CHAPTER 1

Reinforced Concrete: Mechanics and Technology

CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE

Concrete is a mixture of sand, gravel, crushed rock, or other aggregates held together in a rocklike mass with a paste of cement and water. Sometimes one or more admixtures are added to change certain characteristics of the concrete such as its workability, durability, and time of hardening. As with most rocklike substances, concrete has a high compressive strength and a very low tensile strength. Reinforced concrete is a combination of concrete and steel wherein the steel reinforcement provides the tensile strength lacking in the concrete. Steel reinforcing is also capable of resisting compression forces and is used in columns as well as in other situations, which are described later.

Ali R. Emami

Reinforced Concrete: Mechanics and Design

۲-۷ مقاومت فشاری تک محورهٔ بتن

۲-۷-۱ تعریف مقاومت فشاری بتن و محدودهٔ تغییرات آن

مقاومت فشاری بتن نه تنها به عنوان مهم‌ترین خصوصیت مکانیکی بتن، بلکه به عنوان یکی از مهم‌ترین خواص رفتاری بتن شناخته می‌شود. مقاومت فشاری بتن ممکن است بر اساس نمونهٔ استوانه‌ای و یا نمونهٔ مکعبی سنجیده شود. نمونهٔ استوانه‌ای به صورت استاندارد، قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر دارد؛ هم‌چنین بعد نمونهٔ مکعبی به صورت استاندارد برابر ۱۵۰ میلی‌متر و یا ۲۰۰ میلی‌متر است. هر نمونه در سه لایه و با ۲۵ بار میله‌زدن با میله‌ای به قطر ۱۶ میلی‌متر برای تراکم هر لایه، ریخته شده و به مدت ۲۸ روز در زیر آب و یا در اطاقی با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد و در دمایی در محدودهٔ ۲۱ تا ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد مراقبت می‌شود. آن‌گاه نمونه‌ها تحت سرعت بارگذاری مشخص ($0.15-0.34\,\mathrm{MPa/sec}$ بر اساس استاندارد $ASTM\ C39$) و تا نقطهٔ شکست بارگذاری می‌شوند. مقاومت حاصله برای نمونهٔ استوانه‌ای با f_c' ، و برای نمونهٔ معکبی با f_{cu}' نمایش داده می‌شود.

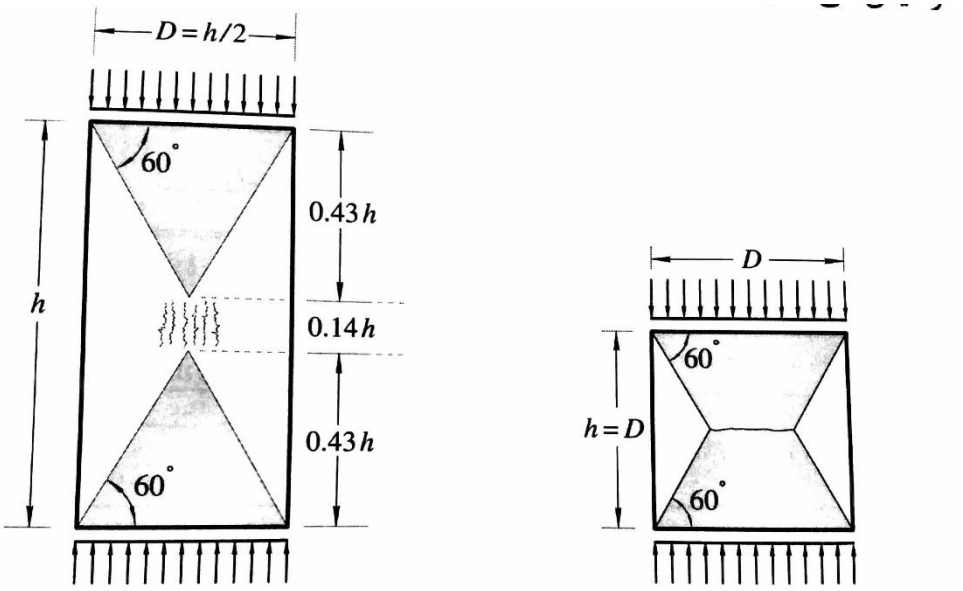
۲-۷-۲ عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری بتن

با استفاده از اختلاط اولیهٔ یکسان، ممکن است تحت شرایط متفاوت، بتن از خود مقاومت فشاری متفاوتی نشان دهد. در ادامه به بعضی از عوامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن پرداخته می‌شود.

۱- نوع نمونه

نوع نمونه بر مقاومت فشاری بتن اثر می‌گذارد؛ به صورتی که مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر، در حدود ۸۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ مکعبی با بعد ۱۵۰ میلی‌متر $(f_c' \approx 0.8 f_{cu}')$؛ و در حدود ۸۳ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ مکعبی با بعد ۲۰۰ میلی‌متر است. با این وجود برای بتن سبک وزن، مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی تقریباً یکسان خواهند بود.

علت اصلی تفاوت مقاومت نمونهٔ استوانه‌ای و مکعبی را باید در تفاوت نسبت ابعاد هر کدام از نمونه‌ها، و ایجاد تنش‌های برشی بین صفحات فولادی اِعمال بار و سطح نمونه به دلیل تفاوت در مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد و بتن جستجو کرد. چنین تنش‌های برشی با زاویهٔ ۶۰ درجه در نمونه نفوذ می‌کنند و بنابراین نفوذ این تنش‌ها از دو طرف نمونه حداکثر به میزان $\tan 60^\circ$ ضرب در بعد افقی نمونه خواهد بود. بدین ترتیب برای نمونه‌هایی با نسبت ارتفاع به عرض بیش از ۱/۷۳، ناحیه‌ای از وسط وجود خواهد داشت که بدون تأثیر این تنش‌های جانبی و فقط تحت تأثیر تنش‌های خالص فشاری قرار می‌گیرد. این وضعیت می‌تواند برآورد واقع بینانه‌ای از مقاومت فشاری تک محوری حقیقی بتن به دست دهد. در صورتی که در نمونهٔ مکعبی با نسبت ابعاد ۱/۰، رئوس هرم‌های دربردارندهٔ تنش‌های برشی تولید شده در هم تداخل کرده و هیچ ناحیه‌ای تحت تنش خالص فشاری قرار ندارد.



شکل ۲-۲ *توزیع تنش‌های جانبی (اصطکاکی) ناشی از تفاوت خصوصیات بتن و صفحهٔ فولادی اِعمال بار، در ارتفاع نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی*

عامل دیگری نیز ممکن است در تفاوت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای دخالت داشته باشد. در نمونهٔ استوانه‌ای جهت بتن‌ریزی و جهت اعمال تنش یکسان است؛ در حالی‌که در نمونهٔ مکعبی معمولاً به جهت استفاده از سطوح صاف‌تر و موازی، نمونه را طوری زیر دستگاه قرار می‌دهند که جهت اعمال تنش عمود بر جهت بتن‌ریزی است. این مسأله به‌خصوص اگر بتن همگن نباشد، تأثیر قابل توجهی بر نتایج آزمایش می‌گذارد.

لازم به ذکر است که امروزه در بسیاری از کشورهای جهان و از جمله آمریکا، کانادا، استرالیا و ایران، از مقاومت فشاری نمونهٔ استوانه‌ای (f_c') استفاده می‌شود. در مقابل در بعضی از کشورهای اروپایی، مقاومت فشاری نمونهٔ معکبی (f_{cu}') مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- اندازهٔ نمونه

اندازهٔ نمونهٔ بتنی هم بر عددی که در آزمایشگاه به عنوان مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصل می‌شود، تأثیر می‌گذارد. در محدودهٔ ابعاد متداول نمونه‌ها، هر چه اندازهٔ نمونه بزرگ‌تر شود، مقاومت فشاری آن کاهش خواهد یافت. از جدول ۲-۱ می‌توان نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای با نسبت ابعاد ۲/۰ و با قطر غیر استاندارد، نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌های استاندارد با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر، و هم‌چنین نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با ابعاد متفاوت، نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌های استاندارد با بعد ۱۵۰ میلی‌متر را به‌دست آورد.

