

مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر افزودن الیاف شیشه در بتن پودری واکنش‌پذیر

علی حیدری* (دانشیار)

فرید نادری شورایی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۱ (دوره ۲ - شماره ۱/۴، ص. ۳۶-۲۵)، پژوهشی

بتن پودری واکنش‌پذیر، یکی از انواع بتن‌های پر مقاومت است، که با توجه به تراکم مناسب ریزساختار، مقاومت فشاری بالایی در محدوده‌ی ۲۰۰ تا ۸۰۰ مگاپاسکال دارد. از دیگر ویژگی‌های بتن پودری واکنش‌پذیر، مدول کشسانی بالا، تخلخل کم و جذب آب پایین آن است. در پژوهش حاضر، با بررسی رفتار مقاومتی و ریزساختار بتن مشاهده شد که با افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر از ۱ به ۱/۲، شرایط تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته بهبود یافته و ریزترک‌ها کاهش پیدا کرده است. همین امر موجب بهبود خواص بتن، نظیر: مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب در نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ در مقایسه با نسبت ماسه به سیمان ۱ شده است. همچنین مطابق نتایج به دست آمده، افزودن ۴ تا ۵ درصد حجم بتن الیاف شیشه، ویژگی‌های بتن پودری واکنش‌پذیر نظیر: مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی و رفتار دوامی بتن در برابر نفوذ آب بهبود یافته است. این در حالی است که افزودن ۶٪ حجم بتن الیاف شیشه، خواص مقاومتی بتن پودری واکنش‌پذیر را تضعیف کرده است.

واژگان کلیدی: بتن پودری واکنش‌پذیر، الیاف شیشه، ماسه‌ی سیلیسی، میکروسکوپ الکترونی.

heidari@sku.ac.ir
Fariidnaderii@gmail.com

۱. مقدمه

(۲۰۱۸) بیان کرد که بتن پودری واکنش‌پذیر در برابر یخ‌زدگی و نفوذ یون‌ها مقاوم است.^[۶] میهب^۲ و همکاران (۲۰۲۰)، گزارش کردند که به دلیل عدم استفاده از سنگ‌دانه‌های درشت، بتن پودری واکنش‌پذیر در نظر برخی پژوهشگران به عنوان ملات شناخته می‌شود، اما در مقابل برخی دیگر از آنها بر این باورند که وجود الیاف و مقدار بالای سیمان، دلیل کافی برای نام‌گذاری بتن بر ماده‌ی مذکور است.^[۸] در مطالعات دیگری، حیدری و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که مقاومت فشاری بتن، مهم‌ترین خصوصیت آن است؛ عموماً بتن‌های با مقاومت فشاری بیش از ۵۰ مگاپاسکال را بتن پرمقاومت می‌نامند. یکی از انواع بتن‌های پرمقاومت، بتن پودری واکنش‌پذیر است، که با هزینه‌ی قابل توجهی می‌تواند به مقاومت بالای ۱۰۰ مگاپاسکال برسد.^[۹]

از عوامل مؤثر در رسیدن به چنین مقاومت‌های بالایی در بتن پودری واکنش‌پذیر را می‌توان به استفاده از شن و ماسه با دانه‌بندی و شکل مناسب، افزایش مقدار سیمان مصرفی، محدود کردن بزرگ‌ترین دانه، استفاده از ماسه با مدول نرمی مناسب و نسبت ماسه به سیمان مناسب برای همگنی بیشتر را نام برد، که طبق گزارش‌های ریچارد و همکاران (۱۹۹۵)، بتن پودری واکنش‌پذیر را به یک بتن قدرتمند تبدیل کرده‌اند.^[۱۰]

مطالعات باقری و همکاران (۲۰۰۷)، در زمینه‌ی بتن پودری واکنش‌پذیر نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری بتن، رفتار آن ثبات بیشتری می‌یابد؛ لذا رفتار بتن

بتن بدون شک پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی مصرفی عصر حاضر در دنیاست و بسیاری از سازه‌های کوچک و بزرگ ساختمانی و نیز بسیاری از سازه‌های بتندی و دریایی، اسکله‌ها و پل‌ها از بتن ساخته می‌شوند. ضمن آن‌که حتی در ساختمان‌های با اسکلت فولادی نیز، بسیاری از قسمت‌ها از جمله: پی‌ها، کف‌ها و اندودها از بتن و یا ملات تشکیل شده‌اند. بنابراین لازم است مهندسان عمران و دست‌اندرکاران صنعت ساختمان، به خوبی بتن و خصوصیات آن را شناخته و درک کاملی از عوامل تأثیرگذار در رفتار و کیفیت بتن داشته باشند.^[۱]

یکی از نوآوری‌هایی که در زمینه‌ی فناوری بتن در دهه‌ی نود میلادی در فرانسه رخ داده است، ابداع بتن پودری واکنش‌پذیر است. علت توجه پژوهشگران به بتن پودری واکنش‌پذیر، ویژگی‌های رفتاری و مکانیکی عالی آن است. بتن پودری واکنش‌پذیر از: ماسه‌ی سیلیسی، پودر سیلیس، سیمان، میکروسیلیس، پودر کوارتز، آب، فوق روان‌کننده و در صورت نیاز به مقاومت کششی یا جذب انرژی بالا، الیاف فولادی تشکیل شده است. بتن پودری واکنش‌پذیر، علاوه بر مقاومت‌های فشاری و کششی بالا، دارای خصوصیات عملکردی بالایی، نظیر: مقاومت سایشی و خوردگی بالا، نفوذپذیری کم و تخلخل پایین، و نیز دوام زیاد است.^[۵-۲] همچنین عادل قسیم^۱

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۳/۲، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۱۹، پذیرش ۱۴۰۱/۶/۲۹

DOI:10.24200/J30.2022.60199.3098

پودری واکنش‌پذیر نسبت به بتن مقاومت بالای معمولی تردتر است.^[۱۱] در ادامه، بررسی خواص بتن پودری واکنش‌پذیر ژیان زین^۳ و همکارانش (۲۰۰۴)، طی مطالعات خود نشان داده‌اند که در بتن مذکور برای رسیدن به تخلخل کمتر و یک بتن متراکم‌تر می‌توان از برخی مواد پوزلانی استفاده کرد.^[۱۲] لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی بر روی تأثیر سنگ‌دانه‌ها و افزودنی‌های مختلف در بتن پودری واکنش‌پذیر انجام شده است، که به عنوان مثال، تأثیر افزودن و جایگزینی پودر سنگ آهک، ضایعات سنگ گرانیت، افزودن سنگ‌دانه‌های سبک جهت رسیدن به بتنی با وزن کمتر و یا افزودن ضایعات سرباره‌ی تیتانیوم جهت بهبود خواص به بتن پودری واکنش‌پذیر اشاره کرد.^[۱۳-۱۶]

بتن پودری واکنش‌پذیر، از جمله مواد ساختمانی است که تا امروزه در صنعت ساخت و ساز بسیار کم استفاده شده و تاکنون به صورت عملی فقط در تیرهای پیش‌تینده‌ی x شکل، حفاظت و نگهداری از زباله‌های هسته‌یی و ایزوله کردن ضایعات هسته‌یی در چندین پروژه در اروپا به کار رفته است. به عنوان نمونه‌یی دیگر جهت کاربرد بتن پودری واکنش‌پذیر در صنعت ساخت و ساز، می‌توان به ساخت یک پل با مقاطع بتنی بهینه به علت مقاومت بالای بتن پودری واکنش‌پذیر در کبک اشاره کرد.^[۱۷، ۱۸]

با بررسی ویژگی‌های بتن پودری واکنش‌پذیر در مطالعات سایر پژوهشگران، باید توجه کرد که در کنار داشتن ویژگی‌های مناسب ذکر شده، بتن پودری واکنش‌پذیر در مقابل تنش‌های کششی، عملکرد ضعیفی دارد، که ضعف اخیر در بتن‌های معمولی با مسلح کردن آن به وسیله‌ی میلگردهای فولادی و این فرض که بتن و فولاد، یک ماده‌ی همگن و ایزوتروپ را تشکیل می‌دهند، رفع می‌شود؛ در حالی که چنین فرضی به علت عدم گسترش میلگرد در کل مقطع، صحیح به نظر نمی‌رسد. برای رفع مشکل اخیر، باید بتن پودری واکنش‌پذیر به یک کامپوزیت تبدیل شود. کامپوزیت ترکیبی است که از مخلوط کردن مواد با خصوصیات مختلف جهت تولید ماده‌ی جدید با خصوصیات بهبود یافته به وجود می‌آید.

ناصر و همکاران (۲۰۱۹)، در گزارش‌های خود بیان کردند که بتن حاوی الیاف در حقیقت نوعی کامپوزیت است که با به کارگیری الیاف تقویت‌کننده‌ی داخل مخلوط بتن، مقاومت‌های کششی و فشاری آن را افزایش می‌دهد. ترکیب اخیر، امکان استفاده از بتن به عنوان یک ماده‌ی شکل‌پذیر جهت تولید سطوح مقاوم پُرانحنا را فراهم می‌آورد.^[۱۹]

کرنچل و استانگ^۴ (۱۹۸۹)، نیز در گزارش‌های خود بیان کردند که با کاربرد مناسب الیاف به هم پیوسته به شکل‌پذیری کششی ۱۰۰ برابر نسبت به بتن معمولی دست یافتند.^[۲۰]

مطالعات انجام شده توسط سروشیان و همکاران (۱۹۹۰)، نشان می‌دهد که فاصله‌ی بین الیاف‌ها و مقاومت کششی، تعداد میانگین الیاف‌ها در واحد سطح و مقاومت فشاری بتن ارتباط وجود دارد. البته این ارتباط در تعداد میانگین الیاف‌ها و مقاومت فشاری تأثیر بیشتری دارد.^[۲۱]

تاکنون مصالح بسیاری جهت بهبود خواص بتن پودری واکنش‌پذیر به آن افزوده شده‌اند. الیاف شیشه‌ای با توجه به خواص مناسبی که به بتن معمولی می‌بخشد، می‌تواند در بتن پودری واکنش‌پذیر نیز عملکرد مناسبی نشان دهد. از این رو در پژوهش حاضر، به بررسی عملکرد الیاف شیشه‌ای در بتن پودری واکنش‌پذیر پرداخته شده است. در پژوهش حاضر به این نکته توجه شده است که بتن پودری واکنش‌پذیر، علاوه بر داشتن مزایای بسیار، یک نقطه ضعف اساسی دارد. میزان بالای مصرف سیمان در فرایند تولید بتن پودری واکنش‌پذیر، علاوه بر افزایش هزینه‌ی ساخت بتن مذکور، سبب ایجاد گرمای هیدراتاسیون زیادی می‌شود.

