زدن، خوردگی و مقاومت در برابر آتش‌سوزی را تا حد مطلوبی جبران می‌کند.

نکته: در مقابل مزایای استفاده از بتن مسلح شده با فولاد که به آن **بتن‌آرمه** نیز می‌گویند، نقاط ضعفی نیز وجود دارد که مهمترین آن‌ها عبارتند از:

۱- اجرای سازه‌های بتنی با قالب‌بندی همراه بوده و زمان اجرای پروژه معمولاً نسبت به سازه‌های فولادی کمی بیشتر است.

۲- ابعاد بزرگ مقاطع بتنی نسبت به مقاطع فولادی، بار مردهٔ سازه را افزایش داده و فضای مفید سازه را کمی کاهش می‌دهد.

تذکر: در یک قطعهٔ بتنی، حتی با وجود آرماتورها، در ناحیهٔ کششی معمولاً ترک‌های ریزی ایجاد می‌شود. این ترک‌ها عرض کمی داشته و در شکل ظاهری مقطع بی‌تأثیرند. در فصل‌های آینده، این موضوع را بیشتر بررسی می‌کنیم.

---

* میلگردگذاری در ناحیهٔ فشاری مقطع بتنی نیز می‌تواند انجام شود که در فصل‌های بعد در مورد آن بحث خواهیم کرد.

زیر شاخه‌های قسمت اول
A–۱– مقاومت فشاری بتن
A–۲– پارامترهای فیزیکی بتن
A–۳– مقاومت کششی بتن

A-۱- مقاومت فشاری بتن

احتمالاً شنیده‌اید که در مهندسی عمران، استفاده از بتن به علت مقاومت فشاری بالای آن رایج است. مقاومت فشاری در حقیقت تنش فشاری قائم قابل تحمل توسط بتن است که با f_c نشان داده می‌شود (همانطور که به یاد دارید در درس مقاومت مصالح، تنش محوری با نماد σ نمایش داده می‌شد). عوامل اصلی مؤثر بر مقاومت فشاری بتن عبارتند از:

۱- نسبت آب به سیمان مورد استفاده در ساخت بتن (معمولاً مهم‌ترین عامل در تعیین مقاومت فشاری بتن محسوب می‌شود)

۲- نسبت مصالح سنگی به سیمان

۳- ریزی و درشتی مصالح دانه‌ای (دانه‌بندی) و مقاومت آنها در برابر اعمال بار

۴- افزودنی‌های بتن

توجه شود که افزودن آب به بتن، کارایی بتن و روانی آن در اجرای سازه را افزایش داده، ولی تأثیرات منفی زیادی از جمله کاهش مقاومت فشاری را به دنبال دارد. در ادامهٔ بحث می‌خواهیم نموداری مرتبط با پارامتر f_c را بررسی کنیم.

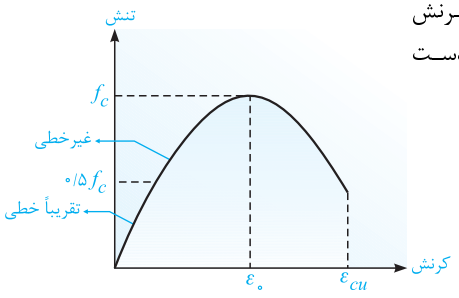
نمودار تنش - کرنش بتن

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

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

۲) مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آبا، برای بررسی مقاومت فشاری تک‌محوری بتن از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر $۱۵۰\,mm$ و ارتفاع $۳۰۰\,mm$ استفاده می‌شود.* در کارهای عملی علاوه بر این حالت، از نمونه‌های مکعبی با طول ضلع‌های $۱۵۰\,mm$ و یا $۲۰۰\,mm$ نیز جهت تعیین مقاومت فشاری استفاده می‌شود.

۳) با تحت فشار قرار دادن نمونه‌های بتن، نمودارتنش - کرنش بتن تا لحظهٔ گسیختگی نمونه مطابق شکل مقابل به‌دست می‌آید:



* مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آبا، از آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتن‌آرمه در ایران محسوب می‌شوند که شباهتشان به یکدیگر زیاد است. البته باید توجه شود که آبا (آیین‌نامهٔ بتن ایران) چند سالی است که جای خود را به مبحث نهم مقررات ملی ساختمان داده، ولی با توجه به اینکه هنوز بسیاری از سؤالات کنکور بر مبنای ضوابط آبا طرح می‌شوند، در این کتاب ما هر دو آیین‌نامه را مدنظر قرار داده‌ایم.

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) $0/5f_c$: تا این تنش، نمودار را با تقریب مناسبی می‌توان یک خط در نظر گرفت (این موضوع یعنی دقیقاً خط نیست).

۳) ε_0: کرنش نمونه در مقاومت فشاری حداکثر (f_c) است. این پارامتر در محدودهٔ ۰/۰۰۱۵ الی ۰/۰۰۲ قرار دارد.

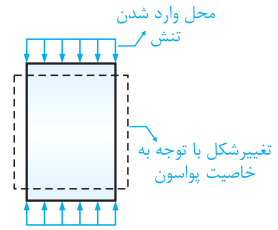
۴) ε_{cu}: کرنش ایجاد شده در نمونه، در لحظهٔ گسیختگی نمونه است. این پارامتر معمولاً در محدودهٔ ۰/۰۰۳ الی ۰/۰۰۵ قرار دارد.

تذکر: پارامتر ε_{cu} نیز پارامتر بسیار مهمی در طراحی سازه‌های بتن آرمه محسوب می‌شود. برای ε_{cu} آیین‌نامه‌های آبا و ACI* به صورت محافظه‌کارانه مقدار ۰/۰۰۳ و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان مقدار ۰/۰۰۳۵ را در نظر گرفته‌اند.

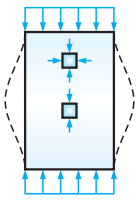
تمرین ۱: آیا مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی با یکدیگر برابر است؟ چرا؟

حل: برای تحلیل این تمرین جالب و مفهومی، به موارد زیر توجه کنید:

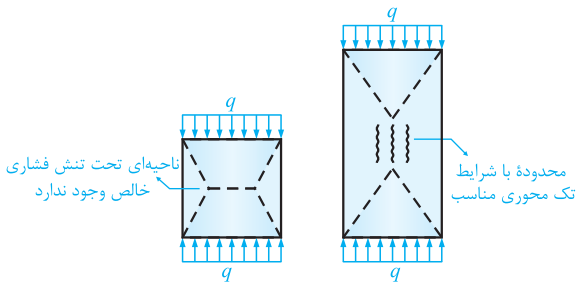
۱- در صورتی که بین دستگاه واردکنندهٔ تنش و نمونهٔ بتنی اصطکاکی وجود نداشته باشد (که در واقعیت وجود دارد)، نمونه به صورت تک‌محوری عمل کرده و با توجه به خاصیت پواسون در مقاومت مصالح، تغییرشکل آن مطابق شکل مقابل است.



۲- در صورتی که بین دستگاه واردکنندهٔ تنش و نمونهٔ بتنی اصطکاک وجود داشته باشد، تغییرشکل نمونه مطابق شکل مقابل بوده و با توجه به تغییرشکل رسم شده، نمونه به صورت تک محوری عمل نمی‌کند. در این حالت، در بالا و پایین نمونه شرایط تک‌محوری برقرار نبوده و در راستاهای دیگر نیز بر نمونه تنش وارد می‌شود. در نمونهٔ بتنی رسم شده می‌توان نشان داد که هر چه به وسط نمونه نزدیک‌تر می‌شویم، نقش اصطکاک کمتر شده و به شرایط تک محوری نزدیک‌تر می‌شود.



