

بررسی تأثیر نانوسیلیس و الیاف پلی وینیل الکل بر بهبود مشخصات مکانیکی و ریزساختار بتن ساخته شده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی

مهدی اسفندی سرافراز*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران.

چکیده

استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافت شده از پسماند بتن در ساخت بتن جدید، راه حلی مناسب جهت جلوگیری از آلودگی محیط زیست و مصرف منابع طبیعی در جهان می‌باشد. در این تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از نانو ذرات سیلیس و الیاف پلی وینیل الکل در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده از ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی پرداخته می‌شود. با این روش میزان مصرف سنگ‌دانه‌های طبیعی به مقدار قابل ملاحظه کاهش می‌یابد. ریزدانه و درشت‌دانه با دانه‌بندی مشابه سنگ‌دانه طبیعی با نسبت ۰/۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ با سنگ‌دانه طبیعی جایگزین می‌شود. برای بهبود مشخصات مکانیکی بتن، ذرات نانوسیلیس و الیاف پلی وینیل الکل با نسبت‌های مختلف (۰، ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی برای نانوسیلیس و ۰، ۵/۰ و ۱ درصد حجمی برای الیاف پلی وینیل الکل) به بتن اضافه گردید. پارامترهای مختلف مورد بررسی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و میزان جذب انرژی می‌باشد. همچنین ریزساختار تعدادی از مخلوط‌های ساخته شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از نانو سیلیس و الیاف پلی وینیل الکل باعث بهبود مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن ساخته شده از مصالح بازیافتی می‌شود. همچنین در صورت استفاده از ۴ درصد نانوسیلیس و ۵/۰ درصد الیاف پلی وینیل الکل، بتن ساخته شده از ۵۰ درصد درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی رفتاری بهتر از بتن معمولی حاوی سنگ‌دانه طبیعی از خود نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌دانه بازیافتی، نانو سیلیس، بتن الیافی، مقاومت فشاری، ریزساختار.

* نویسنده مسئول: sarafraz.m@wtiau.ac.ir

۱- مقدمه

ضعیف تری دارد [۷-۸]. بر اساس تحقیقات انجام شده در صورت جایگزینی حدود ۳۰٪ از سنگ‌دانه‌های طبیعی با سنگ‌دانه بازیافتی، مقاومت فشاری بتن حاصل تغییر چندانی ندارد ولی در صورت استفاده بیشتر از سنگ‌دانه بازیافتی، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد [۹-۱۱].

جداسازی و تقویت ملات چسبیده، دو روش متداول در بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام RAC می‌باشد [۱۲]. جداسازی شامل جداسازی مکانیکی، شستشو در آب و شستشو در اسید برای جدا کردن ملات چسبیده به سنگ‌دانه بازیافتی است [۱۲]. اضافه کردن پوزولان، پلیمر، کربنات کلسیم، سیلیکات سدیم و الیاف راهکارهای متعارف تقویت سنگ‌دانه‌های بازیافتی می‌باشد [۱۲]. افزودن پوزولانها از قبیل دوده سیلیس^۵ (SF)، خاکستر بادی^۶ (FA)، متاکائولن^۷ (MC) و نانو سیلیس^۸ (NS) باعث پر کردن حفرات بین سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان شده و در نتیجه خصوصیات ناحیه انتقال میان سطحی^۹ (ITZ) را بهبود می‌بخشد. این کار باعث تولید مقادیر زیادی ژل C-S-H شده و حفرات و ترک‌ها را پر می‌کند [۱۳]. تحقیقات کو^{۱۰} و همکاران نشان داده است که دوده سیلیس و متاکائولن باعث افزایش مقاومت و دوام بتن حاوی سنگ‌دانه بازیافتی می‌شود، ولی خاکستر بادی و سرباره تنها بر دوام RAC مؤثرند [۱۳]. حسینی^{۱۱} و همکاران نشان دادند که در صورت استفاده از ۱/۵٪ و ۳٪ نانو سیلیس بجای سیمان، مشخصات مکانیکی بتن حاوی سنگ‌دانه بازیافتی بهبود می‌یابد [۱۴]. شیخ^{۱۲} و همکاران نشان دادند که اضافه کردن نانو سیلیس به مقدار ۱٪ و ۲٪ وزن سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی ۲۵٪ درشت‌دانه بازیافتی می‌شود [۱۵].

یکی از روش‌های مناسب برای بهبود عملکرد بتن حاوی سنگ‌دانه بازیافتی، افزودن الیاف به آن است. هدف اصلی از افزودن الیاف به بتن کنترل گسترش و رشد ترک است، به گونه‌ای که مقطع توانایی تحمل تغییر شکل و نیروی بیشتری را داشته باشد. الیاف افزوده شده به بتن در عرض ترک‌ها پل زده، رشد آن‌ها را محدود

بتن پر مصرف‌ترین ماده ساختمانی در دنیا می‌باشد. قیمت ارزان و در دسترس بودن مصالح آن، باعث افزایش میزان مصرف آن در دنیا شده است. بسیاری از سازه‌های بتنی به دلایل مختلف از قبیل نگهداری نامناسب، شرایط بد محیطی و طراحی و اجرای اشتباه قبل از رسیدن به عمر مفید خراب می‌شوند. نخاله‌های حاصل از تخریب بتن که اصطلاحاً به آن CDW می‌گویند حدود نیمی از زباله جامد تولید شده در دنیا را تشکیل می‌دهد [۱]. سنگ‌دانه‌ها شامل شن و ماسه حدود ۷۵-۶۵ درصد از حجم بتن را تشکیل می‌دهند، لذا میزان مصرف سنگ‌دانه در دنیا بسیار زیاد است و صنعت بتن به تنهایی حدود ۵۰ درصد از منابع خام قابل بهره‌برداری و ۴۰ درصد از کل انرژی دنیا را مصرف کرده و حدود ۵۰ درصد از کل زباله جامد در دنیا را تولید می‌کند [۲]. استحصال و تولید سنگ‌دانه‌های طبیعی نیازمند تجهیزات خاص بوده و تولید آن عموماً منجر به مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده و باعث کاهش میزان منابع طبیعی در دسترس بشر می‌شود. از این رو مدیریت صحیح تولید، مصرف و بازیافت بتن و مصالح تشکیل دهنده آن ضروری است. یک راهکار مناسب برای بازیافت و مدیریت این زباله‌ها، استفاده از آن به صورت مصالح بازیافتی در بتن می‌باشد [۳].