علت تأثیر اندازهٔ نمونه بر مقاومت فشاری بتن را می‌توان به مسألهٔ 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 خواهد داشت. این نقاط ضعف، مقاومت فشاری نمونهٔ آزمایشگاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هر چه بعد نمونه بزرگ‌تر بوده و حجم بتن بیش‌ترباشد، احتمال وجود نقاط ضعیف بیش‌تر، افزایش یافته و مقاومت نمونه کاهش می‌یابد. با این وجود، چنان‌چه ابعاد نمونه بزرگ‌تر از ابعاد متداول شود، نقاط ضعف در نمونه به میزان یک‌نواختی خواهد رسید و دیگر با افزایش بعد نمونه، کاهش مقاومت مشاهده نخواهد شد. این نکته را

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

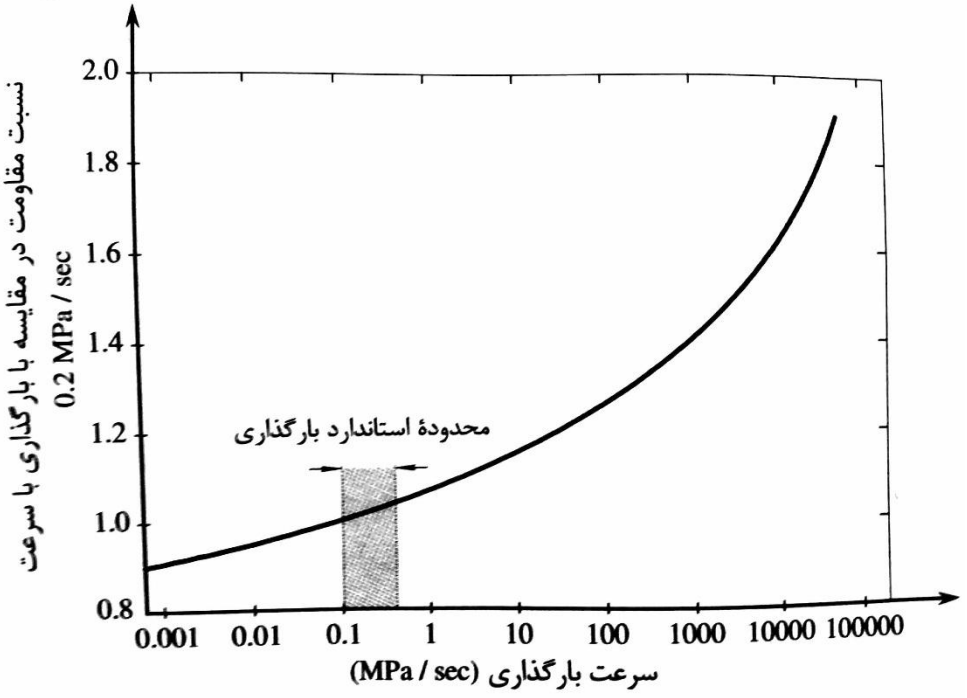
نمونه‌های استوانه‌ای	اندازهٔ نمونه (mm)	۵۰ × ۱۰۰	۷۵ × ۱۵۰	۱۰۰ × ۲۰۰	۱۵۰ × ۳۰۰	۲۰۰ × ۴۰۰	۳۰۰ × ۶۰۰	۴۵۰ × ۹۰۰	۶۰۰ × ۱۲۰۰
	نسبت مقاومت	۱/۰۹	۱/۰۶	۱/۰۴	۱/۰۰	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۸۶	۰/۸۴
نمونه‌های مکعبی	اندازهٔ نمونه (mm)		۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰		
	نسبت مقاومت		۱/۱۰	۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۹		

۳- سرعت بارگذاری

سرعت بارگذاری به صورت میزان افزایش تنش در واحد زمان تعریف می‌شود. سرعت بارگذاری نمونهٔ آزمایشی بتنی بر مقاومتی که آن نمونه از خود نشان می‌دهد، تأثیر می‌گذارد؛ به صورتی که هر چه سرعت اِعمال تنش بالاتر باشد، بتن از خود مقاومت بیش‌تری نشان می‌دهد. شکل ۲-۳ تأثیر سرعت بارگذاری را بر مقاومت فشاری بتن نشان می‌دهد.

دلیل افزایش مقاومت فشاری در سرعت بارگذاری بالاتر را می‌توان در پدیدهٔ خزش جستجو کرد. هر چه 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 شد.

همان‌گونه که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود، در محدوهٔ سرعت‌های بارگذاری استاندارد، تفاوت عمده‌ای در مقاومت فشاری حاصل نمی‌شود. نتایج تجربی بعضی از تحقیقات نشان داده است که در مقایسه با سرعت بارگذاری در محدودهٔ استاندارد و برابر با 0.25 MPa/sec، برای نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر، چنان‌چه سرعت بارگذاری به ۳ درصد کاهش یابد (۳۰ برابر کم شود)، مقاومت فشاری استوانه‌ای فقط ۱۲ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی در همین وضعیت اگر سرعت بارگذاری ۳۰ برابر افزایش یابد، مقاومت فشاری حدود ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. در



۴- عوامل مرتبط با نوع و درصد مصالح بتن و نحوهٔ مراقبت

به جز عوامل فوق‌الذکر، عوامل دیگری نیز بر مقاومت فشاری بتن تاثیر می‌گذارند که عمدتاً عوامل درونی محسوب شده و به نوع و میزان پیشرفت ترکیبات موجود در بتن بر می‌گردند. این عوامل به صورت خلاصه از قرار زیر هستند:

الف- نوع سیمان: نوع سیمان مصرفی در گیرش اولیه تأثیر گذاشته و مقاومت فشاری ۳ روزه و ۷ روزهٔ متفاوتی را ایجاد می‌کند. این روند کسب مقاومت برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز قابل تعمیم است؛ ولی مقاومت فشاری دراز مدت بتن‌های ساخته شده با انواع سیمان تقریباً یکسان است. حتی گاهی مقاومت دراز مدت بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های دیرگیر، کمی بیش از مقاومت درازمدت بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های معمولی یا زودگیر می‌باشد. جدول ۲-۲، تأثیر نوع سیمان پرتلند بر مقاومت نسبی بتن در سنین ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز را نشان می‌دهد.

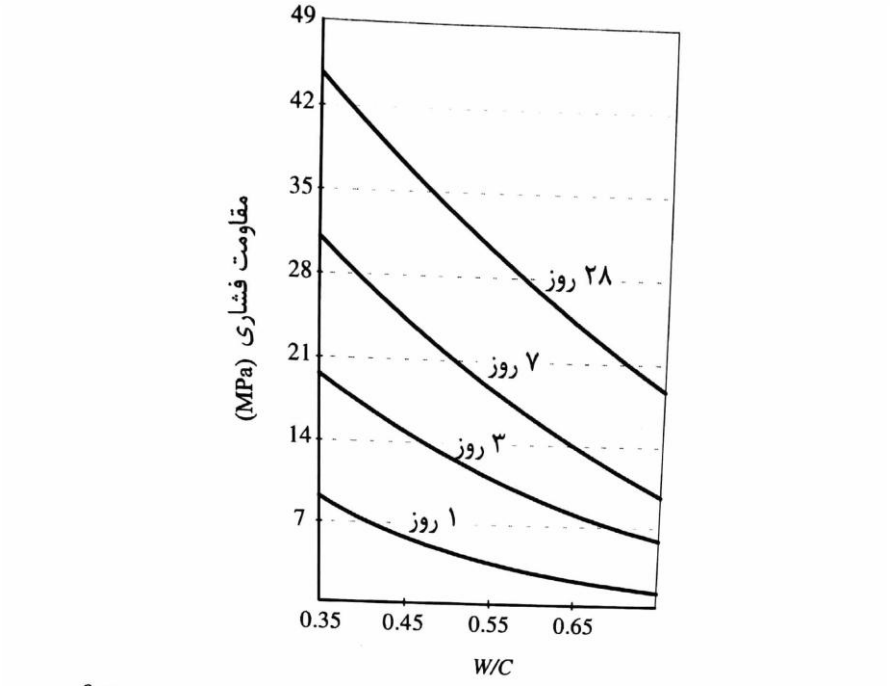
جدول ۲-۲ *مقاومت تقریبی نسبی بتن بر اساس نوع سیمان*

نوع سیمان	مقاومت فشاری (درصدی از نوع I)			
پرتلند	۱ روز	۷ روز	۲۸ روز	۹۰ روز
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

ب- نسبت آب به سیمان: آبرامز[1] در سال ۱۹۱۸ دریافت که رابطهٔ معکوسی بین نسبت آب به سیمان و مقاومت بتن وجود دارد. این رابطه به عنوان قاعدهٔ نسبت آب به سیمان آبرامز شناخته شده و به صورت رابطهٔ (۲-۱) بیان می‌گردد.

$$f_c' = \frac{k_1}{k_2^{(W/C)}} \qquad (۲-۱)$$

شایان ذکر است که بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، برای نسبت‌های آب به سیمان کم‌تر از ۰/۳، با کاهش اندک در نسبت آب به سیمان، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری بتن حاصل می‌شود. تولید بتن‌های با مقاومت خیلی بالا اصولاً با رعایت نسبت آب به سیمان حدود ۰/۲۵ انجام می‌گیرد.



ج- مواد سیمانی تکمیلی: همان گونه که قبلاً ذکر شد، مواد سیمانی دیگری نظیر خاکستر بادی، میکروسیلیس و یا سرباره می‌توانند به عنوان جانشین بخشی از سیمان در بتن به‌کار روند. چنین موادی اولاً با ابعاد بسیار ریز خود می‌توانند در خلل و فرج داخلی بتن جای گرفته و بتنی توپر و متراکم تولید کنند؛ و ثانیاً با انجام واکنش‌هایی با هیدروکسید کلسیم حاصل از ترکیبات سیمان، ترکیبات سخت‌تری را تولید می‌کنند. در این میان میکروسیلیس نقش ویژه داشته و به‌صورت خاص باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد.

