



ارزیابی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس

صفا پیمان^{۱*}، امیر محمد حسن زاده^۲، سید رامتین رضائی^۲، رضا حسن زاده^۳

^{۱*} استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، آب و انرژی دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، آب و انرژی دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

^۳ کارشناسی ارشد، دانشگاه آیت الله بروجردی(ع)، بروجرد، ایران

(speyman@ihu.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲)

چکیده

بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی، رفتاری شکننده دارد. افزودن الیاف به بتن بر شکل پذیری، مقاومت در برابر ضربه، میزان جذب انرژی، مقاومت پس از ترک خوردگی، مقاومت سایشی و مقاومت کششی بتن اثرگذار بوده و از گسترش ترک جلوگیری می کند. به همین منظور، پژوهشی برای بررسی تأثیر ترکیبات مختلف الیاف پلی پروپیلن، الیاف فولادی سینوسی و نانوسیلیس کلئیدی بر مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و درصد جذب آب بتن انجام شده است. نتایج آزمایش های انجام شده نشان می دهد که با افزودن الیاف فولادی سینوسی، الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس کلئیدی به نمونه های بتنی، مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی افزایش می یابد. بهترین طرح اختلاط مربوط به نمونه ی ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (S7N3) می باشد، که مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی این ترکیب به ترتیب ۵۴/۳۴، ۳۵/۶۲ و ۲۶/۳۱ درصد نسبت به نمونه شاهد (OPC) افزایش نشان می دهد. در نمونه حاوی ۳ درصد نانوسیلیس (N3) نسبت به نمونه شاهد جذب آب ۳۲ درصد کاهش یافته است.

کلمات کلیدی

نانوسیلیس کلئیدی، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، خصوصیات مکانیکی بتن، بتن الیافی.



Evaluation of Mechanical Properties of Concrete Containing Steel Fibers, Polypropylene Fibers and Nanosilica

Safa Peyman ^{1*}, Amir Mohammad Hassanzadeh ², Seyed Ramtin Ramezani ², Reza Hassanzadeh ³

^{*1} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Energy, Imam Hossein University, Tehran, Iran

² Ms.c, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Energy Imam Hossein University, Tehran, Iran

³ Ms.c, Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Iran

(speyman@ihu.ac.ir)

(Date of received: 16/08/2024, Date of accepted: 02/11/2024)

ABSTRACT

Concrete, as one of the most widely used construction materials, has a brittle behavior. Adding fibers to concrete has an effect on formability, impact resistance, energy absorption rate, post-cracking resistance, abrasion resistance and tensile strength of concrete and prevents crack propagation. For this purpose, a research has been conducted to investigate the effect of different combinations of polypropylene fibers, sinusoidal steel fibers and colloidal nanosilica on the performance of flexural strength, compressive strength, tensile strength and water absorption percentage of concrete. The results of the experiments show that by adding sinusoidal steel fibers and colloidal nanosilica to concrete samples, bending strength, compressive strength and tensile strength are increased. The best mixing design is related to the sample of 7% of steel fibers and 3% of nano colloidal silica (S7N3), which the bending strength, compressive strength and tensile strength of this combination are 54.34, 35.62 and 26.31% respectively. The control sample (OPC) increases. In the sample containing 3% nanosilica (N3), compared to the control sample, water absorption has decreased by 32%.

Keywords:

Colloidal nanosilica, Steel fibers, Polypropylene fibers, Mechanical properties of concrete, Fiber concrete.



۱- مقدمه

با توسعه علم مهندسی سازه، تقاضا برای ساخت انواع جدیدی از بتن‌ها که دارای خصوصیات بهبود یافته باشند افزایش یافت. از بتن‌های بهبود یافته می‌توان به بتن با مقاومت بالا اشاره کرد که دارای مقاومت و چگالی بیشتری نسبت به بتن با مقاومت معمولی است [۱]. از آنجا که بتن با مقاومت بالا شکننده‌تر از بتن معمولی می‌باشد، محققان به دنبال راه‌حلی برای تقویت رفتار و بهبود عملکرد این نوع بتن‌ها هستند. یکی از این روش‌ها استفاده از الیاف برای تقویت بتن می‌باشد [۲]. استفاده از الیاف به جهت بهبود بخشیدن به خواص بتن کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های بتنی و بتن مسلح پیدا کرده است. علت استفاده گسترده از الیاف، مزایای زیاد فنی و اقتصادی در جسم بتن می‌باشد. از تاثیرات مثبت استفاده از الیاف در بتن افزایش مقاومت خمشی، مقاومت برشی، مقاومت کششی، میزان جذب انرژی و افزایش مقاومت مقطع در برابر ترک خوردگی می‌باشد. از سوی دیگر وجود الیاف سبب کم شدن میزان انقباض، خزش و سایش سطحی بتن می‌گردد [۳]. در سال‌های اخیر تمایل به استفاده از نانو ذراتی چون نانوسیلیس به عنوان پوزولان در جهت تقویت خواص بتن افزایش یافته است [۴]. با افزودن نانوسیلیس فرایند هیدراتاسیون سریع‌تر صورت می‌گیرد و همچنین مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد [۵]. در میان الیاف مورد استفاده برای تقویت بتن، استفاده از الیاف فولادی و پلی پروپیلن بیشتر است. الیاف فولادی بر حسب شکل مقطع به صورت دایره‌ای، مستطیلی، نیم‌دایره‌ای و الیاف با مقاطع نامنظم استفاده می‌شوند. در بتن‌های بدون الیاف، گسیختگی به صورت ناگهانی صورت می‌گیرد و بتن کاملاً از هم می‌پاشد (بتن رفتاری شکننده دارد). در حالی که بتن حاوی الیاف رفتاری شکل‌پذیر از خود نشان می‌دهد و گسیختگی به آرامی انجام می‌شود (نمونه‌ی بتنی، پس از گسیختگی شکل ظاهری خود را حفظ می‌کند) [۶]. استفاده از الیاف پلی پروپیلن به طور قابل ملاحظه‌ای ساختمان میکروسکوپی بتن را تغییر می‌دهد. این تغییر ساختار سبب می‌شود، بلوره شدن $Ca(OH)_2$ کاهش یابد و حفره‌ها و ترک‌های ریز داخل بتن در این نوع بتن به حداقل برسد [۷]. چن و لیو در سال ۲۰۰۴ مطالعاتی را روی بتن با مقاومت بالا انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که حضور الیاف فولادی سبب بهبود مقاومت فشاری و کششی این نوع بتن می‌گردد [۸]. نجف و همکاران در سال ۲۰۲۲ به مطالعه بهبود مقاومت کششی و فشاری بتن سبک با استفاده از پودر شیشه زباله، نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن باز یافتی مورد استفاده پرداختند. بهترین ترکیب شامل ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن، ۳ درصد نانوسیلیس بر اساس وزن سیمان و ۲۵ درصد پودر شیشه بر اساس وزن سنگدانه‌ها بود که مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب حدود ۱/۷ و ۱/۶ برابر افزایش داد [۹]. همکاران در سال ۲۰۲۰ تأثیر افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیس و پودر لاستیک را بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری بررسی کردند. مجموعه آزمایش‌های انجام شده شامل تست‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی بتن‌های ژئوپلیمری بود. نتایج نشان داد که استفاده همزمان از این دو ماده می‌تواند به بهبود مقاومت فشاری و کششی این نوع بتن کمک کند [۱۰]. عایشه و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمر تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی پروپیلن در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی باعث افزایش خواص مکانیکی بتن می‌شود [۱۱]. قریش و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی خواص بتن با اضافه کردن الیاف فولادی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان الیاف فولادی، مقاومت کششی در نمونه‌ها به شکل خطی افزایش پیدا می‌کند [۱۲]. با توجه به مرور منابع صورت گرفته، هدف اصلی این پژوهش بررسی خصوصیات مکانیکی بتن مانند مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی و همچنین درصد جذب آب ناشی از الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس کلوتیدی و مقایسه‌ی آن با بتن بدون افزودنی می‌باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی و مصالح

