فصل اول

مقدمه

۱ - ۱. مقدمه

امروزه در پی گسترش صنعت ساخت‌وساز در کشور و نیاز به ایجاد سازه‌های حیاتی ، افزایش دقت و ایمنی در تولید و اجرای سازه‌های مهندسی امری ضروری می‌باشد . از جمله راه‌کارهای مناسب می‌توان به دست‌یابی به تکنیک‌ها و ترکیبات جدیدی از مصالح ساختمانی جهت تسهیل پروژه‌های پیچیده به‌منظور افزایش ضریب اطمینان و ایمنی ساخت آن‌ها از طریق مکانیزه کردن امور و کاهش دخالت انسانی اشاره نمود که مورد مذکور در تقلیل هزینه‌های مالی ساخت و نگهداری طرح‌های پر خرج نقش به‌سزایی خواهد داشت .

بتن از جمله پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی در دنیا شناخته می‌شود . با گسترش استفاده از بتن ، ویژگی‌هایی مانند دوام ، کیفیت ، تراکم و بهینه‌سازی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند . بتن خودتراکم ، بتنی سیال ، روان و مخلوطی همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی نظیر جداشدگی ، آب‌انداختن ، جذب آب ، نفوذپذیری و ... را مرتفع نموده و علاوه بر آن بدون نیاز به هیچ لرزاننده‌ای ، تحت اثر وزن خود ، متراکم می‌شود . این ویژگی کمک شایانی به اجرای اعضای ساختمانی با فشردگی زیاد آرماتور خواهد نمود . لذا مطالعه و تحقیق پیرامون بتن خودتراکم به جهت رفع نواقص و مشکلات تولید و کاربرد آن و پیشبرد نقاط قوت و توانایی‌ش در آینده‌ای نه‌چندان دور ضرورتی آشکار است .

بتن خودتراکم تکنولوژی جدیدی از بتن است و به‌عنوان ابزاری قوی برای استفاده در شرایط مختلف می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نیاز به این تکنولوژی می‌تواند به‌وسیله خود صنعت در پاسخ به هر یک از موارد زیر بهتر احساس شود :

- مشکلات راجع‌به جداشدگی دانه‌ها در بتن
- مشکلات درباره آب‌انداختگی بیش از حد بتن
- بتن‌ریزی در مناطق با آرماتوربندی فشرده

استفاده از بتن خودتراکم راه‌حل مناسبی برای رفع اشکالات احتمالی ذکر شده در مرحله تولید و بتن‌ریزی است . بتن خودتراکم تکنولوژی تازه‌ای از بتن است که در آن بتن می‌تواند در شکل های فشرده و آرماتوربندی حجیم در قالب‌ها ریخته شود بدون اینکه نیاز به هرگونه ویبره‌ای داشته باشد . جریان بتن ادامه می‌یابد تا تمام فضای خالی قالب را پر کن ، هم‌چنین در اطراف میلگردها به‌طور کامل جریان می‌یابد ، بدون اینکه حباب هوا و تخلخل ایجاد شود . هیچ‌گونه جداشدگی و آب‌انداختگی در طول بتن‌ریز و در طول زمانی که بتن به حالت پلاستیک درمی‌آید اتفاق نمی‌افتد .

کاربردهای بتن خودتراکم متفاوت و فراوان هستند و محدودیت‌ها فقط به دلیل اطلاعات ناقص بخش صنعت از این تکنولوژی جدید به‌وجود می‌آیند. هم‌چنین قابلیت‌های زیادی برای تولید و پذیرش آن وجود دارد . تحقیقات نشان داده‌اند که تخلخل در ناحیه انتقال در بتن‌های خودتراکم کمتر از بتن‌های معمولی است ، اگرچه که نسبت آب به سیمان ، نوع سیمان و دانه‌بندی در

آن‌ها یکسان است . تمامی بخش‌های ذکر شده می‌بایست بهینه باشند و در طرح اختلاط مورد بررسی قرار گیرند . اصولاً طرح اختلاط بتن های خودتراکم شامل گام‌های زیر می‌گردد :

۱. انتخاب صحیح مصالح مصرفی ، شامل سیمان ، مواد سیمانی متمم ، سنگدانه‌ها ، آب و افزودنی‌های شیمیایی .
۲. تعیین مقادیر نسبی مواد برای این‌که بتنی تولید کنیم که هم اقتصادی باشد و هم کارایی مورد انتظار از بتن خودتراکم و هم نیازهای مقاومتی و دوام مورد نظر را برآورده سازد .
۳. کنترل کیفیت دقیق در هر مرحله از عملیات تولید بتن با استفاده از آزمایشات مربوطه .

سیمان آمیخته یا ترکیبی نوعی سیمان است که جهت بهبود خواص فیزیکی از ترکیب با مواد معدنی به صورت خام یا فرآوری شدن هم‌چون پوزولان یا مواد شیمیایی یا ضایعات مواد گیاهی (سبوس برنج) بدست می‌آید [۵] .

۱ – ۲ . شرح بیان پایان‌نامه

در این مطالعه برخی از خواص بتن خودتراکم توانمند ساخته شده با انواع پوزولان شامل خاکستر پوسته شلتوک برنج ، میکروسیلیس ، نانوسیلیس بررسی می‌شود .

برای این منظور با ساختن بتن خودتراکم با درصدهای مختلف پوزولان‌ها ، خواص مهندسی آن از طریق انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری ، مقاومت کششی (به روش برزیلی) ، مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) ، اولتراسونیک و جذب آب بررسی می‌شود .

۱ – ۳ . اهداف موردنظر پایان‌نامه

براساس آزمایش‌های درنظر گرفته نتایج زیر مورد بررسی قرار خواهد گرفت :

۱. اثر پوزولان‌ها بر رفتار نمونه‌های بتن تازه خودتراکم توانمند .
۲. اثر پوزولان‌ها بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم توانمند ساخته شده .
۳. اثر پوزولان‌ها بر مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم توانمند ساخته شده و رابطه آن با مقاومت فشاری .
۴. اثر پوزولان‌ها بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتن خودتراکم توانمند ساخته شده و رابطه آن با مقاومت فشاری .
۵. اثر پوزولان‌ها بر جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم توانمند ساخته شده در پایان دوره عمل‌آوری .
۶. اثر پوزولان‌ها بر سرعت عبور امواج مافوق صوت در نمونه‌های بتن خودتراکم توانمند ساخته شده و رابطه آن با مقاومت فشاری .

۱ - ۴ . معرفی فصول پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل ۵ فصل می‌باشد که عبارتند از :

فصل اول - مقدمه : در این فصل به بیان علت انجام پایان‌نامه و اهداف موردنظر پرداخته می‌شود .

فصل دوم - بتن خودتراکم توانمند : در این فصل ابتدا به تاریخچه و کاربرد پوزولان و ارزیابی فعالیت پوزولانی پرداخته شده و سپس اطلاعات کاملی از بتن خودتراکم و بتن توانمند و هم‌چنین بتن خودتراکم توانمند ارائه می‌شود .

فصل سوم – برنامه آزمایشگاهی : در این فصل ، طرح‌های اختلاط ، نحوه ساخت ، آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های مدنظر و نحوه انجام آزمایش‌ها ارائه خواهد شد .

فصل چهارم - ارائه نتایج و بررسی آن‌ها : در این فصل تحلیل نتایج ارائه شده از آزمایش‌ها آورده شده است .

فصل پنجم - نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها : در این فصل خلاصه کارهای انجام شده و نتایج بدست آمده ارائه خواهد شد و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیقات در این زمینه ارائه خواهد شد .