د- خصوصیات سنگ‌دانه: در بتن معمولی مقاومت دانه‌ها (به جز سنگ‌دانه‌های سبک وزن) بر مقاومت بتن تأثیری نمی‌گذارد؛ زیرا مقاومت دانه‌های معمولی به مراتب بیش از مقاومت خمیر سیمان است. با این وجود در بتن با مقاومت بالا، مقاومت دانه نیز بر مقاومت بتن تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل در ساخت بتن با مقاومت بالا حتماً باید از دانه‌های با مقاومت بسیار خوب نظیر کوارتز، و یا لااقل از دانه‌های با مقاومت متوسط نظیر گرانیت و یا سنگ آهک استفاده نمود؛ استفاده از دانه‌های ضعیف نظیر ماسه سنگ، مرمر و بعضی از سنگ‌های دگرگونی سبب شکست زود هنگام این بتن خواهد شد.

خصوصیات دیگری از سنگ دانه‌ها -به جز مقاومت- نظیر اندازه، دانه‌بندی، شکل، بافت سطحی، و کانی‌شناسی[1] می‌توانند بر مقاومت بتن در رده‌های مختلف تأثیر بگذارند. کاهش در بزرگ‌ترین اندازهٔ دانه‌های مصرفی و استفاده از دانه‌بندی خوب و پیوسته، و نیز استفاده از دانه‌های با بافت سطحی خشن‌تر و یا دانه‌های خرد شده معمولاً منجر به کسب مقاومت بالاتری برای بتن خواهد شد. از طرفی بعضی از گزارشات نشان می‌دهند که برای بتن معمولی و تحت شرایط یکسان، تغییر در کانی دانه و به کار بردن دانه‌های آهکی به جای دانهٔ سیلیسی -مثلاً استفاده از سنگ آهک به جای ماسه سنگ- با بهبود اساسی مقاومت بتن همراه بوده است.

ه- شرایط مراقبت از بتن: واژهٔ عمل‌آوری یا مراقبت از بتن به روش‌هایی اطلاق می‌شود که در آن روش‌ها هیدراسیون سیمان ارتقاء داده می‌شود. این روش‌ها شامل کنترل زمان، شرایط رطوبتی و دما بلافاصله پس از قرار دادن مخلوط بتنی در قالب خواهد بود.

ه-۱ زمان: تحت شرایط مراقبت مرطوب و در دمای معمولی، برای یک بتن مشخص هر چه دورهٔ مراقبت طولانی‌تر باشد، مقاومت بالاتر خواهد رفت. ارزیابی مقاومت فشاری با گذشت زمان برای بتن ساخته شده با سیمان نوع I و به صورت مرطوب عمل آوری شده در دمای ۲۱°C را می‌توان بر اساس پیشنهاد کمیتهٔ *ACI* 209، با استفاده از رابطهٔ (۲-۲) انجام داد.

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

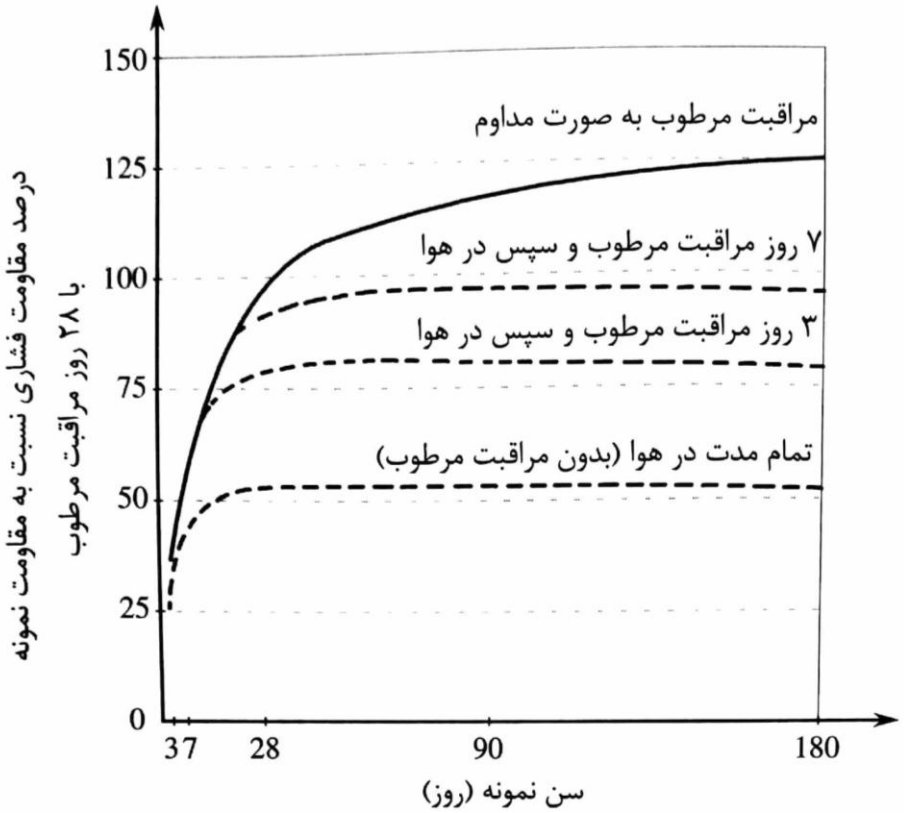
جدول ۲-۳ *رشد مقاومت بتن ساخته شده با سیمان نوع I در طول زمان تحت شرایط عمل‌آوری مناسب*

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

ه-۲ رطوبت: رطوبت کافی در طول دورهٔ عمل‌آوری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت بتن می‌گذارد. بعضی از تحقیقات نشان می‌دهد که پس از ۱۸۰ روز و در یک نسبت آب به سیمان معین، مقاومت بتن 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 نمونهٔ بتنی در زمان آزمایش نیز بر مقاومت فشاری بتن تأثیر می‌گذارد. در آزمایشات مشاهده شده است که نمونه‌های در هوا خشک شده، ۲۰ تا ۲۵ درصد مقاومت بیش‌تر نسبت به نمونه‌هایی که در شرایط اشباع آزمایش می‌شوند، از خود نشان می‌دهند. مقاومت پائین‌تر نمونه‌های اشباع احتمالاً به دلیل فشار منفذی موجود در خمیر سیمان است. یادآوری می‌شود که روش عمل استاندارد، ایجاب می‌کند که نمونه‌ها فقط 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 ۲-۵، تأثیر شرایط عمل‌آوری در دمای ^{o}C ۲۱و نیز رطوبت نمونه در زمان آزمایش را بر مقاومت فشاری بتن نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵ *تأثیر شرایط عمل‌آوری و میزان رطوبت نمونه در زمان آزمایش بر مقاومت فشاری بتن*

ه-۳ دما: برای بتن مرطوب به عمل‌آمده، تأثیر دما بر مقاومت به تاریخچهٔ زمان- حرارت[1] در هنگام ریختن بتن و مراقبت از بتن بستگی خواهد داشت. درمحدودهٔ دمای ^{o}C ۴ تا ^{o}C ۴۶، وقتی که بتن در یک دمای ثابت و مشخص ریخته شده و مراقبت شود، عموماً تا ۲۸ روز هر چه دما بالاتر باشد، هیدراسیون سیمان سریع‌تر بوده و مقاومت بتن بیش‌ترخواهد بود. جدول ۲-۴ درصد کسب مقاومت یک بتن مشخص را که در محدودهٔ دمای ^{o}C ۴ تا ^{o}C ۴۶ ریخته شده و به صورت مرطوب در همان دما مراقبت شده است، نسبت به مقاومت ۲۸ روزهٔ بتن ریخته شده و مراقبت شده در دمای ^{o}C ۲۱، در سنین تا ۲۸ روز نشان می‌دهد.

از جدول ۲-۴ ملاحظه می‌شود که مقاومت ۲۸ روزهٔ بتنی که در دمای ^{o}C ۴ ریخته و مراقبت شده باشد، حداکثر ۸۰ درصد مقاومت نمونه‌های بتنی که در دمای ^{o}C ۱۳ تا ^{o}C ۴۶ ریخته و مراقبت شوند، خواهد بود. با این وجود در سنین بالاتر،

جدول ۲-۴ *درصد مقاومت بتن ریخته شده و مراقبت شده در دمای یکسان بر حسب مقاومت ۲۸ روزهٔ بتن ریخته شده و مراقبت شده در دمای* ^{o}C ۲۱ *در سنین مختلف*

