

## بررسی آزمایشگاهی کارایی و خواص مکانیکی بتن حاوی پودر شیشه و خرده شیشه ضایعاتی با کاربردهای جداگانه و همزمان

سیدفتح اله ساجدی<sup>\*</sup>، فرزاد دارش

گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۱ شهریور ۱۳۹۶  
بازنگری: ۱۹ بهمن ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۹ بهمن ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۳ بهمن ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

پودر شیشه  
خرده شیشه ضایعاتی  
مقاومت فشاری بتن  
مقاومت کششی دونیم شدن  
ضریب ارتجاعی استاتیکی

**چکیده:** تولید بتن نیازمند مصالح طبیعی و مصنوعی گوناگونی است. تولید سیمان به عنوان اصلی ترین ماده ساخت بتن، باعث تولید گاز دی اکسید کربن و اثرات زیان بار آن بر لایه ازن می شود. لذا محققین را به یافتن راه حلی جهت کاهش در سهم مصالح طبیعی و تولید گازهای گلخانه ای در تولید بتن واداشت. حجم زیاد شیشه های ضایعاتی بازیافت ناپذیر، به عنوان جایگزین مصالح مذکور در بتن اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیقات قبلی، جایگزینی ماسه با خرده شیشه در نسبت های بالا، کاهش قابل ملاحظه خواص مکانیکی را نتیجه داد. در این تحقیق پس از ساخت طرح اختلاط مرجع، ماسه با خرده شیشه ضایعاتی با نسبت های ۵٪، ۸٪ و ۱۲٪ جایگزین و ۳ طرح اختلاط ساخته شد. ۳ طرح با جایگزینی پودر شیشه با سیمان در ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ نیز ساخته شدند. پس از بررسی نتایج ۷ طرح مذکور، طرح های ترکیبی با جایگزینی ثابت ۸٪ خرده شیشه با ماسه و سیمان با پودر شیشه در نسبت های ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ نیز ساخته شدند. در هر آزمایش سه نمونه و در مجموع ۲۳۰ نمونه گیری انجام شد. مقاومت فشاری نمونه های مکعبی استاندارد در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه، تعیین گردید. مقاومت کششی به روش دونیم شدن نمونه ها، اندازه گیری شدند. آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی نیز بر روی نمونه های استاندارد استوانه ای، انجام گردید. مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی، اسلامپ، وزن مخصوص بتن های تازه و سخت شده طرح های اختلاط حاوی خرده شیشه و پودر شیشه به صورت همزمان، نسبت به طرح های اختلاط حاوی فقط پودر شیشه، کاهش را نشان داد، که این امر، عملکرد نامطلوب شیشه به صورت ذرات درشت تر (خرده شیشه) در ساختار بتن و افزایش فعالیت قلیایی-سیلیسی را نشان می دهد. عملکرد نامطلوب خرده شیشه در خواص مکانیکی بتن از طریق جایگزینی سیمان با پودر شیشه، تا حدود بسیار زیادی بهبود یافت. نتایج نشان داد که جایگزینی همزمان سیمان با پودر شیشه در نسبت های پایین در طرح های حاوی ۸٪ ثابت جایگزینی ماسه با خرده شیشه، باعث کاهش شدید کارایی و بهبود خواص مکانیکی بتن ها نسبت به طرح مرجع، گردید.

### ۱- مقدمه

بتن<sup>۱</sup> یکی از مصالح پر مصرف در سازه های مهندسی است [۱]؛ خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب بتن از یک سو و سهولت تولید آن از سوی دیگر بتن را به پرمصرف ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز تبدیل نموده است [۲]. نقطه قوت بتن در تحمل فشارهای بالا باعث استفاده فراوان از آن گردیده است [۳]؛ به این ترتیب که در برابر شکست های ناگهانی و تاب تحمل تنش های فشاری، مقاومت خوبی از خود نشان می دهد [۴]. این ماده به راحتی پس از شکل گیری در داخل قالب، خواص مکانیکی قابل قبولی پیدا نموده و بهبود مشخصات آن به مرور زمان کامل می گردد. جذب انرژی بالا و مقاوم بودن آن در برابر آتش سوزی از دیگر مزایای بتن می باشد [۳]. اما در کنار داشتن این ویژگی ها، مقاومت کششی بتن بسیار پایین است؛ به

همین علت تقویت بتن و بهبود خواص آن از مهم ترین مواردی است که امروزه مورد توجه جوامع علمی قرار گرفته است [۲]. بر این اساس، یکی از مهم ترین اهداف محققین دستیابی به طرحی جدید از بتن با ویژگی های برتر است [۵].

در سال های اخیر استفاده از ضایعات شیشه<sup>۲</sup> در بتن، اقبال زیادی یافته که لزوم بررسی اثرات این ضایعات را بر خواص رفتاری و مکانیکی بتن ضروری می سازد [۱]. شیشه یکی از قدیمی ترین مصالح بشرساز است که در اشکال مختلف تولید می شود. از این رو، نیاز به استفاده مجدد (بازیافت) به منظور جلوگیری از مشکلات زیست محیطی دارد. از لحاظ تئوری، شیشه یک ماده ۱۰۰٪ بازیافتی است که می تواند به صورت نامحدود و بدون هیچ گونه افت کیفیتی بازیافت شود. نمونه های بسیاری از بازیافت موفق شیشه ضایعاتی وجود دارد که می تواند به عنوان جایگزین سنگدانه ها و یا

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: Sajedi@iauhvat.ac.ir

سیلیسی کاهش دهد [۹]. همچنین در مطالعه‌ای ویجایاکومار و همکاران<sup>۳</sup> به این نتیجه رسیدند که پودر شیشه می‌تواند به عنوان مواد جایگزین سیمان تا حد اندازه ذرات کمتر از ۷۵ میکرومتر استفاده گردد تا از واکنش‌های قلیایی-سیلیسی جلوگیری نماید [۱۰]. در ادامه تحقیقات اخیر شخاوات و آگاروال<sup>۴</sup> نشان دادند که ضایعات شیشه می‌تواند به‌طور موثر در بتن به عنوان یک پوزولان شیشه‌ای استفاده شود. ضایعات شیشه در قالب پودر ریز برخی از خواص پوزولانی را به دلیل محتوای سیلیسی دارا می‌باشد. بنابراین پودر شیشه تا حدی توانست با سیمان جایگزین و باعث بهبود مقاومت و دوام بتن گردد [۱۱]. همچنین دامیترا و همکاران<sup>۵</sup> بیان می‌کنند که پودر شیشه آهکی سیلیکاتی عبوری از الک شماره ۱۰۰ در جهت کاهش واکنش قلیایی-سیلیسی است [۱۲]. در این راستا مرکز زمین پاک واشنگتن<sup>۶</sup> به نقل از دبیر و دبیر، بیان می‌کند که دانه‌های ریز (پودر) می‌توانند بتن را به‌وسیله تأثیر واکنش قلیایی-سیلیسی تضعیف کنند [۱۳]. همچنین کارهای انجام‌شده توسط سامتور<sup>۸</sup> بر روی این موضوع بیان می‌کند که پودر شیشه عبوری از الک شماره ۲۰۰ می‌تواند مانند یک ماده پوزولانی و در جهت کاهش اثر واکنش سنگدانه‌ها عمل کند [۱۴].

تحقیق‌های ناصر و سروشیان<sup>۹</sup> نشان داد، هنگامی که اندازه ذره شیشه خرد شده به مقیاس میکرو میل کند، واکنش پوزولانی با هیدرات سیمان انجام می‌گیرد که باعث تشکیل سیلیکات‌کلسیم هیدراته ثانویه می‌گردد. این واکنش‌ها در مورد تغییرات مطلوب در ساختار هیدراته خمیر سیمان و مناطق انتقال سطحی در بتن‌های بازیافتی کاربرد دارند. نتایج بیان نمود که پودر شیشه جایگزین بخشی از سیمان دستاوردهای قابل توجهی در مقاومت و دوام بتن‌های بازیافتی ایجاد و واکنش‌های قلیایی-سیلیسی را محدود می‌نماید [۱۵]. در بررسی آزمایشگاهی دیگر، وایتکویسیس و همکاران<sup>۱۰</sup> بیان می‌نمایند که پودر شیشه به عنوان جایگزین کامل پودر کوارتز میکروسیلیس، باعث بهبود خواص مقاومت فشاری و ریزساختاری، بتن با عملکرد خیلی بالا می‌شود. بررسی ریزساختاری توسط نفوذ جیوه<sup>۱۱</sup> و تجزیه و تحلیل با انکسار اشعه ایکس<sup>۱۲</sup> مشخص نمود که پودر شیشه خردشده به مقیاس ریز تحت واکنش پوزولانی کم و به عنوان تسریع کننده انحلال فاز کلینکر و در قالب سیلیکات‌کلسیم هیدراته عمل می‌کند. این واکنش‌ها اثر مثبتی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن با عملکرد خیلی بالا دارند [۱۶].

بازانت<sup>۱۳</sup> بیان می‌کند که ذرات شیشه حدود ۱/۵ میلی‌متری باعث انبساط

افزودنی پوزولانی در بتن مورد استفاده قرار گیرند [۲]. دلیل استفاده از بتن با شیشه‌های ضایعاتی می‌تواند جلوگیری از تخریب بیش‌تر محیط زیست و همچنین بهبود برخی از مشخصات بتن باشد. از این رو با جایگزینی مناسب شیشه‌های ضایعاتی به سنگدانه‌های استفاده شده در بتن، می‌توان علاوه بر صرفه اقتصادی، از هزینه دفع این گونه ضایعات نیز جلوگیری نمود [۳]. این در حالی است که امروزه توسعه جهانی حجم انبوهی از ضایعات و تلفات قابل توجه را بر محیط وارد کرده است و فعالیت‌های ساخت و ساز و تخریب، بیش‌ترین سهم را در آسیب‌های محیطی داشته است. لذا استفاده از ضایعات بازیافتی، نه تنها تولید را کاهش داده، بلکه در عین حال باعث کاهش دفع زباله و حفظ محیط زیست نیز خواهد شد [۴].

شیشه به عنوان یکی از ضایعات، می‌تواند به صورت جایگزین سیمان و یا سنگدانه‌ها در بتن به کار گرفته شود. استفاده از زباله‌های شیشه به عنوان یک جزء بتن، فن‌آوری جدیدی است که نیاز به مطالعه بیشتر و بررسی در جهت ارتقای عملی و تأکید بر معرفی شیشه‌های بازیافتی به عنوان جایگزینی برای مصالح اولیه دارد. در طول سال‌های اخیر مقدار قابل توجهی از کار پژوهش به منظور بهره‌برداری از توان بالقوه استفاده از زباله یا مواد قابل بازیافت در بتن به عنوان یک راه‌حل برای حل مشکل مواد زائد و بهبود خواص بتن انجام شده است [۵]. تعدادی از بررسی‌ها در دهه ۱۹۶۰ انجام شدند تا سعی کنند از شیشه‌های زائد به عنوان سنگدانه در بتن استفاده نمایند. در چند سال گذشته استفاده از شیشه بازیافتی به عنوان سنگدانه در بتن منافع تحقیقاتی زیادی را به علت صرف هزینه بالا جهت دفع شیشه‌های زائد و نیز اعمال قوانین زیست‌محیطی جذب کرده است. تقریباً در سراسر جهان تعدادی از کاربردهای استفاده از شیشه بازیافت شده در صنعت ساخت وجود دارد که این کاربردها شامل استفاده آن‌ها در بتن آسفالتی، بتن طبیعی، مواد پرکننده، زیراساس، کاشی، آجرینایی، بلوک‌های سنگ‌فرش و اهداف تزئینی دیگر می‌باشد. اما کاربرد عملی شیشه بازیافتی در بتن ساختمانی محدود است [۶ و ۷].

در واقع نگرانی بزرگی که در استفاده از شیشه در بتن وجود دارد واکنش شیمیایی مابین ذرات سیلیس اشباع شیشه و قلیایی‌های مخلوط بتن است، که به واکنش قلیایی-سیلیسی<sup>۱</sup> معروف است. این واکنش می‌تواند برای پایداری بتن بسیار خطرناک باشد. به این منظور باید پیش‌گیری مناسبی در جهت کم‌تر کردن اثر این واکنش انجام شود. پیش‌گیری مناسب می‌تواند با استفاده از یک ماده پوزولانی مناسب مانند خاکستر بادی، متاکائولین یا میکروسیلیس با نسبت مناسب در مخلوط بتن انجام گیرد [۸].

اگر شیشه به صورت بسیار ریز پودر شود، می‌تواند خواص پوزولانی از خود نشان دهد. به عنوان مثال ریندل<sup>۲</sup> در تحقیقی عنوان نمود که پودر شیشه (اندازه عبوری از الک با اندازه ۲۰۰) می‌تواند مانند یک ماده پوزولانی عمل نماید تا تمایل مصالح دانه‌بندی شده واکنش‌پذیر را در مقابل واکنش قلیایی-

1 Alkali-Silica Reaction (ASR)

2 Rindel

3 Vijayakumar et al.

4 Shekhawat and Agarwal

5 Dumitru et al.

6 Washington's Clean Sky Center

7 Dyer and Dhir

8 Samtur

9 Nassar and Soroushian

10 Vaitkevicius et al.

11 Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

12 X-Ray Diffraction (XRD)

13 Bazant

جایگزین ساختند. نتایج مشخص نمود که اسلامپ با افزایش مقادیر شیشه بازیافتی رشد داشت. از طرف دیگر، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی و همچنین ضریب ارتجاعی استاتیکی در مخلوط‌های بتن خودتراکم، با افزایش میزان شیشه بازیافتی، کاهش داشت [۷]. در تحقیقی دیگر فیروزجانی پودر شیشه را درنسبت‌های وزنی ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪ جایگزین سیمان نمود. طرح ۵٪ جایگزینی، بهترین مقاومت فشاری را نشان داد. با وجود این، مقاومت فشاری بتن حاوی شیشه بازیافتی، با افزایش مقدار شیشه بازیافتی در ۲۵٪ و ۳۰٪ جایگزینی شیشه، شدیداً کاهش یافت. کاهش مقاومت در دیگر نسبت‌های جایگزینی مختلف قابل توجه نبود [۱۰]. همچنین وینا و همکاران<sup>۲</sup> پودر شیشه ضایعاتی را با درصدهای ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جایگزین سیمان کردند و به این نتیجه رسیدند که درصدهای بالاتر جایگزینی پودر شیشه ضایعاتی باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود [۵۹].

