Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 52(4) (2020) 207-210
DOI: 10.22060/ceej.2019.14895.5774

Comparison of the effects of micro and macro polymer fiber on the mechanical and durability of roller-compacted concrete pavements

A. A. Ramezanianpour[1], J. Sobhani[2,*] , A. R. Pourkhorshidi[2] , M. Lotfi[1]

[1] Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
[2] Department of concrete Technology, Road, Housing and Urban Development Research Center

ABSTRACT: A laboratory study was performed to determine the benefits of micro and macro fibers in roller-compacted concrete (RCC) for pavements by measuring the RCCs mechanical and durability properties. To this aim, three RCC mixtures with use of micro and macro polyolefin-based fibers in two volumetric content (1 and 2 kg/m3) were prepared and the mechanical properties (compressive strength and flexures strengths (modulus of rupture and toughness)) and durability properties (salt scaling under freeze-thaw and water permeability) were evaluated. The results emphasized that the macro fibers could be efficiently enhanced the toughness in comparison with the microfibers. Moreover, the water permeability of fiber-concrete decreased up to 20% in comparison with the reference concrete. Furthermore, it was found that the application of microfibers in comparison with macro fibers significantly improved the salt-scaling resistance of concrete.

Review History:
Received: 8/28/2018
Revised: 11/13/2018
Accepted: 2/6/2019
Available Online: 2/6/2019

Keywords:
Roller compacted concrete
Polymer fibers
Mechanical properties
Durability
Toughness

1. INTRODUCTION

Roller-compacted concrete for pavement (RCCP) can be considered as an evolution of the RCC technology used for dam construction. RCCP is made with smaller maximum size aggregates and contains a high-quality cement paste having a relatively low water cementitious material ratio (w/cm) [1].

Interest in roller compacted concrete (RCC) as a paving material has increased in recent years because of its economic benefit relative to other stabilized construction materials, construction expediency high-density paver technology, and ability to open early to traffic. From a materials perspective, RCC has reduced cementitious contents compared to typical Portland cement concrete (PCC) pavements as a result of increased aggregate content, a more continuous aggregate gradation [1-2], and increased construction compaction energy.

Fibers may provide improved shear load transfer and residual strength in RCC, as noted for conventional PCC pavement. Macro-fibers have been added to PCC pavement to reduce slab thickness, control crack width and decrease crack deterioration rates, increase joint spacing, and increase fracture properties. By reducing the crack width at a joint, the shear mechanism of aggregate interlock is enhanced, thereby increasing load transfer and potentially reducing the slab's critical tensile stresses [3-7].

2. EXPERIMENTAL DETAILS

Locally available ordinary Portland cement type I conforming to ASTM C150 was used. Fine and coarse crushed aggregate was obtained from local sources in southern Tehran province. The coarse aggregates had a saturated surface dry density of 2620 kg/m^3, the maximum size of 19 mm and water absorption of 2.65%. Two synthetic macro and microfibers were utilized in this study and their properties shown in Table 1.

In Table 1, the mix proportion of fiber roller compacted concrete is shown.

Water= 132.7 kg/m^3, Cement= 350 kg/m^3, aggregate=1903 kg/m^3

In this research, compressive and flexural strength, salt-scaling durability, water penetration under pressure, were tested.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Compressive and flexural strength, salt-scaling durability, water penetration under pressure, were shown in Fig. 1.

As seen in Fig. 1, minor changes could be seen for compressive strength with the use of both fiber types.

As seen in Fig. 2, microfibers could not improve the flexural strength due to short length and low modulus of elasticity. Moreover, macro fibers showed better performance in comparison with the micro-fiber specimens.

In general, the permeability of specimens with the use of fibers decreased as seen in Fig. 3.

As demonstrated in Fig. 4, specimens with microfibers showed better performance in salt-scaling tests due to the improved transition zone between fibers and cement paste in compassion with the macro fiber included mixtures.