طی گزارش تام و همکاران (۲۰۱۲)، گرمای هیدراتاسیون بالا در بتن پودری واکنش‌پذیر می‌تواند مشکلاتی را از لحاظ مقاومت و دوام ایجاد کند؛ همچنین بالا رفتن گرمای هیدراتاسیون سبب مشکلات در جمع‌شدگی بتن پودری واکنش‌پذیر می‌شود.^[۲۲] به منظور امتداد مطالب بیان شده در پژوهش حاضر، ابتدا افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر ارزیابی و پس از آن با افزودن مقادیر مختلف نسبت الیاف شیشه‌ای به نمونه‌های ساخته‌شده، رفتار بتن بررسی شده است.

۲. مطالعه‌ی آزمایشگاهی

افزایش نسبت ماسه به سیمان تا میزان مشخصی موجب اصلاح رفتار بتن در برخی ویژگی‌ها می‌شود.^[۲۳] جهت بررسی رفتار بتن پودری واکنش‌پذیر در افزایش نسبت ماسه به سیمان، ابتدا ۵ طرح با نسبت‌های ماسه به سیمان ۱، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۲۵ و ۱/۳ ارزیابی شده و سپس با الیاف شیشه‌ای به میزان ۴، ۵ و ۶ درصد حجم بتن به هر کدام از نسبت‌های ذکر شده، مناسب‌ترین نسبت جایگزینی ماسه به سیمان و درصد الیاف افزوده شده به بتن پودری واکنش‌پذیر مشخص شده است.

۲.۱. مواد مصرفی و طرح‌های اختلاط

مصالح مصرفی در طی فرایند ساخت آزمایشگاهی، شامل: سیمان، ماسه‌ی سیلیسی، آب، فوق روان‌کننده و الیاف شیشه‌ای بوده است. به جهت میزان بالای سیمان، سیمان مصرف شده جهت ساخت نمونه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ و ۱-۵۲۵ بوده است. در پژوهش حاضر، از سیمان ۱-۵۲۵ شهرکرد استفاده شده است. ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده از معادن شرکت ماسه‌ی ریخته‌گری چیروک طیس تهیه شده است. از آنجایی که میزان سیمان استفاده شده در طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنش‌پذیر زیاد بوده است، سیمان به عنوان یکی از تأثیرگذارترین مواد در ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر شناخته می‌شود؛ لذا شناخت دقیق ترکیب‌های شیمیایی سیمان و ماسه‌ی سیلیسی مصرفی در بتن، موجب تحلیل دقیق‌تر رفتار آن می‌شود. مشخصات شیمیایی سیمان و ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. جهت بررسی مواد تشکیل‌دهنده‌ی ماسه‌ی سیلیسی، نتایج آزمون XRF مطابق استاندارد ASTM E ۱۶۲۱-۵ بیان شده است.^[۲۴]

استفاده از سنگ‌دانه‌های ریز با اندازه‌ی بیشینه‌ی مشخص، موجب رسیدن به یک بتن همگن با ساختار میکروسکوپی عالی می‌شود. اندازه‌ی دانه‌ها در بتن

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان و ماسه‌ی سیلیسی.

سیمان شهرکرد	ماسه‌ی سیلیسی	
۰/۷۹ ± ۰/۶۲	-	Insol
۲۰/۳۰ ± ۰/۲۰	۹۷-۹۹	SiO ₂
۵/۶۵ ± ۰/۱۵	۰/۴-۱/۷	Al ₂ O ₃
۳/۳۰ ± ۰/۱۵	۰/۲-۰/۶	Fe ₂ O ₃
۶۵/۷۰ ± ۰/۲۰	۰/۰۷-۰/۲	CaO
≤ ۱/۶	۰	MgO
≤ ۲/۸	-	SO ₃
۰/۲۷ ± ۰/۰۳	۰-۰/۰۱	Na ₂ O
۰/۵۸ ± ۰/۰۴	۰/۰۲-۰/۰۶	K ₂ O

جدول ۳. مشخصات الیاف شیشه‌ی مصرفی.

مقدار	ویژگی
$2/68 \text{ g/cm}^3$	وزن مخصوص
$14 \mu\text{m}$	قطر الیاف
کم	رسانایی الکتریکی
زیاد	مقاومت شیمیایی
بیشینه‌ی ۳٪	رطوبت
۵۵٪	تخریب در اثر جرقه
$86^\circ\text{C} - 158^\circ\text{C}$	نقطه‌ی نرم شدن
$1 \times 10^6 \text{ psi} - 72 \text{ Gpa}$	مدول کشسانی
$25 \times 10^3 \text{ psi} - 17 \text{ Mpa}$	مقاومت کششی
$\leq 16/0$	$\%Z_{\text{r}}O_2$
$15^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$	شرایط نگهداری

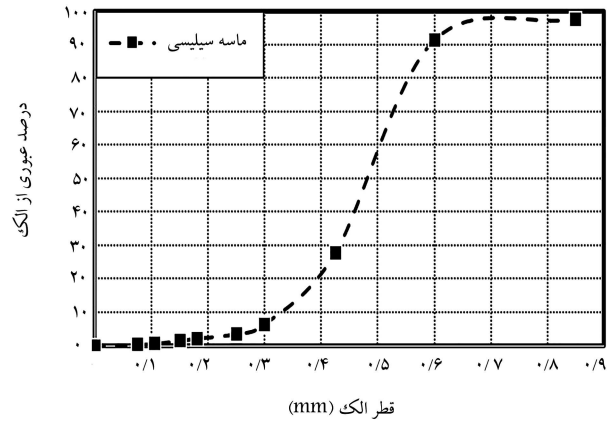
مختلف، تفاوت دارد. همچنین اضافه کردن الیاف شیشه به شدت در کاهش کارایی بتن تأثیرگذار است.^[۲۷، ۲۸] به همین منظور در طرح‌های حاوی الیاف شیشه با افزایش درصد الیاف شیشه در ساخت نمونه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر با توجه به افزایش حجم مصالح خشک، نسبت فوق روان‌کننده به سیمان به منظور حصول کارایی در مقایسه با طرح‌های فاقد الیاف شیشه افزایش پیدا کرده است.

۳.۲. روش انجام آزمایش

بتن پودری واکنش‌پذیر، یک بتن ایزوتروپ و همگن با روانی بالا است.^[۴] به منظور ساخت نمونه‌های بتنی مناسب با ویژگی‌های مطلوب، در مرحله‌ی اول، مصالح خشک، شامل سیمان و ماسه‌ی سیلیسی به طور کامل با یکدیگر مخلوط شده‌اند. در مرحله‌ی دوم، ۸٪ از آب مورد نیاز طرح به همراه دوز کامل فوق روان‌کننده به مخزن همزن اضافه و به مدت ۴ الی ۵ دقیقه، عملیات اختلاط انجام شده است. در مرحله‌ی سوم، الیاف شیشه (در طرح‌های حاوی الیاف) به مخلوط اضافه و با اضافه کردن ۲۰٪ آب باقی‌مانده‌ی طرح، عملیات اختلاط ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه ادامه یافته است.^[۲۹] سپس نمونه‌های بتن به قالب‌ها منتقل و به مدت ۲۴ ساعت فرایند گیرش اولیه انجام شده است.

جهت بررسی رفتار بتن پودری واکنش‌پذیر در افزایش نسبت ماسه به سیمان و همچنین تأثیر افزودن الیاف شیشه به آن، آزمایش‌های مکانیکی نظیر: مقاومت فشاری (ASTM C۳۹)،^[۳۰] مقاومت کششی (ASTM C۴۹۶)،^[۳۱] مقاومت خمشی (ASTM C۲۹۳)،^[۳۲] نفوذناپذیری (EN۱۲۳۹۰-۸)^[۳۳] و جذب آب (ASTM ۴۶۲-۹۷)،^[۳۴] انجام شده است.

جهت انجام آزمون مقاومت فشاری از قالب‌های مکعبی به ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر استفاده شده است. برای آزمون‌های مقاومت کششی، نفوذناپذیری و جذب آب از قالب‌های استوانه‌ی 10×20 سانتی‌متر و برای آزمون مقاومت خمشی از قالب مکعبی $4 \times 4 \times 16$ سانتی‌متر استفاده شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی پس از ساخت به قالب‌ها منتقل و پس از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج شدند. نمونه‌ها مطابق شکل ۲ تا زمان انجام آزمون به استخر آب آهک اشباع منتقل شدند. لازم به ذکر است که تمام نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C۱۹۲^[۳۵] از زمان قالب‌گیری تا لحظه‌ی انجام آزمون در دمای (2 ± 23) درجه‌ی سلسیوس به صورت مرطوب در استخر مطابق شکل ۳، عمل‌آوری و با توجه به شرایط آزمون مد نظر از استخر خارج و بررسی شده‌اند.



شکل ۱. دانه بندی ماسه‌ی سیلیسی.

جدول ۴. مشخصات فوق روان‌کننده‌ی مصرفی.

