

مروری بر برخی از خواص مکانیکی و دوام بتن‌های خودتراکم توانمند

سیدفتح اله ساجدی*، میلاد اورک^۲

۱- دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

یکی از مشکلات بتن‌ریزی که بر مقاومت، دوام و کیفیت ظاهری بتن سخت‌شده تأثیرگذار است، تراکم بتن می‌باشد. ارتعاش، عملی است که با صدای زیاد همراه است و نیاز به کارگران آموزش‌دیده دارد و عدم انجام صحیح آن باعث مشکلات بسیاری می‌گردد. برای غلبه بر این مشکل، اقدام به توسعه بتن خودتراکم گردید. این بتن با استفاده از ریزدانه بیش‌تر و لزجت خمیری فراوان، بدون نیاز به ارتعاش و جداشدگی اجزاء آن و آب‌انداختگی، تمام ابعاد قالب را پر کرده و جریان می‌یابد. از موضوعات مورد توجه طی سالیان دراز در فن‌آوری بتن، مقاومت و دوام بوده است. برای داشتن خودتراکمی و همین‌طور مقاومت و دوام بالا، بتن خودتراکم توانمند ایجاد گردیده است. رسیدن به خودتراکمی، نیازمند استفاده از مقادیر زیاد مواد پودری است که برخی از این مواد فعال قابلیت جایگزینی بخشی از سیمان را داشته و جایگزینی آن‌ها گامی در راستای توسعه پایدار نیز می‌باشد. هم‌چنین با استفاده از مواد پودری، چگالی تراکم مصالح بتن افزایش یافته و منجر به بهبود مقاومت و دوام آن می‌گردد. از طرف دیگر استفاده از مقادیر زیاد مواد پودری نیاز به آب اختلاط را افزایش داده و احتمال جمع‌شدگی خمیری را بالا می‌برد. لذا لازم است تمام موارد برای ارتقاء عملکرد بتن منظور شوند تا بتن توانمند طراحی و ساخته شود. بنابراین، در این پژوهش مروری بر مطالعات پیشین در زمینه ماهیت، خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم توانمند صورت گرفته و حدود ۹۰ مقاله پراستناد با تمرکز بر اهداف و نتایج به دست آمده، بررسی شده‌اند. نتایج پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهند که با استفاده از بتن خودتراکم، می‌توان به بتنی با مقاومت مشابه بتن‌های معمولی دست یافت و با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و هم‌چنین استفاده از مواد پوزولانی، نه تنها مقاومت بلکه خواص دوامی بتن نیز ارتقاء یافته و بتن خودتراکم توانمند حاصل می‌گردد.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم توانمند، پوزولان، مواد جایگزین سیمان، خواص مکانیکی، دوام، چگالی تراکم.

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/jsce.2018.127252.1522	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.127252.1522	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۵/۲۵	۱۳۹۷/۰۴/۱۷	۱۳۹۶/۱۲/۰۴

*نویسنده مسئول: سیدفتح اله ساجدی

پست الکترونیکی: sajedi@iauhvaz.ac.ir

A review on some of mechanical properties and durability of high- performance self- compacting concretes

Seyed Fathollah Sajedi^{1*}, Milad Orak²

1- Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, IAU, Ahvaz, Iran

2- Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, IAU, Ahvaz, Iran

ABSTRACT

Concrete density is always a problem that occurs during concrete and it affects the strength, durability and apparent qualities of hardened concrete. Vibration is a practical thing that comes with a lot of noise and requires trained workers, and failure to do so will cause many problems. To overcome this problem, the development of self-compacting concrete has begun. This concrete, fills all the dimensions of the mould and is flowing through the use of more fine-grained and plastic shrinkage, without the need for vibration, without any parts being detached. The topics that have been considered for many years in concrete technology have been resilient and durable. For concrete having self-compacting and high resistance and durability, high- performance self-compacting concrete (HPSCC) has been created. The achievement of self-condensation requires the use of a large amount of powdered material, some of which are capable of replacing part of the cement, and replacing them is a step towards sustainable development. Also, using powder materials, the density of concrete aggregates increases and leads to improved strength and durability. The use of large quantities of powdered materials increases the need for mixing water and the likelihood of plastic shrinkage. Therefore, it is necessary to consider all items to enhance concrete performance, so that HPC can be designed and constructed. Therefore, in this research, a review of previous studies on the nature, mechanical properties and durability of highly capable HPSCC's has been carried out and about 90 high citation articles have been considered, focusing on goals and results. The results of previous studies have shown that using SCC, concrete with similar strength of conventional concrete can be obtained. By reducing the proportion of water to cementitious materials, as well as using pozzolans, not only resistance but also concrete properties are enhanced and HPSCC is obtained.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 April 2018

Revise Date: 07 August 2018

Accept Date: 24 September 2018

Keywords:

High- performance self-compacting concrete (HPSCC), Pozzolan, Supplementary cementing materials (SCM's), Mechanical properties, Durability, Compressive strength, Packing density.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.127252.1522

*Corresponding author: Seyed Fathollah Sajedi

Email address: sajedi@iauahvaz.ac.ir

۱- مقدمه

بتن بعد از آب دومین ماده پر مصرف در دنیا و پر استفاده‌ترین مصالح ساختمانی با تولید سالانه حدود ۱۰ میلیارد تن در سراسر جهان است. استفاده از این ماده به دلیل خواص منحصر به فرد از جمله دوام و مقاومت فشاری بالا می‌باشد. استفاده از بتن‌های سنتی و ویرهای بسیار متداول است ولی با محدودیت‌هایی نظیر مشکلات در جای‌دادن آن در محل‌های دارای تراکم آرماتور، قالب‌های پیچیده و کمبود کارگران ماهر برای ویریه زدن مواجه است. لرزاندن عملی است که بتن را به صورت موضعی هُل می‌دهد و این عمل باعث خلاص شدن بتن از حباب‌های غیرعمدی هوا پس از ریختن می‌گردد. وجود این حباب‌های هوا باعث افزایش نفوذپذیری و به خطر انداختن دوام بتن می‌شود. حفرات هوا هم‌چنین تماس بین بتن و میلگردها را کاهش داده و منجر به کاهش چسبندگی میلگردها^۱ و مقاومت مورد انتظار می‌گردند [۱]. این مسأله در مورد اعضای مانند دیوار برشی و ستون‌ها که در آن‌ها فشردگی آرماتور زیاد و ابعاد مقطع بتن‌ریزی کوچک می‌باشد، از اهمیت بیش‌تری برخوردار است [۲]. از سال ۱۹۸۳ دوام سازه‌های بتنی موضوع بسیار مهمی در ژاپن بود. ساخت سازه‌های بتنی با دوام نیازمند تراکم مناسب به وسیله کارگران ماهر می‌باشد. کاهش تدریجی تعداد کارگران ماهر در صنعت ساخت ژاپن، منجر به کاهش کیفیت کارهای ساخت گردید. یک راه حل برای دستیابی به سازه‌های بتنی با دوام، استفاده از بتن خودتراکم است که خودبخود متراکم شده و با استفاده از وزن خود به تمام زوایا و گوشه‌های قالب راه پیدا کرده و نیازی به تراکم ارتعاشی ندارد. لزوم استفاده از این نوع بتن در سال ۱۹۸۶ توسط اوکامورا^۲ پیشنهاد شد [۳]. مطالعات برای توسعه بتن خودتراکم شامل مطالعات اساسی روی کارایی بتن توسط اوزاوا و میکاوا^۳ در دانشگاه توکیو انجام گردید [۴]. بتن با کارایی بسیار بالا دارای خواص مکانیکی و دوام عالی بوده و یکی از پیشرفت‌های اخیر در فن‌آوری بتن محسوب می‌شود [۵].

بارتوس^۴ بتن خودتراکم را بتنی تعریف کرده که تحت وزن خود جاری شده و بدون نیاز به هر نوع ارتعاش، به طور کامل قالب‌ها را پر کرده و همگنی خود را حفظ نماید. طبق تعریف اوزاوا، بتن خودتراکم تازه باید سه ویژگی توانایی پرکنندگی، توانایی عبور و مقاومت در برابر جداسازی را داشته باشد [۶].

اولین مقاله‌های تحقیقاتی که نگاهی به اصول مورد نیاز بتن خودتراکم در ژاپن داشتند، در محدوده ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۱ منتشر شدند. این مطالعات تحت عناوین بتن با عملکرد بالا^۵ و بتن فوق‌کارا^۶، بر خواص بتن تازه مانند ظرفیت پرشدگی، جاری شدن و مقاومت در مقابل جداسازی متمرکز بودند [۷].

¹ Bond

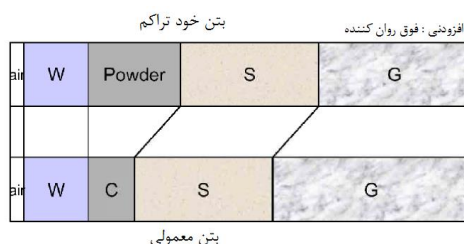
² Okamura

³ Ozawa and Mikawa

⁴ Bartos

⁵ High Performance Concrete (HPC)

⁶ Super-workable



شکل ۱- مقایسه نسبت‌های مخلوط در بتن‌های خودتراکم و معمولی [۴]

مدل اولیه بتن خودتراکم در ابتدا در سال ۱۹۸۸ تکمیل شد. این مدل اولیه عملکرد مناسبی در مورد جمع‌شدگی خمیری^۷ و جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن^۸، حرارت هیدراسیون، چگالی پس از سخت‌شدن و سایر خواص داشت. این نوع بتن "بتن با عملکرد بالا" نامیده شد و در سه مرحله زیر تعریف گردید:

- تازه^۹: قابلیت خودتراکمی
- سنین اولیه^{۱۰}: جلوگیری از مشکلات اولیه^{۱۱}
- پس از سخت‌شدن: محافظت در برابر عوامل خارجی [۴]

در سال ۱۹۹۳، تحقیقات گسترده‌ای تحت عنوان پروژه بریت ایوم^{۱۲} با همکاری کشورهای اروپایی آغاز شد که بر روی پروژه‌های عمرانی و خانه‌سازی به عنوان پروژه‌های تجربی انجام گردید. به موازات این پروژه، مؤسسه تحقیقاتی سیمان و بتن سوئد^{۱۳} با همکاری سازمان راهسازی سوئد، اولین پل را خارج از ژاپن، در سال ۱۹۸۸ به اتمام رساند. گزارش پروژه نشان داد که بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی از مقاومت و دوام بیش‌تری برخوردار است و هزینه‌ها نیز حدود ۱۰٪ کاهش یافتند [۷].

بتن خودتراکم به خاطر ویژگی‌های خاص خود اخیراً به طور گسترده در ساخت‌وسازها استفاده می‌شود [۸]. اگر چه هزینه اولیه بتن‌ریزی این سازه‌ها به علت استفاده از مواد افزودنی حدود ۲۶٪ افزایش می‌یابد، ولی در نهایت به علت کاهش نفر-ساعت عملیات اجراء و پرداخت نهایی بتن و عدم استفاده از دستگاه‌های ارتعاشی که آلودگی صوتی را نیز به همراه دارند، حدود ۱۷٪ کاهش هزینه کلی اجرای سازه حاصل می‌شود [۹]. توانایی بالای جریان‌پذیری، قابلیت عبور و پایداری^{۱۴} بتن خودتراکم می‌تواند مشکلات بتن‌ریزی را کاهش داده و بهره‌وری^{۱۵} بتن را ارتقاء بخشد [۱]. بتن خودتراکم یک نوع بتن بسیار کارا^{۱۶} است که دارای عملکرد بالا و مقاومت مناسب می‌باشد [۱۰].

در مقایسه با بتن معمولی، بتن خودتراکم شامل مقادیر بیش‌تری ذرات ریز، میزان بیش‌تر افزودنی‌ها و درصد چگالی فشرده‌گی بیش‌تر بوده که جریان‌پذیری و لزجت بیش‌تری را ایجاد می‌کند. این موضوع به اثبات رسیده که اصلاح بتن با ذرات بسیار ریز، خواص فیزیکی و مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد [۱۱]. بتن خودتراکم سنتی نیازمند مقدار زیادی چسباننده^{۱۷} برای دستیابی به خصوصیات خود و اعمال فشار جانبی زیاد به قالب می‌باشد. این بتن تمایل زیادی به خزش، جمع‌شدگی و ترک‌خوردگی در نتیجه حرارت هیدراسیون بالا دارد [۱۲].

⁷ Plastic shrinkage

⁸ Drying shrinkage

⁹ Fresh

¹⁰ Early age

¹¹ Initial defects

¹² Brite-Euam Project

¹³ Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI)

¹⁴ Stability

¹⁵ Productivity

¹⁶ Highly workable

¹⁷ Binder

جایگزینی بخشی از سیمان با یک پرکننده^{۱۸} مانند آهک هیدرولیکی^{۱۹} منجر به کاهش دمای هیدراسیون و قیمت مصالح بتن خودتراکم می‌گردد [۱۳].