*Corresponding author's email: sobhani@bhrc.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Properties of utilized fibers

Item	Macro fiber	Microfiber
Type	Modified olefin	Polypropylene
Diameter (mμ)	0.3	20
Density (g/cm^3)	0.91	0.91
Modulus of elasticity (GPa)	7	3.7
Tensile strength (MPa)	620	360
Length (mm)	58	12
L/d	193	600

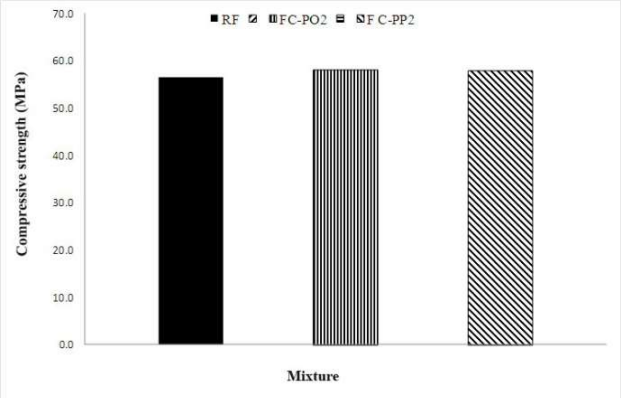


Fig. 1. Compressive strength of mixtures

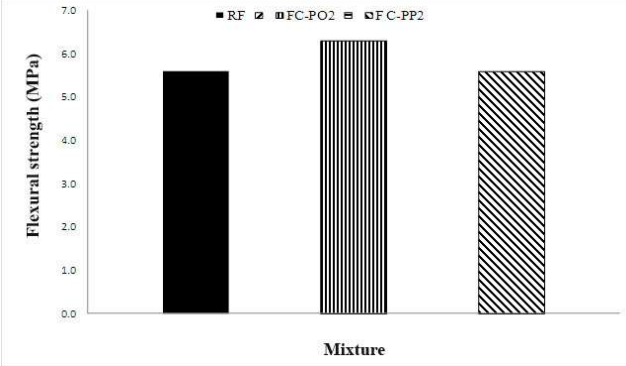


Fig. 2. Flexural strength of mixtures

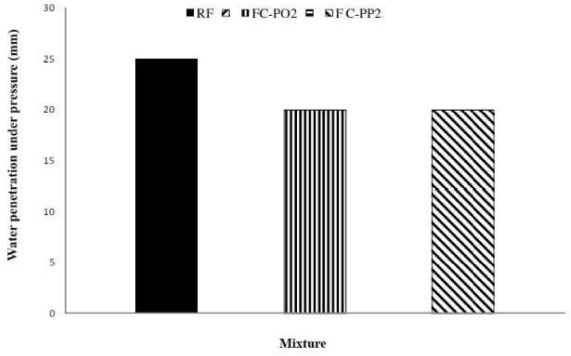


Fig. 3. Water penetration under pressure

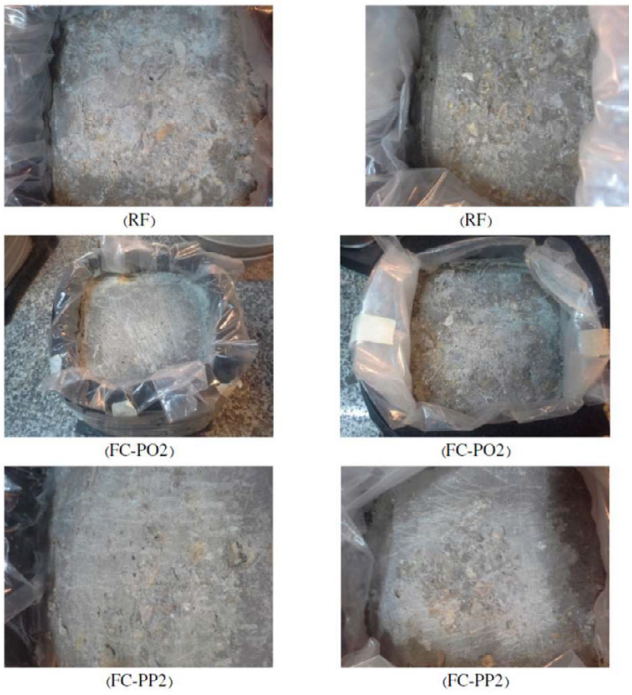


Fig. 4. Visual inspection of specimens after salt-scaling test

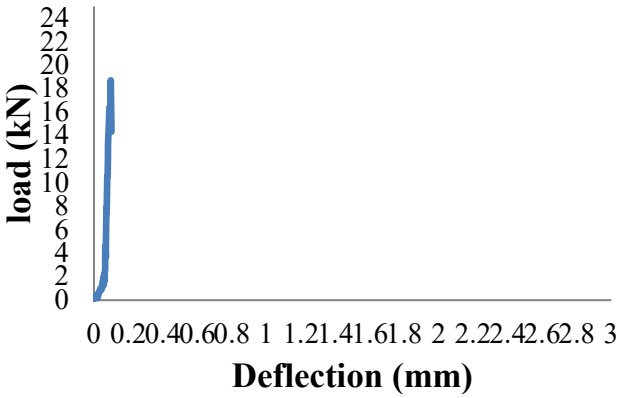


Fig. 5. Load-deflection curve for reference mixture

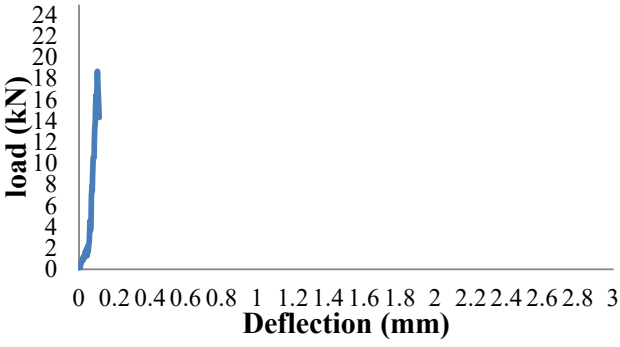


Fig. 6. Load-deflection curve for mixture FC-PO2

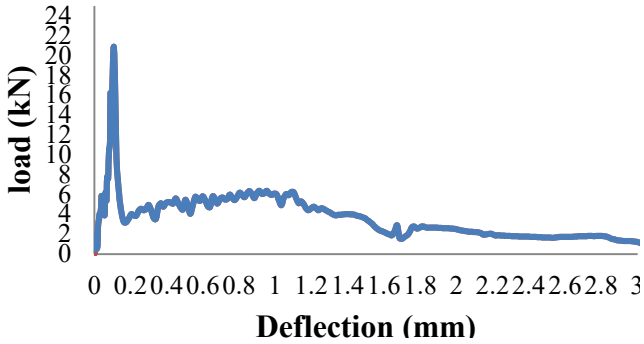


Fig. 6. Load-deflection curve for mixture FC-PP2

Table 2. Mix proportion of fiber roller compacted concrete

Mix code	Fiber type	Fiber (kg/m^3)
RF	Reference	0
FC-PO2	Modified olefin	2
FC-PP2	Polypropylene	2

As seen in Fig.s 5 and 6 and Table 3, the failure mode of the specimen is of brittle type; however, the mixtures with macro fibers do not fail in a brittle, catastrophic manner at the formation of the first crack under an identifiable maximum load.

4. CONCLUSIONS

The following conclusion could be drawn:

.Minor changes could be seen for compressive strength with the use of both fiber types.

· Microfibers could not improve the flexural strength due to the short length and low modulus of elasticity. Moreover, macro fibers showed better performance in comparison with the micro-fiber specimens.

· Specimens with microfibers showed better performance in salt-scaling tests due to the improved transition zone between fibers and cement paste in compassion with the macro fiber included mixtures.

· Mixtures with macro fibers do not fail in a brittle, catastrophic manner at the formation of the first crack under a identifiable maximum load.

REFERENCES

[1] American Concrete Institute, 1995. "State of the-art report on roller compacted concrete pavement". , ACI-325.10R.

[2] Banthia, N., Gupta, R., 2004. "Hybrid fiber reinforced concrete: fiber synergy in high strength matrices", RILEM, J. Materials and Structures, 37 (274), pp.707-716.

[3] Hsie, M, Tua, C., Song, P.S., 2008. "Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete", J. Materials Science and Engineering: A 494, pp.153-157.

[4] Perry, B., 2003. "Reinforcing external pavements with both large and small synthetic fibers", concrete, 37(8), pp. 46-47.

