Construction Science and Technology
Volume 7, Issue 1

Investigating the mechanical properties and durability of self-healing self-compacting concrete

Seyed Mohammad Reza Hasani[1] , Mohammadali Ghanbari[2] , Emad Moini[3]

[1] PhD student,. Elite soldier and civil engineering PhD student, Noshirvani University of Babol
[2] PhD student,. Director of Concrete Research Center of novin sazan institute
[3] Master's degree, Technical Deputy of Qom Municipality Urban Train Organization

RTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2025 February

Accepted: 2025 May 18

* Correspondence Email Addres:

smr.hasani@stu.nit.ac.ir

Keywords:
Self-Compacting Concrete;
Self-Healing Concrete;
Mechanical Properties;
Durability;
Microsilica;

ABSTRACT

One of the main characteristics of concrete is the ability to change the mixing plan and add special additives in order to achieve different goals, which makes it possible to obtain self-compacting or self-healing concrete or a combination of the two; each of which has its own characteristics. In this research, according to the need of self-healing concrete in underground structures, after excavation, shotcrete concrete, PVC layers and geotextile are used to stabilize and impermeability of concrete structures, the structure of self-healing concrete as a material It has been investigated with low permeability. Taking into account the soil conditions of the region in terms of sulfate and chloride intensity, soil pH and groundwater level, factors affecting the mixing plan, implementation method and some concrete surface additives are tested in order to achieve the desired results. The main focus of research is crystallizing materials and additives that are used to make self-healing concrete. These materials should be used in combination with concrete constituents (pozzolanic materials). In this research, the effect of the combined use of microsilica pozzolan and crystallizing penetrant on the mechanical properties and durability of concrete for the repair of underground tunnel concrete has been investigated. For this purpose, slump tests, determination of compressive and electrical resistances, volumetric water absorption, chloride penetration have been recorded. In the end, by choosing the optimal modes of self-healing self-compacting concrete, the proposed design has been reviewed and presented in terms of durability and economic costs.

Cite this article: Hasani, S. M. R., ghanbari, M., & Moini, E. (2025). Investigating the mechanical properties and durability of self-healing self-compacting concrete. Construction science and technology, 6(1), 35-45. **DOI** 20.1001.1.29812577.1404.6.1.9.3

Publisher: Imam Hussein University

«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»
سال چهارم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، صفحه ۳۵ الی ۴۵

علمی – تخصصی

بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن‌های خودتراکم خود ترمیم شونده

سید محمدرضا حسنی[1*]، محمد علی قنبری، عماد معینی

[1] دانشجوی دکترا، مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی بابل

[2] دانشجوی دکترا، مدیر مرکز تحقیقات بتن موسسه نون سازان–هلدینگ راه و شهرساز
ی

[3] کارشناسی ارشد، معاونت فنی سازمان قطار شهری شهرداری قم

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸)

چکیده

در قرن اخیر استفاده از بتن به صورت روز افزون رشد نموده و چشم انداز آن در آینده نیز نشان دهنده کاربرد هر چه بیشتر آن در صنعت ساخت و ساز می‌باشد. از ویژگی های اصلی بتن قابلیت تغییر در طرح اختلاط و اضافه کردن مواد افزودنی خاص به منظور دستیابی به اهداف مختلف می‌باشد که باعث می‌شود با در نظر گرفتن تمهیدات خاص، بتن خودتراکم یا خودترمیم شونده و یا ترکیب این دو حاصل گردد؛ که هرکدام ویژگی های خاص خود را دارا می‌باشند. در این پژوهش باتوجه به نیاز بتن های خودترمیم شونده در سازه های زیر زمینی که بعد از حفاری جهت پایدار سازی و نفوذناپذیری سازه های بتنی از بتن شاتکریت، لایه های PVC و ژئو تکستایل استفاده می‌شود، ساختار بتن خودترمیم شونده به عنوان یک ماده با نفوذپذیری کم مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن شرایط خاک منطقه از نظر شدت سولفات و کلراید، PH خاک و سطح آب زیر زمینی، عوامل موثر بر طرح اختلاط، نحوه اجرا و برخی افزودنی‌های سطحی بتن به منظور دستیابی به نتایج مطلوب مورد آزمایش قرار می‌گیرند. محوریت اصلی تحقیق مواد کریستال شونده و افزودنیست که به منظور ساخت بتن خودترمیم شونده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد به صورت ترکیب با اجزا تشکیل دهنده بتن (مواد پوزولانی) مورد استفاده قرار گیرند. در این پژوهش تاثیر توامان استفاده از پوزولان میکروسیلیس و نفوذگرکریستال شونده بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن جهت ترمیم بتن تونل زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور آزمایش های اسلامپ، تعیین مقاومت‌های فشاری، مقاومت الکتریکی، نفوذ کلرید، جذب آب حجمی ثبت گردیده است. در پایان با انتخاب حالت های بهینه بتن خودتراکم خودترمیم شونده، طرح پیشنهادی از نظر دوام و هزینه های اقتصادی بررسی و ارائه شده است.

کلید واژه‌ها: بتن خودتراکم، بتن خودترمیم شونده، خصوصیات مکانیکی، دوام، میکروسیلس

۱. مقدمه

از حدود ۱۷۰ سال گذشته بتن به طور گسترده در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. بتن خودتراکم یکی از گام‌های رو به جلو در زمینه بتن است. یکی از ابتکارات مهم اخیر مهندسین در زمینه تولید بتن، ساخت بتن خودتراکم بوده است[۲]. این بتن پدیده جدیدی در علم مصالح ساختمانی است که تقریبا سه دهه از عمر آن می‌گذرد. پیدایش فوق روان کننده‌ها به عنوان نوع جدیدی از افزودنی ها زمینه را برای ظهور بتن خود تراکم فراهم کرده است. بتن خودتراکم شاخه جدید بتن با مقاومت متوسط به بالا و روانی بسیار بالا است که بدون نیاز به ویبره کردن و تحت وزن خود داخل قالب را پرمی کند و میتوان از آن به راحتی در مقاطع پرخاموت و با تراکم میلگرد باال از آن استفاده نمود[۳-۵]. همچنین این بتن دارای شکل پذیری و پایداری بالایی بوده تا ظرفیت پر کردن قالب های با اشکال پیچیده، مقاطع عمیق و باریک را داشته باشد [۶]. مقاومت فشاری بالا، ترد شکنندگی، کمبود مقاومت کششی و خمشی از محاسن و معایب اصلی بتن می‌باشند، که با استفاده از الیاف های فولادی می‌توان برخی از معایب بتن را بهبود بخشید [۷-۸]. موهینی و همکاران در سال ۲۰۱۹ مطالعاتی بر روی بتن خودتراکم انجام داده که به بررسی طرح مخلوط های بتن خودتراکم با مقاومت بالا پرداخته بودند. در این مقاله نسبت آب

به سیمان، میزان آب، درصد ریز دانه به کل مواد سنگی، میزان خاکستربادی، فاکتور جذب هوا و میزان فوق روان کننده به عنوان فاکتور یا عوامل تاثیر گذار در طرح مخلوط بتن خودتراکم با مقاومت بالا به نرم افزار تعریف کردند و بهترین طرح مخلوط برای مقاومت بالا و وجود کمتر هوای جذب شده را بدست آوردند [۹].

