

تأثیر استفاده‌ی توأمان الیاف شیشه و پلیمر در خواص مکانیکی، جمع‌شدگی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی

سروناز معتمد (کارشناس ارشد)

سید حسام مدنی* (دانشیار)

دانشکده‌ی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

مهندسی عمران شریف، پاییز (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲ - شماره‌ی ۳/۲، ص. ۶۷-۷۶

در مطالعه‌ی حاضر، خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های حاوی الیاف و پلیمر بررسی و در طی آن از سیمان کلسیم آلومینات و سیمان پرتلند به صورت مجزا استفاده شده است. الیاف شیشه و پلیمر پایه‌ی آکریلیک برای اصلاح مخلوط‌ها مصرف شده است. نمونه‌های ساخته شده حاوی ۲ و ۴ درصد الیاف شیشه و ۵٪ وزن جامد پلیمر هستند. آزمون‌های مکانیکی انجام شده، شامل: مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، طاقت و مقاومت ضربه‌یی است. آزمون مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلراید و همچنین آزمون تغییر طول ناشی از جمع‌شدگی نیز مطالعه شده است. مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات از نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند بیشتر است، لیکن با افزودن پلیمر و الیاف شیشه به مخلوط‌ها، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. استفاده از الیاف و پلیمر در کامپوزیت‌های سیمانی، سایر خواص مکانیکی را بهبود بخشیده است، لیکن در آزمون دوام، مخلوط‌های الیافی سبب افزایش نفوذ یون کلراید شده‌اند. همچنین برخلاف پلیمر، اضافه کردن درصد بالای الیاف به مخلوط‌ها سبب کاهش تغییر طول ناشی از جمع‌شدگی شده است.

sarvenazmoetamed@gmail.com
h.madani@kgut.ac.ir

واژگان کلیدی: سیمان کلسیم آلومینات، سیمان پرتلند، الیاف شیشه، پلیمر.

۱. مقدمه

شده‌ی تبدیل فازها از نیمه‌پایدار به پایدار در دمای بین ۳۵ تا ۶۵ صورت می‌گیرد و موجب کاهش حجم محصولات هیدراسیون می‌شود و در نتیجه تخلخل ساختاری افزایش می‌یابد.

شماری از افزودنی‌ها در ساختار بتن‌های ساخته شده با سیمان CAC از واکنش اشاره شده‌ی تبدیل فازها جلوگیری می‌کنند و در نتیجه مانع از کاهش مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با سیمان CAC به دلیل افزایش تخلخل ناشی از تبدیل فازها از نیمه‌پایدار به پایدار می‌شوند.^[۷-۹] به عنوان مثال، شانگ و همکاران (۲۰۱۶)، با افزودن پودر آلومین در ساختار بتن ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات به این نتیجه رسیدند که پودر آلومین از واکنش تبدیل فازهای نیمه‌پایدار به پایدار ممانعت می‌کند و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری به دلیل افزایش تخلخل صورت نمی‌گیرد.^[۸] لینگ لین و همکاران (۲۰۱۲)،^[۹] به بررسی سیستم‌های سه‌گانه‌ی سولفات کلسیم / سیمان پرتلند / سیمان کلسیم آلومینات پرداختند که با افزایش دما، زمان گیرش اولیه و نهایی کوتاه می‌شود و مقاومت فشاری و خمشی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص است که میزان تشکیل اترینگایت به درجه‌ی حرارت و سولفات کلسیم وابسته است.

بتن برای چندین دهه به دلیل قیمت پایین، مقاومت و دوام مطلوب به عنوان

برای تولید بتن می‌توان انواع سیمان و مواد افزودنی را با یکدیگر ترکیب کرد، تا به عملکردی مطلوب دست یافت. یکی از انواع سیمان‌ها، سیمان کلسیم آلومینات است. سیمان کلسیم آلومینات، ویژگی‌هایی مانند: کسب مقاومت زود هنگام، مقاومت مناسب در برابر حملات اسیدی و مقاومت بالا در برابر سایش و ضربه دارد. یکی از کاربردهای بتن‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات، استفاده در شبکه‌های فاضلاب است. در شبکه‌های فاضلاب مشاهده می‌شود که سولفوریک اسید توسط باکتری تولید و سولفوریک اسید موجود باعث ایجاد مشکل می‌شود؛ در نتیجه، بتن‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات در برابر حملات اسیدی ذکر شده مقاوم هستند.^[۳-۱]

با تماس ذرات سیمان با آب، هیدراسیون سیمان آغاز می‌شود، در نتیجه محصولات هیدراسیون تولید می‌شوند، که این محصولات در سیمان کلسیم آلومینات، ابتدا محصولات نیمه‌پایدار CAH_10 و C_2AH_10 هستند، که در اثر دو پارامتر دما و گذر زمان به محصولات پایدار C_2AH_6 و AH_3 تبدیل می‌شوند. واکنش ذکر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۲/۳۱، اصلاحیه ۱۳۹۸/۵/۲۲، پذیرش ۱۳۹۸/۶/۱۷

DOI:10.24200/J30.2019.53132.2535

یکی از مؤثرترین مواد برای ساخت و ساز به شمار می‌رود.^[۱۰-۱۱] با این حال، عملکرد کششی آن، از جمله مقاومت و انعطاف پذیری پس از ترک خوردگی نسبتاً ضعیفی دارد. به منظور غلبه بر عملکرد کششی ضعیف بتن معمولی، بسیاری از پژوهشگران استفاده از الیاف در مخلوط‌های بتنی را بررسی کرده و به طور مداوم گزارش داده‌اند که اضافه کردن الیاف به مخلوط‌های بتنی عملکرد کششی بتن را بهبود می‌بخشد و همچنین جلوی انتشار ریزترک‌ها را می‌گیرد.^[۱۲-۱۵]

الکساندرا و همکارانش (۲۰۰۹)،^[۱۴] در مطالعه‌ی کاهش ترک خوردگی و کاهش انقباض را با اضافه کردن الیاف ارزیابی کردند و دریافتند که اضافه کردن الیاف تا ۷۰٪ عرض ترک خوردگی را کاهش می‌دهد، همچنین الیاف سبب کاهش انقباض نیز می‌شود.

جونگ هان لی و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۶] به ظرفیت خمشی بتن الیافی با در نظر گرفتن مقاومت بتن و درصد حجم الیاف پرداختند و دریافتند که مقاومت خمشی و ظرفیت جذب انرژی با افزایش درصد حجم الیاف، افزایش می‌یابد؛ لیکن با افزایش مقاومت بتن، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد.

تاسو و لابل (۲۰۱۴)،^[۱۷] در بررسی خواص مکانیکی بتن تقویت شده با الیاف شیشه دریافتند که افزودن الیاف شیشه به بتن تأثیر کمی در مقاومت فشاری و مدول کشسانی دارد؛ لیکن موجب افزایش قابل توجهی در مقاومت خمشی و مقاومت برشی مستقیم، بدون در نظر گرفتن نوع ماتریس و یا طول الیاف می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که انعطاف پذیری و طاقت برشی با افزایش درصد الیاف، افزایش می‌یابد، در حالی که روانی بتن با افزایش درصد الیاف کاهش می‌یابد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که بتن تقویت شده با الیاف شیشه می‌تواند با کارایی و خواص مکانیکی مناسب برای کاربرد در عناصر ساختمان تولید شود.

پلیمرها یکی از افزودنی‌های بتن هستند، که اغلب به ملات سیمان اضافه می‌شوند تا خواص مخلوط تازه را بهبود بخشند. برخی پلیمرها به خوبی در آب حل و در آب توزیع می‌شوند، همچنین برخی پلیمرهای مورد استفاده در بتن، مقاومت خوبی در برابر حملات شیمیایی نشان می‌دهند. پلیمرها می‌توانند سبب کاهش نفوذپذیری در مخلوط‌های سیمانی شوند.^[۱۸-۲۰]

چهارازی و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲۱] در بررسی مشخصات مکانیکی و دوام مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی اصلاح شده با اتیلن وینیل استات و استایرن آکرلیک دریافتند که افزودن پلیمر سبب بهبود شماری از خواص مکانیکی، از جمله: مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مقاومت در برابر ضربه می‌شود. همچنین افزودن پلیمر سبب کاهش نفوذپذیری در آزمون‌های ضریب مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلراید و آزمون نفوذ موئیته می‌شود.