۳- با توجه به این توضیحات، نوع نمونه بر مقاومت فشاری بتن اثر می‌گذارد. به طور کلی هر چه ارتفاع نمونه نسبت به بعدی که بارگذاری بر آن وارد می‌شود بزرگتر باشد، شرایط تک‌محوری بهتر حاصل می‌شود.



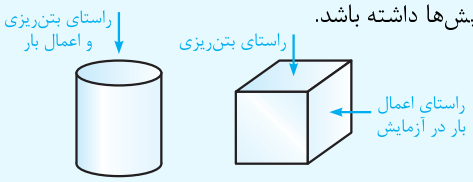
* ACI، آیین‌نامهٔ بتن آمریکا است که آیین‌نامهٔ بسیار معتبری محسوب می‌شود.

۴- در نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد بدون تأثیر تنش‌های جانبی، ناحیه‌ای در وسط نمونه وجود خواهد داشت که فقط تحت تأثیر تنش‌های خالص فشاری قرار می‌گیرد. این در حالی است که در نمونه‌های مکعبی، معمولاً شرایط تک محوره ایجاد نشده و با توجه به این که کرنش کمتری در آنها ایجاد می‌شود، نمونه مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهد. $f_{cu(۱۵۰)} > f_{cu(۲۰۰)} > f_{c(۱۵۰\times۳۰۰)}$

۵- به طور کلی، نمونه‌های استوانه‌ای شباهت بیشتری به نمونهٔ واقعی ساخته شده در سازه دارند.

کمی دقت

عامل دیگری نیز در تفاوت بین مقاومت فشاری نمونه‌ها برای یک نوع بتن مؤثر است. در نمونه‌های استوانه‌ای، جهت بتن‌ریزی و جهت اعمال تنش یکسان است؛ در صورتی که در نمونه‌های مکعبی به جهت استفاده از سطوح صاف‌تر، جهت اعمال تنش معمولاً عمود بر جهت بتن‌ریزی انتخاب می‌شود. این عامل نیز می‌تواند گاهی از اوقات تأثیر قابل توجهی بر نتایج آزمایش‌ها داشته باشد.



با توجه به نتایج آزمایشگاهی برای بتن‌های معمولی، مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد (۱۵۰×۳۰۰) در حدود ۸۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونه مکعبی با بعد ۱۵۰ میلی‌متر و در حدود ۸۳ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ مکعبی با بعد ۲۰۰ میلی‌متر است.

$f_{c(۱۵۰\times۳۰۰)} = ۰/۸\ f_{cu(۱۵۰)} = ۰/۸۳\ f_{cu(۲۰۰)}$

نکته: برای بتن سبک وزن، مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی تقریباً یکسان می‌باشد.

در تمرین بعد، نکات خوب و مهمی را در مورد نمودار تنش - کرنش بتن یاد می‌گیریم.

تمرین ۲: درستی یا نادرستی عبارت‌های زیر را بررسی کنید.

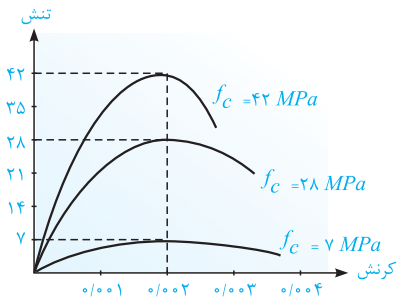
۱) هر چه مقاومت فشاری بتن افزایش یابد، مقدار ε_{cu} نیز افزایش می‌یابد.

۲) هر چه مقاومت فشاری بتن کاهش یابد، مقدار ε_c افزایش یافته، ولی در مجموع تغییرات آن جزئی و کم است.

۳) با افزایش سرعت بارگذاری وارد بر یک نمونه، مقاومت فشاری بتن افزایش و شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد.

حل: برای پاسخ دادن به این تمرین، ابتدا به موارد زیر توجه شود:

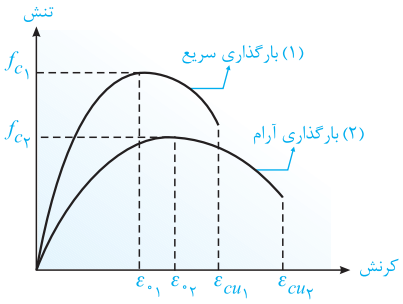
۱- با افزایش f_c ، بتن کمتر تغییرشکل داده و شکل‌پذیری نمونهٔ بتنی کاهش یافته و ε_{cu} برای آن کم می‌شود. این مورد با توجه به نمودار مقابل که برای سه نمونهٔ بتن رسم شده است مشهود می‌باشد. توجه شود که بتن قوی‌تر در کرنش کوچکتری به گسیختگی نهایی رسیده و شکل‌پذیری آن کمتر است.



۲- با افزایش f_c، مقدار $\varepsilon_{\circ}$ (کرنش نظیر مقاومت f_c یا کرنش کاهش یافتگی بتن) نیز مقدار بسیار کمی کاهش می‌یابد که معمولاً از آن صرف‌نظر می‌شود.

۳- با افزایش سرعت بارگذاری، مقاومت فشاری بتن افزایش یافته و کرنش نظیر با آن و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. در صورتی که آزمایش مقاومت فشاری با سرعت بالا انجام شود، نمونه در ظاهر سخت‌تر بوده و مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. در مقابل در بارگذاری آرام، تنش فشاری حداکثر کاهش و ε_{cu} افزایش می‌یابد؛ مثلاً در یک بارگذاری بسیار سریع مانند انفجار، بتن مقاومت بیشتری از خود نشان داده، ولی تغییرشکل‌های کمتری را می‌تواند تحمل کند.

۴- نمودار تنش - کرنش برای بتن در بارگذاری سریع (تند) و بارگذاری آرام مطابق شکل زیر است:



$$E_1 > E_2 \quad , \quad f_{c_1} > f_{c_2}$$
$$\varepsilon_{\circ_2} > \varepsilon_{\circ_1} \quad , \quad \varepsilon_{cu_2} > \varepsilon_{cu_1}$$

با توجه به موارد بررسی شده، عبارت‌های (۲) و (۳) درست و عبارت (۱) نادرست است.

A - ۲- پارامترهای فیزیکی بتن

در این قسمت می‌خواهیم مروری بر پارامترهای مقاومت مصالحی یک نمونهٔ بتنی داشته باشیم. در یک نمونهٔ بتنی، پارامترهای فیزیکی زیر در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند:

۱) **نسبت پواسون:** این پارامتر نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری در نمونه را بیان می‌کند که این عدد برای بتن در محدودهٔ $0/1 \le \nu \le 0/2$ قرار دارد.

تذکر: نسبت پواسون برای بتن‌های با مقاومت بالا کمتر است (زیرا تغییرشکل جانبی آنها در یک بارگذاری یکسان کمتر است). از سوی دیگر با ایجاد ترک در بتن، نسبت پواسون افزایش می‌یابد.

