وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

موسسه آموزش عالی فردوس

سازه‌های بتن آرمه

مطابق سرفصل‌های دوره کارشناسی

مهندسی معماری

گردآوری و تنظیم

مهندس داود مجیدی نصرآبادی

زمستان ۱۴۰۰

بسم الله الرحمن الرحيم

فهرست مطالب

۱- آشنایی با بتن مسلّح..... ۲

۱-۱ مقدمه..... ۲

۱-۲ سازگاری بتن و فولاد..... ۳

۱-۳ پیشینه‌ی تاریخی بتن‌آرمه..... ۳

۱-۴ مزایا و معایب بتن‌آرمه..... ۵

۱-۵ بتن پیش‌تنیده..... ۷

۱-۶ آئین‌نامه‌های طراحی..... ۹

۲- مشخصات فنی بتن..... ۱۴

۲-۱ خصوصیات مصالح در بتن‌آرمه..... ۱۴

۲-۱-۱ سیمان و اجزاء آن..... ۱۴

۲-۱-۱-۱ انواع سیمان و خواصّ آن‌ها..... ۱۵

۲-۱-۲ سنگ‌دانه ها..... ۱۶

۲-۱-۲-۱ رطوبت سطحی و جذب آب دانه‌ها..... ۱۸

۲-۱-۳ آب بتن..... ۱۹

۲-۱-۴ مواد مضاف..... ۲۰

۲-۲ مقاومت فشاری بتن..... ۲۳

۲-۲-۱ عوامل موثر بر مقاومت فشاری بتن..... ۲۵

۲-۲-۱-۱ اثر نوع نمونه..... ۲۵

۲-۲-۱-۲ اثر اندازه‌ی نمونه..... ۲۶

۲-۲-۱-۳ اثر سرعت بارگذاری..... ۲۶

۴-۱-۲-۲ اثر نوع سیمان مصرفی..... ۲۷
۵-۱-۲-۲ اثر نسبت آب به سیمان..... ۲۸
۶-۱-۲-۲ اثر مواد مضاف معدنی..... ۲۹
۷-۱-۲-۲ اثر خصوصیات سنگدانه ها..... ۳۰
۸-۱-۲-۲ اثر شرایط مراقبت از بتن..... ۳۱
۳-۲ منحنی تنش – کرنش بتن..... ۳۵
۴-۲ مدول الاستیسیته بتن..... ۳۶
۱-۴-۲ مدول الاستیسیته استاتیکی بتن..... ۳۷
۲-۴-۲ مدول الاستیسیته دینامیکی بتن..... ۳۸
۳-۴-۲ مدول الاستیسیته خمشی بتن..... ۳۹
۴-۴-۲ عوامل موثر بر مدول الاستیسیته‌ی بتن..... ۳۹
۵-۲ ضریب پواسون بتن..... ۴۰
۶-۲ مقاومت کششی تک محوره بتن..... ۴۰
۱-۶-۲ مقاومت کششی بتن تحت اثر کشش خالص..... ۴۰
۲-۶-۲ مقاومت کششی بتن تحت اثر کشش ناشی از خمش..... ۴۱
۳-۶-۲ رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن..... ۴۲
۷-۲ رفتار بتن تحت اثر تنش چند محوره..... ۴۳
۸-۲ مقاومت خستگی بتن..... ۴۴
۹-۲ ارزیابی و پذیرش بتن..... ۴۵
۱-۹-۲ پذیرش نمونه های آزمایشگاهی..... ۴۵
۲-۹-۲ تواتر نمونه برداری..... ۴۵
۳-۹-۲ ضوابط پذیرش مقاومت بتن..... ۴۶

۴-۹-۲ بررسی نتایج بتن کم مقاومت..... ۴۶
۳- طراحی سازه های بتن آرمه..... ۲۶
۳-۱ مقدمه..... ۲۶
۳-۲ طراحی تیرهای بتن آرمه..... ۲۶
۳-۳ طراحی ستون های بتن آرمه..... ۲۶
۳-۴ طراحی پی های بتن آرمه..... ۲۶
۳-۵ آشنایی با دیوارهای بتن آرمه..... ۲۶
۴- پیوست..... ۱۳۴

پیشگفتار

در ترم گذشته، دانشجویان با سازه‌های فلزی و بخصوص سازه‌های ساخته شده با آلیاژ فولاد آشنا و مباحث مربوط به این سازه‌ها مورد نقد و بررسی قرار گرفت. سازه های بتنی نیز گونه ای از سازه های متعارف هستند که بنا به ویژگی های خاص خود در صنعت ساختمان از آنها استفاده می‌گردد. این سازه ها نسبت به سازه های فولادی دارای مفاهیم جدیدی هستند که لازم است دانشجویان عزیز زمان ویژه ای برای فهم و بکارگیری این مفاهیم منظور نمایند. دانشجویان در این درس با فرآیند تولید و ویژگی های سازه های بتنی آشنا شده و پس از اگاهی نسبت به آئین نامه ها و ضوابط قانونی مرتبط، طراحی سازه های بتنی مسلح را فراگیرند. طبعاً پروسه‌ی طراحی اعضاء سازه‌ای پیچیده‌تر از آن است که بتوان در یک درس دو واحدی همه مطالب را بیان نمود. از این رو مطالب به صورت ساده شده و کاربردی در اختیار مهندسان معمار قرار می‌گیرد تا بتوانند به صورت تقریبی، تخمین درستی از وضعیت اعضاء سازه داشته باشند. مجموعه‌ی پیش روی شما، گزیده‌ای از کتاب سازه‌های بتن‌آرمه، تالیف آقای دکتر داود مستوفی نژاد، استاد دانشگاه صنعتی اصفهان بوده و امید است مسیر حرکت معماران را در جهت فراگیری علم سازه هموار نماید. مطالب مربوط به درس سازه های بتنی، مطابق با سرفصل‌های وزارت علوم، مصوب پاییز ۱۳۷۹، در۳ فصل و دو پیوست ارائه می‌گردد. از کلیه‌ی دانشجویان و اساتیدی که در ارتقاء کیفی این مجموعه ما را یاری می‌کنند، پیشاپیش سپاس‌گزاریم.

داود مجیدی نصرآبادی

زمستان ۱۴۰۰

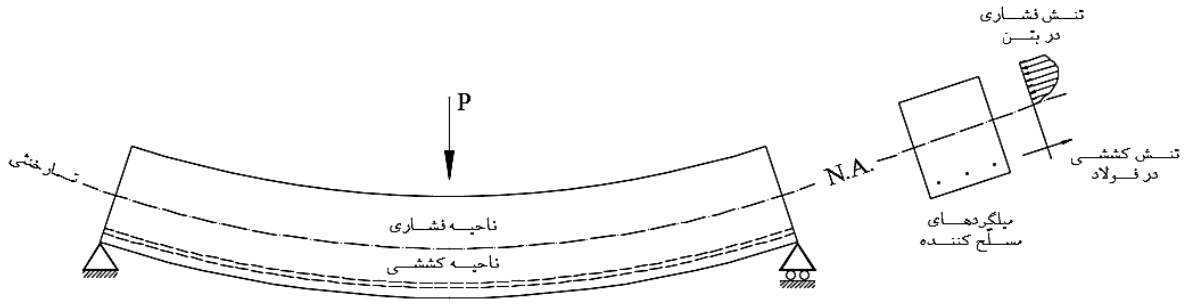
فصل اول

آشنایی با بتن مسلّح

۱- آشنایی با بتن مسلّح

۱-۱ مقدمه

مصالح ساختمانی گوناگونی از دیرباز توسط انسان مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان شاید بتوان از چوب، سنگ، فولاد و بتن به عنوان پرمصرف ترین مصالح ساختمانی نام برد. *بتن*[1] که در حقیقت یک نوع سنگ ساخته دست بشر است، از مقاومت فشاری قابل قبول و مقاومت کششی بسیار پایین (در حدود ۱۰ درصد مقاومت فشاری آن) برخوردار است. از طرفی در بسیاری از قطعات سازه ای کشش مستقیم و یا کشش ناشی از خمش ایجاد می شود. به همین جهت برای جبران ضعف مقاومت کششی بتن، ایده ی *بتن مسلح*[2] مطرح شده است. در این روش، در هر قسمت که قطعه ی سازه ای تحت کشش (کشش مستقیم یا کشش ناشی از خمش) قرار گیرد، از فولاد به عنوان یک ماده ی مقاوم در مقابل کشش، استفاده می گردد. شکل ۱-۱ ترکیب بتن و فولاد را در تحمل کشش و فشار ناشی از خمش در یک تیر بتن مسلح نشان می دهد.



شکل ۱-۱ ترکیب فولاد و بتن در یک تیر بتن‌آرمه تحت اثر کشش ناشی از خمش

اگرچه فولاد برای تقویت بتن در مقابل تنش‌های کششی در نظر گرفته شده است، ولی می‌تواند به عنوان یک عنصر کمکی در تحمل فشار نیز در کنار بتن قرار گیرد. از این رو از میلگردها با عملکرد فشاری در قطعات تحت اثر فشار، مثل ستون‌ها و یا ناحیه‌ی فشاری در تیرها، استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه مقاومت کششی بتن ناچیز است، حتی با وجود آرماتور در ناحیه‌ی تحت اثر کشش، بازهم ترک‌هایی در اثر تنش‌های کششی ایجاد شده که این ترک‌ها حتی از میلگردهای کششی نیز عبور کرده و در سطح تیر دیده می‌شوند. عمق و عرض این ترک‌ها بسیار محدود بوده (کوچکتر از ۰/۳ میلی‌متر) و در عملکرد عضو بتن مسلح تاثیر ندارند.

---

[1] Concrete (“ béton” in French)
[2] Reinforced Concrete

۲-۱ سازگاری بتن و فولاد

بتن و فولاد سازگاری قابل توجهی برای تشکیل یک جسم مرکب دارند که در این میان می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱) ضریب انبساط حرارتی بتن و فولاد بسیار به هم نزدیک است؛ از این رو تحت تاثیر تغییرات دمای محیط، تنش‌های قابل توجهی بین آن‌ها ایجاد نمی‌شود. ضریب انبساط حرارتی فولاد برابر با $1.2 \times 10^{-5}\ (1/°C)$ است؛ در حالی که ضریب انبساط حرارتی بتن در محدوده‌ی $1.0 \times 10^{-5}\ (1/°C)$ تا $1.3 \times 10^{-5}\ (1/°C)$ متغیر است.

۲) بتن و فولاد چسبندگی بسیار خوبی به یکدیگر دارند و بین آن دو لغزش اتفاق نمی‌افتد؛ بنابراین می‌توانند عملکرد مرکبی با یکدیگر داشته باشند و همانند یک جسم واحد عمل کنند. چسبندگی بسیار خوب بین بتن و فولاد، ناشی از چسبندگی شیمیایی بین دو ماده، و نیز ناصافی‌های سطحی و برآمدگی‌های میلگرد (آج) است.

۳) فولاد ماده‌ای است که به راحتی در معرض خوردگی شیمیایی قرار می‌گیرد؛ در حالی که بتن غالباً نفوذناپذیری قابل قبولی داشته و می‌تواند فولاد مسلح کننده را در مقابل خوردگی محافظت نماید.

۴) مقاومت فولاد در برابر حرارت ناشی از آتش‌سوزی پایین است؛ در حالی که پوشش بتن روی میلگردها مقاومت بسیار خوبی در مقابل آتش‌سوزی ایجاد می‌کند.

۳-۱ پیشینه‌ی تاریخی بتن‌آرمه

اگرچه گفته می شود که سیمان از دیرباز توسط ایرانیان و رومیان به عنوان یک ماده ی ساختمانی به کار گرفته شده است، اما سابقه سیمان کنونی که به *سیمان پرتلند*[1] معروف است، به *ژوزف آسپیدین*[2] انگلیسی در سال ۱۸۲۴ بر می‌گردد. از آن پس بتن غیر مسلح برای سالها به عنوان یک مصالح ساختمانی خوب، تولید شد.

سابقه‌ی استفاده از بتن مسلح به سال ۱۸۵۰ بر می‌گردد که *ژوزف لامبوت*[3] فرانسوی یک قایق بتنی را که با شبکه‌ای از سیم‌های موازی مسلح شده بود، تولید کرد. با این حال اختراع بتن‌آرمه معمولاً به *ژوزف مونیر*[4] فرانسوی نسبت داده شده است. وی در سال ۱۸۶۷ ابداع ساخت حوضچه‌ها و مخازن بتنی مسلح به شبکه‌ای از سیم‌های آهنی را برای خود ثبت کرده است. از آن به بعد *مونیر* تا سال ۱۸۸۱ موارد متعددی از کاربرد بتن مسلّح را در ساخت لوله‌ها و مخازن، صفحات و دال‌های مسطّح، پل‌های عابر پیاده، قوس‌ها، ساختمان‌ها و اجزاء رابط خطوط آهن، به نام خود به ثبت رساند. با این جود گفته می شود که وی دانش مربوط به رفتار

[1] Portland Cement
[2] Joseph Aspdin
[3] Joseph Lambot
[4] Joseph Monier

بتن‌آرمه و یا روش مناسب جهت طراحی سازه‌های بتن‌آرمه را نداشته است. در آمریکا *ویلیام وارد*[1] نخستین ساختمان بتن‌آرمه را در سال ۱۸۷۵ در نیویورک بنا نمود. *تادیوس هیات*[2] که در ابتدا یک وکیل بود، در دهه‌ی ۱۸۵۰ تجربیاتی را در مورد تیر بتن‌آرمه انجام داد.

همچنین *رانسام*[3] در دهه‌ی ۱۸۷۰ در شهر سانفرانسیسکو مواردی از استفاده از بتن‌آرمه را تجربه نمود. وی در سال ۱۸۸۴ استفاده از میله‌های آجدار را با پیچاندن میله‌هایی با سطح مقطع مربعی و به منظور افزایش چسبندگی بین بتن وفولاد، به نام خود ثبت کرد. همچنین وی در سال ۱۸۹۰ ساختمان یک موزه دو طبقه به طول ۹۵ متر را به صورت بتن‌آرمه بنا نمود. این ساختمان در زلزله‌ی سال ۱۹۰۶ سانفرانسیسکو و نیز در آتش‌سوزی متعاقب این زلزله، آسیب جزئی دید که این عملکرد و نیز عملکرد مناسب سایر ساختمان‌های بتن‌آرمه در آن زلزله و آتش‌سوزی‌های متعاقب آن، منجر به اقبال عمومی به این سیستم جدید ساختمان‌سازی گردید.

در سال ۱۹۰۳، تشکیل یک کمیته‌ی مشترک از نمایندگان سازمان‌های علاقه‌مند در زمینه‌ی بتن در آمریکا، نقطه شروعی برای همگانی کردن دانش طراحی بتن‌آرمه بود. از آن به بعد در دهه‌ی اول قرن بیستم، آزمایشات متعددی توسط دانشمندان، در آمریکا و اروپا جهت تعیین مقاومت فشاری بتن و مدول الاستیسیته‌ی آن انجام گرفت. از سال ۱۹۱۶ تا ۱۹۳۵، بیشترین تحقیقات بر ستون‌های بتن‌آرمه تحت اثر بار محوری متمرکز انجام پذیرفت. در دو دهه‌ی ۱۹۳۰ تا ۱۹۵۰، ستون‌های بتن‌آرمه با بار خارج از محور، شالوده‌های بتن‌آرمه و نیز مقاومت نهایی تیرها بیشتر مورد توجه قرار گرفت.

از آن به بعد و تا کنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه‌ی رفتار قطعات و سازه‌های بتن‌آرمه انجام گرفته است. هزاران رساله‌ی کارشناسی ارشد و دکترای حرفه‌ای در این زمینه و در دهه‌های اخیر به رشته‌ی تحریر درآمده است. با این وجود هنوز ناشناخته‌های بسیاری در زمینه‌ی رفتار اجزاء تشکیل دهنده‌ی بتن وجود دارد. در حال حاضر نیز بسیاری از تحقیقات زنده‌ی دانشگاه‌های معتبر و مراکز تحقیقاتی دنیا در زمینه‌ی اجزاء و قطعات بتن‌آرمه معطوف می‌گردد.

---

[1] William E. Ward
[2] Thaddeus Hyatt
[3] E. L. Ransome

۴-۱ مزایا و معایب بتن‌آرمه

مصالح مختلفی مثل چوب، مصالح بنایی، فولاد و بتن ممکن است به عنوان گزینه‌هایی برای ساخت یک بنا مطرح باشند. این گزینه‌ها برای بسیاری از سازه‌های متداول وجود دارند؛ اگرچه در ساخت اسکلت سازه‌های بلند، ممکن است به فولاد و بتن محدود گردند. با این وجود امروزه بتن‌آرمه به عنوان یک گزینه ی قابل اعتماد برای ساخت بسیاری از سازه‌های کوچک و بزرگ محسوب می گردد؛ به طوری که شاید بتوان از آن به عنوان مهم ترین ماده ی ساختمانی موجود با کاربردی فراگیر در تمام دنیا نام برد.

امروزه بسیاری از ساختمانهای کوچک و بزرگ، پلها، سدها، تونلها، کانالها، مخازن، دیوارههای حائل، لوله ها و روسازی راهها از بتن‌آرمه ساخته می شود.موفقیت قابل توجه بتن‌آرمه نسبت به سایر مصالح ساختمانی و بخصوص فولاد در کاربرد فراگیر آن را می توان مرهون موارد زیر دانست:

۱) بتن مقاومت فشاری قابل قبولی در مقایسه با بسیاری از مصالح ساختمانی دیگر دارد.

۲) تمامی اجزاء تشکیل دهنده‌ی بتن (به جز سیمان) به عنوان مصالح محلی و ارزان قیمت محسوب می‌شوند. تقریباً در همه جا می‌توان آب، ماسه و شن را از فواصل نزدیک به محل بتن‌ریزی حمل نمود که این مساله منجر به سهولت و رغبت بیشتر به بتن، و ارزان‌تر شدن آن خواهد شد.

