

Laboratory investigation of the effect of recycled polyethylene terephthalate fibers on the mechanical properties of self-compacting concrete

Mahbobeh Mirzaie Aliabadi ¹, Amir Hossein Derakhshan Nezhad ^{2*}

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, iran

2- Master's student in civil-structural engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, iran

ABSTRACT

Self-compacting concrete is concrete that, due to its fluidity and fluidity, can fill all corners of the mold and rebars only under the influence of gravity and without the need for any mechanical pressure, without causing separation or shedding water, and it compacts automatically. Self-compacting concrete has been increasingly targeted by engineers and researchers in the construction industry. Plastic bottles are one of the major parts of solid waste. One of the plastic recycling materials that are prepared based on plastic bottles are recycled polyethylene terephthalate fibers. The main goal of this research is to use polyethylene terephthalate fibers in the self-compacting concrete mixing plan to increase the tensile strength and reduce the permeability of the samples. In this way, the fibers are cut with a length of 3 to 4 cm and used in self-compacting concrete with different percentages (0, 0.5, 1, 1.5, 2 percent compared to the weight of cement) as a cheap and accessible additive. became. Slump flow tests, V funnel, L box, J ring, compressive strength, tensile strength, ultrasonic pulse speed, Schmidt hammer and permeability tests were tested for the fresh and hardened properties of self-compacting concrete with fibers. The results of the experiments showed that with the increase in the percentage of polyethylene terephthalate fibers in self-compacting concrete, the tensile strength during 7 and 28 days of curing in the range of 14.35-58.35 and 21.9-72.57 percent increased compared to self-compacting concrete without fibers. The compressive strength was in the range of 3.02-12.64 and 3.97-12.88 percent of the strength reduction compared to self-compacting concrete without fibers, and also the permeability test in 72 hours was in the range of 8.13-47.67 percent of permeability compared to concrete the self-density without fibers decreased.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 December 2023

Revise Date: 14 February 2024

Accept Date: 14 March 2024

Keywords:

Self-compacting concrete
polyethylene terephthalate
fibers
compressive strength
tensile strength
ultrasonic pulse speed Schmidt
hammer
permeability test

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.428815.3293>

*Corresponding author: Mahbobeh Mirzaie Aliabadi
Email address: mirzaie@bkatu.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف بازیافتی پلی اتیلن ترفتالات بر خواص مکانیکی بتن خود تراکم

محبوبه میرزائی علی آبادی^{*}، امیرحسین درخشان نژاد^۲

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران

چکیده

بتن خودتراکم بتنی است که به دلیل قابلیت جریان پذیری، روانی زیاد می‌تواند تنها تحت تأثیر نیروی ثقل و بدون نیاز به هیچ‌گونه فشار مکانیکی تمامی زوایای قالب و میلگردها را پر کند، بدون آنکه جداشدگی یا آب انداختن ایجاد گردد و به صورت خودبه‌خود متراکم می‌شود. بتن خود تراکم به طور فزاینده‌ای در صنعت ساختمان مورد هدف مهندسان و پژوهشگران قرار گرفته است. بطری‌های پلاستیکی یکی از بخش‌های عمده زباله‌های جامد هستند. یکی از مواد بازیافت پلاستیکی که بر پایه بطری‌های پلاستیکی تهیه می‌شوند، الیاف بازیافتی پلی‌اتیلن ترفتالات هستند. هدف اصلی این پژوهش، استفاده از الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات در طرح اختلاط بتن خود تراکم جهت افزایش مقاومت کششی و کاهش نفوذپذیری آزمونه‌ها است. بدین ترتیب که الیاف‌ها با طول ۳ تا ۴ سانتی‌متر برش داده و در بتن خودتراکم با درصد‌های مختلف (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ درصد نسبت به وزن سیمان) به‌عنوان یک ماده افزودنی، ارزان و قابل دسترس استفاده شد. برای خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم با الیاف آزمایش‌های جریان اسلامپ، قیف V، جعبه L، حلقه J، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سرعت پالس آلتراسونیک، چکش اشمیت و آزمایش نفوذپذیری مورد آزمایش و انجام قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش درصد الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات در بتن خودتراکم مقاومت کششی طی عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در محدوده ۱۴/۳۷ - ۵۸/۳۵ و ۲۱/۰۹ - ۷۲/۵۷ درصد افزایش مقاومت نسبت به بتن خودتراکم بدون الیاف شد، مقاومت فشاری در محدوده ۳/۰۲ - ۱۲/۶۴ و ۳/۹۷ - ۱۲/۸۸ درصد کاهش مقاومت نسبت به بتن خودتراکم بدون الیاف شد و همچنین آزمایش نفوذپذیری در مدت ۷۲ ساعت در محدوده ۸/۱۳ - ۴۷/۶۷ درصد نفوذپذیری نسبت به بتن خودتراکم بدون الیاف کاهش یافت.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سرعت پالس آلتراسونیک، چکش اشمیت، آزمایش نفوذپذیری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2024.428815.3293	۱۴۰۲/۰۸/۳۰	۱۴۰۲/۱۲/۲۴	۱۴۰۲/۱۲/۲۴	۱۴۰۲/۱۱/۲۵	۱۴۰۲/۰۹/۱۴
محبوبه میرزائی علی آبادی mirzaie@bkatu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

بتن خودتراکم به دلیل مزایایی مانند در دسترس بودن مصالح، روانی و کارایی به طور گسترده در صنعت سازه استفاده می‌شود [۱]. اهمیت بتن خودتراکم به دلیل دوام بالا، هزینه کم در اجرا نسبت به بتن معمولی، مقاومت، ویسکوزیته و پایداری آن است که این نوع بتن، یکی از جدیدترین انواع بتن است [۲-۴]. بتن خودتراکم دارای معایبی از جمله رفتار شکننده، مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی کم است [۵-۷]. با پیشرفت صنعت، تکنولوژی و رشد جمعیت انسانی تولید زباله‌های جامد از جمله پلاستیک‌ها در حال تسریع است. امروزه پلاستیک‌ها تقریباً در هر جنبه‌ای از زندگی ما نقش مهمی ایفا می‌کنند [۸-۱۰]. اما در حال حاضر، دفع پلاستیک‌ها استفاده شده به دلیل عدم تجزیه پذیری آن‌ها تبدیل به یک چالش شده است. امروزه یکی از نگرانی‌های مهم در محیط‌زیست، دفع زباله‌های جامد هستند. بطری‌های پلاستیکی به عنوان یکی از منابع آلودگی در محیط زیست به شمار می‌آیند [۱۱-۱۳]. ۸۰ درصد از بطری‌ها به محل دفن زباله منتقل، ۸ درصد از آن‌ها سوزانده و تنها ۷ درصد از آن‌ها سالانه مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرند که خطر جدی برای طبیعت و محیط زیست هستند. کاربرد پلاستیک‌های بازیافتی در بتن به دلیل خواص مکانیکی، چگالی کم، مقاومت شیمیایی، مدول الاستیسیته بالا، خواص کششی و عایق حرارتی در مقایسه با سایر مواد بازیافتی منجر به بهبود خواص مکانیکی بتن می‌شود [۱۴]. یکی از مواد پلاستیکی بازیافتی مورد استفاده در صنعت و بتن، الیاف پلی اتیلن ترفتالات^۱ (PTF) است که از بطری‌های پلاستیکی تهیه می‌شوند [۱۵]. پلی اتیلن ترفتالات جزء اصلی و رایج از نوع پلاستیک بطری‌های نوشابه، آب معدنی و غیره که پس از استفاده دور ریخته می‌شوند، هستند. پلی اتیلن ترفتالات به رنگ سفید، سخت و سبک است. یکی از روش‌های استفاده از پلی اتیلن ترفتالات به عنوان الیاف باریک در ساخت و ساز به عنوان یک ماده افزودنی در بتن است. بتن خودتراکم الیافی که نسبت به بتن خودتراکم دارای رفتار شکل‌پذیرتر با کنترل رشد و مقاومت کششی می‌باشد. ویژگی‌های الیاف پلی اتیلن ترفتالات عبارتند از: دوام بالا، مقاومت، استقامت شیمیایی، حرارتی، مقاومت کششی بالا، مقاوم در برابر آسیب و ضربه است [۱۶]. استفاده از الیاف پلی اتیلن ترفتالات در بتن خودتراکم می‌تواند برای بهبود شکل‌پذیری، افزایش دوام، چقرمگی مفید و کارایی بهتری را در بتن ارائه می‌دهد [۱۷]. یکی دیگر از ویژگی‌های مهم الیاف در بتن این است که بتن دارای خواص ضد حریق بوده ولی بیشترین نگرانی از سازه‌های بتن‌آرمه در زمان آتش سوزی مربوط به میلگردها است. زیرا یکی از پیشنهادها به منظور کاهش خطرات آتش سوزی، استفاده از مصالح جایگزین در طرح مخلوط بتن خودتراکم نظیر الیاف پلی اتیلن ترفتالات است [۱۸]. پژوهش‌های مختلفی در رابطه با استفاده از الیاف پلی اتیلن ترفتالات در بتن صورت گرفته است که مواردی از آن در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. الحدیثی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۲]، به بررسی رفتار ساختاری تیرهای بتنی سبک خودتراکم مسلح با استفاده از پلی‌استایرن منبسط شده به عنوان سنگدانه درشت و حاوی الیاف پلی اتیلن ترفتالات پرداختند. این مطالعه، برای تولید تیرهای بتنی از نوع بتن خودتراکم (SCC^۲) حاوی دانه‌ها پلی‌استایرن منبسط شده (EP^۳) به عنوان سنگدانه درشت و الیاف پلی اتیلن ترفتالات (PET) تولید شده از برش تسمه‌های بسته‌بندی دور ریخته شده انجام شد. نتایج نشان داد که امکان تولید بتن سبک با استفاده از ضایعات (EP) و (PTF) وجود دارد. تیرهای بتن خودتراکم سبک وزن مسلح، نسبت به تیرهای بتن مسلح ساخته شده از بتن با وزن معمولی می‌توانند تحت بارهای خمشی تحمل کنند. عسکر و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۴]، به بررسی استفاده از پلی اتیلن ترفتالات در بتن پرداختند. این تحقیق مطالعاتی را نشان داد که از پلی اتیلن ترفتالات (PET) در بتن به عنوان نسبت حجمی یا جایگزینی سنگدانه‌های بتن استفاده کردند. استفاده از (PET) در صنایع بتن ممکن است آلودگی‌های زیست محیطی مانند انتشار دی اکسید کربن و مشکلات دفع زباله‌های پلاستیکی را کاهش دهد. ویدودو و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۷]، به بررسی تاثیر بتن خود تراکم با استفاده از خاکستر بادی و الیاف پلی اتیلن ترفتالات پرداختند. هدف این مطالعه استفاده از خاکستر بادی و الیاف (PET) ضایعاتی برای تولید بتن خودتراکم پایدار با مقاومت مکانیکی بیشتر بود. خاکستر بادی به عنوان یک ماده سیمان تکمیلی و الیاف (PET) به عنوان تقویت کننده، بهبود استحکام خمشی و دستیابی به مقاومت فشاری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که وجود الیاف (PET) در مخلوط (SCC) باعث کاهش جریان‌پذیری می‌شود.