۲) **ضریب انبساط حرارتی:** این پارامتر از مهم‌ترین کمیت‌های مربوط به خواص حرارتی بتن است که مقدار آن را می‌توان به ویژگی‌های مصالح سنگی مورد استفاده در بتن و سیمان مصرفی در بتن مرتبط کرد. مقدار ضریب انبساط حرارتی بتن به طور تقریبی برابر مقدار زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\alpha_c \simeq 1\times10^{-5}\ \frac{1}{^\circ C}$$

تذکر: از آنجا که با تغییر درجه حرارت، حجم بتن نیز افزایش و یا کاهش می‌یابد، این موضوع گاهی منجر به ایجاد تنش‌های قابل توجهی در سازه می‌شود که اثرات نامطلوبی دارد و باید در طراحی مدنظر قرار گیرد.

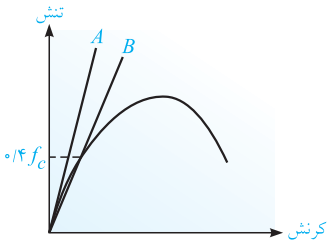
۳) **وزن مخصوص:** مقدار وزن مخصوص بتن غیر مسلح، عمدتاً از وزن مخصوص مصالح سنگی آن ناشی می‌شود و در محدودهٔ مقابل قرار می‌گیرد:

$$w_c = \gamma_c = 15 \sim 25\ kN/m^3$$

۴ **مدول الاستیسیته:** شیب منحنی تنش - کرنش است که معمولاً به دو صورت زیر تعریف می‌شود:

الف) مدول الاستیسیتهٔ مماسی اولیه: شیب خط مماس بر منحنی در مبدأ است که در شکل زیر، معادل با شیب خط A است.

ب) مدول الاستیسیتهٔ سکانتی: شیب خطی است که از مبدأ به نقطه‌ای روی منحنی، متناظر با تنش $0/4f_c$ وصل می‌شود. این تعریف معمولاً به صورت ساده به نام «مدول الاستیسیتهٔ بتن» شناخته می‌شود. شیب خط B در شکل مقابل، معادل با این پارامتر است.



در تمرین بعد، تأثیر پارامترهای مختلف را بر مدول الاستیسیتهٔ بتن بررسی می‌کنیم.

تمرین ۳: هر یک از موارد زیر، چه تأثیری بر مدول الاستیسیتهٔ بتن دارند؟

۱) افزایش درصد استفاده از مصالح دانه‌ای مستحکم‌تر و مرغوب‌تر

۲) افزایش رطوبت محیط

۳) افزایش مقاومت فشاری بتن

حل: تأثیر هر یک از این موارد بر روی مدول الاستیسیته عبارت است از:

۱- افزایش درصد دانه‌های با مقاومت بالاتر در مخلوط بتن، باعث بالا رفتن مقاومت بتن و E_c می‌شود. همچنین افزایش مدول الاستیسیتهٔ اجزای تشکیل دهندهٔ بتن، باعث افزایش مدول الاستیسیتهٔ بتن نیز می‌شود.

۲- آزمایش‌ها نشان می‌دهند که نمونه‌های بتنی که در شرایط مرطوب آزمایش می‌شوند، در حدود ۱۵ درصد مدول الاستیسیتهٔ بالاتری نسبت به نمونه‌های آزمایش شده در شرایط خشک از خود نشان می‌دهند.

۳- با توجه به شکل رسم شده در قسمت اول تمرین (۲)، هر تغییری که باعث افزایش مقاومت فشاری بتن شود، با افزایش شیب نمودار، E_c را نیز بالا می‌برد.

بررسی چند نکته آیین‌نامه‌ای

۱ رابطهٔ مورد استفاده برای تخمین مدول الاستیسیتهٔ بتن، به وزن مخصوص و مقاومت فشاری آن وابسته است. در آیین‌نامهٔ ACI از رابطهٔ زیر برای تخمین E_c استفاده می‌شود:

$$E_c = 0/043\, w_c^{1/5} \sqrt{f_c}$$

توجه شود که در این رابطه، w_c برحسب kg/cm^3 و f_c برحسب kg/cm^2 بوده و E_c برحسب kg/cm^2 به دست می‌آید.

۲ مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، برای بتن‌های معمولی ($23 \le \gamma_c \le 25$ برحسب kN/m^3) مدول الاستیسیته عبارت است از:

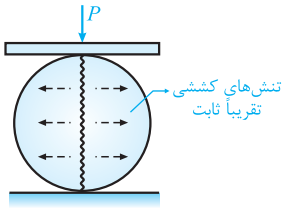
$$E_c = 5000\sqrt{f_c} \qquad (MPa)$$
$$E_c = 15100\sqrt{f_c} \qquad (kg/cm^2)$$

A - ۳- مقاومت کششی بتن

در ابتدای این قسمت باید توجه کنید که هر چند مقاومت کششی بتن کم می‌باشد، ولی صفر نیست. در انجام بسیاری از طراحی‌ها، احتیاج به مقاومت کششی بتن داریم. حالت ایده‌آل برای محاسبهٔ مقاومت کششی بتن این است که مقاومت کششی از طریق آزمایش کشش مستقیم (مشابه با فولاد) اندازه‌گیری شود، اما عملاً به دلیل مشکلات اجرایی هیچ‌گونه آزمایش استانداردی برای این موضوع در آیین‌نامه‌ها وجود ندارد. در ادامه آزمایش‌های مورد استفاده برای تخمین مقاومت کششی بتن شرح داده می‌شود. شایان ذکر است که در این آزمایش‌ها، مقاومت کششی بتن در محدودهٔ ۸ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری بتن به دست می‌آید.

آزمایش کشش خالص (آزمایش برزیلی)

در این آزمایش بار وارد بر یک نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد به طول ۳۰ و قطر ۱۵ سانتی‌متر، باعث ایجاد تنش‌های کششی غیر مستقیم در قطر استوانه می‌شود.



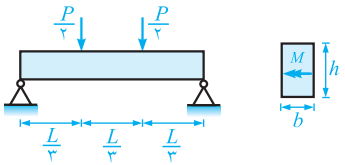
در این آزمایش با افزایش بار، سرانجام در یک مقدار مشخص P، نمونه می‌شکند. تنش کششی که باعث شکسته شدن نمونه می‌شود، از رابطهٔ زیر تعیین شده و مقدار این تنش همان مقاومت کششی بتن با توجه به نتایج این آزمایش است.

$$f_{ct} = \frac{۲P}{\pi LD}$$

تذکر: تحقیقات نشان می‌دهد که نتایج آزمایش کشش خالص، ۱۰ الی ۱۵ درصد بیشتر از مقدار واقعی مقاومت کششی بتن است.

آزمایش خمش

برای سنجش مقاومت کششی بتن تحت کشش **ناشی از خمش**، می‌توان از این آزمایش استفاده کرد. در این حالت، از تیر مقابل استفاده می‌کنند که در یک سوم میانی آن لنگر خمشی ثابت بوده و ناحیهٔ خمش خالص به وجود می‌آید. با افزایش نیروی P سرانجام تیر ترک می‌خورد و با اندازه‌گیری مقدار P در این لحظه، تنش f_r به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:



$$f_r = \text{تنش در تار پایینی مقطع} \Rightarrow f_r = \frac{Mc}{I} = \frac{\frac{PL}{۶} \times \frac{h}{۲}}{\frac{bh^۳}{۱۲}} = \frac{PL}{bh^۲}$$

تمرین ۴: ارتباط بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن در آیین‌نامه‌ها چگونه بررسی می‌شود؟

حل: مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن با یکدیگر مرتبط بوده، ولی رابطهٔ آنها به صورت خطی نمی‌باشد. مقاومت کششی بتن را به صورت تقریبی می‌توان با کمک روابط زیر به دست آورد:

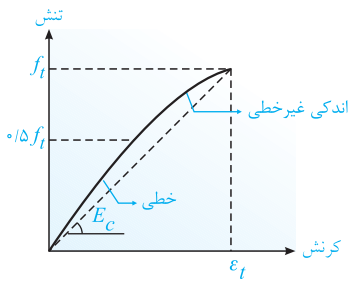
$$f_r = \alpha\sqrt{f_c}$$

در این رابطه اگر f_c برحسب مگاپاسکال باشد، $0/6 < \alpha < 0/7$ بوده و اگر f_c برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع باشد، $1/9 < \alpha < 2/2$ می‌باشد.