خاصیت جریان‌پذیری^{۲۰} بتن خودتراکم حاصل تغییراتی در طرح مخلوط بتن معمولی است. این تغییرات با استفاده از مقدار زیاد پودر (سیمان، پودر سنگ و مواد افزودنی معدنی)، نسل جدید فوق‌روان‌کننده‌ها و مواد افزودنی اصلاح‌کننده لزجت^{۲۱} حاصل می‌شود. انتخاب دقیق حجم سنگدانه‌ها و دانه‌بندی مناسب آن‌ها نیز از ضرورت‌های طرح مخلوط بتن خودتراکم است. این نوع بتن می‌تواند تحت وزن خود بدون جداسازی یا آب‌انداختن در مقاطع محدود جریان یابد. بتن خودتراکم به دلیل سهولت در ریختن در قالب‌های پیچیده همراه با انبوه آرماتور، ذاتاً دارای مزایای اقتصادی می‌باشد. عموماً چندین رویکرد برای توسعه بتن خودتراکم اقتصادی از جمله استفاده از مقادیر زیاد پوزولان‌ها برای کاهش سیمان مصرفی و استفاده از مقادیر زیاد کاهنده‌های آب ارزان قیمت وجود دارد [۱۰]. مفاهیم بتن خودتراکم و بتن با عملکرد بالا می‌توانند با هم ترکیب شده و بتنی را نتیجه دهند که به طور همزمان خودتراکمی لازم، مقاومت فشاری بالا و دوام خوب داشته باشد. درک این اهداف با بتنی به نام بتن خودتراکم با عملکرد بالا (توانمند)، عموماً نیازمند مقادیر مواد سیمانی بیش‌تر، نسبت آب به مواد چسباننده کم‌تر و حداکثر اندازه سنگدانه کوچکتر می‌باشد [۱۴].

دقیقاً در زمانی که اوکامورا در ژاپن بتن خودتراکم را تعریف نمود، بتن با عملکرد بالا به عنوان بتنی با دوام بالا در نتیجه نسبت آب به سیمان پایین توسط آیتسین و همکاران^{۲۲} تعریف گردید. از آن به بعد عنوان بتن با عملکرد بالا در سراسر جهان به بتن خودتراکم با عملکرد بالا^{۲۳} (توانمند) تغییر نام یافت [۴]. آن چیزی که بتن را توانمند می‌کند، نسبت آب به سیمان بسیار پایین است. اما نسبت آب به سیمان را تا حدی می‌توان کم کرد، به خصوص اگر از سیمان پرتلند معمولی استفاده شده باشد [۱۵]. کاهش نسبت آب به سیمان خصوصاً اگر با افزایش میزان ریزدانه همراه باشد، کاهش روانی زیادی را به همراه خواهد داشت. پس برای اینکه بتوان به مقاومت و دوام مناسب و از طرفی به کارایی و روانی بالا دست پیدا نمود، لازم است میزان فوق‌روان‌کننده را افزایش داده و گاهی در کنار آن از افزودنی اصلاح‌کننده لزجت نیز استفاده گردد.

غالباً افزودنی‌های معدنی نظیر سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی و پودر سنگ آهک برای کاهش مقدار سیمان مصرفی، بهبود کارایی و ارتقاء خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم استفاده می‌شوند. عملکرد بتن خودتراکم توانمند با حضور مواد فعال مانند میکروسیلیس، خاکستر پوسته برنج و متاکائولین بهبود یافته است [۱۶]. لی و همکاران^{۲۴} مزایای استفاده از چندین افزودنی معدنی در حالت‌های سه‌جزئی، ترکیب سیمان و افزودنی‌های معدنی متداول (خاکستر بادی یا پودر سنگ آهک) و افزودنی‌های فعال‌تر (میکروسیلیس یا خاکستر پوسته برنج) را برای ساخت بتن خودتراکم توانمند بررسی نمودند. مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه ۹۰ الی ۱۲۰ مگاپاسکال برای بتن خودتراکم توانمند در حالی که همچنان خواص خودتراکمی خوبی داشته، به دست آمده است [۱۴]. در شکل ۲ تصویر اسکن الکترونی دو نوع از مواد پودری غیرفعال (پودر سنگ آهک) و فعال (متاکائولین) نشان داده شده است.

¹⁸ Filler

¹⁹ Hydraulic lime

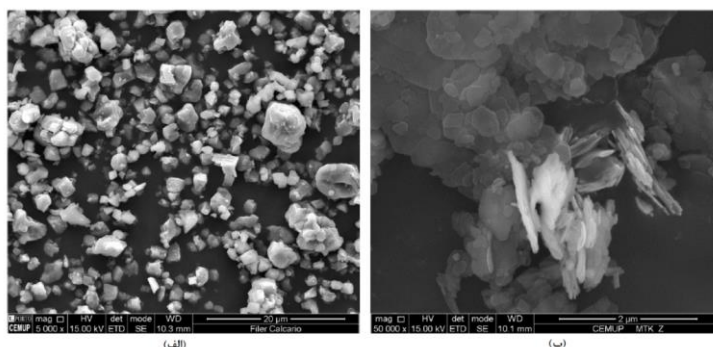
²⁰ Flow ability

²¹ Viscosity modifying admixture (VMA)

²² Professor Aitcin et al.

²³ High Performance Self-Compacting Concrete (HPSCC)

²⁴ Le et al.



شکل ۲- اسکن الکترونی ذرات (الف) پودر سنگ آهک ($\times 5000$) و (ب) متاکائولین ($\times 50000$) [۱۷]

افزودن خاکستر بادی تأثیر خوبی بر مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن دارد. مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و ذوب‌شدن نیز بالا می‌رود. مصالح پرکننده فعال باعث تأثیر مثبت بر به تأخیر انداختن فرآیند تخریب بتن و افزایش چقرمگی شکست^{۲۵} ترکیب سیمان می‌گردند [۱۱].

۲- سازوکار دستیابی به خودتراکمی

روش دستیابی به بتن خودتراکم فقط تغییر شکل‌پذیری بالای ملات یا خمیر نیست، بلکه مقاومت در برابر جدایش سنگدانه‌های درشت و ملات هنگامی که بتن جریان پیدا می‌کند و از میان انبوه آرماتورها عبور می‌نماید، می‌باشد. اوکامورا و اوچی^{۲۶} در مقاله خود نموداری را مطابق شکل ۳ به عنوان روش‌های دستیابی به خودتراکمی بتن پیشنهاد نمودند.

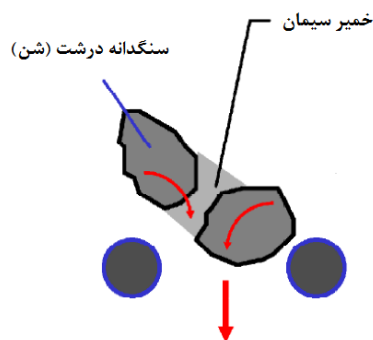


شکل ۳- روش‌های دستیابی به خودتراکمی بتن [۴]

با کاهش فاصله نسبی بین ذرات می‌توان تناوب برخورد و تماس بین ذرات سنگدانه‌ها را افزایش داده و سپس هنگامی که بتن تغییرشکل پیدا می‌کند (به‌خصوص نزدیک موانع) تنش داخلی می‌تواند افزایش یابد. انرژی مورد نیاز جهت جریان یافتن با کاهش تنش داخلی در نتیجه انسداد ذرات سنگدانه مصرف می‌گردد. برای جلوگیری از انسداد، میزان سنگدانه‌های درشت که بر انرژی مصرفی به شدت تأثیر می‌گذارد، باید محدود شود. هم‌چنین باید از خمیر با لزجت بیشتر برای جریان‌پذیری هنگام عبور از موانع، استفاده گردد. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده، در محدود کردن میزان سنگدانه‌های درشت و افزایش لزجت خمیری می‌توان مخلوط همگن و با لزجت بیشتری را تهیه کرد که هم از موانع به راحتی عبور کند و هم شکل‌پذیرتر باشد، ولی دچار جدایی اجزاء نگردد.

²⁵ Fracture toughness

²⁶ Okamura and Ouchi



شکل ۴- سازوکار دستیابی به خودتراکمی بتن [۴]

هنگامی که بتن تغییرشکل پیدا می‌کند، خمیر با لزجت بالا از افزایش تنش داخلی موضعی در نتیجه رویکرد سنگدانه‌های درشت، جلوگیری می‌کند. دستیابی به تغییرشکل‌پذیری بالا فقط با استفاده از فوق‌روان‌کننده و نگه داشتن نسبت آب به سیمان در مقادیر کم امکان‌پذیر است.

بتن خودتراکم به تغییرات در خواص و نسبت‌های مصالح تشکیل‌دهنده بسیار حساس است، بنابراین نیازمند کنترل‌های کیفی زیادی می‌باشد. ویژگی‌های ذاتی بتن خودتراکم که شامل خواص بتن تازه می‌گردد، تأثیر به‌سزایی بر خواص بتن سخت‌شده از جمله مقاومت فشاری، پایداری ابعادی و دوام دارد [۱۸].

برنجیان و همکاران جدادگی و انسداد در بتن‌های خودتراکم را بر اساس استانداردهای راهنمای افنارک^{۲۷} مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مخلوط‌هایی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف ساختند. نتایج نشان داد که نسبت آب به سیمان تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت روانی بتن خودتراکم دارد و در محدوده ۰/۳۴ تا ۰/۴۴ با کاهش نسبت آب به سیمان، ظرفیت روانی به صورت خطی کاهش یافته است [۱۹]. لیبر و همکاران نیز گزارش کردند که از میان پارامترهای اختلاط بتن، تأثیرگذارترین عامل بر روانی، پایداری و خواص رفتاری ملات بتن خودتراکم، نسبت آب به سیمان مخلوط می‌باشد [۲۰]. ملات‌های بتن خودتراکم ساخته‌شده با ماسه دو جزئی^{۲۸} و سه جزئی^{۲۹}، به طور چشم‌گیری مقاومت فشاری را بهبود بخشیده و جریان اسلامپ و کیف V رضایت‌بخشی را ایجاد نموده‌اند [۲۱]. حضور مقادیر زیاد خاکستر بادی فقط تأثیر منفی جزئی روی کارایی دارد، در حالی که مقادیر زیاد خاکستر پوسته برنج تمایل به کاهش کارایی و جدادگی را به همراه خواهد داشت. خاکستر پوسته برنج می‌تواند تا سطح ۲۵٪ مورد استفاده قرار گرفته و نتایج رضایت‌بخشی داشته باشد [۲۲]. خالو و همکاران استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی را به عنوان درشت‌دانه با درصد‌های جایگزینی مختلف نسبت به درشت‌دانه طبیعی بررسی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، به کارگیری سنگدانه‌های بازیافتی موجب افت خواص روانی بتن‌های خودتراکم گردیده و دستیابی به خواص خودتراکمی را دشوار کرده است. البته با جایگزینی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی درشت با سنگدانه طبیعی درشت، بتن خودتراکم ساخته شده است [۲۳].

دیناکار و همکاران^{۳۰} به طراحی بتن خودتراکم با استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی بر اساس مفهوم بهره‌وری پرداختند. در این تحقیق یک روش نسبت مخلوط برای طراحی بتن خودتراکم سرباره‌ای بر اساس مقاومت مورد نیاز پیشنهاد گردیده و مزایای سرباره مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش با جایگزینی ۲۰ الی ۸۰ درصد سرباره، مقاومت‌هایی در محدوده ۳۰ الی ۱۰۰ مگاپاسکال حاصل شدند. روش پیشنهادی یک روش ساده و مشتمل بر ۵ مرحله می‌باشد. در مرحله اول کل پودر مشخص و ثابت می‌گردد. در مرحله دوم، مقدار سرباره بر اساس مقاومت مورد نیاز با معادله ارائه شده، تعیین می‌گردد. در مرحله سوم مقدار آب مورد نیاز و در مرحله چهارم سنگدانه‌های درشت و

²⁷ The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC)

²⁸ Binary sands

²⁹ Ternary sands

³⁰ Dinakar et al.

ریز و ترکیب آن‌ها بر اساس منحنی‌های استاندارد دین ۳۱ [۲۴] تعیین می‌گردد. در آخرین مرحله خودتراکمی بتن با ارزیابی آزمون‌های جریان اسلامپ و قیف ۷ برای جریان‌پذیری و جعبه L برای قابلیت عبور بررسی می‌گردند [۲۳].

اردلان و همکاران^{۳۲} در سال ۲۰۱۷ کارایی و مقاومت فشاری بتن خودتراکم را در حضور پوزولان‌های مختلف (پومیس، میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در تمام مخلوط‌ها، بخشی از سیمان را با ۱۰ الی ۵۰ درصد پومیس، خاکستر بادی و سرباره جایگزین نمودند. هم‌چنین برای بهبود خواص بتن خودتراکم حاوی پومیس، از سیمان آمیخته جایگزین‌شده با پومیس و میکروسیلیس استفاده نمودند. آن‌ها مشاهده کردند که جایگزینی بیش از ۳۰٪ سیمان پرتلند با مواد پوزولانی، خودتراکمی مخلوط‌ها را به طور چشم‌گیری کاهش داده است. بر این اساس در این مواقع استفاده بیش‌تر از افزودنی فوق‌روان‌کننده توصیه شده است. خواص بتن سخت‌شده نشان داد که پومیس به خصوص در حضور میکروسیلیس دارای خاصیت پوزولانی بسیار زیادی بوده است. مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی پومیس و خاکستر بادی کم‌تر از سرباره بوده در حالی که طرح مخلوط حاوی پومیس، بیش‌ترین افزایش را نسبت به بتن مرجع داشته است [۲۶].