مشخصه	شرح
شکل ظاهری	مایع
رنگ	شفاف یا شیری
pH	۵ ~ ۷
Na ₂ O	کمتر از ۱/۵٪
مقدار کلراید	کمتر از ۱٪
چگالی	$1.0 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$
میزان مصرف	۵/۰ الی ۲ درصد وزن سیمان

پودری واکنش‌پذیر در بازه‌ی ۲۰۰ تا ۶۰۰ میکرومتر است.^[۱۰] به همین منظور ماسه‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر باید دارای ابعاد مجاز سنگ‌دانه‌ی بتن پودری واکنش‌پذیر باشد. دانه بندی ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده در فرایند ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۱ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، ۸۹/۱٪ دانه‌های ماسه سیلیسی در بازه‌ی مجاز جهت ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر قرار دارد. فوق روان‌کننده‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر، Carboxal SR ۵۱۰۰ بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات اثر تهیه شده از شرکت الیز شیمی آسیا بوده است، که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

الیاف شیشه‌ی مصرف شده از نوع AR بوده است، که به جهت کارایی مناسب، به ابعاد ۱۰ میلی‌متر برش خورده است. مشخصات الیاف شیشه در جدول ۳ ارائه شده است. الیاف شیشه‌ی AR باید همراه با سیمان پرتلند استفاده شوند، زیرا زیرکونیوم موجود در آن، مانعی برای واکنش میان سیمان و الیاف است.^[۲۵]

۲.۲. معرفی طرح‌های اختلاط

مطابق جدول ۴، در پژوهش حاضر مجموعاً ۲۰ طرح اختلاط، شامل ۵ طرح بدون الیاف شیشه با نسبت‌های ماسه به سیمان ۱ تا ۱/۳ و ۱۵ طرح با نسبت ماسه به سیمان ۱ تا ۱/۳ حاوی ۴، ۵ و ۶ درصد حجم بتن الیاف شیشه ساخته و ارزیابی شده‌اند.

به منظور یکسان بودن کارایی طرح‌های ساخته شده، نمونه‌ها تحت آزمایش کارایی با میز سیلان مطابق با استاندارد BS ۱۸۸۱ قرار گرفتند و تمام نمونه‌ها با کارایی در محدوده‌ی ۱۹۰ میلی‌متر ساخته شدند. افزایش نسبت ماسه به سیمان موجب کاهش روانی بتن می‌شود.^[۲۶] از این رو نسبت آب به سیمان در ساخت طرح‌های

جدول ۴. معرفی طرح اختلاط نمونه‌های بتن.

نام طرح	مصالح (kg/m^3)				الیاف شیشه	نسبت ماسه به سیمان	نسبت آب به سیمان	الیاف شیشه (% در حجم بتن)
	سیمان	ماسه	آب	فوق روان‌کننده				
Cs1	۹۷۲/۸۵	۹۷۲/۸۵	۱۹۴/۵۷	۹/۷۳	۰	۱	۰/۲	۰
Cs1/1	۹۲۶/۷۲	۱۰۱۹/۴۰	۱۹۴/۶۱	۹/۲۷	۰	۱/۱	۰/۲۱	۰
Cs1/2	۸۸۱/۱۵	۱۰۵۷/۳۸	۲۰۲/۶۶	۸/۸۱	۰	۱/۲	۰/۲۳	۰
Cs1/25	۸۶۰	۱۰۷۵	۲۰۶/۴	۸/۶	۰	۱/۲۵	۰/۲۴	۰
Cs1/3	۸۳۶/۵۸	۱۰۸۷/۵۵	۲۱۷/۵۱	۸/۳۷	۰	۱/۳	۰/۲۶	۰
Cs1G4	۹۳۶/۸۲	۹۳۶/۸۲	۱۸۷/۳۶	۱۴/۰۵	۷۴/۹۵	۱	۰/۲	۴
Cs1/1G4	۸۹۳/۹۷	۹۸۳/۳۷	۱۸۷/۷۳	۱۳/۴۱	۷۱/۵۲	۱/۱	۰/۲۱	۴
Cs1/2G4	۸۵۱/۴۹	۱۰۲۱/۷۸	۱۹۵/۸۴	۱۲/۷۷	۶۸/۱۲	۱/۲	۰/۲۳	۴
Cs1/25G4	۸۳۱/۷۲	۱۰۳۹/۶۵	۱۹۹/۶۱	۱۲/۴۸	۶۶/۵۴	۱/۲۵	۰/۲۴	۴
Cs1/3G4	۸۰۹/۷۹	۱۰۵۲/۷۳	۲۱۰/۵۵	۱۲/۱۵	۶۴/۷۸	۱/۳	۰/۲۶	۴
Cs1G5	۹۲۷/۹۲	۹۲۷/۹۲	۱۸۵/۵۸	۱۵/۷۷	۹۲/۷۹	۱	۰/۲	۵
Cs1/1G5	۸۸۵/۸۷	۹۷۴/۴۵	۱۸۶/۰۳	۱۵/۰۶	۸۸/۵۹	۱/۱	۰/۲۱	۵
Cs1/2G5	۸۴۴/۱۳	۱۰۱۲/۹۶	۱۹۴/۱۵	۱۴/۳۵	۸۴/۴۱	۱/۲	۰/۲۳	۵
Cs1/25G5	۸۲۴/۷۰	۱۰۳۰/۸۸	۱۹۷/۹۳	۱۴/۰۲	۸۲/۴۷	۱/۲۵	۰/۲۴	۵
Cs1/3G5	۸۰۳/۱۴	۱۰۴۴/۰۸	۲۰۸/۸۲	۱۳/۶۵	۸۰/۳۱	۱/۳	۰/۲۶	۵
Cs1G6	۹۱۹/۲۰	۹۱۹/۲۰	۱۸۳/۸۴	۱۷/۴۶	۱۱۰/۳۰	۱	۰/۲	۶
Cs1/1G6	۸۷۷/۹۱	۹۶۵/۷۰	۱۸۴/۳۶	۱۶/۶۸	۱۰۵/۳۵	۱/۱	۰/۲۱	۶
Cs1/2G6	۸۳۶/۹۰	۱۰۰۴/۲۸	۱۹۲/۴۹	۱۵/۹۰	۱۰۰/۴۳	۱/۲	۰/۲۳	۶
Cs1/25G6	۸۱۷/۸۰	۱۰۲۲/۲۵	۱۹۶/۲۷	۱۵/۵۴	۹۸/۱۴	۱/۲۵	۰/۲۴	۶
Cs1/3G6	۷۹۶/۵۹	۱۰۳۵/۵۷	۲۰۷/۱۱	۱۵/۱۴	۹۵/۵۹	۱/۳	۰/۲۶	۶

راهنما: در نام‌گذاری طرح عدد پس از Cs بیانگر نسبت ماسه به سیمان و عدد پس از G درصد الیاف طرح را مشخص می‌کند.

۳. ارائه‌ی نتایج

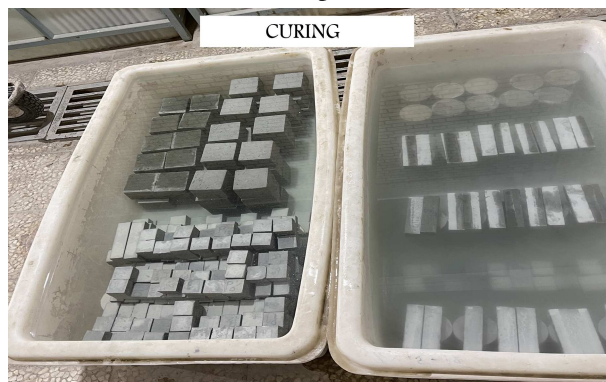
۳.۱. نتایج مقاومت فشاری

جهت بررسی مقاومت فشاری بتن، ابتدا نمونه‌ها در سنین ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز از استخر خارج شدند و درحالت اشباع با سطح خشک در محفظه‌ی جک بتن‌شکن قرار گرفتند. سرعت بارگذاری جک برای نمونه‌های مکعبی $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متری، 90° نیوتن بر ثانیه بوده است. به جهت بررسی تأثیر نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد الیاف شیشه در شکل ۴ و به جهت بررسی تأثیر افزودن درصد‌های مختلف الیاف شیشه در بتن پودری واکنش‌پذیر، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۴، ۵ و ۶ درصد الیاف شیشه به ترتیب در شکل‌های ۵ الی ۷ مشاهده می‌شوند.

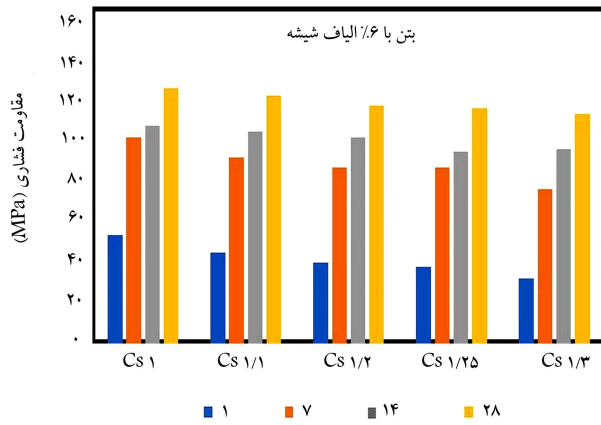
به منظور بررسی دوام نمونه‌ها هنگام خارج شدن از قالب در سن ۱ روز بر مبنای نتایج شکل ۴، با افزایش نسبت ماسه به سیمان از نسبت ۱ تا $1/3$ مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است، که بر این مبنای نمونه‌های حاوی سیمان بیشتر به علت گیرش اولیه‌ی سیمان ۱-۵۲۵ جهت خارج شدن از قالب، دوام مناسب‌تری دارند. در سن ۷ روز، اختلاف مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی نسبت ماسه به سیمان ۱ با سایر نمونه‌ها کاهش یافته است. پس از سن ۱۴ روز، افزایش نسبت ماسه به سیمان تا نمونه‌ی Cs1/2 (حاوی نسبت ماسه به سیمان $1/2$)، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن را افزایش داده و پس از آن، به ازاء مقادیر بیشتر ماسه به سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است. در سن ۲۸ روز، بیشترین مقاومت فشاری مربوط



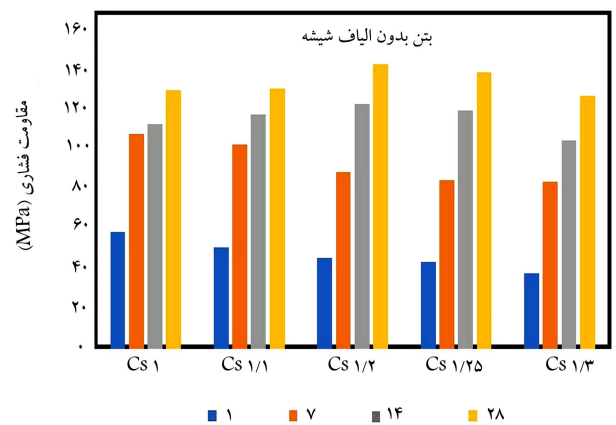
شکل ۲. تصویر سه طرح از نمونه‌های ساخته شده.



