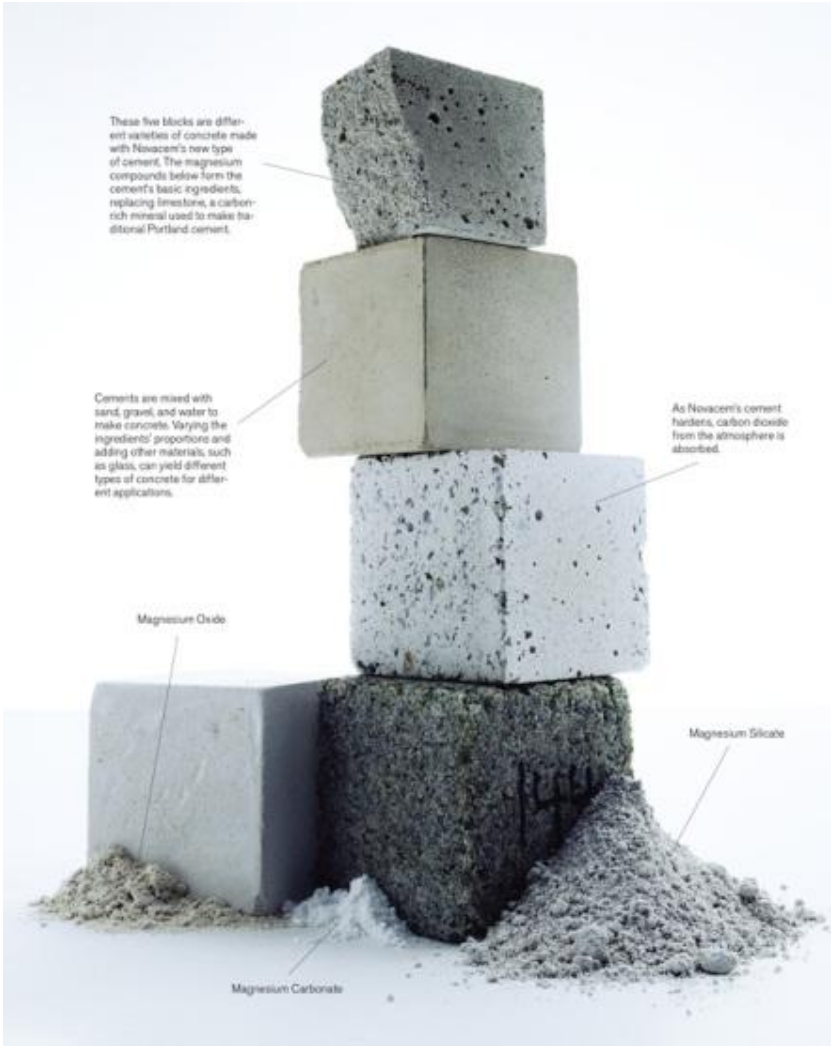
تکنولوژی بتن

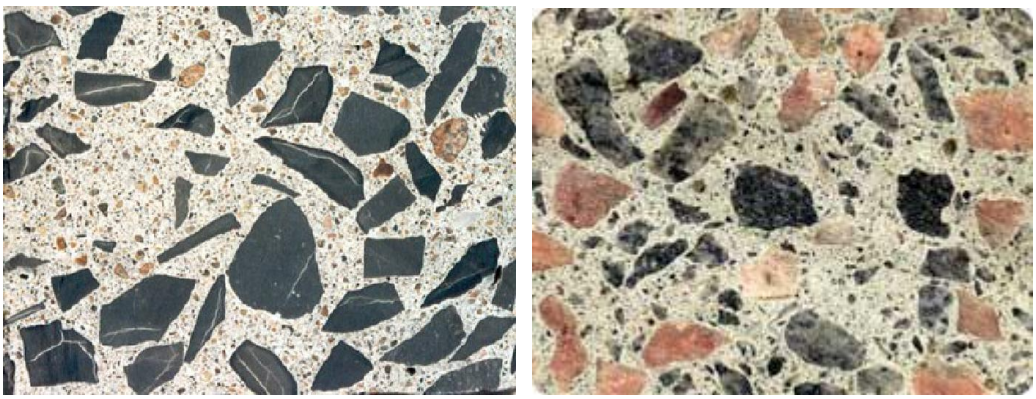


فصل اول: بتن چیست؟

بتن به هر ماده یا محصولی که از یک ماده‌ی چسبنده با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده باشد، گفته می‌شود. این ماده چسبنده عموما حاصل فعل و انفعالات شیمیایی شده آب و سیمان می‌باشد. در این درس هرگاه از بتن صحبت می‌شود، منظور ماده‌ای است که از مخلوط کردن و ترکیب شدن سیمان، آب، سنگدانه و مواد افزودنی به دست می‌آید:

بتن = سیمان + آب + سنگدانه (شن و ماسه) + مواد افزودنی (اختیاری)

ارتباط میان مواد تشکیل دهنده‌ی بتن چیست؟ از ترکیب شیمیایی (هیدراسیون) آب و سیمان ماده‌ای چسبنده به دست می‌آید و این ماده چسبنده سنگدانه‌ها را به عنوان ماده‌ی ارزان و پرکننده به یکدیگر می‌چسباند(شکل ۱).



شکل ۱ : تصویری از مقطع بتن

آیا می‌توان سیمان و آب را به تنهایی به عنوان بتن به کار برد؟

پاسخ قطعا منفی است. به دلایل زیر:

۱) زیرا مخلوط سیمان و آب (خمیر سیمان) به شدت تغییرحجم می‌دهد و باعث می‌شود خمیر سیمان ترک بخورد.
۲) در اثر ترکیب سیمان و آب حرارت زیادی تولید می‌شود (حرارت هیدراسیون) و این حرارت باعث ترک خوردن خمیر سیمان می‌شود. این ترک‌ها در اثر تنش‌های حرارتی در سیمان به وجود می‌آید.
۳) سنگ‌دانه‌ها نسبت به خمیر سیمان در برابر حمله مواد شیمیایی مقاوم‌ترند.
۴) قیمت سنگدانه‌ها از سیمان بسیار پایین‌تر است.

معیار ارزیابی بتن تازه با کیفیت خوب چیست؟

۱) روانی و غلظت بتن باید به گونه‌ای باشد که با وسایل موجود در کارگاه (ویبراتور) بتوان آن را متراکم کرد.
۲) چسبندگی بتن تازه باید به گونه‌ای باشد که در ضمن حمل و نقل بتن، مواد تشکیل دهنده آن از یکدیگر جدا نشوند یا به اصطلاح بتن آب نیاندازد.

معیار ارزیابی بتن سخت شده با کیفیت خوب چیست؟

پس از اینکه بتن سخت می‌شود تنها معیار پذیرش آن مقاومت فشاری بتن است.

فصل دوم: سیمان

تاریخچه‌ی پیدایش سیمان: با پیشرفت تکنولوژی رفته رفته استفاده از مصالح سنتی مانند آجر، آهک و مصالح کم‌مقاومت منسوخ شده و جای خود را به سیمان و فولاد دادند که می‌توانند بارهای کششی و فشاری بیشتری را تحمل کنند. سیمان (Cement) واژه‌ای است رومی که قبل از میلاد از آن استفاده می‌شد. ولی کشف سیمان به شکل امروزی مربوط است به یک بنایی انگلیسی به نام «ژوزف اسپدین، Joseph Aspdin» (شکل ۲) که از **پختن آهک و خاک رس** در حرارات بالا و آسیاب کردن آن موفق شد ابتدایی‌ترین نوع سیمان را کشف کند و اسم این سیمان را **سیمان پرتلند** گذاشت.

شکل ۲ : ژوزف اسپدین، کاشف سیمان در سال ۱۸۲۴

مواد تشکیل دهنده سیمان پرتلند: موادی که برای پختن سیمان به کوره می‌رود شامل خاک رس و سنگ آهک است. سنگ آهک و خاک رس را به نسبت تقریبی ۷۵٪ سنگ آهک به ۲۵٪ خاک رس (نسبت ۳ به ۱) با یکدیگر مخلوط می‌کنند. گاهی اوقات در طبیعت این نسبت ۳ به ۱ به طور دقیق وجود دارد که به آن مارل (Marl) می‌گویند (شکل ۳).

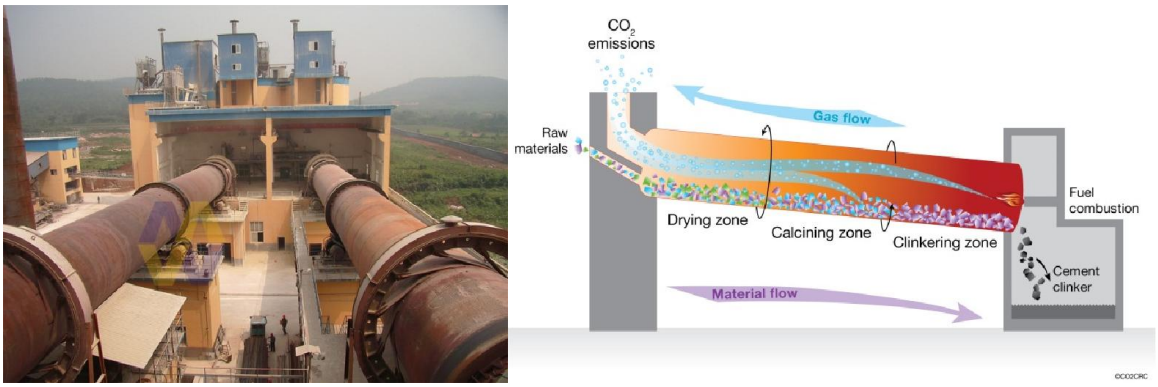
شکل ۳ : تصویر سنگ‌های مارل در طبیعت

مراحل تهیه سیمان: در تمامی مراحل تهیه سیمان سعی بر این است که سنگ آهک و خاک رس بهتر با یکدیگر مخلوط شوند و محصول یکنواختری تولید شود. مراحل تهیه سیمان عبارتند از:

۱) مواداولیه به وسیله سنگ‌شکن‌ها خرد می‌شوند تا به اندازه‌ی ۱۰ سانتی متری برسند.

۲) چون مواد اولیه با رطوبت زیاد از معدن استخراج می‌شوند به این مواد حرارت می‌دهند تا رطوبتشان خشک شود. سپس آنها را آسیاب می‌کنند تا به اندازه ۰/۱ میلیمتر برسند.

۳) دانه‌های آسیاب شده را درون کوره‌ی افقی بلندی که به شکل استوانه است (شکل ۴) می‌ریزند و آنرا تا حدود ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌دهند تا اصطلاحاً عرق کنند و در آنها فعل و انفعلات شیمایی صورت گیرد. به این مرحله «سیمان‌پزی» می‌گویند، به طوریکه در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد مواد، ذوب شده و باعث چسبیدن دانه‌ها به یکدیگر شود. این دانه‌های جدید که به اندازه‌ی فندق می‌باشند، به رنگ قهوه‌ای است و اصطلاحاً «کلینکر» نام دارد (شکل ۵).



شکل ۴ : کوره‌ی استوانه‌ای

شکل ۵ : کلینکر

پس از حرارت دادن کلیه مواد اولیه به چهار عنصر اصلی سیمان تبدیل می‌شوند. این عناصر عبارتند از:

الف)تری کلسیم آلومینات (C3A)

ب) دی کلسیم سیلیکات (C2S)

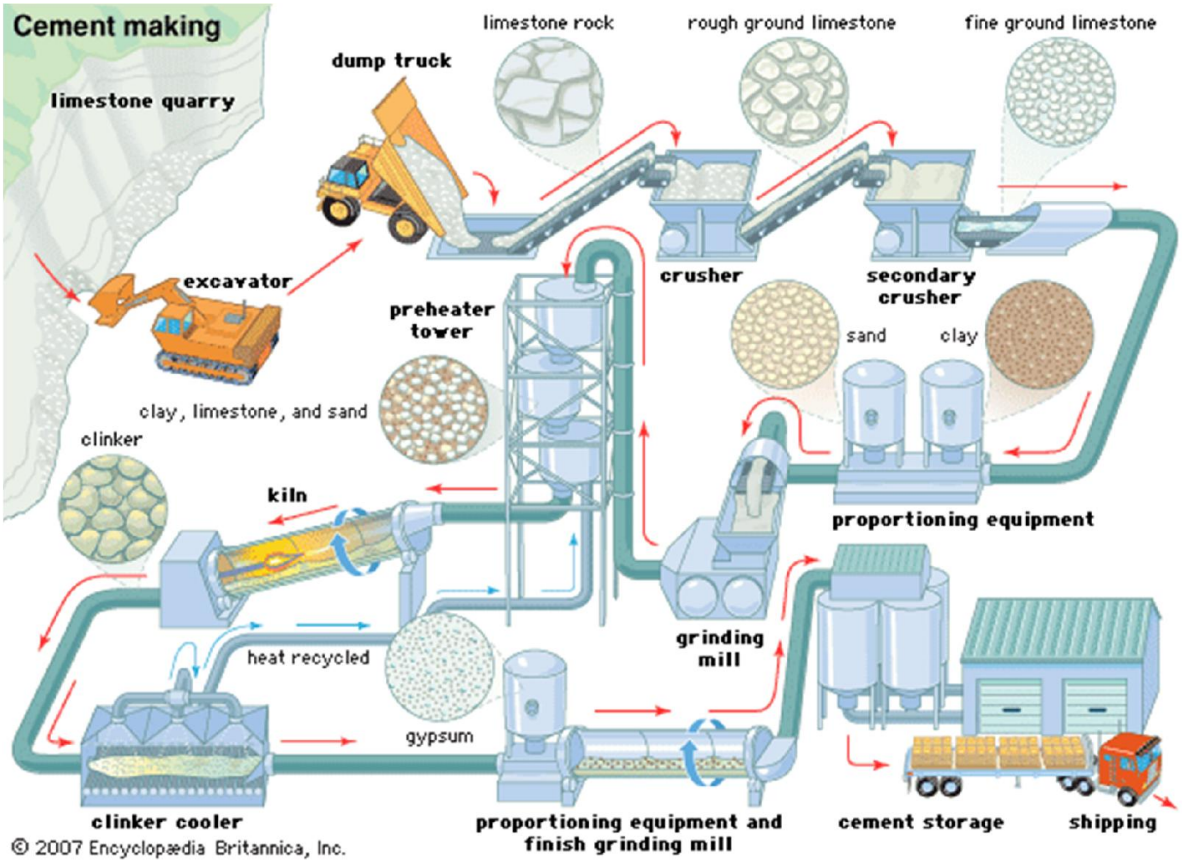
ج) تری کلسیم سیلیکات (C3S)

د) تترا کلسیم آلومینات فریت (C4AF)

مدت زمان تهیه سیمان: زمان پخت سیمان بستگی به نوع کوره، نوع سوخت و نوع مواد اولیه دارد و بین ۳ تا ۵ ساعت طول می‌کشد.

