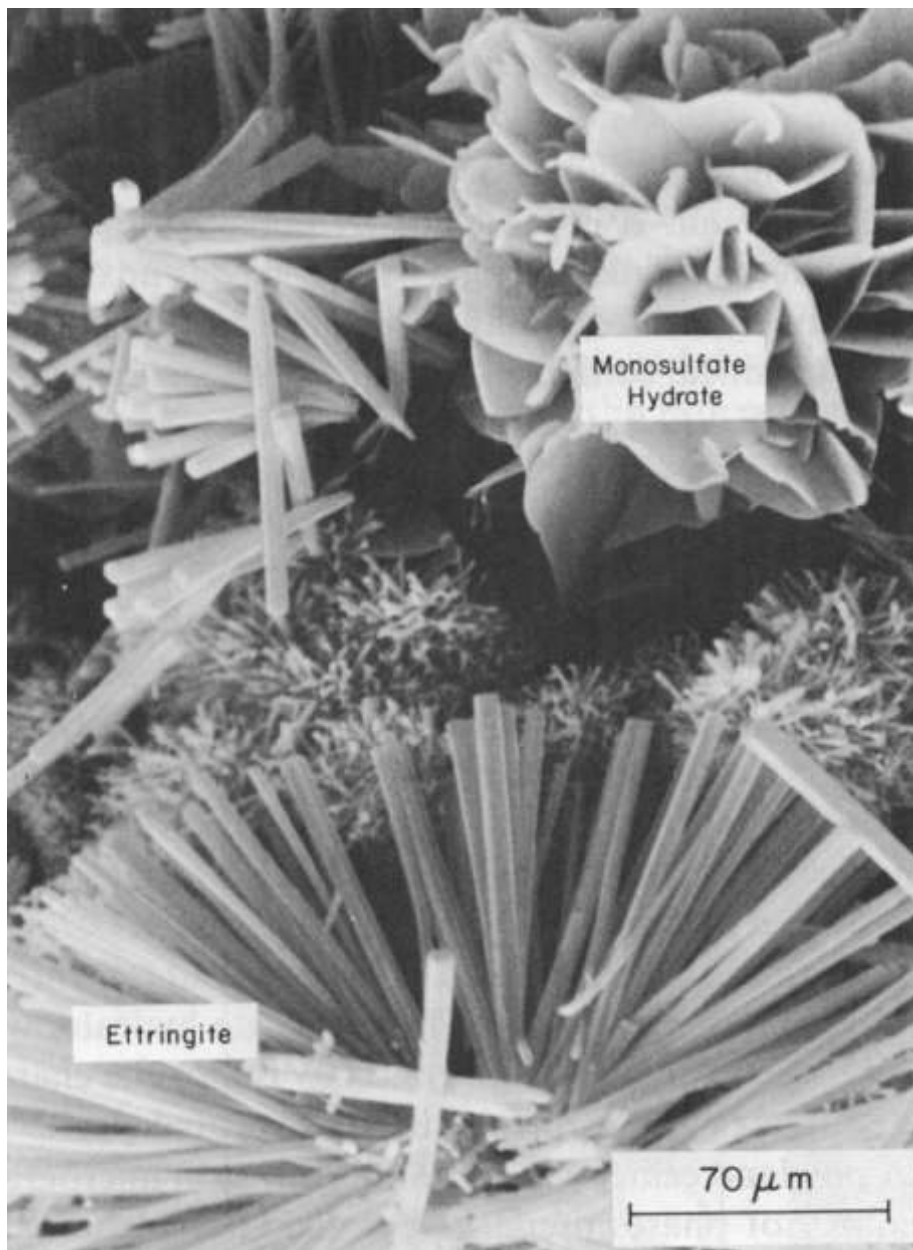


تکنولوژی بتن پیشرفته



ساختار بتن

مروری بر مطالب

ارتباط بین ساختار و خواص مواد از مطالب علم جدید مواد است. بتن ساختاری غیر همگن و پیچیده دارد. لذا بسیار مشکل است که الگوهای ساختاری مشخصی را برای بتن در نظر گرفته و با توجه به آن بتوان رفتار مصالح را پیش بینی کرد. بهر حال دانستن ساختار و خواص اجزای تشکیل دهنده بتن و ارتباط بین آنها برای کنترل خواص آنها کاملاً مفید خواهد بود. در این بخش سه جزء ساختار بتن یعنی سیمان هیدراته شده، سنگدانه و ناحیه بین خمیر و سنگدانه توضیح داده می شوند. همچنین در مورد ارتباط بین خواص و ساختار از نقطه نظر انتخاب مشخصات بتن نظیر مقاومت، پایداری ابعادی و دوام بحث شده است.

تعاریف

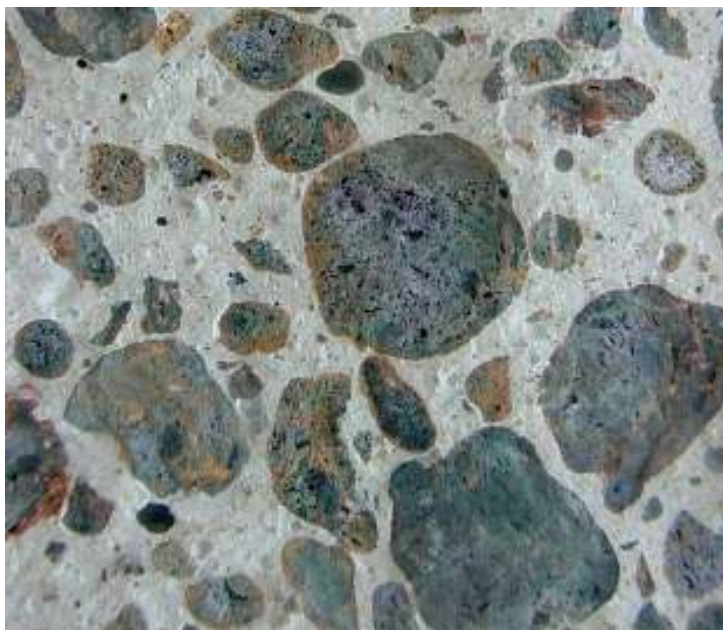
ساختار به نوع، مقدار، اندازه، شکل و پخش فازهای موجود در یک جامد گفته می شود. اجزای درشت در ساختار یک ماده معمولاً قابل رؤیت می باشند در حالی که اجزای ریز را باید با کمک میکروسکوپ مشاهده نمود. عبارت کلان ساختار عموماً به اجزای بزرگتری که با چشم معمولی قابل رؤیت هستند اطلاق می شود. محدوده دید انسان با چشم غیر مسلح در حدود $\frac{1}{5}$ میلیمتر (۲۰۰ میکرون) می باشد. عبارت ریزساختار برای رؤیت قسمتهای بزرگ شده ماده با میکروسکوپ بکار می رود. قابلیت بزرگنمایی میکروسکوپهای نوری تا 10^5 برابر میرسد درحالیکه با کاربرد میکروسکوپهای الکترونی امکان مطالعه ساختار تا چند دهم میکرون نیز فراهم شده است.

اهمیت

پیشرفت در علم مواد ابتدائاً بر این اصل استوار شده است که خواص مواد ناشی از ساختار داخلی آنها است. بعبارت دیگر خواص مواد با ایجاد تغییرات مناسب در ساختار آنها قابل اصلاح می باشد. بتن اگرچه پرمصرفترین مصالح ساختمانی است لیکن ساختاری غیرهمگن و پیچیده دارد. ارتباط بین خواص و ساختار بتن هنوز بدرستی روشن نیست. به هر حال دانستن پاره ای از اجزای ساختاری بتن قبل از بحث بر روی عوامل مؤثر در خواص مهندسی مهم بتن نظیر مقاومت، کشسانی (الاستیسیته)، انقباض، خزش و ترک و دوام امری لازم و با اهمیت است.

پیچیدگیها

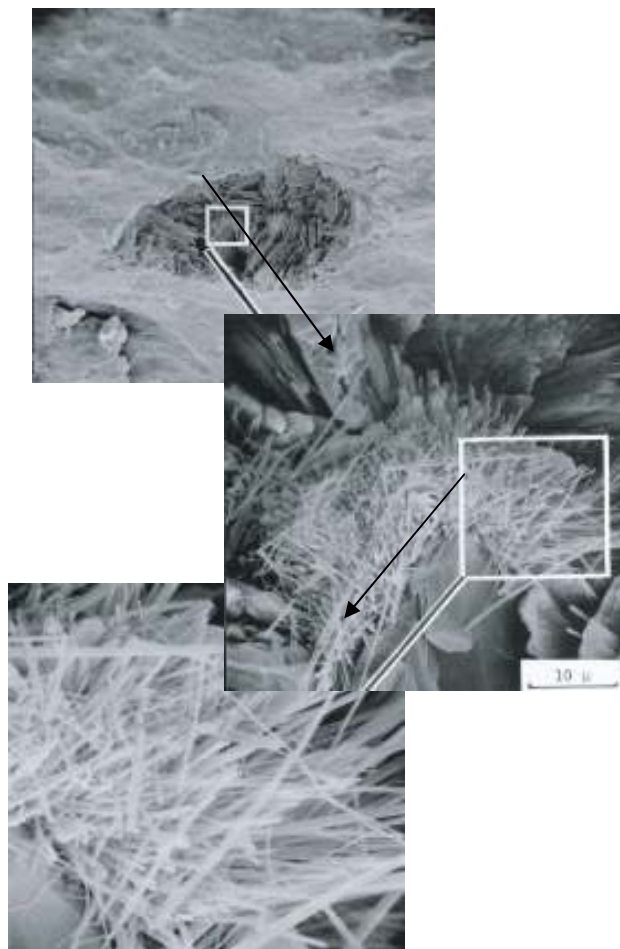
با بررسی مقطع یک بتن سخت شده دو فاز به آسانی قابل تشخیص است. فاز سنگدانه ها با اندازه و شکلهای متفاوت، و فاز خمیر سخت شده که حاصل هیدراتاسیون (آبگیری) سیمان می باشد. بنابراین در مقیاس کلان ساختار، بتن شامل دو فاز سنگدانه های پخش شده در خمیر سیمان می باشد.