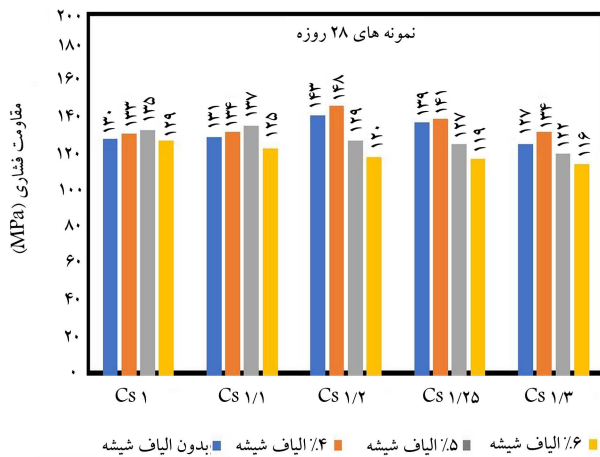
شکل ۳. استخر عمل‌آوری نمونه‌های بتن.



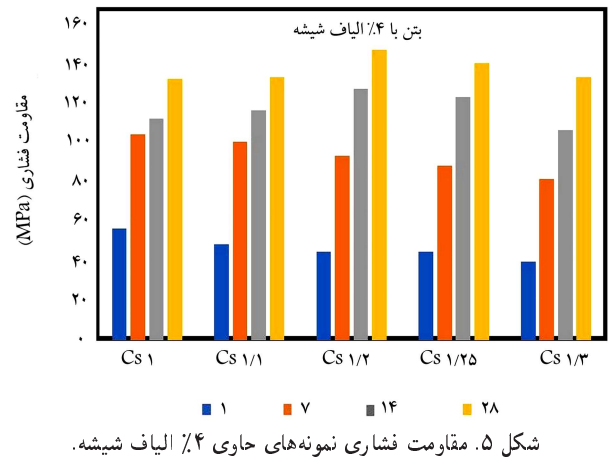
شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۶٪ الیاف شیشه.



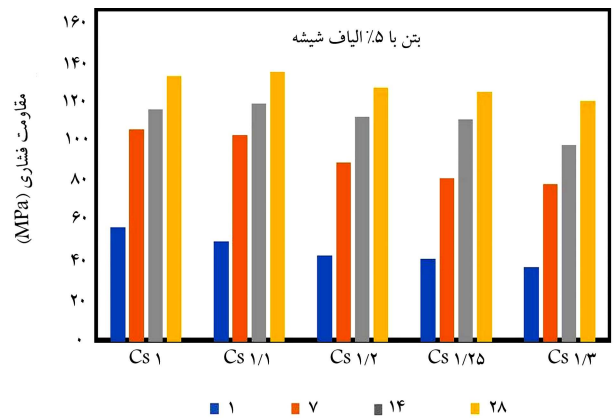
شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد الیاف شیشه.



شکل ۸. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتن.



شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۴٪ الیاف شیشه.



شکل ۶. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵٪ الیاف شیشه.

نشان داده شده است. در سن ۱۴ روز، مقاومت فشاری نمونه‌ها تا نسبت ماسه به سیمان ۱/۱ تقریباً مشابه با نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه بوده و پس از آن به ازاء نسبت ماسه به سیمان بیشتر، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است. در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری تمام نمونه‌های بتن نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه، افزایش پیدا کرده است؛ که بهترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ی Cs 1/2 G ۴ با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۱۴۸ مگاپاسکال بوده است.

بر مبنای نتایج شکل ۶، مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با افزودن ۵٪ حجم بتن الیاف شیشه به بتن پودری واکنش‌پذیر در سن ۱ روزه نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه شکل ۴ کاهش یافته است. در سن ۷ روز، مقاومت فشاری نمونه‌ی Cs 1 G ۵ با نمونه‌ی Cs 1 برابر بوده و پس از آن مقاومت فشاری نمونه‌ها تا نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ افزایش یافته است و به ازاء مقادیر بیشتر ماسه به سیمان در نمونه‌های Cs 1/2.5 G ۵ و Cs 1/3 G ۵، مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه (Cs 1/2.5 و Cs 1/3) کاهش پیدا کرده است. در سن ۱۴ و ۲۸ روز فقط در نمونه‌های Cs 1 G ۵ و Cs 1/2.5 G ۵ مقاومت فشاری افزایش یافته است، که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ی Cs 1/2.5 G ۵ با ۱۳۷ مگاپاسکال بوده است.

بر مبنای نتایج شکل ۷، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی افزودن ۶٪ حجم بتن الیاف شیشه به بتن پودری واکنش‌پذیر، در سن ۱۴ مختلف نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه شکل ۴ کاهش یافته است.

به طور کلی، مطابق آنچه در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در نسبت‌های ماسه به

به نمونه‌ی Cs 1/2 با ۱۴۳ مگاپاسکال بوده است، که به میزان ۱۰٪ از مقاومت فشاری نمونه‌ی Cs 1 بیشتر است. از طرف دیگر، نمونه‌ی Cs 1/2.5 با ۵٪ افزایش نسبت ماسه به سیمان رفتار مشابه با نمونه‌ی Cs 1/2 داشته است. بنابراین تأثیر گام افزایشی ۱۰٪ در مقایسه با گام افزایشی ۵٪ قابل توجه است.

مطابق شکل ۵، افزودن ۴٪ حجم بتن الیاف شیشه به بتن پودری واکنش‌پذیر، مقاومت فشاری نمونه‌های ۱ و ۷ روزه را نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شیشه شکل ۴ کاهش داده است. در سن ۷ روز، مقاومت فشاری نمونه‌های Cs 1/2 G ۴ و Cs 1/2.5 G ۴ به میزان ۵/۶ و ۴/۶ درصد، بیشتر از نمونه‌های فاقد الیاف شیشه

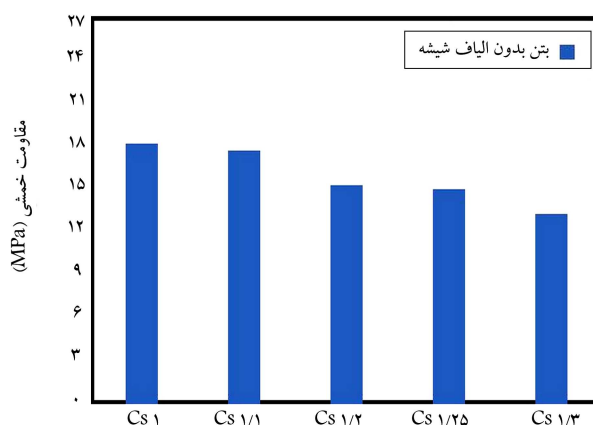
سیمان ۱ و ۱/۱، افزودن ۵٪ حجم بتن الیاف شیشه و در نسبت‌های ۱/۲، ۱/۲۵، ۱/۳ و ۱/۳، افزودن ۴٪ حجم سیمان الیاف شیشه، موجب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها شده است.

۲.۳. نتایج مقاومت خمشی

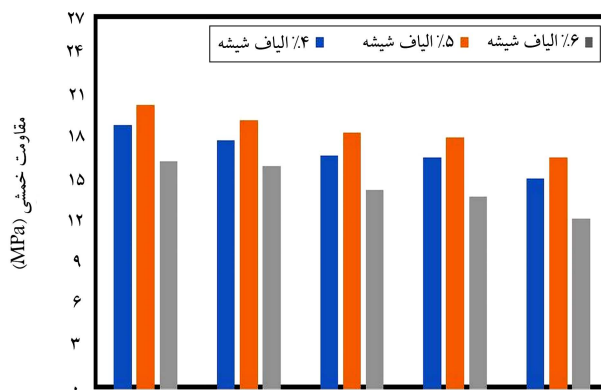
جهت بررسی مقاومت خمشی بتن، طبق استاندارد، نمونه‌ها در سن ۲۸ روز پس از عمل‌آوری بررسی شدند. سرعت بارگذاری جک برای نمونه‌های $4 \times 4 \times 16$ سانتی‌متر بر روی ۵۵ نیوتن بر ثانیه تنظیم شده بود. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های فاقد الیاف شیشه در شکل ۹ و نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی افزودن ۵، ۶ درصد حجم بتن، الیاف شیشه‌ی بتن پودری واکنش‌پذیر در شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند.

مطابق شکل ۹، افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر موجب کاهش مقاومت خمشی نمونه‌های بتن شده است. بیشترین کاهش مربوط به افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱/۱ به ۱/۲ به میزان ۱۳/۴۲٪ بوده است. به طور کلی، کاهش میزان سیمان با افزایش نسبت ماسه به سیمان در طرح‌ها موجب کاهش چسبندگی بین ریزدانه‌ها در بتن می‌شود، همین امر موجب پایین آمدن تحمل ریزدانه‌ها و کاهش مقاومت خمشی در نمونه‌های بتن شده است. [۳۶]

مطابق شکل ۱۰، در تمام نسبت‌های ماسه به سیمان، افزودن ۴ و ۵ درصد حجم بتن الیاف شیشه موجب افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه شده است، که افزایش اخیر در نمونه‌های حاوی ۵٪ حجم



شکل ۹. مقاومت خمشی نمونه‌های فاقد الیاف شیشه.



شکل ۱۰. مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف شیشه.