قدوسی و همکاران در سال ۱۳۹۵ تغییرات تنش جاری‌شدن و لزجت خمیری^{۳۳} بتن خودتراکم حاوی چند نوع افزودنی معدنی جایگزین بخشی از سیمان را بررسی نمودند. در این تحقیق، بتن‌های خودتراکم با مقدار متفاوت از پودر سنگ آهک و مقدار و نوع افزودنی‌های مختلف ساخته و آزمایش‌های کارایی و مؤلفه‌های روانی مخلوط‌ها بررسی گردیدند. بر این اساس، مخلوط‌هایی با نسبت‌های آب به سیمان متفاوت و مقادیر مختلف پودر سنگ آهک و سیمان با جایگزینی میکروسیلیس، سرباره و متاکائولین ساخته شدند. نتایج نشان دادند که افزایش نسبت آب به سیمان موجب کاهش هر دو مؤلفه می‌شود و از طرف دیگر، افزایش در مقدار پودر سنگ آهک منجر به کاهش تنش جاری‌شدن مخلوط‌ها می‌گردد. در حالی که لزجت خمیری تا ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب پودر سنگ کاهش و سپس افزایش را نشان می‌دهد. با جایگزینی ۸٪ میکروسیلیس، تنش جاری‌شدن افزایش یافته ولی لزجت خمیری تغییری نکرده در حالی که متاکائولین موجب افزایش هر دو مؤلفه جایگزینی سرباره تا ۱۵٪ موجب افزایش تنش جاری‌شدن شده است، اما تغییری در لزجت خمیری ایجاد نگرديده است. تنش جاری‌شدن (استاتیکی و دینامیکی) با گذشت زمان افزایش یافت که این افزایش در زمان‌های سکون بیش‌تر، برجسته‌تر است؛ در حالی که گذشت زمان بر لزجت خمیری تأثیر چندانی نداشته و مستقل از زمان تغییر کرده است [۲۷].

جلال و همکاران در سال ۲۰۱۵ تأثیر چند افزودنی پوزولانی شامل نانوسیلیس، میکروسیلیس و خاکستر بادی را بر خواص مختلف بتن خودتراکم توانمند (خواص روانی، دمایی و نفوذ) بررسی کردند. برای این منظور، جهت کاهش مقدار سیمان، بخشی از سیمان پرتلند با بخشی از افزودنی‌های پوزولانی جایگزین گردید. خواص روانی بتن تازه از طریق زمان و قطر جریان اسلامپ و زمان جریان قیف ۷ اندازه‌گیری شدند. خواص گرمایی با آزمایش تحلیل گرماسنجی^{۳۴} بررسی گردید. نتایج نشان داد که افزایش مقدار خاکستر بادی خواص روانی بتن خودتراکم توانمند را بهبود بخشیده است. هم‌چنین به دست آمد که خواص مکانیکی و انتقال مخلوط‌های حاوی افزودنی خصوصاً میکروسیلیس و ذرات نانوسیلیس بهبود یافته است [۲۸].

مهدی‌خانی و رمضانپور در سال ۲۰۱۵ روش‌های جدیدی را برای ارزیابی خواص روانی بتن خودتراکم ارائه نمودند. عملکرد برتر بتن خودتراکم و ملات‌های خودتراکم^{۳۵} نسبت به بتن معمولی مربوط به اجزاء آن‌ها می‌باشد. در مقایسه با مخلوط‌های ملات معمولی، ملات‌های خودتراکم دارای حساسیت بیش‌تری نسبت به درجه‌بندی و میزان رطوبت سنگدانه‌ها، نوع و میزان فوق‌روان‌کننده‌ها می‌باشد. برای مطالعه جریان‌پذیری و جداسدگی دانه‌ها در ملات خودتراکم، توانایی اندازه‌گیری سریع خواص ملات بسیار اهمیت دارد. برای بررسی خواص ملات بتن تازه خودتراکم، سه نوع آزمایش جداسدگی ستون کوچک^{۳۶}، حلقه L کوچک^{۳۷} و آزمایش دهانه کوچک^{۳۸} به عنوان روش‌های ساده و

³¹ DIN 1045

³² Ardalan et al.

³³ Plastic Viscosity

³⁴ Thermogravimetric Analysis (TGA)

³⁵ Self-Consolidating Mortars (SCMOs)

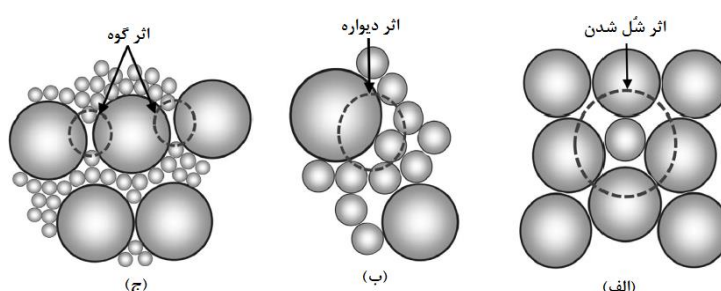
³⁶ Mini column segregation

³⁷ Mini J-ring

سریع به کار گرفته شدند. هر سه روش فوق، میزان لرزجت ملات‌های ساخته شده را تأیید نمودند. هم‌چنین از ۳۰ مخلوط ملات شامل صفر تا ۶ درصد نانوسیلیس و میکروسیلیس برای تأیید روش‌های آزمایش استفاده گردید که نتایج حاکی از لرزجت بهتر هر دو نوع بتن حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی بوده است [۲۹].

۲-۱- چگالی تراکم^{۳۹}

در سراسر جهان روش‌های مختلفی برای طرح و ساخت بتن خودتراکم وجود دارد. اکثر روش‌ها با تمرکز بر خواص بتن تازه از جمله قابلیت عبور، قابلیت پرکنندگی و مقاومت در برابر جدایش تعریف شده‌اند [۳۰]. این موضوع به اثبات رسیده است که کنترل سیستم سنگدانه‌ها، کیفیت و کمیت خمیر برای طراحی بتن خودتراکم ضروری می‌باشند. به حداقل رساندن حفرات موجود در میان سنگدانه‌ها، می‌تواند به خمیر اجازه دهد که سطح سنگدانه‌های بیش‌تری را در یک سیستم بتنی پوشش دهد. بنابراین، بهبود کارایی و کاهش منافذ موئینه می‌تواند مقاومت و دوام بتن را بیش‌تر افزایش دهد [۳۱].



شکل ۵- نمایش شماتیک اثر متقابل ذرات: اثر شل شدن^{۴۰} (الف) اثر دیواره^{۴۱} (ب) اثر گوه^{۴۲} (ج) [۳۲]

یک نظریه اساسی برای طرح اختلاط بتن، حداکثر کردن چگالی تراکم سنگدانه‌ها می‌باشد [۳۳]. چگالی تراکم مفهوم کلیدی برای دستیابی به بتن‌های توانمند و خودتراکم است. چگالی تراکم به معنای نسبت حجم مواد جامد به حجم توده‌ای ذرات است و آن را می‌توان در دو قسمت تراکم سنگدانه و سیمان مورد بحث قرار داد. تراکم سنگدانه مستقیماً با اندازه‌گیری چگالی انبوهی سنگدانه قابل اندازه‌گیری است و نشان می‌دهد که سنگدانه‌ها به چه میزان به یکدیگر فشرده شده‌اند. به این وسیله حجم حفرات بین سنگدانه‌ها که باید به وسیله خمیر سیمان پر شود، از کم کردن چگالی تراکم از عدد یک به دست می‌آید. هنگامی که فقط از سیمان پرتلند معمولی استفاده می‌شود، درصد حفرات (نسبت حجم حفرات به حجم مواد جامد) تمایل به افزایش پیدا می‌کند. برای غلبه بر این مشکل، مواد مکمل جایگزین سیمان ریزتر از ذرات سیمان پرتلند مانند خاکستر بادی و میکروسیلیس می‌توانند اضافه شوند تا حفرات را پر کرده و سبب افزایش چگالی تراکم مصالح سیمانی گردند. این مطالب باید برای تمام ذرات سیستم بتن شامل مواد سیمانی، سنگدانه‌های درشت و ریز به کار گرفته شود [۳۴]. اگر دانه‌های با اندازه‌های مختلف و به نسبت مناسب در مخلوط وجود داشته باشد، دانه‌های کوچک فواصل بین دانه‌های بزرگ را پر کرده و فضای خالی کم‌تری برای پر شدن توسط مواد ریزتر باقی می‌ماند، لذا مقدار سیمان کم‌تری نیاز خواهد بود. با فرض یک مقدار ثابت مواد سیمانی، خمیری که بر مقدار لازم برای پر کردن فضاهای خالی وجود دارد، باعث می‌شود تا دانه‌ها به نحو بهتری با خمیر پوشانده شوند و توزیع جریان بهتری حاصل شود. بنابراین دانه‌بندی سنگدانه‌ها تأثیر به‌سزایی در تقاضای خمیر و کارایی مخلوط دارد.

مفهوم چگالی تراکم را می‌توان به مواد سیمانی نیز بسط داد. همان‌گونه که تراکم سنگدانه‌ها تقاضای سیمان را مشخص می‌سازد، تراکم مواد سیمانی نیز تقاضای آب را تعیین می‌کند. مواد سیمانی گوناگون دارای اندازه‌های مختلف هستند، بنابراین پودرهای ریزتر می‌توانند فضاهای

³⁸ Mini orimet test

³⁹ Packing density

⁴⁰ Loosening Effect

⁴¹ Wall Effect

⁴² Wedging Effect

خالی بین ذرات درشت تر را پر کرده، تقاضای آب را کاهش دهند [۳۵]. بنابراین چگالی تراکم بالاتر ذرات سیستم (با آب موجود یکسان) منجر به جریان پذیری بالاتر [۳۶] و یا با جریان پذیری ثابت نیاز به آب کم تر و در نتیجه مقاومت و دوام بیش تر خواهد شد [۱۵].

با توزیع اندازه ذرات می توان به سیستم کل ذرات بهینه شده دست یافت. ذرات با اندازه متوسط باید فضای بین ذرات درشت و ذرات ریز فضای بین ذرات متوسط را پر کنند. در این صورت چگالی تراکم ذرات سیستم می تواند با حداقل کردن آب مورد نیاز برای پر کردن حفرات، حداکثر شود. این موضوع می تواند اجازه دهد نسبت آب به سیمان کاهش یابد تا مقاومت و دوام افزایش پیدا کنند و با کاهش حجم خمیر سیمانی، منجر به افزایش پایداری ابعادی بتن گردد [۱۵]. وجود ذرات ریز (ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون) تأثیر قابل توجهی بر عملکرد بتن دارد. علی رغم اینکه ذرات ریز مقدار سطح مقطع سنگدانه ها و آب مورد نیاز را افزایش می دهند و محدودیت هایی را ایجاد می کنند، ولی حفرات بین ذرات درشت تر را پر کرده و منجر به افزایش چگالی تراکم و بنابراین کاهش حجم حفراتی که باید با خمیر سیمان پر شوند، می گردند. لذا پیشنهاد گردیده که مقدار ذرات ریز با اعمال محدودیت هایی همراه باشد. به دلیل مشکلات اندازه گیری، تأثیرات ذرات ریز بر چگالی تراکم هنوز به خوبی مشخص نشده است [۳۷].

افزایش چگالی تراکم به دلیل کاهش نسبت آب به سیمان و کم تر شدن تقاضای آب، نفوذپذیری و آب انداختگی بتن را کاهش می دهد. هم چنین در اثر کم شدن فضاهای تخلخلی که به علت اثر دیواره در مجاورت سنگدانه ها ایجاد می شود، تخلخل ناحیه انتقالی کاهش یافته و کیفیت ناحیه انتقالی که ضعیف ترین اتصال در بتن محسوب می شود، بهبود می یابد. به همین دلیل در بتن های با مقاومت بالا که چگالی نسبی به وسیله میکروسلیس افزایش یافته بود، سطح شکست از منطقه گذار عبور نکرده بود، بلکه از میان سنگدانه ها گذشته است [۶]. یکی از روش های محاسبه چگالی تراکم، ریختن ملاتی به وزن M داخل ظرفی با حجم V می باشد که می توان از رابطه (۱) حجم جامد را محاسبه نمود:

$$\phi = \frac{M/V}{\rho_w u_w + \rho_\alpha R_\alpha + \rho_\beta R_\beta + \rho_s R_s} \quad (1)$$

در رابطه (۱) پارامترهای ρ_w ، ρ_α ، ρ_β و ρ_s به ترتیب چگالی آب، مواد سیمانی α و β و ماسه است و پارامترهای u_w ، R_α ، R_β و R_s نیز به ترتیب بیانگر نسبت حجم آب، حجم مواد سیمانی α و β و حجم ماسه به حجم کل جامد می باشند. رابطه (۱) با مقادیر مختلف محاسبه گردیده که حداکثر مقدار به دست آمده میزان چگالی تراکم خواهد بود [۷].

