تحقیق و بررسی روشهای ساخت و ترکیب انواع بتن هوشمند

عبدالکریم عباسی دزفولی
استادیار، مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
abbasihamid@hotmail.com
تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۱۱/۲۶

چکیده

بتن هوشمند به مصالح ساختاری اطلاق می‌شود که می‌توانند تغییرات محیط اطراف خود را حس کنند و واکنش مناسب نشان دهند. این کار با تغییر یک یا چند پارامتر صورت می‌گیرد. خواص هوشمندانه بتن معمولاً با تغییر و ارتقاء مواد ترکیب دهنده و ماتریس بتن به دست می‌آید. به طور عمده با بهبود ترکیب مواد اولیه یا افزودن مواد عامل دار و کاربردی به بتن حاصل می‌شود، این بتن دارای ویژگی‌های بیونیک (زیستی) نیز میباشد. در مقایسه با بتن معمولی، بتن هوشمند که به‌طور مناسب و صحیح طراحی شده میتواند برای بهینه سازی ایمنی، دوام و عملکرد مناسب زیرساخت‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری مورداستفاده قرار گیرد. هزینه‌های مدت استفاده، مصرف منابع و آلودگی محیط‌زیست، که پایه‌ای اساسی برای ساخت‌وساز خواهد بود را کاهش می‌دهند. در چند دهه گذشته، تلاش‌های چشمگیری در جهت تحقیق در مورد بتن هوشمند و بسیاری از دستاوردهای نوآورانه در توسعه و کاربرد بتن هوشمند به‌دست‌آمده است. سیزده نوع بتن هوشمند با تأکید بر قابلیت‌های خود، به‌طور سیستماتیک در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرند، که با توجه به اصول، ترکیب، ساخت، خواص، توسعه تحقیق و کاربردهای ساختاری مطالعه و بررسی شدند. علاوه بر این، برخی ازنظرات و چشم‌انداز توسعه بتن هوشمند نیز مورد بحث قرار گرفته است. نهایتاً ترکیب ساخت ۱۳ بتن هوشمند به‌طور خلاصه در جدولی ارائه شده است.

کلید واژگان: بتن هوشمند؛ ظرفیت، خواص؛ ترکیب، ساختار

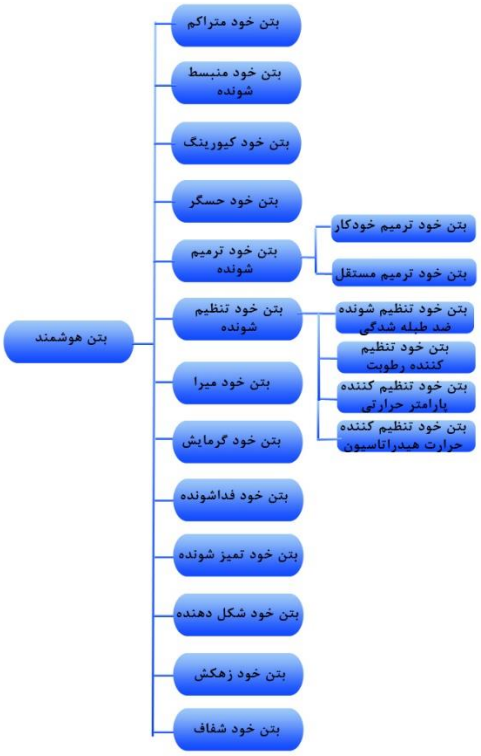
مقدمه

از تولید سیمان پرتلند در سال ۱۸۲۴ بتن بیشترین کاربرد را در ساخت‌وساز داشته است. مواد بتنی در ساخت زیرساخت‌ها به دلیل کم هزینه بودن، مقاومت فشاری بالا و سازگاری گسترده بتن با شرایط آب و هوایی مختلف باعث شده که از بتن استفاده وسیعی شود. ولی بواسطه ماهیت شبه شکننده بتن، خواص مکانیکی ازنظر چقرمگی، استحکام کششی و مقاومت در برابر ضربه، از ضعف‌های بتن است بااین‌حال، موجودیت مواد اولیه و مقاومت در شرایط محیطی متفاوت منجر به قابلیت اطمینان بخش بودن بتن می‌شود [۱]. مواردی که بتن را به چالش می کشند شامل بار وارده افزون، دما، رطوبت و سایر عواملی که موجب ترک و خرابی در بتن می‌شوند. بعد از یک سری آسیب های زیر ساختی سازه‌ها ناشی از مواد در دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ اتفاق افتاد، محققان متوجه امنیت و قابلیت اطمینان ساختارها شدند. اگر مواد از ظرفیت‌هایی برخوردار باشند که قابلیت خود حسگر، خود تنظیم و خود ترمیم داشته باشند وقوع حوادث فاجعه آمیز کاهش می‌یابد. از آن زمان، مواد هوشمند، که به عنوان موادی تعریف شده است با کارکرد معقول و قابل کنترل با تغییرات محیط، توسعه یافته است [۲]. روند اولیه کار ساخت بتن هوشمند در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱. روند اطلاعاتی بتن هوشمند [۳]

روند اطلاعات بتن هوشمند شامل شبیه‌سازی، تمیز دادن، آنالیز، قضاوت و عمل می‌باشد.

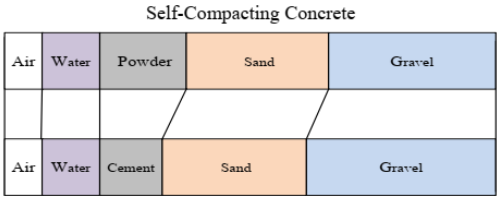
در مورد بتن‌های هوشمند مختلف تا به امروز تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است [۴]. ترکیب، روند ساخت، مکانیسم، اندازه‌گیری و اعمال بتن هوشمند به‌طور وسیعی تحقیقات با مطالعه تجربی و تحلیل نظری و شبیه‌سازی عددی انجام شده است. در این مقاله به دستاوردهای تحقیقاتی از بتن هوشمند، با تمرکز بر روی علوم، خواص، پیشرفت‌های تحقیقی و کاربردهای ساختاری پرداخته شده است. اگرچه بتن هوشمند دارای بیش از ده مشخصه ظرفیت هوشمند است، این تحقیق بر اساس روند ارائه شده در شکل ۲ می‌باشد. در میان ۱۳ بتن هوشمند، شش نوع اول متداول است که به ترتیب بر اساس ساخت، کیورینگ و خاصیت سخت شدگی بررسی شده‌اند و هفت نوع بعدی بتن های هوشمندی هستند که اخیراً توسعه یافته‌اند.



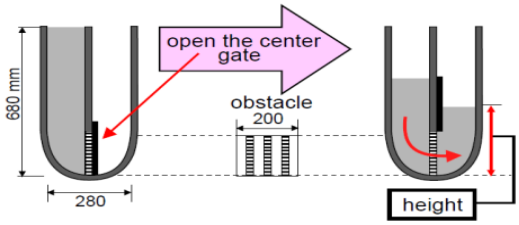
شکل ۲- دسته‌بندی بتن هوشمند

۲- بتن خود متراکم self compacting concrete

بتن خود متراکم یا SCC بتن خود تثبیت کننده و خود تسطیح شده بدون استفاده از ویبراسون می‌باشد. نمونه اولیه SCC در ابتدا توسط اوکامورا در سال ۱۹۸۶[۷]ایجاد شد. SCC مزایای سیالیت بالا، بدون جدایی سنگدانه ها و پدیده آب انداختگی در مقایسه با بتن معمول را دارد. بتن خود متراکم نه تنها توانایی خوبی برای عبور از فضای میان میلگردهای فلزی را دارد بلکه توانایی این را دارد که بدون عمل ویبره کردن زیر وزن خود متراکم شود [۷-۵]. تفاوت بین نسبت مخلوط SCC و بتن معمولی در شکل ۳ نشان داده شده است. برای بررسی اینکه آیا نسبت مخلوط بتن مناسب است، برخی از روش‌های آزمایش مانند: جریان U روش آزمون، روش تست جعبه، روش آزمون قیف V و روش آزمون T500 توسعه داده شد. در جریان U روش آزمایش ارتفاع بتن که از طریق مانع عبور می‌کند در شکل ۴ نشان داده شده است. اگر بتن بتواند از ارتفاع بیش از ۳۲۰ میلی‌متر جریان یابد بتن را می‌توان SCC برشمرد. روش تست جعبه مناسب برای آزمایش تفکیک بین ملات و مصالح است. اگر بتن از خودتراکمی ناکافی برخوردار باشد نسبت مخلوط بتن مجدداً تعدیل می‌شود.



شکل ۳- تفاوت بین نسبت مخلوط SCC و بتن معمولی [۸]



شکل ۴- تست جریان U [۸]

روش آزمون جریان U در شکل ۴ نشان داده شده است، ارتفاع بتنی که بتواند از مانع عبور کند نشان دهنده تراکم بتن است. اگر بتن بتواند از ارتفاع ۳۲۰ میلی‌متر جریان یابد بتن SCC محسوب می‌شود. روش تست باکس برای تست بتن که جدایی سنگدانه از ملات محتمل است، مناسب می‌باشد. شاخص عملکرد SCC توسط موسسه استانداردسازی ساخت و ساز استاندارد اروپا "مشخصات برنامه SCC" توسعه یافت [۹] و در جدول ۱ برای تست قیف V و رینگ J ارائه شده است. قیف V شامل قسمت بالایی به شکل V و قسمت پایینی مستطیل شکل است که به همدیگر متصل شده اند که برای اندازه گیری میزان روانی بتن خود متراکم مورد استفاده قرار میگیرد. رینگ J شامل آرماتور صاف ساده نمره ۱۲ که بطور یکنواخت دور یک رینگ دایره ایی شکل فیکس شده اند قطر بیرونی این رینگ ۳۶۰ میلیمتر و قطر داخلی ۳۰۰ میلیمتر است و برای اندازه گیری جدایی سنگدانه و خمیر بتن خود متراکم بواسطه وجود اثر آرماتور در تست است. تست جریان اسلامپ به منظور اندازه گیری زمان مورد نیاز برای پخش شدن نمونه بتن خود متراکم به قطر اسمی ۵۰۰ میلیمتر (T500) و براساس استاندارد اروپا زمان کمتر از ۸ ثانیه است.

جدول ۱- شاخص عملکرد SCC

روش تست	محدوده
تست قیف V	۶- ۱۲ ثانیه
تست‌رینگ J	کمتر از ۱۰ میلیمتر

نسبت بهینه بتن خود متراکم به‌طور عمده از طریق تعداد زیادی از تست‌های متعامد تعیین می‌شود. مشخصات اصلی طراحی SCC شامل مقاومت فشاری، استحکام کششی، مدول الاستیک، گرمای هیدراتاسیون، دوام، خزش، انقباض و سختی می‌باشد [۵]. پرسون [۹] پس از انجام یک سری از مطالعات در مقاومت بتن مدول الاستیک، خزش و انقباض SCC با بتن معمول را باهم مقایسه کرد و متوجه شد که هیچ تفاوت محسوسی ندارند. ناگاموتو و همکاران [۱۰] دریافتند که خصوصیات مواد جامد موجود در ملات تا حد زیادی بر کاهش میزان تغییر شکل برشی در ملات تأثیرگذارند. وقتی که نسبت سنگدانه زبر به سنگدانه نرم متغیر باشد مقدار فوق روان کننده باید تنظیم شود. علاوه بر این، توسط بسیاری محققان ثابت‌شده است که SCC دارای داوم بهتری نسبت به بتن معمول می‌باشد. SCC شامل طیف متنوعی در هر دو خواص بتن تر و سخت است. میزان پرکنندگی بالاتر، تغییر شکل‌پذیری بهتر و در مقابل جدایی سنگدانه، پایداری بیشتر در مقایسه با بتن معمولی دارد. با این حال، هنوز هم برخی از موضوعات مورد نیاز برای حل و فصل وجود دارد. به عنوان مثال، انقباض زودرس در سن اولیه SCC به دلیل درصد کم نسبت آب به مواد بایندر (چسبنده) است، این امر منجر به ترک خوردگی می‌شود. SCC به دلیل سیالیت فشار زیادی بر روی قالب وارد می‌کند. هنگامی که المان بتنی در معرض درجه حرارت بالا قرار می‌گیرد طبله شدگی در بتن خود متراکم آسان‌تر از بتن معمولی است. در ترکیب بتن خود متراکم در بعضی از موارد از مواد اصلاح شونده ویسکوزیته یا لزجت استفاده می‌شود.

۳- بتن خود منبسط شونده self expanding concrete

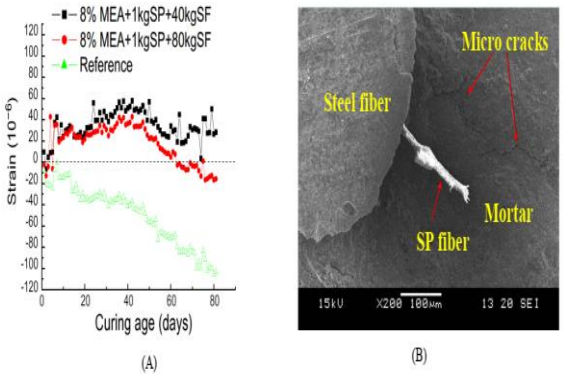
انقباض حجمی در زمان هیدراسیون و سخت شدن بتن سیمانی پرتلند اتفاق می‌افتد. میکرو ترک در نتیجه این انقباض در بتن سخت شده حادث می‌شود. در تضاد با بتن معمولی، انبساط به جای انقباض در بتن خود منبسط شونده ظاهر می‌شود. از این رو، نواقص ناشی از انقباض را می‌توان با انبساط بر آن غالب شد. به‌طورمعمول، بتن خود منبسط شونده به دو نوع بتن جبران انقباض (shrinkage compensating) و بتن استرس‌زا (self stressing) که بر اساس انرژی انبساط است تقسیم می‌شود. بتن جبران انقباض بتنی است که تا حدی منبسط می‌شود تا از ترک خوردگی جلوگیری کند. در مقایسه با بتن جبران انقباض، بتن استرس‌زا ظرفیت انبساطی بیشتری دارد و می‌تواند استرس فشاری معادل ۲٫۰-۸٫۰ مگاپاسکال درزمانی که انبساط بتن توسط آرماتور یا عوامل دیگر مهار شود را اعمال نماید. با استفاده از ترکیبات منبسط شونده مانند سیمان‌ها یا مواد افزودنی منبسط شونده می‌توان بتن منبسط شونده را تولید کرد. توانایی انبساط تا حد زیادی به میزان مصرف و فعالیت ترکیبات منبسط شونده بستگی دارد. اطلاعات دقیق در مورد سیمان‌های مختلف و مواد افزودنی منبسط شونده در جدول ۲ خلاصه می‌شود. با مخلوط کردن مواد معدنی با سیمان پرتلند در طی فرآیند تولید کلینکر، سیمان منبسط شونده تولید می‌شود و توسط ASTM با توجه به مواد معدنی اصلی مختلف با سه نوع (یعنی K، M و S) مشخص شده است [۱۰]. از طرف دیگر، به خاطر تنظیم راحت ظرفیت انبساط، مواد معدنی انبساطی به‌طور جداگانه معرفی شده‌اند.