هوانگ و همکاران (۲۰۱۰)،^[۲۲] در ارزیابی آزمایشگاهی نفوذپذیری و مقاومت بتن پیش‌ساخته‌ی اصلاح شده با پلیمر و الیاف دریافتند که می‌توان با استفاده از پلیمر و الیاف، بتنی با زهکشی قابل قبول و مقاومت کافی تولید کرد. پلیمر تخلخل و نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد. همچنین با اضافه کردن پلیمر مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ی اخیر، الیاف اثر معنی‌داری در خواص مقاومت بتن پیش‌ساخته نداشتند و دلیل این امر آن بود که الیاف به طور کامل پراکنده و به طور مساوی در مخلوط بتن توزیع نشده بودند.

سو و همکاران (۱۹۹۱)،^[۲۳] در مطالعه‌ی به بررسی اثر اتیل وینیل استات در مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی پرتلند پرداختند و دریافتند که افزودن پلیمر اتیل وینیل استات، برخی خواص از قبیل طاقت خمشی را بهبود می‌بخشد.

سعیدی‌کیا و همکاران (۲۰۱۹)،^[۲۴] در مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی و ارزیابی عملکرد دو نوع ماده‌ی پلیمری اتیلن وینیل استات و پلی وینیل استات بر

خواص دوام مخلوط‌های پایه‌ی سیمان آلومینات کلسیمی پرداختند و دریافتند که مواد پلیمری اتیلن وینیل استات و پلی‌وینیل استات سبب کاهش در نفوذپذیری آب و یون کلراید در مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی می‌شوند و اتیلن وینیل استات، عملکرد مطلوب‌تری در مقایسه با پلی وینیل استات در این خواص دارد. پلیمرهای مذکور سبب کاهش در مقاومت فشاری شدند، که این کاهش در سنین پایین مشهود است؛ لیکن در اثر گذشت زمان ضعف ایجاد شده در مقاومت فشاری نمونه‌ها، حتی در درصدهای بالای مصرفی تقلیل یافته است.

هزینه‌ی تولید بتن‌های خاص نسبت به بتن‌های معمول نسبتاً بالاتر است، لیکن کاربرد بتن‌های خاص در موارد ویژه می‌تواند توجیه‌کننده‌ی تولید فرآورده‌ها باشد. به عنوان مثال، یک نمای سنگ می‌تواند هزینه‌ی بالاتری نسبت به بتن الیاف شیشه داشته باشد. همچنین در کاربردهای مشابه همچون تولید قطعات اکسیوز و دکوراتیو، استفاده از بتن الیاف شیشه (با توجه به شکل‌پذیر بودن آن) در مقایسه با سایر مصالح توجیه اقتصادی قابل توجه دارد. شایان ذکر است در حال حاضر پروژه‌های متعددی همچون نمای ساختمان‌های بزرگ، نماهای اسلیمی مساجد و نمادهای شهری از بتن الیاف شیشه ساخته می‌شوند، که توجیه اقتصادی مناسبی دارند.

در پژوهش حاضر، تأثیر دو درصد مختلف الیاف شیشه و یک پلیمر پایه اکرلیکی در برخی خواص مکانیکی و دوام مطالعه شده است. همچنین در مطالعه حاضر علاوه بر سیمان پرتلند، از سیمان کمتر شناخته شده‌ی کلسیم آلومینات استفاده شده است. با توجه به این‌که در مورد تأثیر توأمان الیاف شیشه و پلیمر در ساختار مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی بررسی چندانی انجام نشده است، لذا در مطالعه‌ی حاضر از الیاف شیشه و پلیمر به صورت ترکیبی نیز استفاده شده است. با توجه به استفاده از سیمان کلسیم آلومینات، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند جنبه‌ی نوآورانه از لحاظ کاربرد و مطالعات علمی داشته باشد. خواص مکانیکی بررسی شده در پژوهش حاضر، شامل: مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، طاقت (چقرمگی) خمشی، مقاومت در برابر ضربه و تغییر طول ناشی از جمع‌شدگی و به منظور بررسی خواص دوام ملات‌های اصلاح شده، از آزمون ضریب تسریع شده‌ی مهاجرت یون کلراید استفاده شده است.

۲. مواد و مصالح

۱.۲. سیمان

در پژوهش آزمایشگاهی حاضر از دو نوع سیمان کلسیم آلومینات IRC-۴۰، که از شرکت سیمان‌های نسوز ایران واقع در اصفهان تهیه و سیمان پرتلند نوع II کرمان به صورت مجزا استفاده شده است. مشخصات شیمیایی دو سیمان مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. سنگدانه

ماسه‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر از جنس سیلیس است، که از شرکت کهید کرمان زمین تهیه شده است. دانه‌بندی آن از سه سایز ۰/۶ الی ۲/۳۶، ۰/۴ الی ۰/۵ و کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر که به ترتیب ۴۸، ۲۰ و ۳۲ درصد از سهم دانه‌بندی را به خود اختصاص داده‌اند، تشکیل شده است. میزان رطوبت اشباع با سطح خشک ترکیبی ماسه‌های به کار رفته بر اساس استاندارد ASTM C ۱۲۸^[۲۵] معین شد. مشخصات فیزیکی سنگدانه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان ها.

نوع سیمان	Ti ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
پر تلند	%	%	%	%	%	%	%
پر تلند	-	۶۳٫۵۲	۱٫۷۵	۲٫۲۰	۳٫۹۷	۴٫۹۵	۲۱٫۵
کلسیم آلومینات	۳	۴۰	۱٫۵	-	۱۶٫۵	۳۵	۴

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ی سیلیسی.

چگالی ترکیبی سنگدانه‌ها (ماسه‌های سیلیسی)	جذب آب در حالت SSD (%)
۲۵۵۴ (Kg/m ³)	۰٫۶

جدول ۳. مشخصات الیاف شیشه‌ی مورد استفاده.

شیشه	نوع الیاف
۱٫۷	مقاومت کششی (گیگاپاسکال)
۸۰٫۴	مدول کشسانی (گیگاپاسکال)
۲۵	طول (میلی‌متر)
۰٫۱۳	قطر (میلی‌متر)
-	ازیاد طول (%)
۰٫۲	جذب آب (%)
صاف	هندسه

جدول ۴. مشخصات پلیمر استفاده شده.

نوع ترکیب	نوع پلیمر
ترموپلاستیک	نوع پلیمر
آکریلیک	درصد جامد
۵۰ ± ۱٪	ظاهر
مایع شیری سفید رنگ	بو
خفیف	pH
۶-۷	کمینه‌ی دمای تشکیل فیلم پلیمر
۱۱°C	اندازه‌ی ذرات
۱۱۰-۲۱۰ um	چگالی
(g/cm ³) ۱٫۰۵۵	



شکل ۱. الیاف شیشه‌ی مصرفی.

۳. روش انجام آزمایش‌ها

۳.۱. مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های با ابعاد ۵۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C ۱۰۹^[۲۶] انجام شده است. بدین منظور برای انجام آزمون مقاومت فشاری از یک هیدرولیکی و نمایش‌گر دیجیتالی با سرعت بارگذاری ۵۳۰ کیلوگرم بر ثانیه استفاده شده است و در آن، سه آزمون در هر سن شکسته شدند.

۳.۲. مقاومت خمشی

برای بررسی مقاومت خمشی نمونه‌ها از قالب‌های منشوری ۴۰ × ۴۰ × ۱۶۰ میلی‌متری مطابق با آیین‌نامه‌ی EN ۱۹۶^[۲۷] و از سه آزمون در هر سن استفاده شده است. نمونه‌های خمشی در سن‌های ۲۸ و ۹۰ تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌یی (نمونه‌ها در دو نقطه روی تکیه‌گاه قرار می‌گیرند و نیرو نیز در دو نقطه به نمونه اعمال می‌شود) قرار گرفته‌اند. سرعت بارگذاری بر روی نمونه‌ها برابر با ۱٫۰۲ میلی‌متر بر دقیقه بوده است.