در مقیاس ریز ساختار، پیچیدگی ذرات و ترکیبات رخ می نماید. از بررسی ریز ساختار مشخص میگردد که دو فاز سنگدانه و خمیر نه خودشان همگن می باشند و نه به صورت همگن نیز پخش شده اند. در پاره ای از قسمتها خمیر سخت شده حتی متراکمتر از سنگدانه ها است در حالی که در بخشی دیگر بسیار متخلخل است. همچنین اگر تعدادی نمونه بتن با مقدار مساوی سیمان ولی با میزان آب متفاوت با هم مقایسه گردند در زمانهای مختلف مشاهده می شود که حجم حفرات مویینه در خمیر کاملاً هیدراته شده می توان برای مدل کردن رفتار مصالح از ناهمگن بودن بخش جامد و حفرات در داخل خمیر صرفنظر نمود. بهر حال مطالعات ریز ساختار نشان می دهد که چنین فرضی در خصوص خمیر سخت شده در بتن صادق نیست. با وجود سنگدانه در بتن، ساختار خمیر سخت شده مجاور سنگدانه های درشت معمولاً بسیار متفاوت از ساختار خمیر به تنهایی و یا در ملات خواهد بود. در حقیقت بسیاری از رفتارهای بتن تحت تنش، با در نظر گرفتن فاز سومی که همان فصل مشترک دانه ها و خمیر است مشخص می گردد. در نتیجه سیمای منحصر به فرد بتن به صورت زیر قابل بیان خواهد بود.

ابتدا فاز سوم یا ناحیه انتقال را می توان نام برد که نشاندهنده ناحیه فصل مشترک سنگدانه های درشت و خمیر سخت شده است. ناحیه انتقال به صورت یک پوسته نازک با ضخامت حدود ۱۰ تا ۵۰ میکرون بدور دانه های درشت قرار گرفته و عموماً ضعیف تر از دو بخش دیگر بتن بوده و در نتیجه تأثیر بیشتر و مهمتری بر روی خواص مکانیکی بتن با وجود اندازه اش خواهد داشت. ثانیاً هر یک از سه فاز خود طبیعتی چند فازه دارند. به عنوان مثال هر دانه سنگ ممکن است دارای کانیهای متعدد بوده و شامل ترکهای ریز و حفرات نیز باشد. به طور مشابه، هم خمیر سخت شده و

هم ناحیه انتقال (فصل مشترک) عموماً دارای پخش غیرهمگنی از انواع و مقادیر مختلف ذرات جامد، حفره ها و ترکهای ریز می باشند که بعداً توضیح داده می شوند. ثالثاً برخلاف سایر مصالح مهندسی، ساختار بتن ثابت نمی ماند (یعنی جزء خواص ذاتی مصالح نیست). این بدین دلیل است که دو جزء دیگر ساختار یعنی خمیر سخت شده و ناحیه انتقال با گذشت زمان و تغییرات رطوبت و دمای محیط تغییر می کنند. به علت طبیعت غیرهمگن و دینامیک ساختار بتن مدلهایی که روابط تئوریکی ساختار خواص را در رفتار مصالح مهندسی بیان می کنند و اغلب مفید هستند، در مورد بتن چندان قابل استفاده نیستند. به هر حال، داشتن دانش وسیع در زمینه صور مهم ساختار اجزای تشکیل دهنده بتن برای درک و کنترل خواص مواد مرکب امری اساسی است .



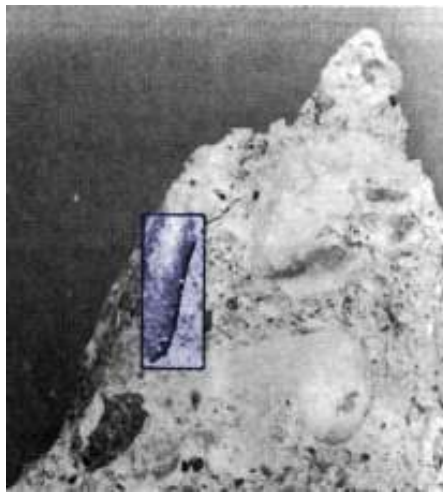
ساختار فاز سنگدانه

ترکیب و خواص سنگدانه های مختلف بتن در بخشهای بعدی کاملاً توضیح داده شده است. در اینجا توضیح مختصری در خصوص عناصر مهم در ساختار سنگدانه ها که تأثیر عمده ای بر خواص بتن می گذارند، آورده شده است.

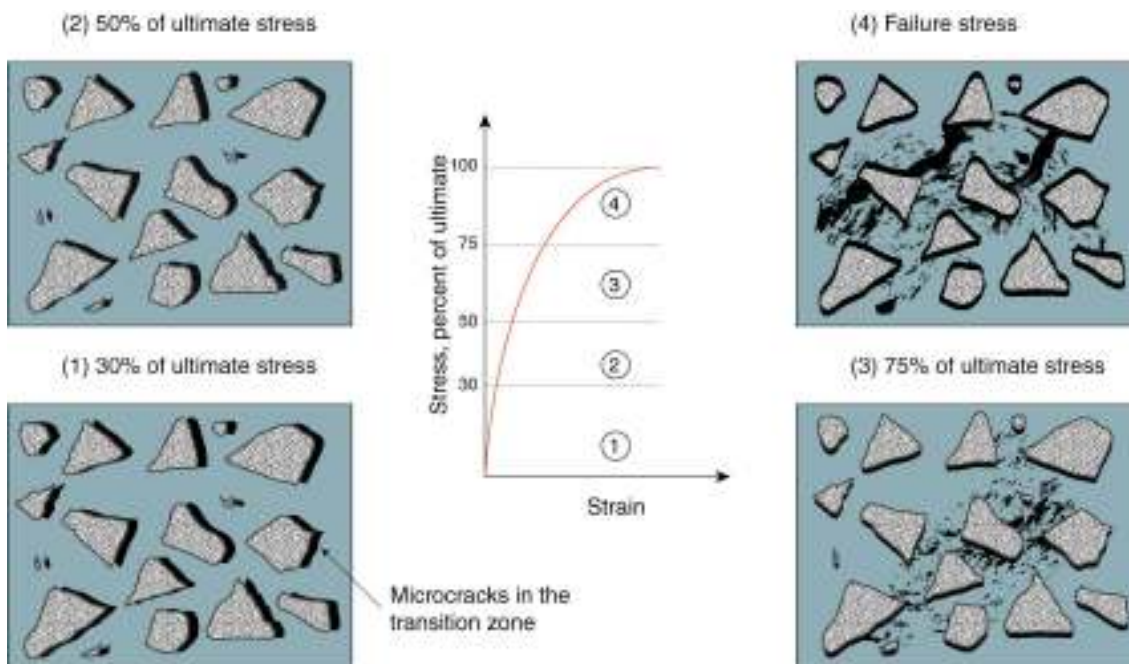
در واقع سنگدانه تعیین کننده وزن واحد حجم، مدول (الاستیسیته) و پایداری ابعادی بتن می باشد. این خواص بتن تا حدود زیادی بستگی به وزن مخصوص ظاهری و مقاومت سنگدانه ها دارد که آنهم به نوبه خود به خواص فیزیکی سنگدانه بیشتر از خواص شیمیایی آن وابسته است. بعبارت دیگر ترکیبات شیمیایی و کانیهای فاز جامد سنگدانه ها نسبت به مشخصات فیزیکی آنها نظیر حجم، اندازه و پخش حفرات در بتن از اهمیت کمتری برخوردارند.

علاوه بر تخلخل، شکل و بافت سنگدانه های درشت نیز در خواص بتن تأثیر دارند. به طور عموم شن های طبیعی دارای شکلی گرد گوشه و بافت سطحی صافی می باشند. در مقابل، سنگ شکسته دارای سطحی زبر و خشن بوده و بسته به نوع سنگ معدن و انتخاب نوع سنگ شکن، سنگدانه های شکسته شده ممکن است دارای مقادیر قابل ملاحظه ای ذرات مسطح یا دراز باشند که تأثیر نامناسبی بر روی بتن دارند. سنگدانه های سبک، سنگهایی متخلخل، اغلب حفره ای و زاویه دار و دارای بافت سطحی خشن می باشند لیکن انواعی که از سنگهای شیل یا رس منبسط شده به دست آمده باشند اغلب دارای سطحی صاف و گرد گوشه هستند. سنگدانه، با برخورداری از مقاومتی بالا در مقابل دو فاز دیگر بتن، اثر مستقیمی بر روی مقاومت بتن نخواهد داشت مگر پاره ای از سنگدانه های ضعیف و متخلخل نظیر پومیسها که می توانند در مقاومت مؤثر باشند. اندازه و شکل

سنگدانه های درشت بهر حال به طور غیرمستقیم در مقاومت بتن مؤثر هستند. وجود سنگدانه های با ابعاد بزرگتر و همچنین نسبت زیاد سنگدانه های مسطح و طویل در بتن باعث بوجود آوردن لایه نازک آب در فصل مشترک خمیر و سنگدانه شده و این لایه در ضعیف نمودن پیوستگی خمیر و سنگدانه (در ناحیه انتقال) بسیار مؤثر است. این پدیده تحت عنوان آب انداختگی داخلی شناخته می شود.