جدول ۲ – خلاصه سیمان و افزودنی منبسط شونده

مواد منبسط شونده	نوع	معدن اصلی	منابع انبساط
سیمان منبسط شونده	K	منو سولفیت، جیپسوم، آهک	اینترینگایت
	M	کلینکر آلومینیات و جیپسوم	ایترینگایت
	S	تری کلسیم آلومینیات و جیپسوم	ایترینگایت
مواد افزودنی منبسط شونده	اساس سولفو آلومینیات	سولفو آلومینیات	اینترینگایت
	کلسیم CaO	کلسیا	پرتلندیات
	اساس MgO	مگنیزیا	بروسایت
	هوازا	آهن یا پودر آلومینیوم	هیدروژن، فروهیدرواکسید

اینترینگایت کریستالهای سوزنی شکل هستند در موقع کلینکر سیمان پدیدار میشوند و معمولا آنرا هیدرات سولفوآلومینیات کلسیم می نامند.

بتن خود منبسط شونده یک جایگزین مناسب جهت ارتقاء رفتار سازه‌ای بتن است. به‌هرحال، انبساط بتن در اثر تشکیل اینترینگایت آب زیادی تولید می‌کند و قویاً نیاز به کیورینگ تر دارد. اخیراً الیاف ترکیبی و پیوندی همراه MgO و افزودنی انبساطی MEA در ساخت باند فرودگاه Tibet در چین بکار برده شد. نتایج نشانگر کاهش انبساط بتن با افزایش الیاف استیلی و الیاف SP چنانچه در شکل 5a مشاهده می‌شود، پایداری حجمی در دال بتنی در سنین اولیه را بیشتر کرده است. اسکن الکترون میکروسکوپ SEM شکل 5b نشان می‌دهد که میکرو ترک توسط الیاف هیبرید مهار شده‌اند.



(A) (B)

شکل ۵: A تغییر شکل کرنشی بتن با الیاف هیبریدی B میکرو ساختار الیاف هیبریدی در بتن

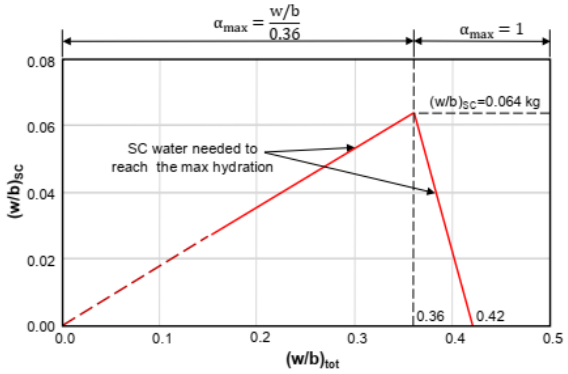
۴- بتن خود کیورینگ self-curing concrete

بلافاصله پس از ریختن بتن ضروری است کیورینگ بتن صورت گیرد. به دلیل انقباض احتمالی و تغییر شکل حرارتی در سنین پایین بتن باید به طور مناسب کیور یا آماده سازی شوند. برای کیورینگ مورد نیاز خواص مکانیکی و دوام روش‌های سنتی ریختن مانند آبگیری، پاشش و االسپری آب، پوشش گونی مرطوب یا فیلم‌های پلاستیکی برای بتن معمولی کافی است. با این حال، این تکنیک‌های کیورینگ ممکن است در بتن با عملکرد بالا (HPC) کارآمد نباشند.

HPC با نسبت کم (w / b) و موادی مانند دود سیلیس ساخته می‌شود که منجر به زیادشدن مقاومت و تراکم در سنین پایین در این شرایط، روش معمول کیورینگ مناسب نبوده و مانع نفوذ آب کیورینگ خارجی شده و فقط سطحی است. در نتیجه، آب کافی برای هیدراتاسیون کامل بایندر موجود نمی‌باشد. یک سری انقباض شیمیایی باعث ترک زیاد و زودرس میشود. این ترک زودرس درنهایت باعث تخریب خواص مکانیکی و دوام بتن می‌شود. در حال حاضر مواد کیورینگ شن سبک LWA مانند پومیس و پلیمرهای سوپر جذب‌کننده SAP هستند. SAP تا ۱۰۰۰ برابر وزن خود قدرت جذب آب دارد (شکل ۶).

شکل ۶-SAP خشک و متورم [۱]

بتن‌های خود کیور در نیم قرن اخیر مورد توجه ویژه قرار گرفته است و بیشتر تحقیقات بر اساس مدل پاورز انجام می‌شود، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است [۱۵و۱۶]. مدل بصورت سیستماتیک حداقل مقدار آب مورد نیاز برای رسیدن به ماکزیمم حد از هیدراسیون بایندر (α_{max}) برای رسیدن به حداکثر درجه در یک w / b داده شده را ارائه می‌دهد.



شکل ۷.–حداقل مقدار آب خود کیور جهت بدست آوردن ماکزیمم α در طی هیدراتاسیون سیمان[۱]

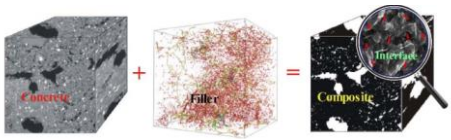
همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، وقتی α_{max} به ناحیه ۱,۰ می‌رسد (یعنی هیدراتاسیون کامل بایندر) با w / b برابر یا بیشتر از ۰,۳۶ حاصل میشود. زیر این مقدار، هیدراتاسیون بایندر فقط تا حدی حاصل می‌شود و α_{max} در شرایط اشباع به عنوان ۰,۳۶ /(w/b) برآورد شده است. همچنین در شکل ۷، وضعیت کاملاً اشباع شده نیز نشان داده شده است.

هیدراتاسیون بایندر را می‌توان با مقدار کمی آب حاصل کرد آب خود کیور ۰,۰۶۴ کیلوگرم در هر کیلوگرم بایندر مناسب است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد در بتن HPC، w/b به‌طور کلی بین ۰,۳۰ و ۰,۴۰ است. تغییر شکل مضر ناشی از انقباض اتوژنیک را می‌تواند از طریق فن‌آوری خود کیورینگ برطرف کرد. در اینجا HPC با w / b از ۰,۳۰ به عنوان نمونه‌ای برای تشریح موارد استفاده‌شده است تأثیر عامل خود کیورینگ در عملکرد HPC بر اساس مدل پاورز Powers [۱۲] ارائه شده است.

بتن خود کیور همراه با خواص مکانیکی مناسب به خوبی طراحی شده و دوام فوق العاده ای دارد و در برنامه‌های مهندسی به کار گرفته شده است. که در ژانویه ۲۰۰۵، در حدود ۱۹۰۰۰۰ مترمکعب HPC خود کیور شده با LWA presoaked با موفقیت در بخش بزرگ سایت ترانزیت راه‌آهن در تگزاس آمریکا بتن‌ریزی شد. پس از جایگزینی بواسطه توسعه روند هیداسیون سیمان، استحکام خمشی در ۷ روز به ۹۰٪ تا ۱۰۰٪ مقاومت ۲۸ روزه رسید [۱۸]. علاوه بر این، ترک‌های انقباضی خیلی کمتر در مقایسه با بتن‌ریزی معمول داشتند.

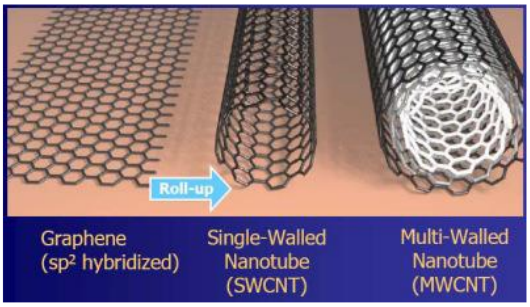
۵– بتن خود حسگر Self-Sensing Concrete

بتن خود حسگر که به آن بتن خود مونیتور یا خود گزارش گر می‌گویند، به بتنی اطلاق می‌شود که ظرفیت مرحله ایی خود مانند (تنش، کرنش، صدمه و یا حرارت) بدون نیاز به نصب و تعبیه سنسورهای متصل یا از راه دور مشخص می‌کند [۱۹]. مقداری پرکننده‌ها یا فیلرهای عامل دار، با شکل و ابعاد مشخص داخل ماتریس بتن شده، و سپس بتن از حالت عایق به بتن رسانا تبدیل می‌شود. تحت تأثیر زمینه نیرو و یا دما، مسیر هادی کامپوزیت به دلیل تغییر ریزساختار بتن تغییر یافته و در نتیجه باعث تغییر الکتریکی می‌شود خواصی از قبیل مقاومت، خازن، امپدانس، و ولتاژ، تغییر ساختار بتن در سیگنال‌های الکتریکی منعکس‌شده و توسط دستگاه‌های مشخص اندازه‌گیری می‌شود. بتن خود حسگر به‌طور کلی از یک فیلر عامل دار در مقیاس درشت‌تر ساختاری در شکل ۸ نشان داده شده است. ماتریس بتن خود حسگر معمولاً سیمان پرتلند است. پرکننده‌های یا فیلر های رسانا به‌طور عمده از کربن تشکیل شده است، مواد فلزی و پلیمری، که در بین آن‌ها پرکننده‌های کربنی و فلزی بیشترین کاربرد را دارند بررسی شده است و نشان داده شده است که، برخی از پرکننده‌های عامل دار نه تنها می‌توانند ویژگی رسانای بتن را بهبود بخشند بلکه می‌توانند باعث تقویت خواص مکانیکی و دوام آن شوند [۲۰]. علاوه بر این، یک خاصیت ترجیحی از ترکیبی بتنی که خود حسگر باشد با استفاده هم‌افزایی از دو یا چند مورد (هیبریدی) به دست می‌آید. پرکننده‌های عامل دار و اثر ترکیبی مثبت نسبت به تک فیلر دارند [۲۱]. خاصیت الکتریکی عالی برای بتن های حسگر لازم است.



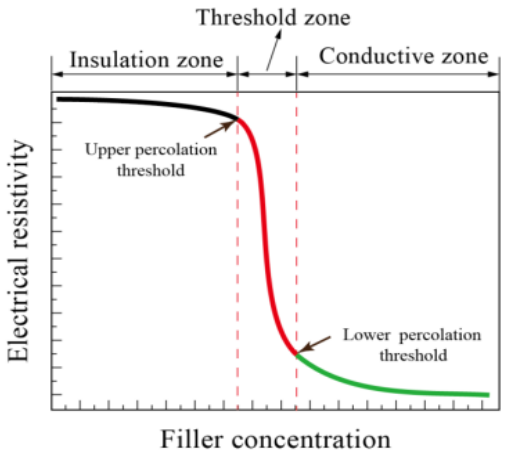
شکل ۸– ساختار ISSC [۲۰]

نانولوله‌های کربن (CNTs) دارای شکل استوانه ایی میکرو سازه‌ای که از شیت گرافین لوله شده ساخته می‌شوند. CNTs دارای درصد خلوص متغیر و معمولاً از ۷۰٪ تا ۹۰٪ کربن تولید می‌شوند که دو نوع هستند یک جداره که دارای یک شیت گرافین به‌اندازه ۴ تا ۱۰ نانومتر و طول چندین برابر قطر و چند جداره که دارای لایه‌های متعدد و به قطر ۴ تا ۱۰۰ نانومتر. شکل a9 ساختار نانو کربن تیوب را نشان می‌دهد. فاصله چشمه نانو تیوب به ۳۴ نانومتر می‌رسد. انتهای نانولوله کربن کپ می‌کنند. استفاده از نانو کربن لوله عامل‌دار در بتن باعث ارتقای مقاومت فشاری (بعنوان مثال اضافه کردن ۰,۰۳٪ نانولوله کربن به وزن مخلوط ملات ۳۹٪ افزایش مقاومت فشاری شده است) همچنین سایر پارامترهای مقاومتی مانند مقاومت خمشی و کششی با نانو تیوب کربن ارتقاء داده شده اند. تکنیک توزیع مواد نانو تیوب در مخلوط ملات سیمان و بتن اهمیت دارد که نوعاً با کربوکسیلات بهمراه التراسونیک است. نانو کربن تیوب از گروه COOH هستند و به CSH یا هیدرو اکسید کلسیم سیمان متصل می‌شوند [۲۵].



شکل ۹– نانو کربن تیوب یک جداره و چند جداره

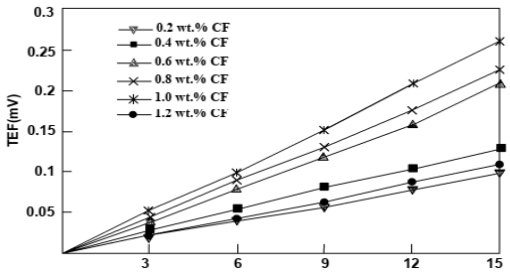
خواص بتن خود حسگر تحت تأثیر عوامل مختلفی از قبیل نیروی خارجی، ولتاژ، خواص پرکننده‌ها، سن، محتوای آب و محیط سرویس قرار دارد [۲۲]. برای تسلط بر شکل‌گیری و توزیع شبکه‌های رسانا، تمرکز پرکننده یک پارامتر اصلی مؤثر بر خاصیت بتن خود حسگر در بین این عوامل است. مقاومت الکتریکی بتن خود حسگر با تغییر در پرکننده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ترکیب بحرانی به نام آستانه نفوذ وجود دارد که فراتر از آن مقاومت الکتریکی به‌شدت کاهش می‌یابد، بنابراین منجر به تغییر بتن از محدوده عایق به یک محدوده نیمه‌رسانا یا رسانا می‌شود. با توجه به این آستانه نفوذ، منحنی‌های مشخصه رسانا به سه منطقه تقسیم می‌شوند (همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است).