با توجه به اینکه خواص فیزیکی در نسبت‌های بالای جایگزینی کاهش می‌یابد، لذا در این تحقیق نهایت نسبت جایگزینی به ۱۲٪ محدود شد. از طرفی در راستای مقایسه و صحت سنجی با اکثر تحقیق‌های گذشته، که نسبت ۵٪ به عنوان طرح بهینه مشخص شده بود، این نسبت نیز در این تحقیق لحاظ گردید؛ لکن با توجه اینکه گام ۵٪، که در اکثر تحقیقات گذشته استفاده شده، نسبتاً بزرگ بوده و امکان هم رفتار نبودن با نسبت‌های مطرح نشده قبل و بعد را دارد، در محدوده‌های بالاتر از ۵٪، گام نسبت‌های جایگزینی به ۴٪ کاهش یافت. در این تحقیق نیز قصد بر این است به بررسی کاربرد شیشه به صورت پودر و خردشده در بتن و شناسایی اثرات آن‌ها بر کارایی و خواص مکانیکی بتن پرداخته شود. در واقع هدف کلی از این تحقیق ایجاد نوعی بتن حاوی پودر و خرده شیشه‌های ضایعاتی است که به شکل مناسب پودر و خرد شده‌اند و در درصدهای مختلف به صورت جایگزین‌های جداگانه با ماسه و سیمان و در نهایت ترکیبی، به بتن اضافه شوند. پس از ساختن طرح‌های اختلاط مناسب و مکفی، آزمایش‌های مرتبط به منظور بررسی کارایی و خواص مکانیکی بتن‌های ساخته شده صورت خواهد پذیرفت.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

#### ۲-۱-۱- سیمان

سیمان مصرفی در ایران معمولاً سیمان پرتلند، نوع ۲ می‌باشد که مهم‌ترین ویژگی آن مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها و نمک‌ها است. لازم به ذکر است که زمان گیرش سیمان نوع ۲ مانند سیمان معمولی (نوع ۱) می‌باشد و چون در بسیاری از کارخانه‌های تولید سیمان در ایران این نوع سیمان تولید می‌شود، بنابراین در تحقیق حاضر از این نوع سیمان استفاده شده و همچنین به دلیل استفاده از مواد پوزولانی و یا جایگزین سیمان مانند

زیادی میشوند، هرچند که ذرات کوچکتر از ۰/۲۵ میلی‌متری در آزمایشگاه باعث هیچگونه انبساطی در بتن نگردیدند [۱۷]. باکستر و میر<sup>۱</sup> به این نتیجه رسیدند که ذرات شیشه حدود ۱/۲ میلی‌متری باعث بیشترین انبساط ملات در بین دانه‌های با اندازه ۰/۱۵ تا ۴/۷۵ میلی‌متری می‌شوند. آن‌ها پی بردند که بیش‌ترین انبساط وقتی حاصل می‌شود که ۱۰۰٪ ذرات شیشه به صورت سنگدانه باشند و اگر شیشه‌های سبز بیش از ۱٪ اکسید کرم داشته باشند اثر مثبتی بر واکنش قلیایی-سیلیسی دارند [۶]. در تحقیقی دیگر کارپنتر و کرامر<sup>۲</sup> گزارش کردند که پودر شیشه بر کم کردن اثر واکنش قلیایی-سیلیسی در آزمایش تسریع شده ملات مانند اثر خاکستر بادی و میکروسیلیس و سرباره موثر است. این نشان میدهد که پودر شیشه می‌تواند انبساط ناشی از اثر واکنش قلیایی-سیلیسی را در سنگدانه‌های حساس و شیشه‌های دانه-ای متوقف کند [۱۸]. همچنین پاتنگیل<sup>۳</sup> نیز به این نتایج دست یافت. مرکز تحقیقات انرژی ایالت نیویورک<sup>۴</sup> حمایت‌های مالی تحقیق بر روی کاربرد شیشه بازیافتی برای بلوک‌های بنایی بتنی را انجام داده و نشان داد که شیشه ضایعاتی میتواند هم به جای سنگدانه و هم به عنوان پوزولان (با ایجاد شرایط مشخص) در بتن استفاده شود [۱۹].

از تحقیق‌های انجام شده چنین نتیجه‌گیری شده است که شیشه می‌تواند به سه صورت درشت‌دانه، ریزدانه و پودر شیشه در بتن استفاده شود. درشت‌دانه و ریزدانه می‌توانند باعث واکنش قلیایی-سیلیسی در بتن شوند. اما پودر شیشه می‌تواند اثر واکنش قلیایی-سیلیسی را کاهش دهد. البته در بعد تجاری بسیار به صرفه است که پودر شیشه به جای سیمان مصرف شود تا اینکه شیشه به عنوان سنگدانه در بتن مصرف شود. پودر شیشه یک ماده با ارزش است که از شیشه‌هایی که برای بازیافت مناسب نیستند به دست می‌آید [۱۴ و ۱۵]. به‌طور کلی شیشه یک قلیای ناپایدار است که بخش سیلیسی شیشه در محیط بتن می‌تواند باعث ایجاد مشکلات ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی شود. این ویژگی می‌تواند به عنوان یک مزیت در خرد کردن شیشه (پودر شیشه) و استفاده از آن به عنوان یک ماده پوزولانی در بتن مطرح شود. البته رفتار دانه‌های بزرگ شیشه در واکنش قلیایی در آزمایشگاه را نمی‌توان با رفتار واقعی پودر شیشه در طبیعت یکسان دانست. این واکنش می‌تواند برای پایداری بتن بسیار خطرناک باشد. به این سبب باید پیش‌گیری مناسبی در جهت کم‌تر کردن اثر این واکنش انجام شود [۱۶].

عامری و همکاران خرده‌های شیشه را با نسبت‌های ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جایگزین قسمتی از دانه‌های لیکا نمودند. نتایج حاصله نشان داد بیشترین افزایش مقاومت، مربوط به ۵٪ خرده‌شیشه بوده است [۶۳]. همچنین دیگر اسرا و اچ آل تراساوی<sup>۵</sup> شیشه بازیافتی را با نسبت‌های (۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪) با دانه‌بندی ریز در بتن خود متراکم<sup>۶</sup>

1 Baxter and Meyer

2 Carpenter and Cramer

3 Pattengil

4 New York Energy Research Center

5 Esraa and H. Al-Tersawy

6 Self-Compacting Conceret (SCC)

7 Veena et al.

۲-۱-۲- سنگدانه‌ها

دانه‌بندی سنگدانه‌ها عامل تعیین‌کننده‌ای در مقدار کارایی مخلوط بتن است. کارایی به نوبه خود بر مقدار آب و سیمان لازم در مخلوط اثر می‌گذارد، جداسازی و آب انداختن بتن را کنترل می‌کند و بر نحوه بتن‌ریزی و پرداخت سطح بتن اثر دارد. بنابراین دانه-بندی سنگدانه در تعیین نسبت مواد تشکیل دهنده مخلوط بتن اهمیت بسیار زیادی دارد [۱۷]. در این تحقیق شن مصرفی از نوع شکسته بوده که از معادن شهرستان رامهرمز در استان خوزستان تهیه گردید و حداکثر اندازه اسمی شن مصرفی ۱۹/۵ (شن بادامی) و ۱۲/۵ میلی‌متر (شن نخودی) بوده است؛ آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق استاندارد ASTM C-127 برای مصالح سنگی درشت‌دانه انجام پذیرفت [۱۹]؛ وزن مخصوص اشباع با سطح خشک شن‌های بادامی و نخودی به ترتیب ۲/۶۵ و ۲/۶۲ و وزن مخصوص ظاهری ۱/۶۱ و ۱/۶۲ و گرم بر سانتی‌متر مکعب و هم‌چنین جذب آب آن‌ها نیز ۰/۱۸۵٪ و ۰/۹۵٪ تعیین گردید. ماسه مصرفی از نوع شسته محصول معادن کهنک شهرستان دزفول در استان خوزستان بود. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق استاندارد ASTM C-128 برای مصالح سنگی ریزدانه انجام گردید [۲۰]. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ماسه ۲/۶۴ و وزن مخصوص ظاهری ۱/۷۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب و هم‌چنین جذب آب آن نیز ۱/۳۶٪ به دست آمد. در نمودار شکل ۱ منحنی‌های دانه‌بندی شن ۳/۸" (۱۲/۵ میلی‌متر) و ماسه مصرفی ارائه گردیده است.

۲-۱-۳- خرده شیشه ضایعاتی

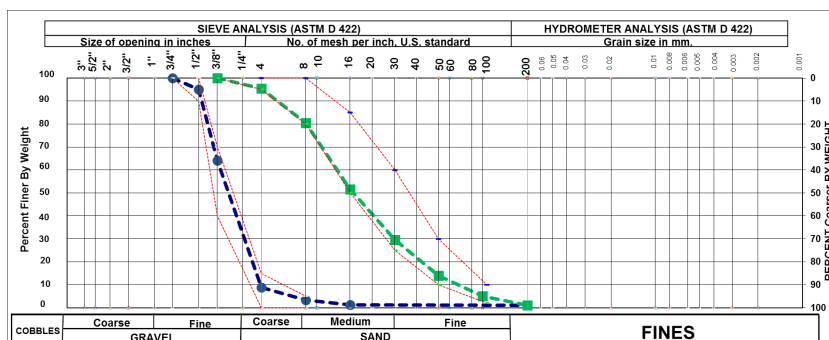
با توجه به اینکه شیشه ضایعاتی در کارخانه‌ی واقع در اشتهارد از استان البرز، در محدوده‌های مندرج در جدول ۲ به خرده شیشه غیرکروی تبدیل گردید، لذا در این تحقیق به مقدار مورد نیاز، خرده شیشه از اکثر محدوده‌های مذکور تهیه و سپس مخلوط نهایی ماسه شیشه‌ای بر اساس محدوده استاندارد دانه‌بندی ASTM C-33 تولید شد، که منحنی دانه‌بندی آن به همراه دانه‌بندی شن ۳/۴" (۹/۵ میلی‌متر) مصرفی در تحقیق در نمودار شکل ۳ ارائه گردیده است.

میکروسیلیس و پودر شیشه، سیمان معمولی مانع کارایی مناسب بتن می‌شود [۱۷]. سیمان مورد استفاده در این تحقیق به صورت یکجا از کارخانه سیمان کارون، با توده ویژه وزن مخصوص  $3/15 \text{ g/cm}^3$  و سطح ویژه (بلین)  $2922 \text{ cm}^2/\text{g}$  تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد و الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران و ASTM C-150 را دارا بود [۱۸]؛ ترکیبات شیمیایی این سیمان که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلورئوسانس اشعه ایکس می‌باشد در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲ مصرفی در تحقیق

Table 1. Table 1. Chemical composition of Portland cement type 2 consumed in research

عنصر	ppm	اکسید	%
Cl	۱۵۶	SiO <sub>2</sub>	۲۵/۵۳
As	۹	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۷۶
Ba	۵۲۱	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲/۷۲
Ce	۲۴	CaO	۵۶/۸۷
Co	۵	Na <sub>2</sub> O	۰/۳۴
Cr	۵۰	MgO	۴/۳۸
Ni	۵۰	K <sub>2</sub> O	۱/۲۷
Pb	۲۴۵	TiO <sub>2</sub>	۰/۱۳
Rb	۳۱	MnO	۰/۰۷
Sr	۶۲۸	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۰۸
V	۳۸	LOI	۰/۵۷
Y	۸	S	۳/۳۰



شکل ۱: منحنی‌های دانه‌بندی شن ۳/۸" (۱۲/۵ میلی‌متر) و ماسه مصرفی

Fig. 1. Grain size distribution of gravel 3/8" (12.5 mm) and used sand

1 X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

۲- ۱- ۴- پودر شیشه ضایعاتی

شیشه یک قلیایی غیر پایدار است که در محیط بتن می‌تواند باعث مشکلات ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی شود. این واکنش شیمیایی مابین ذرات سیلیس اشباع شیشه و قلیایی‌های مخلوط بتن به وجود می‌آید. در اثر واکنش مذکور، ژل مخصوصی در اطراف سنگدانه‌های حاوی سیلیس فعال از جمله شیشه تشکیل می‌گردد، که در برابر رطوبت کافی، از خود انبساط نشان داده و به شدت متورم شده و تغییر حجم می‌دهد؛ و باعث ایجاد ترک‌های بسیار ریز در ساختار بتن و در اطراف سنگدانه می‌گردد، که موجب کاهش چشم‌گیر مقاومت بتن می‌شود. مطالعات اخیر نشان داد که اگر شیشه زائد به اندازه کافی ریز گردد و تبدیل به پودر بسیار ریز شود، می‌تواند در مخلوط‌های سیمانی به دور از هرگونه نگرانی در مورد وقوع واکنش قلیایی-سیلیسی مورد استفاده قرار گیرد [۲۱]. با توجه به اینکه شیشه ضایعاتی در کارخانه‌ای واقع در اشتهارد استان البرز در محدوده‌های مندرج در جدول ۲ به ذرات شیشه غیرکروی تبدیل گردید، حداکثر به ابعاد کم‌تر از ۸۰ میکرون به صورت غیرکروی تولید شد که در واقع حاصل جمع‌آوری پرکننده، انباره‌های فیلترهای پشتیبان روند خرد کردن شیشه می‌باشد. غبار<sup>۱</sup> متراکم شده پودر شیشه میباشد، که در محفظه‌های عقب فیلترهای<sup>۲</sup> روند خرد کردن شیشه، انبار میشوند. از این رو پودر مذکور تهیه شد. پودر شیشه دارای وزن مخصوص  $2/96 \text{ g/cm}^3$  و سطح ویژه  $\text{cm}^2/\text{g}$  ۲۶۱۲ بود. ترکیبات شیمیایی این پودر شیشه که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس می‌باشد در جدول ۳ ارائه گردیده است.

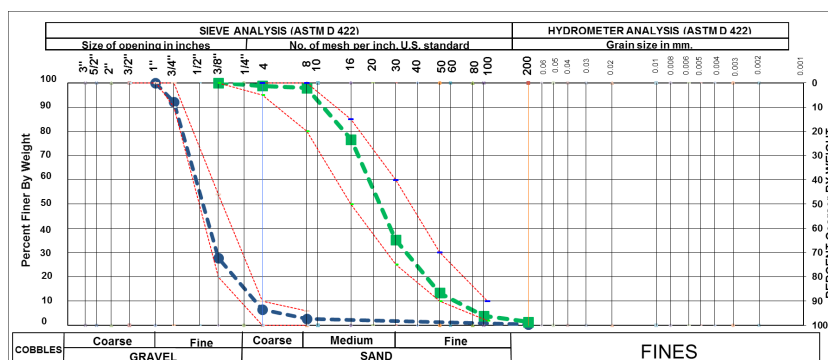
جدول ۲: محدوده خرده شیشه ضایعاتی تولیدی، مصرفی در تحقیق

Table 2. Glass jar waste used in research

ردیف	مشخصات ابعادی محصول (میکرون)
۱	کوچک‌تر از ۸۰
۲	۸۰-۱۵۰
۳	۱۵۰-۲۱۲
۴	۲۱۲-۳۰۰
۵	۳۰۰-۶۰۰
۶	۶۰۰-۱۲۰۰
۷	۱۲۰۰-۲۳۰۰
۸	۲۳۰۰-۳۳۰۰
۹	۳۰۰۰-۴۰۰۰
۱۰	۴۰۰۰-۵۰۰۰



شکل ۲: خرده شیشه مصرفی در تحقیق  
Fig. 2. Glass jar used in research



شکل ۳: منحنی‌های دانه‌بندی شن  $3/4''$  (۵/۱۹ میلی‌متر) و خرده شیشه ضایعاتی مصرفی

Fig. 3. Grading curves of gravel  $3/4''$  (19.5 mm) and waste glass jar used in research

- 1 Filler
- 2 Back Filters Bins (BFB)



و کاهش دهنده شدید آب می‌باشد، از یک شرکت داخلی تهیه گردید. این فوق‌روان‌کننده جهت تسریع در روند کسب مقاومت‌های اولیه و نهایی بتن، به‌واسطه کاهش قابل توجه میزان آب مصرفی در مخلوط بتن و نیز افزایش قابل توجه کارایی با خاصیت حفظ اسلامپ بتن، در محدوده زمانی معین بدون نیاز به آب موجود و همچنین جهت افزایش دوام بتن، مورد استفاده قرار گرفت. تولید این فوق‌روان‌کننده مطابق با استانداردهای ASTM C-494 و ۲۹۳۰ ایران می‌باشد. این فوق‌روان‌کننده براساس آیین‌نامه ASTM C-494 در رده G قرار می‌گیرد [۲۲]. مشخصات فنی این فوق‌روان‌کننده در جدول ۴ ارائه شده است. ضمناً آب این فوق‌روان‌کننده به عنوان بخشی از آب اختلاط در نظر گرفته شده است.

