



## مطالعه آزمایشگاهی دوام بتن حاوی شیشه ریزدانه بازیافتی و دوده سیلیسی

مسعود سعادت خوش<sup>۱\*</sup>، سیمین طاهرزاده<sup>۱</sup>، مهدی آرزومندی<sup>۲</sup> و مجتبی حاجی‌مهدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته، کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه غیرانتفاعی شهاب دانش

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه غیرانتفاعی شهاب دانش

<sup>۲</sup> دانشجو، کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، مدیر واحد تحقیق و توسعه شرکت دانش بنیان نانو بتن امین

arezoumandi@shahabdanesh.ac.ir

**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 می باشد. شیشه نیز به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد ساخت دست بشر بوده که علاوه بر مصرف در صنعت ساخت و ساز، در دیگر صنایع بزرگ نیز استفاده به سزایی دارد. به این جهت بازیافت شیشه و به همان اندازه، حجم شیشه های ضایعاتی که قابل بازیافت نیستند، رو به گسترش نهاده است. در این مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی دوام بتن های حاوی دوده سیلیسی و سنگدانه شیشه بازیافتی، که دارای مزایایی چون کاهش آلودگی هوا، ذخیره سازی منابع طبیعی و کاهش مصرف انرژی است، پرداخته شده است. این تحقیق توسط انجام آزمایش های مقاومت ویژه الکتریکی بتن و نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCMT)، بر روی نمونه های بتنی با نسبت آب به سیمان 0.45 و حاوی 425 کیلوگرم بر متر مکعب سیمان، انجام شده است. درصد جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی 6 درصد و جایگزینی شیشه بازیافتی با بخش سنگدانه ریزدانه 5 و 10 درصد می باشد. نتایج این آزمایش ها حاکی از آن است که بتن حاوی میکروسیلیس و شیشه بازیافتی دارای مقاومت الکتریکی بیشتر و نفوذ یون کلراید کمتر نسبت به بتن معمولی (شاهد) بودند.

**کلمات کلیدی:** دوام، بتن بازیافتی، سنگدانه بازیافتی شیشه، دوده سیلیسی

## Experimental Study on Durability of Concrete with Fine Recycled Glasses and Silica Fume

M. Saadat khosh, S. Taher zade, M. Arezoumandi and M. Haji.Mahdi

**Abstract:** Recently, there has been an increasing trend toward the use of sustainable materials. Sustainability helps the environment by reducing the consumption of non-renewable natural resources. Concrete – the second most consumed material in the world after water – uses a significant amount of non-renewable resources. As a result, an experimental investigation was conducted to study the durability of concrete constructed with 5 and 10% fine recycled glass aggregate as well as 6% silica fume. This experimental program consists of six mix designs. The electrical resistivity and chloride ion penetration of recycled concrete mixes were compared with the conventional concrete samples. Results of this study show that the mixes including both recycled glass aggregate and silica fume show superior durability (both for electrical resistivity and chloride ion penetration) compared with conventional concrete samples.

**Keywords:** Durability, Recycled concrete, Silica fume, Recycled glass aggregate.

**1- مقدمه**

تا کنون طراحان سازه‌های بتنی بیشتر به مشخصات مقاومتی این ماده علاقه‌مند بوده اند، ولی به دلایل گوناگون، آن‌ها اکنون می‌باید برای دوام بتن نیز اهمیت ویژه‌ای قائل شوند. همچنین مناسب بودن اجزای تشکیل دهنده و عمل‌آوری بتن موجب افزایش طول عمر کارکرد بتن در بیشتر شرایط طبیعی و صنعتی می‌گردد، اما شکست زودرس سازه‌های بتنی نیز در بعضی مواقع رخ داده و درس‌های ارزشمندی را در مورد کنترل عامل‌های موثر در عدم دوام سازه‌های بتنی به ما می‌دهند.

دوام بتن یکی از مهمترین مشخصه‌های آن است که باید در هنگام طراحی و ساخت بتن، تمهیدات لازمی برای تامین آن در نظر گرفته شود. علاوه بر آن، می‌باید با روش‌های مناسب علمی، طول عمر خدمت‌دهی سازه‌های مختلف بتنی، نحوه رفتار آن‌ها در شرایط مختلف محیطی، وجود خوردگی‌ها و تخریب‌های احتمالی و علل آن‌ها و نحوه تعمیر و زمان انجام آن‌ها را مشخص سازیم. خوردگی فولاد مدفون در داخل بتن بر اثر نفوذ یون کلراید و پیامدهای آن، یکی از مهمترین انواع خرابی‌های سازه‌های بتن مسلح است که به ویژه به دلیل کثرت میزان آن، هر ساله خسارات بسیار زیادی را بر ابنیه بتنی وارد می‌آورد. علی‌رغم تحقیقات فراوانی که در این زمینه صورت گرفته است، اما به دلیل اهمیت فنی و اقتصادی موضوع، هنوز هم بخش عمده‌ای از تحقیقات مربوط به دوام بتن در این زمینه انجام می‌گیرد. این موضوع در کشور ما نیز، به دلیل جدی بودن مسئله، به ویژه در مناطق حاشیه سواحل و جزایر خلیج فارس و دریای عمان از اهمیت زیادی برخوردار است.

عمر خدمت‌دهی طولانی مترادف با دوام در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که دوام تحت یک مجموعه شرایط، لزوماً به معنای دوام تحت مجموعه شرایط دیگری نمی‌باشد، به همین دلیل متداول است که هنگام تعریف دوام اشاره‌ای کلی به محیط نیز بشود. بر طبق تعریف کمیته 201 انستیتوی بتن آمریکا (ACI) [1]، دوام بتن سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقاومت در

برابر عوامل هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش، و یا هر فرآیندی که موجب آسیب دیدگی شود، گفته می‌شود. بنابراین، بتن با دوام، بتنی است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت‌دهی خود را در شرایط محیطی حفظ کند. امروزه افزایش روز افزون هزینه‌های تعمیر و جایگزینی سازه‌ها، ناشی از خرابی مصالح، بخش عمده‌ای از کل بودجه ساخت و ساز را به خود اختصاص می‌دهد. به عنوان مثال، تخمین زده شده‌است که در کشورهای صنعتی بیش از 40 درصد کل منابع صنعت ساختمان در قسمت تعمیر و نگهداری سازه‌های موجود و کمتر از ۶۰ درصد آن برای احداث ساختمان‌های جدید بکار گرفته می‌شود. بهای روز افزون جایگزینی‌ها در سازه‌ها، و تاکید فزاینده بر هزینه‌های مصرفی در طی طول عمر سازه، به جای هزینه‌های مصرفی اولیه‌ی آن، مهندسان را مجبور می‌کند که دوام را جدی بگیرند [2-4].

