

بسمه تعالى



جزوه درس :

# تکنولوژی بتن

( Concrete Technology )

تهیه و تنظیم

جواد پور شریفی

ویرایش جدید: نیمسال دوم سال تحصیلی ۸۹ - ۸۸

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

## مقدمه

امروزه نیاز به دانش تکنولوژی بتن با توجه به جایگاه ویژه‌ای که بتن در صنعت ساختمان بخود اختصاص داده، برای طراحان و همچنین عوامل اجرایی امری ضروری است. استفاده فراوان بتن در ساخت و تولید سازه‌های گوناگون و گستردگی کاربردهای آن گوی سبقت را از دیگر مصالح ساختمانی ریوده است. دلیل این جایگاه ویژه و ارجحیت بتن را نسبت به مصالح دیگری همچون فولاد می‌توان موارد ذیل دانست:

### ۱ - شکل پذیری بتن و سهولت در اجرای آن

بتن به سادگی به شکل دلخواه در می‌آید و اتصال قطعات بتنی نیازمند به تمهیدات ویژه‌ای نیست. با پیشرفت‌هایی که تاکنون در فناوری بتن صورت گرفته، عملاً هر نوع ساختمان و سازه‌ای را با بتن می‌توان ساخت. انرژی لازم و هزینه تولید بتن نسبت به سایر مصالح ساختمانی با عملکرد معادل کمتر است.

۲ - پاسخگو بودن بتن به ضرورتهای فنی، اقتصادی و مهمتر از آنها زیست محیطی در عمل هر نوع سازه‌ای را می‌توان با بتن ساخت. هزینه تولید بتن نسبت به سایر مصالح ساختمانی با عملکرد معادل کمتر است و بالاخره تولید و کاربرد بتن به محیط زیست آسیب نمی‌رساند. در واقع آنچه برای ساختن بتن از طبیعت گرفته می‌شود، کمترین اثر نامطلوب را بر محیط زیست خواهد داشت.

۳ - سهولت در امر تهیه مواد تشکیل دهنده و یا در دسترس بودن اجزاء اصلی  
تشکیل دهنده بتن

منابع مربوط به عناصر اصلی تشکیل دهنده بتن یعنی آب و مصالح سنگی در طبیعت به میزان فراوان وجود داشته تولید سیمان نیز که عناصر اصلی آن خاک رس و آهک می‌باشد نیز به نوبه خود در همه جا به وفور یافت می‌شوند. در این رابطه امکان مصرف مجدد مواد بازیافتی حاصل از تخریب بتن، بعنوان مصالح پرکننده در بتن‌های دیگر و یا در راهسازی از نقاط قوت آن محسوب می‌گردد.

## فن آوری بتن

### ۴ - سازه های بتنی در برابر آتش سوزی مقاومت خوبی را از خود نشان داده و حتی تا ۲۴ ساعت دوام می آورند

بدیهی است در ظرف ۲۴ ساعت می توان بزرگترین آتش سوزی هارا مهار نمود. در حالیکه، سازه های فولادی محافظت شده در برابر آتش سوزی زمان بسیار کوتاه تری دوام می آورند.

### ۵ - عمر مفید و دوام سازه های بتنی

این ویژگی نیز در مقایسه با سازه های دیگر قابل رقابت است و در صورتیکه عوامل مخرب محیطی همچون حمله سولفات ها و خوردگی در تسليحات فولادی سازه های بتن آرمه صورت نگیرد، از این بعد نیز سازه های بتن آرمه بر سازه های فولادی مرجع هستند.

### ۶ - بتن دارای مقاومت قابل قبول و خوب فشاری است

بنابراین برای سازه های معمولی کاملاً مناسب می باشد. شاید تنها ضعف آنرا بتوان کمی مقاومت در برابر کشش دانست، که این ضعف نیز با استفاده از فولاد و تسليحات فولادی در آن قابل جبران خواهد بود. در هر حال، طی چند دهه اخیر با توسعه فزاینده ساختمان سازی و همچنین نوآوری های چشمگیر در زمینه ابداع و تولید مصالح جدید، موقعیت بتن بعنوان یکی از ممتاز ترین مصالح، تثبیت شده و تولید و کاربرد بتن با مقاومت های زیاد، و همچنین خصوصیات بهتر را میسر نموده است. امروزه علاوه بر مواد اصلی تشکیل دهنده بتن (یعنی سیمان، آب، شن و ماسه) اغلب از مواد افزودنی و مضاف، استفاده می شود. بخش عمده ای از این مواد مانند پوزولان های مصنوعی که تولیدات جنبی صنایع دیگر هستند، سبب میگردند تا ویژگی های مقاومتی و پایایی بتن بهبود یابد که بالطبع در کوتاه مدت به تقلیل و بهینه سازی ابعاد قطعات سازه ای و در دراز مدت به افزایش دوام و عمر مفید آنها می انجامد. کاربرد وسیع پوزولان های طبیعی و مصنوعی نظری دوده سیلیسی (یا میکروسیلیس) نمونه بارز این نوع مواد هستند. امروزه مبحث تکنولوژی بتن از محدوده اجزاء اصلی تشکیل دهنده بتن یعنی سیمان سنگدانه ها، و آب بسیار فراتر رفته و علاوه بر شناسائی دقیق شیمیائی هر کدام از این عناصر، فعل و انفعالاتی که در هر مرحله بر روی یکدیگر دارند، آزمایشات بسیاری را نیز می طلبند. اگر تا دیروز دو آزمایش اسلامپ و مقاومت فشاری، صرفاً ملاک عمل قرار می گرفت، امروزه مسائلی مانند قابلیت و امکان پمپ نمودن بتن تا ارتفاع ۱۲۰ متر و بیشتر (در برج های بلند)

آنهم بدون افزودن آب و بالا بردن نسبت آب به سیمان، مطرح است که بحث بتن‌های روان و یا خود متراکم می‌باشد. تولید و کاربرد بتن با مقاومت‌های بمراتب زیادتر از آنچه که در طراحی متعارف سازه‌های بتن آرمه در نظر گرفته می‌شود، یعنی تولید بتن با مقاومتی بیشتر از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در کارگاه‌ها، امروزه امری غیر عادی تلقی نمی‌شود. و در آزمایشگاه تحت شرایط کنترل شده می‌توان، با مصالح طبیعی با جرم مخصوص متعارف به مقاومتها بین تا ۲۳۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و در صورتیکه از مصالح مصنوعی نظری سرامیک، استفاده گردد، قادر خواهیم بود بتن‌هایی با مقاومت بالا یا اصطلاحاً (ابربتن‌ها) که تا دو برابر این مقدار مقاومت خواهند داشت را تهیه نمود. ضمناً دستیابی به بتن‌های سبک با جرم مخصوص حدود  $1/9$  تن بر مترمکعب با مقاومت‌های بالاتر از ۱۰۰ مگا پاسکال میسر است و در عمل تقاضای فزاینده‌ای برای، بتن‌های با مقاومت بیشتر و وزن مخصوص کمتر، به منظور کاهش جاگیری سازه و کاهش وزن آن، مطرح است. وجود آب و هوای خاص در ایران به ویژه در خطه جنوب و عوامل فرساینده و خورندهای همچون بالا بودن درجه حرارت، وجود یون‌های کلر، آلدگی خاک به سولفات‌ها و شرایط خاص اقلیمی که در این مناطق وجود دارد، نیازمند دانش لازم جهت مبارزه با عوامل مخرب سازه‌های بتن آرمه، همچون خوردگی در تسليحات فولادی و آرماتورها، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها، حمله سولفات‌ها و... می‌باشد. از این‌رو با توجه به امر توسعه کشور عزیzman بخصوص طی دوران سازندگی و اجرای پروژه‌های عظیم و همچنین به خاطر شرایط آب و هوای متنوع، شناخت کافی و مهارت در امر جلوگیری از بوجود آمدن این مسائل و یا آگاهی به روش‌های موجود، جهت ترمیم و مرمت سازه‌های بتنی از ضروریات مسلم است. با این مقدمه که در حقیقت جایگاه بحث تکنولوژی بتن را در شرایط کنونی و اهمیت و ضرورت آن را تأکید می‌نماید به تعریفی از بتن می‌پردازیم:

### تعریف بتن

بتن در مفهوم بسیار وسیع به هر ماده چند جزیی چسبیده به هم که با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده باشد، اطلاق می‌شود. این ماده چسبنده عموماً حاصل فعل و انفعال سیمان‌های هیدرولیکی و آب می‌باشد. بتن ممکن است از انواع مختلف سیمان و نیز پوزولان‌ها، سرباره کورهای آهنگذاری، مواد مضاد، گوگرد مذاب، پلیمرها، الیاف وغیره تهیه شود و همچنین

در نحوه تولید آن ممکن است از حرارت، بخار آب، اتوکلاو، فشارهای هیدرولیکی و متراکم کنندها استفاده گردد. در هر حال در اثر واکنش شیمیایی (هیدراسیون) سیمان با آب، خمیر سیمان سخت شده و باعث به هم چسبیدن سنگدانهها می‌گردد. فرآیند سخت شدن تازمانی که بتن مرطوب بوده و دما مناسب باشد و همچنین سیمان آزاد وجود داشته باشد، ادامه می‌یابد. در عمل برای کمک به هیدراتاسیون بتن تازه، کترول رطوبت و دما تا رسیدن به کیفیت مطلوب ادامه می‌یابد. در این رابطه موضوع مهم، آنست که اصولاً بتن خوب و مطلوب چه بتنه است؟ گرچه ارائه تعریفی جامع از بتن خوب بسادگی امکان پذیر نیست، لیکن با آگاهی از چگونگی ساخت بتن، چند معیار کلی برای یک بتن خوب تعریف می‌شود:

- بتن در حالت تازه زمانی که از مخلوط کن تخلیه شده و در قالبها ریخته می‌شود باید مورد پذیرش واقع شود بدین مفهوم که روانی و سیالیت بتن باید طوری باشد که با وسائل موجود در کارگاه بتوان آنرا متراکم نمود.

- چسبندگی مخلوط بتن باید بحدی باشد که در ضمن حمل و ریختن بتن با وسائل موجود، مواد از یکدیگر جدا نشوند.

- در بتن سخت شده عموماً مقاومت فشاری عنوان معیار پذیرش در نظر گرفته می‌شود و می‌باشد از مقادیر تعیین شده برای منظورهای مختلف کمتر نباشد.

- اگر چه عددی که به عنوان مقاومت از آزمایشها بدست می‌آید، مقاومت واقعی بتن در ساختمان نمی‌یاشدو تنها کیفیت بتن ریخته شده را نشان می‌دهد، لیکن مقاومت فشاری بتن تنها راه ساده‌ای است که برای ارزیابی بتن با مشخصات دیگر در نظر گرفته می‌شود. دلیل دیگر انتخاب مقاومت فشاری این است که، بسیاری از خواص دیگر بتن بنوعی به مقاومت آن ارتباط پیدا می‌کند. به عنوان مثال وزن مخصوص، نفوذ پذیری، مقاومت در مقابل فرسایش، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت کششی، مقاومت در برابر سولفاتها و برخی خواص دیگر با مقاومت ارتباط دارند. گرچه این ارتباط صد درصد تابع مقاومت فشاری نیست (فرضاً دوام بتن نه تنها با مقاومت بلکه با پارامترهای دیگری نظیر نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان در مخلوط نیز مربوط است). در هر حال عموماً بتن با مقاومت بالا بسیاری از خواص مطلوب را دارد و مطالعه در جزئیات این موارد از مباحثی است که تکنولوژی بتن به آنها می‌پردازد.

## عناصر تشکیل دهنده بتن

امروزه عناصر تشکیل دهنده بتن از اجزاء اصلی آن یعنی سیمان، سنگدانه‌ها و آب، بسیار فراتر رفته و بنا به کاربردهایی که برای بتن در شرایط مختلف تعریف می‌گردد، مواد افزودنی، در طیف وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابداع بتن‌های گوناگون برای کسب مقاومت‌های بالا و همچنین پایائی و عمر مفید موثر برای سازه‌های با اهمیت (همچون سدها و راکتورها و مخازن نگهدارنده مواد شیمیایی و انواع سازه‌های بلندمرتبه مسکونی، تجاری و یا پارکینگ‌های بزرگ) باعث شده تا در برخی از عناصر تشکیل دهنده بتن، همچون سیمان، تحولات عمیقی صورت گیرد و در ساخت و تولید گونه‌های مختلف و مناسب آن برای شرایط محیطی متفاوت، تلاشهای فراوانی بعمل آید. شناخت دقیق‌تر از ویژگی‌ها و خواص مربوط به سنگدانه‌ها، سبب گردیده تا علاوه بر تولید مصالح سنگی بوسیله دستگاههای پیشرفته، بتوان برای انواع بتن مورد سفارش، سنگدانه‌های مناسب تولید نمود و با شناخت از فعل و انفعالاتی که سنگدانه‌ها در مجاورت آب با سیمان، انجام می‌دهند، بر بسیاری از پدیده‌های مخرب، همچون واکنش قلیائی-سیلیسی فائق‌آمد. همچنین دانش کافی از شرایط آب مناسب و ویژگیهای مطلوب آن باعث شده تا در بکارگیری آب مناسب برای بتن اهتمام ورزیده شود و مهمتر از همه کاربرد وسیع مواد افزودنی که پاسخگوی نیازهای فنی طرحها در شرایط گوناگون محیطی و اجرایی است، سبب توجه عمیق به این بخش از عناصر تشکیل دهنده بتن گردیده است. اغلب از مواد افزودنی و مضاف به منظور بهبود کیفیت، افزایش کارآیی و روانی بتن در حالت تازه، افزایش مقاومت و عمر مفید بتن در شرایط نامناسب محیطی و همچنین کاهش نارسانی‌های بتن نظیر نفوذپذیری، افزایش مقاومت در برابر سایش و یا تغییر پاره‌ای از خصوصیات بتن مانند زمان‌گیرش و سخت‌شدن آن استفاده می‌گردد. بدیهی است که شناخت کامل این مواد و تأثیر آنها بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و همچنین رفتار بتن در شرایط گوناگون، امری لازم و ضروری است. در بخش‌های بعدی ضمن معرفی عناصر اصلی تشکیل دهنده بتن به کاربردهای وسیع مواد افزودنی و مواد مضاف در بتن پرداخته شده است.

## تکنولوژی بتن

باید توجه داشت که مواد خام اکثراً به صورت اکسید یافت می‌شوند.

آهک (CaO) 60~67%

سیلیس (SiO<sub>2</sub>) 17~25%

آلومین (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 3~8%

اکسید آهن (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 0.5~6%

اکسید منیزیم (MgO) 0.1~4%

اکسیدهای قلیایی 0.2~1.3% (Alkalies)

سولفات (S<sub>3</sub>O) 1~3%

معمولًاً چهار ترکیب به عنوان اجزای اصلی تشکیل دهنده سیمان در نظر گرفته می‌شود. این ترکیبات را با علایم اختصاری زیر نشان می‌دهند که در آنها هر اکسید با یک حرف مشخص می‌شود:



در معادلات واکنش‌های هیدراسیون، آب را نیز با H نشان می‌دهند.

با استفاده از علایم اختصاری فوق ترکیبات اصلی تشکیل دهنده سیمان پرتلند به صورت زیر نشان داده می‌شود:

سه کلسیم سیلیکات 3CaO, SiO<sub>2</sub> = C<sub>3</sub>S

دو کلسیم سیلیکات 2CaO, SiO<sub>2</sub> = C<sub>2</sub>S

سه کلسیم آلومینات 3CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = C<sub>3</sub>A

چهار کلسیم آلومینو فریت 4CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = C<sub>4</sub>AF

## سیمان پرتلند و انواع آن

نام سیمان پرتلند به خاطر شباهت رنگ آن به سنگ پرتلند انتخاب شده است که در منطقه‌ای به نام Dorset واقع در سواحل جنوبی انگلستان یافت می‌شود. اختراع سیمان پرتلند توسط یک معمار به نام Joseph Aspdin در شهر لیدز انگلستان در سال ۱۸۲۴ به ثبت رسید. مواد خام اصلی بکار رفته در تولید سیمان پرتلند معمولی عبارتند از حدود ۷۵٪ کلسیم (از آهک یا سنگ آهک) و حدود ۲۵٪ سیلیس (از خاک رس یا شل).

### روشهای تولید سیمان پرتلند:

- ۱) روش تر: مواد خام با نسبت‌های گوناگون همراه آب با هم‌دیگر مخلوط می‌شوند و از یک استوانه گردان در دمای  $1400^{\circ}\text{C}$  ~  $1500^{\circ}\text{C}$  عبور داده می‌شوند. در این استوانه واکنش‌های شیمیایی پیچیده‌ای روی می‌دهد و در نتیجه گلوله‌های بسیار سختی تشکیل می‌شود که کلینگر نام دارد. ابعاد این گلوله‌ها  $3\text{~}25\text{ mm}$  می‌باشد. در مرحله بعد این گلوله‌ها همراه با حدود ۸% ~ ۷ سنگ گچ (gypsum) آسیاب می‌شود تا به صورت پودر ریزی درآید که سیمان نامیده می‌شود.
- ۲) روش خشک: مشابه روش تراست با این تفاوت که مواد به صورت خشک با هم مخلوط می‌شوند. اکنون روش خشک ترجیح داده می‌شود. زیرا انرژی کمتری مصرف می‌شود. نسبت‌های تقریبی مواد خام تشکیل دهنده سیمان، بسته به انواع آن، به ترتیب زیر می‌باشد.

## واکنش‌های هیدراسیون سیمان

اضافه کردن آب به سیمان باعث واکنش‌های شیمیایی پیچیده‌ای می‌شود که بلا فاصله بعد از افزودن آب شروع شده و باعث سخت شدن تدریجی خمیر سیمان می‌شود. این واکنش‌ها را واکنش‌های هیدراسیون<sup>۱</sup> و مواد حاصل از آنها را فرآورده‌های هیدراسیون می‌نامند.

شدت واکنش‌های هیدراسیون برای ترکیبات اصلی تشکیل دهنده سیمان، متفاوت است. از بین این ترکیبات،  $C_{3A}$  و  $C_{3S}$  فعال‌ترین هستند در حالی که واکنش  $C_{2S}$  بسیار آهسته‌تر است. وجود سنگ گچ سرعت اولیه واکنش  $C_{3A}$  را کند می‌کند. در ادامه واکنش‌های هیدراسیون به طور جداگانه بررسی شده‌اند.

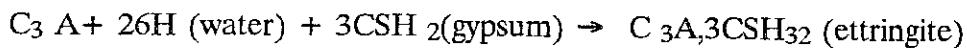
۱) واکنش  $C_{3A}$  با آب: این واکنش شدیدترین واکنش می‌باشد. برای جلوگیری از گیرش آنی<sup>۲</sup> خمیر سیمان، این واکنش باید کنترل شود. این عمل با افزودن سنگ گچ به سیمان انجام می‌شود.

---

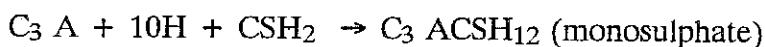
1- hydration reactions

2- flash setting

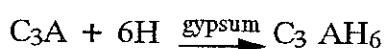
## تکنولوژی بتن



با تشکیل ettringite لایه‌ای به دور دانه‌های سیمان ایجاد می‌شود که باعث کاهش سرعت واکنش هیدراسیون  $C_3A$  می‌شود. بعد از مدتی، ettringite ناپایدار شده و واکنش دومی شروع می‌شود:

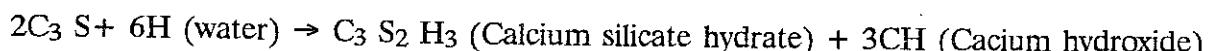


بعد از واکنش دوم است که خمیر شروع به سفت شدن می‌کند و کارایی<sup>۳</sup> رو به کاهش می‌گذارد. به جای دو واکنش فوق می‌توان واکنش ساده شده زیر را در نظر گرفت:



واکنش  $C_3A$  با آب مقدار زیادی گرماتولید می‌کند ولی سهم اندکی در مقاومت خمیر سیمان بعد از سخت شدن دارد. نکته مهم درباره  $C_3A$  این است که در برابر سولفات‌ها آسیب‌پذیر است و مقدار آن در سیمان نباید از حد مجاز بیشتر باشد. مزیت وجود  $C_3A$  این است که در هنگام پخت سیمان به عنوان گداز آور عمل می‌کند و دمای پخت کلینیگر را پایین می‌آورد.  
۲) واکنش سیلیکات‌های کلسیم ( $C_2S$  و  $C_3S$ ): این واکنش‌ها دارای بیشترین اهمیت هستند، زیرا هیدرات‌های سیلیکات کلسیم بیشترین سهم را در مقاومت خمیر سخت شده سیمان دارند.

واکنش‌های هیدراسیون برای هر دو سیلیکات مشابه هم هستند، تنها تفاوت در شدت انجام واکنش و مقدار هیدروکسید کلسیم حاصل می‌باشد. ترکیب  $C_3S$  با آب فعال‌تر از واکنش دیگر است:

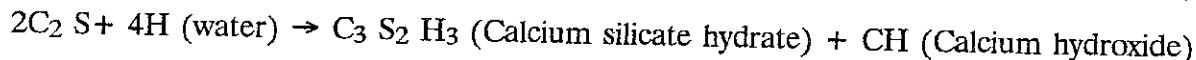


این واکنش سهم قابل ملاحظه‌ای از گرمای ایجاد شده و مقاومت اولیه خمیر سخت شده

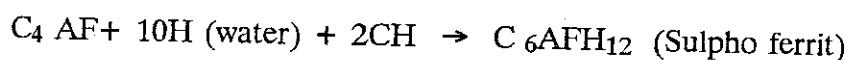
۳-کارایی: میزان آسانی ریختن و فشرده کردن بتن

## سیمان پرتلند و انواع آن

سیمان را بر عهده دارد. واکنش  $C_2 S$  مشابه  $C_3 S$  است ولی با شدت کمتری انجام می‌گیرد و سهم بیشتری در مقاومت درازمدت دارد و گرمای کمتری تولید می‌کند.



۳) واکنش  $C_4 AF$ . این واکنش در مقایسه با واکنش‌های دیگر اهمیت چندانی ندارد و یک واکنش کُند است که گرمای کمی تولید می‌کند و تاثیر کمی در مقاومت سیمان دارد. تنها مزیت آن گدازآور بودن هنگام پخت سیمان است.



تاثیر واکنش‌های فوق در مقاومت خمیر سخت شده سیمان و میزان گرمای تولید شده در جدول زیر نشان داده شده است.

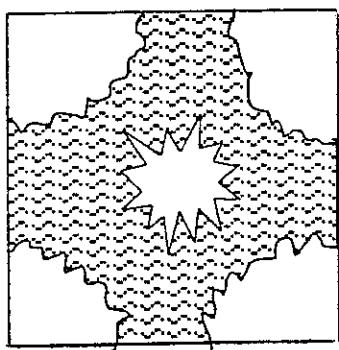
جدول ۱-۲ - مقایسه تاثیر ترکیبات اصلی سیمان

$C_4 AF$	$C_3 A$	$C_2 S$	$C_3 S$	
متوسط	سریع	آهسته	متوسط	شدت واکنش
کم	زیاد	کم	متوسط	گرمای آزاد شده
کم	کم	کم	خوب	تاثیر در مقاومت اولیه
خیلی کم	خیلی کم	خوب	خوب	تاثیر در مقاومت نهایی

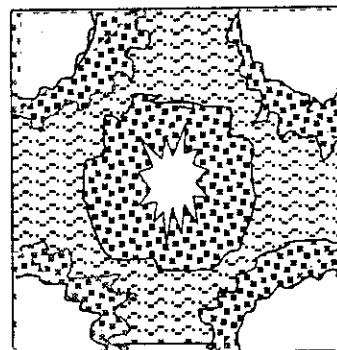
## تکنولوژی بتن

ساختمان میکروسکپی خمیر سخت شده سیمان  
دیاگرام ساده زیر نشان دهنده مراحل هیدراسيون سیمان می باشد.

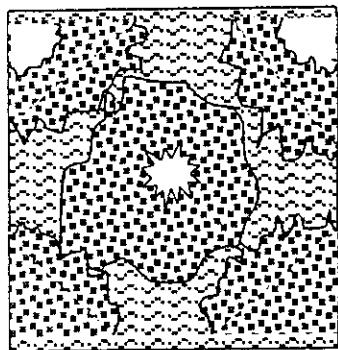
شكل ۲-۱- مراحل هیدراسيون سیمان



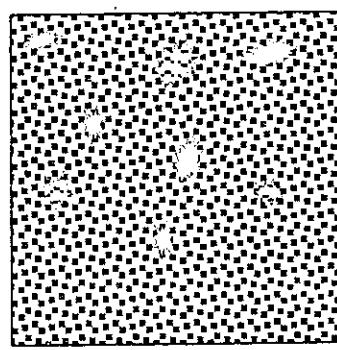
(۱)



(۲)



(۳)



(۴)

## سیمان پرتلند و انواع آن

(۱) پلا فاصله پس از مخلوط کردن: دانه های سیمان در آب پخش می شوند. فاصله دانه ها به نسبت آب به سیمان اولیه بستگی دارد. سطح زیاد دانه ها از ته نشینی آنها جلوگیری کرده و باعث می شود به صورت معلق باقی بمانند.

(۲) تقریباً ۲ ساعت پس از مخلوط کردن: خمیر کمتر حالت مایع دارد ولی هنوز قابل شکل دادن است. مواد حاصل از هیدراسیون در حال شکل گیری در سطح دانه ها هستند. ettringite,

CSH)

(۳) یک روز پس از مخلوط کردن: خمیر گرفته است ولی مقاومت واقعی ندارد. ساختمان ژل در سطح دانه ها رشد کرده و به هم متصل می شود و در نتیجه فضای خالی بین دانه ها را پر می کند. ساختمان هیدراتات حالت شامل CSH , ettringite و هیدرات های C4 AF کریستال های هیدروکسید کلسیم می باشد.

(۴) هفت روز پس از مخلوط کردن: در حدود 70% مقاومت نهایی حاصل شده است. در اثر تشکیل مقدار بیشتری CSH، ساختمان هیدراتات متراکم تر شده است. هنوز حفره های بزرگ ممکن است باقی بماند. این بدان معنی است که با بالاتر بودن نسبت آب به سیمان فاصله بیشتری بین ذرات سیمان به وجود می آید و در نتیجه حفره های ممکن است خواهند داشت. وجود حفره های بیشتر منجر به وجود بتن ضعیفتر و نفوذ پذیرتر می شود. ضرورت دارد که عمل هیدراسیون ادامه یابد تا حفره های موجود تا حد امکان توسط مواد حاصل پر و مسدود شوند.

دیده می شود که در هر مرحله ای از واکنش هیدراسیون، خمیر سخت شده سیمان شامل هیدرات های مواد مختلف، کریستال های هیدروکسید کلسیم، ettringite ، تعدادی مواد فرعی، سیمان هیدرات نشده و باقی مانده فضاهای پراز آب اولیه می باشد. این فضاهای خالی به عنوان حفره های ممکن شناخته می شوند (capillary pores) و اندازه آنها بین 100 تا 1000 آنگستروم<sup>7</sup> (mm<sup>-7</sup>) است. علاوه بر آن حفره های دیگری نیز در خمیر سخت شده سیمان وجود دارند که آنها

## تکنولوژی بتن

را حفره‌های ژل می‌نامند (gel pores) و اندازه آنها بین 50 تا 100 آنگستروم است. حفره‌های ژل به قدری کوچک هستند که تاثیر کمی در مقاومت یا نفوذپذیری خمیر سخت شده سیمان دارند، در حالی که حفره‌های مویینه دارای بیشترین تاثیر در این خواص هستند. اگر حفره‌های مویینه شامل مقداری آب باشند، عمل هیدراسیون ادامه پیدا کرده و بر حجم ژل هیدرات افزوده شده و در عوض حجم حفره‌های مویینه کمتر می‌شود. تخمین زده می‌شود که سیمان کاملاً هیدرات شده شامل 24% حفره‌های ژل و 14.4% حفره‌های مویینه باشد. ولی عملاً هیدراسیون کامل هیچ وقت حاصل نمی‌شود و در کامل‌ترین بتن‌ها احتمال نمی‌رود که هیدراسیون بیش از 88% حاصل شده باشد. علاوه بر حفره‌های مویینه و ژل، نوع دیگری از فضاهای خالی در خمیر سخت شده سیمان وجود دارد که حفره‌های هوا نام دارد. این حفره‌ها ممکن است حباب‌های ریزی باشند که عمداً توسط مواد حباب‌ساز برای مقاصد خاص ایجاد می‌شوند (entrained air) که ابعاد آنها  $\mu\text{m}$  50-200 است و یا هوای محبوسی باشد که در اثر تراکم ناکافی و به طور ناخواسته ایجاد شده‌اند (entrapped air). این حباب‌ها بزرگ‌تر بوده و اندازه آنها ممکن است تا 3 mm هم برسد. چون این دو نوع حفره‌های هوا بسیار بزرگ‌تر از حفره‌های مویینه هستند، در مقاومت و نفوذپذیری بتن تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارند. در جدول زیر اندازه‌های تقریبی اجزای تشکیل‌دهنده خمیر سخت شده سیمان نشان داده شده است:

جدول ۲-۲- اندازه‌های تقریبی اجزای خمیر سیمان

اجزای تشکیل دهنده	اندازه بر حسب آنگستروم ( $10^{-7} \text{ mm}$ )
مولکول آب	2.6
حفره‌های ژل	15
ژل جامد	30
حفره‌های مویینه	500
دانه سیمان	300000 ( $30\mu\text{ m}$ )
حباب‌های هوا	500000 ( $50\mu\text{ m}$ )

## سیمان پرتلند و انواع آن

### خواص فیزیکی سیمان

مهم‌ترین خواص فیزیکی سیمان که معمولاً مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارتند از:

۱) ریزی سیمان (fineness)

۲) زمان گیرش (setting time)

۳) سلامت (ثبات حجم) سیمان (soundness)

۴) مقاومت سیمان (strength)

۱) ریزی سیمان: هر قدر دانه‌های سیمان ریزتر باشند، سطح تماس با آب بیشتر شده و هیدراسيون سریع‌تر خواهد بود. در عمل، ریزی سیمان با سطح مخصوص دانه‌های آن تعریف می‌شود. منظور از سطح مخصوص (specific surface) مقدار سطح جانبی موجود در واحد جرم سیمان است. مثلاً مطابق BS12 سطح مخصوص سیمان پرتلند معمولی نباید کمتر از  $225\text{m}^2/\text{kg}$  باشد. در سیمان معمولی عملاً تمام ذرات از الک ( $150\mu\text{m}$ ) No.100 و ۹۵٪ ذرات از الک No.200 عبور خواهند کرد. استفاده از الک برای تعیین ریزی سیمان امروزه دیگر توصیه نمی‌شود، زیرا هم احتمال گرفتگی سوراخ‌های الک وجود دارد و هم اینکه در مورد ذرات ریزتر از الک No.200 اطلاعی به دست نمی‌آید. بنابر این از روش‌های غیرمستقیم بر مبنای تخمین سطح مخصوص دانه‌ها استفاده می‌شود. انواع این روش‌ها عبارتند از:

۱-۱) روش رسوب‌گذاری (sedimentation)

در این روش از رابطه سقوط آزاد ذرات در داخل یک سیال بی‌اثر، با قطر ذرات (قانون استوک) استفاده می‌شود. سرعت نهایی سقوط ذرات سیمان اندازه‌گیری می‌شود و هر قدر سرعت سقوط کمتر باشد ذرات ریزتر هستند.

۱-۲) روش استفاده از دستگاه کد دورت سنج و اگنر (turbidimeter)

طبق ASTM C115-79b در این روش غلظت ذرات معلق در داخل نفت با استفاده از یک ستون نور عبوری از آن اندازه‌گیری می‌شود. در صد نور عبوری با استفاده از یک سلول نوری (فتول) (فتول)

## تکنولوژی بتن

تعیین می شود. هر قدر در صد نور عبوری کمتر باشد، غلظت ذرات معلق بیشتر بوده و در نتیجه ذرات ریزتر هستند.

### ۱-۳) روش قابلیت نفوذ هوا ارائه شده توسط Lea & Nurse

در این روش افت فشار هوای خشک هنگام عبور از بستر سیمان با سرعت ثابت اندازه گیری می شود، هر قدر سیمان ریزتر باشد افت فشار بیشتر است.

### ۱-۴) روش Blain که اصلاح شده روش Lea & Nurse است

در این روش حجم معینی از هوا با فشار متوسط تعیین شده از بستر سیمان عبور کرده و سرعت جریان به طور یکنواخت کاهش می یابد. زمان عبور جریان اندازه گیری شده و هر قدر زمان بیشتر باشد سیمان ریزتر است.

مقدار ریزی سیمان پرتلند معمولی با روش Blain برابر  $m^2/kg$  280 می باشد.

۲) زمان گیرش سیمان: وقتی سیمان با آب مخلوط می شود، ترکیبات مختلف موجود در سیمان شروع به واکنش با آب می کنند. برای مدت کوتاهی خمیر سیمان حالت پلاستیک دارد و می توان بدون زحمت زیاد آن را به شکل های گوناگون درآورد. با پیش رفتن واکنش های شیمیایی خمیر شروع به گرفتن می کند. زمان شروع و خاتمه گیرش را به ترتیب، زمان گیرش اولیه و زمان گیرش نهایی می نامند که در حقیقت شروع و خاتمه مرحله انتقال از حالت مایع به حالت جامد است. تعیین دقیق زمان های گیرش مشکل است. به همین منظور مطابق استاندارد BS12 زمان گیرش اولیه عبارت است از فاصله زمانی بین زمان اضافه کردن آب به سیمان تا زمانی که خمیر مقاومت لازم در برابر فشار تعیین شده ای را کسب کند. به همین ترتیب زمان گیرش نهایی عبارت است از فاصله زمانی بین لحظه اضافه کردن آب تا لحظه ای که خمیر مقاومت لازم در برابر فشار تعیین شده بیشتری را کسب کند. در آزمایشگاه بتن، ایجاد چنین فشار تعیین شده ای روی نمونه خمیر سیمان با استفاده از دستگاه ویکات (Vicat) انجام می گیرد که در آن میله فولادی و سوزن متصل به آن دارای وزن استانداردی می باشند. در آزمایش زمان

## سیمان پرتلند و انواع آن

گیرش از خمیری با غلظت استاندارد (نسبت وزنی آب به سیمان مشخص) استفاده می‌شود که تعیین این غلظت استاندارد با آزمایش دیگری با استفاده از همان دستگاه ویکات انجام می‌گیرد. مطابق BS12 خمیر با غلظت استاندارد دارای مقدار آبی است که پس از اضافه شدن به سیمان، خمیر حاصله مقاومت لازم در برابر فشار تعیین شده‌ای را داشته باشد. مقدار آب لازم برای خمیر استاندارد حدود 26-33% وزن سیمان است. مطابق استاندارد ENV197-1:1992 حداقل زمان گیرش اولیه باید بین 45 تا 60 دقیقه باشد. برای زمان گیرش نهایی در استانداردهای جدید اروپایی و آمریکایی مقدار مشخصی تعیین نشده است. در صورت نیاز به داشتن زمان گیرش نهایی، و در صورتی که نتایج آزمایش برای آن در دست نباشد، می‌توان از رابطه‌ای بین زمان گیرش اولیه و نهایی استفاده کرد که در مورد اکثر سیمان‌ها در دمای معمولی برقرار است:

(زمان گیرش اولیه بر حسب دقیقه)  $= 90 + 1.2 \times$  زمان گیرش نهایی بر حسب دقیقه

چون دما و رطوبت نسبی محیط بر زمان گیرش سیمان اثر می‌گذارد، مطابق استاندارد ENV196-3:1987 برای محیط آزمایش دمای  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  و حداقل رطوبت نسبی 65% تعیین شده است. علاوه بر گیرش اولیه و گیرش نهایی، دو نوع گیرش دیگر نیز ممکن است در خمیر سیمان روی دهد که نامطلوب است:

گیرش کاذب (false setting). اگر مقدار  $\text{Ca SO}_4$  اضافه شده به سیمان بیش از حد باشد، به علت از دست دادن آب هنگام آسیاب شدن با کلینگر، مقدار اضافی آن هنگام هیدراسيون سیمان با آب ترکیب شده و تشکیل گچ بنایی می‌دهد. گیرش گچ بنایی منجر به سخت شدن خمیر می‌شود که با ادامه عمل اختلاط از بین می‌رود.

گیرش آنی (flash setting). به علت وجود  $\text{C}_3\text{A}$  در سیمان ممکن است با ترکیب شدید آن با آب گیرش آنی اتفاق افتد. برای جلوگیری از این پدیده، هنگام آسیاب کردن سیمان مقداری سنگ گچ به آن اضافه می‌کنند تا با دخالت در واکنش از شدت آن جلوگیری کند.

(۳) سلامت (ثبات حجم) سیمان: خمیر سیمان پس از گرفتن نباید دچار تغییر حجم شود، مخصوصاً نباید انبساط حجم در آن به وجود آید، زیرا در غیر این صورت ترک خوردنگی باعث از

## تکنولوژی بتن

بین رفتن یکپارچگی و استحکام خمیر سیمان خواهد شد. ناسالم بودن سیمان ممکن است در اثر چند عامل به وجود آید که عبارتند از: وجود آهک آزاد، اکسید منیزیم و سولفات کلسیم. آهک آزاد: اگر مواد به کار رفته برای پخت سیمان در کوره دارای آهک اضافه بر آن مقداری که با اکسیدهای اسیدی ترکیب می‌شود باشد، یا اگر حرارت دادن و خنک کردن مواد به طور صحیح انجام نشود، آهک اضافی به طور آزاد باقی خواهد ماند. این آهک سوخته شده، به گندی هیدراته می‌شود و در درازمدت افزایش حجم پیدا می‌کند. باید توجه داشت که آهکی که به سیمان آماده اضافه شود باعث ناسالم بودن آن نخواهد شد. زیرا این آهک قبل از گیرش سیمان هیدراته می‌شود. وجود آهک آزاد را نمی‌توان با تجزیه شیمیایی تعیین کرد، زیرا تشخیص بین  $\text{CaO}$  و  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  که در اثر هیدراسیون جزئی سیمان در مجاورات هوا حاصل می‌شود، ممکن نیست.

اکسید منیزیم: وجود  $\text{MgO}$  نیز که مانند  $\text{CaO}$  با آب ترکیب می‌شود، می‌تواند باعث ناسالم بودن سیمان شود.

سولفات کلسیم: وجود این ترکیب می‌تواند با تشکیل ettringite باعث ایجاد انبساط شود. لازم به یادآوری است که مقداری سنگ گچ هنگام آسیاب کردن سیمان به آن اضافه می‌شود تا از گیرش آنی آن در هیدراسیون جلوگیری شود، ولی اگر مقدار آن بیشتر از حدی باشد که می‌تواند با  $\text{C}_3\text{A}$  ترکیب شود، مقدار اضافی باعث انبساط در درازمدت خواهد شد. به همین علت در استانداردهای مختلف حد مشخصی برای سنگ گچ اضافه شده به سیمان تعیین شده است تا از ناسالم بودن سیمان جلوگیری شود.

چگونگی تشخیص ناسالم بودن سیمان: چون ناسالم بودن سیمان پس از مدت طولانی (چند ماه تا چند سال) اثر خود را نشان می‌دهد، لازم است با روش‌های تسریع شده‌ای آن را تشخیص داد:

آزمایش لوشاپلیه (Le Chatelier) مطابق 1987: EN 196-3: در این آزمایش خمیر سیمان با غلظت استاندارد تهیه شده و در داخل قالب لوشاپلیه قرار گرفته و دو طرف قالب با شیشه

## تکنولوژی بتن

بین رفتن یکپارچگی و استحکام خمیر سیمان خواهد شد. ناسالم بودن سیمان ممکن است در اثر چند عامل به وجود آید که عبارتند از: وجود آهک آزاد، اکسید منیزیم و سولفات کلسیم. آهک آزاد: اگر مواد به کار رفته برای پخت سیمان در کوره دارای آهک اضافه بر آن مقداری که با اکسیدهای اسیدی ترکیب می‌شود باشد، یا اگر حرارت دادن و خنک کردن مواد به طور صحیح انجام نشود، آهک اضافی به طور آزاد باقی خواهد ماند. این آهک سوخته شده، به گندی هیدراته می‌شود و در درازمدت افزایش حجم پیدا می‌کند. باید توجه داشت که آهکی که به سیمان آماده اضافه شود باعث ناسالم بودن آن نخواهد شد. زیرا این آهک قبل از گیرش سیمان هیدراته می‌شود. وجود آهک آزاد را نمی‌توان با تجزیه شیمیایی تعیین کرد، زیرا تشخیص بین  $\text{CaO}$  و  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  که در اثر هیدراسیون جزئی سیمان در مجاورات هوا حاصل می‌شود، ممکن نیست.

اکسید منیزیم: وجود  $\text{MgO}$  نیز که مانند  $\text{CaO}$  با آب ترکیب می‌شود، می‌تواند باعث ناسالم بودن سیمان شود.

سولفات کلسیم: وجود این ترکیب می‌تواند با تشکیل ettringite باعث ایجاد انبساط شود. لازم به یادآوری است که مقداری سنگ گچ هنگام آسیاب کردن سیمان به آن اضافه می‌شود تا از گیرش آنی آن در هیدراسیون جلوگیری شود، ولی اگر مقدار آن بیشتر از حدی باشد که می‌تواند با  $\text{C}_3\text{A}$  ترکیب شود، مقدار اضافی باعث انبساط در درازمدت خواهد شد. به همین علت در استانداردهای مختلف حد مشخصی برای سنگ گچ اضافه شده به سیمان تعیین شده است تا از ناسالم بودن سیمان جلوگیری شود.

چگونگی تشخیص ناسالم بودن سیمان: چون ناسالم بودن سیمان پس از مدت طولانی (چند ماه تا چند سال) اثر خود را نشان می‌دهد، لازم است با روش‌های تسریع شده‌ای آن را تشخیص داد:

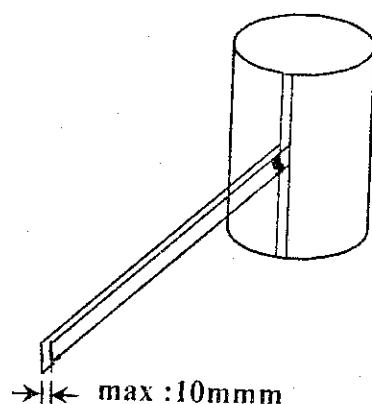
آزمایش لوشاپلیه (Le Chatelier) مطابق 1987: EN 196-3 : در این آزمایش خمیر سیمان با غلظت استاندارد تهیه شده و در داخل قالب لوشاپلیه قرار گرفته و دو طرف قالب با شیشه

## سیمان پرتلند و انواع آن

پوشانده شده و به مدت 24 ساعت در آب و در دمای  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  قرار داده می‌شود. پس از این مدت فاصله بین دو تیغه قالب اندازه‌گیری شده و سپس نمونه را دوباره در داخل آب قرار داده و آب را به آرامی در مدت 30 دقیقه به جوش می‌آورند و پس از جوشاندن به مدت 3 ساعت، آن را بیرون آورده و بعد از سرد کردن، فاصله بین تیغه‌ها دوباره اندازه‌گیری می‌شود. افزایش فاصله بین تیغه‌ها در این مرحله نباید بیشتر از 10mm باشد.

آزمایش لوشاتلیه فقط وجود آهک آزاد را نشان می‌دهد. بنابراین در کشورهایی که مواد اولیه موجود برای تولید سیمان دارای مقادیر زیادی اکسید منیزیم باشد، باید از روش دیگری برای تشخیص آن استفاده کرد. این روش آزمایش اتوکلاو (autoclave) نام دارد که شرح آن در استاندارد ASTM C-151-93a داده شده است. در این آزمایش میله‌ای از خمیر سیمان با مقطع 25×25mm و به طول 250mm ساخته شده و به مدت 24 ساعت در هوا مرطوب نگهداری می‌شود و سپس در داخل محفظه دستگاه اتوکلاو (دستگاه تولید بخار آب با فشار بالا) قرار می‌گیرد. با روشن کردن دستگاه در مدت  $15 \pm 60$  دقیقه دمای محفظه به  $216^\circ\text{C}$  و فشار بخار به  $2 \pm 0.07\text{MPA}$  رسانده شده و به مدت 3 ساعت در این وضعیت نگه داشته می‌شود. وجود بخار آب با فشار زیاد باعث سریع ترشدن هر دو واکنش اکسید منیزیم و آهک آزاد می‌شود. انبساط میله سیمانی در این حالت نباید بیشتر از 8% باشد.

برای تشخیص ناسالم بودن سیمان در اثر وجود سولفات کلسیم، آزمایشی وجود ندارد، ولی مقدار آن در سیمان را می‌توان با تجزیه شیمیایی تعیین کرد.



شکل ۲-۲ - قالب لوشاتلیه

## تکنولوژی بتن

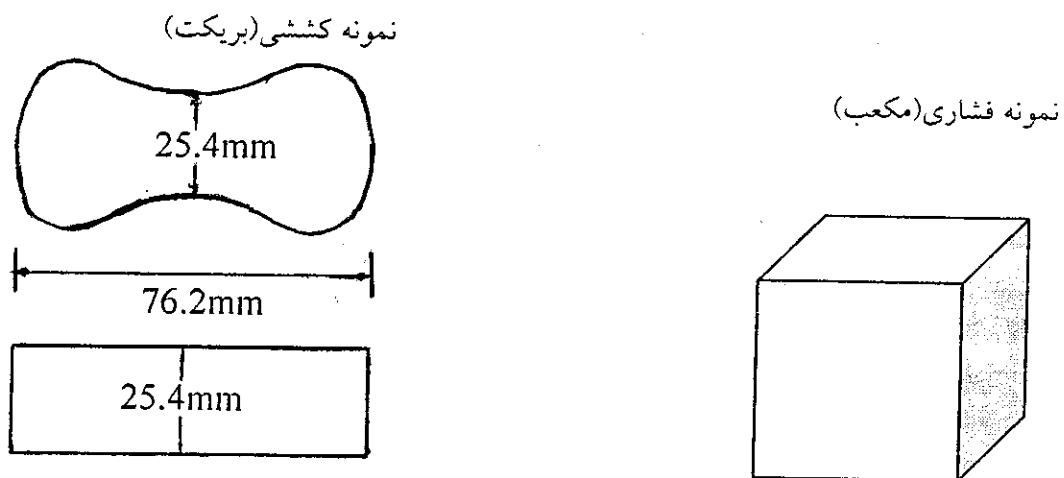
(۴) مقاومت سیمان: مقاومت خمیر سخت شده سیمان شاید مهم‌ترین خاصیتی باشد که در سازه مورد نیاز است. مقاومت ملات سیمان و بتن به میزان چسبندگی خمیر سیمان به سنگدانه‌ها و نیز خواص خود سنگدانه‌ها بستگی دارد. ولی چون در این مرحله بررسی خواص سیمان مورد نظر است، با استفاده از ماسه استاندارد، تاثیر سنگدانه‌ها حذف می‌گردد. ماسه استاندارد دارای دانه‌هایی کروی با ابعاد تقریباً یکسان است که تمامی آن از الک No.20 رد شده و روی الک No.30 باقی می‌ماند. برای آزمایش مقاومت، نمونه‌هایی از ملات ماسه و سیمان با نسبت‌های مشخص که تحت شرایط معینی ساخته و نگهداری می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. انواع آزمایش‌های مقاومت عبارتند از: مقاومت کششی مستقیم، مقاومت خمشی (کشش غیرمستقیم) و مقاومت فشاری.

آزمایش کشش مستقیم روی نمونه‌های به شکل بریکت با مخلوط 1 قسمت وزنی سیمان و 3 قسمت وزنی ماسه استاندارد و مقدار آبی به اندازه 0.4 برابر وزن سیمان انجام می‌شود. همچنین آزمایش خمشی روی نمونه‌های مکعب مستطیلی به ابعاد  $40 \times 40 \times 160\text{mm}$  با مخلوط 1 قسمت وزنی سیمان و 2.75 قسمت وزنی ماسه استاندارد و مقدار آب به اندازه 0.485 وزن سیمان انجام می‌شود. امروزه این دو آزمایش به ندرت انجام می‌شوند، زیرا اولاً به علت مشکل بودن ایجاد کشش کاملاً محوری نتایج حاصل دارای دقت کمی هستند، ثانیاً طراحی سازه‌ها عمدتاً در جهت استفاده از مقاومت فشاری خوب بتن انجام می‌گیرد و در نتیجه مقاومت کششی بتن چندان دارای اهمیت نیست. بنابراین امروزه، فقط مقاومت فشاری بتن مهرده شده و آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های ملات ماسه سیمان انجام می‌شود.