۴) **آسیاب کردن کلینکر:** پس از خنک شدن کلینکر، آنرا به آسیاب برده و با افزودن ۲٪ سنگ گچ، کلینکر را پودر می‌کنند.

نرمی دانه‌های سیمان: هرچقدر دانه‌های سیمان ریزتر باشد، سیمان مرغوب‌تر است. به مقدار ریز بودن دانه‌های سیمان ضریب نرمی می‌گویند که هرچقدر این ضریب بزرگتر باشد، سیمان ریزتر و به اصطلاح نرمتر است. شکل دانه‌های سیمان نیز باید به صورت کروی باشد.



شکل ۶ : مراحل تهیه سیمان در یک نگاه

انواع سیمان پرتلند از نظر جنس:

۱) **سیمان پرتلند تیپ ۱ :** رایجترین و پرمصرفترین نوع سیمان است. مصرف این سیمان در تمام کارهای ساختمانی مجاز است. سازه‌های ساخته شده توسط این نوع سیمان نباید در معرض حمله‌ی سولفات‌ها قرار بگیرد مانند پایه‌ی پل‌ها و اسکله‌ها.

۲) **سیمان پرتلند تیپ ۲ :** این نوع سیمان در مقابل حمله اندک سولفات‌ها مقاومت می‌کند. در نتیجه برای ساختن کانال‌ها و لوله‌های فاضلاب (شکل ۷) مناسب است. درجه حرارت هیدراسیون این نوع سیمان نسبت به سیمان تیپ ۱ کمتر است. در نتیجه برای بتن‌ریزی در هوای گرم مناسب است. مصرف این نوع سیمان برای سازه‌هایی که مورد که مورد حمله شدید سولفاتها هستند مانند کارهای دریایی و پایه‌ی پل‌ها مجاز نیست.

شکل ۷ : لوله‌های فاضلاب

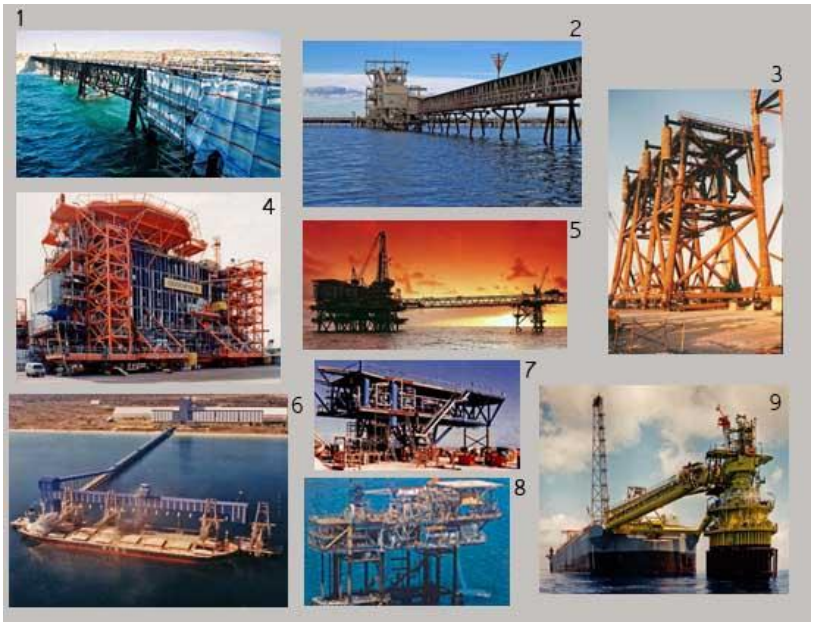
۳) **سیمان پرتلند تیپ ۳ :** این نوع سیمان زودگیر است. به همین دلیل در محل‌هایی که احتیاج به قالب‌برداری فوری می‌باشد از این نوع سیمان استفاده می‌شود. زیرا مقاومت اولیه این سیمان خیلی زود بالا

می‌رود و به علت زودگیر بودن، توصیه می‌شود در هوای سرد از آن استفاده کنند. زیرا حرارت هیدراسیون آن در ساعات اولیه بسیار زیاد است.

۴) **سیمان پرتلند تیپ ۴ :** کمترین حرارت هیدراسیون را تولید می‌کند. به همین دلیل در بتن‌ریزی‌های انبوه مانند سدها که حجم بتن‌ریزی زیاد است (شکل ۸) استفاده می‌شود. همچنین در مناطق گرم کشور و در تابستان که گرمای محیط زیاد است و حرارت هیدراسیون ممکن است روی فعل و انفعالات سخت شدن سیمان اثر بگذارد و مقاومت بتن را کاهش دهد از این نوع سیمان استفاده می‌کنند.

شکل ۸ : سد بتنی قوسی

۵) **سیمان پرتلند تیپ ۵ :** این نوع سیمان ضدسولفات است. این نوع سیمان در ساختن اسکله‌ها، پایه‌ی پل‌ها و کارهای دریایی (شکل ۹) استفاده می‌شود. به همین دلیل در بنادر جنوبی ایران که محیط دارای خورندگی شدید می‌باشند دارای کاربرد فراوانی است.



شکل ۹ : سازه‌های دریایی

فصل سوم: سنگدانه‌ها

وظیفه‌ی سنگ‌دانه‌های در بتن

۱) نقش باربری بر عهده‌ی سنگدانه‌هاست.
۲) افزایش مقاومت بتن
۳) دوام و پایداری بتن
۴) کم کردن مصرف سیمان و کاهش هزینه‌ی نهایی بتن

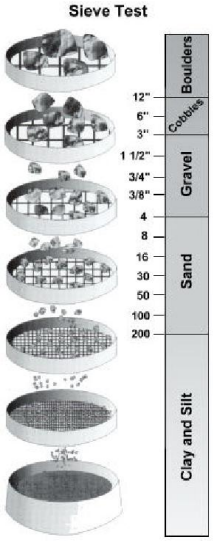
گروه‌بندی سنگدانه‌ها

۱) درشت‌دانه یا شن و ماسه (بالای الک نمره ۲۰۰)
أ. شن: سنگدانه‌ی بزرگتر از ۴/۷۵ میلیمتر یا بالای الک نمره ۴
ب. ماسه : سنگدانه کوچکتر از ۴/۷۵ میلمتر و بین الک‌های نمره ۴ و نمره ۲۰۰
۲) ریزدانه: سنگدانه پایین از الک نمره‌ی ۲۰۰

مصالح سنگی (شن و ماسه) ۶۶٪ تا ۷۵٪ حجم بتن را تشکیل می‌دهند.

۶۰ تا ۷۰٪ از کل درشت‌دانه‌ها شن است.
۳۰ تا ۴۰٪ از کل درشت‌دانه‌ها ماسه است.

تفاوت و مرز میان شن و ماسه الک استاندارد نمره‌ی ۴ (#4) است که اندازه‌ی آن ۴/۷۶ میلیمتر است.



شکل ۱۰ : انواع الک و دستگاه لرزاننده (Shaker)

سنگدانه‌های عبوری از الک نمره‌ی ۴ و بالای الک نمره ۲۰۰ **ماسه** هستند.
سنگدانه‌های مانده روی الک نمره ۴ **شن** هستند.

تعریف بزرگترین اندازه‌ی سنگدانه:

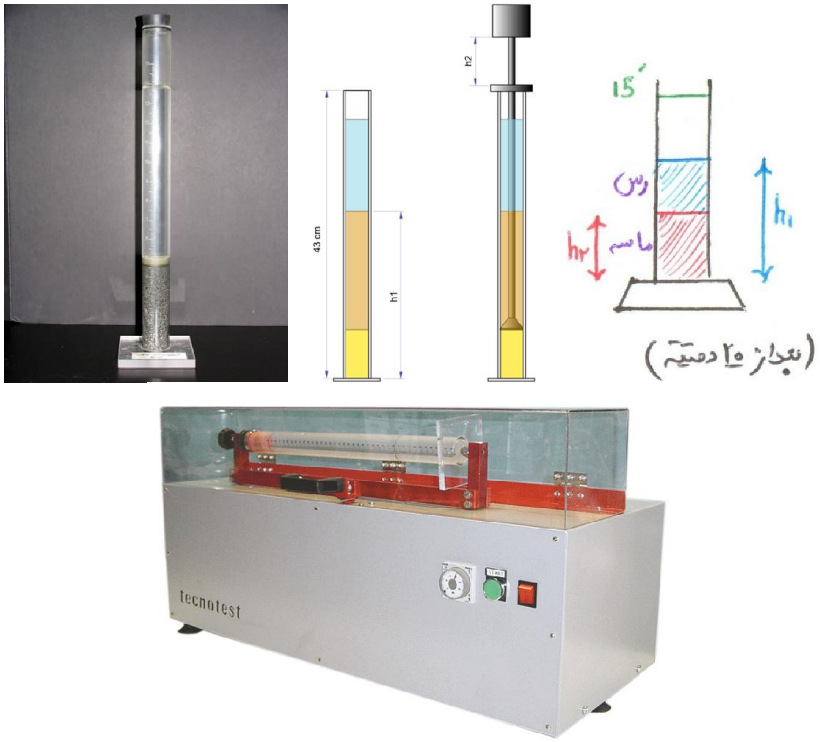
عبارت است از اندازه کوچکترین الکی که حداکثر ۱۰٪ وزنی سنگدانه روی آن باقی بماند [مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان].

مشخصات و ویژگی‌های شن و ماسه

۱) **تمیز و عاری از گل و لای و ناخالصی‌های شیمیایی:** میزان رس، گل و لای مجاز برای شن حداکثر ۱٪ و برای ماسه حداکثر ۳٪ است. این معیار توسط آزمایش ارزش ماسه‌ای ارزیابی می‌شود. با استفاده از آزمایش ارزش ماسه‌ای می توان به کیفیت ماسه از نظر رس و لای مخلوط با آن پی برد. از آنجایی که وجود مقدار بیش از حد مجاز رس در بتن مشکلات بسیار جدی ایجاد می کند تعیین این عدد اهمیت بسزایی خواهد داشت. روش این آزمایش به اینصورت است که ابتدا ۱۱۰ گرم سنگ‌دانه که از الک نمره ۴ رد شده‌اند (برای تهیه ماسه) را به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۱۱۰ درجه حرارت می‌دهیم. سپس یک استوانه‌ی مدرج را که برحسب اینچ مدرج شده است ابتدا تا ارتفاع ۴ اینچ از محلول استکس پر می‌کنیم و با قیف ماسه را در داخل استوانه می‌ریزیم. سپس چند ضربه به کف استوانه میزنیم تا حباب های هوای محبوس در آن تخلیه شود. سپس به مدت ۱۰ دقیقه آنرا گذاشته تا خوب خیس شود. پس از این مدت درپوش استوانه را رویش قرار داده و آنرا در زمان ۳۰ ثانیه در فاصله‌ی ۲۰ سانتیمتری ۹۰ بار بطور افقی جابجا می کنیم. پس از این مرحله استوانه را روی میز قرار داده و میله‌ی ظرف حاوی محلول استکس را در استوانه فرو می‌بریم و سپس شیر مربوطه را باز می کنیم تا ماسه را از ته بشوید که اگر مقداری رس در ته ظرف محبوس شده بود به بالا آمده و معلق گردد. کمی از ماسه‌هایی را که به جداره‌ی استوانه چسبیده بود را نیز بدینوسیله می شوییم. باید توجه نمود حجم مخلوط موجود در ظرف باید نهایتا به ۱۵ اینچ برسد. در نهایت نمونه به مدت ۲۰ دقیقه باید ساکن بماند تا ذرات رس به سمت بالا معلق شوند. پس از این مدت ارتفاع H_1 را به صورت چشمی قرائت کرده و ارتفاع H_2 را با استفاده از سمبه‌ی فلزی به دست می‌آوریم. قرائت با استفاده از سمبه‌ی فلزی به این صورت است که ابتدا سمبه را به آرامی در استوانه رها

کرده تا جایی که خود بخود متوقف شود. با اینکار کمی فشار به محلول وارد شده و در نتیجه ذرات رس و ماسه از هم تفکیک خواهند شد. سپس عدد بالایی سمبه را قرائت نموده وآنرا از 10.2_{inch} کم می کنیم. سپس اعداد قرائت شده را در رابطه زیر قرار داده و مقدار SE را محاسبه می‌کنیم.

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$



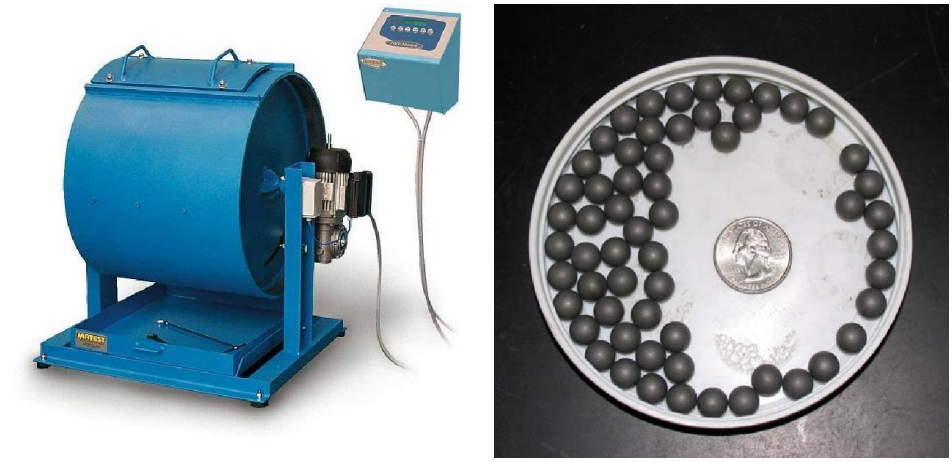
شکل ۱۱ : آزمایش ارزش ماسه‌ای

هر چقدر مقدار SE ماسه بالاتر باشد ماسه تمیزتر است و هرچقدر رس و لای موجود در آن بیشتر باشد دارای SE کمتری خواهد بود. به عنوان مثال برای مصالح کاملا شسته و تمیز این عدد برابر با ۱۰۰ خواهد شد. برای ساخت بتن به SE بالای ۷۰٪ برای مصالح سنگی نیاز است. مصالحی که رس و لای بیشتری دارند و مقدار SE آنها بالاتر است، چسبندگی بیشتری داشته و مناسب استفاده در کارهای راهسازی هستند.

مثال: اگر در آزمایش SE ضخامت لایه‌ی رسی ۳ و ضخامت لایه‌ی ماسه‌ای ۱۱ سانتی‌متر باشد، مقدار SE این ماسه را حساب کنید.