۳.۳. طاقت خمشی

طاقت (چقرمگی) خاصیتی از یک جسم است که تا حدی شکل‌پذیری اجسام را در برابر شکست نشان می‌دهد. اگر طاقت شکست یک ماده کم باشد، آن ماده به صورت ترد می‌شکند و هر چه طاقت شکست بالاتر رود، احتمال شکست نرم افزایش می‌یابد. طاقت خمشی مساحت زیر منحنی خیز - نیرو است، که میزان

۳.۲. الیاف

در پژوهش حاضر از الیاف شیشه‌ی AR-Glass با طول ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. دیگر مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. نمونه‌ی الیاف شیشه‌ی به کار رفته در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

۴.۲. پلیمر

پلیمر مورد استفاده یک نوع رزین آکریلیک است، که نام تجاری آن POLY-۷۷۴ CURE Forton- است. مشخصات کامل پلیمر در جدول ۴ ارائه شده است.

۵.۲. روان‌ساز

در مطالعه حاضر از فوق روان‌کننده‌ی مایع بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات اتر استفاده شده است، که pH آن مساوی ۶ و وزن مخصوص آن ۱٫۰۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب است.

جدول ۵. طرح مخلوط مورد مطالعه (kg/m³).

طرح	W/C	سیمان	آب	ماسه	الیاف شیشه	پلیمر	روان ساز
C	۰٫۳۸ (CAC)	۸۵۰	۳۲۳	۱۰۱۰٫۱	۰	۰	۰٫۴۵
C-P	۰٫۳۸ (CAC)	۸۵۰	۳۲۳	۹۰۷٫۱۹	۰	۴۲٫۵	۰٫۵
CG%۲-P	۰٫۳۸ (CAC)	۸۵۰	۳۲۳	۸۵۶٫۱۱	۵۲	۴۲٫۵	۱
CG%۴-P	۰٫۳۸ (CAC)	۸۵۰	۳۲۳	۸۰۵٫۰۳	۱۰۴	۴۲٫۵	۴٫۸۱
P	۰٫۳۸ (PC)	۸۵۰	۳۲۳	۹۷۸٫۷۵	۰	۰	۰٫۲۸
P-P	۰٫۳۸ (PC)	۸۵۰	۳۲۳	۸۷۵٫۸۷	۰	۴۲٫۵	۰
PG%۲-P	۰٫۳۸ (PC)	۸۵۰	۳۲۳	۸۲۴٫۷۹	۵۲	۴۲٫۵	۰٫۸۴
PG%۴-P	۰٫۳۸ (PC)	۸۵۰	۳۲۳	۷۷۳٫۷۱	۱۰۴	۴۲٫۵	۴٫۲۵

میله‌ی مرجع از جنس آلیاژ فولادی است، صورت می‌گیرد. استاندارد مورد استفاده برای انقباض ASTM C۴۹۰^[۳۱] است.

۷.۳. مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلراید

یکی از رایج‌ترین آزمایش‌های دوام برای ساختار بتن، محاسبه‌ی ضریب مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلراید است. آزمون نام برده طبق استاندارد NT NUILD ۴۹۲^[۳۲] و روی سه نمونه انجام می‌پذیرد. آزمایش انتشار تسریع شده‌ی یون کلراید به درون ملات با شکستن نمونه‌ها و پاشیدن محلول نیترات نقره، روی سطح شکسته شده انجام می‌شود. بعد از گذشت تقریباً ۱۵ دقیقه به وسیله‌ی کولیس و یا خطکش مناسب، عمق نفوذ از وسط نمونه تا لبه‌ها خوانده می‌شود.

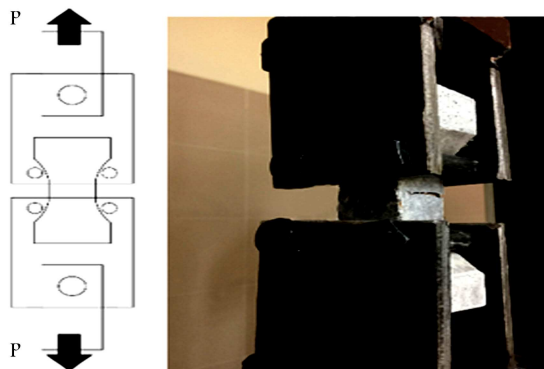
۴. نسبت‌های اختلاط

طرح مخلوط مورد استفاده در پژوهش حاضر بر اساس حجم واحد در نظر گرفته شده و در آن از مخلوط ۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان استفاده و میزان الیاف به عنوان یک پارامتر متغیر در طرح‌های پژوهش مطرح شده است. میزان الیاف مورد استفاده در طرح‌ها، شامل ۲ و ۴ درصد الیاف شیشه (درصدی از حجم کل مخلوط) و پلیمر به میزان ۵٪ جامد (درصدی از وزن سیمان) استفاده شده است. در طرح مخلوط حاضر که مطابق با جدول ۵ است، برای اختلاط الیاف و پلیمر در اجزاء دیگر ساخت بتن و ملات، بخش جامد پلیمر و الیاف به عنوان جایگزینی از سنگدانه به شمار می‌آیند. در طرح مخلوط‌های پژوهش حاضر، نسبت آب به سیمان برابر ۰٫۳۸ است، که به منظور ثابت نگه‌داشتن نسبت اخیر، میزان آب موجود در روان‌ساز و پلیمر از میزان آب مصرفی کم شده است.

۵. ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

شیوه‌ی ساخت ملات‌های اصلاح شده با الیاف و پلیمر در ۴ مرحله انجام شده است:

- ۱- ابتدا سیمان و ماسه به صورت خشک به مدت ۵ دقیقه در میکسر مخلوط شدند. شایان ذکر است مدت زمان مذکور جهت اختلاط بهینه‌ی مصالح خشک در نظر گرفته شده است.
- ۲- آب و پلیمر با یکدیگر به صورت جداگانه ترکیب و در حین اختلاط به مصالح خشک اضافه شده‌اند.



شکل ۲. نمونه‌های مقاومت کششی و شماتیکی از کشش در ۳ نمونه.

انرژی جذب شده را توسط نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد. بررسی طاقت مخلوط‌های ساخته شده مطابق آیین‌نامه‌ی ۹۷-۱۸-۱۰۱۸۰ ASTM^[۳۸] انجام گرفته است.

۴.۳. مقاومت کششی

برای انجام آزمون مقاومت کششی از نمونه‌های براکتی که در شکل ۲ مشاهده می‌شود و از سه نمونه در هر سن استفاده شده است. آزمون مقاومت کششی طبق استاندارد ASTM C۱۹۰^[۳۹] صورت گرفته است. سرعت اعمال نیروی کششی در آزمون حاضر برابر ۰٫۸۸ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. مقاومت کششی نهایی برای هر طرح، میانگینی از مقاومت کششی ۳ نمونه در سنین مشخص است.

۵.۳. مقاومت در برابر ضربه

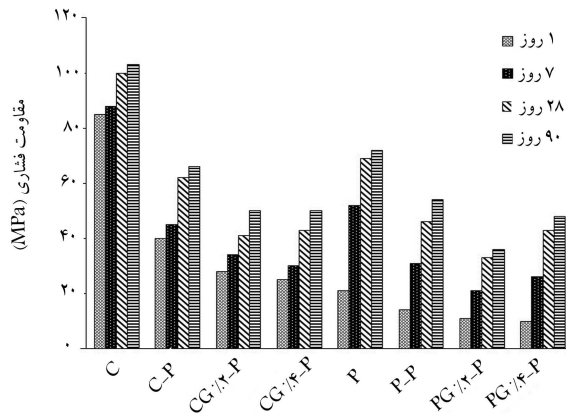
آزمون مقاومت ضربه‌یی با هدف تعیین میزان مقاومت نمونه‌های بتنی تحت اعمال ضربه و بر اساس روش ACI۵۴۴.۲R-۸۹^[۴۰] انجام می‌شود. این آزمون در سن ۱۰۰ روز روی سه نمونه انجام شده و میانگینی از تعداد ضرباتی که سبب ایجاد اولین ترک بر سطح نمونه و گسیختگی نهایی این نمونه‌ها می‌شود، به عنوان تعداد ضربات ایجاد اولین ترک بر سطح نمونه و نهایی ثبت می‌شود.

۶.۳. تغییر طول ناشی از خشک شدن

برای تعیین تغییر طول نمونه‌های منشوری ساخته می‌شوند. این آزمایش به وسیله کمپراتور انقباض که مجهز به عقربه‌ی اندیکاتور دیجیتال با دقت میکرومتر و یک

جدول ۶. خواص بتن تازه.