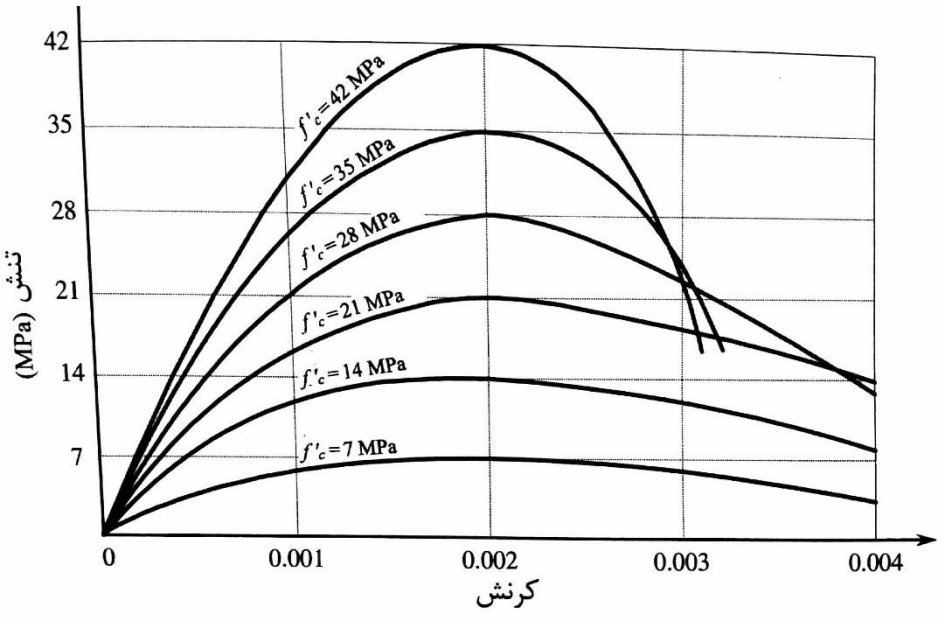
دمای ریختن بتن و مراقبت از آن (^{o}C)	درصد کسب مقاومت			
	۳ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه
۴	۲۰	۴۰	۵۷	۷۶
۱۳	۳۰	۵۷	۷۶	۹۶
۲۱	۳۲	۶۲	۸۰	۱۰۰
۴۶	۵۸	۸۲	۹۷	۱۰۵

از طرفی چنانچه تاریخچهٔ زمان–حرارت بتن به صورتی باشد که نمونه‌های بتنی در دمای متفاوت ریخته شوند (دمای ۲ ساعت اول پس از ساخت بتن)، ولی در دمای ثابت مراقبت شوند، مقاومت ۲۸ روزه و دراز مدت نمونه‌های بتنی ریخته شده در دمای پایین‌تر، بیش‌ترخواهد بود. هم‌چنین اگر تاریخچهٔ زمان–حرارت بتن بر اساس دمای ثابت در زمان ریختن و دمای متفاوت در زمان مراقبت تنظیم گردد، کسب مقاومت ۲۸ روزه برای بتن‌های مراقبت شده در دمای بالاتر، بیش‌ترخواهد بود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داده است که برای بتن ریخته شده در دمای ^{o}C ۲۱، چنانچه دمای مراقبت تا ۲۸ روز نزدیک به یخزدگی و در حدود ^{o}C ۱، و یا ^{o}C ۱۰ باشد، مقاومت ۲۸ روزهٔ بتن به ترتیب در حدود نصف و یا ۶۵ درصد مقاومت ۲۸ روزهٔ بتن مراقبت شده در دمای ^{o}C ۲۱ خواهد بود.

۲-۸ منحنی تنش-کرنش بتن

تغییر شکل بتن تحت تنش فشاری با منحنی تنش-کرنش آن مشخص می‌شود. منحنی نوعی تنش-کرنش بتن تحت فشار تک محوره در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که تغییر شکل بتن تحت تنش فشاری تک محوره به صورت غیرخطی است؛ به صورتی که هر چه بتن تحت تنش فشاری بالاتری قرار گیرد، رفتار غیرخطی آن بیش‌تر آشکار می‌شود. رفتار غیرخطی بتن تحت تنش فشاری ناشی از تشکیل تدریجی ریزترک‌ها[1] در آن است؛ به طوری که هر چه تنش افزایش یابد، مقدار ریز ترک‌ها نیز افزایش خواهد یافت. با این وجود رفتار بتن را تا تنش حداکثر ۵۰ درصد مقاومت فشاری آن، می‌توان با یک رفتار خطی تقریب زد.

کرنش نظیر تنش حداکثر f_c' که با ε_0 نمایش داده می‌شود، برای بتن‌های با مقاومت پایین تا بتن‌های با مقاومت بالا ممکن است در محدودهٔ ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۳ متغیر باشد؛ اگر چه می‌توان ε_0 را برای بتن‌های با مقاومت معمولی حدود ۰/۰۰۲ در نظر گرفت. هم‌چنین کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن که با ε_{cu} نمایش داده می‌شود، برای انواع بتن از ۰/۰۰۳ به بالا خواهد بود. این کرنش برای بعضی از انواع نمونه‌های بتنی تا ۰/۰۰۵ و بالاتر نیز گزارش شده است. در بسیاری از آئین‌نامه‌های طراحی به صورت محافظه کارانه فرض می‌شود که $\varepsilon_{cu} = 0.003$ باشد. از شکل ۲-۶ ملاحظه می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری بتن، کرنش نهایی شکست کاهش یافته و به بیان دیگر، رفتار بتن تحت فشار، تردتر می‌شود.



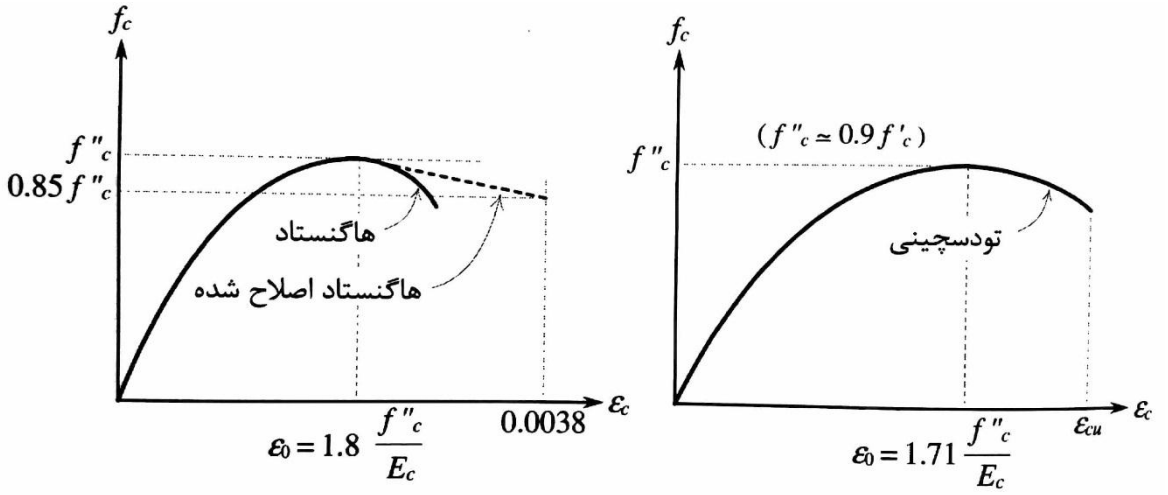
معادلهٔ رفتاری تغییرات تنش فشاری تک محوری بتن بر حسب کرنش را می‌توان به صورت منحنی هاگنستاد[۳] یا سهمی هاگنستاد به صورت رابطهٔ (۲-۴) بیان کرد. این منحنی در شکل ۲-۷- الف نمایش داده شده است.

$$f_c = f_c'' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_o} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \right] \qquad (۲-۴)$$

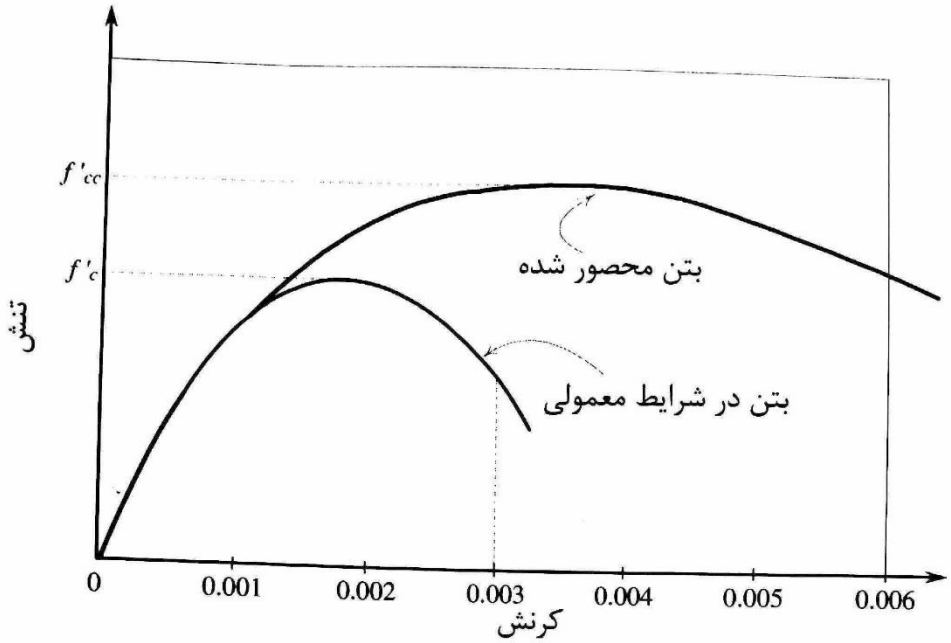
در رابطهٔ (۲-۴) f_c'' تنش حداکثری است که در عضو بتنی حاصل می‌شود، در حالی که f_c' مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای است. مقدار f_c'' به صورت $f_c'' = k_s f_c'$ به‌دست می‌آید که ضریب k_s را می‌توان برای بتن‌هایی با مقاومت فشاری استوانه‌ای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، و مساوی یا بزرگ‌تر از ۳۵ مگاپاسکال، به ترتیب برابر ۱/۰، ۰/۹۷، ۰/۹۵، ۰/۹۳ و ۰/۹۲ در نظر گرفت. منحنی هاگنستاد به صورت اصلاح شده نیز در شکل ۲-۷- الف، به صورت خط چین نمایش داده شده است که در محاسبات، رفتار بهتری را از خود نشان می‌دهد.

