



Semnan University



Research Article

Experimental and Analytical Investigation of Metakaolin and Polypropylene Fiber Addition on Some Properties of Roller Compacted Concrete Pavement

Nasiri Rad, A. M.^a , Mostakhdemin Hosseini, M. R.^{b*}

^a Former M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Mahdishahr Branch, Islamic Azad University, Mahdishahr, I. R. Iran.

^b Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Mahdishahr Branch, Islamic Azad University, Mahdishahr, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-11-20

Revised: 2024-03-08

Accepted: 2024-03-13

Keywords:

Roller compacted concrete pavement;

Metakaolin powder;

Polypropylene fibers;

Compressive strength;

Tensile strength;

Water adsorption.

ABSTRACT

In this study, mechanical properties of roller compacted concrete pavement (RCCP) containing metakaolin (MK) with or without polypropylene fibers (PP) are experimentally and analytically investigated. For this purpose, 16 different mixes were designed and tested in the laboratory. Effect of using polypropylene fibers in 0, 0.05, 0.1 and 0.2 percent of cement volume with metakaolin powder in 0, 7.5, 15 and 22.5 percent of cement weight was investigated. Compressive strength, tensile strength and water adsorption were evaluated. Results showed that highest compressive strength occurs in combination of 0.1% of PP and 15% of MK that increases the compressive strength of 7 and 28 days respectively, by 51% and 25% compared to the reference sample. The tensile strength using the above combination increased by 42%, which is the highest increase in the tensile strength. By using 0.1% of PP and 22.5% of MK, maximum decrease in water adsorption (11%) was observed as compared to the reference sample. In this research, analytical formulas predicted properties of the RCCP and estimated optimal combination of the PP and MK.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32369.1657>

* Corresponding author.

E-mail address: MR.Mostakhdemin@iau.ac.ir

How to cite this article: Nasiri Rad, A. M., & Mostakhdemin Hosseini, M. R. (2023). Experimental and analytical investigation of metakaolin and polypropylene fiber addition on some properties of roller compacted concrete pavement. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(4), 127-144. doi: [10.22075/jtie.2024.32369.1657](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32369.1657)

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

ارزیابی آزمایشگاهی و بررسی تحلیلی روسازی بتن غلتکی تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن و پودر متاکائولن

امیرمحمد نصیری راد^۱، محمدرضا مستخدمین حسینی^{۲*}

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، واحد مهندسی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مهدیشهر، ایران
^۲استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مهندسی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مهدیشهر، ایران

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی و تحلیل رفتار روسازی بتن غلتکی تقویت‌شده با کمک الیاف پلی پروپیلن و پودر متاکائولن می‌باشد. به منظور ارزیابی این هدف، ۱۶ طرح اختلاط متفاوت ساخته شد. در این طرح‌ها، اثر استفاده از الیاف پلی پروپیلن در مقادیر صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد حجمی سیمان و پودر متاکائولن در مقادیر صفر، ۷/۵، ۱۵ و ۲۲/۵ درصد وزنی سیمان به صورت مجزا و همزمان در بتن غلتکی بررسی گردید. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. نتایج بررسی نشانگر وجود بیشترین مقاومت فشاری در مصرف همزمان ۰/۱ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۱۵ درصد متاکائولن است. در این ترکیب، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به نمونه مرجع به ترتیب به میزان ۵۱ و ۲۵ درصد افزایش یافت. ترکیب فوق، بیشترین افزایش (۴۲ درصد) در مقاومت کششی را نیز نشان داد. بیشترین کاهش جذب آب به میزان ۱۱ درصد در مصرف همزمان ۰/۱ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۲۲/۵ درصد متاکائولن نسبت به نمونه مرجع رخ داد. فرمول‌های تحلیلی مقاومت و جذب آب در بتن غلتکی به صورت توابع دو متغیره از متاکائولن و الیاف پلی پروپیلن به خوبی خواص بتن غلتکی و درصد بهینه استفاده از ترکیبات فوق را پیش‌بینی نمود.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

واژگان کلیدی:

روسازی بتن غلتکی،

الیاف پلی پروپیلن،

پودر متاکائولن،

مقاومت فشاری،

مقاومت کششی،

جذب آب.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32369.1657>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: MR.Mostakhdemin@iauo.ac.ir

استناد به این مقاله: نصیری راد، امیر محمد، & مستخدمین حسینی، محمدرضا. (۱۴۰۲). ارزیابی آزمایشگاهی و بررسی تحلیلی روسازی بتن غلتکی تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن و پودر متاکائولن. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۹(۴)، ۱۴۴-۱۲۷.

doi: [10.22075/jtie.2024.32369.1657](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32369.1657)

۱. مقدمه

بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی جاده‌ها (RCCP) یک ترکیب بتنی با اسلامپ صفر است که معمولاً توسط فینیشرهای آسفالت (با تغییراتی در شمشه، مخزن و...) جای‌دهی شده و به وسیله غلتک‌های سنگین فلزی و چرخ لاستیکی متراکم می‌شود. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد بتن غلتکی تازه، اسلامپ بسیار کم (در حدود صفر) آن است. این ویژگی، امکان تحکیم مناسب و دستیابی به ویژگی‌های خاص را فراهم می‌کند (ACI207.5R, ۲۰۰۴). ترکیبات RCCP مانند بتن معمولی شامل ماسه و شن (با حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر)، مواد سیمانی، آب و گاهی مواد افزودنی می‌باشد. اما برخلاف بتن معمولی، این بتن خشک‌تر است، تا حدی که بتواند توسط غلتک‌های ارتعاشی متراکم شود (واحدی‌فرد و همکاران، ۲۰۱۰). فرآیند استفاده از مواد پوزولانی در بتن در سال‌های اخیر رواج یافته و انتخاب هر پوزولان بر اساس استاندارد و عملکرد بتن و همچنین در دسترس بودن پوزولان‌ها در هر پروژه می‌باشد. بر طبق آیین‌نامه ASTM (۲۰۰۸) پوزولان‌ها مواد سیلیسی یا سیلیس آلومینیومی هستند که به تنهایی خاصیت چسبندگی نداشته و یا خاصیت چسبندگی کمی دارند. این مصالح در حالت گرد شدن (ذرات ریز) و در مجاورت رطوبت و حرارت معمولی، طی واکنش‌های شیمیایی با هیدروکسید کلسیم، ترکیباتی با خاصیت سیمانی به وجود می‌آورند. نحوه استفاده از پوزولان در بتن در دستورالعمل اجرایی ACI 232.2R-18 (۲۰۱۸) تدوین شده است. متاکائولن (MK) یک ماده پوزولانی بوده که از کائولن‌های تصفیه‌شده و کلسینه‌شده در شرایط خاص تشکیل می‌شود. MK یک ماده پوزولانی بسیار کارآمد است و از طریق واکنش پوزولانی، سیلیکات کلسیم و هیدرات‌های آلومینوسیلیکات کلسیم را تشکیل می‌دهد. این ماده، با افزایش مقاومت و کاهش زمان گیرش، کیفیت بتن را بهبود بخشیده و نشان داده که یک

عنصر قابل دوام برای ساخت بتن است (دوبی و همکاران، ۲۰۱۵). واکنش اصلی بین متاکائولن و هیدروکسید کلسیم به دلیل هیدراتاسیون سیمان در حضور آب رخ می‌دهد. این واکنش باعث تولید ژل سیمانی CSH بیشتر و همچنین ترکیبات کریستالی مانند هیدرات آلومینات کلسیم و هیدرات‌های آلومینیوم سیلیکات (C2ASH8, C4AH13, C3AH6) می‌شود (ال دیادامونی و همکاران، ۲۰۱۶).

الیاف پلی‌پروپیلن (PP)، از جمله جدیدترین الیاف مصنوعی تولید شده در دنیا است که برای نخستین بار توسط گروهی از مهندسين آمریکا در سال ۱۹۶۵ برای ساخت بتن مقاوم در برابر انفجار تولید شد و مورد استفاده قرار گرفت. با گذشت زمان، استفاده از این الیاف بیشتر شد و امروزه به یکی از محبوب‌ترین الیاف با کاربرد گسترده تبدیل شده است. همچنین، این الیاف دارای وزن سبک و استحکام زیاد می‌باشد. از آنجا که اکثر روسازی‌های بتن غلتکی در معرض عوامل جوی، رطوبت و بارهای ناشی از ترافیک قرار می‌گیرند، به تدریج دچار استهلاک شده و بروز خرابی در آنها اجتناب‌ناپذیر است. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در محیط‌های کلریدی، نفوذ یون کلر به درون بتن سبب خوردگی تدریجی فولاد شده و در نتیجه باعث کاهش مقاومت و دوام سازه می‌گردد. یکی از راه‌حل‌های مناسب برای کاهش آسیب‌های ناشی از تهاجم اسیدی، کلریدی، سولفاته، کربوناسیون و واکنش‌های قلیایی، استفاده از موادی است که نسبت به این عوامل خورنده حساسیت کمتر و مقاومت بیشتری داشته باشند و الیاف PP می‌توانند انتخاب مناسبی در این خصوص باشند (توتونچی و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، الیاف PP دارای مقاومت زیاد در برابر حرارت، مقاومت در برابر رطوبت و خواص الکتریکی مناسب می‌باشد. با توجه به سازگاری خوب الیاف PP با بتن، بتن به راحتی خواص الیاف را کسب می‌نماید. مزیت دیگر استفاده از الیاف PP نسبت به سایر

