

مطالعه آزمایشگاهی نقش الیاف هیبریدی بر جذب آب و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی

امیر بهادر مرادی خوا، علیرضا اسپرهم^۲

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران.
- ۲- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران.

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط: amirbahador.mk@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط زیست، به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است که می‌تواند منجر به کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند شود. بتن ژئوپلیمری الیافی به عنوان یک نوع از بتن‌های جدید با شکل‌پذیری بیشتر نسبت به بتن معمولی، شناخته می‌شود. در این پژوهش آزمایشگاهی، از الیاف هیبریدی از جنس پلی پروپیلن اصلاح شده ۱۲ میلی‌متری و پلی الفین ۵۵ میلی‌متری، برای ساخت بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی، استفاده شد. در همین راستا، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و فاقد الیاف ساخته و عمل‌آوری شد. سپس آزمون‌های جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلین) و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای روی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری انجام شد. نتایج نشان داد استفاده از الیاف سبب کاهش جذب آب و وزن مخصوص نمونه‌های الیافی نسبت به نمونه فاقد الیاف شد. همچنین استفاده از الیاف هیبریدی سبب افزایش اندک مقاومت فشاری و افزایش قابل ملاحظه مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی نسبت به نمونه فاقد الیاف شد.

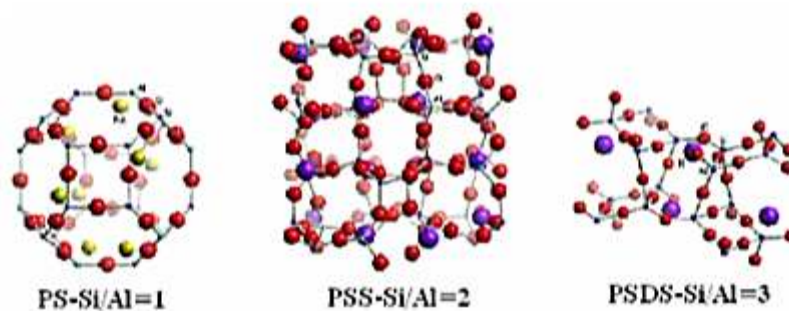
کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری الیافی، الیاف هیبریدی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی.

۱. مقدمه

سیمان پرتلند به عنوان عنصر اصلی سازنده بتن‌های معمولی، پرمصرف‌ترین مصالح سیمانی در صنعت ساخت ساز است [۱-۴]. اما تولید سیمان پرتلند معایب بزرگ زیست محیطی دارد از جمله مصرف بالای انرژی، مصرف منابع اولیه و انتشار گاز دی‌اکسید کربن [۱ و ۵]. به طوری که تولید ۱ تن سیمان پرتلند سبب رها سازی تقریباً ۱ تن دی‌اکسید کربن به محیط زیست [۶-۸] و مصرف ۱/۵ تن مواد اولیه می‌شود [۹]. از سوی دیگر، آلودگی و پدیده گرمایش جهانی به مهم‌ترین نگرانی‌ها در کشورهای پیشرفته تبدیل شده‌اند [۲]. علت اصلی پدیده گرمایش جهانی انتشار گازهای گلخانه‌ای است و در میان گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن با میزان انتشار ۶۵ درصد، بیشترین نقش را در پدیده گرمایش جهانی دارد [۱۰]. فرآیند تولید سیمان پرتلند عامل تولید ۷ تا ۱۰ درصد از کل میزان انتشار جهانی دی‌اکسید کربن است [۱۱]. کشور ما نیز به عنوان پنجمین تولید کننده سیمان پرتلند در معرض این مشکلات زیست

محیطی قرار دارد. در سال‌های اخیر ژئوپلیمرها به عنوان یک عامل سیمانی سبز و یک جایگزین مناسب برای سیمان پرتلند، در سراسر جهان مطرح شده است. ژئوپلیمر برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی توسط داویدوویتس^۱ شیمیدان برجسته فرانسوی، به عنوان چسباننده‌های جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی شد. استفاده از سیمان های ژئوپلیمری می تواند انتشار دی‌اکسید کربن را ۴۴-۶۴ درصد در مقایسه با سیمان پرتلند، کاهش دهد [۱۲] همچنین، سبب استفاده بهینه از ضایعات موجود می‌شود که تاثیر مثبتی بر محیط زیست دارد [۱۳]. از نقطه نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن های ژئوپلیمری خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن های معمولی دارند که از جمله آنها می توان مقاومت های مکانیکی [۱۴-۱۶]، کارایی بالا [۱۷]، مقاومت در برابر آتش سوزی و حرارت های بالا [۱۸-۲۰]، نفوذ پذیری کم و مقاومت در برابر حمله نمک ها و اسید ها [۲۱ و ۲۲] و خزش پایین [۲۳] و [۲۴] اشاره کرد.

ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از واکنش ژئوپلیمریزاسیون منبع آلومیناسیلیکاتی غنی از سیلیکا (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) با یک محلول قلیایی فعال کننده حاصل می‌شوند [۲۵ و ۲۶]. ژئوپلیمریزاسیون واکنش سریع شیمیایی در شرایط قلیایی بین مینرال‌های Si و Al است که باعث تشکیل زنجیره سه بعدی پلیمری Si-O-Al می‌شود [۲۷-۲۹]. داویدوویتس نام پلی سیالیت^۲ را برای شناسایی ژئوپلیمرها پیشنهاد کرد که poly sialate نیز عبارت اختصاری برای زنجیره silicon-oxo-aluminate است. وی اعتقاد دارد سه مونومر اصلی پلی سیالیت (PS)، پلی سیالیت سیکلو (PSS) و پلی سیلیکات دی سیکلو (PSDS)، اساس ساختمان ژئوپلیمرها را تشکیل می‌دهند [۳۰-۳۳]. در شکل ۱ تصویر شماتیک این مونومرها نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر شماتیک سه مونومر PS، PSS و PSDS [۳۲]

محلول فعال کننده قلیایی به عنوان یکی از دو بخش اصلی ژئوپلیمرها نقش مهمی در تجزیه و تشکیل ساختار کریستالی Si و Al ایفا می‌کند و معمولاً بر مبنای سدیم یا پتاسیم که از فلزات قلیایی حلال هستند، انتخاب می‌شود. رایج‌ترین محلول فعال کننده قلیایی مورد استفاده در ژئوپلیمریزاسیون، ترکیبی از محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) یا پتاسیم (KOH) با محلول سیلیکات سدیم یا پتاسیم است [۳۴]. منبع آلومیناسیلیکاتی که با نام‌های دیگری مانند منبع ژئوپلیمریزاسیون، raw material، source material و بایندر شناخته می‌شود به عنوان تامین کننده Si و Al مهمترین نقش را در سیمان‌های ژئوپلیمری دارد. منبع آلومیناسیلیکاتی می‌تواند طبیعی مانند زئولیت یا کائولن، صنعتی مانند متاکائولن و یا مواد ضایعاتی یا محصول جانبی^۳ باشد که معمول‌ترین آنها فلی‌اش یا خاکستر بادی و سرباره (slag) است.

همان طور که در گفته شد بتن و خصوصاً بتن ژئوپلیمری، دارای مزایای متعددی است. اما در کنار این مزایا باید به معایب بتن نیز توجه شود که یکی از مهمترین آنها، مقاومت کششی کم است. در نتیجه بتن دارای شکل پذیری کم و تردی زیاد می‌باشد. از این رو در چند دهه برای رفع این مشکل از رشته‌های الیاف که به صورت یکنواخت در حجم بتن پراکنده می‌شوند، استفاده می‌شود. استفاده از الیاف در مواد ترد دارای سابقه‌ای طولانی بوده و به ۳۵۰۰ سال قبل

^۱ Davidovits
^۲ poly(sialate)
^۳ By product

از میلاد هنگامی که از آجر آفتاب‌پخته تقویت شده با نی که برای ساخت تپه مرتفع ۳۵ متری آکارکوف نزدیک بغداد استفاده شد، بر می‌گردد [۳۵]. همچنین از موی دم اسب نیز برای تقویت ملات بنایی و گچ استفاده شده است [۳۶]. استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن یافی، به عنوان یک گام موثر در جلوگیری از انتشار ریز ترک‌ها و ترک‌ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می‌شود [۳۷]. امروزه از الیاف به صورت گسترده جهت بهبود انواع خواص مانند: تقویت مقاومت فشاری، خمشی، کششی، ضربه‌ای، حرارتی و غیره، در انواع بتن استفاده می‌شود. این الیاف دارای طیف وسیعی از الیاف فلزی تا الیاف پلیمری هستند اما الیاف پلیمری مانند پلی پروپیلن، به دلیل اقتصادی بودن نسبت به الیاف فلزی، همواره مورد توجه پژوهشگران جهت استفاده در انواع بتن، بوده است. یکی از انواع جدید الیاف پلیمری، الیاف پلی الفین است. این الیاف برای ساخت بتن‌های الاستو-پلاستیک استفاده می‌شود و سبب افزایش سختی خمشی، مقاومت ضربه‌ای و همچنین کاهش انتشار ترک بتن می‌شود [۳۸]. از سوی دیگر، در سال‌های اخیر استفاده از الیاف هیبریدی دوگانه و چندگانه به منظور بهبود بیشتر خواص مورد نظر بتن‌های یافی، رواج یافته است. بتن ژئوپلیمری یافی به عنوان یک نوع از بتن‌های جدید با شکل‌پذیری بیشتر نسبت به بتن حاوی سیمان پرتلند [۳۹]، مورد پژوهش محققان مختلف قرار گرفته است.