چند تذکر:

۱) از f_r به عنوان مدول گسیختگی بتن نیز یاد می‌شود که در محاسبات مربوط به خیز تیرهای بتنی و تعیین مقدار عرض ترک در ناحیهٔ کششی مقطع کاربرد زیادی دارد.

۲) منحنی تنش - کرنش بتن تحت تنش کششی، اندکی غیرخطی می‌باشد؛ اگر چه تا تنشی در حدود ۵۰ درصد مقاومت کششی با تقریب خوبی می‌توان آن را خطی فرض کرد. در ضمن مقدار ε_t با توجه به آزمایش‌های کششی خالص و آزمایش خمش عبارت است از:



در آزمایش کشش خالص $\Rightarrow$ $\varepsilon_t = 0/0001$

در آزمایش خمش $\Rightarrow$ $\varepsilon_t = 0/00014 \sim 0/0002$

۳) در نمودارهای تنش - کرنش بتن که تا قبل از این نمودار بررسی کردیم، محور قائم همواره نشان دهندهٔ تنش فشاری بتن بوده در حالی که در این نمودار محور قائم نشان دهندهٔ تنش کششی بتن است.

۴) با توجه به شکل بالا، منحنی تنش - کرنش بتن تحت کشش را می‌توان با یک خط مستقیم با شیب E_c و تا تنش f_t تقریب زد.

۵) در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، $f_r = 0/6\sqrt{f_c}$ در نظر گرفته می‌شود که f_c برحسب مگاپاسکال است.

در ادامه با حل چند تمرین متنوع، مطالب این بخش را مرور می‌کنیم.

تمرین‌های ادراک و تسلط بیشتر

تمرین ۵: یک نمونهٔ بتنی استوانه‌ای تحت آزمایش فشار تک‌محوری قرار می‌گیرد. اگر در یک حالت مقاومت فشاری بتن زیاد شده و در حالت دیگر سرعت اعمال بار وارد بر نمونه کاهش یابد، کرنش نظیر مقاومت فشاری ($\varepsilon_\circ$) به ترتیب ..... و ..... یافته و کرنش نظیر نقطهٔ شکست (ε_{cu}) به ترتیب ..... و ..... می‌یابد.

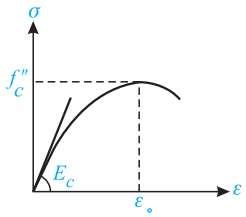
۱) افزایش، کاهش، افزایش، کاهش
۲) تقریباً ثابت، ثابت، افزایش، کاهش
۳) ثابت، افزایش، افزایش، کاهش
۴) تقریباً ثابت، کاهش، افزایش، افزایش

حل: در صورتی که مقاومت فشاری بتن زیاد شود، مقدار $\varepsilon_\circ$ با تقریب مناسبی ثابت می‌ماند، ولی کرنش نهایی در نقطهٔ شکست (ε_{cu}) کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با کاهش سرعت بارگذاری نمونه، نمودار تنش - کرنش کشیده‌تر می‌شود؛ به عبارت دیگر هر دو پارامتر $\varepsilon_\circ$ و ε_{cu} بیشتر می‌شوند. با توجه به موارد بیان شده گزینهٔ (۴) صحیح است. برای درک بهتر این تمرین، می‌توانید به تمرین (۲) نیز مراجعه کنید.

تمرین ۶: مقاومت فشاری بتن با گذشت زمان چگونه تغییر می‌کند؟

حل: تحت شرایط ثابت رطوبت محیط و دما، با گذشت زمان مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد و پس از ۲۸ روز، در حدود ۹۰ درصد مقاومت خود را به‌دست می‌آورد. آیین‌نامه‌ها آزمایشات خود را برای مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ بتن ارائه می‌دهند.

تمرین ۷: در منحنی تنش - کرنش بتن در فشار، تنش ماکزیمم را با f_c'' و کرنش متناظر با آن را با $\varepsilon_\circ$ و ضریب ارتجاعی اولیهٔ بتن را با E_c نشان می‌دهیم. اکثر محققین و آیین‌نامه‌ها، شاخهٔ صعودی اولیهٔ منحنی را با یک منحنی سهمی مدل می‌کنند. در این صورت می‌توان نوشت: (سراسری ۹۱)



۱) $\varepsilon_\circ = \frac{۱/۷ f_c''}{E_c}$
۲) $\varepsilon_\circ = \frac{f_c''}{E_c}$
۳) $\varepsilon_\circ = \frac{۰/۸۵ f_c''}{E_c}$
۴) $\varepsilon_\circ = \frac{۲ f_c''}{E_c}$

حل: معادلهٔ شاخهٔ صعودی منحنی را به صورت معادلهٔ یک سهمی مطابق روابط زیر می‌نویسیم:

$$\begin{cases} y = ax^۲ + bx + c \\ y' = ۲ax + b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma = a\varepsilon^۲ + b\varepsilon + c \\ \sigma' = ۲a\varepsilon + b \end{cases}$$

اطلاعات داده شده با توجه به شکل منحنی، به شرح زیر است:

$\varepsilon = ۰ \Rightarrow \sigma = ۰ \ , \ \sigma' = E_c$ (شیب) $\qquad \varepsilon = \varepsilon_\circ \Rightarrow \sigma = f_c'' \ , \ \sigma' = ۰$ (شیب)

در ادامه، این اطلاعات را در معادلات فوق جایگذاری می‌کنیم تا پارامترهای a ، b و c بدست آید:

مختصات نقطهٔ مبدأ: $\begin{cases} \varepsilon = ۰ \\ \sigma = ۰ \end{cases} \Rightarrow ۰ = ۰ + ۰ + c \Rightarrow c = ۰$

شیب نقطهٔ مبدأ: $\begin{cases} \varepsilon = ۰ \\ \sigma' = E_c \end{cases} \Rightarrow E_c = ۲a \times ۰ + b \Rightarrow b = E_c$

مختصات قلهٔ منحنی: $\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_\circ \\ \sigma = f_c'' \end{cases} \Rightarrow f_c'' = a\varepsilon_\circ^۲ + E_c \varepsilon_\circ \Rightarrow a = \frac{f_c'' - E_c \varepsilon_\circ}{\varepsilon_\circ^۲}$

معادلهٔ تکمیل شدهٔ این منحنی به‌صورت مقابل خواهد شد:

$$\sigma = \frac{f_c'' - E_c\,\varepsilon_\circ}{\varepsilon_\circ^2}\,\varepsilon^2 + E_c\,\varepsilon$$