شکل ۱۰- تغییر مقاومت الکتریکی به همراه پرکننده متراکم [۲۲]

ناحیه عایق در منحنی به بیشترین مقاومت و پایداری الکتریکی ربط دارد، درحالی‌که بخشی با مقاومت الکتریکی بطور چشمگیر کاهش‌یافته ناحیه آستانه و قسمت آخر با کمترین مقاومت تثبیت شده، منطقه رسانا است. اگرچه حالت‌ها و مسیرهای هدایت شده در بالا همواره به‌طور هم‌زمان وجود دارند، تنها یک یا چند مورد از آن‌ها بسته به تمرکز پرکننده‌های فیلرهای رسانا، بر وضعیت یک ناحیه خاص تسلط دارند [۲۳].

تاکنون تلاش زیادی در زمینه تحقیق در مورد بتن خود حسگر شده است. در سال ۱۹۸۹، مقدار متوسطی از الیاف کربن در بتن گنجانیده شد و بین مقاومت الکتریکی و ساختار داخلی بتن همبستگی وجود داشت. این نشانگر آغاز بتن فیبر کربن هوشمند بود [۲۴]. پس از آن، مفهوم "خود تشخیص" اولین بار توسط موتو در سال ۱۹۹۲ به عنوان بتنی که توانایی سنجش خسارت خود را دارد، مطرح شد. بعداً در سال ۱۹۹۳، چانگ مفهوم "بتن هوشمند" را مطرح کرد و یکسری مطالعه سیستماتیک بر روی بتن هوشمند تاکنون در حال انجام است [۱]. برای CFRC رابطه خطی پایدار و قابل تکرار بین نیروی ترموالکتریک (TEF) و تغییرات دما (T) بیان شده، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با داشتن درصد مختلف فیبر کربن، قدرت ترموالکتریک می‌تواند تا ۱۸V/°C μ برسد. همه این‌ها باعث می‌شود که سنسور های دما با ماده سیمانی فیبر کربن ساخته شود. تحقیقات بعدی نشان داد که، یک ضریب درجه حرارت مثبت (PTC) یا ضریب دمای منفی (NTC) می‌توانند در بتن رسانا تولید شوند و آن‌ها می‌توانند تمایل به توسعه را همراه با پرکننده‌های رسانای مختلف تغییر دهند. علاوه بر این، یک سری تحقیق در مورد بتن های مختلف خود سنجش از نظر خصوصیات مکانیکی، مکانیسم حساس به نیروی مکانیکی، مکانیسم حساس به دما، روش‌های اندازه‌گیری و نفوذ محیط توسط محققان انجام شده است، همچنین برخی چشم‌اندازها در مورد کاربرد مهندسی انها صورت پذیرفته است. علاوه بر این، پرکننده‌های عامل دار میکرونی یا نانو به ویژه برای پرکننده‌های فیبری، نحوه های انتشار آن‌ها در بتن را به یک مسئله مهم تبدیل می‌کند [۱]. برای حل این مشکل روش‌های پراکندگی فیزیکی (یعنی روش‌های پراکندگی یا انتشار) یا ترکیبی از آن‌ها در چند سال گذشته مورد استفاده گسترده قرار گرفتند. باید اشاره کرد که یک روش پراکندگی مناسب نه تنها می‌تواند باعث افزایش خواص الکتریکی بتن بلکه باعث بهبود قدرت و دوام می‌شود.



شکل ۱۱- رابطه بین دما و TEF در CFRC [۱]

بتن خود حسگر دارای حساسیت بالایی است (ضریب حساسیت کرنش چند ده یا حتی صدها است، درحالی‌که در کرنش سنج متداول ضریب حساسیت فقط دو است)، ساختار یکپارچه و خاصیت حساسیت یک سیستم کامل خود حسگر بستگی به میزان هوشمند بودن تشخیص پویا و به موقع، تنش، تغییر شکل، دما، ترک و آسیب دارد. بنابراین دارای پتانسیل کاربردی گسترده‌ای در زمینه نظارت بر ساختار سلامت سازه است، گرچه بتن حسگر بیش از سه دهه پدید آمده است، تلاش‌های بسیاری برای ارتقاء آن لازم است. در محیط بیرونی سخت، خصوصیات الکتریکی بتن حسگر ناپایدار بوده و دقت اندازه‌گیری به‌شدت کاهش می‌یابد. رفتارهای بتن حسگر در شرایط تنش پیچیده باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرند. علاوه بر این، بهینه سازی پرکننده‌های عامل دار، تأثیر سنگدانه ها و انتخاب روش‌های انتشار و ترکیب مواد حسگر مانند نانو کربن تیوب، مثل توزیع بوسیله تکنیک التراسونیک این مواد در ماتریس بتن، باید عمیقاً مورد بررسی قرار گیرد.

۶- بتن خود ترمیم شونده Self healing concrete

با توجه به ویژگی‌های ذاتی بتن و محیط‌های مختلف بتن‌ریزی، وقوع ترک در هنگام قالب گیری و سرویس دهی بتن امری اجتناب ناپذیر است. ترک‌ها مسیر ورود مواد تهاجمی مضر به داخل بتن می‌شوند در نتیجه بتن آسیب دیده و تخریب‌های مختلف بوجود میاید. برای سازه‌های بتن مسلح، ترک‌های گسترده باعث آسیب و خوردگی آرماتور میشود. در نتیجه، آسیب

به آرماتور موجب خوردگی و خراب شدن کل سیستم می‌شود. بنابراین نگهداری بتن از ترک خوردگی اهمیت دارد. با این حال، تشخیص بعضی از ترک‌ها بسیار دشوار است، به ویژه هنگامی که ترک‌ها نامرئی یا غیرقابل دسترسی باشند. با الهام از ماهیت آب انداختگی بتن یا ترمیم خود به خودی استخوانهای شکسته شده در موجودات زنده، همین مفهوم توسط دانشمندان در مواد مهندسی گنجانیده شده است، و باعث می‌شود آن‌ها توانایی‌ترمیم یا بهبودی صدمات توسط خودشان را داشته باشند [۲۱].

به عنوان نوعی ماده‌ترمیم کننده، بتن خود ترمیم کننده نیز بتن خود ترمیم یا خود آب بند نامیده می‌شود و ذات این بتن این است که محصولات چسب لازم را تهیه می‌کند که در صورت بروز آسیب می‌تواند ترک‌ها را پر کند. به‌طور کلی، بتن خود ترمیم شونده به دو دسته بتن ترمیم کننده خودکار و مستقل طبقه بندی می‌شود.

۶,۱- بتن خود ترمیم خودکار Autogenous

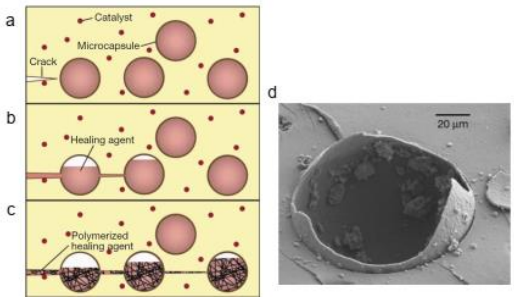
بتن خود ترمیم کننده خودکار (اتوژن) به عنوان بتنی با قابلیت آب بندی خود بدون نظارت خارجی یا مداخله انسانی تعریف شده است. به دلیل هیدراتاسیون مداوم مواد معدنی کلینکر یا کربناته شدن هیدروکسید کلسیم [$Ca(OH)_2$] ممکن است ترک‌های بتن در یک زمان‌ترمیم شوند. بتن خود ترمیم ترکیبی از فعل و انفعالات پیچیده شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی است. بتن عمدتاً در سنین اولیه تحت هیدراتاسیون مداوم سیمان است، درحالی‌که در سنین بعدی، بیشتر مربوط به تشکیل کربنات کلسیم ($CaCO_3$) [۱۷] است.

برای هر یک از خود بتن های خود ترمیم کننده (اتوژن) ، به دلیل نقش مهم آب در ایجاد واکنش شیمیایی و حمل ذرات نرم و ریز دربتن وجود آب ضروری است. اگر عرض ترک محدود باشد، ترمیم بتن خود ترمیم خودکار می‌تواند موثرتر باشد. بتن خود ترمیم قادر است که ترک تا حداکثر ۵۰ میکرومتر را ترمیم کامل کند و تا ۱۵۰ میکرومتر ترک بتن خود ترمیم میتواند خواص مکانیکی تا حدودی تامین کند [۱۸]. برای بهبود توانایی بتن خود ترمیم از هیدرولیک نهفته و پوزولانی مخلوط (به عنوان مثال، خاکستر بادی، آهک، سرباره کوره آهنگدازی) یا پلیمرهای سوپر جاذب (SAP) و ماده انبساطی هستند معمولاً در بتن گنجانیده می‌شوند. برخی از محققان روی رفتارهای بتن خود ترمیم با ساخت بتن ماورای فوق سبک Ultra PC (UHPC) تمرکز کردند با نسبت آب به سیمان کم (نزدیک به ۰,۲) و محتوای مواد افزودنی زیاد بتن مافوق سبک را ساختند. این بدان معنی است که UHPC مقدار زیادی کلینکر بی آب دارد و در نتیجه پتانسیل خود ترمیمی با هیدراتاسیون پایدار مواد بایندر [۱۹] را دارد. آزمون خمشی سه نقطه‌ای و شبیه‌سازی عددی در UHPC انجام شده و نمونه‌ها مخلوط با آب کیور شدند [۱]. از طرف دیگر، محدود شدن عرض ترک توسط الیاف مربوط به بتن خود ترمیم شونده است. به عنوان مثال، کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی (ECC) به عنوان ماده‌ای که فیبر PVA دارند الگوی ترک خوردگی چندگانه و عرض متوسط ترک زیر 60 µm را ترمیم کنند. علاوه بر این، بتن تقویت شده با کتان و الیاف کنف می‌توانند حداکثر عرض ترک را زیر ۳۰um کنترل کنند، که این به بهبود کامل بتن را تضمین می‌کند [۲۲].

بتن خود ترمیم شونده بتن خود تعمیر نیز نامیده می‌شود که خود دارای مواد چسبنده‌ای است که ترکها را پر می‌کند و آببند نیز می‌باشد. به‌طور کلی بتن خود ترمیم دو نوع است بتن ترمیم شونده خود زا و بتن ترمیم شونده مستقل. بهبودی بتن خود ترمیم و خودزا یا اتوژن فقط همراه با آب مؤثر است، که کنترل آن دشوار است. بنابراین، بسیاری از عوامل نامشخص مورد نیاز است که به صراحت مورد توجه قرار گرفته و طراحی بتن خود ترمیم کننده اتوژن را به چالش بکشد. در این حالت، بتن خود ترمیم کننده مستقل پیشنهاد می‌شود.

۶,۲- بتن خود ترمیم مستقل Autonomous

بتن خود ترمیم شونده دارای یک ظرف یا کپسول دایره ایی که در بتن جایگزین میشوند، این ظرف حاوی مواد خود ترمیم شونده هستند و وقتی که ترک در بتن توسعه پیدا کرد و پیشرفت کرد باعث شکستگی ظرف شده ماده ترمیم شونده خارج و واکنش میدهند. روند ترمیم را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. سپس واکنش شیمیایی بین ماده ترمیم کننده و بتن برای اتصال سطوح ترک خورده به هم و تغییر شکل نوک ترک صورت می‌گیرد. وقتی توسعه ترک متوقف شد خصوصیات مواد مانند سفتی، چقرمگی و مقاومت آن بهبود مییابد. برای روش میکرو کپسول، سیستم ساده است و کپسول‌ها در داخل ماتریس پراکنده می‌شوند. بتن خود ترمیم کننده خودکار در مقایسه با بتن خود ترمیم کننده اتوژن، قابل اطمینان بیشتر و وابسته به محیط اطراف نیست. اگرچه خود ترمیمی مستقل به عنوان یک رویکرد بالقوه بزرگ به نظر می‌رسد، گسترش این ایده از تحقیقات به کاربری همچنان یک چالش بزرگ است. خود ترمیمی به‌طور وسیع شامل سه قسمت است الف لوله یا تیوب توخالی ب میکروکپسول ج میکرو اورگانیزم. تیوب ازجنس شکننده است که بتواند بسادگی ماده ترمیمی در بتن رها سازند.



شکل ۱۲- روش اصلی رویکرد میکروکپسول. (a) ترک‌های موجود در ماتریس؛ (b) پارگی میکروکپسولها، ماده‌ترمیم کننده را درون حفرات مویینگی بتن رها می‌سازند (c) عامل‌ترمیم شونده با کاتالیزور تماس گرفته و سطوح ترک بسته شده را پیوند می‌دهد. (d) تصویر ESEM که میکرو کپسول پاره شده را نشان می‌دهد [۲۳].

۷- بتن خود تنظیم شونده self- adjusting concrete

بتن خود تنظیم توانایی تنظیم ساختارهای داخلی (مانند ساختارهای منافذ) و عملکرد (مانند ظرفیت گرما، میزان رطوبت و فرایند هیدراتاسیون) تحت عوامل بیرونی را دارد. این شامل عمدتاً بتن ضد طبله شدن، بتن خود تنظیم کننده رطوبت، بتن خود تنظیم پارامتر حرارتی و بتن خود تنظیم حرارت هیدراتاسیون است. بتن خودتنظیم قابلیت جلوگیری از ترک که ناشی از گرمای هیدراتاسیون سیمان، را دارد. تحقیقات و کاربردهای بتن خود تنظیم در سالهای اخیر توجه زیادی را برانگیخته است. حرارت هیدراسیون مساوی درجه حرارت محیط به اضافه $^{o}25C$ یا هر ۴۵ کیلوگرم سیمان مصرفی ۵-۹ درجه سانتیگراد بسته بنوع سیمان حرارت ایجاد میکنند.