شکل شماتیک آب انداختگی در بتن تازه ریخته شده



شکست برشی یک نمونه بتنی تحت بار محوری، در محل پیوستگی سنگدانه و خمیرسیمان.

ساختار خمیر سیمان هیدراته شده

همانطور که قبلاً گفته شد سیمان هیدراته شده در این بخش عموماً به خمیر ساخته شده از سیمان پرتلند اشاره دارد. اگرچه ترکیبات و خواص سیمان پرتلند در بخشهای بعدی خواهد آمد، لیکن قبل از اینکه وارد فعل و انفعالات شیمیایی و ترکیبات حاصل از هیدراتاسیون سیمان و آب بشویم خلاصه ای از ترکیبات سیمان در این قسمت آورده می شود.

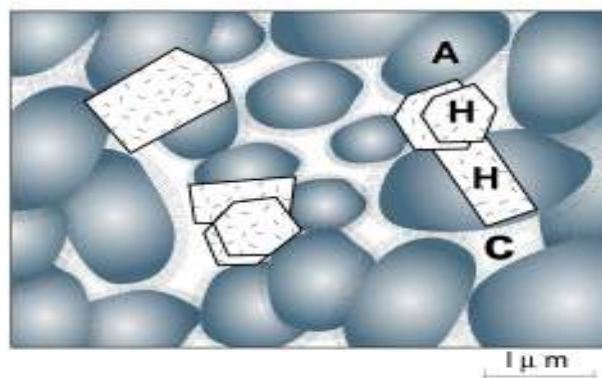
سیمان پرتلند غیرهیدراته پودر خاکستری رنگی است که از ذرات زاویه داری و در اندازه های بین ۵۰ تا ۵ میکرون تشکیل شده است. سیمان از آسیاب نمودن کلینکر با مقدار کمی سولفات کلسیم به دست می آید. کلینکر مخلوط غیرهمگنی از چندین کانی است که در دمای بالا بر اثر فعل و انفعالات اکسید کلسیم و اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم و آهن تولید می گردد. ترکیبات اصلی کلینکر سیمان شامل C_4AF, C_3A, C_2S, C_3S می باشد که در سیمان پرتلند معمولی مقادیر این ترکیبات بترتیب بین ۴۵ تا ۶۰، ۱۵ تا ۳۰، ۶ تا ۱۲ و ۸ تا ۱۶ درصد تغییر می کند (برای اختصار در فرمولهای شیمیایی، از نمادهای $H = H_2O$ و $S = SO_3, F = Fe_2O_3, A = Al_2O_3, S = SiO_2, C = CaO$ استفاده می کنیم).

هنگامی که پودر سیمان در آب ریخته می شود، سولفات کلسیم و ترکیبات دمای بالای کلسیم تمایل به حل شدن پیدا کرده و مایع جدید، سریعاً از ذرات یونی مختلف اشباع می شود. در نتیجه تشکیل ترکیبات حاصل از کلسیم، سولفات، آلومینات و یونهای هیدروکسیل، چند دقیقه پس از هیدراتاسیون سیمان، ابتدا بلورهای سوزنی شکل سولفوآلومینات کلسیم هیدراته شده موسوم به اترینگایت ظاهر می گردند، پس از چند ساعت بلورهای بزرگ منشوری شکل هیدروکسید کلسیم و

بلورهای کوچک الیافی شکل سیلیکات کلسیم هیدراته شده فضاهای خالی خمیر را که قبلاً توسط آب و ذرات سیمان اشغال شده بود پر می کنند. بعد از چند روز بسته به میزان نسبت اکسید آلومینیوم به سولفات سیمان پرتلند، اترینگایت ناپایدار شده و به مونوسولفات هیدراته شده، بشکل صفحات شش وجهی، در می آید. صفحات شش وجهی شکل همچنین متعلق به هیدروکسید کلسیم هیدراته شده می باشد که در خمیر هیدراته شده کم سولفات یا در سیمانهای با C_3A زیاد تشکیل می شود. محلول و سولفات کلسیم محلول، در تصویر نشان داده شده است. تصویر نیز الگویی از فازهای اصلی موجود در ریز ساختار خمیرسیمان کاملاً هیدراته شده را نشان میدهد.



تصویر میکروسکوپی الکترونی بلورهای شش وجهی
مونوسولفات هیدراته شده و سوزنی شکل اترینگایت،
حاصل از اختلاط محلولهای سولفات کلسیم و آلومینات
کلسیم



مدل خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده، در این شکل A مجموعه بلورهای ضعیف ذرات H_3C-S-H بلورهای شش وجهی ترکیباتی نظیر CH و C_4AH_{10} , C_4A,SH_{18} و بالاخره C نشان دهنده فضاهای مویینه خالی در خمیر سیمان است.

با توجه به مدل خمیرسیمان هیدراته شده نشان داده شده در شکل دیده می شود که فازهای مختلف بوجود آمده، از نظر اندازه و شکل همگن نمی باشند و همچنین پخش آنها در خمیر همگن نیست. در خمیر سخت شده این ناهمگن بودن تأثیرات قابل ملاحظه ای بر روی مقاومت و خواص وابسته مکانیکی خمیر می گذارد زیرا چنین خواصی اغلب وابسته به تمامی بخشهای ماده و نه به متوسط خواص آن هستند. بنابراین گرچه ریزساختار خمیرسیمان نتیجه واکنشهای شیمیایی سیمان در آب می باشد لیکن باید به خواص رئولوژی خمیرسیمان تازه مخلوط شده که در ریز ساختار آن مؤثر خواهد بود نیز، توجه داشت. به عنوان مثال ذرات هیدراته نشده سیمان تمایل به جذب یکدیگر و تشکیل کلوخه داشته که این امر باعث بدام انداختن مقادیر زیادی از آب اختلاط می گردد. واضح است که تغییرات موضعی نسبت آب به سیمان منبع اولیه ایجاد ناهمگنی در حفرات خمیر می باشد. در خمیرهای دارای مقادیر کلوخه زیاد نه تنها اندازه و شکل حفرات بلکه محصولات کریستالی ناشی از واکنشهای هیدراتاسیون نیز نسبت به حالتی که سیمان کاملاً یکنواخت در محلول پخش شود، با هم متفاوت می باشند.

ارتباط ساختار در خمیرسیمان هیدراته شده

خواص مهندسی مهم بتن سخت شده یعنی مقاومت، پایداری ابعادی و دوام، تحت تأثیرخواص خمیر هیدراته شده که آنها تحت تأثیر ساختار خمیر (نوع، مقدار و توزیع قسمت جامد و فضاهای خالی) است، قرار دارد. ارتباط ساختار- خواص خمیر هیدراته شده در زیر به طور مختصر آورده شده است.

مقاومت

بایستی متذکر شد که عامل اصلی مقاومت در بخش جامد خمیرسیمان هیدراته شده وجود نیروهای واندروالسی است. چسبندگی بین سطوح دو قسمت جامد، به این نیروهای جذبی فیزیکی نسبت داده می شود. درجه چسبندگی، به طبیعت و گسترش این سطوح وابسته است. بلورهای کوچک C-S-H، سولفات آلومینات کلسیم هیدراته شده و آلومینات کلسیم هیدراته شده شش وجهی دارای سطح جانبی زیاد و در نتیجه قابلیت چسبندگی قابل ملاحظه ای می باشند. این ترکیبات سیمان پرتلند نه تنها تمایل شدیدی به چسبیدن به یکدیگر دارند بلکه به محصولات هیدراتاسیون با سطح جانبی کمتر یعنی هیدروکسید کلسیم، دانه های کلینکر غیر هیدراته و نیز دانه های ریز و درشت شن و ماسه نیز می چسبند.

اکنون کاملاً روشن است که در یک ماده ارتباط معکوسی بین مقاومت و تخلخل وجود دارد. اساس مقاومت روی بخش صلب و تو پر بوده و بنابراین فضاهای خالی اثر قابل ملاحظه ای بر آن دارند. در خمیرسیمان هیدراته شده، فضای بین لایه ها در ساختار C-S-H و حفرات ریزی که در حوزه تأثیر نیروهای جاذبه و واندروالسی قرار دارند در مقاومت اثر بالایی ندارند. علت این امر آن است که تمرکز تنش و گسیختگی ناشی از آن بر اثر اعمال بار از حفرات بزرگ مویینه و ترکهایی که در خمیر وجود دارد آغاز می گردد.