مطابق استاندارد ASTM C 109-93 آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی ملات ماسه سیمان به ابعاد  $50\text{mm}$  و با نسبت‌های اختلاط 1 قسمت وزنی سیمان و 2.75 قسمت وزنی ماسه استاندارد و وزن آب 0.485 برابر وزن سیمان انجام می‌شود. در استاندارد اروپایی EN196-1:1987 آزمایش فشاری روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد  $40\text{mm}$  با نسبت‌های اختلاط 1 به

## سیمان پرتلند و انواع آن

شکل ۲-۳- نمونه‌های آزمایش مقاومت سیمان



(سیمان به ماسه) و نسبت آب به سیمان ۰.۵ و در استاندارد BS4550 روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۷۰.۷ mm و با نسبت‌های اختلاط ۱ به ۳ و نسبت آب به سیمان ۰.۴ انجام می‌شود. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت باقی ماندن در محیط مرطوب، از قالب باز شده و تا روز آزمایش باید در آب با دمای  $20^{\circ}\text{C}$  نگهداری شوند.

طبق استاندارد آمریکایی ASTM C150 برای سیمان پرتلند معمولی (نوع ۱)، مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه حداقل باید به ترتیب برابر  $12.4\text{ MPa}$  و  $19.3\text{ MPa}$  باشد. همچنین طبق استاندارد BS12 حداقل مقاومت کششی یک روزه سیمان نوع ۳ باید برابر  $2.1\text{ MPa}$  باشد.

## انواع سیمان پرتلند

با انتخاب نسبت‌های گوناگون از مواد خام، انواع سیمان‌های پرتلند به دست می‌آیند. عملاً ۹۰% تولید سیمان پرتلند را نوع معمولی آن تشکیل می‌دهد و قسمت عمده کارهای بتُنی نیز با استفاده از همین سیمان انجام می‌شود. هنوز سیمانی تولید نشده است که برای تمام کاربردها کاملاً مناسب باشد.

## تکنولوژی بتن

۱) سیمان پرتلند معمولی، (OPC یا Type I). این سیمان برای کارهای بتنی معمولی که خطر سولفات‌ها در محیط موجود نباشد به کار می‌رود. از حدود سه دهه گذشته نسبت  $C_3S/C_2S$  و همچنین ریزی این سیمان کمی افزایش یافته است. در نتیجه مقاومت ۲۸ روزه و مقاومت روزهای اولیه و حرارت هیدراسیون نیز بیشتر شده است. افزایش در مقاومت سیمان تاثیر چشمگیری در طرح اختلاط بتن دارد، چون می‌توان برای یک مقاومت معین بتن، عیار سیمان پایین‌تر و نسبت آب به سیمان بالاتر در نظر گرفت. این تغییر می‌تواند در بعضی کاربردهای بتن مفید باشد ولی ممکن است برای دوام بتن اشکالاتی را به وجود بیاورد.

۲) سیمان اصلاح شده، (modified cement یا Type II). این سیمان برای اولین بار در آمریکا برای کارهای سدسازی ارائه شده است و اکتون در بعضی از کشورها نیز ساخته می‌شود. حرارت هیدراسیون این سیمان مشابه سیمان کم حرارت ولی سرعت کسب مقاومت آن مشابه سیمان معمولی است. استفاده از این سیمان در مواردی توصیه می‌شود که حرارت هیدراسیون نسبتاً کم و مقاومت متوسط در برابر سولفات‌ها مورد نظر است.

۳) سیمان پرتلند زود سخت شونده، (Type III یا RHPC). این سیمان مشابه سیمان پرتلند معمولی است ولی ریزی آن حدود  $100 \text{ m}^2/\text{kg}$  بیشتر است تا کسب مقاومت سریع‌تر انجام شود. مقاومت این سیمان در روزهای اولیه بیشتر از سیمان پرتلند معمولی ولی مقاومت ۲۸ روزه مشابه آن است. موارد کاربرد این سیمان عبارتند از: بتن پیش‌ساخته، هوای سرد (به علت حرارت هیدراسیون بیشتر)، و موقوعی که باز کردن سریع قالب‌ها ضروری است. اصطلاح زود سخت شدن باید با زودگیر بودن اشتباه شود. سیمان زود سخت شونده با همان سرعت سیمان معمولی به گیرش اولیه می‌رسد و پس از این مرحله است که مقاومت با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد.

۴) سیمان پرتلند کم حرارت، (LHPC یا Type IV). سیمانی است با مقدار  $C_3S$  کمتر که مقدار  $C_3A$  نیز در آن پایین نگهداشته شده است. حرارت هیدراسیون این سیمان کمتر، کسب مقاومت

## سیمان پرتلند و انواع آن

کندتر، ولی مقاومت نهایی مشابه سیمان پرتلند معمولی است. استفاده از این سیمان در بتن ریزی‌های حجیم که افزایش حرارت در آن نامطلوب است، مناسب می‌باشد.

(۵) سیمان ضد سولفات (Type V یا SRPC): نوعی سیمان پرتلند است که مقدار  $C_3A$  در آن پایین نگهداشته شده است. مطابق استاندارد BS 4027 مقدار  $C_3A$  در این سیمان حداقل ۳.۵٪ است. با اضافه کردن اکسید آهن و کاهش اکسید الومینیوم در مواد اولیه، مقدار  $C_3A$  کمتر شده و مقدار  $C_4AF$  بیشتر می‌شود. به علت بیشتر بودن مقدار آهن رنگ این سیمان کمی تیره‌تر از سیمان معمولی است.

هنگامی که بتن در معرض محلول‌های سولفات که در بعضی از خاک‌ها و آب‌ها یافت می‌شوند قرار بگیرد، واکنشی بین هیدرات‌های حاصل از  $C_3A$  و سولفات ممکن است روی دهد که باعث ترک خورده‌گی و خرابی بتن می‌شود. بهترین راه برای افزایش مقاومت بتن در برابر سولفات‌ها محدود کردن میزان  $C_3A$  در سیمان است. البته عوامل دیگری مانند نفوذپذیری بتن نیز در این واکنش تاثیر دارند. برای جبران کمبود  $C_3A$  در مقاومت اولیه، معمولاً ریزی این سیمان در حدود  $30m^2/kg$  بیشتر از سیمان پرتلند معمولی است. این سیمان در مواردی به کار می‌رود که خطر سولفات‌ها در محیط شدید باشد.

(۶) سیمان پرتلند سفید: سیمانی که از مواد اولیه بدون آهن تهیه می‌شود (آهک خالص و کائولن) تا مقدار  $C_4AF$  در آن بسیار ناچیز شود. در ساخت این سیمان از آلدگی طی مراحل تولید باید جلوگیری شود. مقاومت این سیمان تقریباً به اندازه سیمان معمولی است ولی قیمت آن گرانتر است. از این سیمان می‌توان در نماکاری‌های با رنگ روشن و کلیه کارهای بتُنی که رنگ روشن در آنها اهمیت دارد، استفاده کرد. در هنگام استفاده باید دقت کافی برای جلوگیری از آلدگی با مواد تیره رنگ به عمل آید.

## تکنولوژی بتن

۷) سیمان زود سخت شونده مخصوص،<sup>۴</sup> (SRHPC). سیمانی است که سرعت کسب مقاومت آن بسیار زیاد است و در مواردی به کار می‌رود که مقاومت اولیه بسیار زیاد مورد نیاز می‌باشد. معمولاً، مقاومت اولیه زیاد با افزایش ریزی سیمان تا حدود  $900\text{m}^2/\text{kg}$   $\sim 700$  حاصل می‌شود. به علت بالا بودن ریزی این سیمان مقدار سنگ گچ آن نیز باید بالاتر از سیمان معمولی باشد. ولی این سنگ گچ اضافی باعث ناسالم بودن سیمان نخواهد شد، زیرا تمام آن در واکنش‌های اولیه هیدراسیون به مصرف خواهد رسید. از موارد کاربرد این سیمان می‌توان پیش تئیده کردن زود هنگام بتن و کارهای تعمیراتی سریع را نام برد.

۸) سیمان سرباره آهن گدازی<sup>۵</sup> (PBFC). این سیمان از مخلوط کردن سرباره کوره‌های آهن‌گدازی با سیمان پرتلند معمولی به دست می‌آید. نسبت اختلاط معمولاً ۵۰:۵۰ است، ولی تا ۶۵% سرباره نیز مجاز است. سرباره یک محصول زاید در کوره‌های تولید آهن است. از نظر شیمیایی سرباره مخلوطی است از آهک، سیلیس و آلومین، یعنی همان اکسیدهایی که سیمان پرتلند را تشکیل می‌دهند، ولی با نسبت‌های متفاوت با آن. سرباره به تنها یک فعالیت هیدرولیکی اندکی دارد ولی در مجاورت هیدروکسید کلسیم و دیگر محلول‌های قلیایی حاصل از هیدراسیون سیمان معمولی، فعال نر می‌شود. این سیمان حرارت هیدراسیون و سرعت کسب مقاومت پایین‌تری نسبت به سیمان پرتلند معمولی دارد. مقاومت ۳ و ۷ روزه بتن ساخته شده با این سیمان کمتر از بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی است. بتن ساخته شده با سرباره برای یک کارایی معین نیاز به آب کمتری نسبت به بتن معمولی دارد. این کاهش در حدود ۳~۵٪ است.

چون واکنش بین سرباره و آهک آزاد وابسته به وجود رطوبت است، باید در عمل آوری بتن

4- Sulphate Resisting Portland Cement

5- Portland Blast Furnace Cement

## سیمان پرتلند و انواع آن

ساخته شده با این سیمان دقت زیادی به عمل آید تا از خشک شدگی زود هنگام بتن جلوگیری شود. از این سیمان می‌توان در بتن ریزی‌های حجیم و هوای گرم و در سازه‌های دریایی و اسکله‌ها به علت مقاومت بیشتر در برابر سولفات‌ها استفاده کرد.

۹) سیمان سوپر سولفات: این سیمان از آسیاب کردن ۸۰-۸۵٪ سرباره آهن با ۱۰-۱۵٪ سولفات کلسیم (به صورت سنگ چچ سوخته) و حدود ۵٪ سیمان پرتلند معمولی به دست می‌آید. این سیمان باید در شرایط بسیار خشک نگهداری شود در غیر این صورت سریعاً غیرقابل استفاده خواهد شد. این سیمان عمدتاً در بلژیک و فرانسه مورد استفاده قرار می‌گیرد و به علت دشوار بودن تولید و نگهداری، در اغلب کشورها تولید نمی‌شود. این سیمان در مقابل آب دریا و تمرکزهای بالای سولفات‌ها در خاک و همچنین در مقابل اسیدها و روغن‌ها مقاوم است. حرارت هیدراسیون این سیمان پایین است و بنابراین می‌توان در بتن ریزی‌های حجیم از آن استفاده کرد. ولی در هوای سرد سرعت کسب مقاومت آن بسیار پایین خواهد آمد. استفاده از این سیمان در بتن ریزی‌های مجاور خاک‌های آلوده مناسب است، اگر چه وقتی تمرکز سولفات‌ها بالا باشد مقاومت آن از سیمان ضدسولفات کمتر است.

۱۰) سیمان‌های پوزولانی: این سیمان از مخلوط کردن سیمان پرتلند با یک پوزولان مناسب به دست می‌آید. پوزولان ماده‌ای است طبیعی یا مصنوعی که دارای سیلیس به صورت فعال باشد. پوزولان به تهایی دارای خاصیت سیمانی اندکی است، ولی به صورت پودر شده و در مجاورت رطوبت، با هیدروکسید کلسیم در دماهای عادی واکنش انجام داده و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که دارای خاصیت سیمانی است. از مواد پوزولانی طبیعی می‌توان خاکستر آتشفشاری، پومیس (سنگ پا)، رس سوخته و از پوزولان‌های مصنوعی خاکستر زغال سنگ یا خاکستر بادی (fly ash) را نام برد. خاکستر بادی یک محصول جانبی نیروگاه برق با سوخت زغال سنگ است که از دود زغال سنگ مشتعل در دمای ۱۵۰۰-۲۰۰۰°C به روش الکترواستاتیکی استخراج می‌شود و نسبت اختلاط آن با سیمان معمولی ۱۵-۵۰٪ است. سیمان پوزولانی دارای حرارت هیدراسیون

## تکنولوژی بتن

پایین است و می‌توان از آن در بتن ریزی‌های حجیم استفاده کرد ولی سرعت کسب مقاومت آن کمتر از سیمان معمولی است، به طوری که مقاومت 7 روزه و 28 روزه آن پایین خواهد بود. این سیمان تا حدی در مقابل سولفات‌ها و نیز اسیدهای ضعیف مقاوم است. همچنین دوره به عمل آوردن و مراقبت از بتن در این سیمان باید طولانی‌تر از سیمان معمولی باشد.

(۱۱) سیمان پرآلومین: از نام این سیمان می‌توان دریافت که قسمت عمداتی از آن را آلومین (اکسید آلومینیوم) تشکیل داده است. معمولاً ۴۰٪ این سیمان را آلومین، ۴۰٪ را آهک، ۱۵٪ را اکسیدهای آهن ( $Fe_2O_3$ ,  $FeO$ ) و حدود ۵٪ را سیلیس تشکیل می‌دهد. مواد خام به کار رفته معمولاً سنگ آهک و بوکسیت می‌باشند. از مشخصات این سیمان می‌توان رنگ تیره، مقاومت اولیه زیاد، حرارت هیدراسیون بالا، مقاومت در برابر عوامل شیمیایی و کسب مقاومت بسیار سریع را نام برد. ۸۰٪ مقاومت این سیمان در ۲۴ ساعت اولیه به دست می‌آید. موارد کاربرد این سیمان عبارتند از: تعمیرات سریع کارهای بتنی، آببندی موقت و سریع، مقاومت در برابر حرارت  $1600-1800^{\circ}C$ ، مقاومت در برابر تغییرات دما، عوامل شیمیایی و ضربه.

به علت پدیدهای به نام تبدیل (conversion)، بتن ساخته شده با این سیمان به تدریج متخلخل شده و مقاومت خود را از دست می‌دهد. در جریان این پدیده، هیدراتات حاصل از واکنش سیمان با آب در دراز مدت به هیدراتی با چگالی بیشتر تبدیل می‌شود و به علت ثابت بودن حجم کلی، تخلخل افزایش یافته و مقاومت کاهش می‌یابد. بنابراین دیگر از این سیمان در اعضای بتنی سازه‌ای که باید مقاومت کافی داشته باشند استفاده نمی‌شود.

این سیمان ماده‌ای مناسب برای ساخت کوره‌ها با حرارت‌های بالای  $1000^{\circ}C$  است.

(۱۲) سیمان ضدآب: از آسیاب کردن کلینیگر سیمان پرتلند با یک ماده پرکننده حفره‌های بتنی به دست می‌آید.

(۱۳) سیمان چاه نفت: سیمانی است با دانه‌های درشت‌تر از معمول که دارای یک ماده کننده گیرکننده است. این سیمان برای طولانی‌تر کردن زمان گیرش در فشار و دمای بالا در عمق

## سیمان پرتلند و انواع آن

چاههای نفت به کار می‌رود.

۱۴) سیمان منبسط شونده: سیمانی است که برای جبران انقباض ناشی از آبرفتگی بتن، کمی ابساط پیدا می‌کند. دارای انواع گوناگون است که تمام آنها تولید ettringite می‌کنند که باعث افزایش حجم می‌شود.

جدول ۲-۳- نسبت‌های معمول ترکیبات تشکیل‌دهنده انواع اصلی سیمان‌های پرتلند

نوع سیمان	% C <sub>3</sub> S	% C <sub>2</sub> S	% C <sub>3</sub> A	% C <sub>4</sub> AF	% CaSO <sub>4</sub>	% آهک آزاد	% MgO	% افت حرارتی
تیپ ۱	42~67 (49)	8~31 (25)	5~14 (12)	6~12 (8)	2.4~3.4 (2.9)	0~1.5 (0.8)	0.7~3.8 (2.4)	0.6~2.3 (1.2)
تیپ ۲	37~55 (46)	19~39 (29)	4~8 (6)	6~16 (12)	2.1~3.4 (2.8)	0.1~1.8 (0.6)	1.5~4.4 (3)	0.5~2 (1.0)
تیپ ۳	34~70 (56)	0~38 (15)	7~17 (12)	6~10 (8)	2.2~4.6 (3.9)	0.1~4.2 (1.3)	1.0~4.8 (2.7)	1.1~2.7 (1.9)
تیپ ۴	21~44 (30)	34~57 (46)	3~7 (5)	6~18 (13)	2.6~3.5 (2.9)	0~0.9 (0.3)	1.0~4.1 (2.7)	0.6~1.9 (1.0)
تیپ ۵	35~54 (43)	24~49 (36)	1~5 (4)	6~15 (12)	2.4~3.9 (2.7)	0.1~0.6 (0.4)	0.7~2.3 (1.6)	0.8~1.2 (1.0)

## مواد سنگی بتن (سنگدانه‌ها)

تقریباً 75% حجم بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند و در نتیجه خواص سنگدانه‌ها تأثیر زیادی روی خواص بتن دارد. خواص سنگدانه‌ها چگونه روی خواص بتن تأثیر می‌گذارد؟

۱) مقاومت: مقاومت بتن نمی‌تواند از مقاومت سنگدانه‌ها بیشتر باشد. بنابراین در اکثر بتن‌های معمولی که با سنگدانه‌های خوب ساخته شده‌اند، عامل تعیین‌کننده مقاومت بتن، مقاومت خمیر سیمان یا پیوستگی بین خمیر و سنگدانه است که معمولاً پیوستگی ضعیفتر از خمیر سیمان است. مقاومت سنگدانه‌ها معمولاً بسیار بیشتر از مقدار لازم است. فقط در بتن‌های با مقاومت بسیار بالا (بیشتر از 80MPa) مقدار مقاومت سنگدانه اهمیت پیدا می‌کند. خواص سنگدانه‌ها به طور غیرمستقیم و از طریق تأثیر روی کارایی و نسبت آب به سیمان روی مقاومت بتن تأثیر می‌گذارد.

۲) کارایی: شکل، زیری سطح، حداکثر ابعاد و سطح مخصوص سنگدانه‌ها روی کارایی بتن تأثیر می‌گذارد. هر قدر شکل سنگدانه‌ها زاویه‌دارتر و اندازه آنها کوچکتر باشد، سطح مخصوص آنها بیشتر شده و در نتیجه میزان آب لازم برای کارایی معین بیشتر خواهد شد.

۳) الاستیسیته: این خاصیت تا حد زیادی بستگی به وجود سنگدانه‌ها دارد. سنگدانه سخت‌تر از خمیر سیمان است و در نتیجه وجود آن باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن

## تکنولوژی بتن

۴) آب رفتگی و خزش بتن: با به کار بردن سنگدانه های سخت تر و بیشتر بودن مقدار آن، مقدار آب رفتگی و خزش بتن کاهش می یابد.

۵) دوام (پایایی) بتن: سنگدانه ها از چند طریق روی دوام بتن تاثیر می گذارند:

- از طریق تاثیر روی نسبت آب به سیمان: هر قدر این نسبت بالاتر باشد دوام بتن کمتر است.

- از طریق مواد زیان آور موجود در سنگدانه ها

- میزان انبساط سنگدانه ها در اثر انجماد و ذوب و تغییرات دما

## خواص سنگدانه ها

۱) طبقه بندی سنگدانه ها: سنگدانه ها را به سه طبقه زیر می توان طبقه بندی کرد:

۱-۱) از نظر سنگ شناسی می توان سنگ ها را به چند گروه که دارای خصوصیات مشترک هستند تقسیم کرد. طبقه بندی زیر در استاندارد 1975:BS812 انجام شده است:

- بازالت (Schist)- گرانیت (Granite)- سنگ آهک (Limestone)- شیست (Gneiss)- گردنیت (Gabbro)- هرنفل (Flint)- سنگ گریت (Flint)- پورفری (Porphyry)- گابرو (Gabbro)- کوارتزیت (Quartzite)- کوارنیت (Hornfels)

۱-۲) از نظر زیری سطح می توان سنگدانه ها را به چند دسته تقسیم کرد. طبقه بندی زیر در استاندارد 1975:BS812 انجام شده است:

- شیشه ای (Glassy)- صاف (Smooth)- دانه دانه (Granular)- زیر یا خشن (Rough)- بلوری (Crystalline)- لانه زنبوری یا متخلخل (Honeycombed)

۱-۳) از نظر شکل دانه ها نیز طبقه بندی زیر در استاندارد 1975:BS812 انجام شده است:

- گرد (Rounded)- نامنظم (Irregular)- ورقه ای (Flaky)- گوشیدار (Angular)- دراز و باریک (Angular)

(Elongated) - ورقه‌ای و دراز و باریک (Flaky & elongated)

(۲) خواص مکانیکی: مهم‌ترین خواص مکانیکی سنگدانه‌ها عبارتند از:

(۱-۱) مقاومت (strength): آزمایش مقاومت سنگدانه‌ها معمولاً روی نمونه‌های آماده سنگ (مکعب یا استوانه) انجام نمی‌شود، زیرا اولاً تهیه چنین نمونه‌ای از سنگ مادر مشکل است، ثانیاً سنگدانه به صورت خرد شده در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد نه به صورت قطعات بزرگ.

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه خرد شده سنگدانه مطابق استاندارد BS812:1975 انجام می‌شود. در این آزمایش نمونه‌ای از سنگدانه که از الک 14mm رد شده و روی الک 10mm باقی مانده باشد تهیه شده و ابتدا به مدت 4 ساعت در کوره با حرارت  $100-110^{\circ}\text{C}$  خشک می‌شود و سپس در قالب استوانه‌ای ریخته شده و نیروی 400kN به تدریج و در مدت 10 دقیقه روی آن وارد می‌شود. پس از این مرحله سنگدانه از قالب خارج شده و روی الک (No.8) 2.36mm ریخته می‌شود. نسبت وزن سنگدانه عبور کرده از الک به کل وزن نمونه را عیار خردشدنی سنگدانه می‌نماید.<sup>۱</sup> (ACV)

(۲-۲) مقاومت ضربه‌ای (طاقت) (toughness): این کمیت مقاومت گسیختگی سنگدانه‌ها را در مقابل بارهای ضربه‌ای نشان می‌دهد. نمونه مورد آزمایش مشابه آزمایش فشاری تهیه می‌شود ولی نیروی وارد بر نمونه به صورت ضربه و به وسیله چکشی که تحت اثر وزن خود 15 بار روی سنگدانه داخل قالب سقوط می‌کند، وارد می‌شود. عیار خردشدنی نیز مانند آزمایش فشاری محاسبه می‌شود.

مطابق استاندارد BS882:1973 میانگین نتایج به دست آمده از دو آزمایش فوق باید از مقادیر

زیر بیشتر شود:

## تکنولوژی بتن

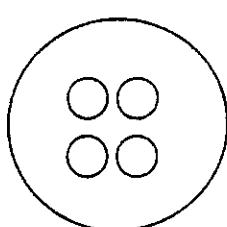
برای سنگدانه‌هایی که در بتن در معرض سایش باشد: 30%

برای سنگدانه‌هایی که در انواع دیگر بتن به کار بروند: 45%

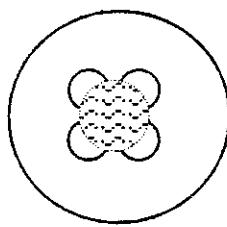
۲-۳) مقاومت سایشی (سختی) (hardness): این نوع مقاومت، خاصیت مهمی در بتن مورد استفاده در جاده‌ها و کف‌های در معرض رفت و آمد زیاد می‌باشد. برای سنجش این خاصیت چند نوع آزمایش وجود دارد که شاید معروف‌ترین آنها آزمایش لوس آنجلس باشد. در این آزمایش سنگدانه‌ها با محدوده ابعادی مشخص، مثلاً رد شده از الک 14mm و باقی مانده روی الک 10mm، را به همراه تعداد مشخصی از گلوله‌های فولادی در داخل استوانه فولادی که به صورت افقی قرار گرفته است، می‌ریزند و استوانه با تعداد دور مشخصی در مدت معینی دوران می‌کند. غلتیدن و سقوط سنگدانه‌ها همراه با گلوله‌ها باعث سایش سنگدانه‌ها می‌گردد. سپس سنگدانه از استوانه بیرون آورده شده و وزن عبوری آن از الک 2.36mm (No.8) (برای محدوده ابعادی ذکر شده) اندازه‌گیری شده و به صورت درصدی از وزن کل تعیین می‌شود. شرح این آزمایش و محدوده‌های ابعادی مختلف سنگدانه‌ها در استاندارد ASTM C131-89 داده شده است.

۳) خواص فیزیکی: قبل از بررسی خواص فیزیکی سنگدانه‌ها باید انواع حالت‌های سنگدانه از نظر میزان رطوبت را شناخت. نمودار ساده زیر حالت‌های مختلف سنگدانه از نظر میزان رطوبت را نشان می‌دهد:

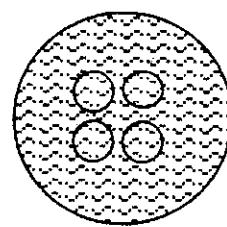
شکل ۳-۱- انواع حالت‌های سنگدانه از نظر میزان رطوبت



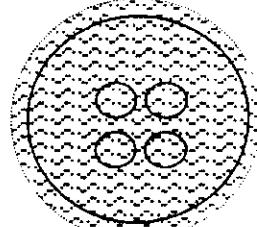
خشک در کوره  
oven-dry



خشک در هوا  
air-dry



اشباع-سطح خشک  
saturated surface dry



خیس  
moist

## مواد سنگی بتن

مهم‌ترین خواص فیزیکی سنگدانه‌ها عبارتند از:

۳-۱) وزن مخصوص (Specific gravity): چون سنگدانه‌ها دارای منافذ قابل نفوذ و غیر قابل نفوذ می‌باشند، چند نوع وزن مخصوص برای آن تعریف می‌شود.

۳-۲-۱) وزن مخصوص مطلق (absolute): این وزن مخصوص به حجم تمام ماده جامد بدون منافذ موجود در آن مربوط می‌شود و می‌توان آن را به صورت نسبت وزن مخصوص مواد جامد در خلاء به وزن هم حجم آب مقاطر که هر دو در یک دمای مشخص تعیین شوند، تعریف نمود. تعیین وزن مخصوص مطلق مشکل است و نیاز به پودر کردن سنگ دارد.

۳-۲-۲) وزن مخصوص ظاهري (apparent): اگر حجم مواد جامد طوری در نظر گرفته شود که شامل منافذ غیرقابل نفوذ نیز گردد، وزن مخصوص به دست آمده را وزن مخصوص ظاهري می‌نامند. در این صورت وزن مخصوص برابر است با نسبت وزن سنگدانه‌های خشک شده در کوره به وزن آب هم حجم مواد جامد شامل منافذ غیرقابل نفوذ. برای به دست آوردن این وزن مخصوص یک ظرف شیشه‌ای که بتوان آنرا با دقت تالبه پر از آب کرد مورد نیاز است.

$$\frac{D}{B - A + D} = \text{وزن مخصوص ظاهري}$$

D = وزن نمونه خشک شده در کوره

B = وزن ظرف آزمایش پر از آب

A = وزن ظرف آزمایش محتوی نمونه اشباع شده و آب (برای اشباع شدن، نمونه باید قبل از ۲۴ ساعت در داخل آب باقی مانده باشد).

B-(A - D) = وزن آبی که حجم معادل مواد جامد را اشغال کند.

۳-۲-۳) وزن مخصوص در حالت اشباع - سطح خشک (SSD): معمولاً در محاسبات مربوط به

## تکنولوژی بتن

بتن حالت اشباع و سطح خشک سنگدانه‌ها در نظر گرفته می‌شود، زیرا هنگام مخلوط کردن بتن مقداری از آب در منافذ سنگدانه‌ها نفوذ کرده و در واکنش هیدراسيون شرکت نمی‌کند، بنابراین می‌توان آن را به عنوان بخشی از سنگدانه در نظر گرفت. برای تعیین این وزن مخصوص وزن سنگدانه‌های مورد آزمایش را پس از 24 ساعت غوطه‌ور بودن در آب و بعد از خشک کردن آب اضافی روی آن، تعیین کرده و با C نشان می‌دهند. وزن مخصوص اشباع- سطح خشک برابر خواهد بود با:

$$\frac{C}{B - A + C} = \text{وزن مخصوص اشباع - سطح خشک (SSD)}$$

۱-۳-۴) وزن مخصوص انبوه (Bulk density): در موقعی که سنگدانه‌ها به صورت حجمی پیمانه شوند، دانستن وزن سنگدانه‌هایی که پیمانه واحد حجم را پر می‌کنند ضروری است. این کمیت به عنوان وزن مخصوص انبوه شناخته می‌شود و از آن برای تبدیل مقادیر وزنی به مقادیر حجمی استفاده می‌شود. این وزن مخصوص در دو حالت غیرمتراکم و متراکم می‌تواند تعیین شود. در حالت غیرمتراکم یا آزاد، سنگدانه‌ها را به آرامی در ظرفی با حجم معین می‌ریزند تا لبریز شود و سپس سطح آن را با میله‌ای به صورت افقی صاف می‌کنند. در حالت متراکم سنگدانه در سه مرحله در ظرف ریخته شده و در هر مرحله با یک میله فولادی به قطر 16mm به دفعات مشخصی کوبیده شده و در پایان مقدار اضافی آن نیز برداشته می‌شود. بعد از وزن کردن سنگدانه وزن مخصوص انبوه در حالت موردنظر (متراکم یا غیرمتراکم) تعیین می‌شود.

$$\frac{\text{وزن سنگدانه}}{\text{حجم ظرف}} = \text{وزن مخصوص انبوه}$$

معمولًاً نسبت وزن مخصوص در حالت غیرمتراکم به وزن مخصوص در حالت متراکم در حدود 0.87 تا 0.96 می‌باشد. همچنین اگر وزن مخصوص انبوه را با  $\sigma$  و وزن مخصوص اشباع - سطح خشک را با  $\sigma_s$  نشان دهیم، نسبت فضاهای خالی سنگدانه از این رابطه به دست

می‌آید:

$$\frac{b}{s \times l} = 1 - \text{نسبت فضاهای خالی}$$

۲-۳) تخلخل و جذب آب سنگدانه‌ها (porosity & water absorption): حفره‌های موجود در سنگدانه‌ها دارای اندازه‌های مختلف هستند ولی در هر حال بسیار بزرگتر از حفره‌های موجود در خمیر سخت شده سیمان هستند. چون سنگدانه حدود 75% بتن را تشکیل می‌دهد، بنابراین تخلخل سنگدانه‌ها بر نفوذپذیری بتن و میزان جذب آب آنها بر خواصی از بتن مانند پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان، مقاومت بتن در برابر انجماد و ذوب و همچنین بر پایداری شیمیایی و مقاومت سایشی آن تاثیر می‌گذارد. از طرف دیگر تخلخل سنگدانه بر وزن مخصوص آن و در نتیجه بر وزن مخصوص بتن تاثیر خواهد گذاشت.

۳-۳) میزان رطوبت سنگدانه‌ها (moisture content): موقعی که سنگدانه‌ها در معرض باران قرار گرفته باشند مقادیر قابل ملاحظه‌ای از آب در سطح آنها جمع می‌شود. این مقدار آب اضافی موجود در سطح سنگدانه‌ها باید در محاسبه آب لازم برای بتن مورد توجه قرار گیرد. سنگدانه‌های درشت به ندرت بیش از 1% رطوبت دارند، در حالی که سنگدانه‌های ریز (ماسه) می‌توانند بیش از 10% رطوبت داشته باشند. چون میزان رطوبت سنگدانه‌ها تابع وضعیت آب و هوا بوده و از محلی به محل دیگر متغیر است، مقدار آن باید مرتباً تعیین و کنترل شود. برای تعیین میزان رطوبت سنگدانه‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد. در آزمایشگاه می‌توان میزان رطوبت را با استفاده از پیکنومتر (ظرفی استوانه‌ای با درپوش مخروطی) تعیین کرد. ابتدا باید وزن مخصوص SSD سنگدانه‌ها (s) معلوم باشد. اگر وزن پیکنومتر پر از آب برابر B، وزن نمونه مرطوب سنگدانه برابر C و وزن پیکنومتر همراه با نمونه و پر از آب برابر A باشد، در صد رطوبت سنگدانه‌ها از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

## تکنولوژی بتن

$$\text{moisture content \%} = \left[ \frac{C}{A \cdot B} \left( \frac{s-1}{s} \right) - 1 \right] \times 100$$

(۴) سلامت سنگدانه‌ها (soundness): منظور از سلامت سنگدانه مقاومت آن در برابر تغییرات حجم بیش از حد در نتیجه تغییر شرایط فیزیکی می‌باشد. علت‌های فیزیکی تغییرات حجم عبارتند از انجماد و ذوب، تغییرات دمای بالاتر از انجماد و ترو خشک شدن‌های متوالی. سنگدانه موقعی ناسالم خوانده می‌شود که تغییرات حجم ناشی از علت‌های فوق، باعث خرابی و از بین رفتن بتن شود. روش‌های متعددی برای تحقیق سلامت سنگدانه‌ها در آزمایشگاه ارائه شده است ولی هیچکدام از آنها اطلاع دقیقی از رفتار درازمدت سنگدانه نمی‌دهند. بنابراین بهترین راه استفاده از تجربیات به دست آمده روی نمونه‌های استفاده شده سنگدانه‌ها در درازمدت است.

(۵) خواص حرارتی سنگدانه‌ها (thermal properties): سه خاصیت حرارتی در سنگدانه‌ها دارای اهمیت است:

۱-۵) انبساط حرارتی (thermal expansion)

۲-۵) گرمای ویژه (specific heat)

۳-۵) هدایت گرمایی (thermal conductivity)

این خواص تاثیر زیادی روی خواص مشابه بتن دارند. خواص ۲-۵ و ۳-۵ معمولاً در سازه‌های عادی بتنه دارای اهمیت نیستند و تنها در جاهایی که عایق‌بندی گرمایی موردنیاز باشد، مهم هستند. خاصیت ۱-۵، ضریب انبساط حرارتی سنگدانه‌ها مخصوصاً در کاهش خطر ترک‌های حرارتی و در جاهایی که مقاومت در برابر آتش مورد نظر است، دارای اهمیت است.

## تأثیر سنگدانه‌ها روی خواص بتن

### تأثیر حداکثر ابعاد سنگدانه‌ها روی خواص بتن

با کوچکتر بودن ابعاد سنگدانه‌ها مقدار آب موردنیاز برای کارایی معین افزایش می‌یابد. ولی اگر ابعاد دانه‌ها کوچکتر از  $150\mu\text{m}$  (الک No.100) باشد، قانون فوق برقرار نیست، چون این ذرات عمل لغزندگار کردن مخلوط را انجام می‌دهند. به همین علت است که در یک مخلوط معین با افزودن مقداری بر عیار سیمان، آب موردنیاز مخلوط تقریباً ثابت می‌ماند و در نتیجه نسبت آب به سیمان ( $\text{w/c}$ ) کاهش یافته و مقاومت افزایش می‌یابد. البته اگر مقدار مواد ریز مانند سیلیسیس بسیار نرم خیلی زیاد شود، افزایش سطح مخصوص باعث افزایش دوباره آب موردنیاز می‌شود. بر عکس، با افزایش ابعاد دانه‌ها سطح مخصوص کمتر شده و مقدار آب موردنیاز کاهش می‌یابد و با ثابت نگهدارشتن غلظت مخلوط و عیار سیمان، نسبت  $\text{w/c}$  کمتر شده و مقاومت بیشتر می‌شود. در عمل، اگر ابعاد دانه‌ها بیش از حد بزرگ باشد (بزرگتر از حدود  $40\text{mm}$ )، به علت جمع شدن حباب‌های هوا در اطراف ناحیه انتقال و همچنین کاهش کلی سطح پیوستگی، مقاومت بتن کاهش می‌یابد. معمولاً، حداکثر ابعاد سنگدانه‌ها در یک مخلوط بتن با توجه به قابل دسترسی بودن منبع تهیه سنگدانه‌ها و ملاحظات اقتصادی، و همچنین محدودیت‌های سازه‌ای تعیین می‌شود. حداکثر اندازه سنگدانه باید از  $1/5$  تا  $1/4$  ضخامت مقطع بتنی (تیر، ستون، دال ...) و از حدود  $3/4$  فاصله آزاد بین آرماتورها بیشتر باشد.

### تأثیر زبری سطح سنگدانه‌ها در مقاومت بتن

به نظر می‌رسد که بتن ساخته شده با سنگدانه‌های زبرتر به دلیل چسبندگی بهتر با خمیر سیمان، در سنین پایین، مقاومت (مخصوصاً کششی) بیشتری از بتن ساخته شده با سنگدانه‌های صاف‌تر داشته باشد. در سنین بالاتر بتن، این اختلاف مقاومت به علت ایجاد پیوند شیمیایی بین

## تکنولوژی بتن

سنگدانه‌ها و خمیر سیمان، کمتر می‌شود. از طرف دیگر سنگدانه‌های زبرتر نیاز به آب بیشتری دارند و در نتیجه اختلاف کلی در مقاومت خیلی کم است.

تأثیر ترکیبات معدنی سنگدانه‌ها در مقاومت بتن  
سنگدانه‌های کلسیم دار مقاومت بیشتری از سنگدانه‌های سیلیس دار، مخصوصاً در سنین بالای بتن ایجاد می‌کنند.

تأثیر دانه‌بندی سنگدانه‌ها در مقاومت بتن  
برای اینکه بتن دوام کافی داشته باشد باید چگالی فشرده‌گی آن تا حد امکان بالاتر بوده و همچنین کارایی کافی برای فشرده شدن در هنگام بتن‌ریزی را داشته باشد. مخلوط سیمان، آب و سنگدانه‌های ریز باید کمی بیشتر از حد لازم برای پرکردن فضاهای خالی بین سنگدانه‌های بزرگ بوده و همچنین خمیر سیمان نیز کمی بیشتر از حد لازم برای پرکردن حفره‌های موجود بین سنگدانه‌های ریز باشد تا بتن کارایی کافی داشته باشد. فضاهای خالی موجود در سنگدانه‌ها بستگی به چگونگی توزیع ابعاد آنها دارد که با استفاده از آنالیز نمونه‌ای از سنگدانه به وسیله الک‌ها تعیین می‌شود. آنالیز به وسیله الک یا دانه‌بندی عبارت است از تقسیم نمونه به چند قسمت که هر قسمت شامل دانه‌هایی با ابعاد یکسان باشد. در عمل، ابعاد دانه‌های موجود در هر یک از این قسمت‌ها بین دو حد بالا و پایین که همان اندازه سوراخ‌های الک بزرگ‌تر و کوچک‌تر است، قرار دارد. اندازه الک‌ها در استاندارد BS410 با mm و در استاندارد ASTM E 11-87 با اینچ یا شماره (مثلًا No.100) مشخص می‌شود. روش آزمایش بدین صورت است که الک‌ها به ترتیب از بزرگ به کوچک روی هم قرار می‌گیرند به طوری که الک با بزرگ‌ترین سوراخ در بالای مجموعه و الک با ریزترین سوراخ در پایین مجموعه قرار گیرند.

## مواد سنگی بتن

نمونه سنگدانه که با روش استاندارد دو نیمه کردن متواالی تهیه شده است و وزن آن مشخص است، روی بالاترین الک ریخته شده و با لرزاندن مجموعه الک‌ها اطمینان حاصل می‌شود که هر دانه ریزتر از سوراخ الک، از آن رد شده باشد. سپس وزن سنگدانه باقی مانده روی هر الک اندازه‌گیری شده و جدولی مانند مثال زیر تهیه شده و از روی این جدول منحنی رسم می‌شود که منحنی دانه‌بندی نام دارد.

جدول ۱-۳ - نمونه جدول دانه‌بندی سنگدانه

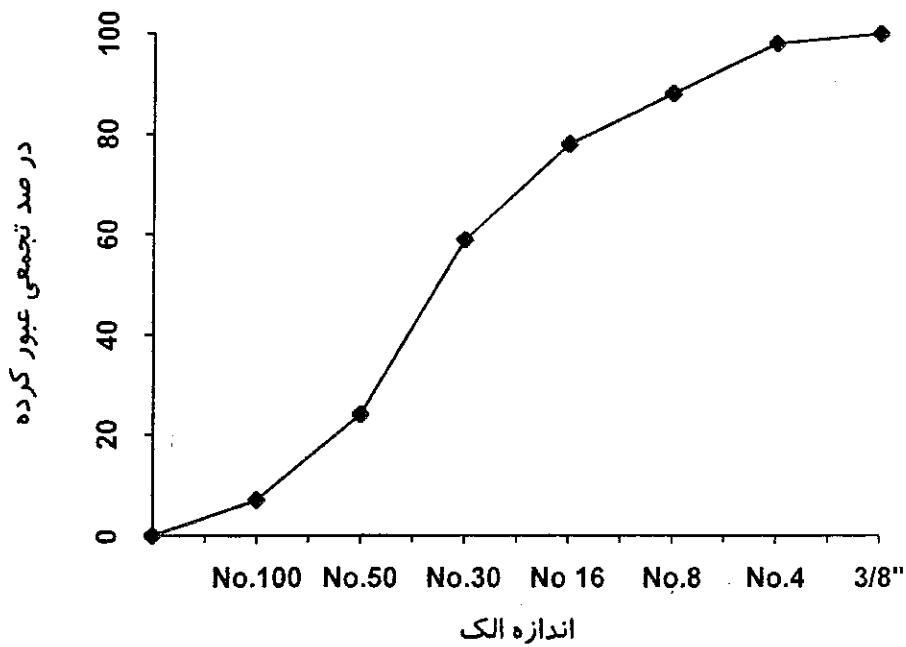
اندازه الک	BS	ASTM	وزن باقی مانده روی الک بر حسب گرم (g)	درصد وزنی باقی مانده	درصد تجمعی رد شده از الک (%)	درصد تجمعی باقی مانده	درصد تجمعی باقی مانده (%)
(1)			(2)	(3)	(4)	(5)	
10mm		3/8 "	0	0	100	0	0
5mm		No.4	6	2	98	2	2
2.36mm		No.8	31	10	88	12	12
1.18mm		No.16	30	10	78	22	22
600μm		No.30	59	20	58	42	42
300μm		No.50	107	35	23	77	77
150μm		No.100	53	17	6	6	94
<150μm		<No.100	21	6	—	—	—
Total=307g				Total=			249

منحنی دانه‌بندی با استفاده از مقادیر ستون (۱) جدول در محور افقی (لگاریتم اندازه الک) و مقادیر ستون (۴) جدول در محور عمودی رسم می‌شود.

## تکلیف بتن

از تقسیم مجموع ارقام به دست آمده در ستون ۵ جدول بر عدد صد، کمیتی به دست می‌آید به نام مدول نرمی که نشانگری از ریزی سنگدانه‌ها است. در مورد مثال فوق مدول نرمی برابر است با  $249/100 = 2.49$  هر قدر مقدار این مدول بیشتر باشد، سنگدانه درشت‌تر است.

شکل ۲-۳- نمودار دانه‌بندی سنگدانه

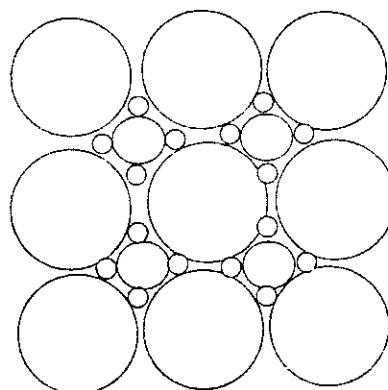


دانه‌بندی سنگدانه از طریق تأثیر روی نسبت آب به سیمان لازم برای کارایی معین، روی مقاومت بتن تاثیر می‌گذارد. اگر سنگدانه دارای تمام ابعاد ممکن دانه‌ها از ریزترین تا درشت‌ترین (مطابق شکل زیر) باشد، یعنی منحنی دانه‌بندی کاملاً پیوسته باشد، چگالی فشردگی این سنگدانه حداقل خواهد بود و از نظر تئوریک ایده‌آل است. ولی در عمل، بتنی که با چنین سنگدانه‌ای ساخته شود بسیار سفت بوده و شکل دادن آن به علت کارایی کم، مشکل خواهد بود و مقدار آب موردنیاز برای آن زیاد خواهد بود.

در شکل زیر چگونگی پرشدن فضاهای خالی در یک نمونه سنگدانه با دانه‌بندی کاملاً پیوسته نشان داده شده است.

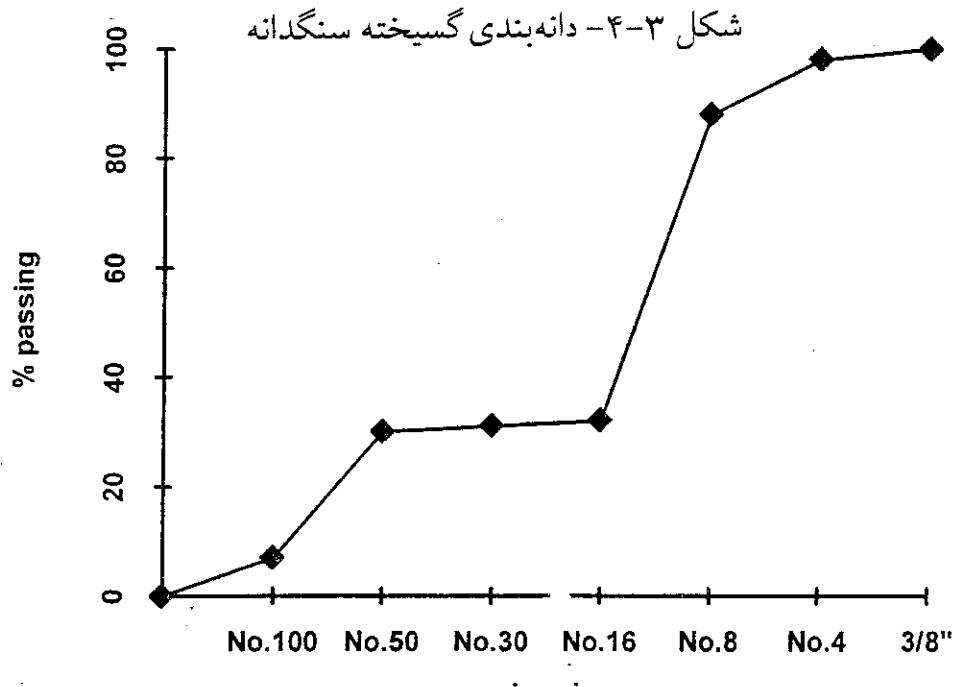
از طرف دیگر، اگر سنگدانه فاقد دامنه‌های مشخصی از ابعاد باشد، یعنی منحنی دانه‌بندی آن گسیخته باشد، احتمال جداسدگی و آب‌افتدگی در بتن ساخته شده با این سنگدانه زیاد

شکل ۳-۳- تاثیر دانه‌بندی پیوسته روی چگالی فشردگی



خواهد بود و در کاربرد این نوع سنگدانه باید دقیق به عمل آید. منحنی‌های دانه‌بندی سنگدانه مناسب برای بتن در بین دو حالت فوق قرار دارند. به علت متغیر بودن خواص سنگدانه‌ها، ارائه منحنی دانه‌بندی ایده‌آل غیرممکن است، ولی تعدادی منحنی دانه‌بندی پیشنهادی در استانداردهای مختلف داده شده‌اند که به عنوان راهنمایی توان از آنها استفاده کرد.