۳) بتن را می‌توان به سهولت به هر شکل دلخواهی درآورد. با ساختن قالب مناسب، تقریباً هرگونه مقطع سازه‌ای و شکل معماری را می‌توان از بتن‌آرمه تولید نمود. در مقابل، مقاطع فولادی در ابعاد و اشکال مشخص و در کارخانه تولید می‌شوند و تولید مقاطع خاص از مصالح فولادی گاهاً مشکل و یا غیرممکن خواهد بود.

۴) بتن مقاومت بسیار خوبی در مقابل آتش دارد. یک ساختمان بتن‌آرمه می‌تواند ساعت‌ها در برابر آتش سوزی مهیب مقاومت کند، بدون آنکه فرو ریزد. این مساله فرصت کافی برای مهار آتش و تخلیه‌ی ساختمان از نفرات و اموال باارزشش را فراهم می‌سازد. در مقابل یک ساختمان فولادی در برابر آتش سوزی کاملاً ضعیف خواهد بود. فروریزی برج‌های دوقلوی نیویورک در واقعه‌ی ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱ و ساختمان پلاسکو تهران در جریان آتش سوزی دی‌ماه ۱۳۹۵، به دلیل اسکلت فولادی آن‌ها بود. چنان‌چه این برج‌ها از مصالح بتنی ساخته شده بودند، جان هزاران انسان و نیز میلیون‌ها دلار ثروت موجود در آنها حفظ می‌شد.

۵) بتن مقاومت خوبی در برابر رطوبت و آب دارد. اگر آبِ در تماس با بتن، حاوی بعضی از املاح و یون‌ها از قبیل یون سولفات و یا یون کُلُر نباشد، برای بتن و حتی میلگردهای موجود در آن، مشکلی ایجاد نمی‌شود.

۶) اجزاء بتن آرمه از صلبیت بالایی برخوردار هستند. به همین دلیل معمولاً ساکنان یک ساختمان بتن‌آرمه در هنگام وزش شدید باد و یا تحرک زیاد همسایگان، لرزشی احساس نکرده و آرامش آنها حفظ می‌شود.

۷) اجزاء بتنی در مقایسه با سازه‌ی فولادی، به صورت ذاتی به محافظت و نگهداری کمتری نیاز دارند. به خصوص اگر بتن‌ریزی به صورت متراکم انجام گرفته باشد و در قسمت‌های در تماس با هوا از بتن هوادار استفاده شده باشد، پس از شروع بهره‌برداری از سازه‌ی بتنی تقریبا نیازی به مراقبت ویژه احساس نمی‌شود.

۸) بتن در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی عمر بهره‌دهی بسیار طولانی دارد. تحت شرایط مشخص، یک سازه‌ی بتن‌آرمه می‌تواند برای همیشه بدون کاهش در ظرفیت باربری مورد استفاده قرار گیرد. در واقعیت، بتن در گذر زمان نه تنها کاهش مقاومت ندارد، بلکه با گذشت زمان و با تحکیم بیشتر سیمان، افزایش مقاومت نیز خواهد داشت. با این وجود، تاثیر عوامل مخرب محیطی و یون‌های مهاجم ممکن است دوام بتن را در طول زمان به مخاطره بیاندازد.

۹) بتن در بعضی از اجزاء سازه‌ای مانند پی‌ها، دیوارهای حائل و شمع‌ها، به عنوان تنها گزینه‌ی اقتصادی محسوب می‌شود.

از طرف دیگر برای بتن نقاط ضعفی نیز مطرح است که گاه ممکن است رغبتی برای استفاده از سایر مصالح ساختمانی را فراهم آورد. این نقاط ضعف عبارتند از:

۱) مقاومت کششی بتن بسیار پایین بوده و یک دهم مقاومت فشاری آن است. این مسأله استفاده از فولادهای مسلح کننده در ناحیه‌ی کششی بتن را اجتناب ناپذیر می‌کند. با این وجود در ناحیه‌ی کششی ترک‌هایی ایجاد می‌شود که لازم است با تمهیدات خاصی عرض این ترک‌ها را محدود نمود. چنین ترک‌هایی ممکن است در موارد خاص، زمینه‌ی نفوذ آب یا رطوبت یا یون‌های زیان‌آور را فراهم کند.

۲) برای اجرای بتن درجا نیاز به قالب‌بندی، مهارگذاری و شمع‌بندی است. هزینه‌ی مصالح مصرفی برای قالب‌بندی، هزینه‌ی ساخت قالب، نصب قالب و برداشتن آن، هزینه مصالح شمع‌بندی، نصب و برداشتن آن‌ها برای نگهداری بعضی از اجزاء نظیر دال‌ها و تیرها قبل از سخت شدن بتن، مبالغ قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهند که حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد کل هزینه‌ی اجرای سازه‌ی بتن آرمه را شامل می‌شود.

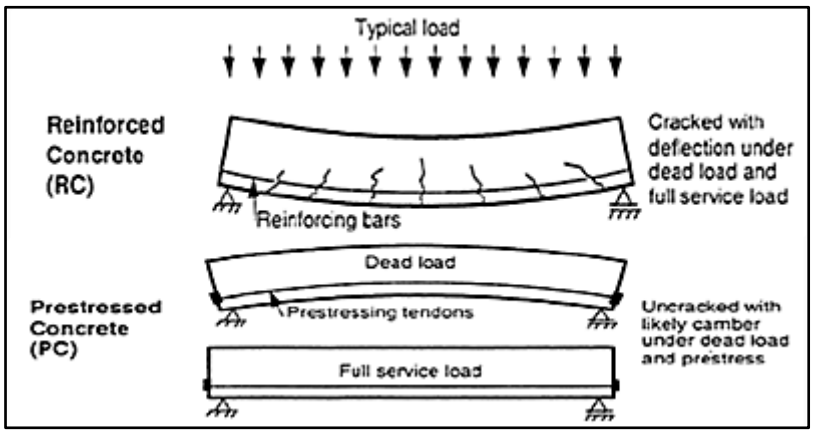
۳) مقاومت پایین تر به ازای واحد وزن بتن در مقایسه با فولاد، منجر به سنگین تر شدن اعضای بتن آرمه می شود. مقاومت فشاری بتن معمولی حدود ۵ تا ۱۰ درصد مقاومت فولاد بوده و وزن مخصوص آن حدود ۳۰ درصد وزن مخصوص فولاد است. بدین ترتیب مقاومت به ازای وزن واحد بتن حدود $\frac{1}{6}$ تا $\frac{1}{3}$ همین کمیت برای فولاد خواهد بود. وزن بیشتر اجزاء بتنی به خصوص در تیرهای با دهانه های بلند روی مقاومت تیر اثر منفی خواهد گذاشت. این افزایش وزن همچنین اثر نیروی زلزله را بیشتر می کند. از طرفی دیگر بزرگی ابعاد منجر به اشغال فضای بیشتری توسط ستونها و تیرها خواهد شد که ممکن است از نظر معماری مطلوب نباشد.

۴) کنترل کیفیت بتن یک کنترل کارگاهی است و نسبت به کنترل کیفیت فولاد که در کارخانه انجام می‌شود به مراتب پایین‌تر خواهد بود. خصوصیات بتن به تغییرات نسبت اجزاء متشکله‌ی آن، شرایط اختلاط، نحوه‌ی بتن ریزی و ویبراسیون، و نیز شرایط مراقبت از بتن بعد از بتن‌ریزی بستگی زیادی خواهد داشت که ممکن است تمام یا بعضی از این شرایط در کارگاه دستخوش تغییرات شده و به خوبی رعایت نگردد.

۵) بتن تغییرات حجمی وابسته به زمان دارد. این تغییرات حجمی که عمدتاً با پدیده‌های *افت* و *خزش* مرتبط هستند، با گذشت زمان ترک خوردگی‌هایی را ایجاد می‌کنند و تغییر شکل و خیز اجزاء را افزایش می‌دهند.

۵-۱ بتن پیش‌تنیده

بتن پیش‌تنیده[1] روش دیگری برای تولید یک مقطع مرکب و جبران ضعف کششی بتن است که ایده‌ی اصلی آن با ایده‌ی بتن‌آرمه متفاوت است. در مقطع بتن‌آرمه، وظیفه‌ی تحمل تنش‌های کششی به فولادهای مسلح کننده واگذار شده و اجازه داده می‌شود که بتن در ناحیه‌ی کششی ترک بخورد. در حالی که در مقطع پیش‌تنیده با ایجاد تنش‌های فشاری اولیه در مقطع بتن، شرایطی فراهم می‌شود که تنش‌های کششی ناشی از خمش، تنش‌های اولیه را خنثی نموده و بدین ترتیب در مقطع یا اصلاً تنش کششی ایجاد نشود، ویا تنش‌های کششی ایجاد شده اندک بوده و از مقاومت کششی بتن فراتر نرود. بنابراین در مقطع بتن پیش تنیده هیچ‌گونه ترک‌خوردگی ایجاد نخواهد شد. (شکل ۲-۱)

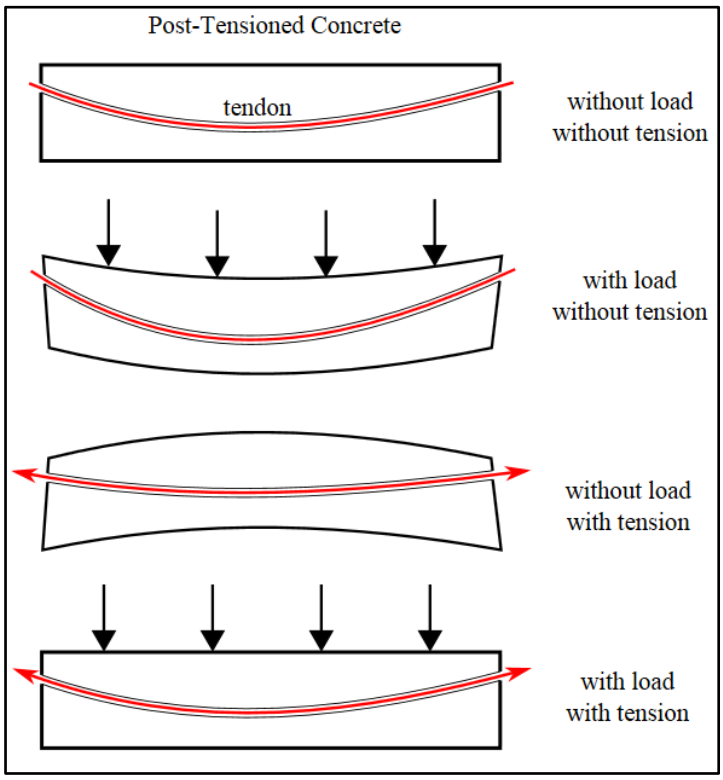


شکل ۲-۱ مقایسه بتن مسلّح (RC) و بتن پیش‌تنیده (PC) از نظر نوع عملکرد

پیش تنیدگی به دو روش *پیش‌کشیده*[2] و *پس‌کشیده*[3] انجام می‌گیرد. در بتن پیش‌کشیده ابتدا کابل‌های پیش‌تنیدگی که از نوع با مقاومت بالا و با تنش تسلیم بین ۱۲۰۰ تا ۲۰۰۰ مگاپاسکال انتخاب می‌شوند، از داخل قالب عبور داده شده و به مقدار دلخواه

[1] Prestressed Concrete
[2] Pre-tensioned
[3] Post-tensioned

کشیده می‌شوند. سپس داخل قالب بتن‌ریزی شده و پس از کسب مقاومت ۷ روزه‌ی بتن، کابل‌ها آزاد می‌شوند. بدین ترتیب عکس‌العمل نیروی کششی اولیه در کابل، به صورت نیروی فشاری در مقطع اثر می‌کند. همچنین در بتن پس‌کشیده کابل‌های عبور داده شده از یک غلاف محافظ، به همراه غلاف در موقعیت مناسب در داخل بتن تعبیه شده و بتن‌ریزی انجام می‌پذیرد. سپس قطعه بتنی پس از انجام گیرش به محل نصب حمل شده و در موقعیت مربوطه قرار می‌گیرد. آن‌گاه کابل موجود در قطعه که قبلاً از یک طرف مهار شده است، از طرف دیگر توسط دستگاه تحت کشش قرار گرفته و نهایتاً در انتهای قطعه مهار می‌شود. در این حالت نیز، عکس‌العمل نیروی کششی به صورت فشاری بر قطعه اثر خواهد نمود.



شکل ۳-۱ نمایش رفتار تیر پیش‌تنیده (پس‌کشیده) تحت اثر بارگذاری

شکل ٤-۱ نمایش لنگرگاه کابل چند رشته‌ای در دو انتهای تیر

شکل ۵-۱ نمایش تیر پیش تنیده با کابل‌های چند رشته‌ای

۶-۱ آئین‌نامه‌های طراحی

آنالیز و طراحی سازه‌های بتن‌آرمه باید بر مبنای یک آئین‌نامه انجام گیرد. آئین‌نامه ها بر اساس تحقیقات انجام شده در هر زمینه و تجربیات قبلی، و نیز با منظور نمودن ایمنی مناسب، مجموعه مقرراتی را تنظیم می نمایند. هر مهندس می تواند بر اساس اصول کلی طراحی و رعایت قوانین یک آیین نامه، طراحی صحیح و مطمئنی را ارائه دهد.

نخستین مجموعه مقررات مرتبط با بتن آرمه، تحت نظر *پروفسور مورش*[1] در سال ۱۹۰۴ در دانشگاه اشتوتگارت آلمان منتشر شد. مقررات طراحی بتن آرمه هم‌چنین در کشورهای انگلستان، فرانسه، اتریش و سوئیس در سال های ۱۹۰۷ تا ۱۹۰۹ منتشر شد. در آمریکا نیز در سال ۱۹۰۴ کمیته‌ی مشترکی در ارتباط با بتن آرمه بین چهار موسسه‌ی مرتبط با این موضوع تشکیل شد. همچنین در سال ۱۹۱۰، "*مقررات استاندارد ساختمانی برای استفاده از بتن آرمه*" توسط "*موسسه‌ی ملی استفاده‌کنندگان سیمان*"[2]، که "بعدها به *موسسه‌ی بتن آمریکا*"[3] (ACI) تغییر نام داد، منتشر شد. کمیته ی مشترک تشکیل شده در سال ۱۹۰۴ نهایتاً به *موسسه‌ی بتن آمریکا* متصل شد و گزارش نهایی در مورد مقررات مرتبط با بتن آرمه در سال ۱۹۱۶ منتشر گردید. امروزه آئین‌نامه ACI318 مجموعه مقررات ساختمان‌های بتن آرمه را با عنوان "*الزامات ساختمان برای سازه‌های بتنی*"[4] هر ۶ سال یا ۷ سال منتشر می‌کند. توضیحات بیشتری در مورد این آئین‌نامه، در شرح[5] آن در کنار نسخه اصلی آن منتشر می‌شود.

---

[1] Professor Morsch
[2] National Association of Cement Users
[3] American Concrete Institute
[4] Building Code Requirements for Concrete Structures
[5] Commentary

هم‌چنین اصلاحات جزئی آئین‌نامه بین انتشار دو نسخه اصلی آن، منتشر می گردد. نسخه های دهه‌های اخیر این آئین‌نامه، ACI 318 – 02، ACI 318 – 05، ACI 318 – 08، ACI 318 – 14 بوده است. آئین‌نامه ی بتن ACI همچنین اساس بسیاری از آئین‌نامه‌های دنیا از جمله آئین‌نامه بتن کانادا (CSA Standard A23.3)، آئین‌نامه بتن استرالیا (AS3600)، آئین‌نامه بتن نیوزلند و نیز آئین‌نامه بتن در بعضی از کشورهای آمریکای لاتین است.

کشورهای اروپایی نیز هر کدام آئین‌نامه های طراحی بتن مخصوص به خود دارند. با این حال دو کمیته ی *CEB*[1] و *FIP*[2] به صورت مشترک در سال ۱۹۷۸، آئین‌نامه‌ی *CEB-FIP Model for Concrete Structure* را برای یکنواخت کردن ضوابط طراحی سازه‌های بتن‌آرمه منتشر کردند. ویرایش های دیگری نیز از این آئین‌نامه در سال ۱۹۹۰ منتشر گردید.

در ایران نیز با تلاش دفتر امور فنی و تدوین معیارها از سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، آئین‌نامه بتن ایران (آبا) در دو جلد تدوین و منتشر شد. جلد اول این آئین‌نامه که در سال ۱۳۷۱ منتشر شد، مباحث مرتبط با تکنولوژی بتن، مصالح و مسائل اجرائی مطرح گردید. در جلد دوم آن که در سال ۱۳۷۴ منتشر گردید، مسائل مربوط به اصول تحلیل و طراحی سازه‌های بتن‌آرمه مورد نقد و بررسی قرار گرفت. این مجموعه دو جلدی در سال ۱۳۷۹ در یک جلد و ۲۰ فصل تحت عنوان آئین‌نامه بتن ایران، "آبا" (تجدید نظر اول) منتشر گردید. این آئین‌نامه تا حدودی بر اساس آئین‌نامه بتن آمریکا و آئین‌نامه بتن کانادا تنظیم شده است. همچنین مبحث نهم مقررات ملی ساختمان نیز به ضوابط و الزامات ساختمان های بتن آرمه اشاره می کند. قرار بوده است طی سالهای اخیر، این دو آئین‌نامه‌ی داخلی (آبا و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان) با انجام اصلاحاتی با یکدیگر ادغام شده و آئین‌نامه واحدی تدوین گردد که تا زمان نگارش این مجموعه چنین اتفاقی محقق نشده است. در این مجموعه سعی شده است تا ضوابط مربوط به آئین‌نامه‌های ACI318-14 و آئین‌نامه های ایرانی آبا و مبحث نهم مورد نقد و بررسی قرار گیرد.