ساید و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از روشی خاص به بهینه سازی طرح مخلوط بتن خودتراکم برای بدست آوردن میزان جایگزینی میکروسیلیس با سیمان پرداخته و مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۵×۵×۵ سانتیمتری را بدست آوردند. نتایج نشان داد که نسبت بهینه برای طرح مخلوط، ۱۵۰ گرم میکروسیلیس، ۵۵۰ گرم سیمان و ۱۴۰۰ گرم ماسه است. یعنی ۱۸/۵۲٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان شد. مقاومت فشاری این طرح ۵۴ مگاپاسکال و جذب آب ۵/۳۵۹ ٪ را نشان می دهد [۱۰].

میکرو و نانو سیلیس، تخلخل در سیمان هیدراته شده را به وسیله‌ی پر کردن فضاهای خالی بین ذرات بزرگتر در مقیاس نانو کاهش می‌دهند. علاوه بر این، این دو فعالیت‌های پوزولانی را در مصالح و خاکستر بادی فراهم می-کنند، که نتایج آن منجر به افزایش سریعتر در مقاومت و پتانسیل برای کاهش مشکلات و مقاومت آهسته در مصالح پوزولانی می‌باشد [۱۱]. میکروسیلیس همچنین می‌تواند مقدار سیمان مورد نیاز برای بتن را کاهش دهد، در نتیجه کاهش تولید حرارت بالا و وجود مشکلات انقباضی با محتویات بالا کاهش پیدا می‌کند[۱۲].

گارسیا و همکارانش اصلاح بتن خودتراکم با آمورف نانوسیلیس با درصدهای مختلف نانوسیلیکا در بتن خودتراکم با توزیع ذرات مشابه از طریق دو فرآیند متفاوت مورد آزمایش قرار دادند. تأثیر نانوسیلیس بر خواص بتن تازه و دوام بتن سخت شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می¬دهد که نانوسیلیس می‌تواند خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود ببخشد[۱۳]. ارهان گونوسی و همکاران بررسی رفتار رئولوژیکی نانوسیلیس و خاکستر تازه بر مخلوط بتن خودتراکم مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق آزمایشگاهی از نانوسیلیس با درصدهای ۲و۴ و۶ درصد وزنی سیمان و نسبت وزنی آب به سیمان ۰/۳۳ تحت آزمایش‌های بتن تازه از جمله زمان افت جریان، جعبه L، قیف V و غیره قرار گرفت و نتایج حاکی از این بود که افزودن خاکستر بادی نسبت به افزودن نانوسیلیس تأثیر بهتری در بهبود خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم داشته است[۱۴].

بسیاری از محققان با الهام از طبیعت، مانند درمان طبیعی زخم یا بریدگی در موجودات زنده که می‌توانند به صورت خود به خودی زخم خود را درمان کنند، توانسته‌اند از این ایده برای مصالح مصنوعی مانند بتن استفاده کنند و بتن را به عنوان یک بتن هوشمند معرفی نمایند [۱۵]. سالانه مقادیر هنگفتی صرف شناسایی و تعمیر خرابی های به وجود آمده در بتن میشود. یکی از متداولترین گسیختگی‌ها در بتن، ترک خوردگی است[۱۶]. در گذشته برخی تحقیقات کامل روی موضوع بتن خودترمیم انجام گرفته است. نویل در سال ۱۹۸۱ به پدیده ترمیم ذاتی بتن و علت آن اشاره کرده بود. او دریافت که ممکن است ترک‌های ریز در بتن بهطور کامل تحت شرایط مرطوب ترمیم پیدا کنند و علت این پدیده را تأخیر هیدراتاسیون، ذرات سیمان هیدراته نشده و کربناسیون بیان کرده بود[۱۷]. برای اولین بار راما کریشنان و همکاران در سال ۱۹۹۸، کنفرانس بین‌المللی در استرالیا ایده استفاده از باکتری در بتن برای ترمیم ترک را پیشنهاد دادند [۱۸]. در ادامه راما چاندران و همکاران (۲۰۰۶) استفاده از میکروارگانیسم در بتن را ادامه دادند، آنها پوشش ترک توسط باکتری را در بتن بررسی کردند و به نتایج مثبتی رسیدند [۱۹]. سوکی بنگ و همکاران در سال ۲۰۰۱ تأثیر استفاده از باکتری باسیلوس پاستوری بر تولید کلسیم کربنات در ملات سیمان را بررسی کردند. آنها ملات سیمان ساخته شده را دچار ترک کردند و سپس با اضافه کردن خارجی نوار فوم حاوی غلظت¬های مختلف باکتری در قسمت ترک‌ها و قرار دادن نمونه¬ها در محیط کشت حاوی اوره و کلسیم کلرید (به عنوان ماده مغذی برای تولید کلسیم کربنات) پوشش ترک را بررسی کردند [۲۰]. قوش و همکاران در سال ۲۰۰۵ با استفاده از باکتری بی هوازی کولی و باکتری شوانلا، مقاومت فشاری بتن (ملات ماسه سیمان) را در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در غلظت های مختلف میکروارگانیسم بررسی کردند. مقاومت فشاری در همه‌ی غلظت‌های میکروارگانیسم افزایش پیدا کرد و بیشترین افزایش برای غلظت ۱۰۵ سلول بر میلی‌لیتر برای تمامی سنین بود که به ۲۵ درصد در ۲۸ روز رسید [۲۱]. دمیونک و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی وجود کلسیم کلرید به عنوان منبع غنی کلسیم در کنار باکتری پرداختند. آنها نشان دادند حضور کلسیم کلرید، میزان رسوب گذاری کلسیم لاکتات روی سطح بتن را افزایش داده و در نتیجه سطح آب موینه و نفوذپذیری در برابر گازها کاهش می یابد [۲۲]. جونکرز و همکاران در سال ۲۰۱۰ برای آزمایش بتن حاوی باکتری از باکتری اسپوروسارسینا پاستوری در آب مخلوط بتن استفاده کردند. دو سری بتن با باکتری و بدون باکتری ساخته شد و مقاومت فشاری و خمشی آنها در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه بررسی شد. از نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که این باکتری تأثیر چندانی روی مقاومت خمشی و فشاری بتن ندارد [۲۳]. ون تیتلبون و همکاران در سال ۲۰۱۰ باکتری باسیلوس اسفاریکوس را برای هدف خود ترمیمی در بتن مناسب