از سه دادهٔ مسئله استفاده کرده‌ایم، با چهارمین دادهٔ مسئله، خواستهٔ مسئله که همان ارتباط بین $\varepsilon_\circ$، f_c'' و E_c است را می‌توانیم به‌دست آوریم. به همین منظور با توجه به صفر بودن شیب در قلهٔ منحنی داریم:

$$\sigma' = ۲\left(\frac{f_c'' - E_c\,\varepsilon_\circ}{\varepsilon_\circ^2}\right)\varepsilon + E_c$$

$$\text{شیب نقطهٔ اوج}: \begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_\circ \\ \sigma' = \circ \end{cases} \Rightarrow \circ = ۲\left(\frac{f_c'' - E_c\,\varepsilon_\circ}{\varepsilon_\circ^2}\right)\times\varepsilon_\circ + E_c \Rightarrow \varepsilon_\circ = \frac{۲f_c''}{E_c}$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

بیشتر بدانید

رابطهٔ به‌دست آمده که توسط هاگنستاد پیشنهاد شده است، در نهایت به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\sigma = f_c''\left[\frac{۲\varepsilon}{\varepsilon_\circ} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_\circ}\right)^2\right]$$

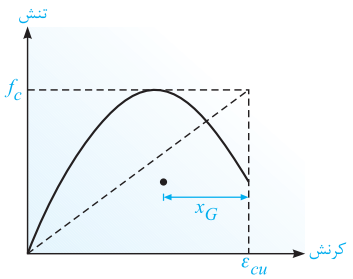
در رابطهٔ فوق f_c'' تنش حداکثری است که در عضو بتنی حاصل می‌شود، در حالی که f_c' که از نمونه‌های استوانه‌ای به‌دست می‌آید مربوط به مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای است. مقدار f_c'' به صورت $f_c'' = k_s f_c'$ به‌دست می‌آید که ضریب k_s را می‌توان برای بتن‌هایی با مقاومت فشاری استوانه‌ای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و مساوی یا بزرگ‌تر از ۳۵ مگاپاسکال، به ترتیب برابر ۱/۰، ۰/۹۷، ۰/۹۵، ۰/۹۳ و ۰/۹۲ در نظر گرفت.

دقت: منحنی تنش - کرنش فشاری بتن را همچنین می‌توان بر اساس معادلهٔ تودسچینی که به صورت زیر است نیز نشان داد:

$$\sigma = \frac{۲f_c''\,(\varepsilon/\varepsilon_{cu})}{۱ + (\varepsilon/\varepsilon_\circ)^2}$$

تمرین ۸: مساحت و محل مرکز سطح نمودار تنش - کرنش بتن، کاربرد زیادی در محاسبات فصل‌های بعد دارد. این موارد را بر حسب پارامترهای f_c و ε_{cu} چگونه می‌توان تخمین زد؟

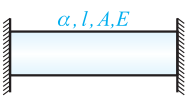
حل: با توجه به شکل زیر، منحنی تنش - کرنش بتن درون یک مستطیل با ابعاد f_c و ε_{cu} محبوس است. مساحت و مرکز سطح نمودار تنش-کرنش با استفاده از ضرایب $x_۱$ و $x_۲$ به دست می‌آیند:



$$\begin{cases} S = x_۱(\varepsilon_{cu} f_c) \Rightarrow \frac{۱}{۲} < x_۱ < ۱ \\ x_G = x_۲\,\varepsilon_{cu} \Rightarrow \frac{۱}{۳} < x_۲ < \frac{۱}{۲} \end{cases}$$

توجه شود که برای f_c کوچک، نمودار تقریباً یک مستطیل است. در این حالت $x_۱ = ۱$ و $x_۲ = \frac{۱}{۲}$ می‌باشد یعنی مساحت نمودار $\varepsilon_{cu} f_c$ و مرکز سطح آن $x_G = \frac{۱}{۲}\varepsilon_{cu}$ است. از طرفی برای f_c بزرگ، نمودار تقریباً یک مثلث است؛ یعنی مساحت نمودار $\frac{۱}{۲}\varepsilon_{cu} f_c$ و مرکز سطح آن $x_G = \frac{۱}{۳}\varepsilon_{cu}$ است. دقت شود که از این دو حالت حدی برای پیدا کردن بازه‌های فوق کمک گرفته‌ایم.

تمرین ۹: در تیر بتنی خالص دو سر گیردار نشان داده شده:

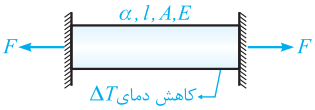


الف) حداقل اختلاف دمای بین شب و روز چقدر باشد تا تیر بتنی ترک بخورد؟ (مدول ترک خوردگی بتن را f_r در نظر بگیرید)

ب) اگر مقاومت فشاری بتن مورد استفاده ۴۴ درصد افزایش یابد، میزان اختلاف دمای لازم برای ترک خوردن تیر بتنی چند برابر می‌شود؟

حل:

الف) با توجه به شرایط تکیه‌گاهی، تغییر طول نمونهٔ بتنی صفر است. در صورتی که دمای تیر بتنی کاهش یابد، در آن نیروی کششی ایجاد می‌شود که سبب می‌شود تیر بتنی ترک بخورد. در ادامه با کمک روابط مقاومت مصالح می‌توان نوشت:



$$\Delta L = 0 \Rightarrow \frac{Fl}{AE} - \alpha l \Delta T = 0 \Rightarrow F = AE\alpha\Delta T \Rightarrow \sigma = \frac{F}{A} = E\alpha\Delta T$$

شرط ترک خوردن : $\sigma = f_r \Rightarrow E\alpha\Delta T = f_r \Rightarrow \Delta T = \frac{f_r}{E\alpha}$

ب) اگر مقاومت فشاری بتن مورد استفاده ۴۴ درصد افزایش یابد، داریم:

$$f_{c_2} = f_{c_1} + 0/44 f_{c_1} = 1/44 f_{c_1} \quad , \quad f_r \propto \sqrt{f_c}$$

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{f_{r_2}}{f_{r_1}} = \sqrt{\frac{f_{c_2}}{f_{c_1}}} = \sqrt{1/44} = 1/2$$

یعنی میزان تغییر دمای لازم برای ترک خوردن تیر، ۱/۲ برابر می‌شود.

تمرین ۱۰: اگر مقاومت فشاری بتن $20\ MPa$، ضریب ارتجاعی بتن $16\times10^3\ MPa$ و $\alpha = 10^{-5}/^\circ C$ باشد، اختلاف درجهٔ حرارت شب و روز چقدر باشد تا عضو بتنی نشان داده شده در فشار خرد شود؟

۱) ۱۲۵
۲) ۲۵۰
۳) ۳۰۰
۴) ۶۰۰

حل: در صورتی که دمای عضو افزایش یافته و تنش فشاری ایجاد شده در بتن برابر f_c شود، عضو بتنی در فشار خرد می‌شود. به همین منظور باید دمای عضو به اندازهٔ ΔT افزایش یابد و مقدار ΔT به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta L = 0 \Rightarrow -\frac{FL}{AE} + \alpha L \Delta T = 0 \Rightarrow \text{تنش} = \frac{F}{A} = \alpha E \Delta T = f_c$$

$$\Delta T = \frac{f_c}{\alpha E} = \frac{20}{10^{-5}\times16\times10^3} = 125\ ^\circ C$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

دقت: در تمرین (۹) نیاز است که دمای هوا کاهش یابد تا در تیر کشش ایجاد شده و تیر ترک بخورد، اما در تمرین (۱۰) نیاز است تا دمای هوا افزایش یابد تا در تیر فشار ایجاد شده و تیر در فشار خرد شود.