حفاظت از منابع طبیعی از طریق با دوام‌تر ساختن مصالح در هر حال، یک اقدام زیست محیطی می‌باشد. همچنین، استفاده از بتن در محیط‌های آسیب رسان روز به روز نیز توسعه می‌یابد. از جمله‌ی این محیط‌ها، سکوهای فراساحل، مخازن و راکتورهای تحت فشار بالا در صنایع هسته‌ای را می‌توان نام برد. شکست‌های اخیر در سازه‌های فراساحل در نروژ نشان داد که هم تلفات جانی و هم خسارات مالی مربوط به خرابی زودرس و اتفاقی در مصالح ساختمانی می‌توانند بسیار زیاد باشند [5].

نفوذ کلرید در بتن که به عواملی چون مقدار ماده سیمانی، مقدار آب، دانه‌بندی سنگدانه و نحوه‌ی عمل‌آوری بستگی دارد موجب خوردگی آرماتورهای داخل بتن می‌شود. بنابراین همواره سعی می‌شود تا میزان نفوذ کلرید در بتن کاهش داده شود [6-7]. نفوذ کلرید در بتن حتی در نسبت‌های آب به سیمان بالا به کندی صورت می‌گیرد، بنابراین اندازه‌گیری میزان این نفوذ در حالت عادی فرایندی زمان‌گیر می‌باشد. محققان دریافته‌اند اتصال یک جریان الکتریکی به یک نمونه بتنی نفوذ کلرید در آن نمونه را سرعت می‌بخشد. آن‌ها با توجه به این نکته دو روش برای

افزایش مقاومت مکانیکی آن می‌گردد و بر اساس مطالعات انجام شده بازه‌ی 5 تا 15 درصد جایگزینی میکروسیلیس با سیمان پرتلند بیشترین مقاومت را حاصل می‌نماید [16-17]. این بتن‌ها به دلیل تراکم زیاد و نفوذپذیری کم از دوام مناسبی برخوردار هستند و همچنین توانایی آن‌ها در دفع یون‌های خارجی در ساختمان هیدرات‌ها این عملکرد مثبت را به جای گذاشته است. میکروسیلیس بخاطر ذرات بسیار ریز و جدا شده‌ی آن و همچنین درصد بسیار زیادی سیلیس آمورف (غیربلوری) برای تولید بتن با مقاومت و دوام بالا استفاده بیشتری دارد [18-19]. همچنین میکروسیلیس علاوه بر استحکام بخشیدن به سازه‌های بتنی باعث آب‌بندی و نفوذ ناپذیری آن‌ها در مقابل آب و کاهش اثر مواد شیمیایی بر روی بتن نیز می‌شود. و تاثیر مثبت میکروسیلیس در بتن عموماً در دو مکانیزم نمو پیدا می‌کند، یکی به جهت فعالیت پوزولانی بسیار زیاد میکروسیلیس که کاهش هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان پرتلند با آب را باعث شده و دیگری به علت ریزی زیاد میکروسیلیس خلل و فرج بین ذرات سیمان پر می‌گردد. اگر چه تحقیقات نشان می‌دهند که افزودن میکروسیلیس به بتن باعث افزایش دوام بتن در اثر کاهش نفوذپذیری (که منجر به کاهش نفوذ یون‌های مضر می‌گردند) و کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم (که باعث مقاومت بیشتر در مقابل حمله سولفاتی می‌گردد) می‌شود. افزایش دوام بتن خود باعث افزایش قدرت بتن حاوی میکروسیلیس در محافظت از خوردگی فولاد مدفون شده در بتن نیز می‌گردد [20].

مطالعات گوناگونی در ارتباط با دوام ملات و یا بتن حاوی شیشه ضایعاتی نیز انجام پذیرفته است. به عنوان نمونه مطالعات، توسط جین و نایتالات [21]، نشان داده است که شار عبوری ناشی از آزمون نفوذ یون کلر تسریع شده با جایگزینی وزنی 10 و 20 درصد پودر شیشه کاهش می‌یابد. روند مشابه در ملات حاوی خرده شیشه به عنوان جایگزین بخشی از ماسه توسط تان و دو [22]، گزارش شده است. بررسی دوام ملات حاوی پودر شیشه توسط لی و همکاران [23]، نشان

اندازه‌گیری میزان نفوذ کلرید در بتن ارائه دادند که یکی ارزیابی سریع انتشار کلرید<sup>1</sup> (RCMT) و دیگری ارزیابی سریع نفوذ کلرید<sup>2</sup> (RCPT) می‌باشد. روش RCMT بر اساس استاندارد [8] AASHTO T 357، بوده و خروجی‌های آن بر حسب پیکومتر مربع بر ثانیه می‌باشد اما روش RCPT بر اساس استاندارد [9] ASTM C120، بوده و خروجی‌های آن بر حسب کولن می‌باشد [10-11].

