

## ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد بتن خودتراکم حاوی ذرات شیشه تحت شرایط مهاجم اسید سولفوریک

سامان راحت دهمرده<sup>۱</sup>، محمد حسن میرابی مقدم<sup>۲\*</sup>، محمد صالح سرگزی مقدم<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

### چکیده

در سال‌های اخیر، بررسی زوال تدریجی بتن تحت تاثیر عوامل خوردنده نظیر حملات اسیدی از مهمترین چالش‌های تحقیقاتی در زمینه تکنولوژی بتن بوده است. از طرفی در راستای میل بسوی توسعه پایدار، تولید بتن‌های بازیافتی با بهره‌گیری از ضایعات ساختمانی و غیر ساختمانی بیش از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است. لذا در این تحقیق آزمایشگاهی، جهت ارزیابی تاثیر افزودن ضایعات شیشه بر عملکرد بتن خودتراکم در معرض حمله اسید سولفوریک، ۹ طرح مخلوط حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد ضایعات شیشه به دو صورت پودر و خرده شیشه جهت جایگزینی بخشی از مصالح سنگی ریزدانه و درشت‌دانه در نظر گرفته شد. آزمایش‌های اسلامپ،  $T_{50}$ ، قیف ۷، حلقه L و جعبه L جهت بررسی رفتار بتن تازه و آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی برای ارزیابی خواص بتن سخت شده انجام گردیده است. علاوه بر این، به منظور سنجش دوام نمونه‌ها پس از قرار دادن آن‌ها در محیط خوردنده اسید سولفوریک، آزمایش‌هایی نظیر: کاهش وزنی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی پس از ۳۰ و ۶۰ روز غوطه‌وری در محلول اسید سولفوریک با  $PH=1/5$  انجام شد. نتایج اینگونه نشان داد که با افزودن ذرات شیشه روانی، قابلیت عبور و پخش شدگی بتن افزایش می‌یابد. پس از ۶۰ روز غوطه‌وری در اسید مقاومت فشاری در تمامی طرح‌ها کاهش یافته است. با افزودن شیشه دوام نمونه‌های قرار گرفته در معرض اسید سولفوریک به میزان قابل توجهی نسبت به طرح شاهد بهبود یافته است. تمامی نمونه‌ها پس از خوردگی دچار کاهش وزنی شدند که طرح‌های حاوی شیشه عملکرد مناسبتری را در افت وزنی نسبت به طرح شاهد نشان دادند.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، شیشه، دوام، اسید سولفوریک، مقاومت، افت وزنی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.78162.1087	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.78162.1087	۱۳۹۷/۰۸/۳۰	۱۳۹۶/۰۷/۱۳	۱۳۹۶/۰۷/۱۳	۱۳۹۶/۰۶/۲۴	۱۳۹۵/۱۱/۲۸
محمد حسن میرابی مقدم					*نویسنده مسئول:	
mhmirabi@eng.usb.ac.ir					پست الکترونیکی:	

## Experimental study on the performance of self compacting concrete containing glass particles under sulfuric acid attack

Saman Rahat Dahmardeh<sup>1</sup>, Mohammad Hassan Mirabi Moghaddam<sup>2\*</sup>, Mohammad Saleh Sargazi Moghaddam<sup>3</sup>

1- Master of Science, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

3- Master of Science, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

### ABSTRACT

*In the recent years, study on the gradual deterioration of concrete under effect of corrosive factors such as acid attacks has been one of the most important research challenges in the concrete technology. On the other hand, in order to achieving the sustainable development, recycled concrete production by using of building and non building wastes, is interest for researchers more than past. So in this experimental study, for assessing the performance of self compacting concrete containing glass particles under sulfuric acid attack, 9 mixtures comprising 0, 5,10,15 and 20% glass particles as fine and coarse aggregates were considered. To determine fresh and hardened behavior, Slump, T50, V-funnel, J-ring, L-box and compressive and flexural strength tests were performed. In addition, in order to specify the durability of concrete samples, after placing them in the corrosive sulfuric acid solution with PH=1.5 for 30 and 60 days, mass loss and compressive and flexural strengths tests were carried out. Results showed that with increasing glass particles, fluidity, passing ability and dispersion of self compacting concrete increased. After 60 days immersion in sulfuric acid solution, compressive strength reduced for all samples. By adding glass particles, durability of self compacting concrete improved significantly compared to the control mix. Mass of all samples decreased after corrosion, which samples containing glass showed better performance in the mass loss compared to the control sample.*

### ARTICLE INFO

Received: 16/02/2017

Revised: 15/09/2017

Accepted: 05/10/2017

### Keywords:

*Self Compacting Concrete  
Glass  
Durability  
Sulfuric acid  
Strength  
Mass Loss*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

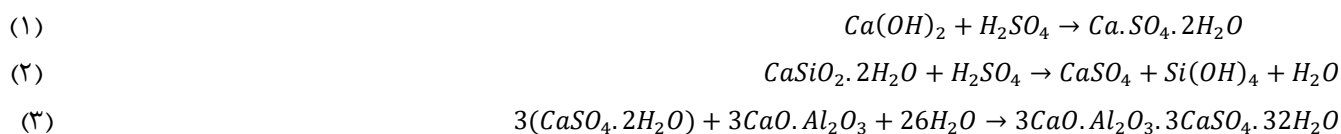
doi: 10.22065/jsce.2017.78162.1087

\*Corresponding author: Mohammad Hassan Mirabi Moghaddam.

Email address: mhmirabi@eng.usb.ac.ir

## ۱- مقدمه

با توجه به تولید روزافزون بتن و استفاده از آن برای کاربردهای مختلف عمرانی، دستیابی به بتن‌های توانمند و بادوام از دغدغه‌های اصلی محققین فعال در این زمینه می‌باشد. قرارگیری بتن در محیط‌های مهاجم اسیدی از موضوعات اصلی دوام به شمار می‌آید که تاثیر بسزایی بر عملکرد، عمر مفید و همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی دارد [۱]. بتن‌های مورد استفاده در لوله‌ها و تاسیسات انتقال آب و فاضلاب بخصوص فاضلاب‌های صنعتی، دامداری‌ها و کشتارگاه‌ها، کف ساختمان‌های پرورش طیور و ساختمان‌های صنعتی دائما در معرض خوردگی بیولوژیکی در اثر حملات اسیدی قرار دارند [۲ و ۳]. تخریب سازه‌های بتنی به وسیله حمله بیولوژیکی اسید سولفوریک در زمره رایج‌ترین ساز و کارهای تخریب این گونه سازه‌ها و یکی از مهمترین نگرانی‌ها در رابطه با دوام بتن در دنیاست [۴]. این اسید بسیار مهاجم می‌باشد و با محصولات هیدراتاسیون ماتریس سیمان واکنش می‌دهد و منجر به تولید گچ و اترینگایت می‌شود. هر دو ماده‌ی تولید شده دارای استحکام سازه‌ای کم و حجم بزرگتری از مواد سازنده خود می‌باشند که موجب ایجاد فشار داخلی و ترک خوردن بتن می‌شوند و در نهایت سبب از بین رفتن انسجام بتن خواهند شد. علاوه بر ایجاد فشار داخلی، مواد حاصل از فرآیند خوردگی نسبت به مواد سازنده‌ی خود از مقاومت کمتری برخوردار بوده و لذا با پیشرفت روند خوردگی رفته رفته از مقاومت بتن کاسته می‌شود [۵]. اولین ماده حاصل از واکنش اسید سولفوریک با هیدروکسید کلسیم بتن  $(Ca(OH)_2)$  که در سطح بتن نیز پدیدار می‌شود گچ بوده و همراه با افزایش حجم می‌باشد. گچ می‌تواند تنش‌های کششی در بتن ایجاد کند و سبب ترک خوردگی و پوسته پوسته شدن آن گردد. در مرحله بعد، گچ تشکیل شده با کلسیم آلومینات  $(C_3A)$  سیمان وارد واکنش می‌شود. واکنش گچ با فازهای کلسیم آلومیناتی در ماتریس سیمان می‌تواند موجب تشکیل اترینگایت گردد که نسبت به گچ افزایش حجم بیشتری دارد. بنابراین اترینگایت سبب به وجود آمدن ترک‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی بیشتری در بتن می‌شود [۶ و ۷]. به طور کلی اسید سولفوریک ماتریس سیمانی را توسط از بین بردن کلسیم سیلیکات هیدرات  $(C-S-H)$  تجزیه نموده و موجب خوردگی و کاهش مقاومت آن می‌گردد [۸]. واکنش بتن با اسید سولفوریک و خوردگی ناشی از آن توسط واکنش‌های ۱ تا ۳ بیان می‌شود:



## ۲- پیشینه تحقیق

امروزه به دلیل رشد سریع جمعیت، شهرنشینی و صنعتی شدن شهرها در سراسر دنیا، دفع ضایعات جامد به چالشی اساسی در مدیریت پسماندها تبدیل شده است. سازمان ملل در سال ۲۰۰۴ میزان تولید پسماندهای جامد در کل جهان را حدود ۲۰۰ میلیون تن تخمین زده که بیش از ۷ درصد آن سهم ضایعات شیشه بوده است [۹]. از آنجایی که ضایعات شیشه موادی غیرقابل تجزیه هستند و سالیان متمادی در طبیعت به شکل اولیه باقی می‌مانند، بازیافت آن‌ها برای حفاظت از محیط زیست امری ضروری است [۱۰]. با این حال متاسفانه نرخ بازیافت شیشه در بسیاری از کشورها به میزان قابل توجهی پایین می‌باشد. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۴، میزان تولید روزانه ضایعات شیشه در هنگ کنگ حدود ۳۰۰ تن بوده و تنها کمتر از ۱۰ درصد آن‌ها بازیافت شده‌اند [۱۱]. سالانه در تهران بیش از ۵۲ هزار تن ضایعات شیشه تولید می‌گردد که بخش زیادی از آن‌ها به همراه سایر پسماندها دفن می‌شوند و متاسفانه نرخ بازیافت ماهانه کمتر از ۲ درصد است [۱۲]. از این رو، بهره‌گیری از راه حل‌های جایگزین جهت بازیافت این گونه ضایعات امری اجتناب ناپذیر است. یکی از روش‌های عملی که

<sup>1</sup> . Ettringite

<sup>2</sup> . Calcium Hydroxide

<sup>3</sup> .  $3CaO \cdot Al_2O_3$

<sup>4</sup> . Calcium Aluminate Hydrate

مزایای زیست محیطی و اقتصادی فراوانی دارد استفاده از ضایعات شیشه در تولیدات بتنی و ملات به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی طبیعی ریزدانه و درشت دانه [۱۳-۱۵] و یا بخشی از سیمان [۱۶ و ۱۷] می‌باشد.