فصل دوم

بتن خودتراکم توانمند

۲ - ۱ . تاریخچه پوزولان

قبل از ابداع سیمان پرتلند ، در یونان ، روم و شمال اروپا ساختمان‌های آبی و دریایی را با ملات سیمان‌های طبیعی و گرد آهک شکفته می‌ساختند . یونانی‌ها از جزیره ترا[۱]، که امروزه سنتورین[۲] نام دارد ، کف‌سنگ آتشفشانی می‌آوردند و آن را آسیاب کرده و گرد آن را با گرد آهک شکفته و آب خمیر می‌کردند و با آن ملات آبی می‌ساختند . رومی‌ها هم از نزدیکی خلیج ناپل[۳] پوکه‌سنگ سرخ رنگی در می‌آوردند که از خمیر کردن گرد آن با گرد آهک شکفته و آب ، ملات آبی می‌ساختند ، چون بهترین جنس این پوکه‌سنگ از پوزولی[۴] بدست می‌آمد آن را پوزولان نامیدند که اکنون هم مصرف می‌شود [۴] .

بتن‌های حاوی سیمان پوزولانی از سال ۱۹۱۲ مورد استفاده قرار گرفت که امروزه به طورکلی برای کم کردن قیمت تمام شده و اصلاح در اجرا و ساخت بتن کاربرد دارد [۳۸] . پوزولان‌ها براساس منشاء و مبنای تولیدشان به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند :

الف – پوزولان‌های طبیعی ، شامل خاکسترهای دیاتومه[۵] ، اپالین[۶] ، چرت‌ها[۷] ، شیل‌ها[۸] ، توف‌ها و خاکسترهای آتشفشانی یا پومیس‌ها .

ب - پوزولان‌های صنعتی یا مصنوعی ، که منبع اصلی آن‌ها تأسیسات تولید انرژی که از ذغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می‌کنند ، می‌باشد . هم‌چنین کوره‌های ذوب فلزات ، تولید شمش آهن ، فولاد ، مس و ... . آلیاژهای آهن و سیلیس نیز از منابع اصلی مواد مصنوعی و صنعتی به شمار می‌روند . بسیاری از مواد صنعتی قادرند مقاومت نهایی و دوام بتن‌های ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی را مخصوصاً وقتی که جایگزین مواد دانه‌ای بتن می‌شوند افزایش دهند [۴۸] .

۲ - ۲ . طبقه‌بندی و مشخصات استانداردها برای پوزولان

اولین طبقه‌بندی برای پوزولان‌های طبیعی توسط مایلنز[۹] و همکاران پیشنهاد گردید . آن‌ها پوزولان‌ها را از نظر نوع فعالیتشان به شش طبقه تقسیم کردند . از طبقه‌بندی‌های جدید پوزولان‌ها طبقه‌بندی ماسازا[۱۰] می‌باشد که پوزولان‌ها را به سه گروه

[1] Thera
[2] Santorin
[3] Naples
[4] Pozzuoli
[5] Diatoms
[6] Opaline
[7] Chates
[8] Shales
[9] Mielenz
[10] Massazza

سنگ‌های با منشاء آتشفشانی ، مواد دگرگون شده غیرچسبنده و سنگ‌های آذرآواری که بعد از رسوب‌گذاری دچار تغییرات فیزیکی و شیمیایی گردیده‌اند ، تقسیم‌بندی می‌کند .

اولین گروه از این طبقه‌بندی که پوزولان‌های واقعی نامیده می‌شود ، عمدتاً از سیلیس همراه اکسید آلومینیوم و اکسید فریک به‌وجود می‌آید . این پوزولان‌ها در نتیجه فوران شدید مواد مذاب تشکیل می‌شوند که در اثر سرد شدن سریع آن مواد شیشه‌ای با حباب‌های گاز محصور در داخل آن تولید می‌شود . واکنش‌پذیری پوزولان با آهک با افزایش مقدار ترکیبات شیشه‌ای[11] آن افزایش می‌یابد .

دومین گروه از پوزولان‌های طبیعی دارای مواد دگرگون‌شده با میزان سیلیس بالا است . این پوزولان‌ها توسط فرایند رسوب‌گذاری مواد با منشاءهای متفاوت در آب‌هایی راکد تشکیل می‌یابند . شسته‌شدن اکسیدهای محلول در آب و تغییر و تبدیل شیمیایی ، آن‌ها را به سنگ‌های متخلخل سبک سفید رنگ تبدیل می‌کند . این مواد غالباً با خاک رس مخلوط و یا همراهند که موجب کاهش خاصیت پوزولانی آن‌ها می‌شود .

سومین گروه از پوزولان‌های طبیعی ، مواد با منشاء آواری[12] و پلیتیک[13] می‌باشند و مواد این گروه شامل خاک های رسی و خاک‌های دیاتومه‌ای است [۳۸] .

استاندارد ASTM C618 برای پوزولان‌های طبیعی حداقل ۷۰٪ از سه اکسید اصلی یعنی SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 را لازم می‌داند و محدودیت حداکثر ۱۰٪ را برای افت سرخ شدن و ۳٪ را برای رطوبت موجود در نظر می‌گیرد .

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران نیز ویژگی‌های پوزولان‌های طبیعی را در استاندارد ۳۴۳۳ و ویژگی‌های سیمان پرتلند پوزولانی را در استاندارد ۳۴۳۲ بیان کرده است . استاندارد ۳۴۳۲ مؤسسه استاندارد تحقیقات صنعتی ایران ، سیمان پرتلند پوزولانی را این‌گونه بیان می‌کند : سیمان پرتلند پوزولانی ، مخلوطی است از حداکثر ۱۵ درصد پوزولان طبیعی و دست کم ۸۵ درصد کلینکر یا سیمان پرتلند با نرمی مشخص که در مجاورت آب به صورت جسم چسبنده‌ای در کارهای ساختمانی مصرف می‌شود .

استاندارد ASTM C618 استفاده از پوزولان‌های طبیعی و خاکستر بادی را به عنوان مواد افزودنی در بتن بیان می‌کند . مراحل نمونه‌گیری و آزمایش خاکستر بادی در استاندارد ASTM C311 آورده شده است . پوزولان‌های مناسب به‌منظور استفاده آن‌ها در بتن طبق ASTM C618 به صورت زیر رده‌بندی می‌شود :

[11] Vitreous
[12] Clastic
[13] Pelitic

- پوزولان رده N : پوزولان‌های طبیعی خام یاکلسینه شده شامل خاک‌های دیاتومه ، چرم‌های اپالین و شیل‌ها ، توف‌ها و خاکسترهای آتشفشانی یا پومیست‌ها و بعضی شیل‌ها و رس‌های کلسینه شده .
- پوزولان رده F : خاکستر بادی با منشاء ذغال‌سنگ قیری (نوعی ذغال‌سنگ که در اثر حرارت مقدار قابل توجهی مواد فرّار قیری تولید می کند و ذغال‌سنگ نرم نیز نامیده می‌شود) .
- پوزولان رده C : شامل خاکستر بادی ، خاکستر لیگنیت با منشاء ذغال‌سنگ قیری .
- پوزولان رده S : هر نوع ماده دیگر شامل بومیست‌های عمل آورده شده ، بعضی دیاتومیت‌ها ، شیل‌ها و رس‌های کلسینه شده و آسیاب شده .