شکل ۳-۴- دانه‌بندی گسیخته سنگدانه



## تکنولوژی بتن

جدول ۲-۳ - جدول دانه بندی پیشنهادی برای سنگدانه های ریز

ASTM C33-93	درصد تجمعی عبور کرده از الک				اندازه یا شماره الک	
	ریز	متوسط	درشت	کلی	ASTM	BS
100	-	-	-	100	3/18"	10mm
95-100	-	-	-	89-100	3/16"	5mm
80-100	80-100	65-100	60-100	60-100	No.8	2.36mm
50-85	70-100	45-100	30-90	30-100	No.16	1.18mm
25-60	55-100	25-80	15-54	15-100	No.30	600μm
10-30	5-70	5-48	5-40	5-70	No.50	300μm
2-10	-	-	-	0-15	No.100	150μm

جدول ۳-۳ - دانه بندی پیشنهادی برای سنگدانه های درشت (ASTM C33-93)

اندازه اسمی سنگدانه های هم اندازه	درصد تجمعی عبور کرده از الک				اندازه یا شماره الک	
	اندازه اسمی سنگدانه ها با دامنه ابعادی معین (mm)	4.75~12.5	4.75~19	4.75~37.5	Inch	mm
37.5	63	4.75~12.5	4.75~19	4.75~37.5	Inch	mm
-	100	-	-	-	3	75
-	90-100	-	-	-	2.5	63
100	35~70	-	-	100	2	50
90~100	0~15	-	-	95~100	1.5	38.1
20~55	-	-	100	-	1	25
0~15	0~5	100	90~100	35~70	3/4	19
-	-	90~100	-	-	1/2	12.5
0~5	-	40~70	20~55	10~30	3/8	9.5
-	-	0~15	0~10	0~5	3/16	4.75
-	-	0~5	0~5	-	No.8	2.36

جدول ۴-۳ - دانه بندی پیشنهادی برای سنگدانه های درشت (BS 882 : 1992)

اندازه اسمی	درصد تجمعی عبور کرده از الک			اندازه الک	
	10mm	20mm	40mm	Inch	mm
-	-	-	100	2	50
-	100	-	95~100	1.5	37.5
-	95~100	-	45~80	3/4	20
100	-	-	-	1/2	14
95~100	-	-	-	3/8	10
30~65	35~55	-	25~50	3/16	5
20~50	-	-	-	No.8	2.36
15~40	-	-	-	No.16	1.18
10~30	10~35	-	8~30	No.30	600μm
5~15	-	-	-	No.50	300μm
0~8	0~8	-	0~8	No.100	150μm

## حمل و انبار کردن سنگدانه‌ها

حمل و انبار کردن سنگدانه‌های درشت می‌تواند منجر به جداسدگی و بهم خوردن دانه‌بندی سنگدانه‌ها شود. برای به حداقل رساندن جداسدگی دانه‌ها، رعایت نکات زیر ضروری است:

- سنگدانه‌های درشت بهتر است به چند قسمت تقسیم شوند که هر قسمت محدوده ابعادی معینی داشته باشد، مثلاً: 5 تا 10 میلی‌متر، 10 تا 20 میلی‌متر و 20 تا 40 میلی‌متر. فقط هنگام تهیه بتن و ریختن سنگدانه‌ها درون میکسر این سنگدانه‌ها با هم مخلوط می‌شوند.

- سنگدانه‌ها در لایه‌هایی با ضخامت یکنواخت ریخته می‌شوند و از ریختن آنها به صورت مخروطی خودداری شود. بدین منظور باید بارهای سنگدانه توسط کامیون در محل‌های نزدیک به هم ریخته شده و به وسیله لودر صاف شوند.

- برداشت سنگدانه‌ها با هر وسیله از بالا به طرف پایین طوری انجام شود که هر قطعه برداشته شده شامل قسمت‌هایی از کلیه دانه‌ها باشد.

- از ریختن سنگدانه‌ها از ارتفاع زیاد خودداری شود، زیرا ممکن است دانه‌های ریز توسط باد جدا شوند.

## تمیزی سنگدانه‌ها

سنگدانه باید تمیز و عاری از ناخالصی‌های آلی باشد. از سنگدانه حاوی مواد آلی بتن ضعیفی حاصل خواهد شد. سنگدانه باید عاری از غبار یا خاک رس باشد، زیرا وجود اینگونه مواد باعث جلوگیری از پیوستگی خوب بین سنگدانه و خمیر سیمان خواهد شد. مقدار بیش از حد غبار و پودر سنگ ممکن است باعث جلوگیری از پوشش کامل سنگدانه‌ها با خمیر سیمان و در نتیجه کاهش مقاومت بتن شود. شن و ماسه مصرفی معمولاً به وسیله آب شسته می‌شوند تا رس، لای و سایر ناخالصی‌ها از آن جدا شود. البته شستشوی بیش از حد نیز می‌تواند باعث جدا شدن تمام دانه‌های ریزتر از الک No.50 شود و در نتیجه بتن حاصل فاقد چسبندگی کافی

## تکنولوژی بتن

گردد. همچنین ناکافی بودن ماسه ریز در مخلوط بتن نیز ممکن است باعث ایجاد آب افتادگی در بتن شود.

حدود مجاز رس و لای در سنگدانه و روش تعیین آن، در استاندارد 1 BS812.Part داده شده است. برای تعیین میزان آلدگی ماسه با رس و لای، آزمایش ساده‌ای می‌توان در محل کارگاه انجام داد. در این آزمایش ابتدا مقداری محلول آب و نمک معمولی با غلظت 1% (تقریباً معادل دو قاشق چای خوری در یک لیتر آب) تهیه می‌شود. در یک استوانه شیشه‌ای مدرج به حجم 250ml، ابتدا تا حدود 50ml از محلول آب نمک ریخته و بعد از آن ماسه مورد آزمایش به آرامی ریخته می‌شود تا بالاترین نقطه ماسه به خط 100ml برسد. سپس مقدار بیشتری از محلول آب نمک تا ارتفاع 150ml اضافه می‌شود. در مرحله بعدی استوانه کاملاً تکان داده شده و سپس به مدت سه ساعت به طور ساکن نگهداری می‌شود. بعد از این مدت، ضخامت لایه رس و لای در بالای ماسه اندازه‌گیری و به صورت درصدی از ارتفاع لایه ماسه تعیین می‌شود. اگر درصد اندازه‌گیری شده از 10% بیشتر نباشد، میزان آلدگی سنگدانه در حد قابل قبول قرار دارد. این روش برای تعیین آلدگی سنگدانه درشت (شن) و یا مخلوط سنگدانه درشت و ریز مناسب نیست و در این موارد باید آزمایش دانه‌بندی به عمل آید.

## آب بتن

### آب اختلاط بتن

کیفیت آب مصرفی برای ساخت بتن می‌تواند از چند طریق روی کیفیت بتن تاثیر داشته

باشد:

- تاثیر در زمان گیرش سیمان
- تاثیر در مقاومت بتن
- تغییر رنگ و کیفیت ظاهری بتن
- ایجاد خوردگی در فولاد (در بتن مسلح)

مقدار مواد مضرّ در آب بتن نباید قابل توجه باشد. با این حال، استانداردی که کیفیت آب مصرفی بتن را به طور دقیق تعیین کند، موجود نیست. عدم انتشار استاندارد خاص تا حدی به این دلیل است که محدوده دقیق برای مواد زیان بار مشخص نشده است، ولی شاید بیشتر به این دلیل باشد که ایجاد محدودیت‌های بی مورد باعث هزینه‌های اضافی می‌شود.

در بسیاری از استانداردهای ساختمانی شرط قابل قبول بودن آب برای بتن این است که آن آب قابل آشامیدن باشد. ذرات محلول چنین آبی معمولاً بیش از 1000ppm-2000ppm (قسمت در میلیون) نیست. اگر نسبت آب به سیمان 0.5 باشد، 1000ppm به معنی وجود ذرات جامد به میزان

## تکنولوژی بتن

0.05% وزن سیمان است. از طرف دیگر، در بعضی مناطق آب آشامیدنی شور بوده و دارای مقادیر زیادی کلراید است و بعضی از آب‌های معدنی نیز دارای مقادیری کربنات و بیکربنات قلیایی می‌باشد که ممکن است منجر به واکنش قلیایی - سیلیسی شود. بر عکس، بعضی از آب‌های غیرآشامیدنی ممکن است برای بتن مناسب باشد.

به عنوان یک معیار، هر آبی که PH آن بین 6 تا 8 (و حتی 9) بوده و طعم شور نداشته باشد، برای بتن‌سازی مناسب است. یک راه ساده برای تعیین کیفیت آب، ساختن دو سری نمونه با آب مورد نظر و آب مقطر (یا آب جوشیده و سرد شده) و اندازه‌گیری زمان گیرش سیمان و مقاومت در هر دو سری است. اگر نتایج بیش از 10% اختلاف نداشته باشند، آب قابل قبول است.

وجود جلبک در آب نیز باعث ایجاد حباب در بتن و کاهش مقاومت آن می‌شود. مطابق ضمیمه استاندارد BS 3148:1980 در صورت وجود جلبک سبز یا قهوه‌ای رنگ، آب باید مورد آزمایش قرار گیرد.

آب شور دارای کلراید و سولفات است. اگر مقدار کلراید از 500 ppm و مقدار سولفات از 1000ppm بیشتر نباشد، آب قابل استفاده است.

آب دریا دارای شوری به اندازه 3.5% است و باعث می‌شود مقاومت زود هنگام بتن کمی افزایش یابد ولی مقاومت نهایی بتن را کاهش می‌دهد. کاهش مقاومت معمولاً حداقل 15% است و بنابراین چندان مهم نیست. استفاده از آب دریا باعث شوره زدن و ایجاد لکه در سطح بتن می‌شود، بنابراین، اگر کیفیت ظاهری بتن دارای اهمیت باشد باید از آب دریا برای ساخت آن استفاده شود. نکته بسیار مهم این است که وجود کلراید در آب بتن باعث ایجاد خوردگی در فولاد آرماتور (در بتن مسلح) می‌شود، بنابراین به هیچ‌وجه نباید از آب دریا یا هر آب دیگر حاوی کلراید، در بتن مسلح استفاده شود.

## آب بتن

### آب عمل آوری بتن

به طور کلی آب مورد استفاده برای ساخت بتن، برای عمل آوری آن نیز مناسب است. با این حال، آهن یا مواد آلی موجود در آب ممکن است باعث ایجاد لکه در روی بتن شوند، مخصوصاً اگر آب به آرامی روی بتن جاری شده و به سرعت تبخیر شود. در بعضی موارد تغییر رنگ بتن دارای اهمیت نیست و هر نوع آب مناسب یا حتی تا حدی نامناسب برای ساخت بتن، برای عمل آوری قابل قبول است. البته آب مورد استفاده باید عاری از مواد حمله‌کننده به بتن باشد. برای مثال بتن در اثر تماس آب حاوی دی‌اکسید کربن صدمه می‌بیند. همچنین، عمل آوری با آب دریا ممکن است به خوردگی فولاد داخل بتن منجر شود.

## افزودنی‌های بتن

بنا به تعریف، افزودنی‌ها (admixtures) موادی هستند که در مرحله اختلاط، به مخلوط بتن اضافه می‌شوند تا خواص آن را در مرحله شکل‌پذیر بودن و یا بعد از سخت شدن، بهبود دهند. در بسیاری از موارد می‌توان از افزودنی‌های بتن برای تغییر دادن بعضی از خواص آن استفاده کرد. باید توجه داشت که تاثیر افزودنی‌ها محدود است و نمی‌توانند بتن بد را به بتن خوب تبدیل کنند. مطابق استانداردهای اروپایی (ENV)، حداکثر میزان مصرف افزودنی به طور کلی 5% وزن سیمان موجود در بتن است. البته فقط باید از افزودنی‌هایی که توسط سازندگان شناخته شده و معتبر ساخته شده است استفاده نمود و هنگام استفاده نیز باید به تاریخ ساخت و نکات توصیه شده توسط سازنده در مورد طریقه و مقدار مصرف توجه نمود. انواع مهم افزودنی‌ها عبارتند از: تسريع‌کننده‌ها، کندگیرکننده‌ها، روان‌سازها، روان‌سازهای عالی و حباب‌سازها

### تسريع‌کننده‌ها (accelerators)

این مواد سرعت اولیه واکنش شیمیایی بین آب و سیمان را افزایش می‌دهند. این تاثیر عمدهاً روی واکنش‌های  $C_3S$  و  $C_4AF$  می‌باشد. در نتیجه بتن زودتر سخت می‌شود. این مواد روی کارایی بتن و مقاومت 28 روزه تاثیر خیلی جزئی دارند. عمده‌ترین ماده‌ای که تا سال‌های اخیر به

## تکنولوژی بتن

عنوان تسریع‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است کلرید کلسیم ( $\text{CaCl}_2$ ) می‌باشد. ولی به علت اینکه وجود کلراید‌ها در بتن باعث خوردگی فولاد می‌شود، امروزه استفاده از این ماده در بتن مسلح و بتن پیش‌تینیده ممنوع شده است و در صورت لزوم باید از روش‌های جانشین یا تسریع‌کننده‌های بدون کلر استفاده کرد. موارد کاربرد تسریع‌کننده‌ها عبارتند از: بتن‌ریزی در هوای سرد، کارهای تعمیراتی سریع، تولید بتن پیش ساخته و موقعی که نیاز به باز کردن زودهنگام قالب‌ها باشد.

در بتن بدون فولاد (بتن غیر مسلح)، می‌توان از کلرید کلسیم به میزان یک تا دو درصد وزن سیمان استفاده نمود تا پایین بودن دمای هوا را جبران کند. استفاده از کلرید کلسیم احتمالاً باعث افزایش آب‌رفتگی (انقباض) و خرسن بتن و کاهش مقاومت یخ‌زدگی بتن حباب‌دار می‌شود. همچنین استفاده از کلرید کلسیم باعث کاهش مقاومت در برابر سولفات‌ها در مخلوط‌های کم سیمان و افزایش احتمال واکنش مضر قلیایی سیلیکات در صورت فعلی بودن سنگدانه‌ها خواهد شد.

عملکرد نمک معمولی ( $\text{NaCl}$ ) در صورت اضافه شدن به بتن مشابه کلرید کلسیم ولی باشد کمتری است. همچنین تاثیر آن بسیار متغیرتر بوده و کاهش گرمای هیدراسیون و در نتیجه کاهش مقاومت در 7 روز و بعد از آن مشاهده شده است. به همین علت استفاده از آن به هیچ وجه توصیه نمی‌شود.

تسريع‌کننده‌ها گاهی تحت عنوان ضدیخ بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که این مواد نیاز به محافظت بتن در هوای سرد را بر طرف نمی‌کنند. در بتن‌ریزی در هوای سرد به جای استفاده از کلرید کلسیم بهتر است از روش‌های جانشین استفاده نمود، مانند گرم کردن بتن از طریق گرم کردن آب یا سنگدانه‌ها (با بخار آب)، افزایش عیار سیمان، گرم نگهداشت بتن در 24 تا 48 ساعت اولیه، کاهش نسبت آب به سیمان و یا استفاده از سیمان زود سخت‌شونده (تیپ ۳). تسريع‌کننده‌های بدون کلر نیز ساخته شده‌اند، ولی گران قیمت بوده و به اندازه کلرید کلسیم

## تکنولوژی بتن

عنوان تسریع‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است کلرید کلسیم ( $\text{CaCl}_2$ ) می‌باشد. ولی به علت اینکه وجود کلراید‌ها در بتن باعث خوردگی فولاد می‌شود، امروزه استفاده از این ماده در بتن مسلح و بتن پیش‌تینیده ممنوع شده است و در صورت لزوم باید از روش‌های جانشین یا تسریع‌کننده‌های بدون کلر استفاده کرد. موارد کاربرد تسریع‌کننده‌ها عبارتند از: بتن‌ریزی در هوای سرد، کارهای تعمیراتی سریع، تولید بتن پیش ساخته و موقعی که نیاز به باز کردن زودهنگام قالب‌ها باشد.

در بتن بدون فولاد (بتن غیر مسلح)، می‌توان از کلرید کلسیم به میزان یک تا دو درصد وزن سیمان استفاده نمود تا پایین بودن دمای هوا را جبران کند. استفاده از کلرید کلسیم احتمالاً باعث افزایش آب‌رفتگی (انقباض) و خرسن بتن و کاهش مقاومت یخ‌زدگی بتن حباب‌دار می‌شود. همچنین استفاده از کلرید کلسیم باعث کاهش مقاومت در برابر سولفات‌ها در مخلوط‌های کم سیمان و افزایش احتمال واکنش مضر قلیایی سیلیکات در صورت فعلی بودن سنگدانه‌ها خواهد شد.

عملکرد نمک معمولی ( $\text{NaCl}$ ) در صورت اضافه شدن به بتن مشابه کلرید کلسیم ولی باشد کمتری است. همچنین تاثیر آن بسیار متغیرتر بوده و کاهش گرمای هیدراسیون و در نتیجه کاهش مقاومت در 7 روز و بعد از آن مشاهده شده است. به همین علت استفاده از آن به هیچ وجه توصیه نمی‌شود.

تسربیع‌کننده‌ها گاهی تحت عنوان ضدیخ بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که این مواد نیاز به محافظت بتن در هوای سرد را بر طرف نمی‌کنند. در بتن‌ریزی در هوای سرد به جای استفاده از کلرید کلسیم بهتر است از روش‌های جانشین استفاده نمود، مانند گرم کردن بتن از طریق گرم کردن آب یا سنگدانه‌ها (با بخار آب)، افزایش عیار سیمان، گرم نگهداشت بتن در 24 تا 48 ساعت اولیه، کاهش نسبت آب به سیمان و یا استفاده از سیمان زود سخت‌شونده (تیپ ۳). تسربیع‌کننده‌های بدون کلر نیز ساخته شده‌اند، ولی گران قیمت بوده و به اندازه کلرید کلسیم

مؤثر نیستند: از تسریع‌کننده‌های بدون کلر می‌توان فورمات کلسیم و نیتریت سدیم را نام برد. باید توجه داشت که هیچ تسریع‌کننده‌ای که مقبولیت عمومی داشته باشد عرضه نشده است. همچنین تقاضا برای مصرف آنها نیز کاهش یافته است، مخصوصاً در بتن پیش ساخته، چون می‌توان از روش‌های جانشین استفاده کرد مانند کاهش نسبت آب به سیمان همراه با به کار بردن روان‌سازهای عالی. ولی استفاده از تسریع‌کننده‌ها در هوای سرد همچنان ادامه دارد.

### کندگیرکننده‌ها (retarders)

این مواد باعث به تأخیر افتادن گیرش سیمان می‌شوند که عموماً همراه با کم شدن سرعت سخت شدن خمیر سیمان است. مکانیزم دقیق عمل کندگیرکننده‌ها هنوز کاملاً مشخص نشده است. احتمالاً این مواد با انجام واکنش با یکی از مواد تشکیل‌دهنده سیمان و ایجاد غلاف روی دانه‌های سیمان، باعث کاهش سرعت واکنش می‌شوند. استفاده از کندگیرکننده‌ها باعث می‌شود زمان قابلیت حمل و ریختن بتن طولانی‌تر شود. همچنین به تأخیر افتادن سخت شدن بتن باعث می‌شود فرصت کافی بین مراحل متوالی بتن‌ریزی در یک قالب با ارتفاع زیاد وجود داشته باشد و از ایجاد اتصال سرد<sup>۱</sup> (cold joint) جلوگیری شود. همچنین در هوای گرم استفاده از کندگیرکننده‌ها باعث جلوگیری از هیدراسیون سریع و سخت شدن زود هنگام بتن می‌شود. استفاده از کندگیرکننده‌ها به دقت فراوان نیاز دارد، زیرا در صورتی که مقدار بکار رفته بیش از حد مجاز باشد، می‌تواند به طور کلی از گرفتن و سخت شدن بتن جلوگیری کند. برای مثال، اگر از شکر به مقدار کنترل شده‌ای در حدود 0.05% وزن سیمان استفاده شود، به عنوان کندگیرکننده قابل قبولی عمل کرده و گیرش سیمان را تقریباً به مدت 4 ساعت به تأخیر خواهد انداخت. اما اگر شکر بیشتری، مثلاً حدود 0.2% تا 1% وزن سیمان اضافه شود، عملاً از گیرش سیمان

## تکنولوژی بتن

جلوگیری خواهد کرد. وقتی که شکر به عنوان کندگیرکننده به کار رود، مقاومت اولیه بتن نسبت به بتن خالص به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر بوده، ولی بعد از 7 روز مقاومت بتن با کندگیرکننده، چند درصد بیشتر از بتن خالص خواهد بود. احتمالاً به این علت که گیرش کندر تر منجر به ایجاد ژل هیدرات متراتکمتر می‌شود.

چون کندگیرکننده‌ها معمولاً در هوای گرم به کار می‌روند، ذکر این نکته لازم است که تأثیر آنها در دماهای بالا کمتر می‌شود و در دماهای خیلی بالا، مثلاً بیشتر از  $60^{\circ}\text{C}$ ، بعضی از کندگیرکننده‌ها تأثیر خود را از دست می‌دهند.

افزودنی‌های روان‌ساز/کاهنده آب (plasticsers/water reducers) همانطور که از نام این مواد پیداست، عملکرد آنها عبارت است از کاهش آب اختلاط بتن، معمولاً به میزان 5% تا 10%. بنابراین، منظور از استفاده از یک افزودنی کاهنده آب در یک مخلوط بتن این است که بتوان نسبت آب به سیمان را کاهش داد بدون اینکه کارایی کاهش پیدا کند، یا اینکه کارایی مخلوط بتن را افزایش داد بدون اینکه نیاز به افزایش نسبت آب به سیمان باشد. دو گروه اصلی مواد تشکیل‌دهنده روان‌سازها عبارتند از اسیدهای لیگنو‌سولفونیک و املاح آنها و اسیدهای کربوکسیلیک و املاح آنها.

مکانیزم عمل روان‌سازها: بعد از تماس با آب، روی مولکول این مواد بارهای مثبت و منفی به وجود می‌آید که نحوه جذب و عملکرد آنها بستگی به این بارها دارد. این مولکولها با ایجاد بارهای همنام روی دانه‌های سیمان، آنها را پراکنده کرده و از بهم چسبیدن آنها جلوگیری می‌کند. همچنین حباب‌های هوانیز دارای بار منفی شده و از دانه‌های سیمان دور می‌شوند. این فرایند باعث افزایش کارایی و آزاد شدن آب موجود بین لخته‌های سیمان می‌شود. این عمل روی سنگدانه‌ها نیز انجام گرفته و آنها نیز دارای بار منفی و خاصیت دافعه می‌شوند. به علت شکستن لخته‌های سیمان و تماس بهتر آنها با آب، مقداری تسريع‌کنندگی نیز وجود دارد.

### کاربردهای روانسازها

- ۱- بدست آوردن مقاومت بیشتر با کاهش نسبت آب به سیمان در کارایی ثابت
- ۲- بدست آوردن کارایی ثابت با کاهش عیار سیمان و در نتیجه کاهش دمای هیدراسيون در هوای گرم
- ۳- افزایش کارایی برای راحتی بتن ریزی در نقاط غیرقابل دسترس و مشکل، مانند قالب‌های با آرماتوریندی فشرده، شمع‌های بتنی و همچنین پمپاژ بتن باید توجه داشت که در مخلوط‌های بدطراحی شده (مثلاً آب بیش از حد یا دانه‌بندی نامناسب) استفاده از روانسازها ممکن است باعث افزایش آب‌افتدگی بتن شود.

### روانسازهای اعلا (فوق روانسازها) (super plasticisers)

این مواد برای اولین بار در ژاپن و آلمان از حدود 35 سال پیش عرضه شدند. نحوه عمل این مواد مانند روانسازهای عادی است ولی تاثیر آنها خیلی بیشتر است. دو نوع عمده روانسازهای عالی از ترکیبات ملامین و نفتالین ساخته می‌شوند. روانسازهای عالی پولیمرهای آلی محلول در آب هستند که تولید آنها طی فرایند پیچیده‌ای انجام می‌گیرد و به همین دلیل قیمت آنها نسبتاً بالاست.

عملکرد اصلی مولکول‌های روانسازها این است که به دور دانه‌های سیمان چسبیده و باز الکتریکی منفی قوی در آنها ایجاد کرده و باعث دفع دانه‌ها از هم می‌شوند. افزایش حاصل در کارایی می‌تواند به دو طریق به کار رود، تولید بتن با کارایی بسیار بالا و یا تولید بتن با مقاومت بسیار بالا.

در یک نسبت معین آب به سیمان اضافه کردن روانسازهای عالی باعث می‌شود کارایی بتن افزایش یابد، (معمولًاً از اسلامپ 75mm به اسلامپ 200mm). بتن حاصل را می‌توان بدون نیاز به فشرده کردن، یا با مختصه فشرده کردن در قالب جای داد. چنین بتنی برای ریختن در قالب‌هایی که آرماتوریندی بسیار فشرده دارند، مناسب است. نکته قابل توجه هنگام طراحی

## تکنولوژی بتن

قالب برای بتن بسیار روان این است که این نوع بتن می‌تواند فشار کامل هیدرو استاتیکی به قالب وارد کند.

کاربرد دوم روان‌سازهای عالی تولید بتن با کارایی معمولی، ولی با مقاومت بسیار بالا می‌باشد، زیرا می‌توان نسبت آب به سیمان را بسیار کاهش داد. به طور کلی با استفاده از روان‌سازهای عالی می‌توان مقدار آب لازم برای یک کارایی معین را حدود 25% تا 35% کاهش داده (در روان‌سازهای معمولی تقریباً نصف این مقادیر) و مقاومت 24 ساعته بتن را 75% تا 50% تا 25% افزایش داد. روان‌سازهای عالی ساختمان سیمان هیدرات شده را تغییر نمی‌دهند بلکه فقط باعث پخش شدن کامل دانه‌های سیمان و هیدراسیون بهتر آنها می‌شوند. به همین علت است که در بعضی موارد حتی با نسبت آب به سیمان ثابت نیز استفاده از روان‌ساز عالی باعث افزایش مقاومت می‌شود. افزایش‌هایی در حدود 10% برای مقاومت 24 ساعته و 20% برای مقاومت 28 روزه ثبت شده، ولی این خاصیت در همه جا تایید نشده است.

ارقام جدول زیر از نتایج آزمایش‌ها روی بتن‌های ساخته شده با فوق روان‌ساز و بتن بدون روان‌ساز به دست آمده است.

جدول ۱-۵- تأثیر فوق روان‌ساز در مقاومت و مصرف سیمان

مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	نسبت آب به سیمان	عيار سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	مخلوط بتن
31.5	0.61	305	بدون فوق روان‌ساز
45.0	0.50	305	با فوق روان‌ساز
30.5	0.61	260	با فوق روان‌ساز
44.5	0.50	375	بدون فوق روان‌ساز
58.5	0.40	360	با فوق روان‌ساز
45.0	0.50	305	با فوق روان‌ساز

### افزودنی‌های حباب‌ساز (air entrainers)

موادی هستند که هنگام مخلوط شدن با بتن مقادیر کنترل شده‌ای از حباب‌های هو را که به طور یکنواخت توزیع شده‌اند، ایجاد می‌کنند. اندازه این حباب‌ها ۰.۰۲mm تا ۱mm و فاصله آنها حداقل ۰.۴mm است. موکلول‌های آلی مواد حباب‌ساز هنگام تماس با آب به دو قسمت کاتیونی و آنیونی تجزیه می‌شوند که قسمت آنیونی وارد عمل شده و باعث پایدار شدن حباب‌های ریز هوا می‌شود که هنگام مخلوط شدن بتن به وجود آمده‌اند. نحوه عمل به این ترتیب است که قسمت باردار مولکول در سطح تماس آب و هوا قرار گرفته و باعث پایدار شدن حباب هوا شده و به علت ایجاد بار منفی در سطح حباب‌ها، باعث دفع آنها از هم‌دیگر می‌شود. در همان حال این ماده به علت وجود بارهای غیرهمنام جذب دانه‌های سیمان شده و در نتیجه این دانه‌ها نیز تا حدی دافع آب می‌شوند.

نتیجه کلی این فرایند این است که حباب‌های ثبیت شده هوا جذب دانه‌های سیمان و سنگدانه شده و به طور یکنواخت در مخلوط پخش می‌شوند.

تئوری حباب‌ها: فشار داخلی حباب هوا با رابطه  $P=2T/R$  داده می‌شود که در آن  $T$  نیروی کشش سطحی و  $R$  شعاع حباب است. از این رابطه معلوم می‌شود که با کوچک بودن  $R$  فشار داخلی حباب باید بیشتر باشد. در نتیجه حباب‌های کوچک هوا تمایل دارند به هم چسبیده و تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر را بدهند. عمل اصلی مواد حباب‌ساز کاهش نیروی کشش سطحی می‌باشد که در نتیجه کاهش نیروی  $T$  در رابطه بالا، حباب‌های کوچک هوا ثبیت می‌شوند.

### تأثیر مواد حباب‌ساز روی خواص بتن:

- ۱- بهبود کارایی به علت تاثیر حباب‌های هوا، گاهی فقط بدین منظور بکار می‌رود.
- ۲- کاهش آب افتادگی، زیرا حباب‌های هوا به تعليق بهتر مواد جامد در مخلوط بتن کمک کرده و از تهشیین آنها جلوگیری می‌کند.

## تکنولوژی بتن

- ۳- چگالی کمتر بتن و در نتیجه مقاومت پایین تر، که البته تا حدی با کاهش نسبت آب به سیمان در کارایی ثابت جبران می شود.
- ۴- مقاومت بتن ساخته شده در برابر انجماد و ذوب متوالی به علت فضای اضافی که حباب ها برای افزایش حجم آب هنگام انجماد فراهم می سازند. استفاده از این خاصیت مهم ترین کاربرد مواد حباب ساز می باشد که در نواحی با خطر یخ بندان اهمیت فراوانی دارد.

## بتن تازه

بتن تر (بتن تازه) یا بتن شکل‌پذیر (fresh concrete / plastic concrete) حالتی موقتی است که در این حالت بتن هنوز قابلیت شکل‌پذیری دارد. چون مقاومت بتن با نسبت‌های اختلاط معین، پس از سخت شدن تا حد زیادی به میزان تراکم آن بستگی دارد، بنابراین بسیار مهم است که کیفیت و یکنواختی بتن در جریان حمل، ریختن، متراکم کردن و پرداخت کردن آن حفظ شود.

## خواص بتن تر

مهم‌ترین خواص بتن تر عبارتند از چسبندگی و کارایی.

چسبندگی: گاهی به عنوان پایداری بتن نیز شناخته می‌شود و هیچ روش عملی برای اندازه‌گیری آن وجود ندارد ولی معمولاً بررسی نظری بتن در حال تخلیه از میکسر یا پمپ کافی می‌باشد.

کارایی: میزان آسانی ریختن و فشرده کردن بتن را کارایی می‌نامند.

## عوامل مؤثر در کارایی بتن

۱) آب بتن: عامل اصلی مؤثر در کارایی بتن مقدار آب بتن است. کارایی نسبت مستقیم با

## تکنولوژی بتن

مقدار آب مصرفی بتن دارد. چسبندگی بتن نیز بستگی به وجود آب کافی برای بهم پیوستن مواد تشکیل دهنده بتن دارد.

### (۲) خواص سنگدانه‌ها:

۱-۱) حداکثر اندازه سنگدانه‌ها: با استفاده از قطعات بزرگتر سنگدانه در بتن، حجم خمیر سیمان لازم برای پوشاندن تمام سنگدانه‌ها کمتر خواهد بود. چون حجم خمیر سیمان اضافی تعیین‌کننده کارایی بتن است، بنابراین با وجود حجم خمیر ثابت، با بزرگتر بودن سنگدانه‌ها کارایی بیشتر خواهد شد. در عمل حداکثر اندازه سنگدانه‌ها با توجه به ابعاد عضو بتن آرمه و فاصله آرماتورها تعیین خواهد شد.

۱-۲) دانه‌بندی: بیش از حد بودن یک اندازه معین در دانه‌بندی سنگدانه ممکن است باعث ایجاد مشکل در بتن ریزی شود و معمولاً سنگدانه با دانه‌بندی تقریباً پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۳) شکل و زبری سنگدانه‌ها: استفاده از سنگدانه‌های صاف‌تر و گردتر باعث ایجاد اصطکاک کمتر بین آنها شده و در نتیجه کارایی افزایش می‌یابد. سنگدانه‌های شکسته معمولاً دارای گوشه‌های تیز و زیر بوده و نیاز به آب بیشتری دارند.

۲) نوع و عیار سیمان: استفاده از سیمان‌های ریزتر، نیاز به آب را در مخلوط بتن تا حدی افزایش می‌دهد، ولی تاثیر نوع سیمان در کارایی بتن در مقایسه با تاثیر سنگدانه‌ها بسیار کمتر است. همچنین، تاثیر عیار سیمان در کارایی بتن‌های معمولی خیلی کم است و معمولاً در اغلب روش‌های طرح اختلاط بتن از این تاثیر صرف نظر می‌شود.

۳) سرباره آهن‌گدازی و نرمه خاکستر زغال سنگ: استفاده از این دو ماده به صورت مخلوط با سیمان، باعث افزایش کارایی و چسبندگی بتن می‌شود.

۴) افزودنی‌های بتن: موادی مانند روان‌سازها و روان‌سازهای عالی برای افزایش کارایی بتن و آسان‌تر کردن حمل و ریختن و متراکم‌تر کردن بتن بکار می‌روند. هنگام طراحی نسبت‌های اختلاط بتن، ابتدا فقط آب و سیمان و سنگدانه‌ها در نظر گرفته شده و سپس تاثیر افزودنی‌ها به

عنوان یک ماده اضافی دخالت داده می‌شود.

### آب افتادگی بتن (bleeding)

ظاهر شدن آب بر روی بتن که بعد از ریختن و فشرده کردن آن و قبل از گیرش اتفاق می‌افتد، آب افتادگی نام دارد. آب سبک‌ترین جزء تشکیل دهنده بتن است و اگر مواد داخل بتن قادر به نگهداری آب مخلوط نباشند، آب به طرف بالای مخلوط حرکت کرده و در همان حال مواد سنگین‌تر شروع به ته‌نشین شدن می‌کنند. پدیده جداشدگی نیز معمولاً همراه با آب افتادگی روی می‌دهد و عبارت است از ته‌نشین شدن مواد سنگین‌تر بتن که در اثر ناکافی بودن چسبندگی بتن روی می‌دهد. جلوگیری از جداشدگی در بتن ضرورت دارد، زیرا فشرده کردن کامل بتن بعد از جداشدگی امکان‌پذیر نیست. از طرف دیگر، اگر تمام آب حرکت کرده به سمت بالای بتن در سطح آب جمع می‌شد امکان داشت با جمع آوری آن با یک وسیله مناسب، نسبت آب به سیمان بتن پایین آمده و مقاومت افزایش یابد. ولی در عمل مقدار زیادی از این آب در زیر دانه‌های بزرگ سنگ و یا آرماتورهای موجود جمع شده و در نتیجه لایه بالایی بتن متخلخل و ضعیف می‌شود. همچنین، به علت جمع شدن آب به همراه دانه‌های ریز و سیمان در روی بتن لایه‌ای سست و غبارمانند تشکیل می‌شود که باید قبل از بتن‌ریزی بعدی آن را پاک کرد.

### عوامل موثر در آب افتادگی

- ۱) مواد ریز بتن: ماسه ریز و مخصوصاً سیمان بیشترین تاثیر را در جلوگیری از آب افتادگی بتن دارند، زیرا از طرفی به علت سطح مخصوص بیشتر عبور آب را به طرف بالا کند می‌کنند و از طرف دیگر با سریع‌تر شدن هیدراسیون، آب زودتر به مصرف می‌رسد.
- ۲) مقدار آب بتن: افزایش آب بتن باعث افزایش فاصله مواد جامد شده و آب افتادگر افزایش می‌یابد.
- ۳) نسبت سنگ‌دانه‌های ریز به درشت: بیشتر شدن نسبت ماسه ریز باعث کمتر شدن

## تکنولوژی بتن

آب افتادگی می شود ولی تاثیر آن به اندازه سیمان نیست.

۴) افزودنی های بتن: کندگیرکننده ها باعث افزایش آب افتادگی می شوند زیرا واکنش هیدراسيون را گندتر می کنند، بر عکس تندگیرکننده ها باعث کاهش آب افتادگی می شوند. مواد روانساز اگر به عنوان روانکننده به کار بروند ممکن است باعث افزایش آب افتادگی شوند، ولی اگر به عنوان کاهنده آب به کار بروند، باعث کاهش آب افتادگی می شوند. مواد حباب ساز همیشه آب افتادگی را کاهش می دهند، زیرا باعث تعليق بهتر سنگدانه ها شده و جريان آب به طرف بالا را گند می کنند.

### جداشدگی بتن (segregation) و عوامل مؤثر در آن

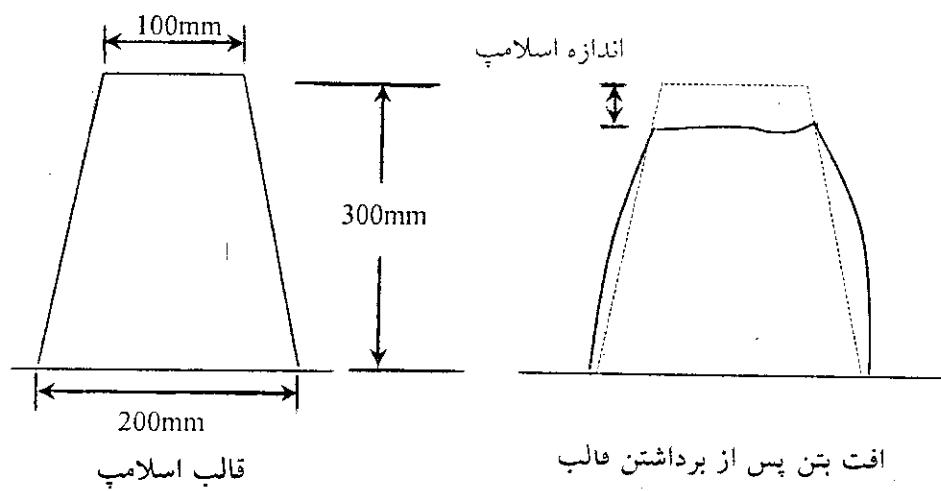
بنا به تعریف عبارت است از جدا شدن اجزای تشکیل دهنده یک مخلوط غیرهمگن، به طوری که توزیع این اجزاء دیگر یکنواخت نباشد. علت اصلی جداشدگی در بتن اختلاف اندازه و گاهی اختلاف وزن مخصوص اجزای مخلوط است. دو نوع جداشدگی وجود دارد، در نوع اول سنگدانه های درشت به علت حرکت بیشتر در شبیب یا تنهشین شدن بیشتر از دانه های ریز تمایل به جدا شدن دارند. در نوع دوم در مخلوط های پر آب، مخلوط آب و سیمان تمایل به جدا شدن از مخلوط دارد.

عوامل اصلی مؤثر در جداشدگی: بتن ریزی از ارتفاع زیاد، عبور از یک ناوданی مخصوصاً با تغییر جهت، بتن ریزی از روی یک مانع و استفاده از سنگدانه های خیلی درشت.

### آزمایش های کارایی بتن

۱) آزمایش اسلامپ (slump test) مطابق (ASTM C 143-90a و BS 1881:Part 102:1983) رایج ترین روش اندازه گیری کارایی است. در این آزمایش یک قالب به شکل مخروط ناقص به ارتفاع ۳۰۰mm از جنس فولاد در حالی که در روی یک صفحه فولادی محکم نگهداشته شده و دهانه کوچک تر آن به طرف بالا است در سه مرحله و هر مرحله با ۲۵ ضربه میله فولادی به

قطر 16mm کوییده و پر می شود. سپس قالب به طور عمودی بلند شده و میزان افت مخروط ناقص بتن از ارتفاع اولیه بر حسب mm و با دقت 5mm اندازه گیری شده و به عنوان اسلامپ (یا افت) بتن که نشانه ای از کارایی آن است ثبت می شود. این آزمایش برای بتن های معمولی با کارایی متوسط مناسب بوده و برای بتن های خیلی سفت و یا خیلی روان مناسب نیست. اسلامپ 5-10mm کارایی خیلی کم، 15-30mm کارایی کم، 35-75mm کارایی متوسط، 80-155mm کارایی زیاد و 160mm به بالا کارایی خیلی زیاد را نشان می دهد.



شکل ۱-۶ - آزمایش اسلامپ

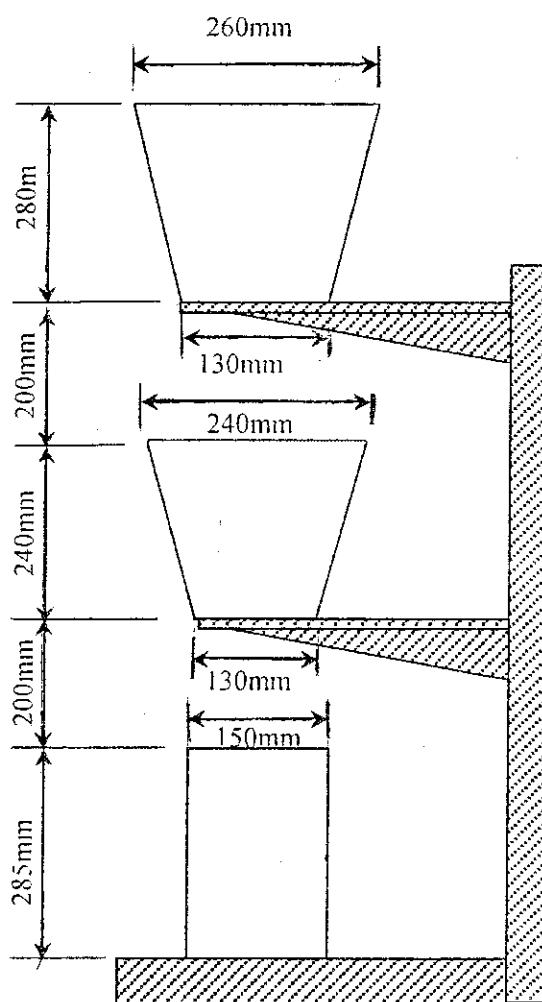
(۲) آزمایش فاکتور تراکم (compacting factor) مطابق BS1881:Part103:1993 و ACI211.3-75

دستگاه مورد استفاده در این آزمایش شامل دو قالب قیفی شکل با دریچه ای در زیر هر کدام همراه با یک قالب استوانه ای در زیر آنها است. یکی از دو قالب قیفی شکل بزرگتر از دیگری بوده و در بالای آن قرار دارد. روش کار به این ترتیب است که بتن در قیف بالایی بدون تراکم پر می شود و سپس با باز کردن دریچه تحت اثر وزن خود به داخل قیف دوم ریخته و با باز کردن دریچه این قیف در استوانه پایینی می ریزد. مقدار اضافی بتن از روی استوانه برداشته شده و

## تکنولوژی بتن

وزن بتن غیرمتراکم داخل آن تعیین می‌شود. سپس قالب روی دستگاه لرزاننده قرار گرفته و در این حین مقداری بتن نیز به آرامی به آن افزوده می‌شود تا کاملاً پر و متراکم شود. در این حالت دوباره وزن بتن داخل قالب تعیین می‌شود. نسبت وزن غیرمتراکم به وزن متراکم بتن برابر فاکتور تراکم می‌باشد. این آزمایش برای بتن‌های سفت و با کارایی کم مناسب است. در زیر مقایسه‌ای بین مقادیر بدست آمده از آزمایش‌های اسلامپ و فاکتور تراکم انجام شده است:

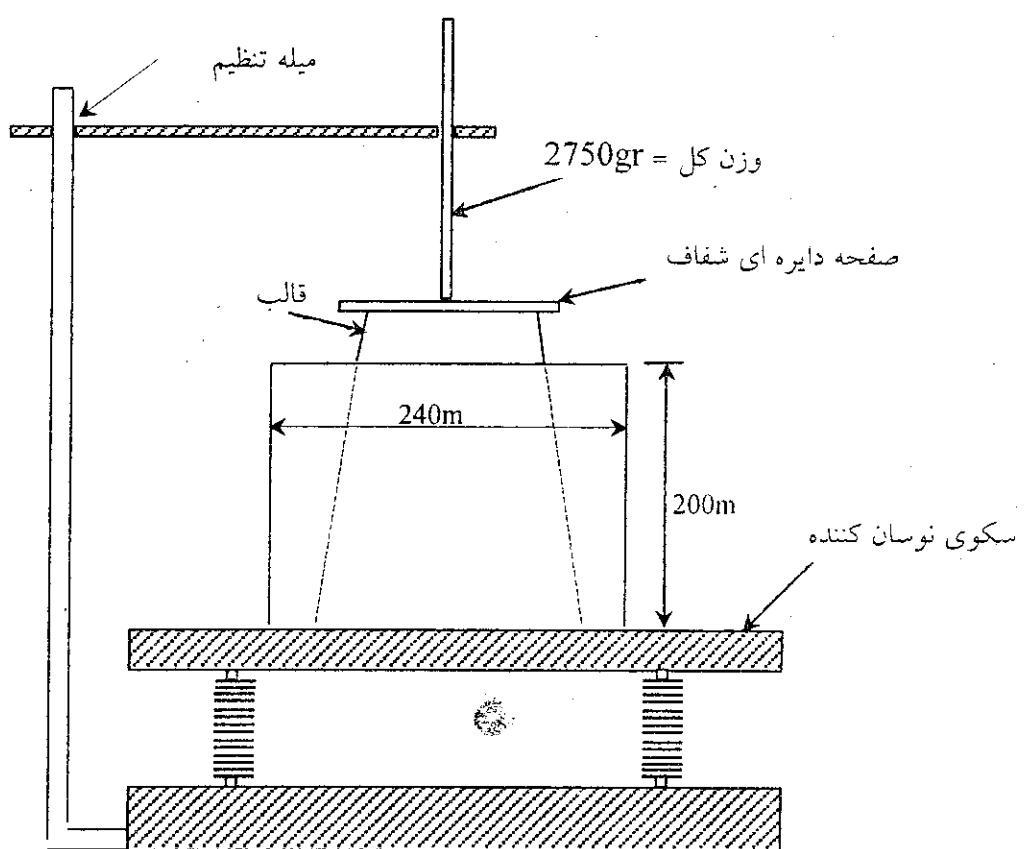
اسلامپ (mm)	فاکتور تراکم
0-25	0.78
25-50	0.85
50-100	0.92
100-175	0.95



شکل ۲-۶ - دستگاه آزمایش فاکتور تراکم

۳) آزمایش زمان وی - بی (Vebe test) مطابق 104:1983 BS1881:Part و 75-75 ACI211.3

آزمایشی است که توسط یک سوئیچ به نام V.Bahrner برای بتن‌های سفت عرضه شده است و بیشتر برای انجام در آزمایشگاه‌ها مناسب است. در این آزمایش یک مخروط ناقص از بتن به وسیله قالب مخصوص و با روش خاص تهیه شده و در روی دستگاه قرار می‌گیرد. سپس یک صفحه دایره‌ای شفاف که ارتفاع آن قابل تنظیم است مماس بالبه بالای بتن قرار می‌گیرد. با روشن کردن دستگاه بتن شروع به لرزش کرده و به سطح صفحه پاشیده می‌شود. مدت زمان لازم از لحظه روشن کردن دستگاه تا لحظه‌ای که سطح صفحه دایره‌ای کاملاً از بتن پوشیده و کدر شود به عنوان زمان وی - بی تعیین می‌شود. هر قدر این زمان طولانی‌تر باشد، کارایی بتن کمتر است.