همانطور که بیان شد حجم فضاهای مویینه در خمیر هیدراته شده به میزان آب اختلاط با سیمان در ابتدای واکنش و درجه هیدراتاسیون سیمان بستگی دارد. هنگامی که خمیر گیرش پیدا می کند، حجم ثابتی که تقریباً برابر با حجم سیمان بعلاوه آب است را اشغال می کند. فرض کنید ۱ سانتیمتر

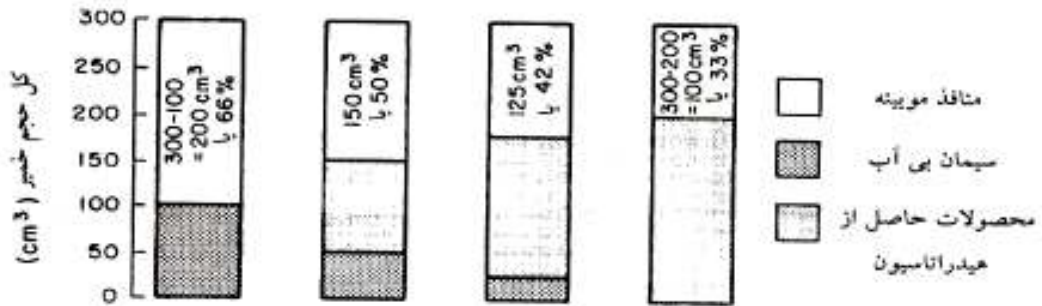
مکعب سیمان حدود ۲ سانتیمتر مکعب مواد هیدراته تولید کند. پاورز در اینجا محاسبات ساده ای را برای نشان دادن تغییرات تخلخل موینگی برحسب تغییرات هیدراتاسیون خمیر با نسبت آب به سیمانهای مختلف انجام می دهد.

براساس کار او، در شکل نمایش پیشرفت هیدراتاسیون یا آگیری و کاهش تخلخل موینگی در دو حالت افزایش درجه هیدراتاسیون (حالت الف) یا آورده شده است. از آنجا که نسبت آب به سیمان اغلب به صورت وزنی مشخص می گردد، لذا برای محاسبه حجم آب و فضای کل، که برابر با جمع احجام آب و سیمان می باشد، لازم است که مقدار چگالی نسبی سیمان پرتلند (که تقریباً برابر با ۳/۱۴ است) را بدانیم.

در حالت الف، خمیری با نسبت آب به سیمان ۰/۶۳ و شامل ۱۰۰ سانتیمتر مکعب سیمان نیاز به ۲۰۰ سانتیمتر مکعب آب دارد که در مجموع ۳۰۰ سانتیمتر مکعب حجم خمیر یا کل فضای در دسترس را تشکیل می دهد. درجه هیدراتاسیون سیمان به شرایط عمل آوری (مدت زمان هیدراتاسیون، دما و رطوبت) بستگی دارد. فرض می شود که تحت شرایط استاندارد عمل آوری ASTM، حجم سیمان هیدراته شده در سنین ۷ و ۲۸ و ۳۶۵ روز بترتیب ۵۰ و ۷۵ و ۱۰۰ درصد و حجم جامد محاسبه شده (سیمان غیرهیدراته بعلاوه محصولات هیدراتاسیون) به ترتیب برابر با ۱۵۰ و ۱۷۵ و ۲۰۰ سانتیمتر مکعب می باشد. حجم فضاهای موینه از اختلاف بین کل فضای در دسترس و کل حجم جامد قابل محاسبه است. این حجم در سنین ۷ و ۲۸ و ۳۶۵ روز از هیدراتاسیون، برابر با ۵۰ و ۴۲ و ۳۳ درصد به دست می آید.

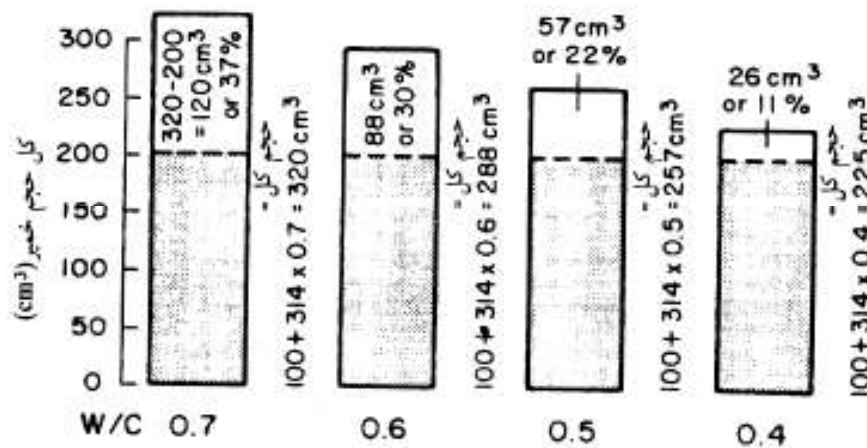
در حالت ب، درجه هیدراتاسیون ۱۰۰ درصد برای ۴ نوع خمیر، با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۶، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۴ فرض می‌شود. برای حجم سیمان داده شده، خمیر دارای بالاترین مقدار آب، بزرگترین حجم کل قابل دسترس را دارا است. بهر حال بعد از هیدراتاسیون کامل تمام خمیرها مقدار یکسانی از محصولات هیدراتاسیون را دارا هستند. لذا خمیر دارای بزرگترین فضای کل سرانجام بزرگترین حجم فضاهای مویینه را خواهد داشت. ۱۰۰ سانتیمتر مکعب سیمان در هیدراتاسیون کامل، ۲۰۰ سانتیمتر مکعب محصولات واکنش در هریک از حالتها خواهد داشت. با این وجود، از آنجا که کل فضا در خمیرهای با نسبت آب به سیمانهای ۰/۷، ۰/۶، ۰/۵، ۰/۴ به ترتیب برابر با ۲۸۸، ۲۵۷، ۲۲۵، ۳۲۰ سانتیمتر مکعب بوده است، لذا فضای مویینه محاسبه شده ۲۲، ۳۰، ۳۷ و ۱۱ درصد خواهد شد. براساس مفروضات فوق خمیر با نسبت آب به سیمان ۰/۳۲ در صورت هیدراتاسیون کامل، تخلخل مویینگی صفر خواهد داشت.

برای ملاتهای با سیمان پرتلند هیدراته شده معمول، پاورز نشان داده است که تابع نمایی بشکل $S = KX^3$ بین مقاومت فشاری (S) و نسبت جامی به فضای خالی (X) که در آن K مقدار ثابت و برابر 235MPa است، برقرار است. با فرض درجات هیدراتاسیون مختلف مثلاً ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد می‌توان تأثیر افزایش نسبت آب به سیمان را ابتدا بر روی تخلخل و سپس بر روی مقاومت براساس فرمول پاورز محاسبه نمود. نتایج به صورت منحنی شکل رسم شده اند.



تعداد روزهای هیدراته شده	درجه هیدراتاسیون	7 روز	28 روز	یک ساله
هیچ	0%	50%	75%	100%

حالت الف: ۱۰۰ سانتیمتر مکعب سیمان، $W/C = 0.63$ (ثابت)، درجات مختلف هیدراتاسیون



حالت ب: ۱۰۰ سانتیمتر مکعب سیمان، ۱۰۰ درصد هیدراتاسیون، مقادیر متغیر W/C

شکل ۱-۲- تغییرات تخلخل مویینه با تغییرات نسبت آب به سیمان و درجه هیدراتاسیون

ناحیه انتقال در بتن

اهمیت ناحیه انتقال

آیا هرگز فکر کرده اید که چرا:

۱- بتن در کشش شکننده و در فشار نسبتاً مقاوم است؟

- ۲- اجزای بتن زمانی که جداگانه آزمایش می شوند در فشار تک محوری تا مرحله شکست ،
ارتجاعی باقی می مانند در صورتی که خود بتن رفتاری غیر ارتجاعی دارد؟
- ۳- مقاومت فشاری بتن در حدود ۱۰ برابر مقاومت کششی آن است ؟
- ۴- با مقادیر مشخص سیمان و نسبت آب به سیمان و سن هیدراتاسیون، ملات سیمان همواره
قویتر از بتن آن است؟ همچنین مقاومت بتن با افزایش اندازه سنگدانه های درشت کاهش می یابد.
- ۵- تراوایی بتن دارای سنگدانه های حتی بسیار متراکم، به مراتب بیشتر از تراوایی ملات سیمان
نظیر آن است؟

- ۶- در مجاورت آتش، مدول ارتجاعی بتن بسیار سریعتر از مقاومت فشاری آن کاهش می یابد؟
پاسخ به سئوالات فوق و بسیاری از سئوالات دیگر در خصوص خواص بتن، به ناحیه انتقال یا
منطقه گذرای بتن یعنی ناحیه خمیرسیمان و سنگدانه های درشت برمیگردد. اگر چه این ناحیه
ترکیباتی شبیه خمیرسیمان هیدراته شده دارد، لیکن ساختار و خواص ناحیه انتقال با خواص توده
خمیر متفاوت است. بنابراین بهتر است که این ناحیه، به عنوان فاز جداگانه ای از ساختار بتن مورد
مطالعه قرار گیرد .

ساختار ناحیه انتقال (منطقه گذرا)

به علت مشکلات انجام آزمایشها، اطلاعات در خصوص ناحیه انتقال بتن نسبتاً کم است. به هر حال
براساس توصیف عنوان شده توسط مازو (maso) ، مفاهیم مشخصات ساختاری این ناحیه را می
توان با مطالعه توالی تغییرات آن از زمانی که بتن ریخته می شود به دست آورد .