[5] Smirnova, O. Kharitonov, A. Belentsov Y.; "Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete", Journal of Traffic and Transportation Engineering, In Press article, 2018, doi.org/10.1016/j.jtte.2017.12.004

[6] Rooholamini, H., Hassani, A., M., Aliha, M.R., 2018. "Evaluating the effect of macro-synthetic fiber on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology". Construction and Building Materials,159, 20, January, pp. 517-529

[7] La Hucik, J., Dahal S., Roesler, J., Amirkhanian, A.N., Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers, Construction and Building Materials, Volume 135, 15, Pages 440-446, March 2017.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A.A. Ramezanianpour, J. Sobhani, A.R. Pourkhorshidi, M. Lotfi, Comparison of the effects of micro and macro polymer fiber on the mechanical and durability of roller-compacted concrete pavements, Amirkabir J. Civil Eng., 52(4) (2020) 207-210.

DOI: 10.22060/ceej.2019.14895.5774

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲ شماره ۴، سال ۱۳۹۹، صفحات ۷۹۷ تا ۸۰۸
DOI: 10.22060/ceej.2019.14895.5774

تاثیر استفاده از الیاف‌های پلیمری میکرو و ماکرو بر خواص مکانیکی و دوام روسازی بتن غلتکی

علی‌اکبر رمضانیان‌پور[۱]، جعفر سبحانی[۲*]، علیرضا پورخورشیدی[۲]، محمدمهدی لطفی[۱]

[۱] دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
[۲] بخش فناوری بتن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.

خلاصه: تفاوت اساسی بتن غلتکی و بتن معمولی دانه‌بندی متراکم بتن غلتکی می‌باشد که باعث می‌گردد که حجم خمیر سیمان در این بتن نسبت به بتن معمولی کمتر باشد. افزودن الیاف میکرو و ماکرو به رویه‌های بتنی نشان داده‌است که ظرفیت خمشی، مقاومت خستگی و توزیع ترک‌خوردگی را بهبود می‌دهند و به انتقال بار از میان ریز ترک‌های داخلی بتن کمک شایانی می‌نماید. در این مطالعه آزمایشگاهی، مزایای استفاده از الیاف میکرو و ماکرو پلیمری برای روسازی‌های بتن غلتکی با تعیین مشخصات مکانیکی و دوام مورد بررسی قرار گرفته‌است. بدین منظور ۳ طرح مخلوط بتن غلتکی با استفاده از الیاف‌های ماکرو (پلی‌الفین) و میکرو (پلی‌پروپیلن) در مقدار مصرف یک و دو کیلوگرم در مترمکعب ساخته و آزمایش‌های مکانیکی مقاومت فشاری و مقاومت خمشی (مدول گسیختگی و طاقت) و دوام پوسته‌شدن سطح در حضور نمک‌های یخزدا و نفوذپذیری تحت‌فشار آب انجام گردید. نتایج آزمایش خمش نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که در مخلوط‌های بتن الیافی ماکرو (پلی‌الفین) و مخلوط بتن الیافی میکرو (پلی‌پروپیلن)، الیاف ماکرو (پلی‌الفین) نقش مؤثرتری را در افزایش مدول گسیختگی نسبت به الیاف میکرو (پلی پروپیلنی) ایفا نموده است. هم‌چنین نتایج نشان داد که استفاده از الیاف (پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن) می‌تواند نفوذپذیری را تا حدود ۲۰ درصد کاهش دهد. به‌علاوه، مشخص شد که با استفاده از الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) می‌توان مقاومت سطح در برابر پوسته‌شدن در حضور نمک‌های یخزدا را به میزان قابل‌توجهی بهبود بخشید اما برخلاف الیاف میکرو (پلی پروپیلنی)، الیاف ماکرو (پلی‌الفین) باعث کاهش مقاومت پوسته‌شدگی شده‌است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۰۶-۰۶-۱۳۹۷
بازنگری: ۲۲-۰۸-۱۳۹۷
پذیرش: ۱۷-۱۱-۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۱۷-۱۱-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:
بتن غلتکی
الیاف پلیمری
مشخصات مکانیکی
طاقت
دوام بتن.

