

## عملکرد بتن حاوی شیشه ضایعاتی در نسبت پایین آب به چسباننده

علی کاوسی

دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی عمران، موسسه پویندگان دانش، چالوس

سید یاسین موسوی \*

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گلستان

### چکیده

هدف از انجام این مطالعه بررسی خواص بتن حاوی شیشه ضایعاتی در نسبت پایین آب به چسباننده می باشد. در مجموع، ۷ طرح مخلوط بتن با میزان ثابت آب به چسباننده ۰/۲۷ ساخته شد که در آنها شیشه ضایعاتی جایگزین بخشی از سیمان و یا ماسه شده است. عملکرد بتن حاوی شیشه ضایعاتی با استفاده از مقاومت فشاری، سرعت عبور امواج مافوق صوت، مقاومت کششی، جذب آب (اولیه و نهایی) و همچنین مقاومت الکتریکی سنجیده شده است. نتایج نشان می دهد اگرچه استفاده از پودر شیشه ضایعاتی سبب کاهش مقاومت فشاری بتن پرمقاومت می گردد، استفاده از شیشه ضایعاتی به عنوان ماسه، مقاومت فشاری ۹۰ روزگی بتن پرمقاومت مینا را از ۱۰۲/۳ به ۱۰۶ مگاپاسکال افزایش می دهد. همچنین، ارتباط مناسبی مابین میزان سرعت عبور امواج مافوق صوت و مقاومت فشاری با ضریب  $R^2$  برابر ۰/۸۷ و ۰/۷۹ به ترتیب برای بتن پرمقاومت حاوی پودر شیشه ضایعاتی و بتن پرمقاومت حاوی خرده شیشه ضایعاتی وجود دارد. مقاومت کششی بتن پرمقاومت حاوی پودر شیشه ضایعاتی نسبت به بتن پرمقاومت مینا کمتر است. جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) کمتر از ۳٪ برای بتن پرمقاومت حاوی شیشه ضایعاتی بدست آمده است که نشان دهنده بتن با کیفیت "خوب" است. همچنین مقاومت الکتریکی بتن پرمقاومت حاوی شیشه ضایعاتی در سن ۲۸ روزگی بالاتر از  $20 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  تخمین زده شده است. در مجموع می توان شیشه ضایعاتی را در بتن پرمقاومت با خواص مکانیکی و دوام قابل قبول به کار برد.

واژه‌های کلیدی: بتن پرمقاومت، شیشه ضایعاتی، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی.

\* نویسنده مسئول: y.mousavi@gu.ac.ir

## ۱- مقدمه

در ارتباط با دوام ملات و یا بتن معمولی حاوی شیشه ضایعاتی نیز انجام پذیرفته است. به عنوان نمونه، توسط Jain و Neithalath [۵] نشان داده شد که شار عبوری ناشی از آزمون نفوذ یون کلر تسریع شده با جایگزینی جرمی ۱۰ و ۲۰ درصد پودر شیشه کاهش می یابد. روند مشابه در ملات حاوی خرده شیشه به عنوان جایگزین بخشی از ماسه توسط Tan و Du [۶] گزارش شده است. بررسی دوام ملات حاوی پودر شیشه توسط Sousa و Matos و Coutinho [۷] نشان داد که با جایگزینی ۲۰ درصدی پودر شیشه مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در مقایسه با ملات نرمال افزایش می یابد. همچنین آنان گزارش نمودند که پودر شیشه در ملات می تواند مقاومت در برابر حمله سولفات را افزایش دهد. در مطالعه ای Tunçan و همکاران [۸] با انجام آزمون ذوب و یخندان نشان دادند که با افزودن خاکستر بادی و شیشه ضایعاتی دوام بتن بهبود می یابد. همچنین Nassar و Soroushian [۹] همکاران گزارش نمودند استفاده از شیشه آسیاب شده به عنوان جایگزین سیمان باعث بهبود مشخصه های دوام بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی اندازه گیری شده توسط آزمون ذوب و یخندان، نفوذپذیری یون کلر و .. می گردد. نسبت آب به چسباننده یکی از پارامترهای اصلی مؤثر بر خواص مهندسی و دوام بتن است که تغییر آن می تواند سبب تغییرات قابل توجهی در عملکرد بتن گردد. هدف از انجام این مطالعه بررسی خواص بتن حاوی شیشه ضایعاتی در نسبت پایین آب به چسباننده می باشد. لازم به ذکر است که میزان نسبت آب به چسباننده جهت رسیدن به بتن پرمقاومت انتخاب شده است. بر این مبنای نمونه های مختلف بتن پرمقاومت حاوی شیشه ضایعاتی در دو گروه طراحی و ساخته شد. در گروه اول پودر شیشه ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از مواد چسباننده و در گروه دوم از خرده شیشه به عنوان جایگزین بخشی از ماسه استفاده شده است. مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سرعت عبور امواج مافوق صوت، جذب آب (اولیه و نهایی) و همچنین مقاومت الکتریکی نمونه ها در مقایسه با بتن پرمقاومت شاهد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق می تواند برای مهندسين و پیمانکاران صنعت ساخت و ساز کشور در تولید و استفاده از بتن بازیافتی پرمقاومت، در سازه ها مفید واقع گردد. بدین ترتیب می توان علاوه بر سودمندی استفاده از بتن پرمقاومت، از کاهش منابع طبیعی و همچنین افزایش مواد ضایعاتی در طبیعت جلوگیری نمود.