برای تهیه‌ی نمونه‌های بتنی مورد استفاده در این تحقیق از مواد و مصالح زیر استفاده شده است.

۲-۱- سیمان

در این پژوهش سیمان استفاده شده از نوع سیمان تیپ ۲ می‌باشد که در کارخانه سیمان تهران تولید شده است. مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی این سیمان با استاندارد سیمان پرتلند ASTM C150 [۱۳] و استاندارد شماره ۳۸۹ ایران نیز مطابقت دارد. در جدول ۱ و ۲ به مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی اشاره شده است.



جدول ۱: مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

ویژگی	استاندارد مربوطه	
وزن مخصوص ویژه	ASTM C188-89	۳/۱۷ gr/cm ³
سطح مخصوص بدست آمده از آزمایش بلین سیمان	ASTM C204	۲۸۵۰g/ Cm ²
زمان گیرش	ASTM C82	اولیه (دقیقه)
		ثانویه (ساعت)
		۳ روزه
مقاومت فشاری	B.S.1881-116	۷ روزه
		۲۸ روزه
		۲۰۰ Kg/cm ²
		۳۱۰ Kg/cm ²
		۳۸۰ Kg/cm ²

جدول ۲: مشخصات شیمیایی ماده تشکیل دهنده سیمان مصرفی با توجه به درصد وزنی

ماده	درصد وزنی	ماده	درصد وزن
Sr	۰/۰۸	SO ₃	۲
Fe ₂ O ₃	۳/۵۵	SiO ₂	۲۱/۳
MnO	۰/۲۲۴	Al ₂ O ₃	۴/۸
TiO ₂	۰/۳۳	MgO	۳/۹
CaO	۶۲/۸	Na ₂ O	۰/۱۸
K ₂ O	۰/۵۱	-	-

۲-۲- آب

در این پژوهش از آب شرب شهر تهران استفاده شده است و فاقد هرگونه ماده افزودنی می باشد.

۲-۳- الیاف پلی پروپیلن

الیاف پلی پروپیلن در بازه بارگذاری های معمولی از الاستیسیته پایینی برخوردار است، اما مدول آن تحت بارهای ضربه به صورت چشم گیری افزایش می یابد. براساس مطالعات صورت گرفته مدول الاستیسیته این الیاف در حین بارگذاری ضربه ای، ۲ تا ۳ برابر مدول الاستیسیته آن در حین بارگذاری با سرعت پایین است که علت اصلی آن کم تر شدن اثر رفتار ویسکو الاستیک بر اثر گذشت زمان، در بارگذاری سریع می باشد [۱۴]. در جدول ۳ به مشخصات الیاف پلی پروپیلن مصرفی در این پژوهش اشاره شده است.

جدول ۳: به مشخصات الیاف پلی پروپیلن مصرفی

مشخصات	مقدار	مشخصات	مقدار
نوع جنس	PP%۱۰۰	طول برش	۱۲Mm
رنگ ظاهری	سفید	قطر	۲۰۰ (μm)
وزن مخصوص	۰/۹۱ (gr/cm ³)	مقاومت در برابر واکنش سیلیسی قلیایی	عالی
محدوده ذوب	۱۶۵ (C°) درجه	هدایت الکتریکی	بسیار پایین



۲-۴- الیاف فولادی سینیوسی

الیاف فولادی محبوب‌ترین نوع الیافی است که به عنوان تقویت کننده بتن استفاده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که افزودن الیاف فولادی در بتن به طور قابل توجهی چقرمگی خمشی، ظرفیت جذب انرژی، رفتار شکل‌پذیر قبل از شکست نهایی، کاهش ترک خوردگی و بهبود دوام بتن را افزایش می‌دهد [۱۵]. در جدول ۴ به مشخصات الیاف فولادی مصرفی در این پژوهش اشاره شده است.