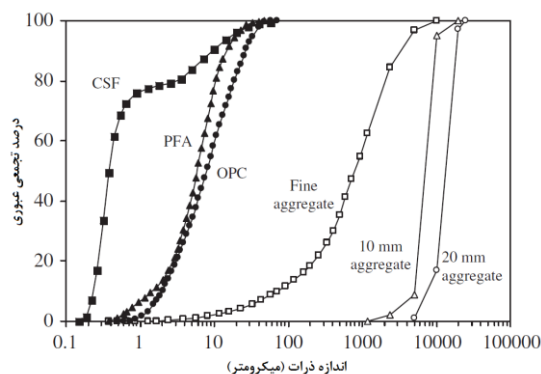
کوان و همکاران^{۴۳} تأثیر ترکیبی دو نوع ذرات ریز کوچکتر از ۷۵ میکرون (A) و بزرگتر از ۷۵ میکرون تا ۱۵۰ میکرون (B) بر چگالی تراکم سنگدانه های ریز در بتن تحت شرایط مختلف (متراکم و غیرمتراکم، تر و خشک، با و بدون فوق روان کننده) را به صورت آزمایشگاهی با استفاده از دو روش آزمون "تراکم خشک معمولی"^{۴۴} و "تراکم تر اخیراً توسعه یافته"^{۴۵} بررسی نمودند. نتایج نشان داد که تراکم به روش خشک بسیار حساس تر از روش تر می باشد. هم چنین نکته بسیار مهم این بوده که چگالی تراکم در حالت تر و همراه با فوق روان کننده بیش ترین مقدار را به دست آورده است. با تغییر چگالی تراکم با مقادیر A و B تحت شرایط مختلف، مشاهده گردید که در هر دو حالت تر و خشک، چگالی تراکم با مقادیر A و B افزایش یافته اما هنگامی که مقادیر A یا B بیش تر از ۱۰٪ بودند، مقدار افزایش چگالی تراکم کم تر بوده است. در مقایسه با سنگدانه های آمیخته نشده با مقادیر A و B، وجود ۱۵٪ مقدار A و ۱۵٪ مقدار B، حدود ۱۴٪ چگالی تراکم را افزایش داده و ۳۳٪ نسبت حفرات را در حالات تر و خشک (در شرایط متراکم شده) کاهش داده است. تأثیرات سودمند مقادیر A و B هنگامی که آب و فوق روان کننده نیز حضور داشته باشند، بیش ترین مقدار را داشته و با حضور ۱۵٪ ذرات A و ۱۵٪ ذرات B، چگالی تراکم ۱۷٪ افزایش داشته و حجم حفرات ۳۵٪ کاهش یافته است [۳۷].

⁴³ Kwan et al.

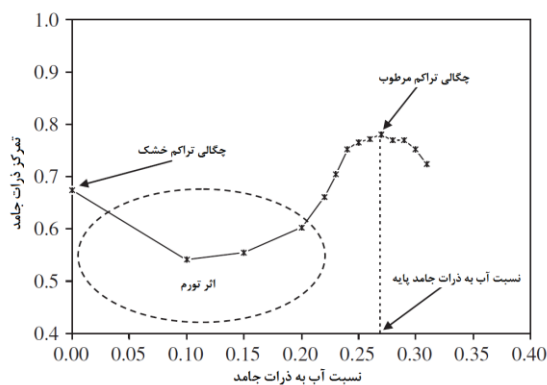
⁴⁴ Conventional dry packing test

⁴⁵ Recently developed wet packing test

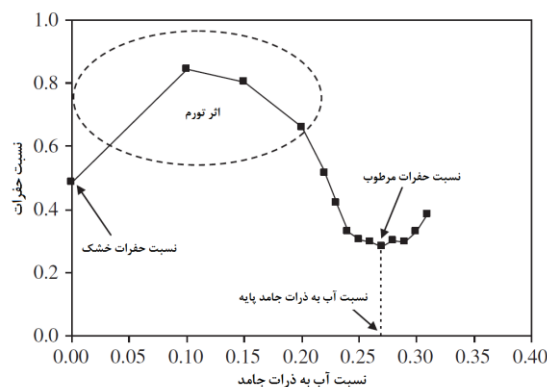
کوان و لی^{۴۶} چگالی تراکم مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های درشت و ریز و مصالح سیمانی را در دو حالت تر و خشک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مخلوط بتن حاوی تمام ذرات، چگالی تراکم بالاتر، نسبت حفرات کم‌تر و تأثیر پراکندگی مواد مکمل جایگزین سیمان بیش‌تری در حالت تر در مقایسه با شرایط خشک به‌دست آمده است [۱۵].



شکل ۶- توزیع اندازه ذرات میکروسیلیس متراکم‌شده^{۴۷}، خاکستر بادی نرم‌شده^{۴۸}، سیمان پرتلند معمولی، ماسه، شن ۱۰ میلی‌متر و شن ۲۰ میلی‌متر [۱۵]



شکل ۷- تمرکز ذرات جامد مخلوط بتن بر حسب نسبت آب به ذرات جامد [۱۵]



شکل ۸- نسبت حفرات مخلوط بتن بر حسب نسبت آب به ذرات جامد [۱۵]

⁴⁶ Kwan and li

⁴⁷ Compacted Silica Fume (CSF)

⁴⁸ Pulverized Fly Ash (PFA)

۳- مقاومت فشاری

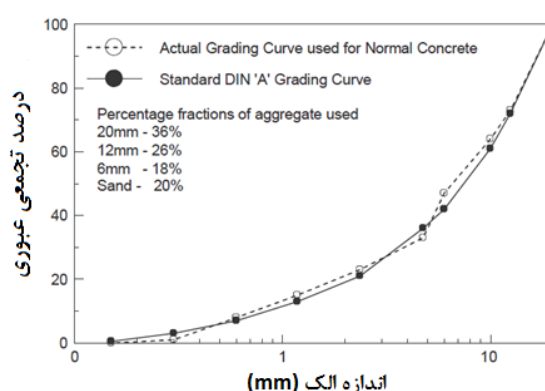
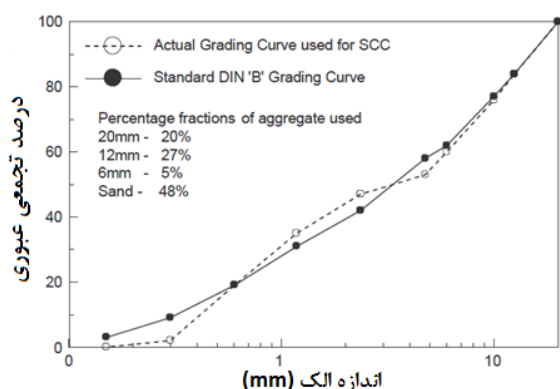
مقاومت فشاری به عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن سخت‌شده برای طبقه‌بندی در آیین‌نامه‌های بین‌المللی می‌باشد [۳۸]. سایر خواص بتن از جمله نفوذناپذیری، ضریب ارتجاعی^{۴۹} و مقاومت در برابر عوامل جوی به طور مستقیم یا غیرمستقیم با مقاومت فشاری رابطه دارند [۳۹]. لذا بررسی پارامترهای تأثیرگذار در روند کسب مقاومت فشاری حائز اهمیت است. در بتن‌های خودتراکم برای رسیدن به ترکیب مناسب جریان‌پذیری و پایداری بالا، نیاز به حجم بالاتری از مصالح پودری نسبت به بتن‌های معمولی می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که مقاومت فشاری در بتن خودتراکم، توسط نوع و نسبت پودر مصرف‌شده تعیین می‌گردد [۳۸].

ارزیابی اولیه خواص بتن خودتراکم سخت‌شده برای هر طرح و هدف کاربردی ضروری می‌باشد. مقاومت فشاری بتن خودتراکم یک پارامتر اساسی برای تخمین سایر خواص مکانیکی محسوب می‌گردد. هیچ رابطه مستقیمی برای تعیین مقاومت فشاری بتن خودتراکم وجود ندارد و این پارامتر باید از طریق مطالعات آزمایشگاهی و آزمون‌های مخرب و غیرمخرب پیش‌بینی گردد. مشکل اینجا است که به دنبال فرآیند سخت‌شدن، خواص مکانیکی و کیفی قابلیت ارتقاء ندارند. رفتار سازه‌ای بتن بر نسبت‌های مخلوط استوار است و خواص مکانیکی پس از سخت‌شدن امکان تغییر نخواهند داشت [۴۰].

مقاومت فشاری به هیچ‌وجه تنها مشخصه اصلی بتن سخت‌شده نمی‌باشد، ولی عموماً مقاومت بتن مهم‌ترین عامل نشان‌دهنده کیفیت آن است؛ این موضوع به این علت است که میزان مقاومت، مستقیماً به کیفیت خمیر سیمان سخت‌شده مربوط می‌شود. به عنوان مثال اگرچه مقاومت مستقیماً نشانگر میزان دوام بتن یا ایستادگی آن در برابر تغییر شکل نیست، اما شدیداً به نسبت آب به سیمان بستگی دارد، این نسبت نیز با کنترل میزان تخلخل بتن بر روی دوام و مقاومت در برابر تغییر شکل آن تأثیر می‌گذارد [۴۱].

وخشوری و نژادی^{۵۰} مقاومت فشاری بتن خودتراکم را از روی نسبت‌های مخلوط و جریان اسلامپ با استفاده از مدل انفیس^{۵۱} پیش‌بینی نمودند. برای این کار به برقراری ارتباط بین مقاومت فشاری به عنوان خروجی و جریان اسلامپ و نسبت‌های مخلوط به عنوان ورودی پرداختند. هم‌چنین از اطلاعات ۵۵ مطالعه آزمایشگاهی پیشین نیز بهره گرفته شد [۴۲].

در مطالعات انجام‌شده بر روی خواص مکانیکی در ۶۸ مورد کاربردهای بتن خودتراکم، مقاومت فشاری ۲۸ روزه ارائه شده بین ۲۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال متغیر بوده که حدود ۸۰٪ طرح‌های اختلاط دارای مقاومت فشاری بالای ۴۰ مگاپاسکال بوده‌اند. نتایج حاصله نشان دادند که امکان تولید بتن خودتراکم با مقاومت‌های مشابه با انواع بتن‌های معمولی و مقاومت بالا وجود دارد و در این بتن‌ها، برخلاف بتن‌های معمولی، مقاومت اساساً به وسیله ترکیب چسباننده‌ها کنترل می‌گردد و نه با نسبت آب به سیمان [۶].



شکل ۹ - مقایسه سنگدانه‌های ترکیبی استاندارد و واقعی استفاده شده در بتن معمولی (سمت راست) مقایسه سنگدانه‌های ترکیبی استاندارد و واقعی استفاده شده در بتن خودتراکم (سمت چپ) [۴۳]

⁴⁹ Elastic Modulus

⁵⁰ Vakhshouri and Nejadi

⁵¹ Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) model

سانکارایانان و جاگادسان^{۵۲} در سال ۲۰۱۶ تأثیر استفاده از مقادیر مختلف نانوسیلیس را در بتن‌های با عملکرد بالا حاوی مقادیر زیاد خاکستر بادی مورد بررسی قرار دادند. در قسمت اول تأثیر مقادیر مختلف نانوسیلیس (۱، ۲ و ۳ درصد) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بر مقاومت فشاری بتن ارزیابی گردید. سپس از میان مقادیر به کار رفته فوق، درصد جایگزینی که بیشترین مقدار مقاومت فشاری را داشته، تعیین و در بتن حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد خاکستر بادی نوع F به کار گرفته شد. نتایج نشان دادند که نانوسیلیس کارایی را در بتن‌های معمولی و حاوی خاکستر بادی کاهش داده است؛ در حالی که بتن حاوی ۱٪ نانوسیلیس در سنین اولیه (۳ و ۷ روزه) به ۱۴۰٪ مقاومت فشاری بیش‌تر نسبت به بتن مرجع دست یافته و در سن ۲۸ روزه، مقدار افزایش ۶۲٪ بوده است. هم‌چنین استفاده از ۱٪ نانوسیلیس و ۴۴ الی ۴۶ درصد خاکستر بادی، مقاومت ۲۸ روزه را حدود ۵۳٪ افزایش داده است. بنابراین می‌شود نتیجه گرفت که با افزودن نانوسیلیس می‌توان به بتنی در راستای توسعه پایدار با ۴۰٪ سیمان کم‌تر دست یافت [۴۴].