نام طرح	C	C-P	CG/۲-P	CG/۴-P	P	P-P	CG/۲-P	CG/۴-P
سیلان (سانتی متر)	۲۰	۲۱	۱۷	۱۶	۲۰	۲۲	۱۶	۱۶



شکل ۳. مقاومت فشاری (۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز).

مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه C-P نسبت به نمونه C، ۳۴٪ و نمونه P-P نسبت به نمونه کنترل P، ۲۵٪ کاهش داشته است. با اضافه کردن الیاف شیشه به مخلوطها نیز کاهش مقاومت فشاری مشاهده می‌شود، چرا که الیاف شیشه سبب کاهش تراکم و افزایش هوای محبوس می‌شود، در نتیجه مقاومت فشاری کاهش می‌یابد؛ به طور مثال، مقاومت فشاری نمونه PG/۲-P در سن ۲۸ روزه نسبت به نمونه P، ۲۸٪ و نسبت به نمونه C، ۵۲٪ کاهش مقاومت داشته است. همچنین مقاومت فشاری نمونه PG/۴-P در همان سن ۲۸ روزه نسبت به نمونه C-P، ۳۴٪ و نسبت به نمونه C، ۵۹٪ کاهش یافته است.

با افزایش مقدار الیاف شیشه از ۲ به ۴ درصد، تأثیر ناچیزی در مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات مشاهده می‌شود، که مطابق آن، مقاومت فشاری ۱ روزه نمونه CG/۲-P برابر ۲۸ مگاپاسکال و نمونه CG/۴-P برابر ۲۵ مگاپاسکال است. همچنین در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند، مقاومت فشاری ۱ روزه مثلاً نمونه PG/۲-P برابر ۱۱ مگاپاسکال و نمونه PG/۴-P برابر ۱۰ مگاپاسکال است.

با افزایش سن، مقاومت فشاری همه‌ی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به طوری که مقاومت ۹۰ روزه نمونه PG/۴-P برابر ۴۸ مگاپاسکال و مقاومت ۱ روزه آن برابر ۱۰ مگاپاسکال است. در نتیجه مشاهده می‌شود که مقاومت ۹۰ روزه نمونه مذکور ۴/۸ برابر مقاومت ۱ روزه آن است. همچنین در نمونه CG/۴-P مشاهده می‌شود که مقاومت ۹۰ روزه نمونه اخیر، ۲ برابر مقاومت ۱ روزه نمونه است.

۲.۶. مقاومت خمشی

آزمون مقاومت خمشی بر روی نمونه‌ها در سن ۲۸ و ۹۰ روزه صورت گرفته است. نتایج آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزودن پلیمر به مخلوطها به دلیل تشکیل فیلم پلیمر در نمونه‌های پلیمری سبب افزایش مقاومت خمشی می‌شود. فیلم پلیمرها به سبب حالتشان مانند الیاف عمل می‌کنند و افزایش مقاومت خمشی را

۳- پس از افزودن آب و پلیمر به مخلوط، به مقدار لازم فوق روان‌ساز افزوده شد. مقدار روان‌ساز بر مبنای دست‌یابی به کارایی مطلوب، به نحوی که قالب‌گیری و تراکم به صورت مناسب انجام شود، تنظیم شده است. لیکن نسبت روان‌ساز در مخلوط‌های حاوی الیاف شیشه بالاست، که نشان‌گر عدم توانایی مواد مذکور در بهبود روانی چنین مخلوط‌هایی است. به ویژه در مخلوط ۴٪ الیاف شیشه، درصد بالای روان‌ساز مؤید این مطلب است که در مخلوط‌های اخیر لازم است از روش شاکریت برای تولید بتن استفاده کرد.

۴- در پایان، الیاف اضافه و مصالح به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند. مخلوط آماده شده در قالب‌ها ریخته و روی میز ویبره به مدت یک دقیقه، تراکم انجام شده است. خواص بتن تازه در جدول ۶ ارائه شده است.

عمل‌آوری صورت گرفته برای نمونه‌ها بدین صورت بوده است که نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت، از قالب خارج شدند و ابتدا به مدت ۷ روز در حوضچه‌های آب با دمای 24 ± 2 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و پس از ۷ روز از زمان ساخت، نمونه‌ها از آب خارج و در محیط اتاق با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد تا سن ۲۸ و ۹۰ روز نگاه داشته شدند.

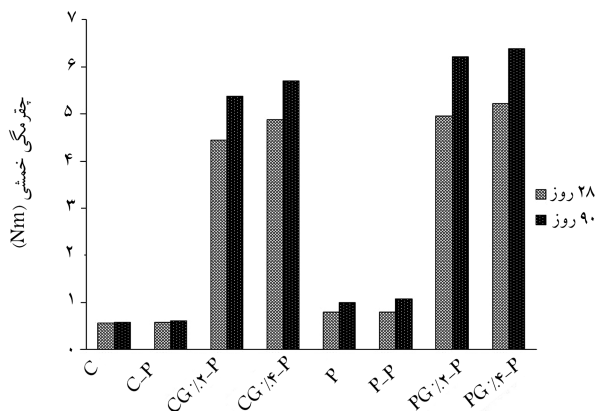
استفاده از افزودنی‌ها، مشخصات و ریزساختار بتن را تحت تأثیر ۳۰ قرار می‌دهند، لذا می‌توانند آثاری در چسبندگی بتن به سطح میلگرد داشته باشند. به همین لحاظ برای عملکرد خمشی یا کششی آرماتور استفاده از میلگرد آجدار و رعایت طول مهار الزامی است، تا به طریق مکانیکی، اتصال مناسب برقرار شود. موضوع مذکور در پژوهش حاضر مطالعه نشده است، لیکن می‌تواند زمینه‌ی پژوهشی مناسبی در مطالعات آتی باشد.

۶. نتایج و بحث

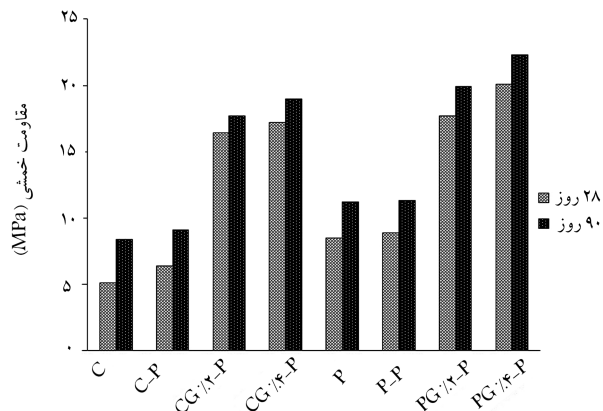
۶.۱. مقاومت فشاری

در آزمون مقاومت فشاری، نمونه‌ها در سن ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تحت تنش فشاری قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات از نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند بیشتر است، به طوری که مقاومت ۱ روزه نمونه C، ۸۵ مگاپاسکال است، لیکن مقاومت ۱ روزه نمونه P برابر ۲۱ مگاپاسکال است. همچنین مقاومت ۹۰ روزه نمونه P برابر ۷۲ مگاپاسکال است، که این بدان معناست که مقاومت ۱ روزه نمونه ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات از مقاومت ۹۰ روزه نمونه ساخته شده با سیمان پرتلند بیشتر است، که این یکی از ویژگی‌های سیمان کلسیم آلومینات است. با مقایسه با نوشتار مصطفی و همکاران (۲۰۱۲، [۳۳]) نیز مشاهده می‌شود که مقاومت اولیه‌ی نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات بیشتر از سایر نمونه‌های ساخته شده است.

با افزودن ۵٪ پلیمر، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد، چرا که فیلم پلیمرها اطراف ذرات غیرهیدراته‌ی سیمان را می‌گیرند و هیدراسیون را با اختلال مواجه می‌کنند، در نتیجه مقاومت فشاری را با کاهش روبرو می‌کنند، به طوری که مشاهده می‌شود



شکل ۵. طاقتم خمشی مخلوط‌های مورد بررسی.



شکل ۴. مقاومت خمشی (۲۸ و ۹۰ روز).