جدول ۴: مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده

۱	قطر d (mm)	موجدار	سطح
۷/۸۵	چگالی (gr/cm ³)	مدور	مقطع عرضی
۵۰	L/d	دو سر قلاب	شکل انتهایی
-	-	۵۰	L طول (mm)

۲-۵- نانوسیلیس کلونیدی

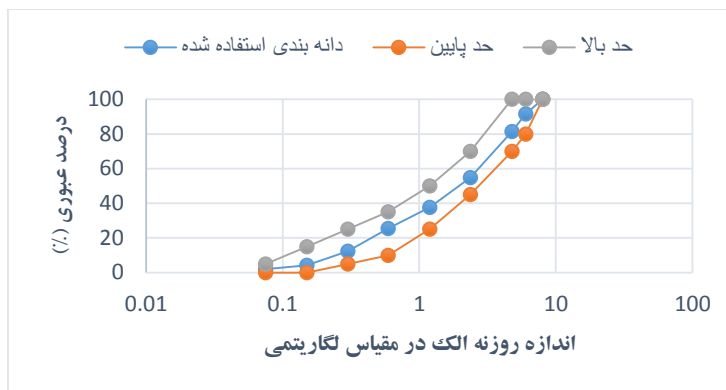
استفاده از نانوسیلیس در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری و سایشی در بتن می‌شود [۱۶]. در جدول ۵ به مشخصات نانوسیلیس مصرفی در این پژوهش اشاره شده است.

جدول ۵: مشخصات نانوسیلیس کلونیدی

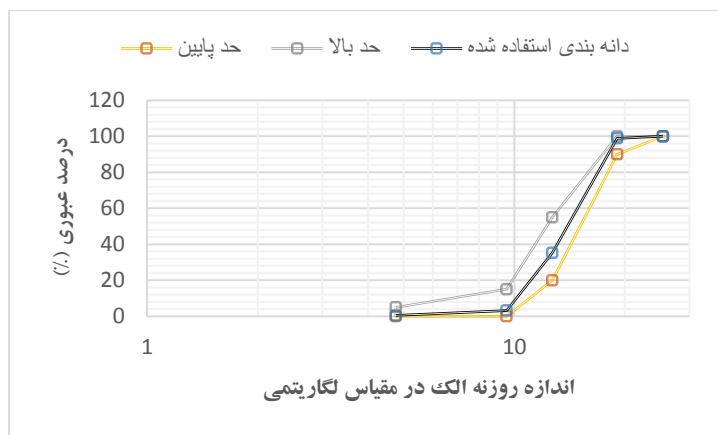
۹-۱۰	Ph	SiO ₂ .nH ₂ O	فرمول شیمیایی
۲۵۰ m ² /g	سطح خاص (N ₂)	سفید شیری	رنگ
۱۰-۲۰ nm	اندازه ذرات	۶۰/۰۸ g/mol	وزن مولکولی

۲-۶- مشخصات سنگدانه

به طور معمول سه چهارم حجم بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند. از این رو کیفیت سنگدانه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار هستند. دانه‌های سنگی طبیعی معمولاً به وسیله هوازدگی، فرسایش و یا به طور مصنوعی با خرد کردن سنگ‌های مادر تشکیل می‌شوند. مصالح درشت‌دانه و ریزدانه استفاده شده در این پژوهش از معادن رودخانه‌ای منطقه شهریار در استان البرز تهیه شده که توسط سنگ‌شکن شکسته شده‌اند. مشخصات مکانیکی انجام شده روی مصالح ریزدانه و درشت دانه در جدول ۶ مشخص شده است. شکل ۱ و ۲ دانه‌بندی مصالح سنگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: دانه بندی مصالح ریزدانه



شکل ۲: دانه بندی مصالح درشت دانه

جدول ۶: نتایج آزمایشات مکانیکی انجام شده روی مصالح ریزدانه و درشت دانه.

نوع سنگدانه‌ها		استاندارد مربوطه	مشخصات سنگدانه‌ها
ریزدانه	درشت دانه		
Mm۸	Mm۱۹	ASTM C136	حداکثر اندازه‌ی اسمی
۲۵۶۷ Kg/m ³	۲۵۶۰ Kg/m ³	ASTM C127	وزن مخصوص
۳/۵	-	ASTM C136	مدول نرمی
۷۵	-	ASTM D2419	درصد ارزش ماسه‌ای
-	۱۲/۳	ASTM C121, C535	سایش لس آنجلس
%۳/۳۹	%۲/۴۵	ASTM C566-89	SSD جذب آب
-	%۶۸	B.S.63	درصد شکستگی مصالح درشت‌تر از الک #۴



۲-۲- روش ساخت مخلوط

برای طرح اختلاط بتن مورد استفاده از استاندارد ACI ۲۱۱ استفاده شده است. ترتیب اختلاط بدین صورت بوده است که سنگدانه‌ها و سیمان درون میکسر ریخته شده و میکسر به مدت دو دقیقه مخلوط را هم زده و سپس ترکیبی از آب با الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن و نانوسیلیس با درصدهای متفاوت به صورت تدریجی به مخلوط اضافه گردید و میکسر تا زمان همگن شدن بتن روشن ماند. طرح اختلاط بتن مصرفی در جدول ۷ نشان داده شده است. شکل ۳ عمل‌آوری نمونه‌های بتن را نشان می‌دهد.