شده توسط دوبی و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان داد که وقتی MK جایگزین بخش جزئی از سیمان پرتلند در بتن شود، مقاومت فشاری بتن را بهبود می‌بخشد. استفاده از ۱۰ درصد جایگزینی MK به جای سیمان در بتن، سبب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۲۱/۶۷ درصد شد. استفاده از درصدهای بیشتر این پوزولان سبب کاهش مقاومت بتن گردید و مقاومت‌های بتن در حالت استفاده از صفر و ۲۰ درصد جایگزینی این پوزولان تقریباً با یکدیگر برابر شد. حسن و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند که استفاده از ۲۰ درصد جایگزینی MK به جای سیمان روی عملکرد دوام بتن خودتراکم تأثیر قابل توجهی دارد. نتایج تحقیقات حمزه و الشدید (۲۰۰۸) نشان داد که افزودن MK به بتن غلتکی سبب بهبود مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چگالی و مدول الاستیسیته بتن می‌شود. بر طبق این تحقیق، درصد بهینه استفاده از MK در بتن ۲۰ درصد است. علاوه بر این، بهبود خواص ذکر شده با افزایش سن بتن غلتکی افزایش یافت.

در خصوص استفاده از ترکیبات مختلف الیاف و به‌خصوص الیاف پلی‌پروپیلن (PP) در انواع مختلف بتن تحقیقاتی به شرح زیر انجام گردیده است. الیاف مختلف (فولادی، شیشه و PP) توسط اساکي و همکاران (۲۰۲۳) در بتن مسلح مورد استفاده قرار گرفتند. آنها نشان دادند که ترکیب الیاف فولادی و PP بیشترین اثر را در مقاومت تیرهای بتنی ایجاد می‌نماید. یازیچی و همکاران (۲۰۱۵) مخلوط‌های مختلف بتن غلتکی را با استفاده از مقادیر مختلف الیاف PP شامل صفر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد حجمی سیمان در یک متر مکعب بتن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که مصرف این الیاف باعث افزایش نسبت آب به سیمان می‌شود. همچنین، مصرف این حجم از الیاف باعث کاهش (حداکثر ۲۰ درصد) خواص مکانیکی بتن غلتکی در مقایسه با نمونه مرجع گردید. طبق گفته بنوآده و همکاران (۲۰۱۷)، هنگامی که الیاف PP در بتن غلتکی استفاده شود، مقاومت فشاری،

الیاف، عدم گلوله‌ای شدن در هنگام اختلاط بتن است. خاصیت آب‌گریز بودن الیاف باعث می‌شود که در هنگام اختلاط بتن، با خمیر سیمان خیس نشود و بنابراین آب اضافه‌ای در بتن مصرف نمی‌شود (ردی و همکاران، ۲۰۲۲). علی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی الیاف فلزی، شیشه و PP مورد استفاده در روسازی‌های بتنی پرداخته و نتیجه گرفتند که با استفاده از الیاف PP می‌توان روسازی‌های اقتصادی‌تر و سازگارتر با محیط‌زیست احداث کرد. اُزترک و اوزیورت (۲۰۲۲) با استفاده از الیاف فولادی و PP در طرح اختلاط روسازی بتنی نشان دادند که با توجه به مقاومت سایشی زیاد و عملکرد خوب بعد از ترک-خوردگی بتن به کمک این الیاف، می‌توان ضخامت لایه روسازی بتنی را به کمک این الیاف حداکثر تا ۲۷/۵ درصد کاهش داد. همچنین، الیاف مسلح‌کننده تأثیر قابل توجهی در به تأخیر انداختن و کاهش ترک‌های کششی در بتن دارند (السیق و همکاران، ۲۰۰۵). با توجه به ویژگی‌های ذکر شده، در این تحقیق، برای تقویت بتن غلتکی از الیاف PP به همراه پودر متاکائولن استفاده شده و تأثیرگذاری آن در خصوصیات مکانیکی نمونه‌های بتن غلتکی ارزیابی گردید.

۲. مطالعات پیشین

در گذشته، تحقیقات مختلفی در خصوص استفاده از پودر متاکائولن (MK) در انواع مختلف بتن انجام شده است. مورالی و سروتی (۲۰۱۲) مخلوط‌های بتنی را با جایگزین کردن پودر MK به جای بخشی از سیمان مصرفی مورد مطالعه قرار دادند. آنها صفر ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی از سیمان را توسط پودر MK در مخلوط‌های بتن جایگزین کردند. نتایج نشان داد که استفاده از ۷/۵ درصد MK سبب افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن به ترتیب برابر ۱۴/۲ و ۷/۹ و ۹/۳ درصد نسبت به نمونه مرجع می‌گردد. تحقیقات انجام

با یا بدون الیاف فولادی با افزایش سن افزایش یافت. ترکیب ۱۵ درصد از MK و ۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی بهترین ترکیب برای بتن غلتکی در سن ۹۰ روزگی گردید. همچنین، استحکام کششی با افزایش MK و الیاف در مخلوط افزایش یافت. نفوذپذیری به طور پیوسته با افزایش ترکیب MK و الیاف فولادی کاهش یافته و به حداکثر مقدار ۷۷/۹ درصد در ترکیب ۲۰ درصد MK و ۶۰ کیلوگرم الیاف فولادی رسید.

با توجه به اینکه تاکنون تحقیقات در خصوص اثر همزمان MK و PP بر عملکرد روسازی بتن غلتکی انجام نشده و تنها اثر یکی از این پارامترها بررسی گردیده است، تحقیق آزمایشگاهی حاضر می‌تواند شکاف علمی در مورد عملکرد روسازی بتن غلتکی حاوی MK و PP را برطرف نموده و به افزایش دانش در این حوزه منتهی شود. همچنین، مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی اثر همزمان این دو متغیر بر خواص روسازی بتن غلتکی، برای اولین بار در این پژوهش ارائه شده است.

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. خصوصیات مصالح

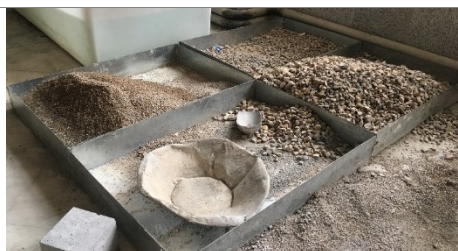
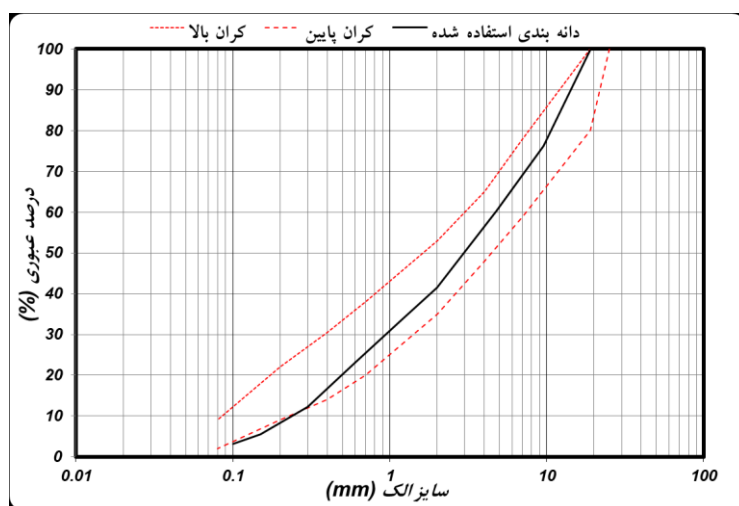
مصالح اصلی استفاده شده برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی در این تحقیق شامل شن و ماسه شکسته، سیمان پرتلند تیپ II و آب آشامیدنی می‌باشد. پودر متاکائولن به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن با هدف تسلیح بتن به مخلوط اضافه گردید. مصالح سنگی مصرفی که از شرکت سیمان سنگسر تهیه گردیده، عبوری از الک ۳/۴ بوده و دارای دانه‌بندی مناسب برای ساخت بتن غلتکی است. جذب آب مصالح سنگی ریزدانه ۶ درصد به‌دست آمد. به‌منظور دستیابی به حدود دانه‌بندی مشخص شده در ACI 211.3R (۲۰۰۹) برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی، دپوهای مصالح به تفکیک دانه‌بندی و درصد‌های مورد نیاز از هر کدام برآورد گردید. نتیجه ترکیب مصالح سنگی در شکل ۱

مقاومت کششی و استحکام خمشی را بهبود می‌بخشد. بر اساس بررسی نئوکلئوس و همکاران (۲۰۱۱)، با افزودن الیاف PP، چگالی و کارایی بتن غلتکی کاهش یافته و جذب آب به طور متناسب بهبود می‌یابد. افزودن این الیاف به طور قابل توجهی انقباض بتن غلتکی را کاهش می‌دهد. آنها به این نتیجه رسیدند که یک کیلوگرم بر متر مکعب از این نوع الیاف برای استفاده در بتن غلتکی برای افزایش خواص مختلف مفید است. مافی و همکاران (۲۰۲۳) مخلوط‌های مختلف روسازی بتن غلتکی را با استفاده از مقادیر مختلف الیاف PP شامل صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم بر متر مکعب بتن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مصرف یک کیلوگرم PP، بهترین مقاومت و دوام را در بتن ایجاد می‌نماید.