[1] Comite Euro-International du Beton
[2] The Federation International de la Precontrainte

فصل دوم

مشخصات فنی بتن

۲- مشخصات فنی بتن

۲-۱ خصوصیات مصالح در بتن‌آرمه

۲-۱-۱ سیمان و اجزاء آن

سیمان اصطلاحاً به ماده ای اطلاق می شود که با انجام واکنش شیمیایی با آب (واکنش هیدراسیون)، نقش چسباندن کصالح سنگی به یکدیگر و تولید جسم سخت بتن را ایفا می کند. همانطور که قبلاً هم اشاره شد، گرچه استفاده از سیمان به چندین هزار سال قبل بازمی‌گردد، اما اولین بار در سال ۱۸۲۴ میلادی *ژوزف اسپدین*، معمار بریتانیایی طرح اصلاحی خود را برای آهک هیدرولیک تحت عنوان *سیمان پرتلند* به ثبت رساند. وی نام *پرتلند* را به علت تشابه سیمان حاصل با رنگ کانسارهای آهکی جزیره پرتلند در انگلستان انتخاب کرد. مواد اولیه ی سیمان عمدتاً خاک رس و آهک است. به صورتی که آهک (CaO) حدود ۶۳ درصد، سیلیس (SiO_2) حدود ۲۰ درصد، آلومین (Al_2O_3) حدود ۶ درصد، اکسید آهن (Fe_2O_3)حدود ۳ درصد و اکسید منیزیم (MgO) حدود ۱/۵ درصد از مواد اولیه سیمان را تشکیل می‌دهند. این مواد پس از پخت در کوره به روش تر یا خشک، *کلینکر*[1] سیمان را تولید کرده و سپس کلینکر تولید شده با ۲ تا ۳ درصد سنگ گچ آسیاب می گردد تا پودر سیمان تشکیل شود. اضافه کردن سنگ گچ جهت جلوگیری از گیرش سریع سیمان است.

شکل ۱-۲ کلینکر سیمان

فازهای اصلی تشکیل دهنده‌ی سیمان عبارتند از،

[1] Clinker

۱) تری کلسیم سیلیکات (به شکل SiO_2 و $3CaO$) با علامت اختصاری C_3S . این ماده نسبت به سایر اجزاء سیمان گیرش سریع تری داشته و در هنگام ترکیب با آب، گرمای زیادی آزاد می کند (۱۲۰ کالری بر گرم). C_3S همچنین زمینه‌ی مستعدی برای حمله‌ی سولفات‌ها به بتن فراهم می‌کند.

۲) *دی‌کلسیم‌سیلیکات* (به شکل SiO_2 و $2CaO$) با علامت اختصاری C_2S . این ماده بر خلاف C_3S گیرش اولیه‌ی بالایی نداشته و دیرگیر است. از طرفی ترکیب C_2S با آب، گرمای اندکی تولید می کند (۶۲ کالری بر گرم).

۳) *تری‌کلسیم‌آلومینات* (به شکل Al_2O_3 و $3CaO$) با علامت اختصاری C_3A . این ماده با خصوصیاتی مشابه C_3S، گیرش اولیه ی بسیار بالایی داشته و از طرفی زمینه ی کاملاً مساعدی برای حمله ی سولفاتها به بتن فراهم می کند. همچنین گرمای آزاد شده در اثر ترکیب شیمیایی C_3A با آب بسیار زیاد است (حدود ۲۱۰ کالری بر گرم).

۴) *تتراکلسیم‌آلومینوفریت* (به شکل Fe_2O_3، Al_2O_3 و $4CaO$) با علامت اختصاری C_4AF . این ماده گیرش متوسطی داشته و پس از ترکیب با آب حدود ۱۰۰ کالری بر گرم گرما آزاد می کند.

۱-۱-۱-۲ انواع سیمان و خواصّ آن‌ها

استاندارد ASTM [1] پنج نوع سیمان پرتلند را معرفی می کند،

۱) **سیمان پرتلند نوع یک**[2]: یک سیمان معمولی است که برای مصارف عمومی ساختمانی مناسب است.

۲) **سیمان پرتلند نوع دو**[3] : یک سیمان اصلاح شده با خصوصیات متوسط که نسبت به سیمان نوع یک حرارت کمتری تولید کرده و برای مصرف در محیط‌هایی که حملات ضعیفی از سولفات‌ها وجود دارد، مناسب است.

۳) **سیمان پرتلند نوع سه**[4]: یک سیمان زودگیر است؛ به صورتی که در ۲۴ ساعت اول، بتنی با مقاومت حدود ۲ برابر مقاومت ساخته شده با سیمان نوع یک تولید می‌کند. این سیمان همچنین یک سیمان پر حرارت محسوب می شود. مصرف این نوع سیمان برای ساخت بتن در هوای سرد به جهت آزاد کردن گرمای بیش‌تر و نیز کم کردن دوره‌ی مراقبت، مناسب است. هم‌چنین در تعمیرات فوری و نیز مواردی که در نظر باشد قالب ها سریع تر باز شوند، استفاده از سیمان نوع سه توصیه می‌شود.

---

[1] American Society for Testing and Materials
[2] Ordinary Portland (Type I) Cement
[3] Modified (Type II) Cement
[4] Rapid-Hardening Portland (Type III) Cement

۴) **سیمان پرتلند نوع چهار[۱] :** یک سیمان کندگیر و کم حرارت به حساب می‌آید. این سیمان معمولاً در هوای گرم به دلیل تولید حرارت کم تر و تسهیل در امر مراقبت از بتن استفاده می شود. کاربرد سیمان نوع چهار در بتن ریزی های حجیم باعث کاهش تنش های حرارتی خواهد شد. در بتن ریزی های پیوسته نیز استفاده از این نوع سیمان از ایجاد اتصالات سرد جلوگیری می کند.

۵) **سیمان پرتلند نوع پنج[۲]** : یک سیمان ضد سولفات و یا مقاوم در مقابل حمله ی سولفاتها است. این سیمان هم‌چنین تا حدودی خصوصیات دیر گیری داشته و نسبت به سیمان نوع یک، حرارت کمتری تولید می کند.

علاوه بر ۵ نوع سیمان فوق؛ انواع دیگری از سیمان تولید می شود که می توان به سیمان‌های حباب‌زا، سیمان‌های سفید و رنگی، سیمان سرباره‌ای، سیمان پوزولانی، سیمان بنایی، سیمان چاه نفت، سیمان برقی (پرآلومین)، سیمان نسوز و غیره اشاره نمود.

زمینه‌ی پژوهش : معرفی ویژگی‌ها و کاربردهای سایر انواع سیمان

۲-۱-۲ سنگ‌دانه ها

مصالح سنگی یا *سنگدانه‌ها*[۳] به صورت دانه‌های درشت یا شن و دانه‌های ریز یا ماسه بوده که حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد حجم بتن را اشغال می‌کنند. مرز بین شن و ماسه الک شماره ی ۴ است که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن ۴/۷۶ میلی‌متر است. دانه ها ممکن است از نظر شکل ظاهری به صورت گرد[۴]، نامنظم[۵]، گوشه‌دار[۶] یا شکسته، پولکی[۷] و سوزنی[۸] باشند. دانه های با شکل ظاهری پولکی و سوزنی برای ساخت بتن مناسب نیستند و نباید در مجموع از ۱۵ درصد کل دانه ها بیشتر باشند. از طرفی دانه های گوشه دار به دلیل برخورداری از *سطح مخصوص*[۹] (از تقسیم مساحت جانبی سنگدانه به جرم آن سطح مخصوص به دست می‌آید) بزرگتر، نیاز به خمیر سیمان بیشتری داشته، ولی اتصال بهتری در بتن ایجاد می کنند.

نحوه ی توزیع دانه ها از نظر ابعاد با *منحنی دانه‌بندی*[۱۰] مشخص می‌شود. منحنی دانه‌بندی، درصد رد شده دانه ها از هر الک استاندارد را مشخص می کند. الک های استاندارد به ترتیب از بزرگ به کوچک عبارتند از،

---

[1] Low-Heat Portland (Type IV) Cement
[۲] Sulfate-Resisting (Type V) Cement
[3] Aggregates
[4] Rounded
[5] Irregular
[6] Angular
[7] Flaky
[8] Elongated
[9] Specific Surface Area
[10] Grading Curve

۱) الک $\mathbf{1\frac{1}{2}}$ اینچ که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن $38.1\ mm$ است.

۲) الک $\frac{\mathbf{3}}{\mathbf{4}}$ اینچ که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن $19.06\ mm$ است.

۳) الک $\frac{\mathbf{3}}{\mathbf{8}}$ اینچ که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن $9.5mm$ است.

۴) الک **شماره ٤** که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن $4.76\ mm$ است.

۵) الک **شماره ۸** که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن $2.36mm$ است.

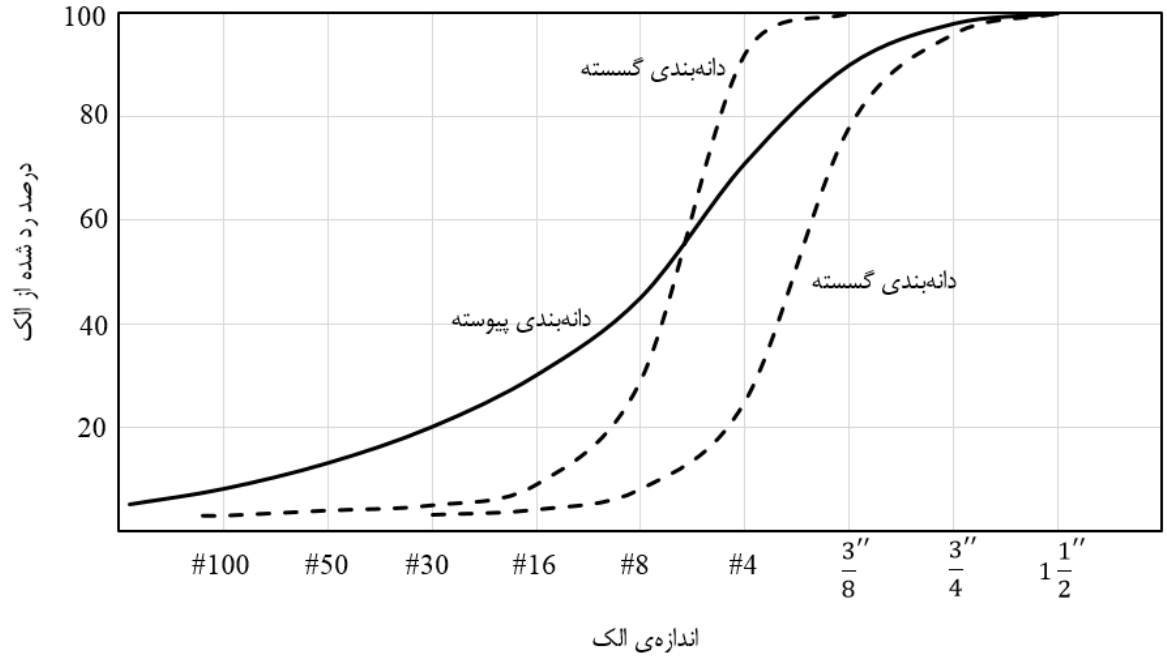
۶) الک **شماره ١٦** که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن $1.18\ mm$ است.

۷) الک **شماره ۳۰** که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن $0.6\ mm$ است.

۸) الک **شماره ۵۰** که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن $0.3mm$ است.

۹) الک **شماره ۱۰۰** که اندازه‌ی بُعد شبکه های آن $0.15\ mm$ است.

منحنی دانه‌بندی ممکن است به صورت پیوسته و یا ناپیوسته (گسسته) باشد. یک منحنی دانه‌بندی در صورتی پیوسته محسوب می شود که اولاً تمام ابعاد استاندارد دانه ها را شامل باشد؛ و ثانیاً بعضی از ابعاد دانه ها نسبت به سایر ابعاد، به صورت قابل ملاحظه کمتر نباشد. در ساخت بتن معمولاً از دانه‌بندی پیوسته استفاده می شود. شکل ۲-۲ نمونه هایی از منحنی دانه‌بندی پیوسته و گسسته را نشان می دهد.



شکل ۲-۲ نمونه هایی از منحنی دانه‌بندی پیوسته و گسسته

استفاده از شن و ماسه با دانه‌بندی پیوسته، فضای خالی بین دانه ها را کاهش داده و در نتیجه مصرف خمیر سیمان کاهش می‌یابد. از طرفی با استفاده از یک دانه‌بندی پیوسته، ابعاد مختلف دانه ها به خوبی در بین یکدیگر جای گرفته و حجم بیشتری از بتن توسط دانه ها اشغال شده و بتن متراکم تری ایجاد می گردد. دانه‌بندی گسسته مصرف کاملاً محدودی دارد که از جمله می توان به ساخت بتن با دانه های نمایان و یا بتن اکسپوز، اشاره نمود.

میزان ریزی و نرمی دانه های ماسه با *ضریب نرمی*[1] مشخص می‌شود. ضریب نرمی به صورت مجموع درصدهای باقی‌مانده روی الک‌های استاندارد تقسیم بر عدد ۱۰۰، تعریف می‌گردد. ضریب نرمی ماسه در محدوده‌ی ۲/۳ تا ۳/۲ متغیر بوده و غالباً برابر ۲/۸ است.

زمینه‌ی پژوهش : جزئیات آزمایش و روش تعیین ضریب نرمی ماسه

درمورد ریزدانه‌ها هم‌چنین باید به انبساط حجمی ظاهری دانه‌ها بر اثر رطوبت که به ری‌کردن ماسه[2] معروف است، توجه نمود. حجم دانه‌های ماسه با رطوبت محدود، در اثر کشش سطحی بین ملکول‌های آب و دانه‌های ماسه، افزایش می‌یابد. این انبساط ظاهری در رطوبت حدود ۵ درصد ماسه، بیشترین مقدار را داشته و با افزایش مقدار رطوبت، کاهش یافته و به صفر می‌رسد. انبساط ظاهری ریزدانه‌ها در رطوبت ۵ درصد در ماسه‌های ریز و درشت، ممکن است بین ۱۵ تا ۴۰ درصد متغیر باشد. با توجه به پدیده‌ی ری‌کردن ماسه برای ریزدانه‌های مرطوب، توصیه می‌شود در کارگاه بجای استفاده از پیمانه‌های حجمی از توزین ماسه استفاده شود. استفاده از دانه های درشت تر شن، منجر به امکان استفاده از آب و سیمان کم تری خواهد شد. با این وجود، تجربیات نشان داده است که استفاده از دانه های درشت تر، مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد. از طرفی آئین‌نامه‌ها حداکثر بُعد دانه‌های سنگی را به مقادیری مشخص محدود می‌کنند.

زمینه‌ی پژوهش : ضوابط آئین‌نامه‌های مختلف بتن، برای حداکثر بُعد دانه‌های سنگی

۱-۲-۱-۲ رطوبت سطحی و جذب آب دانه‌ها

دانه ها از نظر رطوبت سطحی و میزان جذب آب، به چهار دسته تقسیم می شوند.

۱) **دانه های کاملاً خشک (خشک شده در کوره)**[3]: این دانه ها در کوره و در دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی گراد کاملاً خشک شده اند و حفره ها و خلل و فرج داخلی دانه ها عاری از هرگونه رطوبت است.

---

[1] Fineness Modulus
[2] Bulking of Sand
[3] Oven Dry

۲) **دانه‌های خشک**[1]: این دانه ها به صورت معمولی و در فضای عادی خشک شده اند. با این وجود در بعضی حفره های داخلی آنها ممکن است آب وجود داشته باشد.

۳) **دانه‌های اشباع با سطح خشک**[2] **(SSD):** در این دانه‌ها کلیه‌ی حفره‌های داخلی از آب اشباع است؛ ولی سطح دانه‌ها عاری از آب است. چنانچه دانه‌ها به مدت کافی (مثلاً ۲۴ ساعت) در زیر آب قرار گیرند و سپس از آب خارج شده و با یک پارچه خشک شوند، در حالت SSD محسوب می‌شوند.

۴) **دانه‌های مرطوب یا خیس**[3]**:** دانه‌هایی هستند که علاوه بر این که کلیه‌ی حفره‌های داخلی آن‌ها از آب اشباع است، سطح بیرونی آن‌ها نیز حاوی مولکول‌های آب است.

اصولاً طرح اختلاط اجزاء بتن بر اساس وضعیت SSD دانه ها است. چنین دانه هایی نه از بتن آب جذب می‌کنند و نه به بتن آب اضافه می‌کنند. در صورت عدم انجام آزمایش می‌توان رطوبت SSD دانه‌های شنی را برابر ۰/۵ درصد، و رطوبت اشباع با سطح خشک دانه‌های ماسه‌ای را برابر ۰/۷ درصد در نظر گرفت.

۳-۱-۲ آب بتن

آبی که در ساخت بتن به کار می رود، نقش اساسی در خصوصیات بتن ایفاد می کند. استفاده از آب نامناسب در ساخت بتن ممکن است مشکلات زیر را ایجاد کند،

۱) زمان گیرش سیمان را به تاخیر اندازد.

۲) مقاومت نهایی بتن را کاهش دهد.

۳) موجب خوردگی و زوال تدریجی میلگردها شود.

۴) روی سطح نهایی بتن خشک شده، لکه هایی را ایجاد کند.

آبی که در ساخت بتن به کار می رود باید تمیز بوده و عاری از هر گونه مواد زیان آور نظیر روغن، اسید، قلیا، مواد آلی و سایر مواد نامناسب برای بتن و فولاد باشد. در یک جمله ی کلی می توان گفت آب مصرفی در بتن باید قابل شرب باشد. استفاده از آب غیرقابل شرب در بتن فقط زمانی مجاز است که مقاومت نمونه های ۷ روزه و ۲۸ روزه ساخته شده با آن آب، حداقل برابر ۹۰ درصد نمونه های مشابه ساخته شده با آب آشامیدنی (و یا آب مقطر) باشد. همچنین بر اساس آئین نامه بتن ایران، زمان گیرش

[1] Dry
[2] Saturated Surface Dry
[3] Dump od Wet

سیمان با آب غیر آشامیدنی نباید بیش از یک ساعت زودتر تا ۱/۵ ساعت دیرتر از زمان گیرش سیمان با آب مقطر باشد. در یک ملاحظه ی کلی خصوصیات آب مناسب برای ساخت بتن را می توان به صورت زیر بیان کرد،

۱) اسیدی و بازی نباشد ($5 < PH < 8.5$).

۲) میزان ذرات جامد معلق در آب کم‌تر از ۰/۱ درصد برای بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و یا بتن پیش تنیده، و کم‌تر از ۰/۲ درصد برای بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم و یا بتن بدون فولاد باشد.