۲ - ۳ . ارزیابی فعالیت پوزولانی

ارزیابی فعالیت پوزولانی برای استفاده از یک ماده به عنوان پوزولان مسئله‌ای بسیار اساسی است و به همین دلیل مطالعات زیادی روی این موضوع انجام شده است . پیشنهادهای متعدد در این زمینه نشان می‌دهد که یافتن یک روش آزمایش عمومی که برای هر نوع پوزولان معتبر باشد و هم دقت و سرعت کافی و قابل قبول داشته باشد ، امری مشکل است . روش‌های زیادی برای تقریب فعالیت پوزولانی توسط محققین پیشنهاد شده است . بعضی از این روش‌ها عمومی است و می‌توانند هم برای پوزولان‌های طبیعی و هم برای پوزولان‌های مصنوعی به کار گرفته شوند و برخی دیگر خاص هستند . این روش‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد : روش‌های شیمیایی و فیزیکی [۳۸] .

۲ – ۳ – ۱ . روش‌های شیمیایی

فعالیت پوزولانی را می‌توان با محاسبه مقدار آهک ترکیب شده با پوزولان طی مخلوط شدن با آهک هیدراته یا سیمان پرتلند اندازه‌گیری نمود . این آزمایش را می‌توان با کار کردن روی مواد معلق یا خمیر ایجاد شده انجام داد که نتیجتاً یک ایده از فعالیت کوتاه‌مدت و درازمدت از فعالیت ماده بدست می‌دهد .

در روش فراتینی آهک ترکیب شده بعد از قرار دادن پوزولان در محلول آهک تحت دمای مشخص برای یک مدت معلوم اندازه‌گیری می‌شود . یک اندیس فعالیت پوزولانی را می‌توان توسط سلیوآلومین موجود در پوزولان که بعد از فعل و انفعال با آهک محلول گشته ، به‌دست آورد . در بعضی روش‌های پیشنهادی مقدار سیلیس یا مقدار مجموع $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ حل شده در اسید کلریدریک سرد اندازه‌گیری می‌شود [۳۸] .

روش تجزیه حرارتی نیز برای اندازه‌گیری اختلاف در مقدار هیدروکسیدکلسیم خمیرهای سیمان با خاکستر بادی و خمیرهای سیمان پرتلند خالص به کار گرفته شده است [۳۸] .

۲ – ۳ – ۲ . روش‌های فیزیکی

بعضی روش‌های تجربی دیگر جهت تعیین خاصیت های پوزولانی مواد شامل اندازه‌گیری برخی خواص مهندسی در ارتباط با آهک است . به عنوان مثال روش تامپسون که برای ارزیابی خواص خاک بسیار مفید و قابل استفاده است ، عبارت است از اندازه‌گیری مقاومت فشاری احاطه نشده خاک‌های مخلوط شده با درصد بهینه آهک (برای مقاومت فشاری) و متراکم شده با دانسیته حداکثر و نگهداری شده به مدت ۲۸ روز است . آن‌گاه اختلاف بین مقاومت فشاری احاطه نشده مخلوط خاک – آهک و مقاومت خاک خالص به عنوان عکس‌العمل آهکی خاک نامیده می‌شود [۳۸] .

روش کلی عبارت است از : ساختن نمونه‌های با ابعاد معین از ملات‌های مخلوط پوزولان – آهک یا پوزولان – سیمان نگهداری آن‌ها در شرایط محیطی کنترل شده و نهایتاً آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در فواصل زمانی مشخص ، تغییرات در نوع و نسبت وزنی آهک ، سیمان و پوزولان و در دانه‌ها به نحو قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت تأثیر می‌گذارند . بنابراین باید دقیقاً نسبت‌ها مشخص باشند ، تا بتوان نتایج را با نتایج تحقیقی دیگر مورد مقایسه قرار داد . در مخلوط سیمان پرتلند و پوزولان ، اندیس فعالیت پوزولانی به صورت نسبت بین مقاومت فشاری ملات پوزولان – سیمان مشخص و ملات کنترل با سیمان خالص تعریف می‌گردد . مقاومت‌ها بر روی نمونه‌های نگهداری شده در شرایط کاملاً پوشیده برای یک روز در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و ۲۷ روز در دمای ۳۸ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آیند .

ملات با جایگزینی ۳۵ درصد حجمی سیمان از ماده پوزولانی ساخته می‌شود و نسبت آب به سیمان طوری انتخاب می‌گردد که کارایی ثابت داشته باشد . بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که دما نقش مهمی در ترکیب سیمان‌های پوزولانی و پرتلند دارد . بنابراین اختلاف بین مقاومت‌های سیمان پوزولانی در دمای نرمال یا بالاتر را می‌توان به عنوان اندیس فعالیت پوزولانی منظور کرد . در یک بررسی ملات‌هایی از سیمان پرتلند خالص و سیمان پرتلند با ۴۰٪ جایگزینی وزنی آن ، از پوزولان‌های طبیعی ساخته شد . نسبت ماسه به سیمان ۳ به ۱ و نسبت آب به سیمان ۰/۴ بود . نمونه‌ها به مدت ۵ روز در دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد به عمل آورده شدند از آن‌جا که اختلاف مقاومت‌های فشاری به عنوان اندیس فعالیت پوزولانی معیاری مناسب نیست لذا نسبت مقاومت‌های فشاری نمونه‌ها با پوزولان به نمونه‌های کنترل شده در شرایط یکسان مورد استفاده قرار گرفت [۳۸] .

این اصل در استاندارد BS3892-1982 مورد توجه قرار گرفته بود . در این روش اندیس فعالیت پوزولانی عبارت است از : نسبت مقاومت ملات‌های با سیمان مخلوط به مقاومت ملات‌های مشابه با سیمان خالص بعد از ۷ روز نگهداری به شرطی که کارایی ملات‌ها یکسان باشد . شرایط نگهداری عبارت است از ۲۴ ساعت در هوای مرطوب ، سپس ۴ روز در زیر آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد ، سپس ۴۶ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و نهایتاً ۲ ساعت در زیر آب با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد [۳۸].

۲ - ۴ . بتن خودتراکم

بتن خودتراکم یکی از انواع بسیار جالب بتن است که در بدو امر برای کاربرد در قطعات بتن آرمه پر آرماتور ابداع و ساخته شد. ولی امروزه کاربرد این نوع بتن یکی از مشکلات عمده اجرای کارهای بتنی در محیط‌های شهری را حل می‌کند که عبارت است از آلودگی صوتی ناشی از کاربرد ویبراتور برای لرزاندن و جادادن بتن . این آلودگی صوتی ، کاربرد شبانه بتن در محیط‌های شهری را غیرعملی می‌سازد ولی با کاربرد بتن خودتراکم ، دیگر نیازی به لرزاندن بتن نیست و می‌توان کارهای اجرایی را در مدت شب نیز ادامه داد . امروزه در برخی از کشورها به منظور برجسته کردن این مشخصه بتن خودتراکم ، به آن نام " بتن بی‌صدا " داده‌اند . استفاده از بتن خودتراکم از اواخر دهه ۸۰ میلادی در کشور ژاپن آغاز شد و سپس در کشورهای دیگر گسترش یافت . امروزه در کشورهای پیشرفته بتن خودتراکم در زمره بتن‌های متداول و رایج محسوب می‌شود . وجود هوای تصادفی ناشی از عدم تراکم کافی موجب ضعف مشخصات مکانیکی بتن می‌شود به طوری‌که هر یک درصد هوا تقریباً پنج درصد افت مقاومت فشاری را به همراه دارد . استفاده از بتن خودتراکم اجازه می‌دهد در محل‌هایی که امکان تراکم کافی به دلیل آرماتور زیاد وجود ندارد یا دسترسی به محل بتن‌ریزی مشکل است بتن‌ریزی بدون نیاز به تراکم انجام پذیرد و مقدار هوای تصادفی در بتن به حداقل برسد .