دانسته و نشان دادند که رسوبات تولید شده توسط این باکتری‌ها تأثیر زیادی در مقاومت فشاری بتن دارد. آن‌ها به منظور محافظت از باکتری در برابر محیط خشک و قلیایی بتن از سیلیکا ژل استفاده کرده اند. آن‌ها با ایجاد شیارهای مصنوعی روی سطح بتن، به این نتیجه رسیدند که در صورت محافظت از باکتری، می‌توان ترک‌های با عمق بیشتر را نیز، ترمیم سطحی نمود [۲۴]. نصوحیان و همکاران در سال ۲۰۱۵، پنج گروه از نمونه‌های بتنی را تولید کرده و از طریق سوسپانسیون‌های حاوی اسپوروسارسینا پاستوری، باسیلوس اسفاریکوس و باسیلوس سابتیلیس سطح نمونه‌ها را ترمیم سطحی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با ترمیم سطحی نمونه‌های بتنی نیز می‌توان مشخصات دوام بتن (مقاومت فشاری، درصد جذب آب و نفوذ یون کلر) را بهبود بخشید [۲۵]. مستوفی نژاد و سلماسی در سال ۲۰۲۰ به بررسی دوام و مقاومت فشاری بتن سبک وزن حاوی باکتری پرداختند. نتایج نشان دادند که با استفاده از باکتری در بتن، تغییرات جرم، حجم و جذب آب کاهش یافته و مقاومت فشاری نمونه ها افزایش می‌یابد [۲۶].

۲- طراحی آزمایش به کمک نرم افزار دیزاین اکسپرت

جهت بهینه سازی و کاهش تعداد آزمایش ها از نرم افزار دیزاین اکسپرت و روش باکس بنکن استفاده گردید.

اساس طرح‌های مخلوط برمبنای نمونه بتنی خودمتراکم بصورت شاهد و خودترمیم شونده است که درجدول۱ ارائه شده است.

نمونه طرح نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

متغیرهای اصلی پژوهش مواد پوزولانی بصورت میکروسیلیس، مواد افزودنی خودترمیم شونده شامل کریستال-شونده‌ها و نسبت آب به سیمان و سن رشد بتن می‌باشد که سن رشد بتن ۷ و ۲۸ روز در نظر گرفته شده است.

در این آزمایش‌ها، میکروسیلیس و افزودنی خودترمیم‌شونده به عنوان درصد معینی جایگزین سیمان معرفی شده‌اند.

میزان نسبت های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴ و ۰/۴۵ بوده است و میزان جایگزینی میکروسیلیس با سیمان ۵ و ۷/۵ و ۱۰ درصد ومیزان افزودنی خودترمیم شونده نیز ۱/۵ و ۳ درصد بوده است.

محدوده میزان استفاده از مواد خودترمیم شونده براساس پیشنهاد شرکت سازنده بوده است.

عیار سیمان نیز ۴۰۰کیلگرم برمترکعب فرض شده است.

جدول(۱). طرح های مخلوط پیشنهادی جهت انجام آزمایش برحسب کیلوگرم

شماره	w/c	افزودنی(٪)	میکروسیلیس(٪)	افزودنی(کیلوگرم)	میکروسیلیس(کیلوگرم)
۱	۰/۴	۰	۰	۰	۰
۲	۰/۳۵	۳	۷/۵	۱	۲/۴
۳	۰/۴	۳	۱۰	۱	۳/۲
۴	۰/۴۵	۱/۵	۵	۰/۵	۱/۶
۵	۰/۴۵	۰	۷/۵	۰	۲/۴
۶	۰/۴۵	۳	۷/۵	۱	۲/۴
۷	۰/۴۵	۱/۵	۱۰	۰/۵	۳/۲
۸	۰/۳۵	۱/۵	۱۰	۰/۵	۳/۲
۹	۰/۳۵	۱/۵	۵	۰/۵	۱/۶
۱۰	۰/۴	۰	۵	۰	۱/۶
۱۱	۰/۴	۰	۱۰	۰	۳/۲
۱۲	۰/۴	۱/۵	۷/۵	۰/۵	۲/۴
۱۳	۰/۴۵	۱/۵	۷/۵	۰/۵	۲/۴
۱۴	۰/۳۵	۱/۵	۷/۵	۰/۵	۲/۴
۱۵	۰/۴۵	۳	۵	۱	۱/۶
۱۶	۰/۳۵	۰	۷/۵	۰	۲/۴
۱۷	۰/۴	۳	۰	۱	۰
۱۸	۰/۴۵	۱/۵	۰	۰/۵	۰
جمع				۹	۳۳

جدول(۲). طرح مخلوط پیشنهادی

خودترمیم کننده	میکروسیلیس	سیمان	آب	ماسه	نخودی	بادامی	طرح
۵۸۰	۹۶۰	۱۷۶۶۰	۱۰۶۶۰	۵۱۵۳۰	۱۰۳۸۰	۱۷۷۴۰	۱۴
۰	۱۴۴۰	۱۷۷۶۰	۸۸۸۰	۵۵۱۷۰	۱۱۱۱۰	۱۹۰۰۰	۱۵

۳- مصالح

مصالح بکار رفته در آزمایش شامل سیمان دلیجان(تیپ۲)، بادامی و نخودی، ماسه، روان کننده، آب(تهران) و میکروسیلیس(ازنا) بوده است.