۳) میزان مواد محلول در آب کم‌تر از ۰/۱ درصد برای بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و یا بتن پیش تنیده، و کم‌تر از ۰/۲ درصد برای بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم؛ و کم‌تر از ۰/۳ درصد برای بتن بدون فولاد باشد.

۴) میزان یون کلرید موجود در آب کم‌تر از ۰/۰۵ درصد برای بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و یا بتن پیش تنیده، و کم‌تر از ۰/۱ درصد برای بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم؛ و کم‌تر از ۱ درصد برای بتن بدون فولاد باشد.

۵) میزان یون سولفات در آب کم‌تر از ۰/۱ درصد برای بتن آرمه و یا بتن پیش تنیده، و کم‌تر از ۰/۳ درصد برای بتن بدون فولاد باشد.

۶) میزان قلیایی های موجود در آب ($Na_2O + 0.658\ K_2O$) کم تر از ۰/۰۶ درصد باشد.

آب دریا در حدود ۳/۵ درصد نمک‌های غیر محلول داشته و حاوی یون‌های کلرور و سولفات است. این آب از نقطه نظر مقاومت، در بتن غیرمسلح مشکلی ایجاد نمی‌کند. با این وجود، در بتن مسلّح و بتن پیش‌تنیده، آب دریا خطر خوردگی فولاد را افزایش می‌دهد و بنابراین نباید برای ساخت بتن مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۱-۴ مواد مضاف

مواد مضاف[1] به موادی اطلاق می شود که قبل از اختلاط بتن و یا هم زمان با اختلاط، به بتن اضافه می شوند تا تحت شرایط مشخصی عملکرد بتن را بهبود بخشیده و یا مصرف سیمان را کاهش دهند. بعضی از انواع مواد مضاف، عبارتند از،

۱) مواد مضاف تسریع کننده[2]

این مواد، موادی نظیر کلریدکلسیم ($CaCl_2$) هستند که کسب مقاومت اولیه‌ی بتن را تسریع می‌کنند. استفاده از این مواد به خصوص در هوای سرد، زمان لازم برای مراقبت از بتن را کاهش داده و امکان باز کردن زودتر قالب را فراهم می‌کند. کلرید کلسیم باعث خوردگی فولاد و یا کابل‌های پیش‌تنیدگی می‌شود و به همین جهت باید از استفاده از این

[1] Admixtures
[2] Accelerating Admixtures

ماده‌ی مضاف در بتن پیش تنیده جداً، و در بتن‌آرمه تا حد امکان احتراز نمود. حداکثر میزان مجاز مصرف کلریدکلسیم در بتن‌آرمه ۰/۵ درصد، و در بتن غیر مسلح ۲ درصد وزنی سیمان است.

استفاده از کلریدکلسیم مقاومت بتن را در مقابل فرسایش و سایش افزایش داده، ولی مقاومت آن را در مقابل حمله‌ی سولفات‌ها کاهش می‌دهد. همچنین کلریدکلسیم افت بتن را به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهد.

۲) مواد مضاف کندگیر کننده[1]

این مواد، موادی نظیر شکر و مشتقات آن و نیز اسیدهای مختلف هستند که با افزوده شدن به بتن، گیرش آن را کند کرده و افزایش دمای هیدراسیون را محدود می کنند. از این مواد می توان در بتن ریزی های حجیم برای کاهش تنش های حرارتی، در هوای گرم برای کم کردن دمای هیدراسیون استفاده نمود.این مواد همچنین بتن را برای زمان طولانی تری به صورت پلاستیک نگه داشته و بنابراین اختلاط بهتر و اتصال بهتر لایه های متوالی را ممکن می گردد.

چنانچه شکر به میزان ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان به بتن اضافه شود، گیرش آن را ۴ ساعت به تأخیر می‌اندازد. هم‌چنین اگر شکر در حدود ۱ درصد وزنی سیمان اضافه شود، گیرش سیمان را به کلی متوقف می‌کند. بعضی از رانندگان کامیون‌های حمل بتن، بسته‌هایی از شکر را با خود حمل می‌کنند تا در صورت توقف در راه‌بندان، جهت جلوگیری از گیرش بتن به آن اضافه کنند.

۳) مواد مضاف کاهنده‌ی آب[2] یا فوق روان‌کننده‌ها[3]

این مواد عمدتاً از سولفونات‌های آلی ساخته شده‌اند و این امکان را فراهم می‌کنند که بتوان هم‌زمان با کاهش میزان آب بتن، کارایی (یا *اسلامپ*[4]) آن را افزایش داد. از فوق روان‌کننده‌ها گاهی هم برای کم‌کردن میزان سیمان مصرفی با ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان و کم کردن میزان آب در یک اسلامپ ثابت استفاده می‌شود؛ اگرچه غالباً از آن برای ساخت یک بتن با کارایی مناسب، با کاهش نسبت آب به سیمان و ثابت نگه داشتن میزان سیمان استفاده می‌شود که منجر به تولید بتن‌هایی با مقاومت بالا خواهد شد.

زمینه ی پژوهش : درباره‌ی آزمایش اسلامپ و بررسی نتایج آن

٤) مواد مضاف هوازا[5]

---

[1] Retarding Admixtures
[2] Water-Reducing Admixtures (Plasticizers)
[3] Superplasticizers
[4] Slump
[5] Air-Entraining Admixtures

مواد مضاف هوازا یا حباب‌زا موادی هستند که وقتی به اختلاط بتن افزوده می‌شوند، باعث افزوده شدن میلیاردها حباب بسیار ریز هوا به مخلوط می شوند. چنین حباب های ریزی با قطر حدود ۰/۰۵ میلی‌متر، در فواصل بسیار نزدیک و در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر نسبت به هم توزیع می شوند. اساس مواد مضاف هوازا موادی همچون چربی طبیعی جانوران و صمغ طبیعی درختان است که به صورت ترکیبی با مواد شیمیایی تثبیت کننده، تولید شده و به مقدار کم (حدود ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان) به بتن اضافه می شوند و ممکن است در محدوده ی ۴ تا ۸ درصد حباب ریز هوا تولید کنند.

مهم‌ترین خصوصیات مفید بتن هوادار، افزایش میزان روانی، افزایش مقاومت در برابر یخ‌زدن و ذوب شدن، کاهش امکان لایه‌لایه شدن بتن در مقابل نمک‌های یخ‌زدا که در زمستان روی سطح بتن پاشیده می‌شوند، افزایش قابلیت آب‌بندی بتن و افزایش مقاومت در برابر حمله‌ی سولفات‌ها است. همچنین بتن هوادار امکان جداشدن دانه ها و آب انداختن بتن را کاهش داده و میزان جذب آب و نیز افت و خزش در بتن سخت شده را کاهش می دهد. در مقابل بتن هوادار به ازای هر ۱ درصد هوا، حدود ۵ درصد کاهش مقاومت ایجاد خواهد نمود.

۵) مواد مضاف معدنی[۱]

امروزه استفاده از پوزولان‌ها[۲] و محصولات فرعی به عنوان افزودنی های معدنی در بتن، به دلایل زیست محیطی و اقتصادی رو به افزایش است. حضور افزودنی های معدنی به عنوان جانشین قسمتی از سیمان پرتلند، معمولاً سرعت کسب مقاومت را کند می کند؛ ولی بهبود قابل ملاحظه ای در مقاومت نهایی بتن ایجاد می کند. هم چنین قابلیت و توانایی یک افزودنی معدنی برای واکنش با هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) موجود در خمیر سیمان هیدراته شده در دمای معمولی و تشکیل هیدرات های سیلیکات کلسیم، می تواند به کاهش چشم گیر در تخلخل سیمان و بتن منجر شود؛ که بدین ترتیب بتنی متراکم تر و با نفوذپذیری و جذب آب پایین‌تری تولید می‌شود. این بتن می تواند در طول زمان دوام بسیارخوبی در مقابل عوامل مخرب محیطی و جوّی از خود ارائه دهد.

به عنوان پوزولان طبیعی مناسب برای افزودن به بتن می‌توان از *خاکسترآتشفشانی*[۳]، *شیل‌های اُپالینی*[۴] و *چرت‌ها*[۵] نام برد. هم‌چنین به عنوان پوزولان‌های مصنوعی می توان *خاکسترِبادی*[۶] و *میکروسیلیس*[۷] یا *دوده‌ی‌سیلیسی*[۸]را ذکر نمود.

---

۱ Inorganic Admixtures
2 Pozzolans
3 Volcanic Ash
4 Opaline Shales
5 Cherts
۶ Fly Ash or Pulverized Fuel Ash (PFA)
۷ Micro Silica
8 Silica Fume

خاکستر بادی محصول فرعی مراکز تولید برقی است که سوخت ذغال سنگ مصرف می کنند؛ که این نوع پوزولان مصنوعی در ایران تولید نمی شود. دوده ی سیلیسی محصول فرعی کارخانجات تولید فولاد آلیاژی است و ریزی ذرات آن به مراتب بیشتر از ذرات سیمان است و آمادگی مناسبی جهت ترکیب با هیدروکسید کلسیم موجود در خمیر سیمان را داراست؛ و در ایران در چند مرکز صنعتی با کیفیت بسیار خوب و خلوص سیلیس بیش از ۹۸ درصد تولید می گردد.لازم به ذکر است که استفاده از کلیه ی مواد پوزولانی و به خصوص استفاده از ۱۰ تا ۱۵ درصد میکروسیلیس جانشین سیمان، علاوه بر کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن در طول زمان، به صورت قابل ملاحظه مقاومت بتن را نیز بهبود می‌بخشد. سرباره‌ی کوره‌ی ذوب‌آهن نیز یک افزودنی خوب به بتن محسوب می‌شود. بتن ساخته شده با سرباره دوام خوبی در مقابل حمله ی سولفاتها و سایر عوامل مخرب نشان می دهد. از طرفی ایم بتن تا حدودی دیرگیر می‌شود، ولی مقاومت نهایی آن کمتر از بتن بدون سرباره نیست. همچنین افزودنی های دیگری مثل پودر سنگ آهک یا پودر آهک هیدراته شده نیز برای متراکم کردن بتن مفید است. افزودنی های دیگری مثل پودر روی یا پودر آلومینیوم نیز وجود دارند که در حضور قلیایی ها و یا هیدروکسید کلسیم موجود در خمیر سیمان، حباب های هیدروژن آزاد کرده و بتن گازی تولید می کنند. این بتن می تواند نقش عایق حرارتی را ایفا کند.

۲-۲ مقاومت فشاری بتن

مقاومت فشاری بتن نه تنها به عنوان مهم ترین خصوصیت مکانیکی بتن، بلکه به عنوان یکی از مهم ترین خواص رفتاری بتن شناخته می شود. مقاومت فشاری بتن ممکن است بر اساس یک نمونه ی مکعبی و یا یک نمونه ی استوانه ای سنجیده شود. نمونه ی استاندارد استوانه ای دارای قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر است؛ در صورتی که نمونه ی استاندارد مکعبی دارای بعد ۱۵۰ یا ۲۰۰ میلی‌متر است. هر نمونه در سه لایه و هر لایه با ۲۵ بار میله زدن با میله ای به قطر ۱۶ میلی‌متر متراکم شده و پر می شود. سپس نمونه به مدت ۲۸ روز زیر سطح آب در دمایی بین ۲۱ تا ۲۵ درجه سانتی گراد قرار گرفته و نگه داری می شود. آنگاه نمونه تحت سرعت بارگذاری مشخصی (0.15 to 0.34 MPa/sec بر اساس استاندارد *ASTM C39*) و تا نقطه ی شکست بارگذاری می گردد. مقاومت حاصله برای نمونه های استوانه ای با f'_c و برای نمونه های مکعبی با f'_{cu} نمایش داده می شود.

بسیاری از بتن‌های متعارف، مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی استوانه ای در محدوده ی ۲۰ تا ۳۰ مگاپاسکال دارند. بتن با مقاومت حدود ۱۰ تا ۱۵ مگاپاسکال برای تنظیف و تراز کردن سطح زیر پی ها (*بتن مگر*[1]) به کار می‌رود. هم چنین برای بتن پیش تنیده،

[1] Lean Concrete

از بتن با مقاومت ۳۵ تا ۴۰ مگاپاسکال استفاده می شود. بتن‌هایی با مقاومت ۶۰ تا ۶۵ مگاپاسکال نیز برای کار کردن در ستون‌های طبقات پایین‌تر ساختمان‌های بلند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با پیشرفت سریع تکنولوژی بتن در جهان، امکان تولید بتن‌های با مقاومت بالاتر افزایش یافته و استفاده از بتن‌های با مقاومت بالا در حال افزایش است. در سال ۱۹۵۰، بتن با مقاومت فشاری ۳۴ مگاپاسکال به عنوان بتن با مقاومت بالا محسوب می شد؛ در حالی که در سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۷۰، از بتن‌های با مقاومت فشاری حدود ۵۲ تا ۶۲ مگاپاسکال به عنوان بتن با مقاومت بالا یاد شده است. امروزه بتن‌های با مقاومت فشاری کمتر از ۲۰ مگاپاسکال به عنوان *بتن‌های با مقاومت پایین*[۱]، بتن‌های با مقاومت بین ۲۰ تا ۴۰ مگاپاسکال به عنوان *بتن‌های با مقاومت معمولی یا متوسط*[۲]، بتن‌های با مقاومت بین ۴۰ تا ۸۰ مگاپاسکال به عنوان *بتن‌های با مقاومت بالا*[۳]، بتن‌های با مقاومت ۸۰ تا ۱۵۰ مگاپاسکال به عنوان *بتن‌های با مقاومت بسیار بالا*[۴]، و بتن‌های با مقاومت بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال به عنوان *بتن‌های با مقاومت فوق العاده زیاد*[۵] قلمداد می‌گردند. لازم به ذکر است که از انواع بتن‌های با مقاومت بالا به عنوان *بتن با عملکرد بالا*[۶] و بتن توانمند نیز یاد می شود؛ چرا که چنین بتن‌هایی معمولاً با نفوذپذیری کم و کیفیت بسیار خوب، دوام بسیار خوبی در مقابل انواع شرایط نامناسب محیطی از خودشان نشان می دهند.

تولید بتن با مقاومت بالا با بکارگیری نسبت‌های درست و مناسب ترکیبات بتن، کاهش نسبت آب به سیمان، استفاده از میکروسیلیس به عنوان جانشین بخشی از سیمان، و نیز استفاده از سنگ دانه های مقاوم و متراکم، امکان پذیر است. امروزه با استفاده از سنگدانه های معدنی با کیفیت بسیار خوب می توان بتن با مقاومت تا ۲۳۰ مگاپاسکال تولید کرد. همچنین با استفاده از دانه های سرامیکی، امکان رسیدن به مقاومت فشاری تا ۴۶۰ مگاپاسکال نیز فراهم است.

نوع دیگری از بتن با مقاومت بالا تحت عنوان *بتن با پودر فعال*[۷] تولید می شود. این بتن، یک بتن با مقاومت فوق العاده زیاد است و از شکل پذیری، جذب انرژی بسیار خوب، تخلخل بسیار کم، نفوذپذیری ناچیز و مقاومت سایشی بسیار بالا، برخوردار است. مقاومت فشاری این بتن حداقل ۲۰۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی آن با استفاده از الیاف کوچک فولادی در حدود ۵۰ مگاپاسکال

---

[1] Low Strength Concrete
[2] Medium or Ordinary Strength Concrete
[۳] High Strength Concrete
[4] Very High Strength Concrete
[5] Ultra-High Strength Concrete
[۶] High Performance Concrete
[۷] Reactive Powder Concrete (RPC)

است. ایده ی تولید بتن RPC نخستین بار در دهه ۱۹۹۰ در فرانسه شکل گرفت و برای اولین بار، در سال ۱۹۹۷ میلادی در ساخت یک پل عابر پیاده با دهانه ی ۶۰ متر در *شربروک*[1] کانادا به صورت عملی به کار گرفته شد.

مواد به کار رفته در تولید RPC، دانه‌های کوارتز ریز با دانه‌بندی خوب و در محدوده‌ی ۰/۴ تا ۰/۱۵ میلی‌متر، سیمان پرتلند بدون C_3A و یا با C_3A بسیارکم (مثلاً سیمان نوع پنج)، پودر میکروسیلیس مرغوب، و فوق روان‌کننده‌ی با کیفیت بسیار خوب است که با نسبت آب به سیمان بسیارکم (۰/۲ تا ۰/۱۸) ساخته می‌شود. به عنوان نمونه می توان $1200\ kg/m^3$ مواد سیمانی (به صورت ۸۰ درصد سیمان پرتلند و ۲۰ درصد میکروسیلیس)، حدود $1000\ kg/m^3$ ماسه ی ریز (مثلاً کوارتز)، در حدود $13\ kg/m^3$ پودر روان‌کننده، $180\ kg/m^3$ الیاف فولادی و حدود $220\ kg/m^3$ آب را به عنوان یک طرح اختلاط مناسب برای ساخت RPC معرفی نمود. عمل آوری RPC ممکن است در دمای معمولی، و یا تحت فشار و با بخار ۱۶۰ °C انجام گیرد. امروزه دانش تولید RPC در حال پیشرفت است و گفته می شود که بتن ب مقاومت فشاری تا ۶۰۰ مگاپاسکال، با این روش تولید شده است. مقاطع تیر تولید شده با روش RPC که بدون استفاده از میلگردهای فولادی ساخته شده‌اند، با مقطع فولادی از نظر ابعاد و وزن قابل مقایسه و رقابت هستند.

۱-۲-۲ عوامل موثر بر مقاومت فشاری بتن

با استفاده از اختلاط اولیه ی یکسان، ممکن است تحت شرایط متفاوت، بتن از خود مقاومت فشاری متفاوتی نشان دهد. در ادامه به بعضی از عوامل موثر در مقاومت بتن اشاره خواهد شد.

۱-۱-۲-۲ اثر نوع نمونه

نوع نمونه بر مقاومت فشاری بتن اثر می گذارد؛ به صورتی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی نومنه ی استوانه ای استاندارد با قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر، در حدود ۸۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی نمونه مکعبی با بعد ۱۵۰ میلی متر و در حدود ۸۳ درصد مقاومت فشاری نمونه مکعبی با بعد ۲۰۰ میلی متر است. این درحالی است که برای بتن های سبک وزن، مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای و مکعبی برابر است.