¹ Polyethylene terephthalate fibers

² Self-consolidating concrete

³ Expanded polystyrene

افزودن الیاف (PET) باعث کاهش مقاومت فشاری شد، در حالی که کاهش مقاومت فشاری بتن خودتراکم با الیاف (PET) بدون خاکستر بادی ناچیز شد. افزودن الیاف (PET) به مخلوط (SCC) می‌تواند استحکام خمشی را افزایش دهد. آیوش و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۱۶]، به بررسی و ارزیابی خواص مکانیکی و کارایی بتن مسلح با الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات پرداختند. در این تحقیق از الیاف پلاستیکی جدا شده از بطری‌های زباله پلاستیکی برای تقویت بتن معمولی استفاده شد. مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ساخته شده از بتن با الیاف پلی‌اتیلن- ترفتالات طبق استاندارد در آزمایشگاه تعیین شدند. رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت استوانه‌ای برای بتن مسلح معمولی و الیاف پلاستیکی تعیین شد و آن‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. کتابداری و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۷]، به بررسی خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی فنرهای فولادی بازیافتی پرداختند. در این مقاله اثر افزودن فنرهای فولادی کم کربن گالوانیزه با فنرهای با قطرهای ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر، با درصدهای ۰/۲ و ۰/۴ به بتن خودتراکم اضافه شد و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. سپس آزمون‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از فنر با قطر ۱۲ میلی‌متر مقاومت فشاری، کششی و خمشی را افزایش می‌دهد. قلپکی و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۸]، به بررسی عملکرد بتن حاوی فنرهای بازیافتی در شرایط پس از آتش سوزی پرداختند. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی عملکرد بتن حاوی فنرهای بازیافتی با کسر حجمی مختلف ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بود که با استفاده از آزمون‌های مقاومت کششی و فشاری مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی با افزودن درصد فنرهای ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد بهبود یافت.

هدف از این پژوهش، افزایش مقاومت کششی و کاهش نفوذپذیری آزمون‌های بتن خودتراکم با الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات است. جنبه نوآوری این طرح استفاده بهینه از منابع ضایعاتی و به حداقل رساندن ضایعات است. سیمان نسبت به الیاف خاصیت کششی کمتری دارد بنابراین؛ در طرح مخلوط این پژوهش به دلیل اینکه بتوان میزان مصرف سیمان را کاهش و میزان مقاومت کششی بتن خودتراکم را نیز افزایش داد، برای استفاده، از الیاف به میزان درصد وزنی سیمان در بتن خودتراکم افزوده شد و از ژل میکروسیلیس جهت افزایش مقاومت و تقویت ناحیه انتقال بتن (فاز سوم) در طرح اختلاط استفاده شد. تفاوت این پژوهش با بقیه طرح‌ها این است که آزمایش نفوذپذیری برای نمونه‌های مکعبی بتن خودتراکم با و بدون الیاف مورد ارزیابی قرار گرفت و آزمایش‌های غیرمخرب از قبیل سرعت پالس آلتراسونیک و چکش اشمیت بر روی نمونه‌ها انجام شد. الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات به عنوان یک سیستم توسعه پایدار در طرح اختلاط بتن خودتراکم استفاده گردید. نتایج نشان داد که با افزایش درصد الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات در بتن خودتراکم مقاومت فشاری، مقاومت کششی با چکش اشمیت، آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک، نفوذپذیری کاهش یافتند و مقاومت کششی افزایش یافت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

در تمام ۵ طرح مخلوط‌ها از سیمان پرتلند تیپ ۵ کارخانه سیمان بهبهان طبق استاندارد ASTM C150 [۱۹] استفاده شد (مطابق جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات سیمان پرتلند تیپ ۵ [۸]

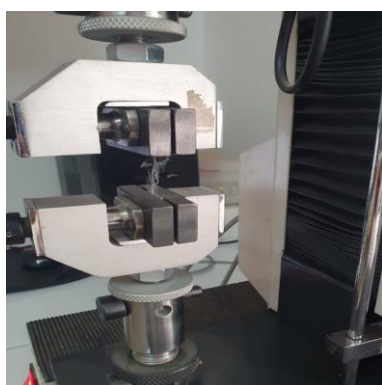
C ₄ A _F	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	LOI	K ₂ O	O ₂ Na	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	IR	تجزیه و تحلیل شیمیایی درصد
۱۶/۴۲	۲/۵۲	۱۵/۲۳	۶۱/۱۲	۰/۱۹	۰/۷۷	۰/۲۶	۰/۵۰	۲/۲۸	۶۴/۶۴	۵/۴۰	۴/۴۰	۲۱/۳۸	۰/۱۸	

۲-۱-۲- الیاف پلی اتیلن ترفتالات

الیاف پلی اتیلن ترفتالات از بازیافت بطری‌های پلاستیکی (PET) تهیه می‌شوند. ابتدا محصولاتی از جمله ترفتالیک اسید^۴ خالص و اتیلن گلیکول^۵ که از مشتقات نفت خام هستند، با یکدیگر در زمان و حرارت مشخص ترکیب می‌شوند تا اولین محصول به نام منومر بیس هیدروکسید اتیل ترفتالات تولید شود که از جمله پلیمرهای با وزن مولکولی پایین است. منومر بیس هیدروکسید اتیل ترفتالات با اتیلن گلیکول ترکیب شده و به روش تقطیر، (PET) تشکیل می‌شود. (PET) در مرحله اول به صورت یک مایع ویسکوز مذاب است که با فشار خارج شده و توسط آب خنک شده و به فرم مواد بی‌شکل شیشه‌ای در می‌آید. (PET) در مرحله دوم با وزن مولکولی بالا توسط پلیمریزاسیون به صورت جامد در دمای پایین تولید می‌شود. در تهیه (PET) رسیدن به وزن مولکولی بالا برای ایجاد خصوصیات مکانیکی، سختی و مقاومت خزشی ضروری است تا انعطاف کافی در برابر برش را داشته باشد. از این رو، مواد شیمیایی از جمله نمک‌های از تیتانیوم، ژرمنیوم، کبالت، منگنز، منیزیم و روی هم گاهی استفاده می‌شود تا سختی لازم را پیدا کند، سپس با دمای بالاتر از ۷۲ سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود تا از حالت سخت شیشه‌ای به فرم الاستیکی تغییر حالت پیدا کند. (PET) سریعاً سرد می‌شود تا در صورت کشش خصوصیت استحکام را داشته باشد. تولید الیاف پلی اتیلن ترفتالات را می‌توان با روش‌های مختلفی نظیر: قالب گیری تزریقی، اکستروژن، قالب گیری دمشی و ترموفرمینگ و پردازش تولید نمود. نمره نخ الیاف‌ها دارای ظرافت‌های متفاوت هستند. این نمره نخ‌ها برحسب دنیتر (den) حساب می‌گردند. دنیتر واحد اندازه گیری نمره یا ظرافت نخ است. در واقع معیاری برای سنجش ضخامت و نازکی نخ می‌باشد. الیاف پلی اتیلن ترفتالات دارای ۳ نوع دنیتر است. انواع الیاف‌ها با دنیترهای مختلف عبارتند از: دنیتر ۶، دنیتر ۱۵ و دنیتر ۲۵. در واقع نمره نخ نسبت جرم به طول نخ است. هر چه جرم نخ‌ها بیشتر باشد دنیتر و ضخامت نخ نیز بیشتر و در نتیجه ظرافت آن کمتر می‌شود. برای مثال اگر ۹۰۰۰ متر از نخ ۲۵ گرم وزن داشته باشد، نمره آن ۲۵ دنیتر خواهد بود. پلی اتیلن ترفتالات (PET) یک رزین پلی استر ترموپلاستیک با فرمول شیمیایی $(C_{10}H_8O_4)_n$ است. در این طرح از الیاف پلی اتیلن ترفتالات با دنیتر ۲۵ استفاده و الیاف‌ها با طول ۳ تا ۴ سانتی‌متر برش داده و به مقدار وزنی متفاوت در بتن خودتراکم استفاده شد. (مطابق جدول ۲ و شکل ۱).

جدول ۲: مشخصات الیاف پلی اتیلن ترفتالات [۸]

ویژگی - ها	نمره نخ (den)	مدول الاستیسیته (GPa)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	جذب آب (۲۴) ساعت (٪)	مقاومت کششی (GPa)	جمع شدگی	ازدیاد طول در شکست	ازدیاد طول در تسلیم	دمای ذوب (C°)	طول (سانتی‌متر)	دمای خمش حرارتی (C°)
مقدار	۲۵	۴	۰/۳۷	۰/۱۵	۳/۸	٪ ۱/۵	٪ ۵۶	٪ ۲/۷	۲۵۴	۳ - ۴	۷۶



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۱: (الف) الیاف پلی اتیلن ترفتالات (ب) طول و برش الیاف پلی اتیلن ترفتالات (پ) آزمایش کششی الیاف جهت تعیین مقاومت کششی

^۴ $C_8H_6O_4$

^۵ $C_2H_6O_2$

۲-۱-۳- سنگدانه‌ها

سنگدانه درشت (شن) با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و ماسه با حداکثر ۴/۷۵ میلی‌متر در این طرح مخلوط با استاندارد ASTM C33 [۲۰] استفاده شد. شن و ماسه مورد استفاده در این طرح اختلاط از رامهرمز خوزستان تهیه شد. با استفاده از الک‌های مناسب به دانه‌بندی ماسه و شن (نخودی، بادامی) پرداخته شد. برای شن نخودی رد شده از الک با شماره $\frac{3}{8}$ ، شن بادامی رد شده از الک شماره $\frac{1}{4}$ ، ماسه رد شده از الک شماره ۸ استفاده گردید (مطابق جدول ۳).

جدول ۳: مشخصات سنگدانه‌ها

ویژگی‌ها	درصد جذب آب ماسه	درصد جذب آب شن نخودی	درصد جذب آب شن بادامی
مقدار (%)	۲/۲	۰/۸۰	۰/۹۰

۲-۱-۴- فوق روان کننده و ژل میکروسیلیس

در این پژوهش، برای رسیدن به خواص مکانیکی بتن خودتراکم، از SUPER PLAST PC5000 که بر پایه پلی کربوکسیلات اتر به عنوان یک نوع آب کاهندگی و افزاینده بسیار قوی بتن است، استفاده شد. همچنین برای رسیدن به خواص رئولوژیک در حالت خمیری و بهبود دهنده کیفیت بتن خودتراکم، از ژل میکروسیلیس که بر پایه دوده سیلیسی و کاهنده قوی آب بتن می‌باشد، استفاده شد که اضافه کردن فوق روان کننده و ژل میکروسیلیس به بتن خودتراکم مطابق با استاندارد ASTM C 494 [۲۱] است. استفاده از ژل میکروسیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری بتن شده و امکان سهولت بتن ریزی با افزایش اسلامپ بتن و کارایی بالا میسر می‌گردد، همچنین ژل میکروسیلیس می‌تواند ناحیه انتقال را تقویت و بر مقاومت نهایی بتن تاثیر گذار باشد (مطابق جدول ۴).

جدول ۴: مشخصات فنی فوق روان کننده و سوپر ژل میکروسیلیس

ویژگی‌ها	حالت فیزیکی	جرم مخصوص (کیلوگرم بر لیتر)	PH	رنگ
فوق روان کننده SUPER PLAST PC5000				
مشخصات	مایع	۱/۱	۶/۲	زرد
ژل میکروسیلیس				
مشخصات	مایع غلیظ	۱/۳۵	۹	خاکستری

۲-۱-۵- آب

آب مورد استفاده در طرح اختلاط بتن خودتراکم، آب شرب است. جهت تولید و عمل آوری نمونه‌ها از آب شرب استفاده شد که افزودن آب در بتن منطبق بر الزامات ASTM C 94 [۲۲] است (مطابق جدول ۵).