در خصوص استفاده از ترکیب همزمان الیاف و پوزولان در بتن غلتکی، پژوهش‌هایی به شرح زیر انجام یافته است. مدح‌خان و همکاران (۲۰۱۱)، مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی را با یا بدون استفاده از پوزولان طبیعی و الیاف مختلف مورد مطالعه قرار دادند. مقدار ۱۵ الی ۳۰ درصد سیمان توسط این پوزولان‌ها در مخلوط‌های بتن جایگزین شد. مقادیر ۳۰، ۴۵ و ۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی و PP در مخلوط‌های مختلف اضافه گردید. نتایج آزمایش نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه هیچ افزایشی در مقاومت فشاری از خود نشان ندادند. از سوی دیگر، استفاده از الیاف PP در مخلوط‌های با یا بدون پوزولان منجر به افزایش مقاومت فشاری گردید. نتایج همچنین نشان داد که افزودن الیاف PP برخلاف الیاف فولادی، مدول گسیختگی را کاهش می‌دهد. در بررسی آزمایشگاهی دیگر توسط ابوبکر و همکاران (۲۰۲۲)، ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی و دوام بتن غلتکی حاوی MK با یا بدون الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، هفت مخلوط مختلف در آزمایشگاه طراحی و آزمایش شدند. مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی MK

شرکت پاژن شیمی تهیه شده و دارای قطر ۳۵ میکرون، رنگ سفید، وزن مخصوص 0.91 g/cm^3 و مقاومت کششی 400 MPa می باشد. شکل ۲، پودر متاکائولن و الیاف پلی پروپیلن مصرفی در این تحقیق را نشان می دهد.

ارائه شده است. در ساخت بتن از آب شهری شهر مهدیشهر در استان سمنان استفاده گردید. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II (سیمان شاهرود) و متاکائولن تهیه شده از شرکت جهان پودرگناباد در جدول ۱ ارائه شده است. الیاف پلی پروپیلن ۱۲ میلی متری از



شکل ۱. دانه بندی ترکیب مصالح سنگی



(ب)

(الف)

شکل ۲. مصالح مورد استفاده برای ساخت نمونه های مورد آزمایش: الف) پودر متاکائولن و ب) الیاف پلی پروپیلن

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی مواد اولیه (درصد)

| C3A | C2S | C3S | F.CaO | IR | L.O.I | K2O | Na2O | So3 | mgO | CaO | Fe2O3 | Al2SO3 | SiO2 | |
|-----|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|--------|-------|-----------|
| 5.3 | 20.7 | 53.5 | 1.5 | 0.44 | 2.35 | 0.48 | 0.41 | 2.57 | 1.36 | 63.65 | 3.91 | 4.49 | 21.17 | سیمان |
| - | - | - | - | - | 1.2 | 4.68 | 0.97 | 1.36 | 0.67 | 0.66 | 2.56 | 22.87 | 64.51 | متاکائولن |

۲-۳. سهم ترکیبات

با توجه به هدف طراحی روسازی بتن غلتکی راه‌ها، از بین دو روش موجود برای تعیین نسبت‌های مخلوط که شامل آزمایش‌های روانی بتن و روش‌های تراکم خاک می‌باشد، روش دوم برای نمونه‌های با حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است. نسبت‌های اختلاط با استفاده از روش تراکم خاک و مطابق استاندارد ACI 211.3R (۲۰۰۹) تعیین شده است. بدین منظور، برای تعیین رطوبت بهینه مورد نیاز ساخت نمونه‌های بتن غلتکی، روش استاندارد ASTM D1557 (۲۰۱۳) مورد استفاده قرار گرفت. میزان سیمان مصرفی در بتن غلتکی بین ۱۰ تا ۱۷ درصد وزن خشک مصالح سنگی می‌باشد (ACI 211.3R R09, ۲۰۰۹). در تحقیق حاضر، این نسبت برابر با ۱۷ درصد در نظر گرفته شد.

بتن غلتکی با ترکیبات مختلفی از MK و PP ساخته شد. بدین منظور، پودر MK با صفر، ۷/۵، ۱۵ و ۲۲/۵ درصد وزنی سیمان و الیاف PP با صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد حجمی سیمان در هر طرح به صورت مستقل و توأمان در بتن غلتکی مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش، ۱۶ طرح اختلاط در نظر گرفته شد و در هر طرح ۳ نمونه به منظور سنجش مقاومت فشاری ۷ روزه،

سه نمونه به منظور سنجش مقاومت فشاری ۲۸ روزه، ۳ نمونه به منظور سنجش مقاومت کششی ۲۸ روزه و یک نمونه به منظور سنجش جذب آب پس از ۲۸ روز و در مجموع ۱۶۰ نمونه ساخته شد. در جدول ۲، نسبت‌های هر طرح اختلاط بیان شده است.

۳-۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

نسبت‌های اختلاط اجزای تشکیل‌دهنده بتن (جدول ۲) با استفاده از میکسر آزمایشگاهی مخلوط گردید. جهت ساخت نمونه‌ها ابتدا اختلاط سنگ‌دانه‌ها از درشت به ریز، سپس سیمان و در انتها الیاف به تدریج به ملات خشک افزوده شد تا گلوله‌ای نگردد. آب طرح نیز در سه مرحله و قبل از افزودن الیاف به مصالح اضافه گردید. تراکم مناسب نمونه‌های بتن غلتکی در آزمایشگاه انجام شد. قالب‌های بتن‌ریزی شده به مدت ۲۴ ساعت در محیط استاندارد و با پوشش گونی مرطوب و روکش پلاستیکی نگهداری شده و پس از خروج از قالب مطابق شکل ۳، در حوضچه آب تا سن مورد نظر نگهداری گردیدند. جهت انجام مقاومت فشاری و جذب آب، از نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵ و جهت انجام مقاومت کششی از نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰ استفاده شد.



(الف)



(ب)

شکل ۳. الف) نمونه‌ها درون قالب‌ها و ب) نمونه‌ها در حوضچه عمل‌آوری

جدول ۲. نسبت اختلاط نمونه‌ها (کیلوگرم برای یک متر مکعب بتن)

| شن (kg) | ماسه (kg) | آب (kg) | سیمان (kg) | پودر متاکائولن (MK) | | الیاف پلی‌پروپیلن (PP) | | طرح اختلاط |
|------------|--------------|------------|---------------|---------------------|-----------|------------------------|----------|---------------|
| | | | | وزن (kg) | درصد وزنی | درصد حجمی | وزن (kg) | |
| 862.6 | 1020.8 | 108 | 301.34 | 0 | 0 | 0 | 0 | PP0-MK0 (REF) |
| | | | 278.74 | 7.5 | 22.60 | 0 | 0 | PP0-MK7 |
| | | | 256.14 | 15 | 45.20 | 0 | 0 | PP0-MK15 |
| | | | 233.54 | 22.5 | 67.80 | 0 | 0 | PP0-MK22 |
| | | | 301.34 | 0 | 0 | 0.05 | 0.53 | PP5-MK0 |
| | | | 278.74 | 7.5 | 22.60 | 0.05 | 0.53 | PP5-MK7 |
| | | | 256.14 | 15 | 45.20 | 0.05 | 0.53 | PP5-MK15 |
| | | | 233.54 | 22.5 | 67.80 | 0.05 | 0.53 | PP5-MK22 |
| | | | 301.34 | 0 | 0 | 0.1 | 1.05 | PP10-MK0 |
| | | | 278.74 | 7.5 | 22.60 | 0.1 | 1.05 | PP10-MK7 |
| | | | 256.14 | 15 | 45.20 | 0.1 | 1.05 | PP10-MK15 |
| | | | 233.54 | 22.5 | 67.80 | 0.1 | 1.05 | PP10-MK22 |
| | | | 301.34 | 0 | 0 | 0.2 | 2.1 | PP20-MK0 |
| | | | 278.74 | 7.5 | 22.60 | 0.2 | 2.1 | PP20-MK7 |
| | | | 256.14 | 15 | 45.20 | 0.2 | 2.1 | PP20-MK15 |
| | | | 233.54 | 22.5 | 67.80 | 0.2 | 2.1 | PP20-MK22 |

۳-۴. روش انجام آزمایش‌ها

(کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)، P حداکثر بار اعمال شده (کیلوگرم)، L طول نمونه (سانتی‌متر) و D قطر نمونه (سانتی‌متر) می‌باشد. میزان جذب آب نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C642 (۲۰۱۳) اندازه‌گیری شد. در این آزمایش، پس از بازه زمانی ۲۸ روز، نمونه‌ها از آب خارج و سپس درون دستگاه آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند. نمونه‌ها وزن شده و سپس به مدت ۷۲ ساعت درون آب غوطه‌ور گردیدند. پس از این بازه زمانی، نمونه‌ها از آب خارج، سطح روی آنها خشک و مجدداً وزن شده تا براساس رابطه (۲) میزان جذب آب بلندمدت نمونه‌های بتنی محاسبه گردد.

$$\text{درصد جذب آب} = \left[\frac{M - M_0}{M_0} \right] \times 100 \quad (2)$$

که، M جرم نمونه خشک شده توسط گرمکن و M_0 جرم نمونه با سطح خشک بعد از غوطه‌وری و اشیاع است.

مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی 15×15 در سنین ۷ و ۲۸ روزه مطابق استاندارد BS-1881-part-116 (۱۹۸۳) انجام شد. برای انجام این آزمایش، از جک هیدرولیکی دیجیتال استفاده گردید (شکل ۴-الف) و با میانگین‌گیری از نتایج هر سه نمونه، میزان مقاومت نهایی هر طرح ثبت شد. آزمایش مقاومت کششی بتن در سن ۲۸ روزه مطابق استاندارد ASTM C496 (۲۰۱۳) به روش برزیلی انجام شد (شکل ۴-ب). در این روش، با قرار دادن نمونه‌های استوانه‌ای به صورت افقی درون دستگاه مقاومت فشاری و اعمال ضربه از عرض نمونه، نمونه‌ها به دو نیم تقسیم شده و نیروی شکست نمونه ثبت می‌گردد. سپس، مقاومت کششی با استفاده از فرمول (۱) محاسبه می‌شود. در رابطه (۱)، T مقاومت کششی

$$T = 2.P / (\pi . L . D) \quad (1)$$



(ب)

(الف)

شکل ۴. مراحل انجام آزمایش‌ها: الف) آزمایش مقاومت فشاری و ب) آزمایش مقاومت کششی

۴. نتایج آزمایش‌ها

$$\Delta f'_c = \left[\frac{f'_c - f'_{c,REF}}{f'_{c,REF}} \right] \times 100 \quad (۳)$$

شکل ۶، تغییرات افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، بیشترین مقدار افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در ۰/۱ درصد از PP و ۱۵ درصد از MK به مقدار ۲۵ درصد حاصل گردید (شکل ۶- الف). همچنین، بیشترین مقدار افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه در ۰/۱ درصد از PP و ۱۵ درصد از MK به مقدار ۵۱ درصد به ثبت رسید (شکل ۶- ب). بتن‌های غلتکی در مرحله تولید بسته به شیوه آماده سازی، دارای حفره‌های هوا در داخل ملات می‌باشند. افزودن پوزولان‌ها سبب کاهش این حفرات و افزودن چسبندگی آنها شده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. بررسی مقاومت فشاری در درصد‌های مختلف استفاده از MK و PP نشان‌دهنده تأثیر مثبت و به‌سزای استفاده از الیاف پلی پروپیلن به همراه پودر متاکائولن در بتن غلتکی است.

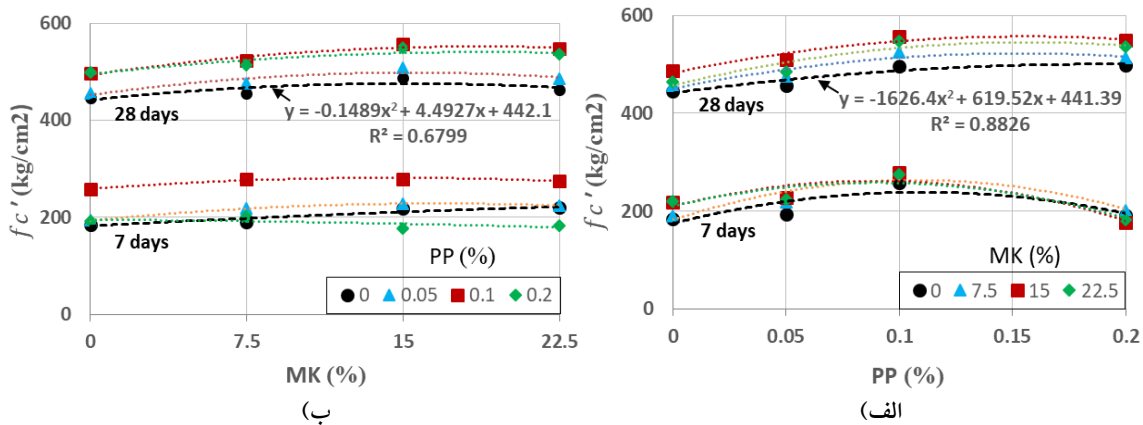
در جدول ۴، مقادیر میانگین و انحراف معیار مقاومت کششی ۲۸ روزه در کلیه طرح‌های اختلاط درج گردیده است. در شکل ۷ نمودار تغییرات مقاومت کششی (f_t) در درصد‌های مختلف استفاده از PP و MK در بتن

مقادیر میانگین و انحراف معیار وزن مخصوص و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه تمام طرح‌های اختلاط در جدول ۳ درج گردیده است. در شکل ۵، نمودار تغییرات مقاومت فشاری (f'_c) در درصد‌های مختلف استفاده از الیاف پلی پروپیلن (PP) و پودر متاکائولن (MK) در بتن غلتکی در سنین ۷ و ۲۸ روز نشان داده شده است. براساس این نمودار، با افزایش مقدار MK تا ۱۵ درصد، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه افزایش یافته و سپس با بالاتر رفتن مصرف MK این مقاومت‌ها کاهش می‌یابند (شکل ۵- الف). همچنین، با افزایش مقدار PP تا ۰/۱ درصد، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه افزایش یافته و با بالاتر رفتن مصرف PP این مقاومت‌ها کاهش می‌یابند (شکل ۵- ب). حداکثر مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نمونه PP10-MK15 به مقدار 558 kg/cm^2 به ثبت رسید. در جدول ۳، مقادیر افزایش مقاومت‌های ۷ و ۲۸ روزه طرح‌های مختلف نسبت به نمونه مرجع (REF) براساس رابطه (۳) محاسبه گردیده است. در رابطه (۳)، $f'_{c,REF}$ و f'_c به ترتیب مقاومت فشاری هر طرح، مقاومت فشاری نمونه مرجع و $\Delta f'_c$ افزایش مقاومت فشاری می‌باشد.

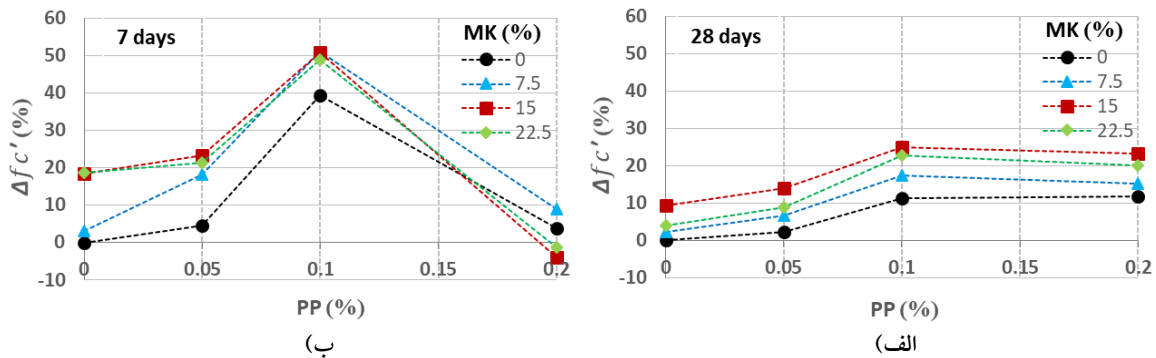
غلثکی در سن ۲۸ روز نشان داده شده است. براساس این نمودار، با افزایش مقدار MK تا ۱۵ درصد، مقاومت