در حال‌حاضر فرهنگ متعارف مهندسی بتن در کشور ، استفاده از بتن با اسلامپ زیاد را قابل قبول نمی‌داند و دلیل این است که معمولاً چنان‌چه روانی بتن زیاد باشد ، این افزایش به دلیل استفاده از آب زیاد (بیش از آن‌چه در طرح اختلاط پیش‌بینی شده است) و یا استفاده از افزودنی‌ها با درصد زیاد ایجاد شده است ، که در هر دو صورت ، بتن از حیث مقاومت و رفتار بتن تازه با مشکل روبرو است . بتن خودتراکم که برای حل مشکلات ناشی از تراکم در بتن‌ریزی توسعه یافته است ، در عین کارایی و روانی زیاد ، دارای مقاومت کافی در برابر جداشدگی و آب‌انداختگی است و مشخصات مکانیکی آن نیز در حالت حداقل برابر بتن معمولی می‌باشد . با توسعه روزافزون سازه‌های بتنی و با تأکید بر مقاومت و دوام آن از یک‌سو و کمبود یا نبود کارگران ماهر از سویی دیگر و گسترش صنایع پیش‌ساخته بتنی در دنیا موجب گردید که بتنی طراحی شود که برای تراکم و تحکیم خود ، نیازی به عمل لرزاندن در جریان بتن‌ریزی نداشته باشد . ساخت این نوع بتن با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی (فوق‌روان‌کننده‌های نسل جدید) و معدنی امکان‌پذیر شده است .

بتن خودتراکم نخست در سال ۱۹۸۶ توسط H.Okamura در ژاپن پیشنهاد گردید و در سال ۱۹۸۸ این نوع بتن در کارگاه ساخته شد و نتایج قابل قبولی را از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن ارائه داد . مقاله‌ای در مورد این نوع بتن توسط K.Ozawa و همکارانش در سال ۱۹۸۹ منتشر گردید [۳۲] .

تعریف P.Bartos : بتن خودتراکم بتنی است که تحت وزن خود جاری شده و بدون نیاز به هر نوع لرزاندنی به طور کامل قالب‌ها را پر کرده (حتی با وجود میلگردهای متراکم) و حالت همگن بودن خود را حفظ نماید [۳۴] .

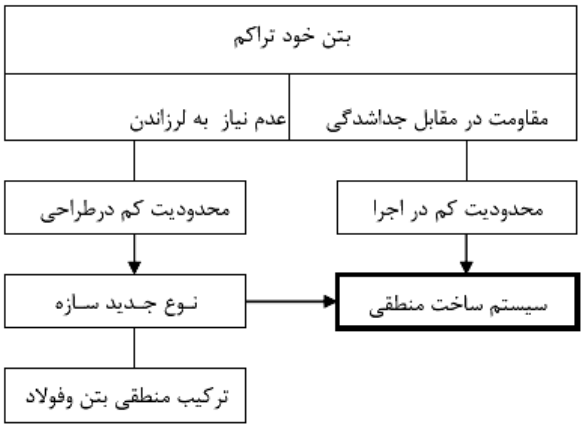
تعریف K.Ozawa : بتن خودتراکم تازه باید خواص زیر را داشته باشد : [۳۴] :

الف – توانائی پرکنندگی : جاری شدن بتن خودتراکم در تمام فضاهای قالب‌ها تحت وزن خود .

ب – توانایی عبور : امکان عبور از فواصل تنگ میلگردها و قالب‌ها تحت وزن خود .

ج – مقاوم در مقابل جداشدگی : بتن خودتراکم ضمن دارا بودن خواص (الف) و (ب) باید شکل و ترکیب یکنواخت خود را در جریان حمل و بتن‌ریزی حفظ نماید .

K.Ozawa : مدل پیشنهادی شکل (۲ - ۱) را برای سیستم ساخت منطقی بتن خودتراکم ارائه می‌دهد :



شکل ۲ - ۱ . مدل پیشنهادی K.Ozawa برای ساخت بتن خودتراکم [۳۴]

H.Okamura : خاصیت ویژه خودتراکمی این نوع بتن را به مشخصات مصالح و نسبت اختلاط وابسته می‌داند و در تحقیقات خود در سال ۱۹۸۶ با ثابت نگه‌داشتن مقدار سنگدانه‌های درشت در حد ۵۰ درصد حجم مواد جامد و سنگدانه‌های ریز در حد ۴۰ درصد حجم ملات و با تنظیم نسبت آب به سیمان و با افزودن مقداری فوق روان کننده توانست به خاصیت خودتراکمی بتن دست یابد [۳۲] .

در سال ۲۰۰۳ مؤسسه بتن پیش‌ساخته و پیش‌تنیده[14](PCI) و مؤسسه بتن آمریکا[15](ACI) و مجموعه ASTM[16] اولین تعاریف خود را از بتن خودتراکم ارائه نمودند که به شرح زیر می‌باشد :

[14] Precast/Prestressed Concrete Institute
[15] American Concrete Institute
[16] American Society for Testing and Materials

تعریف مؤسسه بتن پیش‌ساخته و پیش‌تنیده (PCI) : بتنی با کارایی بسیار بالا که می‌تواند از میان آرماتورهای به‌هم فشرده و از بین اعضای پیچیده سازه‌ها تحت اثر وزن خود جریان یافته ، بدون جداشدگی و افزایش آب‌انداختگی قالب را با بی‌نیازی کامل از لرزش به طور کامل پر نماید [۳۵] .

تعریف مؤسسه بتن آمریکا (ACI) : بتنی با جریان‌پذیری بالا و بدون جداشدگی که می‌تواند در تمامی سطح قالب پخش شده و قالب را پر نموده و فضای اطراف آرماتورها را بدون هیچ‌گونه تراکم خارجی در برگیرد [۱۵] .

تعریف مؤسسه ASTM : بتنی که می‌تواند در اطراف آرماتورها جریان یافته و با حفظ یکنواختی در داخل قالب ، تحت اثر وزن خود ، بدون اثر نیروی خارجی متراکم شود [۲۰] .

دلایل گسترش بتن خودتراکم در دنیا :

- توسعه سازه‌های بتنی در دنیا و نیاز به بتن‌های با خواص ویژه
- کمبود کارگران ماهر بتن‌ریزی به‌ویژه کارگران ویبره‌زن
- افزایش سرعت اجرای سازه‌های بتنی در سهولت بتن‌ریزی
- امکان بهبود کیفیت مکانیکی بتن
- امکان اجرای سازه‌های بتنی ظریف و سنگین و انتخاب مقاطع کوچک با میلگردهای فشرده (آزادی عمل بیشتر در طراحی)
- توسعه صنایع پیش ساخته بتنی
- صرفه‌جوئی اقتصادی با توجه به کاهش نیروی انسانی لازم و زمان ساخت
- اجرای سازه‌های بتنی ویژه مانند بتن‌ریزی در زیر آب
- توجه به سطح تمام شده زیبا و مرغوب سازه‌های بتنی
- کاهش سر و صدا و آلودگی صوتی محیط کار به‌ویژه در صنایع پیش‌ساخته بتنی

۲ - ۵ . مصالح در بتن خودتراکم

۲ – ۵ - ۱ . سیمان پرتلند و مواد جایگزین سیمان

برای تأمین شکل‌پذیری مورد نیاز بتن خودتراکم لازم است حجم خمیر سیمان افزایش یابد بدین منظور مقدار سیمان مصرفی در بتن خودتراکم ۳۸۵ الی ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد [۱۴] . به دلیل قیمت بالای سیمان می‌توان به جای آن از مواد جایگزین استفاده نمود . استفاده از مواد جایگزین علاوه بر جنبه اقتصادی باعث بهبود ویژگی‌های بتن مثل نفوذپذیری ، دوام و پایایی بتن در مقابل مواد شیمیایی می‌گردد .