جدول ۵: ویژگی آب شرب

ویژگی‌ها	دما (سانتی‌گراد)	pH	غلظت یون کلرید
مقدار	۲۰	۶	۵۰

۲-۱-۶- پودر سنگ آهک

یکی از مواد لازم جهت تأمین ویسکوزیته مناسب در بتن خودتراکم پودر سنگ است. پرکننده‌هایی چون پودر سنگ به دلیل دارا بودن ذرات بسیار ریز، باعث پر کردن فضای خالی و حفره‌های موجود بین ذرات سیمان و سنگدانه شده و لذا باعث کاهش تخلخل و افزایش درجه توپری بتن می‌گردند. این دسته از عناصر پرکننده به دلیل دارا بودن سطح ویژه بسیار زیاد، اصطکاک بین دانه‌ها را افزایش داده و باعث افزایش لزجت بتن می‌گردند، زیرا استفاده از فوق روان کننده‌ها به منظور افزایش روانی بتن در ساخت چنین بتن‌هایی اجتناب ناپذیر

است. نتایج تجزیه شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و پودرسنگ آهک در جدول ۶ نشان داده شده است. در این طرح، از پودر سنگ آهک قم استفاده شد.

جدول ۶: پودر سنگ آهک قم [۴]

LOI	SO ₃	Cao	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	تجزیه و تحلیل شیمیایی
۴۳/۲	۱/۲۴	۵۱/۲۲	۱/۸	۰/۵	۰/۳۵	۲/۸	درصد

۲-۱-۷- افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته

افزودنی پودری VMA^۶ برای تولید بتن خودتراکم با ویسکوزیته افزایش یافته و خواص رئولوژیکی کنترل شده توسعه می‌دهد. VMA در کنترل آب اضافی بتن نقش بسزایی دارد. در این تحقیق، از افزودنی Master Matrix VMA 358 بر پایه رشته‌های مولکولی پلیمری سنگین و با پایداری فوق‌العاده‌ای استفاده شد. مقدار این ماده در طرح مخلوط بتن نسبت به درصد سیمان محاسبه می‌شود. زمانی که تمامی مصالح (شن نخودی، شن بادامی، سیمان، آب، روان کننده، میکروسیلیس، ماسه و پودرسنگ) در میکسر مخلوط شدند. در لحظه نهایی که بتن شکل گرفته شد به مدت چند ثانیه میکسر را خاموش و به بتن استراحت داده می‌شود و به مقدار وزنی مشخص VMA را بر روی بتن پخش می‌شود تا آب اضافی بتن از طریق VMA کنترل و بتن به حالت روانی و کارایی بهتر مطلوب شود که اضافه کردن افزودنی VMA به بتن خودتراکم براساس استاندارد ASTM C 494/C 494M [۲۳] می‌باشد (مطابق شکل ۲).



شکل ۲: مصالح مورد مصرف در طرح اختلاط بتن خودتراکم (۱-ماسه، ۲-شن نخودی، ۳-شن بادامی، ۴-پودر سنگ، ۵-آب، ۶-فوق روان کننده، ۷-ژل میکرو سیلیس، ۸-افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته، ۹-سیمان)

۲-۲- طرح اختلاط

۵ طرح اختلاط بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. میزان درصد الیاف پلی اتیلن ترفتالات با نسبت‌های مختلف (۰٪، ۰/۱۵٪، ۰/۱٪، ۱/۱۵٪، ۰/۲٪ نسبت به وزن سیمان) می‌باشد. در تمامی ۵ طرح مخلوط، مقدار مصالح ثابت بوده و میزان درصد الیاف پلی اتیلن ترفتالات متغیر است (مطابق جدول ۷).

^۶ Viscosity Modifying Admixtures

جدول ۷: طرح اختلاط بتن خودتراکم با و بدون الیاف پلی اتیلن ترفتالات

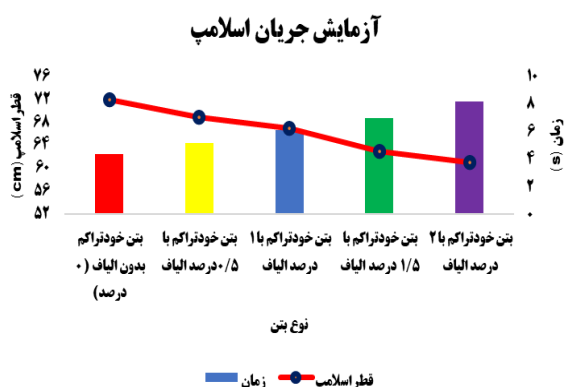
طرح اختلاط بتن خودتراکم بدون الیاف پلی اتیلن ترفتالات (%)							
الیاف پلی اتیلن ترفتالات (kg/m ³)	VMA (kg/m ³)	پودر سنگ (kg/m ³)	فوق روان کننده - سوپر ژل میکروسیلیس (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن بادامی (kg/m ³)	شن نخودی (kg/m ³)
-	۰/۱۶۷	۲۰۷	۱۲-۷	۱۵۴	۱۰۶۷	۱۴۰	۳۵۰
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۰/۵٪ الیاف پلی اتیلن ترفتالات							
۲/۵	۰/۱۶۷	۲۰۷	۱۲-۷	۱۵۴	۱۰۶۷	۱۴۰	۳۵۰
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۱٪ الیاف پلی اتیلن ترفتالات							
۵	۰/۱۶۷	۲۰۷	۱۲-۷	۱۵۴	۱۰۶۷	۱۴۰	۳۵۰
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۱/۵٪ الیاف پلی اتیلن ترفتالات							
۷/۵	۰/۱۶۷	۲۰۷	۱۲-۷	۱۵۴	۱۰۶۷	۱۴۰	۳۵۰
طرح اختلاط بتن خودتراکم با ۲٪ الیاف پلی اتیلن ترفتالات							
۱۰	۰/۱۶۷	۲۰۷	۱۲-۷	۱۵۴	۱۰۶۷	۱۴۰	۳۵۰

۲-۳- انجام آزمایش

مصالح ذکر شده را جهت انجام آزمایش بتن خودتراکم در مدت ۶ تا ۸ دقیقه در میکسر مخلوط شدند. پس از ترکیب شدن مصالح در میکسر لازم است برای خواص تازه بتن خودتراکم با و بدون الیاف پلی اتیلن ترفتالات آزمایش جریان اسلامپ^۷، آزمایش قیف V^۸، آزمایش جعبه L^۹، آزمایش حلقه J^{۱۰}، انجام شود.

۲-۳-۱- آزمایش جریان اسلامپ

آزمایش جریان اسلامپ به دلیل سادگی اجرا، برای تعیین کارایی بتن خودتراکم بسیار متداول است. نتایج آزمایش جریان اسلامپ بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف الیاف پلی اتیلن ترفتالات در شکل ۳ براساس میانگین بدست آمده است.



(ب)

(الف)

شکل ۳: الف) آزمایش جریان اسلامپ ب) نتایج آزمایش جریان اسلامپ

7 Slump flow

8 V-Funnel

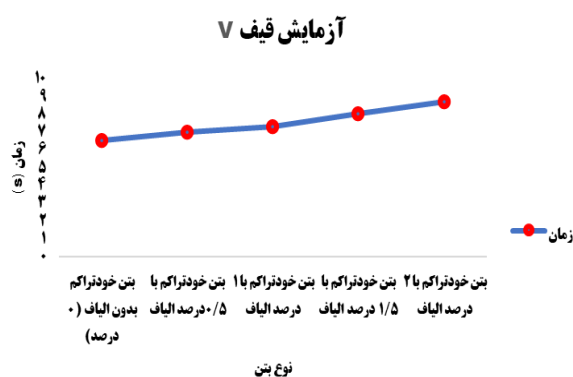
9 L-Box

10 J-Ring

نتایج آزمایش جریان اسلامپ نشان داد با افزایش درصد الیاف پلی اتیلن ترفتالات به مقدار (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲٪) در بتن خودتراکم قطر جریان اسلامپ به ترتیب (۲/۷۷، ۶/۹۴، ۱۱/۱۱، ۱۳/۸۸ درصد) نسبت به بتن خودتراکم بدون الیاف کاهش یافت این مسئله به دلیل سنگین، سخت تر شدن و کاهش جریان پذیری بتن با افزایش مقدار الیاف می باشد، همچنین زمان جریان اسلامپ به ترتیب (۳۰، ۴۲/۵، ۵۵، ۶۷/۵ درصد) نسبت به بتن خودتراکم بدون الیاف نیز افزایش یافت. آزمایش جریان اسلامپ برای بتن خودتراکم براساس استاندارد ASTM C1611 [۲۴] می باشد.

۲-۳-۲- آزمایش قیف V

آزمایش قیف V جهت سنجش توانایی بتن خودتراکم، عبور بتن از میان مقاطع مسلح مقید بدون جداشدگی دانه ها و وقوع انسداد در جریان در نظر گرفته شده است. نتایج آزمایش قیف V بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف الیاف پلی اتیلن ترفتالات در شکل ۴ براساس میانگین بدست آمده است.



(ب)



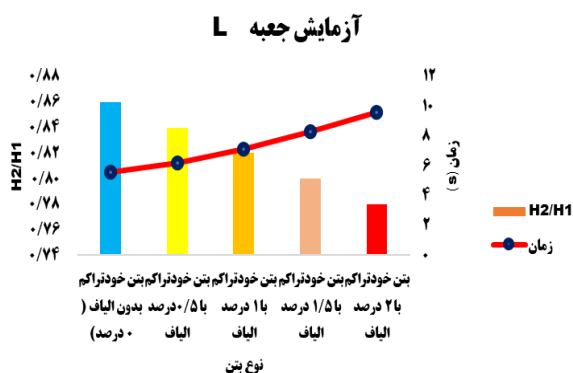
(الف)

شکل ۴: الف) آزمایش قیف V ب) نتایج آزمایش قیف V

نتایج آزمایش قیف V نشان داد با افزایش درصد الیاف پلی اتیلن ترفتالات به مقدار (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲٪) زمان آزمایش به ترتیب (۷/۶۹، ۱۲/۳۰، ۲۳/۰۷، ۳۳/۸۴ درصد) نسبت به بتن خودتراکم بدون الیاف نیز افزایش یافت که نشان دهنده سخت تر شدن و کاهش جریان پذیری بتن با افزایش درصد الیاف شد. آزمایش قیف V برای سنجش توانایی و ویسکوزیته بتن خودتراکم براساس استاندارد ISISIR 3203-9 [۲۵] می باشد.

۲-۳-۳- آزمایش جعبه L

هدف از آزمایش جعبه L برای بررسی قابلیت روانی، قدرت عبور بتن از بین میلگردها، پایداری در مقابل جداشدگی دانه ها و قابلیت پرکنندگی است. نتایج آزمایش جعبه L برای بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف الیاف پلی اتیلن ترفتالات در شکل ۵ براساس میانگین بدست آمده است.