#### جدول ۴: مشخصات فوق‌روان‌کننده مصرفی در تحقیق

Table 4. Specifications of the super-plasticizer used in research

ظاهر	مایع قهوه‌ای رنگ
وزن مخصوص	۱/۱۸~ گرم بر سانتی‌متر مکعب دردمای ۲۲±۲ درجه سانتی‌گراد
میزان کلر	ندارد
میزان نیتريت	ندارد
نقطه انجماد	صفر درجه سانتی‌گراد

#### ۲-۱-۶- آب

آب مورد استفاده در ساخت طرح‌های اختلاط و عمل‌آوری نمونه‌ها، از آب آشامیدنی شهر اهواز بوده است.

#### ۲-۲- طرح‌های اختلاط

پس از ساخت طرح‌های اختلاط اولیه و نمونه‌های ۷ روزه بر اساس نبست‌های ارائه شده توسط استاندارد ACI 211.1-91<sup>۲</sup> به صورت وزنی، چندین طرح دیگر جهت رسیدن به وضعیت مطلوب از نظر بافت، پیوستگی، شکل ظاهری، اسلامپ و مقاومت فشاری ۷ روزه ساخته شدند و در نهایت جزئیات اختلاط طرح مرجع مشخص گردید [۲۳]. با مطالعه تحقیقات انجام پذیرفته قبلی، جایگزینی ماسه با خرده شیشه در نسبت‌های بالا، کاهش قابل ملاحظه خواص مکانیکی مورد انتظار را در پی داشت. لذا در این تحقیق پس از ساخت طرح مرجع، ماسه با خرده شیشه ضیاعی در نسبت‌های ۵٪، ۸٪ و ۱۲٪ جایگزین و ۳ طرح اختلاط تهیه گردید؛ مشاهده گردید جایگزینی ماسه با خرده شیشه در نسبت‌های پایین، باعث کاهش کارایی و خواص مکانیکی

#### جدول ۳: ترکیبات شیمیایی پودر شیشه مصرفی در تحقیق

Table 3. Chemical composition of glass powder used in research

عنصر	ppm	اکسید	%
Cl	۴۹۶	SiO <sub>2</sub>	۷۲/۰
S	۳۸۳	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۵۸
As	۹	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۷۶
Ba	۷۷	CaO	۷/۹۶
Cr	۶۶	Na <sub>2</sub> O	۱۱/۳۶
Cu	۱۷۶	MgO	۳/۲۷
Ni	۳۱	K <sub>2</sub> O	۰/۱۹
Pb	۱۵۸	TiO <sub>2</sub>	۰/۰۶
Rb	۱۹	MnO	۰/۰۲
Sr	۸۷	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۰۱
V	۱۹	LOI	۲/۹۷
Y	۱۱		
Zr	۱۳۸		
Zn	۲۲		
Mo	۳۳		



شکل ۴: پودر شیشه مصرفی در تحقیق

Fig. 4. Glass powder used in research

#### ۲-۱-۵- فوق‌روان‌کننده

یکی از عوامل مهم در ایجاد واکنش قلیایی-سیلیسی وجود رطوبت است، که استفاده از فوق‌روان‌کننده می‌تواند به کاهش نسبت آب به سیمان و در نهایت کاهش نفوذپذیری منجر شود [۱۷]. لذا فوق‌روان‌کننده‌ای با نام تجاری پنکريت -۴۳۳، که یک فوق‌روان‌کننده اصلاح شده از نسل سوم

2 American Concrete Institute (ACI)

1 Pancrete - 433

در ۳ طرح اختلاط دیگر خرده شیشه ضایعاتی در نسبت های ۵٪، ۸٪ و ۱۲٪ جایگزین ماسه گردید؛ پس از حصول نتایج، طرح ۸٪ خرده شیشه جایگزین ماسه، به عنوان طرح بهینه انتخاب شد؛ لذا در نهایت، در ۳ طرح اختلاط دیگر حاوی ۸٪ خرده شیشه جایگزین ماسه به صورت ثابت، پودر شیشه ضایعاتی با نسبت های ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ جایگزینی سیمان شد. روش نام گذاری طرح های اختلاط به این صورت است که SH، GP و GS به ترتیب بیانگر طرح های مرجع، حاوی پودر شیشه و خرده شیشه هستند و عدد پس حرف لاتین نام بیانگر درصد استفاده از این مصالح به عنوان جایگزین می باشد. به عنوان مثال GS5، به این معنا است که در این طرح اختلاط، ۵٪ از ماسه طرح اختلاط مرجع با خرده شیشه جایگزین شده، یا در طرح GP4، به این معنا بوده که در این طرح اختلاط، ۴٪ از سیمان طرح اختلاط مرجع با پودر شیشه جایگزین گردید. در طرح GS8GP12 به این است که در این طرح اختلاط به صورت همزمان ۱۲٪ از سیمان طرح اختلاط مرجع با پودر شیشه و ۸٪ از ماسه طرح اختلاط مرجع با خرده شیشه جایگزین شدند. در جدول ۵ جزئیات طرح های اختلاط نهایی تحقیق برای یک متر مکعب بتن ارائه گردیده اند.

بتن در حد کم و بعضاً بسیار کم خواهد شد؛ از این رو نسبت ۸٪ خرده شیشه به ماسه، به عنوان نسبت بهینه مشخص گردید. با توجه به نیاز به بهبود خواص مکانیکی بتن از یک سو و کاهش میزان مصرف سیمان از دیگر سو، ۳ طرح اختلاط با نسبت های جایگزینی پودر شیشه ضایعاتی با سیمان در درصدهای ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ تهیه شد؛ معلوم شد که جایگزینی سیمان با پودر شیشه در نسبت های پایین، باعث کاهش کارایی و افزایش قابل توجه خواص مکانیکی بتن می شود. پس از بررسی نتایج ۷ طرح مذکور و با توجه به رشد خواص مکانیکی در طرح های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان و به سبب بهبود خواص طرح های حاوی خرده شیشه جایگزین ماسه و کاهش فعالیت قلیایی- سیلیسی، و به منظور بررسی رفتار پودر شیشه در نسبت های مختلف بر روی طرح بهینه حاوی خرده شیشه، اقدام به تهیه طرح های اختلاط ترکیبی حاوی نسبت ثابت ۸٪ جایگزینی ماسه با خرده شیشه و جایگزینی سیمان با پودر شیشه در نسبت های ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ گردید. در این تحقیق پس از ساخت طرح مرجع، در ۳ طرح اختلاط پودر شیشه ضایعاتی با نسبت های ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ جایگزینی سیمان شد؛

#### جدول ۵: جزئیات طرح های اختلاط استفاده شده در تحقیق

Table. 5. Details of the mixing designs used in the research

نسبت آب به سیمان	خرده شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	پودر شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	شن ۳/۸" (kg/m <sup>3</sup> )	شن ۳/۴" (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	عیار سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	درصد خرده شیشه	درصد پودر شیشه	کد طرح
۰/۴۴	۰/۰	۰	۸۷۲/۹	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۴۲۲/۲	۰	۰	SH
۰/۴۴	۴۳/۶	۰	۸۷۲/۹	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۴۲۲/۲	۵	۰	GS5
۰/۴۴	۶۹/۸	۰	۸۷۲/۹	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۴۲۲/۲	۸	۰	GS8
۰/۴۴	۱۰۴/۷	۰	۸۷۲/۹	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۴۲۲/۲	۱۲	۰	GS12
۰/۴۴	۰	۱۶/۹	۸۷۲/۹	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۴۰۵/۳	۰	۴	GP4
۰/۴۴	۰	۳۳/۸	۸۷۲/۹	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۳۸۸/۴	۰	۸	GP8
۰/۴۴	۰	۵۰/۷	۸۷۲/۹	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۳۷۱/۶	۰	۱۲	GP12
۰/۴۴	۶۹/۸	۱۶/۹	۸۳۸/۰	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۴۰۵/۳	۸	۴	GS8GP4
۰/۴۴	۶۹/۸	۳۳/۸	۸۰۳/۱	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۳۸۸/۴	۸	۸	GS8GP8
۰/۴۴	۶۹/۸	۵۵/۷	۷۶۸/۲	۴۳۸/۶	۴۳۸/۱	۱۸۵	۵/۶	۳۷۱/۶	۸	۱۲	GS8GP12



شکل ۵: روند ساخت، نمونه‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌ها

Fig. 5. Manufacturing, sampling, and curing processes of specimens

### ۳- آزمایش‌ها

#### ۳-۱- آزمایش‌های بتن تازه

#### ۳-۱-۱- آزمایش اسلامپ بتن

برای سنجش روانی بتن‌های تازه از آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C-143/C-143M-07 استفاده شد. این آزمایش برای اندازه‌گیری لزجت مخلوط در حالت تازه به کار می‌رود. این آزمایش در آمریکا توسعه یافته است و به دلیل سادگی به‌میزان وسیع در کارگاه‌های ساختمانی تمام دنیا به کار برده می‌شود. آزمایش اسلامپ کارایی بتن را نمی‌سنجد ولی می‌توان آن را به صورت سنجشی از روانی بتن توصیف کرد و برای پی‌بردن به تغییرات در یکنواختی مخلوط بتن با نسبت‌های اسمی معین، بسیار مفید است. در این آزمایش، یک قالب به شکل مخروط ناقص به ارتفاع ۳۰، قطر ۱۰ در بالا و قطر ۲۰ سانتی‌متر در پایین، با بتن در سه لایه که هر لایه از طریق ۲۵ ضربه با میله مخصوص، به صورت مارپیچ (از سمت کناره‌ها به طرف مرکز

### ۲-۳- ساخت بتن، نمونه‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌ها

سعی گردید تمام موارد ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آزمایشگاه بر اساس استاندارد ASTM C-192/C-192M-07 انجام گردد؛ قبل از ریختن مصالح به درون مخلوط‌کن، ابتدا جداره آن کمی مرطوب شد تا رطوبت سنگدانه‌ها تغییر نکند. جهت آماده کردن مخلوط، ابتدا ماسه به همراه سیمان و پودر شیشه در مخلوط‌کن ریخته شده و به مدت ۲ دقیقه با هم مخلوط شدند. سپس نصف آب مصرفی و فوق‌روان‌کننده به آن اضافه و عملیات اختلاط به مدت ۲ دقیقه دیگر ادامه یافت. در مرحله بعد مصالح درشت‌دانه و خرده شیشه به درون مخلوط‌کن ریخته شدند و آب باقی‌مانده به آرامی اضافه شد و نهایتاً به مدت ۶ دقیقه دیگر اختلاط ادامه پیدا کرد. پس از آماده شدن مخلوط‌ها، اقدام به نمونه‌گیری از بتن مطابق استاندارد ASTM C-172 برای انجام آزمایش‌های مربوطه شد. در این راستا ابتدا سطوح داخلی قالب‌ها به وسیله روغن مخصوص به اندازه کافی چرب شدند تا پس از سخت شدن بتن، نمونه‌ها به راحتی از قالب جدا گردند. سپس بتن در قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای در سه لایه ریخته شد و هر لایه توسط کوبه مخصوص به تعداد ۲۵ ضربه کوبیده شد و پس از کوبش هر لایه، قالب‌ها به مدت چند ثانیه بر روی میز ویبره قرار داده شدند. بعد از ریختن لایه سوم، سطح نمونه‌ها با استفاده از خط‌کش صاف و سپس در زیر یک پوشش مرطوب در شرایط ۹۰٪ رطوبت، به مدت  $24 \pm 2$  ساعت قرار داده شدند و پس از گذشت زمان مذکور نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان آزمایش به حوضچه عمل‌آوری با دمای ثابت حدود ۲۳ درجه سانتی‌گراد منتقل گردیدند. برای یکسان‌سازی شرایط عمل‌آوری، نمونه‌ها در کوتاه‌ترین بازه زمانی ممکن ساخته شدند. در خصوص عمل‌آوری نمونه‌ها شرایط استاندارد ASTM C-511 رعایت شد. در جدول ۶ مشخصات ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی ارائه گردیده است.

### جدول ۶: مشخصات ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی

Table. 6. Specification of construction and curing of concrete samples

آزمایش	تعداد طرح	نوع نمونه	سن نمونه	تعداد نمونه	شرایط عمل‌آوری
مقاومت فشاری	۱۰	مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵	۷	۳	غرقاب
			۲۸	۳	غرقاب
			۵۶	۳	غرقاب
ضریب ارتجاعی استاتیکی	۱۰	استوانه ۳۰×۱۵	۲۸	۳	غرقاب
			۹۱	۳	غرقاب
مقاومت کششی	۱۰	استوانه ۳۰×۱۵	۲۸	۳	غرقاب
			۹۱	۳	غرقاب
وزن مخصوص	۱۰	مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵	۹۱	۲	غرقاب



جک هیدرولیکی بتن شکن، با سرعت بارگذاری ۰/۹۴ کیلو نیوتن بر ثانیه، براساس استاندارد ASTM C-496، بر روی نمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک انجام پذیرفت [۲۵]؛ هر طرح دارای ۳ نمونه بود که نتایج

$$T=(2 P)/\pi LD \quad (1)$$

نهایی، میانگین سه مقدار حاصله می‌باشند؛ مقدار مقاومت کششی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

در رابطه ۱، T بیانگر مقاومت کششی به روش دو نیم‌شدن بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، P حداکثر بار اعمال شده بر حسب کیلوگرم، L طول نمونه بر حسب سانتی‌متر و D نیز قطر نمونه بر حسب سانتی‌متر می‌باشند.

### ۳-۲-۳- آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن

یاد آوری: ضریب یانگ و روش‌های محاسبه آن برای محاسبه ضریب تنش- کرنش در منحنی‌های غیرخطی، دو روش عمومی وجود دارد:

الف: ضریب تانژانتی (مماسی)، که بر اساس شیب مماس در هر نقطه بر منحنی است؛ معمولاً به مماس بخش اول منحنی، ضریب تانژانتی اولیه گفته می‌شود.