(Kg/m^3 جدول ۷- نسبت‌های مخلوط)

عیار سیمان	۴۸۸/۶۲	نسبت آب به سیمان	۰/۵
دانه درشت	۸۶۹/۴۵	ریزدانه	۶۹۸/۰۳

در این تحقیق از ۱۰ طرح اختلاط بتن استفاده شده است که عبارتند از: نمونه‌ی حاوی ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (PP04N3)، نمونه‌ی حاوی ۰/۷ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (PP07N3)، نمونه‌ی حاوی ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن (PP04)، نمونه‌ی حاوی ۰/۷ درصد الیاف پلی‌پروپیلن (PP07)، نمونه‌ی حاوی ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (S7N3)، نمونه‌ی حاوی ۵ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (S5N3)، نمونه‌ی حاوی ۷ درصد الیاف فولادی (S7)، نمونه‌ی حاوی ۵ درصد الیاف فولادی (S5)، نمونه‌ی حاوی ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (N3) و نمونه بتن شاهد (OPC).



شکل ۳: عمل‌آوری نمونه‌های بتن

۳- آزمایش‌ها و نتایج

آزمایش‌های انجام شده شامل آزمایش اسلامپ، آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش مقاومت خمشی، آزمایش مقاومت کششی و آزمایش درصد جذب آب می‌باشد. در جدول ۸ نوع آزمایش، ابعاد و تعداد نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.

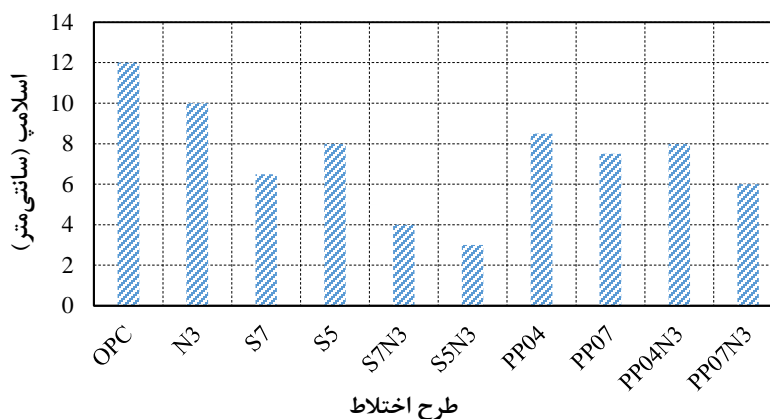


جدول ۸: نوع آزمایش، ابعاد نمونه (میلی متر) و تعداد نمونه

آزمایش	آزمایش مقاومت فشاری	آزمایش مقاومت خمشی	آزمایش مقاومت کششی	آزمایش درصد جذب
سن (روز)	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
نوع آزمایش	مخرب	مخرب	مخرب	غیر مخرب
ابعاد نمونه	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	۵۰×۱۰۰×۱۰۰	۱۰۰×۲۰۰	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰
تعداد نمونه در هر اختلاط	۳	۲	۲	۲

۳-۱- اسلامپ

اسلامپ آزمایشی برای مشخص کردن میزان کارایی و روانی بتن تازه قبل از گیرش بتن است. بلافاصله بعد از اختلاط آزمایش اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM C143 [۱۷] بروی نمونه‌های بتن صورت گرفت.



شکل ۴: اسلامپ نمونه‌های بتن

نتایج مقایسه اسلامپ یا کارایی بتن در شکل ۴ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، نمونه OPC با اسلامپ ۱۲ سانتیمتری در مقایسه با نمونه‌های دیگر دارای کارایی (اسلامپ) بالاتری است. افزودن ۳ درصد نانوسیلیس به بتن (N3)، کاهش ۲ سانتیمتری اسلامپ را نسبت به نمونه شاهد به دنبال دارد. نمونه‌های بتنی حاوی ۵ و ۷ درصد الیاف فولادی (S7، S5) به ترتیب دارای ۴ و ۵/۵ سانتیمتر اسلامپ کمتر نسبت به بتن شاهد هستند. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن ۴/۰ و ۷/۰ درصد (PP07، PP04) به ترتیب اسلامپ را ۳/۵ و ۴/۵ سانتیمتر کاهش می‌دهد. در حالت استفاده از الیاف بصورت ترکیبی، نمونه‌های بتنی حاوی ۵ و ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (S7N3، S5N3) به ترتیب دارای اسلامپ ۳ و ۴ سانتیمتر می‌باشند که نسبت به نمونه شاهد ۹ و ۸ سانتیمتر اسلامپ کمتری دارند. افزودن ۴/۰ و ۷/۰ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (PP07N3، PP04N) به ترتیب سبب کاهش اسلامپ به میزان ۴ و ۶ سانتیمتر نسبت به بتن شاهد می‌شوند. بنابراین بیشترین کاهش اسلامپ نسبت به نمونه شاهد مربوط به نمونه بتنی حاوی ۵ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانوسیلیس کلئیدی (S5N3) است. در این نمونه ۷۶ درصدی کاهش اسلامپ مشاهده شده است. به طور کلی می‌توان گفت که افزودن الیاف و نانوسیلیس



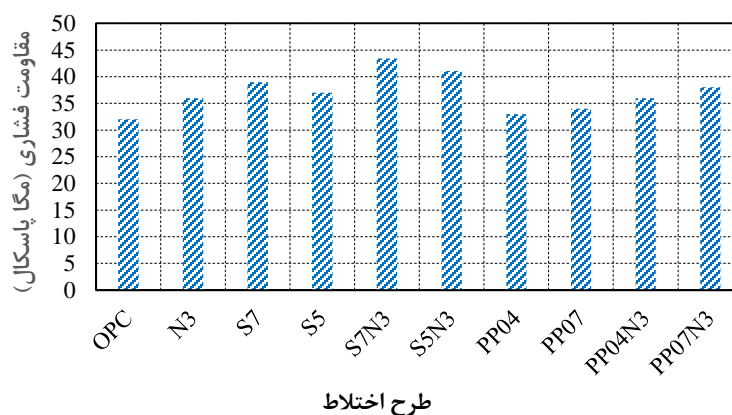
سبب کاهش روانی بتن می‌شود و الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر بیشتری در کاهش روانی داشته است.