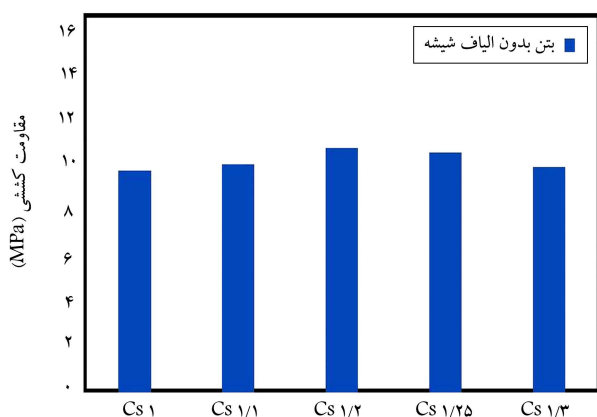
بتن الیاف شیشه بیشتر بوده است. مطابق با نتایج بیشترین افزایش مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی افزودن ۴٪ حجم بتن الیاف شیشه، مربوط به نمونه‌های Cs 1/25G 4 و Cs 1/3G 4 با افزایش ۱۱/۷ و ۱۴/۳۴ درصد نسبت به نمونه‌های Cs 1/3 و Cs 1/25 بوده است. این مقادیر برای نمونه‌های Cs 1/25G 5 و Cs 1/3G 5 به میزان ۲۱/۴ و ۲۴/۰۳ درصد نشان داده شده است. همچنین در تمام نسبت‌های ماسه به سیمان مطابق با نتایج شکل ۱۰، افزودن ۶٪ حجم سیمان الیاف شیشه موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است.

۳.۳. نتایج مقاومت کششی

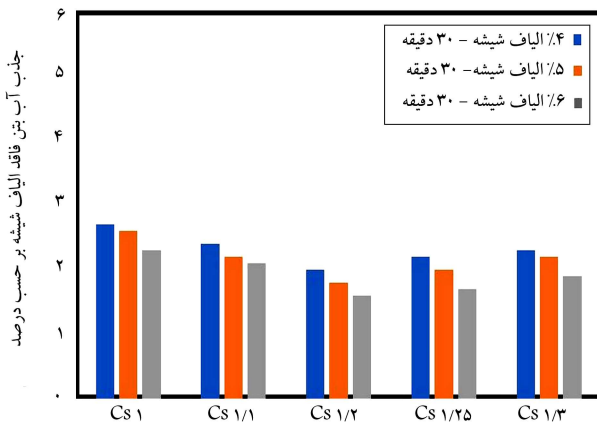
جهت بررسی مقاومت کششی بتن، نمونه‌های با سن ۲۸ روزه پس از خارج شدن از استخر، با قرارگیری زیر جک به روش برزیلین بررسی شدند. سرعت بارگذاری جک برای نمونه‌های استوانه‌ی 10×20 سانتی‌متر، بر روی ۹۰ نیوتن بر ثانیه تنظیم شده بود. به جهت بررسی تأثیر نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر، نتایج مقاومت کششی نمونه‌های فاقد الیاف شیشه در شکل ۱۱ و به جهت بررسی تأثیر افزودن درصد‌های مختلف الیاف شیشه در بتن پودری واکنش‌پذیر، نتایج مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۴، ۵ و ۶ درصد الیاف شیشه در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر مطابق با نتایج شکل ۱۱، موجب افزایش مقاومت کششی نمونه‌های بتن شده است. افزایش نسبت ماسه به سیمان تا نسبت ۱/۲ بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت کششی نمونه‌های بتن داشته است. مطابق با نتایج، نمونه‌ی Cs 1/2 مقاومت کششی ۱۰/۹۵ مگاپاسکال را نشان داده است، که به میزان ۱۰/۰۵٪ بیشتر از نمونه‌ی Cs 1 بوده است. پس از آن با افزایش نسبت ماسه به سیمان در نمونه‌های بتن، مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی Cs 1/2 کاهش یافته و مطابق نتایج در نمونه‌ی Cs 1/3، به میزان ۱/۵٪ نسبت به نمونه‌ی Cs 1، مقاومت فشاری بیشتر بوده است.

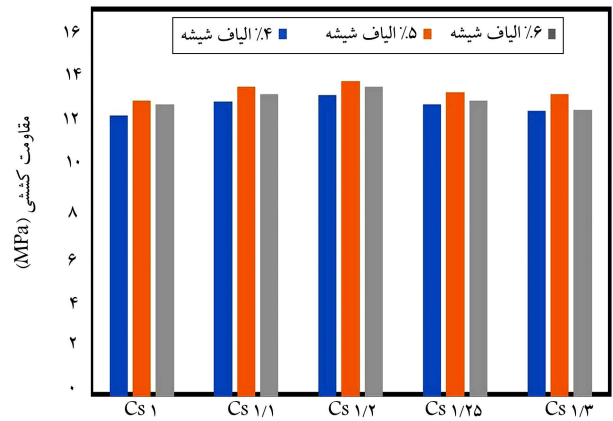
در شکل ۱۲، مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف شیشه مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، افزودن الیاف شیشه به نمونه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر به ازاء تمام درصد‌ها موجب افزایش مقاومت کششی شده است. بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های Cs 1G 5، Cs 1/1G 5، Cs 1/2G 5، Cs 1/25G 5 و Cs 1/3G 5، حاوی ۱۰٪ وزن سیمان الیاف شیشه با ۱۲/۹، ۱۵/۵، ۱۳/۷۵، ۱۳/۲۵ و ۱۳/۲ مگاپاسکال بوده است.



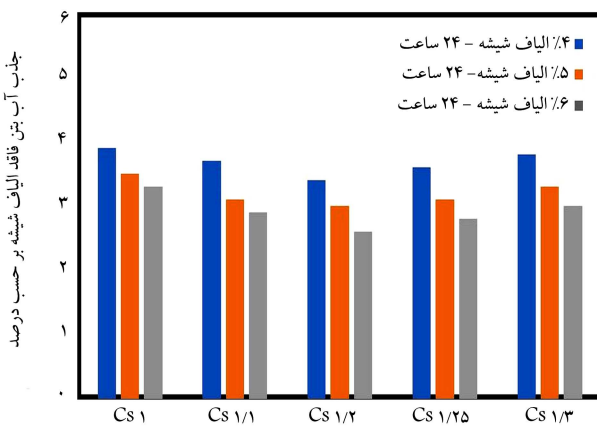
شکل ۱۱. مقاومت کششی نمونه‌های فاقد الیاف شیشه.



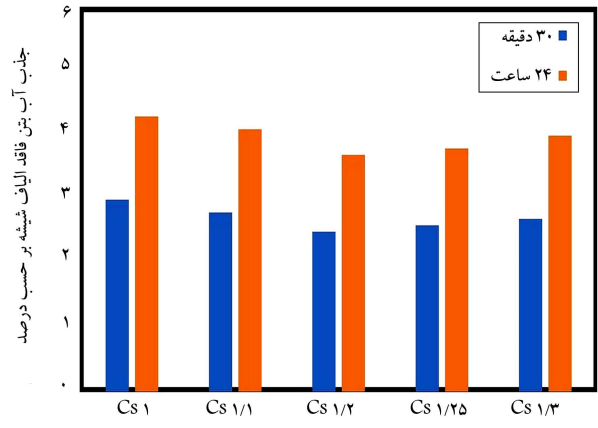
شکل ۱۴. جذب آب کوتاه مدت نمونه‌های حاوی الیاف شیشه.



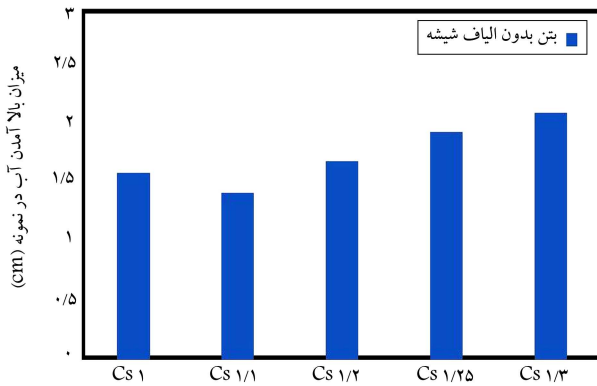
شکل ۱۲. مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف شیشه.



شکل ۱۵. جذب آب بلندمدت نمونه‌های حاوی الیاف شیشه.



شکل ۱۳. جذب آب نمونه‌های فاقد الیاف شیشه.



شکل ۱۶. نفوذناپذیری آب نمونه‌های فاقد الیاف شیشه.

۴.۳. نتایج جذب آب

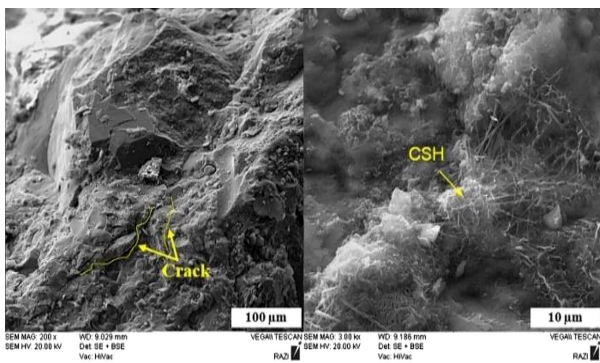
به منظور بررسی میزان جذب آب بتن پودری واکنش‌پذیر، طبق استاندارد، نمونه‌های با سن بیش از ۲۸ روز پس از خارج شدن از استخر آزمایش شدند. به جهت بررسی تأثیر نسبت ماسه به سیمان در نتایج جذب آب بتن پودری واکنش‌پذیر، نمونه‌های فاقد الیاف شیشه در شکل ۱۳ و به جهت بررسی تأثیر افزودن درصد‌های مختلف الیاف شیشه در جذب آب بتن پودری واکنش‌پذیر، نتایج نمونه‌های حاوی ۴، ۵ و ۶ درصد حجم بتن الیاف شیشه در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۱۳، با افزایش نسبت ماسه به سیمان در نمونه‌ی Cs1/2 جذب آب بلندمدت (۲۴ ساعت) نمونه، ۳/۸٪ نشان داده شده است. مطابق با نتایج، به طور کلی جذب آب نمونه‌های بتن تا نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ کاهش و پس از آن، جذب آب نمونه‌های بتن مجدداً افزایش یافته و در نمونه‌ی Cs1/3 جذب آب برابر با ۴٪ مشاهده می‌شود. بیشترین جذب آب با ۴/۳٪ مربوط به نمونه‌ی Cs1 با کمترین نسبت ماسه به سیمان بوده است.