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100 = \frac{11}{3+11} \times 100 = 78.6\%$$

۲) **مقاوم در برابر سایش:** برای بتن‌هایی که در پیاده‌روها، راه‌های بتنی و مکان‌های عبور و مرور استفاده می‌شوند. برای تعیین سختی و مقاومت در برابر سایش سنگ‌دانه‌ها از آزمایش لس‌آنجلس (Los Angles Abrasion Test) استفاده می‌شود (شکل ۱۲).



شکل ۱۲ : آزمایش لس آنجلس

شکل ۱۳ : نتایج آزمایش لس آنجلس

نحوه‌ی محاسبه‌ی نتایج آزمایش Los Angles به صورت زیر است:

$$\text{درصد کاهش جرم ذرات} = \frac{\text{جرم نهایی - جرم اولیه نمونه}}{\text{جرم اولیه}} \times 100$$

هرچقدر عدد آزمایش لس‌آنجلس بیشتر باشد، مقاومت در برابر سایش سنگدانه‌ها کمتر است و سنگ‌دانه‌ها بیشتر سائیده می‌شود.

۳) **مقاوم در برابر اعمال تنش:** سنگدانه‌ها نقش استخوان بندی در بتن را دارند.

(سختی دانه‌های سیسلسی = ۸) > (سختی دانه‌های آهکی=۳ الی ۴) > (سختی دانه‌های گچی = کمتر از ۳)

۴) **مقاوم در برابر یخبندان:** برای بتن‌هایی که در مناطق سردسیر استفاده می‌شوند. به چند عامل همچون تخلخل (باید کم باشد) ، نفوذپذیری (باید کم باشد) و مقاومت کششی (زیاد باشد) سنگدانه بستگی دارد.

۵) **مقاوم در برابر هوازدگی**

شکل و بافت سطحی و ظاهری سنگدانه‌ها

دانه‌ها از لحاظ شکل ظاهری به ۵ دسته تقسیم می‌شوند:

۱) **گردگوشه (رودخانه‌ای):** دارای سطح صاف و گرد

۲) **نامنظم (رودخانه‌ای)**: دارای سطح صاف ولی شکل آنها گرد نیست.
۳) **گوشه‌دار (شکسته)**: دارای سطح ناصاف و گوشه‌های تیز. بهترین نوع سنگ‌دانه برای ساخت بتن است.
۴) **پولکی**: ضخامت آنها نسبت به دو بعد دیگر کم است (غیرمجاز در ساخت بتن)
۵) **سوزنی**: طول آنها نسبت به دو بعد دیگر بیشتر است (غیرمجاز در ساخت بتن)

سطح مخصوص

نسبت سطح جانبی(خارجی) به حجم سنگدانه را سطح مخصوص آن گویند. هرچه سطح مخصوص سنگ‌دانه بیشتر باشد، آب بیشتری را به خود جذب می‌کند و کارآیی بتن پایین می‌آید.

مقایسه از لحاظ مصرف سیمان: هر چه سطح مخصوص سنگ‌دانه‌های کمتر باشد، مصرف سیمان کمتر است.

سنگدانه‌های گردگوشه $<$ سنگدانه‌های نامنظم $<$ سنگ‌دانه‌های گوشه‌دار

مقایسه از لحاظ مقاومت نهایی بتن: هر چه اصطکاک میان سنگ‌دانه‌ها بیشتر باشد و سنگ‌دانه‌ها بهتر با یکدیگر بیشتر درگیر شوند مقاومت بتن بیشتر خواهد بود.

سنگدانه‌های گردگوشه $<$ سنگدانه‌های نامنظم $<$ سنگ‌دانه‌های گوشه‌دار

سوال: چرا استفاده از دانه‌های پولکی و سوزنی در ساخت بتن مجاز نیست؟

به دلایل زیر :
۱) زیرا در این دانه‌ها تمرکز تنش ایجاد شده و دانه‌ها از وسط می‌شکنند. یعنی مقاومت کمی دارند و مقاومت بتن را کاهش می‌دهند.
۲) این سنگ‌دانه‌ها سطح مخصوص بالایی دارند و کارآیی بتن را کاهش می‌دهند.

لذا آیین‌نامه‌ها مصرف این سنگ‌دانه‌ها را به ۱۰ تا ۱۵٪ وزن کل سنگ‌دانه‌ها محدود کرده‌اند.

$$\text{ضریب پولکی} = \frac{\text{وزن دانه‌های پولکی}}{\text{وزن کل دانه‌ها}} < 10\sim15\%$$

دانه‌بندی (Grading)

نحوه‌ی توزیع وزنی سنگدانه‌ها از نظر ابعاد را دانه‌بندی گویند.
در ساخت بتن با کیفیت بالا باید فاصله مناسبی میان مصالح درشت‌دانه و ریزدانه استفاده شود.
منحنی دانه‌بندی عبارت است از یک منحنی که نحوه‌ی توزیع دانه‌ها را از نظر ابعاد مشخص می‌کند.
برای تنظیم منحنی دانه‌بندی ابتدا شن و ماسه را از الک‌های استاندارد عبور می‌دهند.
تعداد این الک‌ها ۱۰ عدد می‌باشد.
نام‌گذاری الک‌های کوچکتر از شماره‌ی ۴ به این صورت است که تعداد روزنه‌های موجود در یک اینچ مربع الک را شماره الک می‌نامند.

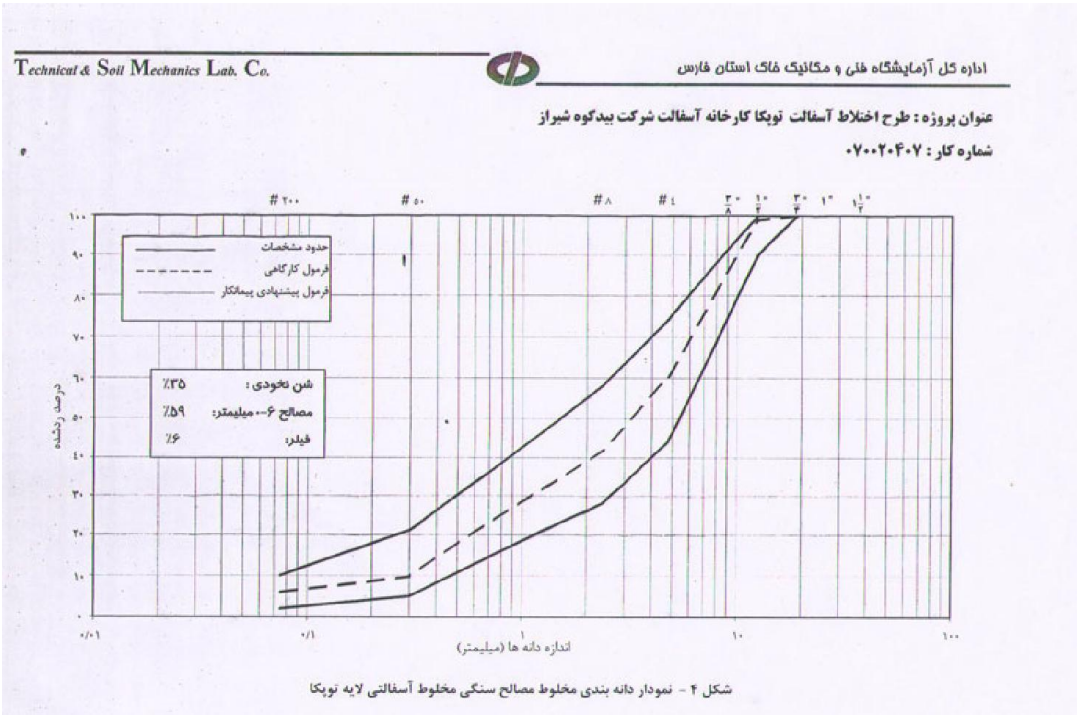
نمره‌ی الک	اندازه‌ی روزنه‌ی الک
شن	
الک $1\frac{1}{2}$	۳۸/۱ میلیمتر

الک $\frac{3}{4}$	۱۹/۰۶ میلیمتر
الک $\frac{3}{8}$	۹/۵ میلیمتر
ماسه	
الک نمره ۴ (#4)	۴/۷۶ میلیمتر
الک نمره ۸ (#8)	۲/۳۶ میلیمتر
الک نمره ۱۶ (#16)	۱/۱۸ میلیمتر
الک نمره ۳۰ (#30)	۰/۶ میلیمتر
الک نمره ۵۰ (#50)	۰/۳ میلیمتر
الک نمره ۱۰۰ (#100)	۰/۱۵ میلیمتر
الک نمره ۲۰۰ (#200)	۰/۰۷۵ میلیمتر

در ساخت یک بتن با کیفیت بالا باید فاصله مناسبی میان مواد درشت‌دانه و ریزدانه وجود داشته باشد.

نحوه رسم منحنی دانه‌بندی:

ابتدا مجموعه‌ای از دانه‌ها را وزن کرده و از الک‌های استاندارد عبور می‌دهند. سپس وزن دانه‌های مانده رو هر الک را اندازه‌گیری کرده و درصد آنها را نسبت به وزن کل محاسبه می‌کنند (درصد مانده). مجموع درصدهای مانده روی الک مورد نظر و الک‌های بالاتر را از ۱۰۰ کم نموده تا درصد رد شده از الک مورد نظر به دست آید. سپس بر اساس اندازه‌ی الک و درصد رد شده‌ی دانه‌ها از الک‌های استاندارد منحنی را رسم می‌نمایند. توجه کنید که معمولاً محور افقی لگاریتمی است.



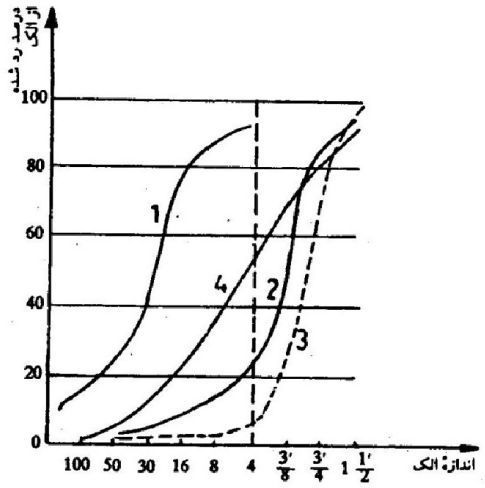
شکل ۱۴ : منحنی دانه‌بندی یک پروچه در شیراز

در این نمودار ۴۰٪ شن است. ۵۲٪ ماسه است و ۸٪ ریزدانه وجود دارد.

انواع منحنی دانه‌بندی

۱) **دانه‌بندی پیوسته:** در صورتی‌که تمام ابعاد سنگ‌دانه موجود باشند (شرط اول) و برخی از آنها نسبت به سایر ابعاد به میزان چشمگیری بیشتر یا کمتر نباشند (شرط دوم).

۲) **دانه‌بندی گسسته:** در صورتی که یکی از دو شرط بالا برآورده نشود، منحنی دانه‌بندی گسسته است.



شکل ۱۵ : نمونه‌هایی از منحنی دانه‌بندی

در شکل ۱۵:

منحنی شماره‌ی ۱ : فقط دانه‌های الک نمره ۴ کوچکتر وجود دارد و در آن از شن خبری نیست (گسسته).
منحنی شماره‌ی ۲ : ۶۰٪ درصد دانه‌ها هم اندازه هستند و دانه‌بندی یکنواخت نیست (گسسته).
منحنی شماره‌ی ۳ : در محدوده‌ی کوچکی ۷۰٪ از کل دانه‌ها قرار گرفته‌اند (گسسته).
منحنی شماره‌ی ۴ : در محدوده‌ی شن و ماسه پیوسته بوده و دارای تمام ابعاد دانه‌ها است (پیوسته).

چرا باید از دانه‌بندی پیوسته در ساخت بتن استفاده کرد؟

۱) فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها حداقل می‌شود (تراکم بیشتر) و سیمان کمتری مصرف می‌شود.
۲) بتن حاصله توپرتر و متراکم‌تر می شود و مقاومت آن افزایش می‌یابد.

دانه‌بندی مصالح ماسه‌ای

مزیت استفاده از ماسه : با استفاده از آب کمتر بتن روان‌تر و کاراتری به دست می‌آید (مقاومت بیشتر).
مضرات استفاده از ماسه : مصرف سیمان افزایش می‌یابد.
برای بتن‌هایی که در نمای صاف مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید از مقدار ماسه‌ی بیشتر باید استفاده شود.
مدول نرمی: عبارت است از مجموع درصدهای باقیمانده روی الک‌های استاندارد تقسیم بر صد. مدول نرمی ممکن است بین صفر تا ۹ متغییر باشد ولی عموماً مقدار آن بین ۲/۳ تا ۳ است و افزایش آن نشان‌دهنده‌ی درشتی دانه‌هاست.

مدول نرمی بزرگتر	مخلوط درشت‌دانه‌تر

دانه‌بندی مصالح شنی

هر چه در بتن مواد درشت دانه‌تر بیشتر باشد، بتن مقاومت بیشتری خواهد داشت.
حداکثر بعد دانه‌های شنی (بین سه عدد زیر باید کوچکترین عدد انتخاب شود):

۱) کوچکتر از $1/5$ حداقل بعد قالب
۲) کوچکتر از $3/4$ فاصله‌ی آزاد بین میلگردها
۳) کوچکتر از $1/2$ ضخامت دال‌های سقفی

مثال : اگر در یک تیر 50×30 سانتی‌متر فاصله‌ی آزاد بین میلگردها ۷ سانتی‌متر باشد، حداکثر بعد سنگ‌دانه که می‌توان استفاده کرد چقدر است؟

شرط اول : $30 \times \frac{1}{5} = 6_{cm}$

شرط دوم : $7 \times \frac{3}{4} = 5.25_{cm}$

پس باید از سنگ‌دانه با حداکثر بعد ۵/۲۵ سانتی‌متر استفاده می‌شود.

مثال : نتایج آزمایش دانه‌بندی بر روی نمونه‌ای در جدول زیر نشان داده شده است. مطلوب است تکمیل جدول و رسم منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها؟

برای حل این مسئله مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

۱) ستون اول تا سوم جز داده‌های مسئله است.
۲) ستون چهارم تا ششم باید محاسبه شوند.
۳) ابتدا تمام اعداد ستون سوم را با یکدیگر جمع کرده و وزن کل نمونه را به دست می‌آوریم.
۴) اعداد ستون چهارم از تقسیم ستون سوم بر وزن کل دانه‌ها به دست می‌آید. مثلاً

$$\frac{6}{378} \times 100 = 1.59\%$$

۵) ستون پنجم به این صورت به دست می‌آید که ابتدا ردیف اول ستون چهارم را از ۱۰۰ کم می‌کنیم. سپس ردیف‌های بعدی ستون پنجم به این صورت به دست می‌آیند که عدد ردیف پایین‌تر ستون چهارم از عدد بالاتر ستون پنجم کم شده و در ردیف پایین‌تر ستون پنجم نوشته می‌شود.