در سالیان اخیر، گسترش صنعت ساخت و ساز و نیاز به احداث سازه هایی با عملکرد بالا، باعث افزایش تقاضا برای استفاده از بتن شده است. امروزه بتن در ساخت انواع سازه ها مانند سدها، اسکله های دریایی، پل ها و ساختمان های بلند مرتبه در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار می گیرد. با این حال گسترش کاربرد و افزایش میزان تولید بتن باعث گردیده است که نیاز به مصالح اولیه جهت ساخت آن مانند سیمان و سنگدانه ها افزایش یابد. این مصالح عموماً از منابع طبیعی استخراج می شوند که با توجه به کمبود منابع طبیعی و مشکلات زیست محیطی ناشی از برداشت بی رویه آنان، می تواند باعث کاهش تولید بتن و عدم سودمندی از فواید چشمگیر آن گردد. لذا، ضرورت استفاده از مواد جایگزین مناسب در تولید بتن که کاهش تخریب محیط زیست را به دنبال داشته باشند، روز به روز بیشتر احساس می گردد.

به عنوان راه حلی جهت کاهش مصرف مصالح طبیعی ایده استفاده از مواد ضایعاتی در ساختار بتن مطرح گردیده است. این مهم می تواند از دیدگاه زیست محیطی به جهت جلوگیری از انباشت مواد ضایعاتی در طبیعت نیز مفید واقع گردد. از جمله مواد ضایعاتی که شاهد تولید حجم قابل توجهی از آن در سرتاسر دنیا می باشیم، شیشه است. مطالعات گوناگون نشان می دهد که می توان از شیشه حاصل از منابع متفاوت به عنوان جایگزینی بخشی از سنگدانه و یا سیمان در تولید بتن بهره جست. البته بیشترین توجه به جایگزینی شیشه به عنوان بخشی از ریزدانه و یا سیمان معطوف شده است [۱-۹]. در این راستا، Shao و همکاران [۱] با بررسی بتن حاوی شیشه آسیاب شده نشان دادند که در مقایسه با خاکستر بادی، شیشه آسیاب شده می تواند هر دو مقاومت فشاری کوتاه و بلند مدت بتن را بهبود بخشد. همچنین آنان گزارش نمودند که شیشه آسیاب شده با قطر ذره ریزتر از  $38 \mu\text{m}$  رفتار پوزولانی دارد. توسط Shi و همکاران [۲] نیز پودر شیشه آسیاب شده ریز به عنوان یک ماده با فعالیت پوزولانی بسیار بالا معرفی شده است. میزان بهینه جایگزینی پودر شیشه بر مبنای آزمایش های مقاومت و هیدراتاسیون توسط Schwarz و همکاران [۳]، ۱۰ درصد گزارش شده است. از طرفی Shayan و Xu [۴] معتقدند که تا ۳۰ درصد پودر شیشه ریز را می توان به عنوان جایگزین سیمان و یا سنگدانه در بتن بدون هرگونه تاثیرات دراز مدت مخرب به کار برد. مطالعات گوناگونی

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

## ۲-۱- مصالح مورد استفاده

در این مطالعه از سیمان پرتلند با ترکیبات شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است. همچنین در تمامی اختلاط‌ها از دوده سیلیس با وزن مخصوص ۲/۱۲ استفاده شده است که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۱ بیان گردیده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان و دوده سیلیس

	سیمان	دوده سیلیس
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۹	۹۱/۷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۸۶	۱
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۳	۰/۹
CaO	۶۳/۳۲	۱/۶۸
MgO	۱/۱۵	۱/۸
SO <sub>3</sub>	۲/۱	۰/۸۷
K <sub>2</sub> O	۰/۵۶	-
Na <sub>2</sub> O	۰/۳۶	۰/۱

## ۲-۲- نسبت های اختلاط

در این مطالعه، هفت اختلاط بتن در نسبت ثابت آب به چسباننده ۰/۲۷ و میزان کل مواد چسباننده ۵۰۰ kg/m<sup>3</sup> طراحی و تولید گردید. همان‌گونه که بیان شد این میزان از نسبت آب به چسباننده جهت رسیدن به بتن پرمقاومت انتخاب شده است. اولین اختلاط این مطالعه که با NC نمایش داده می‌شود، بتن شاهد است که در آن از شیشه ضایعاتی استفاده نشده است. در اختلاط‌های دوم تا چهارم به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد مواد چسباننده، از کل سیمان مصرفی کم شده و با پودر شیشه جای‌گزین شده است. این اختلاط‌ها با GP10، GP20 و GP30 نمایش داده شده اند. همچنین اختلاط‌های GS10، GS20 و GS30 که در آنها خرده شیشه به ترتیب جایگزین ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از ماسه در بتن شاهد شده اند، اختلاط‌های پنجم تا هفتم را تشکیل داده اند. این میزان از جایگزینی بر مبنای مطالعات گذشته و طرح‌های آزمایشگاهی اولیه انتخاب شده است. همچنین، در تمامی اختلاط‌ها دوده سیلیس به میزان ۱۰ درصد مواد چسباننده جهت اطمینان از حصول حداقل مقاومت لازم در بتن پرمقاومت استفاده شد. جدول ۲ نمایش دهنده جزئیات ۷ اختلاط بتن مورد مطالعه می‌باشد.