تمرین ۱۱: در طراحی یک ساختمان بتنی، مقاومت مشخصهٔ محاسباتی بتن مصرفی برابر $35MPa$ فرض شده است. بر اساس نتایج آزمایشگاه مصالح، مقاومت سه نمونه از بتن مصرفی برابر ۳۷، ۴۰ و ۳۰ مگاپاسکال بوده است. بتن مصرف شده بر اساس معیارهای متعارف دارای چه حالتی است؟

۱) بتن در شرایط خاص با تمهیدات تقویتی قابل قبول است.

۲) بتن غیر قابل قبول است.

۳) بتن قابل قبول است.

۴) این بتن برای کاربرد در اجزاء ثانویهٔ سازه‌ای قابل قبول است.

حل: برای پاسخ‌گویی به این سؤال ابتدا به بحث پذیرش نمونه‌های آزمایشگاهی در آیین‌نامه توجه کنید.

نکته آیین‌نامه‌ای

بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، بتن‌های ساخته شده در کارگاه در صورتی قابل قبول تلقی می‌شوند که یکی از شرایط زیر برقرار باشد:

الف) در آزمایش سه نمونهٔ متوالی، مقاومت هیچ کدام از نمونه‌ها کمتر از مقاومت فشاری مشخصه نباشد.

$$x_{۱,۲,۳} \geq f_c$$

ب) متوسط مقاومت نمونه‌ها، حداقل ۱/۵ مگاپاسکال بیش از مقاومت مشخصه باشد. همچنین کوچک‌ترین مقاومت نمونه‌ها، از مقاومت مشخصهٔ نهایی منهای ۴ مگاپاسکال کمتر نباشد.

$$\begin{cases} \bar{x} \geq f_c + ۱/۵ \\ x_{min} \geq f_c - ۴ \end{cases}$$

در صورتی که یکی از شرایط زیر وجود داشته باشد، بتن غیر قابل قبول تلقی می‌شود:

$\bar{x} < f_c$ یا $x_{min} < f_c - ۴ \Rightarrow$ بتن قطعاً غیر قابل قبول است.

حال برای پاسخ‌گویی به این تست، مقادیر متوسط و حداقل مقاومت نمونه‌ها را تعیین کرده و با مقادیر آیین‌نامه‌ای مقایسه می‌کنیم:

$$\bar{x} = \frac{۳۷ + ۴۰ + ۳۰}{۳} = ۳۶\ MPa$$

$$x_{min} = ۳۰\ MPa < f_c - ۴ = ۳۱\ MPa$$

با توجه به اینکه $x_{min} < f_c - ۴$ شده است، بتن غیر قابل قبول تلقی شده و گزینهٔ (۲) صحیح است. این تمرین را که بر مبنای ضوابط آیین‌نامه طرح شده است، به دلیل کاربردی بودن در مسائل اجرایی و همچنین تکرار زیاد در امتحانات مختلف از جمله آزمون‌های نظام مهندسی ساختمان در این‌جا مطرح کرده‌ایم.

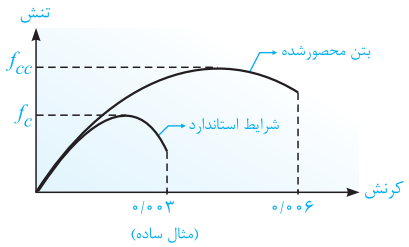
مقدمه

در قسمت دوم این فصل، ابتدا می‌خواهیم رفتار بتن را تحت تنش‌هایی که در چند جهت بر آن وارد می‌شود، بررسی کنیم و سپس پدیده‌هایی مانند خزش، جمع‌شدگی، وادادگی و خستگی را بشناسیم. در نهایت نیز ویژگی‌های انواع میلگردها را شناخته و با بتن پیش‌تنیده که ایده‌ای جالب برای رفع ضعف بتن در کشش محسوب می‌شود، آشنا می‌شویم.

B – ۱– رفتار بتن تحت تنش‌های چند محوره و محصورشدگی بتن

همان‌طور که در قسمت اول فصل بحث کردیم، آزمایش مقاومت فشاری در نمونه‌های استوانه‌ای، باعث ایجاد شرایط تنش تک‌محورهٔ فشاری در وسط نمونه می‌شود اما آزمایش‌ها نشان می‌دهد در صورتی که به جز فشار محوری، نیروهای دیگری نیز از اطراف نمونه بر آن وارد شود، رفتار بتن تغییر خواهد کرد.

به طور مثال چنانچه نمونهٔ بتنی در زمان بارگذاری تحت تأثیر فشار جانبی از اطراف قرار گیرد، تغییرشکل جانبی آن محدود می‌شود. این موضوع سبب می‌شود که مقاومت فشاری بتن افزایش یافته و همچنین کرنش نهایی آن به طور قابل ملاحظه‌ای زیاد شود. در این حالت در اصطلاح **شرایط محصورشدگی** ایجاد شده و رفتار بتن به مراتب شکل‌پذیرتر خواهد شد.



$\Rightarrow$ پدیدهٔ محصورشدگی، پارامترهای f_c و ε_{cu} را افزایش می‌دهد.

f_c : نمایندهٔ مقاومت

ε_{cu} : نمایندهٔ شکل‌پذیری

درک بهتر:

تصور کنید در اطراف یک نمونهٔ بتنی که تحت نیروی فشاری P قرار دارد، یک غلاف فولادی قرار داده‌اید، این غلاف فولادی تغییرشکل‌های جانبی نمونه را محدود کرده و مقاومت آن را تحت نیروهای فشاری افزایش می‌دهد.

توجه: رفتار بتن محصور شده به دلیل امکان جذب انرژی وارد بر سازه، برای تأمین شکل‌پذیری در مقابل زلزله بسیار مناسب می‌باشد. توجه شود که مساحت زیر نمودار تنش - کرنش، نمایندهٔ چگالی انرژی جذب شده توسط ماده است.

قسمت دوم (آشنایی با اتفاقاتی که بر روی بتن رخ می‌دهد)

زیر شاخه‌های قسمت دوم

B–۱– رفتار بتن تحت تنش‌های چند محوره و محصورشدگی
B–۲– افت یا انقباض بتن
B–۳– خزش (Creep)
B–۴– خستگی در سازه‌های بتنی
B–۵– بررسی میلگردهای مورد استفاده در بتن مسلح
B–۶– معرفی بتن پیش‌تنیده

تست‌های فصل اول

۱- کدام عبارت برای مقایسهٔ ویژگی‌های بتن و فولاد نادرست است؟

۱) بتن و فولاد هر دو در برابر نیروی فشاری مقاومت مناسبی دارند.
۲) مقاومت فولاد در برابر نیروی کششی مناسب است، ولی بتن در برابر کشش مقاومت مطلوبی ندارد.
۳) دوام سازه‌های بتنی بسیار کمتر از دوام سازه‌های فولادی است.
۴) بتن در برابر آتش‌سوزی مقاوم است، ولی فولاد مقاومت کمی در برابر دمای زیاد دارد.

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

۱) تشکیل ریزترک‌ها
۲) تغییرات سرعت بارگذاری نمونه
۳) رفتار غیرخطی فولادهای مسلح‌کننده
۴) رفتار غیرخطی سنگدانه‌ها

۳- در طراحی قطعات بتن مسلح به روش حد نهایی و مستقل از آیین‌نامه‌ها، مقدار کرنش کاهشی بتن در مقاطع تحت فشار ساده معمولاً به چه مقداری محدود می‌شود؟

۱) ۰/۲ در هزار
۲) ۲ در هزار
۳) ۲۰ در هزار
۴) با توجه به رفتار مورد انتظار از مقطع تحت فشار بتنی، معمولاً مقدار کرنش کاهشی به صفر محدود می‌شود.