السلان و همکاران^{۵۳} در سال ۲۰۱۷ به توسعه بتن با عملکرد بسیار بالا با استفاده از مصالح بومی پرداختند. آن‌ها با بیان این که بتن با عملکرد خیلی بالا^{۵۴} نوعی بتن پیشرفته است که می‌تواند خواص دوام و مقاومت سازه‌های بتنی را بالا ببرد، استفاده از مصالح بومی را یک گام اساسی برای صرفه‌جویی در مصالح، انرژی و کاهش هزینه بتن دانستند. آن‌ها در پژوهش خود تأثیر ماسه، نوع و مقدار مواد چسباننده و نوع عمل‌آوری را بر روی مقاومت فشاری بتن آزمایش کردند. نتایج به دست آمده مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن حاوی ۵٪ میکروسیلیس و بدون عمل‌آوری توسط حرارت^{۵۵} را ۱۵۵ مگاپاسکال نشان داد. هم‌چنین با استفاده از ماسه ریزتر، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به ماسه معمولی به دست آمد، که این تأثیر هنگام استفاده از میکروسیلیس به حداقل رسیده است. آن‌ها هم‌چنین مشاهده کردند که مقاومت فشاری در سنین اولیه در حضور بیش از ۲۰٪ خاکستر بادی، کاهش داشته در حالی که در درازمدت افزایش یافته است. در ۳۰٪ جایگزینی خاکستر بادی، بیشترین مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه به دست آمد، در حالی که با جایگزینی ۲۰٪ خاکستر بادی کم‌ترین تأثیر بر مقاومت در تمام سنین مشاهده شده است. از طرف دیگر، شکل نمونه‌ها در میزان مقاومت فشاری به دست آمده تأثیر داشته به طوری که مقاومت فشاری نمونه مکعبی ۱۱٪ بیش‌تر از نمونه استوانه‌ای با شرایط اختلاط یکسان بوده است [۴۵].

۴- ضریب ارتجاعی^{۵۶}

ضریب ارتجاعی بتن یک ویژگی سرنوشت‌ساز در طراحی و تحلیل سازه‌های بتنی به‌خصوص برای محاسبات خیز اعضاء، خدمت‌پذیری^{۵۷} موردنیاز، تحلیل لرزه‌ای، تغییر مکان‌های نسبی^{۵۸}، کوتاه‌شدن ارتجاعی بتن^{۵۹} در طراحی بتن‌های پیش‌تنیده و خزش، محسوب می‌گردد [۴۶]. ضریب ارتجاعی بتن به نسبت ضریب ارتجاعی اجزاء و درصد آن‌ها در حجم بتن وابسته است. بنابراین از آنجا که سنگدانه‌های معمولی، ضریب ارتجاعی بالاتری از خمیر هیدراته شده سیمان دارند، حجم بالاتری از سنگدانه‌ها، نتایج بالاتری از ضریب ارتجاعی را برای بتن در مقابل مقاومت فشاری نشان خواهد داد. [۳۸] ضریب ارتجاعی بتن تابعی از مقاومت فشاری آن می‌باشد. مؤسسه بتن آمریکا^{۶۰} این تابع را به شکل رابطه (۲) تعریف کرده است [۴۷]:

$$E_c = 4.73 (f_c)^{1/2} \quad (2)$$

رابطه (۲) توسط استاندارد ترکیه^{۶۱} تغییر یافته و به صورت رابطه (۳) بیان شده است:

⁵² Sankaranarayanan and Jagadesan

⁵³ Alsalman et al.

⁵⁴ Ultra High Performance Concrete (UHPC)

⁵⁵ Heat curing

⁵⁶ Elastic modulus

⁵⁷ Serviceability

⁵⁸ Drifts

⁵⁹ Elastic shortening of concrete

⁶⁰ ACI 318-95

⁶¹ Turkish Standard (TS-500)

$$E_c = 3.25 (f_c)^{1/2} + 14 \quad (۳)$$

هنگامی که بتن به رده بتن‌های با مقاومت بالا می‌رسد، رفتار ضریب ارتجاعی در مقابل مقاومت فشاری تغییر می‌کند که استانداردهای آمریکا^{۶۲} [۴۸]، اروپا^{۶۳} [۴۹] و نروژ^{۶۴} [۵۰] برای بتن‌های با مقاومت بالا به ترتیب روابط (۴) الی (۶) را پیشنهاد داده‌اند [۵۱]:

$$E_c = 3.32 (f_c)^{1/2} + 6.9 \quad (۴)$$

$$E_c = 10 (f_c + 8)^{1/3} \quad (۵)$$

$$E_c = 9.5 (f_c)^{0.3} \quad (۶)$$

روابط فوق برای بتن‌های مختلف متفاوت است و استفاده از روش‌های فراابتکاری برای تخمین ضریب ارتجاعی یک نوع بتن بر اساس مقاومت فشاری آن توصیه می‌گردد [۵۲]. دمیر^{۶۵} در سال ۲۰۰۵ منطق فازی را به عنوان یک روش جدید پیشگویی ضریب ارتجاعی بتن‌های معمولی و با مقاومت بالا بیان نمود. او تلاش کرد که از طریق مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی را پیش‌بینی نماید. او مزیت اصلی این روش را توانایی در تشریح دانش در یک روش توصیفی شبه انسانی در قالب وظایف ساده در یک زبان قابل تغییر بیان کرد [۵۱]. وی هم-چنین در سال ۲۰۰۷ استفاده از روش شبکه‌های عصبی-مصنوعی^{۶۶} را به عنوان یک گزینه مناسب برای پیش‌بینی ضریب ارتجاعی بتن معرفی نمود [۵۳].

محمدی گل‌افشانی و عاشور^{۶۷} در سال ۲۰۱۶ با بهره‌گیری از روش جدیدی به نام برنامه پایه زیست جغرافیایی^{۶۸}، ضریب ارتجاعی بتن خودتراکم را پیش‌بینی نمودند. این روش به صورت مستقیم از یک روش برداشت جامع اطلاعات از نتایج آزمایشگاهی موجود بتن خودتراکم در نوشته‌ها ایجاد شده است. برای اهداف مقایسه‌ای، از یک مدل نمادین جدید دیگری به نام روش "برنامه کولونی مصنوعی زنبور عسل"^{۶۹} نیز استفاده شده است. هر دو مدل در محیط متلب کدگذاری شده و برای پیش‌بینی ضریب ارتجاعی بتن خودتراکم به کار گرفته شدند. نتایج از نزدیکی بیش‌تر پیش‌بینی‌های روش برنامه "پایه زیست جغرافیایی" نسبت به روش "برنامه کولونی مصنوعی زنبور عسل مصنوعی" با نتایج واقعی حکایت داشته است [۵۴].

۵- جمع‌شدگی

جمع‌شدگی در دو مرحله سنین اولیه و بعد از آن می‌تواند اتفاق بیافتد. مرحله اول (طی ۲۴ ساعت اول) به عنوان زمانی که بتن جای گرفته و در حال سخت شدن است، تعریف می‌گردد. مرحله دوم مربوط به سنین بعد از ۲۴ ساعت اول می‌باشد. در هر دو مرحله، جمع‌شدگی شامل جمع‌شدگی خودبخودی^{۷۰}، جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن و جمع‌شدگی حرارتی^{۷۱} می‌شود که علی‌رغم همپوشانی نتایج، دارای سازوکارهای مختلفی هستند. در دراز مدت، به انواع جمع‌شدگی‌های ذکر شده، جمع‌شدگی ناشی از کرناسیون هم اضافه می‌شود که دارای اثرات تجمعی هستند. مشاهده شده است که جمع‌شدگی خودبخودی در بتن‌های توانمند در مقایسه با سایر انواع جمع‌شدگی‌ها تغییرات حجمی چشم‌گیرتری را در سنین اولیه ایجاد می‌کند [۵۵].

⁶² ACI 363

⁶³ CEB 90

⁶⁴ NS 3473

⁶⁵ Demir

⁶⁶ Artificial Neural Networks (ANNs)

⁶⁷ Mohammadi Golafshani and Ashour

⁶⁸ Biogeographical-based programming (BBP)

⁶⁹ Artificial Bee Colony programming (ABCP)

⁷⁰ Autogenous shrinkage

⁷¹ Thermal shrinkage

در زمانی که بتن حالت خمیری داشته و فرآیند گیرش نهایی در آن صورت نگرفته باشد، عامل تبخیر از سطح بتن باعث ایجاد هلال‌هایی در منافذ موئینه آن می‌شود. این هلال‌ها باعث ایجاد فشار منفی در بتن شده و ماتریس را دچار جمع‌شدگی می‌نماید. این نوع جمع‌شدگی، جمع‌شدگی خمیری نامیده می‌شود و هنگامی که تبخیر آب از سطح بتنی که در مرحله خمیری است بیش‌تر از آب‌انداختگی آن می‌شود، بتن در معرض ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری است. جمع‌شدگی خمیری آزاد هیچ ترکی را موجب نمی‌شود، بلکه جمع‌شدگی مقید^{۷۲} به وسیله قید ناشی از سطح بتن باعث ایجاد تنش کششی و در نتیجه ترک در سطح بتن می‌شود [۵۶]. زمانی که میلگرد و یا الیاف در بتن وجود داشته باشد، می‌توانند به عنوان قید در مقابل نشست خمیری و یا جمع‌شدگی عمل نمایند.

تنش در اعضاء بتنی نمی‌تواند دقیقاً متناسب با کرنش جمع‌شدگی خمیری اندازه‌گیری شده (واقعی) باشد، بلکه متناسب با تفاضل بین کرنش جمع‌شدگی خمیری آزاد و کرنش جمع‌شدگی خمیری اندازه‌گیری شده است. مطلب بیان شده را می‌توان به صورت رابطه (۷) نشان داد:

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_{fc} - \varepsilon_{mc} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، ε_{rc} کرنش جمع‌شدگی خمیری مقید، ε_{fc} کرنش جمع‌شدگی خمیری آزاد و ε_{mc} کرنش جمع‌شدگی خمیری اندازه‌گیری شده می‌باشد. کرنش خمیری مقید نیز از روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{rc} = R\varepsilon_{fc} \quad (8)$$

یا:

$$\varepsilon_{mc} = (1 - R)\varepsilon_{fc} \quad (9)$$

در روابط (۸) و (۹)، R فاکتور قید است. در صورتی که در مقابل جمع‌شدگی هیچ قیدی وجود نداشته باشد ($R=0$)، می‌توان گفت که $\varepsilon_{mc} = \varepsilon_{fc}$ و برای اعضاء کاملاً مقید ($R=1$) مقدار $\varepsilon_{rc} = \varepsilon_{fc}$ خواهد بود [۵۷].

ياسوموتو و همکاران^{۷۳} نشان دادند که سطح مقاومت بتن خودتراکم در برابر ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی کاملاً متفاوت بوده و به نوع مصالح پودری مورد استفاده بستگی دارد [۵۸-۵۹]. آکایا و همکاران^{۷۴} در یک بررسی آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که استفاده از مواد مکمل جایگزین سیمان جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن را افزایش داده و جمع‌شدگی خودبخودی را کاهش می‌دهد. ولی تفاوت چشم‌گیری در جمع‌شدگی کل مشاهده نشده است. هم‌چنین استفاده از مواد مکمل جایگزین سیمان تحت شرایط مقید^{۷۵} ترک خوردگی را به تعویق می‌اندازد [۶۰]. پتانسیل جمع‌شدگی در بتن خودتراکم با افزایش نسبت خاکستر بادی می‌تواند کاهش یابد [۶۱].

روش‌های آزمون زیادی برای جمع‌شدگی مقید به منظور ارزیابی پتانسیل ترک خوردگی بتن از جمله "آزمایش آزمون خطی"^{۷۶} و "آزمون حلقه"^{۷۷} مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶۲]. استانداردهای آشتو و آمریکا، آزمون حلقه را برای ارزیابی رفتار جمع‌شدگی مقید بتن توصیه نموده‌اند. در شکل ۱۰ حلقه‌های فولادی بر اساس استانداردهای ذکر شده به تصویر کشیده شده‌اند [۶۳-۶۴].

⁷² Restrained shrinkage

⁷³ Yasumoto et al.

⁷⁴ Akkaya et al.

⁷⁵ Restrained conditions

⁷⁶ Linear specimen test

⁷⁷ Ring test

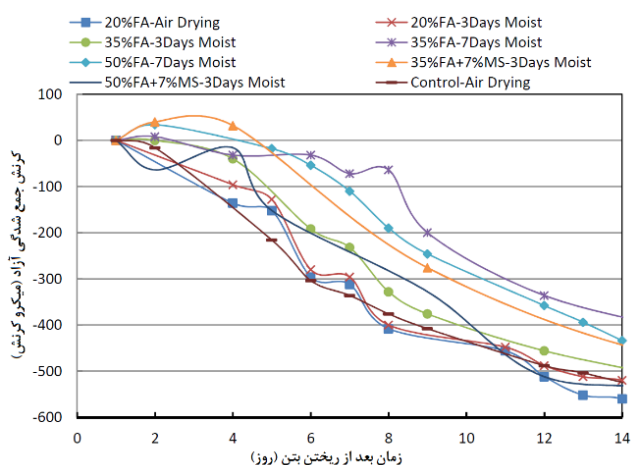


شکل ۱۰ - حلقه‌های استاندارد مطابق با استانداردهای آمریکا (تصویر سمت راست) و آشتو (تصویر سمت چپ) جهت آزمون حلقه [۶۲]

روش آزمون حلقه از بتنی که اطراف حلقه فولادی قرار گرفته و مقاومت بیرونی در برابر جمع‌شدگی بتن دارد، تشکیل شده است. کرنش‌های ایجاد شده در حلقه فولادی می‌تواند برای ارزیابی تنش‌های کششی بتن و خواص خزش کششی با استفاده از اصول مکانیک به کار گرفته شود. سرانجام این اطلاعات می‌توانند برای تعیین سن ترک‌خوردگی استفاده شوند [۶۲]. آزمون حلقه می‌تواند برای به دست آوردن اطلاعاتی در مورد عرض ترک با استفاده از کرنش جمع‌شدگی آزاد^{۷۸}، درجه گیرداری و کرنش اندازه‌گیری شده از حلقه فولادی مطابق رابطه (۱۰) مورد استفاده قرار گیرد:

$$w = 2R_{IC} \varphi \varepsilon_{SH} \left(1 - \frac{\varepsilon_{ST}^{AC}}{\varepsilon_{ST}^{BC}} \right) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، w عرض ترک، R_{IC} شعاع داخلی حلقه فولادی، φ درجه گیرداری، ε_{SH} کرنش جمع‌شدگی آزاد، ε_{ST}^{BC} و ε_{ST}^{AC} کرنش در حلقه فولادی قبل و بعد از ترک‌خوردگی می‌باشند [۶۵]. در شکل ۱۱ کرنش جمع‌شدگی آزاد بر حسب مدت زمان پس از ریختن بتن برای بتن‌های حاوی مقادیر مختلف خاکستر بادی و میکروسیلیس نشان داده شده است [۶۲].