در صورتی که نخاله‌های CDW در اندازه و سایز مناسب خرد شوند، قابلیت استفاده مجدد در بتن به عنوان سنگ‌دانه را دارند [۳]. سنگ‌دانه بازیافتی^۲ (RA) عموماً از سنگ‌دانه طبیعی و ملات چسبیده^۳ به آن تشکیل شده است. ملات چسبیده به سنگ‌دانه شامل ریزدانه، سیمان هیدراته و سیمان غیر هیدراته بوده که کیفیت آن به نحوه استحصال از بتن بستگی داشته و مشخصات مکانیکی آن وابسته به نسبت آب به سیمان بتن اولیه است [۴]. ملات چسبیده به سنگ‌دانه بازیافتی باعث تخلخل، نفوذپذیری زیاد و چگالی کم سنگ‌دانه بازیافتی در مقایسه با سنگ‌دانه طبیعی می‌شود [۵-۶]، لذا بتن ساخته شده از سنگ‌دانه بازیافتی^۴ (RAC) نسبت به بتن ساخته شده از سنگ‌دانه طبیعی (بتن معمولی) مشخصات مکانیکی و دوام

⁷ Metacaolin

⁸ Nano Silica

⁹ Interfacial Transition Zone

¹⁰ Kou

¹¹ Hosseini

¹² Shaikh

^۱ Construction and Demolition Waste

^۲ Recycled aggregate

^۳ Adhered mortar

^۴ Recycled Aggregate Concrete

^۵ Silica Fume

^۶ Fly Ash

مورد استفاده به صورت ذرات کروی شکل با اندازه میانگین ۱۵ نانومتر و خلوص SiO_2 بالای ۹۹ درصد تولید شرکت صنایع نانو سیلیس ایساتیس یزد بوده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ نشان داده شده است. مشخصات ذکر شده در جدول ۱ بر اساس مشخصات اعلام شده از کارخانه سازنده می باشد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و نانوسیلیس

ترکیب شیمیایی (%)	سیمان	نانوسیلیس
SiO_2	۲۱/۲۵	۹۹/۹۹
Al_2O_3	۴/۹۴	
Fe_2O_3	۴/۱۱	
Cao	۶۲/۹۰	
MgO	۱/۵۵	
SO_3	۲/۲۵	
Na_2O	۰/۵۲	
K_2O	۰/۶۳	
Others	۱/۸۵	
مشخصات فیزیکی		
m^2/kg سطح ویژه	۲۹۱	۲۲۰۰۰۰
g/cm^3 چگالی	۳/۱	۲/۱

ماسه طبیعی مورد استفاده با وزن مخصوص $2/55 \text{ gr}/\text{cm}^3$ و میزان جذب آب ۱/۹ درصد و شن طبیعی مورد استفاده نیز از نوع شکسته با وزن مخصوص $2/69 \text{ gr}/\text{cm}^3$ و میزان جذب آب ۰/۸ درصد می باشد. شن و ماسه طبیعی مورد استفاده از معادن اطراف تهران تهیه گردید. وزن مخصوص و میزان جذب آب سنگ دانه ها بر اساس استاندارد ASTM C127 تعیین شد.

سنگ دانه های بازیافتی در این تحقیق از زباله های آزمایشگاه بتن تهیه شده است. به این منظور، نمونه های فشاری تست شده در آزمایشگاه جمع آوری شده و به وسیله چکش شکسته و دانه بندی گردید و جهت تمیز کردن چندین بار با آب شسته شد. در شکل ۱ زباله های مورد استفاده جهت تهیه سنگ دانه بازیافتی مشاهده می شود. با توجه به استفاده از پسماند آزمایشگاه بتن، اطمینان خاطر از وجود ۱۰۰٪ ذرات بتن در داخل مصالح بازیافتی وجود داشته و

کرده و از به هم پیوستن آن ها جلوگیری می نماید. در این حالت روند شکل گیری ترک، از یک ترک بزرگ به تعدادی ترک کوچک تغییر می کند. کز می^۱ و همکاران به بررسی تأثیر استفاده از الیاف ماکرو بر مشخصات مکانیکی RAC پرداختند. در این تحقیق سه نسبت مختلف استفاده از الیاف پلی پروپیلن (۱٪ و ۰/۵٪، ۰٪) و سه نسبت مختلف جایگزینی سنگ دانه طبیعی با بازیافتی (۱۰۰٪ و ۵۰٪ و ۰٪) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان جذب انرژی و شکل پذیری RAC در صورت استفاده از الیاف بهبود می یابد [۱۶].

یکی از انواع الیاف استفاده شده در بتن، الیاف پلی وینیل الکل^۲ (PVA) می باشد. PVA مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بالا داشته و در محیط سیمانی با PH زیاد از دوام خوبی برخوردار است. این الیاف پیوند شیمیایی محکمی با خمیر سیمان برقرار می کنند [۱۷]. نوشینی^۳ و همکاران نشان دادند که اضافه کردن الیاف PVA به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی و شکل پذیری بتن می شود، به گونه ای که در آزمون حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف PVA، مقاومت فشاری حدود ۱۲٪ زیاد می شود [۱۷].

در عمده تحقیقات گذشته تنها از درشت دانه بازیافتی در ساخت RAC استفاده شده و ریزدانه ها به صورت طبیعی مورد استفاده قرار می گرفت. در این تحقیق به بررسی اثر هم زمان استفاده از نانوسیلیس و الیاف PVA بر مشخصات مکانیکی بتن ساخته شده از سنگ دانه های بازیافتی پرداخته می شود. سنگ دانه های بازیافتی شامل شن و ماسه با سه نسبت ۱۰۰٪، ۵۰٪، ۰٪ با سنگ دانه طبیعی جایگزین می گردند. پارامترهای مورد بررسی شامل اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و جذب انرژی می باشد. همچنین ریزساختار تعدادی از مخلوطها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ (SEM) مورد بررسی قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایش ها

۲-۱- مصالح مصرفی

سیمان استفاده شده در این پژوهش از نوع سیمان پرتلند نوع ۱ ساخت کارخانه سیمان تهران بوده که ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است. نانو سیلیس

³ Noushini

⁴ Scanning Electron Microscope

¹ Kazmi

² Polyvinyl alcohol fiber



شکل ۳- درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی الف: درشت‌دانه، ب: ریزدانه

شکل ۳- درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی الف: درشت‌دانه، ب: ریزدانه

۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش بر اساس روش وزنی استاندارد ACI 211.1 و بر مبنای مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر با ۳۵ مگاپاسکال می‌باشد. نسبت آب به سیمان و میزان مواد سیمانی پس از آزمون و خطا به صورت ثابت برابر با ۰/۵ و ۴۰۰ در نظر گرفته شد. مقدار رطوبت و جذب آب سنگ‌دانه‌ها در طرح اختلاط لحاظ شده است. از آنجا که نانوسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، در آزمون‌های دارای نانو سیلیس، به میزان مصرف نانو سیلیس از وزن سیمان مصرفی کاسته شده است. طرح اختلاط آزمون‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

سنگ‌دانه‌های بازیافتی اعم از شن و ماسه با سه نسبت ۱۰۰٪ و ۵۰٪، ۰٪ با سنگ‌دانه طبیعی جایگزین می‌گردند. نانو سیلیس به میزان ۰/۶٪ و ۰/۴٪، ۰/۲٪، ۰٪ وزنی با سیمان جایگزین شده و الیاف PVA به مقدار ۱٪ و ۰/۵٪، ۰٪ حجمی به بتن اضافه می‌شود.