ب: ضریب سکانتی، که بر اساس شیب خط بین دو نقطه است؛ که معمولاً دو نقطه در محدوده تنش سرویس قرار دارند.

با توجه به تعریف ضریب سکانتی، در واقع رابطه ۲ شیب خط بین دو نقطه متناظر با تنش‌های  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  که ضریب ارتجاعی بتن و یا همان ضریب سکانتی منحنی تنش- کرنش می‌باشد را محاسبه می‌کند.

$$E=(\sigma_2-\sigma_1)/(\varepsilon_2-0.00005) \quad (2)$$

مخروط) متراکم می‌شود، پر می‌گردد. سپس قالب به آهستگی برداشته می‌شود. مخروط بتنی بدون حایل، بر اثر وزن خود نشست پیدا می‌کند. مقدار این نشست، موسوم به اسلامپ بتن است [۲۴].

### ۳-۱-۲- آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

پس از آماده‌شدن مخلوط‌های بتنی، اقدام به نمونه‌گیری از آن‌ها مطابق استاندارد ASTM C-172 جهت تعیین وزن مخصوص بتن تازه بر اساس استاندارد ۳۲۰۳-۶ "موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران سازمان ملی استاندارد ایران" و منطبق بر استاندارد ASTM C-138 گردید.

### ۳-۲-۲- آزمایش‌های بتن سخت‌شده

#### ۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری بتن

نمونه‌های مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متری پس از عمل‌آوری در آب، به مدت ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز مطابق استاندارد ASTM C-511، از حوضچه خارج شدند و آزمایش تعیین مقاومت فشاری، با جک هیدرولیکی بتن شکن، با سرعت بارگذاری ۱۳۵۰ کیلوگرم بر ثانیه، براساس استاندارد BS-188، بر روی نمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک انجام پذیرفت؛ هر طرح اختلاط در هر سن دارای ۳ نمونه بود، که نتایج نهایی در صورت عدم تجاوز از انحراف معیار ۱/۴ مگاپاسکال بر اساس استاندارد ASTM C-192/C-192M-07، میانگین این ۳ مقدار مقاومت فشاری بود، در غیر این صورت داده مورد نظر حذف و میانگین دو مقاومت فشاری باقی‌مانده لحاظ شد.

#### ۳-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی بتن به روش دو نیم‌شدن

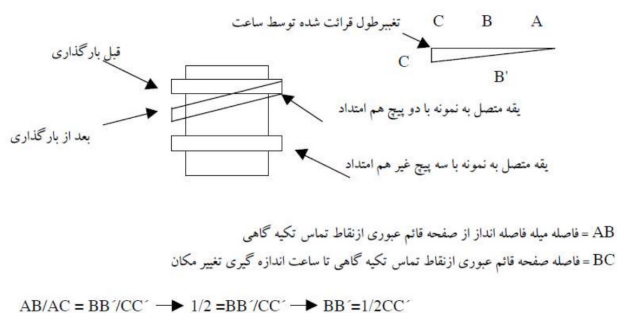
نمونه‌های استوانه‌ای به قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب مطابق استاندارد ASTM C-511 از حوضچه خارج شدند و آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن، با استفاده از



شکل ۶: روند انجام آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش دونیم شدن

Fig. 6. Test procedure to determine the split cylinder test

جای گذاری شد. سپس رینگ به سمت بالا آورده شد و کاملاً در قسمت میانی نمونه قرار گرفت و پیچ های قیدهای فوقانی و تحتانی کاملاً به نمونه بسته شدند (تذکر: پیچ های هم محور قید فوقانی به نمونه محکم بسته شدند). سپس نمونه به همراه دستگاه ضریب ارتجاعی زیر جک بتن شکن قرار گرفت. در آن هنگام تمامی میله های فاصله نگهدار، که فاصله دو قید را از هم کنترل می کنند (همان طول اولیه که ۲۰۰ میلی متر است)، باز شده و میله فاصله انداز در جای خود باقی ماند. برای رفع اثرات خزش جابه جایی های اولیه، چندین بار (دو تا سه مرتبه) بارگذاری و باربرداری انجام شد، سپس بارگذاری اصلی آغاز گردید.



شکل ۷: نحوه اندازه گیری کرنش برای تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی

Fig. 7. Strain measurement method to determine static modulus of elasticity



شکل ۸: روند انجام آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی

Fig. 8. Test procedure for determination of static modulus of elasticity of samples

۳-۲-۴- آزمایش وزن مخصوص بتن سخت شده پس از عمل آوری نمونه در آب به مدت ۹۱ روز، آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سخت شده بر اساس استاندارد ۷۵۱۶ "موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران سازمان ملی استاندارد ایران" و استاندارد EN 12390-7، جهت تعیین وزن مخصوص بتن سخت شده انجام گردید. هر

روش بیان شده در فوق تحت عنوان "روش دو پیچه" شناخته شده است. در این روش بعد از آن که نمونه داخل قید قرار گرفت، برای رفع اثرات خزش جابه جاییهای اولیه، چندین بار، بارگذاری و باربرداری انجام می شود، سپس بارگذاری اصلی آغاز می گردد و در حین افزایش میزان بار، بار اعمالی و کرنش طولی در دو حالت زیر قرائت می شوند:

الف - وقتی تغییر طول نسبی  $\epsilon_1 = 0.00005$  باشد.

ب - هنگامی که بار وارده ۴۱٪ بار نهایی است.

تنش از نسبت بار نهایی به سطح مقطع و کرنش از نسبت مقدار تغییر شکل بر طول مؤثر نمونه آزمایش به دست می آید.

در رابطه ۲، E ضریب ارتجاعی،  $\sigma_2$  تنش متناظر با  $\epsilon_1 = 0.00005$  و  $\epsilon_2$  کرنش متناظر با تنش  $\sigma_2$  می باشند.

در خصوص این آزمایش از دستگاه منطبق با استاندارد ASTM C-469 استفاده شد؛ این دستگاه دارای دو قید<sup>۱</sup> با فاصله ۲۰۰ میلی متر می باشد، که نمونه بتنی در داخل آن ها جا می گیرد. قید پایینی به وسیله سه عدد پیچ غیر هم امتداد، که دارای زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر می باشند و قید بالایی به وسیله دو عدد پیچ هم امتداد بر روی نمونه بسته می شوند. این دو قید به وسیله یک فنر و میله فاصله انداز<sup>۲</sup> که به قیدهای پایین و بالایی به صورت مفصلی متصل است، به هم مرتبط می باشند و موجب نگهداری قیدها از یک طرف، در یک فاصله معین از یکدیگر می شوند. یک ساعت اندازه گیری تغییر مکان روبروی این میله فاصله انداز به قید بالایی وصل است که وظیفه آن، اندازه گیری مقدار تغییر مکان دو قید، نسبت به یکدیگر با دقت ۰/۰۰۲ میلی متر است. با توجه به این که قید بالا حول دو عدد پیچ اتصالی به نمونه قابلیت چرخش دارد، بنابراین در هنگام بارگذاری، اگر فاصله ساعت و میله فاصله انداز، از صفحه قائم عبوری از نقاط تماس تکیه گاهی دو عدد پیچ قید بالا که هم امتداد هستند، برابر باشند، تغییر طول نمونه در محدوده دو قید، برابر با نصف تغییر طولی که توسط ساعت قرائت می شود، می باشد [۲۶]؛ نحوه اندازه گیری کرنش برای تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی در نمودار شکل ۷ توضیح داده شده است.

نمونه های استوانه ای به قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵ و ۳۰ سانتی متری پس از عمل آوری در آب به مدت ۲۸ و ۹۱ روز، مطابق استاندارد ASTM C-511 از حوضچه خارج شدند، پس از کلاهک گذاری<sup>۳</sup> مطابق استاندارد ASTM C-617 ابتدا جک بتن شکن با سرعت بارگذاری  $2/5 \pm 0/3$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع در ثانیه تنظیم گردید و مقادیر سطح مقطع نمونه، واحدهای مربوط به تنش، نیرو و سطح مقطع برای جک بتن شکن آزمایش تعریف شدند. قبل از بارگذاری قیدهای ضریب ارتجاعی که به صورت کامل به همراه ساعت اندازه گیری متصل و با دو میله فاصله نگهدار و یک میله فاصله انداز بود، در کنار جک قرار گرفت و نمونه در داخل رینگ

- 1 Yoke
- 2 Pivot Rod
- 3 Capping

خالی سنگدانه ها، توسط ذرات پودر شیشه و آزاد شدن این ذرات در بین سنگدانه ها در نسبت های بیش تر جایگزینی، که رفتار آن ها متفاوت با رفتار سیمان، به جهت جذب آب و کاهش اسلامپ می باشد و با افزوده شدن مجدد آن مقدار جایگزینی در طرح GP12، این رفتار بیش تر نمایان می شود. که پس از اینکه فضای خالی سنگدانه ها، توسط ذرات ریزتر پودر شیشه پر گردید، ذرات درشت تر پودر شیشه (ولی در محدوده کوچکتر از ۸۰ میکرون) در بین سنگدانه ها به واسطه افزایش نسبت جایگزینی، بیشتر شدند، لیکن به علت اندازه درشت تر آنها نسبت به سیمان، رفتار آن ها متفاوت با سیمان، به جهت جذب آب و کاهش اسلامپ می باشد، که با افزوده شدن مجدد آن مقدار جایگزینی در طرح GP12، این رفتار بیش تر نمایان می شود. این رفتار نشان دهنده این مطلب می باشد که بخش عمده ذرات پودر به سمت حد بالای محدوده، یعنی ۸۰ میکرون میل میکنند.

#### ۴-۱-۳- اسلامپ طرح های ترکیبی

در طرح های اختلاط حاوی خرده شیشه و پودر شیشه به صورت همزمان، افت شدید اسلامپ در محدوده ۲۴٪ تا ۳۲٪ ملاحظه گردید، که از طرح های اختلاط جایگزینی قبلی پودر شیشه و خرده شیشه به صورت جداگانه قابل تصور بود. لیکن افت اسلامپ طرح اختلاط حاوی ۸٪ خرده شیشه، به علاوه افت اسلامپ طرح های اختلاط حاوی ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ پودر شیشه، به مقدار ۱/۹٪ تا ۳/۱٪ نسبت به میزان افت اسلامپ طرح های ترکیبی کم تر می باشد، که نشان دهنده نقش مضاعف خرده شیشه در کاهش اسلامپ، در صورت افزوده شدن به طرح های اختلاط حاوی پودر شیشه، به ویژه طرح های حاوی مقدار کمتری پودر شیشه خواهد بود.

طرح دارای دو نمونه بود که نتایج نهایی، حاصل میانگین آن ها می باشند؛ در این راستا نمونه پس از خروج از حوضچه عمل آوری، به صورت اشباع با سطح خشک وزن گردید. به صورت اشباع با سطح خشک، درون مخزن ارشمیدس قرار گرفته و وزن آن با دقت ۱ گرم ثبت گردید، سپس نمونه در گرمخانه با دمای  $10.5 \pm 0.5$  درجه سانتی گراد خشک شد. این عمل تا زمانی که کاهش وزن در نمونه مشاهده نشد ادامه پیدا نمود، به این صورت که نمونه هر ۲۴ ساعت یک بار توزین شد تا جایی که اختلاف دو اندازه گیری متوالی به کم تر از ۰/۲٪ وزن نمونه خشک رسید، نهایتاً وزن نمونه ثبت شد.

#### ۴- نتایج تجزیه و تحلیل نتایج

##### ۴-۱- اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه

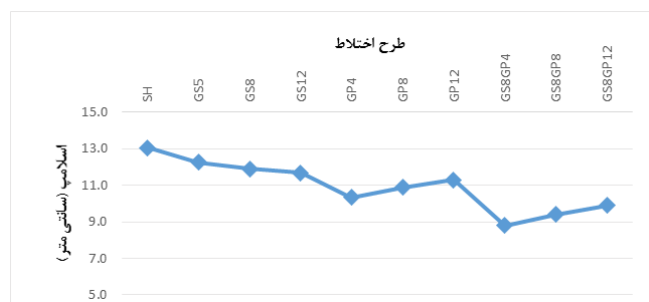
نتایج به دست آمده در خصوص اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه طرح های اختلاط ساخته شده، در جدول ۷ ارائه گردیده است. هم-چنین نتایج اسلامپ طرح های اختلاط ساخته شده، در نمودار شکل ۸ نمایش داده شده است. نسبت اسلامپ طرح های اختلاط به طرح اختلاط مرجع در نمودار ۵ نمایش داده شده است.

##### ۴-۱-۱- اسلامپ طرح های حاوی خرده شیشه جایگزین ماسه

جدول ۷ بیانگر کاهش مقدار اسلامپ در تمام نسبت های جایگزینی نسبت به طرح اختلاط مرجع می باشد. مشاهده می شود که به تناسب تقریباً خطی، با افزایش نسبت جایگزینی خرده شیشه با ماسه، اسلامپ در محدوده ای بین ۶ تا ۱۰ درصد دچار کاهش شد، که می توان آن را به دلیل شکستگی بالاتر خرده شیشه و افزایش جذب آب بیش تر، توسط فیلرهای خرده شیشه دانست.