با این حال برخی از محققان نتیجه گرفتند که استفاده از ضایعات شیشه در بتن به عنوان سنگدانه‌های طبیعی اثرات منفی در خواص مکانیکی بتن ایجاد می‌کند [۱۸] و علاوه بر این می‌تواند باعث بروز واکنش شیمیایی بین سیلیس موجود در شیشه و قلیای سیمان شود که واکنش سیلیکایی-قلیایی (ASR) نیز نامیده می‌شود [۱۹]. انبساط ناشی از این واکنش موجب کاهش مقاومت و دوام بتن می‌گردد [۲۰]. لازم به ذکر است که ذرات شیشه با اندازه‌های کوچکتر پتانسیل کمتری برای ایجاد واکنش سیلیکایی-قلیایی دارند [۱۹].

اخیراً پژوهشگران اثرات استفاده از ذرات ریز و پودر شیشه جهت جایگزینی بخشی از مصالح سنگی ریزدانه و سیمان بر خواص مکانیکی و دوامی بتن را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۲۱ و ۲۲]. با توجه به این نکته که بیش از ۷۰ درصد شیشه‌های معمولی از سیلیس تشکیل شده است، این اعتقاد وجود دارد که افزودن ذرات ریزتر شیشه در بتن منجر به بروز واکنش پوزولانی می‌گردد [۲۳]. شی و همکاران<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۵ [۲۴] و همچنین شوارز و همکارانش<sup>۶</sup> در سال ۲۰۰۸ [۲۵] بیان کردند که ذرات شیشه با اندازه کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر تا ۲۰ درصد جایگزینی به عنوان سیمان می‌توانند خاصیت پوزولانی بیشتری نسبت به خاکستر بادی از خود نشان دهند. در سال ۲۰۰۶ نیز چن و همکاران<sup>۷</sup> [۲۶] گزارش نمودند که افزودن پودر شیشه به علت دارا بودن خاصیت پوزولانی مقاومت فشاری و مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها و نفوذ یون کلراید را بهبود می‌دهد. خواص مکانیکی و دوامی بتن حاوی مقادیر بالای پودر شیشه جایگزین شده به جای سیمان (تا ۶۰ درصد) در سال ۲۰۱۷ توسط دوو و تان<sup>۸</sup> [۲۷] بررسی شده است. تحلیل‌های میکروساختاری انجام شده در این تحقیق نشان داد ذرات پودر شیشه با کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)<sub>2</sub>) سیمان واکنش داده و منجر به تولید ژل کلسیم-سیلیکات-هیدراته (C-S-H) شده است. ژل تولید شده افزایش تراکم، همگنی مخلوط بتن و در نهایت بهبود مقاومت و دوام را در پی داشته است. میزان بهینه جایگزینی پودر شیشه مربوط به ۱۵ و ۳۰ درصد می‌باشد که بیشترین افزایش مقاومت و کمترین تخلخل را نشان داده است.

با افزایش تولید و استفاده از بتن خودتراکم (SCC)، تحقیقات زیادی در زمینه تاثیر افزودن ضایعات جامد نظیر شیشه [۲۸ و ۲۹]، لاستیک [۳۰ و ۳۱] و بطری‌های پلاستیکی (PET) [۳۲ و ۳۳] بر خواص این نوع بتن انجام شده است. بتن خودتراکم نوع خاصی از بتن می‌باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ توسط اکومورا<sup>۹</sup> به منظور دستیابی به بتنی با دوام پیشنهاد گردید [۳۴]. به طور کلی، بتن خودتراکم بتنی با حد روانی بالا است که تحت اثر وزن خود جریان می‌یابد و بدون نیاز به هیچ گونه لرزاندنی به راحتی درون هر گونه قالبی حتی با وجود آرماتورهای متراکم جای می‌گیرد و به نحو مناسبی متراکم می‌شود [۳۵]. برای رسیدن به روانی بالا و انسجام کافی باید افزودنی فوق روان کننده و مقدار زیادی مواد پودری (فیلر) به همراه سیمان استفاده شود [۳۶]. کوو و پوون<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۰۹ [۳۷] خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم حاوی ذرات شیشه که به عنوان ماسه تا ۳۰ درصد جایگزین شده بودند را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش محتوای شیشه در مخلوط بتن خودتراکم جریان اسلامپ و نسبت انسداد افزایش داشته و از سوی دیگر مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته کاهش یافته است. امام علی و الترزاولی<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۱۲ [۳۸] تأثیر افزودن ضایعات شیشه به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی ریزدانه در بتن خودتراکم را بررسی نمودند. در این تحقیق ۱۸ طرح مخلوط با سه عیار متفاوت سیمان (۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب) و نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴ در نظر گرفته شد و ذرات شیشه تا میزان ۵۰٪ جایگزین مصالح ریزدانه گردیدند. آن‌ها بیان کردند که افزایش مقدار شیشه اثرات منفی بر خواص مکانیکی نمونه‌ها داشته و منجر به کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی شده است.

<sup>5</sup> . Shi et al

<sup>6</sup> . Schwarz et al

<sup>7</sup> . Chen et al

<sup>8</sup> . Du and Tan

<sup>9</sup> . Okamura

<sup>1</sup> . Kou and Poon

<sup>1</sup> . Emam Ali and Al-Tersawy

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه دوام بتن در شرایط خورنده اسیدی انجام شده است. با توجه به توسعه بیشتر بتن‌های ترکیبی که دارای افزودنی‌های مختلف طبیعی، بازیافتی و ضایعاتی هستند، ارزیابی دوام این نوع بتن‌ها تحت خوردگی بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۷ بازونی و نهدی<sup>۱</sup> مقاومت بتن خودتراکم تحت حمله اسید سولفوریک با کاهش متوالی PH را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق آن‌ها از مواد پوزولانی و الیاف ترکیبی (فولاد و پلی پروپیلن) استفاده کردند که باعث بهبود مقاومت بتن در برابر حمله اسید سولفوریک شده است [۸]. فیز و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۹ تأثیر اسید سولفوریک روی بتن خودتراکم در دو PH برابر ۱/۷ و ۲ را ارزیابی نمودند. آن‌ها گزارش کردند که نمونه‌های بدون پودر سنگ افت وزنی و مقاومتی بیشتری داشته و پودر سنگ مانند خنثی کننده اسید سولفوریک عمل کرده است [۳۹]. در سال ۲۰۱۰ سیاد و همکارانش<sup>۱</sup> تأثیر پوزولان‌های طبیعی بر رفتار بتن خودتراکم تحت حمله اسید سولفوریک را مورد مطالعه قرار دادند. این محققین ۱۲ طرح مخلوط برای دستیابی به مقاومت هدف ۳۰، ۵۰ و ۷۰ مگاپاسکال با مقادیر مختلف پوزولان در نظر گرفتند و عملکرد بهتر دوامی نمونه‌های دارای پوزولان‌های طبیعی را نسبت به نمونه‌های حاوی خاکستر بادی و پودر سنگ گزارش نمودند [۴۰]. در سال‌های اخیر نیز تحقیقاتی در زمینه تأثیر افزودنی‌ها بر دوام بتن در برابر تهاجم اسید سولفوریک انجام شده است [۴۱ و ۴۲]. در سال ۲۰۱۵ عراقی و همکارانش<sup>۱</sup> مقاومت فرسایشی بتن حاوی ذرات پلی اتیلن تحت خوردگی اسید سولفوریک را ارزیابی کردند. آن‌ها نمونه‌ها را در محلول ۵ درصد اسید سولفوریک قرار دادند و پس از انجام آزمایش‌ها بیان نمودند که با افزایش ذرات پلی اتیلن کاهش وزنی نمونه‌ها کمتر می‌شود [۱]. لینگ و پوون<sup>۱</sup> نیز در سال ۲۰۱۱ علاوه بر بررسی امکان پذیرش بتن سفید خودتراکم حاوی شیشه‌های رنگی در معماری ساختمان، خواص سازه‌ای و دوام این نوع بتن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تا ۱۰۰ درصد ذرات شیشه را جایگزین سنگدانه‌های طبیعی کردند و به طور میانگین پس از ۲۸ روز عمل‌آوری به مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۶ مگاپاسکال دست یافتند. سایر نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش مقدار شیشه دوام نمونه‌ها اعم از جذب آب، مقاومت در برابر جمع شدگی و کاهش وزن در اسید بهبود یافته است [۴۳]. تان و دوو<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۳ دوام بیشتر نمونه‌های حاوی شیشه را در برابر یون کلر و حمله سولفات‌ها گزارش کردند [۴۴]. در سال ۲۰۱۶ سیاد و همکارانش<sup>۱</sup> پژوهشی در زمینه تأثیر افزودن پودر شیشه بر ملات انجام دادند و بر بهبود دوام نمونه‌های حاوی پودر شیشه در برابر حمله اسید سولفوریک تأکید نمودند [۴۵]. در تحقیق حاضر به منظور بررسی دقیق تأثیر ضایعات شیشه در بتن خودتراکم، با بکارگیری مقادیر مختلف شیشه به دو صورت خرده و پودر جایگزین شده با مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه، علاوه بر تعیین خواص رفتاری و مکانیکی آن، عملکرد این نوع بتن در برابر حمله اسید سولفوریک به صورت جامع مورد مطالعه قرار گرفت.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

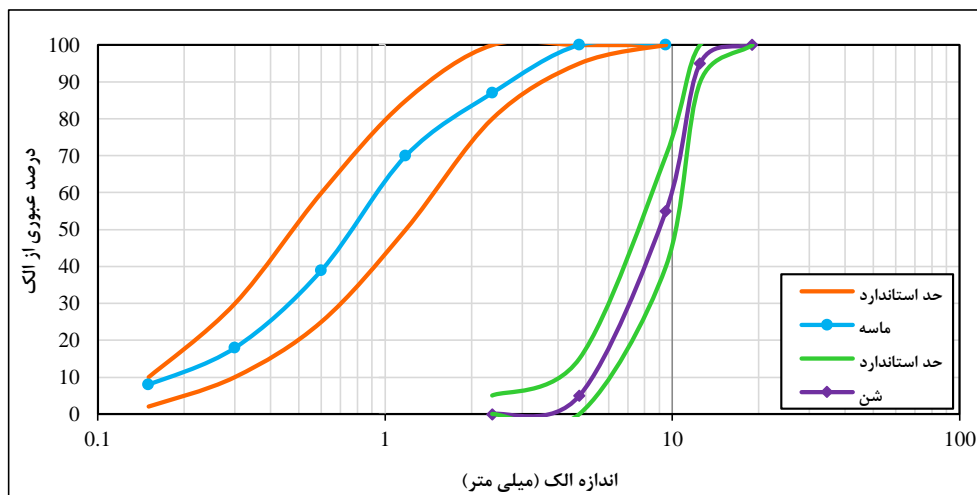
#### ۳-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان سیستان که مشخصات آن با استانداردهای ASTM C150 و ISIRI 389 منطبق می‌باشد، استفاده شده است. پودر سنگ قم با چگالی ۲۶۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان فیلر مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات شیمیایی سیمان [۴۶] و پودر سنگ بر اساس اطلاعات کارخانه سازنده در جدول ۱ ارائه شده است.