گائو^۴ و همکاران [۴۰] در تحقیقات خود در مورد بتن ژئوپلیمری یافی، از الیاف هیبریدی فلزی در دو اندازه ۶ و ۱۲ میلی‌متری استفاده و نتیجه‌گیری کردند که الیاف ۶ میلی‌متری در مناطق با بازشدگی ترک‌های کوچک بسیار موثر هستند. در حالی که الیاف بلند شکل‌پذیری خوبی را در ترک‌های بزرگ و عریض تامین می‌کنند. همچنین استفاده از الیاف هیبریدی در درصد بهینه، سبب هم‌افزایی اثر الیاف و جلوگیری از ایجاد ترک‌ها در دو فاز ماکرو و میکرو می‌شود. اسرانی^۵ و همکاران [۴۱] در تحقیق در مورد بتن ژئوپلیمری یافی بر پایه سرباره، از ۳ نوع الیاف پلی پروپیلن، شیشه و فولاد سه بعدی استفاده کردند. این محققین عملکرد بتن ژئوپلیمری را با استفاده از این الیاف به صورت تکی و هیبریدی از ۲ یا ۳ نوع الیاف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات این پژوهشگران نشان داد که استفاده از الیاف پلی پروپیلن (تکی) سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن به میزان تقریباً ۶ و ۱۰۸ درصد، نسبت به نمونه فاقد الیاف می‌شود. همچنین هیبرید نمودن الیاف سبب بهبود قابل ملاحظه مقاومت‌ها شده است به طوری که استفاده از الیاف فلزی و پلی پروپیلن، سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی به میزان بیش از ۳۰ و ۲۰۰ درصد، نسبت به نمونه فاقد الیاف شده است. آلبرتی^۶ و همکاران [۴۲] خواص بتن یافی مسلح شده با الیاف پلی الفین و الیاف فولادی در نسبت کم، را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند استفاده از الیاف پلی الفین موجب بهبود مقاومت‌های مکانیکی و دستیابی به شکل‌پذیری و سختی خمشی مناسب می‌شود. هان^۷ و همکاران [۴۳] تاثیر الیاف پلی الفین بر خواص بتن حاوی دوده سیلیس را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد استفاده از این الیاف سبب افزایش ۱۳ درصدی مقاومت خمشی و کاهش ۷۰ درصدی انتشار ترک‌ها شده است. همچنین نمونه‌های حاوی این الیاف مقاومت ضربه‌ای دو برابر بیشتر نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و ۱۴ برابر بیشتر نسبت به نمونه کنترل (فاقد الیاف) را ارائه کردند. دنگ^۸ و همکاران [۴۴] نیز تاثیر الیاف ماکرو پلی الفین را بر خواص بتن مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهشگران اثرات مثبت الیاف پلی الفین را در جلوگیری از انتشار ترک در بتن با افزایش درصد استفاده از الیاف، مکنترله کردند. چلیک^۹ و دیگران [۳۸] در پژوهشی نقش الیاف مختلف بر مقاومت حرارتی بتن ژئوپلیمری را مطالعه کردند. این پژوهشگران از الیاف پلی الفین، بازالت، پلی آمید اصلاح شده و PVA به صورت غیر هیبریدی، استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد استفاده از الیاف پلی الفین در درصد بهینه (۱/۲)، سبب افزایش ۴/۷ درصدی مقاومت فشاری، ۲۵ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه کنترل (بی الیاف) شده است.

در این پژوهش آزمایشگاهی، از نوع جدیدی از الیاف پلیمری هیبریدی شامل: الیاف پلی الفین تویت بلند و الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده کوتاه، برای ساخت بتن ژئوپلیمری یافی استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌های اولیه و انتخاب طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره، نقش الیاف مصرفی بر جذب آب بتن و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا نمونه‌های بتن ژئوپلیمری یافی و فاقد الیاف، ساخته و عمل‌آوری شد. سپس آزمون‌های جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلین) و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای از نمونه‌های بتن ژئوپلیمری گرفته شد. در پایان نتایج آزمایش‌های انجام شده جمع‌آوری، تحلیل و گزارش شدند.

Gao^۴

Asrani^۵

Alberti^۶

Han^۷

Deng^۸

Celik^۹

۲. مواد

منبع آلومیناسیلیکاتی استفاده شده در این مقاله سربراره کوره آهن گدازی (محصول کارخانه ذوب آهن اصفهان) بود که آنالیز XRF این مواد در جدول ۱ ارائه شده است. هیدروکسید سدیم (NaOH) با خلوص ۹۸ درصد از شرکت قطران شیمی خریداری شد و محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت SiO_2 به Na_2O برابر با ۲ از شرکت نفیس سیلیکات اصفهان خریداری شد. آنالیز شیمیایی این دو ماده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- آنالیز XRF سربراره

SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	Cl
34.4	11.2	37	0.6	9.8	0.68	0.6	1.58	0.002

جدول ۲- آنالیز شیمیایی محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم

NaOH			Na_2SiO_3 solution		
Chemical analysis	Result	Unit	Chemical analysis	Result	Unit
NaOH	98	%	SiO_2	30.00	%
Na_2CO_3	1	%	Na_2O	14.50	%
NaCl	200	ppm	Water	55.50	%
Fe	6	ppm			
SiO_2	15.7	ppm			
Appearance	White flake		Appearance	Clear liquid	

شن و ماسه مصرفی در این آزمایش از معادن اطراف تهران تهیه شد. شن مصرفی پس از تهیه، توسط الک استاندارد ASTM C ۱۳۶ [۴۵] دانه بندی شد. در این مقاله از شن در دو اندازه ۱۰ و ۷ میلی متری استفاده شد. ضریب نرمی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C ۱۳۶، ۳/۲۹ اندازه گیری شد. **خریب SE یا ارزش ماسه ای، ماسه مورد مصرف نیز بر اساس استاندارد ASTM D ۲۴۱۹ [۴۶] اندازه گیری شد.** آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر تهران بود. از روان کننده پلی کربوکسیلاتی که از کلینیک تخصصی بتن خریداری شده بود، به منظور کاهش آب طرح اختلاط و بالا بردن کارایی بتن استفاده شد. الیاف مصرفی نیز از شرکت نانوخ سیرجان تهیه شد که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین تصویر این الیاف نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات الیاف مصرفی

	الیاف پلی الفین دو گانه
طول (میلی متر)	12,55
چگالی (gr/cm^3)	0.91-0.95
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	350-750
جذب آب	ندارد
مقاومت در برابر اسید و باز	عالی
دمای ذوب (درجه سانتی گراد)	160-170