زمینه‌ی پژوهش : علت کمتر بودن مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای نسبت به نمونه های مکعبی

[1] Sherbrook

۲-۱-۲-۲ اثر اندازه‌ی نمونه

اندازه‌ی نمونه‌ی بتنی، بر عددی که در آزمایشگاه به عنوان مقاومت ۲۸ روزه حاصل می‌شود، تاثیرگذار است. در محدوده‌ی ابعاد متداول نمونه‌ها، هرچه اندازه‌ی نمونه بزرگتر شود، مقاومت فشاری آن کاهش خواهد یافت. جدول ۱-۲ نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های با ابعاد غیر استاندارد را نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌های با ابعاد استاندارد نشان می‌دهد. علت تاثیر اندازه‌ی نمونه بتنی بر مقاومت فشاری بتن را می‌توان به مسأله‌ی احتمالات در رابطه با وجود ضعف در بتن نمونه نسبت داد. اصولاً بتن جسم کاملاً همگن و با کنترل کیفیت عالی نبوده و همیشه احتمال وجود نقاط ضعفی در آن وجود دارد. این نقاط ضعف، مقاومت فشاری نمونه‌ی آزمایشگاهی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هرچه نمونه بزرگتر باشد و حجم بتن بیشتر، احتمال وجود نقاط ضعف، افزایش یافته و مقاومت نمونه کاهش می‌یابد. با این وجود، چنانچه ابعاد نمونه بزرگتر از ابعاد متداول باشد، نقاط ضعف در نمونه به میزان یکنواختی خواهد رسید و دیگر با افزایش بعد نمونه، کاهش مقاومت اتفاق نخواهد افتاد.

جدول ۱-۲ نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های با ابعاد غیراستاندارد به مقاومت فشاری نمونه‌های با ابعاد استاندارد

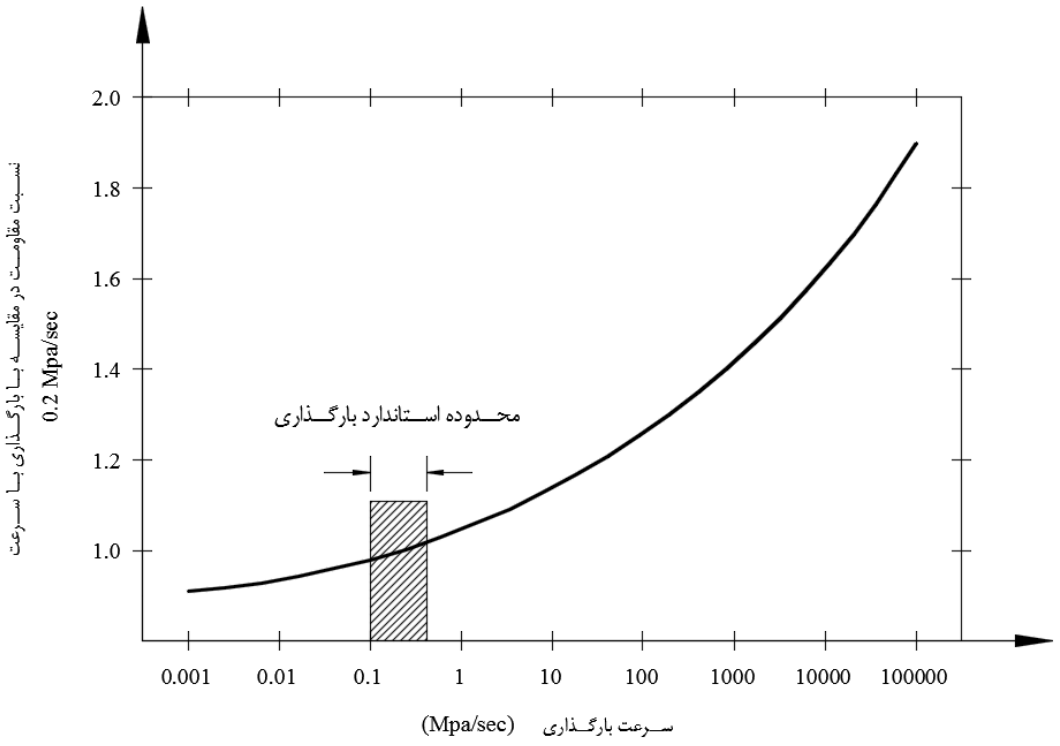
نمونه های استوانه ای	اندازه نمونه (mm)	۵۰ X ۱۰۰	۷۵ X ۱۵۰	۱۰۰ X ۲۰۰	۱۵۰ X ۳۰۰	۲۰۰ X ۴۰۰	۳۰۰ X ۶۰۰	۴۵۰ X ۹۰۰	۶۰۰ X ۱۲۰۰
	نسبت مقاومت	۱/۰۹	۱/۰۶	۱/۰۴	۱/۰	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۸۶	۰/۸۴
نمونه های مکعبی	اندازه نمونه (mm)			۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	
	نسبت مقاومت			۱/۱۰	۱/۰	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۹	

۲-۲-۱-۳ اثر سرعت بارگذاری

سرعت بارگذاری به صورت افزایش میزان تنش در واحد زمان تعریف می شود. سرعت بارگذاری نمونه‌ی آزمایشی بتن بر مقاومتی که آن نمونه از خود نشان می‌دهد، تاثیر می‌گذارد؛ به صورتی که هرچه سرعت بارگذاری بیشتر باشد، بتن از خود مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. شکل ۳-۲ تاثیر سرعت بارگذاری را بر مقاومت فشاری بتن نشان می‌دهد.

دلیل افزایش مقاومت فشاری در سرعت‌های بالا را می‌توان در پدیده‌ی خزش جستجو کرد. هرچه سرعت بارگذاری کم‌تر باشد، خزش بیشتری در نمونه اتفاق می‌افتد و بنابراین تحت سطح مشخصی از تنش، کرنش‌های فشاری بیشتری اتفاق می‌افتد، که این مسأله منجر به شکست نمونه تحت تنش کم‌تری خواهد بود.

همانگونه که در شکل ۳-۲ دیده می‌شود، در محدوده‌ی سرعت های بارگذاری استاندارد، تفاوت عمده‌ای در مقاومت فشاری حاصل نمی‌شود. نتایج تجربی بعضی از تحقیقات نشان داده است که در مقایسه با سرعت بارگذاری در محدوده ی استاندارد و سرعت برابر با 0.2 MPa/sec، برای نمونه‌های استوانه ای 300 × 150 میلی‌متر، چنانچه سرعت بارگذاری ۳۰ برابر کمتر شود، مقاومت فشاری حدود ۱۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در همین وضعیت اگر سرعت بارگذاری ۳۰ برابر افزایش یابد، مقاومت فشاری حدود ۱۲ درصد افزایش می یابد. در سرعت‌های بسیار پایین بارگذاری که در زمان طولانی انجام می گیرد، مقاومت بتن به ۷۵ درصد مقاومت در سرعت بارگذاری استاندارد کاهش می‌یابد. همچنین در سرعت‌های بارگذاری حدود 200 MPa/sec که تقریباً حدود سرعت بارگذاری در یک زلزله‌ی نسبتاً شدید است، مقاومت نمونه‌ی بتنی به حدود ۱۱۵ درصد مقاومت در سرعت بارگذاری استاندارد خواهد رسید. البته باید دقت داشت که در این سرعت بارگذاری، نمونه ی استوانه ای در محدوده ی ۰/۱ تا ۰/۱۵ ثانیه شکسته خواهد شد؛ در حالی که در سرعت بارگذاری استاندارد، شکست نمونه‌ی استوانه‌ای استاندارد، حدود ۱/۵ تا ۲ دقیقه طول می‌کشد.



شکل ۳-۲ تاثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت فشاری بتن

٤-۱-۲-۲ اثر نوع سیمان مصرفی

نوع سیمان مصرفی در گیرش اولیه تأثیر گذاشته و مقاومت فشاری ۳ روزه و ۷ روزه ی متفاوتی ایجاد می کند. این روند کسب مقاومت برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز قابل تعمیم است؛ ولی مقاومت فشاری بتن در درازمدت با انواع سیمان‌ها، یکسان است.

حتی گاهی مقاومت بتن های ساخته شده با سیمان های دیرگیر، کمی بیشتر از مقاومت درازمدت بتن های ساخته شده با سیمان های معمولی یا زودگیر است. جدول ۲-۲، تأثیر نوع سیمان پرتلند را در مقاومت فشاری بتن در سنین ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به سیمان معمولی نوع یک نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲ مقاومت تقریبی نسبی بتن بر اساس نوع سیمان

نوع سیمان	مقاومت فشاری (درصدی از سیمان نوع I)			
پرتلند	۱روز	۷روز	۲۸روز	۹۰روز
I	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
II	۷۵	۸۵	۹۰	۱۰۰
III	۱۹۰	۱۲۰	۱۱۰	۱۰۰
IV	۵۵	۶۵	۷۵	۱۰۰
V	۶۵	۷۵	۸۵	۱۰۰

۵-۱-۲-۲ اثر نسبت آب به سیمان

در سال ۱۹۱۸ *داف آبرامز*[1] دریافت که رابطه ی معکوسی بین نسبت آب به سیمان و مقاومت بتن وجود دارد. این رابطه به عنوان قاعده ی نسبت آب به سیمان آبرامز شناخته شده و به صورت رابطه ی (۲-۱) بیان می گردد.

$$f_c' = \frac{k_1}{k_2^{(\frac{w}{c})}} \qquad (۲-۱)$$

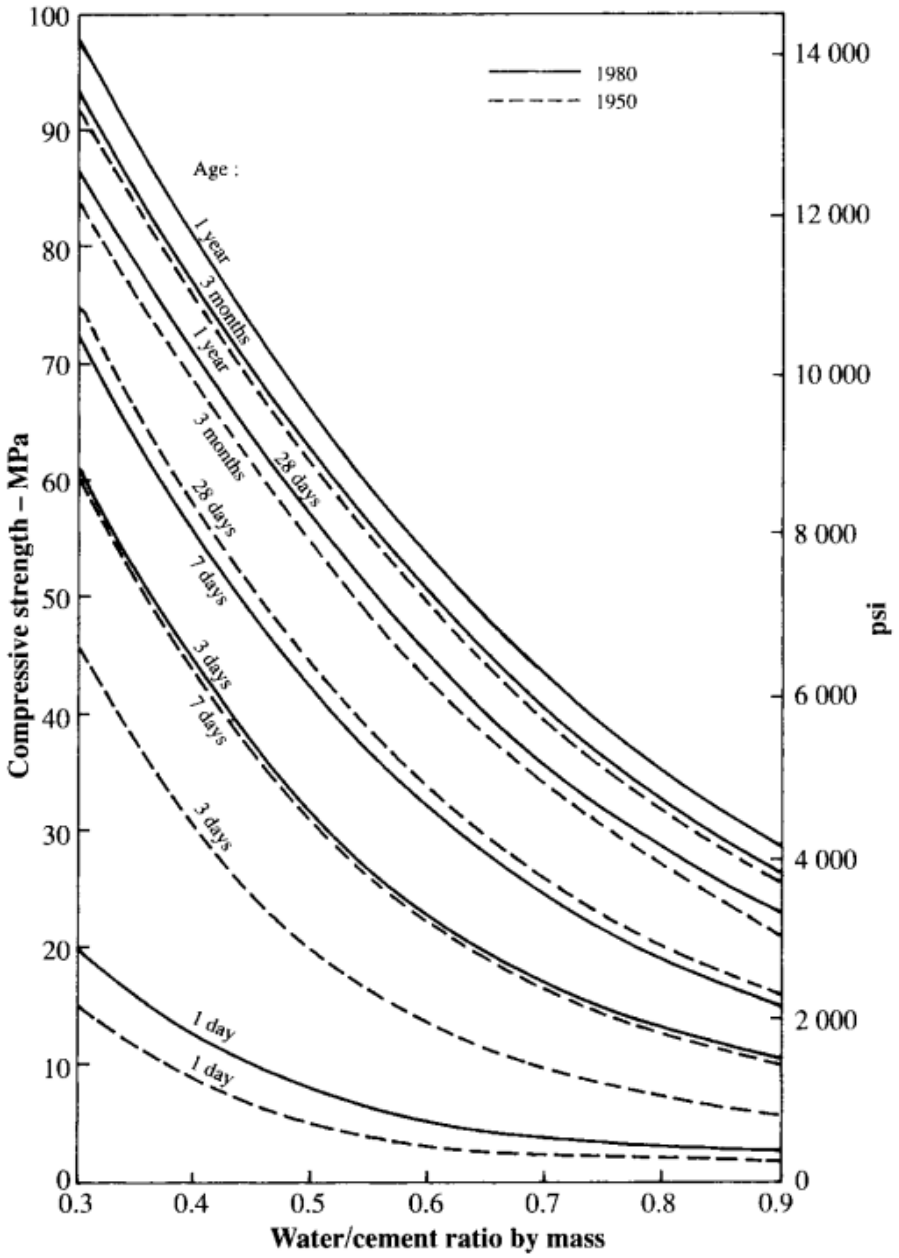
در رابطه ی فوق w/c نسبت وزنی آب به سیمان، و k_1 و k_2 ثابت های تجربی هستند. منحنی های متداولی که ارتباط نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری بتن را در یک سن معین از مراقبت مرطوب مشخص می کند، در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است.

[1] Duff Abrams

شایان ذکر است که بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، برای نسبت های آب به سیمان کمتر از ۰/۳، با کاهش اندکی در نسبت آب به سیمان، افزایش قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری بتن حاصل می شود. تولید بتن های با مقاومت خیلی بالا اصولاً با رعایت نسبت آب به سیمان حدود ۰/۲۵ محقق خواهد شد.

٦-۱-۲-۲ اثر مواد مضاف معدنی

همان گونه که قبلاً ذکر شد، مواد معدنی دیگری نظیر خاکستر بادی، میکروسیلیس و یا سرباره به عنوان جانشین بخشی از سیمان در بتن به کار می‌روند. چنین موادی اولاً با ابعاد بسیار ریز خود میتوانند در خُلَل و فُرَج داخلی بتن جای گرفته و بتنی تور و متراکم تولید کنند؛ و ثانیاً با انجام واکنش‌هایی با هیدروکسیدکلسیمِ حاصل از ترکیبات سیمان، ترکیبات سخت‌تری را تولید نمایند. در این میان میکروسیلیس نقش ویژه ای داشته و به صورت خاص باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می شود.



شکل ٤-٢ تاثیر نسبت آب به سیمان و دوره مراقبت بر مقاومت فشاری بتن

۷-۱-۲-۲ اثر خصوصیات سنگدانه ها

در بتن معمولی مقاومت دانه‌ها بر مقاومت بتن تاثیری ندارد؛ زیرا مقاومت دانه های معمولی به مراتب بیش از مقاومت خمیر سیمان است؛ در حالی که در بتن های با مقاومت بالا، مقاومت دانه ها بر مقاومت بتن موثر است. به همین دلیل در ساخت بتن با مقاومت بالا حتماً باید از دانه‌های با مقاومت بسیار خوب مثل کوارتز، و یا لااقل از دانه‌های با مقاومت متوسط نظیر گرانیت و یا سنگ آهک استفاده نمود؛ استفاده از دانه های ضعیف مثل ماسه سنگ، مرمر و بعضی از سنگهای دگرگونی سبب شکست زودهنگام این بتن خواهد شد.

زمینه‌ی پژوهش : درمورد انواع سنگ‌ها بخصوص سنگ‌های دگرگونی چه می‌دانید.

خصوصیات دیگری از سنگ دانه ها (به جز مقاومت) نظیر اندازه، دانه بندی، شکل، بافت سطحی، و *کانی‌شناسی*[1] می توانند بر مقاومت بتن در رده های مختلف تاثیر بگذارند. کاهش در بزرگترین اندازه ی دانه های مصرفی و استفاده از دانه بندی خوب و پیوسته، و نیز استفاده از دانه های با بافت سطحی خشن تر و یا دانه های خرد شده (شکسته) منجر به کسب مقاومت بالاتری خواهد شد. از طرفی بعضی از گزارشات نشان می‌دهند که برای بتن معمولی و تحت شرایط یکسان، تغییر در کانی دانه و به کاربردن دانه های آهکی به جای دانه های سیلیسی (مثلاً استفاده از سنگ آهک بجای ماسه سنگ) با بهبود اساسی مقاومت بتن همراه بوده است.

۸-۱-۲-۲ اثر شرایط مراقبت از بتن

واژه ی عمل آوری یا مراقبت از بتن به روش هایی اطلاق می شود که در آن روش ها هیدراسیون سیمان ارتقاء داده می شود. این روش ها شامل کنترل زمان، شرایط رطوبتی و دما بلافاصله پس از قراردادن مخلوط بتنی در قالب خواهد بود.

۱) **زمان** : تحت شرایط مراقبت مرطوب و در دمای معمولی، برای یک بتن مشخص هرچه دوره ی مراقبت طولانی تر باشد، مقاومت بالاتر خواهد رفت. ارزیابی مقاومت فشاری با گذشت زمان برای بتن ساخته شده با سیمان نوع یک و به صورت مرطوب عمل آوری شده در دمای 21 °C را می توان بر اساس پیشنهاد کمیته ی ACI209، با استفاده از رابطه ی (۲-۲) انجام داد.

$$f'_c(t) = f'_{c,28}\left(\frac{t}{4 + 0.85t}\right) \qquad (۲-۲)$$

در رابطه ی فوق، t زمان مورد نظر پس از ریختن بتن بر حسب روز، $f'_c(t)$ مقاومت فشاری بتن پس از t روز و $f'_{c,28}$ مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی بتن است. چنانچه از سیمان نوع سه به جای سیمان نوع یک استفاده شود، لازم است ضرایب 0.85 و 4 با مقادیر 0.92 و 2.3 جایگزین گردد.