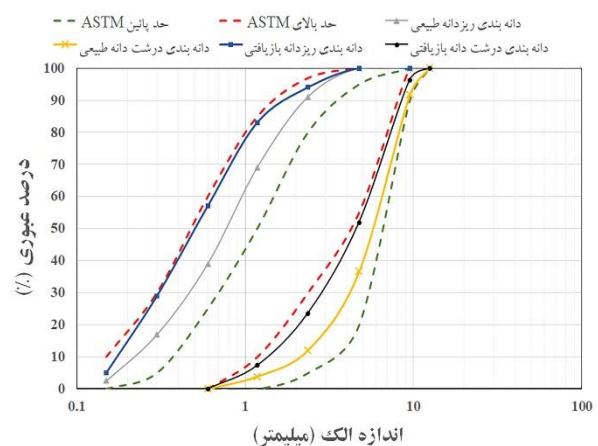
در مجموع بیست و یک آزمون بتنی شامل یک آزمون بدون نانوسیلیس و الیاف PVA (آزمون شاهد) ساخته شد. ساخت مخلوط‌های اولیه نشان داد که سطح ویژه زیاد ذرات نانوسیلیس باعث جذب آب زیاد شده و در این حالت در صورتی که نسبت حجمی الیاف PVA بیشتر از ۱ درصد باشد، کارایی بتن شدیداً کاهش یافته و پدیده گلوله‌ای شدن^۱ الیاف رخ می‌دهد. در این حالت الیاف PVA در یک نقطه جمع شده و امکان مخلوط کردن یکنواخت آن در بتن وجود ندارد. لذا حداکثر الیاف مورد استفاده در این تحقیق ۱ درصد انتخاب گردید.

از آنجا که انتظار می‌رفت با افزودن الیاف PVA کارایی بتن کاهش یابد و بررسی پیش نمونه‌های ساخته شده نیز این موضوع را تأیید نمود، در طرح اختلاط از فوق روان کننده استفاده گردید.

ذرات آجر، کاشی، چوب و آسفالت در این مصالح بازیافتی وجود ندارد. مقاومت فشاری بتن زباله‌های آزمایشگاهی بین ۲۰ تا ۴۵ مگاپاسکال بوده است. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های طبیعی و بازیافتی مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C33 در شکل ۲ نمایش داده شده است. در شکل ۳ تصویری از درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی نشان شده است. جهت رسیدن به اسلامپ مورد نظر، افزایش کارایی و کاهش آب مصرفی از فوق روان کننده پایه پلی کربوکسیلات اتر بانام تجاری FARCO PLAST P10N محصول شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است. این فوق روان کننده به صورت مایع و با وزن مخصوص $1/1 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد. الیاف PVA مورد استفاده ساخت کارخانه Kuraray کشور ژاپن بوده که اساس اطلاعات منتشر شده توسط کارخانه سازنده دارای قطر ۱۶ میکرون، طول ۱۲ میلی‌متر، مدول الاستیسیته ۳ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۱۶۰۰ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۱- زباله‌های بتنی مورد استفاده جهت تهیه سنگ‌دانه بازیافتی



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های طبیعی و بازیافتی مورد استفاده

¹ Balling

میزان فوق روان کننده مصرفی به گونه‌ای با فرآیند آزمون و خطا تعیین شد که اسلامپ آزمونه‌ها همیشه در محدوده 100 ± 20 میلی‌متر قرار گیرد. به منظور تسهیل در شناسایی، هر یک از آزمونه‌ها به صورت منحصر به فرد با استفاده از یک نام شامل چهار بخش مشخص می‌شود. بخش اول شامل عبارت R بوده که نشان‌دهنده بتن بازیافتی است. بخش دوم نسبت جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی با سنگ‌دانه‌های بازیافتی را به صورت درصد نشان می‌دهد. بخش سوم نشان‌دهنده درصد جایگزینی نانوسیلیس باسیمان بوده و بخش چهارم درصد حجمی الیاف PVA در هر مترمکعب بتن است. به عنوان مثال مخلوط R-100-2-1 دارای صد درصد سنگ‌دانه بازیافتی، دو درصد وزن سیمان طرح نانوسیلیس و یک درصد حجمی الیاف PVA در هر مترمکعب بتن می‌باشد.

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاط

کد آزمونه	نسبت اختلاط (kg/m^3)									جذب انرژي (ژول)	
	سیمان	آب	نانو سیلیس	ماسه طبیعی	شن طبیعی	ماسه بازیافتی	شن بازیافتی	الیاف PVA	فوق روان کننده		
Control	۴۰۰	۲۰۰	۰	۶۸۴	۱۰۵۴	۰	۰	۰	۰/۷	۱۱۳	۷/۴۴
R-50-0-0	۴۰۰	۲۰۰	۰	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۰	۰/۸۵	۱۰۷	۶/۱۰
R-100-0-0	۴۰۰	۲۰۰	۰	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۰	۰/۹۵	۹۸	۵/۳۱
R-50-2-0	۳۹۲	۲۰۰	۸	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۰	۱/۰۶	۱۰۳	۵/۶۰
R-100-2-0	۳۹۲	۲۰۰	۸	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۰	۱/۰۹	۹۶	۵/۱۲
R-50-4-0	۳۸۴	۲۰۰	۱۶	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۰	۱/۱۱	۱۰۳	۶/۰۳
R-100-4-0	۳۸۴	۲۰۰	۱۶	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۰	۱/۱۶	۹۵	۴/۹۷
R-50-6-0	۳۷۶	۲۰۰	۲۴	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۰	۱/۱۷	۹۶	۵/۱۹
R-100-6-0	۳۷۶	۲۰۰	۲۴	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۰	۱/۲۲	۸۹	۴/۹۵
R-50-2-0.5	۳۹۲	۲۰۰	۸	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۶/۵	۰/۹۷	۹۷	۲۶/۶۰
R-100-2-0.5	۳۹۲	۲۰۰	۸	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۶/۵	۱/۰۳	۸۸	۱۹/۸۷
R-50-4-0.5	۳۸۴	۲۰۰	۱۶	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۶/۵	۱/۰۹	۹۳	۲۳/۶۷
R-100-4-0.5	۳۸۴	۲۰۰	۱۶	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۶/۵	۱/۱۴	۸۹	۱۸/۹۳
R-50-6-0.5	۳۷۶	۲۰۰	۲۴	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۶/۵	۱/۱۹	۹۱	۱۸/۱۸
R-100-6-0.5	۳۷۶	۲۰۰	۲۴	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۶/۵	۱/۲۳	۸۵	۱۵/۲۳
R-50-2-1	۳۹۲	۲۰۰	۸	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۱۳	۱/۰۵	۸۹	۲۷/۵۰
R-100-2-1	۳۹۲	۲۰۰	۸	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۱۳	۱/۱۱	۸۳	۲۲/۳۳
R-50-4-1	۳۸۴	۲۰۰	۱۶	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۱۳	۱/۱۶	۸۹	۲۱/۴۹
R-100-4-1	۳۸۴	۲۰۰	۱۶	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۱۳	۱/۲۲	۸۴	۱۲/۶۲
R-50-6-1	۳۷۶	۲۰۰	۲۴	۳۴۲	۵۲۷	۳۱۸	۵۰۸	۱۳	۱/۲۵	۸۳	۱۷/۸۴
R-100-6-1	۳۷۶	۲۰۰	۲۴	۰	۰	۶۳۶	۱۰۱۶	۱۳	۱/۳۲	۸۱	۱۳/۵۴