ابتدا پس از تراکم بتن تازه فیلم نازکی از آب اطراف سنگدانه های درشت تشکیل می شود. این مسأله می تواند به علت بالا بودن نسبت آب به سیمان در مجاورت سنگدانه های درشت در مقایسه با سایر قسمت های خمیر باشد. سپس در قسمت توده ای خمیر، یون های کلسیم، هیدروکسیل و آلومینات که از حل سولفات کلسیم و آلومینات کلسیم به دست آمده اند، با یکدیگر ترکیب شده تا تولید اترینگایت و هیدروکسید کلسیم بنمایند. به علت زیاد بودن نسبت آب به سیمان در مجاورت سنگدانه های درشت این بلورها در این محل اغلب شامل بلورهای درشت بوده و لذا ساختاری متخلخل تر از بلورهای بخش خمیری سیمان یا ملات دارند. هیدروکسید کلسیم صفحه ای شکل به صورت بلورهایی در جهتی تقریباً عمود بر سطح سنگدانه در این ناحیه قرار می گیرد. بالاخره با پیشرفت هیدراتاسیون، C-S-H کمتر بلورین، و نسل دومی از بلورهای کوچک اترینگایت و هیدروکسید کلسیم شروع به پر نمودن فضای موجود بین شبکه ایجاد شده توسط بلورهای بزرگ اترینگایت و هیدروکسید کلسیم می کنند. این امر به متراکم شدن و مقاومت ناحیه انتقال کمک می نماید.

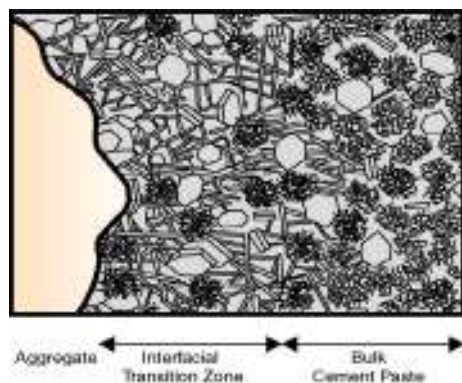
شکل شماتیک و تصویر میکروسکوپ الکترونی ناحیه انتقال در بتن شکل نشان داده شده است.



نمایش شماتیک ناحیه انتقال و بخش توده ای خمیر سیمان در بتن.

تصویر میکروسکوپ الکترونی

بلورهای هیدروکسید کلسیم در ناحیه انتقال .



مقاومت ناحیه انتقال

همانند خمیرسیمان هیدراته شده علت چسبندگی مواد حاصل از هیدراتاسیون و ذرات سنگدانه ها نیز نیروهای جاذبه واندروالسی است . لذا مقاومت ناحیه انتقال در هر نقطه به حجم و اندازه فضاهای موجود در آن بستگی دارد . حتی در بتن با نسبت کم آب به سیمان، در اوایل هیدراتاسیون و سنین کم، حجم و اندازه فضاهای خالی در ناحیه انتقال بزرگتر از موارد مشابه در ملات است و در نتیجه مقاومت ضعیفتری در این ناحیه مشاهده می گردد. (شکل) بهرحال با افزایش سن بتن ممکن است مقاومت ناحیه انتقال برابر یا حتی بیش از مقاومت قسمت توده ملات گردد. این مسأله ممکن است به علت کریستاله شدن محصولات جدید در فضاهای خالی ناحیه انتقال تحت واکنشهای شیمیایی بین خمیر و سیمان و سنگدانه باشد که می تواند منجر به تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته شده در صورت وجود سنگدانه های سیلیسی ، و یا تشکیل کربوآلومینات هیدراته شده در صورت وجود سنگ آهک گردد. این ترکیبات سبب افزایش مقاومت میگردد. زیرا سبب کم شدن میزان هیدروکسید کلسیم در ناحیه انتقال می شوند. بلورهای بزرگ هیدروکسید کلسیم ظرفیت چسبندگی کمتری دارند که این موضوع، نه تنها به علت سطح جانبی کمتر و در نتیجه نیروهای واندروالسی ضعیف تر است بلکه به دلیل ساختار جهت دار آنها، به صورت نواحی مستعد شکافت رفتار می کنند.

علاوه بر وجود فضاهای موئینه بزرگ و بلورهای هیدروکسید کلسیم جهت دار در ناحیه انتقال ، عامل اصلی مقاومت کم این ناحیه همانا وجود ترکهای ریز است. میزان ترکهای ریز به عواملی چون اندازه و دانه بندی سنگدانه ها، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، درجه تراکم بتن تازه،

شرایط عمل آوری، رطوبت نسبی محیط و تاریخچه حرارتی بتن بستگی دارد. به عنوان مثال یک مخلوط بتنی دارای دانه بندی نامناسب تمایل به جدایی ذرات در هنگام تراکم داشته و در نتیجه فیلم ضخیمی از آب در اطراف دانه های درشت و بخصوص در زیر آن تشکیل می گردد. تحت شرایط یکسان، اندازه بزرگتر سنگدانه سبب ضخیم تر شدن فیلم آب می گردد. در چنین شرایطی، ناحیه انتقال تشکیل شده حساسیت زیادی نسبت به ترک خوردن تحت اثر تنشهای کششی بوجود آمده از تغییر مکانهای نسبی بین سنگدانه و خمیرسیمان پیدا می کند. چنین تغییر مکانهایی اغلب از خشک یا سرد شدن بتن ناشی می شود. بعبارت دیگر بتن حتی قبل از اینکه تحت بار قرار گیرد ترکهای ریزی در ناحیه انتقال خواهد داشت. بدیهی است که بر اثر بارهای ضربه ای کوتاه مدت، جمع شدگی ناشی از خشک شدن، و بارهای ثابت در تنشهای بالا، اندازه و تعداد ترکهای ریز افزایش خواهد یافت.

تأثیر ناحیه انتقال بر روی خواص بتن

ناحیه انتقال که در حقیقت ضعیفترین حلقه در زنجیر بتن است عامل محدود کننده مقاومت بتن می باشد. به همین دلیل، بر اثر وجود ناحیه انتقال، بتن تحت تنشی شکسته می شود که این تنش، به مراتب کمتر از مقاومت هر یک از دو جزء تشکیل دهنده آن است. از آنجا که برای گسترش ترکهای موجود در ناحیه انتقال، مقدار انرژی زیادی مورد نیاز نیست و حتی در ۴۰ تا ۷۰ درصد مقاومت نهایی این کار عملی است، لذا مقدار کرنش افزایشی زیادی برای واحد تنش اعمال شده به دست می آید. این موضوع این پدیده را توجیه می کند که اجزای بتن (سنگدانه و خمیرسیمان یا

ملات) معمولاً تا حد گسیختگی، رفتاری ارتجاعی در آزمایش فشار تک محوری دارند، ولی بتن خود رفتاری غیر ارتجاعی را نشان می دهد.

در مقادیر تنش بیش از ۷۰ درصد مقاومت نهایی، تمرکز تنش در حفرات بزرگ ملات به اندازه ای بزرگ می شوند که ترکهایی جدید را ایجاد می کنند. با افزایش تنش، ترکهای داخل خمیر گسترش یافته و به ترکهای ایجاد شده در ناحیه انتقال می پیوندند. آنگاه سیستم ترک خوردگی، پیوسته شده و ماده شکست می خورد. انرژی قابل ملاحظه ای برای گسترش ترکها سریعتر و تحت تنشی بسیار پایین تر صورت می پذیرد. به همین دلیل بتن در حالت شکنندگی تحت بارهای کششی گسیخته می شود در حالی که در فشار طاقت بیشتری دارد. همچنین به همین دلیل است که مقاومت کششی بتن بمراتب پایینتر از مقاومت فشاری آن است.

ساختار ناحیه انتقال، بخصوص حجم حفرات و ترکهای ریز موجود در آن تأثیر عمده ای بر سختی و مدول ارتجاعی بتن دارند. در یک ماده مرکب، ناحیه انتقال همچون پلی بین دو جزء یعنی بخش خمیرملات و دانه های درشت عمل می کند. حتی اگر هر جز دارای سختی بالایی باشد سختی ماده مرکب ممکن است به علت وجود پلهای شکسته (حفرات و ترکهای ریز در ناحیه انتقال) که تنش را انتقال نمی دهد، پایین باشد. به علت وجود ترکهای ریز در بتن، اگر بتن در معرض آتش قرار گیرد، مدول ارتجاعی آن سریعتر از مقاومت فشاری اش کاهش می یابد. مشخصه های ناحیه انتقال همچنین در دوام بتن مؤثرند. اعضای بتن مسلح و پیش تنیده اغلب به علت خوردگی و زنگ آرماتور گسیخته می شوند. میزان پیشرفت خوردگی بسیار به تراوایی بتن وابسته است. وجود ترکهای ریز در ناحیه انتقال در فصل مشترک فولاد و دانه های درشت، دلیل اولیه نفوذپذیرتر بودن

بتن از ملات یا خمیر نظیر است. بایستی توجه داشت که برای خوردگی فولاد در بتن هوا و آب نیز دو عامل شروع کننده و مورد نیاز هستند .