۲ – ۵ - ۲ . میکروسیلیس

استفاده از میکروسیلیس به عنوان ماده پوزولانی به اوایل سال ۱۹۵۰ بر می‌گردد ، لیکن بررسی و کار جامع بر روی میکروسیلیس و استفاده از آن در مخلوط بتن و سیمان پرتلند در دهه ۱۹۷۰ انجام گرفته است [۱] . مصرف میکروسیلیس به عنوان ماه افزودنی در تهیه بتن با مقاومت بالا در سال‌های اخیر رایج گشته به طوری که استفاده از آن به عنوان ساده ترین روش برای تهیه این نوع بتن ، تلقی می‌گردد [۱۱] . تحقیقات و بررسی های انجام شده نشان می‌دهد که در میان مواد افزودنی پوزولانی ، میکروسیلیس به دلیل داشتن ذرات بسیار ریز و جدا از هم و هم‌چنین درصد زیاد (حدود ۹۰٪) سیلیس آمورف (غیربلوری) برای تهیه بتن با مقاومت بالا بسیار مناسب است . تفاوت اساسی بین میکروسیلیس و پوزولان‌های معمولی این است که فعالیت پوزولانی میکروسیلیس سریع‌تر از سایر پوزولان‌ها قابل حصول است . میکروسیلیس به خاطر ریزی ذرات با پخش شدن و توزیع خوبش در ماتریس خمیر سیمان ، موجب تسریع واکنش و حرارت‌زایی ترکیبات سیمان بویژه C_3S می‌گردد [۱] . تأثیر مثبت میکروسیلیس بر مقاومت مکانیکی بتن عموماً به دلیل وجود دو مکانیسم است . یکی به خاطر فعالیت پوزولانی بسیار زیاد آن که باعث کاهش هیدروکسیدکلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان پرتلند با آب و افزایش ژل تولیدی در خمیر سیمان خواهد شد و دیگری به دلیل نرمی زیاد آن است که باعث پرکردن خلل و فرج بین ذرات ژل و خمیر سیمان می‌گردد . سهم دقیق میکروسیلیس در افزایش و کسب مقاومت بتن تاکنون مشخص نشده است . می‌توان گفت که این سهم مقدار ثبتی ندارد و به مشخصات فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس مصرفی ، نوع سیمان ، نسبت آب به سیمان و شرایط عمل‌آوری بتن بستگی دارد [۱۹] . استاندارد ASTM C1240 نحوه استفاده از دوده سیلیسی را به عنوان افزودنی در بتن ، ملات و گروت بیان می‌کند [۱۹] .

براساس یافته‌های دوال و کدری[17] که با بکارگیری نسبت آب به سیمان بین ۰/۲۵ تا ۰/۴ و جایگزینی ۱ تا ۳۰ درصدی میکروسیلیس به جای سیمان ، مطالعاتی بر روی مقاومت و کارایی بتن داشتند ، جایگزینی ۴ تا ۸ درصدی میکروسیلیس به جای سیمان باعث افزایش ۲۵ درصدی در مقاومت و بهبود کارایی می‌گردد . به‌علاوه بکارگیری بیش از ۱۵ درصدی میکروسیلیس به جای سیمان در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری و کششی می‌گردد [۲۵] . آزمایش‌ها نشان دادند که اگر میکروسیلیس با سیمان مخلوط شود ، ذرات سیلیس فعال در موقع آبگیری سیمان ، با هیدروکسید کلسیم حاصل از آبگیری سیمان ترکیب شده و آن را به سیلیکات کلسیم آبدار تبدیل می‌نمایند . در نتیجه آسیب‌پذیری بتن را کاسته و مقاومتش را بالا می برند ، به طوری که می‌توان از میزان سیمان مصرفی کاست . هم‌چنین به دلیل ریزدانگی ، فضاهای خالی لعاب سیمان را پر کرده ، نفوذپذیری و انتشارپذیری یون کلر را کاهش می‌دهد . به عبارت دیگر میکروسیلیس از یک‌سو به عنوان یک پوزولان با

[17] Duval & Kadri

خاصیت پوزولانی و از سوی دیگر نظیر یک آب‌بندکننده ریزدانه ، با استقرار در فضای خالی بین ذرات سیمان ، قابلیت نفوذ خمیر سیمان را کاهش می‌دهد .

قطر دانه‌های سیلیسی مواد گرفته شده توسط گردگیرها به طور متوسط ۰/۱ میکرون است . بخش ریزدانه این مواد به دلیل زیاد بودن سطح مخصوص که انجام واکنش‌ها را تسهیل می‌نماید ، بسیار فعال است و هرچه دانه‌ها بزرگتر می‌شود ، سطح آن‌ها نسبت به حجم کاهش یافته و قابلیت واکنش سریعشان کم می‌گردد به طوری که سرعت واکنش دانه‌های با قطر بیشتر عملاً در مراحل اولیه قابل ملاحظه نبوده و محتمل است که واکنش آن‌ها در مدت زمان آبگیری و تشکیل بلورهای سیمانی کامل نشود و این دانه‌ها در خمیر سیمان محصور شده و قابلیت واکنش زایی خود را حفظ نمایند [۵] . در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی و خاکستر های بادی متعارف ، نمونه‌های دوده سیلیسی متراکم ، دو برابر نرم تر هستند بدین جهت این ماده بسیار پوزولانی است و از طرف دیگر مشکلات جابه‌جایی دارد و نیازمندی به آب را در بتن به طور محسوسی افزایش می‌دهد ، مگر آن که همراه با مواد افزودنی کاهنده آب بکار برده شود [۱۴] . نتایج تجزیه شیمیایی روی نمونه میکروسیلیس داخل کشور و مراجع خارجی در جدول (۲ – ۱) ارائه شده است [۶] . همان‌طوری که ملاحظه می‌شود مقدار SiO_2 میکروسیلیس داخلی در محدوده میکروسیلیس‌های قابل استفاده در دنیا بوده اما مقدار Al_2O_3 کمی بیشتر است که البته نقشی در مقاومت اولیه ندارد ولی روند کسب مقاومت نهایی را اندکی افزایش می‌دهد . فعالیت پوزولانی میکروسیلیس در مقابل آهک با استفاده از دستگاه TG[۱۸] اندازه‌گیری شده که نتیجه آن در جدول (۲ – ۲) نشان داده شده است [۶] .

جدول ۲ – ۱ . ترکیب شیمیایی میکروسیلیس [۶]

ترکیب شیمیایی	حدود پیشنهادی (ASTM C1240)	حدود مقادیر میکروسیلیس در مراجع	نمونه داخلی
SiO_2	۸۵	۷۵ – ۹۸	۹۱/۴
Al_2O_3	–	۰/۰۳ – ۵/۷۸	۱/۲۷
Fe_2O_3	–	۰/۰۶ – ۴/۵۴	۱/۴۵
CaO	–	۰/۰۱ – ۰/۸۳	۱/۴۶
MgO	–	۰/۳۶ – ۰/۵۲	۱/۲
Na_2O	–	۰/۱۷ – ۰/۲۳	–
K_2O	–	۰/۰۲ – ۱/۱۵	–
افت سرخ شدن	۶ >	۰/۴۱ – ۲/۷۵	۲/۰۵
ترکیب شیمیایی	–	–	۰/۶۶
Cl	–	–	۰/۰۴

[18] Thermo Gravimetry

جدول ۲ – ۲ . درصد فعالیت پوزولانی میکروسیلیس در برابر آهک در سنین مختلف [۶]

سن	۲ ساعت	۱ روز	۳ روز
درصد فعالیت پوزولانی	۱۶/۳	۸۵/۵	۱۰۰

۲ – ۵ – ۳ . نانوسیلیس

نانوفناوری عبارت است از توانایی مطالعه و کار در تراز اتمی ، مولکولی و فرامولکولی در ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر با هدف ساخت و دخل و تصرف در چگونگی آرایش اتم‌ها و مولکول‌ها . با کاهش یافتن اندازه ذرات در مقیاس نانو ، نسبت سطح مؤثر به حجم ذرات افزایش یافته و اثرات سطحی قوی‌تر می‌شود . در نتیجه می‌توان گفت که واکنش‌پذیری مواد در ابعاد نانو بسیار افزایش می‌یابد که سبب بهبود خواص افزودنی‌های پوزولانی خواهد شد . به‌طورکلی نانوذرات ، از یک‌سو نقش پرکنندگی حفرات بسیار ریز در خمیر سیمان (به خصوص در فضای بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان) را داشته و از سوی دیگر می‌توانند تغییراتی را در فرایند هیدراتاسیون در خمیر سیمان ایجاد نمایند [۴۸] .