۳-۱ سیمان

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه دلیجان مطابق با استاندارد [27] ASTM C150 و استاندارد۳۸۹ استفاده شد که مشخصات دانه‌بندی آن در جدول ۳ نشان داده شده است

جدول(۳). مشخصات سیمان مصرفی

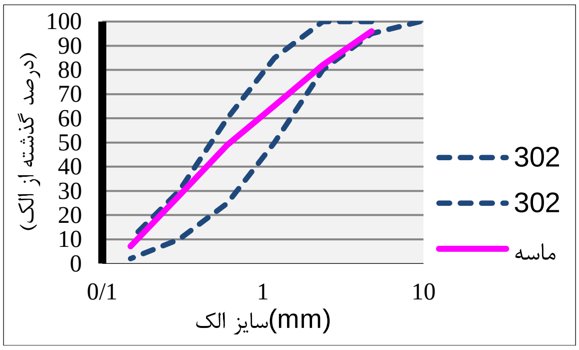
	الزامات استاندارد ملی ۳۸۹	خصوصیات فیزیکی سیمان مصرفی
چگالی (kg/m^3)	-	۳۱۴۰
سطح ویژه (m^2/kg)	بیشتر از ۲۸۰	۳۳۶
زمان گیرش اولیه (min)	بیشتر از ۴۵	۱۱۳
زمان گیرش نهایی (min)	کمتر از ۳۷۵	۱۶۵
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	بیشتر از ۱۷۵	۳۸۷
مقاومت فشاری۲۸روزه (kg/cm^2)	بیشتر از ۳۱۵	۴۹۸

شکل(۱). نمودار دانه بندی ذرات سیمان

۳-۲ سنگدانه

سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل ماسه‌ی رودخانه‌ای و شن شکسته می‌باشند که از داخل کارخانه شهید ولیزاده استان تهران تهیه شده‌اند. سنگدانه‌ها باید الزامات دانه‌بندی استاندارد ملی ۳۰۲ را داشته باشند بنابراین در ابتدا باید دانه‌بندی آنها بر اساس استاندارد ملی ۴۹۷۷ تعیین شود [۲۸].

شکل ۲ نشان می‌دهد ماسه‌ی مصرفی الزامات دانه‌بندی استاندارد ملی ۳۰۲ را دارا می‌باشد [۲۸-۲۹].



شکل (۲). مقایسه‌ی دانه‌بندی ماسه مصرفی با الزامات استاندارد ملی ۳۰۲

۳-۳ آب مصرفی

آب مورد استفاده در این پژوهش آب آشامیدنی شهر قم می‌باشد که براساس استاندارد ملی ۱۴۷۴۸ استفاده از آن برای ساخت بتن منعی ندارد [۳۰].

۳-۴ فوق روان کننده

در این پژوهش سعی شده است کارایی در طرح‌های اختلاط مختلف، با حفظ اسلامپ بالا جهت خودتراکم بودن بتن ثابت نگه داشته شود. این فوق‌روان‌کننده که بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات اتر می‌باشد از شرکت البرز شیمی تهیه شده و الزامات افزودنی‌های شیمیایی بتن بر اساس استاندارد ملی ۲۹۳۰ را دارا می‌باشد [۳۱].

۳-۵ میکروسیلیس

در این پژوهش میکروسیلیس به عنوان یک افزودنی معدنی جایگزین بخشی از سیمان شده است. میکروسیلیس مصرفی از شرکت صنایع فروآلیاژ ایران واقع در ازنای لرستان تهیه شده و الزامات فیزیکی و شیمیایی استاندارد ملی ۱۳۲۷۸ را دارا می‌باشد. [۳۲]

۳-۶ موادخودترمیم شونده

افزودنی های بکار رفته شامل کپکوپروفWPL و

کپکوپروف WPL و استراسیل C512 می باشد که هر سه از شرکت های ایرانی گرفته شده اند که در شکل ۳ نمونه ای از آن‌ها نشان داده شده است.

شکل(۳). نمونه مواد خود ترمیم شونده

۴- آزمایش ها

۴-۱ آزمایش تعیین اسلامپ بتن

آزمایش تعیین اسلامپ از جمله آزمایش‌های بتن تازه می‌باشد که میزان کارایی بتن را نشان می‌دهد. در این آزمایش ابتدا قالب مخروطی شکل مرطوب شده و در محل صاف و سختی که نتواند رطوبت جذب کند قرار می‌گیرد. سپس قالب با استفاده از پاگیرها ثابت شده و طی سه لایه پر می‌شود. هر لایه باید توسط کوبه با ۲۵ ضربه متراکم شود، ضربه‌ها باید به گونه‌ای باشند که کمی در لایه‌ی زیرین نفوذ کنند. در مرحله‌ی بعد سطح قالب صاف شده و قالب طی ۵ تا ۱۰ ثانیه به صورت عمودی و کاملا آرام برداشته می‌شود. در نهایت از حاصل تفاضل ارتفاع قالب و ارتفاع نمونه، اسلامپ بتن به دست می‌آید. با توجه به خودتراکم بودن بتن، نمونه‌ها دارای اسلامپ بالایی بوده‌اند. کلیه‌ی مراحل این آزمایش بر اساس استاندارد ملی ۲-۳۲۰۳ صورت می‌گیرد. شکل ۴ نحوه‌ی تعیین اسلامپ بتن را نشان می‌دهد [۳۳].

شکل(۴). انجام آزمایش اسلامپ و نتیجه آن

۴-۲ آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بتن براساس استاندارد ملی ۳۲۰۶ بوده است[۳۴]. نمونه ها ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلیمتر بوده است و از هر طرح مخلوط، سه آزمونه در سنین ۷ و ۲۸ روز آزمایش شد و میانگین آن ها ثبت گردید. سرعت بارگذاری استاندارد برای شکست آزمونه بتن تحت آزمایش ۲۵ /۰ مگاپاسکال بر ثانیه بوده است. نمونه ای از بارگذاری و شکست آزمونه ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

شکل(۵). آزمایش مقاومت فشاری

۴-۳ آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن

آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی از جمله آزمایش‌های دوام بتن می‌باشد که در این پژوهش برای هر شش طرح در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام می‌گیرد. در این آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰*۲۰ به محض خارج شدن از آب و در حالت کاملا مرطوب توسط دستگاه مخصوص اندازه‌گیری می‌شود. کلیه‌ی مراحل این آزمایش بر اساس استاندارد ASSHTO TP 95 صورت می گیرد [۳۵].

نمونه مورد آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.