(ب)



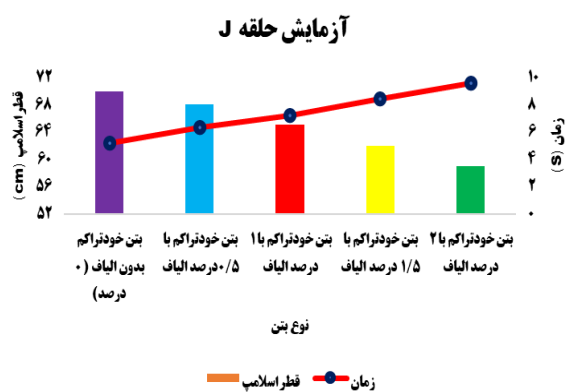
(الف)

شکل ۵: الف) آزمایش جعبه L (ب) نتایج آزمایش جعبه L

نتایج آزمایش جعبه L نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف پلی اتیلن ترفتالات در بتن خودتراکم زمان آزمایش به دلیل کاهش جریان پذیری افزایش یافت. ارتفاع بتن در انتهای بخش افقی (H2) و انتهای بخش عمودی (H1) L-Box تعیین و از رابطه $H2/H1$ که به نسبت اسناد معروف است به دست آمد که با افزایش درصد انواع الیاف، نسبت اسناد کاهش یافت، دلیل این موضوع میزان جذب آب الیاف و ویسکوزیته بتن می‌باشد. آزمایش جعبه L برای بتن خودتراکم براساس استاندارد INSO 3203-10 [۲۶] می‌باشد.

۲-۳-۴- آزمایش حلقه J

آزمایش حلقه J در واقع شبیه سازی عبور بتن از میان میلگردها است و به منظور بررسی قابلیت عبور به کار گرفته می‌شود. نتایج آزمایش حلقه J بتن خودتراکم با اثر درصدهای مختلف الیاف پلی اتیلن ترفتالات در شکل ۶ براساس میانگین بدست آمده است.



(ب)



(الف)

شکل ۶: الف) آزمایش J (ب) نتایج آزمایش J

نتایج آزمایش حلقه J نشان داد که با افزایش درصد الیاف پلی اتیلن ترفتالات به مقدار (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۰/۲) قطر جریان اسلامپ به ترتیب (۴/۴۱، ۱۰/۲۹، ۱۳/۲۳، ۱۷/۶۴ درصد) نسبت به بتن خودتراکم بدون الیاف کاهشی شد این مسئله به دلیل سنگین، سخت تر شدن و کاهش جریان پذیری بتن با افزایش مقدار الیاف می‌باشد همچنین زمان جریان اسلامپ به ترتیب (۰/۹، ۱/۵، ۲/۸، ۴/۱، ۵/۴) شد.

درصد) نسبت به بتن خودتراکم بدون الیاف نیز افزایش یافت. آزمایش حلقه J برای بتن خودتراکم براساس استاندارد INSO 11271 [27] می‌باشد.

۲-۴- قالب‌گیری نمونه‌های بتن

بتن تازه در درون قالب‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر و قالب‌های استوانه‌ای با ابعاد 300×150 میلی‌متر قالب‌گیری شدند. نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای به مدت ۲۴ ساعت جهت سخت شدن در محیط آزاد با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و پس از گذشت ۲۴ ساعت آزمون‌ها از قالب‌ها خارج و در حوضچه آب جهت عمل آوری در مدت ۷ و ۲۸ روزه نگهداری شدند. در مجموع ۲۰۰ نمونه بتن خودتراکم با و بدون الیاف پلی اتیلن ترفتالات ساخته شد که از این تعداد ۱۰۰ آزمون مکعبی و ۱۰۰ آزمون استوانه‌ای ایجاد شد. پس از رسیدن ۵ طرح مخلوط به سنین ۷ و ۲۸ روز، آزمایش چکش اشमित (RH) براساس استاندارد ASTM C805 [28] آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک براساس استاندارد ASTM C-597 [29]، مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی براساس استاندارد ISIRI 3206 [30]، مقاومت کششی آزمون‌های استوانه‌ای براساس استاندارد ASTM C496 [31] و آزمایش نفوذپذیری براساس استاندارد DIN 1048 [35] انجام شد. جهت شکستن آزمون‌های بتن از دستگاه جک بتن شکن استفاده شد. در نهایت پس از آزمایش چکش اشमित، آزمایش آلتراسونیک و شکست آزمون‌ها بتن، نتایج آزمون‌ها با (بتن خودتراکم بدون الیاف) مورد مقایسه و ایجاد رابطه همبستگی با آزمایش چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک مورد بررسی قرار گرفتند.

۲-۵- آزمایش چکش اشमित

جهت آزمایش مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای از آزمایش چکش اشमित استفاده شد. چکش اشमित برای سنجش ویژگی‌های مواد کلسان و به‌ویژه سنجش مقاومت فشاری بتن به کار گرفته می‌شود. امروزه چکش اشमित به‌عنوان یک آزمایش غیرمخرب موردتوجه مهندسان عمران قرار گرفته است و اخیراً به عنوان یک ابزاری مؤثر برای مقاومت سطح اجسام با توجه به سختی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [32]. به این صورت قرائت قابل اعتماد و ثبت عدد شاخص با چکش اشमित بر روی آزمون‌ها انجام می‌شود و سپس نتایج آن ثبت می‌شود. آزمایش چکش اشमित براساس استاندارد ISO1920-7 [33] می‌باشد (مطابق شکل‌های ۷-۹). نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای نشان داد که با اضافه شدن الیاف پلی اتیلن ترفتالات به بتن خودتراکم، مقاومت فشاری کاهش یافت. دلیل کاهش در داده‌های آزمایش چکش اشमित جهت سنجش مقاومت فشاری بتن خودتراکم برای آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای می‌تواند ناشی از تاثیر منفی فضای خالی ایجاد شده در بتن خودتراکم به سبب مقدار، شکل و پراکندگی الیاف در بتن باشد.

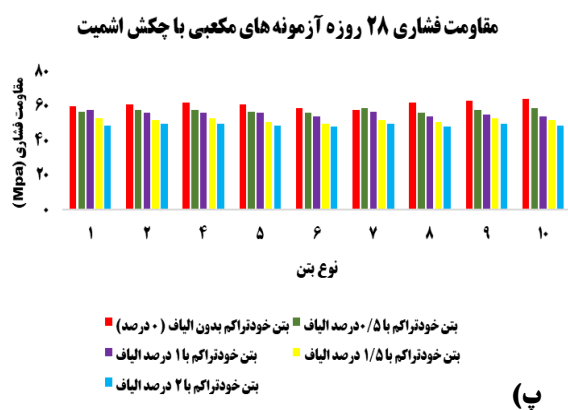
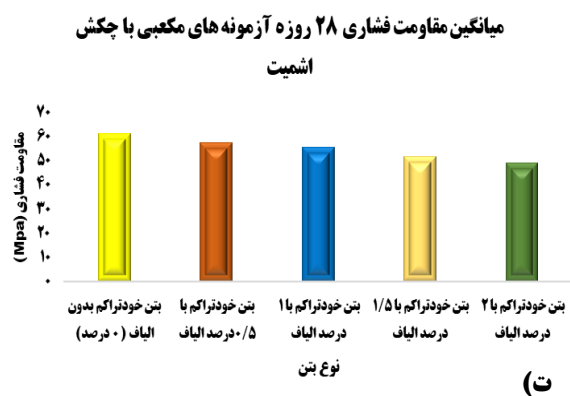
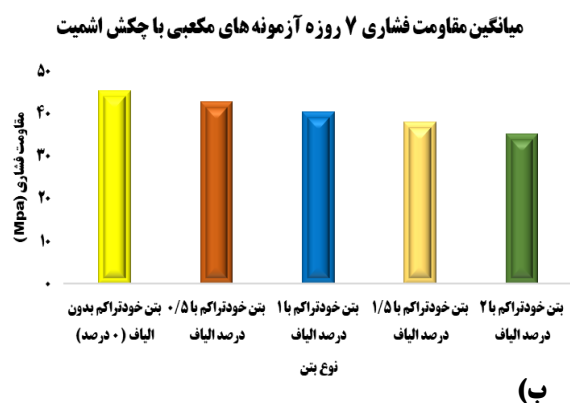


(ب)

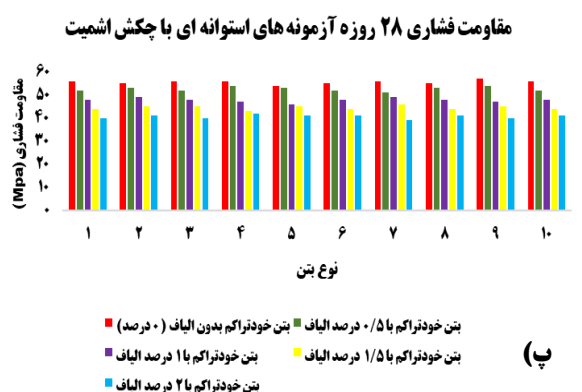
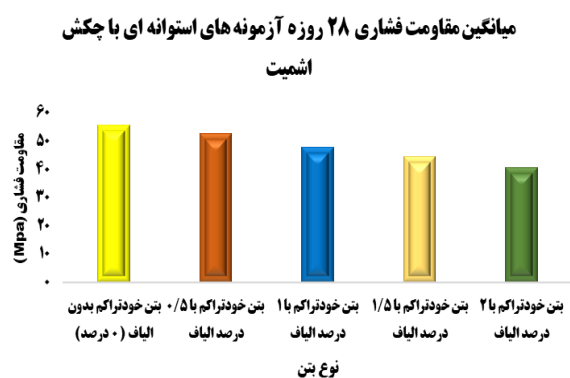
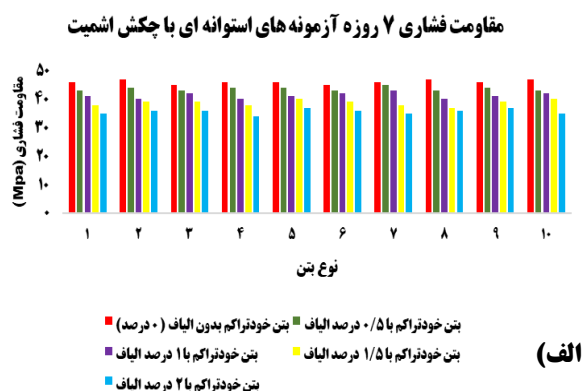
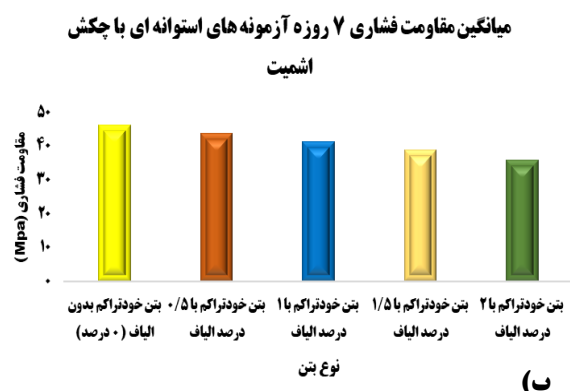


(الف)

شکل ۷: (الف) آزمایش چکش اشमित بر روی آزمون مکعبی (ب) آزمایش چکش اشमित بر روی آزمون استوانه‌ای



شکل ۸: الف) نتایج کل داده‌های آزمایش چکش اشمیت برای آزمون‌های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه ب) میانگین نتایج داده‌های آزمایش چکش اشمیت برای آزمون‌های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه پ) نتایج کل داده‌های آزمایش چکش اشمیت برای آزمون‌های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه ت) میانگین نتایج داده‌های آزمایش چکش اشمیت برای آزمون‌های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۹: الف) نتایج کل داده‌های آزمایش چکش اشمیت برای آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۷ روزه (ب) میانگین نتایج داده‌های آزمایش چکش اشمیت برای آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۷ روزه (پ) نتایج کل داده‌های آزمایش چکش اشمیت برای آزمون‌های استوانه‌ای - ای در عمل آوری ۲۸ روزه (ت) میانگین نتایج داده‌های آزمایش چکش اشمیت برای آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۲۸ روزه