همچنین استاندارد اروپایی CEB-FIP ، در سرایط مشابه رابطه ی زیر را برای ارزیابی مقاومت در طول زمان پیشنهاد می کند،

$$f'_c(t) = exp\left[s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] f'_{c,28} \qquad (۲-۳)$$

[1] Mineralogy

که در رابطه ی فوق s ضریب وابسته به نوع سیمان است که برای سیمان های زودگیر، معمولی و دیرگیر به ترتیب ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳۸ در نظر گرفته می‌شود. رشد مقاومت بتن ساخته شده با سیمان نوع یک در طول زمان را در شرایط عمل‌آوری مرطوب و دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، می‌توان بر اساس روابط (۲-۲) و (۳-۲)، از جدول ۳-۲ پیش‌بینی نمود.

جدول ۳-۲ رشد مقاومت بتن با سیمان نوع یک در گذرزمان نسبت به مقاومت ۲۸ روزه

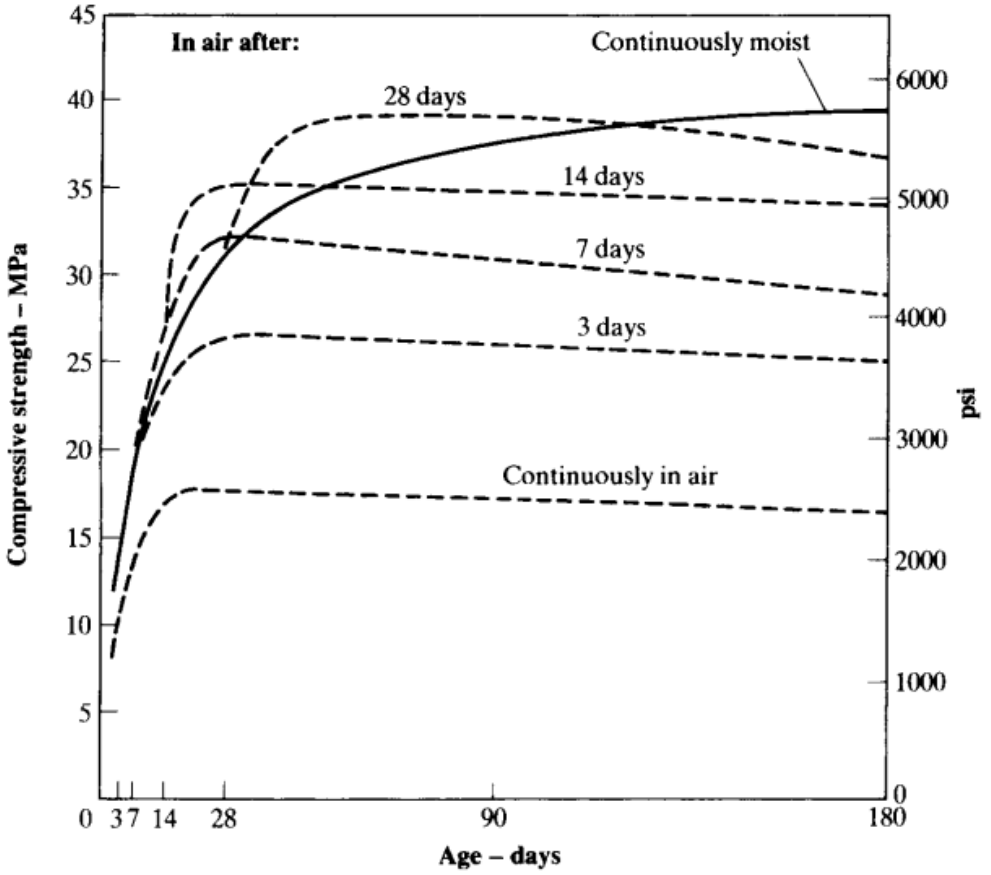
استاندارد	درصد کسب مقاومت					
	۳روزه	۷روزه	۱۴روزه	۲۸روزه	۳ماهه	یک ساله
ACI 209	۴۶	۷۰	۸۸	۱۰۰	۱۱۲	۱۱۶
CEB-FIP	۶۰	۷۸	۹۰	۱۰۰	۱۱۲	۱۲۰

۲) **رطوبت** : رطوبت کافی در طول دوره ی عمل آوری تاثیر قابل ملاحظه ای بر مقاومت بتن می گذارد. بعضی از تحقیقات نشان می دهد که پس از ۱۸۰ روز و در یک نسبت آب به سیمان معین، مقاومت بتنِ به صورت مداوم مرطوب عمل‌آوری شده تا ۳ برابر بزرگ‌تر از مقاومت بتنی است که به صورت مداوم در هوا مراقبت شده است.

از طرفی میزان رطوبت نمونه ی بتنی در زمان آزمایش نیز بر مقاومت فشاری بتن تاثیر می‌گذارد. در آزمایشات مشاهده شده است که نمونه های در هوا خشک شده، ۲۰ تا ۲۵ درصد مقاومت بیش‌تر نسبت به نمونه‌هایی که در شرایط اشباع آزمایش می‌شوند، از خود نشان می‌دهند. مقاومت پایین‌تر نمونه های اشباع احتمالاً به دلیل فشار منفذی موجود در خمیر سیمان است. یادآوری می‌شود که روش عمل استاندارد، ایجاب می‌کند که نمونه ها فقط تا ۲ ساعت قبل از آزمایش از آب و یا محیط با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد خارج شوند و بنابراین در زمان آزمایش در وضعیت مرطوب باشند.شکل ۵-۲، تاثیر شرایط عمل‌آوری در دمای ۲۱ درجه‌ی سانتی‌گراد و نیز رطوبت نمونه در زمان آزمایش را بر مقاومت فشاری بتن نشان می‌دهد.

۳) **دما** : برای بتن مرطوب به عمل آمده، تاثیر دما بر مقاومت بتن به *تاریخچه‌ی زمان – حرارت*[1] در هنگام ریختن بتن و مراقبت از آن بستگی خواهد داشت. در محدوده‌ی دمای ۴ تا ۴۶ درجه سانتی‌گراد، وقتی که بتن در یک دمای ثابت و مشخص ریخته شده و مراقبت شود، عموماً تا ۲۸ روز هرچه دما بالاتر باشد، هیدراسیون سیمان سریع‌تر بوده و مقاومت بتن بیشتر خواهد شد.

[1] Time – Temperature History



شکل ۵-۲ اثر شرایط عمل آوری و میزان رطوبت در زمان آزمایش بر مقاومت فشاری بتن (در نسبت آب به سیمان ۰/۵)

جدول ۴-۲ درصد کسب مقاومت یک بتن مشخص را که در محدوده‌ی دمای ۴ تا ۴۶ درجه‌ی سانتی‌گراد ریخته شده و به صورت مرطوب مراقبت شده است را نسبت به مقاومت ۲۸ روزه بتن ریخته شده و در شرایط مرطوب و دمای ۲۱ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شده، نشان می‌دهد. از جدول ۴-۲ می توان نتیجه گرفت که مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتنی که در دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد ریخته و مراقبت شده است، حداکثر ۸۰ درصد مقاومت نمونه‌های بتنی که در دمای ۱۳ تا ۴۶ درجه‌ی سانتی‌گراد ریخته و مراقبت شده‌اند، خواهد بود. با این وجود در سنین بالاتر چنین اختلافاتی در مقاومت بتن حاصل نمی‌شود. اصولاً مشاهده شده است که هرچه دمای ریختن و مراقبت از بتن تا زمان شکست نمونه بالاتر باشد، مقاومت نهایی (مثلاً یک ساله) کم‌تر خواهد بود.

از طرفی چنانچه تاریخچه‌ی زمان – حرارت بتن به صورتی باشد که نمونه‌های بتنی در دماهای متفاوت ریخته شوند (دمای ۲ ساعت اول بعد از بتن‌ریزی)، ولی در دمای ثابت مراقبت شوند، مقاومت ۲۸ روزه و درازمدت نمونه‌های بتنی ریخته شده در دمای پایین‌تر، بیش‌تر خواهد بود. همچنین اگر تاریخچه‌ی زمان – حرارت بتن بر اساس دمای ثابت در زمان ریختن بتن و دمای متفاوت در زمان مراقبت تنظیم گردد، کسب مقاومت ۲۸ روزه برای بتن‌های مراقبت شده در

دمای بالاتر، بیشتر خواهد بود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داده است که برای بتن ریخته شده در دمای ۲۱ درجه‌ی سانتی‌گراد چنانچه دمای مراقبت تا ۲۸ روز نزدیک به یخ زدگی و در حدود ۱ ،و یا ۱۰ درجه ی سانتی گراد باشد، مقاومت ۲۸ روزه ی بتن به ترتیب در حدود نصف و یا ۶۵ درصد مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتنی است که در دمای ۲۱ درجه سانتی گراد مراقبت شده باشد.

تاثیر تاریخچه ی زمان – حرارت بر مقاومت بتن می‌تواند کاربردهای مهمی در عملیات اجرایی ساختمان های بتنی داشته باشد. از آنجا که تاثیر دمای مراقبت از بتن نسبت به دمای ریختن بتن در کسب مقاومت به مراتب بیشتر است، بتن معمولی که در دمای سرد ریخته می‌شود، باید در یک دوره ی زمانی کافی بالتر از یک حداقل مشخص دما نگه داشته شود. از طرفی از بتنی که در تابستان و یا آب و هوای گرم مراقبت می‌شود، انتظار می‌رود که مقاومت اولیه ی بیشتر، ولی مقاومت نهایی کم‌تری نسبت به همان بتن که در زمستان یا آب و هوای سردتر مراقبت می‌شود، داشته باشد. در صنعت پیش ساخته می‌توان جهت امکان بازکردن سریعتر قالب‌ها، مراقبت با بخار را جهت توسعه‌ی مقاومت اولیه‌ی سریعتر، اعمال نمود. در بتن‌ریزی حجیم معمولاً برای یک زمان طولانی دمای بتن به مراتب بالاتر از دمای محیط باقی می‌ماند. بنابراین مقاومت درجای بتن در مقایسه با مقاومت نمونه هایی که در دمای معمولی آزمایشگاه مراقبت می‌شوند، در سنین اولیه بالاتر و در سنین بعدی پایین تر خواهد بود.

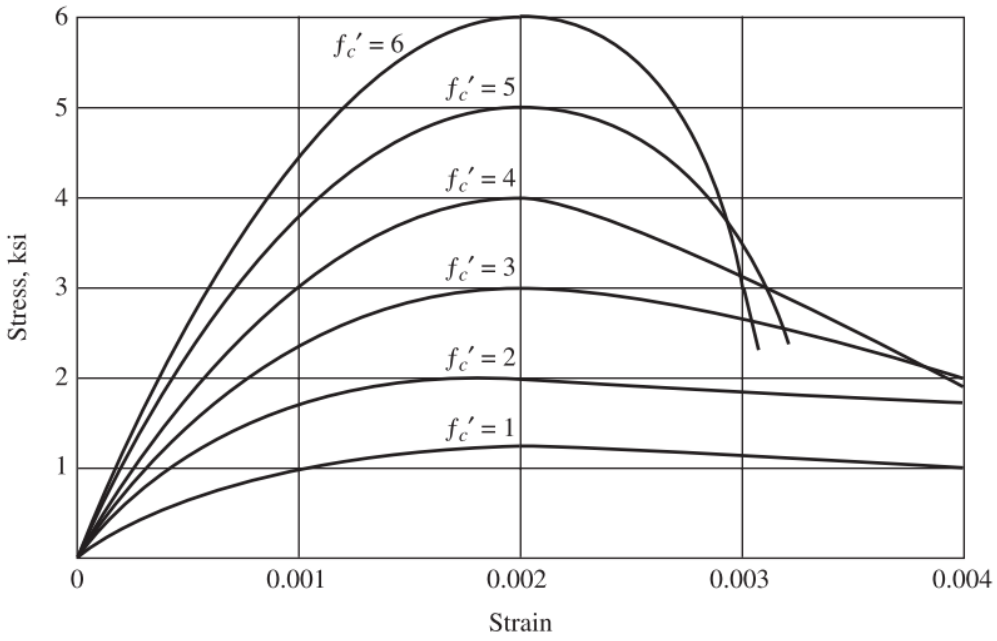
دمای نمونه در زمان آزمایش در یک محدوده ی وسیع از درجه حرارت‌های متعارف، تاثیر چندانی بر مقاومت بتن ندارد. با این وجود در دمای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی گراد در زمان آزمایش، مقاومت بتن به طور محسوسی کاهش می یابد. از طرفی در دمای بسیار پایین مثل ۶۰- درجه سانتی گراد، ممکن است مقاومت بتن از ۲۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش از خود نشان دهد.

جدول ٤-٢ درصد مقاومت کسب شده توسط بتن در دمای مختلف نسبت به بتن ریخته شده در دمای ۲۱ درجه‌ی سانتی‌گراد

دمای ریختن بتن	درصد کسب مقاومت			
و مراقبت از آن (°C)	۳روزه	۷روزه	۱۴روزه	۲۸روزه
۴	۲۰	۴۰	۵۷	۷۶
۱۳	۳۰	۵۷	۷۶	۹۶
۲۱	۳۲	۶۲	۸۰	۱۰۰
۴۶	۵۸	۸۲	۹۷	۱۰۵

۲-۳ منحنی تنش – کرنش بتن

تغییرشکل بتن تحت تنش فشاری، با منحنی تنش کرنش آن مشخص می گردد. شکل ۶-۲ نوعی منحنی تنش کرنش بتن را تحت تنش فشاری تک محوره نشان می‌دهد که با انجام آزمایش بارگذاری فشاری نمونه بتنی مطابق شکل ۷-۲ تهیه می‌گردد. همانطور که در شکل ۶-۲ دیده می‌شود، تغییرشکل بتن تحت تنش فشاری تک محوره به صورت غیرخطی است؛ به صورتی که هرچه بتن تحت تنش فشاری بالاتری قرار گیرد، رفتار غیرخطی آن بیشتر آشکار می‌شود.



شکل ٦-۲ منحنی تنش کرنش بتن تحت اثر بار کوتاه مدت

(هر ksi تقریبا برابر با 7 مگاپاسکال تخمین زده می‌شود)

رفتار غیرخطی بتن تحت تنش فشاری ناشی از تشکیل *ریزترک‌ها*[1] در آن است؛ به طوری که هرچه تنش افزایش یابد، مقدار ریزترک‌ها نیز افزایش خواهد یافت. با این وجود رفتار بتن را تا تنش حداکثر ۵۰ درصد مقاومت فشاری آن، می توان با یک رفتار خطی تقریب زد.

همانگونه که در شکل ۶-۲ دیده می‌شود، بتن پس از رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر (f_c')، می‌تواند تحت اثر بارهای کمتر تغییرشکل های بیشتری را تحمل کند؛ بدون آنکه منهدم گردد. این وضعیت شرایط رفتار نرم‌تری را برای بتن در محدوده‌ی بارهای حداکثر و نزدیک به شرایط شکست نهایی فراهم می‌آورد.

[1] Microcarcks

کرنش نظیر تنش حداکثر f_c' که با ε_0 نمایش داده می شود، برای بتن‌های با مقاومت پایین تا بتن‌های با مقاومت بالا در محدوده‌ی ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۳ متغیر باشد؛ اگرچه می توان ε_0 را برای بتن های با مقاومت معمولی حدود ۰/۰۰۲ درنظر گرفت. همچنین کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن که با ε_{cu} نمایش داده می شود، برای انواع بتن از ۰/۰۰۳ به بالا خواهد بود. این کرنش برای بعضی از نمونه های بتنی تا ۰/۰۰۵ و بالاتر نیز گزارش شده است. در بسیاری از آیین نامه های طراحی به صورت محافظه کارانه فرض می شود که $\varepsilon_{cu} = 0.003$ باشد. از بررسی نمودارهای شکل ۶-۲ همچنین میتوان نتیجه گرفت که با افزایش مقاومت فشاری بتن، کرنش نهایی شکست کاهش یافته و به بیان دیگر، رفتار بتن تحت فشار، تردتر می شود.

شکل ۷-۲ دستگاه بارگذاری و تعیین مقاومت فشاری بتن

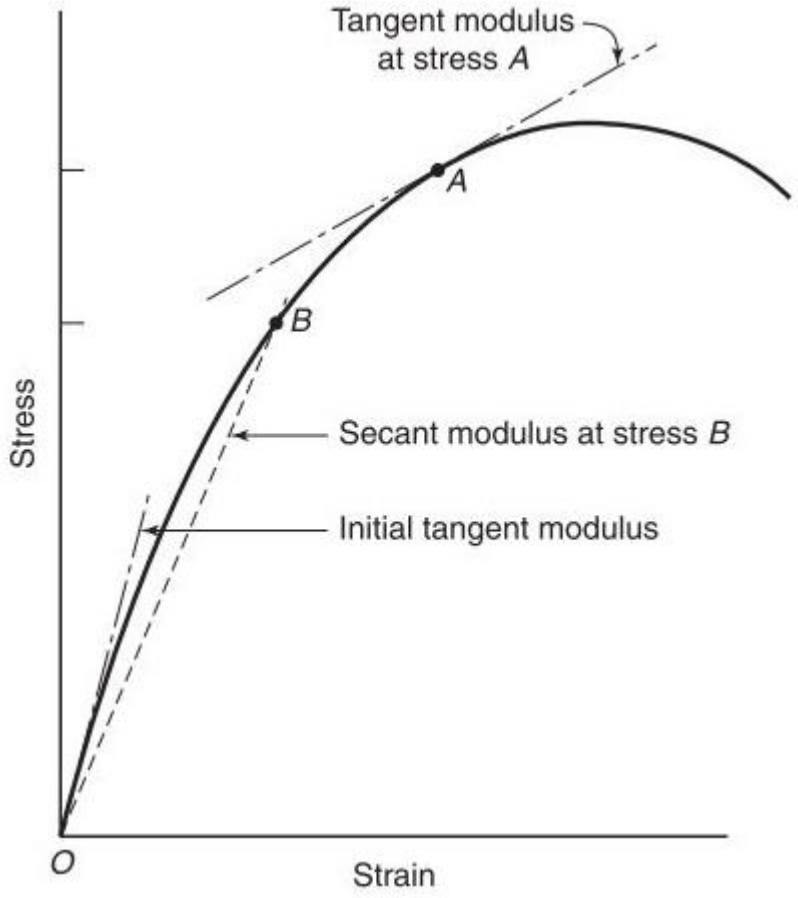
۲-۴ مدول الاستیسیته بتن

شیب منحنی تنش – کرنش بتن به عنوان مدول الاستیسیته بتن محسوب می‌شود. مدول الاستیسیته بتن بسته به نوع بتن، سن بتن، نوع و سرعت بارگذاری، خصوصیات اجزاء بتن و درصد اختلاط، و از همه مهم تر نحوه ی تعریف مدول الاستیسیته، متفاوت خواهد بود. مطابق شکل ۸-۲ مدول الاستیسیته بتن به دو صورت تعریف می گردد،

۱) *مدول الاستیسیته مماسی*[۱] که عبارت است از شیب خط مماس بر منحنی تنش – کرنش در هر نقطه از منحنی

[۱] Tangent Modulus Of Elasticity

۲) *مدول الاستیسیته متقاطع*[1] (یا سِکانت) که عبارت است از شیب خطی که هر نقطه از منحنی تنش – کرنش را به مبدأ متصل می‌کند.