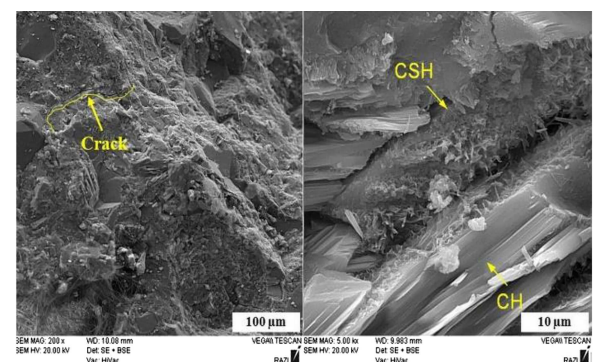
در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، نتایج جذب آب کوتاه‌مدت و بلندمدت نمونه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر حاوی الیاف شیشه مشاهده می‌شود؛ که مطابق آنها، جذب آب نمونه‌های بتن حاوی الیاف شیشه، در مقایسه با جذب آب نمونه‌های بتن ساخته شده با مصالح مشابه ولی فاقد الیاف شیشه کاهش یافته است، که علت این امر عدم جذب آب الیاف شیشه بوده است.^[۳۵] با افزایش درصد الیاف شیشه، جذب آب کاهش یافته و کمترین درصد جذب آب مربوط به نمونه‌های حاوی ۶٪ حجم بتن الیاف شیشه بوده است.

۵.۳. نتایج نفوذناپذیری آب نمونه‌ها

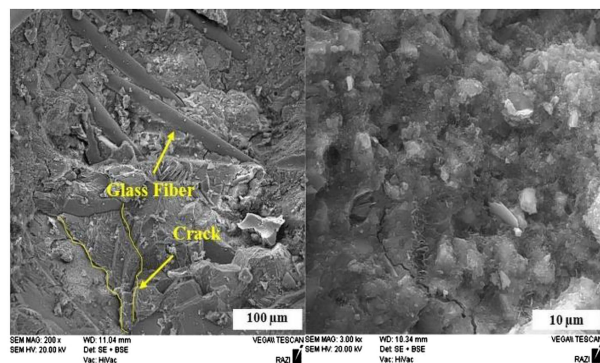
جهت بررسی نفوذناپذیری آب در بتن، نمونه‌های استوانه‌یی ۱۰ × ۲۰ سانتی‌متر با سن ۲۸ روز پس از خارج شدن از استخر، در دستگاه نفوذناپذیری آب در بتن با فشار، ۵ بار تحت آزمایش قرار گرفتند. به جهت بررسی تأثیر نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر، نتایج نفوذناپذیری نمونه‌های فاقد الیاف شیشه در شکل ۱۶ و به جهت بررسی تأثیر افزودن درصد‌های مختلف الیاف شیشه در بتن پودری واکنش‌پذیر، نتایج نفوذناپذیری نمونه‌های حاوی ۴، ۵ و ۶ درصد حجم بتن الیاف شیشه در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود.



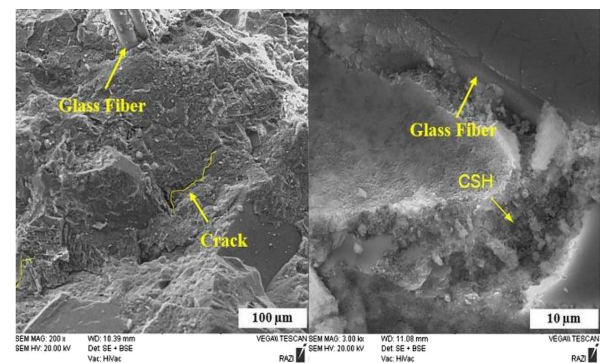
شکل ۱۸. تصاویر SEM طرح Cs1 با بزرگ‌نمایی ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر.



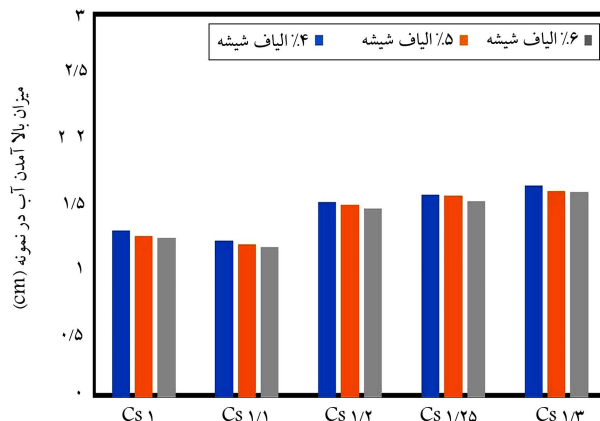
شکل ۱۹. تصاویر SEM طرح Cs1/2 با بزرگ‌نمایی ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر.



شکل ۲۰. تصاویر SEM طرح Cs1G4 با بزرگ‌نمایی ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر.



شکل ۲۱. تصاویر SEM طرح Cs1/2G4 با بزرگ‌نمایی ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر.



شکل ۱۷. نفوذناپذیری آب نمونه‌های حاوی الیاف شیشه.

مطابق نتایج شکل ۱۶، با افزایش نسبت ماسه به سیمان تا نسبت ۱/۱ نفوذناپذیری آب در بتن پودری واکنش‌پذیر کاهش یافته است. سپس با افزایش نسبت ماسه به سیمان، به علت پایین آمدن میزان چسبندگی ریزدانه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر، حفره‌ها و ریزترک‌ها افزایش و میزان پیشروی آب نیز در نمونه‌های بتن افزایش یافته است. [۳۶ و ۳۷]

مطابق شکل ۱۷، در بتن پودری واکنش‌پذیر حاوی الیاف شیشه، افزایش نسبت ماسه به سیمان سبب شده است تا نسبت ۱/۱ موجب افزایش نفوذناپذیری آب در بتن شود. همچنین، افزایش درصد الیاف شیشه در نمونه‌های بتن موجب افزایش میزان نفوذناپذیری آب شده است. مشاهده می‌شود که افزایش درصد الیاف شیشه مطابق آنچه در جذب آب نمونه‌های بتن رخ داده است، موجب دوام بهتر نمونه‌های بتنی در برابر نفوذ آب شده است.

۶.۳. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در شکل‌های ۱۸ الی ۲۱، تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های Cs1، Cs1/2، Cs1G4 و Cs1/2G4 مشاهده می‌شود. فاز سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) بیش از ۵۰٪ حجم مواد جامد خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده را تشکیل داده و بنابراین، مهم‌ترین بخش مواد جامد خمیر در تعیین خواص آن بوده است. بلورهای هیدروکسید کلسیم یا پرتلندایت (CH) نیز حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد حجم قسمت جامد خمیر هیدراته شده را تشکیل می‌دهند. برخلاف ناحیه C-S-H، هیدروکسید کلسیم ترکیبی با فرمول مشخص $Ca(OH)_2$ است. نقش فاز CH به علت نیروهای واندروالسی در مقاومت بتن نسبت به نقش C-S-H محدود است. دوز بالای سیمان در RPC منجر به تشکیل مقدار زیادی ژل C-S-H بین افزایش سطح پودر و در نتیجه، افزایش بسته‌بندی ذرات آن می‌شود. [۲۸] به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های بتن، نمونه‌های Cs1/2 و Cs1/2G4 با توجه به مناسب‌ترین رفتار مکانیکی و مقایسه با نمونه‌های Cs1 و Cs1G4 تصویربرداری شده است.

مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده شده در شکل‌های ۱۸ و ۱۹، شرایط تشکیل ژل C-S-H در نمونه Cs1/2 مناسب‌تر از شرایط تشکیل ژل در نمونه Cs1 بوده و همین امر موجب افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ی اخیر شده است. از طرف دیگر، کاهش جذب آب در نمونه Cs1/2، به علت کاهش ریزترک‌های نمونه‌ی بتن نسبت به نمونه‌ی Cs1 بوده است.

مطابق آنچه در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مشاهده می‌شود، افزودن ۴٪ حجم بتن الیاف شیشه به نمونه‌های Cs1 و Cs1/2، موجب کاهش ریزترک‌ها و هموارتر شدن

جدول ۵. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های ۲۸ روزه فاقد الیاف شیشه نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).

نوع رفتار	Cs۱/Cs۱	Cs۱/۱/Cs۱	Cs۱/۲/Cs۱	Cs۱/۲۵/Cs۱	Cs۱/۳/Cs۱
مقاومت فشاری	—	۰/۷۷	۱۰/۷۵	۶/۹۲	۲/۳
مقاومت خمشی	—	-۲/۶	-۱۵/۶۹	-۱۷/۵۱	-۲۶/۸۹
مقاومت کششی	—	۳/۰۱	۱۰/۰۵	۸/۰۴	۱/۵
جذب آب	—	-۴/۶۵	-۱۳/۹۵	-۱۱/۶۲	-۶/۹۷
نفوذناپذیری آب	—	-۱۰/۶۲	۶/۲۵	۲۱/۸۷	۳۱/۸۷

جدول ۶. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

	Cs۱/Cs۱	Cs۱/۱/Cs۱/۱	Cs۱/۲/Cs۱/۲	Cs۱/۲۵/Cs۱/۲۵	Cs۱/۳/Cs۱/۳
حاوی ۴٪ الیاف	۲/۳	۲/۲۹	۳/۴۹	۱/۴۳	۵/۵۱
حاوی ۵٪ الیاف	۳/۸۴	۴/۵۸	-۹/۷۹	-۸/۶۳	-۳/۹۳
حاوی ۶٪ الیاف	-۰/۷۶	-۴/۵۸	-۱۶/۰۸	-۱۴/۳۸	-۸/۶۶

جدول ۷. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

	Cs۱/Cs۱	Cs۱/۱/Cs۱/۱	Cs۱/۲/Cs۱/۲	Cs۱/۲۵/Cs۱/۲۵	Cs۱/۳/Cs۱/۳
حاوی ۴٪ الیاف	۵/۱	۱/۷	۱۰/۲۷	۱۱/۷	۱۴/۳۳
حاوی ۵٪ الیاف	۱۳/۱	۹/۹۱	۲۰/۷۴	۲۱/۴	۲۶/۰۳
حاوی ۶٪ الیاف	-۹/۵۱	-۹/۰۶	-۶/۰۸	-۷/۳۵	-۷/۱۷