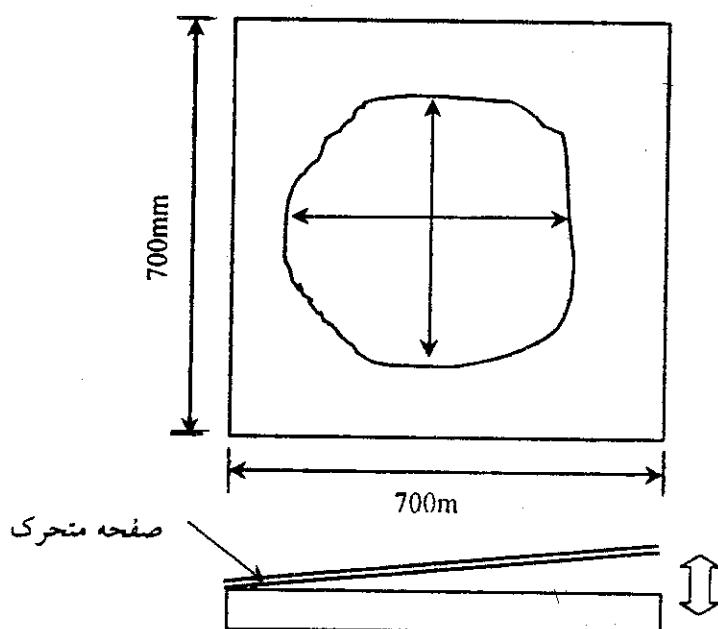


شکل ۳-۶- دستگاه آزمایش زمان وی - بی

## تکنولوژی بتن

۴) آزمایش میز جریان (flow table test) مطابق BS 1881: Part 105:1084

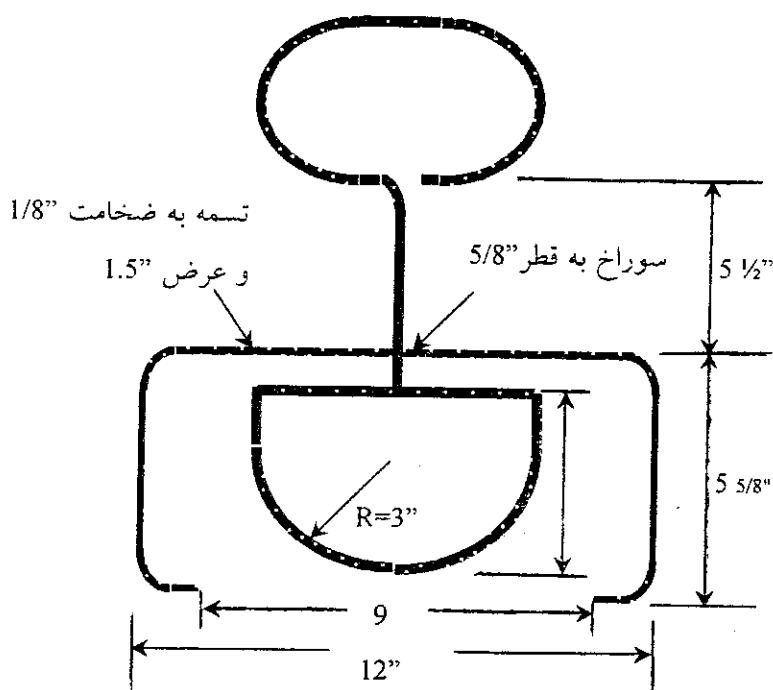
این آزمایش که در سال ۱۹۳۳ در آلمان ابداع شد، در سال‌های اخیر مورد استفاده بیشتری یافته است زیرا برای بتن‌هایی خیلی زیاد مناسب است. دستگاه مورد استفاده شامل یک تخته مربع شکل به ابعاد 700mm است که با یک ورق فولادی پوشیده شده و وزن کل آن ۱۶kg است. یک طرف این تخته بالولا به یک تخته دیگر با همان ابعاد متصل شده و طرف دیگر آن می‌تواند به اندازه 40mm بالا برده شده و رها شود. برای انجام آزمایش روی صفحه مرطوب شده و یک قالب مخروط ناقص به ارتفاع 200mm و با قطرهای دهانه 200mm و 130mm روی آن قرار داده شده و با روش خاص از بتن پر می‌شود. سپس قالب برداشته شده و تخته ۱۵ بار تا ارتفاع 40mm از طرف آزاد بلند شده و رها می‌شود. در نتیجه این عمل بتن روی صفحه پخش می‌شود. مقدار پخش شدگی سطح بتن در دو امتداد عمود بر هم اندازه‌گیری شده و میانگین دو مقدار بر حسب mm به عنوان میزان جریان بتن تعیین می‌شود. آزمایش برای بتن‌هایی با جریان مقدار برابر 400-650mm مناسب است.



شکل ۴-۶- میز جریان

## (۵) آزمایش نفوذ نیمکره فلزی (ball penetration test) مطابق ASTM C 360-92

این روش آزمایش ساده‌ای است که شامل اندازه‌گیری مقدار نفوذ یک نیمکره فلزی به قطر 152mm و وزن 13.6kg در داخل بتن، تحت اثر وزن خود نیمکره می‌باشد. این آزمایش مختص کشور آمریکا است و به ندرت در جاهای دیگر بکار می‌رود. ضخامت لایه بتن مورد آزمایش نباید کمتر از 200mm و اندازه جانبی قالب بتنی نباید کمتر از 360mm باشد. این آزمایش بیشتر حالت مقایسه‌ای داشته و برای کنترل یکنواختی کارایی بتن در قالب‌های مختلف بکار می‌رود.



شکل ۵-۶- دستگاه آزمایش نیمکره فلزی

## مقادیر مناسب کارایی برای کاربردهای مختلف

اسلامپ (mm)	فاکتور تراکم	نوع کاربرد
0	0.75	جاده‌ها و سایر مقاطع بزرگ
0-5	0.85	کارهای بتن آرمه ساده تا معمولی
5-25	0.90	کارهای بتن آرمه معمولی تا فشرده
25-100	0.95	مقاطع بتن آرمه با آرماتوریندی بسیار فشرده

## تکنولوژی بتن

### تأثیر زمان بر کارایی بتن

بتن تازه مخلوط شده با گذشت زمان سفت‌تر می‌شود. این سفت شدن را باید با گیرش سیمان اشتباه گرفت. علت فقط این است که مقداری از آب مخلوط توسط سنگدانه‌ها (اگر غیراشیاع باشند) جذب می‌شود، مقداری از آن در اثر تبخير تلف می‌شود (مخصوصاً اگر بتن در معرض آفتاب یا وزش باد باشد) و مقداری نیز توسط واکنش‌های شیمیایی اولیه مصرف می‌شود. فاکتور تراکم مخلوط تقریباً  $0.1$  در طول یک ساعت از مخلوط کردن کاهش می‌یابد. مقدار دقیق کاهش کارایی به عوامل متعددی بستگی دارد. اول اینکه، هر قدر مقدار کارایی اولیه بیشتر باشد، مقدار کاهش آن نیز بیشتر خواهد بود. دوم اینکه، مقدار کاهش اسلامپ در مخلوط‌های پر سیمان بیشتر خواهد بود. علاوه بر آن، سرعت کاهش بستگی به خواص سیمان مصرف شده دارد؛ اگر مقدار مواد قلیایی سیمان بیشتر باشد و یا مقدار سولفات آن خیلی پایین باشد، سرعت کاهش نیز بیشتر است. تغییر کارایی در طول زمان به وضعیت سنگدانه‌ها از نظر رطوبت (با مقدار کلی آب ثابت) نیز بستگی دارد، مقدار کاهش کارایی با خشک‌تر بودن سنگدانه بیشتر خواهد بود، چون مقداری از آب جذب سنگدانه می‌شود. افزودنی‌های کاهنده آب با اینکه سخت شدن زود هنگام بتن را به تأخیر می‌اندازند، اغلب منجر به کمی افزایش در سرعت کاهش کارایی می‌شوند.

### ایجاد حباب‌های هوا و اندازه‌گیری آن

حباب‌های هوا به دو صورت می‌تواند در بتن تازه ایجاد شود، در اثر تراکم ناکافی و در اثر کاربرد مواد حباب‌ساز. هنگامی که از مواد حباب‌ساز استفاده شود می‌توان میزان هوای موجود در بتن را تعیین نمود. تعیین درصد هوای موجود در بتن با سه روش می‌تواند انجام شود:

- ۱) روش حجمی مطابق ASTM C 173-94 در این روش به حجم معینی از بتن مقدار معینی آب اضافه می‌شود و کاملاً به هم زده می‌شود تا تمام هوای موجود خارج شود. در این حالت اگر  $V_1$

## تکنولوژی بتن

۳) روش وزنی: در این روش چگالی بتن به دو طریق محاسباتی و عملی اندازه‌گیری شده و از اختلاف بین دو مقدار بدست آمده مقدار هوای موجود بتن اندازه‌گیری می‌شود. چگالی بتن به روش محاسباتی با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = 10\gamma_a(100-A) + C(1 - \frac{\gamma_a}{\gamma}) - W(\gamma_a-1)$$

$\gamma_a$  = چگالی نسبی سنگدانه‌ها در حالت اشباع - سطح خشک (2.6 ~ 2.7)

$\gamma$  = چگالی نسبی سیمان (3.15)

A = درصد هوا (%)

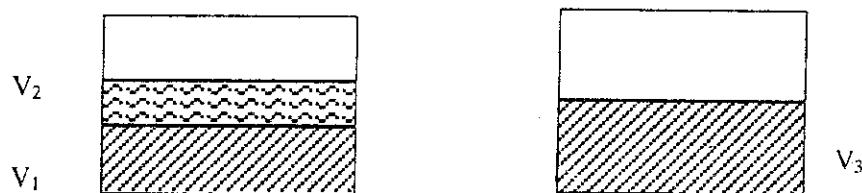
C = عیار سیمان (kg /m<sup>3</sup>)

W = وزن آب مصرفی (kg /m<sup>3</sup>)

در روش عملی نمونه بتن در یک ظرف ریخته شده و پس از تراکم کامل آن به وسیله لرزاندن، وزن آن تعیین شده و با تقسیم کردن وزن بر حجم دقیق اشغال شده در ظرف، چگالی بتن تعیین می‌شود. با مساوی قرار دادن این مقدار با طرف دوم رابطه بالا مقدار A یا درصد هوا بدست می‌آید.

حجم اولیه بتن،  $V_2$  حجم آب اضافه شده و  $V_3$  حجم مخلوط بتن و آب پس از بهم زدن آن باشد، حجم هوای موجود در بتن را می‌توان با استفاده از رابطه زیر بدست آورد.

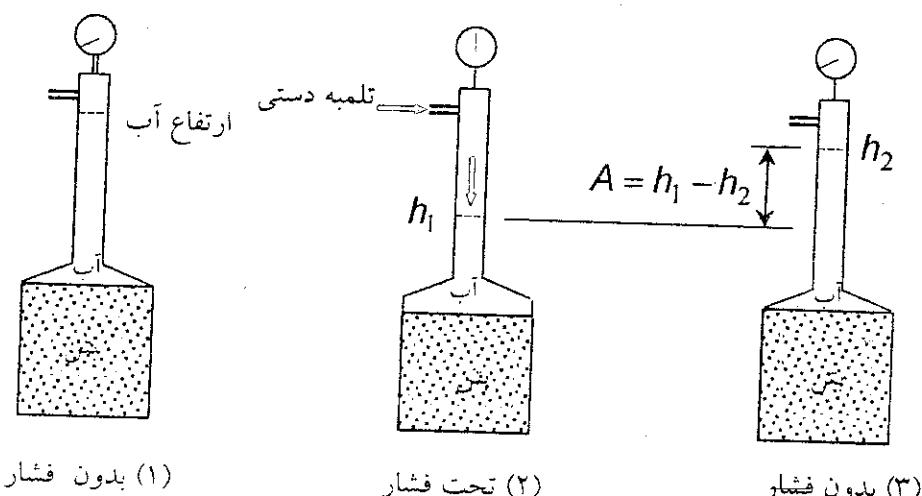
$$A = (V_1 + V_2) - V_3 \quad \text{حجم هوا}$$



شکل ۶-۶- روشن حجمی اندازه‌گیری هوای بتن

۲) روش فشاری مطابق ASTM C 231-91b , BS 1881: Part106: 1983: این روش بر اساس قانون

بویل ماریوت تنظیم شده است. مراحل آزمایش شامل اندازه‌گیری کاهش حجم نمونه متراکم شده بتن تحت فشار معینی است که به وسیله تلمبه دستی وارد می‌شود.



شکل ۶-۷- دستگاه هواسنج بتن به روش فشاری

## اجرای بتن

### روش‌های تهیه بتن

بتن مورد نیاز را به دو صورت می‌توان تهیه نمود: تهیه در محل کارگاه و تهیه به صورت آماده.

سفارش بتن آماده به دو صورت می‌تواند انجام گیرد:

سفارش براساس عملکرد بتن (performance): از نظر عملکرد معمولاً مقاومت بتن مورد نظر است، مثلاً بتن با مقاومت فشاری 30MPa سفارش داده می‌شود. مخلوط بتن مشخص شده براساس عملکرد، مخلوط طراحی شده (designed mix) نام دارد که تولیدکننده مسئول انتخاب نسبت‌های مخلوط برای تأمین عملکرد (مقاومت) مورد نیاز می‌باشد.

سفارش با تجویز مصرف‌کننده بتن (prescribed mix): در این نوع بتن، مشخصات و نسبت‌های اختلاط توسط مصرف‌کننده تعیین می‌شود. تولیدکننده فقط مسئول اختلاط دقیق نسبت‌های مشخص شده می‌باشد و مسئولیتی در مورد عملکرد بتن ساخته شده ندارد. بتن تجویز شده دارای دو نوع است.

الف) مخلوط غیراستاندارد که مصرف‌کننده با استفاده از روش‌های موجود طراحی، نسبت‌های اختلاط بتن را تعیین می‌کند.

ب) مخلوط استاندارد که از لیست مخلوط‌های استاندارد مانند BS 5328 انتخاب می‌شود.

## اجرای بتن

ویبراتور خودداری شود. هنگام ریختن بتن از پیمانه باید آن را به آرامی حرکت داد تا بتن به صورت کپه‌ای ریخته نشود. بتن باید در لایه‌هایی به ضخامت حداقل 450mm ریخته شود. در قالب‌های عمیق و ستون و دیوار از توقف یا تأخیر در بین بتن ریزی باید خودداری نمود تا از تغییرات رنگ بتن جلوگیری شود. سرعت بتن ریزی در این موارد باید بیش از 2m (در ارتفاع) در ساعت باشد.

## ویبره کردن (لرزاندن) بتن

بعد از این که بتن در محل خود ریخته شد، دارای مقداری هوای محبوس به شکل حباب‌های بزرگ خواهد بود. هدف از تراکم بتن به وسیله لرزاندن این است که تا حدامکان این هوای محبوس به بیرون از بتن رانده شود. قبل از تراکم، بتنی با اسلامپ 75mm دارای هوای محبوس به میزان حدود 5% می‌باشد. در حالی که در بتن با اسلامپ 25mm این مقدار هوا ممکن است به 20% برسد. اگر این هوای اضافی خارج نشود، تاثیرات زیر را بر بتن خواهد گذاشت:

- کاهش مقاومت بتن به میزان 5% برای هر 1% هوای محبوس
- افزایش نفوذپذیری بتن و در نتیجه کاهش دوام آن
- کاهش پیوستگی بین بتن و آرماتورهای فولادی داخل آن
- کروم و بد منظره شدن بتن

بتن کاملاً فشرده شده دارای چگالی زیاد، مستحکم، نفوذناپذیر و بادوام خواهد بود. در اغلب موارد بتن به وسیله ویبراتورهای داخلی متراکم می‌شود که اندازه قطر آنها در حدود 27-75mm است. در جدول زیر موارد استفاده اندازه‌های مختلف ویبراتور و شعاع عمل آنها داده شده است. هنگام استفاده، ویبراتور باید به سرعت و به طور عمودی در بتن فرو برد و شود، به طوری که تا 100mm در داخل لایه قبلى نفوذ کند و تا زمانی در داخل بتن باقی بماند که خروج حباب‌های هوای متوقف شود. تشخیص کافی بودن ویبراسیون تا حد زیادی بستگی به تجربه دارد. در بعضی موارد ثابت ماندن صدای خروجی از ویبراتور نشانه خوبی از اتمام تراکم بتن است و علاوه بر آن، ظاهر شدن لایه‌ای براق از ملات در سطح بتن علامتی از تراکم بتن

## تکنولوژی بتن

است. در بعضی از موارد از ویبراتورهای خارجی نیز استفاده می‌شود ولی فقط در قالب‌های بزرگ و سنگین کاربرد دارد. همچنین ممکن است از میزها و سکوهای ویبره نیز برای لرزاندن قالب‌های کوچک در آزمایشگاهها و قالب‌های بزرگ در کارخانه‌های بتن پیش‌ساخته استفاده نمود.

### ویبره کردن مجدد (Re-vibration) بتن

در صورتی که بتن هتوز شکل پذیر باشد، ویبره کردن مجدد آن نه تنها ضرری نخواهد داشت بلکه آزمایش‌ها نشان داده‌اند که احتمالاً باعث افزایش مقاومت نیز خواهد شد. ویبره مجدد 75-100mm لایه فوقانی عضوهای بتنی عمیق باعث کاهش احتمال ترک‌های نشت پلاستیک و یا بسته شدن این ترک‌ها در صورت وجود خواهد شد. همچنین در مورد قالب‌های ستون و دیوار، ویبره مجدد لایه فوقانی آنها باعث کاهش احتمال کرومود شدن بتن در بالای عضو خواهد شد.

جدول ۱-۷ - مشخصات ویبراتورها

قطر ویبراتور (mm)	شعاع عمل ویبراتور (mm)	سرعت تقریبی تراکم با فرض بتن ریزی سریع (مترمکعب بر ساعت)	کاربرد
20~30	80~150	0.8~2	اسلامپ 50mm و بالاتر در مقاطع خیلی باریک و فشرده. ممکن است همواه با ویبراتورهای بزرگتر بکار رود
35~40	130~250	2~4	اسلامپ 50mm و بالاتر در ستون‌های باریک و دیوارها و قالب‌های با دسترسی مشکل
50~70	180~350	3~8	اسلامپ 25mm و بالاتر در بتن ریزی‌های معمولی با فشردگی آرماتور و محدودیت دسترسی

### بتن ریزی در زیر آب

بتن ریزی در زیر آب با مسائل خاصی همراه است. نخست اینکه، باید از شسته شدن بتن به وسیله آب جلوگیری شود. بنابراین، بتن ریزی باید از طریق یک لوله فلزی انجام شود که انتهای آن در داخل بتن تازه ریخته شده قرار دارد. این لوله باید در تمام مدت بتن ریزی پر باقی بماند. این روش بتن ریزی تا حدی شبیه بتن ریزی با پمپ است با این تفاوت که بتن تنها تحت اثر وزن آن جریان می‌یابد. بتن ریزی‌هایی تا عمق 250m آب انجام شده است.

تخلیه مداوم بتن باعث جریان یافتن آن به صورت جانبی می‌شود، بنابراین مخلوط بتن باید کارایی کافی داشته باشد. اسلامپ 150-250mm ضروری است. استفاده از افزودنی‌های مانع شسته شدن بتن مؤثر است (anti-washout admixture)، استفاده از آنها باعث می‌شود بتن تحت اثر حرکت ناشی از تخلیه جریان یابد، ولی هنگام بی‌حرکت بودن بتن، چسبندگی آن بالا باشد. معمولاً برای این نوع بتن ریزی مخلوط‌های پر سیمان با حداقل عیار  $360\text{kg/m}^3$  همراه با 15% مواد پوزولانی برای بهبود کارایی توصیه شده است. با این حال، امروزه در نتیجه بررسی‌ها مشخص شده است که در بتن ریزی‌های حجمی زیر آب، حرارت داخلی در مرکز بتن می‌تواند به  $70-90^\circ\text{C}$  برسد و هنگام سرد شدن بتن ترک خورده‌گی ایجاد شود. اگر بتن غیر مسلح باشد این ترک‌ها ممکن است بسیار عریض باشند. به همین دلیل، امروزه استفاده از سیمان‌های مخلوط تشکیل شده از 16% سیمان پرتلند، 78% سرباره آهن‌گذاری با دانه‌های درشت‌تر از معمول و 6% دوده سیلیس توصیه می‌شود. بتن قبل از تخلیه به داخل لوله، تا حد  $4^\circ\text{C}$  سرد می‌شود. نسبت آب به سیمان معمولاً 0.4 تا 0.45 می‌باشد.

بتن ریزی در زیر آب عملیاتی بسیار ظریف و حساس است که اگر به درستی انجام نشود عواقب جدی در برخواهد داشت، بنابراین، باید از افراد با تجربه برای این کار استفاده شود.

### میکسرها (مخلوط‌کن‌ها) و انواع آن

عمل اصلی میکسر عبارت است از دوران و به هم زدن بتن برای اندود کردن تمام سنگدانه‌ها

## تکنولوژی بتن

با خمیر سیمان و تشکیل مخلوط یکنواخت. انواع اصلی میکسر به ترتیب زیر است:

۱) میکسر پیمانه‌ای (batching mixer): در این نوع میکسر در هر بار، حجم معینی از بتن ساخته و آماده می‌شود.

۲) میکسر پیوسته (continuous): این نوع میکسر به طور مداوم به وسیله یک سیستم پیمانه‌ای وزنی تغذیه شده و بتن با اختلاط تعیین شده از آن خارج می‌شود.

### انواع میکسر پیمانه‌ای

۱-۱) میکسر مخزنی خم شونده (tilting drum): در این میکسر، مخزن برای تخلیه بتن خم شدن نیست و برای تخلیه بتن یک ناودانی به آن متصل می‌شود.

۱-۲) میکسر مخزنی با محور ثابت (none -tilting drum): در این نوع میکسر مخزن قابل خم شدن نیست و برای تخلیه بتن یک ناودانی به آن متصل می‌شود.

۱-۳) میکسر پره‌دار (pan type mixer): اساس کار این میکسر بر مخلوط کردن ناشی از فشار پره‌ها قرار دارد، برخلاف میکسرهای مخزنی که بر اساس سقوط آزاد بتن در داخل مخزن در اثر وزن خود عمل می‌کنند. این میکسرها معمولاً ظرفیت کمی داشته و بیشتر در آزمایشگاه‌های بتن به کار می‌روند.

۱-۴) میکسر با مخزن دوبل: این میکسر دارای دو مخزن جداگانه است که به ترتیب مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نتیجه در هر لحظه بتن آماده مصرف موجود است.

عمل مخلوط کردن نباید بیش از مدت معینی انجام گیرد، زیرا در غیر این صورت عوارضی از قبیل تبخیر آب، ساییدگی سنگدانه‌ها، ریزتر شدن دانه‌بندی و کاهش کارایی بتن را در پی خواهد داشت. حداقل زمان‌های اختلاط توصیه شده برای ظرفیت‌های مختلف میکسرها در جدول زیر داده شده است. زمان اختلاط از لحظه‌ای محاسبه می‌شود که تمام مواد جامد به داخل میکسر ریخته شده باشند. آب را نباید دیرتر از یک چهارم زمان توصیه شده در جدول به

مخلوط اضافه کرد.

### جدول ۷-۲- زمان اختلاط بتن

ظرفیت میکسر(مترمکعب)	زمان اختلاط (دقیقه)
0.8	1
1.5	1 1/4
2.3	1 1/2
3.1	1 3/4
3.8	2
4.6	2 1/4
7.6	3 1/4

هیچ قانونی کلی در مورد ترتیب ریختن مواد به داخل میکسر نمی‌توان تعیین کرد، زیرا این عمل بستگی به خواص مخلوط و میکسر دارد. معمولاً، در ابتدا باید مقدار کمی از آب ریخته شده و به دنبال آن تمام مواد جامد، ترجیح‌آمیز طور یکنواخت و همزمان، به مخلوط اضافه شوند. اگر ممکن باشد، بیشتر مقدار آب باید در همان هنگام به مخلوط اضافه شده و بقیه آن بعد از مواد جامد ریخته شود. با این حال، در بعضی از میکسرهای مخزنی و هنگامی که مخلوط کم آب باشد، بهتر است در ابتدا کمی آب همراه با سنگدانه‌های درشت در میکسر ریخته شود، در غیر این صورت ممکن است سطح آنها کاملاً مرطوب نشود. علاوه بر آن، اگر سنگدانه درشت در ابتدا اضافه نشود، ممکن است ماسه یا مخلوط ماسه و سیمان در بالای میکسر انباسته شده و به طور کامل وارد مخلوط نشود. اگر آب یا سیمان خیلی سریع در میکسر ریخته شود، یا خیلی گرم باشد، می‌تواند منجر به تشکیل گلوله‌های سیمانی در مخلوط شود که اندازه آنها ممکن است تا 70mm برسد. در میکسرهای کوچک پروانه‌دار آزمایشگاهی و در مخلوط‌های بسیار سفت، بهتر است ابتدا ماسه، مقداری از سنگدانه درشت و سیمان، و سپس

## تکنولوژی بتن

آب ریخته شده و در نهایت، بقیه سنگدانه‌های درشت اضافه شود تا کلوخه‌های احتمالی ایجاد شده از ملات شکسته شوند.

## مقدمه

برای بدست آوردن بتن خوب، بعد از ریختن بتنی که با نسبت‌های اختلاط صحیح طراحی شده است، باید شرایط مناسب محیطی برای به عمل آوردن آن در سنتین پایین (چند روز و یا چند هفته اول) فراهم گردد. عمل آوری بتن (curing) عبارت است از اعمال روش‌های مناسب برای کنترل دما و ورود و خروج رطوبت از بتن، به منظور ادامه هیدراسيون سیمان و در نتیجه کسب مقاومت بتن که در عین حال بر دوام آن نیز تأثیر دارد.

سخت شدن بتن، کسب مقاومت و نفوذناپذیر شدن آن بستگی به وجود آب دارد. هنگام بتن‌ریزی همیشه آب کافی برای هیدراسيون کامل وجود دارد، ولی باید اطمینان حاصل نمود که این آب محافظت شود و اکتشاهای شیمیایی ادامه پیدا کند تا مقاومت و نفوذناپذیری کافی در بتن به وجود آید.

هدف از عمل آوری این است که بتن در حالت اشباع یا حتی الامکان اشباع باقی بماند، تا زمانی که فضاهای پر از آب اولیه در خمیر سیمان تا حد مطلوبی با مواد حاصل از هیدراسيون سیمان پر شوند. معمولاً در بتن‌ریزی‌های کارگاهی به عمل آوردن بتن خیلی پیشتر از اینکه حداقل هیدراسيون ممکن اتفاق افتد، متوقف می‌شود.

## تکنولوژی بتن

ثابت شده است که وقتی رطوبت نسبی موجود در حفره‌های مویینه به کمتر از 80% بر سد هیدراسیون سیمان به شدت کاهش می‌یابد و اگر رطوبت نسبی به کمتر از 30% بر سد هیدراسیون بسیار جزئی خواهد بود. هیدراسیون با سرعت کامل فقط در شرایط کاملاً اشباع امکان‌پذیر است. بنابراین، برای ادامه هیدراسیون، رطوبت نسبی داخل بتن باید حداقل 80% باشد. اگر رطوبت نسبی محیط حداقل به همین اندازه باشد، انتقال رطوبت ناچیزی بین بتن و هوای محیط وجود خواهد داشت و روش خاصی برای عمل آوردن لازم نخواهد بود. البته گفته اخیر موقعی صحیح است که عوامل تداخل‌کننده دیگری مانند وزش باد، اختلاف دمای بتن و محیط و نیز تابش مستقیم آفتاب وجود نداشته باشد. در نتیجه، عمل آوری بتن فقط در مناطقی بسیار مرطوب و با هوای آرام و ملایم غیرضروری خواهد بود. لازم به ذکر است که در بیشتر نقاط دنیا، رطوبت نسبی محیط حداقل در اوقاتی از روز ممکن است به کمتر از 80% بر سد و بنابراین اطمینان از عمل آمدن طبیعی بتن فقط به خاطر مرطوب بودن محیط صحیح نیست.

### روش‌های کلی عمل آوری بتن

۱) نگهداشتن سطح بتن در تماس نزدیک با آب یا رطوبت، مثلاً مستغرق کردن بتن با آب (pounding)، اسپری کردن یا ریختن آب روی بتن، استفاده از ماسه مرطوب یا گونی خیس روی بتن.

۲) جلوگیری از اتلاف رطوبت موجود بتن، با استفاده از صفحات پلاستیکی، کاغذهای ضدآب، باز نکردن قالب‌ها تا مدت لازم و استفاده از اسپری‌های آب‌بندی‌کننده سطح بتن. حداقل زمان لازم برای عمل آوری بتن بستگی به عواملی مانند نوع سیمان، عیار سیمان و نسبت آب به سیمان، شرایط محیطی و دمای لایه سطحی بتن دارد. تعیین زمان دقیق برای این منظور هنوز ممکن نشده است.

مقادیر جدول زیر که در استاندارد ENV206 : 1992 توصیه شده‌اند راهنمای مفیدی برای

## عمل آوری بتن

تخمین حداقل زمان لازم برای عمل آوری بتن در شرایط محیطی مختلف است، ولی باید توجه داشت که این مقادیر حداقل زمان‌های لازم هستند و ممکن است نیاز به افزایش داشته باشند. به طور کلی توصیه می‌شود که مرطوب نگه داشتن بتن حتی در شرایط مساعد حداقل به مدت 7 روز برای سطوح افقی و 4 روز برای سطوح قائم ادامه یابد. در مواردی که از سیمان‌های پوزولانی یا سرباره‌ای استفاده شود، به مدت زمان‌های فوق حداقل باید 50% اضافه شود.

جدول ۱-۹ - حداقل زمان‌های توصیه شده برای عمل آوری بتن بر حسب روز

کند			متوسط			سریع			سرعت کسب مقاومت بتن		
(°C)			دماهی بتن (°C)			دماهی بتن (°C)					
شرایط محیطی در طول بعمل آوردن											
5	10	15	5	10	15	5	10	15	بدون آفتاب، رطوبت نسبی بیش از 80%		
3	3	2	3	3	2	2	2	1			
8	5	4	6	4	3	4	3	2	آفتاب ملایم یا باد ملایم یا رطوبت نسبی بیش از 50%		
10	8	5	8	6	5	4	3	2	آفتاب شدید یا باد شدید یا رطوبت نسبی کمتر از 50%		

- کسب مقاومت سریع به معنی استفاده از سیمان زود سخت‌شونده و نسبت آب به سیمان پایین است.

عمل آوری بتن باید هر چه زودتر شروع شده و به طور مداوم انجام شود. در کارگاهها، گاهی عمل آوری بتن به طور متناوب انجام می‌شود. باید توجه داشت که در مورد بتن‌های با نسبت آب به سیمان کم، عمل آوری مداوم و زودهنگام اهمیت زیادی دارد، چون هیدراسيون ناقص ممکن است باعث قطع ارتباط حفره‌های مویینه شود و اگر بعداً عمل آوری از سرگرفته شود، آب قادر به نفوذ کامل به داخل بتن نخواهد بود و بنابراین هیدراسيون بیشتری انجام نخواهد شد. در بتن‌های با نسبت آب به سیمان بالا همیشه مقدار زیادی از حفره‌های مویینه باقی می‌ماند و بنابراین عمل آوری می‌تواند در هر زمانی پی‌گیری شود، ولی در هر حال، عمل آوری باید هر چه زودتر انجام شود.

## عمل آوری سریع با بخار آب

در مواردی که نیاز به کسب مقاومت سریع در بتن باشد، مانند قطعات بتنی پیش ساخته از قبیل بلوك ساختمانی، لوله های بتنی، تیرها و دیوارهای پیش ساخته بتنی و غیره، می توان از عمل آوری با بخار آب استفاده کرد. عمل آوری با بخار می تواند در فشار اتمسفر و یا تحت فشار بالا انجام شود. در فشار اتمسفر، دمای عمل آوری با بخار بین 40 تا 100 درجه سانتیگراد است. البته دمای بهینه بین 65 تا 80 درجه می باشد. بتن بعد از قالب گیری باید حدود 2 تا 6 ساعت در دمای عادی اتاق باقی بماند تا مقداری هیدراسیون اولیه انجام شود. سپس مرحله بخار دادن با افزایش دمای حدود 11 تا 33 درجه در ساعت شروع می شود. افزایش دما هر چه آرامتر باشد بهتر است. به این ترتیب پس از سه روز بتن مقاومت بیشتری از مقاومت 28 روزه تحت شرایط عادی پیدا خواهد کرد. در انتهای مرحله عمل آوری، خنک کردن بتن انجام می شود که سرعت آن نیز بهتر است در حدود 22 تا 33 درجه در ساعت باشد. قطعات بتنی معمولاً قبل از حمل به محل مصرف خشک می شوند. عمل خشک کردن را می توان به طور طبیعی در شرایط محیطی و یا به صورت تسريع شده با جریان هوا انجام داد.

اگر عمل آوری با بخار در محفظه بسته و با فشارهای بیشتر از فشار اتمسفر انجام شود می توان از دماهای بالاتر نیز استفاده نمود. چنین محفظه ای را معمولاً اتوکلاو می نامند. دمای مورد استفاده در اتوکلاو بین 160 تا 210 درجه سانتی گراد و فشار داخل آن 6 تا 20 اتمسفر می باشد. در چنین شرایطی قطعات بتنی پس از 24 ساعت مقاومت کافی برای استفاده را به دست خواهند آورد.

## بتن ریزی در هوای گرم

هنگام بتن ریزی در هوای گرم، مسائل خاصی پیش می آیند که هم ناشی از دمای زیاد بتن و هم در بسیاری از موارد، در نتیجه تبخیر سریع تر آب از بتن می باشند. این مسائل روی اختلاط،

## عمل آوری بتن

ریختن و عمل آوری بتن تاثیر می‌گذارند. بتن ریزی در هوای گرم نیاز به رعایت نکات معین و شناخته شده‌ای برای کنترل یا کاهش تأثیرات دمای بالای محیط، دمای بالای بتن، رطوبت نسبی پائین، سرعت زیاد وزش باد و تابش آفتاب دارد. دمای بالا باعث سریع‌تر شدن گیرش بتن می‌شود. نتیجه آزمایش‌ها نشان داده است که با بالا رفتن دما از  $28^{\circ}\text{C}$  به  $46^{\circ}\text{C}$ ، زمان گیرش اولیه بتن تقریباً نصف می‌شود. این تاثیر در نسبت‌های آب به سیمان از 0.4 تا 0.6 یکسان می‌باشد.

دمای بالاتر محیط باعث نیاز به آب بیشتر در بتن شده و دمای بتن را بالا می‌برد. این امر باعث کاهش سریع‌تر اسلامپ و نیز هیدراسیون سریع‌تر و در نتیجه گیرش سریع‌تر بتن می‌شود و مقاومت بتن را در درازمدت کاهش می‌دهد. علاوه بر آن، تبخیر سریع باعث ایجاد ترک‌خوردگی در سطح بتن می‌شود که این نوع ترکها را ترک‌های آبرفتگی پلاستیک می‌نامند، چون در مرحله شکل‌پذیر بتن شروع می‌شوند. این ترک‌ها ممکن است بسیار عمیق بوده و عرض آنها از 0.1mm تا 3mm و طول آنها بسیار کوتاه بوده و یا بلند باشد و به طول 1m نیز برسد. مطابق استاندارد ACI 305R-91 احتمال ایجاد ترک‌خوردگی در ترکیب‌های مختلفی از دما و رطوبت نسبی به ترتیب زیر یکسان است:

دمای  $41^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی 90%

دمای  $35^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی 70%

دمای  $24^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی 30%

سرعت وزش باد بیش از  $4.5\text{m/s}$  وضعیت را تشدید می‌کند و استفاده از حفاظه‌های مناسب در برابر باد و آفتاب مفید است. نوع دیگری از ترک‌خوردگی پلاستیک وجود دارد که ناشی از نشست نامساوی بتن در اثر وجود سنگدانه‌های بزرگ و یا میلگرد‌ها می‌باشد و می‌تواند در دماهای عادی نیز اتفاق افتد و ممکن است با ترک‌های آبرفتگی پلاستیک اشتباہ شود. برای جلوگیری از این گونه ترکها استفاده از مخلوط‌کم آب تر و تراکم خوب بتن و اجتناب از بتن ریزی بسیار سریع توصیه می‌شود.

## تکنولوژی بتن

حال باید دید که چه مواردی را باید رعایت کرد تا تأثیرات منفی دمای زیاد به حداقل برسد. مطابق با استاندارد اروپایی ENV206:1992 حداکثر دمای بتن ریزی به  $30^{\circ}\text{C}$  محدود می‌شود ولی ایجاد این محدودیت در کشورهایی که آب و هوای گرم دارند، معقول به نظر نمی‌رسد. در صورت امکان، بهتر است بتن ریزی در خنک‌ترین ساعت روز و ترجیحاً موقعی انجام شود که افزایش دمای محیط پس از گیرش بتن اتفاق افتد، مثلاً در هنگام نیمه شب یا ساعت‌های اولیه صبح، اقدامات متعددی را می‌توان در بتن ریزی در هوای گرم بعمل آورد:

- ۱) کاهش عیار سیمان بتن تا حد ممکن، تا دمای هیدراسيون کمتر شود.
- ۲) پایین آوردن دمای بتن با سرد کردن اجزای تشکیل دهنده آن قبل از اختلاط. دمای مطلوب بتن هنگام ریختن آن  $10^{\circ}\text{C}$  است ولی ممکن است رسیدن به آن عملی نباشد. دمای بتن تازه ( $T$ ) را می‌توان بر حسب دمای اجزای تشکیل دهنده آن از رابطه زیر بدست آورد:

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w}{0.22 (W_a + W_c) + W_w}$$

در رابطه فوق  $T$  دما بر حسب  $^{\circ}\text{C}$ ،  $W$  جرم هر کدام از اجزای بتن در واحد حجم آن و پسوندهای  $w_a$  و  $w_c$  به ترتیب مربوط به سنگدانه، سیمان و آب می‌باشد. ضریب 0.22 نشان‌دهنده نسبت تقریبی گرمای ویژه اجزای خشک بتن به گرمای ویژه آب است. در عمل، به علت کار انجام شده روی بتن هنگام اختلاط آن، دمای آن کمی بیشتر از مقدار بدست آمده از رابطه فوق است و در مراحل بعدی به علت شروع واکنش هیدراسيون و انتقال حرارت از محیط و قالب‌بندی بالاتر خواهد رفت. قبیل از شروع بتن ریزی بهتر است دمای قالب‌ها کاهش داده شود. برای مثال، اگر در یک مخلوط بتن نسبت آب به سیمان برابر 0.5 و نسبت کل جرم سنگدانه به جرم سیمان برابر 5.6 باشد، در این صورت برای کاهش  $1^{\circ}\text{C}$  از دمای بتن باید  $90^{\circ}\text{C}$  از دمای سیمان، یا  $3.6^{\circ}\text{C}$  از دمای آب و یا  $1.6^{\circ}\text{C}$  از دمای سنگدانه کاسته شود. دیده می‌شود که به دلیل کم بودن سیمان در مخلوط، دمای آن چندان اهمیت ندارد ولی بهتر است از مصرف سیمان با

## عمل آوری بتن

دماه بالاتر از  $75^{\circ}\text{C}$  خودداری شود. برای خنک کردن سنگدانه‌ها و آب راههای مختلفی وجود دارد. سنگدانه درشت را می‌توان با پاشیدن آب سرد و یا با عبور دادن هوای سرد از داخل سنگدانه مرطوب شده خنک نمود.

برای خنک کردن آب بهترین راه استفاده از قطعات یخ است. یک کیلوگرم یخ برای ذوب شدن و تبدیل به آب صفر درجه، 4 برابر بیشتر از مقدار گرمای آزاد شده برای  $20^{\circ}\text{C}$  کاهش در دماه همان مقدار آب را مصرف می‌کند. تمام یخ موجود باید قبل از پایان اختلاط ذوب شده باشد.

(۳) محافظت بتن از آفتاب بعد از ریختن آن در قالب، در غیر این صورت هنگام شب که دماه هوا پایین می‌آید، احتمال ترک خوردگی وجود دارد. در هوای خشک برای جلوگیری از گرم شدن بتن می‌توان به طور مرتب بتن را آب پاشی کرده و اجازه داد تا آب تبخیر شده و دماه بتن را کاهش دهد.

بحرانی‌ترین حالت از نظر گرما وضعیت آب و هوای گرم و خشک است. در مورد آب و هوای گرم و مرطوب هنوز اطلاعات جامع و عمومی بدست نیامده است و نتایج آزمایش‌ها در نقاط مختلف اختلاف زیادی با هم نشان می‌دهد. تنها چیزی که می‌توان گفت این است که عدم تبخیر آب در ابتدای عمر بتن معادل با عمل آوردن آن با رطوبت است که باعث کسب تدریجی مقاومت و کاهش آبرفتگی بتن می‌شود. همچنین بالا بودن دما در ابتداء، باعث کاهش مقاومت درازمدت بتن می‌شود ولی نتایج مطالعات نشان داده است که تاثیر دماه زیاد در کاهش مقاومت کمتر از عدم عدم آوری با رطوبت است.

## بتن ریزی در هوای سرد

قبل از بحث درباره نکات مهم در بتن ریزی در هوای سرد، باید تاثیر یخ‌بندان در روی بتن تازه مورد بررسی قرار گیرد. هیدراسیون سیمان می‌تواند حتی در دماهایی تا  $10^{\circ}\text{C}$ - نیز انجام

## تکنولوژی بتن

گیرد. بنابراین، این سؤال پیش می‌آید که دمای انجماد آب چه اهمیتی می‌تواند داشته باشد؟ اگر بتنی که هنوز نگرفته است در معرض یخ‌بندان قرار گیرد، آب اختلاط منجمد شده و در نتیجه حجم بتن کمی افزایش خواهد یافت. علاوه بر آن، چون آبی برای واکنش‌های شیمیایی فراهم نیست گیرش و سخت شدن بتن به تعویق خواهد افتاد. از اینجا می‌توان نتیجه گرفت که اگر بتن بلاfacله بعد از ریخته شدن منجمد شود گیرش در آن اتفاق نیفتاده و خمیر سیمان وجود نخواهد داشت که در اثر انجماد آب چار آسیب‌دیدگی شود. تا زمانی که دمای انجماد ادامه داشته باشد، فرایند گیرش نیز متوقف خواهد ماند. اگر بعداً دما بالا رود و یخ ذوب شود، بتن باید دوباره ویبره شود تا پس از آن گرفته و سخت شود بدون اینکه مقاومت آن کاهش یابد. با این حال، اگر در این مرحله ویبره انجام نشود، بتن با تخلخل بالایی گرفته و مقاومت آن بسیار کاهش خواهد یافت. ویبره مجدد پس از ذوب می‌تواند باعث ایجاد بتن با کیفیت رضایت‌بخش شود ولی چنین عملی قابل توصیه نیست مگر در موقعی که اجتناب ناپذیر باشد. اگر انجماد پس از گیرش بتن و قبل از اینکه مقاومت قابل توجهی پیدا کرده باشد روی دهد، انبساط ناشی از تشکیل یخ باعث آسیب‌دیدگی بتن و کاهش مقاومت آن می‌شود. ولی اگر بتن مقاومت کافی کسب کرده باشد می‌تواند در برابر انجماد ایستادگی کند، نه تنها به خاطر مقاومت در برابر فشار یخ، بلکه به علت اینکه قسمتی از آب اختلاط با سیمان ترکیب شده و قسمتی نیز در داخل حفره‌های کوچک قرار گرفته و نمی‌تواند متجمد شود. با این حال، تعیین اینکه این وضعیت چه موقع فرا می‌رسد مشکل است، زیرا گیرش و سخت شدن سیمان بستگی به دما در مرحله قبل از انجماد دارد. مطابق استاندارد ACI 306R-88 وقتی بتن به مقاومت 3.5 MPa (عمولاً پس از یک روز)، درجه اشباع آن به زیر مقدار بحرانی می‌رسد به شرطی که هیچ آبی از بیرون به بتن نفوذ نکرده باشد. در این مرحله قادر به تحمل یک مرحله انجماد و ذوب است.

به طور کلی هر قدر واکنش هیدراسیون سیمان پیشرفت‌تر و مقاومت بتن بالاتر باشد، در برابر انجماد کمتر آسیب‌پذیر است. این واقعیت را می‌توان با معیار حداقل سن لازم به منظور مقاوم

## عمل آوری بتن

بودن در برابر انجماد برای بتن نگهداری شده در یک دمای معین نشان داد. در جدول زیر منتخبی از میانگین ارقام داده شده در منابع مختلف داده شده است.

جدول ۹-۲- سنی که در آن انجماد اثر مخرب بر بتن ندارد (بر حسب روز)

سن (ساعت) وقتی که دمای نگهداری قبلی برابر باشد با:				نسبت w/c	نوع سیمان
20°C	15°C	10°C	5°C		
12	15	25	35	0.4	معمولی (تیپ یک)
17	25	35	50	0.5	
25	35	45	70	0.6	
7	10	15	20	0.4	زود سخت شونده (تیپ سه)
10	15	20	30	0.5	
15	20	30	40	0.6	

## عملیات بتن ریزی در هوای سرد

مطابق استاندارد ACI 306R-88 در بتن ریزی موقعی هوا سرد تلقی می شود که دو شرط زیر برقرار باشد: وقتی که میانگین حداقل و حداکثر دمای ثبت شده در سه روز متوالی کمتر از 5°C بوده و همچنین موقعی که دمای هوا در طی حداقل 12 ساعت از هر 24 ساعت برابر 10°C یا کمتر از آن باشد. تحت چنین شرایطی بتن معمولی نباید ریخته شود مگر آنکه دمای آن در عضوهای باریک (به ابعاد 300mm) حداقل 13°C و در عضوهای ضخیم تر (حداقل ابعاد 1.8m) حداقل 5°C باشد.

در بتن ریزی در هوای سرد می توان از سیمان زود سخت شونده و مخلوط های با عیار سیمان بالا و نسبت آب به سیمان کم استفاده نمود. همچنین تسریع کننده ها قابل استفاده می باشند ولی

## تکنولوژی بتن

در بتن مسلح از افزودنی دارای کلر نباید استفاده نمود. گرم کردن اجزای مخلوط نیز راه مناسبی برای بالا بردن دمای بتن است. آب را می‌توان به آسانی گرم نمود، ولی نباید دمای آن از حدود  $80^{\circ}\text{C}$  ~ 60 بیشتر شود چون ممکن است منجر به گیرش آنی سیمان شود. اگر گرم کردن آب کافی نباشد، باید سنگدانه‌ها را نیز با عبور دادن بخار آب از میان لوله‌های قرار گرفته در میان آن گرم نمود. بخار دادن مستقیم ممکن است منجر به افزایش ناخواسته میزان رطوبت آن شود. سنگدانه‌ها نباید بیشتر از حدود  $52^{\circ}\text{C}$  گرم شوند. توصیه می‌شود که دمای بتن هنگام گیرش  $21^{\circ}\text{C}$  ~ 7 باشد، دمای  $7^{\circ}\text{C}$  موقعی مناسب است که دمای محیط کمتر از  $1^{\circ}\text{C}$ - بوده و عضو بتنی نیز ضخیم باشد. دمای  $21^{\circ}\text{C}$  نیز موقعی مناسب است که دمای محیط کمتر از  $18^{\circ}\text{C}$ - بوده و ضخامت عضو بتنی کمتر از 300mm باشد. بعد از بتن‌ریزی، بتن باید حداقل به مدت 24 ساعت از یخ‌بندان محافظت شود. همچنین در دماهای پایین باید از آب پاشی بتن خودداری کرد تا بتن از حد اشباع پایین‌تر باقی بماند. این گفته ممکن است مخالف با توصیه معمول به نظر برسد، ولی باید توجه داشت که دمای پایین‌تر از  $10^{\circ}\text{C}$  باعث تبخیر چندانی نمی‌شود.

### حداقل زمان لازم قبل از باز کردن قالب‌ها

زمان لازم برای بتن به منظور کسب مقاومت لازم پیش از باز کردن قالب، بستگی به دمای محیط و نیز نوع عضو بتنی دارد. آنچه که مسلم است اینکه در هوای سردتر سرعت کسب مقاومت بتن به شدت کاهش می‌یابد و مدت زمان پیش از باز کردن قالب‌ها باید طولانی‌تر باشد. مقادیر جدول زیر را می‌توان به عنوان راهنمای کار برداشت. باید توجه داشت که مقادیر این جدول فقط برای بتن با سیمان معمولی و یا سیمان ضد سولفات مناسب است.

در مورد سیمان‌های مخلوط (سیمان سرباره و سیمان پوزولانی) به علت کند بودن کسب مقاومت در این سیمان‌ها، باید مقادیر جدول زیر را دو برابر نمود.