تفاوت اصلی فناوری نانو با فناوری‌های دیگر در مقیاس مواد و ساختارهایی است که در این فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. ذرات مواد در ابعاد میکرو معمولاً خواص مشابه حالت توده ماده از خود نشان می‌دهند ، درحالی‌که در مقیاس نانومتری ، مواد خصوصیات فیزیکی کاملاً متمایزی نسبت به حالت توده دارند . در واقع در ابعاد نانو در یک حالت گذرا از اتم یا مولکول به توده ماده هستیم و در این حالت خصوصیات ویژه‌ای از ماده بروز می‌نماید . به عنوان نمونه کریستال‌های با ابعاد نانو دمای ذوب بسیار کمتری نسبت به حالت توده ماده دارند و این تفاوت در برخی موارد تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز خواهد رسید .

در ابعاد نانو ، اتم‌ها یا مولکول‌هایی که مرز ماده با خارج را تشکیل می‌دهند ، کسر بزرگی از کل مولکول‌ها یا اتم‌های یک ذره هستند . به عبارت دیگر ریزشدن ابعاد خارجی نانومواد سبب می‌شود که کسر بیشتری از اتم‌های نانومواد در سطح خارجی آن‌ها که محل انجام واکنش‌های شیمیایی ، فیزیکی و مکانیکی است واقع گردد در حالی که در مواد رایج بیشتر اتم‌ها در عمق ماده قرار گرفته و بخشی از توده ماده که دارای ناخالصی و نقایص ساختاری می‌باشد را تشکیل داده‌اند لذا اتم‌هاکه در نانومواد در این واکنش‌ها شرکت می‌کنند به علت داشتن نسبت سطح به توده ماده بسیار بالا در مقایسه با مواد معمولی خواص متفاوت و بی‌نظیری نسبت به مواد رایج از خود نشان می‌دهند .

یکی از شناخته شده‌ترین نانوذره مورد استفاده در تکنولوژی بتن ، نانوسیلیکا یا نانوسیلیس (SiO_2) آمورف می‌باشد [۲۷] . نانوسیلیس با داشتن میزان بیشتری سیلیس بی‌شکل (بیش از ۹۹ درصد) و اندازه ذرات بسیار کوچکتر (بین ۱ تا ۵۰ نانومتر) ، دارای عملکرد بسیار بهتری نسبت به میکروسیلیس می‌باشد و مقدار بسیار کمتری از این نانوماده همان تأثیر پوزولانی مورد نظر را در مقایسه با مقدار بالای استفاده از میکروسیلیس دارا می‌باشد . با توجه به کند بودن روند کسب مقاومت سنین کوتاه‌مدت بتن‌های حاوی پوزولان‌های معدنی ، چنین به نظر می‌رسد که استفاده از نانوسیلیس به همراه پوزولان‌های

طبیعی ، می‌توان مشکلات مربوط به طولانی بودن دوره کسب مقاومت این بتن‌ها را برطرف کند . در جریان هیدراناسیون سیمان پرتلند ، بخش زیادی از فعالیت پوزولانی نانوسیلیکا باعث تبدیل کریستال‌های هیدروکسیدکلسیم (که از هیدراتاسیون سیمان به وجود می‌آید) به ژل کلسیم‌سیلیکات هیدراته (C-S-H) می‌شود [۲] . نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از مواد نانو باعث ایجاد ساختار میکروسکوپی متراکم‌تر نسبت به مخلوط‌های ساده و کاهش کریستال‌های CH و بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بتن می‌گردد [۲۷] . هم‌چنین مشخص شده است که نانوسیلیکا می‌توان در کاهش سایز کریستال‌های CH تا حد زیادی مؤثر واقع شود [۳۴] .

به منظور درک ضرورت رویکرد نانوفناوری در بتن لازم است که ریز ساختار آن مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد . علاوه بر مواد جامد (فازهای جامد) تشکیل شده در خمیر سیمان هیدراته یا ژل توبرموریت (C-S-H) به عنوان عامل اصلی سخت‌شدگی خمیر سیمان ، بلورهای هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) ، سولفوآلومینات‌کلسیم (بلورهای سوزنی‌شکل اترینگایت) و دانه‌های سیمان هیدراته نشده ، انواع مختلفی از فضاهای خالی در ابعاد گوناگون ، در خمیر سیمان هیدراته شده ایجاد خواهند شد ، که در خواص آن تأثیر مهمی دارند . از مهم‌ترین انواع این فضاهای خالی می‌توان به فضاهای بین لایه‌ای در ژل سیلیکات کلسیم ، فضاهای مویینه و حباب‌های هوای محبوس شده در خمیر سیمان و یا بتن اشاره نمود . آن‌چه از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد آن است که قطر اسمی فضاهای بین لایه‌ای در ژل سیلیکات‌کلسیم (C-S-H) (حفرات ژلی) که درحدود ۲۸ درصد کل حجم ژل را تشکیل می‌دهند ، توسط محققین در حدود ۲ تا ۳ نانومتر و یا بین ۵ تا ۲۵ آنگستروم ($۱۰^{-۱۰}$ متر) بیان شده است .

نوع دیگر حفرات موجود در ریز ساختار بتن یا خمیر سیمان هیدراته شده فضاهای مویینه می‌باشند که توسط قسمت جامد خمیر سیمان (محصولات هیدراتاسیون سیمان) پر نمی‌شوند . در یک خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده با نسبت آب به سیمان کم ، اندازه فضاهای مویینه ممکن است بین ۱۰ تا ۵۰ نانومتر تغییر کند . آن‌گونه که از نتایج تحقیقات انجام گرفته مشاهده می‌شود ، حفرات با اندازه متوسط کوچک‌تر از ۵۰ نانومتر در خمیر سیمان هیدراته شده در جمع‌شدگی ناشی از تکیدگی و خزش و حفرات بزرگتر از ۵۰ نانومتر در خواص مقاومتی و تراوایی تأثیر اساسی دارند .