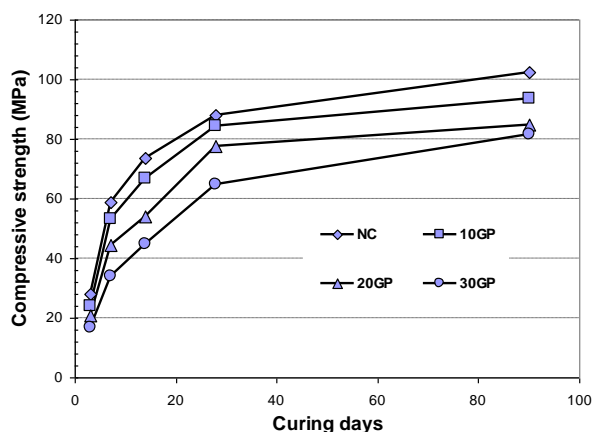
برای ساخت نمونه‌ها پس از توزین مصالح، ابتدا سنگدانه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه در بتونیر مخلوط شدند. پس از آن، نصف آب مصرفی به مدت ۱ دقیقه در حالیکه که بتونیر روشن بود به مخلوط اضافه گردید. بعد از این مرحله بتونیر ۳۰ ثانیه خاموش شده و سپس مواد چسباننده اضافه گردید و به مدت ۱ دقیقه دیگر در بتونیر مخلوط شد. در حالیکه که بتونیر به مدت ۲ دقیقه روشن بود، آب باقیمانده و فوق‌روان‌کننده به مخلوط اضافه گردید. در نهایت بعد از ۱ دقیقه استراحت، بتن به میزان ۳ دقیقه دیگر مخلوط گردید.

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاط‌ها

نام اختلاط	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	دوده سیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	پودر شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	خرده شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	فوق‌روان‌کننده (% چسباننده)
NC	۴۵۰	۵۰	-	-	۱۳۵	۱۰۸۸	۷۶۳	۰/۲۵
GP10	۴۰۰	۵۰	۵۰	-	۱۳۵	۱۰۸۸	۷۵۳	۰/۲۵
GP20	۳۵۰	۵۰	۱۰۰	-	۱۳۵	۱۰۸۸	۷۴۰	۰/۲۵
GP30	۳۰۰	۵۰	۱۵۰	-	۱۳۵	۱۰۸۸	۷۲۹	۰/۲۵
GS10	۴۵۰	۵۰	-	۷۲/۵	۱۳۵	۱۰۸۸	۶۸۶/۷	۰/۲۰
GS20	۴۵۰	۵۰	-	۱۴۵	۱۳۵	۱۰۸۸	۶۱۰/۴	۰/۲۰
GS30	۴۵۰	۵۰	-	۲۱۷/۵	۱۳۵	۱۰۸۸	۵۳۴/۱	۰/۲۰

### ۳-۲- آزمایش‌ها

است که با افزودن پودر شیشه به جای سیمان مصرفی، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. با اینحال تمامی اختلاط‌ها دارای مقاومت فشاری بالاتر از  $64/9 \text{ MPa}$  در ۲۸ روزگی و بالاتر از  $86/1 \text{ MPa}$  در ۹۰ روزگی هستند. در مطالعه ای Schwarz و همکاران [۳] گزارش نمودند که مقاومت فشاری نمونه بتن معمولی حاوی پودر شیشه نسبت به بتن مینا کمتر است. از طرفی همان‌گونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است، هرچند با افزایش میزان پودر شیشه مقاومت کاهش می‌یابد، اما این کاهش مقاومت فشاری نسبت به بتن پرمقاومت مینا اغلب با افزایش سن بتن تقلیل یافته است. به عنوان مثال، مقاومت فشاری ۳ روزگی بتن پرمقاومت حاوی ۳۰ درصد پودر شیشه  $59/6$  درصد مقاومت بتن مینا می‌باشد. این عدد در ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزگی به  $57/9$ ،  $60/9$ ،  $73/7$  و  $79/8$  درصد می‌رسد. در مطالعه Ozcan و Yuksel [۱۰] نشان داده شده است که بیشترین کاهش مقاومت در روزهای اولیه (۷ روزگی) نسبت به آنچه در ۲۸ روزگی دیده می‌شود، نسبتاً بیشتر است. احتمالاً علت این موضوع را می‌توان در فعالیت‌های پوزولانی پودر شیشه در بلند مدت دانست که باعث بهبود ریز ساختار و کاهش تخلخل بتن می‌گردد.



شکل ۱- مقاومت فشاری بتن پرمقاومت حاوی درصد‌های مختلف پودر شیشه ضایعاتی

از شکل ۲ قابل استنباط می‌باشد که وجود خرده شیشه در بتن پرمقاومت در اغلب موارد باعث افزایش مقاومت فشاری آن شده است. بیشترین مقاومت فشاری در بین تمامی نمونه‌ها برای ۳۰ درصد جای‌گزینی خرده شیشه با ماسه در سن ۹۰ روزگی و به میزان  $106 \text{ MPa}$  نتیجه شده است. این میزان  $3/6$  درصد نسبت به مقاومت فشاری تخمین زده شده برای بتن پرمقاومت مینا بالاتر