شکل ۲ - تصاویر الیاف مورد استفاده در این مقاله

۳. روش آزمایشگاهی

در این بخش ۴ طرح مخلوط انتخاب شد که این طرح‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور بهینه یابی میزان الیاف، الیاف مصرفی در اندازه‌های ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد حجمی بتن، به بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره اضافه شد. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا محلول فعال‌کننده قلیایی آماده شد. به همین منظور ابتدا محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مولار با محلول سیلیکات سدیم و روان‌کننده مطابق با طرح‌های اختلاط، مخلوط شد. به محلول به دست آمده ۲۴ ساعت زمان داده شد تا سرد شود. در روز آزمایش، ابتدا مواد خشک شامل: شن، ماسه، سرباره و الیاف مطابق با طرح‌های اختلاط در میکسر پرتابل بتن ریخته و به مدت ۳ دقیقه به منظور توزیع یکنواخت به صورت خشک، مخلوط شدند. سپس محلول فعال‌کننده قلیایی و آب اضافه به میکسر اضافه شد و مخلوط بتن به مدت ۲ دقیقه مخلوط شد. بعد از اتمام مخلوط کردن، نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی بتن تهیه شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز ویبره، متراکم شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. پس از پایان عمل‌آوری، نمونه‌ها از آون خارج شده و در دمای محیط قرار گرفتند. از نمونه‌ها آزمون وزن مخصوص، جذب آب ۳ روزه، مقاومت فشاری، کششی و خمشی ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد. لازم به ذکر است ابعاد نمونه‌های فشاری ۱۰×۱۰×۱۰، خمشی ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر بود. همچنین ابعاد نمونه‌های کششی نیز سیلندری ۲۰×۱۰ سانتی‌متر بود.

جدول ۴ - مشخصات الیاف مصرفی

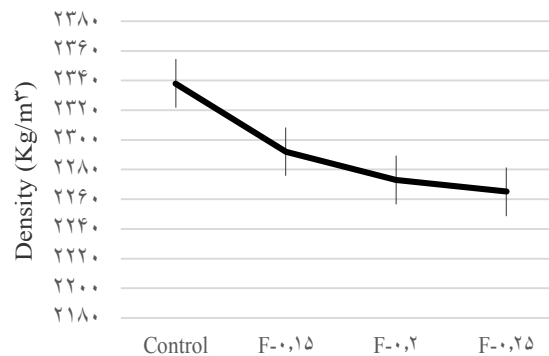
نام طرح اختلاط	سرباره (Kg/m ^۳)	هیدروکسید سدیم (Kg/m ^۳)	سیلیکات سدیم (Kg/m ^۳)	شن (Kg/m ^۳)	ماسه (Kg/m ^۳)	روان‌کننده (Kg/m ^۳)	آب اضافه (Kg/m ^۳)	میزان مصرف الیاف (%)
Control	400	80	120	840	840	8	10	0
F-۰,۱۵	400	80	120	840	840	8	10	0.15
F-۰,۲	400	80	120	840	840	8	10	0.2
F-۰,۲۵	400	80	120	840	840	8	10	0.25

آزمون‌های انجام شده شامل: آزمون مقاومت فشاری بر اساس BS 1881: Part 116 [47] آزمون کشش غیرمستقیم (برزیلین) بر اساس ASTM C496 [48]، آزمون مقاومت خمشی بر اساس ASTM C293 [49] و ASTM C1018 [50] و آزمون جذب آب و وزن مخصوص بر اساس ASTM C642 [51]، بود.

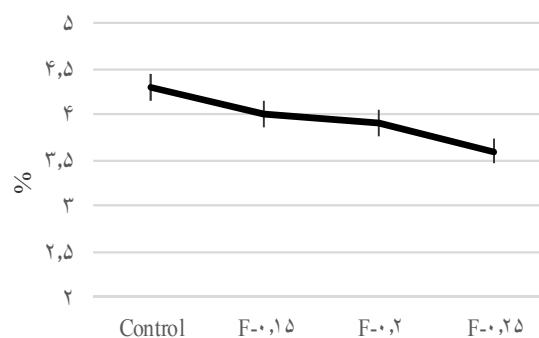
۴. نتایج و بحث

۴-۱- جذب آب و وزن مخصوص

نتایج آزمون جذب آب ۳ روزه و چگالی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و کنترل در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.



شکل ۳- وزن مخصوص نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و کنترل



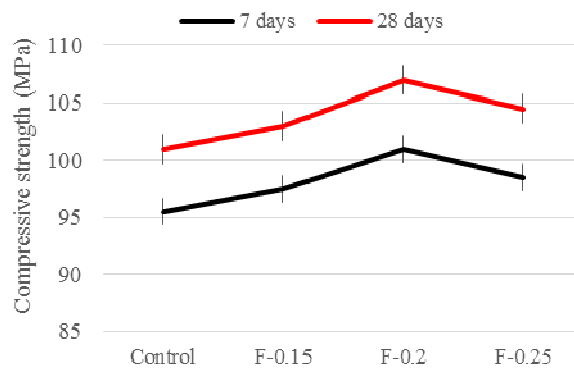
شکل ۴- جذب آب نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و کنترل

وزن مخصوص نمونه کنترل ۲۳۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شد. استفاده از الیاف سبب کاهش وزن مخصوص نمونه‌های الیافی شد و همچنین افزایش میزان الیاف سبب کاهش بیشتر وزن مخصوص نمونه‌ها شد به طوری که در نمونه‌های الیافی که حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف بودند تقریباً ۳ درصد کاهش وزن مخصوص، مکنترل شد. این موضوع می‌تواند مربوط به وزن مخصوص کمتر الیاف نسبت به بتن ژئوپلیمری باشد. وزن مخصوص الیاف مورد استفاده به هم نزدیک و در محدوده ۰/۹۱-۰/۹۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب معادل با ۹۱۰-۹۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. در نتیجه باعث کاهش وزن

مخصوص بتن الیافی نسبت به نمونه فاقد الیاف می‌شود. با توجه به شکل ۵، جذب آب نمونه کنترل، ۴/۳ درصد بود. استفاده از الیاف سبب کاهش نسبی جذب آب نمونه‌ها، نسبت به نمونه کنترل شد و افزایش میزان الیاف سبب کاهش بیشتر جذب آب نمونه‌های الیافی شد. این موضوع می‌تواند مربوط به پراکنش تصادفی الیاف، کنترل میکرو ترک‌ها و پیشگیری از به وجود آمدن میکرو ترک‌های بعدی، باشد. این موضوع سبب بهبود میکرو ساختار و تراکم ماتریس بتن ژئوپلیمری الیافی می‌شود که نتیجه آن کاهش جذب آب نمونه‌ها است [۵۲].