جدول ۳. مقاومت فشاری و وزن مخصوص در استفاده از مقادیر مختلف متاکائولن و الیاف پلی پرو پیلن

| مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²) | | | مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ²) | | | وزن مخصوص خشک (kg/m ³) | | |
|--|--------------|---------|---|--------------|---------|------------------------------------|---------|------------|
| افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه (%) | انحراف معیار | میانگین | افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه (%) | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار | میانگین | طرح اختلاط |
| 0.0 | 2.94 | 446.0 | 0.0 | 1.25 | 185.0 | 23.66 | 2463 | REF |
| 2.2 | 0.47 | 455.7 | 3.0 | 2.49 | 190.6 | 11.90 | 2476 | PP0-MK7 |
| 9.3 | 1.70 | 487.7 | 18.4 | 0.82 | 219.0 | 15.68 | 2479 | PP0-MK15 |
| 4.0 | 1.70 | 463.9 | 18.8 | 2.36 | 219.7 | 13.53 | 2468 | PP0-MK22 |
| 2.2 | 1.41 | 456.0 | 4.6 | 2.45 | 193.6 | 17.53 | 2477 | PP5-MK0 |
| 6.7 | 1.41 | 476.0 | 18.2 | 2.49 | 218.7 | 22.05 | 2464 | PP5-MK7 |
| 14.1 | 2.16 | 509.0 | 23.2 | 0.82 | 228.0 | 10.34 | 2466 | PP5-MK15 |
| 8.8 | 1.89 | 485.4 | 21.5 | 0.47 | 224.7 | 11.22 | 2468 | PP5-MK22 |
| 11.3 | 3.30 | 496.3 | 39.5 | 2.16 | 258.0 | 14.49 | 2476 | PP10-MK0 |
| 17.5 | 2.83 | 524.0 | 50.8 | 2.05 | 279.0 | 14.77 | 2471 | PP10-MK7 |
| 25.0 | 1.25 | 557.7 | 51.0 | 2.16 | 279.4 | 19.62 | 2495 | PP10-MK15 |
| 22.8 | 1.70 | 547.7 | 49.0 | 0.47 | 275.7 | 16.57 | 2466 | PP10-MK22 |
| 11.8 | 1.25 | 498.7 | 3.9 | 3.40 | 192.2 | 14.49 | 2476 | PP20-MK0 |
| 15.2 | 2.16 | 514.0 | 9.0 | 0.47 | 201.7 | 12.02 | 2473 | PP20-MK7 |
| 23.2 | 1.70 | 549.4 | -4.0 | 3.27 | 177.6 | 17.38 | 2458 | PP20-MK15 |
| 20.2 | 1.63 | 536.0 | -1.2 | 2.36 | 182.7 | 6.60 | 2467 | PP20-MK22 |



شکل ۵. نمودار تغییرات مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در درصدهای مختلف: الف) MK و ب) PP



شکل ۶. نمودار تغییرات افزایش مقاومت فشاری: الف) ۲۸ روزه و ب) ۷ روزه

و Δf_t افزایش مقاومت کششی می باشد. شکل ۸، تغییرات افزایش مقاومت کششی را نشان می دهد. براساس این نمودار، بیشترین مقدار افزایش مقاومت کششی در ۰/۱ درصد از PP و ۱۵ درصد از MK به مقدار ۴۲ درصد حاصل گردید. در آخرین ستون جدول ۴، نسبت مقاومت کششی به فشاری در طرح های مختلف بیان شده که دارای میانگین ۸/۸۹ درصد می باشد که نزدیک به مقدار ۱۰ درصد بیان شده توسط آیین نامه ACI 207.5R (۲۰۰۴) می باشد.

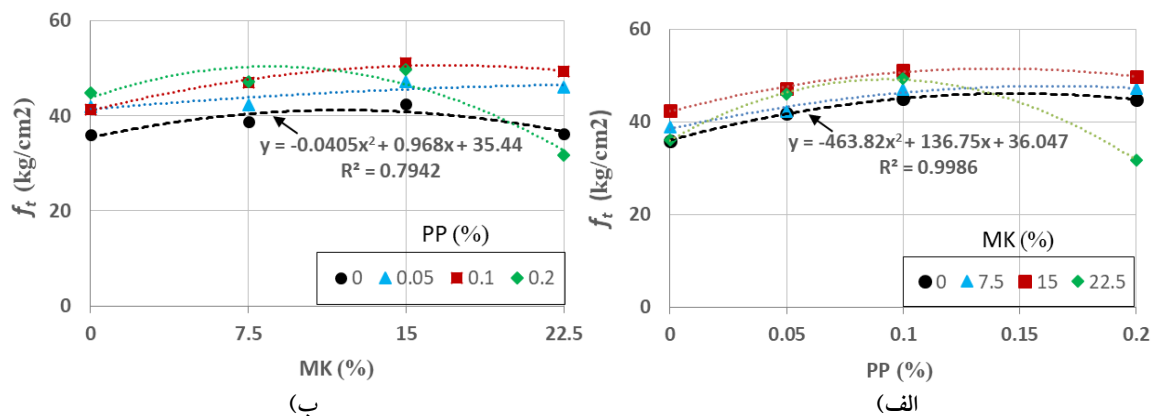
کششی افزایش یافته و سپس با بیشتر شدن مصرف MK، این مقاومت کاهش می یابد (شکل ۷- الف). همچنین، با افزایش مقدار PP تا ۰/۱ درصد، مقاومت کششی افزایش یافته و با بیشتر شدن مصرف PP، مقاومت کششی کاهش می یابد (شکل ۷- ب). حداکثر مقاومت کششی در نمونه PP10-MK15 به مقدار 51 kg/cm^2 به ثبت رسید. در جدول ۴، مقادیر افزایش مقاومت کششی در طرح های مختلف نسبت به نمونه مرجع (REF) براساس رابطه (۴) محاسبه شده است. در رابطه (۴)، f_t و $f_{t,REF}$ به ترتیب مقاومت کششی هر طرح و مقاومت کششی نمونه مرجع

$$\Delta f_t = \left[\frac{f_t - f_{t,REF}}{f_{t,REF}} \right] \times 100 \quad (4)$$

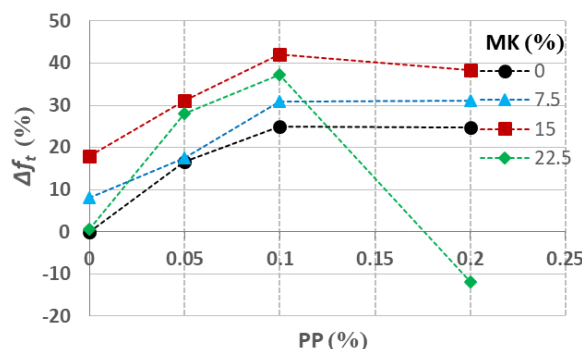
جدول ۴. مقاومت کششی در استفاده از مقادیر مختلف متاکائولن و الیاف پلی پروپیلن در بتن غلتکی

| نسبت مقاومت کششی به فشاری (%) | افزایش مقاومت کششی (%) | مقاومت کششی ۲۸ روزه (kg/cm^2) | | طرح اختلاط |
|----------------------------------|---------------------------|--|---------|------------|
| | | انحراف معیار | میانگین | |
| 8.07 | 0.0 | 0.87 | 36.0 | REF |
| 8.51 | 8.0 | 1.67 | 38.8 | PP0-MK7 |
| 8.69 | 18.0 | 1.57 | 42.4 | PP0-MK15 |
| 7.80 | 0.6 | 2.81 | 36.2 | PP0-MK22 |
| 9.19 | 16.6 | 2.47 | 41.9 | PP5-MK0 |
| 8.89 | 17.6 | 0.65 | 42.3 | PP5-MK7 |
| 9.27 | 31.2 | 2.15 | 47.2 | PP5-MK15 |
| 9.48 | 28.0 | 1.04 | 46.0 | PP5-MK22 |
| 9.05 | 24.9 | 2.79 | 44.9 | PP10-MK0 |
| 8.99 | 30.9 | 2.57 | 47.1 | PP10-MK7 |
| 9.16 | 42.1 | 2.32 | 51.1 | PP10-MK15 |
| 9.02 | 37.3 | 0.84 | 49.4 | PP10-MK22 |
| 9.00 | 24.7 | 2.33 | 44.9 | PP20-MK0 |
| 9.18 | 31.1 | 1.00 | 47.2 | PP20-MK7 |
| 9.06 | 38.4 | 1.18 | 49.8 | PP20-MK15 |
| 5.91 | -11.9 | 8.45 | 31.7 | PP20-MK22 |

میانگین: 8.89



شکل ۷. نمودار تغییرات مقاومت کششی ۲۸ روزه در درصدهای مختلف: الف) MK و ب) PP



شکل ۸. نمودار تغییرات افزایش مقاومت کششی

به ترتیب مقدار جذب آب در هر طرح و جذب آب نمونه مرجع و ΔWa کاهش جذب آب می‌باشد.

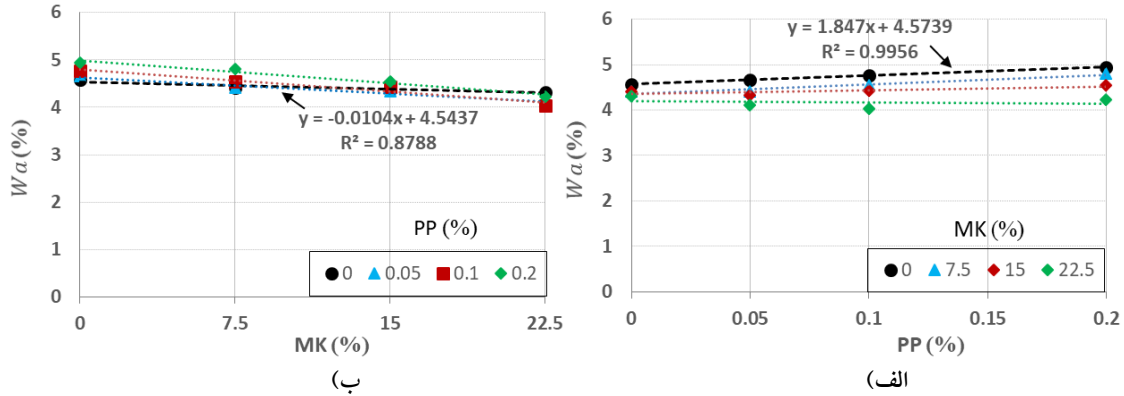
$$\Delta Wa = \left[\frac{Wa - Wa_{REF}}{Wa_{REF}} \right] \times 100 \quad (5)$$

در شکل ۸، تغییرات کاهش جذب آب نشان داده شده است. حداکثر کاهش جذب آب در نمونه PP10- MK22 به مقدار ۱۱ درصد به دست آمد. باید توجه داشت که هر چه میزان جذب آب در بتن کمتر باشد، مطلوب‌تر است. با توجه به اینکه استفاده از الیاف پلی- پروپیلن درون بتن باعث افزایش میزان جذب آب در بتن می‌گردد، افزودن الیاف به همراه متاکائولن می‌تواند عملکرد بتن حاوی الیاف را در برابر جذب آب بهبود بخشیده و موجب بهبود عملکرد بتن در شرایط مختلف گردد.