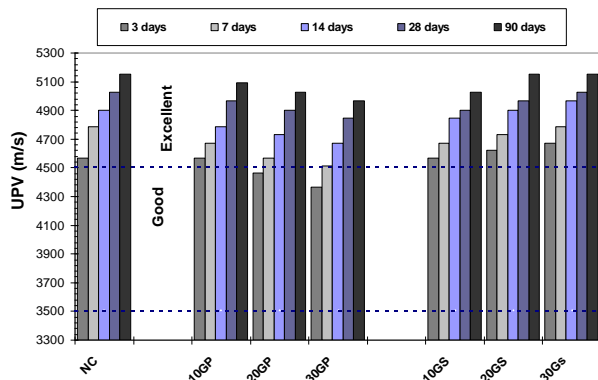
پس از اتمام آزمایش اسلامپ بر روی بتن تازه، نمونه‌ها در داخل قالب‌های مربوطه ریخته شدند. پس از یک روز نمونه‌های بتن قالب‌گیری شده و تا رسیدن به سن آزمایش در درون محیط آبی قرار گرفتند. آزمایش‌های بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سرعت عبور امواج مافوق صوت، جذب آب (اولیه و نهایی) و همچنین مقاومت الکتریکی می‌باشد. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف شامل ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزگی محاسبه شد. قابل ذکر است که قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری، سرعت عبور امواج مافوق صوت توسط دستگاهی که اصطلاحاً آن را PUNDIT می‌نامند، محاسبه گردید. علاوه بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی بتن پرمقاومت در سنین ۲۸ و ۹۰ روزگی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای  $15 \times 30 \text{ cm}$  محاسبه گردید. جذب آب نمونه‌های بتن در سن ۲۸ روزگی اندازه‌گیری شد. بر این مبنای، در هر اختلاط نمونه‌ها در آون در دمای  $110-100$  درجه سانتیگراد تا رسیدن به وزن ثابت نگهداری شدند و سپس جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی (زمانی که تفاضل جرم بعد از فاصله‌های زمانی ۱۲ ساعته قابل چشم‌پوشی است) گزارش شده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتن حاوی شیشه ضایعاتی نیز در سنین مختلف شامل ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزگی و با استفاده از دستگاه سنجش مقاومت الکتریکی چهار نقطه‌ای تخمین زده شد.

### ۳- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

تاثیر جای‌گزینی شیشه ضایعاتی بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در سنین مختلف شامل ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزگی محاسبه گردید و نتایج در شکل ۱ برای نمونه‌های حاوی پودر شیشه ضایعاتی به عنوان جای‌گزین بخشی از کل مواد چسباننده و در شکل ۲ برای جای‌گزینی خرده شیشه ضایعاتی با ماسه مصرفی نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها از  $16/8$  تا  $106 \text{ MPa}$  متغیر است. با افزایش سن بتن، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. هرچند سرعت کسب مقاومت فشاری در سنین اولیه بالاتر است و با گذشت زمان کاهش می‌یابد. بر مبنای نتایج ارائه شده در شکل ۱، مقاومت فشاری ۹۰ روزگی بتن مینا به میزان  $102/3 \text{ MPa}$  اندازه‌گیری شده

روزگی از این قاعده پیروی نمی‌کنند. با در نظر گرفتن شکل ۳، میزان سرعت عبور امواج در تمامی اختلاط‌ها با افزایش زمان عمل آوری افزایش می‌یابد. از طرفی همان‌گونه که در بخش مقاومت فشاری دیده شد، افزودن پودر شیشه در تمامی سنین اثر منفی بر روی سرعت عبور امواج دارد و باعث کاهش میزان سرعت عبور امواج مافوق صوت می‌گردد.



شکل ۳- میزان سرعت عبور امواج مافوق صوت در نمونه‌های مختلف بتن پر مقاومت

محققین مختلفی نشان داده‌اند که می‌توان بین مقاومت فشاری و میزان سرعت عبور امواج مافوق صوت با استفاده از معادله ای به فرم ۱ (نمایی) ارتباط پیدا نمود [۱۴-۱۵].

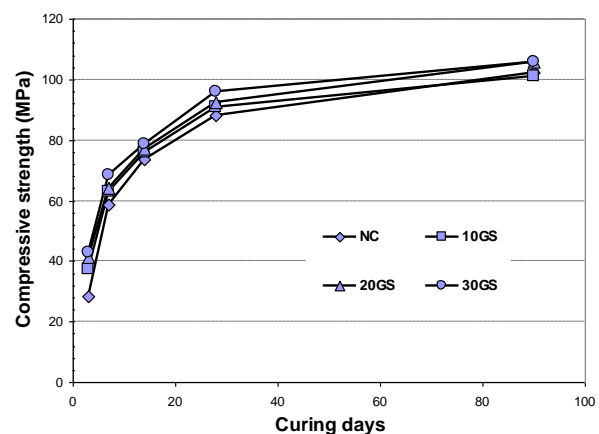
$$f_c = Ae^{B \times (UPV)} \quad (1)$$

در این معادله  $f_c$  نشان دهنده مقاومت فشاری و  $UPV$  میزان سرعت عبور امواج مافوق صوت می‌باشد. بر مبنای نتایج این مطالعه و با استفاده از ابزار رگرسیون، رابطه‌ای به فرم نمایی با میزان  $R^2$  مناسب جهت ارتباط بین سرعت عبور امواج مافوق صوت و مقاومت فشاری در بتن حاوی پودر شیشه در شکل ۴ ارائه شده است. چنین وضعیتی در بتن حاوی خرده شیشه ضایعاتی البته با میزان  $R^2$  کمتر نسبت به بتن حاوی پودر شیشه برقرار است (شکل ۴).

### ۳-۳- مقاومت کششی (شکافت)

تأثیر جای‌گزینی شیشه ضایعاتی بر مقاومت کششی نمونه‌های بتن پر مقاومت در دو سن ۲۸ و ۹۰ روزگی محاسبه گردید و نتایج در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مقاومت کششی بتن پر مقاومت در محدوده ۳/۵۷ تا ۴/۷۵ MPa در سن ۲۸ روزگی و در محدوده ۴/۲۵ تا ۵/۱۵ MPa در سن ۹۰ روزگی قرار دارد.