شکل ۱۱ - کرنش جمع‌شدگی آزاد بر حسب زمان در مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی [۶۲]

اولیویرا و همکاران^{۷۹} در سال ۲۰۱۷ با بررسی سه نوع بتن خودتراکم با مقاومت‌های فشاری مختلف، مدل‌هایی را برای پیش‌بینی جمع‌شدگی بتن استاندارد ارائه نمودند. آن‌ها بیان کردند که بتن خودتراکم نوعی از بتن است که نیاز به لرزاندن برای ریختن و متراکم کردن ندارد. بتن خودتراکم، خواص و ویژگی‌های فنی خاصی دارد که استفاده از آن برای خیلی از کارها توصیه شده است. با این حال در بعضی شرایط، رفتار نامناسبی از انقباض این مصالح در سنین اولیه مشاهده شده است. مدل‌های پیش‌بینی جمع‌شدگی موجود برای بتن‌های معمولی توسعه یافته‌اند. در این مقاله جمع‌شدگی‌های ذاتی و کل در سه طرح مخلوط بتن خودتراکم با مقاومت‌های فشاری مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصله با مدل ارائه شده در استاندارد اروپایی^{۸۰} مورد مقایسه قرار گرفته و مشاهده شد که این مدل، جمع-

⁷⁸ Free shrinkage strain

⁷⁹ Oliveira et al.

⁸⁰ Eurocode 2 Model

شدگی ذاتی را دست پایین و جمع‌شدگی کل را دست بالا ارائه داده است [۶۶]. کیانی و همکاران^{۸۱} در سال ۲۰۱۷ مدلی را برای تعیین جمع‌شدگی بتن‌های حاوی پوزولان‌ها بر اساس روابط انجمن بتن آمریکا^{۸۲} ارائه نمودند. آن‌ها بیان کردند که مدل‌های اندکی برای تخمین جمع‌شدگی بتن‌های حاوی پوزولان‌ها توسعه یافته‌اند و اکثر مدل‌های موجود به ویژه مدل انجمن بتن آمریکا، برای بتن‌های پوزولانی سازگاری ندارند. در این مقاله مدل انجمن بتن آمریکا برای جمع‌شدگی بتن‌های حاوی سه نوع پوزولان میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره ارائه شده است. برای این منظور، اطلاعات جامعی از مولفه‌ها و نسبت‌های اختلاط از مطالعات پیشین جمع‌آوری گردید. برای تعیین تأثیر مقدار و نوع هر پوزولان، زمان کاربرد در مدل انجمن بتن آمریکا اصلاح شد و یک ضریب اصلاح جهت مقاومت فشاری اضافه گردید. نتایج به دست آمده حاکی از بهبود عملکرد پیش‌بینی برای مدل اصلاحی انجمن بتن آمریکا نسبت به مدل اصلی آن، بوده است [۶۷].

۶- دوام

مواد مکمل جایگزین سیمان شامل خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی، میکروسیلیس، متاکائولین و پوزولان‌های طبیعی به طور معمول به عنوان جایگزین نسبتی از کلینکر در سیمان یا به صورت جایگزین بخشی از سیمان در بتن استفاده می‌شوند [۶۸]. این عمل از بابت اینکه معمولاً منجر به کاهش هزینه، کاهش اثرات زیست‌محیطی، مقاومت دراز مدت بیشتر و بهبود دوام بلندمدت می‌گردد، مطلوب می‌باشد [۶۹]. مواد جایگزین سیمان سهم زیادی در خواص جریان‌پذیری و چسبندگی مورد نیاز بتن خودتراکم دارند [۷۰-۷۲]. استفاده از این مواد رو به افزایش بوده به طوری که متوسط درصد استفاده از کلینکر در جهان از ۸۵٪ در سال ۲۰۰۳ به ۷۷٪ در سال ۲۰۱۰ کاهش یافته و انتظار می‌رود در آینده به ۷۱٪ برسد [۷۳]. استفاده از متاکائولین و میکروسیلیس به طور چشم‌گیری نفوذ یون کلراید را در بتن خودتراکم کاهش می‌دهد [۷۴]. بتن‌های خودتراکم در مقایسه با بتن‌های معمولی و بی‌بره‌ای، به دلیل اینکه ذرات ریز بیشتر تری دارند و ریزساختار و در نتیجه شبکه حفرات آن‌ها اصلاح شده است، پتانسیل دوام بالاتری دارند [۷۵]. مخلوط‌های حاوی سیمان آمیخته دوجزئی و سه‌جزئی همراه با مقادیر زیاد خاکستر بادی مقاومت بالاتری نسبت به مخلوط مرجع در مقابل یون کلراید از خود نشان داده‌اند [۷۶]. مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی پودر سنگ آهک پرکننده، تخریب فیزیکی زیادی را در حمله سولفات منیزیم خصوصاً برای رده ۳۰ مگاپاسکال با افت ۱۸٪ داشته‌اند [۷۷].

استفاده از مقادیر بالای پودر سنگ آهک، کربناسیون را شدت بخشیده و می‌تواند خواص دوام بتن خودتراکم را در مقایسه با بتن لرزانده شده کاهش دهد. در نظر گرفتن یک لایه محافظت‌کننده بتن معمولی لرزانده شده، روی میلگردهای تقویت‌کننده در سطح بیرونی بتن‌های خودتراکم در شرایط تهاجمی می‌تواند به دوام این نوع بتن کمک نماید. چنانچه بتن خودتراکم با مقدار پودر سنگ آهک زیاد در شرایط تهاجم سولفات تاوماسیت^{۸۳} قرار گیرد، خطر زیادی از نظر کاهش دوام وجود خواهد داشت، زیرا پودر سنگ آهک دارای سطح ویژه بالایی است که می‌تواند منجر به حل در دی‌اکسید کربن موجود در آب حفره‌ای، خصوصاً در دمای پایین شود. در صورت تهاجم تاوماسیت^{۸۴} در بتن، ژل سیلیکات کلسیم هیدراته در خمیر سیمان به یک توده کم‌بیش متخلخل تبدیل شده، باعث تخریب کامل بتن می‌شود. در چنین حالتی نمی‌توان از تهاجم تاوماسیت با استفاده از سیمان کم‌قلیایی مقاوم به سولفات، پیشگیری کرد [۳۵]. ایراسار^{۸۵} تهاجم سولفات بر روی مصالح سیمانی حاوی پرکننده سنگ‌آهک را بررسی نموده است. مطالعات آزمایشگاهی روی نمونه‌های خمیر، ملات و بتن با ترکیبات مختلف در برابر تهاجم محلول‌های سولفات سدیم و سولفات منیزیم با غلظت‌های مختلف مرور شده است. پودر سنگ‌آهک می‌تواند دوام بتن در برابر هجوم سولفات بیرونی را کاهش دهد. در این رابطه، توصیه‌های گروه متخصصین [۷۸] تاوماسیت استفاده از سیمان‌های حاوی پودر سنگ‌آهک در جاهایی که آب زیرزمینی حاوی بیش از ۰/۴ گرم بر لیتر یون سولفات باشد، را منع نموده است [۷۹].

⁸¹ Kiani et al.

⁸² American Concrete Institute (ACI)

⁸³ Thaumasite

⁸⁴ Taumasite

⁸⁵ Irassar

ترگارد و کالینووسکی^{۸۶} روی دوام بتن خودتراکم با پودر سنگ آهک در محیط‌های دارای یون‌های سولفات و منیزیم تحقیق کردند. نمونه‌های دارای پرکننده سنگ آهک دارای دوام کم‌تری بودند و مخلوط‌های با 50 kg/m^3 پودر سنگ آهک ضعیف‌تر از مخلوط‌های با 100 kg/m^3 و یا بدون آن بودند. پس از دوره‌های آزمون (۲۲ و ۴۸ ماه) نمونه‌ها دچار تخریب‌ها و پوستگی‌های سطحی شده و ترکیبات تائوماسیت، گچ و اترینگایت^{۸۷} در آن‌ها یافت شد [۸۰-۸۱].

قویدل شهرکی و همکاران در سال ۱۳۹۵ با جایگزینی پوزولان‌های زئولیت و متاکائولین به عنوان بخشی از سیمان، اثر آن‌ها را بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خودتراکم مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور، طرح اختلاط‌های مختلفی حاوی زئولیت، متاکائولین و ترکیب آن‌ها با همدیگر ساخته شد و نتایج با نمونه مرجع مقایسه شدند. نسبت آب به پودر در کلیه طرح‌ها یکسان انتخاب شده بود. آزمایش‌های انجام‌شده شامل مقاومت فشاری، جذب آب، نفوذ آب، مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذ تسریع‌شده یون کلراید و خوردگی تسریع‌شده می‌باشد. نتایج بیانگر این بودند که افزودن پوزولان‌های زئولیت و متاکائولین به صورت همزمان به بتن خودتراکم موجب بهبود قابل ملاحظه دوام و خوردگی میلگرد در آن شده است، به طوری که طرح اختلاط حاوی ۱۰٪ زئولیت و ۱۰٪ متاکائولین ضریب نفوذ یون کلراید را نسبت به نمونه مرجع ۸۸٪ کاهش و مقاومت در برابر خوردگی را ۱/۹۴ برابر بهبود داده است [۸۲].

کاویتا و همکاران^{۸۸} در سال ۲۰۱۶ با تمرکز بر کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در جو و کاهش مصرف انرژی با استفاده از مواد پوزولانی جایگزین بخشی از سیمان، خواص دوام بتن خودتراکم حاوی متاکائولین را بررسی نمودند. برای این منظور، اثرات مستقیم زیست‌محیطی از طریق اندازه‌گیری میزان انتشار دی‌اکسیدکربن، و اثرات غیرمستقیم زیست‌محیطی با استفاده از خواص پایایی از طریق اندازه‌گیری میزان جذب آب، نفوذ یون کلراید و حمله سولفات بررسی شدند. تأثیر متاکائولین بر مشخصات داخلی نمونه‌های بتنی با تصویر میکروسکوپ الکترونی^{۸۹} بررسی گردید. هم‌چنین برای ارزیابی شدت^{۹۰} اعضاء در ترکیبات خمیری، از پراکنش اشعه ایکس^{۹۱} و تحلیل انرژی پراکنش اشعه ایکس^{۹۲} استفاده گردید. نتایج نشان دادند که نمونه‌های حاوی ۱۰٪ متاکائولین دارای مقاومت در برابر محلول سولفات منیزیم^{۹۳}، انتشار یون کلراید و جذب آب می‌باشد. علاوه بر این، تحلیل ریزساختار تأیید می‌کند که نمونه‌های حاوی ۱۰٪ متاکائولین موجب کاهش سختی سنگ گچ^{۹۴}، اترینگایت^{۹۵} و بروشیت^{۹۶} که باعث انبساط و ترک خوردگی بتن در نتیجه حمله سولفات می‌شوند، می‌گردد. بنابراین بر اساس پارامترهای پایایی، میزان بهینه جایگزینی متاکائولین، ۱۰٪ می‌باشد. علاوه بر این‌ها، متاکائولین منجر به کاهش استفاده از سیمان پرتلند و در نتیجه کاهش انرژی گرمایی و تقلیل انتشار دی‌اکسیدکربن می‌گردد [۸۳]. فریبرت و اشتارک^{۹۷} نیز روی دوام نمونه‌های خودتراکم دارای 200 kg/m^3 سنگ آهک مطالعه نمودند. نمونه‌ها برای ۴ ماه در معرض محلول سولفات سدیم $33/8$ گرم بر لیتر قرار داده شدند. نتایج مقاومت کششی نسبی روی نمونه‌های خودتراکم و شاهد مشابه با هم و معادل تقریباً ۰/۷ به دست آمد که به نفوذناپذیری خوب نمونه‌ها نسبت داده شد [۸۴].

رضانیانپور و همکاران در سال ۱۳۹۴ دریافتند که مقاومت بتن‌های خودتراکم توانمند حاوی مواد جایگزین سیمان، در برابر حمله اسید سولفوریک با افزایش مقدار جایگزینی افزایش می‌یابد. در این تحقیق ۶ طرح اختلاط بتن با رده مقاومت بالا توسط سیمان پرتلند و با جایگزینی سرباره کوره آهن‌گدازی و پوزولان طبیعی به جای سیمان تهیه شده و عملکرد آن‌ها در محیط حاوی اسید سولفوریک مقایسه

⁸⁶ Trägård and Kalinowski

⁸⁷ Ettringite

⁸⁸ Kavitha et al.