۹/۱ مگاپاسکال و در سن ۲۸ روز، ۶/۴ مگاپاسکال است، که نشان دهنده ۴۲٪ افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه نسبت به ۹۰ روزه است. محصولات هیدراسیون سیمان‌های پرتلند با سیمان کلسیم آلومینات متفاوت هستند و به نظر می‌رسد عملکرد مطلوب‌تری در بهبود مشخصات مکانیکی از بتن، که مستقیماً تحت تأثیر تنش‌های کششی هستند، داشته باشند.

۳.۶. بررسی طاقتم خمشی کشسان

طاقتم خمشی کشسان نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز صورت گرفته است. در مطالعه حاضر، طاقتم مخلوط‌های حاوی الیاف و پلیمر بررسی شده است، تا میزان تأثیر الیاف و پلیمر در افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها و تحمل کرنش‌های بالاتر مشخص شود. لذا هر چه طاقتم بیشتر باشد، احتمال ایجاد شکست ترد در بتن کاهش می‌یابد و همچنین ضعف‌های ریزساختار ماتریس بتنی را جبران می‌کند. تشکیل فیلم پلیمرها سبب تقویت ناحیه انتقالی میان سنگدانه و خمیر سیمان می‌شود و همچنین سبب کاهش تخلخل‌های ساختاری می‌شود و همین امر باعث جبران ضعف‌های ریزساختاری ماتریس بتن می‌شود.

با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزودن پلیمر، طاقتم به مقدار اندکی افزایش می‌یابد. یکی از ویژگی‌های فیلم پلیمرها، مقاومت کششی مطلوب آنهاست، که همین امر به جذب انرژی بیشتر نمونه‌ها و در نتیجه افزایش طاقتم منجر می‌شود. به گونه‌ای که مشاهده می‌شود طاقتم خمشی نمونه P-P در سن ۹۰ روز نسبت به نمونه P در همان سن، ۹٪ و نمونه C-P نسبت به C در همان سن ۹۰ روز، ۴٪ افزایش یافته است.

ماهیت الیاف شیشه این‌گونه است که به خوبی انرژی را جذب می‌کند، در نتیجه اضافه کردن آن به مخلوط‌ها سبب افزایش مساحت زیر نمودار خیز- نیرو و در نتیجه افزایش طاقتم خمشی کشسان می‌شود. استفاده از ۲٪ الیاف شیشه باعث افزایش طاقتم نسبت به نمونه کنترل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در ۲٪ حجمی الیاف شیشه در سن ۹۰ روز، طاقتم نمونه حاوی سیمان کلسیم آلومینات (CG/۲-P) تا ۹ برابر نسبت به نمونه C-P افزایش یافته است. این افزایش طاقتم در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند نیز مشاهده می‌شود، به طوری که طاقتم نمونه PG/۲-P نیز در سن ۹۰ روز، ۶ برابر نسبت به نمونه P-P افزایش یافته است.

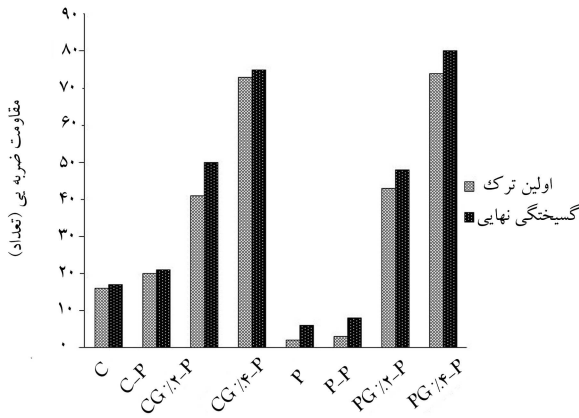
همچنین با افزایش درصد الیاف شیشه از ۲ به ۴ درصد، طاقتم نمونه افزایش بیشتری می‌یابد؛ به گونه‌ای که مشاهده می‌شود طاقتم نمونه CG/۴-P در سن ۲۸

سبب می‌شوند، لیکن همین پلیمرها می‌توانند آب را در درون خودشان نگه دارند و مانع هیدراسیون سیمان و کاهش مقاومت فشاری شوند. همین دلیل باعث می‌شود که نتایج مقاومت فشاری و مقاومت خمشی با یکدیگر متفاوت باشد، یعنی فیلم‌های پلیمری سبب افزایش طاقتم مخلوط‌ها می‌شود و از شکست ترد ماتریس سیمان جلوگیری می‌کند، به گونه‌ای که مشاهده می‌شود مقاومت خمشی نمونه C-P در سن ۹۰ روز نسبت به نمونه C، ۸٪ و نمونه P-P در همان سن ۹۰ روز نسبت به نمونه P، ۲٪ افزایش یافته است.

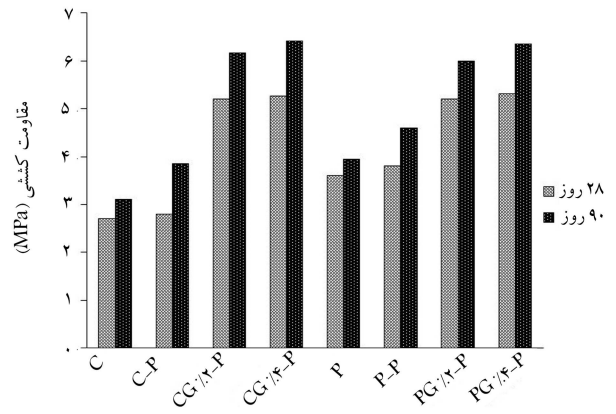
همچنین با بررسی نوشتار چهارزی و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲۱] مشاهده شد که افزودن پلیمراتیلن وینیل استات در ساختار ملات‌ها می‌تواند مقاومت خمشی نمونه‌ها را افزایش دهد و علت این افزایش و رشد مقاومت را می‌توان به فیلم پلیمرها، که توسط مواد پلیمری ایجاد می‌شود، مرتبط دانست.

مقاومت خمشی نمونه‌های مسلح شده با الیاف به شدت وابسته به ناحیه انتقالی و درگیری بین الیاف و ماتریس سیمانی است، با افزودن الیاف شیشه به مخلوط، افزایش مقاومت خمشی در هر دو نوع سیمان مشاهده می‌شود. الیاف شیشه قطر کمی دارند در نتیجه به دلیل ضخامت کم الیاف شیشه، ناحیه انتقالی که اطراف الیاف و ماتریس سیمان شکل می‌گیرد، خواص مناسبی از لحاظ ساختاری دارد، به همین دلیل پیوستگی مناسبی بین الیاف و ماتریس سیمان ایجاد شده است، که سبب درگیری مطلوب الیاف شیشه حین فرایند بارگذاری می‌شود. افزودن ۲٪ الیاف شیشه به نمونه ساخته شده با سیمان پرتلند (PG/۲-P) در سن ۲۸ روز، مقاومت خمشی را تا ۹۸٪ نسبت به نمونه P-P افزایش می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که مقاومت خمشی نمونه PG/۲-P در سن ۲۸ روز، ۲ برابر مقاومت خمشی نمونه کنترل فاقد الیاف و پلیمر (P) است. همان‌طور که گفته شد، افزایش مقاومت خمشی ایجاد شده در نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات نیز مشاهده می‌شود. به طور مثال، مقاومت خمشی نمونه CG/۲-P در سن ۹۰ روز، ۹۴٪ نسبت به نمونه C-P افزایش یافته است. همچنین با مقایسه مقاومت خمشی نمونه CG/۲-P با نمونه C در همان سن ۹۰ روز مشاهده می‌شود که مقاومت خمشی CG/۲-P، حدود ۲ برابر مقاومت خمشی نمونه C است.

افزایش مقدار الیاف شیشه از ۲ به ۴ درصد در نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات در سن ۹۰ روز سبب افزایش ۷ درصدی مقاومت خمشی شده است. این افزایش مقاومت در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند برابر ۱۲٪ است. با افزایش سن از ۲۸ به ۹۰ روز نیز در تمامی نمونه‌ها، افزایش مقاومت خمشی مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که مقاومت خمشی نمونه C-P در سن ۹۰ روز برابر



شکل ۷. مقاومت در برابر ضربه (۱۰۰٪ روز).



شکل ۶. مقاومت کششی (۲۸ و ۹۰ روز).