۲-۳- ساخت آزمونه‌ها

آن اضافه و به مدت ۶۰ ثانیه دیگر باهم مخلوط شدند. در ادامه سیمان مورد نیاز به همراه بخشی از آب و فوق روان کننده در دو مرحله به مخلوط کن اضافه شد. برای جلوگیری از تراکم ابتدا ریزدانه و درشت‌دانه پس از توزین، به صورت خشک به مدت ۴۰ ثانیه باهم مخلوط شده و سپس بخشی از آب لازم در طرح به

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری به همراه انحراف معیار در شکل ۴ ارائه شده است. این مقادیر، میانگین مقاومت فشاری سه آزمون می‌باشند. با توجه به شکل ۴ مشخص است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط حاوی ۵۰ درصد سنگ‌دانه بازیافتی (R-50-0-0) و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه بازیافتی (R-100-0-0) به ترتیب حدود ۱۷ و ۳۱ درصد نسبت به آزمون شاهد فاقد سنگ‌دانه بازیافتی (آزمون Control) کمتر است. تحقیقات کزیمی^۲ و همکاران نشان داد که مقاومت فشاری بتن حاوی صد درصد درشت‌دانه بازیافتی حدود ۲۵ درصد نسبت به بتن ساخته شده از سنگ‌دانه طبیعی کاهش می‌یابد. [۱۶]. بتن RAC برخلاف بتن معمولی دارای دو ناحیه ITZ می‌باشد. اولین ناحیه ITZ بین سنگ‌دانه بازیافتی و خمیر سیمان جدید وجود داشته و دومین ناحیه ITZ بین سنگ‌دانه بازیافتی و ملات قدیمی چسبیده به آن واقع شده است. ریزترک‌ها و حفرات موجود در این دو ناحیه ITZ باعث ضعیف شدن اتصال بین سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان در بتن RAC شده و منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود، بطوریکه هر قدر میزان استفاده از سنگ‌دانه بازیافتی افزایش یابد، کاهش مقاومت بیشتری مشاهده می‌شود [۱۳].

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که افزودن نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی سنگ‌دانه بازیافتی می‌شود. مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون‌های با ۵۰ درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی در صورت اضافه کردن ۲، ۴ و ۶ درصد نانوسیلیس به ترتیب حدود ۸، ۱۹ و ۱۶ درصد نسبت به آزمون فاقد نانوسیلیس (آزمون R-50-0-0) افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت فشاری در آزمون‌های R-100-2-0، R-100-4-0 و R-100-0-0 که دارای ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه بازیافتی هستند به ترتیب ۱۳، ۲۵ و ۳۵ درصد می‌باشد. هیدروکسید کلسیم در مجاورت نانوسیلیس به هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) تبدیل می‌شود. ژل C-S-H تولید شده، فضای خالی بین ناحیه ITZ قدیمی و جدید و سنگ‌دانه‌های بازیافتی را پر کرده و در نتیجه میزان حفرات داخل بتن کاهش یافته و مقاومت خمیر سیمان زیاد می‌شود

نانوسیلیس و اطمینان از پخش یکنواخت آن در مخلوط، نانوسیلیس به همراه آب باقیمانده و فوق روان‌کننده در دستگاه اولتراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شده و به سنگ‌دانه و سیمان اضافه گردید. در ادامه الیاف PVA پس از مجزا کردن با دست، به آرامی و تدریجی به بتن اضافه شد. سریع اضافه کردن الیاف باعث پخش الیاف به سمت هوا منتشر می‌شود. در انتها مخلوط‌کن حدود دو دقیقه با سرعت کم مشغول ترکیب مصالح شده و در این حین جهت رسیدن به کارایی مناسب فوق روان‌کننده به میزان لازم به مخلوط اضافه شد. پس از پایان عملیات اختلاط، اسلامپ مخلوط‌ها بر اساس استاندارد ASTM C143 [۱۸] اندازه‌گیری و آزمون‌ها قالب‌گیری شدند. مقادیر اسلامپ آزمون‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. پس از قالب‌گیری، آزمون‌ها روی میز ویبره متراکم شدند. آزمون‌های ساخته شده در حدود ۲۴ ساعت درون قالب باقی‌مانده و سطح آن‌ها مرطوب نگه‌داشته شد. پس از باز کردن قالب، آزمون‌ها تا سن موردنظر جهت آزمایش در داخل حوضچه آب عمل‌آوری گردید.

۲-۴- آزمایش‌ها

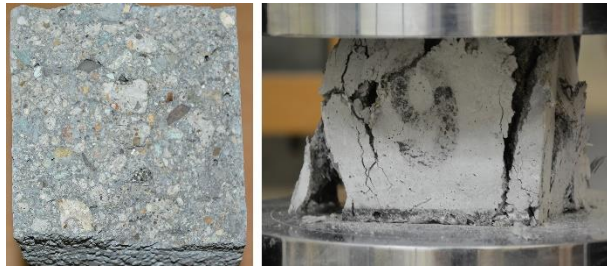
آزمایش مقاومت فشاری روی آزمون‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتری بر اساس استاندارد BS EN 12390-3 در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و انجام می‌شود [۱۹]. مقاومت کششی بتن با روش غیرمستقیم برزیلی تعیین می‌شود. این آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و بر اساس استاندارد ASTM C496 انجام شد [۲۰].

مقاومت خمشی بتن با آزمایش بارگذاری چهار نقطه‌ای و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تعیین می‌شود. این آزمایش بر روی نمونه مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۳۵ میلی‌متری و بر اساس استاندارد ASTM C1609 و با استفاده از دستگاه^۱ UTM انجام می‌شود [۲۱]. ریزساختار مخلوط‌های ساخته شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور توقف فرآیند هیدراسیون، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در اتانول قرار گرفته و سپس در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک و در نهایت با پودر طلا روکش شد.

² Kazmi

¹ Universal Tensile Machine

فشاری بتن ساخته شده از سنگ‌دانه طبیعی شده و در صورت استفاده بیش از این مقدار مقاومت فشاری کاهش می‌یابد [۲۳]. با توجه به وجود الیاف PVA در بتن و خاصیت پل زدن الیاف آن‌ها، حالت خرابی بتن تحت نیروی فشاری به صورت شکل پذیر بوده و بتن پس از رسیدن به مقاومت حداکثر قادر به حفظ انسجام و یکپارچگی خود می‌باشد. در شکل ۵-الف نمونه پس از پایان آزمایش بارگذاری فشاری مشاهده می‌شود.