جدول ۸. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

	Cs۱/Cs۱	Cs۱/۱/Cs۱/۱	Cs۱/۲/Cs۱/۲	Cs۱/۲۵/Cs۱/۲۵	Cs۱/۳/Cs۱/۳
حاوی ۴٪ الیاف	۲۳/۱۱	۲۵/۳۶	۲۰/۰۹	۱۸/۶	۲۳/۲۶
حاوی ۵٪ الیاف	۲۹/۶۴	۳۱/۷	۲۵/۵۷	۲۳/۲۵	۳۰/۶۹
حاوی ۶٪ الیاف	۲۸/۱۴	۲۸/۷۸	۲۳/۲۸	۲۰	۲۳/۷۶

جدول ۹. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش جذب آب نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

	Cs۱/Cs۱	Cs۱/۱/Cs۱/۱	Cs۱/۲/Cs۱/۲	Cs۱/۲۵/Cs۱/۲۵	Cs۱/۳/Cs۱/۳
حاوی ۴٪ الیاف	-۹/۳	-۹/۷۵	-۸/۱	-۵/۲۶	-۵
حاوی ۵٪ الیاف	-۱۸/۶	-۲۴/۳۹	-۱۸/۹۱	-۱۸/۴۲	-۱۷/۵
حاوی ۶٪ الیاف	-۲۴/۲۵	-۲۹/۲۶	-۲۹/۷۲	-۲۶/۳۱	-۲۵

جدول ۱۰. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش نفوذپذیری آب نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف شیشه (%).

	Cs۱/Cs۱	Cs۱/۱/Cs۱/۱	Cs۱/۲/Cs۱/۲	Cs۱/۲۵/Cs۱/۲۵	Cs۱/۳/Cs۱/۳
حاوی ۴٪ الیاف	-۱۸/۷۵	-۱۴/۶۸	-۱۰/۵۸	-۱۸/۹۷	-۲۱/۸
حاوی ۵٪ الیاف	-۲۱/۲۵	-۱۶/۷۸	-۱۱/۷۶	-۱۹/۴۸	-۲۳/۶۹
حاوی ۶٪ الیاف	-۲۲/۵	-۱۸/۱۸	-۱۳/۵۲	-۲۱/۵۳	-۲۴/۱۷

۴. تجزیه و تحلیل یافته‌های پژوهش

در جدول‌های ۵ الی ۱۰، مقادیر مقایسه‌ی نتایج خروجی آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی، جذب آب و نفوذناپذیری آب بتن نمونه‌های فاقد الیاف شیشه و نمونه‌های حاوی ۴، ۵ و ۶ درصد حجم بتن الیاف شیشه ارائه شده است. از مقایسه‌ی آنها می‌توان به صورت خلاصه، به این موارد اشاره کرد:

سطح نمونه‌های بتن شده است. همچنین با افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱ به ۱/۲ در بتن حاوی الیاف شیشه، کاهش ریزترک‌ها موجب کاهش جذب آب و افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ی Cs۱/۲G۴ نسبت به نمونه‌ی Cs۱G۴ شده است. کریستال‌های اترینگیت بین مواد هیدراته‌ی ناقص و ژل C-S-H تشکیل می‌شود.^[۳۹] مطابق شکل‌های اخیر، محصول اصلی هیدراتاسیون همگن، ژل C-S-H است. کریستال‌های $C_a(OH)_۲$ یافت نشده و اترینگیت تشکیل شده است.^[۴۰]

۱۱. به طور کلی، مطابق با نتایج به دست آمده، الیاف شیشه بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری نشان نداده‌اند. از طرف دیگر، در بتن حاوی الیاف شیشه، مقاومت کششی و خمشی به طور قابل توجهی افزایش یافته‌اند. علت این امر مطابق مطالعات پیشین توانایی الیاف شیشه در مقاومت در برابر ترک‌هاست. [۳۷]

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی مطالعات پیشین و اهمیت روزافزون بتن پودری واکنش‌پذیر در صنعت ساخت و ساز، در مطالعات حاضر به جهت بررسی امکان بهبود خواص و کاهش معایب بتن مذکور در ۵ طرح، ابتدا تأثیر افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر و سپس در ۱۵ طرح، تأثیر افزودن مقادیر مختلف الیاف شیشه به بتن پودری واکنش‌پذیر با نسبت ماسه به سیمان مختلف بررسی شده و این نتایج به دست آمده است.

۱. افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱ تا ۱/۲، موجب بهبود خواص بتن، نظیر: مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب شده است. با توجه به ریزساختار بتن، شرایط فاز سیلیکات کلسیم هیدراته نیز در این نسبت بهبود یافته و بیشترین افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ی CS۱/۲ با نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ در مقایسه با نمونه‌ی CS۱ بوده است، که با ۱۰٪ افزایش به ۱۴۳ مگاپاسکال رسیده است.

۲. افزودن الیاف شیشه به میزان ۴ و ۵ درصد حجم بتن موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن شده است. بیشترین افزایش در نسبت‌های ماسه به سیمان ۱ و ۱/۱ مربوط به افزودن ۵٪ الیاف شیشه بوده است، که به ترتیب مقاومت‌های ۱۳۵ و ۱۳۷ مگاپاسکال در نمونه‌های مکعبی به دست آمده و پس از آن در نسبت‌های ماسه به سیمان بالاتر، فقط افزودن ۴٪ حجم بتن الیاف شیشه موجب افزایش مقاومت فشاری شده است، که میزان الیاف مذکور، موجب رسیدن مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی CS۱/۲G۴ به ۱۴۸ مگاپاسکال، نمونه‌ی CS۱/۲۵G۴ به ۱۴۱ مگاپاسکال و نمونه‌ی CS۱/۳G۴ به ۱۳۴ مگاپاسکال شده است.

۳. افزایش نسبت ماسه به سیمان با کاهش چسبندگی بین ریزدانه‌ها موجب کاهش مقاومت خمشی بتن پودری واکنش‌پذیر شده است؛ اما در نمونه‌های حاوی الیاف شیشه، افزودن ۴ و ۵ درصد الیاف شیشه موجب افزایش مقاومت خمشی در تمام نسبت‌های ماسه به سیمان شده است. نمونه‌ی CS۱G۴ با مقاومت خمشی ۲۰/۵ مگاپاسکال، بیشترین مقاومت خمشی را داشته است.

۴. با افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱ به ۱/۲، مقاومت کششی بتن به میزان ۵/۱۰٪ افزایش یافته است. همچنین افزودن الیاف شیشه به میزان ۵٪ حجم بتن، موجب بیشترین افزایش مقاومت کششی در بتن پودری واکنش‌پذیر شده است.

۵. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱ تا ۱/۲ موجب کاهش ریزترک‌های بتن و بهبود شرایط تشکیل ریزساختار بتن شده است. همین امر موجب کاهش جذب آب نمونه‌های بتن شده است، به طوری که به میزان ۱۳/۹۵٪ در نمونه‌ی CS۱/۲ نسبت به نمونه‌ی CS۱ جذب آب کاهش یافته است.

۶. در تمام نسبت‌های ماسه به سیمان، افزودن ۶٪ حجم بتن الیاف شیشه موجب تضعیف خواص مقاومتی بتن، نظیر: مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی شده است.

۱. مطابق جدول ۵، در نمونه‌های بتن فاقد الیاف شیشه، با افزایش نسبت ماسه به سیمان تا نمونه‌ی CS۱/۲ (حاوی نسبت ماسه به سیمان ۱/۲)، مقاومت فشاری نمونه‌ی بتن افزایش یافته است. با توجه به مقایسه‌ی درصد جذب آب نمونه‌های بتن، کمترین درصد جذب آب مربوط به نمونه‌ی CS۱/۲ بوده است. بنابراین افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ی اخیر به تراکم مناسب سنگ‌دانه‌ها و همچنین با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی به کاهش ریزترک‌ها مربوط بوده است.

۲. با افزایش نسبت ماسه به سیمان، مقاومت خمشی کاهش یافته است، که علت آن کاهش میزان سیمان مصرف شده در ساخت نمونه‌های بتن بوده است.

۳. مطابق با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ی بتن با افزایش نسبت ماسه به سیمان از ۱ به ۱/۲، نمونه‌ی CS۱/۲ بیشترین مقاومت کششی را با ۱۰/۷۵ مگاپاسکال داشته است.

۴. کمترین کاهش جذب آب در نمونه‌های بتن، مربوط به نمونه‌ی CS۱/۲ با نسبت ماسه به سیمان ۱/۲ بوده است. مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی، کاهش اخیر درصد جذب آب مربوط به کاهش ریزترک‌های نمونه بوده است. همچنین مطابق با نتایج جدول ۵، پس از نسبت ۱/۱ با افزایش نسبت ماسه به سیمان به علت پایین آمدن میزان چسبندگی ریزدانه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر، میزان پیشروی آب در نمونه‌های بتن افزایش یافته است، که بیشترین میزان پیشروی آب در بتن به نمونه‌ی CS۱/۳ با ۳۱/۸۷٪ افزایش نسبت به نمونه‌ی CS۱ مربوط بوده است.

۵. مطابق نتایج جدول ۶، در نسبت ماسه به سیمان ۱ و ۱/۱، افزودن الیاف شیشه به میزان ۵٪ حجم بتن، موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ی بتن به میزان ۳/۸۴ و ۴/۵۸ درصد شده است. با توجه به کاهش جذب آب نمونه‌های CS۱G۵ و CS۱/۱G۵ به میزان ۱۸/۶ و ۲۴/۳۹ درصد نسبت به نمونه‌های CS۱ و CS۱/۱، کاهش حفره‌ها و ریزترک‌ها موجب افزایش تحمل نمونه‌های بتن در برابر نیروی فشاری شده است.

۶. در نسبت‌های ماسه به سیمان ۱/۲، ۱/۲۵، ۱/۳، افزایش مقاومت فشاری به نمونه‌های حاوی ۴٪ حجم بتن الیاف شیشه با افزایش ۳/۴۹، ۱/۴۳ و ۵/۵۱ مربوط بوده است.