۲-۶- آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک

آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک (UPV) یکی از روش‌های آزمایش غیر مخرب است که امکان تجزیه و تحلیل عمیق همگنی مواد، یکنواختی، کیفیت، فرسودگی، یافتن عیوب، وجود حفره‌های داخلی و خلل و فرج در بتن سخت شده را تعیین می‌کند. در این پژوهش، سرعت امواج آلتراسونیک در محدوده فرکانسی ۲۰ تا ۱۷۰ کیلوهرتز است. همچنین از روش مستقیم برای انجام آزمایش بر روی آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای استفاده شد. فاصله بین دو مبدل آلتراسونیک برای آزمون‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متر و برای آزمون‌های استوانه‌ای ۳۰۰ میلی‌متر است. آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک براساس استاندارد ISO1920-7 [۳۳] می‌باشد. معیار تعیین کیفیت بتن براساس این آزمایش با کنترل سرعت موج در بازه‌های استاندارد تعیین شده (km/s) بدست می‌آید که هر چه مقدار آن کمتر از ۳ باشد نتیجه مطلوب نیست و اگر از ۳ بالاتر باشد نتیجه مطلوب و قابل قبول است [۳۴] به این صورت عدد قرائت آلتراسونیک و فاصله بین دو مبدل‌ها بر روی آزمون‌ها انجام شد و نتایج آن ثبت گردید (مطابق شکل‌های ۱۰-۱۲). نتایج آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک بر روی آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای نشان داد که با اضافه شدن الیاف پلی اتیلن ترفتالات به بتن خودتراکم، سرعت پالس آلتراسونیک کاهش می‌یابد. دلیل کاهش در داده‌های آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای می‌تواند ناشی از جذب و حفظ آب در الیاف باشد و موجب تاثیر منفی در کاهش سرعت پالس آلتراسونیک شود.

$$km/s = \frac{CM}{MS} \times 10 \quad (1)$$

مطابق رابطه (۱) فاصله (CM) بر عدد قرائت (MS) که روی نمایشگر دستگاه نمایش داده شده را تقسیم کرده و در ۱۰ ضرب می‌شود تا سرعت پالس برحسب (km/s) تعیین گردد.

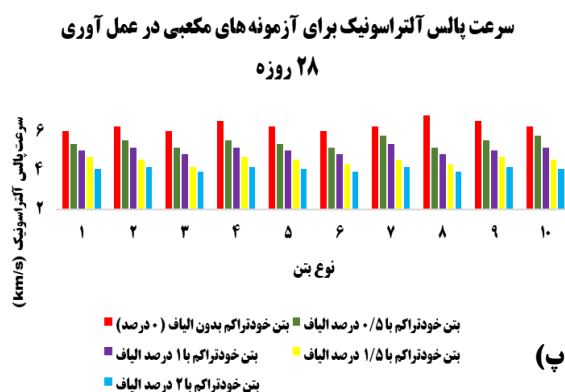
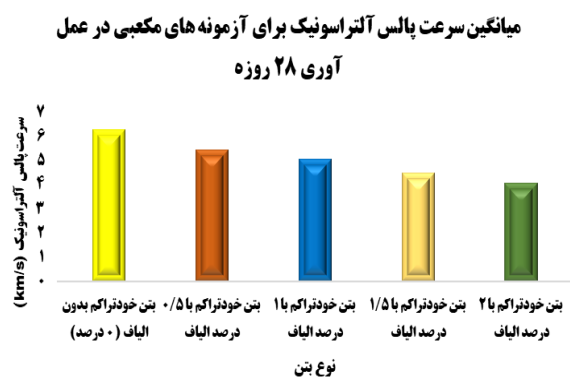
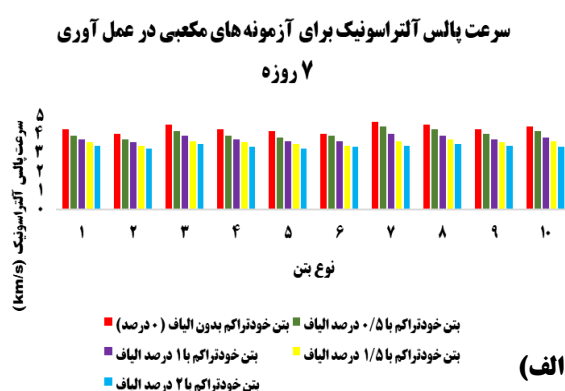
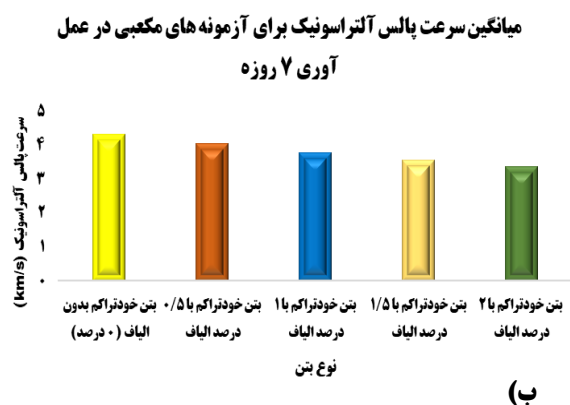


(ب)

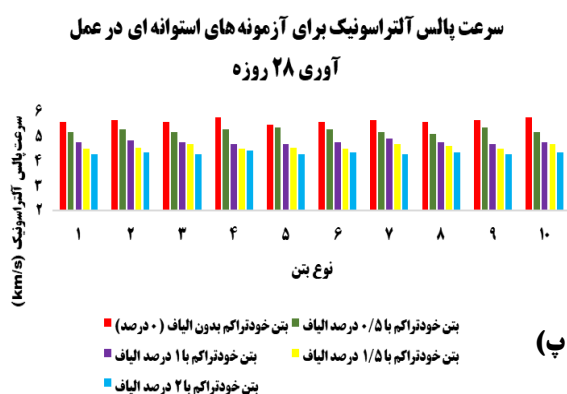
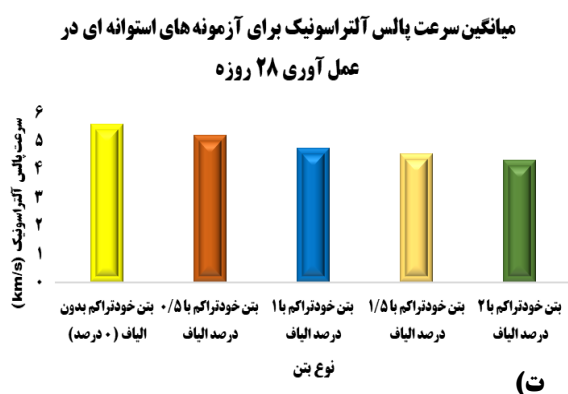
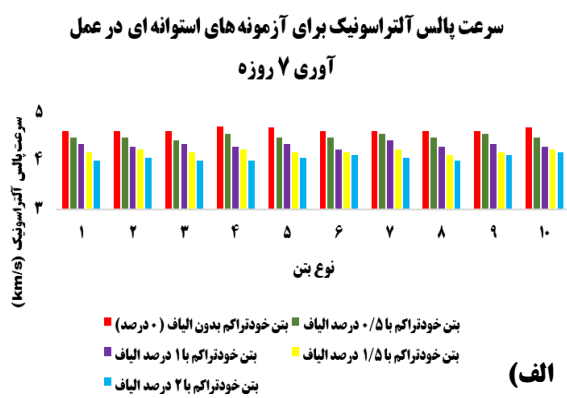
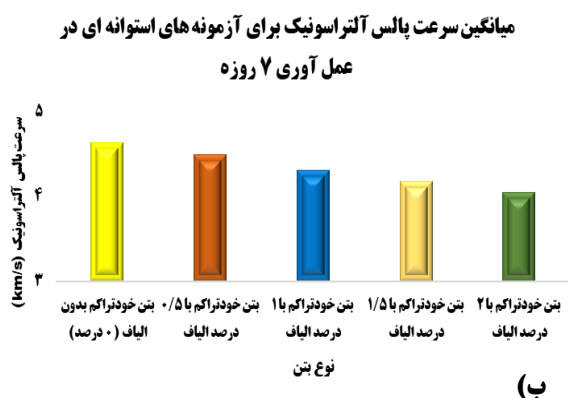


(الف)

شکل ۱۰: الف) آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک بر روی نمونه‌های مکعبی (ب) آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک بر روی نمونه‌های استوانه‌ای



شکل ۱۱: الف) نتایج کل داده‌های آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه‌های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه (ب) میانگین نتایج داده‌های آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه‌های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه (پ) نتایج کل داده‌های آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه‌های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه (ت) میانگین نتایج داده‌های آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه‌های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۱۲: الف) نتایج کل داده های آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه های استوانه ای در عمل آوری ۷ روزه (ب) میانگین نتایج داده های آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه های استوانه ای در عمل آوری ۷ روزه (پ) نتایج کل داده های آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه های استوانه ای در عمل آوری ۲۸ روزه (ت) میانگین نتایج داده های آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک برای نمونه های استوانه ای در عمل آوری ۲۸ روزه

۷-۲- آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی

مقاومت فشاری نمونه های مکعبی بتن خودتراکم با و بدون الیاف پلی اتیلن ترفتالات بر اساس سنین ۷ و ۲۸ روزه با ابعاد مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلی متری مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش ها بر روی نمونه های مکعبی براساس استاندارد ISIRI 3206 [۳۰] نشان داد که با اضافه شدن الیاف پلی اتیلن ترفتالات به بتن خودتراکم، مقاومت فشاری کاهش می یابد (مطابق شکل های ۱۳ و ۱۴). دلیل کاهش در داده های آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی می تواند ناشی از کاهش چسبندگی بین سیمان و سنگدانه ها، کاهش چسبندگی در ناحیه انتقال بتن، پراکنندگی الیاف و عدم انسجام کافی بتن باشد.