## عمل آوری بتن

جدول ۳-۹- زمان باز کردن قالب های عضو های بتنی

نوع قالب	و بیشتر و بین ۰ و ۲۵ (هر دمای $t^{\circ}\text{C}$ )	۷ $^{\circ}\text{C}$	۱۶ $^{\circ}\text{C}$	حداصل زمان قبل از باز کردن قالب دماهی سطح بتن
قالب های قائم ستون، دیوار و تیرهای بزرگ				$\frac{300}{t+10}$ ساعت
قالب کف دال ها	۶ روز	۴ روز	۱۸ ساعت	$\frac{100}{t+10}$ روز
قالب کف تیرها و چوب بست زیر دال ها	۱۵ روز	۱۰ روز		$\frac{250}{t+10}$ روز
چوب بست زیر قالب تیرها	۲۱ روز	۱۴ روز		$\frac{300}{t+10}$ روز

## خرابی‌ها و دوام بتن

دوام (پایایی) بتن (durability of concrete)

توانایی بتن برای مقاومت در برابر عوامل مضرّ خارجی را در طول مدت بهره‌برداری از آن، دوام بتن می‌نامند. مهم‌ترین عوامل مضرّ برای بتن عبارتند از:

(۱) عوامل فیزیکی: سایش، ضربه، انجماد، نفوذ

(۲) عوامل شیمیایی: سولفات‌ها، کلراید‌ها، دی‌اکسید کربن، واکنش قلیایی - سیلیکات.

عامل اصلی مؤثر در دوام بتن نفوذناپذیری آن در مقابل مایعات، گازها و یون‌ها می‌باشد. بنابراین خواصی از بتن که در نفوذپذیری آن تأثیر دارند، در دوام آن نیز تأثیر خواهند داشت، یعنی حجم کل فضاهای خالی (تخلخل) و اندازه نسبی آنها.

عوامل مؤثر در تخلخل بتن عبارتند از:

(۱) نسبت آب به سیمان (w/c). هر قدر این نسبت بالاتر باشد، تخلخل بیشتر است.

(۲) عیار و نوع سیمان: بالا بردن عیار سیمان و استفاده از سیمان‌های مخلوط با پوزولان و یا سرباره آهن‌گدازی باعث ایجاد بافت فشرده‌تر بتن و کاهش نفوذپذیری می‌شود.

(۳) درجه هیدرasiون: در صورت عمل آوردن صحیح بتن، واکنش‌های هیدرasiون ادامه پیدا کرده و تخلخل کاهش می‌یابد. عدم مراقبت از بتن مخصوصاً در سه روز اول بعد از بتونریزی

## تکنولوژی بتن

باعت افزایش تخلخل در ناحیه سطحی بتن می شود.

۴) تراکم: تراکم ناکافی بتن بعد از ریختن آن در قالب باعت افزایش تخلخل می شود.

۵) ترک های پلاستیک: ترک خوردنگی بتن در حالت پلاستیک در نتیجه مراقبت ناکافی، منجر به افزایش نفوذپذیری بتن می شود.

## واکنش سولفات ها با بتن

ترکیبات دارای سولفات مانند سولفات سدیم و سولفات میزیم، در خاک (مخصوصاً خاک رسی)، آب دریا، فاضلابها و در بعضی از سنگدانه ها یافت می شوند. هنگامی که تمرکز سولفات های محلول به بیش از ۰.۱% در خاک، معادل  $150 \text{ mg/liter}$  سولفات در آب بر سد، بتن در معرض خطر قرار دارد و اگر این تمرکز به بیش از ۰.۵% سولفات در خاک، معادل  $2000 \text{ mg/liter}$  در آب بر سد خطر آنها بسیار شدید خواهد بود. سولفات ها به دو طریق در بتن واکنش انجام می دهند:

۱) واکنش سولفات سدیم یا سولفات میزیم با هیدروکسید کلسیم موجود در بتن که باعت افزایش حجمی به میزان دو برابر می شود. این افزایش حجم در نتیجه تولید سنگ گچ می باشد. این واکنش به طور تدریجی باعت کاهش مقاومت و سفتی بتن شده و همراه با انبساط و ترک های ایجاد شده، در نهایت بتن را به جسمی پوک و فاقد چسبندگی تبدیل می کند.

۲) واکنش سولفات ها با  $\text{C}_3\text{A}$ : تمام سولفات ها این واکنش را انجام داده و با تولید ettringite باعت افزایش حجم پنج برابر می شوند. تاثیر این واکنش شدیدتر از واکنش نوع اول است.

## راه های جلوگیری از واکنش سولفات ها

عوامل مؤثر در واکنش سولفات ها عبارتند از: ۱) مقدار و نوع سولفات موجود. ۲) سطح آب زیرزمینی موجود و تغییرات آن در فصول مختلف. ۳) جریان آب زیرزمینی و میزان تخلخل

## خرابی‌ها و دوام بتن

### خاک. ۴) شکل سازه بتنی. ۵) کیفیت بتن

اگر نتوان مانع رسیدن سولفات‌ها به بتن شد، تنها راه مقابله استفاده از عامل ۵ است. مشاهده شده است که شدت واکنش در عضوهایی که تمام سطوح آنها در تماس با آب است کمتر از حالتی است که رطوبت امکان تبخیر دارد. بنابراین زیرزمین‌ها، آبروها، دیوارهای حایل و دال‌های بتنی در تماس با زمین بیشتر از فونداسیون‌ها و شمعها در معرض خطر سولفات‌ها قرار دارند. کیفیت بتن، مخصوصاً نفوذپذیری کم بهترین محافظت در برابر سولفات‌ها است. ضخامت زیاد بتن، عیار سیمان بالا، نسبت آب به سیمان کم و تراکم و عمل آوردن صحیح بتن ریخته شده مهم‌ترین عوامل پایین آوردن نفوذپذیری هستند. این‌می بیشتر با استفاده از سیمان ضد سولفات بدست خواهد آمد.

### واکنش قلیایی - سیلیکات (Alkali-Silicate reaction)

واکنش بین مواد سیلیسی احتمالی موجود در سنگدانه‌ها با یون‌های قلیایی موجود در سیمان پرتلند، واکنش قلیایی سیلیکات نام دارد. این واکنش منجر به تشکیل ژل قلیایی - سیلیکات شده و باعث افزایش حجم در بتن می‌شود. ماده قلیایی بتن عمدتاً منشأ کلسیم، پتاسیم یا سدیم دارد. مواد خام بکار رفته برای تولید سیمان پرتلند، معمولاً دارای اکسیدهای قلیایی به اندازه ۰.۲٪ تا ۱.۵٪ معادل  $\text{Na}_2\text{O}$  می‌باشند. با توجه به اینکه استانداردها میزان قلیایی‌های موجود در سیمان را به ۰.۶٪ محدود می‌کنند معمولاً این محدودیت برای جلوگیری از واکنش کافی است. ولی در بتن‌هایی با عیار بسیار بالا همین مقدار نیز ممکن است ایجاد خطر کند. بررسی‌ها نشان داده است که اگر مقدار قلیایی‌ها در یک متر مکعب بتن کمتر از ۳ kg باشد، واکنش روی نخواهد داد. عوامل مؤثر در واکنش قلیایی - سیلیکات عبارتند از:

- ۱) مقدار مواد قلیایی در سیمان و عیار سیمان.
- ۲) مقدار یون‌های قلیایی که از راه‌های دیگر به داخل بتن می‌رسند، مانند افزودنی‌های بتن،

## تکنولوژی بتن

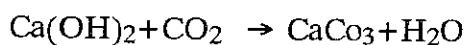
- سنگدانه‌های آلوده به نمک و نفوذ آب دریا یا محلول‌های نمکی ضدیغ به داخل بتن.
- ۳) مقدار، ابعاد و میزان فعال بودن مواد قلیایی فعال موجود در سنگدانه‌های بتن.
- ۴) مرطوب بودن سازه بتنی.
- ۵) دمای محیط

## روش‌های جلوگیری از واکنش قلیایی - سیلیکات

- ۱) کاهش مقدار قلیایی‌ها در سیمان به کمتر از ۰.۶٪ معادل  $\text{Na}_2\text{O}$
- ۲) شستشوی سنگدانه‌هایی که از نواحی نزدیک آب دریا بدست آمده باشد.
- ۳) مخلوط کردن سیمان با مواد پوزولانی و سرباره آهن‌گدازی.
- ۴) در صورت امکان و اقتصادی بودن، مخلوط کردن حدود ۲۰٪ تا ۳۰٪ سنگ آهک یا سنگدانه غیرفعال دیگر به سنگدانه مصرفی بتن.
- ۵) خشک نگهداشتن بتن، چون این واکنش تنها در صورت وجود رطوبت روی می‌دهد.

## واکنش دی‌اکسید کربن با بتن (کربناسیون)

بتن ماده‌ای متخلخل است، بنابراین دی‌اکسید کربن موجود در هوا می‌تواند به داخل آن نفوذ کند. در داخل بتن واکنشی بین دی‌اکسید کربن و هیدروکسید کلسیم روی خواهد داد. به صورت خیلی ساده می‌توان این واکنش را به صورت زیر نمایش داد:



چون عمدتاً وجود هیدروکسید کلسیم است که باعث بالا بودن PH بتن می‌شود بعد از کربناسیون کامل بتن مقدار PH به کمتر از ۹ خواهد رسید. باید توجه داشت که دی‌اکسید کربن از سطح بتن به داخل آن نفوذ می‌کند، در نتیجه کربناسیون نیز از سطح شروع شده و به داخل پیش می‌رود و رفته از شدت آن در عمق بتن کاسته می‌شود و عامل تعیین‌کننده در این واکنش،

## خوابی‌ها و دوام بتن

تخلخل بتن است. واکنش کربناتیون تنها در حفره‌های پراز هوا می‌تواند اتفاق افتد، بنابراین در بتن اشباع شده با آب روی نخواهد داد.

### نفوذ کلراید‌ها به داخل بتن

کلراید‌ها توانایی از بین بردن لایه غیرفعال روی فولاد را حتی در مقادیر PH بالا دارند. مقدار کلراید لازم برای شروع خوردگی بستگی به PH محلول در تماس با فولاد دارد. کلراید‌ها از سه منبع اصلی وارد بتن می‌شوند: از کلرید کلسیم اضافه شده به بتن به عنوان افزودنی تسريع‌کننده، از نمک‌های ضدیخ که در زمستان روی سطح پل‌های بتن آرمه پاشیده می‌شوند، و به وسیله آب دریا. میزان تمرکز یون‌های کلراید در آب دریا چنان بالاست که حتی در بتن‌های با کیفیت بالا تا عمق زیادی که بیشتر از لایه محافظت روی آرماتورهاست نفوذ می‌کند. در نتیجه تروختشک شدن متوالی بتن، هر بار مقداری کلراید در داخل بتن به جای می‌ماند.

### خوردگی فولاد در داخل بتن (steel corrosion)

عوامل مؤثر در خوردگی فولاد عبارتند از:

۱) پایین آمدن PH از حدود ۱۰.۵ در نتیجه نفوذ دی‌اکسید کربن (PH بتن خوب در حدود ۱۲.۸ می‌باشد). و در نتیجه از بین رفتن لایه غیرفعال و محافظت روی میلگردهای فولادی. همچنین نفوذ کلراید‌ها به داخل بتن و رسیدن آنها به مجاورت فولاد می‌تواند باعث از بین رفتن لایه محافظت و شروع واکنش خوردگی شود.

۲) وجود اکسیژن و آب

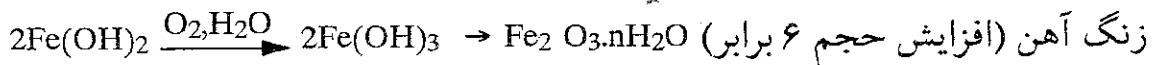
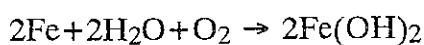
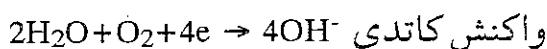
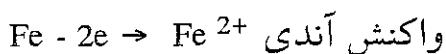
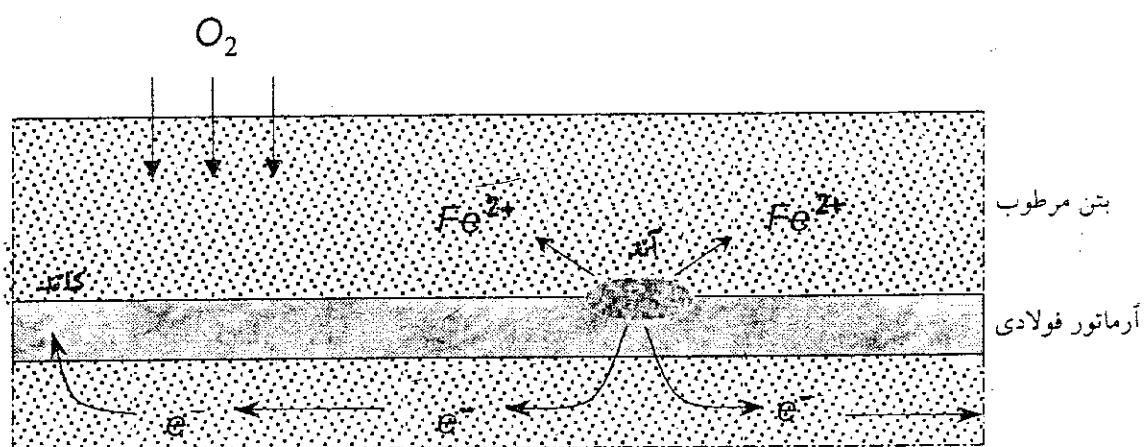
### مکانیزم خوردگی فولاد

وجود دو فلز غیرهمنام در داخل یک الکتروولیت باعث ایجاد جریان الکتریکی بین آن دو

## تکنولوژی بتن

می شود. با اینکه فولاد معمولاً تنها فلز بکار رفته در بتن است ولی وجود اختلاف جزئی در ترکیب فولاد در نقاط مختلف آن باعث ایجاد کاتد ها و آند های موضعی می شود و در صورتی که بتن نیز تر باشد به عنوان الکترولیت عمل می کند. مطابق شکل زیر یون های آهن  $\text{Fe}^{2+}$  آزاد شده از آند، با یون های هیدروکسید  $(\text{OH})^-$  آزاد شده از کاتد با هم ترکیب شده و هیدروکسید آهن (زنگ آهن) تولید می کنند که باعث انبساط حجم و ترک خوردگی بتن شده و از طرف دیگر با کاهش قطر میلگرد از مقاومت آن می کاهند.

شکل ۱-۱۱- واکنش خوردگی فولاد

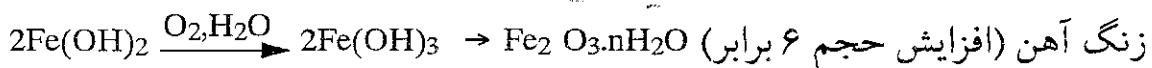
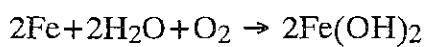
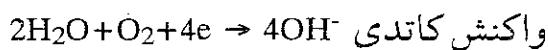
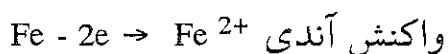
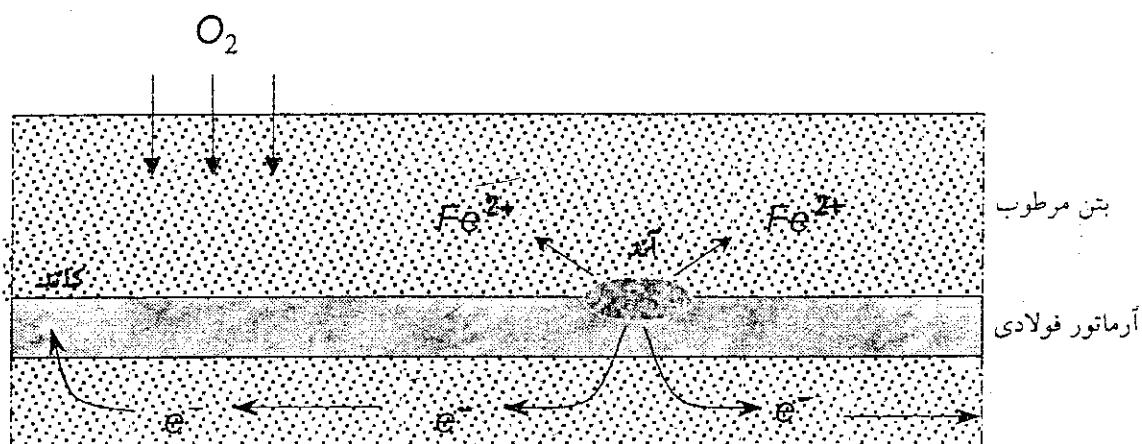


وجود اکسیژن برای تشکیل زنگ آهن و همچنین وجود آب برای عمل الکترولیت ضروری است، بنابراین در این موارد خوردگی اتفاق نخواهد افتاد: ۱) اگر بتن کاملاً خشک باشد. ۲) بتن

## تکنولوژی بتن

می شود. با اینکه فولاد معمولاً تنها فلز بکار رفته در بتن است ولی وجود اختلاف جزئی در ترکیب فولاد در نقاط مختلف آن باعث ایجاد کاتد ها و آند های موضعی می شود و در صورتی که بتن نیز تر باشد به عنوان الکترولیت عمل می کند. مطابق شکل زیر یون های آهن  $\text{Fe}^{2+}$  آزاد شده از آند، با یون های هیدروکسید  $(\text{OH})^-$  آزاد شده از کاتد با هم ترکیب شده و هیدروکسید آهن (زنگ آهن) تولید می کنند که باعث انبساط حجم و ترک خوردگی بتن شده و از طرف دیگر با کاهش قطر میلگرد از مقاومت آن می کاهند.

شکل ۱۱-۱- واکنش خوردگی فولاد



وجود اکسیژن برای تشکیل زنگ آهن و همچنین وجود آب برای عمل الکترولیت ضروری است، بنابراین در این موارد خوردگی اتفاق نخواهد افتاد: ۱) اگر بتن کاملاً خشک باشد. ۲) بتن

کاملاً با آب اشباع باشد، چون فاقد اکسیژن آزاد است. عوامل تعیین‌کننده در کنترل خوردگی عبارتند از ضخامت لایه بتن روی فولاد و نفوذپذیری لایه بتن. به همین علت در آیین‌نامه‌های بتن به کیفیت بتن و ضخامت پوشش بتن روی میلگردهای فولادی اهمیت فراوان داده شده است.

### روش‌های جلوگیری از خوردگی فولاد

- ۱) نفوذناپذیر کردن بتن با بالا بردن کیفیت آن. به این منظور بتن با نسبت آب به سیمان پایین به کار رفته و عمل آوری آن به دقت و به مدت طولانی انجام می‌شود.
- ۲) استفاده از لایه محافظ روی بتن، مثلاً استفاده از پوشش آسفالت کافی روی پل‌های بتنی برای جلوگیری از نفوذ کلراید‌های موجود در نمک‌های ضد یخ‌بندان که در زمستان روی جاده پاشیده می‌شود.
- ۳) ایزوله کردن فولاد از خوردگی، با بکار بردن فولاد گالوانیزه و یا فولاد با روکش اپوکسی. استفاده از فولاد با روکش اپوکسی مخصوصاً در مناطقی که خطر نفوذ کلراید‌ها بالاست یک راه حل شناخته شده است. البته استفاده از روکش اپوکسی مقداری از پیوستگی فولاد به بتن را کاهش می‌دهد که در محاسبات بتن آرمه باید به آن توجه داشت. همچنین هنگام ختم کاری آرماتورها باید دقت کافی برای جلوگیری از شکستگی این پوشش به عمل آید.
- ۴) روش حفاظت الکترو شیمیایی (حفاظت کاتدی) که در ادامه توضیح داده خواهد شد.
- ۵) افزایش ضخامت لایه بتن روی آرماتورهای فولادی. بررسی‌های انجام شده روی سازه‌های بتنی نشان داده است که در بسیاری از موارد ضخامت پوشش بتنی روی آرماتورها به طور جدی کنترل نمی‌شود و پوشش موجود کمتر از مقدار پیش‌بینی شده آن است. برای نشان دادن اهمیت پوشش بتنی کافی است به این نکته اشاره شود که در یک بتن با کیفیت خوب و محافظت شده، پوشش ۱۰mm می‌تواند به مدت ۱۰ سال و پوشش ۳۰mm به مدت ۱۳۵ سال محافظت در برابر نفوذ دی‌اکسید کربن به داخل بتن و مجاورت فولاد ایجاد کند.

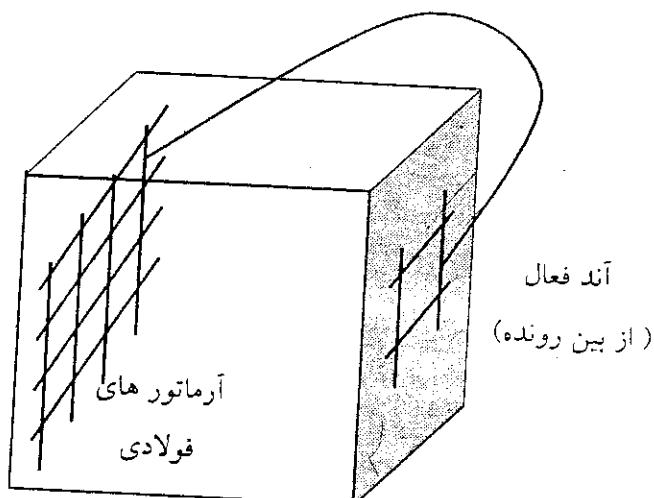
## تکنولوژی بتن

روش حفاظت الکتروشیمیایی یا حفاظت کاتدی (Cathodic protection) عبور دادن جریان از یک منبع خارجی، تضمین می‌کند که پتانسیل فولاد در جهت منفی باشد. در نتیجه تمام سطح بتن به صورت کاتد درآمده و کاتدها و آندهای موضعی در فولاد از بین می‌روند.

حفاظت کاتدی به دو صورت انجام می‌گیرد:

۱) استفاده از آندهای از بین رونده (Sacrificial anodes): مانند استفاده از آلیاژهای فعال منیزیم، آلمینیوم و روی برای ایجاد جریان الکتریکی با فولاد. در نتیجه آند به تدریج حل شده و از بین می‌رود و بعد از مدتی باید جایگزین شود. این روش در مناطقی به کار می‌رود که بتن مرطوب باشد (نزدیک به حالت اشباع).

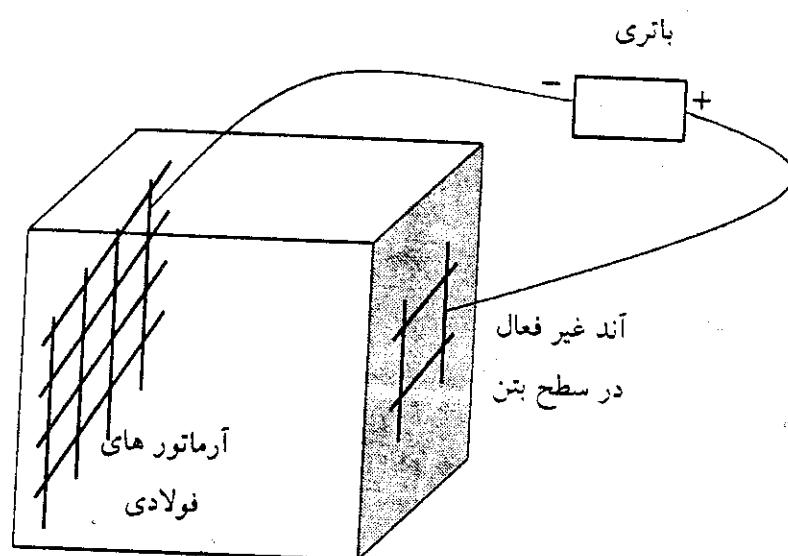
شکل ۲-۱۱- روش حفاظت کاتدی با آند از بین رونده



۲) استفاده از جریان برانگیخته شده (Impressed current)، در این روش آندها از فلزات با پتانسیل نزدیک به فولاد انتخاب شده و خود نمی‌توانند جریان ایجاد کنند، بلکه جریان لازم به وسیله یک منبع الکتریکی مانند باتری اتومبیل تأمین می‌شود.

## خرابی‌ها و دوام بتن

شکل ۳-۱۱- روش حفاظت کاتدی با جریان برانگیخته شده



## طرح اختلاط بتن

باید توجه داشت که طراحی دقیق مخلوط بتن به معنی واقعی غیرممکن است، زیرا مواد به کار رفته در ساخت بتن از نظر خواص بسیار متغیر می‌باشند و نمی‌توان آنها را به طور کامل و به صورت عددی در محاسبات دخالت داد. بنابراین، منظور از طرح اختلاط بتن ارائه یک تخمین آگاهانه از حالت بهینهٔ مخلوط اجزای تشکیل‌دهنده است.

### مراحل طرح اختلاط بتن به روش DOE (Department of Environment)

روشی است که در انگلستان به کار می‌رود. در این روش اجزای تشکیل‌دهندهٔ مخلوط بتن بر حسب وزن در یک متر مکعب بتن تعیین می‌شود. طرح اختلاط بتن به روش DOE مطابق مراحل زیر و با استفاده از نمودارها و جداول ضمیمه انجام می‌شود.

(۱) تعیین مقدار آب آزاد یا نسبت آب به سیمان (w/c): با معلوم بودن مقاومت مشخصه بتن (f<sub>c</sub>) موردنیاز، مقاومت میانگین هدف (f<sub>m</sub>) که مقداری بالاتر از مقاومت مشخصه است، از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$f_m = f_c + 1.64 \sigma$$

σ عبارتست از انحراف معیار آزمایش‌های مقاومت بتن و مقدار آن معمولاً چنین تعیین

می‌شود:

## تکنولوژی بتن

### انحراف معیار ( $\sigma$ (MPa)

4 ~ 5	کنترل خوب، نظارت دقیق
5 ~ 7	کنترل متوسط، نظارت گاه به گاه
7 ~ 8 و بیشتر	کنترل ضعیف، پیمانه‌بندی غیردقیق، بدون نظارت

در ادامه مراحل، مقاومت میانگین هدف بکار می‌رود. با دانستن نوع سیمان مورد نیاز و سنگدانه موجود، از جدول (۱-۸) مقاومت فشاری در سن مورد نظر (معمولاً ۲۸ روزه) با نسبت آب به سیمان  $0.5 = \frac{W}{C}$  تعیین می‌شود. باید توجه داشت که  $0.5 = \frac{W}{C}$  مقدار فرضی اولیه است نه مقدار نهایی.

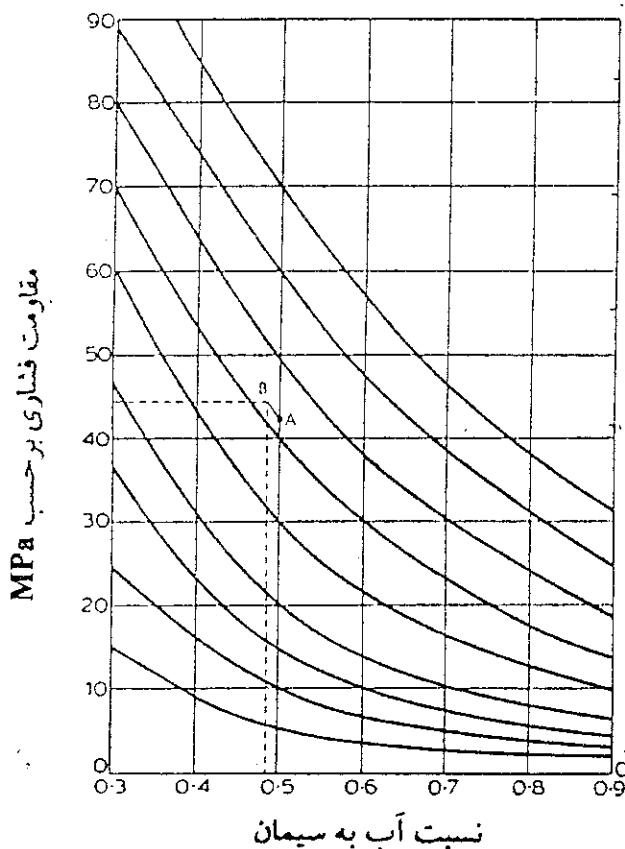
با استفاده از دو مشخصه مقاومت فشاری (از جدول ۱-۸) و نسبت  $0.5 = \frac{W}{C}$  وارد نمودار (۱-۸) شده و نقطه‌ای با این مشخصات تعیین شده و در صورت لزوم با درونیابی بین منحنی‌های موجود، شاخه‌ای که از این نقطه می‌گذرد رسم می‌شود. با استفاده از این شاخه جدید منحنی مقدار  $\frac{W}{C}$  متناظر با مقاومت میانگین هدف که قبلاً محاسبه شده است تعیین می‌شود. اگر نسبت  $0.5 = \frac{W}{C}$  بدست آمده از مقدار حداقل مجاز برای دوام بتن (از جداول ۳-۸ یا ۴-۸ یا ۵-۸) بیشتر باشد، مقدار کمتر و مجاز انتخاب می‌شود و در نتیجه بتنی با مقاومت بیش از نیاز انتخاب می‌شود.

جدول ۱-۸: تعیین مقاومت بتن با نسبت آب به سیمان ۰.۵

مقاومت فشاری بتن در سن مورد نظر (MPa)				نوع سنگدانه درشت	نوع سیمان
۹۱ روز	۲۸ روز	۷ روز	۳ روز		
49	42	30	22	غیرشکسته	تیپ ۱ و تیپ ۵
56	49	36	27	شکسته	
54	48	37	29	غیرشکسته	تیپ ۳
61	55	43	34	شکسته	

## طرح اختلاط بتن

نمودار ۱-۸ - تعیین نسبت آب به سیمان



(۲) با استفاده از مقدار کارایی موردنیاز برای بتن (بر حسب اسلامپ)، و با دانستن نوع (شکسته یا غیرشکسته بودن) و حداقل بعد سنگدانه‌های موجود، از جدول (۲-۸) مقدار آب مورد نیاز بتن (W) تعیین می‌شود.

جدول ۲-۸ - تعیین مقدار آب بتن

مقدار آب بتن (کیلوگرم بر مترمکعب)					سنگدانه	
				اسلامپ (mm)	نوع	حداکثر اندازه (mm)
60-180	30-60	10-30	0-10		غیرشکسته	10
225	205	180	150		شکسته	
250	230	205	180		غیرشکسته	20
195	180	160	135		شکسته	
225	210	190	170		غیرشکسته	40
175	160	140	115		شکسته	
205	190	175	155			

## تکنولوژی بتن

اگر سنگدانه‌های ریز و درشت از نوع مختلف باشند (شکسته و غیرشکسته)، مقدار آب از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$W = \frac{2}{3} W_f + \frac{1}{3} W_c$  و  $W_f$  مقدار آب مناسب با سنگدانه‌های درشت و ریز نوع سنگدانه مشخص شده در جدول (۲-۸) مربوط به کل سنگدانه‌هاست نه فقط سنگدانه درشت. در واقع سنگدانه ریز سطح مخصوص بیشتری دارد و در نتیجه تاثیر آن در کارایی بیشتر است و به همین دلیل است که ضریب  $\frac{2}{3}$  برای سنگدانه ریز به کار رفته است.

۳) تعیین عیار سیمان (C) با استفاده از این رابطه انجام می‌شود:

$$C = \frac{W}{\frac{w}{c}}$$

این عیار باید با مقدار حداکثر ( $550 \text{ kg/m}^3$ ) و حداقل مشخص شده آئین‌نامه در جداول ۳-۸ و ۴-۸ مقایسه شود. اگر مقدار محاسباتی کمتر از مقدار جدول باشد، مقدار بیشتر از جدول انتخاب شده و در نتیجه با کاهش  $w/c$  مقاومت بتن بیشتر از مقدار میانگین هدف خواهد بود. اگر مقدار محاسباتی بیشتر از مقدار حداکثر ذکر شده باشد، در این صورت مقاومت مشخص شده با کارایی انتخاب شده و سنگدانه موردنظر همخوانی ندارد و باید تغییراتی در نوع سیمان یا نوع و ابعاد سنگدانه‌ها داده شود.

جدول ۳-۸- شرایط آئین‌نامه BS 8110 برای تضمین دوام بتن غیرمسلح

شرایطی محیطی	حداکثر مجاز $W/C$	حداقل عیار سیمان برای سنگدانه با بعد:					حداقل مقاومت (MPa)
		40mm	20mm	14mm	10mm		
ملایم	0.80	150	180	200	220	20	
متوسط	0.65	245	275	295	315	30	
شدید	0.60	270	300	320	340	35	
خیلی شدید	0.55	295	325	345	365	35	
فوق العاده شدید	0.50	320	350	370	390	45	

## طرح اختلاط بتن

جدول ۴-۸ - شرایط آینه نامه BS8110 برای بتن مسلح

شرایط محیطی	پوشش اسمی بتن روی آرماتور (mm)				
ملايم	25	20	20	20	20
متوسط	—	35	30	25	20
شدید	—	—	40	30	25
خیلی شدید	—	—	50	40	30
فوق العاده شدید	—	—	—	60	50
W/C	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
حداقل عیار سیمان	275	300	325	350	400
حداقل مقاومت بتن (MPa)	30	35	40	45	50

● توضیح این جدول برای حداکثر بعد سنگدانه 20mm است. برای اندازه های دیگر عیار سیمان به ترتیب زیر اصلاح شود:

10mm : +40 kg      14mm : +20kg      40mm : -30kg (می توان)

● برای بتن پیش تبیده حداقل عیار 300 کیلوگرم است.

### تعريف شرایط محیطی

ملايم: هیچ عامل شیمیایی مهاجم، رطوبت، انجماد و تماس با خاک مهاجم وجود ندارد.

متوسط: بتن در معرض رطوبت و گاهی میعان قرار دارد.

شدید: بتن در معرض رطوبت و میعان شدید و تروخشک شدن متناوب و انجماد متوسط قرار دارد.

خیلی شدید: بتن در معرض گازها، مایعات خورنده و رطوبت همراه با انجماد شدید قرار دارد.

فوق العاده شدید: در معرض فرسایش شدید، عبور وسایل نقلیه، آب اسیدی جاری، ناحیه جذر و مدبی اسکله ها و قطعات معلق در آب، رویه محافظت نشده پل ها

## تکنولوژی بتن

جدول ۵-۸ - شرایط آیین نامه ACI 318-83 برای بتن در معرض سولفات‌ها

شدت خطر سولفات‌ها	میزان سولفات محلول در آب، موجود در خاک (٪ جرم)	میزان سولفات موجود در آب، قسمت در میلیون (ppm)	نوع سیمان مورد نیاز	حداکثر نسبت W/C
ناچیز	0.00-0.10	0-150	دلخواه	-
متوسط (آب دریا)	0.10-0.20	150-1500	تیپ ۲، پوزولانی، یا سیمان سرباره‌ای	0.50
شدید	0.20-2.00	1500-10000	تیپ ۵ (ضد سولفات)	0.45
خیلی شدید	> 2.00	> 10000	تیپ ۵ همراه با پوزولانی	0.45

۴) با معلوم شدن مقدار آب و سیمان، مقدار سنگدانه مصرفی را می‌توان از رابطه زیر تعیین

نمود:

$$V (m^3) = 1 - \frac{C}{3150} - \frac{W}{1000} \quad , \quad A(kg / m^3) = V \times \gamma_a$$

$V$  = حجم سنگدانه‌ها،  $A$  = وزن کل سنگدانه‌ها،  $3150 kg/m^3$  = وزن مخصوص سیمان،

$\gamma_a = 2600 kg/m^3$  = وزن مخصوص آب،  $1000 kg/m^3$  = وزن مخصوص سنگدانه غیرشکسته،

$\gamma_a = 2700 kg/m^3$  = وزن مخصوص سنگدانه شکسته.

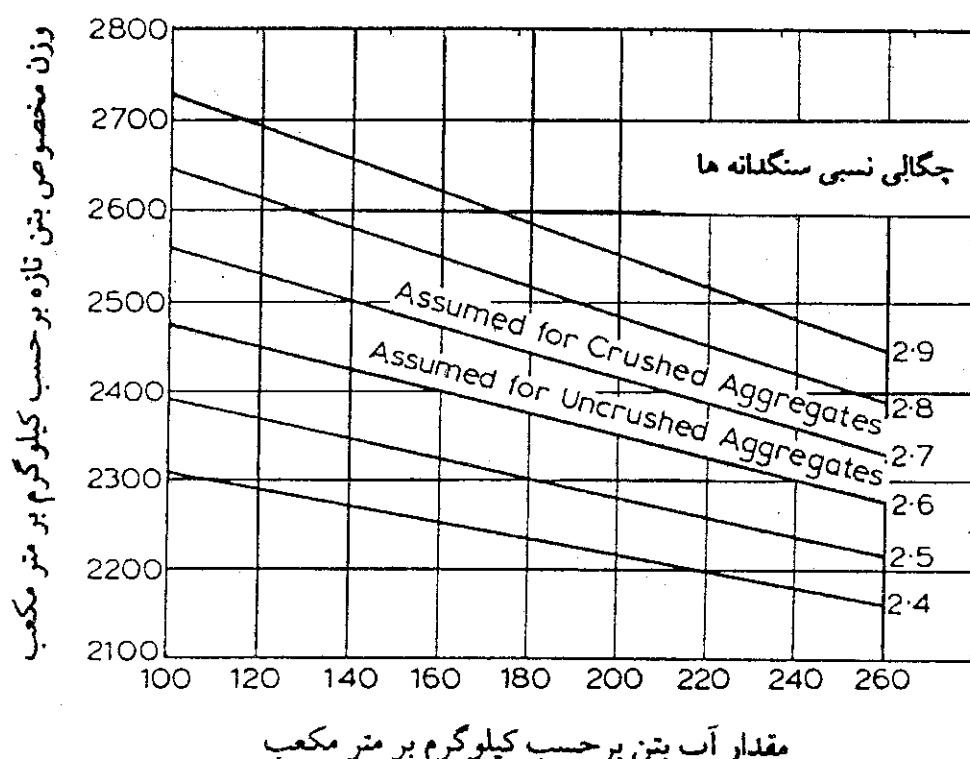
به جای استفاده از رابطه فوق می‌توان از نمودار (۲-۸) با توجه به چگالی نسبی سنگدانه‌ها

(2.6 یا 2.7)، چگالی بتن را بدست آورده و با کم کردن وزن آب و سیمان، وزن سنگدانه‌ها را

بدست آورد.

## طرح اختلاط بتن

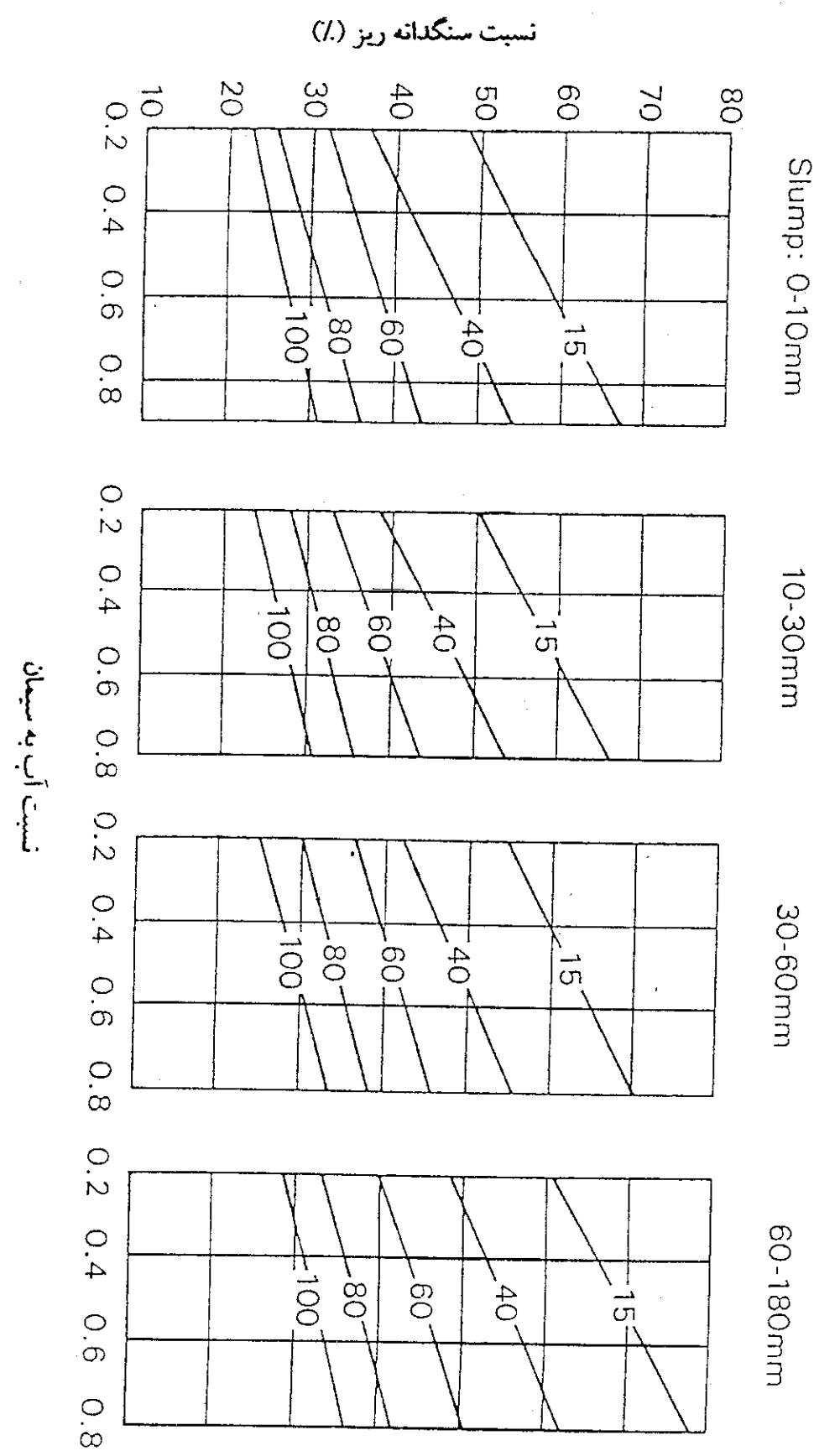
نمودار ۲-۸- تعیین وزن مخصوص بتن تر



مقدار آب بتن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

(۵) تعیین مقدار سنگدانه‌های درشت و ریز (شن و ماسه): با استفاده از یکی از نمودارهای (۳-۸)، بسته به حداکثر بعد سنگدانه‌های درشت، و با دانستن اینکه چند درصد از سنگدانه‌های ریز از الک N0.30 عبور می‌کند (اعداد داخل منحنی ۱۰, ۴۰, ۶۰, ۸۰, ۱۰۰) و با معلوم بودن نسبت W/C در محور افقی، درصد وزنی سنگدانه‌های ریز به کل سنگدانه‌ها از محور قائم تعیین می‌شود. با دانستن این نسبت وزن سنگدانه‌های درشت و ریز قابل تعیین است.

نمودار ۸-۳-۱ - نسبت سنگدانه ریز (حداکثر اندازه درشت دانه) (10mm)



طرح اختلاط بتن

نمودار ۸-۳-۲ - نسبت سنگدانه ریز (حداکثر اندازه درشت دانه mm)

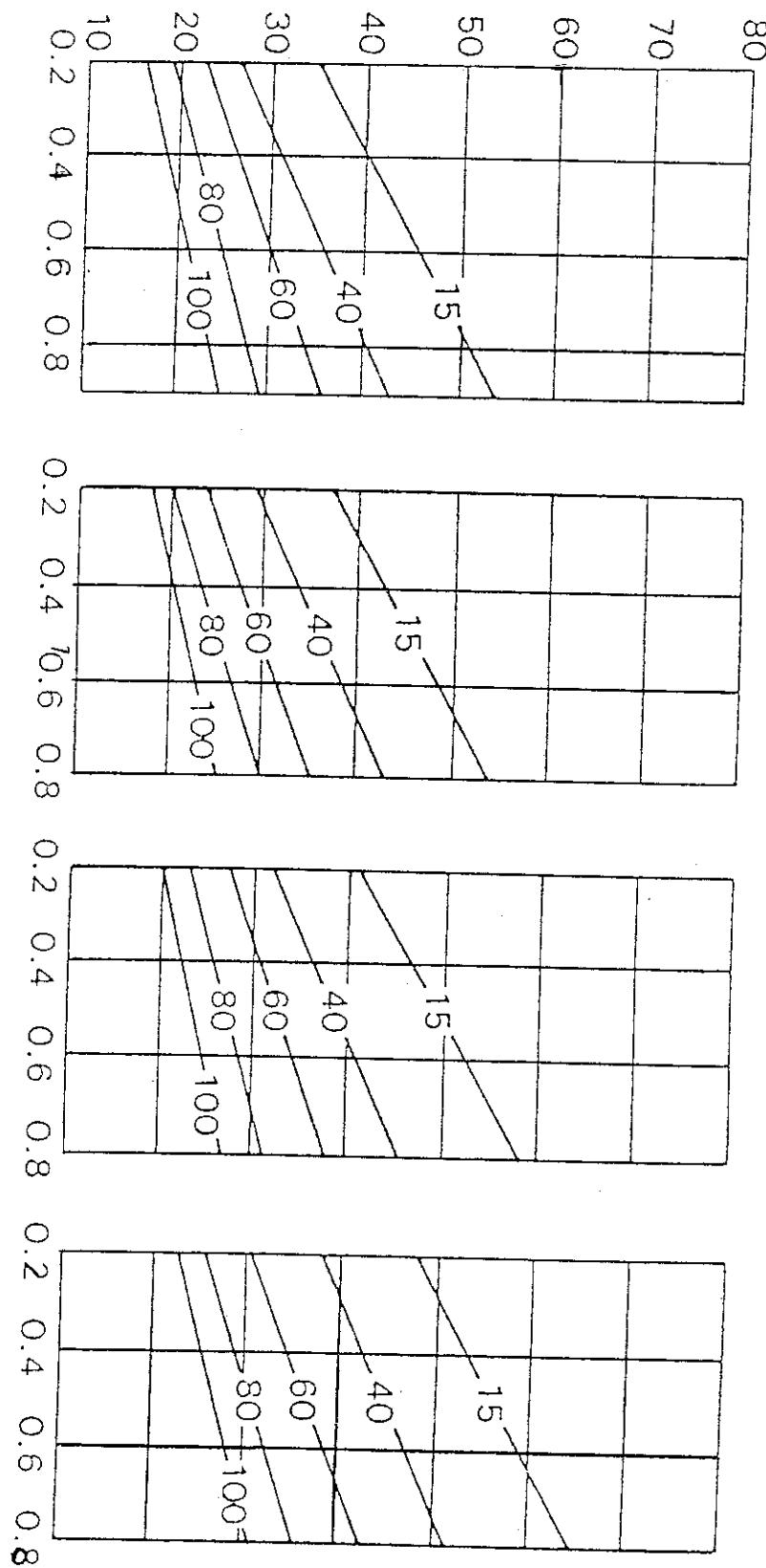
Slump: 0-10mm

10-30mm

30-60mm

60-180mm

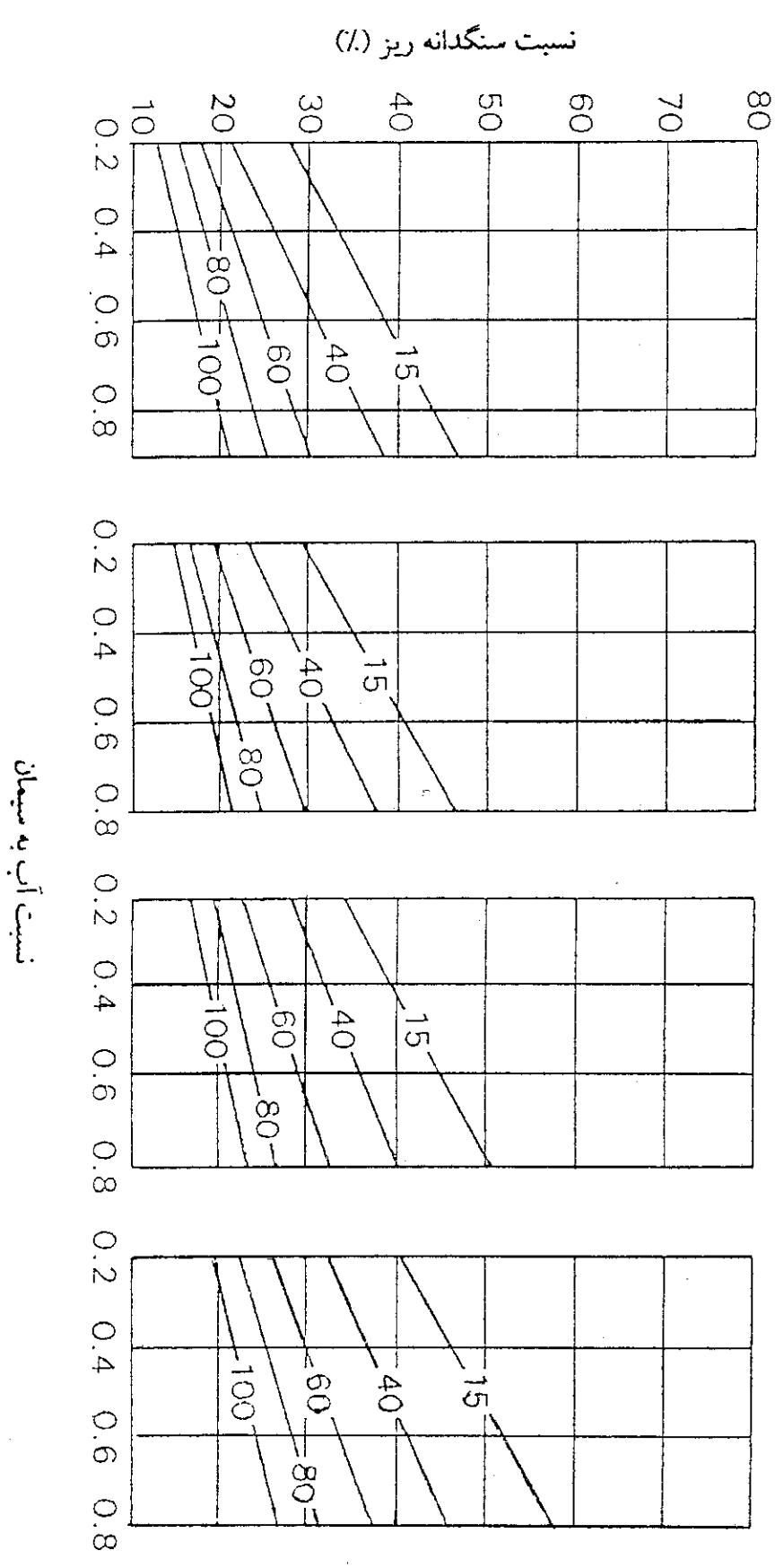
نسبت سنگدانه ریز (%)



نسبت آب به سیمان

نمودار ۸-۳-۲-۳ - نسبت سنگدانه ریز (حداکثر اندازه درشت دانه 40mm)

Slump: 0-10mm      10-30mm      30-60mm      60-180mm



تکثیری بتن

## طرح اختلاط بتن

### اصلاحات در طرح اختلاط برای بتن حباب دار

چون وجود حباب هوا باعث کاهش مقاومت و چگالی بتن می شود، اصلاحات زیر در طرح اختلاط بتن حباب دار به عمل می آید:

$$f_{ma} = \frac{f_c + 1.64 \sigma}{1 - 0.055 a}$$

$f_{ma}$  = مقاومت میانگین هدف بتن حباب دار

$a$  = درصد حجمی هوا بتن

$$\gamma_{c,air} = \gamma_c - 10 \times a \times RD_a$$

$\gamma_{c,air}$  = وزن مخصوص بتن حباب دار در حالت تر (kg / m<sup>3</sup>)

$\gamma_c$  = وزن مخصوص بتن تر معمولی (kg / m<sup>3</sup>)

$RD_a$  = چگالی نسبی سنگدانه (2.6 ~ 2.7)

همچنین موقع استفاده از جدول (۲) مقدار کارایی برای بتن حباب دار در یک سطح پایین تر انتخاب می شود، (مثلاً به جای اسلامپ 10-30mm، اسلامپ 0-10mm انتخاب می شود).