است. این نتیجه در راستای مطالعه Batayneh و همکاران [۱۱] می‌باشد. آنان با بررسی مقاومت فشاری بتن حاوی خرده شیشه که دارای دانهدندی نزدیک به محدوده پایین استاندارد BS882:1992 بود، نشان دادند میزان مقاومت تا ۲۰ درصد جایگزینی خرده شیشه با ماسه افزایش می‌یابد. علت این موضوع توسط آنان در بافت سطحی و مقاومت دانه‌های شیشه در مقایسه با ماسه مطرح گردید. البته نتایجی که نشان دهنده کاهش مقاومت فشاری در حضور خرده شیشه است، در اغلب اختلاط‌های مطالعه شده توسط محققین دیگر مانند Tan و Du [۶] و یا Castro و Brito [۱۲] گزارش شده است. در مجموع به نظر می‌رسد بافت سطحی سنگدانه‌های شیشه و همچنین ناحیه اتصال بین سنگدانه شیشه و ماتریس اطراف نقش مهمی در افزایش و یا کاهش مقاومت فشاری دارد.

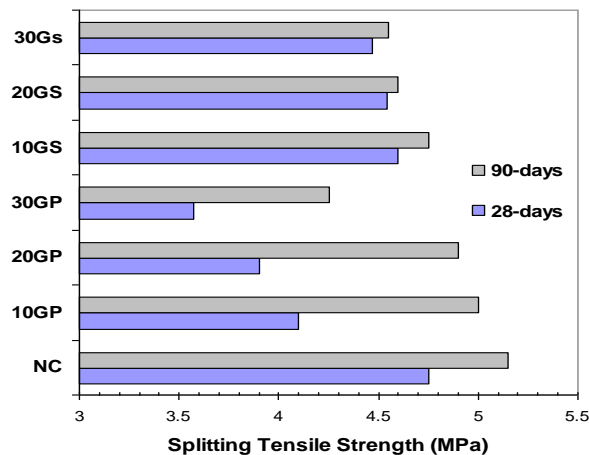


شکل ۲- مقاومت فشاری بتن پر مقاومت حاوی درصد‌های مختلف خرده شیشه ضایعاتی

### ۲-۳- سرعت عبور امواج مافوق صوت

در شکل ۳ میزان سرعت عبور امواج مافوق صوت بر روی نمونه‌های بتن پر مقاومت در سنین مختلف نشان داده شده است. بر طبق طبقه بندی Whitehurst [۱۳] کیفیت بتن بر مبنای سرعت عبور امواج در محدوده ۴/۵ m/s و بیشتر، ۳/۵ تا ۴/۵ m/s، ۳/۵ تا ۳/۵ m/s، ۳ تا ۳ m/s و ۲ m/s و پایین تر به ترتیب به پنج رده "عالی"، "خوب"، "مشکوک"، "ضعیف" و "خیلی ضعیف" رده بندی شده است. بر این مبنای، کیفیت تمامی اختلاط‌های بتن پر مقاومت حاوی شیشه ضایعاتی در تمامی سنین در رده "عالی" طبقه بندی می‌گردد. هرچند فقط دو اختلاط 20GP و 30GP در سن ۳

نسبت جایگزینی پودر شیشه مقاومت کششی نیز کاهش یافته است. البته خاطر نشان می گردد که چنین روندی در بتن پر مقاومت حاوی خرده شیشه ضایعاتی دیده نشد.

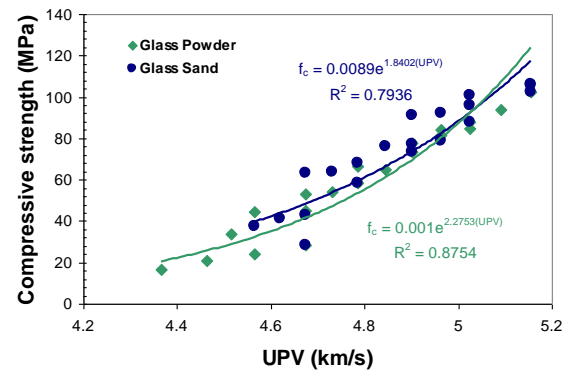


شکل ۵- مقاومت کششی بتن پر مقاومت حاوی شیشه ضایعاتی

### ۳-۴- جذب آب

جذب آب به عنوان یکی از شاخص های مهم مشخص کننده دوام بتن محسوب می گردد. نتایج جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی بتن پر مقاومت در شکل ۶ نشان داده شده است. توسط CEB [۱۸] کیفیت بتن به سه رده "ضعیف"، "متوسط" و "خوب" به ترتیب بر مبنای جذب آب ۵ درصد و بالاتر، بین ۳ تا ۵ درصد و کمتر از ۳ درصد تقسیم بندی شده است. بر مبنای نتایج این مطالعه (شکل ۶) جذب آب اولیه ۲۸ روزگی بتن پر مقاومت ۱/۷۸ درصد است که با جایگزینی پودر شیشه و خرده شیشه به ترتیب در محدوده ۱/۶۹-۱/۱۱ درصد و ۱/۳۷-۱/۰۷ درصد متغیر است که همگی این اعداد کمتر از ۳ درصد می باشند. بر این اساس می توان بتن پر مقاومت حاوی شیشه ضایعاتی را در رده کیفیتی "خوب" طبقه بندی نمود. از طرفی در این مطالعه جذب آب نهایی نمونه های بتن پر مقاومت در محدوده ۱/۵ تا ۲/۳۵ درصد تخمین زده شده است که نسبتاً پایین می باشد.

از شکل ۶ قابل استنباط است که استفاده از خرده شیشه ضایعاتی سبب کاهش جذب آب نهایی بتن پر مقاومت مینا به میزان ۱۹، ۲۳ و ۳۲ درصد به ترتیب برای جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد ماسه مصرفی شده است. همچنین حضور پودر شیشه در بتن پر مقاومت نیز سبب کاهش میزان جذب آب نسبت به بتن پر مقاومت مینا می گردد. این نتیجه در راستای مطالعه توکلی و همکاران [۱۹] است.