دوده سیلیسی دیگر به عنوان محصول جانبی حاصل از منابع فلز سیلیکون و آلیاژ فروسیلیکون ماده‌ای زائد نیست و یک ماده پوزولانی تثبیت شده است که قادر به بهبود خواص تولیدات سیمان پرتلند می‌باشد [12]. در دهه‌ی پنجاه میلادی اولین آزمایش‌ها بر روی تاثیرات میکروسیلیس بر روی بتن در نروژ انجام شد و تا قبل از اواسط دهه‌ی هفتاد میلادی میکروسیلیس در فضا تخلیه می‌شد، که در اثر مشکلات زیست محیطی و نگرانی‌های ناشی از آن باعث جمع آوری و دفن زباله میکروسیلیس شد و در دهه‌ی هشتاد میلادی استفاده از آن در بتن شکل اقتصادی به خود گرفت. به دلیل خصوصیات بارز پوزولانی میکروسیلیس، استفاده از آن برای بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن در کشورهای پیشرفته رو به افزایش است [13-14].

میکروسیلیس یک محصول جانبی از سیلیکون و فری سیلیکون صنعتی است. در دمای 2000 درجه سانتی‌گراد، بخار  $\text{SiO}_2$  تولید می‌شود و در ناحیه کم دما، ذرات کوچک متشکل از سیلیس غیر کریستالی اکسید می‌شود. میکروسیلیس یک ماده بسیار نرم و به صورت ذره‌های بسیار ریز می‌باشد و از مواد غیر بلوری با قطر حدود 0.1 تا 0.2 میکرون (حدود 100 برابر نرم‌تر از سیمان) و دارای جرم مخصوص 2.2 گرم بر سانتی‌مترمکعب و سطح مخصوص تقریبی 20 مترمربع در گرم و چگالی ظاهری 200 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد [15].

استفاده از میکروسیلیس با درصد‌های مختلف جایگزینی در بتن باعث بهبود خواص مکانیکی آن می‌گردد، به طور کلی استفاده از میکروسیلیس باعث

بنابراین قانون برخی از کشورها، سوزاندن مواد ضایعاتی را ممنوع کرده است و بازیافت برخی از ضایعات را در صنایع بخصوصی اجباری نموده اند. بازیافت برخی مواد ضایعاتی جهت استفاده در بتن، راهکار مناسبی برای نیل به دو هدف دفع مواد زاید و دستیابی به خواص مثبت در بتن می باشد. همچنین با توجه به رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای مسکن و به تبع آن مصالح ساختمانی، بازیافت ضایعات جهت استفاده در بتن و مصالح ساختمانی گامی موثر در این راستا می باشد. استفاده از برخی مواد ضایعاتی در بتن علاوه بر کاهش مضرات زیست محیطی، باعث صرفه-جویی در مصرف مواد اولیه تهیه بتن نیز می گردد. یکی از جمله مواد زاید، خرده شیشه های ضایعاتی است و در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.

هدف این تحقیق، بررسی اثر استفاده توام دوده سیلیسی و شیشه بازیافتی به عنوان جایگزین درصدی از ریزدانه، بر دوام بتن می باشد. برای بررسی دوام، از آزمایش های نفوذ تسریع شده یون کلر و مقاومت ویژه الکتریکی نمونه های بتنی استفاده شده است.

## 2- برنامه آزمایش

این پروژه آزمایشگاهی در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول مصالح آزمایش اعم از سنگدانه طبیعی، ریزدانه شیشه بازیافتی، سیمان و دوده سیلیسی انتخاب و مشخصات آنها اعم از مشخصات فیزیکی و شیمیایی مشخص شد. در مرحله دوم نیز 6 طرح اختلاط با عناوین زیر آماده سازی شد:

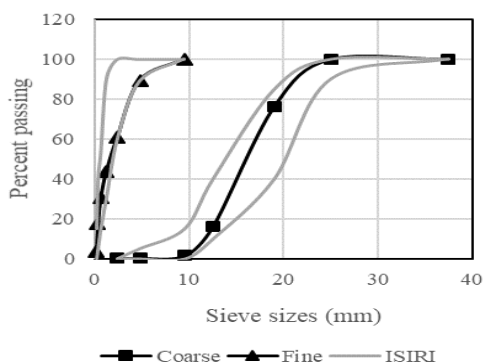
- نمونه شاهد با سنگدانه های طبیعی و فاقد دوده سیلیسی (CC)
- نمونه شاهد با سنگدانه های طبیعی همراه با 6 درصد دوده سیلیسی (CC-S)
- نمونه با 5 درصد جایگزینی ریزدانه شیشه بازیافتی فاقد دوده سیلیسی (T5)
- نمونه با 5 درصد جایگزینی ریزدانه شیشه بازیافتی همراه با 6 درصد دوده سیلیسی (T5-S)
- نمونه با 10 درصد جایگزینی ریزدانه شیشه بازیافتی فاقد دوده سیلیسی (T10)

داد که با جایگزینی 20 درصدی پودر شیشه مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در مقایسه با بتن معمولی افزایش می یابد.

در زمینه تاثیر دوده سیلیسی بر نفوذ یون کلر، ولی پور و همکاران در سال 2013، در تحقیق خود 5، 10 و 15 درصد سیمان را با دوده سیلیسی جایگزین کردند و برای نسبت آب به سیمان 0.4، نفوذ کلرید در بتن را برای سن 28 روزه به روش RCMT اندازه گیری کردند. نتایج تحقیق آنها نشان می داد جایگزینی 5، 10 و 15 درصد از سیمان با دوده سیلیسی، نفوذ کلرید در بتن را به ترتیب به میزان 74، 81 و 73 درصد کاهش می دهد [24]. علاوه بر این، ثابت و همکاران در سال 2013، نیز در تحقیق خود 10 و 20 درصد سیمان را با دوده سیلیسی جایگزین کردند و برای نسبت آب به سیمان 0.32، نفوذ کلرید در بتن را برای سن 90 روزه به روش RCMT اندازه گیری کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد جایگزینی 5 و 10 درصد از سیمان با دوده سیلیسی، نفوذ کلرید در بتن را به میزان 72 و 73 درصد کاهش می دهد [25]. همچنین گوپتا و همکاران در سال 2016، در تحقیق خود 5 و 10 درصد سیمان را با دوده سیلیسی جایگزین کرد و برای نسبت آب به سیمان 0.35، نفوذ کلرید در بتن را برای سن 28 روزه به روش RCMT اندازه گیری کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد جایگزینی 5 و 10 درصد از سیمان با دوده سیلیسی، نفوذ کلرید در بتن را به میزان 12 و 82 درصد کاهش می دهد [26].