منحنی تنش- کرنش فشاری بتن را هم‌چنین می‌توان بر اساس معادلهٔ تودسچینی[۱] که در رابطهٔ (۲-۵) معرفی شده است، تبیین کرد. این منحنی در شکل ۲-۷- ب نمایش داده شده است.

$$f_c = \frac{2 f_c''(\varepsilon_c / \varepsilon_{cu})}{1 + (\varepsilon / \varepsilon_o)^2} \qquad (۲-۵)$$



لازم به ذکر است که منحنی تنش-کرنش بتن، تحت تأثیر وضعیت محصور شدگی[1] نیز قرار می‌گیرد. چنانچه نمونهٔ بتنی در زمان بارگذاری تحت تأثیر فشار جانبی نیز قرار گیرد، شرایط این نمونه به صورت محصور شده تلقی شده و منحنی تنش- کرنش به صورت اساسی تغییر وضعیت خواهد داد؛ به طوری که مقاومت فشاری آن افزایش یافته و هم‌چنین کرنش شکست نهایی آن نیز به مراتب افزایش خواهد یافت. فشار جانبی برای نمونهٔ تحت بار را می‌توان با قرار دادن نمونه در یک محفظهٔ حاوی مایع تحت فشار ، و یا قرار دادن یک لولهٔ فولادی چسبیده پیرامون نمونهٔ استوانه‌ای بتنی ایجاد نمود. هم‌چنین اگر در یک عضو بتنی از میلگردهای عرضی به شکل دورپیچ و با فواصل نزدیک استفاده شده باشد، تا حدی شرایط



شکل ۲-۹ *منحنی تنش-کرنش نمونه‌های بتنی در شرایط معمولی و شرایط محصورشده*

محصور شدگی فراهم می‌گردد. توجه شود که ایجاد شرایط محصور شدگی برای بتن رفتار به مراتب نرم‌تر و شکل پذیرتری را برای عضو بتنی فراهم می‌کند. چنین رفتاری برای تأمین شکل پذیری[1] سازه در مقابل زلزله و سایر بارهای ارتعاشی، به دلیل امکان جذب انرژی ایجاد شده توسط عضو، بسیار مناسب تلقی می‌شود. شکل ۲-۹ مقایسه‌ای از منحنی تنش- کرنش بتن را در شرایط معمولی و در شرایط محصور شده، نمایش می‌دهد.

۲-۹ مدول الاستیسیتهٔ بتن

شیب منحنی تنش- کرنش بتن به عنوان مدول الاستیسیتهٔ بتن محسوب می‌شود. مدول الاستیسیتهٔ بتن بسته به نوع بتن، سن بتن، نوع و سرعت بارگذاری، خصوصیات اجزاء بتن و درصد اختلاط، و از همه مهم‌تر نحوهٔ تعریف مدول الاستیسیته، متفاوت خواهد بود.

مدول الاستیسیته معمولاً به دو صورت تعریف می‌شود:

- مدول الاستیسیتهٔ مماسی[۲] که عبارت است از شیب خط مماس بر منحنی تنش- کرنش در هر نقطه از منحنی.

- مدول الاستیسیتهٔ متقاطع یا سکانت[۱] که عبارت است از شیب خطی که هر نقطه از منحنی تنش- کرنش را به مبدأ وصل می‌کند.

۲-۹-۱ مدول الاستیسیتهٔ استاتیکی بتن

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

۱- **مدول الاستیسیتهٔ مماسی اولیه:** شیب خطی که مماس بر منحنی تنش- کرنش در مبدأ رسم می‌شود.

۲- **مدول الاستیسیتهٔ سکانت:** شیب خطی که از مبدأ به نقطه‌ای از منحنی تنش- کرنش که متناظر با ۴۰ درصد تنش حداکثر f_c' است، وصل می‌شود. این تعریف معمولاً به صورت ساده به نام "مدول الاستیسیتهٔ بتن" خوانده می‌شود.

۳- **مدول الاستیسیتهٔ وتری**[۲]: این تعریف حالت اصلاح شده‌ای از تعریف قبلی است؛ با این تفاوت که به جای مبدأ از یک نقطه از منحنی که متناظر با کرنش ۵۰×۱۰^{-۶} (۵۰ مایکرو استرین: $50\,\mu s$) می‌باشد، استفاده می‌شود. جابجایی نقطهٔ پایین خط به میزان $50\,\mu s$، به جهت تصحیح تعقر کمی است که اغلب در شروع منحنی تنش-کرنش مشاهده می‌شود.

مدول الاستیسیتهٔ استاتیکی بتن را بر اساس *ACI* 318، برای بتن با وزن مخصوص (w_c) در محدودهٔ 1500 تا $2500\,\mathrm{kg/m^3}$، می‌توان از رابطهٔ (۲-۶) تعیین کرد.

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \cdot \sqrt{f'_c} \qquad (۲-۶)$$

برای بتن معمولی با وزن مخصوص حدود $2300\,\mathrm{kg/m^3}$، رابطهٔ فوق به صورت ساده‌تر به شکل رابطهٔ (۲-۷) بیان می‌شود.

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \qquad (۲-۷)$$

آئین‌نامهٔ *ACI 363* برای محاسبهٔ مدول الاستیسیته در بتن با مقاومت بالا، رابطهٔ (۲-۸) را پیشنهاد می‌کند.

$$E_c = \left(3320\sqrt{f'_c} + 6900\right)\left(\frac{w_c}{2300}\right)^{1.5} \qquad (۲-۸)$$

۲-۱۰ ضریب پواسون بتن

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

۲-۱۱ مقاومت کششی تک محورهٔ بتن

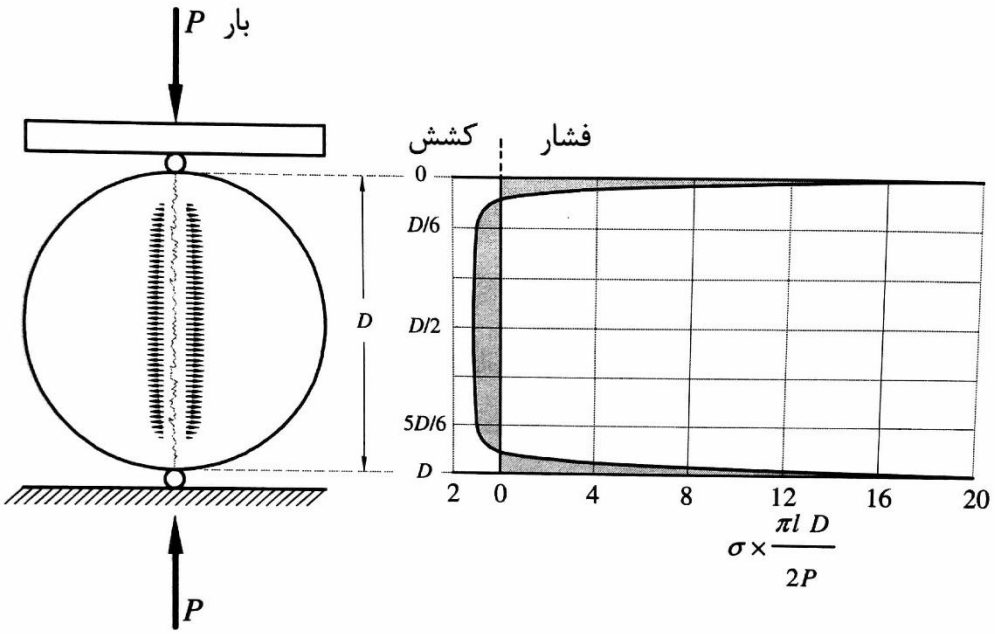
مقاومت کششی بتن ممکن است تحت کشش خالص (کشش مستقیم) و یا کشش ناشی از خمش اندازه‌گیری شود. بسته به نوع مقاومت کششی تعریف شده، مقاومت کششی بتن (f_t') در محدودهٔ ۸ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن متغیر خواهد بود.

دلیل کم‌تر بودن چشم‌گیر مقاومت کششی بتن نسبت به مقاومت فشاری آن، وجود ریزترک‌های فراوان در جسم بتن حتی قبل از شروع آزمایش است. چنین ریزترک‌هایی در فشار، در ابتدا 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.