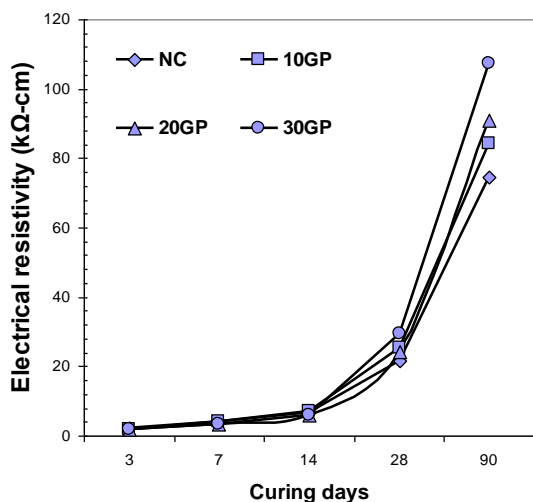


شکل ۴- ارتباط بین میزان سرعت عبور امواج مافوق صوت و مقاومت فشاری

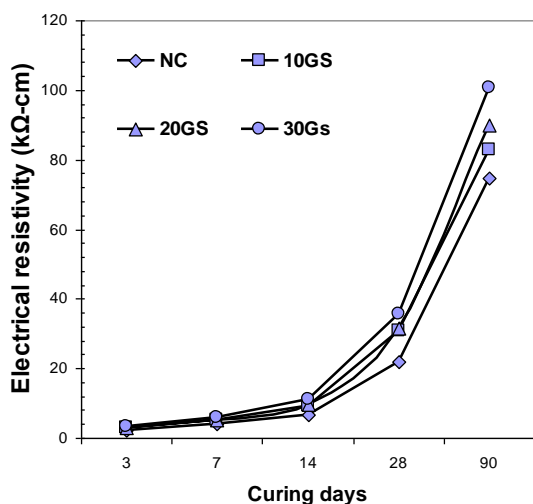
نتایج ارائه شده در شکل های ۱، ۲ و ۵ نشان می دهد که نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری در بتن پر مقاومت شاهد در سنین ۲۸ و ۹۰ روزگی به ترتیب ۵/۴ و ۵ درصد محاسبه شده است. این نسبت در بتن حاوی شیشه ضایعاتی در محدوده ۴/۳ تا ۵/۸ درصد نتیجه شد. بر مبنای Sata و همکاران [۱۶]، نسبت مقاومت کششی برزلی به مقاومت فشاری در بتن پر مقاومت حاوی پوزولان های مختلف در مقایسه با بتن با مقاومت نرمال و متوسط که در حدود ۸ تا ۱۰ درصد است، کمتر می باشد.

شکل ۵ نشان می دهد، بیشترین مقاومت کششی مربوط به بتن پر مقاومت مینا است که با جایگزینی پودر شیشه به عنوان چسباننده، در هر دو سن عمل آوری مقاومت کششی بتن کاهش می یابد. میزان کاهش مقاومت کششی برای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی پودر شیشه در سن ۲۸ روزگی ۱۳/۷٪، ۱۷/۹٪ و ۲۴/۸٪ و در سن ۹۰ روزگی ۲/۹٪، ۴/۸٪ و ۱۷/۵٪ تخمین زده شده است. لازم به ذکر است که مقایسه این ضرایب در مقدار ثابت پودر شیشه نشان می دهد که کاهش مقاومت کششی بتن پر مقاومت با گذشت زمان عمل آوری کاهش می یابد. از طرفی با حضور خرده شیشه ضایعاتی در نمونه های بتن پر مقاومت شاهد کاهش مقاومت کششی نسبت به بتن پر مقاومت مینا هستیم. در مطالعه ای توسط Mardani-Aghabaglou و همکاران [۱۷]، کاهش مقاومت کششی ناشی از شکافت در بتن معمولی با افزایش میزان خرده شیشه به عنوان ماسه مصرفی گزارش شده است. تأثیری که حضور پودر شیشه بر مقاومت کششی بتن پر مقاومت دارد، مشابه آن روندی می باشد که در مقاومت فشاری دیده شده است. به عبارتی همانند نتایج تخمین زده شده برای مقاومت فشاری، در هر سه

در تمامی درصدهای جای‌گزینی مورد مطالعه نسبت به بتن پرمقاومت مبنای بیشتر است. این نتایج دوباره می‌تواند نشان دهنده فعالیت پوزولانی پودر شیشه در بلند مدت باشد. از طرفی همانگونه که از شکل ۷ ملاحظه می‌گردد، درصدهای بالاتر پودر شیشه مقاومت الکتریکی بالاتری را در سن ۹۰ روزگی بدنبال داشته است بنحویکه میزان مقاومت الکتریکی ۹۰ روزگی بتن پرمقاومت در صورت افزودن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد پودر شیشه به ترتیب ۱۳، ۲۲ و ۴۴ درصد افزایش می‌یابد.