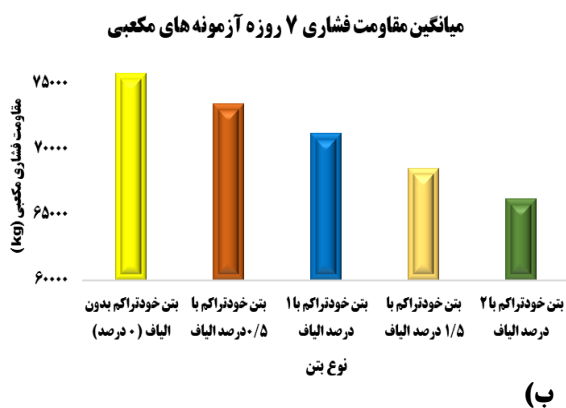


(ب)



(الف)

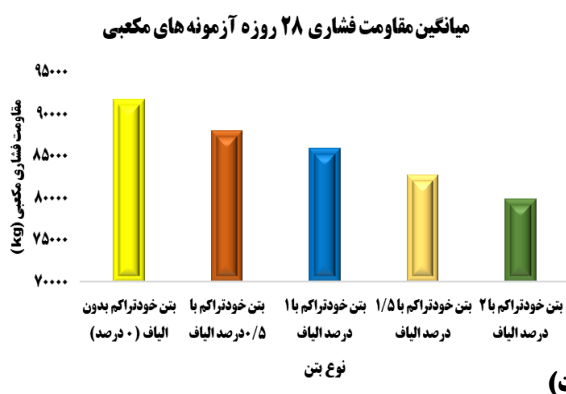
شکل ۱۳: الف) آزمایش شکست آزمون مکعبی با دستگاه جک بتن شکن (ب) آزمون شکسته شده بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات



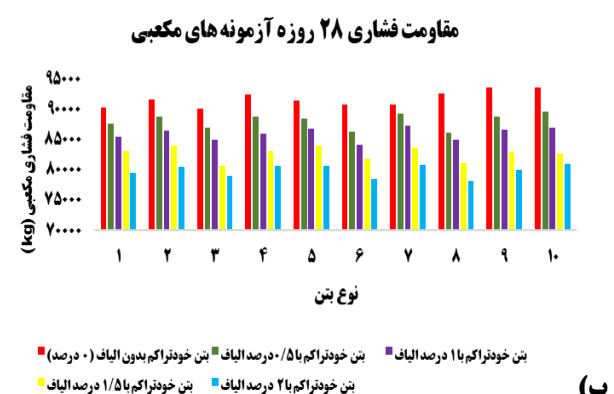
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۴: الف) نتایج کل داده های آزمایش مقاومت فشاری برای آزمون های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه (ب) میانگین نتایج داده های آزمایش مقاومت فشاری برای آزمون های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه (ت) میانگین نتایج داده های آزمایش مقاومت فشاری برای آزمون های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه

۲-۸- آزمایش مقاومت کششی نمونه های استوانه ای

مقاومت کششی آزمون های استوانه ای بتن خودتراکم با و بدون الیاف پلی اتیلن ترفتالات بر اساس سنین ۷ و ۲۸ روزه با ابعاد استوانه ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی متری مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش ها بر روی آزمون های استوانه ای براساس استاندارد ASTM C496

[۳۱] نشان داد که با اضافه شدن الیاف پلی اتیلن ترفتالات به بتن خودتراکم، مقاومت کششی افزایش می‌یابد (مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶). افزایش در داده‌های آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای می‌تواند ناشی از تاثیر مثبت ویژگی منحصر به فرد الیاف با توجه به مقاومت کششی و مدول الاستیسیته الیاف پلی اتیلن ترفتالات در بتن خودتراکم به سبب مقدار و اندازه آن باشد.

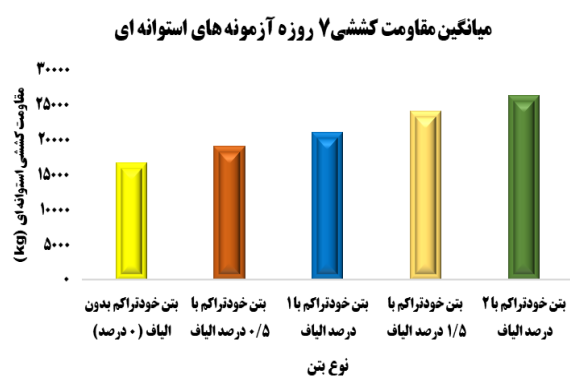


(ب)

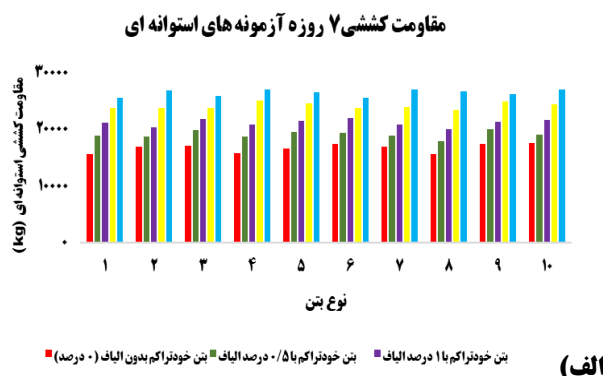


(الف)

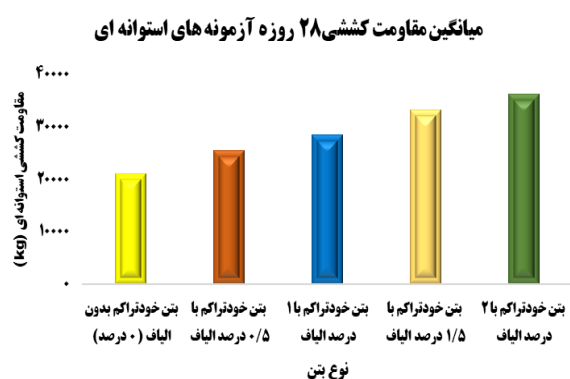
شکل ۱۵: الف) آزمایش شکست آزمون استوانه‌ای با دستگاه جک بتن شکن (ب) آزمون شکسته شده بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات



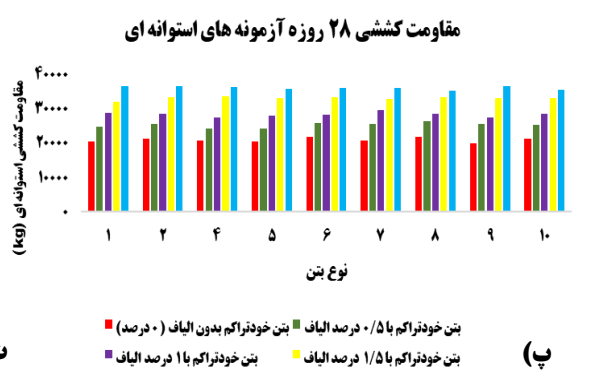
(ب)



(الف)



(ت)

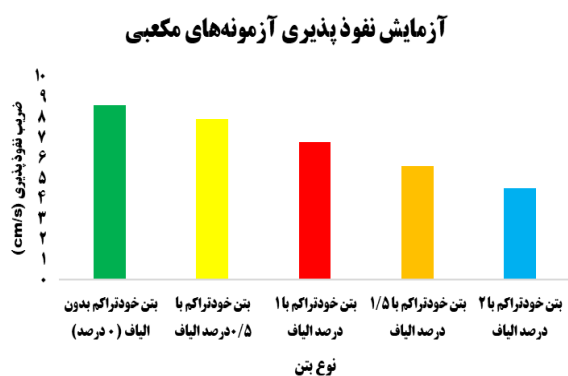


(پ)

شکل ۱۶: الف) نتایج کل داده‌های آزمایش مقاومت کششی برای آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۷ روزه (ب) میانگین نتایج داده‌های آزمایش مقاومت کششی برای آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۷ روزه (پ) نتایج کل داده‌های آزمایش مقاومت کششی برای آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۲۸ روزه (ت) میانگین نتایج داده‌های آزمایش مقاومت کششی برای آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۲۸ روزه

۲-۹- آزمایش نفوذپذیری آزمونه‌های مکعبی

آزمایش نفوذپذیری بتن خودتراکم برای آزمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متری جهت حفظ آزمونه‌ها در برابر حفظ آب، یون‌ها، سولفات‌ها و دوام بتن در نظر گرفته شد. نفوذپذیری نیز ارتباط تنگاتنگی با دوام بتن خودتراکم، به ویژه مقاومت آن، در برابر زوال تدریجی تحت قرار گرفتن در معرض آب و هوای ناسالم و نشست ناشی از نفوذ آب دارد، به ویژه زمانی که حاوی گازها یا مواد معدنی تهاجمی در محلول باشد. منظور از دوام بتن، توانایی آن برای مقابله با عوامل جوی، حملات شیمیایی، سایش، فرسایش و هرگونه فرآیندی که منجر به زوال، خرابی، کاهش طول عمر مفید و بهره دهی آن می‌شود، است. این آزمایش برای آزمونه‌های مکعبی در معرض فشار هیدرواستاتیک ۵ بار که مطابق با استاندارد DIN 1048 [۳۵] است، اندازه‌گیری شد. فشار آب و هوا در بازه زمانی ۷۲ ساعت و در دمای محیطی ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گردید و ضریب نفوذپذیری را محاسبه شد (مطابق شکل ۱۷). استفاده از الیف پلی اتیلن ترفتالات در بتن خودتراکم می‌تواند در کاهش نفوذپذیری بتن موثر باشد. الیف پلی اتیلن ترفتالات می‌تواند به عنوان یک عامل تقویتی به کنترل ترک خوردگی و افزایش مقاومت کششی بتن کمک کند. الیف پلی اتیلن ترفتالات بر کاهش انقباض بتن خودتراکم مؤثر است. الیف پلی اتیلن ترفتالات مقاومت خوبی در برابر آب دارد و می‌تواند در محیط‌های رطوبتی استفاده شود، عمر مفید و دوام بتن خودتراکم را افزایش دهد.



(ب)



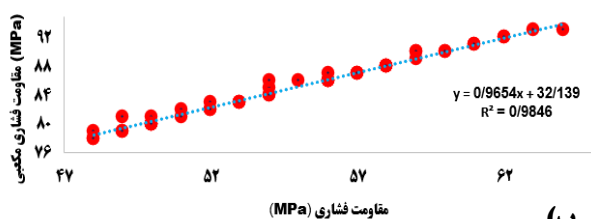
(الف)

شکل ۱۷: الف) دستگاه نفوذپذیری بتن ب) نتایج آزمایش بتن خودتراکم با و بدون الیف پلی اتیلن ترفتالات

۳- جمع بندی نتایج

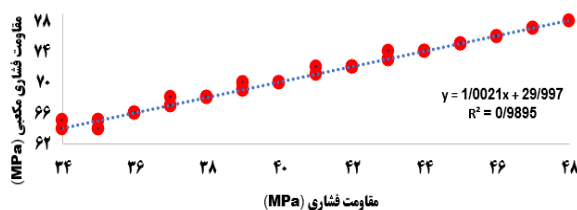
بدین ترتیب مطابق نتایج مذکور رابطه همبستگی بین آزمایش چکش اشمیت، آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک، مقاومت فشاری آزمونه‌های مکعبی و مقاومت کششی آزمونه‌های استوانه‌ای انجام گرفت. ضریب همبستگی نوعی داده آماری برای تعیین درجه و رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. ضریب همبستگی، یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی دو متغیر است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا -۱ است و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است. ضریب همبستگی، روشی پارامتری است که برای داده‌هایی با توزیع نرمال یا تعداد داده‌های زیاد استفاده می‌شود که بیانگر رابطه مستقیم کامل بین دو متغیر می‌باشد، رابطه مستقیم یا مثبت به این معناست که اگر یکی از متغیرها افزایش یا کاهش یابد، دیگری نیز افزایش یا کاهش می‌یابد. زمانی که ضریب همبستگی برابر صفر است این نشان می‌دهد که بین دو متغیر رابطه خطی وجود ندارد. ضریب همبستگی (R^2) آزمایش‌ها از ۰/۹۵ به بالا می‌باشند که نتیجه همبستگی‌ها مورد قبول هستند. این ضریب نشان دهنده رابطه خطی بین نتایج آزمایش‌های صورت گرفته شده است و نتایجی که مورد بررسی قرار داده شدند، رابطه مستقیم دارند (مطابق شکل‌های ۱۸ - ۲۱).