۲-۱۱-۱ مقاومت کششی بتن تحت کشش خالص

ایجاد تنش کششی خالص به صورت مستقیم در یک نمونهٔ بتنی در آزمایشگاه چندان آسان نیست؛ زیرا اساساً وسایل نگه‌داشتن نمونه، تنش‌های ثانویه‌ای تولید می‌کنند که نمی‌توان اثرات آن‌ها را نادیده انگاشت. استاندارد *ASTM C496* برای سنجش مقاومت کششی بتن تحت کشش خالص، آزمایش شکافت کششی یا آزمایش شکافت استوانه[1] را معرفی می‌کند و مقاومت کششی حاصله را با f_{ct} نمایش می‌دهد. این آزمایش به نام آزمایش برزیلی نیز خوانده می‌شود.

در آزمایش شکافت استوانه، نمونهٔ بتنی استوانه‌ای استاندارد با ابعاد $150\times300\,mm$، از پهلو در طول دو خط محوری مخالف تحت فشار قرار می‌گیرد. بار به صورت پیوسته با سرعت ثابت و در محدودهٔ 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 ۲-۱۰ نحوهٔ اعمال بار بر نمونه و تنش‌های ایجاد شده در جهت متعامد را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰ *آزمایش شکافت استوانه و توزیع تنش در قطر استوانه*

تنش کششی شکافت خوردگی در آزمایش برزیلی از رابطهٔ (۲-۱۲) محاسبه می‌شود. در این رابطه P بار وارده در لحظهٔ شکست، l طول استوانه (300 mm) و D قطر استوانه (150 mm) است. آزمایش کششی شکاف خوردگی در مقایسه با کشش مستقیم، ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت کششی بتن را بیش‌تر ارزیابی می‌کند.

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi l D} \qquad (۱۲-۲)$$

بعضی از محققین برای تعیین مقاومت کششی متوسط (f_{ctm}) حاصل از آزمایش برزیلی، رابطهٔ (۲-۱۵) را پیشنهاد کرده‌اند.

$$f_{ctm} = 0.54\sqrt{f_c'} \qquad (۱۵-۲)$$

۲-۱۱- ۲ مقاومت کششی بتن تحت کشش ناشی از خمش

استاندارد *ASTM C78* برای سنجش مقاومت کششی بتن تحت کشش ناشی از خمش، بارگذاری خمشی متمرکز در یک سوم دهانهٔ تیر بتنی با ابعاد 150×150×500 mm را پیشنهاد می‌کند. این تیر با سرعت اعمال تنش در محدودهٔ 0.8 تا 1.2 MPa/sec، و تا لحظهٔ ترک خوردگی و شکست تیر بارگذاری می‌شود. تنش کششی لحظهٔ ترک خوردگی (شکست) تیر به نام مدول گسیختگی[1] و یا مقاومت خمشی نامیده شده و با f_r نمایش داده می‌شود. این تنش بر اساس محاسبات تنش‌های ناشی از خمش از رابطهٔ (۲-۱۳) محاسبه می‌شود. 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 فاصلهٔ یک سوم از تکیه‌گاه‌ها (در هر نقطه $P/2$) وارد شده است.

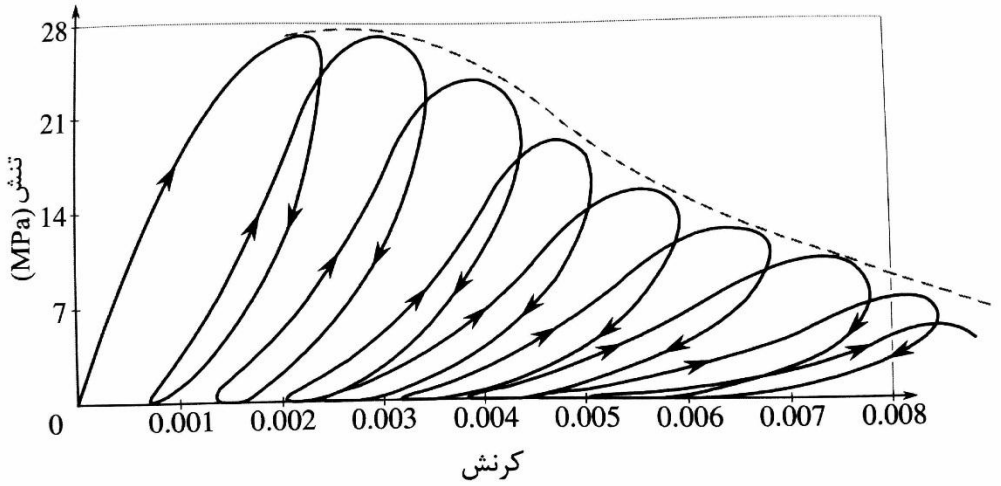
$$f_r = \frac{Pl}{bd^2} \qquad (۱۳-۲)$$

ACI 318 برای تعیین مدول گسیختگی جهت محاسبات خیز تیرها، رابطهٔ (۲-۱۷) را پیشنهاد نموده است.

$$f_r = 0.7\sqrt{f_c'} \qquad (۱۷-۲)$$

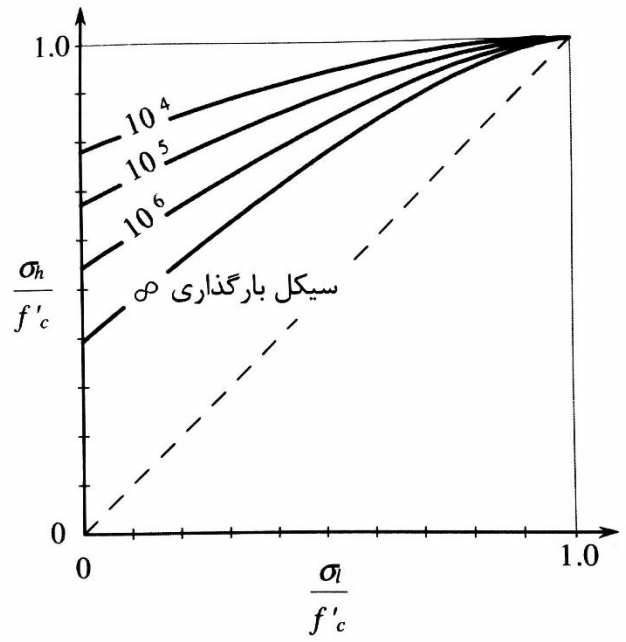
۲-۱۴ مقاومت خستگی بتن

آنچه تا کنون در مورد مقاومت بتن گفته شد، همه مربوط به یک بارگذاری استاتیکی بود. با این وجود در بعضی از سازه‌ها، ممکن است بارهای تکراری بر سازه اثر کند. چنانچه یک ماده تحت تعدادی بارهای تکراری، به صورتی که هر کدام از آن بارها کوچک‌تر از مقاومت فشاری استاتیکی آن ماده است، دچار شکست شود، اصطلاحاً گوییم آن ماده در اثر خستگی[۱] شکسته شده است. پدیدهٔ خستگی در مورد اکثر مصالح و از جمله بتن و فولاد وجود دارد؛ اگر چه در این قسمت فقط مسألهٔ خستگی را در مورد بتن دنبال می‌کنیم.



شکل ۲-۱۶ *منحنی‌های تنش-کرنش فشاری بتن تحت بارهای تکراری*

مقاومت خستگی بتن را می‌توان بر اساس منحنی اصلاح شدهٔ گودمن[۱] ارزیابی کرد. این منحنی در شکل ۲-۱۸ نمایش داده شده است. چنانچه حد پایینی تنش (σ_l) و حد بالایی تنش (σ_h) مشخص باشد، با استفاده از منحنی اصلاح شدهٔ گودمن می‌توان مشخص کرد که در این محدودهٔ تغییرات تنش، با چه سیکلی از بارگذاری نمونهٔ بتنی در اثر خستگی شکسته خواهد شد. بدین منظور نقطه‌ای با مختصات افقی σ_l / f_c' و مختصات قائم σ_h / f_c' را مشخص می‌کنیم؛ وضعیت این نقطه نسبت به منحنی‌های موجود، تعداد سیکل بارگذاری مربوط به شکست این نمونه در اثر خستگی را تعیین خواهد نمود.



شکل ۲-۱۸ *منحنی اصلاحی گودمن برای تعیین مقاومت خستگی بتن تحت فشار*

دقت شود که در مسائل عملی، حد پایینی تنش (σ_l)، تنش ناشی از بار مرده و یا بار مرده به علاوهٔ قسمتی از بارهای زنده که به صورت ثابت وارد می‌شوند، می‌باشد. هم‌چنین حد بالایی تنش (σ_h)، تنش ناشی از مجموع بارهای مرده و زنده است. توجه شود که با استفاده از منحنی اصلاحی گودمن، به شرط آن‌که حد پایینی تنش مشخص باشد، مقاومت خستگی به ازای تعداد مشخصی از سیکل بارگذاری را نیز می‌توان تعیین کرد. نمودار اصلاحی گودمن نشان می‌دهد که برای یک دامنهٔ ثابت تغییرات تنش، هر چه مقدار حداقل تنش بیش‌تر باشد، تعداد سیکل های بارگذاری که یک بتن مشخص می‌تواند تحمل کند، کم‌تر خواهد بود. هم‌چنین هر چه نسبت σ_h / σ_l بیش‌تر باشد، مقاومت بتن در مقابل خستگی کم‌تر بوده و خستگی در تعداد سیکل کم‌تری از بارگذاری رخ می‌دهد. در همین ارتباط، تحقیقات نشان داده است که فرکانس بار متناوب تأثیری بر مقاومت در مقابل خستگی نخواهد داشت.