نکته اساسی در لزوم رویکرد نانوفناوری در دانش تکنولوژی بتن آن است که هم از دیدگاه فیزیکی با وجود تخلخل‌ها و حفرات یاد شده در بتن و خمیر سیمان هیدراته شده و هم از دیدگاه شیمیایی نیز با توجه به واکنش‌های هیدراتاسیون (آبگیری) دانه‌های سیمان شامل هیدراتاسیون آلومینات‌ها با تأثیر بر رفتار گیرش و هیدراتاسیون سیلیکات‌ها با تأثیر بر گسترش مقاومت خمیر سیمان ، که منجر به تشکیل مواد جدید جامد یاد شده در خمیر سیمان هیدراته شده و بروز خواص سخت‌شدگی آن می‌شود و هم‌چنین واکنش‌های شیمیایی انجام گرفته در بتن به هنگام حملات عوامل مهاجم شیمیایی زیان‌آور نظیر تراوش محلول‌های اسیدی به درون خمیر سیمان ، واکنش‌های انبساط‌زای ناشی از حمله سولفاتی ، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و

خوردگی میلگرد در بتن و یا عوامل فیزیکی زیان‌آور نظیر فرسودگی سطحی ، ترک‌خوردگی ناشی از تبلور نمک‌ها در منافذ ، سیکل‌های یخزدگی و آب‌شدگی محیطی و آتش ، می‌توان بتن را یک نانوماده دانست .

بنابراین از آن‌جا که بسیاری از رفتارهای مهم و قابل مشاهده بتن در ابعاد و مقیاس نانو با منشاء ریز ساختار آن شکل می‌گیرد، رویکرد نانوفناوری می‌تواند در شناخت و مطالعه هر چه بهتر عملکرد و بهبود ریز ساختار بتن به عنوان یک نانوماده نقش اساسی داشته باشد . هم‌چنین با تولید نانومواد جدید با سطح ویژه بسیار بالا و کاربرد آن‌ها در بتن به عنوان یک ماده کامپوزیت ، خواص گوناگون مقاومتی ، دوامی و کیفی آن‌ها بهبود می‌یابد [۲] .

۲ – ۵ – ۴ . خاکستر پوسته شلتوک برنج

پس‌ماندها یا محصولات فرعی کشاورزی متشکل از مواد آلی نظیر سلولز ، لیگنین و مقادیر کمی از پروتئین خام و چربی بوده و هم‌چنین دارای مواد معدنی نظیر سیلیس ، اکسید آلومینیوم و اکسیدهای آهن می‌باشند . مواد مذکور به صورتی که هستند نمی‌توانند به عنوان مواد جایگزین سیمان مورد استفاده قرار گیرند بلکه خاکستر به‌دست آمده از آن‌ها مفید است . در خاکستر مقدار زیادی سیلیس فعال وجود دارد که با آهک واکنش نشان داده و تشکیل سیلیکات‌کلسیم هیدراته با خاصیت چسبندگی می‌دهد . خاکستر به‌دست آمده شامل حداکثر ۱۰ درصد قلیایی ، مقدار کمی اکسیدهای آهن و آلومینیوم ، کلسیم، منیزیم و به‌علاوه اکسیدهای عناصر کمیاب موجود در خاکی است که برای کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در جدول (۲ – ۳) نشان داده شده است [۳] .

جدول ۲ - ۳ . تجزیه شیمیایی خاکستر پوسته شلتوک برنج [۳]

عناصر متشکل	درصد وزنی (٪)
SiO_2	۹۲/۱۵
Al_2O_3	۰/۴۱
Fe_2O_3	۰/۲۱
CaO	۰/۴۱
MgO	۰/۴۵
Na_2O	۰/۰۸
K_2O	۲/۳۱

با توجه به آمار بدست آمده در کارخانه‌های شالیکوبی از یک تن شلتوک برنج ، ۲۰۰ کیلوگرم پوسته تولید می‌شود و از سوزاندن آن حدود ۴۰ کیلوگرم خاکستر حاصل می‌شود . طبق آمار بدست آمده ، کشورهای در حال توسعه بزرگترین تولیدکننده‌های برنج هستند . بنابراین استفاده از خاکستر پوسته برنج به عنوان ماده پوزولانی جایگزین نسبی سیمان جهت

تولید سیمان‌های مخلوط در این کشورها ، اهمیت بسزایی دارد زیرا سبب افزایش میزان تولید سیمان و کاهش قیمت آن‌ها می‌شود و مشکل مناطق روستایی که با کمبود سیمان به دلیل مشکلات حمل و نقل و قیمت بالای آن مواجه هستند ، تا حدودی مرتفع می‌گردد [۱۰] .

مهم‌ترین ویژگی خاکستر پوسته شلتوک برنج ، وجود سیلیس بی‌شکل و فعال و سطح ویژه بالای آن است [۳۰] . براساس نتایج به‌دست آمده بیشترین مقدار سیلیس بی‌شکل در نمونه‌هایی که در دمای ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شده‌اند مشاهده شده است [۲۹] . ثابت شده است که دمای حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد در حضور آب ، سیلیس آمورف که در خاکستر پوسته شلتوک برنج وجود دارد می‌تواند با $Ca(OH)_2$ واکنش داده و به فرم یک نوع از ژل C-S-H ($Ca_{1.5}SiO_{3.5}xH_2O$) تبدیل شود . از دلایل اصلی بهبود خصوصیات بتن ، پس از افزودن خاکستر پوسته شلتوک برنج می‌تواند به تشکیل مقدار بیشتر ژل C-S-H در مقایسه با سیمان پرتلند در بتن نسبت داده شود . یک خاکستر پوسته شلتوک برنج خوب سوزانده شده و خوب آسیاب شده ، با بیشترین مقدار سیلیس به شکل آمورف و با سطح مخصوص بین ۴۰ تا ۶۰ m^2/g به روش جذب نیتروژن خیلی فعال هست و می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه ای مقاومت و دوام بتن را بهبود بخشد [۳۷] . در نتیجه می‌توان از آن به عنوان افزودنی پوزولانی جایگزین نسبی سیمان در بتن برای بالا بردن مقاومت آن در سازه‌های مجاور آب دریا که دارای املاح گوناگون است و سبب پوکی بتن می‌شود و سایر محیط‌های خورنده استفاده نمود .

اگرچه مقدار تخمینی پوسته شلتوک در سطح جهانی ۲۱ میلیون تن است ، ولی تولید و استفاده فعلی از آن محدود و کمتر از این مقدار می‌باشد . در ایران نیز بالاترین میزان تولید شلتوک برنج در منطقه مازندران با تولید متوسط سالیانه برابر ۸۹۶/۷۹۲ تن می‌باشد و پایین ترین مقدار ، با ۳۹ تن مربوط به استان یزد است . برآورد تولید خاکستر از پوسته شلتوک برنج در منطقه مازندران ۱۶۱/۴ تن در سال می‌شود . در کشورهای پیشرفته که کارخانه‌های شالی‌کوبی بزرگ ولی فاقد تجهیزات دارند ، دفع پوسته‌ها مشکل بزرگی ایجاد کرده است . جمع‌آوری و سوزاندن آن‌ها در فضای باز از نظر زیست محیطی مسئله‌ساز بوده ، در نتیجه قسمت زیادی از پوسته‌ها در سطح زمین رها می‌شوند . این مشکلات سبب برنامه‌ریزی‌های تحقیقاتی در نحوه استفاده از پوسته برنج و خاکستر حاصله از آن در دنیا خصوصاً در آمریکا شده است .

براساس مطالعات انجام شده با درصدهای مختلف جایگزینی سیمان توسط خاکستر پوسته شلتوک برنج ، درصد وزنی بهینه جایگزینی خاکستر پوسته شلتوک برنج به جای سیمان پرتلند با معیار مقاومت فشاری ، ۲۰٪ گزارش شده است [۸] .

۲ – ۶ . طرح اختلاط

طرح اختلاط بتن خودتراکم را باید به نحوی تنظیم نمود که بتواند تمامی خواص و ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده را برآورده سازد [۲۵ و ۴۶] .