<sup>۱</sup> . Bassuoni and Nehdi	2
<sup>۱</sup> . Feys et al	3
<sup>۱</sup> . Siad et al	4
<sup>۱</sup> . Araghi et al	5
<sup>۱</sup> . Ling and Poon	6
<sup>۱</sup> . Tan and Du	7
<sup>۱</sup> . Siad et al	8

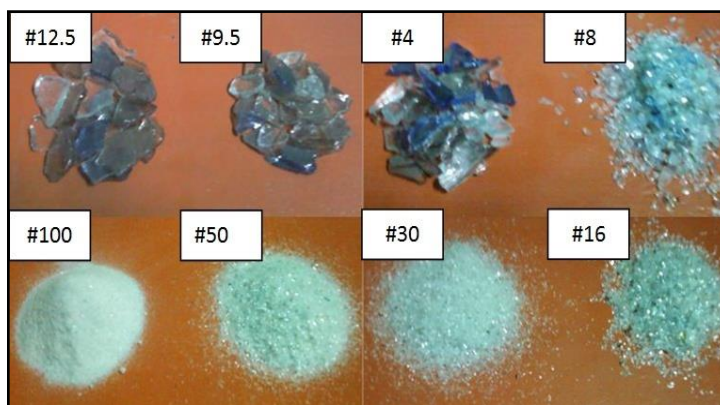
جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان و پودر سنگ

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	L.O.I	نوع مصالح
۲۱/۰۴	۵/۱۲	۳/۸۲	۱/۷۵	۶۳/۰۴	۰/۶۵	۰/۴۳	۲/۳۶	۱/۰۸	سیمان نوع ۲ سیستان
۰/۸۱	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۸۸	—	۰/۱۴	—	۰/۲۶	—	پودر سنگ



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی شن و ماسه

درشت‌دانه مصرفی، شن شکسته با وزن مخصوص ۲/۷۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مطابق با استاندارد ASTM C127 بوده و میزان جذب آب آن ۱/۲ درصد می‌باشد [۴۷]. ریزدانه مورد استفاده ماسه شکسته بوده و وزن مخصوص آن برابر ۲/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میزان جذب آب آن ۰/۷ درصد مطابق با استاندارد ASTM C128 است و همچنین مدول نرمی این ماسه برابر ۲/۸۷ می‌باشد [۴۸]. نتایج دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده با توجه به استاندارد ASTM C33 در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد [۴۹]. شیشه استفاده شده در این پژوهش مطابق شکل ۲ به دو صورت پودر و خرده از ضایعات شیشه‌های مصارف ساختمانی بر اساس دانه‌بندی، مطابق با استاندارد ASTM C33 و همانند شن و ماسه تهیه شده است. مشخصات دانه‌بندی ذرات شیشه در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲: ذرات شیشه به کار رفته در این تحقیق به تفکیک اندازه دانه‌ها براساس شماره الک

جدول ۲: مشخصات دانه بندی شیشه

اندازه الک	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۱/۱۸	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵
درصد تجمعی عبوری شیشه درشت دانه	۹۵	۵۵	۵	۰	۰	۰	۰	۰
درصد تجمعی عبوری شیشه ریزدانه	۰	۰	۱۰۰	۸۷	۷۰	۳۹	۱۸	۸

فوق روان کننده مورد استفاده بر پایه پلی کربکسیلات اتر اصلاح شده (PCE) با نام تجاری Super Viscose 1، محصول کارخانه نامیکاران می باشد. این فوق روان کننده مطابق با استاندارد prEN 934-2، SIA 162 (1989) و جداول ۳ و ۴ استاندارد ۲۹۳۰ است و فاقد یون کلر و مواد خورنده بوده و دارای وزن مخصوص  $1/07 \pm 0/02$  کیلوگرم بر متر مکعب می باشد [۵۰]. در این تحقیق آب موجود در شبکه توزیع آب زاهدان با PH برابر ۷/۴۳ و دارای کلر، سولفات، منیزیم، سدیم و کلسیم به ترتیب به میزان ۹۸۴، ۱۳۹۰، ۱۸۱، ۸۷۴ و ۱۸۶ (PPM) استفاده شده است.

### ۲-۳- طرح مخلوط

برای دستیابی به مخلوط مناسب ابتدا طرح هایی به صورت آزمون و خطا با نسبت های مختلف آب به سیمان و فوق روان کننده ساخته شد و آزمایش های بتن تازه روی آن ها انجام گرفت. با توجه به نتایج آزمایش های انجام شده جهت رفتارشناسی بتن تازه و مقایسه با استاندارد اروپا (EFNARC) [۵۱]، مطلوب ترین طرح به عنوان طرح مخلوط بتن شاهد انتخاب گردید. سپس با توجه به طرح مخلوط شاهد، با افزودن مقادیر مورد نظر شیشه بقیه طرح ها ساخته و در برنامه آزمایشگاهی قرار گرفت. در ساخت نمونه ها، خرده و پودر شیشه به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به صورت حجمی به ترتیب جایگزین شن و ماسه در بتن خودتراکم شدند. در طرح مخلوط نهایی مطابق جدول ۳ میزان فوق روان کننده مصرفی ۲٪ وزن سیمان مصرفی و نسبت های آب به سیمان و آب به مواد پودری به ترتیب برابر ۰/۴۲ و ۰/۳۱ در نظر گرفته شد.

جدول ۳: طرح های مخلوط بتن خود تراکم حاوی شیشه

نام طرح	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	پودر سنگ (kg/m <sup>3</sup> )	خرده شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	پودر شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )
CS	۷۳۰	۸۹۰	۱۸۹	۴۵۰	۱۵۰	۰	.....	۹
GC5	۶۹۳/۵	۸۹۰	۱۸۹	۴۵۰	۱۵۰	۳۶/۵	.....	۹
GC10	۶۵۷	۸۹۰	۱۸۹	۴۵۰	۱۵۰	۷۳	.....	۹
GC15	۶۲۰/۵	۸۹۰	۱۸۹	۴۵۰	۱۵۰	۱۰۹/۵	.....	۹
GC20	۵۸۴	۸۹۰	۱۸۹	۴۵۰	۱۵۰	۱۴۶	.....	۹
GP5	۷۳۰	۸۴۵/۵	۱۸۹	۴۵۰	۱۵۰	.....	۴۴/۵	۹
GP10	۷۳۰	۸۰۱	۱۸۹	۴۵۰	۱۵۰	.....	۸۹	۹
GP15	۷۳۰	۷۵۶/۵	۱۸۹	۴۵۰	۱۵۰	.....	۱۳۳/۵	۹
GP20	۷۳۰	۷۱۲	۱۸۹	۴۵۰	۱۵۰	.....	۱۷۸	۹

CS: طرح شاهد، GC: طرح حاوی خرده شیشه، GP: طرح حاوی پودر شیشه

### ۳-۳- ساخت آزمون ها

قبل از اختلاط، ابتدا ذرات شیشه با آب موجود در آزمایشگاه شسته شده تا مواد زائد از سطح شیشه ها زدوده شود. برای اختلاط ابتدا سیمان، پودر سنگ، مصالح سنگی و ذرات شیشه به مدت یک دقیقه به صورت خشک توسط میکسر با هم مخلوط شده و سپس آب حاوی فوق روان کننده در حین اختلاط اضافه شده است. به منظور ساخت آزمون های مورد استفاده در آزمایش تعیین مقاومت خمشی، از قالب های

استاندارد با ابعاد  $15 \times 15 \times 75$  سانتی‌متر، برای آزمایش‌های مقاومت فشاری و غیر مخرب اولتراسونیک از قالب‌های استاندارد مکعبی به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر و همچنین برای آزمایش جذب آب از قالب‌های استاندارد استوانه‌ای  $10 \times 7/5$  سانتی‌متری استفاده شده است. بتن کاملاً بر اثر وزن و روانی خود درون قالب‌ها جای گرفته و جهت تراکم آن از هیچگونه ضربه یا لرزاندنی استفاده نشده است. آزمون‌ها بعد از ساخته شدن و قالب‌گیری به مدت یک شبانه روز در دمای آزمایشگاه نگهداری شده‌اند. آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای در بازه‌های زمانی ۲۸ و ۵۶ روز و آزمون‌های تیر خمشی در بازه زمانی ۲۸ روز جهت عمل آوری در حوضچه آب شرب نگهداری شده‌اند.