##### ۴-۱-۲- اسلامپ طرح های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان

از نمودار شکل ۸ مشخص است که افزودن پودر شیشه در تمامی طرح ها موجب کاهش اسلامپ نسبت به طرح مرجع می شود، لیکن با افزایش مقدار پودر شیشه میزان اسلامپ طرح های حاوی پودر شیشه افزایش پیدا می کند. از طرفی با توجه به نمودار شکل ۹ مصرف پودر شیشه به میزان ۴٪ سیمان، باعث کاهش نزدیک به ۲۵٪ اسلامپ، نسبت به طرح اختلاط مرجع می شود که با دو برابر کردن نسبت جایگزینی، یعنی به میزان ۸٪، این کاهش تقلیل می باید و نزدیک به ۱۶/۵٪ می رسد. افزایش بیش تر نسبت جایگزینی، این آهنگ کاهش را ملایم تر نموده و موجب کاهش ۱۳٪ اسلامپ طرح GP12 نسبت به طرح مرجع می شود افزایش نسبت جایگزینی، این کاهش تقلیل می باید و موجب کاهش ۱۳٪ اسلامپ طرح GP12 نسبت به طرح مرجع می شود. میزان افت اولیه اسلامپ در طرح GP4 را می توان، به پر کردن خلل و فرج سنگدانه ها و جذب آب سطحی، توسط ذرات ریزتر پودر شیشه نسبت داد. افزایش اسلامپ با افزایش نسبت جایگزینی پودر شیشه را چنین متصور شد، که پس از اینکه پر کردن فضای



شکل ۹: تغییرات اسلامپ در طرح های اختلاط تحقیق

Fig. 9. Slump changes in research mix designs

جدول ۷: نتایج اسلامپ و وزن مخصوص در طرح‌های اختلاط بتن تازه

Table 7. Results of slump and specific gravity in fresh concrete mixing designs

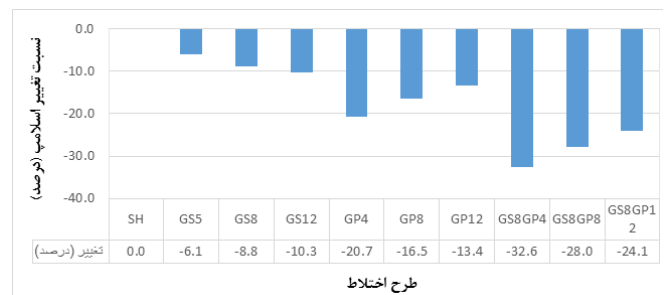
GS8GP12	GS8GP8	GS8GP4	GP12	GP8	GP4	GP12	GP8	GP4	SH	کد طرح
۹/۹	۹/۴	۸/۸	۱۱/۳	۱۰/۹	۱۰/۴	۱۱/۳	۱۰/۹	۱۰/۴	۱۳/۱	اسلامپ (cm)
۲۳۷۳	۲۴۰۸	۲۴۰۰	۲۳۹۳	۲۴۲۶	۲۴۱۵	۲۳۹۳	۲۴۲۶	۲۴۱۵	۲۳۸۷	وزن مخصوص بتن تازه (kg/m <sup>۳</sup> )

۴-۲-۲- مقاومت فشاری طرح‌های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان

با توجه به نمودار شکل ۱۱، در طرح‌های GP4 و GP8 افزایش نسبت جایگزینی پودر شیشه با سیمان، موجب رشد مقاومت فشاری نمونه‌های طرح‌های اختلاط، به میزان ۷ تا ۱۱ درصد در سن ۷ روزه گردید. روند رشد مقاومت فشاری در طرح‌های GP4 و GP8 از سن ۷ تا ۲۸ روزه دو برابر شده، مقاومت فشاری کسب‌شده در طرح‌های GP4 و GP8 از سن ۷ تا ۲۸ روزه تقریباً دو برابر مقاومت فشاری کسب‌شده طرح مرجع در همین بازه سنی می‌باشد، لیکن در سنین ۵۶ و ۹۱ روزه این روند رشد مقدار کسب مقاومت فشاری کاهش یافت، که گویای این موضوع می‌باشد که استفاده از پودر شیشه به میزان صفر تا ۸ درصد، بیش‌ترین تأثیر خود را در مقاومت ۲۸ روزه نشان خواهد داد. از سوی دیگر افزایش نسبت جایگزینی پودر شیشه با سیمان، بیش از ۸٪ در طرح GP12، مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به طرح مرجع، نه تنها رشد نداشته، بلکه کاهش جزئی در حدود ۲ تا ۴ درصدی در سنین ۷، ۵۶ و ۹۱ روزه را نیز تجربه نموده است. نمونه‌های ۲۸ روزه گویای روندی متفاوت از مابقی نمونه‌های سنین دیگر می‌باشند و رشد ۲٪ جزئی را نشان می‌دهند، که تصدیق بر مطلب گفته شده قبلی، در خصوص بیش‌ترین تأثیر پودر شیشه در سن ۲۸ روزه می‌باشد. علت افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه را میتوان شروع فعالیت‌های پوزولانی شیشه، به سبب تأثیرپذیری شیمیایی از روند هیدراسیون دانست؛ لیکن امکان ارتباط کاهش مقاومت فشاری با گسترش فعالیت‌های قلیایی-سیلیسی ذرات بزرگتر پودر شیشه در نسبت‌های بالاتر قوت می‌یابد.

۴-۲-۳- مقاومت فشاری طرح‌های ترکیبی

از نمودار شکل ۱۱، چنین استنباط می‌شود که در طرح‌های اختلاط ترکیبی حاوی پودر شیشه و خرده شیشه به صورت همزمان نسبت به طرح GS8، کاهش مقاومت فشاری نه تنها برطرف شده، بلکه گویای رشد مقاومت فشاری هر چند به میزان ناچیز در تمامی سنین به میزان ۰/۵ تا ۳/۵ درصد، به ویژه در سن ۲۸ روزه در طرح GS8GP4 می‌باشد. همچنین طرح GS8GP8، رشد مقاومت فشاری قابل ملاحظه‌ای در اکثر سنین، از ۴ تا ۱۲/۵ درصد را نشان می‌دهد. لیکن در این مورد رشد نمونه‌های ۵۶



شکل ۱۰: نسبت اسلامپ طرح‌های اختلاط به طرح مرجع

Fig. 10. Mix designs to reference mix slump ratio

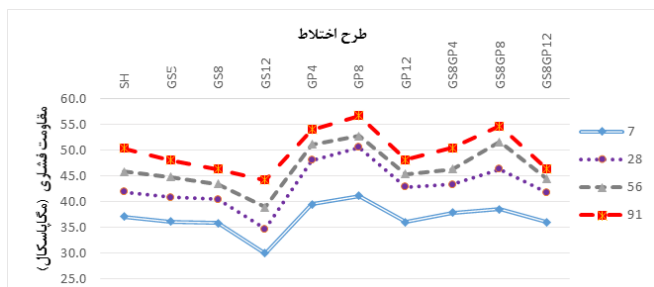
۴-۲- مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سخت‌شده

جدول ۸ نشان دهنده نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه و همچنین وزن مخصوص سخت‌شده می‌باشد. مقدار نتایج مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط به صورت نمودار شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همچنین نسبت نتایج مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط به طرح اختلاط مرجع در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است.

۴-۲-۱- مقاومت فشاری طرح‌های حاوی خرده شیشه جایگزین ماسه

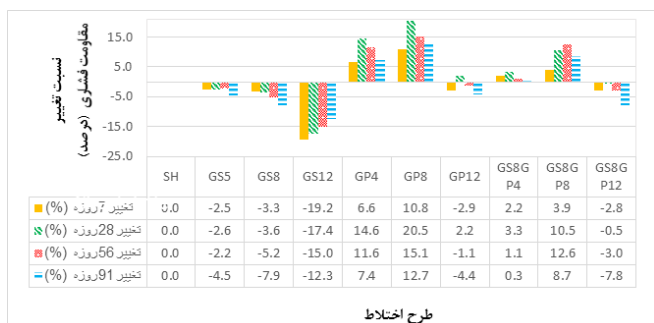
کاملاً واضح است که افزایش میزان جایگزینی خرده شیشه به جای ماسه، موجب کاهش مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های طرح‌های اختلاط می‌شود، لیکن با توجه به نمودار شکل ۱۱، این میزان کاهش در طرح‌های اختلاط با جایگزینی کم‌تر، مانند GS5 و GS8 بسیار کم و در حدود ۲ تا ۸ درصد بوده، از طرفی با افزایش نسبت جایگزینی بیش از ۸٪ در طرح GS12، به یکباره مقاومت فشاری دچار افت ۱۹٪ در سن ۷ روزه شد؛ لیکن روند کاهش مقاومت در طول زمان، کم‌تر شده به ۱۲٪ در سن ۹۰ روزه می‌رسد، که علت احتمالی آن را می‌توان شروع فعالیت‌های بیش‌تر فیلرهای بسیار ریز خرده‌شیشه در روند هیدراسیون، عنوان نمود، که در نسبت‌های بیش‌تر در سنین بالا، پس از تأثیرپذیری شیمیایی در این مدت از هیدراسیون، عنوان نمود نمایان‌تر خواهد شد.





شکل ۱۱: تغییرات مقاومت فشاری با سن نمونه‌ها در طرح‌های اختلاط تحقیق

Fig. 11. Compressive strength variations with age of samples in research mix designs



شکل ۱۲: نسبت مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط به طرح مرجع

Fig. 12. The compressive strength ratio of the mixing designs to the reference mix

۴-۲-۴- روند تغییرات مقاومت فشاری با زمان چهار دسته روابط خطی، نمایی، چندجمله‌ای و توانی به همراه ضریب همبستگی به منظور ارائه نتایج روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های هر طرح اختلاط نسبت به سن نمونه‌ها در جدول ۹ ارائه گردیده است؛ با توجه به بیشترین مقدار ضریب همبستگی، نوع رابطه مشخص و منحنی مربوطه در نمودار شکل ۱۲ ارائه گردید. روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های طرح‌های اختلاط نسبت به سن نمونه‌ها در نمودار شکل ۱۲ ارائه گردیده است.

۴-۲-۴-۱- روند تغییرات مقاومت فشاری با زمان طرح‌های حاوی خرده شیشه جایگزین ماسه

همان‌گونه که در نمودار شکل ۱۲ مشخص است، افزایش نسبت جایگزینی خرده شیشه با ماسه روند افزایش مقاومت نمونه‌ها نسبت به زمان را به صورت کلی کاهش می‌دهد، و این روند کاهش خود را بعد از سن ۲۸ روزه بیش‌تر نشان خواهد داد.

روزه با اختلاف اندک، کم‌تر از ۲٪ از سن ۲۸ روزه و اختلاف بیش‌تر در سایر سنین، پیشی گرفته است. طرح VGS8GP12، کاهش ۰/۵٪ در سن ۲۸ روزه، تا نزدیک ۸٪ در سن ۹۱ روزه مقاومت در تمامی سنین را نشان می‌دهد، لیکن گویای به حداقل رسانیدن کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه با سنین کمتر طرح GS8 می‌باشد؛ از طرفی در سایر سنین از لحاظ تعدیل کاهش مقاومت فشاری، چندان موفق نبوده که نشان دهنده این موضوع می‌باشد که در طرح‌های اختلاط ترکیبی، استفاده از پودر شیشه در مقادیر بالاتر از ۸٪، کمک چندانی در جهت رفع مشکل کاهش مقاومت فشاری به وجود آمده، به سبب استفاده از خرده شیشه نخواهد کرد و در این طرح اختلاط، ضعف خرده شیشه از لحاظ مقاومت فشاری در مقایسه با ماسه، نسبت به دیگر پارامترها، تاثیرگذاری بیش‌تری داشته است. می‌توان این‌گونه عنوان نمود که استفاده از پودر شیشه به میزان ۴٪ در طرح اختلاط حاوی ۸٪ خرده شیشه، باعث بهبود قابل توجه مقاومت فشاری نسبت به طرح GS8 و رشد اندک مقاومت فشاری نسبت به طرح اختلاط مرجع می‌شود؛ جایگزینی ۸٪ پودر شیشه در طرح GS8GP8 رشد چشم‌گیر مقاومت فشاری نسبت به طرح GS8 و هم‌چنین رشد قابل ملاحظه مقاومت فشاری نسبت به طرح اختلاط مرجع را موجب می‌شود.

جدول ۸: نتایج آزمایش مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌های بتنی سخت‌شده

Table. 8. Compressive strength and specific gravity of samples in different designs of research

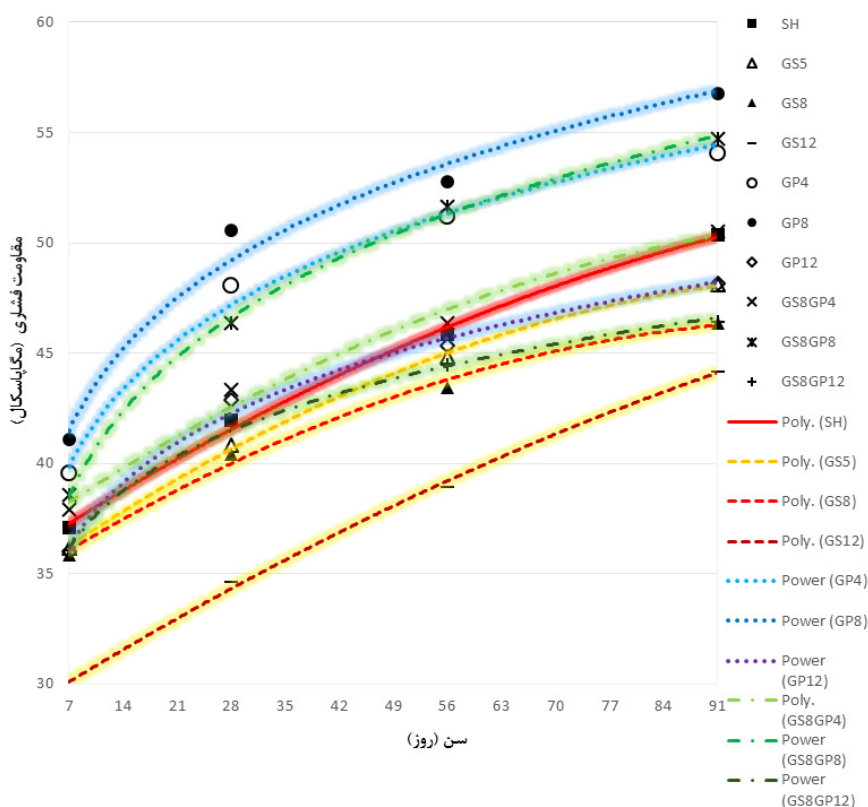
کد طرح	مقاومت فشاری (MPa)				
	وزن مخصوص بتن سخت شده (kg/m <sup>3</sup> )	سن نمونه (روز)			
		۹۱	۵۶	۲۸	۷
SH	۲۳۵۹	۵۰/۴	۴۵/۹	۴۲/۰	۳۷/۱
GS5	۲۳۵۰	۴۸/۱	۴۴/۹	۴۰/۹	۳۶/۲
GS8	۲۳۴۲	۴۶/۴	۴۳/۵	۴۰/۴	۳۵/۹
GS12	۲۳۳۳	۴۴/۲	۳۹/۰	۳۴/۷	۳۰/۰
GP4	۲۳۸۸	۵۴/۱	۵۱/۲	۴۸/۱	۳۹/۶
GP8	۲۳۹۸	۵۶/۸	۵۲/۸	۵۰/۶	۴۱/۱
GP12	۲۳۶۵	۴۸/۲	۴۵/۴	۴۲/۹	۳۶/۰
GS8GP4	۲۳۷۲	۵۰/۵	۴۶/۴	۳۴/۴	۳۷/۹
GS8GP8	۲۳۷۹	۵۴/۷	۵۱/۶	۴۶/۴	۳۸/۶
GS8GP12	۲۳۴۴	۴۶/۴	۴۴/۵	۴۱/۸	۳۶/۱



۲-۴-۲-۴- روند تغییرات مقاومت فشاری با زمان طرح‌های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان

روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های طرح‌های اختلاط نسبت به سن نمونه‌ها در نمودار شکل ۱۲ ارائه گردیده است. از مقایسه، روند افزایش مقاومت فشاری بر اساس سن نمونه‌ها در طرح‌های حاوی پودر شیشه با طرح اختلاط مرجع کاملاً مشخص است. افزایش پودر شیشه، باعث رشد روند افزایش مقاومت نمونه‌ها، در محدوده سنی ۷ تا ۲۸ روزه می‌شود و شیب منحنی در این بازه، نسبت به دیگر بازه‌ها بیشتر است، لیکن بعد از ۲۸ روز، روند افزایش مقاومت طرح‌های اختلاط حاوی پودر شیشه، ملایم شده به نحوی که این روند رشد، کم‌تر از روند رشد طرح اختلاط مرجع تا سن ۹۱ روزه می‌شود.