با استفاده از برخی مواد ضایعاتی در بتن علاوه بر کاهش الودگی زیست محیطی، بعضا حتی می توان به خواص مثبت در بتن نیز دست یافت. به کار بردن مواد ضایعاتی و بازیافت در بسیاری از کشورهای جهان سوم هنوز در مرحله ابتدایی است و نیازمند تشویق و اجبار از طرف دولت است. در بعضی مناطق، مواد ضایعاتی را در بیابانها انباشته می کنند، که محل سکونت حشرات و حیوانات می شود؛ یا ممکن است مواد ضایعاتی را بسوزانند که دود ناشی از آن محیط زیست را آلوده و حرارت آن پدیده خطرناک گرم تر شدن جهان را تشدید می کند.

شده است. نمودار دانه بندی سنگدانه مصرفی در شکل 1 ارائه شده است.



شکل 1. نمودار دانه بندی ریزدانه و درشت دانه  
Fig. 1. Aggregate gradation chart

جدول 1. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و دوده سیلیسی

Table 1. Physical and chemical properties of cement and silica fume

Component	cement	silica fume
SiO <sub>2</sub>	20.7	93.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.7	1.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.1	0.9
CaO	63.8	0.5
SO <sub>3</sub>	2.3	0.1
MgO	1.3	1
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4	0.3
K <sub>2</sub> O	0.6	1
LOi	2.2	-
Specific gravity (kg/m <sup>3</sup> )	3100	200
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3080	-

جدول 2. مشخصات فیزیکی سنگدانه ها

Table 2. Physical properties of aggregates

Maximum aggregate (mm) size	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Water absorption (percent)	Aggregate
4.75	2467	2.2	Fine
19	2700	1.0	Coarse
4.75	2450	1.0	Recycled glasses (fine)

• نمونه با 10 درصد جایگزینی شیشه بازیافتی همراه با 6 درصد دوده سیلیسی (T10-S) برای هر طرح اختلاط 4 نمونه استوانه ای به ابعاد 100×200 میلیمتر براساس استاندارد ACI 211.1-91 [27]، تولید و بر همین مبنا دوام بتن مورد آزمایش قرار گرفت.

## 1-2- مصالح آزمایش

سیمان مورد استفاده، از سیمان پرتلند نوع 2 تهیه شده است، و مطابق با استاندارد ASTM C150 [28]، می باشد. دوده سیلیسی مصرفی در این تحقیق دارای وزن مخصوص 200 کیلوگرم بر مترمکعب و مطابق با استاندارد ASTM C1240 [29]، می باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و دوده سیلیسی در جدول 1 ارائه شده است. سنگدانه های طبیعی مصرفی در این آزمایش در بخش درشت دانه، شن از نوع شکسته کوهی شهر قم است. بزرگترین بعد شن استفاده شده 19 میلیمتر و چگالی آن 2700 کیلوگرم بر متر مکعب است. همچنین بخش ریزدانه، ماسه شسته رودخانه ای شهر قم بوده است که خواص فیزیکی آن ها در جدول 2 ارائه شده است. دانه بندی سنگدانه های طبیعی استفاده شده طبق ASTM C33 [30]، می باشد.

سنگدانه شیشه بازیافتی مورد استفاده در این آزمایش از ضایعات فروشی ها و نخاله های ساختمانی بوده است، که توسط دستگاه لس آنجلس خرد شده و تهیه شده است. دانه بندی این مصالح بازیافتی بطور کامل منطبق بر دانه بندی و مشخصات سنگدانه طبیعی (فاز ریزدانه) است. در جدول 2 نیز مشخصات فیزیکی شیشه بازیافتی ارائه شده است. این مصالح قبل از شروع ساخت نمونه ها در مجاورت محل ساخت بتن دپو شده و قبل از دانه بندی مواد خارجی و متفرقه از سطوح نمونه ها پاک شده است. آب مورد استفاده در این پژوهش نیز، آب شرب شهر قم است. برای جبران کاهش روانی مخلوط های دارای میکروسیلیس، از ابر روان کننده کربوکسیلاتی، به میزان 0.2 درصد در طرح اختلاط هایی که حاوی دوده سیلیسی هستند استفاده

**2-2- طرح اختلاط**

طرح اختلاط‌های بتن مورد آزمایش در این تحقیق مطابق آئین‌نامه 211.1-91 ACI [27]، بوده است. جدول 3، جزئیات طرح‌های اختلاط و مشخصات بتن تازه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه افزودن دوده سیلیسی موجب کاهش کارایی بتن می‌شود برای جبران این مشکل و نزدیک شدن اسلامپ بتن‌های حاوی دوده سیلیسی به اسلامپ بتن‌های دیگر از ابر روان‌کننده استفاده شده است.

**3- ارائه نتایج آزمایش**

در این بخش نتایج آزمایش‌های مقاومت ویژه الکتریکی (7، 14، 28 و 56 روز) و نفوذ تسریع شده یون کلراید (28 و 56 روز) بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**3-1- آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن**

با توجه به اینکه فرآیند خوردگی میلگرد فولادی در بتن یک فرآیند الکتروشیمیایی می‌باشد، لذا مقاومت ویژه الکتریکی بتن نقش قابل توجهی در میزان خوردگی دارد و می‌توان انتظار داشت که بتن‌های با

مقاومت ویژه الکتریکی بالاتر عملکرد بهتری در خصوص کاهش میزان خوردگی میلگردهای فولادی از خودشان نشان می‌دهند. در این تحقیق آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد 20×10 سانتی‌متر و در سنین 7، 14، 28 و 56 روز بر اساس استاندارد AASHTO T358-15 [31] انجام شده و نتایج آن در جدول 4 ارائه شده است. شکل 2 تجهیزات آزمایشگاهی محاسبه مقاومت ویژه الکتریکی را نشان می‌دهد.