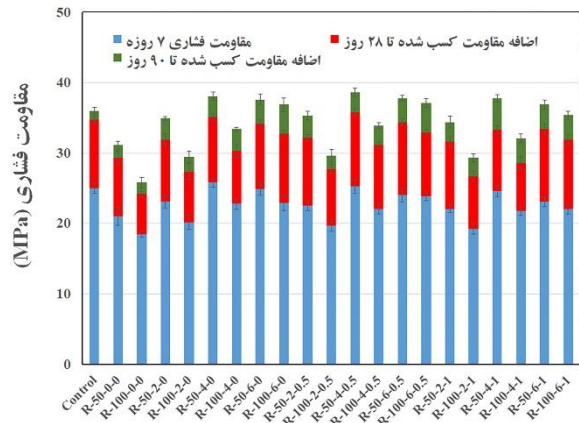
شکل ۵- نحوه خرابی آزمونه‌ها الف: بارگذاری فشاری، ب: بارگذاری خمشی

شکل ۵- نحوه خرابی آزمونه‌ها الف: بارگذاری فشاری، ب: بارگذاری خمشی

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که مقاومت کششی ۲۸ روزه در آزمونه‌های دارای ۵۰ درصد سنگ‌دانه بازیافتی (R-50-0-0) و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه بازیافتی (R-100-0-0) به ترتیب حدود ۵ و ۱۴ درصد نسبت به آزمونه شاهد فاقد سنگ‌دانه بازیافتی (آزمونه Control) کاهش می‌یابد. علت این موضوع ضعیف بودن ناحیه ITZ قدیمی در بتن حاوی سنگ‌دانه بازیافتی است. تحقیقات پیشین مؤید این مطلب است [۹، ۱۲]. ماتیاس^۱ و همکاران نشان دادند که ملات چسبیده به سنگ‌دانه‌های بازیافتی باعث زبری سطح این سنگ‌دانه‌ها شده و در نتیجه اتصال سنگ‌دانه‌های بازیافتی به خمیر سیمان بهبود می‌یابد. تقویت چسبندگی سنگ‌دانه‌های بازیافتی به خمیر سیمان باعث افزایش مقاومت کششی بتن RAC در مقایسه با مقاومت فشاری آن می‌شود [۲۴]. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که افزودن نانوسیلیس به تنهایی تأثیر جزئی در افزایش مقاومت کششی آزمونه‌ها دارد. مقاومت کششی در آزمونه‌های دارای ۲ درصد نانوسیلیس افزایشی نشان

[۱۳]. همچنین مشخص است که تأثیر نانوسیلیس بر میزان افزایش مقاومت فشاری آزمونه‌های با ۱۰۰ درصد جایگزینی سنگ‌دانه بازیافتی، بیشتر از آزمونه‌های با پنجاه درصد جایگزینی سنگ‌دانه بازیافتی می‌باشد.

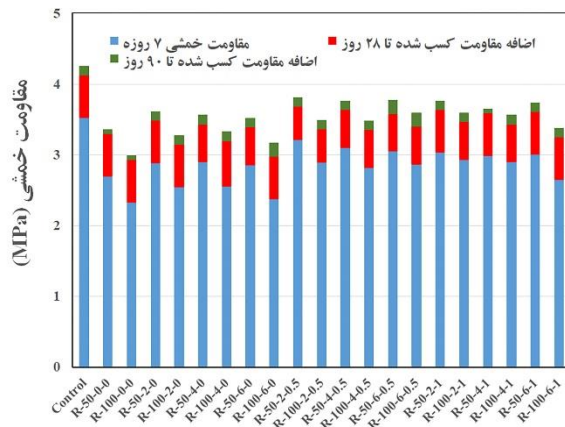


شکل ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

با اضافه کردن نیم درصد حجمی الیاف PVA، مقاومت فشاری ۲۸ روزه در تمام آزمونه‌ها نسبت به گروه فاقد الیاف افزایش می‌یابد. با افزایش حجم الیاف به یک درصد، مقاومت فشاری در مقایسه با آزمونه‌های دارای نیم درصد الیاف کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمونه‌های R-50-4-1 و R-50-4-0.5 که دارای میزان سنگ‌دانه بازیافتی و نانوسیلیس یکسان بوده ولی میزان الیاف آن‌ها متفاوت می‌باشد به ترتیب ۳۳/۳ و ۳۵/۸ مگاپاسکال بوده که نشان‌دهنده کاهش مقاومت فشاری با افزایش حجم الیاف می‌باشد. نتایج مشابه برای سایر آزمونه‌ها ثبت شده است. در صورت استفاده از الیاف PVA، این الیاف با پل زنی بر روی ریزترک‌ها، مانع از بهم پیوستن آن‌ها و تشکیل بهارخواب‌های بزرگ‌تر شده و به این وسیله مانع از خرابی زودهنگام بتن می‌شوند. با افزایش حجم الیاف، توزیع غیریکنواخت آن‌ها در داخل بتن باعث افزایش تخلخل بتن شده و هوای محبوس شده در پشت الیاف باعث کاهش تراکم و مقاومت فشاری بتن می‌شود. در این حالت کاهش مقاومت ناشی از کاهش تراکم بتن، بیشتر از افزایش مقاومت ناشی از خاصیت پل زنی الیاف بوده و در نهایت مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد [۲۲]. سرفراز و همکاران در تحقیقات خود نشان دادند که افزودن الیاف PVA تا حدود نیم درصد حجمی باعث افزایش مقاومت

¹ Matias

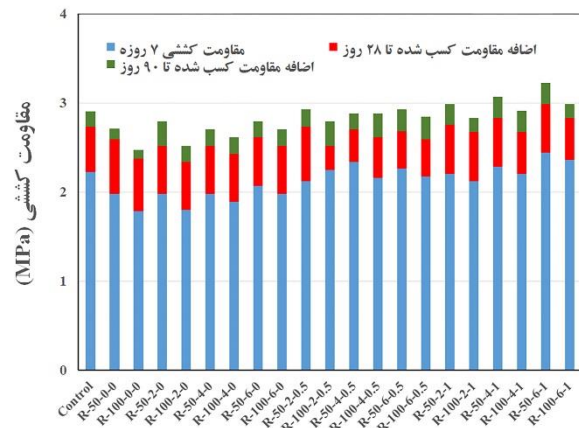
۷ مشاهده می‌شود که با افزایش میزان جایگزینی سنگ‌دانه بازیافتی از ۵۰٪ به ۱۰۰٪، مدول خمشی آزمون‌های R-50-0-0 و R-100-0-0 به ترتیب حدود ۲۰ و ۳۱ درصد نسبت به آزمون شاهد فاقد سنگ‌دانه بازیافتی (آزمون Control) کاهش می‌یابد. همچنین در نمودار نیرو-جابجایی این سه آزمون (شکل ۸-الف) بعد از رسیدن به مقاومت حداکثر، کاهش مقاومت ناگهانی مشاهده شده و مقاومت به سرعت به صفر می‌رسد.