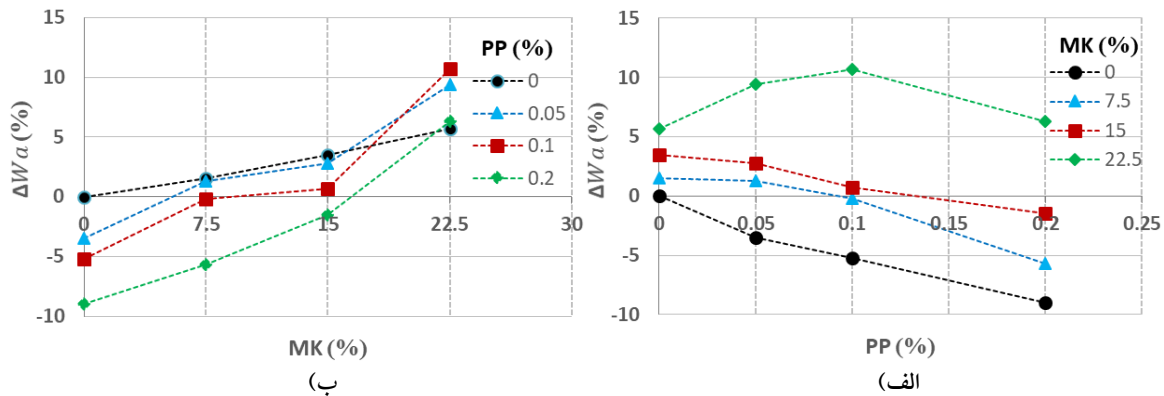
جدول ۵، مقادیر جذب آب بلندمدت کلیه طرح‌های اختلاط را نشان می‌دهد. در شکل ۹، نمودار تغییرات جذب آب در درصدهای مختلف استفاده از PP و MK در بتن غلتکی در سن ۲۸ روز نشان داده شده است. بر اساس این نمودار، با افزایش مقدار MK، جذب آب در درصدهای مختلف PP کاهش می‌یابد (شکل ۱۰-ب). همچنین، با افزایش مقدار PP به طور کلی جذب آب افزایش می‌یابد. البته تنها در حالت استفاده از ۲۲/۵ درصد از MK، جذب آب تا ۰/۱ درصد از PP روند کاهشی داشته و سپس افزایش می‌یابد (شکل ۱۰-الف). در جدول ۵، مقادیر کاهش جذب آب در طرح‌های مختلف نسبت به نمونه مرجع (REF) براساس رابطه (۵) محاسبه گردیده است. در رابطه (۵)، Wa_{REF} و Wa

جدول ۵. جذب آب در استفاده از مقادیر مختلف پودر متاکائولن و الیاف پلی پروپیلن در بتن غلتکی

| کاهش جذب آب (%) | جذب آب بلندمدت (%) | وزن مرطوب (kg) | وزن خشک (kg) | طرح اختلاط |
|-----------------|--------------------|----------------|--------------|------------|
| 0.0 | 4.58 | 8.46 | 8.09 | REF |
| 1.5 | 4.51 | 8.52 | 8.16 | PP0-MK7 |
| 3.5 | 4.42 | 8.53 | 8.17 | PP0-MK15 |
| 5.7 | 4.32 | 8.46 | 8.11 | PP0-MK22 |
| -3.5 | 4.74 | 8.54 | 8.16 | PP5-MK0 |
| 1.3 | 4.52 | 8.76 | 8.39 | PP5-MK7 |
| 2.8 | 4.45 | 8.43 | 8.08 | PP5-MK15 |
| 9.4 | 4.15 | 8.63 | 8.29 | PP5-MK22 |
| -5.2 | 4.82 | 8.78 | 8.38 | PP10-MK0 |
| -0.2 | 4.59 | 8.73 | 8.35 | PP10-MK7 |
| 0.7 | 4.55 | 8.71 | 8.34 | PP10-MK15 |
| 10.7 | 4.09 | 8.52 | 8.19 | PP10-MK22 |
| -9.0 | 4.99 | 8.5 | 8.1 | PP20-MK0 |
| -5.7 | 4.84 | 8.51 | 8.12 | PP20-MK7 |
| -1.5 | 4.65 | 8.75 | 8.37 | PP20-MK15 |
| 6.3 | 4.29 | 8.63 | 8.28 | PP20-MK22 |



شکل ۹. نمودار تغییرات جذب آب در درصدهای مختلف: الف) MK و ب) PP



شکل ۱۰. نمودار تغییرات کاهش جذب آب در درصدهای مختلف: الف) MK و ب) PP

برازش با دقت مناسب تر نقاط در هر حالت است. در روابط ارائه شده در شکل ۵ برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه، در هر دو حالت الف و ب (PP تنها یا MK تنها) عرض از مبدأ با دقت ۹۹ درصد برابر با مقاومت فشاری نمونه مرجع ($f'_{c,REF} = 44.6 \text{ kg/cm}^2$) می باشد. با استفاده از این مفهوم و ترکیب دو رابطه شکل ۵، مدل پیش بینی مقاومت فشاری (۶) به صورت یک تابع دومتغیره شامل PP و MK حاصل می گردد. به طریق مشابه، برای مقاومت کششی و جذب آب نیز می توان روابط پیشنهادی (۷) و (۸) را جهت پیش بینی این پارامترها ارائه نمود.

$$f'_c = -1626.4PP^2 + 619.5PP - 0.1489MK^2 + 4.4927MK + f'_{c,REF} \quad (6)$$

$$f_t = -463.82PP^2 + 136.75PP - 0.04058MK^2 + 0.968MK + f_{t,REF} \quad (7)$$

$$Wa = 1.847PP - 0.0104MK + Wa_{REF} \quad (8)$$

۵. روابط تحلیلی

در این قسمت، روابط تحلیلی جهت پیش بینی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب روسازی بتن غلتکی ارائه می شود. هدف، محاسبه روابطی است تا برای ترکیبات متفاوتی از PP و MK در بتن غلتکی بتوان مقادیر مقاومت و جذب آب را محاسبه نمود. بدین منظور روابطی با دقت کافی در حالت استفاده از PP تنها یا MK تنها در شکل های ۵، ۷ و ۹ ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می شود، در حالت مقاومت فشاری و کششی (شکل های ۵ و ۷) این روابط از درجه دوم و در حالت جذب آب (شکل ۹) از درجه اول می باشد. علت آن

مقاومت فشاری در بتن غلتکی به ترتیب ۰/۱۹ و ۱۵/۱ درصد و برای مقاومت کششی در بتن غلتکی به ترتیب ۰/۱۵ و ۱۱/۹ درصد می‌باشد.

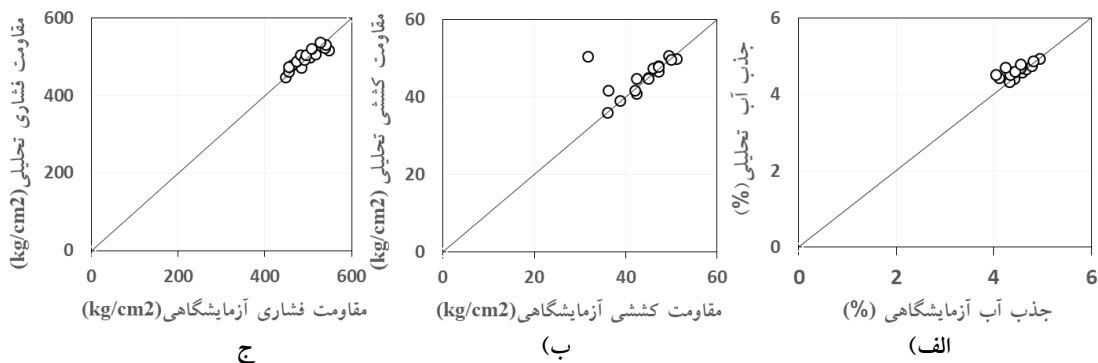
$$\frac{\partial f'_c}{\partial PP} = -2 * 1626.4PP + 619.5 = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial f'_c}{\partial MK} = -2 * 0.1489MK + 4.492 = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial f_t}{\partial PP} = -2 * 463.82PP + 136.75 = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial f_t}{\partial MK} = -2 * 0.0405MK + 0.968 = 0 \quad (12)$$