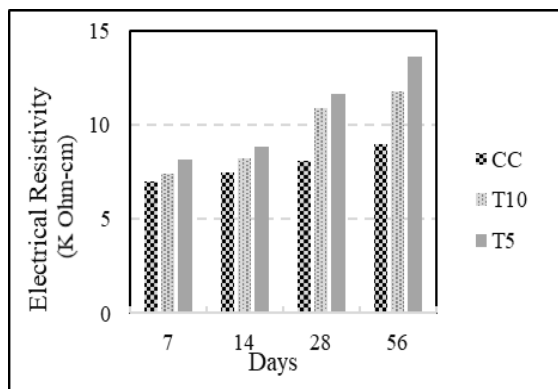
شکل 2. آزمایش مقاومت الکتریکی چهار نقطه‌ای

Fig. 2. Electrical Resistivity test

جدول 3. طرح اختلاط ( $\text{kg/m}^3$ )

Table 3. Mix proportions

Unit weight	Slump (mm)	Recycled glasses	Coarse aggregate	Fine aggregate	HRWR	Silica fume	Water	Cement	Mix
2356	91	0	690	1036	0	0	205	425	CC
2347	95	0	687	1027	0.8	25	209	400	CC-S
2351	125	51	688	980	0	0	206	425	M10
2342	120	51	685	974	0.2	25	206	400	M10S
2347	130	102	689	929	0	0	200	425	M15
2338	130	102	686	912	0.2	25	211	400	M15S



شکل 4. بررسی مقاومت ویژه الکتریکی بتن حاوی سنگدانه شیشه بازیافتی

Fig. 4. Electrical Resistivity of concrete with recycled glasses

نتایج مربوط به مخلوط های حاوی سنگدانه شیشه بازیافتی (شکل 4)، نشانگر این است که در سنین 7، 14، 28 و 56 روز، استفاده از 5 و 10 درصد سنگدانه شیشه بازیافتی، برای جایگزینی سنگدانه (ریز دانه)، با افزایش سن و توسعه ی واکنش های شیمیایی، افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن های حاوی سنگدانه شیشه بازیافتی را در بر دارد. شاپان ذکر است که در سنین 28 و 56 روز بتن حاوی 5 درصد سنگدانه شیشه بازیافتی عملکرد قابل توجهی در مقایسه با بتن شاهد CC، به لحاظ افزایش مقاومت ویژه الکتریکی داشته است. بتن T5 در سن 28 و 56 روز در مقایسه با بتن CC، به ترتیب 43 و 51 درصد افزایش مقاومت ویژه الکتریکی داشته است.

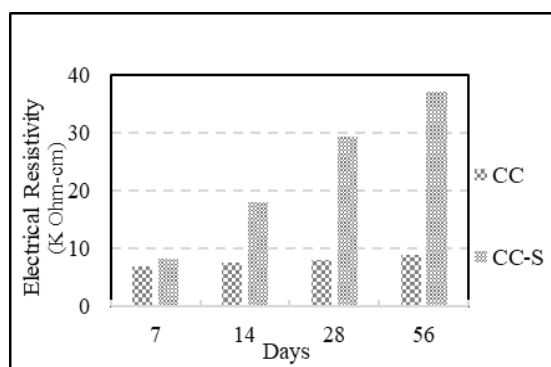
اما نکته قابل توجه این است که، نتایج آزمایش ها نشان می دهد که افزایش درصد سنگدانه شیشه بازیافتی در بتن موجب کاهش مقاومت الکتریکی را در پی دارد. بطوریکه نمونه T10 در مقایسه با بتن T5 در سنین 28 و 56 روز به ترتیب 7 و 15 درصد دچار کاهش مقاومت ویژه الکتریکی شده است.

شکل 5 اثر توام میکروسیلیس و سنگدانه شیشه بازیافتی بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن در سنین مختلف را نشان می دهد. با توجه به شکل 5، مشخص است که برای بتن سه جزئی حاوی 5 و 10 درصد سنگدانه شیشه بازیافتی جایگزین سنگدانه و 6 درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان (T10-S و T5-S)، مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به بتن های دو جزئی و

جدول 4. نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی  
Table 4. Results of Electrical Resistivity

Electrical Resistivity (K Ohm-cm)				Mix
56 days	28 days	14 days	7 days	
9.0	8.1	7.5	7.0	CC
37.2	29.3	18.0	8.2	CC-S
11.8	10.9	8.2	7.4	T10
43.7	31.8	15.7	8.2	T10-S
13.6	11.6	8.9	8.2	T5
58.3	36.0	17.5	7.3	T5-S

در شکل های 3 و 4 به ترتیب تاثیر کاربرد میکروسیلیس و سنگدانه شیشه بازیافتی بر مقاومت ویژه الکتریکی مخلوط های بتن نشان داده شده است. همانطور که در شکل 3 مشاهده می شود، در تمامی سنین، استفاده از میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن گردیده است. همچنین با افزایش سن و توسعه واکنش شیمیایی، نسبت مقاومت ویژه الکتریکی مخلوط های بتن حاوی میکروسیلیس به مقاومت ویژه الکتریکی مخلوط شاهد (CC) افزایش قابل ملاحظه ای پیدا کرده است. بطوریکه مقاومت ویژه الکتریکی مخلوط بتن CC-S نسبت به بتن شاهد، در سنین 14، 28 و 56 به ترتیب 2.5، 3.5 و 4 برابر شده است.



شکل 3. بررسی مقاومت ویژه الکتریکی بتن حاوی 6 درصد میکروسیلیس

Fig. 3. Electrical Resistivity of concrete containing 6% silica fume

مطالعات گذشته [32-36]، افزایش مقاومت الکتریکی بتن با شیشه بازیافتی را نسبت به بتن معمولی گزارش کرده اند که نتایج این آزمایش را تایید می کند.