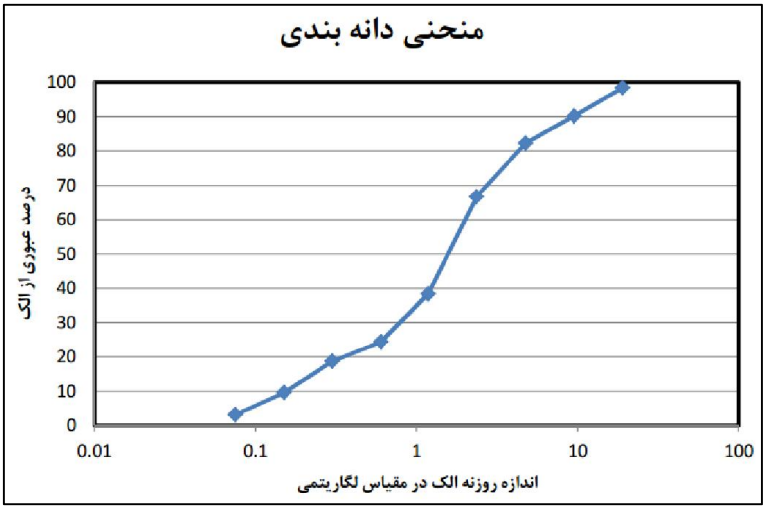
$$100 - 1.59 = 98.41$$
$$98.41 - 8.2 = 90.21$$
.
.
.

۶) سپس ستون پنج را نیز از ۱۰۰ کم می‌کنند و در ستون ششم می‌نویسند (ردیف آخر ستون ششم محاسبه نمی‌شود)

(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)
شماره‌ی الک	اندازه‌ی روزنه‌ی الک (میلیمتر)	وزن مانده بر روی الک (گرم)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی عبوری از الک	درصد تجمعی مانده روی الک

3/4″	۱۹/۰۵	۶	۱/۵۹	۹۸/۴۱	۱/۵۹
3/8″	۹/۵۳	۳۱	۸/۲	۹۰/۲۱	۹/۷۹
#4	۴/۷۵	۳۰	۷/۹۳	۸۲/۲۷	۱۷/۷۲
#8	۲/۳۶	۵۹	۱۵/۶۱	۶۶/۶۶	۳۳/۳۳
#16	۱/۱۸	۱۰۷	۲۸/۳۱	۳۸/۳۶	۶۱/۶۴
#30	۰/۶	۵۳	۱۴/۰۲	۲۴/۳۹	۷۵/۶۶
#50	۰/۳	۲۱	۵/۵۵	۱۸/۷۸	۸۱/۲۱
#100	۰/۱۵	۳۵	۹/۲۶	۹/۵۲	۹۰/۴۷
#200	۰/۰۷۵	۲۴	۶/۳۴	۳/۱۷	۹۶/۸۲
#200 >	Pan	۱۲	۳/۱۷	۰	–
		جمع = ۳۷۸ گرم			جمع = ۴۶۸

$$\text{ضریب نرمی} = \frac{468}{100} = 4.68$$



شکل ۱۶ : منحنی دانه‌بندی

رطوبت سطحی و جذب آب سنگ‌دانه‌ها

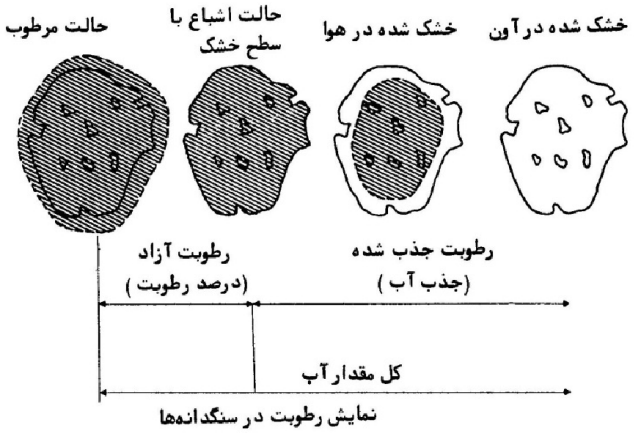
انواع سنگ‌دانه بر حسب رطوبت سطحی و جذب آب:

۱) **سنگدانه‌های کاملا خشک:** در صورتیکه دانه‌ها در Oven کاملا خشک شوند.

۲) **سنگدانه‌های خشک:** مقداری آب در داخل آنها وجود دارد ولی سطحشان خشک است.

۳) **سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک** (S.S.D.) یا Saturated Surface Dry : داخل آنها کاملاً آب وجود دارد ولی سطح آنها خشک است (برای ساخت بتن و در محاسبات مربوط به طرح اختلاط باید استفاده شود)

۴) **سنگدانه‌های مرطوب:** داخل و خارج آنها کاملاً خیس است.



شکل ۱۷ : وضعیت سنگ‌دانه در حالت‌های مختلف از نظر جذب آب و رطوبت سطحی

کدام حالت از سنگدانه باید در طرح اختلاط بتن به کار رود؟

در طرح اختلاط بتن همواره فرض می‌شود که نه آب بتن جذب سنگدانه‌ها می‌شود و نه سنگدانه‌ها آبی را به بتن اضافه می‌کنند. بنابراین باید از دانه‌های اشباع با سطح خشک (حالت سوم) استفاده کرد.
معمولاً سنگدانه‌های ماسه‌ای تا حدود ۰/۷٪ و سنگدانه‌های شنی تا حدود ۰/۵٪ آب جذب می‌کنند تا از حالت کاملا خشک به حالت SSD برسند.

$$\text{درصد جذب آب سنگ‌دانه} = \frac{\text{(وزن سنگدانه خشک شده در آون) - (وزن سنگ‌دانه اشباع)}}{\text{(وزن سنگ‌دانه خشک شده در آون)}} \times 100$$

چگالی سنگدانه‌ها

چگالی سنگ‌دانه‌های به دو نوع چگالی ظاهری و چگالی حجمی تقسیم می‌شود:

۱) **چگالی ظاهری**: نسبت جرم سنگ دانه‌های خشک شده (در Oven به مدت ۲۴ ساعت) به جرم آب هم حجم آن. اکثر سنگ‌دانه‌های طبیعی دارای چگالی ظاهری ۲/۶ تا ۲/۷ می‌باشند.

$$\text{چگالی ظاهری} = \frac{\text{جرم سنگ‌دانه‌های خشک شده در آون}}{\text{(جرم ظرف پر از آب - جرم ظرف و نمونه‌ی پر از آب) - جرم سنگ‌دانه‌های خشک شده در آون}}$$

۲) **چگالی حجمی**: این چگالی به نحوه‌ی متراکم شده دانه‌های کنار یکدیگر در یک ظرف و در نتیجه به توزیع ذرات و شکل آنها بستگی دارد.

$$\text{چگالی حجمی} = \frac{\text{جرم سنگ‌دانه‌ها}}{\text{ظرف حجم}}$$

چگالی ظاهری همواره از چگالی حجمی بیشتر است

مواد مضر برای سنگ دانه‌ها

۱) **مواد آلی**: بر فعل و انفعالات شیمیایی سیمان اثر مخرب دارند و پس از پوسیده شدن موجب بروز فضای خالی در بتن می‌شوند. این مواد با شستن به راحتی جدا می‌شوند. ذغال، چوب، جلبک و ..... .

۲) **رس و ذرات بسیار ریز:** به صورت لایه‌ای دور سنگ‌دانه‌ها را گرفته و روی چسبندگی خمیر سیمان و سنگ‌دانه تاثیر می‌گذارند. همچنین موجب افزایش مصرف آب نیز می‌شوند.

۳) **ناخالصی‌های نمکی:** وجود نمک مقاومت بتن را به شدت کاهش می‌دهد. نمک موجب خوردگی میلگردها در بتن مسلح می‌شود. همچنین نمک به صورت ذرات سفیدی روی سطح بتن ظاهر می‌شود.

فصل چهارم : آب

مشکلات ناشی از استفاده از آب نامناسب در بتن:

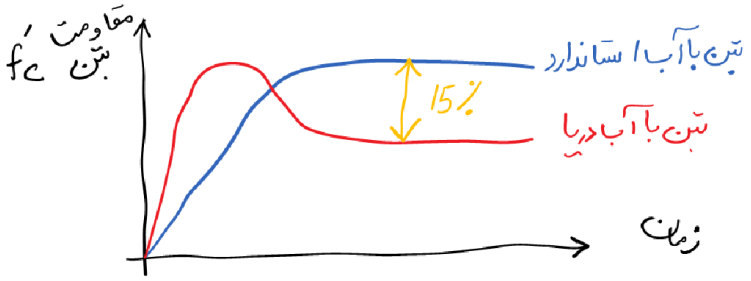
۱) دیرگیر شدن بتن
۲) افت مقاومت نهایی بتن تا ۳۰٪
۳) بروز خوردگی در میلگردها
۴) ایجاد لکه بر روی سطح بتن (در مورد بتن‌های Expose (نما) اهمیت دارد)

آب مناسب برای بتن چیست؟ آب شرب

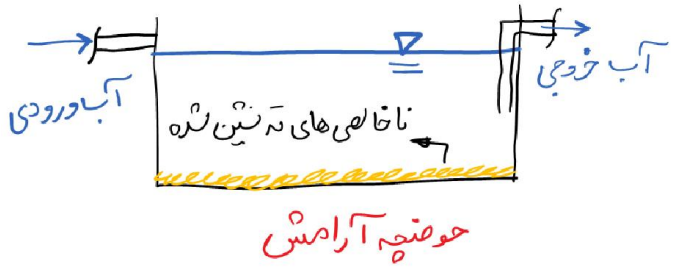
P.H. آب باید بین ۶ تا ۸ باشد.

موادی که نباید در آب بتن وجود داشته باشند و یا درصد آنها باید کم باشد؟

۱) کربنات‌ها
۲) **کلریدها** : موجب خوردگی در میلگرد می‌شود.
۳) سولفات‌ها
۴) نمک‌ها
۵) **آب دریا**: موجب افت مقاومت و خوردگی در میلگرد می‌شود. استفاده از آب دریا در بتن توسط هیچ مرجعی توصیه نشده است.



۶) **گل و لای:** به صورت یک لایه‌ی حائل دور سنگ‌دانه‌ها می‌چسبد و مانع می شود که سیمان سنگ‌دانه‌ها را به یکدیگر بچسباند. راه‌حل این مشکل استفاده از حوضچه آرامش برای ۲۴ ساعت است.



۷) **چربی‌ها (معدنی، حیوانی و گیاهی)**: ایجاد پوشش در سطح سنگ‌دانه‌ها و جلوگیری از چسبیدن سنگ‌دانه‌ها به سیمان

۸) **خزه‌ها و جلبک‌ها:** از چسبیدن سنگ‌دانه‌ها به سیمان جلوگیری می‌کند. همچنین پس از پوسیده شدن در بتن فضای خالی ایجاد می‌شود.

فصل پنجم : بتن و خواص آن

بتن عمدتاً از دو قسمت تشکیل شده است:

۱) **مصالح سنگی :** حدود ۷۵-۶۰٪ حجم بتن

۲) **خمیر سیمان :** حدود ۴۰-۲۵٪ حجم بتن

از ۴۰-۲۵٪ خمیر سیمان، ۱۵-۷٪ را آب و ۲۱-۱۴٪ را سیمان تشکیل می‌دهد.

میزان آب در خمیر سیمان

این پارامتر با نسبت W/C نشان داده می‌شود که W وزن آب است و C وزن سیمان است. به صورت یک اصل نسبت W/C باید حتی‌الامکان کم باشد تا مقاومت بتن بیشتر شود. قسمتی از آب که در ساخت بتن مصرف می‌شود (حدود ۲۵٪ وزن سیمان) جذب ذرات سیمان شده و در واکنش شیمیایی هیدراسیون شرکت می‌کند. اما عملا ساخت بتن با W/C مساوی ۰/۲۵ امکان‌پذیر نیست زیرا بتن حاصله بسیار سفت می‌شود و کارایی مناسب ندارد. بنابراین باید W/C را بین ۰/۴ تا ۰/۶ قرار داد تا بتوان به سهولت با بتن کار کرد. اگر نسبت W/C از ۰/۶ بیشتر باشد، آب اضافی در بتن تبخیر می‌شود و منجر به بروز فضای خالی در بتن و کاهش مقاومت آن می‌شود.

محاسن استفاده از آب به سیمان کمتر

۱) افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن

۲) افزایش خاصیت آب‌بندی بتن (فضای خالی کمتری در بتن ایجاد می‌شود و روزنه‌های کمتری برای عبور آب خواهیم داشت)

۳) کاهش جذب آب (به دلیل کاهش فضای خالی)

۴) پیوستگی بین لایه‌های متوالی در بتن‌ریزی

۵) افزایش چسبندگی بین میلگرد و بتن

۶) افزایش مقاومت در برابر شرایط جوی نامناسب

۷) کاهش افت و خزش

۸) کاهش آب انداختن بتن

۹) کاهش جداشدگی دانه‌ها

محاسن استفاده از آب به سیمان بیشتر

W/C زیاد فقط یک حسن دارد و آن هم روانی و کارآیی بیشتر است. در هر حال کار کردن با بتنی که W/C آن ۰/۴ است امکان‌پذیر نیست.

بتن تازه

بتنی است که تازه ساخته شده و دارای خاصیت روانی و پلاستیسیته است. مهمترین مسئله در بتن تازه میزان کارآیی آن است.

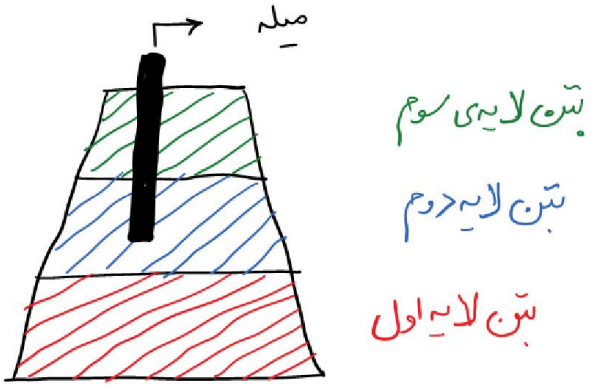
کارآیی

به این مفهوم است که ریختن و کار کردن با بتن تازه ساده‌تر و راحت‌تر باشد. هر چقدر بتن سفت‌تر و خشک‌تر باشد، کارآیی آن کمتر است.
هر چقدر سنگ‌دانه‌ها ریزتر باشند، سطح مخصوص‌شان بیشتر است و مقدار آب بیشتری احتیاج دارند تا مرطوب شوند. در نتیجه کارآیی و روانی بتن را کاهش می‌دهند.
ریزتر شدن دانه‌های سیمان نیز موجب کاهش کارآیی بتن می‌شود.
برای مشخص کردن درجه‌ی کارآیی به صورت کمیت عددی از آزمایش اسلامپ استفاده می‌شود.