### مثال ۱

اگر مقاومت مشخصه 28 روزه مورد نیاز MPa 33 و وضعیت تولید بتن دارای کنترل متوسط و نظارت گاه به گاه باشد ( $\sigma = 6$  MPa)، بتن را با مشخصات زیر طراحی کنید:

نوع سیمان: پرتلند معمولی، سنگدانه درشت غیرشکسته با حداقل اندازه 10mm، سنگدانه ریز غیرشکسته با 90% عبوری از الک N0.30، اسلامپ 10-30mm، شرایط محیطی متوسط، پوشش بتنی روی آرماتورها 35mm

حل: از جدول (۴-۸) برای شرایط محیطی متوسط حداقل  $w/c$  برابر 0.6 و حداقل عیار سیمان برابر  $kg/m^3 = 340 + 40 + 300 = 370$  kg/m<sup>3</sup> خواهد بود. همچنین حداقل عیار سیمان برابر  $550$  kg/m<sup>3</sup> می باشد.

## تکنولوژی بتن

مرحله ۱) از جدول (۱-۸) با نسبت  $w/c = 0.5$  مقاومت ۲۸ روزه بتن برای سنگدانه غیرشکسته و سیمان پرتلند معمولی برابر  $42 \text{ MPa}$  می‌باشد. از طرف دیگر مقاومت میانگین هدف برابر است با  $f_m = 43 \text{ MPa} = 43 \text{ MPa}$ . در روی نمودار (۱-۸) منحنی عبورکننده از نقطه  $fcu = 42 \text{ MPa}$  و  $w/c = 0.5$  را رسم کرده و از روی این منحنی مقدار  $w/c$  مناسب برای  $fcu = 43 \text{ MPa}$  و  $w/c = 0.49$  بدست می‌آید که در حد مجاز است و انتخاب می‌شود.

مرحله ۲) از جدول (۲-۸) برای سنگدانه  $10 \text{ mm}$  و غیرشکسته و اسلامپ  $10-30 \text{ mm}$  مقدار آب لازم برابر است با  $180 \text{ kg/m}^3$ .

مرحله ۳) عیار سیمان برابر است با  $367 = 370 \text{ kg/m}^3 \div 0.49 = 370 \text{ kg/m}^3$  که در محدوده مجاز است (کمتر از  $550$  و بیشتر از  $340$ ).

مرحله ۴) از نمودار (۲-۸) با در نظر گرفتن چگالی نسبی  $SSD$  برابر  $2.6$  برای سنگدانه غیرشکسته و مقدار آب  $180 \text{ kg/m}^3$ ، وزن مخصوص بتن برابر است با  $2380 \text{ kg/m}^3$  در نتیجه وزن کل سنگدانه برابر است با  $2380 - 370 - 180 = 1830 \text{ kg/m}^3$ .

مرحله ۵) از نمودار (۱-۳-۸) برای اسلامپ  $10-30 \text{ mm}$  با  $w/c = 0.49$  و با توجه به  $90\%$  عبوری ریزدانه از الک No.30، از محور قائم نمودار نسبت ریزدانه به کل سنگدانه برابر  $0.30$  خواهد بود. در نتیجه داریم:

$$\text{وزن ماسه (ریزدانه)} = 1830 \times 0.30 = 549 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{وزن شن (درشت دانه)} = 1830 \times 0.70 = 1281 \text{ kg/m}^3$$

پس طرح اختلاط بتن به ترتیب زیر خواهد بود:

$$\text{سیمان} = 370 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{آب} = 180 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{شن} = 1281 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{ماسه} = 549 \text{ kg/m}^3$$

## طرح اختلاط بتن

### مثال ۲

بتن برای فونداسیون در معرض خطر شدید سولفاتها، با مقاومت 28 روزه 25MPa و با اسلامپ 100mm موردنیاز است. حداکثر بعد دانه‌های شن 40mm بوده و 50% ماسه از الک No.30 عبور می‌کند. وضعیت تولید بتن با کنترل متوسط و با نظارت گاه به گاه است ( $\sigma_a = 6\text{ MPa}$ ) حل: در حالت حمله شدید سولفاتها مطابق جدول (۵-۸) سیمان ضدسولفات به کار می‌رود و حداکثر  $w/c$  برابر 0.45 است.

مقادیر میانگین هدف برابر است با  $25 + 1.64 \times 6 = 35 \text{ MPa}$  از جدول (۱-۸)  $fcu = 49 \text{ MPa}$  می‌باشد. از نمودار (۱-۸) منحنی مربوط به  $w/c = 0.50$  و  $fcu = 49 \text{ MPa}$  را رسم می‌کنیم. روی این منحنی  $w/c$  متناظر با مقاومت  $fcu = 35 \text{ MPa}$  برابر حدود 0.65 بدست می‌آید که بیش از حد مجاز است، بنابر این  $w/c = 0.45$  انتخاب می‌شود. از جدول (۲-۸) با اسلامپ 100mm و سنگدانه شکسته 40mm مقدار آب لازم بتن برابر است با  $205 \text{ kg/m}^3$  و در نتیجه عیار سیمان  $455 \text{ kg/m}^3 = 455 \div 0.45 = 205$  بدست می‌آید. از نمودار (۲-۸) چگالی بتن برابر  $2420 \text{ kg/m}^3$  است و از آنجا وزن کل سنگدانه تعیین می‌شود.

از نمودار (۳-۸) نسبت وزن ماسه به کل سنگدانه برابر با 0.35 تعیین شده و در نتیجه، وزن ماسه مصرفی  $1760 \times 0.35 = 616 \text{ kg/m}^3$  وزن شن مصرفی  $1760 \times 0.65 = 1144 \text{ kg/m}^3$

طرح اختلاط بتن:

(سیمان ضد سولفات  $455 \text{ kg/m}^3$ )

(آب  $205 \text{ kg/m}^3$ )

(شن  $1144 \text{ kg/m}^3$ )

(ماسه  $616 \text{ kg/m}^3$ )

## طرح اختلاط بتن به روش ACI

طرح اختلاط بتن و بدست آوردن نسبت اجزاء آن با روش ACI به دو صورت وزنی و یا حجمی انجام می‌گیرد. هر دو روش وزنی و حجمی دارای هفت مرحله می‌باشند که در شش مرحله کاملاً یکسان بوده و صرفاً در مرحله هفتم یعنی در تعیین وزن ماسه اندکی متفاوت خواهند بود. از اینرو ابتدا شش مرحله مشترک را توضیح داده و در مرحله هفتم به تفکیک، دو روش وزنی و حجمی تشریح شده‌اند. شایان ذکر است در این روشهای فرضیاتی وجود دارند که ذیلاً آمده است.

### فرضیات کلی:

- ۱- مصالح مصرفی شن و ماسه باید در محدوده ASTM-C33 قرار گیرند. شکل
- ۵ - (۱۰) از استاندارد فوق الذکر اقتباس شده و محدوده مجاز شن و ماسه مصرفی را مشخص می‌نماید.
- ۲- چگالی سیمان برابر با  $3/15$  در نظر گرفته می‌شود. گرچه می‌توان چگالی سیمان مصرفی را مستقیماً از آزمایشگاه بدست آورد.
- ۳- مدول نرمی ماسه را می‌توان در مسائل  $2/8$  فرض نمود. البته مدول نرمی ماسه با عبور ماسه از الکهای استاندارد در آزمایشگاه قابل تعیین است.
- ۴- وزن مخصوص ظاهری دانه‌ها را می‌بایست در آزمایشگاه تعیین نمود. در صورتیکه چنین آزمایشی انجام نشده باشد می‌توان وزن مخصوص شن را  $2/68$  و وزن مخصوص ماسه را  $2/64$  در نظر گرفت.
- ۵- وزن شن و ماسه براساس حالت اشباع باسطح خشک (S.S.D) تعیین می‌شود به عبارت دیگر فرض بر آنست که دانه‌های سنگی، آبی را از مخلوط به خود جذب نمی‌کنند و به مخلوط نیز آبی اضافه نمی‌شود. بدیهی است در شرایط کارگاهی به ندرت این حالت (SSD) تحقق می‌پذیرد، لذا باید تصحیحات لازم برای وزن شن و ماسه و همچنین آب مصرفی انجام گیرد. رطوبت حالت اشباع با سطح خشک (S.S.D) را می‌توان با آزمایش بدست آورد در صورتیکه چنین آزمایشی صورت

نگرفته باشد می‌توان رطوبت حالت S.S.D دانه‌های را برابر با  $5/0$  درصد و رطوبت S.S.D دانه‌های ماسه‌ای را برابر با  $7/0$  درصد در نظر گرفت.

$$WSSD/CA = 0/5 \text{ درصد}$$

$$WSSD/FA = 0/7 \text{ درصد}$$

ع از آنجا که جداول ارائه شده در روش ACI بر اساس تجربیات آزمایشگاهی تنظیم شده است، می‌بایست در مرحله پایانی طرح با ساخت نمونه‌های آزمایشی اختلاف احتمالی شرایط و مصالح محلی با شرایط و مصالح استاندارد را برطرف نمود.

### مراحل طرح مخلوط به روش وزنی و حجمی

#### مرحله ۱ - انتخاب اسلامپ:

انتخاب اسلامپ مناسب برای بتن تازه، در وله اول بر اساس تجربه است، بدین ترتیب که مهندس با توجه به تجربیات قبلی و بر اساس نوع عضو سازه‌ای که بتن ریزی خواهد شد، اسلامپ لازم را انتخاب می‌کند. در صورتی که چنین تجربه‌ای موجود نباشد، می‌توان از جدول ۳-۱۰ استفاده کرد. در این جدول بر اساس نوع عضو بتنی، مقدار حداکثر و حداقل اسلامپ، پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه محدوده پیشنهادی نسبتاً وسیع است، نظر مهندس در تعیین عدد دقیق اسلامپ در محدوده پیشنهادی، با توجه به تجربه و شرایط کارگاهی، ضروری است.

#### مرحله ۲ - انتخاب بزرگترین بعد دانه‌ها:

بزرگترین بعد دانه شنی ( $D_{max}$ ) مصرفی بر اساس تجربه مهندس طراح و نیز امکانات و شرایط موجود محلی تعیین می‌شود. در مجموع هرچه از دانه‌های درشت‌تری استفاده شود، بتن دارای اسکلت‌بندی قوی‌تری بوده و در ضمن مصرف سیمان نیز کاهش می‌یابد، ولی باید به محدودیت‌های حداکثر بعد دانه‌ها توجه شود.

#### مرحله ۳ - تخمین مقدار آب لازم و میزان هوا (W و A)

مقادیر تقریبی آب لازم و میزان هوا را می‌توان از جدول ۳-۱۲ و بر اساس اسلامپ انتخاب شده و بزرگترین بعد دانه‌ها، تعیین کرد. قسمت بالای جدول برای بتن بدون

هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این قسمت همچنین مقادیر تقریبی هوای غیرعمدی که در بتن بدون هوا ایجاد خواهد شد، پیش‌بینی شده است (مشروط بر آنکه ارتعاش لازم به بتن داده شود) قسمت پائین جدول برای بتن هوادار مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این قسمت مقادیر متوسط درصد هوای لازم که در شرایط محیطی مختلف مناسب خواهد بود، پیش‌بینی شده است. نوع شرایط محیطی بسته به پیش‌بینی میزان حمله سولفاتها یا کلرورها و ترو خشک شدن‌های متوالی، ممکن است به صورت عادی، متوسط و یا شدید تعیین گردد. درصدهای پیشنهادی هوا در این قسمت، با بکارگیری مواد مضاف مناسب و با استفاده از دستورالعملهای آنها در مورد میزان مصرف، حاصل خواهد شد.

تصمیم‌گیری در مورد استفاده از بتن هوادار یا بتن بدون هوا بسته به شرایط محیطی بتن و امکانات اجرایی کار و بر عهده مهندس طراح است.

#### مرحله ۴ - انتخاب نسبت آب به سیمان (W/C):

انتخاب نسبت آب به سیمان براساس دو مسئله صورت می‌گیرد:

الف - براساس مقاومت موردنیاز

ب - براساس شرایط محیطی بتن (و یا براساس دوام موردنظر)

جدول الف ۵-۱۰ براساس مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (نمونه استوانه‌ای) که در ساخت بتن موردنظر است، عددی را برای نسبت آب به سیمان در بتن هوادار و بتن بدون هوا مشخص می‌کند.

اعداد این جدول برای حالتی تنظیم شده که درصد هوا در بتن بدون هوا از ۲ درصد تجاوز نکند. (در غیر این صورت ممکن است با نسبت آب به سیمان انتخاب شده، مقاومت موردنظر بدست نیاید) ملاحظه اعداد این جدول نشان می‌دهد که هرچه مقاومت بالاتری موردنظر باشد، باید از نسبت آب به سیمان کمتری استفاده کرد.

جدول (۵-۱۰) حداقل نسبت آب به سیمان مجاز را براساس شرایط محیطی پیش‌بینی شده برای بتن و به بیان دیگر براساس دوام موردنظر، تعیین می‌کند. در

## طرح مخلوط بتن

این جدول دو حالت برای شرایط محیطی در نظر گرفته شده است، حالت اول برای سازه‌هایی است که دائماً یا متناویاً مرطوب بوده و در معرض یخ‌زدن و آب‌شدن قرار می‌گیرند، در چنین حالتی باید از بتن هوادار استفاده کرد. حالت دوم برای سازه‌هایی است که در معرض آب دریا و یا سولفاتها قرار می‌گیرند، در این حالت اگر از بتن ضدسولفات نوع V یا نوع II استفاده شود، می‌توان مقادیر مجاز نسبت آب به سیمان را به میزان ۵/۰ افزایش داد.

در این مرحله از طرح، اگر چنانچه عوامل محیطی نامناسب پیش‌بینی نشوند، فقط از جدول الف ۱۰-۵ استفاده می‌شود و در صورتیکه مسئله دوام بتن در مقابله با عوامل محیطی نامناسب نیز مطرح باشد، باید هم از جدول (الف ۱۰-۴) و هم از جدول (ب ۱۰-۵) استفاده کرد و کوچکترین دو مقدار بدست آمده را برای نسبت آب به سیمان در نظر گرفت.

### مرحله ۵ - محاسبه مقدار سیمان (C) :

با تقسیم وزن آب بر حسب کیلوگرم در واحد حجم (خروجی مرحله سوم) بر نسبت آب به سیمان (خروجی مرحله چهارم)، مقدار سیمان بر حسب کیلوگرم در واحد حجم بدست می‌آید.

### مرحله ۶ - تخمین مقدار دانه‌های درشت (CA) :

حجم دانه‌ای درشت به صورت خشک و میله خورده در واحد حجم بتن را می‌توان براساس جدول (۶-۱۰) براساس بزرگترین اندازه اسمی دانه‌ها و مدول نرمی ماسه، تعیین کرد. از ضرب عدد بدست آمده در این قسمت، در وزن مخصوص ظاهري شن به صورت خشک و میله خورده، وزن شن در واحد حجم بتن (مثلاً بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب) بدست می‌آید. وزن مخصوص ظاهري شن خشک و میله خورده، معمولاً در محدوده ۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

جدول (۶-۱۰) به صورت تجربی و برای رسیدن به یک درجه کارآیی مناسب در ساختمنهای بتن مسلح معمولی تنظیم شده است. در مواردی که به کارآیی کمتری

نیاز باشد (نظیر بتن ریزی در رویه‌های بتنی)، می‌توان اعداد جدول را ۱۰ درصد افزایش داد تا بدین ترتیب مقدار شن، افزایش یافته و متناسب با آن مقدار ماسه کاهش یابد و بتن توپرتر و با کارآیی کمتری حاصل شود. همچنین در مواردی که آرماتوریندی انبوه و متراکم باشد) می‌توان اعداد جدول را ۱۰ درصد کاهش داد تا مخلوط روانتری حاصل شود.

#### مرحله ۷- تعیین مقدار دانه‌های ریز (ماسه)، (FA) :

تا این مرحله روش وزنی و حجمی در طرح مخلوط بتن، کاملاً یکسان بود. اما این دو روش در مرحله هفتم یعنی در تعیین وزن ماسه لازم، اندکی با هم متفاوت خواهند بود که هریک از دو روش به طور جداگانه در این مرحله توضیح داده می‌شود.

#### الف - روش وزنی:

در این روش اساس کار بر این اصل استوار است که جمع وزن کلیه اجزاء بتن در یک مترمکعب باید برابر با وزن مخصوص بتن تازه گردد. بنابراین اگر اوزان شن، سیمان، آب در یک مترمکعب بتن از وزن مخصوص بتن تازه کم شود، وزن ماسه در یک مترمکعب بدست خواهد آمد یعنی:

$$FA = U - CA - W - C$$

که  $C$ ،  $W$  و  $CA$  به ترتیب اوزان آب، سیمان و شن در یک مترمکعب بتن هستند که در مراحل قبلی بدست آمده‌اند. همچنین  $U$  معرف وزن مخصوص بتن تازه است.

جمع اوزان دانه‌ها و آب و سیمان در یک مترمکعب بتن، برابر با وزن مخصوص بتن تازه خواهد بود. از طرف دیگر  $U$  عبارتست از:

$$U = 10 \cdot Ga (100 - A) + C (1 - Ga) - W (Ga - 1)$$

که در آن  $Ga$  چگالی متوسط دانه‌های ریز و درشت از رابطه زیر بدست می‌آید:  
 $Ga = (GCA + GFA)$

## طرح مخلوط بتن

که در آن:

$$GCA = ۲/۶۸$$

$$GFA = ۲/۶۴$$

### ب: روش حجمی

در این روش حجم ماسه را چنان تعیین ۷ کمتر که جمع احجام کلیه اجزاء موجود در یک مترمکعب از بتن تازه ۲ برابر واحد شود بنابراین:

$$FA = 10 \cdot GFA(100 - \gamma) - GFA \left( \frac{CA}{CA} + \frac{C}{GC} + W \right)$$

در رابطه فوق FA بیانگر وزن ماسه لازم بر حسب کیلوگرم در یک مترمکعب بتن است.

### مرحله ۸- تصحیح به جهت رطوبت دانه‌ها:

در مراحل قبلی فرض بر این بوده است که دانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک (S.S.D) هستند و بنابراین نه آبی از مخلوط جذب کرده و نه آبی به آن اضافه می‌نمایند. معمولاً در شرایط کارگاهی دانه‌ها یا رطوبتی کمتر از حالت S.S.D داشته (دانه‌های خشک) و یا رطوبتی بیش از آن دارند (دانه‌های خیس)، لذا لازم است تصحیحات مناسب در اوزان شن و ماسه و نیز در مقدار آب صورت پذیرد.

### - تصحیح وزن شن و ماسه:

اگر وزن شن و ماسه در حالت مرطوب را به ترتیب با  $w_w$  و درصد رطوبت طبیعی آنها را به ترتیب با  $w_d$  نمایش دهیم، خواهیم داشت:

توجه شود که درصد رطوبت دانه‌ها نسبت به وزن خشک آنها اندازه‌گیری می‌شود.

$$CA_w = CA(1 - w_{CA}) \quad FA_w = (1 + w)_{FA}$$

### - تصحیح مقدار آب:

آبی که در مخلوط بتن مورد نیاز است تا اسلامپ موردنظر حاصل شود، همان مقداری است که در مرحله سوم بدست آمد. اما ممکن است به دلیل رطوبت بیشتر از حالت S.S.D دانه‌ها، مقداری آب اضافی در مخلوط حاصل شود. در چنین حالتی باید آب کمتری به مخلوط اضافه شود. همچنین امکان دارد به دلیل رطوبت کمتر از حالت S.S.D دانه‌ها، مقداری از آب مخلوط، جذب دانه‌ها شود. در این حالت باید آب بیشتری به مخلوط اضافه گردد.

این تصحیحات را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$W = W_{(قبلي)} - (CA(W_{CA} - W_{SSD,CA}) + FA(W_{FA} - W_{SSD,FA}))$$

در این رابطه رطوبت حالت اشباع با سطح خشک شن و ماسه به ترتیب با  $W_{SSD,FA}$  و  $W_{SSD,CA}$  نمایش داده شده‌اند.

#### مرحله ۹- ساخت نمونه آزمایشی و انجام تصحیحات لازم:

از آنجا که ممکن است طرح مخلوط بدست آمده تحت شرایط محلی و استفاده از مصالح محلی، منجر به نتایج کاملاً دقیق نشود. از این‌رو در این مرحله با ساخت نمونه کوچک آزمایشگاهی (مثلًا ۲۰ لیتری) و با استفاده از نتایج بدست آمده در مراحل قبل، امکان تجدیدنظر واقع‌بینانه و اعمال تصحیحات لازم، فراهم می‌گردد. در ساخت این نمونه اوزان بدست آمده برای سیمان، شن و ماسه را به صورت دقیق رعایت کرده و وزن بدست آمده برای آب به صورت حدودی رعایت می‌شود. بدین ترتیب که با یک کترل چشمی، آنقدر آب اضافه کرده تا احساس شود مخلوط به اسلامپ موردنظر رسیده است. گرچه این مقدار آب ممکن است اندکی کمتر یا بیشتر از مقدار محاسباتی باشد. حال بر روی نمونه ساخته شده چند آزمایش ساده و سریع انجام می‌گیرد:

#### الف - آزمایش اسلامپ:

اسلامپ بتن ساخته شده اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً این اسلامپ با اسلامپ مورد نظر، مطابقت ندارد. برای اصلاح اسلامپ، به ازاء هر ۱ سانتی‌متر اختلاف اسلامپ نمونه با اسلامپ موردنظر، در طرح بعدی مقدار آب لازم در مخلوط به میزان ۲

## طرح مخلوط بتن

کیلوگرم بر مترمکعب بتن و در جهت مناسب اصلاح می‌شود ( واضح است که اگر اسلامپ نمونه کمتر از اسلامپ موردنظر باشد، در طرح بعدی باید تصحیح مقدار آب به صورت افزایش اعمال شود و بالعکس)

### ب - آزمایش وزن مخصوص:

حجم مشخصی از نمونه ساخته شده، انتخاب شده و پس از ویبره کردن آن، با تقسیم وزن بر حجم، وزن مخصوص بتن تازه اندازه‌گیری می‌شود. این عدد بهترین تجربه برای وزن مخصوص بتن تازه (U)، در عملیات بعدی بکار گرفته می‌شود.

### ج - آزمایش تعیین درصد هوا:

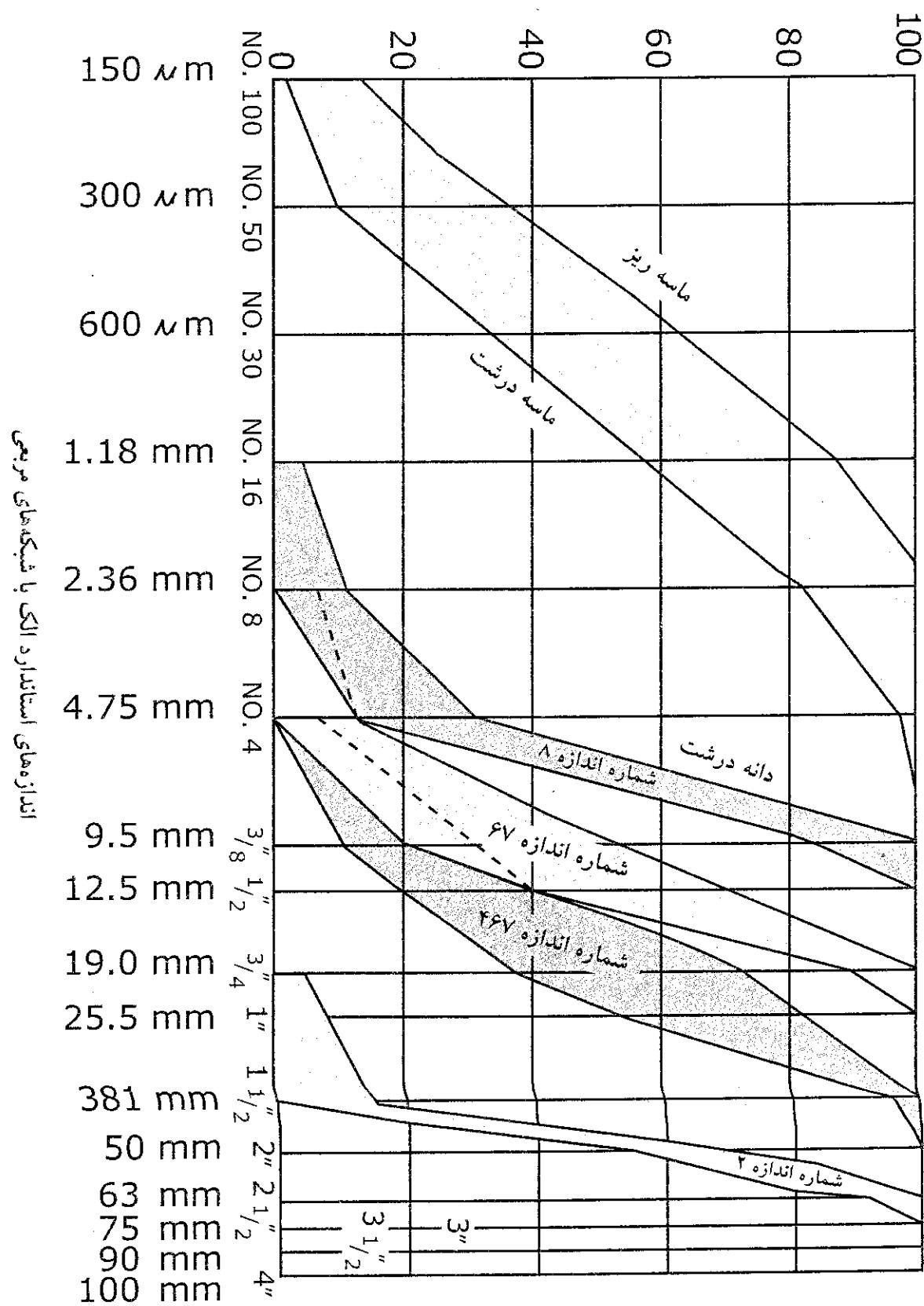
انجام این آزمایش برای بتن هوازدار الزامی بوده ولی در بتن بدون هوا، ضرورتی ندارد. در این آزمایش با روش‌های آزمایشگاهی متداول، درصد هوا در نمونه ساخته شده، اندازه‌گیری می‌شود. در صورت اختلاف درصد هوای نمونه با درصد هوای موردنظر، اصلاحات زیر اعمال می‌شود:

#### ۱- درصد مواد مضاف تغییر داده می‌شود.

۲- به ازاء هر ۱ درصد اختلاف بین درصد هوای نمونه با درصد هوای موردنظر، در طرح بعدی مقدار آب لازم در مخلوط، به میزان ۳ کیلوگرم بر مترمکعب بتن و در جهت مناسب، اصلاح می‌شود. (مثلاً اگر درصد هوای نمونه کمتر از درصد هوای موردنظر باشد، در طرح بعدی تصحیح آب به صورت کاهش اعمال می‌شود زیرا در طرح بعدی مقدار درصد هوا افزایش یافته و بنابراین بتن با هوای بیشتر روان‌تر خواهد شد و بنابراین در یک اسلامپ ثابت، به آب کمتری نیاز خواهد بود).

۳- بدلیل آنکه در طرح بعدی درصد هوا تغییر می‌کند، در یک حجم ثابت از بتن تازه، وزن آن تغییر می‌کند. بنابراین لازم است در طرح بعدی، اصلاحی در وزن مخصوص بدست آمده در قسمت ب، به صورت زیر انجام گیرد.

با اعمال اصلاحات این مرحله از طرح در مراحل قبلی طرح، طرح جدیدی از مخلوط بتی فراهم می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که طرح جدید به واقعیت بسیار نزدیک باشد. بنابراین می‌توان آن را با اطمینان در اکثر کارهای عملی بکار گرفت.



جدول ۵-۱۰- محدوده مجاز شن و ماسه مصرفی بر اساس استاندارد ASTM

## طرح مخلوط بتن

اسلامپ، mm		نوع سازه
حداقل	حداکثر	
۲۵	۷۵	پی‌ها و شالوده دیوارهای بتن آرمه
۲۵	۷۵	پی‌ها و دیوارهای غیر مسلح
۲۵	۱۰۰	تیرها و دیوارهای بتن آرمه
۲۵	۱۰۰	ستونهای سازه
۲۵	۷۵	روسازی‌ها و دالها
۲۵	۷۵	بتن حجیم

جدول ۳-۱۰: اسلامپ‌های پیشنهادی برای سازه‌های مختلف

مقادیر تقریبی آب بر حسب kg/m <sup>3</sup> بر اساس بزرگترین بعد دانه‌ها								اسلامپ، میلیمتر
۱۵۰	۷۵	۵۰	۳۷/۵	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	
بتن بدون حباب هوا								
۱۱۳	۱۳۰	۱۰۴	۱۶۶	۱۷۹	۱۹۰	۱۹۹	۲۰۷	۲۵-۵۰
۱۲۴	۱۴۰	۱۶۹	۱۸۱	۱۹۳	۲۰۰	۲۱۶	۲۲۸	۷۵-۱۰۰
-	۱۶۰	۱۷۸	۱۹۰	۲۰۲	۲۱۶	۲۲۸	۲۴۳	۱۵۰-۱۷۵
۰/۲	۰/۳	۰/۵	۱	۱/۰	۲	۲/۰	۳	درصد تقریبی هوای غیر عمدی در بتن بدون حباب هوا
بتن هوادار								
۱۰۷	۱۲۲	۱۴۲	۱۰۰	۱۶۰	۱۶۸	۱۷۰	۱۸۱	۲۵-۵۰
۱۱۹	۱۳۳	۱۵۷	۱۶۰	۱۷۰	۱۸۴	۱۹۳	۲۰۲	۷۵-۱۰۰
-	۱۰۴	۱۶۶	۱۷۴	۱۸۴	۱۹۷	۲۰۵	۲۱۶	۱۵۰-۱۷۵
۱/۰	۱/۰	۲/۰	۲/۰	۳/۰	۳/۰	۴/۰	۴/۰	مقادیر متوسط درصد هوای پیشنهادی بر اساس شرایط محیطی: شرایط عادی
۳/۰	۳/۰	۴/۰	۴/۰	۴/۰	۵/۰	۵/۰	۶/۰	شرایط متوسط
۴/۰	۴/۰	۵/۰	۵/۰	۶/۰	۶/۰	۷/۰	۷/۰	شرایط شدید

جدول ۴-۱۰- مقادیر تقریبی آب و هوای بر اساس اسلامپ و بزرگترین بعد دانه‌ها



نسبت آب به سیمان		مقاومت فشاری روزه، مگا پاسکال
بتن هوادار	بتن بدون حباب هوا	
-	۰/۴۲	۴۰
۰/۳۹	۰/۴۷	۳۵
۰/۴۵	۰/۵۴	۳۰
۰/۵۲	۰/۶۱	۲۵
۰/۶۰	۰/۶۹	۲۰
۰/۷۰	۰/۷۹	۱۵

جدول الف - ۱۰: نسبت آب به سیمان براساس مقاومت فشاری بتن

سازه هایی که به طور پیوسته یا متناوب مرتبطند و تحت اثر سیکل های یخ زدن و آب شدن قرار دارند	نوع سازه
۰/۴۰	مقاطع ظریف (نظیر نرده ها، جانپناه ها، تیرچه ها و کارهای تزیینی) و مقاطعی با پوشش کمتر از ۵ میلیمتر
۰/۴۵	۰/۴۵

جدول ب - ۱۰ - حداقل نسبت مجاز آب به سیمان  
در شرایط محیطی نامناسب

## طرح مخلوط بتن

حجم دانه های خشک میله خورده در مواد حجم بتن بر اساس مقادیر مختلف مدلول نرمی ماسه				بزرگترین اندازه اسمی دانه ها، میلیمتر
۳/۰۰	۲/۸۰	۲/۶۰	۲/۴۰	
۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۵۰	۹/۰
۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۵۹	۱۲/۰
۰/۶۰	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۶۶	۱۹
۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۷۱	۲۰
۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۳	۰/۷۵	۳۷/۰
۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۷۸	۵۰
۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۰	۰/۸۲	۷۵
۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۸۷	۱۵۰

جدول ۶-۱۰- حجم دانه های درشت در واحد حجم بتن

تخمینی مقدماتی برای وزن واحد حجم بتن، Kg/m <sup>۳</sup>		بزرگترین اندازه اسمی دانه ها، میلیمتر
بتن هوادار	بتن بدون حباب هوا	
۲۲۰۰	۲۲۸۰	۹/۰
۲۲۳۰	۲۳۱۰	۱۲/۰
۲۲۷۵	۲۳۴۵	۱۹
۲۲۹۰	۲۳۸۰	۲۵
۲۳۵۰	۲۴۱۰	۳۷/۰
۲۳۴۵	۲۴۴۵	۵۰
۲۴۰۵	۲۴۹۰	۷۵
۲۴۳۵	۲۵۳۰	۱۵۰

جدول ۷-۱۰- تخمین مقدماتی برای وزن مخصوص بتن تازه

## خواص بتن سخت شده

### مقاومت بتن

با در نظر گرفتن مقدار معینی سیمان و سنگدانه‌هایی با کیفیت قابل قبول، مقاومتی که می‌توان از مخلوط سیمان، سنگدانه و آب، با کارایی مناسب و ریخته شده به طور صحیح، انتظار داشت، بستگی دارد به:

(۱) نسبت وزن آب به سیمان مخلوط شده با آن

(۲) نسبت وزن سیمان به سنگدانه‌ها

(۳) دانه‌بندی، زیری سطح، شکل، گاهی مقاومت و سفتی سنگدانه‌ها

(۴) حداکثر اندازه سنگدانه‌ها

وقتی که سنگدانه‌های معمولی با ابعاد حداکثر تا 40mm بکار روند، عوامل 2 تا 4 اهمیت کمتری خواهند داشت. نسبت آب به سیمان از آن جهت مهم‌ترین عامل در مقاومت بتن قلمداد می‌شود که تعیین‌کننده میزان تمرکز مواد حاصل از هیدراسيون سیمان در فضای موجود برای این مواد است. این میزان تمرکز با نسبت ژل به حجم (gel/space ratio) مشخص می‌شود. نسبت ژل به حجم بنا به تعریف عبارت است از نسبت حجم خمیر سیمان هیدراتات شده به مجموع حجم سیمان هیدراتات شده و حفره‌های موئینه، یا به عبارت دیگر، نسبت مواد جامد حاصل از

## تکنولوژی بتن

هیدراسیون به فضای موجود برای این مواد. با فرض اینکه مواد حاصل از هیدراسیون سیمان دو برابر حجم اولیه آن خواهد بود، پاورز (Powers) رابطه تجربی زیر را برای محاسبه نسبت ژل به حجم و مقاومت بتن ارائه کرده است:

$$r = \frac{0.657\alpha}{0.319\alpha + \frac{\omega}{c}}$$

$$R = 234r^3$$

$$\text{نسبت سیمان هیدرات شده} = \alpha \quad \text{حجم آب مخلوط شده} = \omega \quad \text{جرم سیمان} = c$$

$$\text{مقادیم} = R(\text{MPa}) \quad \text{نسبت ژل به حجم} = r$$

مقاومت بتن بطور کلی تابعی از حجم فضاهای خالی موجود در آن است. رابطه بین مقاومت و تخلخل منحصر به بتن نیست، بلکه در مواد شکننده دیگر نیز که آب حفره‌های خالی در داخل آنها به جای می‌گذارد، این ویژگی وجود دارد. مقاومت بتن به حجم تمام فضاهای خالی آن بستگی دارد: هوای محبوس، حفره‌های مویینه، حفره‌های ژل و حباب‌های هوای افزوده شده (در صورت استفاده از افزودنی حباب‌ساز). برای مثال محاسبه حجم تخلخل یک بتن نمونه به ترتیب زیر می‌باشد:

فرض می‌شود نسبت‌های وزنی سیمان، سنگدانه ریز و درشت 1:3.4:4.2 و نسبت آب به سیمان 0.8 و حجم هوای محبوس در بتن هنگام تراکم 2.3% باشد.

با در نظر گرفتن وزن مخصوص سنگدانه ریز برابر 2.6، سنگدانه درشت برابر 2.65 و سیمان برابر 3.15، نسبت‌های حجمی اجزای بتن به ترتیب زیر است.

$$(1 \div 3.15) : (3.4 \div 2.6) : (4.2 \div 2.65) : (0.8 \div 1) = 0.318 : 1.31 : 1.58 : 0.8$$

چون مقدار هوا 2.3% است، مجموع حجم بقیه مواد باید 97.7% باشد و نسبت‌های حجمی

بر حسب درصد برابر است با:

سیمان خشک: 7.8%， سنگدانه ریز: 32.0%， آب: 19.4%， آب: 38.5%

## خواص بتن سخت شده

در عمل 70% سیمان بعد از 7 روز عمل آوردن در آب هیدراته می‌شود، بنابراین، حجم سیمان هیدراته 5.5% و حجم سیمان غیرهیدراته 2.3% خواهد بود.

حجم آب مصرف شده برای هیدراسیون 0.23 وزن سیمان هیدراته شده است و برابر است

$$3.15 \times 5.5 = 0.23$$

با:

هنگام هیدراسیون حجم مواد جامد حاصل از آن به اندازه 0.254 برابر آب ترکیب شده، کمتر از مجموع حجم سیمان و آب است، در نتیجه حجم مواد جامد حاصل از هیدراسیون برابر  $5.5 + (1 - 0.254) \times 4.0 = 8.5\%$  است با:

چون ژل سیمان به طور طبیعی دارای 28% فضای خالی است، حجم حفره‌های ژل برابر  $w_g$

$$\frac{w_g}{8.5 + w_g} = 0.28 \Rightarrow w_g = 3.3\%$$

است به طوری که:

در نتیجه حجم حفره‌های ژل 3.3% می‌باشد. بنابراین، حجم خمیر سیمان هیدراته شده شامل حفره‌های ژل  $11.8\% = 8.5 + 3.3$  است.

حجم سیمان خشک هیدراته شده و آب مخلوط برابر است با:

$$5.5 + 19.4 = 24.9\%$$

و در نتیجه حجم حفره‌های موینه برابر است با:

$$24.9 - 11.8 = 13.1\%$$

با توجه به محاسبات فوق حجم فضاهای خالی بتن برابر است با:

حفره‌های ژل: 3.3% حفره‌های موینه: 13.1%

مجموع: 18.7%

هو: 2.3%

## تأثیر سن بتن بر مقاومت آن

رابطه بین نسبت آب به سیمان و مقاومت بتن در مورد یک نوع سیمان و در یک سن معین بتن با فرض شرایط نگهداری مرطوب برقرار است. از طرف دیگر رابطه بین مقاومت با نسبت

## تکنولوژی بتن

ژل به حجم کاربرد عمومی تری دارد، زیرا مقدار ژل موجود در خمیر سیمان در هر زمان، تابعی از سن بتن و نوع سیمان است. بنابراین، رابطه اخیر نشان می‌دهد که سیمان‌های مختلف نیاز به مدت زمان‌های مختلف برای ایجاد مقدار معینی از ژل را دارند.

تأثیر نوع سیمان و نیز شرایط عمل آوری بتن در چگونگی کسب مقاومت آن، در فصل‌های قبل مورد بررسی قرار گرفته است. آنچه که در اینجا مورد نظر است مقاومت بتن در سنین مختلف آن است.

در کارهای بتنی، مقاومت بتن به طور سنتی با مقدار آن در 28 روز نشان داده می‌شود و بعضی از دیگر خواص بتن نیز به مقاومت 28 روزه آن ارجاع داده می‌شوند. هیچ مزیت علمی در انتخاب 28 روز به عنوان مبنای زمانی وجود ندارد، این انتخاب فقط به این علت بوده است که کسب مقاومت سیمان‌های اولیه به کندی انجام می‌گرفت و لازم بود واکنش‌های هیدراسیون تا حد قابل ملاحظه‌ای پیشرفت کند تا بتن مقاومت قابل قبولی کسب کند. انتخاب مضربی از هفته (چهار هفته یا 28 روز) به عنوان زمان مبنا برای مقاومت، احتمالاً به این منظور بوده است که آزمایش مقاومت بتن، مانند بتن ریزی، در یک روز کاری هفته انجام گیرد. در سیمان‌های پرتلند جدید سرعت واکنش‌های هیدراسیون بسیار بالاتر از سیمان‌های قدیمی است، هم به علت اینکه ریزی آنها بیشتر است و هم به این علت که مقدار  $C_{3S}$  بیشتری دارند. البته همه سیمان‌های مخلوط شده چنین وضعی ندارند.

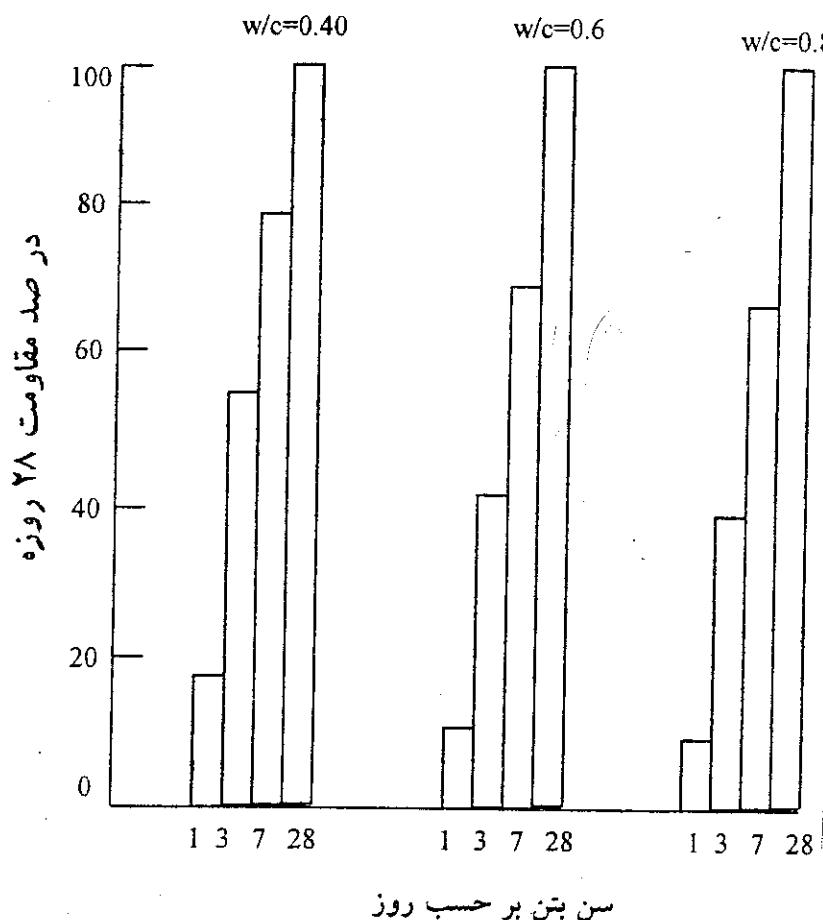
شاید بهتر باشد مدت زمانی کوتاه‌تر از 28 روز را به عنوان مبنای مقاومت در نظر گرفت، ولی به نظر می‌رسد که سن 28 روزه مقبولیت عمومی پیدا کرده است و تغییر آن ضرورتی ندارد. بنابراین، مقاومت 28 روزه بتن تقریباً به صورت تغییرناپذیری به عنوان مبنا مورد پذیرش قرار گرفته است. اگر به علت خاصی، لازم باشد مقاومت 28 روزه را از روی مقاومت در سن کمتری، مثلاً 7 روز، تعیین نمود، رابطه بین مقاومت 7 روزه و 28 روزه باید به طور تجربی برای مخلوط داده شده تعیین گردد. به همین علت، روابط مختلفی که در گذشته برای تعیین نسبت دو مقاومت 7 روزه و 28 روزه عرضه شده بود امروزه دیگر چندان قابل اطمینان نیستند و از ارائه آنها

## خواص بتن سخت شده

### خودداری می‌شود.

نه تنها خواص سیمان، بلکه نسبت آب به سیمان نیز روی سرعت کسب مقاومت بتن تأثیر می‌گذارد. مخلوط‌هایی با نسبت آب به سیمان پایین‌تر دارای سرعت کسب مقاومت (به صورت درصدی از مقاومت درازمدت) سریع‌تری نسبت به بتن‌های با نسبت آب به سیمان بالاتر هستند (نمودار ۱-۱۰). زیرا در مخلوط‌کم آب‌تر، دانه‌های سیمان به هم‌دیگر نزدیک‌تر بوده و سیستم بهم پیوسته ژل سیمان سریع‌تر تشکیل می‌گردد. همچنین باید توجه داشت که در هوای گرم کسب مقاومت اولیه سریع‌تر بوده و نسبت مقاومت ۲۸ روزه به مقاومت ۷ روزه کمتر از مقدار آن در هوای سرد خواهد بود.