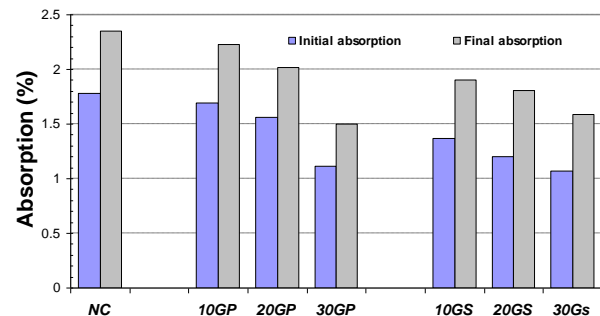
شکل ۷- مقاومت الکتریکی بتن پرمقاومت حاوی پودر شیشه ضایعاتی در سنین مختلف عمل‌آوری



شکل ۸- مقاومت الکتریکی بتن پرمقاومت حاوی خرده شیشه ضایعاتی در سنین مختلف عمل‌آوری

در سن ۲۸ روزگی مقاومت الکتریکی بتن مبنای  $21/8 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  تخمین زده شده است که در صورت استفاده از خرده شیشه

در آن مطالعه نیز جایگزینی پودر شیشه در درصد‌های مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد باعث کاهش میزان جذب آب شده است. این درحالیست که Taha و Nounu [۲۰] نشان دادند اگرچه خرده شیشه به عنوان ماسه به علت خاصیت عدم جذب آب ذاتی آن باعث کاهش جذب آب بتن می‌گردد، استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در بتن سبب افزایش تقاضا برای جذب آب می‌گردد.



شکل ۶- جذب آب بتن پرمقاومت حاوی شیشه ضایعاتی

### ۳-۵- مقاومت الکتریکی

در این مطالعه مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتن پرمقاومت در سنین مختلف شامل ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزگی محاسبه گردیده است. تاثیر جایگزینی پودر شیشه و همچنین خرده شیشه ضایعاتی بر مقاومت الکتریکی بتن پرمقاومت به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتن پرمقاومت صرف‌نظر از میزان جایگزینی پودر شیشه و یا خرده شیشه با گذشت زمان افزایش یافته است. میزان مقاومت الکتریکی بتن پرمقاومت مبنای بسته به سن عمل‌آوری آن از  $2/25 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  تا  $74/5 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  متغیر است که با جایگزینی پودر شیشه از  $1/9 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  تا  $107/4 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  و برای جایگزینی خرده شیشه ضایعاتی با ماسه در محدوده  $2/8 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  تا  $100/5 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  تغییر می‌نماید. با اینحال برای تمامی درصدهای جایگزینی خرده شیشه ضایعاتی میزان مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روزگی و بالاتر بیشتر از  $20 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  نتیجه شده است.

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که مقاومت الکتریکی بتن پرمقاومت در صورت افزودن پودر شیشه در سنین ۳ و ۷ روزگی کاهش می‌یابد. این درحالی است که با افزایش سن عمل‌آوری به بالای ۲۸ روزگی میزان مقاومت الکتریکی بتن پرمقاومت حاوی پودر شیشه

ضایعاتی مقاومت کششی بتن پرمقاومت تا  $24/8$  درصد کاهش می یابد. از طرفی نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری در نمونه های بتن پرمقاومت در محدوده  $4/3$  تا  $5/8$  درصد محاسبه شد. همچنین، روند کاهش مقاومت فشاری نمونه های بتن پرمقاومت در حضور پودر شیشه، در مقاومت کششی نیز برقرار است.

۴. کیفیت بتن پرمقاومت حاوی شیشه ضایعاتی در تمامی درصدهای جای گزینی مورد مطالعه بر اساس جذب آن در رده "خوب" طبقه بندی می گردد. از طرفی جای گزینی شیشه ضایعاتی در هر دو فرم پودر شیشه و یا خرده شیشه سبب کاهش جذب آب نسبت به بتن پرمقاومت مینا گردید.

وجود شیشه ضایعاتی به عنوان جای گزینی بخشی از مواد چسباننده و یا ماسه سبب بهبود میزان مقاومت الکتریکی نسبت به بتن مینا در سنین بالا گردیده است. در این راستا، مقاومت الکتریکی  $28$  روزگی بتن پرمقاومت برای تمامی درصدهای جای گزینی شیشه ضایعاتی مورد مطالعه بیش از  $20 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  نتیجه شده است.

#### ۵- مراجع

- [1]. Shao Y, Lefort Th, Moras S, Rodriguez D. Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research* 30;91–100, (2000).
- [2]. Shi C, Wu Y, Riefler Ch, Wang H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research* 35;987–93, (2005).
- [3]. Schwarz N, Cam H, Neithalath N. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites* 30;486–96, (2008).
- [4]. Shayan A, Xu A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research* 34; 81–9, (2004).
- [5]. Jain JA, Neithalath N. Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure. *Cement and Concrete Composites* 32;148–56, (2010).
- [6]. Tan KH, Du H. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites* 35;109–117, (2013).
- [7]. Matos AM, Sousa-Coutinho J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials* 36;205–15, (2012).
- [8]. Tunçan M, Karasu B, Yalcin M. The suitability for using glass and fly ash in Portland Cement Concrete.

ضایعاتی به عنوان جای گزین  $10$ ،  $20$  و  $30$  درصد از ماسه مصرفی به ترتیب به  $31/5$ ،  $30/85$  و  $35/8 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  افزایش می یابد (شکل ۸). چنین روندی در تمامی سنین قابل مشاهده است. لذا می توان نتیجه گرفت که استفاده از خرده شیشه ضایعاتی در تولید بتن پرمقاومت به مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به بتن پرمقاومت مینا منجر می گردد. در مطالعه ای Wang [۲۱] با بررسی تاثیر حضور خرده شیشه ضایعاتی LCD بر خواص بتن گزارش نمودند که مقاومت الکتریکی بالاتر با افزودن شیشه ضایعاتی LCD نشان دهنده تراکم و دوام بالاتر آن است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه به ارزیابی عملکرد بتن حاوی شیشه ضایعاتی به عنوان جای گزین بخشی از مواد چسباننده و یا ماسه مصرفی در نسبت پایین آب به چسباننده پرداخته شده است. بر این مبنای نتایج زیر حاصل گردید.