آزمایش اسلامپ

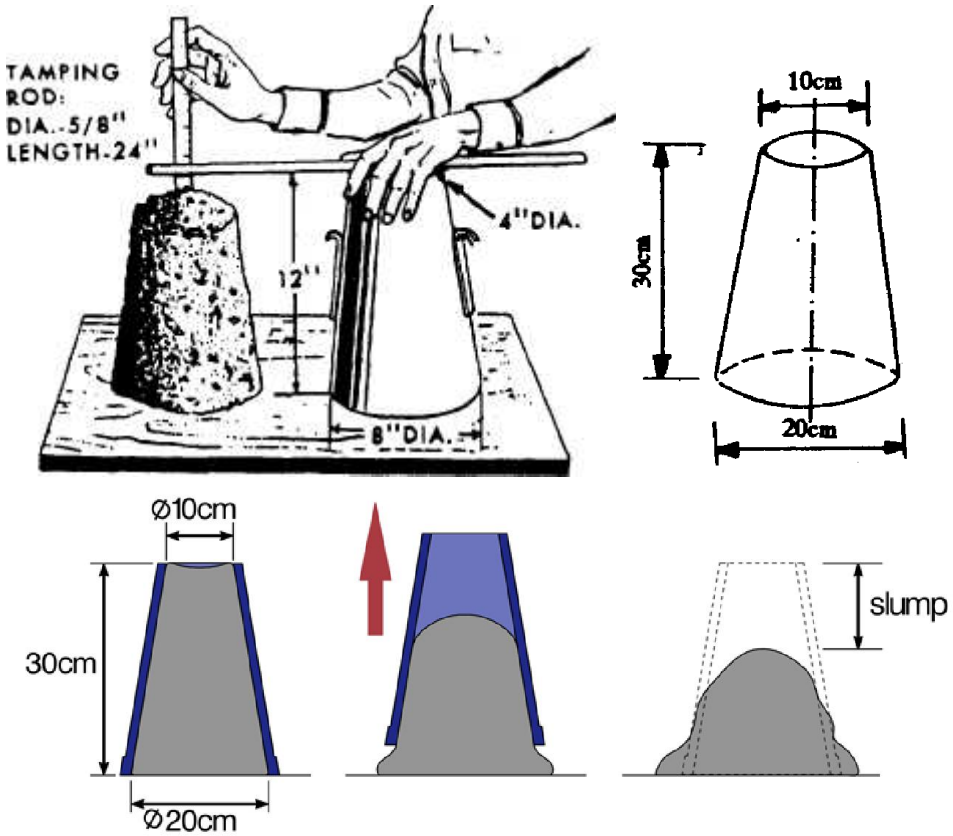
در این آزمایش از یک مخروط ناقص به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود. برای انجام این آزمایش، بتن تازه را در سه لایه داخل مخروط می‌ریزند و با میله هر لایه را ویبره می‌کنند به طوری که میله در لایه‌ی پایین فرو نرود (۲۵ ضربه). سپس سطح بتن را صاف می‌کنند و مخروط را به سمت بالا حرکت می‌دهند. بتن پس از بیرون آمدن مقداری افت می‌کند. میزان این افت بر حسب سانتی‌متر را اسلامپ یا کارآیی بتن می‌گویند (شکل ۱۸).

شکل ۱۸ : مراحل انجام آزمایش اسلامپ



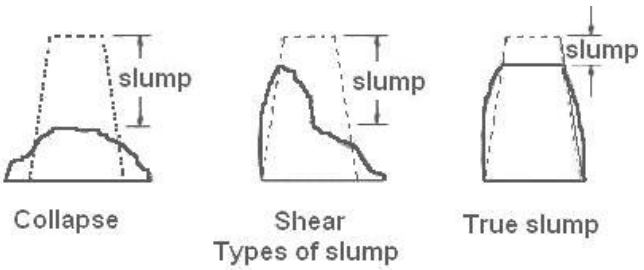
شکل ۱۹ : لایه‌های مختلف بتن‌ریزی و نحوه تراکم هر لایه در آزمایش اسلامپ

این افت می‌تواند از لحاظ نظری بین صفر (برای بتن غلتکی RCC-Rolled compacting concrete) تا ۳۰ سانتی‌متر (برای بتن خودمتراکم SCC-Self Compacting Concrete) باشد.



شکل ۲۰ : آزمایش اسلامپ

در صورتی‌که در آزمایش اسلامپ نیمی از مخروط در صفحه‌ای مورب ریزش کند، اسلامپ برشی است و باید آزمایش تکرار شود (شکل ۲۱). در صورتیکه در تکرار آزمایش دوباره همین موضوع اتفاق بیافتد، نشان دهنده کم بودن چسبندگی بتن است. همچنین در صورتیکه مخروط فرو بریزد باید آب بتن کم شود.



شکل ۲۱ : حالات مختلف اسلامپ

بدیهی است که هر چه اسلامپ کمتر باشد، خواص بتن سخت شده بهتر خواهد بود.

نوع بتن	اسلامپ مورد نیاز (بر حسب سانتی‌متر)
بتن بدون آرماتور و یا با آرماتور کم (بتن سفت)	۵-۲
بتن آرمه معمولی	۱۰-۵
بتن‌آرمه با تراکم آرماتور زیاد (بتن شل)	۱۲-۱۰

برخی مسائلی که ممکن است در بتن تازه به وجود بیاید

۱) **آب انداختن بتن (Bleeding)**: به این صورت است که پس از بتن‌ریزی یک لایه‌ی نازک آب آغشته به سیمان روی سطح بتن ظاهر می‌شود. این آب از قسمت‌های پایین بتن، سیمان را شسته و با خود به سمت بالا می‌آورد. به همین در قسمت‌های بالایی بتن مقدار سیمان بیشتری خواهیم داشت و مقاومت قسمت‌های پایین بتن کمتر خواهد بود.

مشکلات ناشی از آب انداختن بتن

الف) مقاومت پایین بتن
ب) لایه‌ی رویی بتن پس از سخت شدن به مرور سائیده می‌شود و سطح ناصافی خواهد داشت.

مهمترین دلایل آب انداختن بتن

الف) اسلامپ بیش از حد
ب) ویبره‌ی بیش از حد
ج) نامناسب بودن دانه‌بندی

۲) **جداشدن دانه‌ها (Segregation)**: این پدیده به این صورت اتفاق می‌افتد که دانه‌های درشت‌تر به سمت پایین ته‌نشین شده و دانه‌ها ریزتر به سمت بالا منتقل می‌شوند و در نتیجه بتن حالت یکنواختی خود را از دست داده و توزیع دانه‌بندی به هم می‌خورد. چنین بتنی مقاومت پایینی خواهد داشت.

مهمترین دلایل جداشدن دانه‌ها در بتن

الف) اسلامپ بیش از حد
ب) ویبره‌ی بیش از حد
ج) جابه‌جا کردن بتن در قالب

د) ریختن بتن از ارتفاع

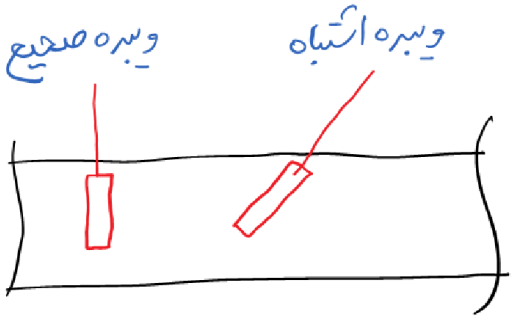
تراکم بتن تازه یا ویبره (Vibration)

تراکم یعنی به حرکت درآوردن ذرات بتن، کم کردن اصطکاک بین آنها و خارج کردن حباب‌های هوا از بتن.
به طور مثال وجود ۵٪ فضای خالی در بتن مقاومت آنرا تا ۳۰٪ کاهش می‌دهد.
برای متراکم کردن بتن از ارتعاش استفاده می‌شود. هدف از ارتعاش این است که حباب‌های هوا از بتن خارج شوند و بتن متراکم‌تر گردد.
متراکم کردن بتن موجب می‌شود تا سطح تماس میان میلگرد و بتن بیشتر شود و چسبندگی میان آنها افزایش یابد.
همچنین مقاومت بتن افزایش می‌یابد.

انواع ویبره

۱) **ویبره دستی:** به صورت میله‌ای یا شلنگی در بازار موجود است (شکل ۲۲). این نوع ویبره یک میله‌ی لرزاننده کوچک است که با دست آنرا به صورت قائم در بتن فرو برده و بتن را مرتعش می‌کند. توصیه شده است که میله‌ی لرزان را به فاصله‌ی ۰/۵ الی یک متر در بتن فرو ببرند و به مدت ۵ تا ۳۰ ثانیه (بسته به میزان تراکم مورد نظر و اسلامپ بتن) در بتن نگه دارند.

شکل ۲۲ : ویبره‌ی دستی



شکل ۲۳ : نحوه ویبره‌ی صحیح

۲) **ویبره‌ی لرزاننده قالب**: این نوع ویبره را به قالب متصل می‌کنند(شکل ۲۴).

شکل ۲۴ : ویبره‌ی قالب

۳) **ویبره میزی:** معمولا در کارگاه‌های بتن پیش ساخته از آن استفاده می‌کنند (شکل ۲۵).

شکل ۲۵ : ویبره‌ی میزی

مضرات ویبره‌ی بیش از حد

ویبره‌ی بیش از حد مضر است، زیرا موجب آب انداختن بتن و یا جدا شدن دانه‌ها از یکدیگر می‌شود.

بتن سخت شده

پس از ریختن بتن با گذشت زمان بتن تازه سخت شده و از زمان ریختن بتن تا مرحله‌ی سفت شدن آن باید از بتن نگهداری و مراقبت کرد.

مراقبت از بتن سخت شده (به عمل آوردن بتن- Curing)

در مراقبت از بتن دو عامل مهم است:

۱) **رطوبت کافی:** به حداقل رطوبتی بین ۱۰۰-۸۰٪ برای مراقبت از بتن نیاز است.

۲) **درجه حرارت مناسب:** بهترین درجه برای بتن ۱۳ درجه‌ی سانتیگراد است و در درجه حرارت‌های زیر ۴ درجه گیرش بتن با مشکل مواجه می‌شود و در دمای زیر صفر درجه بتن یخ می‌زند.

حداقل زمان لازم برای مراقبت از بتن ۷ شبانه‌روز است. یعنی در طول این مدت بتن باید در دمای مناسب و رطوب حداقل ۸۰٪ قرار داشته باشد.

مشکلات ناشی از عدم مراقبت از بتن

۱) افت مقاومت فشاری و خمشی
۲) پودرشدگی سطحی در بتن
۳) افزایش میزان افت و انقباض
۴) افزایش میزان خزش

خشک شدن بتن

خشک شدن بتن از سطح بتن شروع می‌شود و به عمق آن نفوذ می‌کند. مدت زمانی که طول می‌کشد تا مغز بتن خشک شود بسیار طولانی است. بنابراین نباید نگران گیرش سیمان در قسمت‌های مرکزی بتن بود. مشکل اصلی سطح بتن مخصوصاً عمق ۰/۵ تا یک سانتی‌متری است. به همین دلیل باید در ۷ روز اول عمر بتن از آن مراقبت سطحی شود.

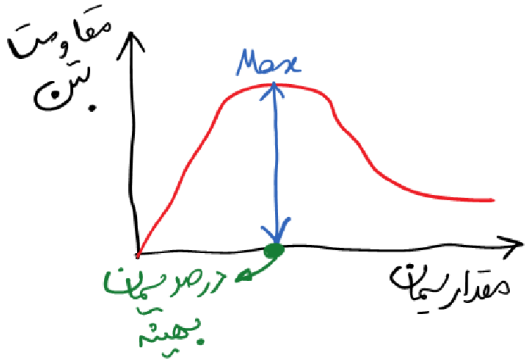
مقاومت بتن

مقاومت بتن به عوامل زیر بستگی دارد.

۱) **کیفیت سنگ‌دانه‌ها :** بهترین نوع سنگ‌دانه از نوع سنگ‌دانه‌ی سیلیسی است که مقاومت بالایی دارد.

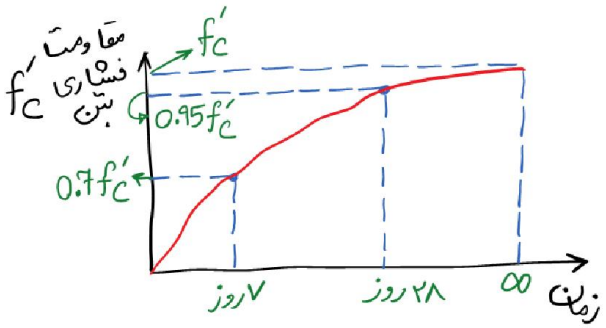
۲) **میزان سنگ‌دانه:** هر چقدر سنگ‌دانه‌ی بیشتری مصرف شود، بتن توپرتر و مقاوم‌تر خواهد شد.

۳) **مقدار سیمان:** هر چه سیمان بیشتر باشد، مقاومت بیشتری خواهیم داشت. به شرط اینکه مقدار سیمان از یک حد مشخص بیشتر نشود. در صورتی‌که از این حد بیشتر شود موجب کاهش مقاومت بتن می‌شود.



۴) **نسبت آب به سیمان:** هر چه نسبت W/C کمتر باشد، بتن مقاومت بالاتری خواهد داشت.

۵) **عمر بتن:** هر چه از شروع ساخت بتن زمان بیشتری گذشته باشد، مقاومت بتن بیشتر خواهد شد. مثلا مقاومت ۷ روزه‌ی بتن در حدود ۷۰٪ مقاومت نهایی بتن است درحالیکه مقاومت ۲۸ روزه‌ی آن در حدود ۹۰-۹۵٪ مقاومت نهایی آن است.



عمر مفید بتن: عمر مفید ساختمان‌های بتنی معولا ۵۰ تا ۱۰۰ سال در نظر گرفته می‌شود. زیرا نفوذ اسیدهای طبیعی در بتن از مقاومت آن می‌کاهد و سبب خوردگی آرماتورها می‌شود.