#### ۴-۳- نگهداری در شرایط خورنده اسید سولفوریک

یکی از روش‌های متداول برای شبیه‌سازی بتن در معرض محیط خورنده، قرار دادن آزمون‌های بتنی در محلول اسید سولفوریک قویتر نسبت به محیط واقعی اسیدی می‌باشد [۴]. برای این هدف آزمون‌ها پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه در آب، بمدت ۳۰ و ۶۰ روز در حوضچه حاوی محلول اسید سولفوریک قرار گرفتند. از آنجایی که مقدار PH برای ایجاد محیط تسریع شده خورنده در اکثر پژوهش‌های انجام شده بین ۱ تا ۲ متغیر بوده است [۵۳، ۴۵، ۳۹، ۸]، در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی شرایط خورنده اسیدی، PH محلول اسید سولفوریک برابر با ۱/۵ در نظر گرفته شد. برای تعیین و ثابت نگاه داشتن PH در طول مدت قرارگیری آزمون‌ها در داخل محلول اسید سولفوریک از PH متر استفاده شده و به صورت روزانه کنترل لازم صورت پذیرفته است. در صورت افزایش مقدار PH محلول اسیدی به حوضچه اضافه می‌شود تا محیط تسریع شده به حالت اولیه باز گردد. در شکل ۳ نحوه اندازه‌گیری PH محیط اسیدی توسط PH متر و همچنین نمایی از آزمون‌های قرار گرفته در حوضچه اسید قابل مشاهده می‌باشد.

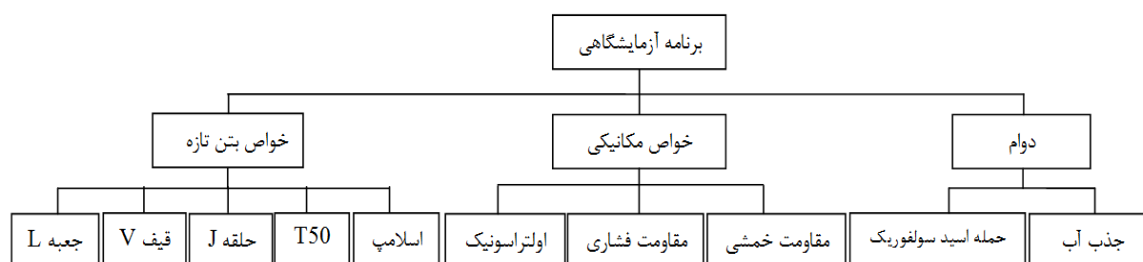


شکل ۳: نمایی از آزمون‌های قرار گرفته در حوضچه اسید و نحوه اندازه‌گیری PH محیط اسیدی توسط PH متر

#### ۵-۳- آزمایش‌های انجام شده

آزمایش‌هایی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند، به سه دسته کلی بتن تازه، خواص مکانیکی و دوام بتن سخت شده تقسیم‌بندی می‌شوند که در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد. در این مطالعه آزمایشگاهی به منظور ارزیابی رفتار بتن خودتراکم تازه حاوی خرده و پودر شیشه، آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان رسیدن قطر دایره اسلامپ به ۵۰ سانتی‌متر (T50)، حلقه ل، جعبه L و زمان تخلیه قیف V مطابق استاندارد اروپا (EFNARC) [۵۱] انجام شده است. با استفاده از این آزمایش‌ها می‌توان خواص رئولوژیکی، میزان کارایی و پایداری بتن را سنجید.





شکل ۴: آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر

مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی مطابق استاندارد ASTM C39 [۵۴] و مقاومت خمشی تیرها مطابق استاندارد ASTM C78 [۵۵] مورد آزمایش قرار گرفتند. جهت بررسی کیفیت و یکنواختی آزمون‌های بتنی ساخته شده آزمایش اولتراسونیک در سنین ۲۸ و ۵۶ روز انجام گرفت. برای این منظور سرعت امواج فراصوت توسط دستگاه PUNDIT مبتنی بر استاندارد ASTM C597 [۵۶] اندازه‌گیری و محاسبه شد. بدین ترتیب که پس از خشک کردن سطح آزمون‌ها، از روغن به عنوان عامل مناسب اتصال استفاده شد و زمان عبور پالس از مرکز آزمون‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری ثبت گردید. به منظور تعیین جذب آب اولیه (نیم ساعته) طبق استاندارد BS 1881 [۵۷] سه آزمون استوانه‌ای ۱۰×۷/۵ سانتی‌متر برای هر طرح مخلوط در سنین ۲۸ و ۵۶ روز در نظر گرفته شد و پس از سه روز قرارگیری در گرمخانه به صورت خشک وزن شدند، سپس به مدت ۳۰ دقیقه در آب قرار گرفته و پس از خارج شدن از آب در وضعیت اشباع با سطح خشک توزین گردیدند. در نهایت به منظور ارزیابی اثرات محیط خورنده اسید سولفوریک بر مقاومت و دوام بتن خودتراکم دارای ذرات شیشه، آزمون‌ها در محیط تسریع شده خوردگی حاوی محلول اسید سولفوریک قرار گرفتند و سپس میزان افت وزنی و تغییرات مقاومت ناشی از خوردگی اندازه‌گیری شد. جهت محاسبه افت وزنی (ML) آزمون‌ها از رابطه ۴ استفاده شده است:

$$ML(\%) = \left( \frac{M_t - M_i}{M_i} \right) \times 100 \quad (۴)$$

که در آن،  $M_t$  جرم آزمون پس از خوردگی در بازه زمانی  $t$  است و  $M_i$  بیانگر جرم اولیه آزمون قبل از غوطه‌وری در محلول اسیدی می‌باشد.

#### ۴- شرح و تفسیر نتایج

##### ۴-۱- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های بتن تازه

نتایج آزمایش‌های بتن تازه برای طرح‌های شاهد و حاوی ذرات شیشه در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان دهنده این موضوع می‌باشد که افزودن ذرات شیشه در بتن خودتراکم تغییر محسوسی در قطر اسلامپ ایجاد نکرده است. مقدار قطر اسلامپ برای تمامی طرح‌ها بین ۷۱۲ و ۷۴۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد که در محدوده مناسب معرفی شده در دستورالعمل EFNARC قرار دارد. قطر اسلامپ برای طرح‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد پودر شیشه کاهش و برای طرح‌های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه افزایش ناچیزی نشان داد. کاهش اندک قطر اسلامپ را می‌توان به جایگیری و پراکندگی بهتر پودر شیشه در مخلوط بتن و وجود سطوح شکسته و نامنظم این ذرات نسبت داد که باعث اصطکاک بیشتر با مخلوط بتن می‌شود [۴۴]. افزایش کم روانی مخلوط بتن با افزایش محتوای شیشه می‌تواند به علت آب‌گیری و جذب آب ناچیز ذرات شیشه باشد [۱۴ و ۲۹]. مطابق نتایج با اضافه کردن خرده و پودر شیشه به بتن خودتراکم زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر (T50) و نسبت انسداد ( $h_2/h_1$ ) تقریباً برای تمامی طرح‌ها نسبت به طرح شاهد کاهش یافته است. بیشترین کاهش در ۲۰ درصد جایگزینی خرده و پودر شیشه و کمترین کاهش برای T50 در ۱۰ درصد و برای نسبت انسداد در ۵ درصد جایگزینی ثبت گردیده است. طرح‌های حاوی خرده شیشه کاهش بیشتری در T50 و نسبت انسداد نسبت به پودر شیشه داشته‌اند. نتایج آزمایش قیف V نشان داد که زمان تخلیه قیف V در طرح‌های حاوی خرده و پودر شیشه برای تمامی درصدها به استثنای ۲۰ درصد جایگزینی خرده شیشه کاهش یافته

است. این تغییرات در قطر اسلامپ و کاهش در زمان T50، نسبت انسداد و زمان تخلیه قیف V ناشی از افزایش اندک روانی بتن خودتراکم در طرح‌های حاوی شیشه می‌باشد. به طور کلی عوامل اصلی تغییر روانی در طرح‌های حاوی پودر شیشه را می‌توان به آگریزی و جذب آب بسیار ناچیز ذرات شیشه نسبت به مصالح سنگی و در طرح‌های حاوی خرده شیشه را به سطوح صاف، آگریزی و اصطکاک کمتر خرده شیشه در مخلوط بتن نسبت داد که باعث ایجاد آب اضافی و کاهش لزجت خمیری در مخلوط بتن می‌شوند [۳۷ و ۴۳].

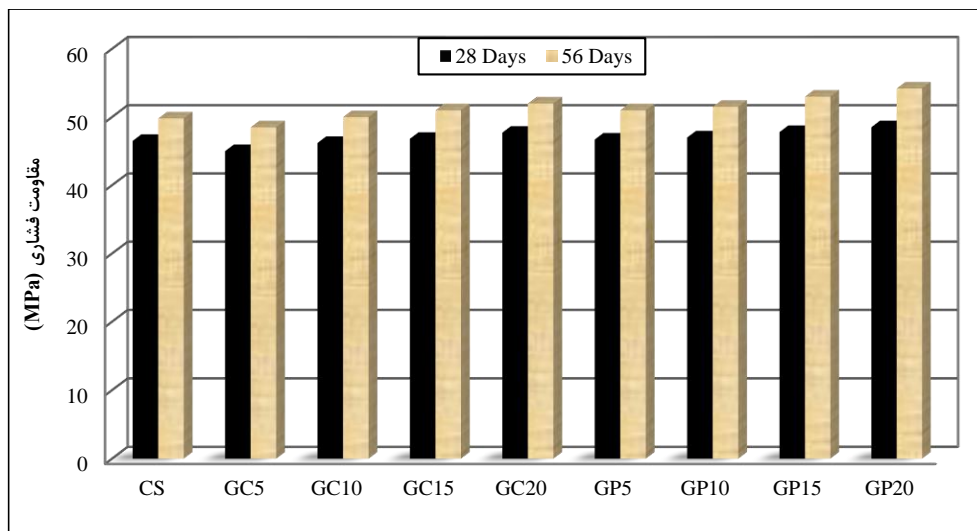
جدول ۴: نتایج آزمایش‌های بتن تازه طرح‌های حاوی ذرات شیشه

نام طرح	جریان اسلامپ		جعبه L			زمان تخلیه قیف V (s)	حلقه J	
	T50 (s)	D (mm)	h2/h1	T400 (s)	T200 (s)		h2-h1	D (mm)
CS	۳/۱	۷۲۰	۰/۹	۲/۳	۱/۱	۸/۶۴	۷۱۰	۷
GC5	۲/۸	۷۲۰	۰/۸۷	۲/۶۷	۱/۲۸	۷/۶	۷۱۵	۷/۷۵
GC10	۲/۹	۷۳۰	۰/۸۱	۳/۷۶	۲/۴	۷/۳	۷۱۵	۸/۵
GC15	۲/۶	۷۳۵	۰/۷۸	۳/۲۸	۱/۹	۸/۵	۷۲۰	۱۱/۷۵
GC20	۲/۳	۷۴۰	۰/۷۶	۲/۷۵	۱/۴	۱۰/۲	۷۴۵	۱۴/۵
GP5	۳/۱۵	۷۱۵	۰/۸۹	۴/۸۶	۱/۹	۷/۹	۷۰۰	۷/۲۵
GP10	۳/۲	۷۱۲	۰/۸۷	۵/۲	۲/۲	۶/۴۸	۷۱۰	۸/۲
GP15	۲/۶	۷۳۰	۰/۸۳	۵/۳۵	۳/۱۵	۷/۱۲	۷۲۵	۹/۵
GP20	۲/۵	۷۳۵	۰/۸	۷/۰۲	۳/۲۸	۷/۸	۷۳۵	۱۱/۲۵