شکل(۶). آزمایش مقاومت الکتریکی

۴-۴ آزمایش تعیین میزان نفوذ کلرید در بتن

نفوذ کلرید در بتن حتی در نسبت‌های آب به سیمان بالا به کندی صورت می‌گیرد، بنابراین لندازه‌گیری میزان این نفوذ در حالت عادی فرایندی زمان‌گیر می‌باشد. محققان دریافتند اتصال یک جریان الکتریکی به یک نمونه‌ی بتنی نفوذ کلرید در آن نمونه را سرعت می‌بخشد. آنها با توجه به این نکته دو روش برای لندازه‌گیری میزان نفوذ کلرید در بتن ارائه دادند که یکی ارزیابی سریع انتشار کلرید (RCMT) و دیگری ارزیابی سریع نفوذ کلرید (RCPT) می‌باشد. RCMT بر اساس یکی از استانداردهای AASHTO T 357 یا NT BUILD 492 انجام شده و خروجی‌هایش بر حسب پیکومتر مربع بر ثانیه

می‌باشد. اما RCPT بر اساس یکی از استانداردهای ASTM C 1202 یا AASHTO T 277 یا NT BUILD 355 صورت گرفته و خروجی‌هایش بر حسب کولمب می‌باشد [۳۶-۴۰].

در این پژوهش از روش RCPT استفاده شده و میزان نفوذ کلرید برای طرح‌های اختلاط در سن ۲۸ روزه اندازه‌گیری گردید. کلیه مراحل آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C1202 صورت می‌گیرد. به این منظور در ابتدا نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۰ در ۲۰ سانتی‌متری به گونه‌ای برش داده می‌شود که سه نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۰ در ۵ سانتی‌متری ایجاد شود. در این آزمایش نمونه های اشباع شده در آب به قطر ۱۰۰ میلی متر و به ضخامت ۵۰ میلی متر بین دو ظرف با محلول های ۳ درصد NaCl و 0.3 M سدیم هیدروکسید NaOH مطابق شکل۷ قرار داده می شود.

پس از آن در مدت ۶ ساعت، ۶۰ ولت برق اعمال می شود. پس از اتمام آزمایش، کل بار الکتریکی عبور کرده اندازه گیری می شود. مقادیر تست RCPT تابع ریز ساختار بتن و هدایت الکتریکی محلول منافذ در بتن است.

شکل (۷). دستگاه اندازه‌گیری میزان نفوذ کلرید در بتن

۴-۵ آزمایش جذب آب حجمی نیم ساعته

برای بررسی مقدار جذب آب در بتن از آزمایش جذب آب حجمی طبق آیین نامه BS 1881 part122[41] استفاده می شود. این آزمایش عمدتا برای نمونه‌های بتنی استوانه ای ۱۰ در ۵ سانتی متر برش خورده انجام می‌شود که باید دارای طول معینی باشد و نمونه کاملا خشک شده در آون (پس از سه روز)، غرقاب می‌شود و درصد جذب آب نیم ساعته بدست می‌آید.

مقدار جذب آب آنها براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود که m، وزن نمونه‌ی مرطوب و m_0، وزن نمونه‌ی خشک اولیه است. شکل۸ آزمایش جذب آب حجمی را نشان می‌دهد.

$$\text{جذب آب}=\frac{m-m_0}{m_0}$$

شکل(۸). دستگاه اندازه‌گیری جذب آب حجمی نیم ساعته

۵- بررسی و تحلیل نتایج

۵-۱ نتایج آزمایش تعیین اسلامپ

در تمامی ۵۴ نمونه ساخته شده به دلیل خود تراکم بودن تمامی نمونه ها از روان کننده استفاده شد که با توجه به اضافه شدن آن، اسلامپ ثابت و روانی گزارش شده در آزمایش برابر با ۶۲ فرض شده است.

۵-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمون مقاومت فشاری ۲۸ روزه برحسب مگاپاسکال در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول(۴). نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸روزه

نمونه	WPL	WPC	C512
ha01	42.9	42.9	42.9
ha02	49.1	50.35	56.3
ha03	35.6	55.45	41.2
ha04	44.9	48.5	37.8
ha05	48	58	58
ha06	39.7	50.35	39.9
ha07	49.8	53.55	39
ha08	62.8	70	45
ha09	53.5	61.3	54.5
ha10	54.9	54.9	54.9
ha11	56.15	56.15	56.15
ha12	45.2	60.75	40.6
ha13	43.8	51.35	40.6

47.7	63.4	44.4	ha14
36.3	40.4	38	ha15
64.4	64.4	64.4	ha16
38.4	32.55	29.85	ha17
31.9	46.1	35.65	ha18

مطابق نتایج ارائه شـــده نمونه های دارای افزودنی WPC دارای رشد مقاومتی بیشتری نسبت به سایر نمونه ها بوده‌اند که نشــان دهنده عملکرد مطلوب این ترمیم شــونده با طرح مخلوط داده شده، جهت کسب مقاومت فشاری در دراز مدت است. نمونه های ha08 و ha09 و ha16 دارای مقاومت فشــاری بیشــتری نسـبت به سـایر نمونه ها هسـتند. که این امر نشـان دهنده تاثیر مثبت میکروسیلیس در فرآیند کسب مقاومت فشاری بیشتر است. در نمونه های بدون وجود میکروســیلیس و تنها دارای افزودنی ترمیم شــونده، فقط نمونه های WPC رشــد مقاومتی بیشــتر از نمونه شـاهد داشـته اند و الباقی نمونه ها عملکرد ضـعیفی داشـته اند.