۲-۴- مقاومت فشاری

نتایج آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و کنترل در شکل ۱۵ ارائه شده است. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه کنترل ۹۵/۵ و ۱۰۱ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. استفاده از الیاف هیبریدی به میزان ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد، سبب افزایش ۲/۲، ۶ و ۳/۴ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل شد. این موضوع می‌تواند مربوط به مسلح شدن بتن توسط الیاف هیبریدی و تقویت ناحیه تماس باشد. ناحیه تماس که به اسامی مختلفی مانند لایه مرزی یا منطقه انتقالی نامیده می‌شود، ناحیه مرزی است که بین خمیر سیمان و سطح سنگدانه، الیاف و یا میلگرد پدید می‌آید و نقش مهمی در نفوذپذیری، دوام و مقاومت بتن دارد. ناحیه تماس دارای میکرو ساختاری متفاوت با خمیر سیمان بوده و دارای تخلخل و ریزترک‌های بیشتری است. ضخامت ناحیه تماس تابع پارامترهایی مانند: نوع الیاف، نوع سیمان، نوع پوزولان مصرفی و غیره می‌باشد [۵۳]. استفاده از افزودنی‌هایی مانند نانو مواد و الیاف می‌تواند منجر به تقویت این ناحیه و بهبود خواص مکانیکی بتن شود. اما از سوی دیگر، با افزایش درصد الیاف از ۰/۲ به ۰/۲۵ مقاومت فشاری اندکی کاهش یافت. الیاف استفاده شده در این مقاله، از جنس پلیمری هستند و در حالت کلی الیاف پلیمری به دلیل داشتن انعطاف بالا در صورت استفاده در درصد حجمی زیاد، باعث ایجاد پدیده گلوله‌شدگی الیاف و ایجاد حفره در ماتریس سیمان و در نتیجه آن ایجاد عیوب داخلی در ناحیه تماس و نهایتاً کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌شود [۵۴]. در پایان این بخش با جمع‌بندی نتایج به دست آمده می‌توان گفت الیاف مورد استفاده، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نداشتند.

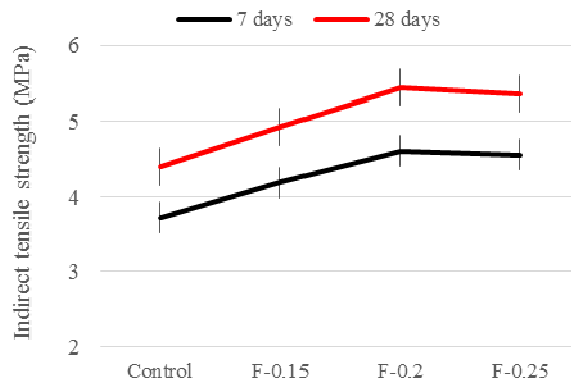


شکل ۵- مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و کنترل

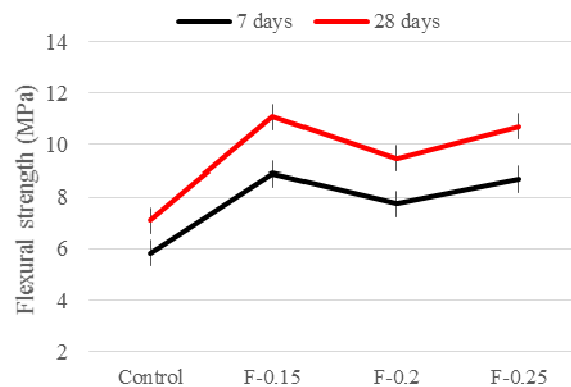
۳-۴- مقاومت کششی و خمشی

نتایج آزمون مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و کنترل، در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. با توجه به شکل ۶، کمترین مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۳/۷۲ و ۴/۴ مگاپاسکال و مربوط به نمونه کنترل و بیشترین مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۴/۶۱ و ۵/۴۵ مگاپاسکال مربوط به نمونه F-۰.۲ بود. استفاده از الیاف هیبریدی به میزان ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد، سبب افزایش تقریباً ۱۲، ۲۴ و ۲۲ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل شد. اضافه کردن الیاف سبب بهبود مقاومت کششی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری نسبت به نمونه کنترل شد. با افزایش میزان

الیاف از ۰/۱۵ به ۰/۲ درصد، الیاف بهترین عملکرد را در بهبود مقاومت کششی نشان دادند در نتیجه ۰/۲ درصد، به عنوان درصد بهینه الیاف، در بهبود مقاومت کششی سنجش شد. با افزایش بیشتر میزان الیاف به ۰/۲۵ درصد، مقاومت کششی نسبت به درصد بهینه، اندکی کاهش یافت.



شکل ۶ - مقاومت کششی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و کنترل



شکل ۷ - مقاومت خمشی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و کنترل

در رابطه با مقاومت خمشی نیز همان طور که شکل ۷ نشان می‌دهد، مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه نمونه کنترل ۵/۸۲ و ۷/۱۱ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. استفاده از الیاف هیبریدی به میزان ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد، سبب افزایش تقریباً ۵۶، ۳۳ و ۵۱ درصدی مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل شد. میزان بهینه الیاف هیبریدی برای بیشترین تاثیرگذاری در بهبود مقاومت خمشی ۰/۱۵ درصد اندازه‌گیری شد و با افزایش درصد الیاف به ۰/۲۵، مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به درصد بهینه، کاهش نسبی یافت.