⁸⁹ Scanning Electron Microscopy (SEM)

⁹⁰ Intensity

⁹¹ X-ray Diffraction (XRD)

⁹² Energy Dispersive X-ray Analysis (EDX)

⁹³ Magnesium sulphate solution

⁹⁴ Gypsum

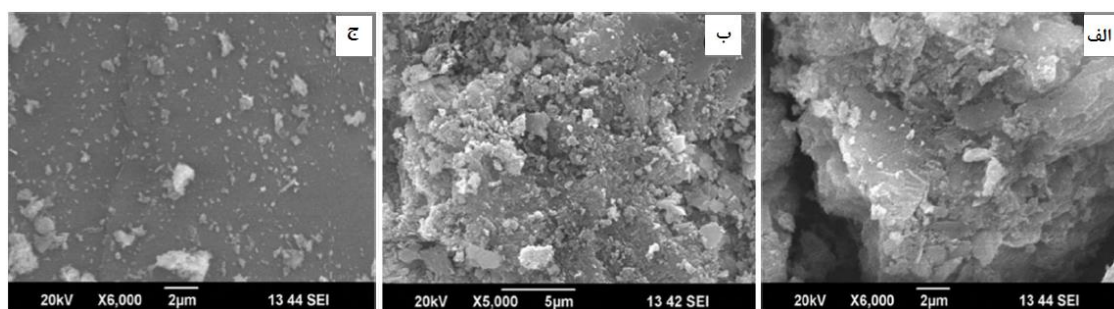
⁹⁵ Ettringite

⁹⁶ Brucite

⁹⁷ Fribert and Stuarck

شدند. در این راستا آزمایش‌های مقاومت فشاری، الکتریکی، جذب سطحی و جذب آب موئینه جهت ارزیابی کیفیت بتن از لحاظ خواص مکانیکی و نفوذپذیری و آزمایش‌های کاهش وزن، کاهش مقاومت فشاری و تغییر سرعت امواج فراصوت^{۹۸} به منظور بررسی عملکرد نمونه‌های بتنی در برابر حمله اسید سولفوریک انجام شدند. ۶ طرح اختلاط ساخته شده در این تحقیق، با داشتن مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بالای ۵۰ مگاپاسکال، در رده بتن‌های توانمند قرار گرفتند. از سوی دیگر، جایگزینی بخشی از سیمان با سرباره کوره آهنگدازی و یا پوزولان طبیعی، تأثیرات چشم‌گیری در بهبود عملکرد بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان داشته است. در نهایت آن‌ها جایگزینی ۲۰٪ سرباره و ۲۵٪ پوزولان طبیعی به جای سیمان را در راستای افزایش مقاومت فشاری و نیز جایگزینی ۴۰٪ سرباره و ۲۵٪ پوزولان طبیعی را در راستای بهبود عملکرد بتن‌های توانمند در محیط‌های حاوی اسید سولفوریک بهینه دانستند [۸۵].

پلیسر و همکاران^{۹۹} متاکائولین و خاکستر بادی را به عنوان جایگزین بخشی از سیمان برای تولید بتن خودتراکم ارزان قیمت به کار بردند. مقاومت‌های به دست‌آمده از ۲۸/۶ مگاپاسکال (با شاخص مصرف سیمان $\frac{kg}{m^3 MPa}$ ۱۰/۲) تا ۶۷ مگاپاسکال (با شاخص مصرف سیمان $\frac{kg}{m^3 MPa}$ ۷/۸) بوده است. آن‌ها با مصرف 222 kg/m^3 سیمان (به همراه $49/4$ کیلوگرم خاکستر بادی و متاکائولین) با شاخص مصرف سیمان $\frac{kg}{m^3 MPa}$ ۱۰/۸ مقاومت ۲۵ مگاپاسکال را کسب نموده و نتیجه‌گیری کردند که این امکان وجود دارد که در مکان‌هایی که نیاز به مقاومت فشاری بالا نیست، می‌توان بتن خودتراکم با مقاومت پایین همراه با جریان‌پذیری مناسب با کاهش مصرف سیمان و جایگزینی مواد مضاف معدنی، ساخت [۸۶].



شکل ۱۲- تصویر اسکن الکترونی بتن خودتراکم مرجع

(الف) جایگزینی ۱۰٪ خاکستر پوسته برنج (ب) جایگزینی ۳۰٪ خاکستر پوسته برنج (ج) جایگزینی ۳۰٪ متاکائولین [۸۷]

ماتوس و همکاران^{۱۰۰} مخلوط سه جزئی از سیمان پرتلند سفید، پودر سنگ آهکی و متاکائولین برای ساخت بتن خودتراکم توانمند سفید را به کار بردند. با استفاده از رویکرد طراحی تجربی برای بررسی تأثیر تغییرات طرح روی خواص مربوطه ملات، مدل‌های آماری برای پیش‌بینی خواص بتن تازه، حداکثر افزایش دما (تحت شرایط نیمه بی‌دررو^{۱۰۱}) زمان‌های گیرش اولیه و نهایی و جمع‌شدگی ملات‌ها توسعه یافتند. نسبت وزن متاکائولین به سیمان به عنوان تأثیرگذارترین عامل (تأثیر منفی) روی کارایی و زمان‌های گیرش اولیه و نهایی برای متاکائولین بسیار فعال معرفی گردید. مقدار سنگدانه ریز نیز بیش‌ترین تأثیر را روی حداکثر افزایش دما و جمع‌شدگی ملات‌ها داشت [۱۷].

بادوگیانیس و همکاران^{۱۰۲} در سال ۲۰۱۵ با جایگزینی سیمان یا پودر سنگ آهک^{۱۰۳} با متاکائولین، دوام بتن خودتراکم را بررسی نمودند. برای این منظور خواصی از قبیل حجم حفرات، نفوذپذیری آب و گاز و قابلیت نفوذ یون کلراید در مقایسه با بتن مرجع ارزیابی شدند. وجود

⁹⁸ Ultrasonic waves velocity

⁹⁹ Pelisser et al.

¹⁰⁰ Matos et al.

¹⁰¹ Semi-adiabatic condition

¹⁰² Badogiannis et al.

¹⁰³ Limestone powder

متاکائولین دوام بتن را افزایش داد، البته نه در نفوذپذیری آب نزدیک سطح بتن^{۱۰۴}. همچنین بیشترین تأثیر بهبوددهنده متاکائولین به عنوان مصالح جایگزین، در مقاومت در مقابل نفوذ یون کلراید مشاهده گردید [۸۸].

اومران و همکاران^{۱۰۵} خواص روانی، مکانیکی و دوام بتن خودتراکم حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و پوزولان طبیعی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مقادیر مختلف سنگدانه‌های درشت و ریز را جایگزین سنگدانه‌های درشت و ریز طبیعی و مقادیر مختلف پوزولان طبیعی را جایگزین بخشی از سیمان نمودند. نتایج نشان داد که در بتن خودتراکم می‌توان تا ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی را جایگزین نمود. در حضور ۱۵ و ۲۰ درصد پوزولان در هر دو نوع بتن خودتراکم معمولی و خودتراکم بازیافتی حدود ۵۰٪ نفوذ یون کلراید کاهش یافته و همچنین افت جرمی در شرایط حمله اسید سولفوریک کاهش داشته است [۸۹].

۷- نتیجه‌گیری

یکی از اصلی‌ترین عوامل موثر بر کارایی، مقاومت، دوام و سایر خواص بتن‌های تازه و سخت‌شده، نسبت آب به سیمان است. این میزان با مقاومت و دوام نسبت عکس داشته ولی با کارایی نسبت مستقیم دارد. اما فقط تا حدودی می‌توان میزان نسبت آب به سیمان را کاهش داد. خصوصاً در مورد بتن خودتراکم باید این نسبت بزرگ باشد. اما وقتی بحث از توانمند بودن بتن مطرح می‌گردد، لازم است این میزان تا حد ممکن کاهش یابد تا هم مقاومت زیاد شود و هم دوام. از طرف دیگر در بتن‌های خودتراکم، لزجت خمیر نیز باید به شدت بالا باشد. افزایش لزجت خمیر با استفاده از مقادیر زیاد مواد پودری و یا افزودنی‌های شیمیایی اصلاح‌کننده لزجت، تأمین می‌گردد. استفاده از مواد پودری نیز موجب بالا رفتن سطح ویژه ریزدانه‌ها و افزایش نیاز آب می‌شود. بر این اساس نسبت آب به سیمان باید به نسبت آب به مواد چسباننده تغییر کند. از آنجایی که در بتن خودتراکم توانمند مقدار نسبت آب به مواد چسباننده نسبت به بتن معمولی بسیار کاهش یافته، لازم است برای جبران روانی، میزان فوق‌روان‌کننده (عموما پلی کربوکسیلاتی) نیز به مقادیر زیاد افزایش یابد. پارامتر دیگری که بر نفوذپذیری و مقاومت بتن تأثیرگذار است و می‌تواند آب مورد نیاز را به حداقل برساند، چگالی تراکم است. هر چه چگالی تراکم بیشتر باشد، در واقع توزیع اندازه ذرات سنگدانه‌ها و مواد پودری به گونه‌ای بوده که فضای بیش‌تری را اشغال کرده، لذا تقاضای آب، نفوذپذیری و آب‌انداختگی را کاهش می‌دهد. از آنجا که حجم خمیر مورد نیاز کم می‌شود، با در نظر گرفتن حجم خمیر ثابت، کارایی و جریان‌پذیری بتن افزایش خواهند یافت. لذا حداکثر کردن چگالی تراکم را می‌توان کلید دستیابی به بتن خودتراکم توانمند دانست. همچنین کیفیت "ناحیه انتقال" که ضعیف‌ترین ناحیه اتصالی در بتن است، در اثر کاهش تخلخل بهبود می‌یابد. از نتایج تحقیقات قبل مشاهده گردیده که در بتن‌های با مقاومت بالا که دارای چگالی نسبی زیادی هستند، سطح شکست از منطقه گذار ناحیه انتقال عبور نکرده بلکه از میان سنگدانه‌ها گذشته است.

¹⁰⁴ The near surface water permeability of the concrete

¹⁰⁵ Omrane et al.

مراجع

- [1] Mawo N. S., Onchiri R. O., Shitote S. M., (2017). Performance of self-compacting concrete made with hydraulic lime as filler. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 20-25.
- [2] Razavi A., Abdelzadeh S. (1393). Self-compacting concrete (SCC). The 15th National Students Conference, Urmia University, Shahrivar 1393.
- [3] Ozawa K., Maekawa K., Kunishima M., Okamura, H., (1989). Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures. *Proceedings of the 2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Vol. 1, pp. 445-450.
- [4] Okamura H., Ouchi M., (2003). Self-Compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 5-15.
- [5] Ahmad S., Hakeem I., Maslehuddin M., (2014). Development of UHPC Mixtures Utilizing Natural and Industrial Waste Materials as Partial Replacements of Silica Fume and Sand. *The Scientific World Journal*, Volume 2014, Article ID 713531.
- [6] Bakhtiari S., Allah Verdi A., Ramezani pour A. A., Peshizkar, T., Raeis Ghasemi M., (2011). A review of the composition and some properties of self-compacting concrete. *Iranian Chemical Engineering Journal*, tenth year, number fifty sixth.
- [7] Qodousi, P., Ramezani pour A. A., Shokrchizada M., Tadayon, M., Pehizkar T., Shirzadi Javid A. A., Raeis Qasemi A. M., (1393). Self-consolidating concrete. *Publication of Roads Research Center, Housing and Urbanization, Tehran, Iran*.
- [8] Abbasi Rashtabadi M., Ranjir M. M., Madondost R., (1396). Investigating the Effect of Using Glass Powders and Metakaolin on the Properties of Self-Compacting Concrete. *Concrete Research Journal*. Tenth year, the first number. Spring 96. pp. 75-90.
- [9] Ahmadi S. A., Havaei, A.A., (1393). The need to know more about self-compacting concrete and its effects on the economics of designs. *First National Engineering Congress for Construction and Evaluation of Civil Engineering Projects, Gorgan, Ordibehesht 1393*.
- [10] kamal M.M., Safan M. A., Bashandi A. A., Khalil A. M., (2018). Experimental investigation on the behavior of normal strength and high strength self-curing self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*. Vol. 16, No. 3, pp. 79-93.
- [11] Niewiadomski P., Hola J., Cwirzen A., (2018). Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles. *Civil and Mechanical Engineering*. Vol. 18, No. 3, pp. 877-886.
- [12] Ghezal A, Assaf G., (2015). Restrained Shrinkage Cracking of Self-Consolidating Concrete. *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol. 27, No. 10, pp. 233-241.
- [13] Zekong C., Mao Y., (2015). The Research on Process and Application of Self-Compacting Concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications*. Vol. 5, No. 8, pp. 12-18.
- [14] Le H. T., Müller M., Siewert K., Ludwig H. M., (2015). The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures. *Materials and Design*, Vol. 72, No. 5, pp. 51-62.
- [15] Kwan A. K. H., Li L.G., (2014). Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. *Powder Technology*, Vol. 253, No. 2, pp. 514-521.
- [16] Long G., Gao Y., Xie Y., (2015). Designing more sustainable and greener self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 84, No.8, pp. 301-306.
- [17] Matus A. M., Maia L., Nunes S., Milheiro-Oliveira P., (2018). Design of self-compacting high-performance concrete: Study of mortar phase. *Construction and Building Materials*, Vol. 167 No.6, pp. 617-630.
- [18] Koehler, E.P., (2007). *Aggregates in self-consolidating concrete*. Aggregates Foundation for Technology, Research, and Education (AFTRE), March 2007, The University of Texas at Austin.
- [19] Bronjian J., Lotfi Omran A., Jalilian S., Nuri Pahlavanlou H., (1394). The effect of water-to-cement ratio on the maximum mechanical capacity of self-compacting concrete. *Second International Congress on Structural Engineering, Architecture and Sustainable Development, Tabriz, Iran*.
- [20] Liber N. A., Khshnazar R., Shekarchi M., (2010). Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*. Vol. 24, No. 1, pp. 1262-1271.
- [21] Benchaab B., Kadri, E., Azzouz, L., Kenai S., (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement & Concrete Composites*, Vol 34, No. 2, pp. 1167-1173.
- [22] Gritsada S., Natt M., (2014). Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 78, No 5, pp. 184-194.