۲-۱۶ انقباض در بتن

افت یا انقباض[1] (و یا آب‌رفتگی)، جمع شدگی و کاهش حجم بتن است که با از دست رفتن و یا خارج شدن آب جذب شده در ساختار خمیر سیمان از بتن، اتفاق می‌افتد. انقباض در بتن ممکن است در انواع افت پلاستیک، افت خودگیری، افت خشک شدگی و یا افت کربناسیون تقسیم‌بندی شود.

۲-۱۶-۱ افت پلاستیک

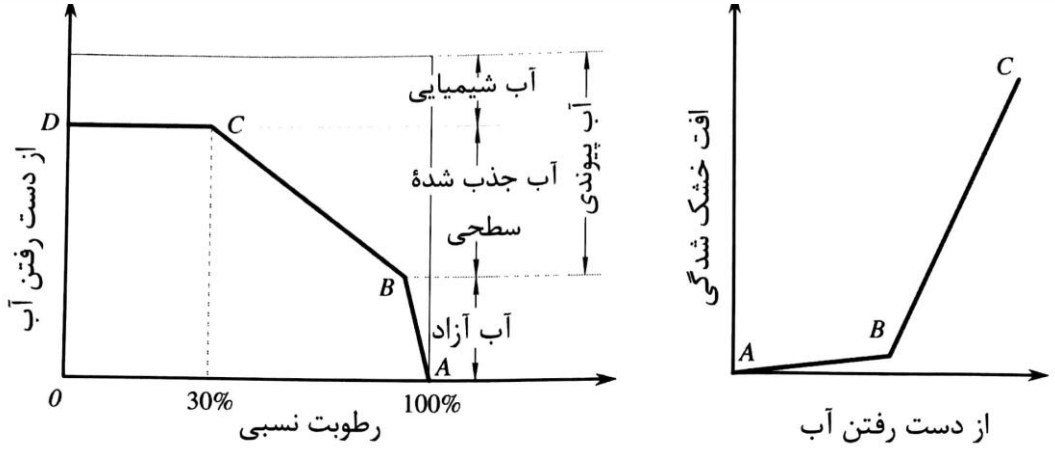
افت پلاستیک بتن در حقیقت انقباضی است که در خمیر سیمان پلاستیک و در اثر تبخیر از سطح بتن و یا جذب آب توسط سطح بتن خشک شدهٔ زیرین، رخ می‌دهد. این افت در حدود ۱ درصد حجم سیمان خشک، انقباض ایجاد کرده و تنش کششی در سطح لایه‌ها ایجاد می‌کند. از آن‌جا که بتن در وضعیت پلاستیک کاملاً ضعیف است، این افت ممکن است به سهولت ترک‌هایی در سطح بتن قبل از سخت شدن ایجاد کند (بین ۱ تا ۸ ساعت پس از ریختن بتن). هر چه میزان سیمان در بتن بیش‌تر باشد، و یا مقدار حجمی دانه‌ها کم‌تر باشد، میزان افت پلاستیک بیش‌ترخواهد بود.

۲-۱۶-۲ افت خودگیری

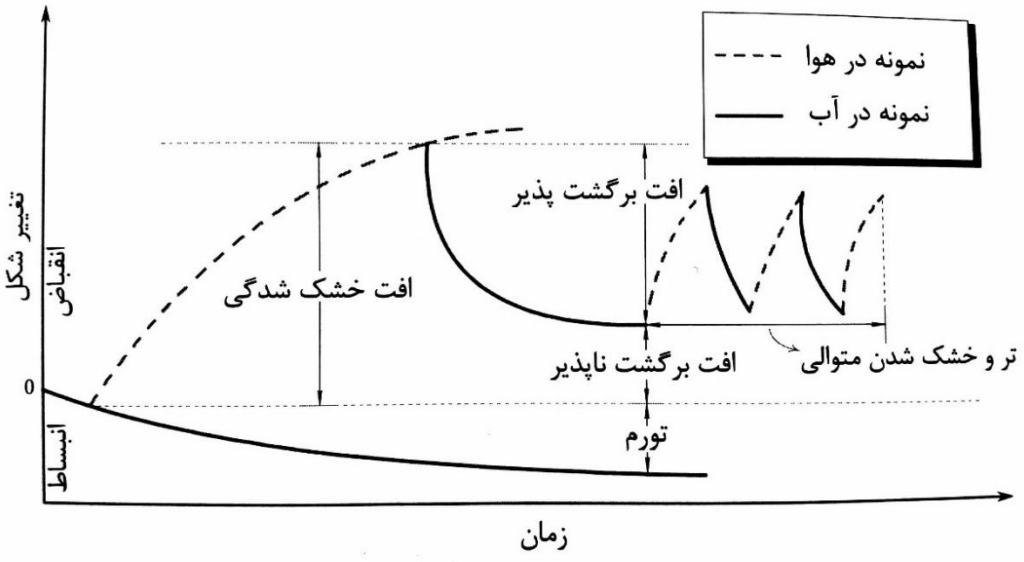
افت خودگیری[1] یک نوع خاصی از افت است که در آن جابجایی آب به داخل یا خارج بتن اتفاق نمی‌افتد؛ بلکه از دست رفتن آب با استفادهٔ آن در هیدراسیون سیمان رخ می‌دهد. این افت به سهولت از افت در بتن سخت شده تمیز داده نمی‌شود. مقدار افت خودگیری بسیار اندک بوده و کرنش آن در محدودهٔ ۵۰×۱۰^{-۶} تا ۱۰۰×۱۰^{-۶} است. لازم به ذکر است که اگر در دورهٔ هیدراسیون سیمان، بتن به طور مداوم در مجاورت آب قرار گیرد، نه تنها افت خودگیری در آن اتفاق نمی‌افتد؛ بلکه با نوعی انبساط در اثر جذب آب توسط ژل سیمان همراه خواهد بود که به آن تورم یا باد کردن[2] گویند.

۲-۱۶-۳ افت خشک شدگی

افت خشک شدگی[۳] انقباضی است که در بتن سخت شده و در اثر خارج شدن آب جذب شده در ساختار خمیر سیمان، به دلیل قرار گرفتن بتن در محیط با رطوبت نسبی کم‌تر از ۱۰۰ درصد، اتفاق می‌افتد. تا زمانی که خمیر سیمان اشباع در رطوبت



اگر بتنی که در معرض رطوبت نسبی کم‌تر از ۱۰۰ درصد قرار گرفته و با انقباض مواجه شده است، مجدداً در آب قرار داده شود، مقداری آب جذب کرده و تا حدودی انبساط می‌یابد؛ اما فقط قسمتی از انقباض جبران می‌شود. این قسمت از افت که قابل برگشت است، به افت برگشت‌پذیر یا جبران‌پذیر[۱] شناخته می‌شود و بسته به شرایط موجود و سن بتن، ممکن است بین ۴۰ تا ۷۰ درصد از کل افت را شامل شود. در هر حال قسمتی از افت قابل جبران نیست که به افت برگشت ناپذیر[۲] شناخته می‌شود. تغییرات افت برگشت‌پذیر و برگشت ناپذیر در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده

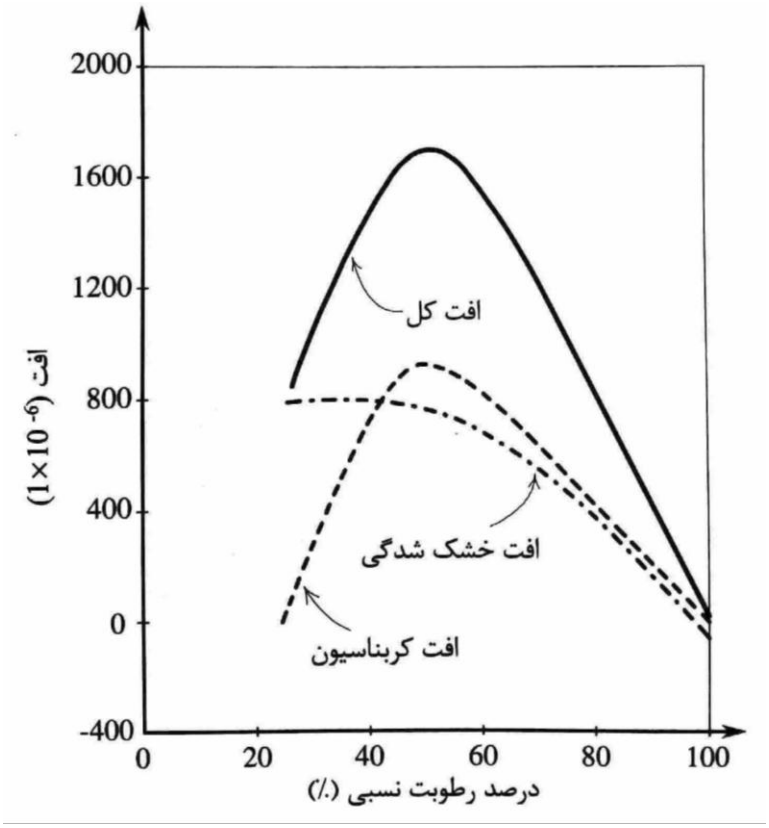


۲-۱۶-۴ افت کربناسیون

ترکیب دی اکسید کربن موجود در هوا با سیمان هیدراته نیز به انقباض بتن منجر می‌شود که این فرآیند افت کربناسیون نامیده می‌شود. CO_2 موجود در هوا ممکن است در محدودهٔ ۰/۰۳ درصد حجمی در هوای مناطق روستایی، تا ۰/۳ درصد حجمی در هوای شهرهای بزرگ متغیر باشد. دی‌اکسید کربن در حضور رطوبت تشکیل اسید کربنیک داده و این اسید با نفوذ در بتن، هیدروکسید کلسیم موجود در ترکیبات خمیر سیمان هیدراته را مطابق رابطهٔ (۲-۱۹)، به کربنات کلسیم تبدیل می‌کند.