شکل ۷- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

با بررسی شکل ۸-ب مشاهده می‌شود که نمودار نیرو-جابجایی در مخلوط‌های دارای نانوسیلیس و فاقد الیاف PVA نیز بعد از رسیدن به مقاومت حداکثر دارای کاهش شدید مقاومت بوده و رفتار این گروه از مخلوط‌ها نیز ترد و فاقد شکل‌پذیری می‌باشد. همچنین مقدار جزئی کاهش در مدول گسیختگی خمشی آزمون‌ها مشاهده می‌شود. علت این موضوع وجود نانوسیلیس در طرح اختلاط این آزمون‌ها می‌باشد. ونگ^۱ و همکاران در مطالعه خود نشان دادند که نانو ذرات سیلیس باعث ترد شدن عملکرد خمشی بتن دارای سنگ‌دانه بازیافتی می‌شود و منحنی نیرو-جابجایی بتن بعد از رسیدن به مقاومت حداکثر با کاهش ناگهانی روبرو می‌شود [۲۵]. با اضافه کردن الیاف PVA مقاومت خمشی آزمون‌ها به علت قابلیت پل زدن الیاف بر روی ترک‌ها نسبت به دو آزمون R-50-0-0 و R-100-0-0 افزایش می‌یابد. همچنین بر اساس نتایج مندرج در جدول ۲ مشخص است که میزان جذب انرژی در آزمون‌های دارای الیاف PVA چندین برابر دو آزمون R-50-0-0 و R-100-0-0 می‌باشد. میزان جذب انرژی بر اساس سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی اندازه‌گیری شده است. الیاف PVA

نمی‌دهد، ولی با افزایش مقدار نانوسیلیس، مقاومت کششی زیاد می‌شود. بیشترین مقاومت کششی در آزمون حاوی ۶ درصد نانوسیلیس ثبت شده است. مقاومت کششی آزمون‌های R-50-6-0 و R-100-6-0 که دارای ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه بازیافتی هستند به ترتیب ۱ و ۶ درصد نسبت به آزمون‌های R-50-0-0 و R-100-0-0 افزایش نشان می‌دهد، یعنی تأثیر نانوسیلیس در افزایش مقاومت کششی، با افزایش میزان جایگزینی سنگ‌دانه بازیافتی بیشتر می‌شود.



شکل ۶- نتایج آزمایش مقاومت کششی

با اضافه کردن الیاف PVA مقاومت کششی مخلوط‌ها بهبود یافته و با افزایش حجم الیاف مورد استفاده، مقاومت کششی بیشتر می‌شود. علت افزایش مقاومت کششی با افزایش حجم الیاف، خاصیت پل زدن الیاف روی ریزترک‌ها و انتقال نیرو از بتن به الیاف می‌باشد. بیشترین مقاومت کششی ۲۸ و ۹۰ روزه در آزمون R-50-6-1 با حدود ۱۵ و ۱۸ درصد افزایش نسبت به آزمون R-50-0-0 ثبت شده است. مقاومت کششی این آزمون از مقاومت کششی آزمون Control که از سنگ‌دانه طبیعی ساخته شده نیز بیشتر است.

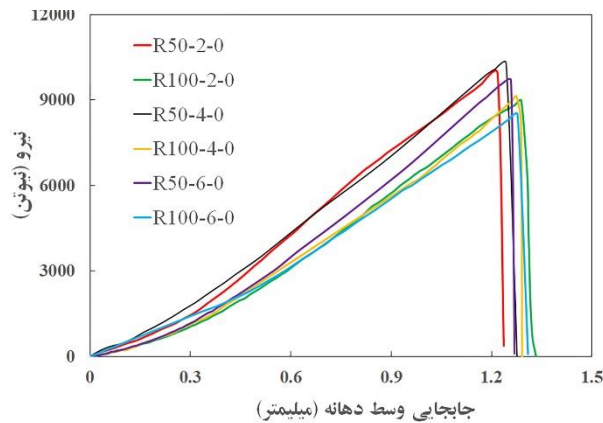
۳-۳- آزمایش مقاومت خمشی

مدول گسیختگی خمشی آزمون‌ها در سنین مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. میزان جذب انرژی بر اساس سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمشی در سن ۲۸ روزه محاسبه گردیده و در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲ و شکل

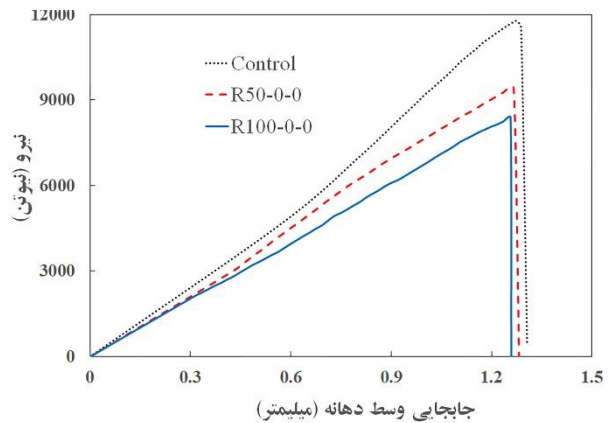
¹ Wang

رسیدن به مقاومت حداکثر مقاومت با شیب بسیار کم کاهش یافته و جابجایی نهایی قبل از گسیختگی نهایی افزایش می‌یابد. این آزمون‌ها دارای شکل پذیری بسیار بالایی هستند (شکل‌های ۸-ج و ۸-د). پس از پایان آزمایش، آزمون‌ها از وسط به دو نیم شده و مود شکست آن‌ها بررسی گردید. با توجه به شکل ۵-ب مشاهده می‌شود که محل شکست نمونه‌ها در مرز بین سنگ‌دانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان جدید است.

بر روی اولین بهار خواب‌های ایجاد شده پل زده و به دلیل مقاومت کششی زیاد، مانع از رشد و گسترش ترک‌ها گردیده و به این وسیله انرژی مستهلک شده در حین آزمایش بارگذاری خمشی افزایش چشمگیر می‌یابد. بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به آزمون R-50-2-1 با ۱ درصد حجمی الیاف PVA می‌باشد که حدوداً چهار و نیم برابر نمونه بدون الیاف است. همچنین در مخلوط‌های حاوی الیاف نمودار نیرو-جابجایی متفاوت می‌باشد، به گونه‌ای که بعد از

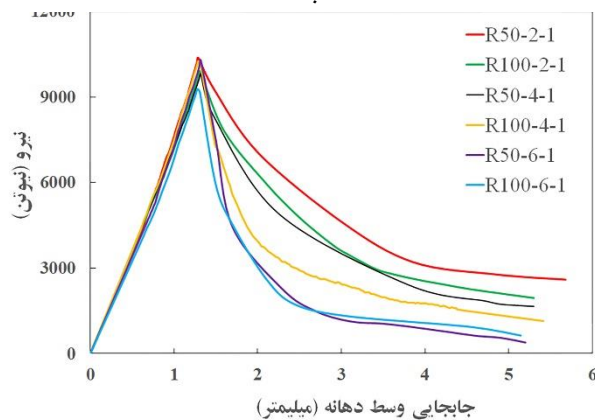


(ب)



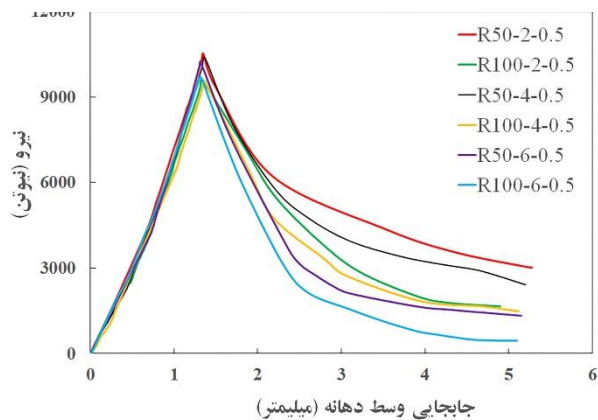
جابجایی وسط دهانه (میلیمتر)