نمونه‌ی C و نمونه‌های PG/۲-P و PG/۴-P به ترتیب ۳۷ و ۴۰ درصد نسبت به نمونه‌ی P-P و نیز ۴۵ و ۴۷ درصد به ترتیب نسبت به نمونه‌ی P در سن ۲۸ روز افزایش یافته‌اند. در نوشتار کین و همکاران (۲۰۱۲)، [۳۵] نشان داده شده است که با توجه به ضعف کششی بتن، استفاده از الیاف برای افزایش مقاومت کششی در آزمون کشش محوری مؤثر است.

در رفتار خمشی تیرهای بتنی، تار انتهایی تحت کشش قرار می‌گیرد. با توجه به این‌که خمیر سیمان در برابر نیروهای کششی ضعیف عمل می‌کند، استفاده از الیاف و سایر افزودنی‌ها می‌تواند سبب تقویت بخش کششی و بالتبع بهبود قابل توجه مقاومت خمشی در برابر نیروهای اعمالی شود. در رفتار خمشی یا کششی، ابتدا خمیر سیمان در برابر نیروها مقاومت می‌کند و پس از این‌که خمیر سیمان گسیخته و اولین ترک در آن ایجاد شد، الیاف در برابر نیروهای اعمالی مقاومت می‌کنند، که این امر سبب افزایش مقاومت و طاقت تیرهای بتنی در برابر نیروهای اعمالی می‌شود. همچنین استفاده از افزودنی‌هایی نظیر الیاف در ساختار مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی، سبب افزایش انسجام ساختار خمیر سیمان و یک‌پارچگی مخلوط‌ها می‌شود و تأثیر مثبت در عملکرد خمشی می‌گذارد.

۵.۶. مقاومت در برابر ضربه

نتایج آزمون مقاومت ضربه‌یی، که در سن ۱۰۰ روز بر روی نمونه‌ها انجام شده است، در شکل ۷ مشهود است. در آزمون مقاومت در برابر ضربه، دو پارامتر ایجاد اولین ترک بر سطح نمونه و گسیختگی نهایی، که وابسته به تعداد ضربات وارده بر سطح نمونه است، ملاک عمل قرار گرفته است.

با افزودن پلیمر به نمونه‌های کنترل به دلیل این‌که ساختار نمونه منسجم‌تر است، مقاومت در برابر ضربه‌ی آن بیشتر است، به طوری که نسبت تعداد ضربات نمونه‌ی C-P به C در اولین ترک برابر ۱/۲۵ و نسبت تعداد ضربات نمونه‌ی P-P به P در اولین ترک ۱/۵ است. بدین معنی که مقاومت در برابر ضربه‌ی نمونه‌ی C-P، ۲۵٪ نسبت به نمونه‌ی C افزایش و نمونه‌ی P-P، ۵۰٪ نسبت به نمونه‌ی P افزایش یافته است.

افزودن الیاف شیشه به مخلوط، مقاومت ضربه‌یی را افزایش می‌دهد. الیاف شیشه به دلیل قطر کم و ریز بودن آن، پیوستگی خوبی با ماتریس سیمانی ایجاد می‌کنند؛ بنابراین سبب انسجام ساختاری مطلوبی می‌شوند، که این امر باعث افزایش مقاومت ضربه‌یی می‌شود.

مشاهده می‌شود که نمونه‌های CG/۲-P و CG/۴-P به ترتیب با ۵۰ و ۷۵

روز، برابر نمونه‌ی C-P است. با مقایسه‌ی دو نمونه‌ی CG/۲-P و CG/۴-P نتیجه گرفته می‌شود که افزایش درصد الیاف شیشه در نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات سبب افزایش ۱۰ درصدی طاقت در سن ۲۸ روزه شده است. همچنین با مقایسه‌ی دو نمونه‌ی PG/۲-P و PG/۴-P نیز افزایش ۵ درصدی نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند با افزودن الیاف از ۲ به ۴ درصد مشاهده می‌شود. شریتر و همکاران (۲۰۱۷)، [۳۲] در پژوهش خود دریافتند که هر چه درصد الیاف زیادتر شود، مشخصه‌های مقاومت خمشی نظیر جذب انرژی و ضریب طاقت بهبود می‌یابد.

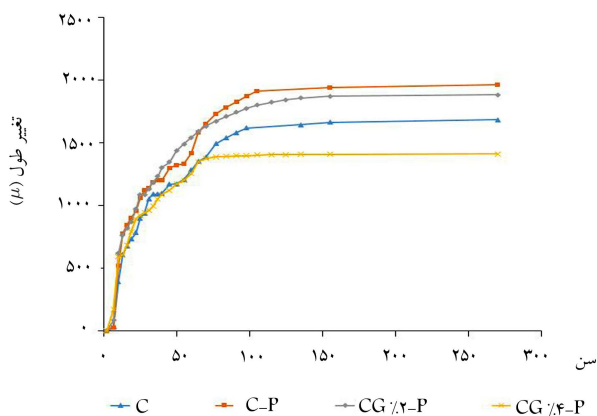
در مقایسه‌ی مخلوط‌های حاوی سیمان پرتلند و کلسیم آلومینات، تفاوت ملموسی از لحاظ طاقت و میزان انرژی جذب شده مشاهده نمی‌شود؛ به طوری که مشاهده می‌شود طاقت نمونه‌ی C-P در ۹۰ روز، برابر ۰/۶ نیوتن‌متر و طاقت نمونه‌ی P-P در همان سن ۹۰ روز، برابر ۱/۰۸ نیوتن‌متر است، لیکن همچون نتایج مقاومت خمشی مخلوط ساده حاوی سیمان پرتلند طاقت بیشتری نسبت به مخلوط با سیمان کلسیم آلومینات داشته است.

۴.۶. مقاومت کششی

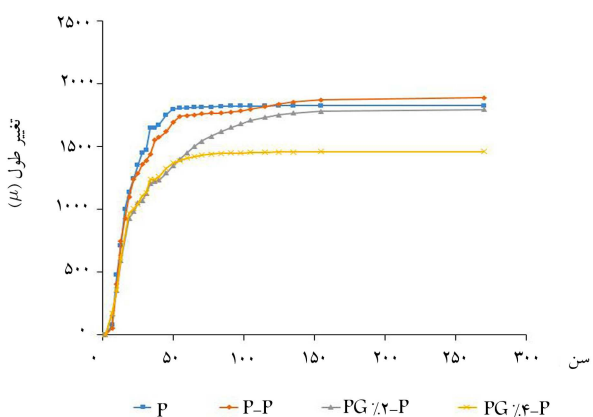
برای انجام آزمون مقاومت کششی از نمونه‌های براکتی استفاده است. نتایج مربوط به مقاومت کششی نمونه‌های اصلاح شده با الیاف و پلیمر در سن ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

در سن ۲۸ و ۹۰ روزه، فیلم پلیمرها فرصت خشک شدن و تشکیل شبکه‌های گسترده‌ی فیلم پلیمر در ماتریس بتن را دارد، به همین منظور استفاده از پلیمر سبب افزایش مقاومت کششی می‌شود و در مقایسه با مخلوط فاقد پلیمر به ویژه در سن ۹۰ روزه، افزایش مذکور مقاومت مشهود است. به طور مثال، مقاومت کششی نمونه‌ی P-P در ۹۰ روز برابر ۴/۶ مگاپاسکال است، که نسبت به نمونه‌ی P در همان سن ۹۰ روز، ۱۶/۵٪ افزایش یافته است. همچنین مقاومت کششی نمونه‌ی C-P در سن ۹۰ روز برابر ۳/۹ مگاپاسکال است، که نسبت به نمونه‌ی C در همان سن ۹۰ روز، ۲۴٪ افزایش یافته است.