$$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O \qquad (۱۹-۲)$$

فرآیند کربناسیون ممکن است انقباضی معادل افت خشک شدگی را در بتن ایجاد کند. با این وجود همان‌گونه که در شکل ۲-۲۱ نمایش داده شده است، افت کربناسیون در رطوبت نسبی کم‌تر از ۲۵ درصد و یا رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد رخ نداده و بیش‌ترین میزان افت کربناسیون، در رطوبت نسبی ۵۰ درصد روی می‌دهد. در



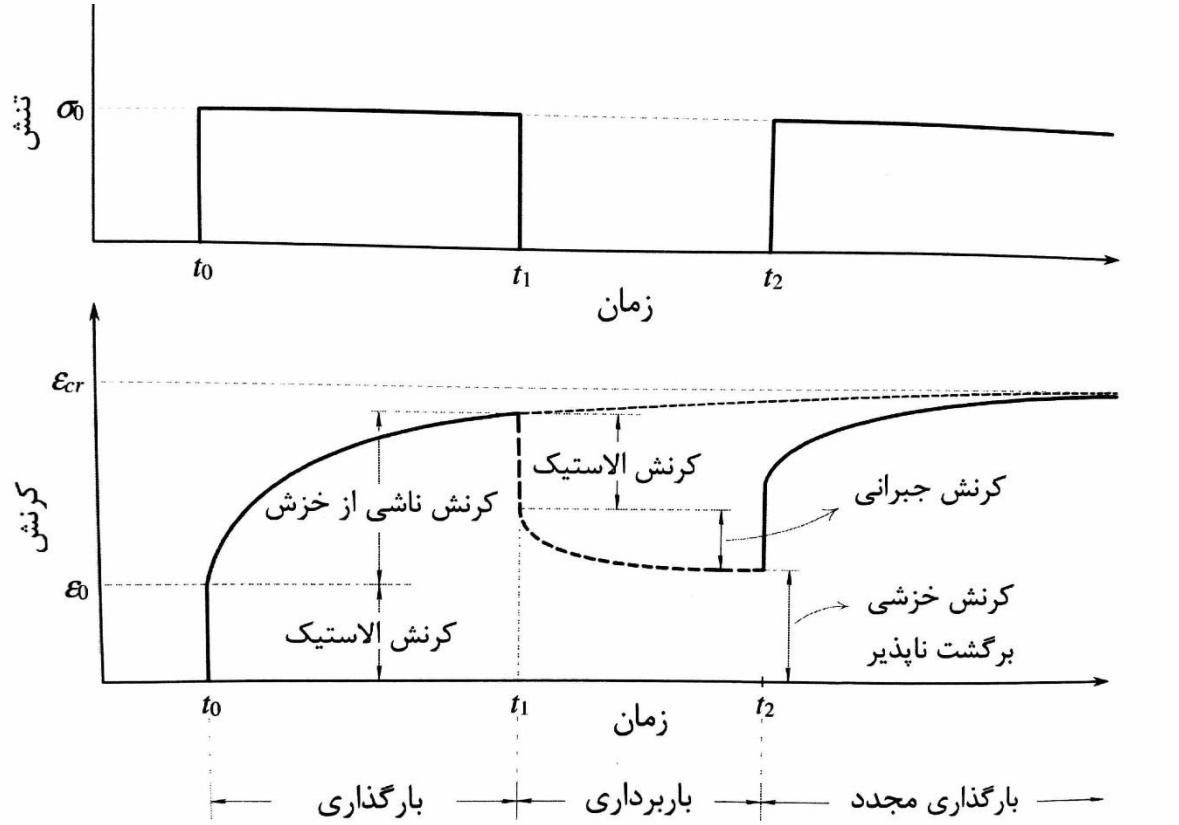
لازم به ذکر است که در فرآیند کربناسیون، با جا گرفتن کربنات کلسیم تولید شده در حفره‌ها و نیز کامل‌تر شدن احتمالی هیدراسیون سیمان به جهت مجاورت با آب آزاد شده، نفوذپذیری بتن کمی کاهش یافته و نیز مقاومت آن اندکی افزایش می‌یابد. با این وجود، فرایند کربناسیون محیط قلیایی خمیر سیمان را خنثی نموده و فولادها را با تهدید خوردگی مواجه می‌کند. اگر کربناسیون در تمام پوشش بتن روی میلگردها نفوذ کند و رطوبت و اکسیژن به سطح میلگردها برسد، خوردگی فولادها و ترک‌خوردگی متعاقب بتن را به دنبال خواهد داشت. در عمل عمق کربناسیون را می‌توان با به‌کارگیری محلول فنل فتالئین بر سطح بتن تازه شکسته اندازه‌گیری کرد. در این فرآیند، قسمت‌هایی از بتن که در آن کربناسیون اتفاق افتاده به صورت بی‌رنگ، و سایر قسمت‌ها به رنگ صورتی در می‌آید.

۲-۱۷ خزش در بتن

تغییر شکل ماده تحت تنش ثابت در طول زمان را خزش[۲] یا وارفتگی گویند. خزش در بسیاری مواد و از جمله در فولاد اتفاق می‌افتد؛ لکن تغییر شکل ناشی از خزش در بتن تحت تنش ثابت در طول زمان، کاملاً قابل توجه بوده و ممکن است تغییر شکل الاستیک اولیه را تا ۳ برابر افزایش دهد. شکل ۲-۲۲ کرنش‌های ایجاد شده در اثر خزش در طول زمان در نمونهٔ بتنی را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که از شکل ۲-۲۲ مشاهده می‌شود، چنانچه در زمان t_0 تنش σ_o به نمونه وارد شود، بلافاصله کرنش الاستیک ε_0 بر اساس قانون هوک در نمونه ایجاد می‌شود. آن‌گاه با گذشت زمان، رفته رفته کرنش در جسم افزایش می‌یابد که این کرنش اضافی ناشی از خزش است. چنانچه در زمان t_1 تنش σ_o از روی نمونه برداشته شود، در همان زمان کرنش الاستیک ε_0 در جهت عکس کرنش الاستیک اولیه به وقوع می‌پیوندد، و با گذشت زمان، کرنش ناشی از خزش به صورت معکوس عمل کرده و در جهت جبران کرنش ناشی از خزش در مرحله‌ای که نمونه تحت بار بوده است، بر می‌آید. با این وجود با گذشت زمان، فقط قسمتی از کرنش خزشی جبران شده و قسمتی از کرنش ناشی از خزش به صورت برگشت ناپذیر در نمونه ذخیره می‌شود.

حال اگر در زمان t_2 مجدداً بر روی نمونه بارگذاری شود، مجدداً کرنش الاستیک اولیه و کرنش ناشی از خزش در طول زمان ایجاد می‌شود؛ به صورتی که اگر میزان تنش در بارگذاری مجدد با میزان تنش در بارگذاری اولیه مساوی باشد، نمودار تغییر شکل ناشی از خزش در بارگذاری مجدد با امتداد نمودار تغییر شکل ناشی از خزش در بارگذاری اولیه، مجانب خواهد شد.



شکل ۲-۲۲ *کرنش‌های ایجاد شده در اثر خزش در نمونهٔ بتنی در طول زمان تحت بارگذاری، باربرداری، و بارگذاری مجدد*

دلیل اصلی پدیدهٔ خزش در بتن، خروج آب جذب شدهٔ سطحی از ساختار خمیر سیمان هیدراته در اثر اِعمال تنش ثابت است که در طول زمان صورت می‌گیرد. این مسأله در حقیقت دلیل اصلی وقوع پدیدهٔ انقباض نیز می‌باشد؛ با این تفاوت که در پدیدهٔ افت خشک شدگی در بتن، خروج آب جذب شدهٔ سطحی، به دلیل تفاوت رطوبت نسبی محیط با رطوبت بتن است، و نه به دلیل اِعمال تنش. البته برای وقوع پدیدهٔ خزش، دلایل دیگری همچون رفتار غیر خطی رابطهٔ تنش-کرنش بتن به‌خصوص در سطح تنش بزرگ‌تر از ۴۰ درصد مقاومت بتن، و نیز ایجاد کرنش‌های الاستیک در دانه‌ها که به صورت تأخیری و با گذشت زمان رخ می‌دهد، وجود دارد.