نمودار ۱-۱۰- سرعت کسب مقاومت نسبی بتن با نسبت‌های آب به سیمان متفاوت



## تکنولوژی بتن

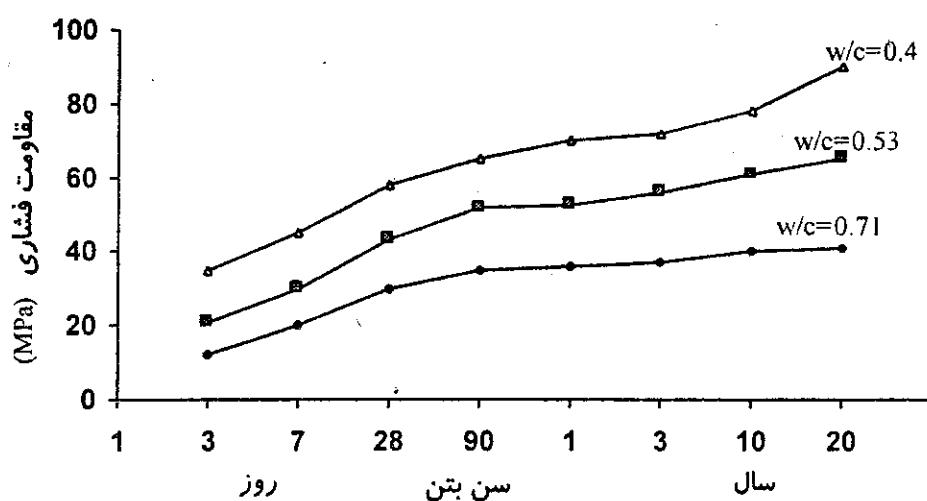
دانستن رابطه مقاومت - زمان در مواقعي دارای اهميت است که يك سازه در سنين بالاتری مورد بهره برداری (بارگذاري کامل) قرار خواهد گرفت، در اين موارد، کسب مقاومت بعد از 28 روز نيز در طراحی مورد توجه قرار می گيرد. در موارد ديگري مانند بتن پيش ساخته يا بتن پيش تنيده، يا مواقعي که باز کردن زود هنگام قالبها لازم باشد، دانستن مقاومت بتن در سن پايين تری از 28 روز، مورد نياز است.

مقادير به دست آمده از افزایش مقاومت بتن با نسبت های آب به سيمان 0.4 و 0.53 و 0.71 برای بتن های ساخته شده با سيمان پرتلند معمولی در سال ۱۹۴۸ که به طور مداوم مرطوب نگهداشت شده اند، در نمودار ۲-۱۰ داده شده است.

اگر منظور مطالعه مقاومت درازمدت واقعي باشد، باید اشاره نمود که بتن های تهيه شده با سيمان های پرتلند ساخته شده در اوائل قرن بیستم در آمریكا (که مقدار  $C_{2S}$  بالاتر و سطح مخصوص کمتری داشتند) که در شرایط هوای آزاد نگهداشت شدند، افزایش مقاومتی متناسب با لگاریتم سن بتن تا 50 سال از خود نشان دادند. مقاومت 50 ساله تقریباً 2.4 برابر مقاومت 28 روزه بود. ولی سيمان هایی که از دهه ۱۹۳۰ به بعد ساخته شدند (با  $C_{2S}$  پايين تر و سطح مخصوص بيشتر) در مدت 10 تا 25 سال به مقاومت نهايی خود رسيدند. بتن هایی که با سيمان پرتلند در سال ۱۹۴۱ در آلمان ساخته شده و در هوای آزاد نگهداشت شدند، مقاومت 30 ساله آنها 2.3 برابر مقاومت 28 روزه بوده است. افزایش نسبی مقاومت در نسبت های آب به سيمان بالاتر بيشتر بوده است.

## خواص بتن سخت شده

نمودار ۲-۱۰- تغییرات مقاومت بتن با نسبت‌های آب به سیمان مختلف بر حسب زمان



## اندازه‌گیری مقاومت بتن

روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری مقاومت بتن در کشورهای مختلف بکار می‌رود.

آزمایش‌های مقاومت بتن به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱- آزمایش‌های مخبر

۲- آزمایش‌های غیرمخرب

در آزمایش‌های مخبر، نمونه بتن که با استفاده از قالب‌های مخصوص ساخته شده است در جریان آزمایش از بین می‌رود ولی آزمایش‌های غیرمخرب روی عضوبتنی اصلی انجام شده و معمولاً آسیبی به عضو وارد نمی‌شود.

## آزمایش‌های مخبر

آزمایش مقاومت فشاری: مهم‌ترین و رایج‌ترین آزمایش مقاومت روی بتن است. در این آزمایش نمونه‌هایی از بتن مورد استفاده ساخته می‌شود. این نمونه‌ها در استاندارد انگلیسی

## تکنولوژی بتن

BS1881 به شکل مکعب و معمولاً به ابعاد  $150 \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  است. اگر حداکثر ابعاد سنگدانه کمتر از  $25 \text{ mm}$  باشد می‌توان از مکعب  $100 \text{ mm}$  و اگر ابعاد سنگدانه‌ها خیلی بزرگ باشد می‌توان از مکعب  $200 \text{ mm}$  نیز استفاده کرد. بعد از ساختن نمونه‌ها باید آنها را به مدت 24 ساعت در دمای  $5^{\circ}\text{C} \pm 20$  نگهداری کرد. در روز آزمایش نمونه از آب بیرون آورده شده و زیر دستگاه فشار قرار می‌گیرد. نتیجه حاصل از این آزمایش با  $f_{cu}$  یا مقاومت فشاری مکعبی بر حسب MPa نشان داده می‌شود. در استاندارد آمریکایی ASTM C192-90a نمونه استوانه‌ای به قطر  $150 \text{ mm}$  و ارتفاع  $300 \text{ mm}$  بکار می‌رود. روش تهیه و نگهداری نمونه‌ها تقریباً مشابه نمونه‌های مکعبی است. هنگام آزمایش نمونه به طور قائم زیر دستگاه فشار قرار می‌گیرد و نتیجه حاصل با  $f_c$  یا مقاومت فشاری استوانه‌ای بر حسب MPa (در سیستم متریک) و یا psi (در سیستم امپریال) نشان داده می‌شود.

به علت وجود اثر اصطکاکی صفحه تماس دستگاه فشار با سطح نمونه بتنی، تنش فشاری مقاوم نمونه بتن مشابه در دو آزمایش مذکور برابر نخواهد بود. به علت اینکه نسبت ارتفاع به قاعده در نمونه مکعبی برابر 1 و در نمونه استوانه‌ای برابر 2 می‌باشد، تنش‌های سه‌بعدی در قسمت میانی ارتفاع مکعب وجود داشته و بنابراین نتیجه بدست آمده از نمونه مکعبی بیشتر خواهد بود. نسبت بین دو نتیجه مقاومت معمولاً برابر است با  $f_{cu} = f_c \approx 0.7 \sim 0.9$ . این نسبت با بالا و پایین رفتن مقاومت بتن کمتر یا بیشتر می‌شود.

آزمایش مقاومت کششی: با اینکه بتن معمولاً برای مقاومت در برابر کشش مستقیم طراحی نمی‌شود ولی داشتن اطلاعاتی در مورد مقاومت کششی آن برای تخمین مقدار باری که باعث ترک خوردن آن می‌شود، مفید است. همچنین تخمین مقاومت کششی به درک بهتر رفتار عضوهای بتن آرمه کمک می‌کند، اگرچه در عضوهای بتن آرمه معمولاً از مقاومت کششی بتن صرف نظر می‌شود.

به علت مشکل بودن ایجاد کشش مستقیم، آزمایش کششی معمولاً بطور غیرمستقیم انجام

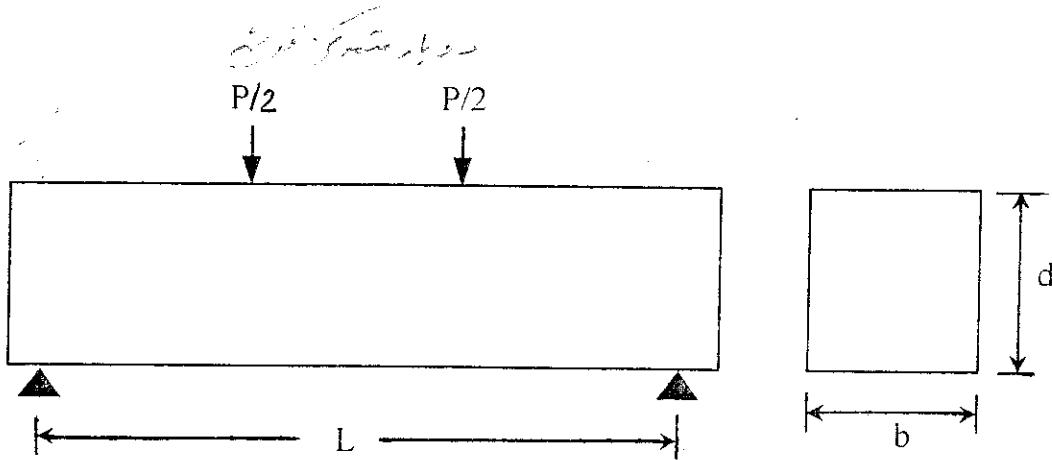
## خواص بتن سخت شده

می شود. دو آزمایش برای این منظور انجام می شود، آزمایش خمشی و آزمایش شکافتگی (دو نیمه شدن)

۱ - آزمایش خمشی: در این آزمایش نمونه مکعب مستطیلی از بتن ساخته شده و تحت اثر دو بار متمرکز قرینه در دهانه خود قرار می گیرد تا لحظه‌ای که گسیختگی اتفاق افتد. مطابق استاندارد BS1881 نمونه مکعب مستطیل به ابعاد  $150 \times 150 \times 750 \text{ mm}$  و یا  $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$  بکار می رود. شرایط استاندارد ASTM C78-94 نیز مشابه BS1881 می باشد. اگر گسیختگی در  $\frac{1}{3}$  مرکزی دهانه تیر اتفاق افتد، مقاومت کششی غیرمستقیم  $f_r$  یا مدول گسیختگی (rupture modulus) براساس تئوری الاستیسیته معمولی از رابطه زیر بدست می آید که در آن  $P$  نیروی کل وارد در لحظه گسیختگی است،

$$f_r = \frac{PL}{bd^2}$$

شکل ۱-۱۰ - آزمایش خمشی



## ۲ - آزمایش شکافتگی استوانه بتنی (دو نیمه شدن)

در این آزمایش نمونه استوانه‌ای مشابه آزمایش فشاری، بطور افقی زیر دو صفحه دستگاه فشار قرار می گیرد و تحت اثر بار خطی در کل طول خود و عمود بر محور طولی قرار می گیرد. نیروی دستگاه به تدریج اضافه می شود تا لحظه‌ای که گسیختگی به صورت شکافتگی از میان

## تکنولوژی بتن

مقطع دایره‌ای ظاهر شود. در این صورت تنش کششی مقاوم بتن در قسمت میانی مقطع دایره از رابطه زیر بدست می‌آید:

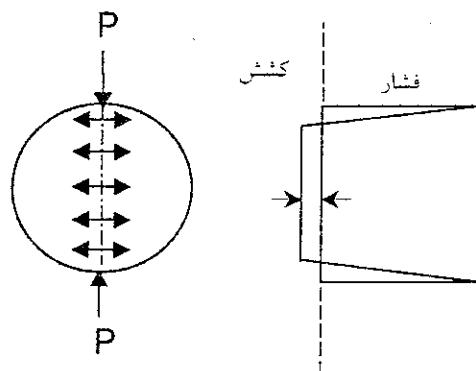
شکل ۲-۱۰- آزمایش شکافتگی استوانه

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi LD}$$

نیروی فشاری کل روی استوانه =  $P$

(300mm) طول استوانه =  $L$

(150mm) قطر استوانه =  $D$



## مغزه‌گیری از بتن (test cores)

در صورت وجود ابهام در همخوانی بین نتایج حاصل از نمونه‌ها و مقاومت واقعی بتن ریخته شده، معمولاً لازم می‌شود مغزه‌هایی از بتن موجود به صورت استوانه برداشته شده و تحت آزمایش فشاری قرار گیرد. قطر مغزه‌ها معمولاً طوری انتخاب می‌شود که نسبت ارتفاع به قاعده 2 باشد، در غیر این صورت نتیجه بدست آمده باید با ضریب مناسبی اصلاح گردد. این ضریب در نسبت 2، برابر 1 و در نسبت 1، برابر 0.8 است. مطابق استانداردهای BS و ASTM حداقل قطر مغزه باید 100mm و بزرگتر از 3 برابر بزرگترین اندازه سنجدانه‌های بکار رفته در بتن باشد.

## آزمایش‌های غیرمخرب

در آزمایش‌هایی که تا به حال مورد بررسی قرار گرفتند نمونه‌ای از بتن مورد آزمایش قرار می‌گیرد که نتیجه حاصل از آن ممکن است با مقاومت واقعی بتن ریخته شده همخوانی نداشته باشد و در مورد مغزه‌گیری باعث رسیدن آسیب به عضو بتنی می‌شود. بنابراین آزمایش‌های

## خواص بتن سخت شده

دیگری ابداع شده‌اند که روی عضوهای بتُنی ساخته شده انجام می‌گیرند. در استفاده از این روش‌ها باید توجه داشت که نتایج عددی قابل اتقا بست نمی‌آید و قضاوت مهندسی ضروری است.

### آزمایش چکش بتن (چکش اشمیت):

یکی از قدیمی‌ترین آزمایش‌های غیرمخرب است و هنوز به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این وسیله در سال ۱۹۴۸ به وسیله Ernst Schmidt اختراع شد. در این آزمایش از این اصل استفاده می‌شود که میزان بازگشت یک جرم الاستیک بعد از برخورد به یک سطح، به میزان سختی آن سطح بستگی دارد. در این وسیله مقدار ثابتی از انرژی توسط یک فنر به یک وزنه فولادی وارد شده و باعث برخورد آن به سطح بتن می‌شود. میزان بازگشت وزنه فولادی از سطح بتن نشانگر سختی سطح بتن است که به مقاومت آن ربط داده می‌شود. در هنگام استفاده از این وسیله باید دقیق داشت که سطح بتن کاملاً صاف باشد و در صورت لزوم با سنگ مخصوص تراش داده شود. همچنین قرار گرفتن روی سنگدانه بتن و یا احیاناً تخلخل باعث افزایش و کاهش میزان بازگشت می‌شود. بنابراین آزمایش روی نقاط متعدد در یک محدوده انجام شده و میانگین گرفته می‌شود.

### آزمایش مقاومت در برابر نفوذ (Penetration resistance test)

در این آزمایش مقاومت بتن در برابر نفوذ یک میله فولادی که تحت مقدار ثابتی از انرژی روی آن فشرده می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. فرض اصلی آزمایش این است که تحت شرایط استاندارد عمق نفوذ نسبت معکوس با مقاومت فشاری بتن دارد. همراه با وسیله آزمایش منحنی‌هایی وجود دارد که رابطه مقدار نفوذ را با مقاومت فشاری نشان می‌دهد. این آزمایش برای تحقیق اینکه آیا می‌توان قالب‌های بتن ریخته شده را باز کرد یا نه، مفید است. البته نتایج بدست آمده وابستگی زیادی به سختی سنگدانه‌ها دارد که ممکن است در زیر میله فرورونده قرار داشته باشند و در نتیجه ممکن است مقاومت واقعی بتن نشان داده نشود.

## تکنولوژی بتن

### آزمایش بیرون کشیدن (Pull-out test)

در این آزمایش نیروی لازم برای بیرون کشیدن یک قطعه فلزی قرار داده شده در داخل بتن از داخل آن توسط یک جک مخصوص اندازه گیری می شود. قطعه کار گذاشته شده در داخل بتن معمولاً همراه با مقداری از بتن اطراف آن به شکل مخروط بیرون آورده می شود. این آزمایش در استانداردهای BS1881:Part207:92 و ASTM C900-87 شرح داده شده است. این آزمایش از نظر عمق و اندازه بتن مورد آزمایش، بر دو روش قبلی برتری دارد ولی عیب آن این است که محل مورد آزمایش در عضو بتنی باید تعمیر شود.

### آزمایش سرعت امواج فراصوتی (Ultrasonic pulse velocity test)

در این آزمایش زمان لازم برای عبور امواج طولی فراصوتی از داخل طول معینی از عضو بتنی اندازه گیری شده و سرعت حرکت امواج اندازه گیری می شود. سرعت بالاتر امواج نشانه مقاومت بیشتر است. این آزمایش بیشتر برای کنترل یکنواختی بتن در نقاط مختلف آن و ردیابی ترکهای احتمالی موجود در آن بکار می رود. البته منحنی هایی ارائه شده اند که می توان از آنها برای تخمین مقاومت بتن بر حسب سرعت حرکت امواج فراصوتی در آن، استفاده کرد.

### پیوستگی بتن به فولاد (bond)

یکی از فرضیات اساسی محاسبات بتن مسلح این است که پیوستگی کافی بین بتن و فولاد داخل آن وجود داشته باشد. تنش پیوستگی بین بتن و فولاد از دو عامل چسبندگی و اصطکاک و در مورد فولاد آجدار علاوه بر آن از درهم گیری آج ها با بتن ایجاد می شود. مطابق آیین نامه BS8110 تنش پیوستگی متوسط عبارت است از نیروی وارد به میله فولادی تقسیم بر سطح تماس

میله با بتن

$$f_b = \frac{F_s}{\pi \times d \times l}$$

## خواص بتن سخت شده

طول میله در تماس با بتن = 1، نیروی وارد بر میله =  $F_s$ ، تنش پیوستگی =  $f_b$   
قطر میله =  $d$

برای جلوگیری از لغزش میله در داخل بتن در اثر نیروی وارد بر آن باید تنش پیوستگی موجود از مقدار نهایی آن  $f_{bu}$  کمتر باشد:

$$f_b < f_{bu}$$

$$f_b = \frac{f_s \times d^2}{\pi \times d \times l} = \frac{f_s \times d}{4l}$$

$$f_s = \frac{F_s}{\pi \times d^2} \quad \text{تشنج پیوستگی نهایی} \quad f_{bu} = \beta \sqrt{f_{cu}} \quad \text{تشنج محوری میله}$$

4

میلگرد فشاری	میلگرد کششی	نوع میلگرد
$\beta = 0.28$	$\beta = 0.35$	صف
$\beta = 0.50$	$\beta = 0.63$	آجدار

$$l = \frac{f_s \times d}{4f_{bu}} \quad \text{طول مهاری لازم}$$

با معلوم بودن تنش جاری شدن فولاد  $f_y$  و مقدار مجاز آن در آیین نامه BS8110 که  $0.87f_y$  می باشد، طول مهاری نهایی فولاد در داخل بتن برابر است با:

$$l_u = \frac{0.87f_y \times d}{4 \beta \sqrt{f_{cu}}}$$

## الاستیسیتیه بتن

از نظر مهندسی ۴ نوع منحنی تنش - کرنش برای مواد مختلف وجود دارد:

۱ - خطی والاستیک، مانند فولاد

۲ - غیرخطی والاستیک، مانند پلاستیک و چوب

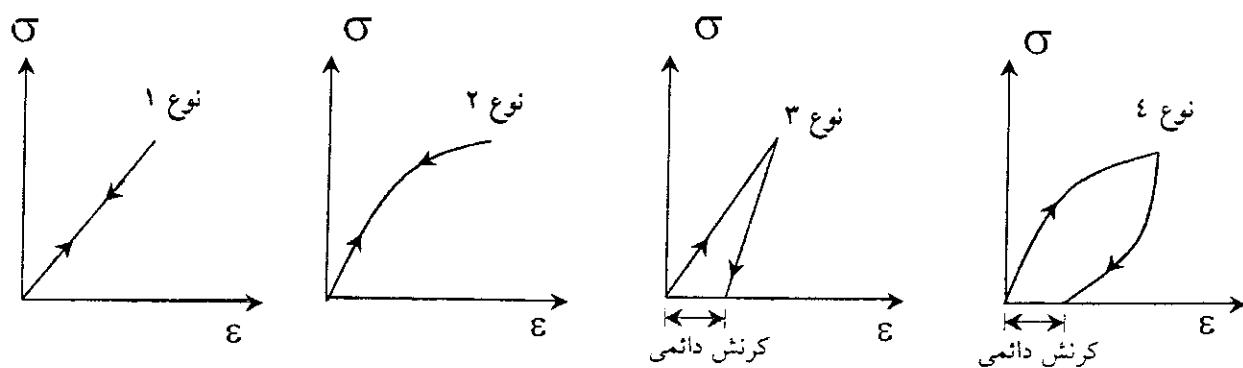
## تکنولوژی بتن

۳- خطی و غیرالاستیک، مانند شیشه و اکثر سنگها

۴- غیرخطی و غیرالاستیک، مانند بتن

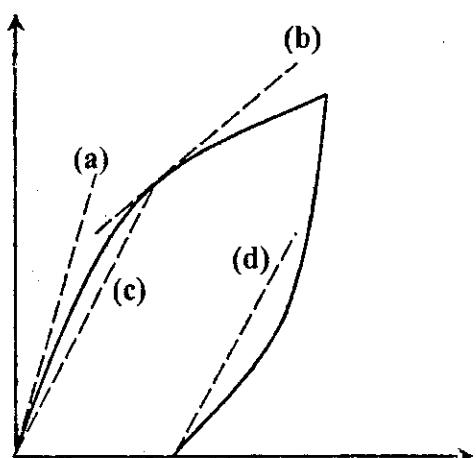
الاستیسته خالص فقط وقتی وجود خواهد داشت که با وارد شدن بار کرنش به وجود آمده و با برداشته شدن بار، کرنش بطور کامل از بین برود.

شکل ۳-۱۰- انواع منحنی های تنش - کرنش



مطابق شکل زیر روی منحنی تنش - کرنش بتن ۴ مقدار مختلف برای مدلول الاستیستیه بتن می توان در نظر گرفت. شبیه هر خط نشانگر مدلول الاستیستیه است:

شکل ۴-۱۰- منحنی تنش - کرنش بتن



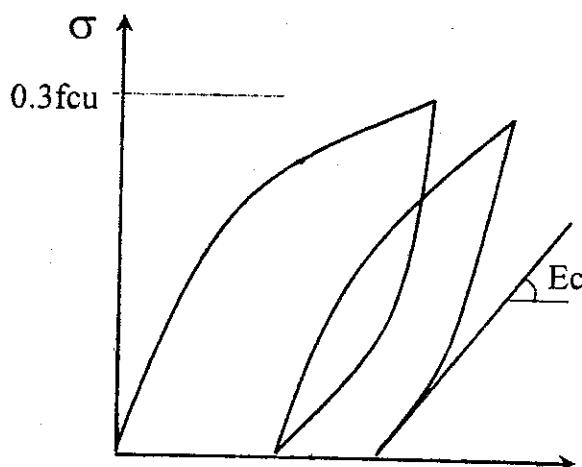
(a) مدلول مماس اولیه initial tangent modulus

## خواص بتن سخت شده

tangent modulus	(b) مدول مماسی
secant modulus	(c) مدول وتری (سکانت)
unloading modulus	(d) مدول باربرداری

سطح زیر منحنی به عنوان hysteresis نامیده شده و عبارت است از انرژی جذب شده برای ایجاد ترک‌های میکروسکوپی داخل بتن. مدول مماس اولیه به عنوان مدول دینامیکی شناخته شده و می‌توان آن را با روش فرکانس تشدید و یا روش امواج فرماصوتی تعیین نمود. مدول باربرداری نیز مدول استاتیکی نام دارد که در محاسبات عادی سازه‌های بتنی بکار می‌رود. تعیین مدول استاتیکی در آزمایشگاه با انجام حداقل سه مرحله بارگذاری و محاسبه شب منحنی (که بعد از بار سوم تبدیل به خط می‌شود) در حالت نهایی بدست می‌آید.

شکل ۱۰-۵- تعیین مدول الاستیک استاتیکی بتن



روش فرکانس تشدید (Resonance frequency method)

در این روش نمونه بتن خالص به شکل مکعب مستطیل ساخته شده و از قسمت وسط بدون گیرداری روی تکیه گاه قرار می‌گیرد. سپس از یک انتهای نمونه نوساناتی با فرکانس قابل تغییر از

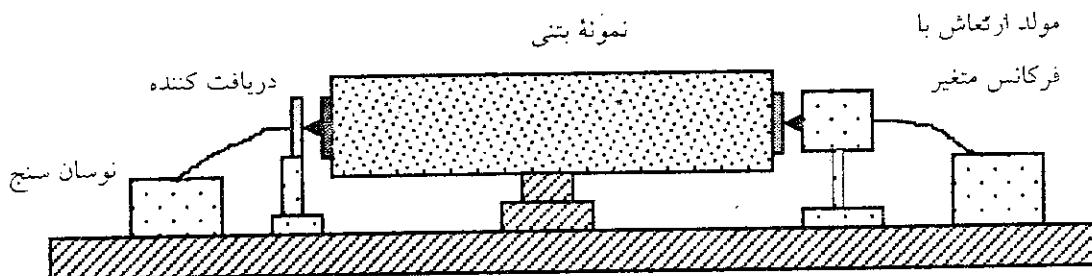
## تکنولوژی بتن

100Hz تا 10000Hz به بتن وارد شده و در طرف دیگر نمونه نوسانات ایجاد شده در بتن دریافت شده و دامنه آنها اندازه گیری می شود. فرکانس نوسانات ایجاد شده تغییر داده می شود تا زمانی که حالت تشدید در فرکانس اصلی (پایین ترین فرکانس) اتفاق افتد. اگر این فرکانس با  $n$  و طول نمونه با  $L$  و وزن مخصوص بتن با  $m$  نشان داده شود، مدول الاستیستیتیه دینامیکی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$E_d = K n^2 L^2 \rho$$

$K$  یک ضریب است که اگر  $L$  بر حسب mm و  $\rho$  بر حسب  $\text{kg/m}^3$  باشد،  $K = 4 \times 10^{-15}$  بوده و  $E_d$  بر حسب GPa بدست خواهد آمد.

شکل ۱۰-۶- آزمایش فرکانس تشدید



### روش امواج فرماصوتی (Ultrasonic pulse velocity)

در این روش سرعت حرکت امواج فرماصوتی در بتن اندازه گیری می شود، اگر سرعت امواج برابر  $V(\text{km/s})$  باشد، مدول دینامیکی بر حسب MPa از رابطه زیر بدست می آید:

$$E = \frac{\rho \times V^2 (1 + \mu) (1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}$$

ضریب پواسون بتن  $\mu = 0.18 \sim 0.24$

با معلوم بودن مدول الاستیک دینامیکی، مدول استاتیکی را می توان از رابطه تجربی زیر بدست آورد:

$$E_c(\text{GPa}) = 1.25 E_d(\text{GPa}) - 19$$

## خواص بتن سخت شده

در آیین نامه های بتن روابط تجربی مختلفی برای محاسبه مدول الاستیک استاتیکی با استفاده از مقاومت فشاری بتن داده شده است. رابطه تجربی زیر در آیین نامه BS8110 داده شده است:  $E_c(\text{GPa}) = 9.1 f_{cu}^{0.33} (\text{MPa})$

### انقباض بتن

انقباض بتن یک تغییر شکل تدریجی است که در اثر از دست دادن آب خمیر سخت شده سیمان اتفاق می افتد. حالت های مختلف آب در بتن عبارتند از:

آب آزاد که دورتر از جاذبه سطحی خمیر سیمان قرار دارد.

آب ژل که توسط نیروهای سطحی ذرات ژل نگهداشته شده است.

آب شیمیایی که قسمتی از مواد هیدرات شده است.

از نظر عملی آب موجود در بتن به دو قسم تقسیم می شود:

۱- آب قابل تبخیر در حرارت  $105^{\circ}\text{C}$  شامل تمام آب آزاد به اضافه قسمتی از آب ژل.

۲- آب غیرقابل تبخیر که شامل بقیه آب موجود در بتن است.

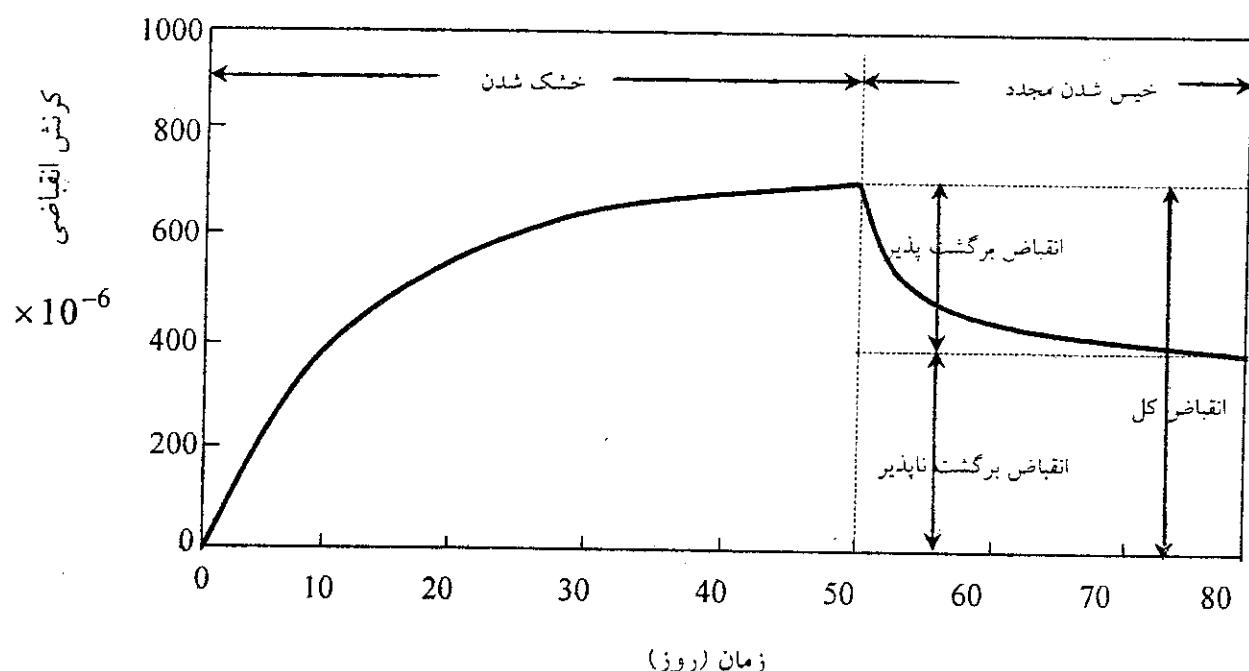
البته باید توجه داشت که در دمای بالای  $1000^{\circ}\text{C}$  تمام آب داخل بتن تبخیر می شود.

هنگامی که بتن در داخل آب عمل آورده شده و سپس در محیطی با رطوبت نسبی حدود ۵۰٪ قرار گیرد تا خشک شود، ابتدا آب آزاد از داخل حفره های بزرگ تبخیر می شود. در این مرحله تغییر حجم خیلی کم است، زیرا خروج آب آزاد تغییری در ساختمان خمیر سیمان نمی دهد. خروج آب آزاد ایجاد اختلاف رطوبت در خمیر سیمان می کند و در نتیجه مولکول های آب می توانند به حفره های بزرگتر منتقل شوند. اگر اختلاف رطوبت به اندازه کافی بزرگ باشد، آب ژل به داخل حفره های موئینه منتقل شده و از آنجا به هوای اطراف انتقال می یابد. خروج آب ژل باعث انقباض ژل هیدرات سیلیکات کلسیم می گردد که به عنوان انقباض یا آبرفتگی (shrinkage) شناخته می شود.

## تکنولوژی بتن

هنگامی که بتن خشک شده مجدداً در تماس با آب قرار گیرد دوباره متورم می‌شود، ولی یک نکته مهم در مورد آبرفتگی خمیر سیمان این است که قسمتی از انقباض حاصل در اولین خشک شدگی، برگشت ناپذیر است. نمودار زیر نشاندهنده این واقعیت است.

شکل ۱۰-۷- نمودار انقباض بتن



### عوامل مؤثر در انقباض بتن

- سنگدانه: هر قدر حجم سنگدانه در بتن بیشتر و هر قدر مدول الاستیسیتیه سنگدانه بالاتر باشد، انقباض بتن کمتر خواهد بود.
- رطوبت نسبی محیط: هر قدر رطوبت نسبی محیط پایین تر باشد، تبخیر آب بیشتر و در نتیجه انقباض بتن بیشتر خواهد بود.
- اندازه عضو بتنی: هر قدر یک عضو بتنی سطح مقطع بزرگتری داشته باشد، کمتر دچار انقباض خواهد شد. علت این امر این است که عضوهای بزرگتر و ضخیم‌تر در مقابل حجم

## خواص بتن سخت شده

بیشتر، سطح تماس کمتری با محیط دارند و چون تبخیر آب نیز از همین سطح آزاد بتن صورت می‌گیرد، مقدار تبخیر در آنها بطور نسبی کمتر خواهد بود. اندازه عضو بتنی را با کمیتی به نام مساحت مقطع به سطح نشان می‌دهند. اگر مقطع مشخصی از عضو بتنی در نظر گرفته شود نسبت حجم به سطح نشان آن همان نسبت حجم به سطح خواهد بود. در بعضی از منابع به جای نسبت حجم به سطح، دو برابر آن را در نظر گرفته و اصطلاحاً ضخامت مؤثر می‌نامند. برای مثال در یک عضو بتنی با مقطع مستطیلی به ابعاد  $b \times h$  نسبت حجم به سطح برابر  $\frac{b \times h}{2(b \times h)} = \frac{v}{8}$  و ضخامت مؤثر برابر  $\frac{b \times h}{b + h}$  خواهد بود. هر قدر نسبت  $\frac{v}{8}$  بزرگتر باشد، انقباض بتن کمتر است. حدود 70% از انقباض 30 ساله بتن در طول یک سال اول انجام می‌گیرد.

## خزش بتن (creep)

خزش عبارتست از افزایش تدریجی کرنش بتن تحت اثر نیروی ثابت و مدام.

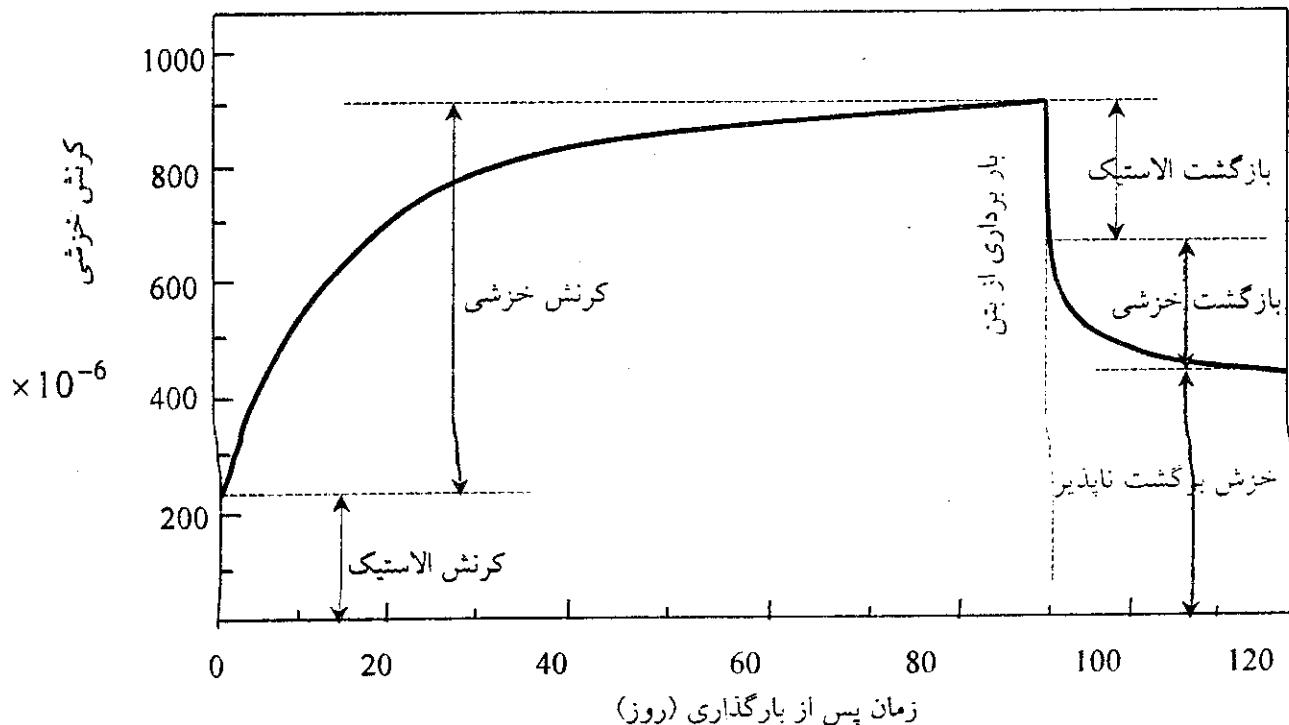
## عوامل مؤثر در خزش بتن.

- ۱- رطوبت نسبی: اگر بتن در رطوبت نسبی 100% عمل آورده شده و سپس تحت اثر نیرو قرار گیرد، رطوبت نسبی محیط تاثیر زیادی بر خزش خواهد داشت و خشک‌تر بودن محیط باعث افزایش خزش خواهد شد. ولی اگر بتن قبل از بارگذاری در معرض خشک شدن قرار گرفته باشد، تاثیر خشکی هوا بر خزش ناچیز و حتی صفر خواهد بود، زیرا هنگام شروع بارگذاری رطوبت کمی در بتن باقی مانده است.
- ۲- تنش بتن و مقاومت آن: در تنش‌های معمولی سازه‌های بتنی (حدود 0.2 تا 0.3 مقاومت بتن)، خزش متناسب با تنش موجود در بتن است. از طرف دیگر خزش به طور معکوس متناسب با مقاومت بتن در هنگام بارگذاری است. در نتیجه هر قدر تنش موجود در بتن کمتر، و هر قدر مقاومت بتن در هنگام بارگذاری بیشتر باشد، خزش آن کمتر خواهد بود.

## تکنولوژی بتن

- ۳- سن بتن هنگام بارگذاری: هر قدر سن بتن هنگام بارگذاری بیشتر باشد، خزش کمتر خواهد بود.
- ۴- سنگدانه موجود در بتن: تاثیر سنگدانه بر خزش مشابه تاثیر آن بر انقباض بتن است.
- ۵- اندازه عضو بتنی: تاثیر این عامل نیز مشابه تاثیر آن بر انقباض بتن است.
- ۶- دما: تاثیر دما بر خزش پیچیده است و هنوز به درستی شناخته نشده است.
- ۷- مدت زمان زیر بار بودن: با افزایش زمان زیر بار بودن بتن به تدریج خزش نیز افزایش می‌یابد. معمولاً خزش ایجاد شده در 30 سال به عنوان خزش نهایی شناخته می‌شود که در حدود 70% آن در یک سال اول اتفاق می‌افتد. در شکل زیر تغییرات کرنش خزشی با زمان در یک بتن نمونه نشان داده شده است.

شکل ۱۰-۸- نمودار کرنش خزشی



## خواص بتن سخت شده

### تأثیرات خزش بر بتن

به عنوان مزیت می‌توان گفت که وجود خزش باعث آزاد شدن تنش‌های کششی ناشی از اختلاف دما و رطوبت می‌شود. معایب ناشی از خزش و انقباض در بتن عبارتند از:

- ۱- از دست دادن پیش‌تنیدگی در تیرهای بتنی پیش‌تنیده
- ۲- انتقال تنش از بتن به فولاد در عضوهای بتن آرمه
- ۳- افزایش خیز در تیرها
- ۴- ایجاد تغییرشکل‌های نامساوی در ساختمان‌های بلند

### روش‌های پیش‌بینی آبرفتگی و خزش

با توجه به اینکه هر دو کرنش فوق تابع عوامل زیادی بوده و در مدت طولانی اتفاق می‌افتد، ارائه روابط کاملاً دقیق برای محاسبه آنها تقریباً غیرممکن است. تنها راه قابل اطمینان، ساخت نمونه‌هایی از بتن با مشخصات کاملاً مشابه بتن مورد نظر و نگهداری آنها در آزمایشگاه با شرایط محیطی کاملاً مشابه منطقه مورد نظر برای مدت طولانی و انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری کرنش‌های آبرفتگی و خزشی با وسایل دقیق و سپس تعمیم نتایج به دست آمده می‌باشد. این روش پرهزینه و طولانی مدت بوده و در بیشتر موارد امکان‌پذیر نیست. بنابراین در آیین‌نامه‌های طراحی بتن، روش‌هایی تجربی ارائه شده است که اگرچه نتایج حاصل از آنها دارای تقریب زیادی است ولی به هر حال برآورده از کرنش‌های درازمدت بتن به دست می‌دهد که در محاسبات سازه‌های بتن آرمه کاربرد دارد. معروف‌ترین این روش‌ها در آیین‌نامه‌های طراحی بتن آمریکا و انگلستان ارائه شده است که برای استفاده از آنها می‌توان به آیین‌نامه ACI 209R-82 و آیین‌نامه BS8110:Part2 انگلستان مراجعه نمود.

## انواع بتن و کاربرد آنها

### بتن سبک (light - weight Concrete)

بتنی است که وزن مخصوص آن از بتن معمولی ( $2400\text{kg/m}^3$ ) کمتر باشد. بتن سبک را می‌توان به دو روش طبقه‌بندی کرد، برآسازی روش ساخت و برآسازی کاربرد.

### انواع بتن سبک از نظر روش ساخت

- ۱) بتن سبک که از سنگدانه‌های سبک به چگالی نسبی کمتر از ۲.۶ ساخته می‌شود. سنگدانه‌های سبک را می‌توان به طور طبیعی یا مصنوعی تهیه نمود. از سنگدانه‌های سبک طبیعی می‌توان پومیس، سنگ آهک متخلخل و پوکه معدنی را نام برد. از سنگدانه‌های مصنوعی نیز سریاره آهن متخلخل و منبسط شده را می‌توان نام برد.
- ۲) بتن سبک که با ایجاد حفره‌های بزرگ در داخل بتن (غیر از حباب‌های ایجاد شده توسط افزودنی‌های حباب‌ساز که برای منظور دیگری ایجاد می‌شوند) ساخته می‌شود و دارای نام‌های زیر است:

- aerated (اسفنجی)
- cellular (متخلخل)

## تکنولوژی بتن

- foamed (کف دار)
- gas concrete (بتن گاز دار)

برای ساخت این بتن معمولاً از پودر آلومینیوم به نسبت 0.2% وزن سیمان استفاده می شود که باعث واکنش با هیدروکسید کلسیم یا قلیایی ها و ایجاد گاز هیدروژن می شود. همچنین می توان از یک ماده کفزا برای این منظور استفاده کرد. میزان هوای موجود در بتن کفی بین 20 تا 65% می باشد. در حالیکه میزان هوای بتن حباب دار معمولی که با استفاده از افزودنی حباب ساز برای مقابله با خطر یخ‌بندان و ذوب متواتی تهیه می شود در حدود 3-6% است. چگالی بتن کفی بسته به مورد استفاده،  $700\text{kg/m}^3 \sim 300$  است. بتن کفی دارای کارایی زیاد، بدون نیاز به تراکم، با قابلیت صاف کردن و پمپاژ خوب است و تقریباً با تمام مصالح ساختمانی دیگر سازگاری دارد.

۳) بتن بدون ریزدانه (no-fines concrete) که با حذف ریزدانه و استفاده از سنگدانه های درشت با اندازه اسمی یکسان ساخته می شود تا فضاهای خالی بیشتری در بتن ایجاد گردد. وزن مخصوص بتن در این حالت حدود 10% کمتر از بتن معمولی خواهد بود.

## انواع بتن سبک از نظر کاربرد

۱) بتن سبک سازه‌ای (structural light weight concrete) که وزن مخصوص آن از  $1840\text{kg/m}^3$  بیشتر نیست (معمولًا 1400-1800) و مقاومت آن نیز از 17 MPa کمتر نیست.

۲) بتن سبک بنایی (masonry light weight concrete) که مقاومت آن معمولاً 7-14MPa و وزن مخصوص آن  $500-800\text{kg/m}^3$  است.

۳) بتن سبک عایق‌کاری (isolating light weight concrete) که مقاومت آن معمولاً 0.7-7MPa و وزن مخصوص آن کمتر از  $800\text{kg/m}^3$  است.

## انواع بتن و کاربرد آنها

مقایسه بعضی خواص بتن سبک با بتن معمولی

- مدول ارتجاعی کمتر در مقایسه با بتن معمولی

- مقاومت بیشتر در مقابل انجماد و ذوب

- مقاومت بیشتر در برابر آتش سوزی

- بریدن و سوراخ کردن آسانتر از بتن معمولی

- مقاومت برشی و پیوستگی کمتر از بتن معمولی

## بتن سنگین

برای افزودن به وزن مخصوص می‌توان سنگدانه‌های معمولی را با مصالحی با چگالی نسبی بالاتر، معمولاً<sup>4</sup> بیش از 4، (در مقایسه با 2.6 برای سنگدانه‌های معمولی) جایگزین نمود. برای این منظور مصالح طبیعی یا مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مصالح طبیعی که بیشتر بکار می‌رود باریت (سولفات باریم) است که دارای چگالی نسبی 4.1 می‌باشد. برای مثال با بکار بردن مخلوط 4.6:6.4 و نسبت  $w/c=0.58$  وزن مخصوص بتن  $3700\text{kg/m}^3$  بدست آمده است. یکی دیگر از انواع سنگدانه‌های طبیعی سنگ معدن آهن است. با استفاده از این سنگها وزن مخصوص بتن  $3000-3900\text{ kg/m}^3$  بدست آمده است.

مصالح سنگین وزن مصنوعی نیز بکار برده می‌شوند که اغلب از جنس فولاد، فسفات آهن و در بعضی موارد سرب می‌باشد. با ساقمه‌های فولادی می‌توان بتن با وزن مخصوص تا حدود 6400 $\text{kg/m}^3$  تولید نمود. به طور کلی در بعضی از موارد بتن سنگین با وزن مخصوص تا  $5500\text{kg/m}^3$  نیز ساخته شده است.

## موارد کاربرد بتن سنگین:

- حفاظت در برابر پرتوهایی مانند اشعه X، اشعه γ و پرتوهای نوترونی

## تکنولوژی بتن

- ساخت وزنهای تعادل و هر جاکه نیاز به چگالی بالا وجود داشته باشد.

### بتن پیش ساخته (pre-cast concrete)

منظور از بتن پیش ساخته بتُنی است که به صورت قطعات از پیش تعیین شده در کارخانه و تحت شرایط کنترل شده ساخته می شود و سپس به محل پروژه ساختمانی حمل شده و نصب می گردد. هدف از ارائه این روش بتن سازی صنعتی کردن ساختمان سازی از طریق تولید انبوه عناصر ساختمانی پر مصرف مانند ستونها، تیرها، دیوارها و دالها می باشد.

### مزایای بتن پیش ساخته

- نیاز به کارکنان کمتر واحد تولید، به علت تولید مکانیزه و سری.
- استفاده از کارگران غیر ماهر محلی در محل پروژه، به جای کارگران ماهر مهاجر.
- زمان ساخت کوتاه تر، چون اغلب فقط ساخت فونداسیون و اتصال قطعات در محل انجام می شود.
- کنترل کیفیت بهتر و مقاومت بالاتر قطعات بتُنی که تحت شرایط کارخانه ای حاصل می شود.
- عدم تأثیر پذیری کیفیت اجرای پروژه از وضعیت آب و هوایی پروژه.

### معایب بتن پیش ساخته

- هزینه بیشتر حمل قطعات پیش ساخته در مقایسه با حمل مصالح ساختمانی.
- مسائل فنی اضافی مربوط به مونتاژ قطعات پیش ساخته و هزینه اتصال آنها.