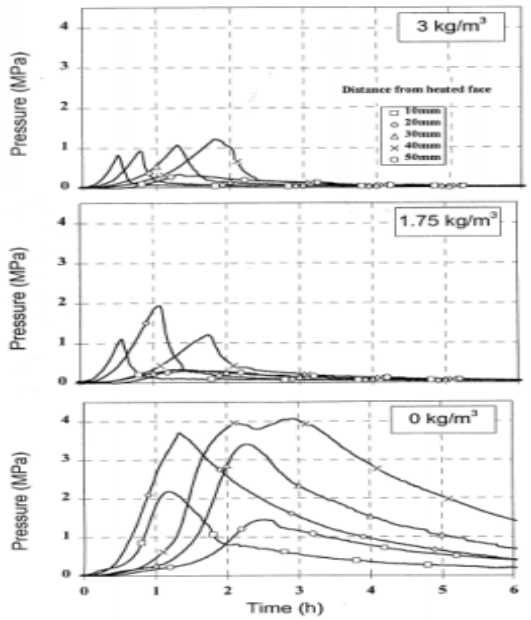
۷,۱ - بتن خود تنظیم شونده ضد طبله شدگی

Anti-spalling self adjusting concrete

بتن هنگام مواجهه با دمای زیاد یا آتش سوزی، مستعد طبله شدن است. بتن خودتنظیم شونده، که از الیاف مصنوعی (به عنوان مثال، الیاف پلی اتیلن، الیاف پلی پروپیلن و الیاف پلی آکریلیلو نیتریل) یا الیاف فلزی تشکیل شده است، میتواند ساختار منافذ و عملکرد حرارتی خود را تنظیم کند (به عنوان مثال، هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی ویژه). بتن خود تنظیم نخستین بار توسط گلدفاین در سال ۱۹۶۵ با الیاف پلی پروپیلن به عنوان مواد افزودنی در بتن اسفاده شد [۱۴].

در حال حاضر، دو دلیل عمده وجود دارد که به‌طور گسترده برای ریختن بتن در دمای بالا پذیرفته شده است [۱]. دلیل اول اصل فشار بخار داخلی است. بخار آب در اثر فرار از منافذ مویینه بتنی در دمای بالا مسدود می‌شود. این امر باعث افزایش فشار بخار و تنش و انبساط در بتن می‌شود. سپس با افزایش دمای محیط، فشار بخار و تنش انبساط در بتن افزایش می‌یابد. دلیل دوم اصل تنش حرارتی که توسط گرادیان دما توسط دمای محیط بالا ایجاد می‌شود. گرادیان دما می‌تواند تنش حرارتی را القا کند که درنهایت منجر به طبلگی بتن خواهد شد.

الیاف مصنوعی را می‌توان به بتن اضافه کرد تا طبلگی بتن ناشی از اصل فشار بخار را تا حد زیادی مرتفع کند. نقطه ذوب الیاف مصنوعی از ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد متغیر است [۱۶]. با توجه به یکنواختی پراکندگی الیاف مصنوعی و حجم کم الیاف، الیاف مصنوعی هنگام رسیدن دما به نقطه ذوب، ذوب می‌شوند و کانالهای متعددی را در داخل بتن تشکیل می‌دهند. حفرات مویینه داخل بتن فرصت تبخیر آب را فراهم می‌کنند، بنابراین فشار بتن و احتمال طبله شدن بتن را کاهش می‌دهد [۷]. وجود الیاف پلی پروپیلن می‌تواند به‌طور موثری از طبله شدگی بتن HPC جلوگیری میکند. عملکرد پراکنده و ریزساختار بتن الیاف پلی پروپیلن بطور وسیعی را بررسی شد [۹]. با توجه به آزمایش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری روی بتن با محتوای فیبر مختلف، فشار بخار داخل بتن آشکارا توسط الیاف پلی پروپیلن تحت دمای بالا کاهش می‌یابد. منحنی‌های فشار در مقابل زمان شکل مشابهی با محتوای فیبرهای مختلف دارند. با این وجود، با افزایش مقدار فیبر همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، ارتفاع نوک یا پیک به‌شدت با شیب تندی کاهش می‌یابد. می‌یابد وقتی که محتوای الیاف پلی پروپیلن از ۰ به ۳ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش می‌یابد فشار اوج داخلی به یک چهارم کاهش می‌یابد و فشار گرما به نصف کاهش پیدا میکند. علاوه بر این، مقدار فیبر ۲ کیلوگرم در مترمکعب با طول فیبر ۲۰ میلی‌متر، بهینه ترین مقدار و اندازه الیاف برای جلوگیری از طبله شدگی در بتن C100 HPC است.



شکل ۱۳- منحنی فشار در برابر زمان بتن حاوی درصد مختلف الیاف [۱۹]

با توجه به هدایت حرارتی کم بتن، برای کاهش تنش حرارتی بتن باید اختلاف دما بین قسمتهای مختلف سازه بتن کاهش یابد. از آنجا که هدایت حرارتی فولاد تقریباً ۴۰ برابر بیشتر از بتن معمولی است، اغلب الیاف فولادی به داخل بتن اضافه می‌شوند تا قوام سرعت افزایش دما بین قسمت داخلی و سطح بتن حفظ شود، در نتیجه باعث کاهش طبله شدگی بتن می‌شود.

اگرچه بتن خودتنظیم کننده ضد طبله می‌تواند به‌طور مؤثر احتمال طبله شدن بتن را کاهش دهد، اما دوام و مقاومت فشاری بتن تضعیف می‌شود، زیرا افزودن الیاف باعث افزایش هوای بتن می‌شود. علاوه بر این، الیاف باعث کاهش کارایی بتن تازه، افزایش مشکلات اجرایی و افزایش هزینه تراکم [۵] می‌شوند.

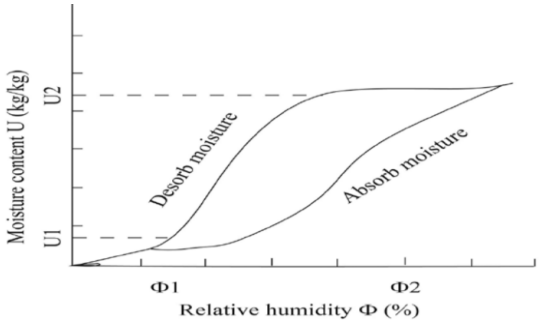
۷,۲- بتن خود تنظیم کننده رطوبت

Moisture self adjusting concrete

محیط مرطوب نه تنها به دوام زیرساخت‌ها و مصرف انرژی کمک می‌کند بلکه تأثیر بسزایی در مشکلات سلامت بتن دارد. برای ایجاد یک محیط راحت و سلامت، کنترل سطح رطوبت مهم است. بتن خود تنظیم رطوبت از بتن با مواد تنظیم کننده رطوبت (به عنوان مثال، زئولیت، آتاگلولیت یا meerschaum) ساخته شده است و می‌تواند رطوبت داخل آن را با رطوبت خارجی تغییر دهد [۱]. بتن خود تنظیم رطوبت حاوی پودر زئولیت، ابتدا

توسط محققان ژاپنی پیشنهاد شد. با تکیه بر خاصیت جذب و رطوبت خاص خود، نیازی به کمک هیچ انرژی و تجهیزات مصنوعی ندارد. کلسیم سیلیکات هیدراته ژئولیت حاوی منافذی به قطر 10^{-10} - $9x10^{-10}$ 1-10 متر است. ظرفیت جذب بخار آب بتن با ساختار متخلخل و چند لایه لانه زنبوری پودر ژئولیت، که دارای حجم منافذ و سطح بزرگتر است، بهبود مییابد. بتن خود تنظیم رطوبت ساخته شده از بتن با ژئولیت، تفاوت زیادی بین شرایط رطوبت مختلف نشان میدهد. بتن خود تنظیم رطوبت در محیط رطوبت کم به سرعت به حالت تعادل رطوبت میرسد. در مقابل، رطوبت بتن خود تنظیم با گذشت زمان در یک محیط با رطوبت اشباع افزایش مییابد [۱۳].

نمودار اصولی کار بتن خودتنظیم رطوبت در شکل ۱۴ نشان داده شده است. هنگامی که رطوبت نسبی هوا از مقدار مشخصی Φ2 فراتر رود، بتن خود تنظیم کننده رطوبت، رطوبت موجود در هوا را جذب میکند تا از افزایش رطوبت نسبی هوا جلوگیری کند. هنگامی که رطوبت نسبی هوا کمتر از مقدار معینی Φ1 باشد، بتن خود تنظیم کننده رطوبت باعث جلوگیری از کاهش رطوبت نسبی هوا میشود. اگر رطوبت بتن بین U1 و U2 باشد، رطوبت نسبی داخلی بهطور خودکار در محدوده Φ1 – Φ2 حفظ میشود [24].



شکل ۱۴- منحنیهای تعادل جذب و دفع رطوبت، بتن خودتنظیم رطوبت [۲۴]

۷,۳ - بتن خود تنظیم کننده پارامتر حرارت
Thermal parameter self-adjusting concrete

بتن خودتنظیم پارامتر حرارتی نوعی بتن هوشمند است. که در آن از مواد تغییر فاز phase change material (PCMs) برای دستیابی به عملکرد تنظیم پارامترهای حرارتی استفاده میشود. PCM ها هنگام جذب مواد از جامد به مایع و برعکس، توانایی جذب یا آزاد سازی گرما رادارند. بتن خودتنظیم پارامتر حرارتی میتواند با کاهش فراوانی نوسانات دما، دما را در نزدیکی دمای موردنیاز حفظ میکند [۱۲]. بتن خودتنظیم پارامتر حرارتی در زمینه بهره وری انرژی ساختمان در مقایسه با بتن معمولی دارای مزایای بسیار زیادی است. این ماده میتواند درجه حرارت داخلی را از طریق ظرفیت حرارتی خاص خود تثبیت کند. اگرچه بتن خودتنظیم پارامتر حرارتی عملکرد بهتری در ذخیره سازی گرمای نهان دارد، اما PCM نیز دارای معایبی است. به عنوان مثال، PCM ها وقتی به فاز مایع تبدیل میشوند، در بتن مقدار نشت اضافه میشود. برخی از PCM ها دارای خاصیت خوردگی در بتن هستند. علاوه بر این، تنش ناشی از فرآیند تغییر فاز PCM ها میتواند منجر به آسیب در بتن شود، بنابراین بتنریزی با مخلوطهای مختلف PCM دارای دوام مناسب نیستند [۱].

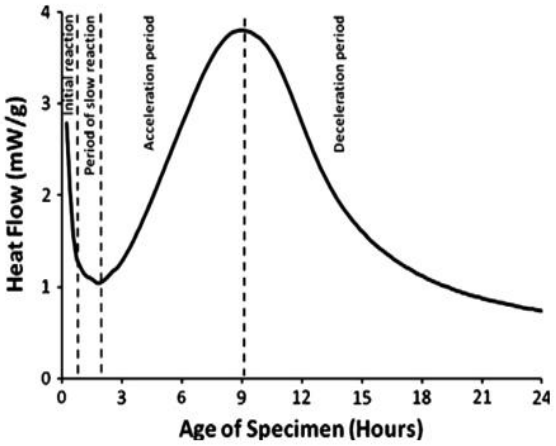
۷,۴ بتن خود تنظیم کننده حرارت هیدراتاسیون Hydration heat self-adjusting

بتن به دلیل مقاومت کششی کم، مستعد ظهور خرابی شکننده است. دلایل زیادی برای ترک خوردگی بتن وجود دارد، اما دلیل اصلی گرمازدایی بتن است. در بتن خود تنظیم حرارت هیدراتاسیون از پرکنندههای عامل دار استفاده میشود. پرکنندههای عملکردی عمدتاً از ترکیبات معدنی، تأخیر دهندهها، پلیمرهای مبتنی بر نشاسته، PCM ها تشکیل شدهاند. این مواد میتوانند بهطور مؤثر گرمای هیدراتاسیون را کاهش و یا روند آنرا آهسته میکنند، بنابراین با کنترل ترکهای حرارتی دما را در بتن کنترل میکند [۱].

بتنهایی با استحکام کم و گرمای کم هیدراتاسیون عمدتاً در پروژههای در مقیاس کوچک قبل از دهه ۱۹۴۰ مورد استفاده قرار گرفتند. از دهه ۱۹۴۰ به بعد، بتن با مقاومت بالا در سازههای بتنی بیشتر و گستردهتر استفاده میشود. مشکل ترک خوردگی بتن مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱۷]. از یک طرف، ترکها میتوانند باعث بروز مشکل نشت آب از بتن و افزایش هزینههای نگهداری پروژه شوند. از طرف دیگر، ترکها باعث میشوند که مواد مضر خورنده وارد فضای بتنی شود، بنابراین ماندگاری و دوام بتن را تحت تأثیر قرار میدهد [۱۵]. این مطالعات نشان داد که حدود ۸۰ درصد ترکها ناشی از گرمای هیدراتاسیون بتن است. گرمای حاصل از هیدراتاسیون C_3S و C_3A منجر به افزایش درجه حرارت بتن میشود، همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. از آنجا که میزان اتلاف حرارت هیدراتاسیون داخلی بتن کندتر از میزان اتلاف حرارت خارجی است، گرادیان دما بین مرکز و سطح بتن تنش حرارتی ایجاد کند. هنگامی که تنش حرارتی بیش از مقاومت کششی نهایی بتن باشد، سطح بتن طبق اصل انبساط و انقباض خراب میشود [۱۸].

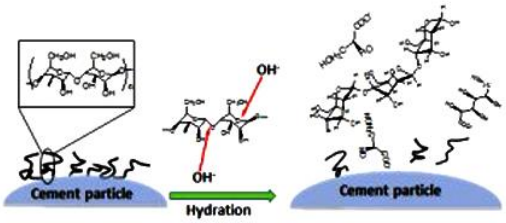
افزودن مقدار مناسب خاکستر بادی در بتن باعث کاهش محتوای C_3S و C_3A در بتن میشود و مقدار آزاد شدن حرارت هیدراتاسیون ناشی از خاکستر بادی به مراتب کمتر از C_3S و C_3A است. بنابراین میزان انتشار و مقدار حرارت هیدراتاسیون بتن را کاهش میدهد. بتن خود تنظیم حرارت هیدراتاسیون با خاکستر بادی نه تنها میتواند سرعت انتشار گرمای هیدراتاسیون را کم کند، بلکه اوج گرمازدگی هیدراتاسیون را به تعویق میاندازد [۲۱].