رابطه همبستگی بین چکش اشمیت با مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه



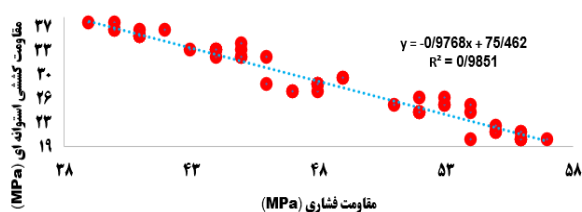
● مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری با آزمایش چکش اشمیت
 Linear ((مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری با آزمایش چکش اشمیت))

رابطه همبستگی بین چکش اشمیت با مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه



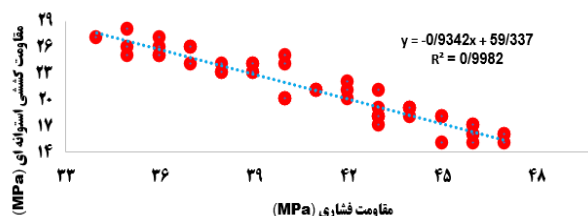
● مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش مقاومت فشاری با آزمایش چکش اشمیت
 Linear ((مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش مقاومت فشاری با آزمایش چکش اشمیت))

رابطه همبستگی بین چکش اشمیت با مقاومت کششی آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۲۸ روزه



● مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت کششی با آزمایش چکش اشمیت
 Linear ((مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت کششی با آزمایش چکش اشمیت))

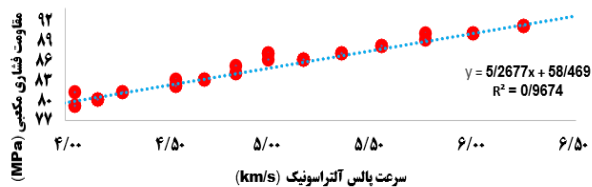
رابطه همبستگی بین چکش اشمیت با مقاومت کششی آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۷ روزه



● مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش مقاومت کششی با آزمایش چکش اشمیت
 Linear ((مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش مقاومت کششی با آزمایش چکش اشمیت))

شکل ۱۸: الف) رابطه همبستگی مثبت بین چکش اشمیت با مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه ب) رابطه همبستگی مثبت بین چکش اشمیت با مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه پ) رابطه همبستگی منفی بین چکش اشمیت با مقاومت کششی آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۷ روزه ت) رابطه همبستگی منفی بین چکش اشمیت با مقاومت کششی آزمون‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۲۸ روزه

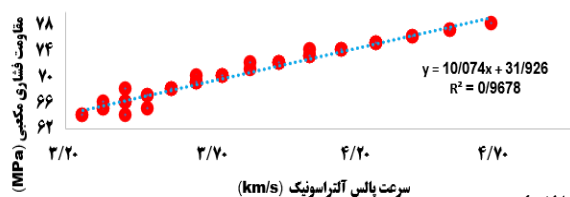
رابطه همبستگی بین آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک با مقاومت فشاری نمونه های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه



(ب)

● مجموع داده های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی با آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک
 Linear (مجموع داده های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی با آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک)

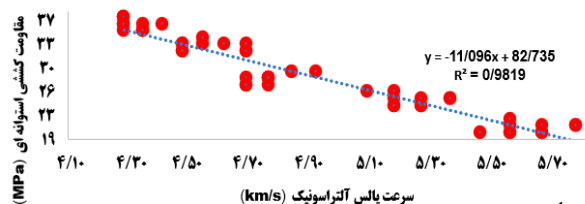
رابطه همبستگی بین آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک با مقاومت فشاری نمونه های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه



(الف)

● مجموع داده های ۷ روزه آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی با آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک
 Linear (مجموع داده های ۷ روزه آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی با آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک)

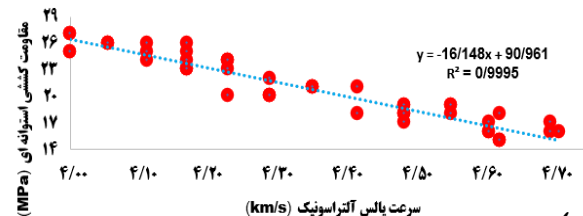
رابطه همبستگی بین آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک با مقاومت کششی نمونه های استوانه ای در عمل آوری ۲۸ روزه



(ت)

● مجموع داده های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت کششی با آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک
 Linear (مجموع داده های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت کششی با آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک)

رابطه همبستگی بین آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک با مقاومت کششی نمونه های استوانه ای در عمل آوری ۷ روزه

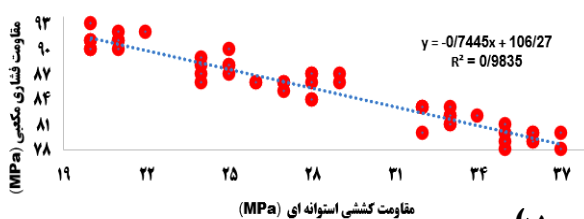


(پ)

● مجموع داده های ۷ روزه آزمایش مقاومت کششی با آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک
 Linear (مجموع داده های ۷ روزه آزمایش مقاومت کششی با آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک)

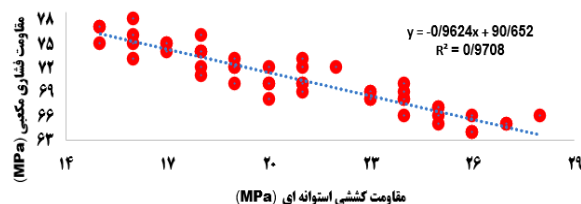
شکل ۱۹: الف) رابطه همبستگی مثبت بین آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک با مقاومت فشاری نمونه های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه (ب) رابطه همبستگی مثبت بین آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک با مقاومت فشاری نمونه های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه (پ) رابطه همبستگی منفی بین آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک با مقاومت کششی نمونه های استوانه ای در عمل آوری ۷ روزه (ت) رابطه همبستگی منفی بین آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک با مقاومت کششی نمونه های استوانه ای در عمل آوری ۲۸ روزه

رابطه همبستگی بین آزمایش مقاومت فشاری با مقاومت کششی
آزمونه‌ها در عمل آوری ۲۸ روزه



● مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری با آزمایش مقاومت کششی
..... Linear مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری با آزمایش مقاومت کششی

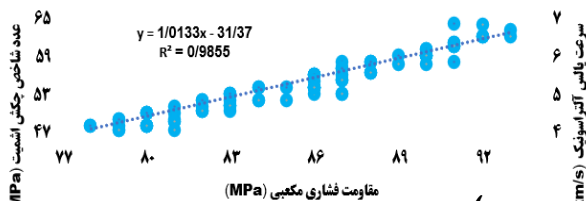
رابطه همبستگی بین آزمایش مقاومت فشاری با مقاومت کششی
آزمونه‌ها در عمل آوری ۷ روزه



● مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش مقاومت فشاری با آزمایش مقاومت کششی
..... Linear مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش مقاومت فشاری با آزمایش مقاومت کششی

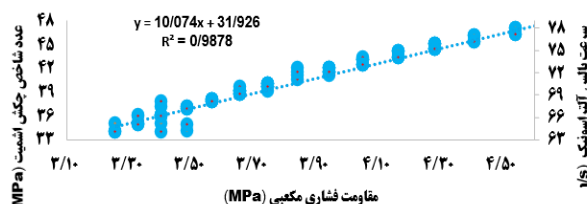
شکل ۲۰: الف) رابطه همبستگی منفی بین آزمایش مقاومت فشاری با کششی آزمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در عمل آوری ۷ روزه (ب) رابطه همبستگی منفی بین آزمایش مقاومت فشاری با کششی آزمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در عمل آوری ۲۸ روزه

رابطه همبستگی بین آزمایش‌های مقاومت فشاری با چکش اشमित و
آلتراسونیک برای آزمونه‌های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه



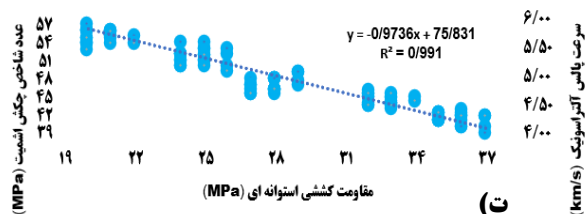
● مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش‌های مقاومت فشاری با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک
..... Linear مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش‌های مقاومت فشاری با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک

رابطه همبستگی بین آزمایش‌های مقاومت فشاری با چکش اشमित و
آلتراسونیک برای آزمونه‌های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه



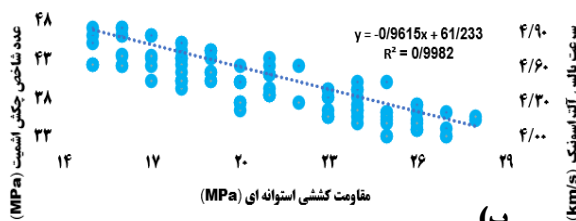
● مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش‌های مقاومت فشاری با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک
..... Linear مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش‌های مقاومت فشاری با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک

رابطه همبستگی بین آزمایش‌های مقاومت کششی با چکش اشमित و
آلتراسونیک برای آزمونه‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۲۸ روزه



● مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش‌های مقاومت کششی با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک
..... Linear مجموع داده‌های ۲۸ روزه آزمایش‌های مقاومت کششی با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک

رابطه همبستگی بین آزمایش‌های مقاومت کششی با چکش اشमित و
آلتراسونیک برای آزمونه‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۷ روزه



● مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش‌های مقاومت کششی با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک
..... Linear مجموع داده‌های ۷ روزه آزمایش‌های مقاومت کششی با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک

شکل ۲۱: الف) رابطه همبستگی مثبت بین آزمایش‌های مقاومت فشاری با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک برای آزمونه‌های مکعبی در عمل آوری ۷ روزه (ب) رابطه همبستگی مثبت بین آزمایش‌های مقاومت فشاری با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک برای آزمونه‌های مکعبی در عمل آوری ۲۸ روزه (پ) رابطه همبستگی منفی بین آزمایش‌های مقاومت کششی با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک برای آزمونه‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۷ روزه (ت) رابطه همبستگی منفی بین آزمایش‌های مقاومت کششی با چکش اشमित و سرعت پالس آلتراسونیک برای آزمونه‌های استوانه‌ای در عمل آوری ۲۸ روزه