تأثیر نسبت آب به سیمان بر تراوایی و مقاومت بتن به ارتباط موجود بین نسبت آب به سیمان و تخلخل خمیر هیدراته شده بتن نسبت داده می شود. مطالب عنوان شده قبلی در مورد تأثیر ساختار و خواص ناحیه انتقال بر روی بتن خاطر نشان می سازد که در واقع بهتر است به تأثیر نسبت آب به سیمان بر روی کل بتن نیز اندیشید. دلیل این امر آن است که بسته به مشخصات سنگدانه ها، نظیر حداکثر اندازه و دانه بندی آنها، ممکن است تفاوت عمده ای بین نسبت آب به سیمان خمیر ملات و ناحیه انتقال موجود باشد. به طور کلی تحت شرایط یکسان هرچه سنگدانه بزرگتر باشد و نسبت آب به سیمان موضعی در ناحیه انتقال بیشتر باشد، بتن ضعیفتر و نفوذپذیرتر خواهد بود .

مواد افزودنی بتن

مواد افزودنی موادی به غیر از سیمان پرتلند ، آب ، سنگدانه ها و الیاف هستند که اندازه که اندکی پیش از اختلاط یا در خلال اختلاط به مخلوط بتن افزوده می شوند. مواد افزودنی برحسب نوع عملکرد خود می توانند به قرار زیر دسته بندی شوند :

۱- مواد افزودنی حباب هواساز

۲- مواد افزودنی کاهنده آب

۳- مواد افزودنی کندگیر کننده

۴- مواد افزودنی تسریع کننده

۵- مواد افزودنی روان کننده

۶- مواد افزودنی معدنی بسیار ریز شده

۷- مواد افزودنی متفرقه ، مانند مواد افزودنی کارآیی بخش، پیوند زاء، عایق رطوبت ، کاهنده

تراوایی، دوغاب ساز، کف ساز، رنگ زاء، باز دارنده خوردگی ، و آسان کننده پمپاژ .



بتن باید کارا، پرداخت پذیر ، قوی ، بادوام ، آب بند و مقاوم در برابر سایش باشد. با انتخاب

مصالح مناسب غالباً می توان این ویژگیها را به آسانی و صرفه جویانه به دست آورد، بدون آنکه

نیازی به مواد افزودنی باشد(جز مواقعی که مواد افزودنی هواساز مورد نیاز باشند) .

دلایل اصلی استفاده از مواد افزودنی عبارت اند از :

۱- کاهش قیمت ساخت و اجرای بتن

۲- دستیابی به برخی خواص که رسیدن به آنها به کمک مواد افزودنی کارآمدتر و مؤثرتر از هر

دو روش دیگری است.

۳- برای اطمینان از کیفیت بتن در هنگام مراحل اختلاط ، حمل ، ریختن و عمل آوردن در

شرایط آب و هوایی مناسب.

۴- برای غلبه بر برخی پیشامدهای ناگهانی در حین عملیات بتن ریزی .

علیرغم این موارد ، تأکید این نکته ضروری است که هیچ ماده افزودنی از هر نوع و هر مقداری که باشد، نباید به عنوان جانشینی برای اجرای خوب بتن تلقی شود.

میزان تأثیر مواد افزودنی، به عواملی از جمله نوع، جنس و مقدار سیمان، مقدار آب ، شکل ، دانه بندی و نسبت ترکیب سنگدانه ، زمان اختلاط، اسلامپ و دمای هوا و بتن بستگی دارد .

مواد افزودنی که برای مصرف در بتن در نظر گرفته می شوند باید با مشخصات فنی مورد استفاده نظیر آنچه که در جدول درج شده است مطابقت و همخوانی داشته باشند. مخلوط های آزمایشی باید با مواد افزودنی و مصالح کارگاهی و در دماها و رطوبتهای محیطی مورد انتظار در کارگاه ساخته شوند . به این ترتیب می توان سازگاری ماده افزودنی با مواد افزودنی دیگر و مصالح کارگاهی و همچنین آثار ماده افزودنی روی خواص بتن تازه و سخت شده را مشاهده کرد و مورد بررسی قرار داد. مقدار ماده افزودنی که توسط تولید کننده توصیه شده یا مقدار بهینه ای که با بررسیهای آزمایشگاهی تعیین شده است باید مورد استفاده قرار گیرد. مواد افزودنی مایع، در مراکز ساخت بتن با کمک مخازن توزیع کننده خودکار به مخلوط اضافه می شوند. نمونه ای از این مخازن توزیع کننده خودکار را در شکل ۱۶ مشاهده می کنید.

هر چند که ماده افزودنی ممکن است بتنی با خواص موردنظر و مطلوب را تولید کند ، ولی غالباً می توان با تغییر در نسبتهای اختلاط یا با انتخاب مواد دیگر بتن به روشی صرفه جویانه تر به همان نتایج دست یافت. در صورت امکان باید بین هزینه های ناشی از تغییر در مخلوط بتن اصلی و هزینه های اضافی حاصل از به کار بردن ماده افزودنی مقایسه ای انجام شود. برآورد هزینه های اضافی مواد افزودنی باید علاوه بر هزینه ماده افزودنی ، شامل هرگونه اثری باشد که استفاده از

ماده افزودنی روی هزینه های حمل، ریختن، پرداخت کردن، عمل آوردن و مراقبت کردن از بتن خواهد داشت.

مواد افزودنی هوازا

مواد افزودنی هوازا به منظور ایجاد عمدی حبابهای میکروسکوپیکی هوا در بتن به کار می روند. هوازایی، دوام بتنی را که در حین یخ زدن و آب شدن در معرض رطوبت قرار دارد، به نحو چشمگیری بهبود می بخشد. حبابهای ایجاد شده هوا، مقاومت بتن در برابر پوسته شدگی ناشی از یخ زدهای شیمیایی را بسیار بالا می برد. کارایی بتن تازه به نحو چشمگیری بهبود می یابد، و جدا شدگی و آب انداختگی آن کاهش می یابد یا کلاً حذف می شود.

بتن هوازایی شده دارای حبابهای هوای بسیار ریزی است که بطور یکنواخت در داخل خمیرسیمان پخش شده اند. حباب های هوا در بتن می توانند با استفاده از سیمان هوازا، به کمک یک ماده افزودنی هوازا، یا از طریق ترکیبی از هر دو روش تولید شوند. سیمان هوازا، عبارت است از سیمان پرتلندی که یک ماده مضاف هوازا در مراحل تولید همراه با کلینکر آن آسیاب شده باشد. از سوی دیگر، یک ماده افزودنی هوازا قبل از اختلاط یا در حین اختلاط مستقیماً به مصالح بتن اضافه می شود. مشخصات فنی و روشهای آزمایش کردن مواد افزودنی هوازا در ASTM C260 و ASTM C233 داده شده اند.

مواد افزودنی کاهنده آب

مواد افزودنی کاهنده آب برای کاهش مقدار آب اختلاط مورد نیاز برای تولید بتنی با اسلامپ مشخص، به منظور کاهش نسبت آب به سیمان یا به منظور افزایش اسلامپ مصرف می شوند.

کاهنده های متعارف آب ، مقدار آب را تقریباً ۵ تا ۱۰ درصد کاهش می دهند. کاهنده های ممتاز آب مقدار آب را بین ۱۲ تا ۳۰ درصد کاهش می دهند (به "فوق روان کننده ها" مراجعه شود). افزودن ماده افزودنی کاهنده آب به یک مخلوط ، چنانچه از مقدار آب اختلاط آن کاسته نشود ، می تواند مخلوطی با اسلامپ بسیار بالا تولید کند. با همه این ها، میزان افت اسلامپ کاهش نمی یابد و در بسیاری موارد ممکن است افزایش یابد. افت اسلامپ سریع منجر به کاهش کارایی و زمان کمتر برای بتن ریزی می شود.

به طور کلی ، استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب ، چنانچه نسبت آب به سیمان کاهش یابد با افزایش مقاومت توأم است. مواد افزودنی کاهنده آب ، علیرغم کاهش در مقدار آب، ممکن است باعث افزایش چشمگیری در جمع شدگی ناشی از خشک شدن شوند . بهره گیری از کاهنده آب به منظور کاهش مقدار سیمان و آب ، در حالیکه نسبت آب به سیمان ثابت نگه داشته شود، می تواند به مقاومت فشاری یکسان یا کاهش یافته منجر شود و نیز ممکن است افت اسلامپ را دو برابر یا بیشتر کند .

میزان تأثیر کاهنده های آب بر بتن ، تابعی از ترکیب شیمیایی آنها، دمای بتن ، ترکیب شیمیایی و ریزی سیمان، مقدار سیمان و وجود سایر مواد افزودنی است. برخی از کاهنده های آب در مخلوط های کم سیمان و با سیمانهای با قلیایی کم یا مقدار تری کلسیم آلومینات پایین ، کارآمدترند .

مواد افزودنی کندگیر کننده

مواد افزودنی کندگیر کننده برای کند کردن میزان گیرش بتن به کار گرفته می شوند. دماهای بالای بتن تازه ($29^{\circ}C$ تا $32^{\circ}C$) غالباً علت افزایش میزان سخت شدن بتن به شمار می آیند که عملیات

بتن ریزی و پرداخت را با مشکل مواجه می کنند. یکی از عملی ترین روشهای مقابله کردن با این اثر ، کاهش دمای بتن با استفاده از خنک کردن آب اختلاط یاسنگدانه هاست. کندگیر کننده ها دمای اولیه بتن را کاهش نمی دهند .