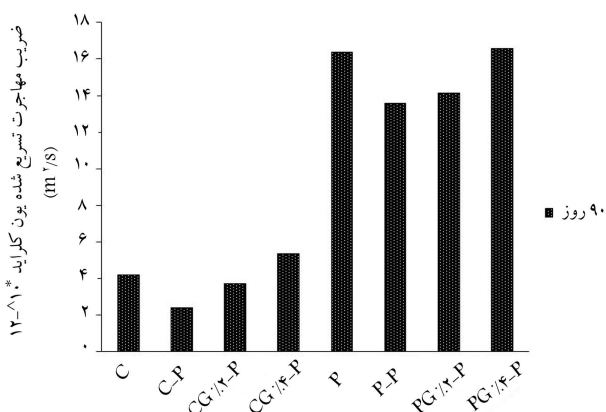
افزایش مقاومت کششی، عملکرد خوب پلیمر و الیاف در ساختار و بهبود مقاومت کششی را نشان می‌دهد. الیاف و پلیمر به عنوان بخش یک‌پارچه‌یی از کامپوزیت سیمانی عمل می‌کنند، در نتیجه سبب بهبود مقاومت کششی می‌شوند. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نمونه‌های CG/۲-P و CG/۴-P به ترتیب ۸۶ و ۸۸ درصد نسبت به نمونه‌ی C-P و همچنین ۹۳ و ۹۵ درصد به ترتیب نسبت به



شکل ۸. تغییر طول نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات.



شکل ۹. تغییر طول نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند.



شکل ۱۰. ضریب مهاجرت تسریع شده یون کلراید در سنین ۹۰ روز.

با $10^{-12} \times 13/59$ مترمربع بر ثانیه است، که بیش از ۶ برابر نمونه‌های پایه ی سیمان کلسیم آلومیناتی است.

در نمونه‌های اصلاح شده مشاهده می‌شود که میزان نفوذ با افزودن پلیمر در ساختار کمتر شده است، که این امر مقاومت خوب پلیمر و فیلم پلیمرهای تشکیل شده از آن را در برابر آب و نفوذ یون کلراید، به نمایش می‌گذارد. همچنین در مطالعه ی مدنی و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲۷] مشاهده شد که با افزودن پلیمر، نفوذ یون کلراید به داخل بتن کاهش می‌یابد.

ضربه و نمونه‌های PG/۴-P و PG/۲-P به ترتیب ۴۸ و ۸۰ ضربه گسیخته می‌شوند. در صورتی که نمونه ی C با ۱۷ ضربه و نمونه ی P با ۶ ضربه کاملاً گسیخته می‌شوند. نمونه‌های دارای الیاف و پلیمر، شکل پذیرند و نمونه‌های بدون الیاف و پلیمر، ترد و شکننده هستند و همین عامل سبب شکست آنها تحت ضربات کم می‌شود. دالوند و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲۶] در پژوهشی به بررسی مقاومت ضربه‌یی بتن‌های توانمند کامپوزیتی پرداختند و دریافتند که با افزایش درصد الیاف، تعداد ضربه‌های لازم به منظور رخ دادن اولین ترک و همچنین شکست نهایی افزایش می‌یابد.

۶.۶. تغییر طول

میزان تغییر طول برای منشورهای اصلاحی با پلیمر و الیاف در سن ۲۷۰ روز در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود.

افزودن ۵٪ پلیمر به نمونه‌ها، سبب افزایش تغییر طول آنها می‌شود، لیکن این افزایش تغییر طول در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند کمتر است. علت اصلی افزایش میزان انقباض در محصولات حاوی مواد پلیمری به درصد کم استفاده از آن در ساختار مخلوط‌های پایه ی سیمانی مرتبط است. برای درصد کم مواد پلیمری، نفوذ کامل فیلم‌های پلیمری در منافذ موئینه اتفاق نمی‌افتد، لذا درصد کمی از منافذ موئینه توسط فیلم‌های پلیمری مسدود می‌شود؛ در نتیجه، عملکرد مناسب در جلوگیری از تبخیر آب در منافذ موئینه صورت نمی‌پذیرد. از سوی دیگر، زمانی که فیلم پلیمرها اطراف ذرات سیمان را می‌گیرند، از هیدراسیون آنها ممانعت می‌کنند، که این مسئله سبب افزایش مقدار آب آزاد در نمونه‌ها می‌شود، که با تبخیر تدریجی، آب جمع‌شدگی رخ داده افزایش می‌یابد. این دلایل سبب افزایش میزان تغییر طول در مخلوط‌های سخت شده حاوی درصد پایین مواد پلیمری می‌شود.^[۱۹] انتظار می‌رود برخلاف نتایج مطالعه‌ی حاضر در درصد‌های بالای پلیمر، کاهش جمع‌شدگی مخلوط‌های سیمانی مشاهده شود. به عنوان مثال، در پژوهش مدنی و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲۷] در نتایج جمع‌شدگی مخلوط‌های سیمانی اصلاح شده با پلیمرهای اتیلن وینیل استات و وینیل استات، در نسبت وزنی سیمان ۲۵٪ کاهش چشمگیر گزارش شده است. الیاف جلوی جمع‌شدگی و انتشار ترک‌ها را می‌گیرند، در نتیجه در نمونه‌های حاوی الیاف شیشه، کاهش تغییر طول مشاهده می‌شود و هر چه درصد الیاف زیادت شود، مقدار کاهش تغییر طول بیشتر می‌شود. مشاهده می‌شود که تغییر طول نمونه ی PG/۲-P برابر ۱۷۹۵ میکرو کرنش است، در صورتی که نمونه ی PG/۴-P تغییر طول آن ۱۴۶۲ میکرو کرنش است.

۷.۶. مهاجرت تسریع شده یون کلراید

نتایج آزمون مهاجرت تسریع شده یون کلراید در سن ۹۰ روز در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

در نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات، ضریب تسریع شده ی مهاجرت یون کلراید در سن ۹۰ روز کمتر از سیمان پرتلند است. در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند به دلیل تداخل بیشتر به علت عدم تراکم دانه‌های سیمان دارای میزان نفوذ یون کلراید بالایی لیکن در نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات، فضاهای متخلخل توسط هیدراته‌های کلسیم آلومینات پر می‌شوند. به عنوان مثال، نمونه ی پایه ی سیمان کلسیم آلومینات حاوی پلیمر دارای ضریبی برابر با $10^{-12} \times 2/410$ مترمربع بر ثانیه است، در حالی که همین مخلوط پایه ی سیمان پرتلند و مواد پلیمری، دارای ضریب مهاجرت تسریع شده یون کلرایدی برابر

- اضافه کردن پلیمر به مخلوط سبب افزایش طاقت نمونه‌ها می‌شود. نمونه‌های حاوی الیاف شیشه به دلیل ماهیت الیاف شیشه که جاذب بسیار خوب انرژی است، بیشترین طاقت را در بین نمونه‌ها کسب کرده‌اند.
- نمونه‌های پلیمری در آزمون مقاومت کششی، همانند آزمون مقاومت خمشی عمل می‌کنند، به طوری که با افزودن پلیمر به مخلوط‌ها به دلیل تشکیل فیلم پلیمرها، افزایش مقاومت کششی در نمونه‌های مذکور مشاهده می‌شود.
- تحت آزمون ضربه‌ی نمونه‌های کنترل در هر دو نوع سیمان در کمترین ضربه از هم‌گسیخته می‌شود، لیکن نمونه‌ی کنترل حاوی سیمان کلسیم آلومینات در این آزمون به دلیل کسب مقاومت در سنین پایین و تشکیل سریع ریزساختار مقاوم‌تر از نمونه‌ی کنترل حاوی سیمان پرتلند است. افزودن پلیمر در مخلوط‌ها تأثیر ناچیزی در مقاومت در برابر ضربه دارد. افزودن الیاف شیشه به دلیل جاذب بالای انرژی و پیوستگی خوب الیاف با ماتریس سیمانی، که سبب انسجام ساختاری می‌شود، مقاومت ضربه را افزایش می‌دهد.
- در نمونه‌های پلیمری، افزایش تغییر طول مشاهده می‌شود. در نمونه‌های الیافی حاوی پلیمر، الیاف سبب کاهش تغییر طول می‌شوند و هرچه درصد الیاف بیشتر باشد، تغییر طول کمتر می‌شود.
- با افزودن پلیمر به مخلوط‌ها، به دلیل مقاومت خوب پلیمر و فیلم پلیمرها در برابر نفوذ، نفوذ یون کلراید در نمونه‌های مذکور کاهش می‌یابد. لیکن افزودن الیاف سبب افزایش نفوذ یون کلراید می‌شود. نفوذ یون کلراید در نمونه‌های ساخته شده با سیمان کلسیم آلومینات به دلیل تخلخل کمتر آن نسبت به سیمان پرتلند، کمتر است.
- افزودن الیاف به مخلوط‌ها سبب افزایش نفوذ یون کلراید می‌شود، زیرا الیاف به دلیل ضخامتی که دارند، سبب یک ناحیه‌ی انتقالی ضخیم در اطراف دیواره‌ی خود می‌شوند، لذا سبب ایجاد منافذ ساختاری و نیز باعث شار یون‌های کلراید به داخل مخلوط سخت می‌شود و در نتیجه، نفوذ یون کلراید در داخل مخلوط افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار الیاف از ۲٪ به ۴٪، نفوذ یون کلراید بیشتر می‌شود، به گونه‌ی که با مقایسه‌ی دو نمونه‌ی PG/۲-P و PG/۴-P، ۱۷٪ افزایش نفوذ یون کلراید مشاهده می‌شود. با مقایسه‌ی دو نمونه‌ی CG /۲-P و C-P مشاهده می‌شود که اضافه کردن فقط ۲٪ الیاف شیشه به مخلوط، ۵۵٪ نفوذ یون کلراید افزایش می‌یابد.