۴- کدام‌یک از مشخصات مکانیکی زیر، برای میلگردهای مختلف تقریباً ثابت است؟

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

۵- اگر مقاومت فشاری به‌دست آمده از آزمایش نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد ($۱۵۰mm \times ۳۰۰mm$) برای یک نمونه بتن برابر f_{cy} و از آزمایش مکعبی استاندارد (طول ضلع $۱۵۰mm$) برای همان بتن برابر f_{cu} باشد، آنگاه ..... .

۱) $f_{cu} > f_{cy}$
۲) $f_{cu} < f_{cy}$
۳) $f_{cu} \simeq f_{cy}$
۴) $f_{cy} = ۲f_{cu}$

۶- با اعمال کدام‌یک از شرایط زیر، کرنش نهایی نمونه‌های آزمایشگاهی بتنی افزایش می‌یابد؟

۱) کاهش مقاومت فشاری بتن، افزایش سرعت بارگذاری، افزایش فشار جانبی
۲) کاهش مقاومت فشاری بتن، کاهش سرعت بارگذاری، افزایش فشار جانبی
۳) افزایش مقاومت فشاری بتن، افزایش سرعت بارگذاری، افزایش فشار جانبی
۴) افزایش مقاومت فشاری بتن، کاهش سرعت بارگذاری، کاهش فشار جانبی

۷- افزایش سرعت بارگذاری روی نمونهٔ استوانه‌ای بتنی، چه تأثیری در نمودار تنش - کرنش بتن دارد؟

۱) مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد.
۲) E را کاهش می‌دهد.
۳) جذب انرژی را کاهش می‌دهد.
۴) کرنش نهایی را افزایش می‌دهد.

۸- مدول گسیختگی بتن به چه معنی است؟

۱) مدول الاستیسیتهٔ مماسی بتن در لحظهٔ گسیختگی است.
۲) مقاومت کششی بتن تحت آزمایش کشش دو محوره است.
۳) مقاومت فشاری بتن تحت آزمایش فشار دو محوره است.
۴) مقاومت کششی بتن تحت خمش خالص است.

۹- بهترین گزینه را انتخاب کنید. (سراسری ۷۰)

۱) مدول الاستیسیتهٔ بتن تابعی از مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن است.
۲) مدول الاستیسیتهٔ بتن تابعی از مقاومت کششی و چگالی (وزن مخصوص) بتن است.
۳) مدول الاستیسیتهٔ بتن تابعی از مقاومت فشاری و چگالی (وزن مخصوص) بتن است.
۴) مدول الاستیسیتهٔ بتن تابعی از مقاومت کششی و سرعت بارگذاری است.

۱۰- چنانچه در منحنی تنش - کرنش بتن، کرنش نظیر مقاومت فشاری بتن را با $\varepsilon_\circ$ و کرنش نظیر نقطهٔ شکست بتن را با ε_{cu} نمایش دهیم، با افزایش مقاومت فشاری بتن کدام اظهارنظر صحیح است؟ (سراسری ۷۱)

۱) $\varepsilon_\circ$ و ε_{cu} هر دو افزایش می‌یابند.
۲) $\varepsilon_\circ$ و ε_{cu} هر دو کاهش می‌یابند.
۳) تغییر محسوسی در $\varepsilon_\circ$ و ε_{cu} روی نمی‌دهد.
۴) $\varepsilon_\circ$ تقریباً ثابت باقی مانده و ε_{cu} کاهش می‌یابد.

۱۱- یک عضو بتن‌آرمه شامل ۱ درصد فولاد است و کرنش انقباضی آزاد بتن $\varepsilon_{sh} = ۲۰۰\times۱۰^{-۶}$ می‌باشد. برای فولاد $E_s = ۲۰۰\,kN/mm^۲$ و برای بتن $E_c = ۱۵\,kN/mm^۲$ است. اگر عضو آزاد از موانع خارجی در نظر گرفته شود، تنش‌های حاصله در بتن و آرماتور به‌ترتیب بر حسب $N/mm^۲$ برابرند با: (سراسری ۸۹)

۱) ۰/۳۵ (کششی) و ۰/۳۵ (فشاری)
۲) ۰/۲ (کششی) و ۴۰ (فشاری)
۳) ۰/۳۵ (کششی) و ۳۵/۳ (فشاری)
۴) ۱/۰ (کششی) و ۱/۰ (فشاری)

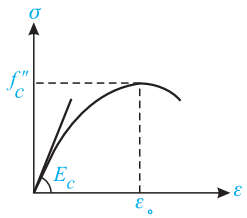
۱۲- در صورتی که مقاومت کششی بتن $f_t = ۲N/mm^۲$ و ضریب ارتجاعی بتن $E_c = ۱۶kN/mm^۲$ و ضرایب انبساط حرارتی بتن و فولاد $\alpha_c = \alpha_s = ۱۰\times۱۰^{-۶}/^\circ C$ باشد، اختلاف درجه حرارت شب و روز چقدر باید باشد تا ترک‌خوردگی در یک سازه کاملاً گیردار (مقید) ایجاد گردد؟ (سراسری ۸۹)

۱) $۸^\circ C$
۲) $۱۲/۵^\circ C$
۳) $۱۰^\circ C$
۴) $۱۵^\circ C$

۱۳- کدام یک از جملات زیر، در مورد منحنی تنش-کرنش بتن صحیح نمی‌باشد؟ (سراسری ۹۱)

۱) چنانچه نمونه در زمان بارگذاری تحت تأثیر فشار جانبی نیز قرار گیرد، مقاومت فشاری آن افزایش می‌یابد.
۲) هر چه بتن تحت تنش فشاری تک محورهٔ بالاتری قرار گیرد، رفتار غیرخطی آن بیشتر آشکار می‌شود.
۳) با افزایش مقاومت فشاری مشخصهٔ بتن، کرنش نهایی شکست کاهش می‌یابد.
۴) در فشار تک محوره با کاهش سرعت بارگذاری، حداکثر مقاومت فشاری افزایش یافته ولی کرنش نظیر تنش حداکثر کاهش می‌یابد.

۱۴- در منحنی تنش - کرنش بتن در فشار، تنش ماکزیمم را با f_c'' و کرنش متناظر با آن را با ε_0 و ضریب ارتجاعی اولیهٔ بتن را با E_c نشان می‌دهیم. اکثر محققین و آیین‌نامه‌ها، شاخهٔ صعودی اولیهٔ منحنی را با یک منحنی سهمی مدل می‌کنند. در این صورت می‌توان نوشت: (سراسری ۹۱)



۱) $\varepsilon_0 = \frac{1/7 f_c''}{E_c}$

۲) $\varepsilon_0 = \frac{f_c''}{E_c}$

۳) $\varepsilon_0 = \frac{0/85 f_c''}{E_c}$

۴) $\varepsilon_0 = \frac{2 f_c''}{E_c}$

۱۵- در صورتی که مقاومت ۲۸ روزهٔ نمونهٔ مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر برابر $30\ MPa$ باشد، مدول گسیختگی بتن چقدر خواهد شد؟

۱) $0/6\sqrt{36}$ ۲) $0/6\sqrt{30}$ ۳) $0/6\sqrt{24}$ ۴) $0/6\sqrt{20}$

پاسخ تست‌های فصل اول

۱- (۳)

برای پاسخ‌گویی به این تست، ویژگی‌های گفته شده در گزینه‌ها در مورد بتن و فولاد را مقایسه می‌کنیم.