#### ۴-۲- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های خواص مکانیکی

##### ۴-۲-۱- مقاومت فشاری

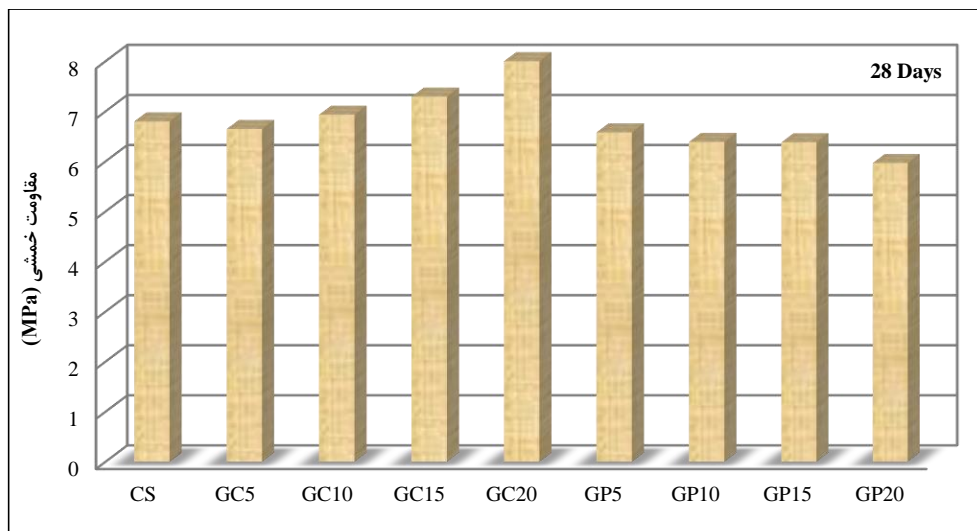
در شکل ۵ نتایج مربوط به تغییرات مقاومت فشاری بتن خودتراکم در اثر افزودن خرده و پودر شیشه در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه ارائه شده است. نتایج بیان می‌دارد که افزودن ذرات شیشه در بتن خودتراکم تغییر محسوسی در مقاومت فشاری ایجاد نکرده است. بیشترین تغییر مقاومت نسبت به طرح شاهد برای هر دو سن ۲۸ و ۵۶ روز مربوط به طرح حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه با افزایشی به میزان ۴/۳ و ۸/۸۴ درصد بوده است. براین اساس می‌توان گفت طرح‌های حاوی پودر شیشه در درصدهای بالاتر جایگزینی می‌توانند تا حدودی مقاومت فشاری را بهبود دهند. پودر شیشه به علت خاصیت پوزولانی خود می‌تواند با هیدروکسید کلسیم (CH) آزاد شده ناشی از عملیات هیدراتاسیون سیمان با آب واکنش نشان داده و باعث تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) شود و از فرار ترکیبات قابل حل خمیر سیمان به سطح بتن که موجب کاهش فضاهای خالی بتن می‌شوند، جلوگیری کند. بهبود استحکام و مقاومت نمونه‌های حاوی پودر شیشه را می‌توان به این عامل نسبت داد [۵۸ و ۵۹].



شکل ۵: مقاومت فشاری ۲۸ و ۵۶ روزه نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه

#### ۴-۲-۲- مقاومت خمشی

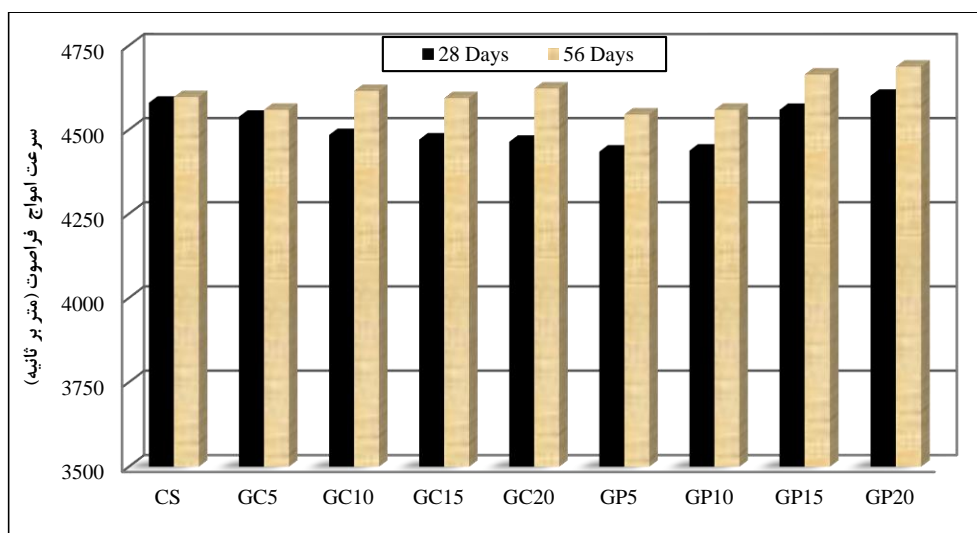
تأثیر افزودن خرده و پودر شیشه بر مقاومت خمشی در شکل ۶ ارائه و مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که افزودن خرده شیشه در بتن خودتراکم در سن ۲۸ روز باعث کاهش مقاومت خمشی فقط در ۵ درصد جایگزینی به میزان ۲/۲۶ درصد می‌باشد. با جایگزینی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده شیشه مقاومت خمشی به میزان ۱/۹۴، ۷/۲۳ و ۲۲/۹۲ درصد نسبت به طرح شاهد افزایش یافته است. اضافه کردن پودر شیشه به بتن خودتراکم باعث کاهش مقاومت خمشی برای تمامی طرح‌ها نسبت به طرح شاهد می‌شود. با توجه به نتایج به وضوح مشاهده می‌شود که طرح‌های حاوی خرده شیشه در تمامی درصدهای جایگزینی مقاومت خمشی بیشتری را نسبت به طرح‌های حاوی پودر شیشه با درصدهای جایگزینی مشابه دارا می‌باشند. با افزایش مقدار خرده شیشه در بتن خودتراکم رشد مقاومت روندی صعودی دارد، اما با اضافه کردن پودر شیشه در بتن، مقاومت خمشی روندی نزولی و منفی را دارا می‌باشد. علت رشد مقاومت در طرح‌های حاوی خرده شیشه ممکن است به دلیل قفل و بست شدن بهتر دانه‌ها در مخلوط بتن باشد.



شکل ۶: مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه

#### ۴-۲-۳- سرعت امواج فراصوت

مقادیر ثبت شده سرعت امواج فراصوت برای سنین ۲۸ و ۵۶ روز در شکل ۷ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل از آزمایش غیر مخرب اولتراسونیک می‌توان اینگونه بیان نمود که سرعت امواج فراصوت برای نمونه‌های حاوی ضایعات شیشه در مقایسه با نمونه شاهد تغییر چندانی نداشته است. مقادیر سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های مورد بررسی بین ۴۴۳۵ تا ۴۶۰۱ متر بر ثانیه و ۴۵۴۵ تا ۴۶۸۸ متر بر ثانیه به ترتیب برای سنین ۲۸ و ۵۶ روز متغییر بوده است. لازم به ذکر است که بیشترین سرعت مربوط به طرح حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه می‌باشد. به طور کلی، زمانی که مقدار سرعت امواج فراصوت برای بتن مورد آزمایش بالاتر از ۳۶۰۰ متر بر ثانیه باشد به عنوان بتنی با کیفیت خوب و در صورتی که بالاتر از ۴۵۰۰ متر بر ثانیه باشد به عنوان بتنی با کیفیت عالی شناخته می‌شود [۶۰]. بنابراین، با توجه به مقادیر بدست آمده برای نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق، تمامی طرح‌ها دارای کیفیت بالایی بوده و اکثر آن‌ها در محدوده بتن با کیفیت عالی قرار می‌گیرند.

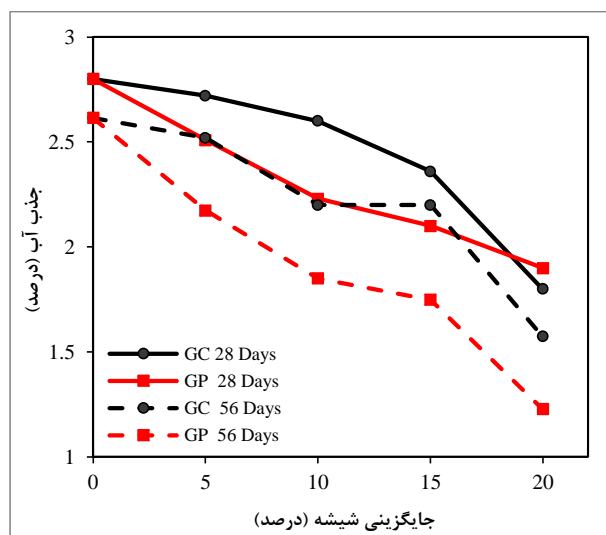


شکل ۷: مقایسه سرعت امواج فراصوت ۲۸ و ۵۶ روزه نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه

## ۴-۳- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های دوامی

## ۴-۳-۱- جذب آب اولیه

در شکل ۸ می‌توان میزان تأثیرگذاری افزودن خرده و پودر شیشه را بر جذب آب اولیه (نیم ساعته) ۲۸ و ۵۶ روزه مشاهده نمود. نتایج بیان می‌دارد که افزودن ذرات شیشه در بتن خودتراکم باعث کاهش جذب آب برای تمامی درصد‌های جایگزینی نسبت به طرح شاهد می‌شود. مقادیر کاهش جذب آب در ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزینی خرده شیشه برای سن ۲۸ روز به ترتیب برابر ۲/۸۶، ۷/۱۴، ۱۵/۷۱ و ۳۵/۷۱ درصد و برای جایگزینی پودر شیشه به ترتیب برابر ۱۰/۳۶، ۲۰/۳۶، ۲۵ و ۳۲/۱۴ درصد نسبت به طرح شاهد بوده است. بیشترین کاهش درصد جذب آب در سنین ۲۸ و ۵۶ روز در ۲۰ درصد جایگزینی و کمترین کاهش در ۵ درصد جایگزینی شیشه مشاهده می‌شود. به وضوح قابل ملاحظه است که طرح‌های حاوی پودر شیشه تقریباً در تمامی درصد‌های جایگزینی شرایط بهتری نسبت به طرح‌های حاوی خرده شیشه دارا می‌باشند. کاهش جذب آب طرح‌های حاوی شیشه به علت خاصیت آبریزی و جذب آب بسیار کم ذرات شیشه نسبت به مصالح سنگی است [۱۸]. از طرفی طرح‌های حاوی پودر شیشه به دلیل خاصیت پوزولانی و پرکنندگی بهتر می‌توانند سبب کمتر شدن خلل و فرج و در نتیجه کاهش بیشتر جذب آب شوند [۲۷].