۳-۴-۲-۴- روند تغییرات مقاومت فشاری با زمان در طرح‌های ترکیبی همان‌گونه که انتظار می‌رفت، روند افزایش مقاومت فشاری در محدود ۷ تا ۲۸ روزه نمونه‌های طرح‌های اختلاط ترکیبی حاوی پودر شیشه و خرده شیشه به صورت هم‌زمان نسبت به نمونه مرجع بیشتر بوده، لیکن خرده شیشه مقدار شیب منحنی‌های طرح‌های اختلاط ترکیبی را نسبت به طرح‌های اختلاط حاوی فقط پودر شیشه، کم‌تر نموده است. از نمودار شکل ۱۲ می‌توان به اختلاف منحنی طرح ترکیبی GS8GP8، با سایر طرح‌های اختلاط ترکیبی و طرح اختلاط مرجع در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه اشاره کرد، که با افزایش سن نمونه‌ها، این اختلاف بیش‌تر نیز شده است.



شکل ۱۳: رشد مقاومت فشاری با سن نمونه‌ها در طرح‌های مختلف تحقیق

Fig. 13. Growth of compressive strength with sample age in different research designs

جدول ۹: روابط و ضرایب رگراسیون رشد مقاومت فشاری با سن نمونه ها در طرح های مختلف تحقیق

Table. 9. Slump changes in research mix designs

کد طرح	ضریب همبستگی			
	توانی	نمایی	نمایی	چند جمله‌ای
SH	۰/۹۸۱۹	۰/۹۶۷۵	۰/۹۹۶۶	۰/۹۷۱۲
	$y = 0.1537x + 36/826$	$y = 37/0.99e^{-0.25x}$	$y = -0.0008x^2 + 0.2301x + 35/706$	$y = 29/2718x^{-1.15}$
GS5	۰/۹۶۳۵	۰/۹۴۶۵	۰/۹۹۹	۰/۹۸۴۶
	$y = 0.1392x + 36/16$	$y = 36/358e^{-0.23x}$	$y = -0.011x^2 + 0.2476x + 34/571$	$y = 28/914x^{-1.09}$
GS8	۰/۹۵۰۹	۰/۹۳۲۹	۰/۹۹۳۸	۰/۹۹۲۰
	$y = 0.1202x + 36/065$	$y = 36/204e^{-0.29x}$	$y = -0.01x^2 + 0.2237x + 34/547$	$y = 29/457x^{-1.982}$
GS12	۰/۹۹۱۸	۰/۹۷۸	۰/۹۹۸۲	۰/۹۵۹۵
	$y = 0.1662x + 29/378$	$y = 29/784e^{-0.45x}$	$y = -0.0005x^2 + 0.2205x + 28/582$	$y = 22/116x^{-1.456}$
GP4	۰/۸۵۵۲	۰/۸۲۵	۰/۹۷۱۸	۰/۹۹۱۴
	$y = 0.1594x + 40/965$	$y = 41/0.27e^{-0.24x}$	$y = -0.024x^2 + 0.3983x + 37/464$	$y = 31/47x^{-1.216}$
GP8	۰/۸۵۱۸	۰/۸۲۰۲	۰/۹۴۶۶	۰/۹۸۱۵
	$y = 0.1687x + 42/627$	$y = 42/699e^{-0.24x}$	$y = -0.023x^2 + 0.3971x + 39/279$	$y = 32/662x^{-1.23}$
GP12	۰/۸۷۶۷	۰/۸۴۹	۰/۹۷۰۴	۰/۹۹۴۰
	$y = 0.1335x + 37/031$	$y = 37/107e^{-0.23x}$	$y = -0.018x^2 + 0.3105x + 34/436$	$y = 29/135x^{-1.118}$
GS8GP4	۰/۹۵۹	۰/۹۴۰۲	۰/۹۸۶۳	۰/۹۸۵۲
	$y = 0.1427x + 38/043$	$y = 38/243e^{-0.23x}$	$y = -0.01x^2 + 0.2404x + 36/612$	$y = 30/529x^{-1.078}$
GS8GP8	۰/۹۰۹	۰/۸۸۰۸	۰/۹۹۶۶	۰/۹۹۸۹
	$y = 0.1855x + 39/392$	$y = 39/578e^{-0.4x}$	$y = -0.024x^2 + 0.4191x + 35/968$	$y = 29/446x^{-1.28}$
GS8GP12	۰/۸۷۴۳	۰/۸۵۱۱	۰/۹۸۴۸	۰/۹۹۷۹
	$y = 0.1156x + 36/92$	$y = 36/976e^{-0.28x}$	$y = -0.017x^2 + 0.2823x + 34/476$	$y = 29/862x^{-1.987}$

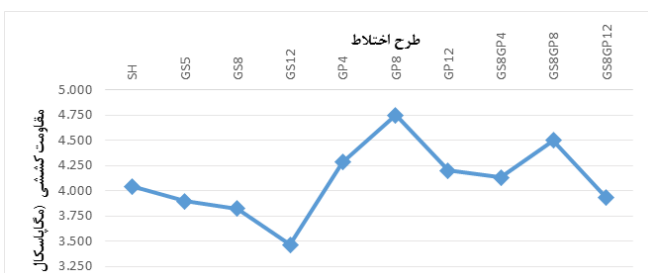
۳/۵ تا ۵/۵ درصد می‌باشد، که تقریباً این مقدار یک سوم مقدار کاهش مقاومت نمونه در طرح GS12 می‌باشد. کاهش حدوداً ۱۵٪ مقاومت کششی طرح GS12 بیانگر این مطلب است که در نسبت‌های جایگزینی بیش از ۸٪ روند کاهش به صورت تصاعدی بیش تر می‌شود. این ضعف مقاومت کششی را می‌توان به دانه‌های ضعیف تر خرده شیشه نسبت داد که در جایگزینی‌های کم‌تر، این ضعف قابل پیش‌بینی بوده، لیکن در جایگزینی بیش تر از ۸٪ حضور بیش تر دانه‌های خرده شیشه در مخلوط بتن، موجب ضعف بیش از پیش ساختار داخلی بتن شده، که در شرایط کشش عملکرد مطلوبی را از خود نشان نخواهد داد.

۴-۳- مقاومت کششی دونیم شدن  
نتایج حاصل از آزمایش تعیین مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه در نمودار شکل ۱۳ ارائه گردیده است. هم‌چنین نسبت نتایج مقاومت کششی طرح‌های اختلاط به طرح اختلاط مرجع در نمودار شکل ۱۴ ارائه شده‌اند.

۴-۳-۱- نتایج مقاومت کششی طرح‌های حاوی خرده شیشه جایگزین ماسه  
با افزایش مقدار جایگزینی خرده شیشه به جای ماسه مقدار مقاومت کششی نمونه‌ها دچار کاهش شده است، این کاهش در مقادیر جایگزینی کم‌تر، در طرح‌های GS5 و GS8 با توجه به نمودار شکل ۱۴ در محدوده‌ای

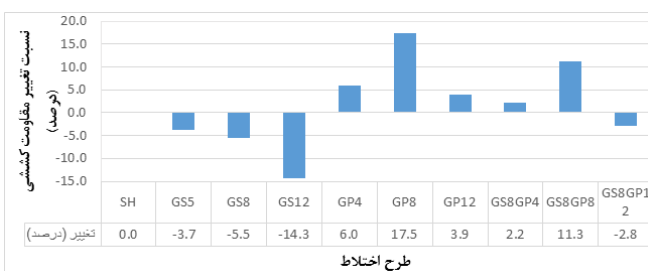
### ۴-۳-۲- نتایج مقاومت کششی طرح‌های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان

نتایج حاصل از آزمایش تعیین مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه در نمودار شکل ۱۳ ارائه گردیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت جایگزینی پودر شیشه با سیمان، در نسبت‌های کم‌تر از ۸٪، مقادیر مقاومت کششی رشد می‌کنند. با توجه به نمودار شکل ۱۴ این مقدار رشد، در طرح GP4 دارای مقدار مطلوب ۶٪ بوده و طرح GP8 رشد بسیار چشم‌گیر ۱۷/۵٪ نسبت به طرح مرجع را نشان می‌دهد؛ این رفتار را می‌توان به تاثیر واکنش پوزولانی سیلیس موجود در پودر شیشه، در تقویت ساختمان داخلی بتن نسبت داد که با دو برابر کردن نسبت جایگزینی، این رشد در حدود سه برابر شده است؛ از طرفی با افزایش نسبت جایگزینی بیش از ۸٪ در طرح GP12 گویای افت روند افزایش مقاومت کششی به میزان حدود ۴٪ می‌باشد، که از میزان افزایش طرح GP4 نیز کم‌تر است، لیکن افزایش مقاومت کششی در طرح GP12 نسبت به طرح مرجع، که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب پودر شیشه در ساختمان بتن به هنگام کشش می‌باشد، اگر چه با افزایش نسبت جایگزینی به میزان بیش از ۱۲٪، کاهش مقاومت کششی نسبت به طرح اختلاط مرجع احتمال بسیار بالایی دارد.



شکل ۱۴: نتایج مقاومت کششی دونیم شدن در طرح‌های اختلاط تحقیق

Fig. 14. Split cylinder test results in the mixing designs of the research



شکل ۱۵: نسبت مقاومت کششی طرح‌های اختلاط به طرح مرجع

Fig. 15. Tensile strength ratio of the mixing designs to the reference mix

۴-۳-۴- نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری  
در اکثر تحقیقات گذشته به منظور سنجش مقاومت کششی بتن، معمولاً آن را به صورت نسبتی از مقاومت فشاری بیان می‌کنند. این نسبت به طور معمول بین ۸ تا ۱۵ درصد ارائه می‌شود [۲۷]. نسبت‌های مقاومت کششی نمونه‌های ۲۸ روزه به مقاومت فشاری نمونه‌ها در همان سن در نمودار شکل ۱۵ نشان داده شده است.

### ۴-۳-۴-۱- نسبت مقاومت کششی به فشاری طرح‌های حاوی خرده شیشه جایگزین ماسه

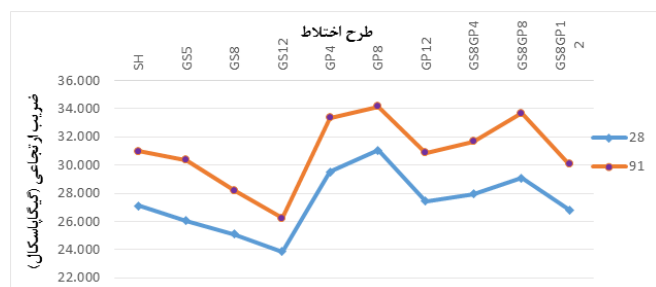
می‌توان مشاهده نمود که در طرح‌های اختلاط مرجع و حاوی خرده شیشه، این نسبت بسیار نزدیک به هم بوده و در محدوده ۰/۲۵٪ می‌باشد. به‌ویژه در طرح‌های GS8 و GS4 که حاوی مقادیر کم‌تر جایگزینی خرده شیشه به جای ماسه بوده، در حدود ۰/۵٪ می‌باشد، لیکن طرح GS12 بیش از ۱٪ افزایش مقاومت کششی به فشاری را نسبت به طرح اختلاط مرجع نشان می‌دهد.

### ۴-۳-۳- نتایج مقاومت کششی طرح‌های ترکیبی

با توجه به نمودار شکل ۱۴ مشخص شده که افزایش پودر شیشه به میزان ۴٪ تا ۸٪ سیمان، به طرح اختلاط حاوی ۸٪ خرده شیشه نه تنها مشکل مقاومت کششی را مرتفع نموده، بلکه آن را به میزان حدود ۲٪/۱۱٪ نسبت به طرح اختلاط مرجع می‌باشد، لیکن نسبت به طرح GS8 بسیار قابل توجه می‌باشد. در ادامه باید افزود با افزایش مقدار جایگزینی پودر شیشه به میزان ۸٪ در طرح GS8GP8، نسبت مقاومت کششی به طرح اختلاط مرجع از کاهش ۵/۵٪ در طرح GS8 به افزایش حدوداً ۱۱٪ در طرح GS8GP8، نزدیک به ۳ برابر شده که بسیار مطلوب می‌باشد و می‌توان چنین عنوان نمود که افزودن پودر شیشه به جای سیمان در طرح اختلاط حاوی خرده شیشه، تماماً عملکرد ضعیف خرده شیشه در خصوص مقاومت کششی را تحت تاثیر مطلوب خود قرار داده و ضعف آن را از بین خواهد برد. لیکن افزایش مقدار پودر شیشه بیش از ۸٪ در طرح GS8GP12، با آن که موجب کاهش نسبت مقاومت کششی طرح GS8GP12 به طرح اختلاط مرجع از ۱۴/۲۸٪ به ۲/۸۴ درصد شده، شایان توجه و تأییدی بر گفته قبلی می‌باشد، همچنین افزایش مقدار پودر شیشه بیش از ۸٪، میزان کاهش مقاومت کششی را از ۱۴/۲۸٪ در طرح GS8 به ۲/۸۴٪ در طرح GS8GP12 رسانیده، که شایان توجه و تأییدی بر گفته قبلی می‌باشد. لیکن هم‌چنان نشان‌دهنده کاهش مقاومت کششی نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. اگر چه این کاهش بسیار ناچیز است و می‌توان از آن چشم‌پوشی نمود، نتایج حاصل نشان می‌دهد به صورت کلی پودر شیشه می‌تواند عملکرد نامطلوب خرده شیشه در مقاومت کششی را بهبود بخشد.

حائز اهمیت می‌باشد [۲۸]. در طراحی سازه‌های بتنی، ضریب ارتجاعی و شکل‌پذیری نقش مهمی را دارا می‌باشند، به‌ویژه در اکثر پروژه‌های بزرگ از جمله سدسازی، احداث نیروگاه هسته‌ای، مخازن نفت و دیگر موارد از پارامترهای اولیه و مهم که همیشه به عنوان اولین پارامترها در طراحی مطرح می‌گردند، ضریب ارتجاعی و شکل‌پذیری بتن هستند. هم‌چنین در سازه‌های بتنی، اغلب در شرایط بهره‌برداری و یا بعضاً در بررسی حالت نهایی از ضریب ارتجاعی استفاده می‌شود. رفتار بتن به دلیل استفاده از مصالح با ویژگی‌های متفاوت و ناهمگن آن، نسبت به دیگر مواد همگن تابع عوامل بسیار زیادی است و رفتار پیچیده و بعضاً ناشناخته‌ای را دارد [۲۶].