۵-۳ نتایج آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن

نتایج آزمون مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه در جدول۵ ارائه شده است

جدول(۵). نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی ۲۸روزه

C512	WPC	WPL	نمونه
11.6	11.6	11.6	ha01
33.9	25.3	29.6	ha02
34.1	28.1	30	ha03
19.7	18.1	17.7	ha04
25.5	25.5	25.5	ha05
24.4	22.4	23.1	ha06
28.1	25.4	34.3	ha07
35.1	36.1	40.4	ha08
23.3	21.1	16.1	ha09
22.7	22.7	22.7	ha10
31.8	31.8	31.8	ha11
28.3	25.7	28.4	ha12
22.5	22	22.5	ha13
29	27.3	29.8	ha14
18.8	17.5	18.5	ha15
31.7	31.7	31.7	ha16
8.6	10.1	12.4	ha17
10	11.1	10.8	ha18

مطابق نمودار ارائه شـده نمونه های دارای افزودنی WPL در سـن ۲۸ روز رشـد چشـمگیری نسـبت به سـن ۷ روز از لحاظ مقاومت الکتریکی داشـــته لند. نمونه ha08با تمام افزودنی های ترمیم شــونده دارای بیشــترین مقاومت الکتریکی هســتند. نمونه دارای افزودنی WPL دارای مقاومت الکتریکی ۴۰/۴ اســـت که نسـبت به نمونه شـاهد ۳/۵ برابر رشـد داشـته اسـت. نمونه دارای افزودنی WPC دارای مقاومت الکتریکی ۳۶/۱ است که نسبت به نمونه شـاهد ۳/۱ برابر رشـد داشـته اسـت. نمونه دارای افزودنی C512 دارای مقاومت الکتریکی ۳۵/۱ اسـت که نسـبت به نمونه شاهد ۳ برابر رشد داشته است. این طرح به عنوان طرح برگزیده از لحاظ مقامت الکتریکی می‌تواند انتخاب شود.

۵-۴ نتایج آزمایش تعیین میزان نفوذ کلرید در بتن

نتایج آزمون تعیین میزان نفوذ کلرید در بتن در شکل ۹ ارائه شده است.

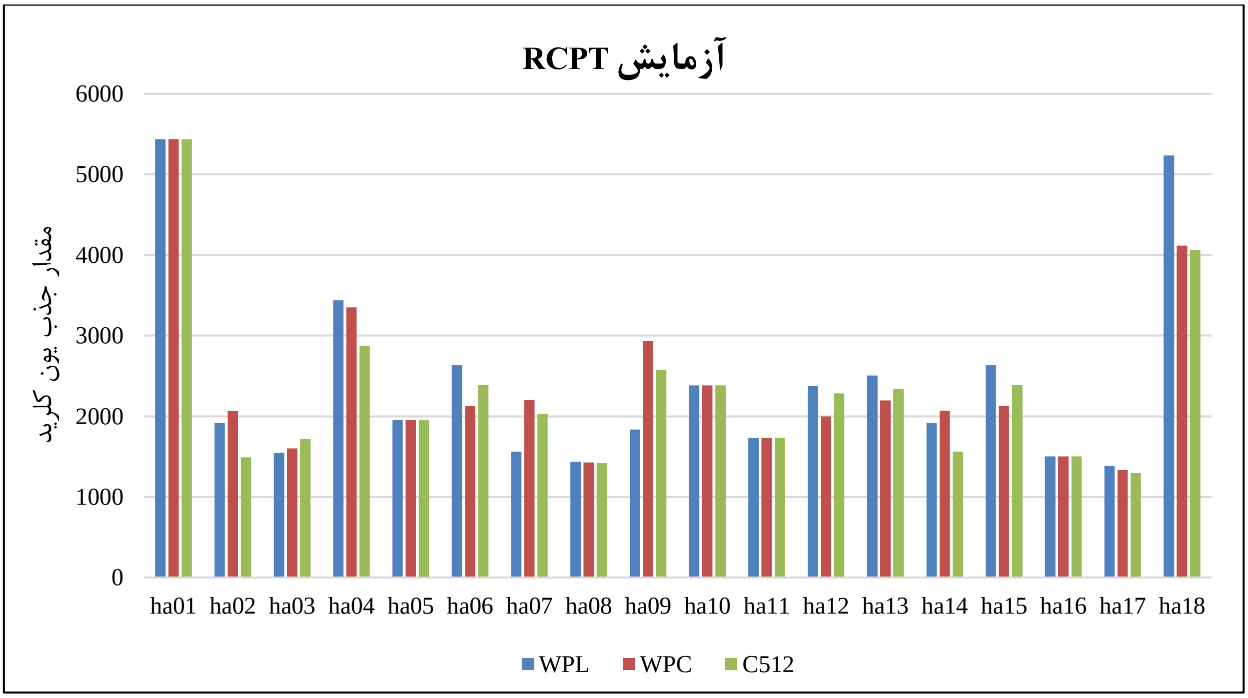
نمونه ha08 دارای انواع افزودنی در مقابل حملات و نفوذ کلرید بسـیار مقاوم هسـتند و بهترین عملکرد را دارند به گونه ای که این نمونه نسـبت به نمونه شـاهد ۳/۸ برابر کاهش میزان نفوذ کلرید را دارد. مطابق با معیار نفوذپذیری یون کلر براســـاس بار الکتریکی عبوری در نمونــه ha08 بــا مقــدار ۱۴۱۷ دارای نفوذپذیری کمی اسـت در حالیکه نمونه شـاهد با مقدار ۵۴۳۸/۶ در مقابل یون کلر نفوذپذیری زیادی دارد.

۵-۵ نتایج آزمایش جذب آب حجمی نیم ساعته

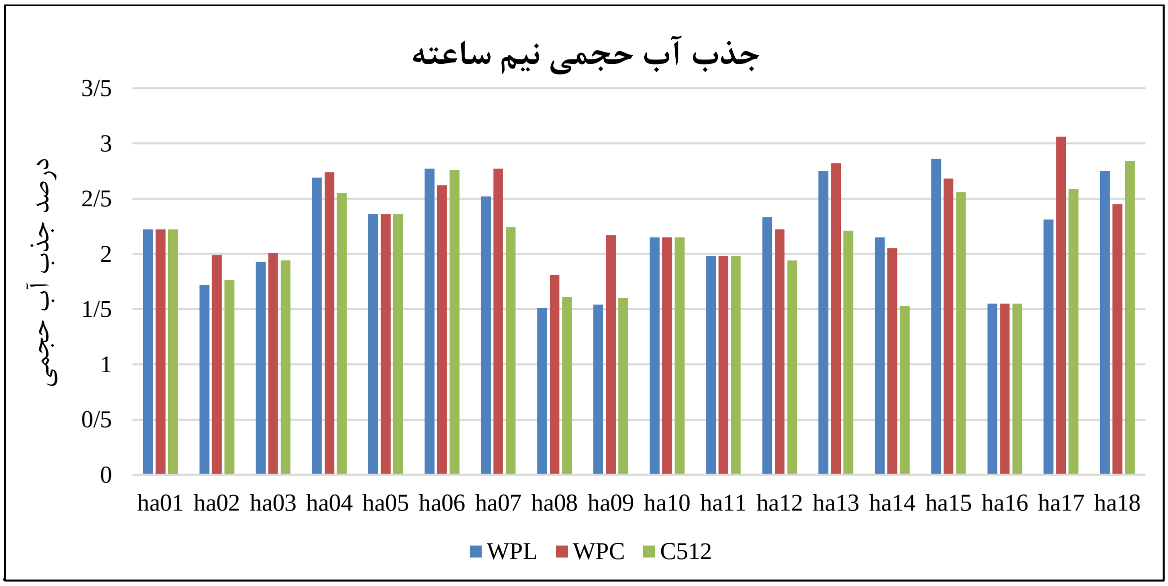
نتایج آزمون جذب آب حجمی نیم سـاعته در شـکل ۱۰ ارائه شده است.