جدول ۹: درصد کاهش اسلامپ نسبت به نمونه شاهد

Mix	-	Mix	-
OPC	-	S5N3	۷۵
N3	۱۶	PP04	۲۹
S7	۴۵	PP07	۳۷
S5	۳۳	PP04N3	۳۳
S7N3	۶۶	PP07N3	۵۰

۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

توانایی سازه در مقابل بارهای محوری فشاری (کاهش طول محوری) را مقاومت فشاری می‌گویند. مقاومت فشاری بتن، از مهم‌ترین ویژگی‌های این ماده محسوب می‌شود. مقدار این مقاومت پس از شروع گیرش بتن و با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند. در این تحقیق مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر طبق استاندارد ASTM C39 [۱۸] آزمایش شد. در این آزمایش نمونه‌ها بین فک‌های دستگاه مقاومت فشاری قرار می‌گیرد، مقدار این پارامتر برابر حداکثر تنشی است که نمونه مکعبی بتواند تحمل کند.



شکل ۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف در شکل ۵ آورده شده است. مقاومت فشاری بتن شاهد برابر ۳۲ مگاپاسکال است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزودن ۳ درصد نانوسیلیس به بتن (N3)، مقاومت فشاری بتن نسبت به نمونه بتن شاهد (OPC) ۴ مگاپاسکال افزایش یافته است. در نمونه‌های حاوی ۵ و ۷ درصد الیاف فولادی (S7، S5) به ترتیب مقاومت فشاری بتن به مقدار ۵ و ۷ مگاپاسکال افزایش یافته است. در نمونه‌های بتنی حاوی ۰/۴ و ۰/۷ درصد الیاف پلی‌پروپیلن (PP07، PP04) به ترتیب مقاومت فشاری بتن ۱ و ۲ مگاپاسکال افزایش یافته است. همانگونه که مشاهده می‌شود با اضافه کردن الیاف فولادی با درصدهای ۵ و ۷ و نانوسلیس کلئیدی با درصد (S5N3، S7N3) مقاومت فشاری بتن به ترتیب ۹/۱ و ۱۱/۴ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. نمونه‌های حاوی ۰/۴ و ۰/۷ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۳ درصد نانوسیلیس کلئیدی (PP07N3، PP04N3) به ترتیب دارای ۴ و ۶ مگاپاسکال مقاومت فشاری بیشتری نسبت به بتن شاهد هستند. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ی حاوی ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانوسیلیس کلئیدی (S7N3) است. در این نمونه نسبت به نمونه شاهد (OPC) ۳۶ درصد مقاومت فشاری افزایش یافته است. در بین نمونه‌های با الیاف ترکیبی، نمونه‌ی حاوی ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و



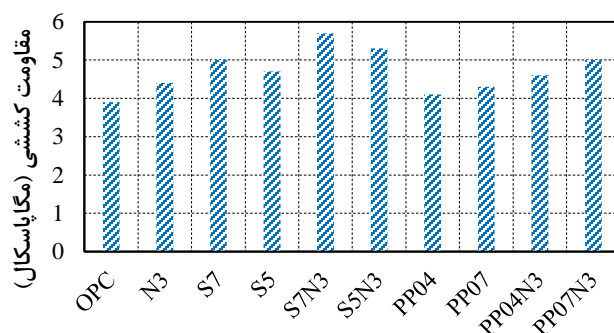
۳ درصد نانوسیلیس کلئیدی (PP04N3) با افزایش ۱۳ درصد مقاومت فشاری، کمترین میزان افزایش را داشته است. در بین کل نمونه‌ها، نمونه بتنی حاوی ۰/۴ درصد الیاف پلی پروپیلن (PP04) با افزایش ۳ درصدی کمترین افزایش مقاومت فشاری را دارد. بر اساس نتایج آزمایش الیاف پلی پروپیلن به تنهایی در افزایش مقاومت فشاری تأثیری کمی داشته است. علت افزایش مقاومت فشاری در اثر افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتنی را می‌توان بدین صورت بیان کرد که وجود الیاف سبب تأخیر در رشد ریزترک‌ها در بتن می‌شود که در نتیجه باعث افزایش مقاومت و کرنش تحت بار حداکثر خواهد شد. با اضافه کردن الیاف، آب انداختن بتن و خروج آب‌ها از بتن کم شده و سبب می‌شود که بتن در زمان بیشتری حالت خمیری خود را حفظ کند و سفت شدن بتن به تأخیر بی‌افتد. با گذشت زمان و پیشروی فرآیند هیدراتاسیون اثر الیاف مشخص می‌شود و رشد مقاومت در تمامی نمونه‌های بتن الیافی نسبت به بتن معمولی قابل مشاهده می‌باشد. افزودن نانوسیلیس به مخلوط سبب افزایش چگالی در نمونه‌ها شده که این امر کاهش تخلخل و بهبود استحکام پیوند بین سیمان و مصالح را در پی داشته و نیز باعث افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی می‌شود.