اضافه کردن الیاف در حالت عمومی سبب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن و در نتیجه افزایش شکل‌پذیری می‌شود. میزان افزایش تابع پارامترهایی مانند نوع و جنس، اندازه، میزان الیاف مصرفی و غیره است. افزودن الیاف پلیمری مانند پلی پروپیلن سبب تقویت و بهبود ماتریس خمیر سیمان ژئوپلیمر، جلوگیری از انتشار میکرو ترک‌ها و تغییر الگوی انتشار ترک‌ها می‌شود [۵۵]. در حالت کلی ساختار ژئوپلیمرها شامل ژل شکل گرفته ژئوپلیمری، ذرات باقی مانده و واکنش نداده منبع آلومیناسیلیکاتی و حفره‌های مختلف است [۵۷-۵۵]. الیاف می‌توانند از طریق محصور کردن ماتریس ژئوپلیمر با دو سر خود، یک اثر پل مانند روی ترک‌ها و سوراخ‌ها داشته باشند که موجب افزایش سختی و مقاومت ماتریس ژئوپلیمر می‌شود [۵۵]. در نتیجه نمونه‌های الیافی، مقاومت کششی و خمشی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون الیاف ارائه می‌دهند. از سوی دیگر این الیاف در اندازه‌های کوتاه و بلند هیبرید شده بودند. هیبرید کردن الیاف به لحاظ ابعاد و جنس و نوع، سبب هم افزایی اثر الیاف می‌شود. اثر مثبت الیاف هیبریدی در محدود کردن ترک‌ها را می‌توان با ۲

مکانیسم بررسی کرد. ۱-الیاف کوتاه در کنترل کردن و پل زدن روی میکرو ترک‌ها بسیار موثر عمل می‌کنند زیرا در میزان مشابه مصرف الیاف، تعداد الیاف کوتاه در بتن به دلیل اندازه کوچک این الیاف، بیشتر است. اما هنگامی که میکرو ترک‌ها با یکدیگر ادغام شده و ترک‌های بزرگتری را تشکیل دهند، الیاف کوتاه به دلیل طول کم، اثرگذاری کمتری دارند. ۲- الیاف بلند بیشتر در کنترل کردن و پیشگیری از ماکرو ترک‌ها موثرند. همچنین الیاف بلند می‌توانند به عنوان مانع برای جلوگیری از چرخش الیاف کوتاه، استفاده شوند. بنابراین الیاف کوتاه با ترکیب شدن با الیاف بلند، می‌توانند عملکرد بهتری نشان دهند. در نتیجه ترکیب الیاف کوتاه و بلند سبب توقف روند ترک خوردن و مقاومت بیشتر در برابر بارگذاری، می‌شود [۴۰ و ۵۸].

۵. نتایج

در این پژوهش آزمایشگاهی سعی شد در حد توان به بررسی نقش الیاف هیبریدی کوتاه و بلند از جنس پلی پروپیلن اصلاح شده و پلی الفین بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی و همچنین جذب آب و وزن مخصوص بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی، مورد مطالعه قرار گیرد. در همین راستا پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل و جمع‌بندی نتایج بدست آمده، موارد زیر به عنوان نتایج این پژوهش ارائه می‌شود:

۱. استفاده از الیاف هیبریدی، سبب کاهش وزن مخصوص و کاهش جذب آب نمونه بتن ژئوپلیمری به دلیل پراکنش تصادفی الیاف، بهبود میکروساختار و تراکم بیشتر ماتریس سیمان ژئوپلیمری، نسبت به نمونه فاقد الیاف شد.
۲. استفاده از الیاف هیبریدی، سبب افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری به دلیل مسلح کردن ماتریس سیمان و تقویت ناحیه تماس، شد. این افزایش مقاومت به دلیل مدول و مقاومت نسبتاً پایین الیاف در مقایسه با مثلاً الیاف فولادی، قابل توجه نبود به طوری که الیاف هیبریدی در درصد بهینه (۰/۲) سبب افزایش ۶ درصدی این مقاومت نسبت به نمونه فاقد الیاف شد.
۳. استفاده از الیاف هیبریدی، به دلیل نقش الیاف در پل زدن روی دو طرف ترک‌ها و جلوگیری از انتشار ترک‌ها و همچنین هم افزایی اثر الیاف کوتاه و بلند در کنترل ترک‌ها در دو فاز میکرو و ماکرو، سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری شد به طوری که استفاده از الیاف هیبریدی در درصد بهینه (۰/۲) برای مقاومت کششی و ۰/۱۵ برای مقاومت خمشی) سبب افزایش ۲۴ درصدی مقاومت کششی و ۵۶ درصدی مقاومت خمشی بتن ژئوپلیمری نسبت به نمونه فاقد الیاف شد.

۶. مراجع

[۱] Davidovits, J. (۱۹۹۴). "Global warming impact on the cement and aggregates industries". World Resour. Rev, Vol. ۶ (۲), pp ۲۶۳-۲۷۸.

[۲] Part, W.K., Ramli, M. and Cheah, C.B. (۲۰۱۵). "An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products". Constr. Build. Mater, Vol. ۷۷, pp ۳۷۰-395.

[۳] Yusuf, M.O., Megat Johari, M.A., Ahmad, Z.A. and Maslehuddin, M. (۲۰۱۴). "Strength and microstructure of alkali-activated binary blended binder containing palm oil fuel ash and ground blast-furnace slag". Constr. Build. Mater, Vol. ۵۲, pp ۵۰۴-۵۱۰.