### 2-3- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCMT)

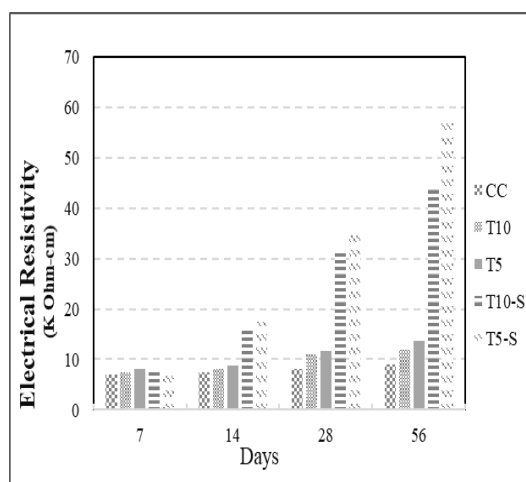
در آزمایش RCMT که طبق استاندارد AASHTO TP 64-03 [37] و NT-BUILD492 [38] انجام گرفته است، عمق نفوذ یون کلر به داخل نمونه بتنی را تحت اختلاف ولتاژ الکتریکی اندازه گیری و میزان نفوذ یون کلر به داخل بتن محاسبه می گردد. بدیهی است که مقادیر بالاتر میزان نفوذ یون کلر نشانگر عملکرد ضعیف تر آن بتن در برابر نفوذ یون کلر می باشد. نتایج آزمایش RCMT مخلوط های بتن، در سنین مختلف در جدول 5 ارائه شده است. در شکل 6، تجهیزات آزمایشگاهی مربوط نفوذ یون کلر در بتن نمایش داده شده است.

جدول 5. نتایج آزمایش نفوذ یون کلر (RCMT)  
Table 5. Results of chloride ion penetration

chloride ion penetration (Pm <sup>2</sup> /s)		Mix
56 days	28 days	
15.0	17.9	CC
4.5	4.6	CC-S
12.7	17.0	T10
3.7	5.0	T10S

جهت امکان بررسی بهتر تاثیر کاربرد میکروسیلیس بر روی ضریب نفوذ یون کلر در بتن، نتایج آزمایش RCMT به صورت نمودار در اشکال 7 و 8 ارائه شده است. شکل 7 مقادیر نرخ نفوذ یون کلر برای همه نمونه بتن های ساخته شده را نشان می دهد. در شکل 8 مشخص است، با کاربرد میکروسیلیس در بتن، میزان نرخ نفوذ یون کلر در بتن، در تمام سنین نسبت به مخلوط های شاهد به شدت کاهش می یابد. بطوریکه نرخ نفوذ یون کلر در بتن مخلوط CC-S در سنین 28 و 56 روز، نسبت به بتن شاهد CC به ترتیب 74 و 70 درصد کاهش یافته است.

نمونه شاهد در تمامی سنین افزایش قابل توجهی می یابد. شکل 5 به وضوح نشان می دهد که بتن سه جزئی با سطح جایگزینی 5 درصد سنگدانه شیشه بازیافتی و 6 درصد میکروسیلیس، بعد از سن 7 روز بهترین عملکرد مقاومت ویژه الکتریکی را نسبت به دیگر بتن ها داشته است.

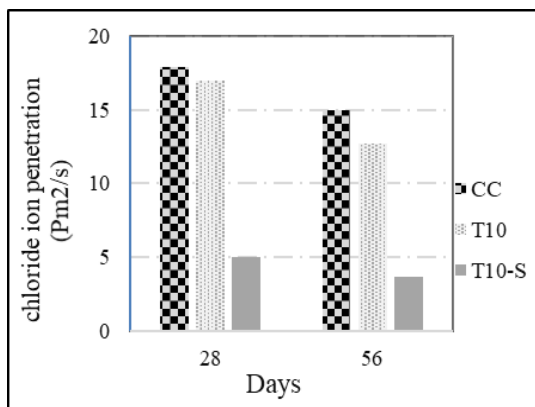


شکل 5. بررسی اثر توام میکروسیلیس و سنگدانه شیشه بازیافتی بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن

Fig. 5. Electrical Resistivity of concrete with recycled glasses and silica fume

همانطور که در شکل 5 مشخص است، برای بتن سه جزئی حاوی 10 درصد سنگدانه شیشه بازیافتی و 6 درصد میکروسیلیس (T10-S)، نسبت به بتن T5-S در سنین 28 و 56 روز، به ترتیب 13 درصد و 33 درصد کاهش مقاومت ویژه الکتریکی را در پی داشته است. مخلوط های بتن سه جزئی حاوی 5 و 10 درصد سنگدانه شیشه بازیافتی و 6 درصد میکروسیلیس نسبت به بتن های دو جزئی حاوی 5 و 10 درصد سنگدانه شیشه بازیافتی، با افزایش سن، افزایش قابل توجهی در مقاومت ویژه الکتریکی داشته اند، و افزودن میکروسیلیس به خوبی توانسته است ضعف بتن حاوی سنگدانه شیشه بازیافتی را در این زمینه جبران نماید. بطوریکه بتن T5-S در سنین 28 و 56 روز، نسبت به بتن T5، به ترتیب 2 و 3.3 برابر افزایش، و بتن T10-S در سنین 28 و 56 روز، نسبت به بتن T10، به ترتیب 1.9 و 2.7 برابر افزایش را در مقاومت ویژه الکتریکی داشته است.





شکل 9. بررسی تاثیر سنگدانه شیشه بازیافتی بر نرخ نفوذ یون کلر

Fig. 9. Chloride ion penetration of concrete with recycled glasses

با توجه به شکل بالا افزودن 6 درصد میکروسیلیس به بتن حاوی 10 درصد سنگدانه شیشه بازیافتی تاثیر شگرفی بر میزان کاهش نفوذ یون کلر داشته است. به طوری که بتن T10-S در سن 28 و 56 روز نسبت به بتن T10 حدود 71 درصد کاهش نفوذ را در پی داشته است.