جدول ۱۰: درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد

Mix	-	Mix	-
OPC	-	S5N3	۲۸
N3	۱۳	PP04	۳
S7	۲۲	PP07	۶
S5	۱۶	PP04N3	۱۳
S7N3	۳۶	PP07N3	۱۹

۳-۳- آزمایش مقاومت کششی

اگر چه به طور معمول بتن به گونه‌ای ساخته نمی‌شود که تنش کششی مستقیم را تحمل کند، ولی دانستن مقاومت کششی بتن در حدس زدن باری که ترک‌ها در آن گسترش می‌یابند، با ارزش است. نبود ترک در حفظ تداوم سازه‌های بتنی و در اکثر موارد در جلوگیری از خوردگی میلگردهای فولادی مهم و قابل توجه است. مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده ۲۸ روزه در آب آهک مطابق استاندارد ASTM C496 [۱۹] صورت گرفت. در این روش، با اعمال نیروی فشاری قطری روی نمونه بتن استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر که بصورت افقی بین دو صفحه دستگاه آزمایش قرار گرفته، بار بطور مداوم، یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی با سرعت ثابتی در حدود ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلو پاسکال بر دقیقه تا هنگام گسیختگی بتن اعمال می‌شود. نمونه به گونه‌ای در بین صفحات دستگاه جک بتن شکن قرار می‌گیرد که محور آن افقی باشد و بعد از آن بار افزایش پیدا می‌کند تا گسیختگی به صورت دو نیم شدن در صفحه شامل قطر قائم نمونه به وجود آید.



طرح اختلاط

شکل ۶: نتایج آزمایش مقاومت کششی



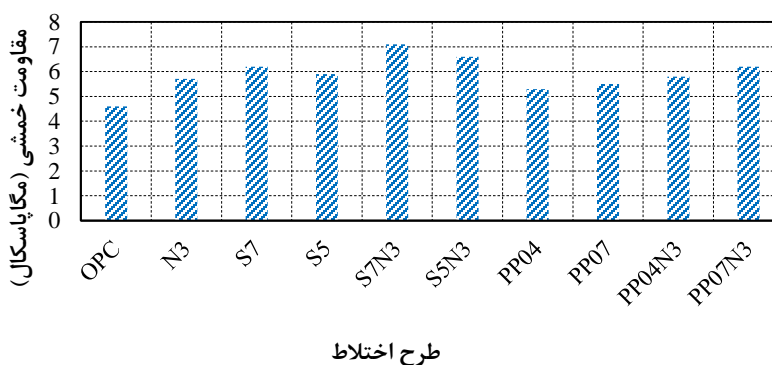
نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. مقاومت کششی نمونه شاهد برابر ۳/۹ مگاپاسکال است. مطابق نتایج، افزودن ۳ درصد نانوسیلیس (N3) به بتن، مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد ۰/۵ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی با درصدهای ۵ و ۷ (S7، S5)، به ترتیب مقاومت کششی بتن ۰/۸ و ۱/۱ مگاپاسکال نسبت به بتن شاهد بیشتر است. افزایش الیاف پلی‌پروپیلن با درصدهای ۰/۴ و ۰/۷ (PP07، PP04) به ترتیب مقاومت کششی بتن را ۰/۲ و ۰/۴ مگاپاسکال نسبت به بتن شاهد افزایش می‌دهند. همچنین در نمونه‌های حاوی ۵ و ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانوسیلیس کلئیدی (S7N3، S5N3) مقاومت کششی بتن به ترتیب ۱/۴ و ۱/۸ مگاپاسکال نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. در نمونه‌های حاوی ۰/۴ و ۰/۷ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (PP07N3، PP04N3)، به ترتیب مقاومت کششی بتن ۰/۷ و ۱/۱ مگاپاسکال نسبت به بتن شاهد بیشتر است. بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه بتنی حاوی ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانوسیلیس (S7N3) می‌باشد. در این نمونه مقاومت کششی به اندازه ۴۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. و کمترین مقاومت کششی مربوط به نمونه شاهد می‌باشد. نتایج فوق بیانگر این مسئله است که استفاده از الیاف فولادی در مقایسه با الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی بتن را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. به علت وجود شکل موج و قلاب انتهایی در الیاف فولادی، گیرداری مناسبی بین بتن و الیاف فولادی تحت بارهای کششی به وجود می‌آید. به علت شکل ظاهری و مقاومت کششی خوب الیاف فولادی از گسترش ترک‌های بزرگ بعد از اولین ترک خوردگی در محل ترک اولیه جلوگیری کرده و سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ی بتنی می‌شود. الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به الیاف فولادی از طول کمتر و مقاومت کششی کمتری برخوردار هستند و در نتیجه از منتشر شدن ترک‌های کوچک در ابتدای بارگذاری جلوگیری می‌کند و در عمل بعد از ترک خوردگی نمونه بتنی، الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر زیادی بر افزایش مقاومت کششی ندارند. نتایج بیانگر این است که ذرات نانوسیلیس سبب بهبود مقاومت کششی نمونه‌ها شده و بتن مقاومت بالایی را تجربه کند.

جدول ۱۱: درصد افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد

Mix	-	Mix	-
OPC	-	S5N3	۳۵
N3	۱۲	PP04	۵
S7	۲۸	PP07	۱۰
S5	۲۰	PP04N3	۱۷
S7N3	۴۶	PP07N3	۲۸

۳-۴- آزمایش مقاومت خمشی

مقاومت خمشی طبق استاندارد ASTM C78 [۲۰] صورت گرفت. نمونه‌های آزمایش مقاومت خمشی در ابعاد $100 \times 100 \times 500$ میلیمتر ساخته شدند و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، آزمایش مقاومت خمشی تحت بار ناشی از خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند.