مطابق نتایج ارائه شـــده نمونه ha08 دارای انواع افزودنی

WPL، WPC و C512 جذب آب حجمی کم و مناسبی دارند که در بین تمامی نمونه ها، نمونه ha08 دارای افزودنی WPLبا مقدار ۱/۵۱ و نمونه ha14 دارای افزودنی C512با مقدار ۱/۵۳ و نمونه ha16 با مقدار ۱/۵۵ درصد جذب آب حجمی نیم ساعته عملکرد مناسبی داشته اند به گونه ای که نسبت به نمونه شاهد حدود ۳۲ ، ۳۱/۱ و ۳۰/۲ کاهش درصد جذب آب حجمی نیم ساعته وجود داشته است. نکته قابل توجه در این سه نمونه این است که نسبت آب به سیمان آن ها ۰/۳۵ است و همچنین میزان افزودنی دو نمونه ha08 و ha14 برابر با ۱/۵ درصد است.



شکل(۹). نتایج آزمایش میزان نفوذ یون کلرید در بتن در سن ۲۸ روزه



شکل(۱۰). نتایج آزمایش میزان جذب آب حجمی نیم ساعته

۶- نتیجه گیری

۶-۱ بررسی نتایج تعیین اسلامپ

به دلیل خود تراکم بودن تمامی نمونه ها از روان کننده استفاده شد که با توجه به اضافه شدن آن، اسلامپ ثابت و روانی برابر با ۶۲ فرض شده است.

۶-۲ بررسی نتایج مقاومت فشاری

مطابق نتایج ارائه شده نمونه های دارای افزودنی WPC دارای رشد مقاومتی بیشتری نسبت به سایر نمونه ها بوده‌اند که نشان دهنده عملکرد مطلوب این افزودنی به عنوان ترمیم شونده با طرح مخلوط داده شده، جهت کسب مقاومت فشاری در دراز مدت است. نمونه های ha08 (دارای WPC) و ha16 و ha09 (دارای WPC) دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به سایر نمونه ها هستند که به ترتیب ۶۳٪، ۵۰٪ و ۴۳٪ کسب مقاومت فشاری ۲۸روزه بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشته اند که در تمامی این نمونه ها نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۳۵ بوده است.همچنین در تمامی این نمونه ها میکروسیلیس در فرآیند کسب مقاومت فشاری عملکرد مثبتی داشته است.

۶-۳ بررسی نتایج مقاومت الکتریکی

با توجه به جواب های بررسی شده نمونه های دارای افزودنی WPL در سن ۲۸ روز رشد چشمگیری نسبت به سن ۷ روز از لحاظ مقاومت الکتریکی داشته اند. نمونه ha08 با تمام افزودنی های ترمیم شونده دارای بیشترین مقاومت الکتریکی هستند. نمونه دارای افزودنی WPL نسبت به نمونه شاهد ۳/۵ برابر رشد، نمونه دارای افزودنی WPC نسبت به نمونه شاهد ۳/۱ برابر رشد و نمونه دارای افزودنی C512 نسبت به نمونه شاهد ۳ برابر رشد داشته است.

۶-۴ بررسی نتایج میزان نفوذ کلرید در بتن(RCPT)

طبق بررسی نتایج، نمونه ha08 دارای انواع افزودنی در مقابل حملات و نفوذ کلرید بسیار مقاوم هستند و بهترین عملکرد را دارند به گونه ای که این نمونه نسبت به نمونه شاهد ۳/۸ برابر کاهش میزان نفوذ کلرید را دارد. مطابق با معیار نفوذپذیری یون کلر براساس بار الکتریکی عبوری در نمونه ha08 با مقدار ۱۴۱۷ دارای نفوذپذیری کمی است در حالیکه نمونه شاهد با مقدار ۵۴۳۸/۶ در مقابل یون کلر نفوذپذیری زیادی دارد.

۶-۵ بررسی نتایج جذب آب حجمی نیم ساعته

نمونه ha08 دارای انواع افزودنی WPL، WPC و C512 جذب آب حجمی کم و مناسبی دارد که در بین تمامی نمونه ها، نمونه ha08 دارای افزودنی WPLبا مقدار ۱/۵۱٪ و نمونه ha14 دارای افزودنی C512 با مقدار ۱/۵۳٪ و نمونه ha16 با مقدار ۱/۵۵٪ جذب آب حجمی نیم ساعته عملکرد مناسبی داشته اند به گونه ای که نسبت به نمونه شاهد حدود ۳۲ ، ۳۱/۱ و ۳۰/۲ کاهش درصد جذب آب حجمی نیم ساعته وجود داشته است. نکته قابل توجه در این سه نمونه این است که نسبت آب به سیمان آن ها ۰/۳۵ است.

۷- مراجع

[1] M. A. Ghanbari, and B. Mehri, "Investigating the effect of styrene butadiene rubber, ethylene vinyl acetate and acrylic latex on the mechanical properties of lightweight concrete," Construction Sciences and Techniques, vol. 2(4), pp. 49-56, 1400. (**In Persian**)

[1] G. Hsin Lai, Ch. Chen, B. Chiang Jeng, and W. Chao, "Ant-based IP traceback," Expert Systems with Applications, vol. 34 pp. 3071-3080, 2008.

[2] M. A. Abba SI, M.M. Nuruddeen, "SelfCompacting Concrete – A Review." 2017, [May 2018].

[3] M. Gholhaki, A. Kheyroddin, M. Hajforoush, M. Kazemi, "an investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials," Construction and Building Materials, vol. 158, pp. 173–180, 2018.

[4] R. Saleh Ahari, T. Kamel Erdem, K. Ramyar, "Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of selfconsolidating concrete," Construction and Building Materials, vol. 75, pp. 89–98, 2015.