در شکل 10 میزان نفوذ یون کلر در بتن دو جزئی حاوی سنگدانه شیشه بازیافتی و بتن سه جزئی حاوی میکروسیلیس و سنگدانه شیشه بازیافتی را نمایش می دهد. همانطور که در تصویر مشخص است بتن حاوی میکروسیلیس میزان نفوذ بسیار کمتری نسبت به نمونه مشابه بدون میکروسیلیس خود داشته است.

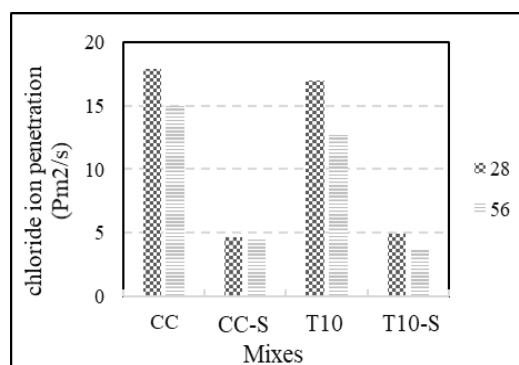


شکل 10. مقایسه میزان نفوذ یون کلر در بتن دو جزئی (سنگدانه شیشه بازیافتی) و بتن سه جزئی (سنگدانه شیشه بازیافتی و میکروسیلیس)

(تصویر 1 بتن سه جزئی - تصویر 2 بتن دو جزئی)  
Figure 10. Comparison of chloride ion penetration in concrete with silica fume and recycled glasses

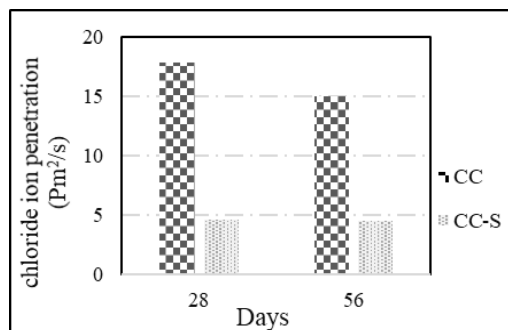


شکل 6. آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر (RCMT)  
Fig. 6. chloride ion penetration test



شکل 7. نتایج آزمایش نرخ نفوذ یون کلر در سنین 28 و 56 روز

Fig. 7. Results of chloride ion penetration



شکل 8. بررسی تاثیر میکروسیلیس بر نرخ نفوذ یون کلر  
Fig. 8. Chloride ion penetration of concrete containing 6% silica fume

نتایج تاثیر سنگدانه شیشه بازیافتی بر نفوذ یون کلر، و مقایسه آن با بتن شاهد CC در شکل 9 ارائه شده است. با توجه به نتایج نمودار، افزودن 10 درصد سنگدانه شیشه بازیافتی به مخلوط بتن، تا قبل از 28 روز، تاثیر چندانی بر نفوذ یون کلر نسبت به بتن شاهد نداشته است.

#### 4- بررسی رابطه نتایج مقاومت ویژه الکتریکی و نتایج نفوذ یون کلر (RCMT)

همانطور که در نتایج آزمایش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و نفوذ یون کلر پیداست، نمونه‌هایی که مقاومت ویژه الکتریکی بالاتری داشتند، میزان نفوذ یون کلر در آن‌ها کمتر بوده‌است. با افزایش مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذ یون کلر کاهش یافته‌است. این نتایج همخوانی آزمایش مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر را تایید می‌کند. با توجه به نتایج و نمودارهایی که در بخش‌های قبلی ارائه شد، بیشترین مقاومت الکتریکی و کمترین مقدار نفوذ یون کلر مربوط به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشد.

- در آزمایش نفوذ یون کلراید بتن سه جزئی T10-S، نسبت به بتن دو جزئی T10، دارای 71 درصد کاهش نفوذ یون کلراید بوده‌است.

#### تقدیر و تشکر

در پایان لازم می‌دانم که نهایت سپاس و قدردانی را، از مدیریت و پرسنل محترم مجموعه‌ی شرکت دانش بنیان نانو بتن امین و کارشناسان این مجموعه به عمل آورم، که در تمامی مدت انجام این پژوهش نهایت همکاری را ما داشته‌اند و بستر انجام تحقیقات در زمینه مربوطه را فراهم نمودند.

#### پی‌نوشت

- <sup>1</sup> Rapid Chloride Migration Test  
<sup>2</sup> Rapid Chloride Permeability Test

#### مراجع

- [1] ACI Committee 212.; "Admixtures for concrete", Concrete International, Vol. 3, No. 5, pp. 24-52, 1981.
- [2] Bertolini, Luca.; Elsener, Bernhard.; Pedeferrri, Pietro.; Redaelli, Elena.; Polder, Rob. B.; "Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair", John Wiley & Sons, 2013.
- [3] Moradi-Marani, F.; Shekarchi, M.; Dousti, A.; Mobasher, B.; "Investigation of corrosion damage and repair system in a concrete jetty structure", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 24, No. 4, pp. 294-301, 2009.
- [4] Dousti, A.; Moradian, M.; Taheri, S. R.; Rashetnia, R. Shekarchi, M.; "Corrosion assessment of RC deck in a jetty structure damaged by chloride attack", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 27, No. 5, pp. 519-528, 2012.
- [5] CLEARY, Paul.; "Trillion Dollar Baby: How Tiny Norway Beat the Oil Giants and Won a Lasting Fortune", Black Inc, 2016.
- [6] Long, S.; Atluri, S. N.; "A meshless local Petrov-Galerkin method for solving the bending problem of a thin plate", Computer Modeling in Engineering and Sciences, Vol. 3, No. 1, pp. 53-64, 2002.
- [7] Udwadia, F. E.; Trifunac, M. D.; "Ambient vibration tests of full scale

#### 5- نتیجه گیری

نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر بر روی بتن‌های شیشه بازیافتی با و بدون میکروسیلیس بصورت زیر خلاصه می‌گردد.