شکل ۸-۲ نمایش مدول الاستیسیته مماسی و سکانتی در منحنی تنش کرنش بتن

۲-۴-۱ مدول الاستیسیته استاتیکی بتن

تعاریفی که برای مدول الاستیسیته‌ی مماسی و مدول الاستیسیته‌ی سکانت ارائه شد، منجر به یک عدد واحد برای مدول الاستیسیته‌ی بتن نخواهند شد؛ این تعاریف برای هر نقطه از منحنی تنش – کرنش بتن، دو عدد برای مدول الاستیسیته آن به دست می‌دهند. به همین جهت به عنوان مدول الاستیسیته‌ی استاتیکی بتن، از تعاریف زیر استفاده می‌شود.

۱) *مدول الاستیسیته‌ی مماسی اولیه* که عبارت است از شیب خطی که مماس بر منحنی تنش – کرنش در مبدأ ترسیم گردد.

[1] Secant Modulus of Elasticity

۲) *مدول الاستیسیته‌ی سکانت* که عبارت است از شیب خطی که از مبدأ به نقطه‌ای از منحنی تنش – کرنش که متناظر با ۴۰ درصد تنش حداکثر f_c' است، وصل می شود. این تعریف معمولاً به صورت ساده به نام *مدول الاستیسیته بتن* خوانده می‌شود.

۳) *مدول الاستیسیته وتری* که در اصل حالت اصلاح شده ای از تعریف قبلی است؛ با این تفاوت که بجای مبدأ از یک نقطه از منحنی که متناظر با کرنش 50×10^{-6} (کرنش ۵۰ مایکرو) است، استفاده می‌شود.

مدول الاستیسیته‌ی استاتیکی را بر اساس ACI318، برای بتن با وزن مخصوص (w_c) در محدوده‌ی ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم برمترمکعب، می‌توان از رابطه‌ی (۲-۴) تعیین نمود.

$$E_c = 0.043 {w_c}^{1.5} \sqrt{f_c'} \qquad (۲-۴)$$

آئین نامه ACI363 برای بتن های با مقاومت بالا رابطه‌ی (۲-۵) را پیشنهاد کرده است.

$$E_c = (33200\sqrt{f_c'} + 6900)\left(\frac{w_c}{2300}\right)^{1.5} \qquad (۲-۵)$$

همچنین تحقیقات انجام شده توسط دکتر مستوفی‌نژاد در دانشگاه صنعتی اصفهان، نشان داده است که برای بتن‌های با مقاومت بالا استفاده از روابط (۲-۶) و (۲-۷) نتایج واقع بینانه تری ارائه خواهد کرد.

$$E_c = 8300\ {f_c'}^{0.35} \qquad (۲-۶)$$

$$E_c = \frac{8\ E_a^{0.3}\ t^{0.053}(1 + \frac{SF}{CM})^{0.28}}{\left(\frac{W}{CM}\right)^{0.18}} \qquad (۲-۷)$$

در رابطه ی (۲-۷)، E_a مدول الاستیسیته‌ی سنگدانه‌های مصرفی، t سن بتن بر حسب روز، $\frac{SF}{CM}$ نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی (جمع وزن سیمان و میکروسیلیس)، و $\frac{W}{CM}$ نسبت آب به مواد سیمانی است.

۲-۴-۲ مدول الاستیسیته دینامیکی بتن

مدول الاستیسیته دینامیکی بتن به یک کرنش بسیار کوچک آنی مرتبط بوده و به صورت تقریبی با مدول الاستیسیته‌ی مماسی اولیه تعیین می‌شود. مدول الاستیسیته‌ی دینامیکی برای بتن های با مقاومت بالا، متوسط و پایین به ترتیب ۴۰، ۳۰ و ۲۰ درصد بالاتر از مدول الاستیسیته‌ی استاتیکی بتن است. برای تحلیل تنش در سازه هایی که تحت تاثیر بارگذاری زلزله و یا بار ضربه ای

قرار می‌گیرند، مناسب‌تر است تا از مدول الاستیسیته‌ی دینامیکی استفاده شود؛ که می‌توان آن را به صورت دقیق با یک آزمایش صوتی تعیین نمود.

زمینه‌ی پژوهش : چگونگی تعیین مدول الاستیسیته‌ی بتن با آزمایش صوتی

۲-۴-۳ مدول الاستیسیته خمشی بتن

مدول الاستیسیته خمشی بر اساس سختی خمشی قطعه بتنی تعیین می‌شود و اغلب در آنالیز و طراحی رویه های بتنی کاربرد دارد. این مدل را می‌توان بر اساس آزمایش تعیین خیز یک تیر دو سر ساده، که در وسط بارگذاری شده است به صورت رابطه زیر تعیین نمود،

$$E = \frac{Pl^3}{48Iy} \qquad (۲-۸)$$

در این رابطه، l طول تیر، P بار متمرکز وارد بر وسط تیر، I ممان اینرسی تیر و y خیز وسط دهانه می‌باشد.

۲-۴-۴ عوامل موثر بر مدول الاستیسیته‌ی بتن

در مواد مرکبی چون بتن، عواملی مانند درصد حجمی، چگالی و مدول الاستیسیته‌ی اجزاء اصلی، تعیین کننده‌ی خصوصیات مکانیکی و بخصوص مدول الاستیسیته خواهند بود. در این میان سنگ‌دانه‌ها نقش ویژه‌ای ایفا می‌کنند. هر چه میزان دانه‌های درشت با مدول الاستیسیته‌ی بالا در مخلوط بتنی بیش‌تر باشد، مدول الاستیسیته‌ی بتن نیز بیش‌تر خواهد بود.

مدول الاستیسیته‌ی دانه‌های طبیعی با تخلخل کم نظیر گرانیت و بازالت در محدوده‌ی ۷۰ تا ۱۴۰ گیگاپاسکال است؛ در حالی که مدول الاستیسیته‌ی ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک و شن‌های متخلخل در محدوده‌ی ۲۰ تا ۵۰ گیگاپاسکال تغییر می‌کند. همچنین مدول الاستیسیته‌ی یک سنگ دانه‌ی سبک وزن ممکن است تا حد ۷ گیگاپاسکال پایین بوده و تا حد ۲۸ گیگاپاسکال بالا باشد. مدول الاستیسیته‌ی خمیر سیمان مستقیماً به تخلخل آن وابسته است، و تخلخل خمیرسیمان نیز به عواملی چون نسبت آب به سیمان، میزان هوا، افزودنی های معدنی و درجه هیدراسیون سیمان بستگی دارد. مدول الاستیسیته‌ی سیمان پرتلند هیدراته شده با تخلخل متغیر، در محدوده‌ی ۷ تا ۳۰ گیگاپاسکال متغیر خواهد بود.

از آنجا که محدوده‌ی تغییرات مدول الاستیسیته‌ی دانه‌ها نسبت به محدوده‌ی تغییرات مدول الاستیسیته‌ی خمیرسیمان به مراتب وسیع‌تر است، لذا نقش سنگ‌دانه‌های مصرفی و مدول الاستیسیته‌ی آن‌ها در مدول الاستیسیته‌ی بتن به مراتب بالاتر خواهد بود. رابطه ی (۲-۷) تاثیر مدول الاستیسیته‌ی سنگ دانه ها در مدول الاستیسیته‌ی بتن با مقاومت بالا را بیان می کند.

شرایط آزمایش نیز در مدول الاستیسیته‌ی بتن مؤثر است. در سرعت بارگذاری بالاتر، بتن از خود مدول الاستیسیته‌ی بالاتری نشان می دهد. همچنین نمونه‌های بتنی که در شرایط مرطوب آزمایش شوند، در حدود ۱۵ درصد مدول الاستیسته‌ی بالاتری نسبت به نمونه‌های آزمایش شده در شرایط خشک، از خود بروز می‌دهند. این در حالی است که همانگونه که قبلاً اشاره شد، مقاومت فشاری نمونه های آزمایش شده در شرایط خشک، در حدود ۱۵ درصد بیش از مقاومت فشاری نمونه های آزمایش شده در شرایط مرطوب است.

۲-۵ ضریب پواسون بتن

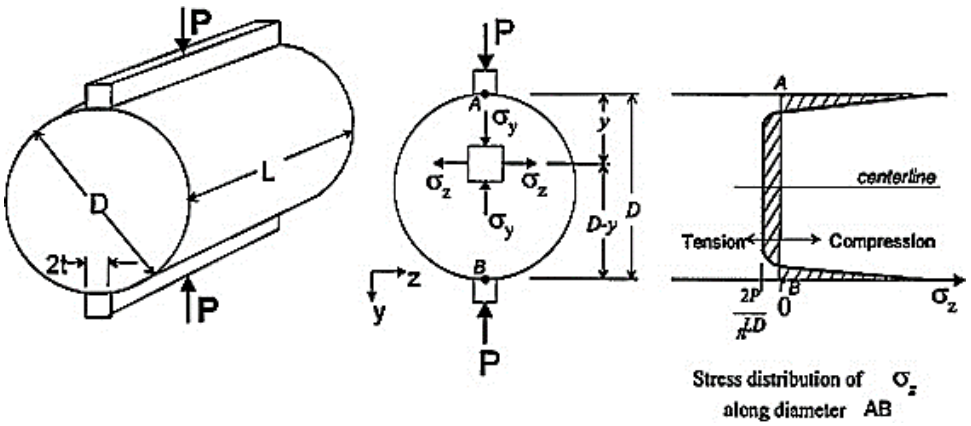
وقتی که نمونه‌ی استوانه‌ای بتنی تحت اثر فشار قرار گیرد، هم‌زمان با کوتاه شدن طول نمونه و ایجاد کرنش‌های طولی، نمونه در جهت جانبی افزایش بُعد پیدا می‌کند. نسبت کرنش‌های جانبی به کرنش فشاری محوری به عنوان ضریب پواسون خونده می‌شود. این ضریب برای بتن با مقاومت بالا در حدود ۰/۱۱، و برای بتن با مقاومت پایین در حدود ۰/۲۱ است. به عنوان یک میانگین مناسب برای ضریب پواسون بتن، عدد ۰/۱۵ تا ۰/۱۷ منطقی به نظر می‌رسد.

۲-۶ مقاومت کششی تک محوره بتن

مقاومت کششی بتن ممکن است تحت کشش خالص (کشش مستقیم) و یا کشش ناشی از خمش اندازه گیری شود. بسته به نوع مقاومت کششی تعریف شده، مقاومت کششی بتن در محدوده ۸ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن متغیر خواهد بود. دلیل کمتر بودن چشمگیر مقاومت کششی بتن نسبت به مقاومت فشاری آن وجود ریز ترک‌های فراوان در جسم بتن حتی قبل از شروع آزمایش است. چنین ریز ترک‌هایی در فشار بسته شده و مشکلی برای باربری فشاری ایجاد نمی‌کنند؛ اما در کشش مانع از انتقال تنش کششی شده و منجر به گسیختگی زودرس آن نمونه تحت تنش کششی می‌شوند.

۲-۶-۱ مقاومت کششی بتن تحت اثر کشش خالص

ایجاد تنش کششی خالص به صورت مستقیم در یک نمونه بتنی در آزمایشگاه چندان آسان نیست زیرا اساساً وسایل نگه داشتن نمونه، تنش‌های ثانویه‌ای تولید می‌کند که نمی‌توان اثرات آنها را نادیده گرفت. استاندارد ASTM C496 برای سنجش مقاومت کششی بتن تحت کشش خالص، آزمایش شکافت استوانه را معرفی می‌کند و مقاومت کششی حاصله را با f_{ct} نمایش داده و با توجه به شکل ۲-۹ با استفاده از رابطه (۲-۹) محاسبه می‌کند. این آزمایش به نام آزمایش برزیلی نیز خوانده می‌شود.



شکل ۹-۲ آزمایش شکافت استوانه و چگونگی توزیع تنش در قطر استوانه

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi LD} \qquad (۹-۲)$$

در این آزمایش نمونه بتنی استوانه ای استاندارد با ابعاد $150 \times 300\ mm$ از پهلو در طول دو خط محوری مخالف تحت فشار قرار می‌گیرد. بار به طور پیوسته با سرعت ثابت و در محدوده 0.7 تا $1.4\ MPa/sec$ وارد می‌شود تا نمونه شکسته شود. تنش فشاری وارد بر این نمونه تنش کششی متعامدی ایجاد می‌کند که در طول قطر عمودی تقریباً یکنواخت است. شکل ۹-۲ نحوه اعمال بار بر نمونه و تنش های ایجاد شده در جهت متعامد را نشان می‌دهد.

۲-۶-۲ مقاومت کششی بتن تحت اثر کشش ناشی از خمش

استاندارد ASTM C78 برای سنجش مقاومت کششی بتن ناشی از خمش، بارگذاری خمشی متمرکز در یک سوم دهانه تیر بتنی با ابعاد $150 \times 150 \times 500\ mm$ را پیشنهاد می‌کند. این تیر با سرعت اعمال تنش در محدوده 0.8 تا $1.2\ MPa/sec$ و تا لحظه ترک خوردگی و شکست تیر بارگذاری می‌شود. تنش کششی لحظه ترک خوردگی (شکست) تیر به نام مدول گسیختگی و یا مقاومت خمشی نامیده شده و با f_r نمایش داده می شود. این تنش بر اساس محاسبات تنش‌های ناشی از خمش از رابطه (۱۰-۲) محاسبه می گردد. در این رابطه b ، d و l به ترتیب عرض، ارتفاع و طول تیر بوده و P کل بار است که در دو نقطه به فاصله یک سوم از تکیه‌گاهها وارد شده است. (شکل ۱۰-۲)

شکل ۱۰-۲ آزمایش تعیین مدول گسیختگی بتن

$$f_r = \frac{Pl}{bd^2} \qquad (۲-۱۰)$$

رابطه (۲-۱۰) فقط وقتی معتبر است که شکست در سطح کششی و در یک سوم میانی طول دهانه باشد. چنانچه شکست خارج از یک سوم میانی باشد باید رابطه (۲-۱۰) اصلاح گردد که دوستان در صورت علاقه می توانند به استاندارد مربوطه مراجعه نمایند.

۲-۶-۳ رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن

اگرچه مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند؛ با این وجود تناسب مستقیمی بین آنها وجود ندارد. با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقاومت کششی بتن با رشد کمتری افزایش می‌یابد. تحقیقات نشان داده است که نسبت مقاومت کششی مستقیم بتن به مقاومت فشاری آن برای بتن با مقاومت کم ۱۰ تا ۱۱ درصد، برای بتن با مقاومت متوسط ۸ تا ۹ درصد و برای بتن با مقاومت بالا حدود ۷ درصد است.