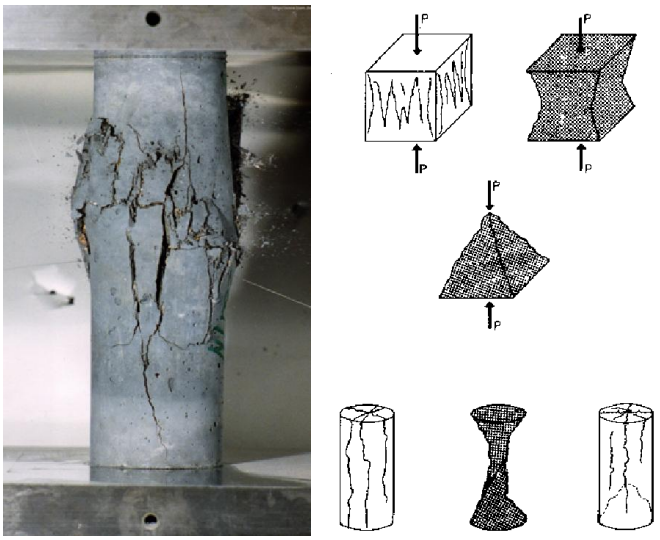
اندازه‌گیری مقاومت بتن

۱) **مقاومت فشاری بتن:** مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن توسط نمونه‌ی آزمایشگاهی تعیین می‌شود. برای این‌کار بتن را در قالب‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متر و یا قالب استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر می‌ریزند و آنرا به مدت ۲۸ روز در آب یا حمام بخار قرار می‌دهند. پس از ۲۸ روز بتن را زیر جک‌های مخصوصی تحت فشار قرار داده و می‌شکنند (شکل ۲۶). مقاومت فشاری نمونه به صورت زیر به دست می‌آید:

شکل قالب بتن مکعب و استوانه_ مکعب و استوانه‌ای

$$\text{مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای} = \frac{\text{نیروی شکسته شدن بتن}}{\pi \times 7.5^2}$$

$$\text{مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی} = \frac{\text{نیروی شکسته شدن بتن}}{15 \times 15}$$



شکل ۲۶ : آزمایش مقاومت فشاری بتن

مثال: در یک آزمایش مقاومت فشاری بتن نیروی شکسته شدن برای نمونه‌ی مکعبی بتنی ۱۵ در ۱۵ برابر ۴۰ تن و نیروی شکسته شدن برای نمونه استوانه‌ای ۱۵ در ۳۰ برابر ۳۰ تن بوده است. مقاومت فشاری دو نمونه را به دست آورید.

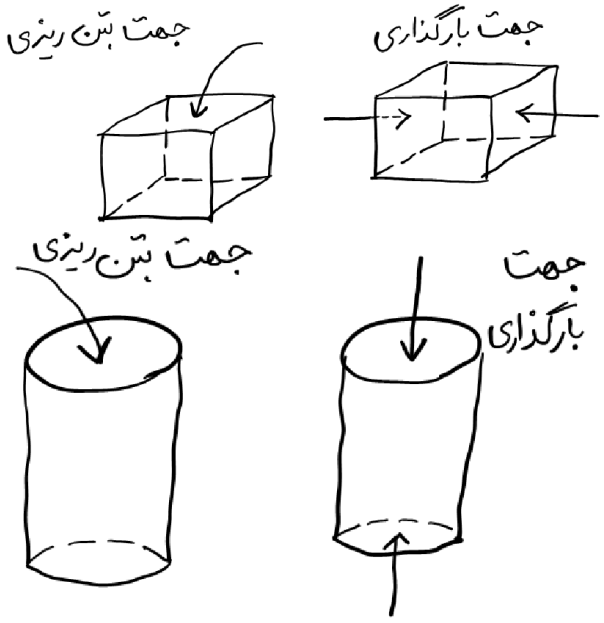
حل:

$$\text{مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی} = \frac{40000\ kg}{15 \times 15} = 1778_{kg/cm^2}$$

$$\text{مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای} = \frac{30000\ kg}{\pi \times 7.5^2} = 169_{kg/cm^2}$$

به طور کلی بتنی خوب تلقی می‌شود که وقتی تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار می‌گیرد، شکست آن با شکستن سنگ‌دانه‌ها همراه نباشد. اگر دانه‌ها سالم بمانند و سیمان از روی دانه‌ها جدا شده باشد، بتن مناسب تلقی می‌شود.

مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه نمونه‌ی مکعبی و استوانه‌ای با هم متفاوت است به گونه‌ای که مقاومت نمونه‌ی استوانه‌ای عموماً ۸۰٪ مقاومت نمونه‌ی مکعبی است. برای توجیه این تفاوت دلایل متفاوتی ذکر شده است. یکی از آنها این است که در نمونه‌ی استوانه‌ای جهت بتن‌ریزی و اعمال تنش یکی است. ولی در نمونه‌ی مکعبی جهت بتن‌ریز و اعمال تنش عمود بر هم هستند. دلیل دیگر این است که امکان به وجود آمدن تمرکز تنش در نمونه‌های استوانه‌ای بیشتر است.



شکل ۲۷ : جهت بارگذاری و بتن‌ریزی برای نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی

در ایران محاسبات بتن آرمه اصولاً بر مبنای آیین‌نامه‌های آمریکایی و مقاومت بتن بر اساس نمونه‌ی استوانه‌ای 150×300 میلیمتر (نمونه استاندارد) ملاک عمل قرار می‌گیرد. در صورت استفاده از نمونه‌های مکعبی یا نمونه‌های استوانه‌ای غیراستاندارد، باید مقاومت آنها به مقاومت نمونه‌ی استوانه‌ای 150×300 تبدیل شود.

$$\text{مقاومت نظیر استوانه استاندارد} = \frac{\text{مقاومت نمونه‌ی استوانه‌ای به ابعاد } a\times 2a}{\emptyset_1}$$

هرچقدر استوانه ابعادش بزرگتر باشد، مقاومتش کمتر است.

$$\text{مقاومت نظیر مکعب به ابعاد ۲۰۰ میلیمتر} = \frac{\text{مقاومت نمونه‌ی مکعبی به بعد } b}{\emptyset_2}$$

هرچقدر مکعب ابعادش بزرگتر باشد، مقاومتش کمتر است.

$$\text{مقاومت نظیر استوانه استاندارد} = \frac{\text{مقاومت نمونه‌ی مکعبی به ابعاد ۲۰۰ میلیمتر}}{\emptyset}$$

مقاومت بتن در جداول زیر بر حسب مگاپاسکال است.

مقادیر ϕ_1

a × ۲a	۱۰۰ × ۲۰۰	۱۵۰ × ۳۰۰	۲۰۰ × ۴۰۰	۲۵۰ × ۵۰۰	۳۰۰ × ۶۰۰
ϕ_1	۱/۰۲	۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۱

مقادیر ϕ_2

مکعبی b	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
ϕ_2	۱/۰۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۵	۰/۹

مقادیر ϕ

مقاومت فشاری نمونه مکعبی (MPa)	≤ ۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵
ϕ	۱/۲۵	۱/۲۰	۱/۱۷	۱/۱۴	۱/۱۳	۱/۱۱	۱/۱۰
مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای (MPa)	با توجه به ضریب	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰

مثال : درصورتیکه مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلیمتر برابر ۳۲/۵ مگاپاسکال باشد، مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای استاندارد را به دست آورید.

حل: با توجه به جداول بالا ابتدا باید مقاومت نمونه مکعبی ۱۰۰ میلیمتری به مقاومت نمونه مکعبی ۲۰۰ میلیمتری تبدیل شود.

$$\text{مقاومت نظیر مکعب به ابعاد ۲۰۰ میلیمتر} = \frac{\text{مقاومت نمونه‌ی مکعبی به بعد ۱۰۰}}{\emptyset_2 = 1.05} = \frac{32.5}{1.05} = 30.9$$

سپس مقاومت نمونه‌ی مکعب ۲۰۰ میلیمتر به مقاومت استوانه‌ی استاندارد تبدیل شود.

$$\text{مقاومت نظیر استوانه استاندارد} = \frac{\text{مقاومت نمونه‌ی مکعبی به ابعاد ۲۰۰ میلیمتر}}{\emptyset} = \frac{30.9}{1.2} = 25.75_{kg/cm^2}$$

نکته: در صورتیکه مقاومت بتن بر حسب مگاپاسکال باشد، می‌توان برای تبدیل مگاپاسکال به کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مقدار مقاومت را در عدد ۹/۸۱ ضرب کرد.

$$\frac{250_{kg/cm^2}}{9.81} = 25.48_{Mpa}$$

آزمایش بتن در سنین کم

گاهی اوقات لازم است جهت افزایش سرعت اجرایی پروژه‌ها از روی مقاومت نمونه‌های کم‌سن‌تر یعنی بتن‌های ۷ روزه، مقاومت بتن ۲۸ روزه را تخمین بزنیم. تجربیات نشان می‌دهد که تامین حداقل مقاومت به میزان ۷۵٪ مقاومت بتن در سنین کم (یک تا ۳ روز) تضمین کننده مقاومت مورد نظر در ۲۸ روز خواهد بود.
در صورت استفاده از سیمان پرتلند استاندارد می‌توان مقاومت مشخصه‌ی بتن را با استفاده از جدول زیر به دست آورد.

جدول ۹-۶-۸- تأثیر نوع سیمان و سن بتن بر روی مقاومت فشاری نسبی بتن

نوع سیمان	مقاومت فشاری (به صورت نسبی)			
	یک روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
سیمان نوع I	۰/۳۰	۰/۶۶	۱/۰۰	۱/۲۰
سیمان نوع II	۰/۲۳	۰/۵۶	۰/۹۰	۱/۲۰
سیمان نوع III	۰/۵۷	۰/۷۹	۱/۱۰	۱/۲۰
سیمان نوع IV	۰/۱۷	۰/۴۳	۰/۷۵	۱/۲۰
سیمان نوع V	۰/۲۰	۰/۵۰	۰/۸۵	۱/۲۰

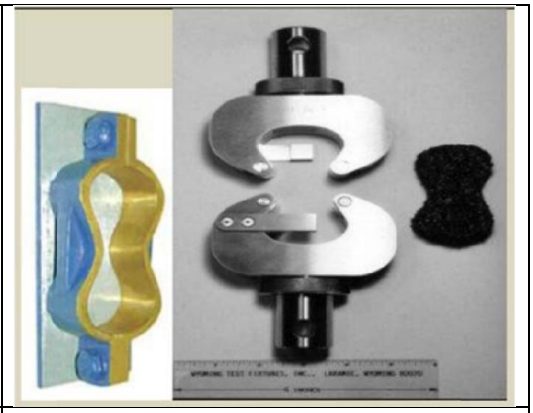
مثال : درصورتیکه مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای استاندارد که با سیمان تیپ ۱ ساخته شده است، در ۷ روز ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع باشد، مقاومت نمونه‌ی ۲۸ روزه‌ی آن چقدر خواهد شد؟

$$\text{مقاومت ۲۸ روزه} = \frac{\text{مقاومت ۷ روزه}}{0.66} = \frac{150}{0.66} = 227.3_{kg/cm^2}$$

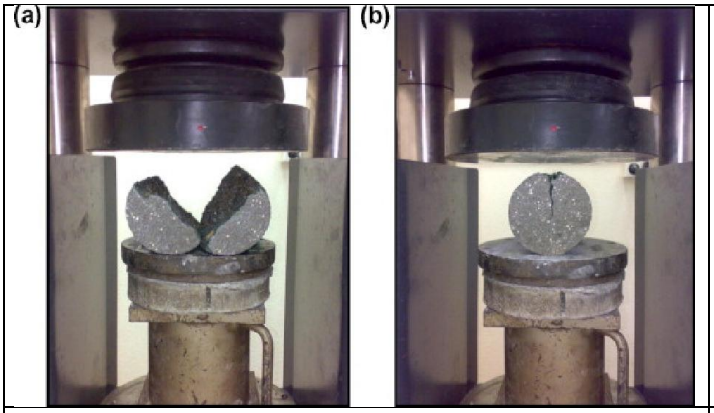
۲) **مقاومت کششی بتن:** مقاومت کششی اصولاً به دو طریق انجام می‌شود. روش اول اندازه‌گیری مقاومت کششی تحت کششی مستقیم است و در روش دوم مقاومت کششی از آزمایش خمش به دست می‌آید. تجربه نشان داده است که بتن از نظر مقاومت کششی در این دو حالت رفتاری متفاوت دارد. مقاومت کششی بتن در اثر خمش بیشتر از مقاومت کششی در اثر کشش مستقیم است. برای اندازه‌گیری مقاومت کششی تحت کشش خالص از آزمایش «کشش استخوان سگی» (شکل ۲۸) و یا از آزمایش «شکافت یا تست برزیلی» (شکل ۲۹) استفاده می‌شود. تجربه نشان می‌دهد که مقاومت کششی بتن تحت کشش مستقیم بین ۱۰-۱۵٪ مقاومت فشاری است.

$$f_t' = (10\sim15\%) \times f_c'$$

$$f_t' = (1.6\sim1.85) \times \sqrt{f_c'(kg/cm^2)}$$



شکل ۲۸ : آزمایش کشش مستقیم بتن، Dog Bone Test



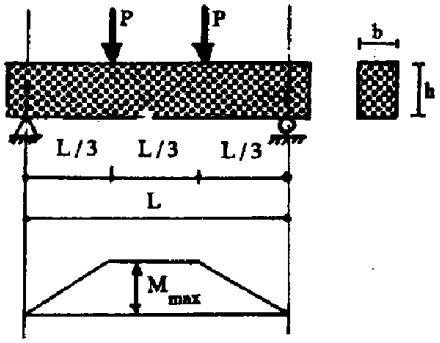
شکل ۲۹ : آزمایش برزیلی یا تست شکافت

برای اندازه‌گیری مقاومت کششی بتن در اثر خمش آزمایش استاندارد ساده‌ای وجود دارد. به این ترتیب که یک تیر بتنی ساده را روی دو تکیه‌گاه قرار می‌دهند و دو بار P را به فاصله‌ی $L/3$ تکیه‌گاه قرار داده و بار P را آنقدر زیاد می‌کنند تا قطعه ترک بخورد. دلیل قرار دادن بار متمکز در یک سوم دهانه این است که در یک سوم میانی تیر خمش خالص تولید شود (شکل ۳۰). مقاومت کششی نمونه با استفاده از رابطه‌ی تنش خمشی به دست می‌آید:

$$M_{max} = \frac{P.L}{3}$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad , \quad I = \frac{bh^3}{12}$$

$$f_{t,max} = f_r = \frac{M_{max} \times h}{2 \times I} = \frac{2PL}{bh^2}$$



شکل ۳۰ : آزمایش مقاومت خمشی بتن

آیین‌نامه‌ی ACI رابطه‌ی تجربی زیر را برای تعیین مدول گسیختگی بر اساس مقاومت فشاری بتن پیشنهاد می‌کند:

$f_r = 2\sqrt{f_c'}$ مقاومت کششی ناشی از خمش

f_r = مقاومت کششی ناشی از خمش

f_c' = مقاومت فشاری بتن

در این رابطه مقدار f_c' باید بر حسب kg/cm^2 جاگذاری شود.