کندگیر کننده ها گاهی به منظور : (۱) جبران اثر تسریع کنندگی هوای گرم روی گیرش بتن : (۲) ایجاد تأخیر در گیرش اولیه بتن یا دوغاب، وقتی شرایط دشوار یا نامعمول در بتن ریزی رخ دهد، مانند بتن ریزی در شالوده ها و پایه های بزرگ پلها، سیمانکاری چاه های نفت پمپ کردن دوغاب یا بتن در مسافتهای طولانی ، یا (۳) ایجاد تأخیر در گیرش برای انجام عملیات خاص پرداخت کردن مانند پرداخت سطح با سنگدانه نمایان، مورد استفاده قرار می گیرند .

مواد افزودنی تسریع کننده

ماده افزودنی تسریع کنند ، به منظور تسریع در کسب مقاومت بتن در سنین اولیه ، به کار می رود. کسب مقاومت بتن می تواند با : (۱) استفاده از سیمان پرتلند نوع III با مقاومت اولیه بالا : (۲) کاهش نسبت آب به سیمان از طریق افزایش ۶۰ تا ۱۲۰ کیلوگرم سیمان اضافی در مترمکعب بتن : یا (۳) عمل آوردن بتن در دماهای بالاتر ، نیز تسریع شود .

کلسیم کلرید ($CaCl_2$) متداولترین ماده ای است که در مواد افزودنی تسریع کننده به کار می رود.

این ماده باید با ضوابط ASTM D98 همخوانی داشته باشد و باید بر طبق ASTM D345

نمونه گیری و آزمایش شود. کاربرد فراگیر مواد افزودنی تسریع کننده کلسیم کلریدی، اطلاعات و

تجربیات بسیاری را درباره اثر آنها روی خواص بتن فراهم ساخته است. کلسیم کلرید در کنار

تسریع رشد مقاومت بتن ، باعث افزایش در جمع شدگی ناشی از خشک شدن ، افزایش پتانسیل خوردگی آرماتور و تغییر رنگ (بتن تیره تر) می شود.

کلسیم کلرید ماده ای ضد یخ نیست. وقتی این ماده در کمیت های مجاز به کار برده شود، نقطه انجماد بتن را بیشتر از چند درجه کاهش نخواهد داد. تحت هیچ شرایطی نباید سعی شود محافظت بتن در برابر یخ زدن، با این روش انجام گیرد، بلکه باید در هوای سرد، اقدامات و روشهای احتیاطی قابل اعتماد و اثبات شده، به کار گرفته شوند.

حداکثر مقدار یون کلرید برای محافظت بتن مسلح در برابر خوردگی ، پیشنهادی **ACI 318** ، در جدول ۲.۶ درج شده است . با افزایش ضخامت پوشش روی آرماتور های فولادی و کاهش نسبت آب به سیمان می توان مقاومت در مقابل خوردگی فولادهای کار گذاشته شده را بیش تر بهبود بخشید.

تسریع کننده های غیر کلریدی غیر خورنده ای یافت می شوند که می توان آن ها را در بتنی که به کار بردن زودگیر کننده های کلریدی در آن توصیه نمی شود ، مصرف کرد(جدول ۱.۶). با همه این احوال ، بسیاری از تسریع کننده های غیرکلریدی به اندازه کلرید کلسیم تاثیر ندارند و گران تر هم هستند.

فوق روان کننده ها(کاهنده های آب ممتاز)

فوق روان کننده ها، کاهنده های آب ممتازی اند که ضوابط **ASTM C1017** و ضوابط مربوط به نوع های **F و G** از **ASTM C494** را تامین می کنند و به بتن با اسلامپ و نسبت آب به سیمان پایین تا معمولی اضافه می شوند تا بتن روان با اسلامپ بالا تولید کنند. بتن روان ، بتن بسیار سیال

اما کارایی است که می تواند بدون لرزاندن یا متراکم کردن ، ویا با اندکی لرزاندن یا متراکم کردن در محل ریخته شود ودرعین حال فاقد آب انداختگی یا جداسدگی باشد. بتن روان در : (۱) بتن ریزی مقاطع نازک؛ (۲) در نواحی با آرماتور بندی فشرده به هم؛ (۳) در بتن ریزی با کیف ولوله (بتن ریزی زیر آب) ؛ (۴) در بتن پمپ شونده به منظور کاهش فشار پمپ ودرنتیجه افزایش ظرفیت ارتفاعی وفاصله ای پمپ ؛ (۵) در مناطقی که نمی توان از روش های معمول بتن ریزی استفاده کرد یا به کار بردن این روش ها غیر عملی باشد؛ و(۶) برای کاهش هزینه های مربوط به انتقال بتن،مصرف می شود. افزودن یک فوق روان کننده به بتنی با اسلامپ 75mm، به راحتی بتنی با اسلامپ ۲۲۵mm تولید می کند.بتن روان، مطابق تعریف ارائه شده در ASTM C1017، بتنی با اسلامپ بیش تر از ۱۹۰mm که هنوز خواص چسبندگی وانسجام خودراحفظ کرده باشد.اسلامپ های بسیار بالا ، حدود ۲۵۰mm یا بیش تر ممکن است موجب جداسدگی در بتن شوند.

جدول ۲,۶ حداکثر مقدار یون کلرید برای محافظت در برابر خوردگی .

نوع عضو	حداکثر یون کلرید محلول در آب (CL^-) در بتن ، برحسب درصد وزن سیمان
بتن پیش تنیده	٪۶
بتن مسلحی که در زمان بهره برداری در معرض کلرید قرار داشته باشد.	۰/۱۵
بتن مسلحی که در زمان بهره برداری خشک بوده یا در برابر رطوبت عایق شده باشد.	۱/۰۰
سایر ساختمانهای بتن مسلح	۰/۳۰

کاهنده های آب ممتاز (ASTM C1017 و انواع F و G از ASTM C494) را میتوان برای ساخت بتن مقاومت بالا با نسبت پایین آب به سیمان، با کارایی در محدوده های متعارف که برای متراکم کردن به کمک لرزاننده های داخلی مشخص شده اند، نیز به کار گرفت. با استفاده از این مواد افزودنی می توان به کاهش آبی معادل ۱۲ تا ۳۰ درصد یافت. کاهش نسبت آب به سیمان علاوه بر فراهم آوردن سایر خواص سودمند مرتب با بتن هایی با نسبت پایین آب به سیمان، می تواند به تولید بتن هایی با: (۱) مقاومت فشاری نهایی بیش تر از 70Mpa ؛ (۲) رشد مقاومت اولیه بالاتر؛ و (۳) نفوذ یون کلرید کم تر، منجر شود.

مواد افزودنی معدنی بسیار ریز

مواد افزودنی بسیار ریز مصالح پودر شده یا آسیاب شده ای اند که قبل از اختلاط یا در حین اختلاط به بتن افزوده می شوند، تا برخی از خواص خمیری یا سخت شده بتن سیمان پرتلندی را بهبود بخشند یا آن ها را تغییر دهند. این مواد افزودنی عموماً از مواد طبیعی یا مواد جنبی تولیدی، تشکیل شده اند (جدول ۳، ۶). این مواد افزودنی بسته به خواص شیمیایی یا فیزیکی شان به: (۱) مواد سیمانی؛ (۲) پوزولان ها؛ (۳) مواد سیمانی و پوزولانی؛ و (۴) مواد تقریباً بی اثر طبقه بندی می شوند.

مواد سیمانی

مواد سیمانی عبارت اند از موادی که به تنهایی از خواص سیمانی هیدرولیکی (گیرش و سخت شدن در حضور آب) برخوردارند. مواد سیمانی دربرگیرنده روبرگیرنده روبره آهن گذاری دان دان آسیاب شده، سیمان طبیعی، آهک هیدرولیکی هیدرات شده، و ترکیباتی از این مواد با مواد دیگر هستند.

جدول ۳,۶ مشخصات فنی و رده های مواد افزودنی معدنی بسیار ریز.

- آهک هیدرولیکی هیدرات شده - ASTM C141

- روباره های روباره های آهن گذاری دان دان آسیاب شده - ASTM C989

رده ۸۰

روباره های با شاخص واکنش پذیری پایین

رده ۱۰۰

روباره های با شاخص واکنش پذیری متوسط

رده ۱۲۰

روباره های با شاخص واکنش پذیری بالا

- خاکستر بادی و پوزولانهای طبیعی - ASTM C618

ردیف N

پوزولانهای طبیعی خام یا تکلیس شده ، شامل خاکهای دیاتومه

چرتهای اوپالین و شیل ها

توف ها و خاکسترهای آتشفشانی یا پومیس ها

برخی از رس ها و شیل های تکلیس شده

ردیف F

خاکستر بادی با خواص پوزولانی

ردیف C

خاکستر بادی با خواص سیمانی و پوزولانی

مواد پوزولانی

پوزولان ماده ای سیلیسی یا آلومینوسیلیسی است که به تنهایی ارزش سیمانی ندارد یا ارزش

ناچیزی دارد ، ولی به شکل ذرات بسیار ریز و درمجاورت آب با کلسیم هیدروکسید حاصل

از آبگیری سیمان پرتلند واکنش شیمیایی نشان می دهد، و ترکیباتی به وجود می آورد که دارای

خواص سیمانی اند.