### بتن مسلح شده با الیاف (fiber reinforced concrete)

این نوع بتن شامل خمیر سیمان، ملات یا بتن همراه با الیاف آزبست، شیشه، پلاستیک و یا

## انواع بتن و کاربرد آنها

فولاد می‌باشد. در مواقعي که اثری زیادی باید جذب گردد (مثلاً بارهای ناشی از انفجار) و مقاومت کششی زیاد و کاهش ترک خوردنگی مطلوب است، و یا حتی در مواردی که به علت شکل خاص عضو بتنی نمی‌توان بتن مسلح معمولی مصرف نمود، بتن مسلح شده با الیاف مفید واقع می‌گردد. الیاف مقاومت ضربه‌ای را افزایش می‌دهند، توسعه ترک خوردنگی را محدود می‌سازند و باعث افزایش ظرفیت تحمل تغییرشکل نسبی می‌گردند.

### بتن پیش‌فسرده یا پیش چیده (pre-placed concrete)

این نوع بتن در دو مرحله ساخته می‌شود. در مرحله اول سنگدانه‌های درشت با ابعاد تقریباً یکنواخت از نوع شکسته یا صاف در داخل قالب قرار داده می‌شوند. در جاهایی که آرماتوریندی متراکم باشد، سنگدانه‌ها باید فشرده شوند. حجم سنگدانه ریخته شده حدود 65-70% حجم بتن را تشکیل می‌دهد. فضاهای خالی باقی مانده در قالب در مرحله بعدی با ملات سیمان پر می‌شود. بدیهی است که سنگدانه بکار رفته دارای دانه‌بندی گسیخته می‌باشد. سنگدانه‌ها باید عاری از آلودگی و گرد و غبار باشد.

مرحله دوم عملیات شامل پمپ کردن ملات سیمان با استفاده از لوله‌های پلاستیکی شکافدار می‌باشد که با فاصله‌های تقریبی دو متر در عمق سنگدانه‌ها قرار گرفته و هنگام ریختن ملات به آرامی بالاکشیده می‌شود.

بتن پیش‌فسرده را می‌توان در نقاطی که با روش‌های بتن‌ریزی معمولی به آسانی در دسترس نیستند و یا دارای ملحقاتی هستند که باید در طول بتن‌ریزی ثابت و پایدار بمانند، بکار برد. این نوع بتن دارای مقدار انقباض کمتری از بتن معمولی است، زیرا سنگدانه‌های درشت با هم تماس داشته و از انقباض جلوگیری می‌کنند.

### بتن با مقاومت زیاد (high strength concrete)

بتن با مقاومت بالا امروزه بیشتر بتن با عملکرد بالا (high performance concrete) خوانده

## تکنولوژی بتن

می شود. این نوع بتن در حقیقت یک ماده غیرعادی نبوده و دارای موادی غیر از آنچه که تاکنون گفته شده، نیست. منظور از عملکرد بالا ممکن است مقاومت زیاد، دوام بالا یا مدول الاستیسیته بالا باشد. اگر منظور مقاومت زیاد باشد، باید گفت که مفهوم این اصطلاح در طول زمان تغییر کرده است. زمانی مقاومت  $40\text{ MPa}$  زیاد محسوب می شد، بعد از مدتی مقاومت  $60\text{ MPa}$  به عنوان مقاومت بالایی به حساب می آمد. امروزه در کشورهای پیشرفته بتن با مقاومت بیش از  $80\text{ MPa}$  به عنوان بتن با مقاومت بالا شناخته می شود. باید توجه شود که در این محدوده مقاومت‌ها تفاوت بین آزمایش فشاری استوانه‌ای و مکعبی به حداقل می‌رسد و در نتیجه ذکر نوع نمونه بکار رفته اهمیت چندانی ندارد.

بتن با مقاومت بالا از این اجزا تشکیل شده است: سنگدانه معمولی با کیفیت خوب، سیمان پرتلند معمولی با عیار بسیار بالا در حدود  $550\text{ kg/m}^3 \sim 450$  (سیمان پرتلند زود سخت‌شونده نیز در صورت نیاز به کسب مقاومت سریع می‌تواند بکار رود)، دوده سیلیس<sup>۱</sup> (silica fume) معمولاً در حدود ۵% تا ۱۵% وزن کل سیمان، گاهی مواد سیمانی دیگر مانند خاکستر زغال سنگ یا سرباره آهن‌گدازی، و همیشه یک فوق روان‌ساز. مقدار ماده فوق روان‌ساز به کار رفته زیاد خواهد بود: ۵ تا ۱۵ لیتر در یک متر مکعب بتن. این مقدار روان‌ساز عالی باعث کاهش آب موردنیاز به میزان ۴۵ تا ۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب بتن می‌شود. بتن تهیه شده باید با روش‌های عادی قابل ریختن در قالب باشد و عمل آوری کاملاً مرطوب نیز باید انجام شود. عامل اصلی بالا رفتن مقاومت این نوع بتن نسبت آب به سیمان بسیار پایین آن است که همیشه کمتر از ۰.۳۵ و اغلب در حدود ۰.۲۵ می‌باشد. بتن با مقاومت بالا، دارای کمترین تخلخل می‌باشد که لازمه آن وجود ذرات بسیار ریز (مانند دوده سیلیس) در دانه‌بندی می‌باشد. چنین مخلوطی باید دارای کارایی کافی باشد تا ذرات کاملاً پخش شده و فضاهای خالی را پر کنند. این مقدار کارایی با

۱- محصول جانبی کورهٔ قوس الکتریکی تولید آلیاژ سیلیکون که به صورت گازی از آن خارج شده و جمع آوری می‌شود.

## انواع بتن و کاربرد آنها

استفاده از روان‌ساز عالی به مقدار زیاد حاصل می‌شود.

در صورتی که شرایط فوق برقرار باشد، بتن با عملکرد بالا حاصل خواهد شد. چنین بتنی بسیار فشرده بوده و دارای حداقل مقدار حفره‌های مویینه خواهد بود که این حفره‌ها در هنگام عمل آوری بتن به قطعات کوچکتر تقسیم می‌شود. در عین حال، به علت کم آب بودن بتن، مقدار قابل ملاحظه‌ای از سیمان غیرهیدراته باقی می‌ماند حتی اگر بتن در تماس با آب باشد، زیرا آب نمی‌تواند به داخل آن نفوذ کند. این سیمان غیرهیدراته می‌تواند به عنوان سنگدانه‌های بسیار ریزی فرض شود که پیوستگی خوبی با مواد حاصل از هیدراسیون داردند.

### خواص سنگدانه مورد استفاده در بتن با مقاومت زیاد

در این نوع بتن، مقاومت فشاری سنگ دارای اهمیت است. همچنین برای ایجاد چسبندگی خوب بین سنگدانه‌های درشت و خمیر سیمان، این سنگدانه‌ها باید دارای ابعادی تقریباً نزدیک به هم بوده و سطح آنها خیلی صاف نباشد چون ممکن است چسبندگی خوبی با خمیر سیمان نداشته باشند. سنگدانه‌ها باید تمیز و عاری از غبار باشند.

سنگدانه‌های ریز باید شکلی نزدیک به گرد داشته و دارای دانه‌بندی یکنواخت و کمی درشت‌تر از معمول باشند، زیرا مخلوط‌های با عیار سیمان بالا دارای ریزدانه زیادی می‌باشند. اگر چه استفاده از سنگدانه‌های درشت با حداکثر ابعاد کوچکتر منجر به افزایش آب مورد نیاز مخلوط می‌شود، ولی با استفاده از روان‌سازهای عالی و کم بودن نسبت آب به سیمان، این موضوع دیگر دارای اهمیت نخواهد بود و با استفاده از درشت‌دانه‌های کوچکتر سطح تماس کلی سنگدانه با خمیر سیمان بیشتر شده و تنفس پیوستگی کمتر خواهد شد. در نتیجه گسیختگی بتن از میان سنگدانه‌های درشت و یا خمیر سیمان اتفاق خواهد افتاد. این بدان معنی است که برخلاف بتن معمولی مقاومت پیوستگی کمتر از مقاومت سنگدانه نخواهد بود.

## تکنولوژی بتن

### بتن پلمری (Polymer-Impergnated Concrete)

وقتی که بتن تحت شرایط معمولی تهیه و عمل آورده شود، تخلخل مویینه زیادی در خمیر سیمان وجود خواهد داشت، حتی در بتن خوب عمل آمده و با نسبت آب به سیمان پایین. باید توجه داشت که مقداری از تخلخل به عنوان قسمتی از ژل C-S-H در نظر گرفته می‌شود. اگر آب موجود در حفره‌های مویینه بیرون کشیده شده و به وسیله ماده جامدی جایگزین شود، مقاومت و دوام بتن تا حد زیادی افزایش خواهد یافت. این عمل اساس بتن پلمری را تشکیل می‌دهد. عمل جایگزینی فضای خالی به وسیله ماده جامد با استفاده از یک مونومر مایع (مونومر مولکول واحدی است که از تکرار به هم پیوستن تعدادی زیادی از آن پلیمر به وجود می‌آید) برای اشباع کردن بتن و سپس پلمریزه کردن مونومر برای تشکیل یک پلیمر جامد در حفره‌های داخل بتن انجام می‌شود.

مقادیر جدول زیر تغییرات حاصل در خواص یک بتن نمونه با استفاده از پلمریزه کردن را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱۲ - مقایسه خواص بتن پلمری

خواص	بتن خالص	بتن پلمری (متیل متاکریلات)	بتن پلمری (استیرن)
مقاومت فشاری ۲۸ روزه MPa	37	140	70
مقاومت کششی ۲۸ روزه MPa	2.8	11	5.8
مقاومت خمشی ۲۸ روزه MPa	5.2	18	—
مدول الاستیسیته GPa	24	44	44
جذب آب %	6.4	0.3	0.7
ضریب انبساط	10.0	9.5	9.0
حرارتی $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$			
پیوستگی به فولاد MPa	1.7	3.8	4.1

## انواع بتن و کاربرد آنها

### مواد به کار رفته در بتن

هر نوعی از بتن را صرف نظر از نوع سیمان، افزودنی‌ها یا سنگدانه‌ها، می‌توان پلیمریزه کرد. تغییرات در طرح اختلاط و نوع مواد تشکیل‌دهنده بتن تعیین‌کننده میزان ماده پلیمری لازم و میزان سهولت انجام عمل اشباع کردن است. مقدار پلیمر لازم برای اشباع کامل بستگی به تخلخل بتن (و در نتیجه نسبت آب به سیمان) دارد. بتن متخلخل‌تر نیاز به پلیمر بیشتری دارد ولی اشباع کامل در آن آسان‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود.

### مواد پلیمری

مونومرهای مختلفی با موقیت برای ساخت بتن پلیمری به کار رفته‌اند. خواص مطلوب یک مونومر عبارتند از ویسکوزیته پایین، دمای جوش نسبتاً بالا، سمیت کم، آسانی پلیمری شدن، هزینه کم و در دسترس بودن آن. مناسب‌ترین مونومرهای رایج عبارتند از: متیل متاکریلات (methyl methacrylate) (MMA) و استیرن (styrene). ویسکوزیته پایین این مواد باعث می‌شود که برای نفوذ به داخل سیستم حفره‌های بتن سخت شده ایده‌آل باشند. پلیمرهای حاصل از این مونومرا که به ترتیب پلی‌استیرن و پلی‌متاکریلات نام دارند خواص مکانیکی خود را در دماهای بالا حفظ نمی‌کنند. اگر بتن پلیمری در دماهای بالاتر از دمای محیط مورد استفاده قرار گیرد، باید از مونومرهایی استفاده کرد که پلیمرهایی با خواص اصلاح شده ایجاد کنند. می‌توان از مواد افزودنی مخصوص برای ایجاد خواص حرارتی بهتر در پلیمرهای فوق استفاده کرد.

### مراحل کار

ساخت بتن پلیمری شامل مراحل زیر بعد از ساخت و عمل آوری بتن معمولی است:

(۱) خشک کردن بتن

(۲) اشباع کردن بتن با مونومر

## تکنولوژی بتن

### ۳) پلیمری کردن مونومر

#### مرحله خشک کردن

برای اشباع کامل نمونه بتنی، باید آب قابل تبخیر آن تا حد امکان جدا شود (در حدود ۲% - ۴% وزن بتن). برای بتن سازه‌ای معمولی دمای  $150^{\circ}\text{C}$  توصیه می‌شود. مدت زمان لازم برای خشک کردن بستگی به دمای خشک کردن، نسبت آب به سیمان بتن، و ضخامت نمونه بتنی دارد. به عنوان نمونه در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  یک لوله بتنی به ضخامت  $100\text{mm}$ ،  $24$  ساعت زمان لازم دارد.

#### مرحله اشباع کردن (impregnation)

اشباع کامل سیستم حفره‌های بتن بستگی دارد به ویسکوزیته مونومر، میزان تخلخل و چگونگی توزیع حفره‌های داخل بتن، فشار هیدرواستاتیکی، و زمان. اشباع کامل یک بتن با کیفیت خوب و تخلخل کم بعد از حدود یک ساعت غوطه‌ور شدن در داخل مونومر حاصل می‌شود به شرطی که بتن خشک شده قبلاً در محفظه خلاء قرار گرفته و سپس مونومر در شرایط خلاء به محفظه وارد شده و در محفظه تحت فشار  $70\text{kPa}$  قرار گیرد.

#### مرحله پلیمری کردن

موفقیت کامل مراحل پلیمری کردن بتن بستگی به پلیمری کردن صحیح مونومر دارد. دو روش برای پلیمری کردن مونومرها به کار می‌رود:

(۱) قرار دادن مونومر در معرض اشعه گاما

(۲) استفاده از یک کاتالیزور و حرارت

با استفاده از اشعه گاما پلیمری کردن در دمای معمولی اتاق و به طور یکنواخت برای قطعات

## أنواع بتن و كاربرد آنها

نسبتاً ضخیم بتن می تواند انجام شود ولی خطرات ناشی از اشعه گاما استفاده از آن را در کارگاه با محدودیت مواجه می کند. در روش دوم مخلوط کاتالیزور و مونومر باید تا دمای  $80^{\circ}\text{C}$  گرم شود تا پلیمریزاسیون شروع شود. برای جلوگیری از تبخیر مونومر در اثر حرارت، پیچیدن بتن با صفحات پلاستیکی یا ورق آلومینیوم توصیه می شود.

## - بتن فروسیمانی

فروسیمانی نوعی از بتن مسلح میباشد که با نوع معمولی تفاوت دارد . فروسیمان شامل لایه های متعدد و نزدیکی از شبکه ها یا میلگرد های نازک است که کاملاً توسط ملات سیمان احاطه شده اند . فروسیمان خیلی نازکتر از بتن مسلح بوده و شبکه آرماتور آن را بدون محدودیت می توان به هر شکلی در آورده و سپس روی آنرا با پاشیدن ملات بوسیله دست یا پمپ پوشانید . روش تولید فروسیمان زحمت زیادی دارد و به همین دلیل تولید آن نسبتاً گران تمام میشود . در نتیجه موارد مصرف بخصوصی دارد که از جمله در ساختن کشتی های کوچک ، خانه های متحرک ، استخراج های شنا ، سیلوها مخازن آب و سقف های قوسی یکار میروند . این مصارف با توجه به این نکته است که در فروسیمان مقاومت در مقابل ترک خوردن و نسبت مقاومت کششی به جرم ، بیشتر از بتن مسلح معمولی می باشد . معمولاً ملات مورد استفاده در فروسیمان ، شامل سیمان پرتلتند یا سیمان پرتلتند - پوزولان ، ماسه خوب دانه بندی شده و احتمالاً مقداری شن ریز متناسب با نوع و اندازه شبکه می باشد . با درنظر گرفتن نسبت ماسه به سیمان بین ۱/۵ تا ۲/۵ و نسبت آب به سیمان بین ۰/۳۵ تا ۰/۵۵ ، مخلوط رضباتیت بخشی تشکیل خواهد شد که حدود ۰/۹۵ حجم فروسیمان را اشغال می کند . در جنس مصالح شبکه های فروسیمانی ، تنوع گسترده ای وجود دارد که از سیمه های ظریف بافته شده یا متصل شده تا شبکه های فولادی جوش شده ، تسمه های فلزی کشیده شده و صفحات سوراخدار و مشبک ، تغییر می کند . باید توجه داشت که تعریف فروسیمان در ۶۲ - ACI ۵۴۹R ، مصالح غیر فلزی مانند الیاف آلی طبیعی و الیاف شیشه ای را که بصورت شبکه های شطرونگی مورد استفاده قرار می گیرند ، شامل می شود .

## - بتن غلطکی

بتن غلطکی (RCC) یا بتن متراکم شده با غلتک ، بتنی با اسلامپ صفر ، میباشد که با ارتعاش توسط غلتکها محکم و سخت شده است . مواردی از کاربرد این نوع بتن ، در ساختمان سدها ، اجرای سریع تک لایه های روسازی بزرگراهها و گذرگاهها و اجرای چندلايه پی ها می باشند . بتن غلتکی ، باید به اندازه کافی خشک باشد تا وزن غلتکها را تحمل کند و به اندازه کافی خیس باشد تا در ضمن اختلاط و تراکم امکان پخش یکنواخت خمیر سیمان در بتن فراهم شود . برای اطمینان از پیوستگی کافی بین بتن غلتکی جدید و بتن سخت شده قبلی ، یا در درزهای سرد باید از جدایی جلوگیری شود و اولین مخلوط بصورت مخلوطی با خاصیت پلاستیکی زیاد ، مورد استفاده قرار گیرد . برای حداقل نمودن گرمای هیدراتاسیون در بتن های حجیم و درنتیجه حداقل شدن ترکها ، لازم است مقدار سیمان کم باشد و تا حد امکان بزرگترین سنگدانه هایی که باعث جدایی نشوند ، مورد استفاده قرار گیرد .

## - بتن گوگردی ( Sulphur concrete )

بتن گوگردی شامل گوگرد و سنگدانه های ریز و درشت می باشد و آب و سیمان ندارد . پودر گوگرد و سنگدانه ها در یک مخلوط کن معمولی که با یک گرم کن تجهیز شده ، طوری مخلوط می شوند که دمای مخلوط به  $140^{\circ}$  درجه سانتیگراد برسد . در این دما ، مخلوط یکنواختی تشکیل می شود که میتوان آنرا در قالب ریخت . برای تهیه این نوع بتن روش دیگری نیز وجود دارد . در

هنجام بتن ریزی ، قالبها مقدار بیشتری پر می شوند . زیرا گوگرد در ضمن سرد شدن منقبض میگردد . سپس با استفاده از اره بتن اضافی بریده می شود . بهترین نسبت وزنی اجزاء ، برای رسیدن به مقاومت و کارآیی بهینه به صورت ۲۰ درصد گوگرد ، ۳۲ درصد ریزدانه ، ۴۸ درصد درشت دانه و ۵ درصد پودر سیلیس می باشد . دانه بندی سنگدانه ها باید طوری انتخاب شود که کمترین مقدار فضای خالی را ایجادنماید .

در مقایسه با بتون معمولی ، بتون گوگردی سریعتر به مقاومت می رسد و در شرایط دمایی و رطوبتی معمولی ۹۰ درصد مقاومتش را در ۶ تا ۸ ساعت بدست می آورد . مقاومت بالا در سنین اولیه و پایانی خوب و شیمیایی ، بتون گوگردی را برای مصرف در قطعات پیش ساخته و مصرف در کارخانه های صنعتی ، مناسب می سازد . شکنندگی ، خرسن زیاد و اثر خورندگی بر فولاد در شرایط مرطوب ، از معایب بتون گوگردی می باشد . همچنین بتون گوگردی دارای نقطه ذوب پائینی در حدود ۱۱۹ درجه سانتیگراد می باشد که در پی آن مقاومت کاهش می یابد و مستعد احتراق می گردد و گازهای سمی تولید می شود . مقاومت این نوع بتون در مقابل یخ زدن و آب شدن نیز کم میباشد .

بتون با گوگرد نفوذی مانند بتون با پلیمر تزریقی ساخته میشود از آنجا که گوگرد بطور قابل ملاحظه ای ارزانتر از منومرهاست و تکنیکهای تزریق آن خیلی ساده است ، تفاوت قیمت قابل ملاحظه ای وجود دارد . نسبت آب به سیمان بتنی که می خواهیم در آن گوگرد تزریق کنیم باید بالا باشد . اگر نسبت آب به سیمان بین ۰/۷ تا ۰/۸ باشد ، دیگر برای نفوذ گوگرد به فشار خارجی نیاز نخواهد بود . تزریق گوگرد در یک بتون معمولی که مقاومت فشاری آن  $Kg/cm^2$  ۲۰ و خمینی آن  $Kg/cm^2$  ۴ باشند ، مقاومت ها را به  $Kg/cm^2$  ۹۰۰ برای مقاومت فشاری و  $Kg/cm^2$  ۱۸۰ برای مقاومت خمینی افزایش خواهد داد . مقاومت بتون با گوگرد نفوذی در مقابل حمله سولفاتها ، اسیدها و تناوبهای یخ زدن و آب شدن ، خوب می باشد . اما معمولاً محلولهای قلیایی باعث شسته شدن گوگرد می شوند .

## منابع استفاده برای تدوین جزوه

۱. تکنولوژی بتن، مهندس سید محمد نکوفر ، انتشارات نیکان کتاب ، ۱۳۸۰
۲. فن آوری بتن ، دکتر محمد حسن رامشت، نشر نیک پی ، ۱۳۸۶

# پیوست ها

**سایت های ایرانی در رابطه با ساختمان**

www.weather.ir/farsi/	آب و هوای ایران
tec.mporg.ir/	آخرین بخش‌نامه های سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
www.itiran.com/ayin/show_user.asp	آین نامه های مربوط به فناوری اطلاعات
www.iritn.com	اخبار فن آوری اطلاعات ایران
www.salammohandea.com	اطلاعات مهندسی ایران
www.toptoop.com/homeen.html	اطلاعاتی راجع به معماری به زبان فارسی و انگلیسی
fa.issiran.com/	انجمن آهن و فولاد ایران
	انجمن بین المللی مستندات و مطالعات تحقیقی
www.isoces.org/hom.htm	انجمن مهندسان راه و ساختمان
www.iranbeton.com	ایران بت
wwwirancomposite.com	ایران کامپوزیت درباره مواد مركب
www.iranhoo.com	بانک اطلاعات ایران
www.irancivil.com	بانک اطلاعات ساختمان
www.irnes.com	بانک اطلاعاتی خدمات مهندسی ایران
www.tamin.org.ir	بخش‌نامه ها و دستورالعمل‌های بیمه ای
mefa.ir/home-fa.html	پایگاه اطلاع رسانی وزارت امور اقتصادی و دارایی
www.iiees.ac.ir	پژوهشکده زلزله شناسی
www.faragamara.com/bakh_search.asp	جستجو در بخش‌نامه های سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
www.irnes.com	خبری و علمی عمران
www.nezam-mohandesir.ir	دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان
www.irirw.com	راه آهن (خبراء، مناقصات و ...)
www.rai.ir/site.aspx	راه آهن جمهوری اسلامی ایران
www.bam.3dup.net	راهنمای صنعت ساختمان در اینترنت
www.mpo-kh.ir	سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان
www.mporg.ir	سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
www.nezam.hud.ir	سازمان نظام مهندسی ساختمان
www.iiees.ac.ir	سازمان نقشه برداری کشور
www.cao.ir/farsi/default.aspx	سازمان هواشناسی کشور
www.iranbuilders.com	سازندگان ایرانی
www.irost.com	سایت جدید شبکه علمی کشور
wwwiransteel.net	شبکه اطلاع رسانی فولاد ایران
www.iransciencw.net	شبکه علمی کشور
www.tehrancouncil.com	شورای شهر تهران
mashhadshora.ir	شورای شهر مشهد
www.iranshora.org	شورای عالی شهرسازی

www.irnes.com	صدور خدمات فنی مهندسی ایران
www.irancement.com/new_index.php	صنعت سیمان به همراه آگهی های مناقصه و مزایده
www.abadgar.org	کانون سراسری شرکتهای ساختمانی و تاسیساتی
www.digilib.sharif.acir	کتابخانه دیجیتالی فارسی
www.irvl.net	کتابخانه های مجازی ایران
www.rah-o-sakhteman.com	ماهنشمه راه و ساختمان
www.magiran.com	مجلات ایرانی
www.ici.gov.ir	مرکز اطلاعات ساختمان و مسکن
www.omran.net	مرکز اطلاعات عمران
www.ticiran.com/default.aspx	مرکز اطلاعات فنی ایران
www.irancivilcenter.com	مرکز اطلاعات مهندسی عمران ایران
www.civilhouse.ir	مرکز برگزاری دوره های تخصصی ساختمان
www.bhrc.gov.ir	مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
www.tehrantraffic.com	مرکز کنترل ترافیک تهران
mashadtraffic.ir	مرکز کنترل ترافیک مشهد
www.irandoc.sc.ir	مرکز مدارک علمی ایران
www.irandoc.ac.ir	مرکز مدارک علمی ایران
www.tehran.ir/Default.aspx?tabid=3505&language=en-US	مزایده و مناقصه های شهرداری تهران
www.mpo-kh.ir/mosavab.asp	مصطفویه های سازمان مدیریت و برنامه ریزی
www.iranbid.com/index.html	عوقور جستجوی مناقصه ها و مزایده های داخلی و بین الملل ایران
www.shana.net	نفت (اخبار، مناقصات و ...)
www.irirw.com	وزارت راه و ترابری (اخبار، مناقصات و ...)
www.mhud.gov.ir	وزارت مسکن

سایت های خارجی در رابطه با ساختمان

www.skyscrapers.com	آسمانخراش های جهان
www.astm.org	انجمن آزمایش مواد ایالات متحده
www.asee.org	انجمن آموزشی مهندسی آمریکا ASEE
www.aci-int.org	انجمن بتن آمریکا ACI
www.precast.org	انجمن بتن پیش ساخته ایالات متحده
www.iaces.org	انجمن بین المللی دانشجویان رشته های مهندسی سازه
www.ipma.ch	انجمن بین المللی مدیریت پروژه
www.ben.ufi.edu	انجمن بین المللی مستندات و مطالعات تحقیقی ساختمان
www.issmge.org	انجمن بین المللی مکانیک خاک
www.iabse.ethz.ch	انجمن بین المللی مهندسی پل و سازه IABSE
www.asccconc.org	انجمن پیمانکاران بتن آمریکا
www.icri.org	انجمن ترمیم بتن ایالات متحده
www.awt.org	انجمن تکنولوژی آب آمریکا
www.ashrae.org	انجمن تهویه و گرمایش و تبرید آمریکا
www.csda.org	انجمن دوخت بتن ایالات متحده
www.pavement.com	انجمن روسازی بتنی ایالات متحده
www.concrete-pipe.org	انجمن فولاد ساختمانی آمریکا AISC
www.chomarchitect.org	انجمن لوله های بتنی آمریکا
www.nrmca.org	انجمن ملی بتن ایالات متحده
www.asce.org	انجمن مهندسان ساختمان آمریکا
www.greatbuildings.com	بانک اطلاعاتی بنها و آثار معماری
www.undp.org	برنامه عمران سازمان ملل
www.undo.org	برنامه عمرانی سازمان ملل
www.cerf.org	بنیاد تحقیقات مهندسی سازه CERF
www.seaoc.org	بنیاد مهندسان سازه کالیفرنیا
www.theses.org	پایگاه پایان نامه های الکترونیکی برخی از دانشگاه های جهان
www.cerf.org	تحقیقات شالوده ایالات متحده
www.csce.org	جامعه مهندسی سازه کانادا CSCE
www.aserc.org	جامعه سرامیک آمریکا
www.stanford.edu	دانشگاه استنفورد
www.berkeley.edu	دانشگاه برکلی
www.structhrae.com	ساختمان های معروف جهان
www.iso.ch	سازمان استاندارد جهانی
www.aashto.org	سازمان ایالی ترابری و بزرگراه آمریکا
www.cmeec.org	سازمان مصالح مهندسی ساختمان
www.usgs.gov	سازمان نقشه برداری ایالات متحده
www.concretenetwork.com	شبکه بتن

www.eccenet.org	شورای مهندسان سازه اروپا
www.architecturemag.com	طرح های معماری، اخبار، محاسبات، تکنولوژی ساختمان
www.greatbuilding.com	عظیم ترین بانک اطلاعاتی بنایها و آثار معماری
www.ifhp.org	فدراسیون بین المللی برگزاری مسابقات
www.fidic.org	فدراسیون بین المللی مهندسان مشاور
www.fmb.org.uk	فدراسیون ساختمان سازمان عدده
www.coolhouseplans.com	فرافهم اورنده طرح های منزل به شیوه اینترنتی
www.awwa.org	کارهای آبی ایالات متحده آمریکا
www.sciencedirect.com	مجلات تخصصی فنی
www.enr.com	محله معتبر ENR درباره مهندسی
www.mrs.org	جمعیت تحقیقات مصالح ایالات متحده
www.energy.arce.ukans.edu	مدرسه معماری و طراحی شهری
www.weet.net	مرکز جهانی اطلاعات تکنولوژی بتن
www.bia.org	موسسه آجر آمریکا
www.ansi.org	موسسه استانداردهای ملی آمریکا
www pci.org	موسسه بتن پیش تبیده و پیش ساخته
www.cpci.ca	موسسه بتن پیش تبیده و ساخته کانادا
www.crsi.org	موسسه بتن مسلح آمریکا
www.imiweb.org	موسسه بین المللی اصول بنایی
www.icri.org	موسسه بین المللی ترمیم بتن
www.nrc.circ	موسسه تحقیق صنعت ساختمان
www.eeri.org	موسسه تحقیقات زلزله ایالات متحده
www.concrete-rapair.com	موسسه جهانی ترمیم بتن
www.icpi.org	موسسه روسازی های بتنی آمریکا
www.aggregates.org	موسسه سنگ و ریزدانه آمریکا
www.portcement.org	موسسه سیمان پرتلند
www.cement.org	موسسه سیمان پرتلند
www.forms.org	موسسه قالب های بتنی
www.concrete.com(&.org)	موسسه کانکریت (بتن)
www.csinet.org	موسسه مشخصات فنی ساختمان
www.nist.org	موسسه ملی استاندارد و فن آوری
www.ntis.gov	موسسه ملی اطلاعات فنی
www.efn.org	مهندسي تحليل سازه
www.engsoftwarecenter.com	نرم افزارهای مهندسی
www.icbo.org	همایش بین المللی متخصصان ساختمان

## سیمان های مناسب برای مصارف گوناگون

نوع سیمان مناسب	موارد مصرف
سیمان پرتلند معمولی (نوع ۱)	کارهای معمولی و عمومی شامل اسکلت های بتن آرم، پل ها، قطعات پیش ساخته بتن آرم، جدول و فرش کف خیابان ها، ملات ها و اندود ها و پی ساختمان هایی که در معرض حمله سولفات ها نباشند.
سیمان سفید و رنگی	ملات ها و اندود های سیمانی تزئینی بتن های نمایان
سیمان پرتلند نوع ۲، سیمان پرتلند-سرباره (با ۱۵٪ تا ۲۵٪ سرباره) و سیمان پرتلند-پوزولانی (با ۱۵٪ تا ۲۵٪ پوزولان)	کارهای جسمی (یا حجمی) مانند سدهای وزنی، کارهایی که در معرض حمله ضعیف سولفات ها قرار دارند و بتن ریزی و اندود کاری در هوای گرم
سیمان پرتلند نوع ۳	بتن هایی با مقاومت زودرس، مواردی که قالب برداری زودتر از موعد مورد نظر است، بتن ریزی، بنایی و اندود کاری در هوای سرد
سیمان پرتلند نوع ۴	بتن ریزی و اندود کاری در هوای گرم، کارهای بتن حجمی که در معرض حمله سولفات ها نباشند.
سیمان پرتلند سرباره (با بیش از ۲۵٪ سرباره)، سیمان پرتلند پوزولانی (با بیش از ۲۵٪ پوزولان)، سیمان پرتلند نوع ۵، سیمان سوپر سولفات	مقابله با سولفات های قوی
سیمان پرتلند سرباره (با بیش از ۵۰٪ سرباره)، سیمان پرتلند پوزولانی (با بیش از ۴٪ پوزولان)	مقابله با سولفات های قوی به فمراه یون کلر، مقابله با واکنش سنتگدانه ها و ساخت بتن متراکم با نفوذ پذیری کم
سیمان بنایی، سیمان آهکی-پوزولانی و سیمان آهکی-سرباره	کارهای بنایی، ملات ها و اندودها در شرایط عادی

\* «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

## مقدار سیمان در ملات ها بر حسب کیلوگرم در متربمکعب ملات

مقدار سیمان	شرح
۴۰۰	ملات ماسه سیمان ۱:۶
۲۳۵	ملات ماسه سیمان ۱:۵
۲۸۵	ملات ماسه سیمان ۱:۴
۳۶۰	ملات ماسه سیمان ۱:۳
۲۸۵	ملات ماسه بادی و سیمان ۱:۴
۳۶۰	ملات ماسه بادی و سیمان ۱:۳
۱۳۰	ملات باتارد ۱:۲:۸ (ماسه: آهک: سیمان)
۱۱۰	ملات باتارد ۱:۳:۱۰ (ماسه: آهک: سیمان)
۳۰۰	ملات سیمان پودر سنگ خاک سنگ ۱:۱:۳
۴۰۰	دوغاب سیمان سفید پودر سنگ ۱:۴ برای بندکشی سنگ پلاک و گاشی و سرامیک
۲۲۵	دوغاب سیمان سفید خاک سنگ ۱:۶ برای بندکشی موzaïek فرنگی
۳۵۰	ملات موzaïek ۲/۵: ۲/۵: ۱:۲
۴۵۰	ملات موzaïek ۲: ۱/۵: ۱
۴۳۰	دوغاب سیمان معمولی

- «برگرفته از فهرست بهای اینیه سال ۱۳۸۶»

- \* افزون بر ملات ماسه و سیمان ملات های دیگری مانند گل و کاه گل - گل آهک - ساروج - گچ خالص - گچ و خاک - گچ و ماسه - گچ و پرلیت - گچ و آهک - سیمان، پوزولانی - آهک، پوزولانی - ماسه و آهک وجود دارند که کاربردهای گوناگونی در ساختمان سازی دارند. برای آگلهی در مورد ساخت و کاربرد آن ها به فصل ۹ ملات ها در نشریه ۵۵ رجوع کنید.

حداکثر مقدار سیمان لازم در بتن برای حصول پایایی در شرایط محیطی مختلف ( kg/m<sup>3</sup> )

بتن ساده (بدون آرماتور)				بتن پیش تنیده				بتن آرمه				نوع بتن	
حداکثر اندازه اسمی مصالح سنتگی به میلیمتر													
۱۰	۱۵	۲۰	۴۰	۱۰	۱۵	۲۰	۴۰	۱۰	۱۵	۲۰	۴۰	شرایط محیطی	
۲۷۵	۲۵۰	۲۲۵	۲۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۷۵	۲۵۰	۲۲۵	بتن کاملاً محافظت شده در برابر هوا یا شرایط مخرب ، بجز مدت کوتاهی که در هنگام ساخت در معرض هوا معمولی واقع می شود .	
۳۰۰	۲۷۵	۲۵۰	۲۲۵	۳۲۵	۳۲۵	۳۰۰	۳۰۰	۳۵۰	۳۲۵	۳۰۰	۲۷۵	بتنی که از باران شدید و یا یخزدگی در حالتی که از آب اشبع شده محافظت گردد. بتن زیر خاک و بتنی که به طور مداوم زیر آب قرار می گیرد .	
۳۵۰	۳۲۵	۲۷۵	۲۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۳۲۵	۳۰۰	۲۷۵	بتنی که در معرض نمک های بخ زدا قرار می گیرد .	
۳۷۵	۳۲۵	۳۰۰	۲۷۵	۴۲۵	۴۰۰	۳۷۵	۳۷۵	۴۰۰	۴۰۰	۳۷۵	۳۷۵	بتن در معرض آب دریا یا بازلاق یا باران شدید و یا در معرض تر و خشک شدن های پیاپی و یا یخزدگی هنگامی که تراست، و یا در معرض بخارهای خورنده است .	
نیازمند بررسی های ویژه است.												بتنی که در معرض غرسایش شدید، عبور و مرور وسایط نقلیه یا آب جاری با PH حداقل ۴/۵ است. و یا رویه های بتنی محافظت نشده و ...	

\* «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

## حداکثر نسبت آب به سیمان مجاز برای بتن با مقاومت های فشاری مختلف

ردیف	مقاطومت فشاری بتن (مگا پاسکال)*	بتن معمولی	بتن با حباب هوا
۱	۱۵	۰/۸۰	۰/۷۱
۲	۲۰	۰/۷۰	۰/۶۱
۳	۲۵	۰/۶۲	۰/۵۳
۴	۳۰	۰/۵۵	۰/۴۶
۵	۳۵	۰/۴۸	۰/۴۰
۶	۴۰	۰/۴۳	-
۷	۴۵	۰/۳۸	-

\*هر مگا پاسکال تقریباً برابر ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است.

## نسبت آب به سیمان با توجه با شرایط رویارویی بتن

نسبت آب به سیمان	شرایط رویارویی
۰/۵	۱- بتن با شرایط نفوذ ناپذیر الف - در رویارویی با آب صاف
۰/۴۵	ب - در رویارویی با آب لب شور و آب دریا
۰/۴۵	۲- بتن در معرض شرایط جوی مرطوب و یخ زدن الف - جدول، آبرو، جان پناه و مقاطع با ضخامت کم
۰/۵	ب - سایر مقاطع
۰/۴۵	پ - بدون به کار بردن مواد یخ زدا
۰/۴۵	۳- برای حفاظت بتن آرمه در برابر خوردگی هنگام رویارویی با نمک های یخ زدا و آب های لب شور، آب دریا و ترشحات حاصل از آن

## موارد کاربرد رده های مختلف بتن

ردیف بتن	مقاآمت مشخصه (مگا پاسکال)	موارد کاربرد
C۶	۶	ماده پر کننده
C۸	۸	ماده پر کننده - بتن نظافت
C۱۰	۱۰	ماده پر کننده - بتن نظافت - بتن ساده (بدون آرماتور)
C۱۲	۱۲	بتن ساده، با مرااعات شرایطی بتن آرمه
C۱۶	۱۶	بتن آرمه
C۲۰	۲۰	بتن آرمه
C۲۵ - C۵۰	۵۰ الی ۲۵	بتن آرمه - بتن پیش تییده

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

درصد وزنی شن در واحد حجم بتن

درصد وزنی شن خشک در واحد حجم بتن				حداکثر قطر شن (میلی متر)
ضریب نرمی ماسنه ۳	ضریب نرمی ماسنه ۲/۸۰	ضریب نرمی ماسنه ۲/۶۰	ضریب نرمی ماسنه ۲/۴۰	
۴۴	۴۶	۴۸	۵۰	( $\frac{۹}{۷}$ ) ۹/۵
۵۳	۵۵	۵۷	۵۹	( $\frac{۱}{۲}$ ) ۲/۵
۶۰	۶۲	۶۴	۶۶	( $\frac{۳}{۴}$ ) ۱۹
۶۵	۶۷	۶۹	۷۱	(۱) ۲۵
۶۹	۷۱	۷۳	۷۵	( $\frac{۳}{۴}$ ) ۴۸
۷۲	۷۴	۷۶	۷۸	(۲) ۵۰

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

حداکثر ضخامت مراحل و لایه های بتن ریزی (متر)

حداکثر ضخامت هر لایه*	حداکثر ضخامت هر مرحله	نوع قطعه بتنی
۰/۵	۳**	دیوارها و پایه های حجیم
۰/۳۵	۳**	سایر دیوارها، ستون ها و پایه ها
۰/۳۵	ضخامت دال	دال ها و صفحات

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

\* برای دست یافتن به بتنی یکپارچه و با توجه به نوع لرزاندن و مرتعش ساختن، دستگاه نظارت می تواند ضخامت لایه ها را کاهش دهد.

\*\* در مواردی که با توجه به نوع سازه میزان بتن ریزی در یک مرحله از ۰/۶ متر تجاوز نموده و یا میزان سیمان مصروفی از ۰۰۴ کیلو گرم در متر مکعب بیشتر باشد توصیه می شود پس از تایید دستگاه نظارت از سیمان های کم حرارت استفاده شود.

### حداقل پوشش بتن (بر حسب میلی متر)

شرایط محیطی					نوع سازه
فوق العاده شدید	بسیار شدید	شدید	متوسط	ملایم	
۷۵	۶۵	۵۰	۴۵	۳۵	تیرها و ستون ها
۶۰	۵۰	۳۵	۳۰	۲۰	دال ها، دیوارها و تیرچه ها
۵۵	۴۵	۳۰	۲۵	۲۰	پوسته ها و سقف های پلیسه ای
۹۰	۷۵	۶۰	۵۰	۴۰	شالوده ها

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

### ضریب تبدیل مقاومت نمونه های مختلف

زمان لازم برای لرزاندن بتن با توجه به اسلامپ آن

	شكل و اندازه نمونه
۱/۰۰	مکعب $۲۰ \times ۲۰$ سانتی متر
۰/۹۵	مکعب $۱۵ \times ۱۵$ سانتی متر
۱/۲۵	استوانه $۱۵ \times ۳۰$ سانتی متر

مدت لرزاندن (ثانیه)	اسلامپ (میلیمتر)	نوع بتن
۳۲-۱۸	—	فوق العاده خشک
۱۸-۱۰	—	خیلی سفت
۱۰-۵	۳۰-	سفت
۵-۳	۸۰-۳۰	سفت خمیری
۳-	۱۳۰-۸۰	خمیری
—	۱۸۰-۱۳۰	روان

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

### حداقل زمان لازم برای قالب برداری

دماهی مجاور سطح بتن (درجه سلسیوس)				شرح	نوع قالب بندی
.	۸	۱۶	۲۴ و بالاتر		
۳۰	۱۸	۱۲	۹	قالب های قائم (ساعت)	
۱۰	۶	۴	۳	قالب زیرین (شبانه روز)	دال ها
۲۵	۱۵	۱۰	۷	پایه های اطمینان (شبانه روز)	
۲۵	۱۵	۱۰	۷	قالب زیرین (شبانه روز)	تیرها
۳۶	۲۱	۱۴	۱۰	پایه های اطمینان (شبانه روز)	

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

## مشخصات میلگرد های مصرفي در بتون مسلح

میلگرد	نوع میلگرد	ویژگی میلگرد	حداکثر مقاومت تسلیم صگا پاسکال	حداکثر مقاومت گسیختگی صگا پاسکال	حداکثر طول نسبی گام گسیختگی (%)	حداکثر ازدیاد
S-220 (A-I)	نرم	—	۲۳۰	۳۴.	۲۲	
S-300 (A-II)	نیمه سخت	الف-با سختی طبیعی ب-با سختی اصلاح شده	۳۰۰	۵۰۰	۱۹ ۱۶	
S-400 (A-III)	سخت	الف-با سختی طبیعی ب-با سختی اصلاح شده	۴۰۰	۵۰۰	۱۴ ۱۲	
S-500 (A-IV)	سخت	حداکثر قطر مصرفي $\Phi 16$	۵۰۰	۵۵۰	۱۰	

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

## عیزان اسلامچ براي اعضا و قطعات بتني

ردیف	نوع عضو یا قطعه بتني	اسلامچ به میلی متر	حداکثر*	حداکفل
۱	شالوده ها و پی دیوارهای بتون آرمه		۷۵	۲۵
۲	شالوده های با بتون ساده، صندوقه ها و دیوارهای زیر سازه ها		۷۵	۲۵
۳	تیرها و دیوارهای بتون آرمه		۱۰۰	۲۵
۴	ستون ها		۱۰۰	۲۵
۵	DAL ها و پیاده روهای بتونی		۷۵	۲۵
۶	بتون حجیم		۵۰	۲۵

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

\* در صورتی که لرزش و ارتعاش با روش های دستی انجام شود به مقدار حداقل ۴۵ میلی متر اضافه نمود.

## حداکثر نسبت آب به سیمان مجاز برای بتن با مقاومت های فشاری مختلف

ردیف	مقاطومت فشاری بتن (مگا پاسکال)*	بتن معمولی	بتن با حباب هوا
۱	۱۵	۰/۸۰	۰/۷۱
۲	۲۰	۰/۷۰	۰/۶۱
۳	۲۵	۰/۶۲	۰/۵۳
۴	۳۰	۰/۵۵	۰/۴۶
۵	۳۵	۰/۴۸	۰/۴۰
۶	۴۰	۰/۴۳	-
۷	۴۵	۰/۳۸	-

\*هر مگا پاسکال تقریباً برابر ۱۰ کیلو گرم بر سانتی متر مربع است.

## نسبت آب به سیمان با توجه با شرایط رویارویی بتن

نسبت آب به سیمان	شرایط رویارویی
۰/۵	۱ - بتن با شرایط نفوذ ناپذیر الف - در رویارویی با آب صاف
۰/۴۵	ب - در رویارویی با آب لب شور و آب دریا
۰/۴۵	۲ - بتن در معرض شرایط جوی مرطوب و بخ زدن الف - جدول، آبرو، جان پناه و مقاطع با ضحامت کم
۰/۵	ب - سایر مقاطع
۰/۴۵	پ - بدون به کار بردن مواد بخ زدا
۰/۴۵	۳ - برای حفاظت بتن آرمه در برابر خوردگی هنگام رویارویی با نمک های بخ زدا و آب های لب شور، آب دریا و ترشحات حاصل از آن

## موارد کاربرد رده های مختلف بتن

ردیف بتن	مقاومت مشخصه (مگا پاسکال)	موارد کاربرد
C6	۶	ماده پر کننده
C8	۸	ماده پر کننده - بتن نظافت
C10	۱۰	ماده پر کننده - بتن نظافت - بتن ساده (بدون آرماتور)
C12	۱۲	بتن ساده، با مراقبات شرایطی بتن آرمه
C16	۱۶	بتن آرمه
C20	۲۰	بتن آرمه
C25 - C50	۲۵ الى ۵۰	بتن آرمه - بتن پیش تبیده

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

نسبت های تقریبی اختلاط برای یک متر مکعب بتن

شن تقریبی تقدیمی (لیتر)	ماسه (لیتر)	سیمان تقریبی (کیلوگرم)	رده بتن
۸۳۰	۵۳۰	۳۵۰	C۲۵
۸۸۰	۵۳۰	۳۰۰	C۲۰
۹۳۰	۵۳۰	۲۵۰	C۱۶
۹۷۰	۵۳۰	۲۰۰	C۱۲
۱۰۵۰	۵۳۰	۱۵۰	C۱۰

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

مدت زمان اختلاط با توجه به حجم مخلوط کن وزن هر متر مکعب بتن تازه (برای تخمین اولیه)

وزن هر متر مکعب بتن	حداکثر قطر شن میلی متر	
	بتن با حباب	بتن معمولی
۲۱۹۰	۲۲۸۵	۱۰
۲۲۴۵	۲۳۱۵	۱۲/۵
۲۲۸۰	۲۳۵۵	۲۰
۲۲۱۵	۲۳۷۵	۲۵
۲۳۵۵	۲۴۲۰	۴۰
۲۳۷۵	۲۴۴۵	۵۰
۲۴۰۰	۲۴۶۳	۷۰
۲۴۳۵	۲۵۰۵	۱۵۰

ظرفیت مخلوط کن (مترمکعب)	زمان اختلاط (دقیقه)
۱/۵	۱/۵
۲	۲
۲/۵	۲
۴	۲/۷۵
۴/۵	۳

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

درصد مقاومت فشاری بتن در سینه مختلف با سیمان های گوناگون نسبت به سیمان نوع ۱

نوع سیمان	مقاومت ۱ روزه	مقاومت ۳ روزه	مقاومت ۷ روزه	مقاومت ۲۸ روزه
نوع ۱	-	۶۴	۱۰۰	۱۴۳
نوع ۲	-	۵۶	۸۹	۱۴۳
نوع ۳	۶۴	۱۲۵	-	-
نوع ۴	-	-	۳۶	۸۹
نوع ۵	-	۴۳	۷۹	۱۰۷

- «برگرفته از نشریه شماره ۵۵ مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی»