- حضور دوده سیلیسی در نمونه‌های بتنی، کاهش میزان 74 درصدی نفوذ یون کلراید و افزایش 260 درصدی مقاومت ویژه الکتریکی 28 روزه نسبت به بتن معمولی را در بردارد.
- در بخش آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی نیز، بتن‌های سه جزئی T5-S و T10-S، نسبت به بتن های دو جزئی مشابه بدون دوده سیلیسی آن به ترتیب دارای 210 و 190 درصد افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بوده‌اند، که این درصد حاکی از تاثیر موثر دوده سیلیسی در بهبود دوام بتن حاوی سنگدانه شیشه بازیافتی است.
- در آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی، بتن حاوی 5 درصد شیشه بازیافتی تنها در سنین بالا دارای 50 درصد افزایش مقاومت در مقایسه با بتن شاهد بوده است، بتن حاوی 10 درصد شیشه بازیافتی دارای 30 درصد افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به بتن شاهد را نشان می‌دهد، این نتایج گویای آن است که بتن با جایگزینی 5 درصد شیشه بازیافتی دوام بهتری نسبت به بتن با 10 درصد شیشه بازیافتی دارد.

- in concrete: Review of hardened properties*", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 55, No. 11, pp. 923-932, **2011**.
- [19] ACI Committee 234.; "Guide for the use of Silica Fume in Concrete", ACI 234R-96.
- [20] Chung, C. W.; Shon, C. S.; Kim, Y. S.; "Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze-thaw cycles", Construction and Building Materials, Vol. 24, No. 9, pp. 1739-1745, **2010**.
- [21] Jain, JA.; Neithalath, N.; "Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure", Cement and Concrete Composites Vol.32, pp.148–56, **2010**.
- [22] Tan KH, Du H.; "Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties", Cement and Concrete Composites Vol. 35, pp.109–117, **2013**.
- [23] Lee, H.; Hanif, A.; Usman, M.; Sim, J.; Oh, H.; "Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material, Journal of Cleaner Production, Vol. 170, pp.683-693, **2018**.
- [24] Valipour, M.; Pargar, F.; Shekarchi, M.; Khani, S.; "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study", Construction and Building Materials, Vol. 41, pp. 879-888, **2013**.
- [25] Sabet, F. A.; Libre, N. A.; Shekarchi, M.; "Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash", Construction and Building Materials, Vol. 44, pp.175-184, **2013**.
- [26] Gupta, T.; Chaudhary, S.; Sharma, R. K.; "Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume", Journal of Cleaner Production, Vol. 112, pp.702-711, **2016**.
- [27] ACI Committee 211, (1991), "Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash", ACI226.4R, ACI Materials Journal.
- [28] ASTM C150-11.; "Standard structures", In Proceeding of the 5th world conference on earthquake engineering, Rome, Italy, pp. 1430-1439, **1973**.
- [8] ASHTO T357.; "Standard Method of Test for Predicting Chloride Penetration of Mydraulic Cement Concrete by the Rapid Migration Procedure," AASHTO, **2006**.
- [9] ASTM C1202-11.; "Standard Test Method for Electrical Indication of Concretes Ability to Resist Chloride Ion Penetration", **2011**.
- [10] Trifunac, M. D.; "Wind and microtremor induced vibrations of a twenty-two story steel frame building" **1970**.
- [11] SETHIAN, J. A.; "Moving interfaces and boundaries: level set methods and fast marching methods", **2006**.
- [12] Bhanja, S.; Sengupta, B.; "Influence of silica fume on the tensile strength of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 4, pp.743-747, **2005**.
- [13] Fidjestol, P.; Dastol, M.; "The history of silica fume in concrete–From novelty to key ingredient in high performance concrete", In: Proceedings of the Congresso Brasileiro do Concreto, 4th–9th Sept, **2008**.
- [14] Ramezani pour, A. A.; Malhotra, V. M.; "Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume", Cement and concrete composites, Vol. 17, No. 2, pp. 125-133, **1995**.
- [15] Siddique, R. "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. Resources, Conservation and Recycling", Vol. 55(11), pp. 923-932, **2011**.
- [16] Firdous, R.; Ilyas, U.; Akram, A.; Adnan, M.; "Evaluation of Mechanical Properties of Concrete Containing Silica Fume from a Local Source in Pakistan", Physical and Computational Sciences, Vol. 54, No. 2, pp. 119–125, **2017**.
- [17] Sahoo, K. K.; Sarkar, P.; Davis, R.; "Mechanical properties of silica fume concrete designed as per construction practice", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, pp.1-9, **2017**.
- [18] Siddique, R.; "Utilization of silica fume

- [35] Kavousi, A.; Mousavi, Y.; "Performance of recycled glass concrete with low water to cement ratio", Concrete research quarterly journal, Vol. 10, No. 1, pp.125-134, **2016** (In Persian).
- [36] MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo JM.; "CONCRETE Microstructure, Properties and Materials", **2017**.
- [37] AASHTO TP 64-03.; "Standard Method of Test for predicting chloride penetration of hydraulic cement concrete by the rapid migration procedure." AASHTO, **2006**.
- [38] NT BUILD 492.; "Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-State Migration Experiment", NTBULD, **1999**.
- Specification for Portland Cement*", **2011**.
- [29] ASTM C1240-11.; "Standard Specification for Use of Silica Fume for Use as a Mineral Admixture in Hydraulic-Cement Concrete, Mortar, and Grout", Concrete structures, standard by Standards Australia", **2009**.
- [30] ASTM C33.; "Standard Specification for concrete", ASTM, **2011**.
- [31] AASHTO T358-15.; "Standard method of test for surface resistivity Indication of concretes Ability to resist chloride Ion penetration", AASHTO, **2006**.
- [32] Wang, H. Y.; "A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete", Waste Management, Vol. 29, No. 1, pp. 335-341, **2009**.
- [33] Her-Yung, W.; "A study of the engineering properties of waste LCD glass applied to controlled low strength materials concrete", Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 6, pp. 2127-2131, **2009**.
- [34] Nili, M.; Biglarijoo, N.; Razmara, M.; "Effect of recycled glass & plastic on concrete properties", Sharif civil engineering journal, Vol. 31.2, pp. 111-119, **2015** (In Persian).