۷. نتیجه‌گیری

- در پژوهش حاضر، مقاومت فشاری نمونه‌ی کنترل (بدون الیاف و پلیمر) سیمان کلسیم آلومینات نسبت به سیمان پرتلند افزایش یافته و با افزودن پلیمر به نمونه‌ها، مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده است. همچنین مشاهده شد که با اضافه شدن مقدار الیاف شیشه از ۲٪ به ۴٪، کاهش مقاومت کمتر بوده است.
- در نمونه‌های حاوی پلیمر به دلیل تولید فیلم پلیمر در ساختار نمونه‌ها، مقاومت خمشی افزایش یافته و با اضافه کردن الیاف شیشه، مقاومت خمشی افزایش پیدا کرده است.

منابع (References)

1. Kirca, Ö., Yamma, İÖ. and Tokyay, M. "Compressive strength development of calcium aluminate cement-GGBFS blends", *Cement and Concrete Composites*, **35**(1), pp. 163-170 (2013).
2. Scrivener, K.L. "Calcium aluminate cements", *Advanced Concrete Technology Set*, Oxford:Elsevier, pp. 1-31 (2003).
3. Hewlett, P.C. "Lea's chemistry of cement and concrete", Elsevier, pp.83-243 (2003).
4. Newman, and Choo, B.S. "Advanced concrete technology 3: processes", Butterworth-Heinemann, Elsevier, pp.1-29 (2003).
5. Barnes, P. and Bensted, J. "Structure and performance of cements", CRC Press, Taylor and francis grup, pp.560-566 (2002).
6. Antonović, V., Keriene, J., Boris, R. and et al. "The effect of temperature on the formation of the hydrated calcium aluminate cement structure", *Procedia Engineering, Elsevier B.V.*, **57**, pp. 99-106 (2013).
7. Kurdowski, W. "Cement and concrete chemistry", *Springer Science & Business*, pp.604-610 (2014).
8. Shang, X., Ye, G., Zhang, Y., and et al. "Effect of micro-sized alumina powder on the hydration products of calcium aluminate cement at 40°C", *Ceramics International*, **42**(13), pp. 14391-14394 (2016).
9. Xu, L., Wang, P. and Zhang, G. "Formation of ettringite in portlan cement/calcium aluminate cement/calcium sulfate ternary system hydrates at lower temperatures", *Construction and Building Materials*, **31**, pp. 347-352 (2012).
10. Yoo, D.-Y. and Yoon, Y.-S. "A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **10**(2), pp. 125-142 (2016).
11. Yoo, D.-Y., Park, J.-J. and Kim, S.-W. "Fiber pull-out behavior of HPRCC: effects of matrix strength and fiber type", *Composite Structures*, **174**, pp. 263-276 (2017).
12. Pajak, M. and Ponikiewski, T. "Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers", *Construction and Building Materials*, **47**, pp. 397-408 (2013).
13. Bantia, N. and Sappakittipakorn, M. "Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization", *Cement and Concrete Research*, **37**(9), pp. 1366-1372 (2007).
14. Passuello, A., Moriconi, G. and Shah, S.P. "Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admix-

- tures and PVA fibers”, *Cement and Concrete Composites*, **31**(10), pp. 699-704 (2009).
15. Chen, P.-W., and Chung, D.D.L. “Comparative study of concretes reinforced with carbon, polyethylene, and steel fibers and their improvement by latex addition”, *Materials Journal*, **93**(2), pp. 129-146 (1996).
 16. Lee, J.-H., Cho, B. and Choi, E. “Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content”, *Construction and Building Materials*, **138**, pp. 222-231 (2017).
 17. Tassew, S.T., and Lubell, A.S. “Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete”, *Construction and Building Materials*, **51**, pp. 215-224 (Jan., 2014).
 18. Knapen, E. and Gemert, C.Van “Cement and concrete research cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers”, *Cement and Concrete Research*, **39**(1), pp. 6-13 (2009).
 19. Ohama, Y. “Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology”, *William Andrew*, pp.1-210 (1995).
 20. Odler, I. Taylor & Francis Group “Special Inorganic Cements”, CRC Press, 416 p. (2000).
 21. Chehrazi Sefiddashti, H., Madani, H. and saeedikia, A. “Investigation on the mechanical properties and durability of modified cement based materials with ethylene vinyl acetate and styrene acrylic”, *Concrete Research*, **11**(4), pp. 31-40 (in persian) (2018).
 22. Huang, B., Wu, H., Shu, X. and et al. “Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete”, *Construction and Building Materials*, **24**(5), pp. 818-823 (2010).
 23. Su, Z., Larbi, J.A. and Bijen, J.M.J.M. “The interface between polymer-modified cement paste and aggregates”, *Cement and Concrete Research*, **21**(6), pp. 983-990 (1991).
 24. Saeedikia, A. and Madani, H. “Influence of polymer materials on the durability of calcium aluminate cement based mixtures”, *Journal of Concrete Structures and Materials*, **3**(2), pp. 24-40 (2019) (In persian) .
 25. ASTM C128 “Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate”, *In ASTM West Conshohocken, PA, Annual Book of ASTM Standards* (2015).
 26. ASTM C109/C109M-16a, “Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens)” *Annual Book of ASTM Standards* (2016).
 27. BS EN 196-1, “Methods of testing cement — determination of strength”, *British Standards Institute* (2005).
 28. ASTM C1018-97, “Standard test method for flexural toughness and first-Crack strength of fiber-reinforced concrete (Using beam with third-point loading)”, *Annual Book of ASTM Standards* (1997).
 29. ASTM C190-85, “Method of test for tensile strength of hydraulic cement mortars”, *ASTM Philadelphia PA, Annual Book of ASTM Standards* (1985).
 30. ACI Committee 544.2R-89, “Measurement of properties of fiber reinforced concrete”, *Aci., 544.2R, no. Reapproved, American Concrete Institute*, p. 12 (1999).
 31. ASTM C 490-04,” Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement, paste, mortar, and concrete”, *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, pa (2004).
 32. NT Build 492, “Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments”, *ESPOO*, Finland (1999).
 33. Mostafa, N.Y., Zaki, Z.I. and Elkader, O.H.A. “Chemical activation of calcium aluminate cement composites cured at elevated temperature”, *Cement and Concrete Composites*, **34**(10), pp. 1187-1193 (2012).
 34. Sharbatdar, M.K. and Aliasgari, M. “Experimental investigation of compressive and flexural capacity of concrete panels reinforced with GFRP fiber”, *Concrete Research*, **10**(2), pp. 15-31 (2017) (in persian).
 35. Kene, K.S., Vairagade, V.S. and Sathawane, S. “Experimental study on behavior of steel and glass fiber reinforced concrete composites”, *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, **2**(4), pp. 125-130 (2012).
 36. Dalvand, A. “Experimental study on impact behaviour of high performance concrete with statistical approach”, *Modares Civil Engineering Journal*, **17**(4), pp. 39-49 (2017) (in persian).
 37. Madani, H. “The influence of ethylene vinyl acetate and vinyl acetate polymers on mechanical properties, shrinkage and durability of calcium aluminate cement based mixtures”, *Modares Civil Engineering Journal*, **18**(4), pp. 101-114 (2018) (in persian).