چنانچه از روابط فوق استفاده نموده و مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب طرح‌های مختلف محاسبه شود، نتایج تحلیلی جدول ۶ به دست می‌آید. با توجه به شکل ۱۱ که نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در برابر هم رسم شده است می‌توان دریافت که نتایج تحلیلی با دقت بالایی قابل اعتماد می‌باشند. جهت محاسبه اکسترمم معادلات (۶) و (۷)، مشتقات جزئی این معادلات به ترتیب نسبت به متغیرهای PP و MK محاسبه و مساوی صفر قرار داده می‌شود. بر اساس معادلات (۹) تا (۱۲)، درصد بهینه PP و MK برای



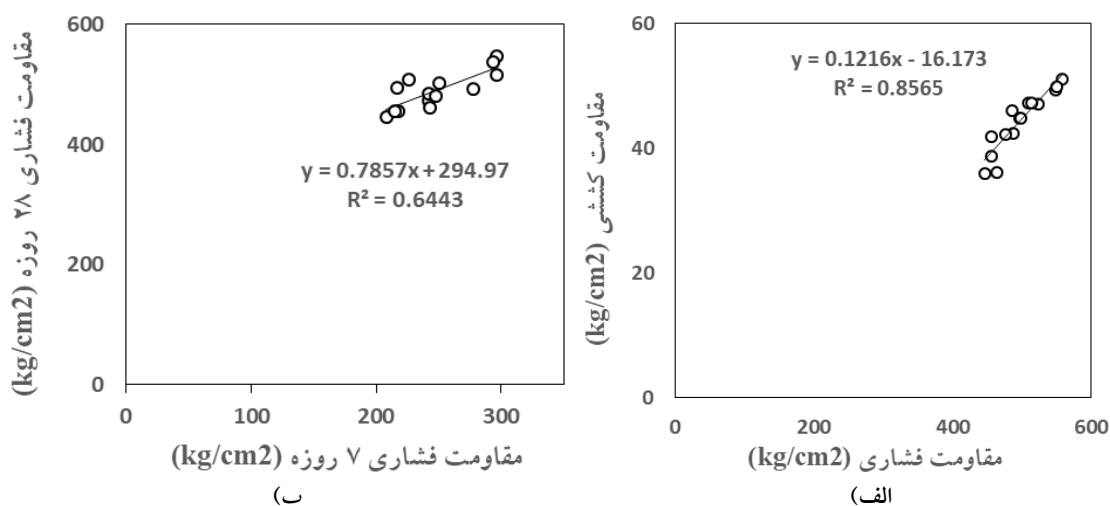
شکل ۱۱. نمودار تغییرات نتایج تحلیلی در برابر نتایج آزمایشگاهی: الف) مقاومت فشاری، ب) مقاومت کششی و ج) جذب آب

جدول ۶. نتایج مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب تحلیلی و آزمایشگاهی

| طرح اختلاط | مقاومت فشاری (kg/cm ²) | | مقاومت کششی (kg/cm ²) | | جذب آب (%) | |
|------------|------------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|------------|------------|
| | تحلیلی | آزمایشگاهی | تحلیلی | آزمایشگاهی | تحلیلی | آزمایشگاهی |
| REF | 446.0 | 446.40 | 36.0 | 36.00 | 4.58 | 4.58 |
| PP0-MK7 | 455.7 | 461.15 | 38.8 | 39.06 | 4.50 | 4.51 |
| PP0-MK15 | 487.7 | 471.72 | 42.4 | 40.98 | 4.42 | 4.42 |
| PP0-MK22 | 463.9 | 478.09 | 36.2 | 41.76 | 4.35 | 4.32 |
| PP5-MK0 | 456.0 | 473.31 | 41.9 | 41.68 | 4.67 | 4.74 |
| PP5-MK7 | 476.0 | 488.06 | 42.3 | 44.74 | 4.59 | 4.52 |
| PP5-MK15 | 509.0 | 498.63 | 47.2 | 46.66 | 4.52 | 4.45 |
| PP5-MK22 | 485.4 | 505.00 | 46.0 | 47.44 | 4.44 | 4.15 |
| PP10-MK0 | 496.3 | 492.09 | 44.9 | 45.04 | 4.76 | 4.82 |
| PP10-MK7 | 524.0 | 506.84 | 47.1 | 48.10 | 4.69 | 4.59 |
| PP10-MK15 | 557.7 | 517.40 | 51.1 | 50.02 | 4.61 | 4.55 |
| PP10-MK22 | 547.7 | 523.78 | 49.4 | 50.80 | 4.53 | 4.09 |
| PP20-MK0 | 498.7 | 505.25 | 44.9 | 44.80 | 4.95 | 4.99 |
| PP20-MK7 | 514.0 | 520.00 | 47.2 | 47.86 | 4.87 | 4.84 |
| PP20-MK15 | 549.4 | 530.56 | 49.8 | 49.78 | 4.79 | 4.65 |
| PP20-MK22 | 536.0 | 536.94 | 31.7 | 50.56 | 4.72 | 4.29 |

تغییرات مقاومت کششی برحسب مقاومت فشاری نشانی داده شده است. چنانچه ملاحظه می شود، معادله خطی $y = 0.12x - 16.17$ رابطه نسبتاً خوبی بین این دو پارامتر ($R^2=0.86$) برقرار کرده است.

در شکل ۱۲- الف، تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه برحسب مقاومت فشاری ۷ روزه نشان داده شده است. معادله خطی ارائه شده در این شکل، بهترین ارتباط بین مقاومت های ۷ و ۲۸ روزه را در بتن غلتکی شامل PP و MK نشان می دهد. همچنین، در شکل ۱۲- ب،



شکل ۱۲. الف) تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه با مقاومت فشاری ۷ روزه و ب) تغییرات مقاومت کششی با مقاومت فشاری

تحقیق حاضر، درصد بهینه PP در مقاومت فشاری، ۰/۱۹ درصد و در مقاومت کششی، ۰/۱۵ درصد به دست آمد. در تحقیق حاضر، درصد بهینه در حضور همزمان این دو پارامتر ۰/۱ و ۱۵ درصد به ترتیب برای PP و MK به دست آمد.

مقاومت بتن غلتکی حاوی MK در این پژوهش و تحقیقات قبلی در جدول ۸ مقایسه گردیده است. چنانچه ملاحظه می شود، درصد افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در محدوده ۱۴ الی ۲۵ درصد (در این تحقیق ۲۵ درصد) و درصد افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه در محدوده ۵۱ الی ۵۳ درصد (در این تحقیق ۵۱ درصد) است. چنانچه نتایج نشان می دهد، افزایش مقاومت در سنین پایین بسیار قابل توجه بوده و با گذشت زمان کاهش می یابد.

۶. مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین

جدول ۷ به مقایسه درصد بهینه الیاف پلی پروپیلن و پودر متاکائولن در بتن غلتکی در تحقیق حاضر و تحقیقات پیشین پرداخته است. البته در پژوهش های گذشته اثر همزمان استفاده از این دو ماده بررسی نشده است. ابوبکر و همکاران (۲۰۲۲) و حمزه و الشدید (۲۰۰۸) درصد بهینه در حالت استفاده از فقط MK در بتن غلتکی را ۲۰ درصد به دست آوردند و براساس نتایج تحقیق حاضر درصد بهینه MK در مقاومت فشاری، ۱۵ درصد و در مقاومت کششی ۱۲ درصد و برای جذب آب ۲۲/۵ درصد به دست آمد. مدح خان و همکاران (۲۰۱۱) و مافی و همکاران (۲۰۲۳)، درصد بهینه ۰/۱ را برای استفاده از PP تنها در بتن غلتکی به دست آوردند و بر اساس نتایج

جدول ۷. مقایسه درصد بهینه الیاف پلی پروپیلن و متاکائولن در این پژوهش و تحقیقات قبلی بتن غلتکی

| تحقیق حاضر | مافی و همکاران (۲۰۲۳) | ابوبکر و همکاران (۲۰۲۲) | مدح خان و همکاران (۲۰۱۱) | حمزه و الشدید (۲۰۰۸) |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| آزمایشگاهی: ۰/۱ | ۰/۱ | - | ۰/۱ | - |
| تحلیلی: ۰/۱۹-۰/۱۵ | | | | درصد بهینه الیاف پلی پروپیلن (PP) تنها |
| آزمایشگاهی: ۱۵ | - | ۲۰ | - | ۲۰ |
| تحلیلی: ۱۲-۲۲/۵ | | | | متاکائولن (MK) تنها |
| آزمایشگاهی: ۰/۱ (PP) ۱۵ (MK) | - | * | - | درصد بهینه ترکیب PP و MK |
| تحلیلی: ۰/۱۹-۰/۱۵ (PP) ۱۲-۲۲/۵ (MK) | | | | |

* در این تحقیق از الیاف پلی پروپیلن استفاده نشده و درصد بهینه ترکیبی از ۱۵٪ MK و ۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی است.