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، اثر الیاف پلی اتیلن ترفتالات بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت که با درصدهای مختلف (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ درصد نسبت به وزن سیمان) پرداخته شد. هدف از این پژوهش، افزایش مقاومت کششی و کاهش نفوذپذیری آزمون‌های بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات بود که این تحقیق می‌تواند سهم مهمی در توسعه پایدار داشته باشد و در نتیجه کاهش هزینه‌های سازه و مصالح، کاهش اثرات مخرب و آلودگی به محیط زیست، کاهش شکنندگی بتن و حفاظت منابع طبیعی شود. با توجه به دستاورد اصلی این مقاله می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- ۱) میانگین نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با چکش برگشتی بر بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات طی عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲) نشان دهنده آن است که با افزایش الیاف به ترتیب ۵/۵۱، ۱۰/۵۹، ۱۶/۱ و ۲۲/۰۷ و ۵/۹۰، ۹/۱۸، ۱۵/۲۴، ۱۹/۵۰ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون الیاف (صفر درصد) رخ می‌دهد.
- ۲) میانگین نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای با چکش برگشتی بر بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات طی عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲) نشان دهنده آن است که با افزایش الیاف به ترتیب ۵/۴۲، ۱۰/۶۲، ۱۶/۰۵ و ۲۲/۵۵ و ۵/۳۹، ۱۴/۰۲، ۱۹/۹۶، ۲۶/۹۷ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون الیاف (صفر درصد) رخ می‌دهد.
- ۳) میانگین نتایج آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک نمونه‌های مکعبی بر بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات طی عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲) نشان دهنده آن است که با افزایش الیاف به ترتیب ۶/۴۶، ۱۲/۴۷، ۱۷/۵۵ و ۲۲/۱۷ و ۱۳/۳۷، ۱۹/۹۰، ۲۸/۲۵۰، ۳۵/۳۵ درصد کاهش سرعت پالس نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون الیاف (صفر درصد) رخ می‌دهد.
- ۴) میانگین نتایج آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک نمونه‌های استوانه‌ای بر بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات طی عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲) نشان دهنده آن است که با افزایش الیاف به ترتیب ۳/۱۲، ۶/۹۱، ۹/۷۱ و ۱۲/۵۲ و ۶/۹۵، ۱۵/۱۵، ۱۸/۷۱، ۲۲/۹۹ درصد کاهش سرعت پالس نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون الیاف (صفر درصد) رخ می‌دهد.
- ۵) میانگین نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات طی عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲) نشان دهنده آن است که با افزایش الیاف به ترتیب ۳/۰۲، ۶/۰۴، ۹/۵۶، ۱۲/۶۴ و ۱۶/۲۵، ۳/۹۷ و ۹/۷۷، ۱۲/۸۸ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون الیاف (صفر درصد) رخ می‌دهد.
- ۶) میانگین نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بتن خودتراکم با الیاف پلی اتیلن ترفتالات طی عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲) نشان دهنده آن است که با افزایش الیاف به ترتیب ۱۴/۳۷، ۲۶/۸۱، ۴۴/۶۱، ۵۸/۳۵ و ۲۱/۰۹، ۳۵/۵۷، ۵۷/۹۵، ۷۲/۵۷ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون الیاف (صفر درصد) رخ می‌دهد.
- ۷) نتایج آزمایش نفوذپذیری نمونه‌های مکعبی بتن خودتراکم با و بدون الیاف پلی اتیلن ترفتالات طی ۷۲ ساعت با درصدهای (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲) نشان دهنده آن است که با افزایش الیاف، به ترتیب ۸/۱۳، ۲۰/۹۳، ۳۴/۸۸ و ۴۷/۶۷ درصد کاهش نفوذپذیری نسبت به نمونه بتن خودتراکم بدون (صفر درصد) رخ می‌دهد.

کووارینانس^{۱۱} شاخصی است که میزان در هم تنیدگی دو متغیر را نشان می‌دهد و هرچقدر مقدار مطلق آن بیشتر باشد، رابطه بین دو متغیر بیشتر خواهد بود. حال اگر مقدار مثبت باشد این رابطه به صورت مستقیم است و اگر منفی باشد این رابطه به صورت معکوس است. همبستگی یا همان ضریب همبستگی نیز مقدار کووارینانس تقسیم بر رادیکال واریانس هر کدام از متغیرها است. نتایج و خروجی رابطه همبستگی بین داده‌های آزمایش‌های از ۰/۹۵ بیشتر بود، پس نشان دهند آن است که رابطه همبستگی بین آزمایش‌های چون نتیجه مثبت بوده پس رابطه داده‌ها به صورت مستقیم هستند. الیاف پلی اتیلن ترفتالات به عنوان یک ماده پلاستیکی در بتن خودتراکم مورد استفاده قرار گرفت. این الیاف باعث افزایش ویژگی‌های مکانیکی و دیگر خواص در بتن خودتراکم شد. برخی از تاثیرات این الیاف عبارتند از: افزایش مقاومت کششی؛ الیاف پلی اتیلن ترفتالات می‌تواند بهبود مقاومت کششی بتن خودتراکم را ایجاد کند که می‌تواند از ترکیب‌های ناشی از اعمال تنش‌های خارجی جلوگیری کند. انعطاف‌پذیری بتن: الیاف افزوده شده می‌تواند به بتن خودتراکم انعطاف‌پذیری بیشتری بدهد و از

^{۱۱} کووارینانس به اندازه گیری چگونگی تغییر دو متغیر تصادفی هنگام مقایسه با یکدیگر اشاره دارد.

تشکیل ترک‌های ناشی از تغییرات حرارتی و انقباض جلوگیری کند. بهبود خواص خودتراکمی: الیاف می‌تواند بهبود تراکم بتن خودتراکم را افزایش دهد و در نتیجه، اجتناب از نیاز به ویبره کردن بتن را فراهم کند به دلیل اینکه به افزایش روانی و قابلیت جابجایی بتن خودتراکم کمک می‌کند. کاهش ترکیبگی: الیاف باعث کاهش ترکیبگی و گسترش ترک‌ها در بتن می‌شود. مقاومت به عوامل محیطی: الیاف پلی اتیلن ترفتالات ممکن است به بتن کمک کند تا مقاومت به تغییرات حرارتی و شرایط محیطی افزایش یابد، همچنین باعث کاهش نفوذپذیری در بتن خودتراکم می‌شود که دوام و عمر بتن خودتراکم افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Khan, S.U. Ayub b, T. (2020). Flexure and shear behaviour of self-compacting reinforced concrete beams with polyethylene terephthalate fibres and strips. Structures. Volume 25, Pages 200-211.
- [2] Al-Hadithi, A.I. Hilal, Majid Al-Gburi, N.N. Midher, A. H. (2023). Structural behavior of reinforced lightweight self-compacting concrete beams using expanded polystyrene as coarse aggregate and containing polyethylene terephthalate fibers. Structural Concrete Journal Citation Reports.
- [3] Sadrumontazi, A. Milehsara, S.D. Lotfi-Omran, O. Sadeghi-Nik, A. (2016). The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. Journal of Cleaner Production Volume 112, Pages 2363-2373.
- [4] Askar, k. Yaman, S.S. Al-Kamaki, S. Hassan, A. (2023). Utilizing Polyethylene Terephthalate PET in Concrete. Journals Polymers Volume 15 .Issue 15.
- [5] Ayub, T. Khan, S.U. Mahmood , W. (2021). Mechanical Properties of Self-Compacting Rubberised Concrete (SCRC) Containing Polyethylene Terephthalate (PET) Fibres. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering volume 46, pages 1073-1085.
- [6] Asmaa, H.S. Khashaa Mahmoud, M. (2022). Optimum characteristics of plastic fibres for sustainable self-compacting concrete SCC. European Journal of Environmental and Civil Engineering. Volume 27, Issue 9, Pages 2967-2984.
- [7] Widodo, S. Alfirahma, R. Prawiranegara, A. Amir, F. Dewi, A. (2023). Development of Eco-friendly Self-compacting Concrete Using Fly Ash and Waste Polyethylene Terephthalate Bottle Fiber. Civil Engineering Journal (C.E.J). Vol 9, No 2.
- [8] Ramhormozy, A. Kazeminezhad, E. Safakhah, S. (2023) Effect of polyethylene terephthalate (PET) and polypropylene (PP) fibers on the shear behavior of RC deep beams. Revista de la Construcción vol.22 no.1.
- [9] Fakhrian, Sh. Mashhadhi, Sh. Behbahani, H. (2019). Compressive strength of fiber concrete containing rubber particles under fire. Scientific Journal of Concrete Materials and Structures, Iranian Concrete Scientific Association, fifth year, number 2, serial number. 47-59.
- [10] Bozorgmehr Nia, S. Adlparvar, M.A. (2022). The effects of waste polyethylene terephthalate (PET) particles on the properties of fresh and hardened self-consolidating concrete. International Journal of Civil Engineering and Construction. 1(1): 06-12.
- [11] Khashaa, M. Ismail, A. Marwa, H. (2019). Production and optimization of eco-efficient self-compacting concrete SCC with limestone and PET. Construction and Building Materials. Volume 197, Pages 734-746.
- [12] Nkomo, N. Masu, L. Nziu, P. (2022). Effects of Polyethylene Terephthalate Fibre Reinforcement on Mechanical Properties of Concrete. Advances in Materials Science and Engineering.
- [13] Sadrumontazi, A. Tahmouresi, B. Tahmoures, M. S. (2019). RHEOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER SELF-COMPACTING CONCRETE UNDER HIGH TEMPERATURE. Sharif Journal of Civil Engineering (SJCE). Volume 34.2, Issue 4.2 - Serial Number 4.
- [14] Madandoust, R. Ranjbar, M.M. Moshiri, A.A. (2014). THE EFFECTS OF STEEL AND PET FIBERS ON THE PROPERTIES OF FRESH AND HARDENED SELF-COMPACTING CONCRETE. ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BHRC) VOL. 15, NO. 5. PAGES 671-682.
- [15] Qalehaki, M. Pachideh, G. Rezai Far, A. (2017). Laboratory study of mechanical properties of concrete containing steel fibers and polypropylene at high temperatures. Scientific-Research Journal of Structural and Construction Engineering. Year 4, Number 3. 167-179.
- [16] Meena, A. Surendranath, A. Ramana, P.V. (2022). Assessment of mechanical properties and workability for polyethylene terephthalate fiber reinforced concrete. Materials Today: Proceedings. Volume 50, Part 5, Pages 2307-2314.
- [17] Pachideh, G. Ketabdari, H. (2023). Investigation of the mechanical properties of self-compacting concrete containing recycled steel springs; experimental and numerical investigation. European Journal of Environmental and Civil Engineering 27(14):1-20. 4026-4045.
- [18] Pachideh, G. Gholhaki, M. Moshtagh, A. (2020). Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions. Structures and Buildings. Volume 173 Issue 1, pp. 3-16.
- [19] ASTM C150/C150M. (2012). Standard Specification for Portland Cement.

- [20] ASTM C 33. (2003). Standard specification for concrete aggregates. American Society of Testing and Materials Standards.
- [21] ASTM C 494. (2002). Standard specification for chemical admixtures for concrete. Annual book of ASTM Standards.
- [22] ASTM C 94. (2009). Standard specification for Ready – Mixed Concrete, American Society of Testing and Materials Standards.
- [23] ASTM C 494/C 494M. (2002). Standard specification for chemical admixtures for concrete. Annual book of ASTM Standards.
- [24] ASTM C1611 . (2009). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete.
- [25] INSO 3203-9. (2013). Testing fresh concrete - Part 9: Self-compacting concrete V-funnel test.
- [26] INSO 3203-10. (2013). Testing fresh concrete – Part 9: Self- compactin g concrete -L box test.
- [27] INSO 11271. (2014). Concrete -Measurement of passing ability of self-consolidating concrete by J-ring- Test Method.
- [28] ASTM C805. (2009). Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.
- [29] ASTM C-597. (2003). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- [30] ISIRI 3206. (2003). Standard Test Determining the compressive strength of concrete samples.
- [31] ASTM C496. (2002). ASTM C496 Tensile Concrete Test Equipment.
- [32] Mirzaie Aliabadi, M. derakhshan Nezhad, A.H.(2023). Quality control of concrete structure by Schmidt hammer method. The fifth international conference and the sixth national conference on civil engineering, architecture, art and urban design.
- [33] ISO1920-7. (2004). Testing of concrete — Part 7: Non-destructive tests on hardened concrete.
- [34] Mirzaie Aliabadi, M. derakhshan Nezhad, A.H.(2023). Health monitoring of concrete structure using ultrasonic. The 7th International Conference on Research in Science and Engineering and the 4th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning in Asia.
- [35] DIN 1048.(2012). Standard test Concrete Impermeability Test ApparatusIm.