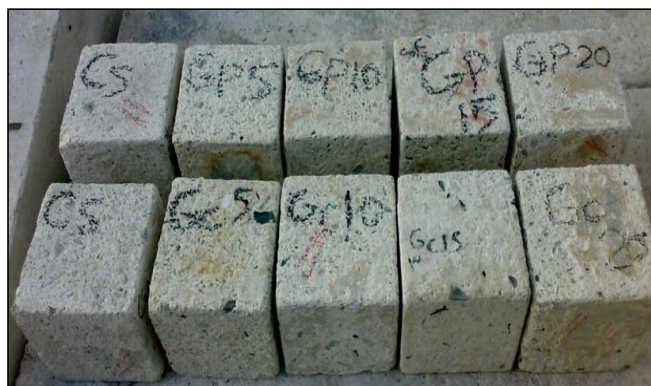


شکل ۸: مقایسه جذب آب اولیه ۲۸ و ۵۶ روزه نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه

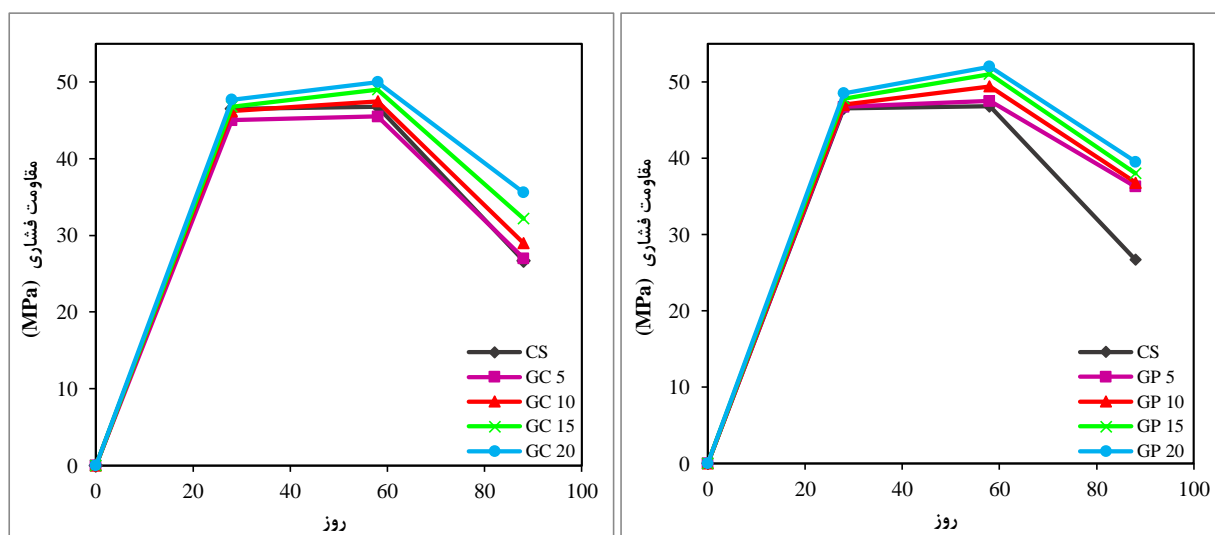
## ۴-۳-۲- مقاومت فشاری پس از غوطه‌وری در اسید سولفوریک

نمونه‌های مکعبی حاوی ۰ تا ۲۰ درصد شیشه پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب شرب، در محیط اسید سولفوریک با  $\text{PH}=1/5$  به مدت ۳۰ و ۶۰ روز قرار گرفتند و مطابق شکل ۹ پس از خارج شدن از محیط اسیدی و پاکسازی رسوبات ناشی از خوردگی، آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی آن‌ها انجام گرفت. در شکل ۱۰ تغییرات مقاومت فشاری ارائه شده و همانطور که ملاحظه می‌شود، تمامی طرح‌های مورد بررسی با افزایش زمان خوردگی از ۳۰ به ۶۰ روز دچار کاهش مقاومت فشاری شده‌اند. طبق نتایج می‌توان اینگونه بیان نمود که تمامی نمونه‌های قرار گرفته در اسید پس از ۳۰ روز غوطه‌وری، دارای رشد مقاومت فشاری بوده‌اند. کمترین میزان رشد مقاومتی متعلق به نمونه شاهد است و با افزایش محتوای شیشه در نمونه‌ها رشد مقاومتی بیشتر شده است. با افزایش زمان خوردگی تا ۶۰ روز مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد و حاوی خرده شیشه، به ترتیب به میزان ۴۰، ۳۷/۲۳، ۳۱/۲ و ۲۵/۳۷ درصد نسبت به قبل از غوطه‌وری در اسید

کاهش یافته است. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پودر شیشه، به ترتیب به میزان ۲۲/۳۳، ۲۱/۷، ۲۰/۵ و ۱۸/۵۶ درصد نسبت به قبل از غوطه‌وری در اسید کاهش یافته است. نتایج گواه این مسئله است که تمامی نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه دارای افت مقاومت به مراتب کمتری نسبت به طرح شاهد بوده و دوام بیشتری را در محیط اسیدی از خود نشان داده‌اند.



شکل ۹: نمونه‌های شاهد و حاوی ۵ تا ۲۰ درصد شیشه خارج شده از حوضچه اسید



شکل ۱۰: روند تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه پس از ۳۰ و ۶۰ روز خوردگی

طرح‌های حاوی پودر شیشه در تمامی درصدهای جایگزینی رشد مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به طرح‌های حاوی خرده شیشه در ۳۰ روز خوردگی و افت مقاومت فشاری کمتری در ۶۰ روز خوردگی با درصدهای جایگزینی مشابه دارا می‌باشند. به طور کلی اسید سولفوریک با محتوای هیدروکسید کلسیم بتن واکنش می‌دهد و با تولید گچ و اترینگات منجر به خوردگی بتن می‌گردد [۸]. از آنجایی که واکنش پوزولانی پودر شیشه در بتن باعث مصرف بخشی از هیدروکسید کلسیم موجود در بتن می‌شود، بنابراین محتوای هیدروکسید کلسیم کاهش می‌یابد و در نتیجه آن هیدروکسید کلسیم کمتری جهت واکنش با اسید سولفوریک باقی می‌ماند. بر این اساس، می‌توان بخشی از کاهش خوردگی و افزایش دوام بتن حاوی پودر شیشه در برابر حمله اسید سولفوریک را به واکنش پوزولانی این ذرات در بتن نسبت داد [۴۵]. رشد مقاومت در بازه ۳۰ روز خوردگی نسبت به قبل از غوطه‌وری به علت عدم نفوذ موثر اسید سولفوریک به داخل بتن و ایجاد خوردگی سطحی در رویه بتن می‌باشد. با افزایش بازه خوردگی تا ۶۰ روز اسید سولفوریک به طور کامل در بتن نفوذ کرده و موجب واکنش متوالی با

محصولات هیدراتاسیون سیمان و تولید بیشتر گچ و اترینگات می‌شود. در شکل ۱۱ می‌توان گچ تولید شده بر روی نمونه‌ها در اثر خوردگی را مشاهده نمود.



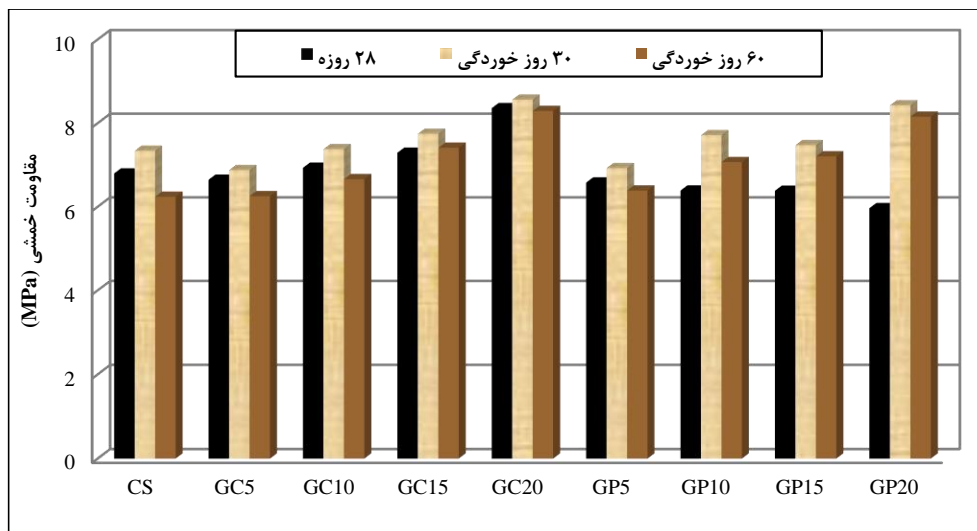
شکل ۱۱: نمایی از گچ تولید شده بر روی نمونه‌ها در اثر خوردگی

### ۳-۳-۴- مقاومت خمشی پس از غوطه‌وری در اسید سولفوریک

نمونه‌های تیر خمشی نیز پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب شرب، مشابه سایر نمونه‌ها در محیط اسید سولفوریک با  $PH=1.5$  به مدت ۳۰ و ۶۰ روز نگهداری شدند و پس از استخراج از حوضچه مطابق شکل ۱۲ مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۱۳ می‌توان تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه را پس از ۳۰ و ۶۰ روز خوردگی در اسید سولفوریک در مقایسه با مقاومت نمونه‌های قبل از غوطه‌وری در اسید مشاهده نمود.