جدول ۸. مقایسه مقاومت بتن غلتکی حاوی MK در این پژوهش و تحقیقات قبلی

| تحقیق حاضر | ابوبکر و همکاران (۲۰۲۲) | مدح خان و همکاران (۲۰۱۱) |
|------------|-------------------------|--------------------------|
| ۵۱ | ۵۳/۱ | - |
| ۲۵ | ۱۴/۲ | ۲۰/۴ |
| ۴۲ | ۲۰/۸ | - |

۷. نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر استفاده از الیاف پلی پروپیلن (PP) در مقادیر صفر، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و درصد حجمی سیمان به همراه پودر متاکائولن (MK) در مقادیر صفر، ۷/۵، ۱۵ و ۲۲/۵ درصد وزنی سیمان در روسازی بتن غلتکی (RCCP) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب روی نمونه‌های مختلف انجام شد و مطالعات تحلیلی جهت پیش‌بینی برخی از خواص روسازی بتن غلتکی صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که:

- بتن‌های غلتکی در مرحله تولید بسته به شیوه آماده‌سازی دارای حفره‌های هوا در داخل ملات می‌باشند. افزودن پوزولان‌ها سبب کاهش این حفرات و افزودن چسبندگی آنها شده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. نتایج حاصله نشانگر آن است که با افزایش مقدار MK تا ۱۵ درصد، مقاومت فشاری ۷ و

۲۸ روزه افزایش یافته و سپس با بیشتر شدن مصرف MK این مقاومت‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش مقدار PP تا ۰/۱ درصد، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه افزایش یافته و با بیشتر شدن مصرف PP این مقاومت‌ها کاهش می‌یابد. افزودن همزمان PP و MK به ترکیب مخلوط بتن غلتکی نشان از تأثیر مثبت آن‌ها بر مقاومت فشاری دارد. حداکثر مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نمونه حاوی ۰/۱ درصد از PP و ۱۵ درصد از MK به مقدار kg/cm^2 ۵۵۸ به ثبت رسید که ۲۵ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش دارد. همچنین، بیشترین افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه نیز در نسبت‌های ذکر شده فوق و به مقدار ۵۱ درصد نسبت به نمونه مرجع به ثبت رسید. چنانچه ملاحظه می‌شود، افزایش مقاومت بتن غلتکی در حضور این دو ماده در سنین کمتر بسیار قابل توجه بوده و با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

- مقاومت کششی بتن غلتکی در درصدهای مختلف استفاده از MK و PP بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که

باشد، مطلوب تر است. با توجه به اینکه استفاده از الیاف پلی پروپیلن درون بتن باعث افزایش میزان جذب آب در بتن می گردد، افزودن الیاف به همراه متاکائولن می تواند عملکرد بتن حاوی الیاف را در برابر جذب آب بهبود بخشیده و موجب بهبود عملکرد بتن غلتکی در شرایط مختلف گردد. حداکثر کاهش جذب آب (۱۱ درصد) نسبت به نمونه مرجع در نمونه حاوی ۰/۱ درصد از PP و ۲۲/۵ درصد از MK حاصل شد.

- فرمول های تحلیلی جهت پیش بینی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب در بتن غلتکی به صورت توابع دومتغیره از متاکائولن و الیاف پلی پروپیلن ارائه شد. مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی بیانگر دقت زیاد این فرمول ها می باشد. بر اساس نتایج تحلیلی، درصد بهینه PP و MK برای مقاومت فشاری در بتن غلتکی به ترتیب ۰/۱۹ درصد و ۱۵/۱ درصد و برای مقاومت کششی به ترتیب ۰/۱۵ درصد و ۱۱/۹ درصد می باشد.

با افزایش مقدار MK تا ۱۵ درصد، مقاومت کششی افزایش یافته و سپس با بیشتر شدن مصرف MK، این مقاومت کاهش می یابد. همچنین، با افزایش مقدار PP تا ۰/۱ درصد، مقاومت کششی افزایش یافته و با بیشتر شدن مصرف PP، این مقاومت کاهش می یابد. حداکثر مقاومت کششی در نمونه حاوی ۰/۱ درصد از PP و ۱۵ درصد از MK به مقدار 51 kg/cm^2 به ثبت رسید که ۴۲ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش دارد و نشان دهنده تأثیر مثبت افزودن همزمان این دو ماده بر مقاومت کششی بتن غلتکی است. نسبت مقاومت کششی به فشاری در این تحقیق دارای میانگین $8/89$ درصد محاسبه شد که نزدیک به مقدار ۱۰ درصد بیان شده توسط آیین نامه می باشد. - با افزایش مقدار MK، جذب آب RCCP در درصدهای مختلف PP کاهش می یابد. همچنین، با افزایش مقدار PP، به طور کلی جذب آب افزایش می یابد. باید توجه داشت که هر چه میزان جذب آب در بتن کمتر

۸. مراجع

- Abu-Bakr, M., Mahmood, H. F. and Mohammed, A. A. 2022. "Investigation of metakaolin and steel fiber addition on some mechanical and durability properties of roller compacted concrete". Case Stud. Constr. Mater. 16: e01136.
- ACI Committee 211. 2009. "Guide for selecting proportions for no-slump concrete". Reported by ACI Committee 211, Vol. 02.
- ACI 232.2R-18. 2018. "Report on the use of fly ash in concrete". Reported by ACI Committee 232.
- Ali, B., Qureshi, L. A. and Kurda, R. 2020. "Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement". Compos. Commun., 22: 100437.
- ASTM C 618-08a. 2008. "American standard for testing and materials, standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete". West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C496. 2013. "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D1557. 2013. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort". West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C642. 2013. "Standard test method for density, absorption and voids in hardened concrete". West Conshohocken, PA, USA.
- Benouadah, A., Beddar, M. and Meddah, A. 2017. "Physical and mechanical behavior of a roller compacted concrete with polypropylene fiber". J. Fundamen. Appl. Sci., 9(2): 623-635.
- BS1881: Part 116. 1983. "Testing concrete method for determination of compressive strength of concrete cubes". London, British Standard Institution.
- Dubey, S., Chandak, R. and Yadav, R. 2015. "Effect of metakaolin on compressive strength of high strength concrete". Int. J. Emerg. Trends Eng. Dev., 4(5).
- El-Diadamony, H., Amer, A. A., Sökkary, T. M. and El-Hoseny, S. 2016. "Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes". HBRC J., 14(2): 150-158.

- Elsaigh, W. A., Kearsley, E. P. and Robberts, J. M. 2005. "Steel fiber reinforced concrete for road pavement applications". Proceedings: 24th South African Transportation Conference, Pretoria, South Africa, pp. 191-201.
- Esakki, A. D. K., Dev, S. K. A., Gomathy, T. and Gifta, C. C. 2023. "Influence of adding steel-glass-polypropylene fibers on the strength and flexural behaviour of hybrid fiber reinforced concrete". Materials Today: Proceedings.
- Hamzah, A. A. and Al-Shadeedi, M. B. 2008. "Evaluation of properties of roller compacted concrete". 1st Reg. Conf. Eng. Sci. NUCEJ Spat. 3 (Issue 11), pp. 366-373.
- Hassan, A. A., Lachemi, M. and Hossain, K. M. 2012. "Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete". Cement Concrete Compos., 34(6): 801-807.
- Madhkhani, M., Azizkhani, R. and Torik, M. E. 2011. "Roller compacted concrete pavement reinforced with steel and polypropylene fibers". Struct. Eng. Mech. 40(2): 149-165.
- Maafi, N., Benouadah, A., Benammar, A., Kessal, O., Belkadi, A. A. and Beddar, M. 2023. "The effects of polypropylene fibers on the mechanical and durability performance of a roller compacted concrete for pavement". Int. J. Pavement Res. Technol.
- Murali, G. and Sruthee, P. 2012. "Experimental study of concrete with metakaolin as partial replacement of cement". Int. J. Emerg. Trends Eng. Dev. 4(5).
- Neocleous, K., Angelakopoulos, H., Pilakoutas, K. and Guadagnini, M. 2011. "Fiber reinforced roller-compacted concrete transport pavements". Proc. ICE – Transp. 164 (TR1): 1-13.
- Ozturk, O. and Ozyurt, N. 2022. "Sustainability and cost-effectiveness of steel and polypropylene fiber reinforced concrete pavement mixtures". J. Clean. Prod., 363: 132582.
- [1] Reddy, K. A., Krishna, G. R. and Balguri, P. K. 2022. "Experimental investigation on the properties of SCC containing metakaolin and polypropylene fibre". Mater. Today: Proc., 62: 3006-3010.
- Toutounchi, S., Dabiri, R. and Dilmaghani, S. 2023. "Study of fiber reinforced polymer (FRP) effects on roller compacted concrete mechanical properties with using ultrasonic pulse velocity in cold region". J. Transpor. Eng., 13(3): 1729-1750.
- Vahedifard, F., Nili, M. and Meehan, C. L. 2010. "Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement". Constr. Build. Mater., 24(12): 2528-2535.
- Yazici, Ş., Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M. and Üte, A. A. 2015. "Mechanical properties and impact resistance of roller-compacted concrete containing polypropylene fibre". Magaz. Concrete Res., 67(16): 867-875.