شکل ۷: نتایج آزمایش مقاومت خمشی



نتایج این آزمایش در شکل ۷ آورده شده است. میزان مقاومت خمشی برای نمونه شاهد برابر ۴/۶ مگاپاسکال است. با افزودن ۳ درصد نانوسیلیس (N3) به بتن، ۱/۱ مگاپاسکال مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. در نمونه‌های بتنی حاوی ۵ و ۷ درصد الیاف فولادی (S7, S5) به ترتیب مقاومت کششی بتن ۱/۳ و ۱/۶ مگاپاسکال نسبت به بتن شاهد افزایش یافته است. همچنین نمونه‌های بتنی حاوی ۰/۴ و ۰/۷ درصد الیاف پلی‌پروپیلن (PP07, PP04) به ترتیب دارای مقاومت خمشی بیشتر به میزان ۰/۷ و ۰/۹ مگاپاسکال هستند. بکارگیری همزمان ۵ و ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (S7N3, S5N3)، مقاومت خمشی بتن را به ترتیب به میزان ۲ و ۲/۵ مگاپاسکال نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد. در نمونه‌های بتنی حاوی ۰/۴ و ۰/۷ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۳ درصد نانوسیلیس کلئیدی (PP07N3, PP04N3) نیز مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است که مقدار آن به ترتیب برابر ۱/۲ و ۱/۴ مگاپاسکال است. بنابراین بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه بتنی حاوی ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (S7N3) است. در این نمونه مقاومت خمشی به اندازه ۵۴ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. از طرفی کمترین افزایش مقاومت خمشی با افزایش ۲۶ درصدی مربوط به نمونه بتنی حاوی ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (PP04N3) می‌باشد. نمونه شاهد دارای کمتری میزان مقاومت خمشی است. همانگونه قابل مشاهده است در نمونه‌ی شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن پس از به وجود آمدن اولین ترک در نمونه، نمونه‌ها دچار شکست شدند و علت این اتفاق را می‌توان در نبود مکانیزمی برای کنترل بازشدگی ترک پس از به وجود آمدن اولین ترک دانست. بکارگیری الیاف فولادی چقرمگی خمشی بتن را به صورت چشم‌گیری افزایش می‌دهد ترک ایجاد شده در اثر بارگذاری خمشی در نمونه‌های مسلح به الیاف فولادی به‌گونه‌ای است که با چشم غیرمسلح به سختی قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱۲: درصد افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد

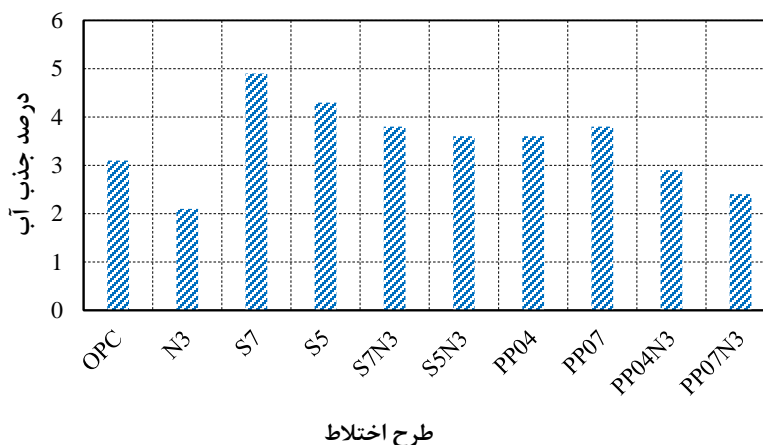
Mix	-	Mix	-
OPC	-	S5N3	۴۳
N3	۲۴	PP04	۱۵
S7	۳۵	PP07	۲۰
S5	۲۸	PP04N3	۲۶
S7N3	۵۴	PP07N3	۳۵

۳-۵- آزمایش درصد جذب آب بتن

جذب آب یکی از ویژگی‌های بتن بوده و نشان دهنده ویژگی‌های ریز ساختار آن از لحاظ فضای خالی و پیوستگی آن‌ها با هم است. آزمایش درصد جذب آب در بتن بر اساس استاندارد [ASTM C642] [۲۱] انجام می‌شود. در این پژوهش نمونه‌های بتنی ساخته شده جهت این منظور، پس از عمل آوری ۲۸ روزه با خروج از حوضچه آماده انجام آزمایش شده‌اند. ابتدا سطح نمونه‌ها به صورت کامل خشک شده و وزن آنها محاسبه شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت در آون با 5 ± 105 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و پس از در آوردن از گرم خانه و خنک شدن در آب تمیز قرار داده شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش و تفاضل وزن‌های خشک و مرطوب، درصد جذب آب محاسبه شد. شکل ۸ نمونه‌های خشک شده در گرمخانه را نشان می‌دهد.



شکل ۸: نمونه‌های خشک شده در گرمخانه



شکل ۹: نتایج آزمایش درصد جذب آب در بتن

در شکل ۹ نتایج میزان جذب آب در نمونه‌های مختلف آورده شده است. کیفیت بتن توسط CEB [۲۲] به سه دسته ضعیف، متوسط و خوب که به ترتیب بر اساس جذب آب ۵ درصد و بالاتر، بین ۳ تا ۵ درصد و کمتر از ۳ درصد هستند تقسیم می‌شوند. طبق تعاریف گفته شده در رده بندی CEB اکثر نمونه‌ها در محدوده متوسط طبقه بندی می‌شوند. درصد جذب آب نمونه شاهد برابر ۳/۱ است. داده‌های نمودار شکل ۹ نشان دهنده این می‌باشد که نمونه‌ی حاوی ۷ درصد الیاف فولادی (S7) بیشترین درصد جذب آب در بتن را دارد. نمونه بتنی حاوی ۳ درصد نانوسیلیس کلئیدی (N3) کمترین درصد جذب آب در بتن را دارد. در نمونه بتنی حاوی ۳ درصد نانوسیلیس کلئیدی (N3) نسبت به نمونه شاهد ۳۲ درصد کاهش درصد جذب آب مشاهده شده است. از این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش درصد الیاف فولادی و پلی پروپیلن به بتن، درصد جذب آب افزایش می‌یابد، و با افزودن نانوسیلیس کلئیدی به بتن درصد جذب آب بتن کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از فعالیت بالای پوزولانی نانوسیلیس و ایجاد ژل H-S-C است که سبب حذف خلل و فرج بتن و همچنین حفرات ریز موجود در ساختار ژل سیلیکاتی می‌شود.