الف) مقاومت در فشار: مقاومت بتن و فولاد در برابر فشار مطلوب است ولی باید به مسئله کمانش مخصوصاً در اعضای فولادی توجه شود.

ب) مقاومت در کشش: مقاومت فولاد در برابر نیروی کششی مطلوب اما مقاومت بتن بسیار کمتر است.

ج) دوام: پایداری و دوام بتن در برابر شرایط محیطی مناسب بوده ولی دوام فولاد کمتر از بتن می‌باشد، زیرا پدیده‌هایی نظیر زنگ‌زدگی و خوردگی نیز در فولاد وجود دارند.

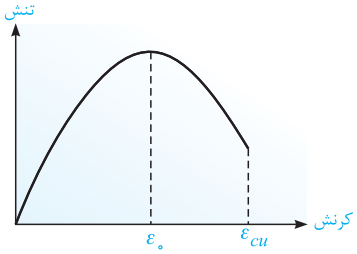
د) مقاومت در برابر آتش‌سوزی: مقاومت بتن در برابر آتش‌سوزی مناسب است ولی فولاد در برابر حرارت نرم شده و مقدار زیادی از مقاومت خود را از دست می‌دهد.

با توجه به توضیحات ارائه شده، تنها عبارت گزینهٔ (۳) نادرست است.

۲- (۱)

تغییرشکل بتن تحت فشار تک محوره به صورت غیرخطی است؛ به طوری که هر چه بتن تحت تنش فشاری بالاتری قرار گیرد، رفتار غیرخطی آن بیشتر آشکار می‌شود (به نمودار تنش - کرنش بتن توجه کنید). رفتار غیرخطی بتن تحت تنش فشاری ناشی از تشکیل تدریجی ریزترک‌ها (*microcracks*) در آن است؛ به طوری که هرچه تنش افزایش یابد، تعداد ریزترک‌ها نیز افزایش خواهد یافت. این موضوع به‌دلیل ماهیت متخلخل بتن است.

۳- (۲)



منظور از کرنش کاهشی بتن، کرنش به ازای تنش f_c است که بعد از آن تنش نمونه کاهش می‌یابد. این کرنش که با $\varepsilon_{\circ}$ یا ε_{cf} نشان داده می‌شود، برای اغلب بتن‌ها ثابت و در حدود ۰/۰۰۲ است (یعنی ۲ در هزار).

توجه: از آنجا که در صورت سوال کرنش کاهشی بتن در مقاطع تحت فشار ساده مدنظر می‌باشد، شرایط محصورشدگی در این حالت وجود ندارد، ولی اگر شرایط محصورشدگی وجود داشته باشد، کرنش $\varepsilon_{\circ}$ بیشتر از ۰/۰۰۲ می‌تواند بشود.

۴- (۲)

مدول الاستیسیتهٔ انواع فولاد تقریباً ثابت و برابر $2\times10^5\ MPa$ است و در نتیجه گزینهٔ (۲) صحیح است.

۵- (۱)

با توجه به قسمت ($A-1$) از درسنامه، گزینهٔ (۱) صحیح است.

۶- (۲)

با توجه به توضیحات و شکل‌های تمرین (۲) و قسمت ($B-1$) از درسنامه، می‌دانیم که با اعمال هر کدام از شرایط گزینهٔ (۲)، کرنش نهایی نمونهٔ بتنی افزایش می‌یابد.

۷- (۳)

در صورتی که سرعت اعمال بارگذاری بر نمونه افزایش یابد، نمونه رفتار تردتری از خود نشان داده و جذب انرژی آن کاهش می‌یابد زیرا سطح زیر نمودار آن کم می‌شود. از طرف دیگر در این حالت مقدار E (شیب نمودار) و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و کرنش نهایی بتن کاهش پیدا می‌کند. برای فهم بهتر به شکل تمرین (۲) رجوع کنید (در سرعت زیاد، اثرات خزش نیز در نمونه ظاهر نمی‌شود).

۸- (۴)

با توجه به قسمت ($A-۳$) از درسنامه، مدول گسیختگی بتن (f_r) برابر حداکثر تنش کششی است که مقطع در آزمایش خمش تحمل می‌کند.

۹- (۳)

در مواد مرکبی چون بتن، عوامل مختلفی تعیین کنندهٔ خصوصیات مکانیکی و از جمله مدول الاستیسیته می‌باشند. از این میان، روابطی که برای تعیین E_c در آیین‌نامه‌ها داده شده است، عمدتاً شامل دو پارامتر اصلی یعنی مقاومت فشاری (f_c) و وزن مخصوص بتن (w_c) می‌باشند.

$$E_c = ۰/۰۴۳ w_c^{۱/۵} \sqrt{f_c}$$

۱۰- (۴)

با توجه به نکات گفته شده در تمرین (۲) از درسنامه، گزینهٔ (۴) صحیح است.

۱۱- (۳)

با توجه به قسمت (الف) از تمرین (۱۴) در درسنامه، گزینهٔ (۳) صحیح است.

کمی فکر: آیا با توجه به رابطهٔ $f_{st} = \frac{A_c}{A_s} f_{ct}$ که در درسنامه با تعادل به آن رسیدیم، بدون حل می‌توان گزینهٔ (۳) را انتخاب کرد؟

۱۲- (۲)

با توجه به تمرین (۹) در درسنامه، میزان ΔT برابر است با:

$$\Delta T = \frac{f_r}{E\alpha} = \frac{۲}{۱۶\times۱۰^{۳}\times۱۰\times۱۰^{-۶}} = ۱۲/۵^{\circ}C$$

۱۳- (۴)

برای یک نمونهٔ بتنی تحت فشار تک محوره، در صورتی که سرعت بارگذاری کاهش یابد، f_c کاهش یافته ولی شکل‌پذیری و کرنش نهایی بتن (ε_{cu}) افزایش می‌یابد. دقت شود که در این حالت کرنش نظیر تنش حداکثر یعنی $\varepsilon_{\circ}$ افزایش می‌یابد، بنابراین عبارت گزینه (۴) نادرست است.

۱۴- (۴)

برای حل کامل این سوال، به تمرین (۷) از درسنامه رجوع کنید.

۱۵- (۳)

با توجه به نکات تمرین (۱) از درسنامه، نوع نمونه بر مقاومت فشاری بتن اثر می‌گذارد؛ به صورتی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد (۱۵۰×۳۰۰) در حدود ۸۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی با بعد ۱۵۰ میلی‌متر و در حدود ۸۳ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی با بعد ۲۰۰ میلی‌متر است.

$$f_{c\,(۱۵۰\times۳۰۰)} = ۰/۸ \quad f_{cu\,(۱۵۰)} = ۰/۸۳ \quad f_{cu\,(۲۰۰)}$$

از طرف دیگر می‌دانیم که برای انجام محاسبات، همواره از مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. بنابراین تمامی نتایج آزمایشات دیگر ابتدا باید به مقاومت نمونهٔ استاندارد استوانه‌ای تبدیل شوند. بنابراین در این سؤال داریم:

$$f_c = f_{c\,(۱۵۰\times۳۰۰)} = ۰/۸\, f_{cu\,(۱۵۰)} = ۰/۸\times۳۰ = ۲۴\ MPa$$

$$f_r = ۰/۶\sqrt{f_c} = ۰/۶\sqrt{۲۴}$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح می‌باشد.