شماره ای مصالح طبیعی مانند خاک دیاتومه ، چرت های اپالین ، رس ها، شیل ها، توف های

آتشفشانی، و پومیسیت ها را درحکم پوزولان ها به کار می برند. بسیاری از پوزولانهای طبیعی باید

پیش از مصرف آسیاب شوند و بسیاری دیگر برای فعال شدن اجزای رسی شان باید پیش از مصرف در دمای ۶۵۰ تا ۹۸۰ درجه سانتیگراد تکلیس شوند. این مواد تحت عنوان پوزولان های ردیف N در ASTM C618 طبقه بندی شده اند.

پوزولان ها، خاکستر بادی و دوده سیلیسی رانیز در بر می گیرند. خاکستر بادی که پرمصرف ترین ماده افزودنی معدنی در بتن به شمار می آید ، ذرات بسیار ریز باقی مانده (پودری شبیه به سیمان) حاصل از احتراق زغال سنگ پودر شده در نیروگاههای برق است.

دوده سیلیسی که به نام میکروسیلیس یا دوده سیلیسی متراکم شده نیز خوانده می شود، ماده دیگری است که به عنوان ماده افزودنی پوزولانی به کار گرفته می شود. این فرآورده پودری که به رنگ خاکستری روشن تاثیر یا به رنگ خاکستری سبز گون متمایل به آبی است، محصولی از عملیات احیای کوارتز خیلی ناخالص با زغال سنگ در یک کوره قوس الکتریکی در کارخانه های تولید آلیاژ سیلیس یا فروسیلیس است. دوده سیلیسی به شکل غباری اکسید شده از کوره با دمای ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد به هوا برمی خیزد. این غبار سرد، متراکم و در کیسه های پارچه ای بزرگ جمع آوری می شود. سپس عملیات فرآوری به منظور زدودن ناخالصی و کنترل ابعاد ذرات، بر روی دوده سیلیسی متراکم شده انجام می گیرد.

دوده سیلیسی بسیار ریز با ذراتی به قطر کوچکتر از $1\mu m$ و میانگین قطر ذرات حدود $0/1\mu m$ ، حدود ۱۰۰ بار کوچکتر از میانگین اندازه ذرات سیمان است. دوده سیلیسی متراکم شده دارای سطح جانبی حدود $20000m^2/kg$ (روش جذب نیتروژن) $10000m^2/kg$ است. سیمانهای نوع I و نوع III به ترتیب ، دارای سطح جانبی حدود $300m^2/kg$ تا $400m^2/kg$ و $500m^2/kg$ تا

$600m^2/kg$ (در مبنای بلین) هستند. چگالی دوده سیلیسی عموماً در محدوده $2/10$ تا $2/25$ قرار می گیرد ولی می تواند تا $2/55$ نیز باشد. سیمان پرتلند دارای چگالی حدود $3/15$ است. جرم حجمی انباشته (وزن مخصوص متراکم نشده) دوده سیلیسی حدود $256kg/m^3$ تا $304kg/m^3$ است

مواد پوزولانی و سیمانی

برخی روباره های آهن گذاری دان دان آسیاب شده و برخی از خاکستر بادی هم خواص پوزولانی و هم خواص پوزولانی و هم خواص سیمانی از خود نشان می دهند. مثلاً، خاکستر های بادی ردیف C از ASTM C618 با مقدار کلسیم اکسید تقریباً ۱۵ تا ۳۰ درصدوزنی، بارزترین نمونه در این گروه از مصالح هستند. بسیاری از این نوع خاکستر، وقتی در مجاورت آب قرار بگیرند، در کم تر از ۴۵ دقیقه هیدرات و سخت می شوند.

در سال های اخیر، استفاده از خاکستر بادی و روباره آهن گذاری دان دان آسیاب شده در مخلوط های بتن حاوی سیمان پرتلند در ایالت متحده گسترش و فزونی یافته است. یکی از دلایل عمده این افزایش مصرف، علاوه بر کاهش قیمت بتن در نتیجه جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر و روباره، مربوط به صرفه جویی در انرژی است.

مواد تقریباً بی اثر

مواد تقریباً بی اثر، خواص سیمانی یا پوزولانی ناچیزی دارند و یا اصلاً چنین خاصیتی ندارند. برخی مواد بی اثر، مواد خام آسیاب شده ای مانند کوارتز، دولومیت، بسیاری از سنگ آهک ها، ماربل، گرانیت، و مواد معدنی دیگرند. مصالح بی اثر غالباً علاوه بر سیمان، و به عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن به کار می روند تا کارایی ضعیفی را که اغلب ناشی از فقدان ذرات نرمه در ماسه است،

بهبود بخشند. سنگ آهک پودر شده گاهی به منظور کاهش واکنش قلیلی - سیلیسی به بتن هایی که حاوی ماسه و شن واکنش زا هستند، افزوده می شوند.

تعیین نسبت مخلوط های بتن معمولی

هدف از طرح مخلوط بتن، تعیین صرفه جویانه ترین و عملی ترین ترکیب مصالحی است که به آسانی در دسترس قرار دارند، تا بتنی تولید کنند که ضوابط عملکردی را تحت شرایط خاص کاری تأمین کند. برای دستیابی به این هدف، مخلوط بتنی که نسبت اجزای آن به نحو مناسبی تعیین شده باشند، باید از کیفیت های زیر برخوردار باشد:

۱. کارایی قابل قبول بتن تازه

۲. پایایی (دوام)، مقاومت، و ظاهر یکنواخت بتن سخت شده

۳. صرفه جویی

درک اصول اساسی طرح مخلوط به همان اندازه محاسبات واقعی طرح مخلوط دارای اهمیت است. تنها با انتخاب مناسب مصالح و مشخصه های مخلوط و تعیین مناسب نسبت اجزای مخلوط می توان در تولید بتن به کیفیت های یاد شده دست یافت.

انتخاب مشخصه های مخلوط

پیش از آنکه نسبت اجزای مخلوط بتن تعیین شوند، مشخصه های مخلوط براساس کاربرد مورد نظر بتن، شرایط محیطی، اندازه و شکل اعضا و خواص فیزیکی بتن (مانند مقاومت) که برای سازه مورد نیاز است انتخاب می شوند. پس از اینکه مشخصه های مخلوط انتخاب شدند، می توان نسبت اجزای مخلوط را با توجه به اطلاعات کارگاهی یا آزمایشگاهی تعیین کرد (در بخش های

بعدی تحت عنوان «تعیین نسبت اجزا» به این بحث می پردازیم). از آنجا که قسمت عمده خواص مورد نظر بتن سخت شده در درجه اول به کیفیت خمیر سیمان بستگی دارد، نخستین گام در تعیین نسبت مخلوط بتن، انتخاب نسبت آب به سیمان مناسب برای دوام و مقاومت مورد نیاز است. مخلوط های بتن باید حتی الامکان ساده نگه داشته شوند، زیرا وارد کردن تعداد زیاد اجزای تشکیل دهنده، غالباً کنترل مخلوط بتن را دشوار می کند.

رابطه بین مقاومت و نسبت آب به سیمان

چون به راحتی می توان مقاومت فشاری را تعیین کرد، این کمیت جامع ترین معیار به کار بردنی برای سنجش کیفیت بتن به شمار می آید. اگر چه مقاومت فشاری مشخصه مهمی است، ولی خواص دیگری مانند دوام، تراوایی و مقاومت سایشی ممکن است به همان اندازه، یا حتی بیشتر، اهمیت داشته باشند.

در محدوده معمولی مقاومت های اجرایی بتن، مقاومت فشاری با نسبت آب به سیمان رابطه عکس دارد: برای بتن کاملاً متراکم و ساخته شده، با سنگدانه های سالم و تمیز، مقاومت و سایر خواص مورد نظر بتن تحت شرایط کاری معین، تابع مقدار آب اختلاط به کار رفته در واحد سیمان هستند. اگر چه متخصصین در مورد تاثیر عمده نسبت آب به سیمان بر مقاومت اتفاق نظر دارند، اما بر سر شکل رابطه آن توافق کمتری دست داده است. اهمیت مقدار آب بر مقاومت، عاملی است که اولین بار توسط آبرامز پیشنهاد شده است. بسیاری از پژوهشگران بتن، استفاده از نسبت آب به سیمان را ترجیح می دهند زیرا مقاومت و سایر خواص مورد نظر بتن تقریباً به طور خطی به این شاخصه وابسته اند. عامل منطقی تر، چگالی نسبی خمیر سیمان است که آن نیز با مقاومت رابطه ای خطی

دارد. مقاومت چسبندگی خمیر سیمان در بتن، به کمیت و کیفیت ترکیبات واکنش پذیر سیمان و به میزان کامل بودن واکنش آبگیری بستگی دارد. مادام که رطوبت موجود و دما مساعد باشد، بتن با گذشت زمان مقاوم تر می شود. بنابراین، مقاومت در هر سن خاص به نسبت آب به سیمان اولیه بستگی زیادی ندارد، بلکه تابعی از میزان آب دار شدن سیمان است. اهمیت عمل آوردن فوری و کامل با این منطق به آسانی باز شناخته می شود.

تغییرات مقاومتی برای یک نسبت آب به سیمان مشخص ممکن است ناشی از تغییرات در اندازه، دانه بندی، بافت سطحی، شکل، مقاومت و سختی سنگدانه؛ تغییرات در انواع سیمان و منابع تهیه آن؛ مقدار هوادهی؛ وجود مواد افزودنی؛ و مدت زمان عمل آوری باشد.