ویژگی‌های بتن تازه خودتراکم را می‌توان به سه فاکتور ذیل خلاصه نمود [۲۵ و ۴۶] :

قابلیت پرکنندگی : توانایی جریان یافتن بتن تازه در قالب و پرکردن تمامی فضای داخل قالب تنها تحت اثر وزن خود .

قابلیت گذردهی : توانایی جریان یافتن بتن تازه از میان فضاهای کوچک و تنگ مثل فاصله بین آرماتورها بدون جداشدگی و بلوکه‌شدن .

مقاومت در برابر جداشدگی : توانایی بتن تازه برای حفظ همگنی خود .

در ادامه به مفهوم جداشدگی دقیق‌تر می‌پردازیم .

۲ – ۶ – ۱ . جداشدگی اجزاء و آب‌انداختگی

جداشدگی به عنوان جدا شدن اجزای بتن تازه به نحوی که دیگر توزیع یکنواخت نداشته باشد تعریف می‌شود . دو نوع جداشدگی وجود دارد . نوع اول ، که از خصوصیات مخلوط‌های بتن خشک است شامل جدا شدن شیره از جسم بتن می‌باشد (ناشی از لرزاندن زیاد بتن باشد) . آب‌انداختگی ، دومین نوع جداشدگی است و از خصوصیات مخلوط‌های خیس می‌باشد [۱۴] . آب‌انداختگی به عنوان پدیده‌ای تعریف می‌شود که تظاهر خارجی آن پدیدار شدن آب بر روی سطح بتن ، پس از اتمام جای دادن و تراکم و قبل از گیرش بتن (وقتی که رسوب‌گذاری و ته‌نشینی دیگر انجام نمی‌شود) ، است . آب سبک‌ترین جزء مخلوط بتن است ، در نتیجه آب‌انداختگی یک شکل از جداشدگی است . زیرا جامدات در حالت تعلیق تمایل دارند تحت نیروی ثقل به طرف پایین حرکت کنند . آب‌انداختگی در نتیجه عدم توانایی اجزای مصالح در نگه‌داشتن تمام آب مخلوط در حالت پراکنده است که در همان حال ، جامدات سنگین رسوب می‌کنند [۱۴] .

کاهش تمایل برای جداشدگی در مخلوط مهم است ، زیرا تراکم کامل برای کسب حداکثر پتانسیل مقاومت ضروری است و پس از جداشدگی بتن امکان‌پذیر نیست . پدیده آب‌انداختگی چندین نمود دارد ، اول آن‌که فقط مقداری از آب به سطح بتن می‌رسد و مقدار بیشتر آن در صورت وجود در ریزدانه‌های بزرگتر مصالح سنگی و میلگردهای افقی به تله می‌افتد . اگر آب ناشی از آب‌انداختگی در تمام مخلوط بتن به صورت یکنواخت از بین برود و قبل از لرزاندن مجدد بتن آبی که بر روی سطح ظاهر می‌شود توسط روش‌هایی مانند مکش ، خارج گردد ، کیفیت بتن بهبود می‌یابد . این امر در نتیجه کاهش نسبت آب به سیمان است ، با این وجود در عمل این امر اتفاق نمی‌افتد . معمولاً حباب‌های آب‌انداختگی در زیر مصالح سنگی درشت و میلگردها بیشتر هستند و در بخش بالایی بتن بزرگتر می‌باشند ، بنابراین بخش بالاتر بتن ضعیف‌تر از بخش پایین‌تر عضو می‌باشد [۱۴] .

شیره بتن همراه با ظاهر شدن خارجی آب‌انداختگی ، بر اثر تمایل آب به بالا آمدن از کانال‌های داخلی بتن خارج شده و موجب آن می‌شود که با خود ، ذرات بسیار ریز سیمان ، ماسه و رس (که در سطح مصالح سنگی وجود دارد) را حمل کرده و آن‌ها را

به شکل پس‌مانده در سطح بتن رسوب دهد . لایه شیره بتن حاوی نسبت زیاد آب به سیمان است و بنابراین متخلخل ، نرم و ضعیف است ، لذا به جای داشتن یک سطح سخت و با دوام بتن دارای سطح نرمی خواهد بود که مساعد پودرشدگی است . محصولات هیدراسیون در خمیر سیمان متخلخل لایه شیره بتن ، به آسانی در هوا کربناته می‌شوند . بنابراین شیره بتن در قدیم همیشه باید توسط برس‌زدن و شستشو ، یا توسط و ماسه‌پاشی ، قبل از جای دادن بتن جدید خارج گردند . آب‌انداختگی هم‌چنین نقش چشمگیری در ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری ایفا می‌کند [۱۴] .

۲ – ۶ – ۱ - ۱ . اندازه‌گیری جداشدگی اجزاء و آب‌انداختگی

برای تعیین مقدار جداشدگی در بتن معمولی هیچ آزمایش وجود ندارد . مشاهده ظاهری و بازرسی مغزه‌های بتن سخت شده به‌طورکلی برای تعیین این‌که آیا در موقعیت موردنظر جداشدگی رخ داده یا نه مناسب می‌باشد ، ولی در بتن خودتراکم می‌توان از T5min قیف V شکل (اختلاف T0 و T5min معیاری برای جداشدگی می‌باشد) [۴۰] و یا از آزمایش GTM برای سنجش جداشدگی استفاده کرد [۲۵ و ۴۶] . آزمایش استاندارد ASTM (ASTM C 232) ، آزمایشی برای تعیین جداشدگی ارائه شده است که در آن نمونه‌ای از بتن را در یک ظرف ، به قطر ۲۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۸۰ میلی‌متر جای داده و متراکم می‌گردد . آب ناشی از آب‌انداختگی که بر سطح پدید می‌آید در فواصل زمانی هر ۱۰ دقیقه ، در طول ۴۰ دقیقه اول و پس از آن در هر ۳۰ دقیقه فاصله ، خارج می‌گردد . آب‌انداختگی برحسب مقدار جمع شده ، به عنوان درصدی از آب خالص مخلوط در نمونه داده می‌شود .

۲ – ۶ – ۱ – ۲ . پارامترهای مؤثر در جداشدگی

ترکیبی از روانی نامناسب ، مقدار مصالح سنگی درشت‌دانه با جرم مخصوص زیاد یا کم ، وجود ذرات ریز و روش‌های نامطلوب جاگذاری و متراکم کردن به‌طورکلی دلایل عمده مشکلات جداشدگی و آب‌انداختگی در بتن هستند . مطمئناً می‌توان از طریق رعایت نسبت‌های مخلوط و روش‌های حمل مناسب و جاگذاری ، میزان جداشدگی را کاهش داد . جداشدگی ، گاهی اوقات در مخلوط‌های بسیار خشک با کمی افزایش دادن مقدار آب ، می‌تواند کاهش یابد . هر چند در اکثر موارد این کار مستلزم توجه دقیق به دانه‌بندی مصالح سنگی نیز می‌باشد . این امر ممکن است شامل پایین آوردن اندازه بزرگترین سنگدانه و استفاده بیشتر از ماسه یا ماسه ریزتر باشد . افزایش در مقدار سیمان و استفاده از مواد افزودنی معدنی و حباب هوا معمول‌ترین روش مقابله با آب‌انداختگی می‌باشد . لازم است توجه داده شود که سیمان با C_3AB زیاد و مقدار قلیایی بیشتر ، باعث کاهش روانی و آب‌انداختگی می‌شود . وقتی که مخلوط بتن باید از ارتفاع زیاد ریخته شود ، (مانند بتن‌ریزی ترمی) ، یا در مقابل یک مانع تخلیه گردد ، مخلوط بتن باید دارای چسبندگی مناسب بوده و هم‌چنین دقت بیشتری برای جای‌دادن بتن انجام گیرد [۱۴].