شکل ۱۲: نمایی از تیر خمشی خورده شده حاوی ۲۰ درصد خرده شیشه قرار گرفته در دستگاه آزمایش خمشی



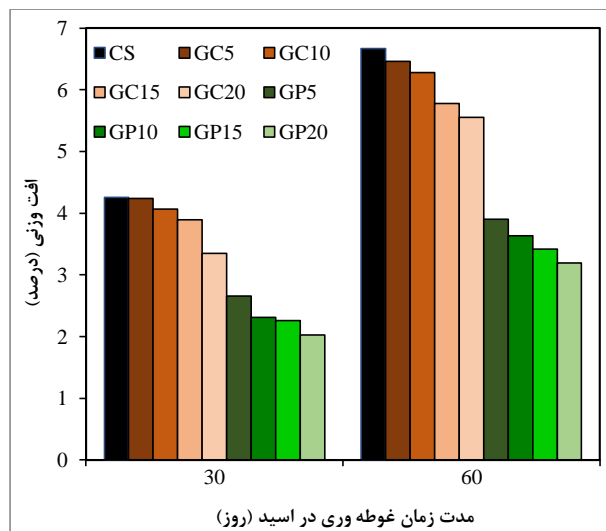
شکل ۱۳: مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه ۳۰ و ۶۰ روزه در اسید

با افزایش زمان خوردگی تا ۶۰ روز مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد و حاوی خرده شیشه، به ترتیب به میزان ۸/۲، ۵/۹۳، ۳/۹۲، ۱/۲۱ و ۰/۸۱ درصد نسبت به قبل از غوطه‌وری در اسید کاهش یافته است. مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی ۵ درصد پودر شیشه، به میزان ۲/۸۹ درصد نسبت به قبل از غوطه‌وری در اسید کاهش و طرح‌های حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه به ترتیب ۱۰/۶۴، ۱۲/۸۹ و ۳۶/۶۷ درصد افزایش یافته است.

#### ۴-۳-۴- افت وزنی پس از غوطه‌وری در اسید سولفوریک

در شکل ۱۴ درصد افت وزنی طرح‌های حاوی مقادیر مختلف خرده و پودر شیشه براساس زمان غوطه‌وری در اسید سولفوریک ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که اضافه کردن ذرات شیشه در بتن خودتراکم برای هر دو بازه ۳۰ و ۶۰ روز غوطه‌وری در اسید، موجب افت وزنی کمتری نسبت به نمونه شاهد می‌شود. پس از ۶۰ روز خوردگی، افت وزنی نمونه‌های شاهد و حاوی ۵ تا ۲۰ درصد خرده شیشه، به ترتیب ۶/۶۷، ۶/۴۶، ۶/۲۸، ۵/۷۸ و ۵/۵۵ درصد و برای طرح‌های حاوی پودر شیشه نیز به ترتیب برابر ۳/۹، ۳/۶۳، ۳/۴۲ و ۳/۱۹ درصد می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار شیشه در بتن خودتراکم دوام در برابر حمله اسید سولفوریک افزایش می‌یابد که این دوام در طرح‌های حاوی پودر شیشه با افزایش زمان خوردگی به مراتب بیشتر از طرح شاهد و طرح‌های حاوی خرده شیشه است. در شکل ۱۵ نمونه مکعبی خارج شده از محلول اسید سولفوریک پس از ۶۰ روز غوطه‌وری برای دو حالت قبل و بعد از پاکسازی رسوبات ناشی از خوردگی قابل مشاهده می‌باشد.





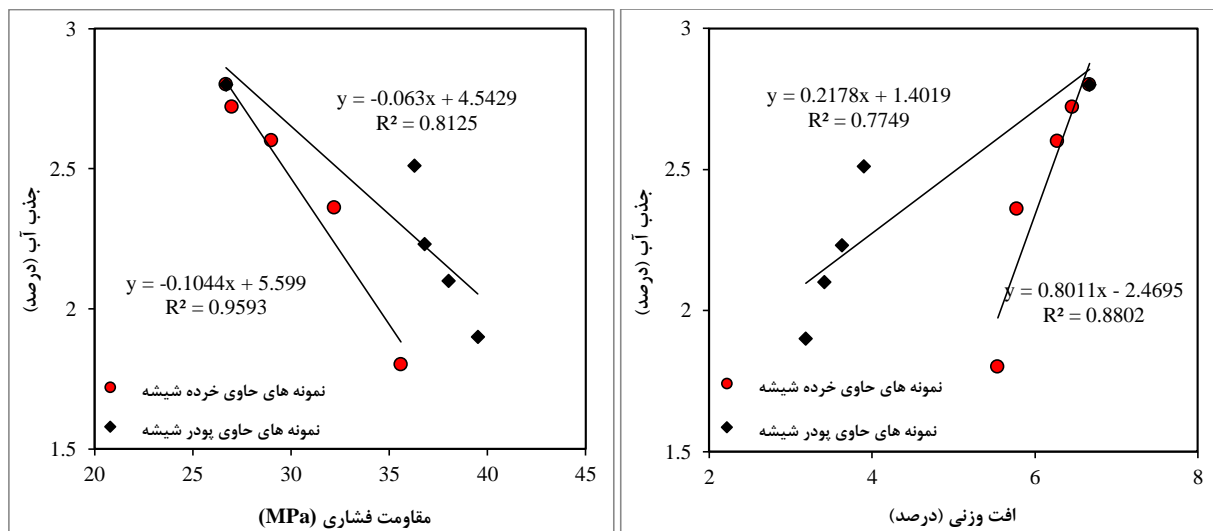
شکل ۱۴: تأثیر مدت غوطه‌وری در اسید سولفوریک بر درصد خوردگی نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه



شکل ۱۵: نمایی از نمونه‌ی مکعبی خارج شده از اسید سولفوریک قبل و بعد از پاکسازی رسوبات پس از ۶۰ روز خوردگی

### ۵-۳-۴- ارتباط میان نتایج آزمایش‌های دوام بتن

به منظور درک مناسب‌تری از رفتار بتن خودتراکم در معرض محیط اسیدی و پی بردن به علل اثرگذاری مثبت پودر و خرده شیشه بر دوام نمونه‌های مورد آزمایش، منطقی‌ترین روش ارزیابی ارتباط متقابل بین آزمایش‌های دوامی می‌باشد. در این راستا ارتباط میان نتایج جذب آب ۲۸ روزه و تغییرات افت وزنی و همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در اثر خوردگی پس از ۶۰ روز غوطه‌وری در اسید با استفاده از رگرسیون خطی بررسی شده و در شکل ۱۶ ارائه شده است. نتایج گواهی محکم بر وجود ارتباط معنی‌دار میان جذب آب و میزان تغییرات افت وزنی و مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌باشد. ضرایب همبستگی بین نتایج جذب آب و افت وزنی به ترتیب برای طرح‌های حاوی خرده و پودر شیشه برابر ۰/۸۸ و ۰/۷۷۴ است و در ارتباط بین جذب آب و مقاومت فشاری پس از ۶۰ روز خوردگی نیز به ترتیب برای طرح‌های حاوی خرده و پودر شیشه برابر ۰/۹۵۹ و ۰/۸۱۲ می‌باشد. با افزایش میزان ذرات شیشه در نمونه‌ها به وضوح کاهش جذب آب و به تبع آن بهبود کاهش وزنی و مقاومت فشاری در شرایط خورنده ملاحظه می‌گردد.



شکل ۱۶: رابطه بین جذب آب و تغییرات افت وزنی و مقاومت فشاری در اثر خوردگی پس از ۶۰ روز غوطه‌وری در اسید

## ۵- نتیجه گیری

۱. افزودن خرده شیشه در بتن خودتراکم تغییر محسوسی در مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد ایجاد نکرده است، اما با اضافه کردن پودر شیشه به بتن خودتراکم، مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۵۶ روز تمایل به افزایش داشت. علت این افزایش مقاومت فشاری را می‌توان به خاصیت پوزولانی پودر شیشه در بتن نسبت داد. مقاومت خمشی در طرح‌های حاوی خرده شیشه با افزایش محتوای شیشه روندی افزایشی را نشان داد. این در حالی است که در طرح‌های حاوی پودر شیشه، مقاومت خمشی روندی نزولی داشته است.

۲. افزودن ذرات شیشه در بتن خودتراکم در سن ۲۸ و ۵۶ روز باعث کاهش جذب آب در تمامی درصد‌های جایگزینی نسبت به طرح شاهد شده است. کاهش جذب آب طرح‌های حاوی شیشه به علت خاصیت آبریزی و جذب آب بسیار ناچیز ذرات شیشه نسبت به مصالح سنگی می‌باشد.

۳. پس از ۳۰ روز خوردگی نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک، رشد مقاومت فشاری برای تمامی نمونه‌های حاوی خرده و پودر شیشه نسبت به قبل از غوطه‌وری مشاهده شد. پس از ۶۰ روز غوطه‌وری در حوضچه اسیدی، اسید سولفوریک به طور کامل در بتن نفوذ کرده و موجب واکنش متوالی با محصولات هیدراتاسیون سیمان و تولید بیشتر گچ و اترینگات می‌شود. با افزودن ذرات شیشه به بتن دوام تمامی نمونه‌ها در برابر حمله اسیدی بهبود یافته و افت مقاومت کمتری نسبت به طرح شاهد داشته‌اند. کمترین افت مقاومت مربوط به طرح حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه به میزان ۱۸/۵۶ درصد بوده است. دوام بیشتر طرح‌های حاوی شیشه نسبت به طرح شاهد به علت جذب آب کمتر و همچنین دوام قطعات شیشه در برابر اسید سولفوریک می‌باشد. افت کمتر مقاومت فشاری و دوام بیشتر در طرح‌های حاوی پودر شیشه را می‌توان به علت اثر پوزولانی، پرکنندگی مناسب و جذب آب کمتر آن‌ها نسبت به سایر طرح‌ها دانست. از آنجائیکه محتوای هیپروکسید کلسیم موجود در بتن نقش کلیدی در واکنش با اسید سولفوریک و ایجاد خوردگی دارد، بنابراین مصرف بخشی از هیپروکسید کلسیم در اثر واکنش پوزولانی شیشه در بتن می‌تواند تا حدی از خوردگی جلوگیری کند.