تغییر شکل حاصل در بتن تا اندازه‌ای به تغییر شکل ارتجاعی سنگدانه‌ها ارتباط دارد [۲۹]. نوع سنگدانه‌های مصرفی بر روی ضریب ارتجاعی تأثیرگذار است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی در نمودار شکل ۱۶ ارائه گردیده است. هم‌چنین نمودار شکل ۱۷ نتایج به‌دست آمده از نسبت ضریب ارتجاعی طرح‌های اختلاط تحقیق نسبت به طرح مرجع را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: نتایج ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح‌های اختلاط تحقیق در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه

Fig. 17. Results of the static elasticity modulus of the mixing designs of research at 28 and 91 days of ages

۴-۴-۱- نتایج ضریب ارتجاعی طرح‌های حاوی خرده شیشه جایگزین ماسه

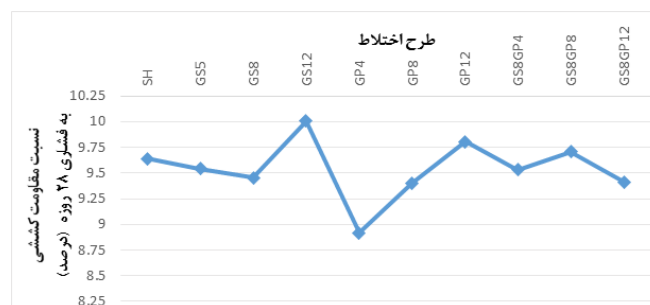
با توجه به نمودار به‌دست آمده از نتایج ضریب ارتجاعی می‌توان به این مورد اشاره کرد که، به‌صورت کلی با افزایش نسبت خرده شیشه به ماسه ضریب ارتجاعی کاهش خواهد یافت، که این کاهش در سن ۹۱ روزه، با اختلاف کم‌تری در طرح GS5 نسبت به طرح اختلاط مرجع مشاهده می‌گردد، لیکن از این رو افزایش نسبت خرده شیشه بیش از ۵٪، در طرح‌های GS8 و GS12 آهنگ کاهش ضریب ارتجاعی در سن ۲۸ روزه را افزایش می‌دهد. از طرفی پس از سن ۲۸ روزه تقریباً با آهنگ ثابت، افزایش نسبت جایگزینی خرده شیشه، مقدار ضریب ارتجاعی را کاهش می‌دهد، که گویای این است که افزایش خرده شیشه، کاهش ضریب ارتجاعی در

۴-۴-۳-۲- نسبت مقاومت کششی به فشاری طرح‌های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان

مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت جایگزینی پودر شیشه نسبت به سیمان در طرح‌های GP4 و GP8 و GP12، نسبت مقاومت کششی به فشاری افزایش پیدا می‌کند، که نشان‌دهنده عملکرد بهتر پودر شیشه در کشش نسبت به فشار می‌باشد. از طرف دیگر، طرح GP4 بیش‌ترین اختلاف نسبت مقاومت کششی به فشاری را با طرح اختلاط مرجع نشان می‌دهد.

۴-۴-۳-۳- نسبت مقاومت کششی به فشاری طرح‌های ترکیبی

در طرح‌های اختلاط ترکیبی GS8GP8 و GS8GP12 با افزایش مقدار پودر شیشه، نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته ولی اختلاف ناچیزی با طرح اختلاط مرجع و طرح GS8 دارد. از طرفی کاهش این نسبت در طرح GS8GP12 نشان‌دهنده عملکرد تضعیف‌کننده خرده شیشه در ساختمان بتن به هنگام کشش بوده و این نسبت، با اختلاف بسیار ناچیزی کم‌تر از طرح GS8 می‌باشد.



شکل ۱۶: نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری در طرح‌های اختلاط تحقیق

Fig. 16. Tensile strength to compressive strength ratio in research mixing designs

۴-۴-۴- ضریب ارتجاعی استاتیکی

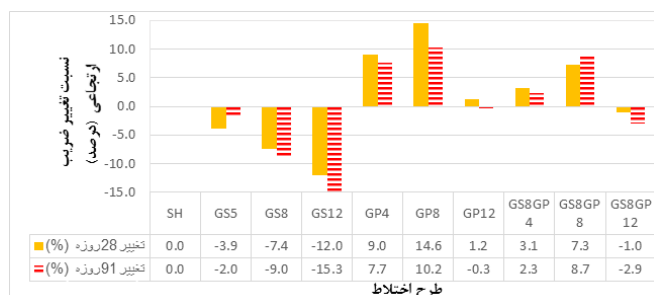
ضریب ارتجاعی بتن، در تحلیل و طراحی سازه‌های بتنی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در اکثر پروژه‌های بزرگ و مهم، ضریب ارتجاعی از جمله پارامترهای مهمی است که همیشه به عنوان اولین پارامتر در طراحی مطرح است. ضریب ارتجاعی همانند مقاومت با توجه به نرخ بار وارده می‌تواند از نوع استاتیکی یا دینامیکی باشد. ضریب ارتجاعی دینامیکی بزرگ‌تر از نوع استاتیکی است ولی هرچه مقاومت بیش‌تر باشد این دو مقدار به هم نزدیک‌تر می‌باشند. لازم به ذکر است مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن برای طبقه‌بندی بتن در آیین‌نامه‌های داخلی و بین‌المللی می‌باشند، لذا بررسی پارامترهای تأثیرگذار در این ویژگی‌ها

نموده، و با این که عملکرد ضعیف خرده شیشه در خصوص کاهش ضریب ارتجاعی را بهبود بخشیده، لیکن مقدار منتجه ضریب ارتجاعی با نسبت کمی که در نمودار شکل ۱۷ مشخص شده در حدود ۱٪ در سن ۲۸ روزه و ۳٪ در سن ۹۱ روزه نسبت به طرح اختلاط مرجع، کاهش را نشان می‌دهد. در ادامه باید افزود، با افزایش دو برابری مقدار جایگزینی پودر شیشه به جای سیمان از طرح GS8GP4 به طرح GS8GP8، نسبت ضریب ارتجاعی طرح مذکور به طرح اختلاط مرجع را در سن ۲۸ روزه، دو برابر و در سن ۹۱ روزه در حدود سه برابر نموده است، که نشان دهنده عملکرد بسیار مطلوب طرح GS8GP8 و ۸٪ جایگزینی پودر شیشه در خصوص ضریب ارتجاعی می‌باشد. در ادامه باید افزود که نسبت ضریب ارتجاعی نمونه‌های ۲۸ روزه طرح‌های ترکیبی به طرح اختلاط مرجع با ۱٪ تا ۲٪ اختلاف، در سن ۹۱ روزه نیز تکرار شده است. نهایتاً می‌توان گفت که جایگزینی با پودر شیشه تا ۸٪ در طرح‌های اختلاط ترکیبی، مشابه طرح‌های اختلاط حاوی فقط پودر شیشه عمل نموده و علاوه بر طراحی مقطع بتنی به روش تنش مجاز، به روش تنش نهایی نیز امکان طراحی وجود دارد.

سن ۹۱ روزه را به صورت تصاعدی در پی دارد، لیکن در سن ۲۸ روزه این کاهش تصاعدی نبوده و متناسب با مقدار جایگزینی خرده شیشه به جای ماسه بوده است. مشخص شد در طرح GS5 که حاوی کمترین مقدار خرده شیشه می‌باشد، مقدار نسبت ضریب ارتجاعی در سن ۲۸ روزه نسبت به طرح اختلاط مرجع کم‌تر از این نسبت در سن ۹۱ روزه می‌باشد، لیکن با افزایش مقدار جایگزینی خرده شیشه به جای ماسه در طرح‌های GS8 و GS12 نسبت‌های ضریب ارتجاعی طرح‌ها به طرح اختلاط مرجع، کاهش بیش‌تر در سن ۹۱ روزه به ۲۸ روزه را نشان می‌دهد، که گویای کاهش رشد ضریب ارتجاعی با زمان، در طرح‌های اختلاط حاوی بیش از ۵٪ خرده شیشه، در سنین بالاتر می‌باشد.

#### ۴-۴-۲- نتایج ضریب ارتجاعی طرح‌های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان

در سن ۲۸ روزه در طرح‌های GP4 و GP8 با افزایش مقدار پودر شیشه از ۰ تا ۸ درصد، مقدار ضریب ارتجاعی افزایش پیدا می‌کند، لیکن با افزایش بیش از ۸٪ در طرح GP12، ضریب ارتجاعی افت قابل توجهی را به دنبال دارد. این روند تقریباً با همان نسبت، در سن ۹۱ روزه طرح‌ها نیز دیده می‌شود. با توجه به نمودار شکل ۱۷ مشخص می‌شود با افزایش دو برابری مقدار جایگزینی پودر شیشه در GP8 نسبت به GP4، نسبت ضریب ارتجاعی طرح GP8 به طرح اختلاط مرجع رشدی کم‌تر از دو برابر را نشان می‌دهد، که برابر ۱۴/۵٪ در سن ۲۸ روزه است. این آهنگ رشد نسبت ضریب ارتجاعی طرح مذکور به طرح اختلاط مرجع، در سن ۹۱ روزه کم‌تر شده و به مقدار ۱۰/۲٪ رسیده است. از طرفی با افزایش نسبت جایگزینی پودر شیشه بیش از ۸٪ در طرح GP12 مقدار نسبت ضریب ارتجاعی طرح به طرح اختلاط مرجع کم‌تر شده و حدود ۱٪ افزایش در سن ۲۸ روزه و ۰/۳۱٪ کاهش در سن ۹۱ روزه را نشان می‌دهد، که گویای عملکرد ضعیف مقادیر هر چه بالاتر از ۸٪ پودر شیشه، بر ضریب ارتجاعی می‌باشد. از این رو می‌توان چنین نتیجه‌گیری کلی نمود که در نسبت‌های جایگزینی ۰ تا ۸ درصد این بازه، می‌توان علاوه بر طراحی مقطع بتنی به روش تنش مجاز، از روش تنش نهایی نیز استفاده نمود، چرا که جایگزینی با پودر شیشه در این مقادیر، موجب رشد محدوده ارتجاعی ساختمان بتن و هم‌چنین رشد مقاومت فشاری آن می‌شود.



شکل ۱۸: نسبت ضریب ارتجاعی طرح‌های اختلاط تحقیق به طرح مرجع

Fig. 18. Static elasticity modulus ratio of the research mixing designs to the reference mix

#### ۵- نتایج نتیجه‌گیری

- نتایج حاصل از این تحقیق در خصوص کارایی و خواص مکانیکی سه نوع بتن در قالب ۱۰ طرح اختلاط، به شرح زیر ارائه می‌گردند:
- ◀ طرح‌های حاوی خرده شیشه جایگزین ماسه
  - با افزایش نسبت جایگزینی، اسلامپ در تمام طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، کاهش می‌یابد.
  - با افزایش نسبت جایگزینی، وزن مخصوص بتن‌های تازه و سخت شده نسبت به طرح اختلاط مرجع، به میزان ناچیزی کاهش می‌یابند.
  - با افزایش نسبت جایگزینی، مقاومت فشاری تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، در تمامی سنین کم می‌شوند.

#### ۴-۴-۳- نتایج ضریب ارتجاعی طرح‌های ترکیبی

در خصوص نتایج حاصله از طرح‌های اختلاط ترکیبی با افزودن پودر شیشه به طرح اختلاط حاوی ۸٪ خرده شیشه، به صورت کلی مقادیر ضریب ارتجاعی ۲۸ روزه بهبود یافته و رشد نموده‌اند که این رشد عیناً در سن ۹۱ روزه هم دیده می‌شود، لیکن با افزایش مقدار پودر شیشه به میزان ۱۲٪ در طرح GS8GP12، مقدار ضریب ارتجاعی نسبت به طرح ترکیبی GS8GP4 و به‌ویژه طرح GS8GP8، به میزان قابل توجهی کاهش پیدا



نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش مییابد و میزان افت ضریب ارتجاعی استاتیکی تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع افزایش را خواهد داد، که احتمالاً متأثر از رشد فعالیت قلیایی-سیلیسی به سبب افزایش نسبت جایگزینی خرده شیشه، می‌باشد.

#### ◀ طرح‌های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان

عموماً اسلامپ تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش داشته است، لیکن با افزایش نسبت جایگزینی، مقدار کاهش تقلیل یافته است.

با افزایش نسبت جایگزینی تا ۸٪، وزن مخصوص بتن تازه طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، به میزان ناچیزی افزایش داشته است.

با افزایش نسبت جایگزینی بیش از ۸٪، وزن مخصوص بتن سخت‌شده طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، به میزان ناچیزی کاهش پیدا کرده است.

با افزایش نسبت جایگزینی تا ۸٪، مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، در تمامی سنین رشد داشت. از طرفی با افزایش بیش از ۸٪ جایگزینی، مقاومت فشاری دچار افت شدیدی گردید.

عموماً با افزایش نسبت جایگزینی، روند کسب مقاومت فشاری در سنین اولیه (۷ تا ۲۸ روزه)، نسبت به طرح اختلاط مرجع افزایش قابل ملاحظه‌ای به‌ویژه در ۸٪ نسبت جایگزینی، از خود نشان داده است.

با افزایش نسبت جایگزینی تا ۸٪، مقاومت کششی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع رشد قابل ملاحظه‌ای داشته، لیکن با افزایش بیش از ۸٪ جایگزینی، رشد مقاومت کششی به‌صورت شدیدی کاهش نشان داد.

نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری در محدوده ۸/۷۵ تا ۹/۸۵ درصد متغیر است. عموماً این نسبت در اکثر طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، کاهش داشته است. لیکن با افزایش نسبت جایگزینی، مقدار کاهش تقلیل داشته، که نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر این جایگزینی بر افزایش مقاومت کششی در مقابل مقاومت فشاری است.

با افزایش نسبت جایگزینی تا ۸٪، ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، در تمامی سنین رشد مطلوبی را نشان داد، لیکن با افزایش بیش از ۸٪ جایگزینی، رشد ضریب ارتجاعی به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افت نموده، به ویژه ضریب ارتجاعی طرح اختلاط حاوی ۱۲٪ جایگزینی، در سن ۹۱ روزه با فاصله بسیار جزئی، پایین‌تر از طرح اختلاط مرجع قرار می‌گیرد.

روند رشد ضریب ارتجاعی در طول زمان با افزایش نسبت جایگزینی، آهسته‌تر می‌شود.

در طرح‌های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان، با افزایش نسبت جایگزینی تا ۸٪، وزن مخصوص بتن‌های تازه و سخت‌شده، مقاومت‌های فشاری، کششی و ضریب ارتجاعی استاتیکی در تمام طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، افزایش می‌یابد. لیکن با افزایش بیش از ۸٪

با افزایش نسبت جایگزینی، افت مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۹۱ روزه، نسبت به نمونه‌های طرح اختلاط مرجع در همین سن، بیش از سایر سنین می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر فعالیت قلیایی-سیلیسی در بتن می‌باشد.

میزان افت مقاومت فشاری در طرح اختلاط حاوی ۵٪ جایگزینی، نسبت به طرح اختلاط مرجع بسیار کم و قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

میزان افت مقاومت فشاری در طرح اختلاط حاوی ۸٪ جایگزینی، نسبت به طرح اختلاط مرجع به میزان کمی بوده، لیکن به مرور زمان بیش‌تر می‌گردد.