از آنجا که مواد افزودنی تأخیر دهنده مستعد جذب سطح ذرات سیمان هستند، افزودن تأخیر دهندهها میتواند پایداری ذرات سیمان را بهبود بخشد و تراکم ذرات سیمان را مهار کند. بتن خود تنظیم حرارت هیدراتاسیون با تأخیر دهنده میتواند بطور موثری هیدراتاسیون بتن را به تأخیر اندازد و باعث کاهش ترک حرارتی در بتن شود. بسیاری از تحقیقات نشان دادهاند که هرچه میزان تأخیر دهندهها بیشتر باشد، توانایی قویتر در کاهش حرارت هیدراتاسیون سیمان نیز وجود دارد [۲۱].

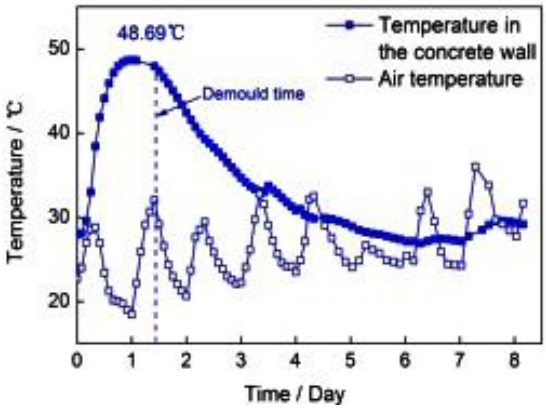


شکل ۱۵ – منحنی جریان حرارت در هیدراسیون بتن [۲۱]

حرارت هیدراتاسیون بتن خود تنظیم ساخته شده از بتن با پلیمرهای مبتنی بر نشاسته با بتن خود تنظیم با تأخیر دهنده دیگر متفاوت است. پلیمر می‌تواند بدون تغییر کل حرارت تولید شده، سرعت تکامل حرارت هیدراتاسیون را کاهش دهد. میزان هیدراتاسیون به دلیل کندی آزاد شدن و جذب پلیمرهای نشاسته‌ای بر روی ذرات سیمانی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. مکانیسم پلیمرهای مبتنی بر نشاسته روی ذرات سیمان در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بتن خودتنظیم گرمای هیدراتاسیون در پروژه فرودگاه بین المللی نانجینگ (چین) بکار برده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، افزایش دما جداره جانبی در حرارت۲۱ درجه سانتیگراد کنترل میشود.



شکل ۱۶ مکانیزم الیاف پلیمری نشاسته‌ای‌ای روی ذرات سیمان[۲۲]



شکل ۱۷ مکانیزم حرارت هیدراسیون/زمان بتن خود تنظیم شونده[۲۱]

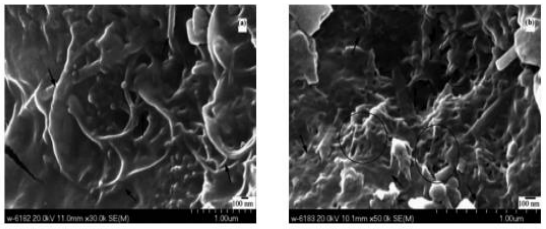
حرارت هیدراسیون بتن خود تنظیم با PCMs همچنین باعث کاهش دمای هیدراسیون بتن می‌شود. زمانیکه دمای هیدراسیون به‌اندازه دمای ذوب PCMs رسید فاز تغییر می‌کند، بنابراین ترکهای حرارتی ناشی از حرارت هیدراسیون کاهش می‌یابند. حرارت هیدراسیون بتن خود تنظیم به‌طور مؤثر حرارت هیدراسیون بتن را به مقدار ۱۵ تا ۲۵ درجه در پیک (نقطه نهایی) خود کاهش می‌دهند. اگر چه بتن تنظیم شده حرارت باعث کنترل تقریبی ترکهای حرارتی در بتن می‌شوند ولی مواد افزودنی در این بتن ها باعث ضعیف شدن خواص مکانیکی می‌شوند [۲۲].

۸- بتن خود میرا Self-damping concrete

عملکرد میرایی بتن ظرفیت تغییر انرژی لرزه ایی به اشکال دیگر انرژی است. برای کاهش لرزش در پل‌ها، زیر ساخت های صنعتی و غیرنظامی بسیار مهم است. بتن یکی از اصلی‌ترین مواد مورد استفاده در زیرساخت‌ها است، اما خاصیت میرایی کم بتن استفاده از آن در مهندسی سازه را محدود می‌کند، به ویژه برای استفاده بیشتر در سازه‌هایی که تحت بارهای مکرر لرزشی قرار دارند. بنابراین، بتن خود میرا در فرایند جستجوی راه حل‌ها توسعه یافته است. بتن خود میرا از طریق پرکننده‌های عامل دار مانند لاتکس پلیمری، الیاف MWCNTs یا نانو تیوب کربن چند جداره، دود سیلیس (SF)، متیل سلولز (MC) و گرافیت، خاصیت میرایی خود را بهبود می‌بخشد.

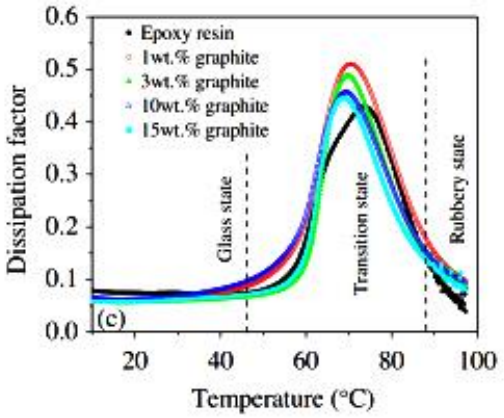
خاصیت میرایی بتن خود میرا که حاوی لاتکس پلیمری است به دلیل پراکندگی ذرات پلیمری در بتن است. در عین حال، ساختارهای شبکه‌ی فضایی مداوم سه بعدی را تشکیل می‌دهد که نه تنها می‌تواند تمرکز تنش بتن را به‌طور موثری کاهش دهد، بلکه ظرفیت تغییر شکل و اتلاف انرژی را نیز افزایش می‌دهد. در نتیجه می‌تواند سرعت توزیع ریز ترکها را در بتن کاهش دهد. بتن عملکرد بهتری از نظر میرایی دارد وقتی نسبت پلیمر / سیمان بین ۱۰٪ – ۲۰٪ باشد.

نسبت میرایی بتن با تمرکز مختلف کربن نانولوله چند جداره MWCNTs (کسری از وزن ملات بتن ۰، ۰,۱٪، ۰,۲٪، ۰,۵٪، ۲,۰٪) را مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد که MWCNT ها در اندازه‌های مختلف گرد هم می‌آیند، بنابراین منجر به سطوح تماس بین الیاف و بتن مجاور و مرزهای چند فازی بیشتر می‌شوند. نسبت میرایی بتن با نسبت وزنی ۰,۵٪ از MWCNT در مقایسه با بتن معمول بمقدار ۲۴,۵۱٪ افزایش یافته است [۱]. با افزایش کسری از وزن MWCNT، نسبت میرایی بتن روند افزایشی دارد. در بخش وزنی بالاتر از MWCNT ها سطح تماس بیشتری بین بتن و MWCNT وجود دارد که منجر به خاصیت میرایی بیشتر بتن می‌شود (همان‌طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است).



شکل ۱۸ – میکرو ساختار بتن خود میرا [۱۴]

افزودن نانولوله‌های کربنی در مقایسه با بتن ساده باعث افزایش نسبت سطح میرایی بتن به مقدار ۲۰۰٪ می‌شود. وانگ و همکاران [۱۴] گزارش دادند که با افزودن دود سیلیس به بتن، می‌توان میرایی لرزشی بتن را افزایش داد. خاصیت میرایی بتن با گرافیت به وضوح بهتر از بتن با رزین اپوکسی است. بزرگ‌ترین ضریب افت میرایی بتن ۰،۵۱ در دمای انتقال شیشه (GT) ۷۰ درجه سانتیگراد است در درصد گرافیت ۱% وزن بتن است. همان‌طور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

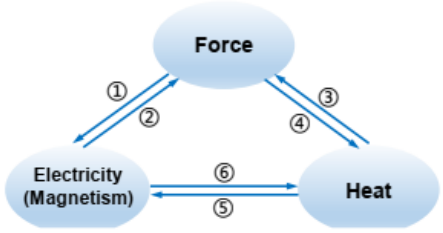


شکل ۱۹ – فاکتور انتشار / حرارت در بتن خود میرا[۱].

اگرچه بتن خود میرا از خاصیت میرایی بهتری نسبت به بتن متداول برخوردار است، اما برخی از پرکننده‌ها ممکن است مقاومت فشاری بتن را تا حدی کاهش دهند. علاوه بر این، عدم تحقیقات سیستماتیک برای بررسی دوام بتن خود میرا که شامل ثبات حجمی، نفوذپذیری و مقاومت در برابر سرما از نیازهای تحقیقی در بتن خود میرا است.

۹- بتن خود گرمایش self –heating concrete

خواص بتن خود گرمایش نیز متکی بر رسانایی الکتریکی بتن، مشابه به بتن حسگر است. هدف از بتن خود حسگر گزارش تغییرات بتن از طریق اندازه‌گیری سیگنال‌های الکتریکی است، درحالی‌که بتن خود گرمایش تولید گرما با اعمال ولتاژ به بتن بر اساس قانون ژول است [معادله (۱)]. در واقع، همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده شده است، بین خواص بتن های مختلف رسانا (نیرو، گرما، الکتریسیته یا مغناطیس) رابطه‌ای وجود دارد.



شکل ۲۰– خواص و رابطه اتصال دوبل مواد بتن هوشمند

به‌طور کلی، بتن معمولی بخاطر انسجام و مقاومت بالا بسادگی گرم نمی‌شود. پس، پرکننده‌های الکتریکی مانند الیاف کربن، الیاف استیل، الیاف فولاد، پودرهای نیکل و گرافیت برای انتقال پذیری حرارت بتن استفاده میشوند [۶]. بنابراین، فرایند ساخت بتن مستقل اساساً با بتن خود حسگر یکسان است.

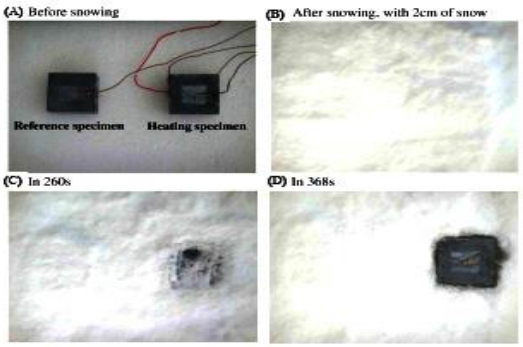
با استفاده از یک عنصر گرمایشی، بتن رسانا مانند بخاری برقی است، بنابراین بتن خود گرمایشی نیز بتن الکتریکی نامیده می‌شود. با توجه به فرمول قانون ژول، مقاومت یک معیار غالب است که حاکی از اثربخشی یک ماده برای گرمایش خود به ویژه در رابطه با توان و حداکثر دما است. مقدار مشخص پایداری در مقابل حرارت برای بتن وجود دارد [۱۷]، یعنی، زیاد یا خیلی زیاد برای مواد مورد استفاده به عنوان عنصر گرمایشی است. از آنجا که یک عنصر الکتریکی با مقاومت نسبتاً بالا می‌تواند جریان بسیار کمی را در عنصر گرمایش ایجاد کند (مگر اینکه ولتاژ بسیار زیاد باشد) در مقابل، یک عنصر الکتریکی با مقاومت کم بیش از حد، به یک جریان بسیار زیاد نیاز دارد تا به یک مقاومت خاص برسد [۱۸]. علاوه بر این، پایداری مقاومت یک نیاز اساسی برای بتن رسانا برای تبدیل شدن به خود گرمایش است. تنها با یک مقاومت پایدار، توان الکتریکی پایدار قابل دستیابی خواهد بود. مطالعات نشان می‌دهد که مقاومت بتن رسانا گرایش به پایداری دارد، به شرطی که محتوای پرکننده رسانا نزدیک یا بیشتر از آستانه نفوذ باشد [۱۹].

$$Q = I^2Rt \text{ یا } P = I^2R \qquad (۱)$$

در جایی که Q مقدار کالری ، I جریان ، R مقاومت، t زمان و P قدرت حرارتی است.

یکی از کاربردهای بتن خود گرمایش، گرمایش خانگی است. این امر با تعویض بتن خود گرمایشی بتن های سنتی در دیوار یا کف و اعمال ولتاژ بر روی آن‌ها انجام می‌شود و سپس گرما به‌طور مداوم از دیوار یا کف ساطع می‌شود. نکته جالب‌تر اینکه، این نوع بتن رسانا کاملاً بی خطر است زیرا فقط در بتن ولتاژ و جریان کوچکی لازم است و حتی اگر آن را لمس کنید، هیچ الکتریسیته نیز احساس نمی‌شود. نوعی اسلب بتنی سیاه کربنی (CBCS) به عنوان ماده کف سازی خود گرم کننده استفاده شده است. تحقیقات نشان می‌دهد که CBCS قادر به افزایش دمای یک اتاق کوچک تا ۱۰ درجه سانتیگراد در ۳۳۰ دقیقه و علاوه بر این، سیستم گرمایش تأمین شده توسط اسلب CBCS پایدار و قابل کنترل بود.