- [23] Khalou A., Allah, Khodaverdi Zanjan. M. M., Hosseini P. (1389). Investigation of self-compacting concrete using coarse aggregates recycled. *Concrete Research Journal*. Summer 1389, Year 3, Number 1, pp. 9-20.
- [24] DIN 1045 "Beton und Stahlbeton". Beton Verlag GMBH. Koln. 1988.
- [25] Dinakar P., Manu S.N., (2014). Concrete mix design for high strength self-compacting concrete using metakaolin. *Materials and Design*, Vol. 60, No. 8, pp. 661-668.
- [26] Ardalan R., Joshaghani A., Hootan R., (2017). Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. *Construction and Building Materials*. Vol. 134, No. 3, pp. 116-122.
- [27] Qodusi P., Shirzadi Javid A. A., Lotfi M. (1395). The effect of the amount and several types of mineral additives on the changes in the yield stress and plastic viscosity of self-compacting concrete. *Amir Kabir Scientific-Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 48, No. 3, pp. 249-259.
- [28] Jalal M., Pouladkhan A., Fasihi Harandi O., Jafari D., (2015). Comparative study on effects of class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 94, No. 9, pp.90-104.
- [29] Mahdikhani M., Ramezani pour A. A., (2015). New methods development for evaluation rheological properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials*, Vol. 75, No. 1, pp. 136-143.
- [30] Bui V, Montgomery D., (1999). Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume. *Proceedings of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete*, Stockholm, Sweden, RILEM Publications Cachan, France, pp. 373-396.
- [31] Wang X., Wang K., Taylor P., Morcou G., (2014). Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method. *Construction and Building Materials*, Vol. 70, No. 11, pp. 439-452.
- [32] Mehdipour I., Khayat K. H., (2018). Understanding the role of particle packing characteristics in rheophysical properties of cementitious suspensions: A literature review. *Construction and Building Materials*, Vol. 161, No. 2, pp. 340-353.
- [33] Reisi M., Mostofinejad D., Ramezani pour A. A., (2017). Computer simulation-based method to predict packing density of aggregates mixture. *Advanced Powder Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 386-398.
- [34] Xie X.J., Liu B.J., Yin J., Zhou S.Q., (2002). Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultra pulverized fly ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No.3, pp. 477-480.
- [35] Bakhtiari S., Allah Verdi A., Perehizkar T., Raeis Ghasemi M., (2009). Review of mixing designs and properties of self-compacting concretes. *Third International Conference on Concrete and Development, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran*, pp. 7-9, Ordibehesht 1388.
- [36] Kwan A. K. H., Wong H. H. C., (2008). Packing density of cementitious materials: Part 2 —packing and flow of OPC + PFA + CSF. *Springer Netherlands*, 41 (4) (2008) 773-784.
- [37] Kwan A. K. H., Ng P. L., Huen K. Y., (2014). Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 61, No. 62, pp. 70-277.
- [38] Mohammad Pour Nikbin A., Islami M., (1387). A review on the mechanical properties of conventional and lightweight concretes. *Fourth National Congress on Civil Engineering, University of Tehran, Ordibehesht 1387*.
- [39] Nematzadeh M., Naghipour M., (2012). Compressive strength and modulus of elasticity of freshly compressed concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 34, No. 4, pp. 476-485.
- [40] Özel C., (2011). Prediction of compressive strength of concrete from volume ratio and Bingham parameters using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and data mining. *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 6, No. 31, pp. 7078-7094.
- [41] Mazloom, M, Resistance and modulus of elasticity in high-strength concretes containing microsilica, *First National Engineering Congress of Tehran, Iran, Ordibehesht 1383*.
- [42] Vakhshouri B., Nejadi S., (2017). Prediction of compressive strength of self-compacting concrete by ANFIS models. *Neurocomputing*, Vol. 280, No. 3, pp. 13-22.
- [43] Dinakar P., Prasanna Sethy K., Sahoo U. C., (2013). Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag. *Materials and Design*, Vol. 43, No.1, pp. 161-169.
- [44] Sankaranarayannan S., Jagadesan J., (2016). Comparison of high performance fly ash concrete using nano silica fume on different mixes. *Circuits and Systems*, Vol. 7, No. 8, pp. 1259-1267.
- [45] Alsalmán A., Dang C., Hale W., (2017). Development of ultra-High performance concrete with locally available materials. *Construction and building materials*, Vol. 133, No. 1, pp. 135-142.
- [46] Mohammadi Golafshani E., Ashour A., (2016). Prediction of self-compacting concrete elastic modulus using two symbolic regression techniques. *Automation in Construction*, Vol. 64, No. 4, pp. 7-19.
- [47] ACI 318 – 95. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95)*.
- [48] ACI 363.2R-98. *Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete*.
- [49] CEB SPECIFICATION. *AERIAL BUNDLE CONDUCTORS - 33 kV.138-1: 2015*

- [50] NS 3475:2004. Prosjektering av murkonstruksjoner - Beregnings- og konstruksjonsregler.
- [51] Demir F., (2005). A new way of prediction elastic modulus of normal and high strength concrete—fuzzy logic. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 1531–1538.
- [52] Samimi K., Kamali-Bernard S., Maghsoudi A.A., Maghsoudi M., (2016). The influence of metakaolin and natural zeolite on the rheology, engineering and durability properties of high strength self-compacting concrete at early age. 2nd International Conference Sustainability ICCS16. Spain, Madrid, 13-15 June 2016.
- [53] Demir F., (2008). Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete by artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 7, pp. 1428–1435.
- [54] Gonzalez-Taboada I., Gonzalez-Fontoboa B., Perez-Ordóñez J. L., Eiras-Lopez J., (2017). Prediction of self-compacting recycled concrete mechanical properties using vibrated recycled concrete experience. *Construction and Building Materials*, Vol. 131, No. 1, pp. 641-654.
- [55] Wu L., Farzadnia N., Shi C., Zhang Z., Wang H., (2017). Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. *Journal of construction and building Materials*, Vol. 149, pp. 62-75.
- [56] Qodousi P., Shirzadi Javid A. A., (1391). The effect of the rebar as a constraint against the shrinkage and plastic settlement of repaired self-compacting concrete. *Concrete Research Journal*, Vol. 5, No. 1, Spring and Summer 1391, pp. 54-45.
- [57] Abbasnia R., Ghoddousi P., Ahmadi J., (2005). Prediction of restrained shrinkage based on restraint factors in patching repair mortar. *Journal of Cement and Concrete Research*, vol. 35, No. 10, pp. 1909-1913.
- [58] Yasumoto A., Edamatsu Y., Mizukoshi M., Nagaoka S., (1998). A Study on the Shrinkage Crack Resistance of Self-Compacting Concrete. *ACI Materials Journal*, 1998: pp. 651-670.
- [59] Edamatsu, Y., Nagaoka, S., Yasumoto, M., (1997). Method for Estimating Autogenous Shrinkage of Self-Compacting Concrete. *Proceedings of the 52nd Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 1997, No. 6, pp. 838-839.
- [60] Akkaya Y., Chengsheng O., Surendra P. S., (2007). Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 29, No. 1, pp. 117-123.
- [61] Khatib J. M., (2008). Performance of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 9, pp. 1963-1971.
- [62] Toubat S. A., Junaid M. T., Leblouba M., Badran D., (2017). Effectiveness of fly ash on the restrained shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 79, No.4, pp. 9-20.
- [63] ASTM C1581. "Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced 427 Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage." 2004.
- [64] Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete. AASHTO Designation PP-34-89.
- [65] Jason W., Akhtar H., (2006). The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 189-199.
- [66] Oliveira M., Bettencourt Riberio A., Gariido Branco F., (2017). Shrinkage of self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 117–124.
- [67] Kiani B., Sajedi S., Ghangomi A. H., Huang Q., Liang R. Y., (2017). Optimal adjustment of ACI formula for shrinkage of concrete containing pozzolans. *Construction and Building Materials*, Vol. 131, No. 1, pp. 485-495.
- [68] Pelisser F., Vieira A., Bernardin A. M., (2018). Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 175, No.2, pp. 324-332.
- [69] Juenger M.C.G., Siddique R., (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 78, part A, No. 12, pp. 71-80.
- [70] Cassagnabere F., Escadeillas G., Mouret M., (2009). Study of the reactivity of cement/ metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 2, pp. 775-784.
- [71] Sahmaran M., Yaman I.O., Tokyay M., (2009). Transport and mechanical properties of self-consolidating concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 2, pp. 99-106.
- [72] Long W. J., Gu Y., Liao J., Xing F., (2017). Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 167, No. 11, pp. 317-325.
- [73] Schneider M., Romer M., Tschudim M., Bolio H., (2011). Sustainable cement production: present and future. *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 7, pp. 642-650.
- [74] Assem A.A., Hassan A. A., Lachemi M, Hossain M. A., (2012). Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concretes, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34 No. 6, pp. 801-807.
- [75] Kanellopoulos A., Petrou M. F., Ioannou I., (2012). Durability performance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 37, No. 12, pp. 320-325.
- [76] Celik K., Meral C., (2014). A Comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 67, Part A, No. 9, pp. 14-19.

- [77] Siad H., Lachemi M., Kamali-Bernard S., Sahmaran M., Hossain A., (2015). Assessment of the long-term performance of SCC incorporating different mineral admixtures in a magnesium sulphate environment. *Construction and Building Materials*, Vol. 80, No. 4, pp. 141-154.
- [78] Irassar E. F., (2009). Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review. *Cement and Concrete Research*, Vol.39, No. 3, pp. 241-254.
- [79] Ozawa K., Meakawa K., Kunishima M., Okamura H., (1989). High performance concrete based on the durability design of concrete structures. *Proceeding of the 2nd East Asia- Pacific conference on structural Engineering & construction*, Chiang Mai, 11-13 Jan. 1989.
- [80] Crammond N. J., Halliwell M. A. (1995). The thaumasite form of sulfate attack in concretes containing a source of carbonate ions — a microstructural overview. in: V.M. Malhotra (Ed.), *2nd CANMET/ACI Int. Symp. on Advances in Conc. Tech.*, ACI SP 154, USA, 1995, pp. 357–380.
- [81] Trägård J., Kalinowski M., (2003). Investigation of the conditions for a thaumasite form of sulfate attack in SCC with limestone filler. *International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 2003, RILEM, Publications 033.
- [82] Ghavidl Shahraki M., Miri M., Rakhshani Mehr M. (1395). Experimental study of the effect of using zeolite and metakaolin on the durability and corrosion of rebar in self-compacting concrete. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 46, No. 1.
- [83] Kavitha O.R., Shanthi V.M., Prince Arulraj G., Sivakumar V.R., (2016). Microstructural studies on eco-friendly and durable self-compacted concrete blended with metakaolin. *Applied Clay Science*, Vol. 124-125, No. 5, pp. 143-149.
- [84] Kalinowski M., Trägård J., (2005). Thaumasite and gypsum formation in SCC with sulfate resistant cement exposed to a moderate sulfate concentration. *2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Chicago, USA, 2005, pp. 319–325.
- [85] Ramezaniapour A.A., Zolfagharnasb A., Bahmanzadeh F., Pour Ebrahimi M., Hasanpour S., Bushehri R., Ramezaniapour A.M. (1394). Study of the performance of high- performance concrete against sulfuric acid attack. *Seventh Annual National Concrete Conference of Iran*, Tehran.
- [86] Pelsser F., Vieira A., Bernardin A. M., (2018). Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 175, No. 2, pp. 324-332.
- [87] Sandhu R. K., Siddique R., (2017). Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 153, No. 10, pp. 751–764.
- [88] Badogiannis E. G., Sfikas I. P., Voukia D. V., Trezos K. G., Tsvivilis S. G., (2015). Durability of metakaolin self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 82, No. 5, pp. 133-141.
- [89] Omrane M., Kenai S., Kadri E. H., Ait-Mokhtar A., (2017). Performance and Durability of Self Compacting Concrete using Recycled Concrete Aggregates and Natural Pozzolan. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 165, No. 11, pp. 415-430.