مسائل اجرایی در هنگام بتن‌ریزی

۱) **ساخت بتن**: ساخت بتن باید به صورتی انجام شود که کلیه‌ی سنگدانه‌ها و سیمان به طور یکنواخت با هم مخلوط شوند.

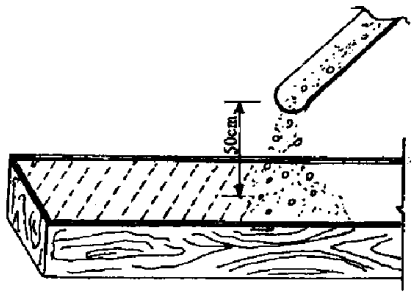
۲) **حمل بتن**: حمل باید به صورتی انجام شود که پدیده‌ی جدا شدن در دانه‌ها اتفاق نیافتد و همچنین بتن آب از دست ندهد. حمل بتن به روش‌های مختلفی انجام می‌شود:

الف) **حمل دستی**: فقط برای کارهای کوچک کاربرد دارد.

ب) **حمل با کمپرسی**: در این روش بزرگترین مشکل پدیده‌ی جدا شدن سنگ‌دانه‌ها است. در این حالت بتن نباید بیشتر از ۴۵ دقیقه در کمپرسی بماند.

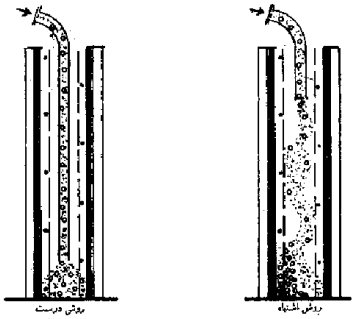
ج) **حمل با میکسر**: در این حالت زمان حمل می‌تواند تا ۱/۵ ساعت ادامه داشته باشد.

۳) **ریختن بتن**: مهمترین مسئله در هنگام ریختن بتن امکان جدا شدن دانه‌ها است. توصیه شده است که فاصله‌ی بتن‌ریزی از سطح بتن بیشتر از ۵۰ سانتی‌متر نباشد (شکل ۳۱).



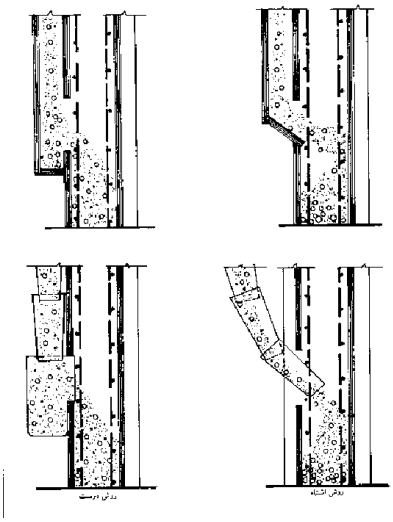
شکل ۳۱ : فاصله‌ی مجاز ریختن بتن در قالب

از مشکلات استفاده از دستگاه پمپ بتن این است که باید نسبت آب به سیمان را اجباراً بالا برد تا اسلامپ بتن به ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر برسد. استفاده از پمپ بتن بیشتر در مواردی توصیه می‌شود که بتن‌ریزی در ارتفاع باشد. برای بتن‌ریز در ستون‌ها در بتن باید دقت کرد که با عبور دادن لوله‌ی پمپ از قالب، ارتفاع مجاز بتن‌ریزی تنظیم شود (شکل ۳۲).

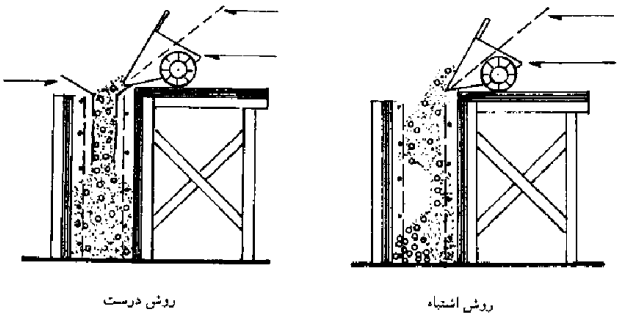


شکل ۳۲ : بتن‌ریزی در ستون‌ها به وسیله‌ی پمپ بتن

در بتن‌ریزی‌هایی که امکان عبور دادن لوله‌ی پمپ از قالب وجود نداشته باشد، بهتر است که در قالب و در فواصل مناسب روزنه‌هایی را تعبیه نموده و بتن ریزی را از این روزنه‌ها انجام داد (شکل ۳۳). در چنین مواقعی می‌توان از قیف جهت بتن‌ریزی استفاده کرد (شکل ۳۴).



شکل ۳۳ : بتن‌ریزی در ستون‌ها با تعبیه روزنه

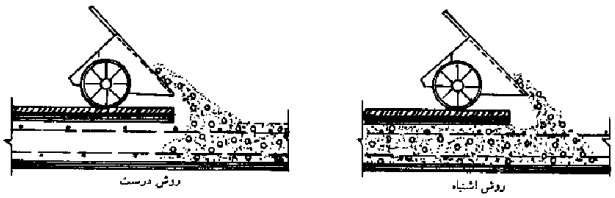


شکل ۳۴ : بتن‌ریزی در ستون‌ها به وسیله‌ی قیف

بتن‌ریزی کف‌ها: در این حالت باید به نکات زیر توجه شود (شکل ۳۵):

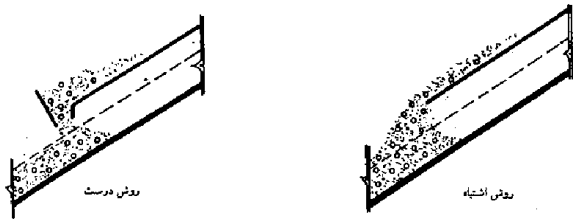
۱) بتن را نباید به صورت توده‌ی بزرگی خالی کرد و سپس با حرکت افقی جابه‌جا کرده و قالب را پر کرد. زیرا سبب جدایی دانه‌ها می‌شود.

۲) بتن‌ریزی باید به گونه‌ای انجام شود که بتن ریخته شده تحت فشار وسیله‌ی تخلیه بتن (مثل فرغون) قرار نگیرد زیرا سبب آب انداختن بتن می‌شود.



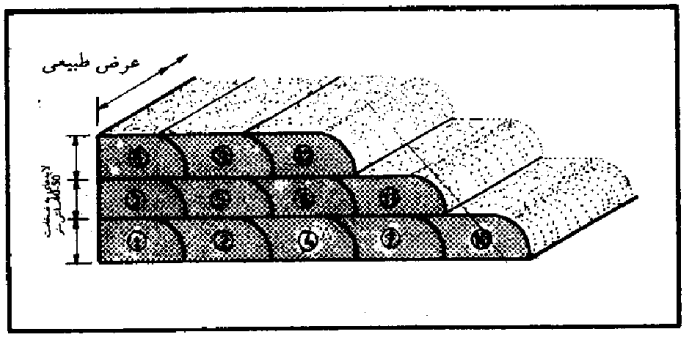
شکل ۳۵ : بتن‌ریزی کف‌ها

بتن‌ریزی در سطوح شیب‌دار: در این حالت بتن‌ریزی باید از طرف پایین به بالا انجام شود تا وزن بتن بالا به تراکم بتن پایین کمک کند (شکل ۳۶).



شکل ۳۶ : بتن‌ریزی در سطوح شیبدار

بتن‌ریزی‌های حجیم: مشکلی که در این روش به وجود می‌آید اتصال سرد میان لایه‌های متوالی بتن‌ریزی است. برای حل این مشکل می‌توان از سیمان تیپ ۴ استفاده کرد و یا از روش بتن‌ریزی لایه‌ای استفاده کرد. با استفاده از این روش امکان سفت شدن لایه‌ی قبلی از بین رفته و اتصال بین لایه‌ی جدید و لایه‌قبلی به خوبی انجام می‌شود (شکل ۳۷).



شکل ۳۷ : بتن‌ریزی لایه‌ای برای جلوگیری از اتصال سرد در بتن‌ریزی حجیم

فصل ششم : طرح اختلاط به روش آیین‌نامه‌ی ACI-211

طرح اختلاط بتنی به این مفهوم است که به چه نسبتی اجزاء بتن (سیمان-آب-شن-ماسه) را مخلوط کنیم تا بتن ساخته شده به خواص مشخصی دست یابد. طرح اختلاط به دو صورت وزنی و حجمی انجام می‌شود. در طرح اختلاط اصولا سه مسئله مطرح است:

۱) رسیدن به مقاومت مورد نظر
۲) تامین دوام کافی
۳) رسیدن به اسلامپ مورد نظر

تعریف وزن مخصوص ظاهری (حجمی)

از تقسیم وزن دانه‌ها بر حجم ظرفی که این دانه‌ها (با احتساب فضای خالی میان ذرات) در آن قرار می‌گیرند به دست می‌آید.

تعریف وزن مخصوص حقیقی

از تقسیم وزن دانه‌ها بر حجم دانه‌ها به دست می‌آید.

فرضیات کلی در طرح اختلاط به روش وزنی و حجمی

۱) وزن مخصوص ظاهری و حقیقی دانه‌ها باید به وسیله آزمایش تعیین شود. در صورت عدم انجام این آزمایش، می‌توان وزن مخصوص حقیقی شن را ۲/۶۸ و وزن مخصوص حقیقی ماسه را ۲/۶۴ در نظر گرفت. همچنین وزن مخصوص ظاهری شن بین ۱/۶ تا ۱/۸ در نظر گرفته می‌شود.
۲) چگالی سیمان برابر با ۳/۱۵ در نظر گرفته می‌شود.
۳) مدول نرمی ماسه را می‌توان با استفاده از آزمایش دانه‌بندی به دست آورد و یا مقدار آنرا برابر با ۲/۸ در نظر گرفت.
۴) وزن شن و ماسه بر اساس حالت اشباع با سطح خشک (SSD) تعیین می‌شود. اگر رطوبت شن و ماسه در حالت SSD نباشد، باید تصحیحات لازم بر روی وزن شن و ماسه و آب مصرفی انجام شود. رطوبت SSD را باید با آزمایش تعیین کرد. درصورتی‌که چنین آزمایشی انجام نشده باشد، می‌توان رطوبت‌ها را به صورت زیر فرض کرد:

$\omega_{SSD,CA} = 0.5\%$ رطوبت اشباع با سطح خشک شن
$\omega_{SSD,FA} = 0.7\%$ رطوبت اشباع با سطح خشک ماسه

مراحل طرح اختلاط به روش وزنی و حجمی

۱) **انتخاب اسلامپ:** این مقدار بر اساس نوع عضو بتنی، تجربه‌ی مهندس طراح، شرایط کارگاه و براساس جدول ۱ انتخاب می‌شود.

جدول ۱ : اسلامپ پیشنهادی برای سازه‌های مختلف

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

۲) **انتخاب بزرگترین بعد سنگدانه‌ها (D_{max})**: هرچه از سنگ‌دانه‌های بزرگتری استفاده شود بتن دارای ساختار قوی‌تری بوده و مصرف سیمان کاهش می‌یابد. ولی باید به محدودیت حداکثر بعد سنگ‌دانه‌ها توجه شود (برحسب ابعاد قالب).

۳) **تخمین مقدار آب لازم و میزان هوا (A, W)**: این مقادیر بر اساس اسلامپ و بزرگترین بعد سنگ‌دانه و بر اساس جدول ۲ تعیین می‌شود. قسمت‌های بالای جدول برای بتن بدون هوا و قسمتهای پایین برای بتن هوادار استفاده می‌شود.

جدول ۲ : مقادیر تقریبی آب و هوا بر اساس اسلامپ و بزرگترین بعد دانه‌ها

اسلامپ ، میلیمتر	مقدار تقریبی آب برحسب kg/m^3 براساس بزرگترین بعد دانه‌ها							
	۹/۵	۱۲/۵	۱۹	۲۵	۳۷/۵	۵۰	۷۵	۱۵۰
بتن بدون حباب هوا								
۵۰ - ۲۵	۲۰۷	۱۹۹	۱۹۰	۱۷۹	۱۶۶	۱۵۴	۱۳۰	۱۱۳
۱۰۰ - ۷۵	۲۲۸	۲۱۶	۲۰۵	۱۹۳	۱۸۱	۱۶۹	۱۴۵	۱۲۴
۱۷۵ - ۱۵۰	۲۴۳	۲۲۸	۲۱۶	۲۰۲	۱۹۰	۱۷۸	۱۶۰	—
درصد تقریبی هوای غیرعمدی	۳	۲/۵	۲	۱/۵	۱	۰/۵	۰/۳	۰/۲
در بتن بدون حباب هوا								
بتن هوادار								
۵۰ - ۲۵	۱۸۱	۱۷۵	۱۶۸	۱۶۰	۱۵۰	۱۴۲	۱۲۲	۱۰۷
۱۰۰ - ۷۵	۲۰۲	۱۹۳	۱۸۴	۱۷۵	۱۶۵	۱۵۷	۱۳۳	۱۱۹
۱۷۵ - ۱۵۰	۲۱۶	۲۰۵	۱۹۷	۱۸۴	۱۷۴	۱۶۶	۱۵۴	—
مقادیر متوسط درصد هوای پیشنهادی								
براساس شرایط محیطی :								
شرایط عادی	۴/۵	۴/۰	۳/۵	۳/۰	۲/۵	۲/۰	۱/۵	۱/۰
شرایط متوسط	۶/۰	۵/۵	۵/۰	۴/۵	۴/۵	۴/۰	۳/۵	۳/۰
شرایط شدید	۷/۵	۷/۰	۶/۰	۶/۰	۵/۵	۵/۰	۴/۵	۴/۰

۴) **انتخاب نسبت آب به سیمان (W/C)**: این نسبت به دو فاکتور مقاومت مورد نیاز و شرایط محیطی بتن بستگی دارد. جدول ۳ بر اساس مقاومت ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ی استوانه‌ای بتن مقدار (W/C) پیشنهاد می‌کند. همچنین مقدار آب به سیمان متاثر از شرایط محیطی (جدول ۴) نیز می‌باشد و باید در تعیین این نسبت کوچکترین مقادیر به دست آمده از جداول جدول ۳ و جدول ۴ در نظر گرفته شود.