در اتحاد جماهیر شوروی سابق، کف گرمکن برقی و آجر خزدار توسط بتن خود گرمایش ساخته شده و از آن‌ها برای تأمین گرمای محل سکونت، کارخانه و گلخانه استفاده میشد. یکی دیگر از کاربردهای بتن حسگر، ذوب برف است. در آب و هوای یخبندان، بسیاری از زیرساخت‌های حمل و نقل (مانند راه ها، پل‌ها و باند فرودگاه) مستعد تجمع یخ هستند. جمع شدن یخ یا برف در این زیرساخت‌ها ممکن است باعث ایجاد موقعیت‌های خطرناکی برای ترافیک شود [۱]. بنابراین، بهبود شرایط زیرساخت‌های حمل و نقل بصورت به موقع و کارآمد امری ضروری است. روش‌های سنتی برطرف کردن و دفع برف (مانند استفاده از نمک ضد یخ) باعث آسیب و خوردگی شدید آرماتور در بتن خواهد شد. در مقایسه با روش‌های سنتی، بتن خود گرمایش دارای مزایای بهره وری بالا، بدون اثر منفی و بدون آلودگی است. ایده استفاده از الیاف فولادی بریده بریده شده به عنوان پرکننده‌های رسانا ارائه شد و آزمایش‌های زیادی درمورد استفاده از یخ زدایی روی عرشه پل انجام شد [۷]. پس از آن، بتن خود گرمایشی در اتوبان روکا اسپور در آمریکا اعمال شد و الیاف فولاد توسط گرافیت (با محتوای ۲۵٪) جایگزین شد. تاکنون این سیستم بتن بخوبی کار می‌کند و هیچ کاهش عملکردی رخ نداده است. تجزیه و تحلیل هزینه‌های اولیه نشان داد که عرشه پل بتنی رسانا پیشنهادی ارزان‌تر از روش‌های معمول یخ زدایی بتن است [۱]. از ذرات نیکل به عنوان پرکننده‌های رسانا و عناصر گرمایش در بتن استفاده شد. نتایج تجربی نشان داد که بتن با ذرات نیکل (۱۲,۰ درصد و ۲,۶–۳,۳ میکرومتر در قطر) می‌تواند ۲ سانتی متر ضخامت برف را در ۳۶۸ ثانیه با ولتاژ ورودی ۱۵ ولت ذوب کند. تصاویر در طول آزمایش ذوب برف در شکل ۲۱ نشان داده شده است. بتن خود گرمایشی نیز برای جلوگیری از لغزش مسافران روی سکوی یخ زده در مترو در لندن اعمال شد. بتن های خود گرمایشی که در سیستم عامل استفاده می‌شوند با سرعت کم تحت اعمال ولتاژ گرم می‌شوند. با این حال، باید توجه داشت که بتن خود گرمایشی به خاصیت گرمایش عنصر از جمله سرعت حرارتی بالاتر، خواص مکانیکی بالا و هدایت الکتریکی پایدار نیاز دارد. راندمان گرمایش ممکن است تحت تأثیر عوامل دمای محیط، سرعت باد و ضخامت لایه یخ / برف باشد. الیاف فولادی در بتن می‌توانند نیازهای مهندسی و کاربردی را براورده کنند.



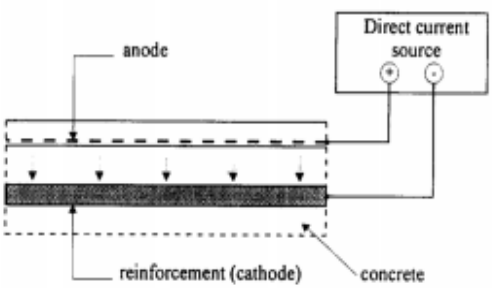
شکل ۲۱ روند برف–ذوب شدگی بتن خود حرارت زا با پودر نیکل. شکل A نمونه مرجع و نمونه حرارت داده را قبل از بارش برف، شکل B بعد از ۲ سانتیمتر بارش برف، شکل C بعد از ۲۶۰ ثانیه و شکل D بعد از ۳۶۸ ثانیه را نشان می‌دهند.[۱۷]

با این وجود، کارایی بتن با داشتن محتوای بالاتر الیاف فولادی ضعیف می‌شود، همچنین در الیاف فولادی براحتی خوردگی رخ می‌دهد. بنابراین، بتن خود گرمایش نوع جدید همراه با عملکرد گرمایشی بالاتر و پایداری بلند مدت هنوز برای توسعه نیاز به تحقیقات کاربردی بیشتر دارد.

۱۰- بتن خود فداشونده self- sacrificing concrete

بتن خود فدا شونده، که همچنین بتن آندی فداشونده نام دارد، به بتن با ظرفیت فدا کردن خود برای محافظت از سیستم کاتد و حفاظت کاتدی تحت تأثیر جریان خود القا (ICCP) اشاره دارد. بتن های فداشونده از بتن رسانا مانند بتن رسانا با الیاف کربن و بتن رسانا با الیاف فولادی ساخته شده‌اند.

صدمات ناشی از خوردگی آرماتورهای فلزی ۸۰٪ عامل اصلی خوردگی بتن مسلح است. سیستم حفاظت کاتدیک (CP)، که در آن از آندهای فداشونده جهت حفاظت کاتدی و ICCP به عنوان دو مؤلفه اصلی حفاظت کاتدی برای کنترل خوردگی استفاده می‌شود، به عنوان یک روش اصلی برای محافظت در برابر خوردگی در سازه‌های بتنی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۲۲ [۱] نشان داده شده است، در سیستم‌های ICCP، جریان مستقیم بتن از یک آند بتن فداشونده که معمولاً روی سطح بتن به یک کاتد گذاشته می‌شود. آند به ترمینال مثبت یک منبع مستقیم با ولتاژ پایین متصل می‌شوند، و کاتد به ترمینال منفی متصل می‌شود. به منظور به تعادل رساندن آند الکترونها را از دست می‌دهد و بعد از حدود ۳۰ روز از بین می‌روند یا فدا می‌شوند.



شکل ۲۲–تصویر شماتیکی از حفاظت کاتدی یک سازه بتنی[۲۱]

در آغاز سال ۱۹۷۰ ابتدا بتن فداشونده را به عنوان آند در سیستم ICCP روی یک عرشه پل ۳۰۷ متر مربع اعمال شد. از بتن فداشونده و Ti-RuO2 به عنوان آند برای ساختن یک سیستم ICCP استفاده شد. شکل ۲۳ روش ساخت آند بتن فداشونده را نشان می‌دهد. میتوان آند فداشونده را با آند معمول Ti-RuO2 مقایسه کرد و پروفیل تمرکز کلرید در اعماق مختلف، مشخصات تمرکز کلرید اولیه، مشخصات تمرکز کلرید نهایی (در کاهش میزان Cl^-) را اندازه‌گیری کرد.

شکل ۲۳- مونتاژ دستگاه با آند بتنی فداشونده (۱) بتن فداشونده با استفاده از گان هوای فشرده شده روی سطح نمونه اسپری می‌شود. (۲) یک لایه جاذب از پلی پروپیلن روی سطح نمونه قرار می‌گیرد. (۳) مدار الکتریکی نصب شده است. قطب مثبت منبع به آند متصل شده و قطب منفی به یکی از آرماتور طولی نمونه (کاتد) وصل شده است[۲۱]

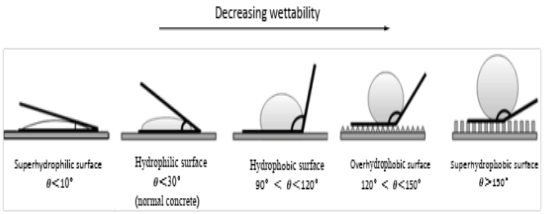
برای جلوگیری از خوردگی آرماتورها از روکش بتنی فداشونده به عنوان آند استفاده شده در بالای عرشه پل به عنوان روکش پاشش شده است. چهار اسلب یا دال با اندازه و فاصله‌های مختلف الکترود مورد آزمایش قرار گرفت. ولتاژ ۲ ولت اعمال شد ازنظر پاسخگویی به قطبی شدن ۴ ساعت ۱۰۰ میلی ولت ولتاژ نیاز داشت در هر دال در هر آزمایش، CP کافی بدست آمد.

در این سیستم ICCP، آند پس از گذشت حدود ۳۰ روز از بین میرود، درحالی‌که با از بین بردن روکش بتنی تخریب شده می‌توان یک پوشش بتنی فداشونده جدید را روکش کرد. در نتیجه، آند می‌تواند به محافظت از عرشه‌های پل ادامه دهد. بتن فداشونده به دلیل مزایای زیر دارای چشم انداز کاربرد امیدوارکننده است: (۱) اجرای حفاظت کاتدیک نسبتا آسان است و می‌توان آند فدا شونده را با گان و بکمک هوای فشرده شده اسپری کرد و به عنوان روکش برای ترمیم بزرگ سطوح عمودی مانند تکیه گاه‌های ساختاری، به ویژه عناصر بتنی ساختاری با اشکال پیچیده نیز استفاده کرد (۲) نه تنها کارکرد ساختاری دارد بلکه قابلیت تعویض دارد (۳) نسبت به انواع دیگر آند کم هزینه است. با این حال، برخی از مسائل وجود دارد مانند پایداری ضعیف بلند مدت و دوام مواد و یکسو کننده‌های آند، محدودیت برای نظارت و حفظ سیستم، درک کافی از فناوری بنیادی با توجه به بتن فداشونده و تخریب خواص مکانیکی در حین سرویس دهی مانند شکستگی هیدروژنی بین آرماتور و بتن و کاهش مقاومت باند آن‌ها.

۱۱- بتن خود تمیز شونده self-cleaning concrete

بتن خود تمیز کننده بتن با توانایی‌های مقاومت در برابر خیس شدن توسط مایعات یا تمیز کردن مواد خطرناک در سطح بتن به خودی خود است. برای بدست آوردن بتن خود تمیز شونده، دو استراتژی معمولاً استفاده می‌شود: فوق آبگریز و فوتوکاتالیستی.

مواد جامد مطابق زاویه تماس با آب (WCA) به صورت آبدوست و آبگریز تقسیم می‌شوند. تماس با زاویه به عنوان زاویه بین سطح جامد و خط مماس فاز مایع در سطح فازهای جامد توصیف شده است. برای یک زاویه تماسی بیش از ۹۰ درجه، رفتار آبگریز به نظر می‌رسد و یک زاویه تماسی کمتر از ۳۰ درجه می‌تواند پدیده آبدوست را نشان دهد. سطوح فوق هیدروفوبیک (آبگریز) و فوق هیدرو فولیک (آبدوست) به ترتیب زیر طبقه سطوح آبگریز و سطح آبدوست هستند. زوایای تماسی که توسط قطرات آب بر روی سطح فوق هیدروفوبیک ایجاد می‌شوند، معمولاً بیش از ۱۵۰ درجه هستند و آنهایی که بر روی سطوح فوق آبگریزی قرار دارند کمتر از ۱۰ درجه هستند، همان‌طور که در شکل ۲۴ نشان داده شده است.

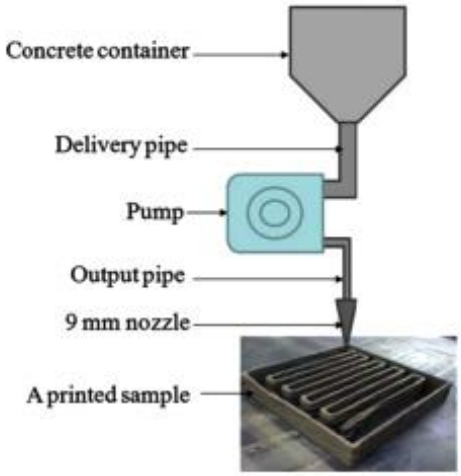


شکل ۲۴- بترتیب از چپ: سطح فوق آب دوست، سطح آب دوست، سطح آبگریز، سطح روی آبگریز، سطح فوق آبگریز[۲۱]

بتن معمول متخلخل است بنابراین قابلیت جذب آب را دارد که آن را هیدرو فولیک (آبدوست) می‌گویند. با افزودن بعضی مواد شیمیایی مانند وکس (wax)، ذرات نانو، روغن و پلیمر مقاوم در برابر آب به بتن رفتار سوپر هیدرو فوبیکی یا فوق آبگریزی و خود تمیز شونده بدست میاید.

۱۲- بتن خود شکل دهنده self-shaping concrete

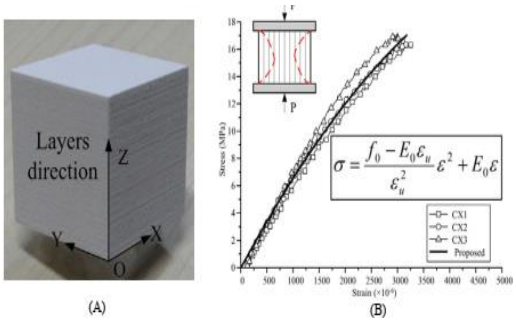
فناوری چاپ سه بعدی (DP۳)، که از اواخر دهه ۱۹۸۰ در ژاپن آغاز شد، در سی سال گذشته دستخوش پیشرفت شده است. به عنوان یک زیر گروه از فرآیند تولید افزودنی، اجسام جامد سه بعدی به‌طور مستقیم توسط فناوری DP۳ که در یک مدل دیجیتال چاپ می‌شوند [۲۴]. DP۳ می‌تواند با استفاده از کاهش مصرف مواد و نیروی کار مرتبط، تقاضای تولید هر نوع هندسه مورد نظر را برآورده سازد. تا به امروز، این فناوری با موفقیت در پزشکی، هوافضا و خودروسازی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین برای چاپ مؤلفه‌های معماری و ساختاری نوید بخش است شکل ۲۵.