جدول ۱۳: درصد کاهش یا افزایش درصد جذب نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد

Mix	-	Mix	-
OPC	-	S5N3	۱۶
N3	۷۷	PP04	۱۰
S7	۴۸	PP07	۱۳
S5	۷۱	PP04N3	-۱۹
S7N3	۵۵	PP07N3	-۲۳



۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق خواص مکانیکی بتن با الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس کلئیدی با ساختن نمونه‌های استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفت. از این پژوهش به طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که: با افزایش مقدار مصرف الیاف فولادی و پلی پروپیلن، مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش می‌یابد و اسلامپ و درصد جذب آب بتن کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار مصرف نانوسیلیس کلئیدی، مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش می‌یابد و اسلامپ و درصد جذب آب بتن کاهش می‌یابد. نمونه بتنی S7N3 (۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانوسیلیس) بیشترین مقاومت خمشی را دارند. علاوه بر آن با توجه به نتایج بدست آمده در نمونه‌های ۲۸ روزه بیشترین افزایش مقاومت فشاری برای S7N3 (۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانوسیلیس) می‌باشد. نمونه‌های استوانه‌ای دارای ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانوسیلیس (S7N3) بیشترین افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه شاهد دارا می‌باشد. پس از آن نمونه حاوی ۵ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانو سیلیس بیشترین افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف را دارا می‌باشد. همچنین اضافه کردن ۰/۴ درصد و ۰/۷ درصد الیاف پلی پروپیلن به بتن، تاثیر چندانی در افزایش مقاومت کششی بتن ندارند. بتن بدون الیاف رفتاری ترد و شکننده دارد این در حالی است که بتن مسلح به الیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن، رفتار شکنندگی بتن را به دلیل جلوگیری از انتشار ترک و دوزندگی ترک‌ها، به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. بهترین طرح اختلاط مربوط به نمونه‌ی ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (S7N3) می‌باشد، که مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی به ترتیب ۵۴/۳۴، ۳۵/۶۲ و ۲۶/۳۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. کمترین درصد جذب آب در بتن با مقدار ۲/۱ درصد مربوط به بتن حاوی ۳ درصد نانو سیلیس کلئیدی (N3) می‌باشد. در نمونه حاوی ۳ درصد نانو سیلیس (N3) نسبت به نمونه شاهد ۳۲ درصد جذب آب کاهش یافته است.

۵- مراجع

- 1- Afrouhsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and building materials*, 94, 73-82.
- 2- Beigi, M. H., Berenjian, J., Omran, O. L., Nik, A. S., & Nikbin, I. M. (2013). An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete. *Materials & Design*, 50, 1019-1029.
- 3- Felekoğlu, B., Türkel, S., & Altuntaş, Y. (2007). Effects of steel fiber reinforcement on surface wear resistance of self-compacting repair mortars. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 391-396.
- 4- Hanehara, S., & Ichikawa, M. (2001). Nanotechnology of cement and concrete. *Taiheiyo Cement Kenkyu Hokoku (Journal of the Taiheiyo Cement Corporation) Japan*, (141), 47-58.
- 5- Bahari, A., Sadeghi Nik, A., Roodbari, M., Taghavi, K., & Mirshafiei, S. E. (2012). SYNTHESIS AND STRENGTH STUDY OF CEMENT MORTARS CONTAINING SiC NANO PARTICLES. *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB)*, 7(4).
- 6- El-Dieb, A. S. (2009). Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers. *Materials & Design*, 30(10), 4286-4292.
- 7- Sun, Z., & Xu, Q. (2009). Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 527(1-2), 198-204.
- 8- Chen, B., & Liu, J. (2004). Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1065-1069.
- 9- Najaf, E., Orouji, M., & Zahrai, S. M. (2022). Improving nonlinear behavior and tensile and compressive strengths of sustainable lightweight concrete using waste glass powder, nanosilica, and recycled polypropylene fiber. *Nonlinear Engineering*, 11(1), 58-70.



- 10- Etemadi, M., Pouraghajan, M., & Gharavi, H. (2020). Investigating the effect of rubber powder and nano silica on the durability and strength characteristics of geopolymeric concretes. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 4(4), 243-252.
- 11- Aisheh, Y. I. A., Atrushi, D. S., Akeed, M. H., Qaidi, S., & Tayeh, B. A. (2022). Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01234.
- 12- QURESH, L. A., et al. Effect of mixing steel fibers and silica fume on properties of high strength concrete. In: *Proceedings. Int Conference Concrete: Constructions sustainable option*, Dundee. UK. p. 173-185. 2008.
- 13- Standard Specification for Portland Cement, 2016, ASTM International, ASTM C150, American Society for Testing and Materials (ASTM).
- 14- Bindiganavile, V., & Banthia, N. (2001). Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading—Part 2: Flexural toughness. *Materials Journal*, 98(1), 17-24.
- 15- Altun, F., Haktanir, T., & Ari, K. (2007). Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams. *Construction and building materials*, 21(3), 654-661.
- 16- A. Nazari, S. Riahi, (2011). Abrasion resistance of concrete containing SiO₂ and Al₂O₃, nanoparticles in different curing media, *Energy Build.* 43 (10) 2939– 2946
- 17- ASTM C 143/C 143M, 2002, Standard test method for slump of hydraulic cement concrete, in: *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- 18- ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- 19- ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- 20- ASTM C78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
- 21- ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete., Philadelphia, Pa: *Annual Book of ASTM Standards*, (2009).
- 22- CEB-FIP,(1989)," Diagnosis and assessment of concrete structures – state of the art report", *CEB Bull* 192, 83–5.