(الف)



جابجایی وسط دهانه (میلیمتر)

(د)



جابجایی وسط دهانه (میلیمتر)

(ج)

شکل ۸- نمودار نیرو- جابجایی الف: آزمون‌های فاقد نانوسیلیس و الیاف PVA، ب: آزمون‌های دارای نانوسیلیس و فاقد الیاف

PVA، ج: آزمون‌های دارای ۰/۵ درصد الیاف PVA، د: آزمون‌های دارای ۱ درصد الیاف PVA

سنگ‌دانه بازیافتی و ۶ درصد نانوسیلیس است، ارائه شده است. با توجه به این شکل مشخص است که با افزودن نانوسیلیس به مخلوط، باعث پر شدن حفرات شده و ژل C-S-H به جای آن تشکیل می‌شود. همچنین تراکم ذرات نانوسیلیس به صورت کلوخه‌ای شدن در این شکل مشاهده می‌شود. در این نمونه خمیر سیمان متراکم‌تر شده و اتصال بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان

۴-۳- بررسی ریزساختار بتن

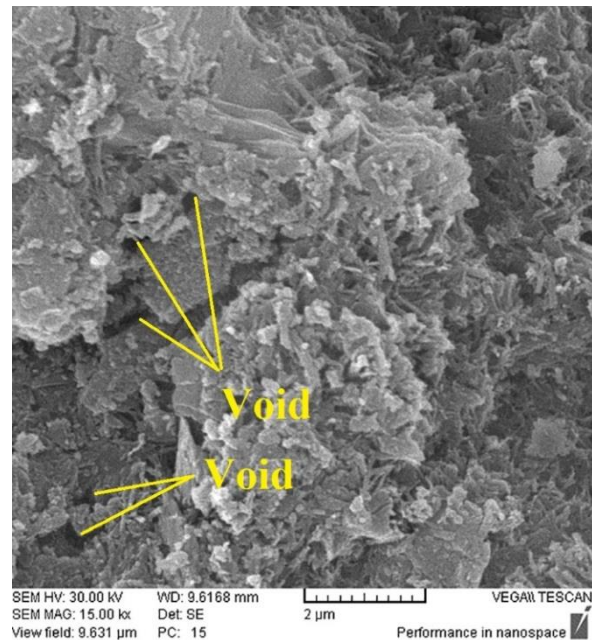
در شکل ۹ تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده است. با توجه به شکل ۹-الف مشاهده می‌شود که در آزمون R-50-0-0 که دارای پنجاه درصد سنگ‌دانه بازیافتی است، تعدادی حفره در خمیر سیمان مشاهده می‌شود. در شکل ۹-ب تصویر SEM آزمون R-50-6-0 که دارای پنجاه درصد

بارگذاری از داخل بتن بیرون کشیده شده‌اند (شکل ۹-د). با توجه به شکل ۹-د مشخص است که این الیاف بر روی ریزترک‌ها پل زده و مانع از توسعه و گسترش آن‌ها می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که بر روی بخشی از الیاف PVA ژل C-S-H و ذرات حاصل از فرآیند هیدراسیون سیمان چسبیده است و به این وسیله گیرایی و اتصال الیاف در داخل بتن بهبود می‌یابد (شکل‌های ۹-ج و ۹-د).

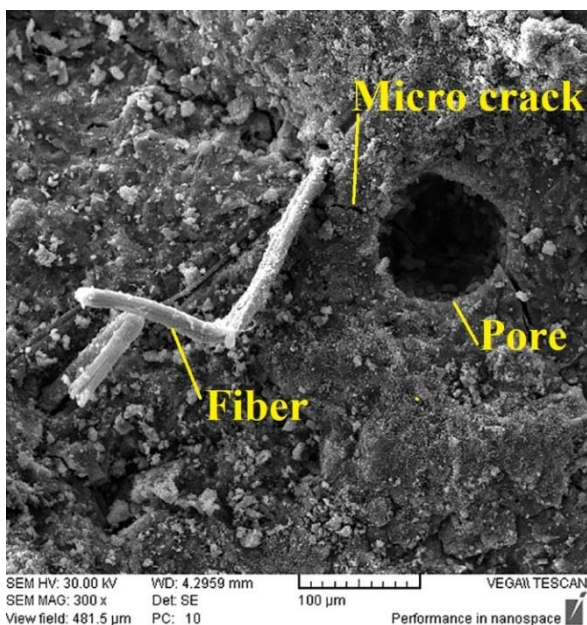
محکم‌تر گردیده و کیفیت ریزساختار بتن ارتقا می‌یابد. علت این پدیده فعالیت پوزولانی و سطح ویژه زیاد ذرات نانوسیلیس است که به راحتی با سایر اتم‌ها در حالت پایدار پیوند مولکولی برقرار می‌کند [۲۵]. در این شکل ترک بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان در ناحیه ITZ دیده می‌شود. در شکل ۹-ج مشاهده می‌شود که سطح الیاف PVA اضافه‌شده به بتن تقریباً صاف و صیقلی می‌باشد. این الیاف کاملاً در داخل بتن مدفون شده و بعضاً تحت



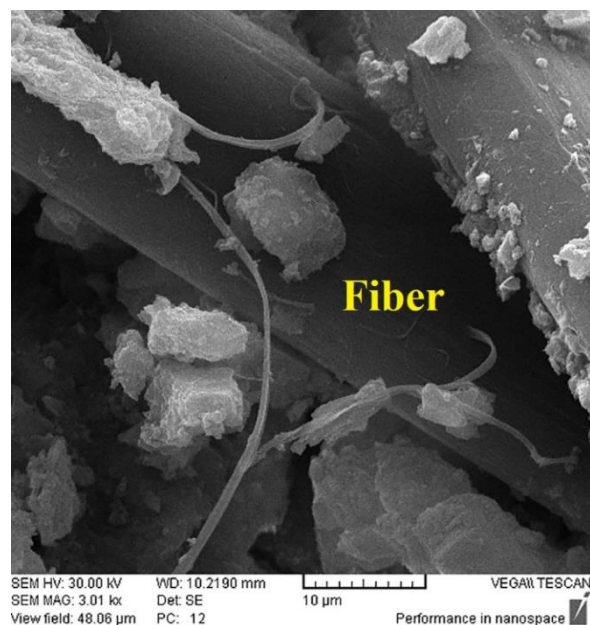
ب



الف



د



ج

شکل ۹- تصاویر ریزساختار آزمونه‌ها در سن ۲۸ روز الف: آزمونه R-50-0-0، ب: R-50-6-0

ج: R-50-2-0.5 د: R-50-6-0.5

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده از ذرات نانوسیلیس و الیاف پلی وینیل الکل بر بهبود مشخصات مکانیکی و ریزساختار بتن ساخته شده از درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی پرداخته شده است. در این راستا سعی گردیده است با استفاده از مواد مذکور، بتن حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه بازیافتی مشخصات مکانیکی معادل و یا بهتر از بتن معمولی حاوی سنگ‌دانه طبیعی داشته باشد. در محدوده آزمایش‌های انجام‌شده نتایج زیر قابل حصول است:

- افزودن نانوسیلیس باعث بهبود مقاومت فشاری بتن حاوی سنگ‌دانه بازیافتی می‌شود. با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه بازیافتی، تأثیر نانوسیلیس بر میزان افزایش مقاومت فشاری بیشتر می‌شود.