میزان افت مقاومت فشاری در طرح اختلاط حاوی ۱۲٪ جایگزینی، نسبت به طرح اختلاط مرجع قابل ملاحظه بوده، لیکن به مرور زمان کاهش می‌یابد.

روند افزایش مقاومت فشاری به مرور زمان در نسبت‌های جایگزینی پایین‌تر، نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش می‌یابد، لیکن در میزان جایگزینی بالاتر، افزایش پیدا می‌کند.

با افزایش نسبت جایگزینی، مقاومت کششی تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش می‌یابد.

با افزایش نسبت جایگزینی تا ۸٪، افت مقاومت کششی نسبت به طرح اختلاط مرجع پایین است.

با افزایش نسبت جایگزینی در محدوده بیش از ۸٪، افت مقاومت کششی نسبت به طرح اختلاط مرجع قابل توجه می‌باشد.

نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری، در محدوده ۹ تا ۱۰ درصد است، که این مقدار در مقایسه با طرح اختلاط مرجع در نسبت‌های پایین جایگزینی، کاهش و در نسبت جایگزینی ۱۲٪، افزایش می‌یابد.

با افزایش نسبت جایگزینی، ضریب ارتجاعی استاتیکی تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش می‌یابد.

با افزایش سن نمونه‌ها بجز طرح اختلاط حاوی ۵٪ جایگزینی، میزان افت ضریب ارتجاعی استاتیکی تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع افزایش می‌یابد، که احتمالاً متأثر از رشد فعالیت قلیایی-سیلیسی به سبب افزایش نسبت جایگزینی خرده شیشه، می‌باشد.

میزان افت ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح اختلاط حاوی ۵٪ جایگزینی، نسبت به طرح اختلاط مرجع بسیار ناچیز است، لیکن با افزایش مقدار جایگزینی بیش از ۵٪، این مقدار افت قابل توجه می‌باشد.

در طرح‌های حاوی خرده‌شیشه جایگزین ماسه، با افزایش نسبت جایگزینی، اسلامپ، وزن مخصوص بتن‌های تازه و سخت‌شده، مقاومت‌های فشاری، کششی و ضریب ارتجاعی استاتیکی در تمام طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، کاهش می‌یابد. لیکن به صورت کلی این کاهش تا ۸٪ جایگزینی، قابل اغماض می‌باشد.

در طرح‌های حاوی خرده‌شیشه جایگزین ماسه، با افزایش سن نمونه‌ها، روند افزایش مقاومت فشاری در نسبت‌های جایگزینی پایین‌تر،

- نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری در محدوده ۹/۲۵ تا ۹/۷۵ درصد متغیر است. با افزایش نسبت جایگزینی تا ۸٪، این نسبت، در مقایسه با طرح اختلاط مرجع و به ویژه طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه، رشد نموده است. لیکن با افزایش جایگزینی به بیش از ۸٪، این نسبت در مقایسه با طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه، تغییر چندانی نداشته، اما در مقایسه با طرح اختلاط مرجع کاهش داشت.

- با افزایش درصد جایگزینی، ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه، در تمام سنین افزایش داشت. لیکن افزایش جایگزینی بیش از ۸٪، ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح‌های اختلاط را نسبت به طرح اختلاط مرجع، در تمام سنین کاهش داده است.

- روند رشد ضریب ارتجاعی استاتیکی با مرور زمان، در تمامی طرح‌های اختلاط ترکیبی تقریباً به یک نسبت بوده است.

- مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی، اسلامپ، وزن مخصوص بتن‌های تازه و سخت شده طرح‌های اختلاط حاوی خرده شیشه و پودر شیشه به صورت هم‌زمان، نسبت به طرح‌های اختلاط حاوی فقط پودر شیشه، کاهش را نشان داد، که این امر، عملکرد نامطلوب شیشه به صورت ذرات درشت‌تر (خرده شیشه) در ساختار بتن و افزایش فعالیت قلیایی-سیلیسی را نشان می‌دهد.

- عملکرد نامطلوب خرده شیشه در خواص مکانیکی بتن از طریق جایگزینی سیمان با پودر شیشه، تا حدود بسیار زیادی بهبود یافت.

- در طرح‌های حاوی خرده‌شیشه جایگزین ماسه و پودر شیشه جایگزین سیمان به صورت هم‌زمان، با افزایش نسبت جایگزینی پودر شیشه به سیمان تا ۸٪، وزن مخصوص بتن‌های تازه و سخت شده، مقاومت‌های فشاری، کششی و ضریب ارتجاعی استاتیکی در تمام طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع، به‌طور قابل ملاحظه‌ای رشد می‌یابد. لیکن با افزایش بیش از ۸٪ جایگزینی، تمامی خواص مکانیکی نسبت به طرح تفاوت چندانی پیدا نمیکنند، لیکن نسبت به طرح حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه افزایش چشمگیری را نشان میدهند.

- در طرح‌های حاوی خرده‌شیشه جایگزین ماسه و پودر شیشه جایگزین سیمان به صورت هم‌زمان، با افزایش نسبت جایگزینی پودر شیشه به سیمان تا ۸٪، روند کسب مقاومت فشاری در سنین اولیه (۷ تا ۲۸ روزه)، نسبت به طرح اختلاط مرجع و به‌ویژه طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه، افزایش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان داد.

### نتیجه‌گیری کلی

مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی، اسلامپ، وزن مخصوص بتن‌های تازه و سخت شده طرح‌های اختلاط حاوی خرده شیشه و پودر شیشه به صورت هم‌زمان، نسبت به طرح‌های اختلاط حاوی فقط پودر شیشه، کاهش را نشان داد، که این امر، عملکرد نامطلوب شیشه به

جایگزینی تمامی خواص مکانیکی کاهش مییابند، که نشان دهنده غلبه عملکرد قلیایی-سیلیسی ذرات درشت‌تر (ولی در محدوده کوچکتر از ۸۰ میکرون) پودر شیشه، بر رفتار پوزولانی ذرات ریزتر پودر شیشه میباشد، که به واسطه افزایش نسبت جایگزینی تا ۱۲٪ رخ خواهد داد. چرا که بخش عمده ذرات پودر به سمت حد بالای محدوده، یعنی ۸۰ میکرون میل می‌کنند.

- در طرح‌های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان، با افزایش نسبت جایگزینی، روند کسب مقاومت فشاری نسبت به طرح مرجع، در سنین اولیه افزایش و در سنین بعد از ۲۸ روزه، کاهش مییابد.

- در طرح‌های حاوی پودر شیشه جایگزین سیمان و همچنین طرح‌های ترکیبی حاوی خرده‌شیشه و پودر شیشه به صورت هم‌زمان، عموماً اسلامپ تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش داشته است، لیکن با افزایش نسبت جایگزینی پودر شیشه به سیمان، مقدار کاهش تقلیل یافته است.

### ◀ طرح‌های ترکیبی حاوی خرده شیشه و پودر شیشه

- عموماً اسلامپ تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است، لیکن با افزایش درصد جایگزینی، مقدار کاهش تقلیل داشته است.

- افزایش جایگزینی تا ۸٪، باعث افزایش وزن مخصوص بتن‌های تازه و سخت شده طرح‌های اختلاط، نسبت به طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه، و همین‌طور افزایش نسبت به طرح مرجع گردید.

- افزایش جایگزینی بیش از ۸٪، وزن مخصوص بتن‌های تازه و سخت شده طرح‌های اختلاط را نسبت به طرح اختلاط مرجع، کاهش داد. وزن مخصوص این بتن‌ها در طرح اختلاط حاوی ۸٪ خرده شیشه و ۱۲٪ پودر شیشه، تقریباً با طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه برابر است.

- با افزایش جایگزینی تا ۸٪، مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط نسبت به طرح‌های اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه و مرجع، در تمامی سنین رشد داشته است.

- مقاومت فشاری با افزایش بیش از ۸٪ جایگزینی، در مقایسه با طرح اختلاط مرجع تغییر چندانی نداشت، لیکن نسبت به طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه، افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان داد.

- با افزایش جایگزینی تا ۸٪، روند کسب مقاومت فشاری در سنین اولیه (۷ تا ۲۸ روزه)، نسبت به طرح اختلاط مرجع و به‌ویژه طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه، افزایش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان داد.

- افزایش جایگزینی تا ۸٪، باعث افزایش مقاومت کششی طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه، و همچنین افزایش نسبت به طرح اختلاط مرجع گردید.

- افزایش جایگزینی بیش از ۸٪، مقاومت کششی طرح‌های اختلاط را نسبت به طرح اختلاط مرجع، کاهش داده است. مقاومت کششی طرح اختلاط حاوی ۸٪ خرده شیشه و ۱۲٪ پودر شیشه، تقریباً با طرح اختلاط حاوی فقط ۸٪ خرده شیشه برابر است.

- [11] S.B., Shekhawat, V.C., Aggarwal "Utilization of Waste Glass Powder in Concrete", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 3 (2014) 1-5.
- [12] I., Dumitru, T., Song, V., Caprar, P., Brooks, J., Moss, "Incorporation of Recycled Glass for Durable Concrete", Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Coventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Center for by Utilization, (2010).
- [13] T.D., Dyer, R.K., Dhir, "Chemical reactions of glass cullet used as cement component", Journal of Materials in Civil Engineering, 13 (6) (2001) 407- 412.
- [14] H.R., Samtur, "Glass Recycling and Reuse", University of Wisconsin, Madison Institute for Environmental Studies, Report No. 17, (1974).
- [15] R.D., Nassar, P., Soroushian, "Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement", Construction and Building Materials, 29 (2012) 368-377.
- [16] V., Vaitkevicius, E., Serelis, H., Hilbig, "The effect of glass powder on the microstructure of ultra-performance concrete", Construction and Building Materials, 68 (2014) 102-109.
- [17] Z.P., Bazant, W., Jin, C., Meyer, "Fracture Mechanics of Concrete Structures", Proc. FRA MCOS, 3 (1998) 1687-1693.
- [18] A.J., Carpenter, S.M., Cramer, "Mitigation of ASR in Pavement Patch Concrete that Incorporates Highly Reactive Fine Aggregate", Transportation Research Record 1668, Paper No. 1087-1099, (1999) 60-67.
- [19] M., Pattengil, "Glass as a Pozzolan", Albuquerque Symposium on Utilization of Waste Glass, Second Prod, (1973).
- [20] J., Jin, P.L., Domone, "Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component", In: Shah SP, Daczko JA, Lingscheit JN, editors. Proceedings of the first North American conference on the design and use of self-consolidating concrete. USA: Chicago, (2002) 37-42.
- [21] A., Shayan, A., Xu, "Utilization of Glass as a Pozzolanic Material in Concrete", ARRB TR Internal Report RC 91132, (1999).
- [22] A.M., Neville, "Concrete Properties", Translated by: Hormoz Family, Iran University of Science and Technology, Tehran, Third edition, (2012).
- [23] ASTM C150-99a, "Standard specification for Portland cement", American Society for Testing and Materials, (1999).
- صورت ذرات درشت‌تر (خرده شیشه) در ساختار بتن و افزایش فعالیت قلیایی-سیلیسی را نشان می‌دهد. عملکرد نامطلوب خرده شیشه در خواص مکانیکی بتن از طریق جایگزینی سیمان با پودر شیشه، تا حدود بسیار زیادی بهبود یافت.
- مراجع**
- [1] S., Rahat Dahmardeh, "Investigation of the mechanical properties of self-compacting concrete, containing glass jar under aggressive conditions of sulfuric acid", Master's thesis for civil engineering, Sistan and Baluchestan University, Faculty of Engineering, (1392).
- [2] E., Emam Ali, S., Al-Tersawy, "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self-compacting concrete," Construction and Building Materials, 35, (2012) 785-791.
- [3] A.K., Abbasi-Daszfoli, M., Olapur, M., Borna, B., Pourzangneh, "Managing the construction and development of the use of scrap glass in concrete by determining its physical and mechanical properties", First International Conference on Iran's Environmental Crisis and its Improvement, (1391).
- [4] J., De Brito, J., Ferreira, D., Pacheco, D., Soares, M., Guerreiro, "Structural, material, mechanical and durability properties and behavior of recycled aggregates concrete," Journal of Building Engineering, 6 (2016) 1-6.
- [5] Z., Firouzjaei, "The effect of adding recycled glass on the properties of self-compacting concrete at different temperatures", Master's thesis for Civil Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Faculty of Civil Engineering. (1393).
- [6] C., Meyer, S., Baxter, W., Jin, "Alkali-aggregate reaction in concrete with waste glass as aggregate", ACI Materials Journal, 97 (2000) 208-213.
- [7] C.H., Chen, R., Huang, J.K., Wu, C.C., Yang, "Waste E-glass particles used in cementitious mixtures", Cement and Concrete Research, 36 (3) (2006) 449- 456.
- [8] S.C., Kou, C.S., Poon, "Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate", Cement and Concrete Composites, 31 (2) (2009) 107-113.
- [9] J., Reindel, "Report by Recycling Manage", Dane county, Department of Public Works, Madison, USA, (1998).
- [10] G., Vijayakumar, H., Vishaliny, D., Govindarajulu, "Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3 (2) (2013) 153-157.

- [30] ASTM C496-M11, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", (2011).
- [31] A.A., Maghsoudi, "Modulus of elasticity, compressive strength and tensile strength of normal concrete and high-strength self-compacting concrete (line 2 of Mashhad urban train) and evaluation of regulations", National Conference on Concrete, Fifth Year, (1392).
- [32] J., Akbari, "Evaluation of the effect of steel and glass fibers on the mechanical properties of concrete", Scientific Journal of Empirical Research in Civil Engineering, 2 (2) (1394) 121-131.
- [33] H., Dabbagh, "Evaluation of the relationship of the regulation to calculate the modulus of Elasticity of concrete", National Conference on Concrete, 6th Year, (1393).
- [34] R., Jones, I., Facaroau, "Incearea Nedestructiva a Betonului," Editor Technical, Bucharest, (1971).
- [24] Y., Sharifi, "The effect of sand replacement with glass waste on the tensile and flexural strengths of self-compacting concrete", National Conference on Concrete, Fifth Year, (1392).
- [25] ASTM C127-12, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate", (2012).
- [26] ASTM C128-12, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate", (2012).
- [27] A., Shayan, A., Xu, "Value-added utilization of waste glass in concrete", Cement and Concrete Research, 34 (1) (2004) 81-89.
- [28] ASTM C494/C494M- 99a, "Standard specification for chemical admixtures for concrete", American Society for Testing and Materials, (1999).
- [29] M., Dehestani, "Providing environmental solutions for the recycling of PET waste bottles by replacing them as fine aggregates in concrete", Concrete Research Quarterly, 5 (1) (2012) 7-18.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. F. Sajedi, F. Darash, Experimental study of workability and mechanical properties of concrete containing powder glass and mineral waste glass with separate and simultaneous applications, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1155-1176.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13416.5404