۴. مقاومت خمشی تمامی طرح‌ها پس از ۳۰ روز غوطه‌وری در اسید نسبت به قبل از غوطه‌وری افزایش داشته است. با افزایش زمان خوردگی تا ۶۰ روز، مقاومت خمشی تمامی نمونه‌های حاوی خرده شیشه و ۵ درصد پودر شیشه کاهش یافته و سایر طرح‌های حاوی پودر شیشه افزایش مقاومت را نشان دادند.

۵. نتایج نشان داد که کمترین افت وزنی نمونه‌ها متعلق به طرح‌های حاوی شیشه می‌باشد. بهترین عملکرد در طرح‌های حاوی خرده و پودر شیشه مربوط به ۲۰ درصد جایگزینی بوده است. دوام بیشتر طرح‌های حاوی شیشه در برابر حمله اسید سولفوریک نسبت به طرح شاهد را می‌توان به جذب آب کمتر و همچنین دوام قطعات شیشه در برابر اسید سولفوریک به علت عدم واکنش‌پذیری آن با اسید نسبت داد.

## مراجع

- [1] Janfeshan Araghi, H. Nikbin, I.M. Rahimi Reskati, S. Rahmani, E and Allahyari, H. (2015). An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack. *Construction and Building Materials*, Volume (77), Page (461–471).
- [۲] رضانیانپور، ع.ا؛ پرهیزکار، ط. و رحمانی، ح.؛ (۱۳۸۳)؛ "آسیب دیدگی های بتن در محیط های اسیدی و ارائه راه حل مناسب جهت کاهش خرابی ها"؛ اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
- [۳] ساداتیان، س.م.؛ رشیدی، ع. و وزین رام، ف.؛ (۱۳۸۹)؛ "افزایش دوام بتن در مقابل خوردگی اسیدی با استفاده سنگدانه آهکی"؛ مجله علمی و پژوهشی تحقیقات بتن، سال سوم، شماره ۲، صفحه (۷۱-۷۹).
- [۴] سهرابی، م.ر. و رستمی، م.؛ (۱۳۹۰)؛ " بررسی ویژگیهای مکانیکی بتن حاوی پوزولان بش آفاج در محیط های فاضلاب شهری"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران.
- [5] Monteny, J. De Belie, N. Vincke, E. Verstraete, W. and Taerwe, L. (2001). Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume (31), Page (1359–1365).
- [6] Monteny, J. Vincke, E. Beeldens, A. De Belie, N. Taerwe, L. Van Gemert, D. and Verstraete, W. (2000). Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume (30), Page (623–634).
- [7] Skariah Thomas, B. Chandra Gupta, R. and John Panicker, V. (2017). Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, Volume (112), Page (504-513).
- [8] Bassuoni, M.T. and Nehdi, M.L. (2007). Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. *Cement and Concrete Research*, Volume (37), Page (1070–1084).
- [9] Topcu, I.B. and Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, Volume (34), Page (267–274).
- [10] Jani, Y. and Hogland, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume (2), Page (1767-1775).
- [11] Lu, J.X. Duan, Z.H. and Poon, C.S. (2017). Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet. *Construction and Building Materials*, Volume (131), Page (793–799).
- [۱۲] عمرانی، ق.ع. منوری، س.م. جوزی، س.ع. و زمانی، ن.؛ (۱۳۸۸)؛ "مدیریت بازیافت شیشه در شهر تهران"؛ علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره یازدهم، شماره چهار، صفحه (۴۱-۵۰).
- [13] Limbachiya, M.C. (2009). Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. *Construction and Building Materials*, Volume (23), Page (1078–1083).
- [14] Ling, T.C. Poon, C.S. Sahmaran, M. and Kou, S.C. (2011). Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars. *Cement and Concrete Composites*, Volume (33), Page (848–854).
- [15] Yu, X. Tao, Z. Song, T.Y. and Pan, Z. (2016). Performance of concrete made with steel slag and waste glass. *Construction and Building Materials*, Volume (114), Page (737–746).
- [16] Madandoust, R. and Ghavidel, R. (2013). Mechanical properties of concrete containing waste glass powder and rice husk ash. *Biosystems Engineering*, Volume (116), Page (113–119).
- [17] Pan, Z. Tao, Z. Murphy, T. and Wuhner, R. (2017). High temperature performance of mortars containing fine glass powders. *Journal of Cleaner Production*, Volume (162), Page (16-26).
- [18] Castro, S.D. and Brito, J.D. (2013). Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, Volume (41), Page (7–14).
- [19] Shayan, A. and Xu, A. (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume (34), Page (81–89).
- [20] Liu, M. (2012). Incorporating ground glass in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Volume (25), Page (919–925).
- [21] Cassar, J. and Camilleri, J. (2012). Utilisation of imploded glass in structural concrete. *Construction and Building Materials*, Volume (29), Page (299–307).

- [22] Sadiquul Islam, G.M. Rahman, M.H. and Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, Volume (6), Page (37–44).
- [23] Ling, T.C. Poon, C.S. and Wong, H.W. (2013). Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume (70), Page (25–31).
- [24] Shi, C. Wu, Y. Riefler, C. and Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, Volume (35), Page (987–993).
- [25] Schwarz, N. Cam, H. and Neithalath, N. (2017). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, Volume (30), Page (486–496).
- [26] Chen, C.H. Huang, R. Wu, J.K. and Yang, C.C. (2006). Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research*, Volume (36), Page (449–456).
- [27] Du, H. and Tan, K.H. (2017). Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, Volume (75), Page (22–29).
- [28] Wang, H.Y. and Huang, W.L. (2010). A study on the properties of fresh self-consolidating glass concrete (SCGC). *Construction and Building Materials*, Volume (24), Page (619–624).
- [29] Sharafi, Y. Houshiar, M. and Aghebati, B. (2017). Recycled glass replacement as fine aggregate in self-compacting concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Volume (7), Page (419–428).
- [30] Najim, K.B. and Hall, M.R. (2012). Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Construction and Building Materials*, Volume (27), Page (521–530).
- [31] Ganesan, N. Bharati Raj, J. and Shashikala, A.P. (2013). Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, Volume (44), Page (7–14).
- [32] Hesami, S. Salehi Hikouei, I. and Emadi, S.A.A. (2016). Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Cleaner Production*, Volume (133), Page (228–234).
- [33] Sadrumontazi, A. Dolati-Milehsara, S. Lotfi-Omran, O. and Sadeghi-Nik, A. (2015). The combined effects of waste PET particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, Volume (112), Page (2363–2373).
- [34] Okamura, H. and Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volume (1), Page (5–15).
- [35] Madandoust, R. and Mousavi, S.Y. (2012). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, Volume (35), Page (752–760).
- [36] Sivakumar, V.R. Kavitha, O.R. Prince Arulraj, G. and Srisanthi, V.G. (2017). An experimental study on combined effects of glass fiber and Metakaolin on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete. *Applied Clay Science*, Volume (147), Page (123–127).
- [37] Kou, S.C. and Poon, C.S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*, Volume (31), Page (107–113).
- [38] Emam Ali, E. and Al-Tersawy, S.H. (2012). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Volume (35), Page (785–791).
- [39] Feys, D. (2009). Influence of Self-Compacting Concrete Composition on Sulfuric Acid Attack. *RILEM PROCEEDINGS*, Volume (65), Page (435–443).
- [40] Siad, H. Mesbah, M.A. and Kamali Bernard, S. (2009). Influence of Natural Pozzolan on The Behavior of Self-Compacting Concrete Under Sulfuric and Hydrochloric Acid Attacks, Comparative Study. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume (35), Page (183–195).
- [41] Xiao, J. Qu, W. Li, W. and Zhu, P. (2016). Investigation on effect of aggregate on three non-destructive testing properties of concrete subjected to sulfuric acid attack. *Construction and Building Materials*, Volume (115), Page (486–495).
- [42] Zhang, M. Zhao, M. Zhang, G. Mann, D. Lumsden, K. and Tao, M. (2016). Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water. *Construction and Building Materials*, Volume (124), Page (373–382).
- [43] Ling, T.C. and Poon, C.S. (2011). Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes. *Materials and Design*, Volume (32), Page (2675–2684).
- [44] Tan, K.H. and Du, H. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites*, Volume (35), Page (109–117).
- [45] Siad, H. Lachemi, M. Sahmaran, M. and Anwar Hossain, K.M. (2016). Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, Volume (113), Page (163–173).
- [46] سایت کارخانه سیمان سیستان. (<http://www.zabolcement.com>)
- [47] ASTM C 127. (2004). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.

- [48] ASTM C 128. (2004). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
- [49] ASTM C 33. (2004). Standard Specification for Concrete Aggregate.
- [50] سایت کارخانه نامیکاران. (<http://www.namikaran.com>)
- [51] EFENARC. (2005). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. *European Federation*.
- [52] Parhizkar, T. Raiees Ghasemi, A.M. Pourkhorshidi, A.R. and Ramezaniapour, A.A. (2010). Influence of Fly Ash and Dense Packing Method to Increase Durability of HPC Subjected to Acid Corrosion. *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.
- [53] Rahmani, H. and Ramzaniapour, A.A. (2008). Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes. *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING)*, Volume (9), Page (303–319).
- [54] ASTM C 39. (2012). Strength Test on Concrete, Compressive Strength Test.
- [55] ASTM C 78. (2012). Strength Test on Concrete, Flexural Strength Test.
- [56] ASTM C 597. (2003). Standard test method for Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Through concrete specimens.
- [57] British Standard Institution. (1983). Method for determination of water absorption. *B.S.1881, Part 122*.
- [58] Aly, M. Hashmi, M.S.J. Olabi, A.G. Messeiry, M. Abadir, E.F. and Hussain, A.I. (2012). Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar. *Materials and Design*, Volume (33), Page (127–135).
- [59] Ismail, Z.Z. and AL-Hashmi, E.A. (2009). Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*, Volume (29), Page (655–659).
- [60] Saint-Pierre, F. Philibert, A. Giroux, B. and Rivard, P. (2016). Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*, Volume (125), Page (1022–1027).