بعضی از محققین برای تعیین مقاومت کششی متوسط حاصل از آزمایش برزیلی رابطه (۲-۱۱) را پیشنهاد کرده اند،

$$f_{ct} = 0.54\sqrt{f'_c} \qquad (۲-۱۱)$$

استاندارد اروپایی $CEB - FIP$ رابطه (۲-۱۲) را برای تعیین مقاومت کششی متوسط حاصل از آزمایش شکافت ارائه می‌کند،

$$f_{ct} = 0.3(f'_c)^{\frac{2}{3}} \qquad (۲-۱۲)$$

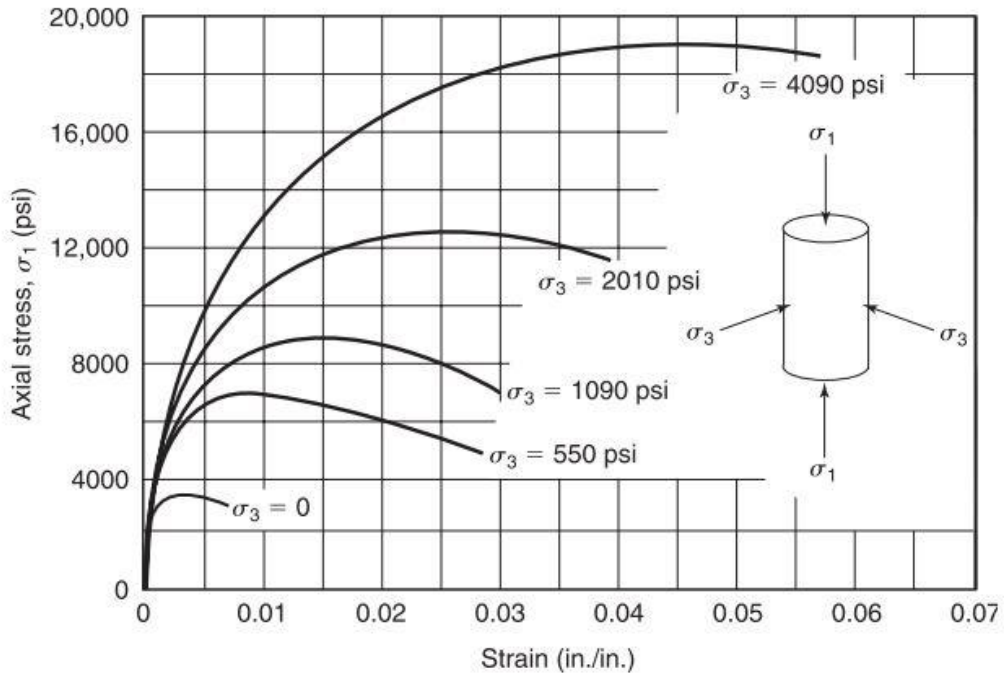
مقاومت کششی بتن در کشش ناشی از خمش و یا مدول گسیختگی (f_r) در مقایسه با مقاومت کششی بتن در کشش مستقیم، ۵۰ تا ۱۰۰ درصد بزرگتر به دست می‌آید. این مسئله عمدتاً به این دلیل است که رابطه خمش یک ارتباط خطی تنش کرنش در سرتاسر مقطع تیر بتنی فرض می کند و از طرفی در آزمایش تیر خمشی به خلاف آزمایش کشش مستقیم فقط در ناحیه محدودی از تارهای پایین مقطع تنش کششی حداکثر حاصل می‌شود. در عمل این حجم کوچک که به تنش حداکثر رسیده است با رفتاری

غیر خطی امکان انتقال تنش حداکثر به تارهایی از مقطع که تحت تنش کششی کوچکتری قرار دارند را نیز فراهم می‌کند و به همین دلیل ترک خوردگی مقطع دیرتر اتفاق می‌افتد و نتایج مشاهدات تجربی نشان داده است که در بتن های با مقاومت پایین مدول گسیختگی می‌تواند تا دو برابر مقاومت بتن در کشش مستقیم باشد. این افزایش برای بتن های با مقاومت متوسط و پایین به ترتیب در حدود ۷۰ درصد، و ۵۰ تا ۶۰ درصد گزارش شده است. توجه شود که در هر حال آزمایش خمشی برای کنترل کیفیت بتن در تیرها، دیوارها و روسازی بزرگراه‌ها و فرودگاهها ارجعیت دارد، زیرا بتن به جای کشش مستقیم، در خمش بارگذاری می‌شود. آیین نامه $ACI\ 318$ برای تعیین مدول گسیختگی جهت محاسبات تیرها، رابطه (۲-۱۲) را پیشنهاد نموده است.

$$f_r = 0.7\sqrt{f'_c} \qquad (۲-۱۳)$$

۲-۷ رفتار بتن تحت اثر تنش چند محوره

رفتار بتن تحت تنش های چند محوره بسیار پیچیده بوده و بر خلاف آزمایش‌های استانداردی که برای تعیین رفتار بتن تحت فشار تک محوره وجود دارد، آزمایش‌های استانداردی برای تعیین رفتار بتن تحت تنش های چند محوره وجود ندارد. با دقت در شکل ۲-۱۱ دیده می‌شود که مقاومت و شکل پذیری بتن تحت فشار سه محوره در مقایسه با مقاومت و شکل پذیری آن تحت فشار تک محوره افزایش قابل توجهی می یابد.



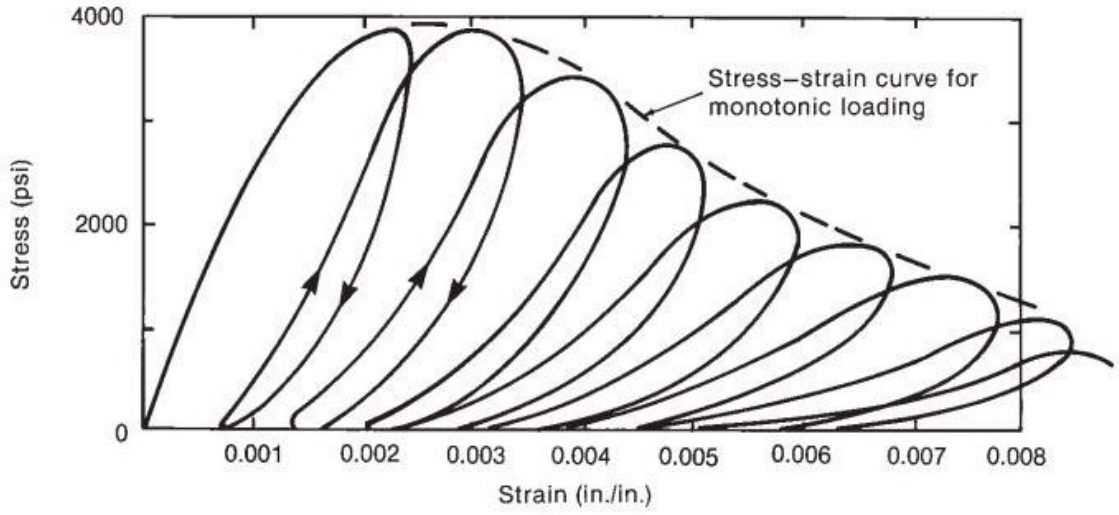
شکل ۲-۱۱ منحنی های تنش کرنش نمونه های بتنی استوانه ای تحت فشار سه محوری

($f'_c = 3600\ psi = 25.2\ MPa$)

۲-۸ مقاومت خستگی بتن

آنچه تاکنون در مورد مقاومت بتن گفته شد همه مربوط به یک بارگذاری استاتیکی بود. با این وجود در بعضی از سازه ها ممکن است بارهای تکراری بر سازه اثر کند. چنانچه یک ماده تحت اثر تعدادی بارهای تکراری قرار بگیرد به صورتی که هر کدام از آن بارها کوچکتر از مقاومت فشاری استاتیکی آن ماده باشد، و ماده تحت اثر آن بارهای کوچک دچار شکست شود، اصطلاحاً می‌گوییم آن ماده در اثر خستگی[۱] شکسته شده است. پدیده خستگی در مورد اکثر مصالح و از جمله بتن و فولاد وجود دارد اگرچه در این قسمت فقط مسئله خستگی را در مورد بتن دنبال می‌کنیم.

برای روشن شدن بهتر مسئله خستگی در بتن، ابتدا یک نمونه بتنی را که تحت بارگذاری تا حد مقاومت بتن و سپس باربرداری، و مجدداً بارگذاری تا آستانه تنش‌های حداکثر قابل تحمل و سپس باربرداری و تکرار این وضعیت قرار گیرد، در نظر بگیرید. منحنی‌های تنش کرنش فشاری برای بار تکراری یک نمونه بتنی با مقاومت $f'_c = 28\ MPa$ در شکل ۲-۱۲ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که پس از هر باربرداری مقدار قابل توجهی کرنش های پسماند در نمونه بتنی باقی می‌ماند که این مسئله باعث می‌شود بعد از تعداد سیکل محدودی بارگذاری، نمونه تقریباً مقاومت خود را از دست بدهد.



شکل ۲-۱۲ منحنی های تنش کرنش فشاری بتن تحت اثر بارهای تکراری

($f'_c = 4000\ psi = 28\ MPa$)

[۱] Fatigue

۲-۹ ارزیابی و پذیرش بتن

بتن ماده های مرکب از سیمان، آب، سنگدانه و هوا بوده و تغییرات در خصوصیات این اجزاء و تغییرات در مسائلی همچون جای‌دادن و تراکم بتن به تغییراتی در مقاومت بتن ساخته شده منجر می شود. از طرفی تفاوت در شرایط آزمایش و دستگاه نیز تفاوت‌های آشکاری در مقاومت بتن ایجاد می‌کند. از این جهت آیین‌نامه‌ها به این تغییرات آماری در نتایج آزمایش مقاومت فشاری توجه کرده و با ارائه تعریف‌ها و روابطی سعی می‌کنند تا یک ضریب اطمینان مناسب را در عدد مقاومت فشاری بتن منظور نمایند.

۲-۹-۱ پذیرش نمونه های آزمایشگاهی

مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، مقاومت یک نمونه آزمایش بتن، میانگین مقاومت حداقل دو آزمونه‌ی استوانه‌ای به ابعاد $150 \times 300\ mm$ و یا میانگین حداقل سه آزمونه‌ی استوانه ای به ابعاد $100 \times 200\ mm$ است که از یک مخلوط بتن برداشته شده و در سن ۲۸ روز یا در سن مشخص شده برای f'_c آزمایش شده باشد.

آزمایشگاهِ مسئول انجام آزمایش‌ها باید دارای صلاحیت تایید شده از طرف سازمان برنامه و بودجه باشد. مسولین آزمایشگاه باید آزمایش‌های بتن تازه را در کارگاه انجام دهند. همچنین آزمونه‌ها را برای عمل آوری استاندارد آماده نمایند و در صورت لزوم آزمونه‌هایی برای عمل آوری در کارگاه تهیه کرده و دمای بتن تازه را همراه با آماده سازی آن ها یادداشت نمایند. کلیه‌ی گزارش‌های آزمایش پذیرش بتن باید برای مهندس ناظر، کارفرما، مقام قانونی مسئول و در صورت لزوم برای تولید کننده بتن ارسال شوند. مسئولین آزمایشگاه محلی و مسئولین آزمایشگاه مرکزی که آزمایش ها را انجام می دهند باید دارای صلاحیت کافی باشند.

۲-۹-۲ تواتر نمونه برداری

نمونه برداری در هر سازه و برای هر نوع و رده‌ی بتن باید در محل مصرف نهایی، قبل از بتن ریزی در عضو مورد نظر صورت گیرد. پذیرش بتن برای هر نوع و رده در هر سازه نیز به صورت جداگانه است. در مواردی که حجم هر پیمانه اختلاط بتن در پای کار یک متر مکعب باشد، تواتر نمونه برداری باید حداقل برابر با بیشترین مقادیر زیر باشد،

۱) یک نمونه در هر نوبت کاری روزانه
۲) یک نمونه برای هر ۳۰ متر مکعب بتن
۳) یک نمونه برای هر ۵۰ متر مربع سطح دال و دیوار
۴) یک نمونه برای هر ۱۰۰ متر طول تیر و کلاف در مواردی که جدا از سایر قطعات بتن ریزی می شوند
۵) یک نمونه برای هر ۵۰ متر طول ستون

در مواردی که حجم هر پیمانه اختلاط بتن در پای کار بیشتر یا کمتر از یک متر مکعب باشد، مقادیر فوق را می توان به همان نسبت افزایش یا کاهش داد مشروط بر آنکه این نسبت ها بیشتر از ۲ و یا کمتر از نصف نشوند. همچنین در هر سازه برای هر نوع و رده‌ی بتن حداقل شش نوبت نمونه‌برداری صرف‌نظر از حجم و سطح سازه ضرورت دارد. در مواردی که حجم کل هر نوع یا رده‌ی بتن در یک سازه از ۳۰ مترمکعب کمتر باشد، به شرط آنکه مهندس ناظر بتن را مناسب تشخیص دهد، می توان از نمونه‌برداری و آزمایش صرف نظر کرد.

۲-۹-۳ ضوابط پذیرش مقاومت بتن

مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ضوابط زیر را برای پذیرش مقاومت بتن اعلام کرده است. در ابتدا باید دقت داشت که نمونه‌گیری از بتن باید مطابق استاندارد ملی انجام شده باشد و همچنین ساخت و عمل آوری آزمونه‌های بتنی در کارگاه نیز باید مطابق استاندارد انجام شده باشد. با رعایت این شروط مقاومت فشاری بتن هنگامی قابل قبول است که شروط زیر برقرار باشند.

۱) میانگین مقاومت هر سه نمونه متوالی برابر یا بیشتر از f'_c باشد.

۲) مقاومت هیچ یک از نمونه ها کمتر از $0.9f'_c$ نباشد.

در مواردی که تنها شرط اول برآورده نشود، می‌توان بتن را از نظر سازه‌ای پذیرفت؛ ولی چنانچه شرط دوم برآورده نشود باید اقداماتی به عمل آیند تا میانگین نتایج مقاومت در آزمایش‌های بعدی افزایش یابد. همچنین در حالتی که شرط دوم تامین نگردد باید الزامات بررسی نتایج بتن کم مقاومت به اجرا گذاشته شوند. چنانچه از آزمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ یا ۱۰۰ میلیمتر برای تعیین مقاومت فشاری استفاده شده باشد، می‌توان طبق ضوابط ارائه شده در آیین نامه‌ی آبا این نتایج را به نتایج استوانه‌ای تبدیل نمود.

۲-۹-۴ بررسی نتایج بتن کم مقاومت

در مواردی که نتایج آزمایش مقاومت هر یک از نمونه ها مطابق ضوابط گفته شده تامین نگردد یا چنانچه آزمایش نمونه‌های عمل آمده در کارگاه نقایصی در حفاظت عمل آوری بتن نشان دهد، باید اقداماتی انجام شوند تا نسبت به کافی بودن مقاومت سازه اطمینان حاصل گردد. چنانچه احتمال بتن کم مقاومت تایید شود و محاسبات سازه کاهش قابل ملاحظه‌ای را در مقاومت سازه نشان دهند، آزمایش مغزه‌گیری از ناحیه مورد نظر مطابق استاندارد ملی به اجرا گذاشته می شود. در چنین مواردی از ناحیه مورد نظر ۳ عدد مغزه باید گرفته شود. مغزه‌های گرفته شده باید در شرایط مطلوب در کیسه ها یا ظروف عایق رطوبت نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شوند و آزمایش کردن مغزها باید بین پنج روز پس از نگهداری در آب تا ۷ روز پس از مغزه‌گیری آزمایش شوند؛

مگر آنکه روش دیگری توسط مهندس ناظر اجازه داده شده باشد. بتن ناحیه‌ای که از آن مغزه‌گیری شده هنگامی قابل قبول تلقی می شود که شروط زیر تامین شده باشند،

۱) میانگین مقاومت هر سه مغزه حداقل $0.85f'_c$ باشد.

۲) مقاومت هیچ یک از مغزها از $0.75f'_c$ کمتر نباشد.

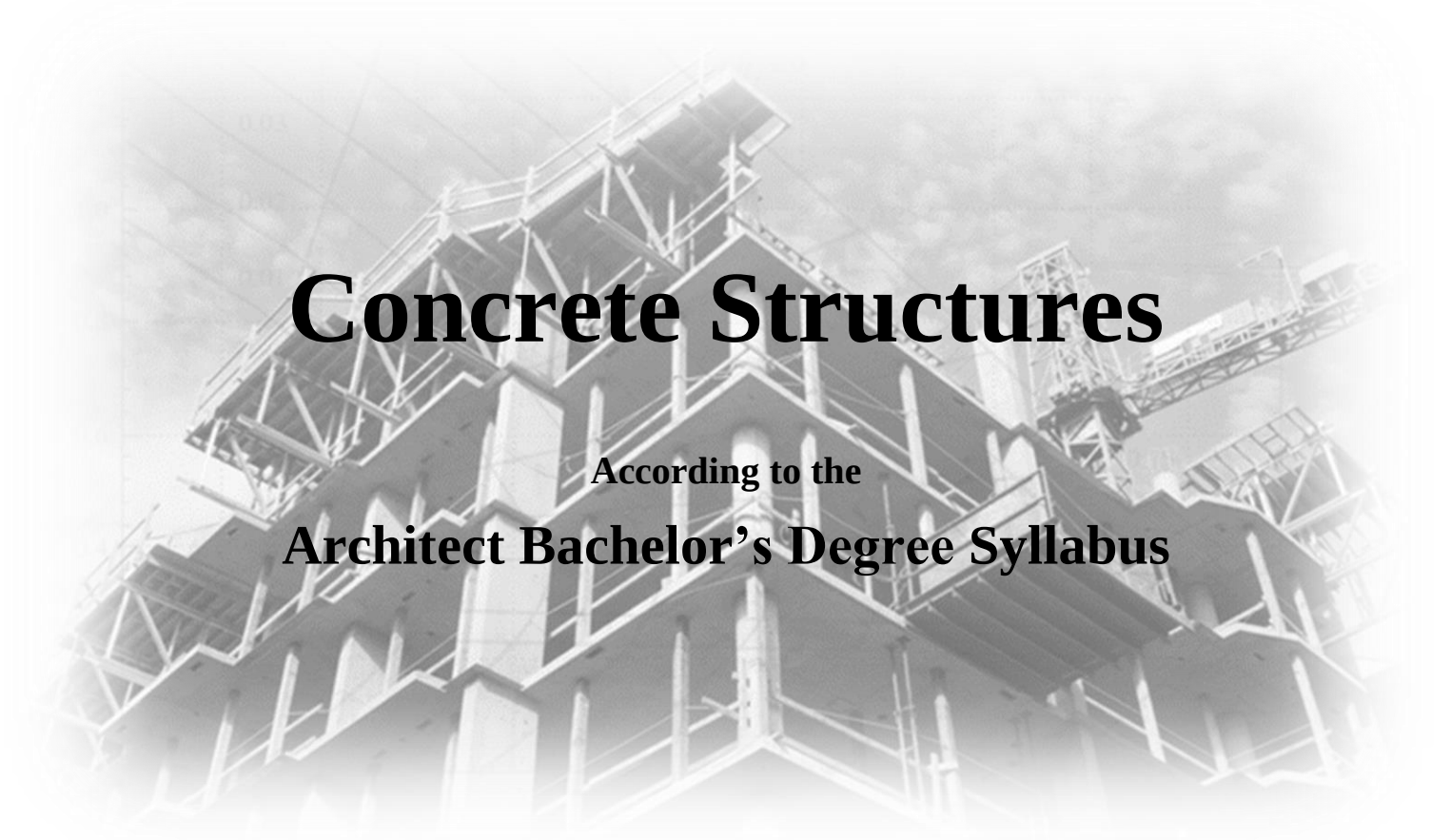
آزمایش مغزه‌های اضافی از مناطقی که نتایج آزمایش مغزه آنها از آشفتگی برخوردار هست مجاز است. در مواردی که ضوابط ارزیابی مقاومت سازه بر اساس نتایج آزمایش مقاومت مغزه‌ها برآورده نگردد و کفایت مقاومت سازه در ابهام باقی بماند، مهندس ناظر یا مقام قانونی مسئول می تواند برای آن بخش تایید نشده سازه دستور مطابق فصل ۹–۲۳ مبحث نهم و یا هر دستور مقتضی دیگر صادر نماید.

فصل سوم

طراحی سازه های بتن‌آرمه

Ferdows Institute or Higher Education

Ministry of Science, Research and Technology (Iran)



Concrete Structures

According to the

Architect Bachelor's Degree Syllabus

Developed by

Davoud Majidi Nasrabadi, M.Sc.

Winter 2022