[5] M. Sonebi, "Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans," Cement and concrete research, vol. 34, pp. 119, 2004.

[6] R. Saleh Ahari, T. Kamel Erdem, K. Ramyar, "Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials," Construction and Building Materials, vol. 79, pp. 326–336, 2015.

[7] J. Sanjeev, K. Sai Nitesh, "Study on the effect of steel and glass fibers on fresh and hardened properties of vibrated concrete and self-compacting concrete," Materials Today: Proceedings, vol. 27, pp. 1559-1568, 2020.

[8] M. Mastali, A. Dalvand, "Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced with Hybrid

for the development of sustainable concrete," Ecological Engineering, vol. 36(2), pp. 230-235, 2010.

[24] K. Van Tittelboom, N. De Belie, and W. Verstraete, "Use of bacteria to repair cracks in concrete," Cement and Concrete Research, vol. 40(1), pp. 157-166, 2010.

[25] F. Nosouhian, D. Mostofinejad, and H. Hasheminejad, "Concrete Durability Improvement in a Sulfate Environment Using Bacteria," Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, vol. 28(1), pp. 1- 12, 2015.

[26] F. Salmasi, and D. Mostofinejad, "Investigating the effects of bacterial activity on compressive strength and durability of natural lightweight aggregate concrete reinforced with steel fibers," Construction and Building Materials, vol. 251, 119032, 2020.

[27] ASTM C150-0, Standard Specification for Portland Cement, Dec 20, 2012.

[28] Iran National Standard 302; Characteristics of concrete aggregates, Iran Institute of Standards and Industrial Research, Tehran, third revision, 2014. **(In Persian)**

[29] Iran National Standard 4977; Grading of fine and coarse aggregates, Iran Standard and Industrial Research Institute, Tehran, first revision, 2013. **(In Persian)**

[30] Iran National Standard 14748; Concrete mixing water, Iran Standard and Industrial Research Institute, Tehran, 2019**(In Persian)**.

[31] Iran National Standard 2930; Requirements of concrete additives, Iran Institute of Standard and Industrial Research, Tehran, 2013. **(In Persian)**

[32] Iran National Standard 13278; Characteristics of silica fume used in cement mixtures, Iran Standard and Industrial Research Institute, Tehran, 2015. **(In Persian)**

[33] Iranian National Standard 2-3203; Slump determination of fresh concrete, Iran Institute of Standards and Industrial Research, Tehran, second revision, 2016. **(In Persian)**

[34] Iran National Standard 3206; Determining the compressive strength of concrete samples, Iran Standard and Industrial Research Institute, Tehran, 1371. **(In Persian)**

[35] AASHTO TP95-14; Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, AASHTO, 2014.

[36] AASHTO T357-15; Predicting Chloride Penetration of Hydraulic Cement Concrete by the Rapid Migration Procedure, AASHTO, 2015.

[37] NT BUILD 492; Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest Method, 1999.

[38] ASTM C1202-18; Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, 2018.

[39] AASHTO T 277-15; Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete, AASHTO, 2015.

Recycled Steel–Polypropylene Fiber," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 29, 2017.

[9] M. Undal1, P.O. Modani, A.S. Gadewar, "Study of Self Compacting Concrete - A Review," International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 06, 2019.

[10] G. N. De Side, N. N. Kencanawati and Hariyadi. "An application of Taguchi experiment design methods on optimization of mortar mixture composition with Silica Fume as a partial substitute for cement," The International Conference on Mining and Environmental Technology, 2019.

[11] D. Corr, S.P. Shah, "Concrete Materials Science at the Nanoscale", proceeding of the International Conference (Application of Nanotechnology in Concrete Design)," University of Dundee, Scotland, U.K., Ed. Dhir, R.K., Newlands, M.D. and Csetenyi, L.J., London: Tomas Telford, vol.14, pp. 129-136, 2005.

[12] A.A. Ramzanianpour, Sh.Tahoni, "Compiled by Waddell, Dobrovolski, Manuscript of concrete implementation, second edition, Alam and Adab Publications," Tehran, 1382. **(In Persian)**

[13] Z. Quercia, P. Spiesz, G. Hüsken, H.J.H. Brouwers, "SCC modification by use of amorphous nano-silica", Cement and Concrete Composites, vol. 45, pp. 69-81, 2014.

[14] E. Güneyisi, M. Gesoglu, A. Al-Goody, and S. İpek, "Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete", Construction and Building Materials, vol. 95, 1, pp. 29-44, 2015.

[15] S. Sangadji, E. schlangen, "mimicking bone healing process to self- repair concrete structure novel approach using porous network concrete." procedia engineering, vol. 54, pp. 315-326. 2013.

[16] A. Tanakizadeh, M. Kharkhani, "Investigating cracking characteristics at low temperature of asphalt mixtures containing recycled asphalt crumb and sasobit additive using semicircle bending test." Construction Sciences and Techniques, vol. 3(1), pp. 11-26, 1401. (**In Persian**)

[17] neville am. properties of concrete. 3rd ed. longman; 1981.

[18] V. Ramakrishnan, S.S. Bang, and K.S. Deo, "A novel technique for repairing cracks in high performance concrete using bacteria. International Conference on High Performance High Strength Concrete," Perth, Australia, 1998.

[19] S.K. Ramachandran, V. Ramakrishnan, and S.S. Bang, "Remediation of concrete using microorganisms," ACI Materials Journal, vol. 98(1), pp. 3- 9, 2001.

[20] S.S.Bang, J.K. Galinat, and V. Ramakrishnan, "Calcite precipitation induced by polyurethaneimmobilized Bacillus pasteurii," Enzyme Microb Tech, vol. 28, pp. 404-409, 2001.

[21] P. Ghosh, S. Mandal, B.D. Chattopadhyay, and S. Pal, "Use of microorganisms to improve the strength of cement mortar," Cement Concrete Res, vol. 35, pp. 1980-1983, 2005.

[22] W. De Muynck, D. Debrouwer, N. De Belie, and W. Verstraete, "Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials," Cement Concrete Res, vol. 38, pp. 1005-1014, 2008.

[23] H.M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, and E. Schlangen, "Application of bacteria as self-healing agent

[40] NT BUILD 355; Concrete, mortar and cement based repair materials: Chloride diffusion coefficient from migration cell experiments, Nordtest Method, 1997.

[41] British 1881-122, Testing Concrete. Method for Determination of Water Absorption.