۱. استفاده از پودر شیشه سبب کاهش مقاومت فشاری بتن پرمقاومت مینا گردید. با این حال با  $30$  درصد جایگزینی پودر شیشه قادر به تولید بتن با مقاومت بالای  $81/6 \text{ MPa}$  در سن  $90$  روزگی می باشیم. از طرفی کاهش مقاومت فشاری نسبت به بتن پرمقاومت مینا اغلب با افزایش سن عمل آوری تقلیل یافته است که نشان دهنده فعالیت پوزولانی پودر شیشه مورد استفاده است. همچنین افزایش میزان خرده شیشه ضایعاتی در ساختار بتن پرمقاومت در اغلب موارد سبب افزایش مقاومت فشاری بتن مینا شده است به نحوی که بیشترین مقاومت فشاری اندازه گیری شده مابین تمامی نمونه ها برای  $30$  درصد جای گزینی خرده شیشه در سن  $90$  روزگی و به میزان  $106 \text{ MPa}$  می باشد.
۲. سرعت عبور امواج مافوق صوت در تمامی نمونه های پس از هفت روز بیش از  $4515 \text{ m/s}$  اندازه گیری شده است که بر این مبنای می توان کیفیت بتن پرمقاومت حاوی شیشه ضایعاتی را در رده "عالی" طبقه بندی نمود. از طرفی می توان مابین مقاومت فشاری و سرعت عبور امواج مافوق صوت در بتن پرمقاومت حاوی پودر شیشه و یا بتن پرمقاومت حاوی خرده شیشه با ضریب  $R^2$  مناسب ارتباط برقرار نمود.
۳. مقاومت کششی بتن پرمقاومت در دو سن  $28$  و  $90$  روزگی محاسبه گردید که نتایج نشان می دهد که با افزودن شیشه



- [21]. Wang HY. A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete. *Waste Management* 29;335-41, (2009)..
- Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2001), Stavenger, Norway 4: 146-52. (2001).
- [9]. Nassar RUD, Soroushian P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials* 29;368-377, (2012).
- [10]. Özkan Ö, Yüksel I. Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products. *Construction and Building Materials* 22;1288-98, (2008).
- [11]. Batayneh M, Marie I, Asi I. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management* 27;1870-76, (2007).
- [12]. Castro Sd, Brito Jd. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production* 41;7-14, (2013).
- [13]. Whitehurst EA. Soniscope tests concrete structures. *J Am Concr Inst*;47:443-4, (1951).
- [14]. Ulucan ZÇ, Türk K, Karatas M. Effect of Mineral Admixtures on the Correlation between Ultrasonic Velocity and Compressive Strength for Self-Compacting Concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing* 44; 367-374, (2008).
- [15]. Sadeghi Nik A, Lotfi Omran O. Estimation of compressive strength of self-compacted concrete with fibers consisting nano-SiO<sub>2</sub> using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials* 44;654-662, (2013).
- [16]. Sata V, Jaturapitakkul Ch, Kiattikomol K. Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials* 21;1589-98, (2007).
- [17]. Mardani-Aghabaglou A, Tuyan M, Ramyar K. Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates. *Materials and Structures* 48; 2629-2640, (2015).
- [18]. CEB-FIP. Diagnosis and assessment of concrete structures – “state of the art report”. *CEB Bull* 192;83-5. (1989).
- [۱۹]. توکلی شیوا، حیدری علی، مقیم محمدنوید، نیلفروشان محمدرضا. بررسی خواص مکانیکی و جذب آب بتن‌های با مقاومت بالا حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه. پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران. جلد ۲، شماره ۲، ۷۷-۸۷. پاییز و زمستان ۱۳۹۴.
- [20]. Taha B, Nounu Gh. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials* 22;713-20, (2008).

## Performance of concrete containing waste glass at a low water/binder ratio

Ali Kavosi

MSc. Student, Poyandegan Danesh higher education institute, Chalous, Iran

S. Yasin Mousavi \*

Assistant Professor, Golestan University, Gorgan, Iran

### Abstract

This paper aims to evaluate the properties of concrete containing waste glass at a low water/binder ratio. Totally, seven concrete mixtures made with water/binder ratio of 0.27 in which recycled glass was partially replaced either as cement or fine aggregate. The properties of waste glass concrete were evaluated by compressive strength, ultrasonic pulse velocity, splitting tensile strength, initial and final absorption and electrical resistivity. Results showed that although, glass powder inclusion decreases the compressive strength of high-strength concrete (HSC), the use of waste glass as fine aggregate increased the 90-days compressive strength of reference HSC from 102.3 MPa to 106 MPa. Furthermore, good correlations can be found between UPV and compressive strength, with  $R^2$  values equal to 0.87 and 0.79 for HSC with glass powder and HSC containing glass sand, respectively. Splitting tensile strength of HSC with waste glass was lower than those obtained for reference HSC. A low absorption (below 3% at 30 min) can be achieved for waste glass mixes classified as “good” concrete quality. The electrical resistivity of HSC containing waste glass is determined to be higher than 20 k $\Omega$ -cm at the age of 28-days. In general, waste glass can be used either as cement or fine aggregate in the production of HSC with acceptable mechanical and durability properties.

**Keywords:** High-Strength Concrete, Waste Glass, Compressive Strength, Electrical Resistivity.

---

\* Corresponding Author: y.mousavi@gu.ac.ir