جدول ۳ : نسبت آب به سیمان بر اساس مقاومت فشاری بتن

مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مگاپاسکال	نسبت آب به سیمان	
	بتن بدون حباب هوا	بتن هوادار
۴۰	۰٫۴۲	—
۳۵	۰٫۴۷	۰٫۳۹
۳۰	۰٫۵۴	۰٫۴۵
۲۵	۰٫۶۱	۰٫۵۲
۲۰	۰٫۶۹	۰٫۶۰
۱۵	۰٫۷۹	۰٫۷۰

جدول ۴ : حداکثر نسبت مجاز آب به سیمان در شرایط محیطی نامناسب

نوع سازه	سازه‌هائی که بطورپیوسته یا متناوب مرطوبند و تحت اثر سیکلهای یخ زدن و آب شدن قرار دارند	سازه‌های در معرض آب دریا و یا سولفاتها
مقاطع ظریف (نظیر نرده‌ها، جان‌پناهها، تیرچه‌ها وکارهای تزئینی) و مقاطعی باپوشش کمتراز ۵ میلیمتر روی آرماتورها	۰٫۴۵	۰٫۴۰
سایر سازه‌ها	۰٫۵۰	۰٫۴۵

۵) **محاسبه‌ی مقدار سیمان (C)**: با تقسیم وزن آب بر حسب کیلوگرم بر نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان بر حسب کیلوگرم به دست می‌آید.

۶) **تخمین مقدار درشت‌دانه-شن (CA)**: مقدار حجم دانه‌های درشت به صورت خشک و میله خورده در واحد حجم بتن بر اساس جدول ۵ و بر اساس مقادیر بزرگترین اندازه‌ی اسمی سنگ‌دانه‌ها و مدول نرمی ماسه تعیین می‌شود. وزن مخصوص ظاهری شن خشک و میله خورده معمولاً ۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. در مواردی که به کارآیی کمتری و یا بیشتری نیاز باشد می‌توان اعداد جدول زیر را تا ۱۰٪ افزایش و یا کاهش داد.

جدول ۵ : حجم درشت‌دانه در واحد حجم بتن

بزرگترین اندازه اسمی دانه‌ها، میلیمتر	حجم‌دانه‌های خشک میله‌خورده در واحد حجم‌بتن‌براساس مقادیر مختلف مدول نرمی ماسه			
	۲/۴۰	۲/۶۰	۲/۸۰	۳/۰۰
۹/۵	۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۴۴
۱۲/۵	۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۵۵	۰/۵۳
۱۹	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۶۰
۲۵	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۶۵
۳۷/۵	۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۷۱	۰/۶۹
۵۰	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۷۲
۷۵	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۷۸	۰/۷۶
۱۵۰	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸۱

۷) **تعیین مقدار ریزدانه-ماسه (FA)**: تا این مرحله روش وزنی و حجمی آیین‌نامه ACI یکسان بود. از این مرحله به بعد و در تعیین وزن ماسه‌ی لازم تفاوت‌هایی وجود دارد:

الف) روش وزنی: در این روش باید وزن کلیه‌ی اجزای بتن در یک مترمکعب با وزن مخصوص بتن تازه برابر باشد:

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

در این رابطه U وزن مخصوص بتن تازه است. برای تعیین وزن مخصوص بتن تازه می‌توان از جدول ۶ استفاده کرد. همچنین می‌توان برای دقت بیشتر از رابطه‌ی زیر استفاده کرد:

$$U = 10G_A(100 - A) + C\left(1 - \frac{G_A}{G_C}\right) - W(G_A - 1)$$

$$G_a = \frac{1}{2}(G_{CA} + G_{FA})$$

در این رابطه:

G_a : چگالی متوسط مخلوط درشت‌دانه و ریزدانه

G_{CA} : چگالی درشت‌دانه‌ها

G_{FA} : چگالی ریزدانه‌ها

G_C : چگالی سیمان

A : درصد حجمی هوای موجود در بتن

W : وزن آب موجود در بتن

جدول ۶ : تخمین مقدماتی برای وزن مخصوص بتن تازه

بزرگترین اندازه اسمی دانه‌ها، میلیمتر	تخمینی مقدماتی برای وزن واحد حجم بتن، kg/m^3	
	بتن بدون حباب هوا	بتن هوادار
۹٫۵	۲۲۸۰	۲۲۰۰
۱۲٫۵	۲۳۱۰	۲۲۳۰
۱۹	۲۳۴۵	۲۲۷۵
۲۵	۲۳۸۰	۲۲۹۰
۳۷٫۵	۲۴۱۰	۲۳۵۰
۵۰	۲۴۴۵	۲۳۴۵
۷۵	۲۴۹۰	۲۴۰۵
۱۵۰	۲۵۳۰	۲۴۳۵

ب) روش حجمی: در این روش حجم ماسه را چنان تعیین می‌کنند که حجم احجام کلیه اجزا موجود در یک مترمکعب بتن تازه برابر با واحد شود:

$$FA = 10G_{FA}(100 - A) - G_{FA}\left(\frac{CA}{G_{CA}} + \frac{C}{G_C} + W\right)$$

در این رابطه FA بیانگر وزن ماسه بر حسب کیلوگرم در یک مترمکعب از بتن است.

۸) **تصحیح به جهت رطوبت دانه‌ها**: در صورتی‌که سنگدانه‌ها رطوبتی بیشتر و یا کمتر از حالت SSD داشته باشند باید تصحیحات مناسب در اوزان شن و ماسه و نیز مقدار آب صورت پذیرد:

الف- تصحیح وزن شن و ماسه

$$CA_W = CA \times (1 + \omega_{CA})$$
$$FA_W = FA \times (1 + \omega_{FA})$$

CA_W : وزن شن در حالت مرطوب

FA_W : وزن ماسه در حالت مرطوب

ω_{CA} : درصد رطوبت طبیعی شن

ω_{FA} : درصد رطوبت طبیعی ماسه

ب- تصحیح وزن آب:

$$\mathrm{W_{Modified}} = \mathrm{W_{initial}} - \mathrm{CA} \times \left(\omega_{\mathrm{CA}} - \omega_{\mathrm{SSD,CA}}\right) - \mathrm{FA} \times \left(\omega_{\mathrm{FA}} - \omega_{\mathrm{SSD,FA}}\right)$$

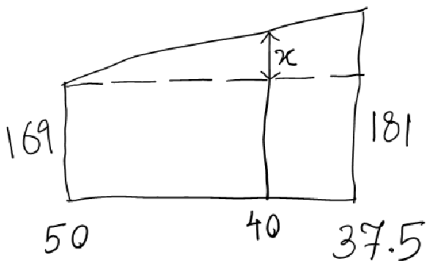
مثال: در یک کارگاه بتن‌سازی مقاومت ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ی استوانه‌ای f'_C برابر با $250_{kg/cm^2}$ و اسلامپ ۸ تا ۱۰ سانتی‌متر مورد نیاز است. دانه‌های شنی مورد استفاده دارای بزرگترین بعد حدود ۴۰ میلیمتر و وزن مخصوص ظاهری خشک میله خورده‌ی شن $1600_{kg/m^3}$ هستند. رطوبت دانه‌های شنی و ماسه‌ای به ترتیب ۲٪ و ۶٪ و مدول نرمی ماسه ۲/۸ است. با استفاده از روش حجمی و وزنی طرح اختلاط بتن را ارائه دهید.

حل:

۱- **اسلامپ** : ۸ تا ۱۰ سانتی‌متر

۲- **انتخاب بزرگترین اندازه‌ی دانه‌ها**: $D_{max} = 40_{mm}$

۳- **تخمین مقدار آب و هوا** : در جدول ۲ مقدار آب مربوط به بزرگترین بعد سنگدانه به اندازه $D_{max} = 40_{mm}$ وجود ندارد. از این رو باید با استفاده از مقادیر وزن آب مربوط به $D_{max} = 37.5_{mm}$ و $D_{max} = 50_{mm}$ ، مقدار آب مربوط به $D_{max} = 40_{mm}$ درون‌یابی شود.



$$\frac{50-40}{50-37.5} = \frac{x}{181-169}$$

$$x = 9.6 \rightarrow W = 169 + 9.6 \approx 179_{kg/m^3}$$

$$\begin{cases} W = 179_{kg/m^3} \\ A = 1\% \end{cases}$$

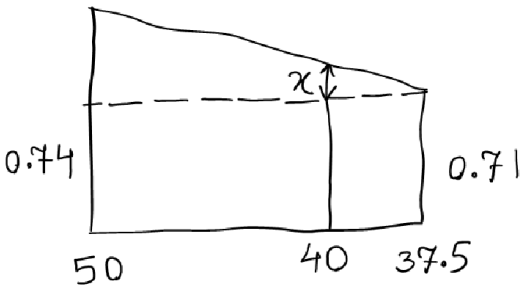
۴- **انتخاب نسبت آب به سیمان:** با توجه به اینکه به بتنی احتیاج داریم که مقاومت ۲۸ روزه‌ی آن باید $250_{kg/m^3}$ یا 25_{Mpa} باشد و با توجه به اینکه بتن در شرایط محیطی نامناسب وجود ندارد و الزامی به رعایت حداکثر نسبت آب به سیمان نیست، از این رو با استفاده از جدول ۳ و جدول ۴ خواهیم داشت:

$$\frac{W}{C} = 0.61$$

۵- **محاسبه مقدار سیمان:**

$$C = \frac{W}{W/C} = \frac{179}{0.61} = 293_{kg/m^3}$$

۶- **تخمین مقدار درشت‌دانه:** در جدول ۵ مربوط به حجم دانه‌های خشک میله خورده، مقادیر مربوط به بزرگترین بعد سنگدانه به اندازه $D_{max} = 40_{mm}$ وجود ندارد. از این رو باید با استفاده از مقادیر مربوط به $D_{max} = 37.5_{mm}$ و $D_{max} = 50_{mm}$، مقدار حجم دانه‌های خشک میله خورده مربوط به $D_{max} = 40_{mm}$ درون‌یابی شود.



$$\frac{40-37.5}{50-37.5} = \frac{x}{0.74-0.71}$$

$$x = 0.006$$

$$\text{حجم شن خشک میله خورده} = 0.71 + 0.006 \approx 0.72 \ m^3$$

حجم ظاهری شن در واحد حجم بتن $= 0.72_{m^3}$

وزن شن خشک $= CA = 0.72 \times 1600 = 1152_{kg/m^3}$

۷- **تعیین مقدار ریزدانه:**

الف- بر اساس روش وزنی: ابتدا باید وزن مخصوص بتن را حساب کنیم. برای این‌کار هم می‌توانیم از روابط ذکر شده و هم از جدول ۶ استفاده کرد. ما در اینجا هر دو روش را محاسبه و نتایج را با هم مقایسه می‌کنیم.

در صورتی که از رابطه‌ی مربوط به وزن مخصوص بتن استفاده شود چون وزن مخصوص حقیقی شن و ماسه را نداریم آنها را به ترتیب ۲/۶۸ و ۲/۶۴ فرض می‌کنیم. وزن مخصوص سیمان هم ۳/۱۵ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه درصد هوای ناخواسته در بتن ۱٪ است خواهیم داشت:

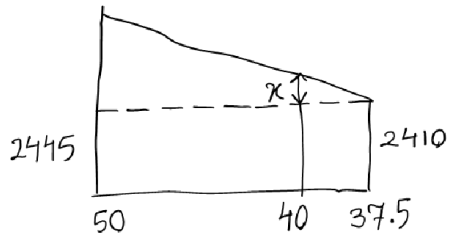
$$G_a = \frac{1}{2}(G_{CA} + G_{FA}) = \frac{1}{2}(2.68 + 2.64) = 2.66$$

$$U = 10G_A(100 - A) + C\left(1 - \frac{G_A}{G_C}\right) - W(G_A - 1)$$

$$= 10 \times 2.66(100 - 1) + 293\left(1 - \frac{2.66}{3.15}\right) - 179(2.66 - 1)$$

$$= 2382_{kg/m^3}$$

اگر هم از جدول ۶ استفاده کنیم باید بین مقادیر $D_{max} = 37.5_{mm}$ و $D_{max} = 50_{mm}$ درون‌یابی انجام شود.



$$\frac{40 - 37.5}{50 - 37.5} = \frac{x}{2445 - 2410}$$

$$x = 7 \rightarrow U = 2410 + 7 = 2417\ kg/m^3$$

ملاحظه می‌شود که با استفاده از رابطه مقدار $U = 2382_{kg/m^3}$ و با استفاده از جدول ۶ مقدار $U = 2417_{kg/m^3}$ به دست آمده است. اگر بالفرض بخواهیم از مقدار $U = 2382_{kg/m^3}$ استفاده کنیم، وزن ریزدانه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$FA = U - CA - W - C = 2417 - 1152 - 179 - 293 = 758_{kg/m^3}$$

ب- بر اساس روش حجمی:

$$FA = 10G_{FA}(100 - A) - G_{FA}\left(\frac{CA}{G_{CA}} + \frac{C}{G_C} + W\right)$$

$$= 10 \times 2.64(100 - 1) - 2.64\left(\frac{1152}{2.68} + \frac{293}{3.15} + 179\right) = 761_{kg/m^3}$$

۸- تصحیح رطوبت سنگ‌دانه‌ها:

الف- بر اساس روش وزنی:

- **تصحیح وزن سنگ‌دانه‌ها:** به دلیل اینکه سنگدانه‌ها خیس هستند، مقدار بیشتر سنگ‌دانه از وزن محاسبه شده در طرح اختلاط باید در مخلوط بتن به کار رود.

$$CA_W = CA \times (1 + \omega_{CA}) = 1152(1 + 0.02) = 1175_{kg/m^3}$$

$$FA_W = FA \times (1 + \omega_{FA}) = 758(1 + 0.06) = 803_{kg/m^3}$$

- **تصحیح وزن آب:** در واقع وزن آب طرح اختلاط به دلیل وجود رطوبت سطحی در سنگ‌دانه‌ها باید کمتر از مقدار محاسبه شده باشد.

$$\mathrm{W_{Modified}} = \mathrm{W_{initial}} - \mathrm{CA} \times \left(\omega_{\mathrm{CA}} - \omega_{\mathrm{SSD,CA}}\right) - \mathrm{FA} \times \left(\omega_{\mathrm{FA}} - \omega_{\mathrm{SSD,FA}}\right)$$

$$= 179 - [1152(0.02 - 0.005) + 758(0.06 - 0.007)] = 122_{kg/m^3}$$

ب- بر اساس روش حجمی:

$$W_{Modified} = W_{initial} - CA \times (\omega_{CA} - \omega_{SSD,CA}) - FA \times (\omega_{FA} - \omega_{SSD,FA})$$
$$= 179 - [1152(0.02 - 0.005) + 761(0.06 - 0.007)] = 121_{kg/m^3}$$