۷. با توجه به جدول ۷، با افزودن الیاف شیشه به میزان ۴ و ۵ درصد حجم بتن، مقاومت خمشی نمونه‌ها در تمام نسبت‌های ماسه به سیمان افزایش یافته است، که این افزایش در نمونه‌های حاوی ۵٪ حجم بتن الیاف شیشه بیشتر بوده است.

۸. با توجه به کاهش مقاومت خمشی در افزودن الیاف شیشه به میزان ۶٪ حجم بتن، خواص مقاومتی بتن تضعیف یافته است. بیشترین کاهش مقاومت خمشی در نمونه‌ی CS۱G۶ با مقاومت خمشی ۱۶/۴ مگاپاسکال اتفاق افتاده است.

۹. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۸، مقاومت کششی نمونه‌ها به ازاء تمام درصد‌های الیاف شیشه افزایش یافته است. بیشترین افزایش مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های حاوی ۵٪ حجم بتن الیاف شیشه بوده است.

۱۰. با توجه به فاقد جذب آب بودن الیاف شیشه، افزودن الیاف شیشه به بتن، موجب کاهش درصد جذب آب شده است. همچنین نفوذ آب در نمونه‌های بتن با افزودن الیاف شیشه کاهش یافته است. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی در نمونه‌ی CS۱/۲G۴، کاهش ریزترک‌های سطح بتن موجب کاهش جذب آب نسبت به نمونه‌ی CS۱G۴ شده است.

بنابر موارد بیان شده با افزایش نسبت ماسه به سیمان به میزان $۱/۲$ (طرح $Cs۱/۲$)، می‌توان خواص مقاومتی بتن پودری واکنش‌پذیر را به ازاء مقادیر کمتر سیمان و همچنین کاهش حرارت هیدراتاسیون به واسطه‌ی کاهش مصرف سیمان، نسبت به نمونه‌ی حاوی ماسه به سیمان ۱ (طرح $Cs۱$) بهبود بخشیده است. همچنین در صورت نیاز به مقاومت کششی، مقاومت فشاری و نفوذناپذیری بیشتر و جذب آب کمتر می‌توان از ۴ تا ۵ درصد حجم بتن الیاف شیشه جهت بهبود خواص بتن پودری واکنش‌پذیر بهره برد.

۷. مطابق با نتایج به دست آمده، خصوصیات نمونه‌ی $Cs۱/۲۵$ بسیار به خصوصیات نمونه‌ی $Cs۱/۲$ نزدیک بوده است. به عنوان مثال، تفاوت مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ی $Cs۱/۲۵$ با نمونه‌ی $Cs۱/۲$ به میزان ۴ مگاپاسکال و برابر با $۲/۸\%$ اختلاف بوده است. این تفاوت برای نمونه‌های $Cs۱/۱$ و $Cs۱/۳$ به ترتیب برابر با $۸/۳۹\%$ و $۱۱/۱۸\%$ درصد بوده است. بنابراین، گام افزایشی ۱۰% جهت بررسی تأثیر افزایش نسبت ماسه به سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر از گام افزایشی $۵/۵\%$ مناسب‌تر است.

پانویس‌ها

1. Qasim, A.
2. Mayhoub
3. JianXin
4. Krenchel & Stang

منابع (References)

1. Mostofinejad, D. "Concrete technology & mixing design", *Arkandaneh, P., 2nd Edn.*, pp. 159-210, Isfahan, IR (In Persian) (205).
2. Malik, A.R. and Foster, S.J. "Carbon fiber reinforced polymer confined reactive powder concrete columns-experimental investigation", *ACI Structural Journal*, **107**(3), pp. 263-271 (2010).
3. Heidari, A. and Tavakoli, D. "Introduction to concrete technology", *Shahrekord University P.*, pp. 1-10, Chaharmahal va bakhtiyari, IR (In Persian) (2017).
4. Lee M.-G., Wang, Y.-C. and Chiu, C.-T. "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material", *Construction and Building Materials*, **21**(1), pp. 182-189 (2007).
5. Voo, J., Foster, S.J., Gilbert, R.I. and et al. "Design of disturbed region in reactive powder concrete bridge girders", (*ASCE*) *Bridge Materials*, pp. 117-127 (2004).
6. Qasim, O.A. "Experimental investigation on autogenous shrinkage of high and ultrahigh strength concrete", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **454**(1), p.012067 (2018).
7. Qasim, O.A. and Ahmed, A.S. "Different variable effects on bond strength of normal, high and ultra-high strength concrete", *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, **9**, pp. 1923-1945 (2018).
8. Mayhoub, O.A., Nasr, A.R., Ali, Y.A. and et al. "The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review", *Ain Shams Engineering Journal*, **12**(1), pp. 145-158 (2020).
9. Heidari, A. and Tavakoli, D. "Production of high-strength concrete based on reactive powder concrete", *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, **2**(4), pp. 111-120 (In Persian) (2016).
10. Richard, P. and Cheyrezy, M. "Composition of reactive powder concretes", *Cement Concrete Research*, **25**(7), pp. 1501-1511 (1995).
11. Bagheri, A. and Zanganeh, H. "Energy absorption of reactive powder concrete (RPC) in static and impact loadings", *CSCE 2007 Annual General Meeting & Conference, Yellowknife 4 Northwest Territories* (2007).
12. JianXin, M. and Orgass, M. "Comparitive investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates", *In International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, **9**, pp.205-212 (2004).
13. Liu, J.H., Song, S.M., Sun, Y.M. and et al. "Influence of ultrafine limestone powder on the performance of high volume mineral admixture reactive powder concrete", *Advance Material Research*, **152-153**, pp. 1583-1586 (Oct 2010).
14. Savadkoohi, M.S. and Reisi, M. "Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in reactive powder concrete", *Journal of Cleaner Production*, **266**, p.121973 (Sep 2020).
15. Grzeszczyk, S. and Janus, G. "Reactive powder concrete with lightweight aggregates", *Construction Building Material*, **263**, p.120164 (Dec 2020).
16. Xiaoying, L., Jun, L., Zhongyuan, L. and et al. "Preparation and properties of reactive powder concrete by using titanium slag aggregates", *Construction Building Material*, **234**, p.117342 (Feb 2020).
17. Masoumi, H., Nezhati, S. and Nejati, F. "Investigating the properties and advantages of reactive powder concrete", *6th Trans-regional Conference on Novel Advances in Engineering Sciences, Ayandegan Higher Education Institute, Tonekabon, Iran* (In Persian) (2013).
18. Blais, P.Y. and Couture, M. "Precast, prestressed pedestrian bridge-world's first reactive powder concrete structure", *PCI Journal*, **44**(5), pp. 60-71 (1999).
19. Naser, M.Z., Hawileh, R.A. and Abdalla, J.A. "Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review", *Engineering Structures*, **198**, 109542 (2019).

20. Krenchel, H. and Stang, H. "Stable microcracking in cementitious materials", In *Brittle Matrix Composites 2*, Brandt, A.M. and Marshall, J.H. eds., pp. 20-33 (1989).
21. Soroushian, P. and Lee, C. "Tensile strength of steel fiber reinforced concrete: correlation with some measures of fiber spacing", *ACI Material Journal*, **87**(6), pp. 541-546 (1990).
22. Tam, C.M., Tam, V.W.Y. and Ng, K.M. "Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong", *Construction and Building Materials*, **26**(1), pp. 79-89 (2012).
23. Heidari, A and Naderi Shourabi, F. "New Concrete", *Arkandanesh P.*, 1st Edn., pp. 75-76, Isfahan, IR (In Persian) (2022).
24. ASTM E1621-05, "Standard guide for elemental analysis by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United States (2014).
25. Iskender, M. and Bekir, K. "Glass fibre reinforced concrete (GFRC)", *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* **5**, **1**, pp. 136-162 (2018).
26. Naderi Shourabi, F. and Heidari, A. "Laboratory investigation of the change of sand-cement ratio in the mechanical behavior of reactive powder concrete", *The 13th National Congress of Civil Engineering*, Iran, (In Persian) (May 2022).
27. Soroushian, P. "Secondary reinforcement adding cellulose fibers", *American Concrete International (ACI)*, **19**(6), pp. 28-34 (1997).
28. Swamy, R.N. "Fibre reinforced cement and concrete: proceedings of the fourth RILEM international symposium", *CRC Press*, 1st Edn., London, GB (1992).
29. Hiremath, P.N. and Yaragal, S.C. "Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of reactive powder concrete", *Construction and Building Materials*, **141**, pp. 271-288 (2017).
30. ASTM C39/C39 M-12, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania (2012).
31. ASTM C496, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", *ASTM International*, west Conshohocken, PA, pp. 469-490 (2011).
32. ASTM C293, "Standard test method for exural strength of Concrete (using simple beam with centerpoint loading)", *American Society for Testing and Materials*, **100**, pp. 19428-2959 (2010).
33. BS. EN, 12390-8, "Testing hardened concrete, depth of penetration of water under pressure", *BSI* (2006).
34. ASTM C 642-97, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", *Book of ASTM Standards*, *American Society for Testing and Materials* (1997).
35. ASTM C192, "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory", *ASTM International*, West Conshohocken (2006).
36. Zhang, Z., Feng, Q. Zhu, W. and et al. "Influence of sand-cement ratio and polycarboxylate superplasticizer on the basic properties of mortar based on water film thickness", *Materials*, **14**(17), 4850 (2021).
37. Ahmad, González-Lezcano, R.A., Majdi, A., Ben Kahla N. and et al. "Glass fibers reinforced concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis", *Materials*, **15**(15), 5111 (2022).
38. Mayhoub, O.A., Naser, A.R., Yehia, A. and et al. "The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review", *Ain Shams Engineering Journal*, **1**(12), pp. 145-58 (2021).
39. Wang, D., Shi, C., Wu, Z. and et al. "A review on ultra high performance concrete: Part II. hydration, microstructure and properties", *Construction and Building Materials*, **96**, pp. 368-77 (2015).
40. Wang, C., Yang, C., Liu, F. and et al. "Preparation of ultra high performance concrete with common technology and materials", *Cement Concrete Composite*, **34**(4), pp. 538-44 (2012).