[۴] Phummiphon, I., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Arulrajah, A., Shen, S. and Chindaprasitrt, P. (۲۰۱۸). "High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material". Journal of Hazardous Materials, Vol. ۳۴۱, pp ۲۵۷-۲۶۷.

[۵] Haddad, R.H. and Alshbuol, O. (۲۰۱۶). "Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: a parametric study". Constr. Build. Mater, Vol. ۱۱۴, pp ۶۹۹-۷۰۷.

[۶] Davidovits, J. (۲۰۱۳). "Geopolymer Cement Geopolymer Cement". a review.

- [۷] Hasanbeigi, A., Menke, C. and Price, L. (۲۰۱۰). "The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry". J. Clean. Prod, Vol. ۱۸, pp ۱۵۰۹-۱۵۱۸.
- [۸] Malhotra, V.M. (۲۰۰۶). "Reducing CO₂ Emissions". ACI Concrete International, Vol. ۲۸, pp ۴۲-۴۵.
- [۹] Rashad, A.M. (۲۰۱۳). "A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag—a guide for civil engineer". Constr. Build. Mater, Vol. ۴۷, pp ۲۹-۵۵.
- [۱۰] McCaffrey, R. (۲۰۰۲). "Climate change and the cement industry". Global. Cem. Lime Mag, pp ۱۵-۹.
- [۱۱] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. and Jullien, A. (۲۰۱۰). "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation". J. Clean. Prod, Vol. ۱۸, pp ۴۷۸-485.
- [۱۲] McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., Van Riessen, A. and Corder, G.D. (۲۰۱۱). "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement". J. Clean. Prod, Vol. ۱۹, pp ۱۰۸۰-1090.
- [۱۳] Assi, L.N., E.E. Deaver, E.E. and Ziehl, P. (۲۰۱۸). "Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete". Constr. Build. Mater, Vol. 167, pp 372-380.
- [۱۴] Amnadhua, K., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. (۲۰۱۳). "Strength, water permeability: and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash". Mater. Des, Vol. ۵۱, pp ۸۹۴-۹۰۱.
- [۱۵] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J. (۲۰۰۷). "The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'". Cem. Concr. Res, Vol. ۳۷ (۱۲), pp ۱۵۹۰-۱۵۹۷.
- [۱۶] Wang, S.D., Scrivener, K.L. and Pratt, P. (۱۹۹۴). "Factors affecting the strength of alkali activated slag". Cem. Concr, Res. Vol. ۲۴ (۶), pp ۱۰۳۳-۱۰۴۳.
- [۱۷] Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I. and Palomo, A. (۲۰۰۷). "Durable characteristics of alkali activated fly ashes". J. Mater. Sci, Vol. ۴۲, pp ۳۰۵۵-۳۰۶۵.
- [۱۸] Cheng, T.W. and Chiu, J.P. (۲۰۰۳). "Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag". Miner. Eng, Vol. ۱۶ (۳), pp ۲۰۵-۲۱۰.
- [۱۹] Sarker, P.K., Kelly, S. and Yao, Z. (۲۰۱۴). "Effect of fire exposure on cracking: spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete". Mater. Des, Vol. ۶۳, pp ۵۸۴-۵۹۲.
- [۲۰] Zhang, H.Y. et al. (۲۰۱۴). "Development of metakaolin-fly ash based geopolymers for fire resistance applications". Constr. Build. Mater, Vol. ۵۵, pp ۳۸-۴۵.
- [۲۱] Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., Vazquez, T. and Grutzeck, M.W. (۱۹۹۹). "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin". Cem. Concr. Res, Vol. ۲۷ (۷), pp ۹۹۷-1000.
- [۲۲] Bakharev, T., J. Sanjayan, J. and Cheng, Y.B. (۲۰۰۳). "Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack". Cem. Concr. Res, Vol. ۳۳ (۱۰), pp ۱۶۰۷-۱۶۱۱.
- [۲۳] Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G. and Tao, M. (۲۰۱۳), "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer". Constr. Build. Mater, Vol. ۴۷, pp ۱۴۶۸-۱۴۷۸.
- [۲۴] Wallah, S.E. (۲۰۱۱). "Creep behaviour of fly ash-based geopolymer concrete". Civ. Eng. Dimens, Vol. ۱۲, pp ۷۳-۷۸.
- [۲۵] DeSilva, P., Sagoe-Crenstil, K. and Sirivivatnanon, V. (۲۰۰۷). "Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂". Cem. Concr. Res, Vol. ۳۷ (۴), pp ۵۱۲-۵۱.
- [۲۶] Part, W.K., M. Ramli, M. and Cheah, C.B. (۲۰۱۵). "An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products". Constr. Build. Mater, Vol. ۷۷, pp ۳۷۰-395.