شکل ۲۵- شماتیک سیستم تحویل بتن[۲۴]

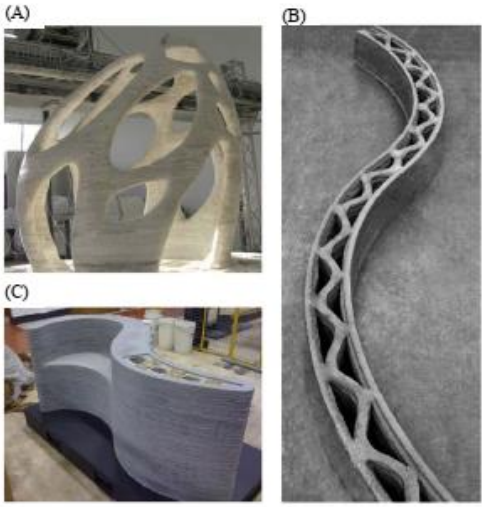
دستگاه چاپ سه بعدی بتن و سیستم تحویل بتن ۳DP بدین ترتیب است که نازل (افشانک) در زیر مسیرهای از پیش تعیین شده با بتن تازه که به‌طور همزمان از یک لایه خارج می‌شود، گردش می‌کند. وقتی همه لایه‌ها روی یک سطح دیگر جمع شدند، یک مؤلفه ساختار کامل شده به پایان می‌رسد. از آنجا که از لرزش بی نیاز است، انتظار می‌رود که بتن در ۳DP ویژگی‌های بتن پاششی را با بتن خود متراکم ترکیب کند. تاکنون تعریفی یکنواخت برای این بتن خاص وجود ندارد و "بتن خود شکل دهنده" بر اساس روند کار آن در اینجا نامگذاری شده است.

بتن خود شکل دهنده به عنوان "جوهر" پرینتر سه بعدی، کارایی آن برای کیفیت ساختهای چاپی بسیار مهم است. بتن باید به راحتی از سیستم لوله و پمپ- نازل عبور کند تا لایه کوچک بتنی خارج شود. در همین حال، چسبندگی و استحکام کافی برای بتن برای پرینت سازه‌هایی با ارتفاع یا لایه‌های معین لازم است اما هیچ تغییر شکل زیان آور رخ نمی‌دهد. ازنظر رئولوژی، ویسکوزیته نسبتاً بالاتر و تنش عملکرد کمتر برای بتن برای رسیدن به انعطاف پذیری مناسب مفید است. علاوه بر این، بتن باید زمان تنظیم کوتاه و استحکام اولیه بالایی را فراهم کند [۱۹]. برای دستیابی به طراحی بهینه مخلوط بتن خود شکل دهنده با الیاف ریز با کارایی بالا تقویت شده است. تأثیر مواد افزودنی نظیر مقدار مصرف نگهدارنده، میزان مصرف مواد تسریع دهنده و مقدار سوپرپلاستایزر بر کارآیی و تغییر کارایی با زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که ساختار الیاف بصورت لایه‌ای است، ساختار ناهمسانگرد به احتمال زیاد به عنوان حفره‌های کوچک در لایه‌های داخلی خود عمل می‌کند و منجر به ضعف ساختار می‌شود. خواص مکانیکی و مقاومت مکانیکی آن به میزان قابل توجهی به جهت گیری بار نسبت به لایه‌ها بستگی دارد. استحکام پیوند بین بتن و الیاف نیز می‌تواند تا حد زیادی بر خاصیت سخت شده بتن تأثیر بگذارد. مواد سیمانی گچ با مواد اصلی گچ، وینیل پلیمر و کربوهیدرات، رطوبت سنج و آب برای چاپ نمونه‌های بتن سه بعدی به تصویب رسید و سپس خصوصیات مکانیکی این نمونه‌ها توسط فنگ مورد مطالعه قرار گرفت (همان‌طور که در شکل ۲۶ (الف) نشان داده شده است). یک رفتار ارتوتروپیک ظاهری در خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها وجود دارد. بر اساس نتایج تجربی، الگویی برای رابطه استرس-کرنش از آزمون فشاری یک محوره ارائه شده است، همان‌طور که در شکل ۲۹ (ب) نشان داده شده است. برای بهینه سازی و استحکام از سیمان پرتلند سخت شده سریع (RHPC) به همراه ۳٪ PVA به عنوان پودر و آب نمک زدایی شده به عنوان مایع استفاده شد. مدول پارگی اندازه‌گیری شده (MOR) به دلیل کاهش تخلخل و کیورینگ نمونه ها در آب ارتقاء پیدا کرد [۱].



شکل ۲۶- (الف) نمونه بتن پرینت سه بعدی. (ب) رابطه تنش/کرنش تحت بار فشاری [۱۹]

کاربرد فناوری ۳DP طی سالهای اخیر در ایالات متحده، چین و اروپا گزارش شده است. اجزای معماری نشان داده شده در شکل ۲۷ با روش مختلف چاپ بتن در کشورهای مختلف ساخته شده است. در سال ۲۰۱۵، یک بلوک آپارتمان با پنج طبقه با استفاده از بتن آرمه شیشه‌ای توسط یک شرکت چینی در شانگهای شکل گرفت. بیان می‌شود که خانه‌های موجود در بلوک آپارتمان مطابق کامل با استانداردهای ملی مربوطه بودند.



شکل ۲۷- نمونه‌هایی از ساخت مقیاس کامل از هر فرآیند، (A) D- شکل، بالا سمت چپ B)، بتن‌ریزی کانتور، سمت راست و (C) بتن چاپ، پایین سمت چپ[۱۹]

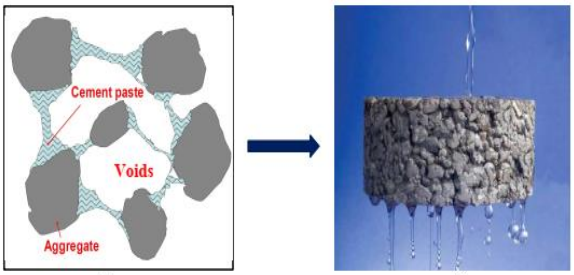
به‌طور شگفت انگیزی، دانشمندان آمریکایی با National آژانس هوانوردی و فضایی (ناسا) تلاش می‌کنند تا از چنین تکنیکی برای ساخت زیرساخت‌های اسکان خارج از زمین با استفاده از خاک قمری به عنوان ماده اولیه استفاده کند. شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تستی در شرایط خلاء توسط دانشمندان اروپایی انجام شده است تا امکان سنجی ایده گفته شده در بالا را بررسی کنند. اگرچه چاپ سه بعدی ساخت و ساز در مقیاس کامل یک مفهوم جدید است، اما دوره جدیدی از زیرساخت‌های پایدار را ایجاد می‌کند. سازه‌هایی با اشکال پیچیده به دلیل عدم نیاز به قالب و لرزش می‌توانند توسط بتن خود شکل دهنده ساخته شوند. بنابراین، می‌توان آن را در افزایش سرعت ساخت و ساز، کاهش نیروی کار و هزینه مهندسی تحقق بخشید. با این حال، مطالعات کمی وجود دارد. بتن خود

شکل‌گیری به انعطاف پذیری خوب، زمان کوتاه بودن، مقاومت اولیه بالا نیاز دارد و باید وزن و بار دینامیکی خود را در طول چاپ بدون تغییر شکل مجزا تحمل کند. همه این الزامات نمی‌توانند همزمان با رویکردهای طراحی بتنی معمولی برآورده شوند.

۱۳. بتن خود زهکش *Self-Draining Concrete*

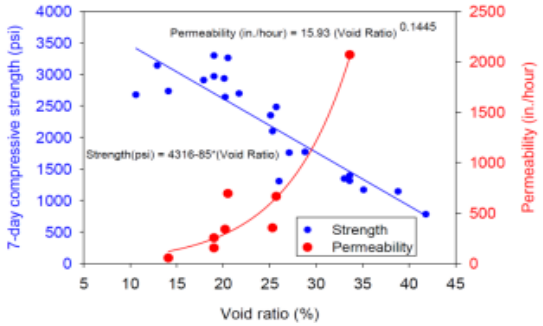
بتن خود زهکشی بتنی است که حاوی منافذ خالی در داخل است تا بشود هوا یا آب را از طریق آن حرکت کند. این نوع بتن همچنین به عنوان بتن متخلخل و نفوذپذیر شناخته می‌شود. هنگامی که بتن خود زهکشی به عنوان مواد سنگ فرش استفاده می‌شود، عبور آب از طریق ماتریس سنگ فرش به زیر خاک زیرین آسان می‌شود. بنابراین، برای حفظ آب سیلاب و شارژ مجدد آبهای زیرزمینی مفید است.

بتن خود زهکش عمدتاً توسط خمیر سیمان و سنگدانه یکدست درشت یکنواخت تشکیل می‌شود. یک مدل برای ساختار بتن خود زهکشی در شکل ۲۸ نشان داده شده است. اسکلت بتن توسط مصالح درشت تشکیل شده و آن‌ها با مقدار محدودی از خمیر سیمان به یکدیگر وصل می‌شوند. بدون تأثیر پر کردن مصالح ریز، مقدار زیادی فضای خالی باز در بین مصالح درشت وجود دارد و اندازه معمولی حفره‌ها از ۲ میلی‌متر تا ۸ میلی‌متر است.



شکل ۲۸- A) مدل بتن خود زهکشی. (B دیاگرام شماتیک از نفوذپذیری[۱]

نفوذ پذیری زیاد هدف اصلی در طراحی بتن خود زهکشی است. در مطالعات متعدد، ثابت‌شده است که با افزایش تخلخل، نفوذپذیری آب بتن افزایش می‌یابد. با این حال، مقاومت فشاری بتن رابطه معکوس با تخلخل نشان می‌دهد. تعادل همبستگی بین متخلخل با هر قابلیت تحمل، تخلخل و مقاومت فشاری، در شکل ۲۹ نشان داده شده است. در این حالت، مقاومت فشاری بتن در ۲۸,۰-۲,۸ مگاپاسکال در ۷ درجه و ضریب نفوذپذیری آب از ۰,۲ تا ۵,۴ میلی‌متر در ثانیه نشان داده شده است.



شکل ۲۹-رابطه بین مقاومت فشاری - نفوذپذیری بتن ۷ روزه و حفرات در چند مخلوط آزمایشی بتن[۱].

ایده بتن خود زهکش تقریباً ۶۰ سال است که وجود دارد و اغلب برای کمک به زهکشی از زیر سنگ فرش استفاده می‌شود. از دهه ۱۹۸۰ میلادی بتن خود زهکشی در پارکینگها، میادین، پیاده روهای عابر پیاده و سایر مناطق با ترافیک سبک بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. به تازگی، یک شرکت ساخت و ساز در انگلستان به نام لافارژ تارمک نوع جدید بتن خود زهکش با گرانیت خرد شده را به عنوان مصالح درشت توسعه داده است. این بتن به‌اندازه کافی قابل نفوذ است و می‌تواند به‌طور متوسط ۶۰۰ لیتر در دقیقه به ازای هر مترمربع در سطح زمین را عبور دهد، همان‌طور که در شکل ۳۰ نشان داده شده است [۱]. با این حال، استفاده از بتن خود زهکش با استحکام نسبتاً کم همچنان در جاده‌های ترافیکی سنگین محدود است.

شکل ۳۰. تست نفوذپذیری بتن خود زهکشی[۱].

پس از ریختن بتن، بارواره به خمیر سیمانی در بین سنگدانه ها منتقل می‌شود. اگرچه مقاومت سنگدانه به‌اندازه کافی زیاد است، خمیر سیمان و منطقه انتقال و سطح تماس بین خمیر سیمان و سنگدانه (ITZ) نسبتاً ضعیف هستند. بنابراین، بتن همیشه در خمیر سیمان و ITZ خراب می‌شود. برای بهبود مقاومت مکانیکی بتن ضمن حفظ تخلخل بالای آن، دو روش پیشنهاد شده است یکی افزایش سطح چسبندگی خمیر سیمان است و از مصالح دانه ریز برای افزایش تعداد ذرات در واحد حجم بتن است. سطح تماس و ناحیه اتصال پس از آن افزایش می‌یابد و باعث افزایش مقاومت می‌شود. مورد دیگر تقویت مقاومت باند سیمانی است. استفاده از سیمان با استحکام بالا و کاهش نسبت آب/سیمان معمولاً از مواد پوزلانی مانند

دوده سیلیس، تقویت کننده‌های آلی و سایر مواد تقویت کننده شیمیایی ویژه استفاده می‌شود.

بتن خود زهکش نقش اساسی در تصفیه آب و کاهش بار زهکشی سیستم فاضلاب دارد. آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده استفاده از بتن خود زهکشی را به عنوان یکی از بهترین روش‌های مدیریت در کنترل از آب سیلاب تشخیص داده است. علاوه بر این، ساختار متخلخل ویژه بتن خود زهکش عملکرد عالی در جذب آنتی اسید، عایق حرارتی و جذب صوتی است. با این حال، به نقص مقاومت مکانیکی ضعیف و مقاومت در برابر یخ زدگی در بتن خو زهکش باید توجه کافی شود. علاوه بر این، حفره‌های باز سازه‌های بتنی خود زهکش مستعد گرفتگی و تمیز کردن دوره‌ای یا جایگزینی باید بررسی شود.

۱۴- **بتن خود شفاف** *Self-Luminous Concrete*

به تازگی، بتن خود شفاف در دانشگاه Michoacan (مکزیک) توسط روبیو و همکاران توسعه یافت. بتن خود نور (به عنوان سیمان ساطع شده نیز خوانده می‌شود) ماده‌ای با انرژی خورشیدی است که انرژی خورشیدی را در طول روزبه دام می‌اندازد و در شب تابش نور می‌کند. کل فرآیند بدون مصرف برق انجام می‌شود [۱۱].

بتن معمولی یک ماده مات است. هنگامی که آب باسیمان مخلوط می‌شود، تکه‌های بلوری شکل می گیرند که اجازه نمی‌دهد نور از داخل آن عبور کند. به منظور پرداختن به این مسئله، محققان توجه زیادی به اصلاح میکرو ساختار سیمان با هدف از بین بردن کریستال‌ها کردند. سرانجام، ماده‌ای شفاف مانند ژل که قادر به جذب انرژی خورشیدی در طول روز و تبدیل انرژی به نور در شب است، ایجاد شد [۱]. اطلاعات دقیق در مورد ترکیب مواد اولیه و روش‌های ساخت آن در بتن خود درخشان در اینترنت موجود نیست، زیرا این بتن جدید به ثبت رسیده است.