- اضافه کردن نیم درصد حجمی الیاف PVA باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. استفاده از بیش از این مقدار الیاف اثر معکوس داشته و مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون R-50-4-0.5 که حاوی پنجاه درصد سنگ‌دانه بازیافتی، ۴ درصد نانوسیلیس و ۰/۵ درصد الیاف PVA است، حدود ۳ درصد از مقاومت فشاری مخلوط ساخته شده از سنگ‌دانه طبیعی بیشتر است.

- استفاده از نانوسیلیس به‌تنهایی تأثیر کمی در افزایش مقاومت کششی بتن حاوی سنگ‌دانه بازیافتی دارد و الیاف PVA بیشتر از نانوسیلیس در افزایش مقاومت کششی مؤثر است. با افزایش مقدار استفاده از نانوسیلیس و الیاف PVA، مقاومت کششی زیاد می‌شود. - مصرف نانوسیلیس باعث ترد شدن رفتار و کاهش میزان استهلاک انرژی بتن می‌شود، ولی اضافه کردن الیاف PVA باعث افزایش مقاومت خمشی و قابلیت استهلاک انرژی بتن می‌شود. علت این موضوع قابلیت پل زدن الیاف بر روی ترک‌ها و افزایش ظرفیت تحمل نیرو است.

- استفاده هم‌زمان از نانوسیلیس و الیاف PVA باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی و میزان جذب انرژی بتن حاوی سنگ‌دانه بازیافتی شده و مود خرابی بتن را از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر تبدیل می‌کند.

۵- مراجع

[1] V.W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam, K.M. Ng, Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete, Journal of Hazardous Materials. 163 (2009) 823–828.

- [2] D. Anik, C. Boonstra, J. Mak, Handbook of Sustainable Building: An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment, James & James, 1996.
- [3] D. Gao, L. Zhang, Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete, Construction and Building Materials. 159 (2018) 126–136.
- [4] M. Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, S. Maiti, Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, Construction and Building Materials. 68 (2014) 501–516.
- [5] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, Construction and Building Materials. 18 (2004) 461–468.
- [6] A. Behnood, J. Olek, M.A. Glinicki, Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M5' model tree algorithm, Construction and Building Materials. 94 (2015) 137–147.
- [7] B. Mas, A. Cladera, T. del Olmo, F. Pitarch, Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use, Construction and Building Materials. 27 (2012) 612–622.
- [8] S. Kou, C. Poon, Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials. 77 (2015) 501–508.
- [9] C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam, Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks, Construction and Building Materials. 16 (2002) 281–289.
- [10] J. Xiao, W. Li, Y. Fan, X. Huang, An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011), Construction and Building Materials. 31 (2012) 364–383.
- [11] A. Abd Elhakam, A.E. Mohamed, E. Awad, Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete, Construction and Building Materials. 35 (2012) 421–427.
- [12] C. Shi, Y. Li, J. Zhang, W. Li, L. Chong, Z. Xie, Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review, Journal of Cleaner Production. 112 (2016) 466–472.
- [13] S. Kou, C. Poon, F. Agrela, Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures, Cement and Concrete Composites. 33 (2011) 788–795.

- [14] P. Hosseini, A. Booshehrian, A. Madari, Developing Concrete Recycling Strategies by Utilization of Nano-SiO₂ Particles, Waste and Biomass Valorization. 2 (2011) 347–355.
- [15] F.U.A. Shaikh, H. Odoh, A.B. Than, Effect of nano silica on properties of concretes containing recycled coarse aggregates, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials. 168 (2015) 68–76.
- [16] S.M.S. Kazmi, M.J. Munir, Y.-F. Wu, I. Patnaikuni, Effect of macro-synthetic fibers on the fracture energy and mechanical behavior of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials. 189 (2018) 857–868.
- [17] A. Noushini, K. Vessalas, B. Samali, Static mechanical properties of polyvinyl alcohol fibre reinforced concrete (PVA-FRC), Magazine of Concrete Research. 66 (2014) 465–483.
- [18] ASTM C143/C143M-15a, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA., (2015).
- [19] B.S.E.N. 12390-3:2009, 12390-3 (2009) Testing hardened concrete—part 3: compressive strength of test specimens, British Standards Institution. (2009).
- [20] A.C./ C496M-12, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA., (2012).
- [21] ASTM C1609/C1609M-12, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA., (2012).
- [22] V.C. Li, A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites, Cement and Concrete Composites. 14 (1992) 131–141.
- [۲۳] م. اسفندی سرافراز، م.س. مسعودی، ا. کریمی، بررسی اثر استفاده از الیاف پلی وینیل الکل بر مشخصات مکانیکی بتن، تحقیقات بتن. ۱۲ (۲۰۱۹) ۱۲۷–۱۴۰.
- [24] D. Matias, J. de Brito, A. Rosa, D. Pedro, Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers, Construction and Building Materials. 44 (2013) 101–109.
- [25] Y. Wang, P. Hughes, H. Niu, Y. Fan, A new method to improve the properties of recycled aggregate concrete: Composite addition of basalt fiber and nano-silica, Journal of Cleaner Production. 236 (2019) 117602.

Effects of the addition of Nano silica and PVA fiber on mechanical and microstructural behavior of recycled aggregate concrete

Mehdi Esfandi Sarafraz *

Civil Engineering Department, Islamic Azad university, West Tehran branch, Tehran, Iran.

Abstract

The reusing of recycled aggregates produced from waste concrete is a sustainable solution to reduce the shortage of natural resources. This paper presents the effects of the addition of Nano silica and polyvinyl alcohol (PVA) fiber on the mechanical and microstructural properties of recycled aggregate concrete containing coarse and fine recycled aggregates. Recycled aggregate concrete was produced by 50% and 100% volume substitution of natural fine and coarse aggregate with recycled aggregate. In total, 21 series of concretes are evaluated. The Nano silica in weight ratios of 0%, 2%, 4%, and 6%, and the polyvinyl alcohol fibers in volume fraction of 0%, 0.5%, and 1% were used. The compressive strength, tensile strength, and flexural strength at the different ages of 7, 28, and 90 days are measured in this research. Also, the microstructure of the recycled aggregate concrete was studied via scanning electron microscopy on the selected mixtures. Test results show that the addition of Nano-silica and polyvinyl alcohol fiber can improve the mechanical and microstructural properties of the recycled aggregate concretes. Also, it was seen that polyvinyl alcohol fiber improves the post-peak behavior of specimens. Moreover, high ratios of Nano silica and PVA fiber in the concrete mixture caused negative effects on the compressive strength of recycled aggregate concrete.

Keywords: Recycled aggregate, Nano silica, Fiber reinforced concrete, Compressive strength, Microstructure.

* Corresponding Author: sarafraz.m@wtiau.ac.ir