- [۲۷] Gao, K., Lin, K.L., DeYing Wang, C.L., Hwang, B.L.A., Shiu Tuan, H.S. and Cheng, T.W. (۲۰۱۳). "Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers". *Constr. Build. Mater.*, Vol. ۴۸, pp ۴۴۱-۴۴۷.
- [۲۸] Davidovits, J. (۱۹۹۹). "Chemistry of geopolymeric systems, terminology, Geopolymer' ۹۹ second international conference". France, pp ۹-۳۹.
- [۲۹] Görhan, G. and Kürklü, G. (۲۰۱۴). "The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures". *Comp. Part B: Eng.*, Vol. ۵۸, pp ۳۷۱-۳۷۷.
- [۳۰] Davidovits, J. (۱۹۸۸a). "Soft Mineralurgy and Geopolymers". Paper presented at the Geopolymer '۸۸, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- [۳۱] Davidovits, J. (۱۹۸۸b). "Geopolymer Chemistry and Properties". Paper presented at the Geopolymer '۸۸, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- [۳۲] Davidovits, J. (۱۹۹۱). "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials". *Journal of Thermal Analysis*, Vol. ۳۷, pp ۱۶۳۳-۱۶۵۶.
- [۳۳] Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. (۲۰۰۲). "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based Geopolymers". *Chemical Engineering Journal*, Vol. 89 (1-3), pp 63-73.
- [۳۴] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V. (۲۰۰۴). "On the development of fly ash-based geopolymer concrete". *ACI Materials Journal*, Vol. ۱۰۱, pp ۴۶۷-۴۷۲.
- [۳۵] Naaman, A. E., Wongtanakitcharoen, T., and Hauser, G. (۲۰۰۵). "Influence of Different Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete". *ACI Materials Journal*, Vol. ۱۰۲(۱), pp ۴۹-۵۸.
- [۳۶] ACI Committee ۵۴۴, Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 1996.
- [۳۷] Soroushian, P. (۱۹۸۶). "Secondary reinforcement adding cellulose fibers". *ACI Concrete International*, pp 28-38.
- [۳۸] Celik, A., Yilmaz, K., Canpolat, O., Al-mashhadani, M.M., Aygörmmez, Y., and Uysal, M. (۲۰۱۸). "High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers". *Construction and Building Materials*, Vol. ۱۸۷, pp ۱۱۹۰-۱۲۰۳.
- [۳۹] Al-Majidi, M.H., Lampropoulos, A., and Cundy, A.B. (۲۰۱۷). "Steel fibre reinforced geopolymer concrete (SFRGC) with improved microstructure and enhanced fibre-matrix interfacial properties". *Construction and Building Materials*, Vol. ۱۳۹, pp ۲۸۶-۳۰۷.
- [۴۰] Gao, X., Yu, Q.L., Yu, R., and Brouwers, H.J.H. (۲۰۱۷). "Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer composites". *Materials and Structures*, Vol. ۵۰(۲), pp ۱۶۵.
- [۴۱] Asrani, N.P., Murali, G., Parthiban, K., Surya, K., Prakash, A., Rathika, K., and Chandru, U. (۲۰۱۹). "A feasibility of enhancing the impact resistance of hybrid fibrous geopolymer composites: Experiments and modelling". *Construction and Building Materials*, Vol. ۲۰۳, pp ۵۶-۶۸.
- [۴۲] Alberti, M.G., Enfedaque, A., Gálvez, J.C., Cánovas, M.F., and Osorio, I.R. (۲۰۱۴). "Polyolefin fiber reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions". *Materials & Design*, Vol. ۶۰, pp ۵۷-65.
- [۴۳] Han, T.-Y., Lin, W.-T., Cheng, A., Huang, R., and Huang, C.-C. (۲۰۱۲). "Influence of polyolefin fibers on the engineering properties of cement-based composites containing silica fume". *Materials & Design*, Vol. ۳۷, pp 569-576.
- [۴۴] Deng, Z., Shi, F., Yin, S., and Tuladhar, R. (۲۰۱۶). "Characterisation of macro polyolefin fibre reinforcement in concrete through round determinate panel test". *Construction and Building Materials*, Vol. ۱۲۱, pp ۲۲۹-۲۳۵.

- [۴۵] ASTM C۱۳۶ / C۱۳۶M-۱۴, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۴.
- [۴۶] ASTM D۲۴۱۹-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۴.
- [۴۷] British Standards Institution, Testing Concrete: Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cubes, BS۱۸۸۱: Part ۱۱۶: ۱۹۸۳, London.
- [۴۸] ASTM C۴۹۶ / C۴۹۶M-۱۷, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۷.
- [۴۹] ASTM C۲۹۳ / C۲۹۳M-16, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۶.
- [۵۰] ASTM C۱۰۱۸-۹۷, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) (Withdrawn ۲۰۰۶), ASTM International, West Conshohocken, PA, ۱۹۹۷.
- [۵۱] ASTM C۶۴۲-۱۳, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۳.
- [۵۲] Ganesan, N., Abraham, R., and Deepa Raj, S. (۲۰۱۵). "Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete". Construction and Building Materials, Vol. ۹۳, pp ۴۷۱-۴۷۶.
- [۵۳] صدر ممتازی، ع.، کهنی خشکبیجاری، ر. و لطفی عمران، ر.، (۱۳۹۴). "خواص مهندسی و دوام بتن خود تراکم حاوی ذرات نانو سیلیس با رویکرد دستیابی به درصد های بهینه الیاف." مجله علمی پژوهشی تحقیقات بتن، سال هشتم، شماره دوم، صفحه ۱۹-۳۴.
- [۵۴] Sukontasukkul, P., Pongsopha, P., Chindaprasirt, P., and Songpiriyakij, S. (۲۰۱۸). "Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer". Construction and Building Materials, Vol. ۱۶۱, pp ۳۷-۴۴.
- [۵۵] Zhang, Z.-h., Yao, X., Zhu, H.-j., Hua, S.-d., and Chen, Y. (۲۰۰۹). "Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer". Journal of Central South University of Technology, Vol. ۱۶(۱), pp ۴۹-۵۲.
- [۵۶] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., and van Deventer, J.S.J. (۲۰۰۷). "Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of Materials Science". Vol. ۴۲(۹), pp ۲۹۱۷-2933.
- [۵۷] Yunsheng, Z., Wei, S., and Zongjin, L. (۲۰۰۶). "Impact behavior and microstructural characteristics of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer boards prepared by extrusion technique". Journal of Materials Science, Vol. 41(10), pp 2787-2794.
- [۵۸] Grünewald, S. (۲۰۰۴). "Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete". Delft University Press.