بتن شفاف (شکل ۳۱) می‌تواند در روشنایی جاده‌ها، آسفالت‌ها و خطوط دوچرخه سواری مورداستفاده قرار گیرد. در حال حاضر، این بتن ساطع کننده نور آبی و سبز موجود است. علاوه بر این، روشنایی را می‌توان به خوبی تنظیم کرد تا نیازهای اعمال آن را برآورده سازد. قابل پیش بینی است که نقش بتن شفاف در کاهش بهره برداری از چراغ راه و کاهش میزان تصادفات رانندگی در آینده از اهمیت بالایی برخوردار است.

بیشتر مواد فلورسنت از پلاستیک ساخته شده‌اند و پس از چند سال توسط اشعه آفتاب تخریب می‌شوند. با این حال محققان ادعا کردند که بتن خود درخشان ضد آفتاب بوده و طول عمر آن تا ۱۰۰ سال تخمین زده می‌شود.

شکل ۳۱- بتن خود درخشان (شفاف) می‌تواند جاده‌های تاریک و بزرگراه‌های بدون استفاده از برق را روشن کند [۱].

خلاصه نتایج تحقیق در ارتباط با مواد تشکیل دهنده انواع بتن هوشمند در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ انواع بتن هوشمند و ترکیب آن

نوع بتن هوشمند	مواد تشکیل دهنده
بتن خود متراکم	شن نخودی + ماسه + پودر سنگ + آب +فوق روان کننده و مواد اصلاح کننده ویسکوزیته.
بتن خود منبسط شونده	ترکیبات منبسط شونده مانند سیمان‌های منبسط یا مواد افزودنی منبسط شونده می‌توان بتن منبسط شونده را ساخت.
بتن خود کیور	مواد کیورینگ شن سبک LWA مانند پومیس و پلیمرهای سوپر جذب‌کننده SAP هستند. SAP می‌توانند تا ۱۰۰۰ برابر وزن خود قدرت جذب آب دارد.
بتن خود حسگر	به‌طور کلی از یک فیلر عامل دار استفاده می‌شود ماتریس بتن خود حسگر معمولاً سیمان پرتلند است. پرکننده‌های یا فیلر های رسانا به‌طور عمده از کربن تشکیل شده است، مواد فلزی و پلیمری، که در بین آن‌ها پرکننده‌های کربنی و فلزی بیشترین کاربرد رادارند.
بتن خود ترمیم	بتن خود ترمیم کننده نیز بتن خود ترمیم یا خود آببند نامیده می‌شود و ذات این بتن این است که بایندر لازم را تهیه می‌کند که در صورت بروز آسیب می‌تواند ترک‌ها را پر کند. به‌طور کلی، بتن خود ترمیم شونده به دو دسته بتن ترمیم کننده خودکار و مستقل هستند.
بتن خود تنظیم شونده	الیاف پلی اتیلن، الیاف پلی پروپیلن و الیاف پلی آکریلیلو نیتریل) یا الیاف فلزی و بتن تشکیل شده است، می‌تواند ساختار منافذ و عملکرد حرارتی خود را تنظیم کند. هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی ویژه) با توجه به دمای خارج از هوا برای جلوگیری از طبله شدن را دارد.
بتن خود میرا	بتن خود میرا از طریق معرفی پرکننده‌های عامل دار مانند لاتکس پلیمری، الیاف MWCNTs یا نانو تیوب کربن چند جداره، دود سیلیس (SF)، متیل سلولز (MC) و قدرت گرافیت، خاصیت میرایی خود را بهبود می‌بخشد
بتن خود گرمازا	بتن خود گرمایش تولید گرما با اعمال ولتاژ به بتن بر اساس قانون ژول است. پرکننده‌های الکتریکی مانند الیاف کربن، الیاف استیل، الیاف فولاد، پودرهای نیکل و گرافیت برای انتقال پذیری گرما به ترکیب بتن افزوده میشوند.
بتن خود فدا شونده	برای جلوگیری از خوردگی آرماتورها از روکش بتنی فداشونده به عنوان آند استفاده از بتن فداشونده که حاوی سلولز الیافی است.
بتن خود تمیز کننده	بدست آوردن بتن خود تمیز شونده، دو استراتژی معمولاً استفاده می‌شود: فوق آبگریز و فوتوکاتالیستی. بتن معمول متخلخل است بنابراین قابلیت جذب آب را دارد که آن را هیدرو فولیک میگویند. برای آببندی به ترکیب بتن مواد آببند مانند پنیترون ادمیکس افزوده می‌شود. موادی مانند روغن، نانو ذرات، پلیمرهای ضد آب به بتن افزوده میشوند تا بتن خاصیت خود تمیز شونده داشته باشد.

بتن خود شکل گیرنده	مواد سیمانی گچ با مواد اصلی گچ، وینیل پلیمر و کربوهیدرات، رطوبت سنج و آب برای چاپ نمونه‌های بتن سه بعدی استفاده میشود.
بتن خود زهکش	بتن خود زهکش عمدتاً توسط خمیر سیمان و سنگدانه یکدست درشت یکنواخت تشکیل می‌شود. اسکلت بتن با مصالح درشت تشکیل شده و آن‌ها با مقدار محدودی از خمیر سیمان به یکدیگر وصل می‌شوند.
بتن شفاف	ماده‌ای با انرژی خورشیدی است که انرژی خورشیدی را در طول روزبه دام می‌اندازد و در شب تابش نور می‌کند. کل فرآیند بدون مصرف الکتریسیته انجام می‌شود.

نتیجه گیری

به عنوان یک ماده مقاوم، همه کاره و اقتصادی، از بتن در ساخت و سازهای جهانی استفاده گسترده‌ای شده است. هنوز هم برای آینده طولانی مدت ضروری و برترین مواد ساختمانی باقی خواهد ماند. بتن به‌طور مداوم در حال توسعه و بهره برداری است. ظرفیت ذاتی بتن هوشمند از طریق ترکیب بتن های سنتی با پرکننده‌های کاربردی عامل دار و یا بهبود ترکیب مواد اولیه عملکردهای جدیدی به دست آورد. این مقاله به‌طور سیستماتیک بتن هوشمند را با عملکردهایی مانند خود متراکم، خود منبسط شونده، خود کیورینگ، خود حسگر، خود ترمیم، خود تنظیم کننده، خود میرا، خود حرارت زا، خود فداشونده، خود تمیز کننده، خود شکل دهنده، خود زهکشی و درخشان، معرفی می‌کند.

بتن هوشمند، به عنوان یک فناوری نوآورانه در زمینه مصالح ساختمانی، علیرغم چالش‌ها، تحول جدیدی را برای مصالح ساختمانی تزریق می‌کند. توسعه بتن هوشمند، کاربرد بتن را به چشم انداز وسیع‌تر ارتقا داده و عملکرد اقتصادی عظیمی را رقم خواهد زد. با این حال، به عنوان یک فناوری نوظهور، تحقیقات در مورد بتن هوشمند هنوز در مرحله اولیه است و موارد زیر لازم است قبل از استفاده در مقیاس بزرگ حل شود.

۱- خصوصیات پرکننده‌های عامل دار کاربردی عوامل اصلی دستیابی به بتن هوشمند هستند. بنابراین، اکتشاف و بهره برداری بیشتر از پرکننده‌های کاربردی مناسب بسیار مهم است. فناوری نانو و فنون بیونیک ممکن است الهام بخش برای جستجوی پرکننده‌های کاربردی کارآمدتر باشند.

۲- خواص مکانیکی و دوام بتن هوشمند نیاز به تجزیه و تحلیل عمیق دارد. مطالعه بتن هوشمند در حالت تنش چند محوری ضروری است، زیرا تحقیقات موجود همیشه در محدوده تنش تک محوره که دور از کاربردهای مهندسی است، محدود می‌شود. علاوه بر این، تأثیر عوامل محیطی مختلف بر عملکرد و دوام بتن هوشمند باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

۳- اگرچه توضیحات و مدل‌های پیش بینی معقول متعدد وجود دارد، اما مکانیسم بتن هوشمند به دلیل سیستم پیچیده‌ای از بتن های هوشمند در خصوصیات چند جزء، چند فاز و چند مقیاس مبهم است. بنابراین، برای تشریح و پیش بینی رفتارهای بتن هوشمند، مدل سازنده دقیق‌تری مبتنی بر امکانات آزمایشگاهی پیشرفته و تجزیه و تحلیل عددی لازم است.

۴- فقدان استاندارد مشخص برای تست بتن هوشمند، طراحی آن را دشوار کرده و کاربردهای آن را نیز محدودتر کرده است. بنابراین، یک روش استاندارد، ارائه راهنمایی و مشخصات استاندارد برای تحقیق و استفاده از بتن هوشمند، ضروری است.

به‌طور کلی، بتن ذاتاً هوشمند یک موضوع میان رشته‌ای است که شامل بیونیک (زیستی)، فیزیک، شیمی، مهندسی و علم مواد و مهندسی عمران و غیره است بنابراین همکاری و ارتباط متقابل علمی بین محققان با تخصص‌های مختلف از اهمیت ویژه‌ای برای انجام تحقیقات بیشتر در مورد بتن هوشمند لازم است. استفاده از بتن هوشمند یک انتخاب منطقی برای حفظ توسعه پایدار سازه‌های بتنی و توسعه زیرساخت‌های هوشمند است، بدون شک بتن هوشمند انقلابی عمیق را در زمینه مصالح ساختمانی و زیرساخت‌ها به همراه خواهد داشت. کاربردهای گسترده آن اثرات مفیدی را در آینده بر جامعه، اقتصاد و محیط زیست خواهد گذاشت.

References

[1] Wang X, Li Z, Bing H, Han B, Yu X, Zeng S, and Ou J. Intelligent concrete with self-x capabilities for smart cities. Smart Materials and Structures. 2016; 5(3): 1-39.

[2] Sun M, Li Z and Liu Q. The electromechanical effect of carbon fiber reinforced cement. Carbon. 2002; 40(12): 2273–2275.

[3] Han B, Wang Y, Dong S, *et al*. Smart concretes and structures: A review, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015; 26(11): 1303–1345.

[4] The Self-Compacting Concrete European Project Group. The European Guidelines for Self-Compactin Concrete. 2016.

[5] Domone P L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. Cement and Concrete Composites, 2007; 29(1): 1–12.

[6] Najim K B, Hall M R, A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC), Construction and Building Materials 2010; 24(11): 2043– 2051.

[7] Okamura H, and Ouchi M, Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology. 2003; 1(1): 5–15.

[8] CECS 203. Technical Specifications for self compacting concrete Application, Standardization Institute of Chinese Construction Standard. 2006; Beijing, China.

[9] Persson B. A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, Cement and Concrete Research. 1996**;** 31(2):193-198.

[10] Nagamoto N, Ozawa K. Mixture properties of self-compacting high performance concrete. ACI Special Publication. 1999; 172: 623–636.

[11] Fu X, Lu W, Chung, D. Improving the strain-sensing ability of carbon fiber-reinforced cement by ozone treatment of the fibers.*Cement and Concrete Research*. 1998; 28(2): 183–187.

[12] Wang W, Dai H, Wu S. Mechanical behavior and electrical property of CFRC- strengthened RC beams under fatigue and monotonic loading. Materials Science and Engineering A. 2008; 479: 191–196.

[13] Huang K, Deng M, Mo L, *et al*. Early age stability of concrete pavement by using hybrid fiber together with MgO expansion agent in high altitude locality. *Construction and Building Materials*. 2013; 48: 685–690.

[14] Wang S, Liang R, Wang B, *et al*. Dispersion and thermal conductivity of carbon nanotube composites. Carbon. 2009; 47(1): 53–57.

[15] Konsta-Gdoutos M S, Metaxa Z S, Shah S P. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. Cement and Concrete Research, 2010; 40(7): 1052–1059.

[16] Self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring. Nanotechnology. 2010; 20(44): 445501.

[17] Han B, Zhang K, Yu X, *et al*. Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection Measurement. 2011; 44(9): 1645–1650.

[18] Yunovich M and Thompson NG, Corrosion of highway bridges: Economic impact and control methodologies, Concrete International, 2003; 25: 52–57.

[19] Poole B, Biomimetics: Borrowing from biology 2012.

[20] Zwaag S, Self healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science: Springer Science+ Business Media BV. 2008.

[21] Snoeck D, Steuperaert S, Van Tittelboom K, et al. Visualization of water penetration in cementitious materials with superabsorbent polymers by means of neutron radiography, Cement and Concrete Research, 2012; 42(8).

[22] Snoeck D and De Belie N, Repeated autogenous healing in strain-hardening cementitious composites by using superabsorbent polymers, Journal of Materials in Civil Engineering. 2015, 28(1): 4015086.

[23] Yildirim G, Sahmaran M and Ahmed HU. Influence of hydrated lime addition on the self-healing capability of high-volume fly ash incorporated cementitious composites, Journal of Materials in Civil Engineering. 2014; 27(6):4014187.

[24] Dhawale A W, Joshi V P, Engineered cementitious composites for structural applications. International journal of application or Innovation in Engineering & Management. 2013, 2: 198–205.

[25] Abbasi A, Shakiba A. Experimental Investigation on the Effect of Nano carbon Tube on Concrete Strength. Journal of Civil Engineering for Material Application. 2020; 4(1): 31-41.

Evaluation and Research on the methods of manufacturing and mixing of various types of smart concrete

Abdoulkarim Abbasi Dezfouli
Faculty Member, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
Abbasihamid@hotmail.com

Abstract

Smart concrete refers to structural materials that can sense and respond appropriately to changes in their environment. This is done by changing one or more parameters. The smart properties of concrete are usually achieved by modifying and upgrading the concrete mix design and matrix. It is mainly obtained by improving the composition of initional materials or adding functional materials to concrete. This concrete also has bionic (biological) characteristics. Compared to conventional concrete, properly designed smart concrete can be utilized to optimize the safety, durability and proper performance of infrastructure and reducing of the maintenance costs. The costs of use, resource consumption and environmental pollution, which are the basic parameters for construcction, will be reduced. Over the past few decades, significant efforts have been made to research smart concrete and many innovative achievements in the development and application of smart concrete are obtained. Thirteen types of smart concrete, with emphasis on their capabilities, are systematically investigated in this article, which is based on the principles, composition, construction, properties, research development and structural applications. In addition, some perspectives on the development of smart concrete are discussed. Finally, thirteen compositions of smart concrete were organized into a Table.

Keywords: Smart concrete, Capabilities, Properties, Composition, Structure