۱- مقدمه

استفاده از رویه‌های بتنی در کشورهای دیگر بسیار متداول است، اما در کشور ما علی‌رغم وجود مصالح کافی، به دلیل ارزان بودن قیر طی سال‌های پیش، معرفی نشدن گزینه‌های مناسب جایگزین و در مواردی نبود دانش فنی- اجرایی و تجهیزات مورد نیاز، اجرا و ساخت این نوع روسازی‌ها متداول نشده‌است. روسازی‌های بتنی، در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته به‌طور موفقیت‌آمیزی اجرا گردیده‌است و در حال حاضر نیز تحقیقات وسیعی در این رابطه در حال انجام است. با توجه به وضعیت تولید سیمان در کشور و شرایط اقلیمی، این نوع روسازی‌ها می‌توانند در بسیاری از راه‌های اصلی و فرعی کشور مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از دغدغه‌های اصلی محققین در خصوص رویه‌های بتنی، مقاومت در برابر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن و نیز مقاومت در برابر نمک‌های یخزدا بوده‌است. نتایج رویه‌های ساخته‌شده نشان می‌دهد که ساخت رویه‌های بتنی مقاوم در برابر یخبندان نیز امکان‌پذیر است. برای پیشگیری از خرابی رویه در مقابل چرخه‌های یخ زدن و آب شدن و نیز نمک‌های یخزدا، تحقیقات متعددی انجام پذیرفته و یا در حال انجام است[۱].

یکی از انواع روسازی‌های بتنی، رویه‌های بتن غلتکی (RCCP)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sobhani@bhrc.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

است که از انواع بتن‌های بدون اسلامپ می‌باشد که برای کاربردهایی هم‌چون سدسازی و یا راه‌سازی مورداستفاده قرار می‌گیرد [۳-۱].

در این رابطه، استفاده از انواع الیاف جهت بهبود خواص مکانیکی و دوام این نوع روسازی‌ها موردتوجه می‌باشد. الیاف‌هایی نظیر الیاف پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن (الیاف سینتتیک) می‌توانند تاثیر مثبتی در رفتار مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و به‌ویژه جذب انرژی داشته‌باشند [۴ و ۵].

علاوه بر این استفاده از الیاف در کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی بتن تاثیرگذار است. استفاده از الیاف در بتن‌های معمولی در برنامه‌های تحقیقاتی مختلفی موردبررسی قرارگرفته و اغلب تاثیر این نوع الیاف بر بتن معمولی مشخص‌شده‌است، لیکن اثر الیاف بر خواص بتن غلتکی به‌صورت جامع مورد تحلیل قرار نگرفته و تجربه‌ی زیادی در این زمینه وجود ندارد. در ادامه به نتایج برخی از تحقیقات صورت گرفته اشاره می‌شود.

شایان ذکر است، این نوع الیاف به روش اکستروژن که عبارت است از خروج با فشار یک محلول غلیظ از سوراخ‌های کوچکی به نام رشته ساز تولید می‌گردند که رشته‌های یکسره نیمه جامد پلیمری را ایجاد می‌کنند. در مراحل اولیه پلیمر تشکیل‌دهنده الیاف به صورت جامد است که برای اکستروژن باید مایع گردد. این کار معمولا اگر پلیمر ترموپلاستیک سنتتیک (که نرم بوده و با حرارت ذوب می شوند) باشد با ذوب کردن انجام می‌پذیرد.

رمضانیان‌پور و رشید داداش [۶]، تاثیر افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن در بتن الیافی هیبریدی معمولی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ۳ مقدار مصرف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن با ۱ درصد حجمی الیاف فولاد صنعتی جایگزین شده‌است. نهایتاً خواص مکانیکی نمونه‌های بتن الیافی هیبریدی فولاد صنعتی و پلی‌پروپیلن شامل طاقت و مقاومت خمشی با یکدیگر و بتن شاهد مقایسه شده‌است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده آن است که هر چه الیاف فولاد صنعتی با درصد بیشتری از الیاف پلی‌پروپیلن جایگزین شود، میزان مقاومت خمشی و جذب انرژی کاهش می‌یابد.

متوسلیان [۷]، تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن را در کاهش ترک‌های بتن خود تراکم مورد ارزیابی قرار داده‌است. بتن خود تراکم به دلیل طرح اختلاط خاص آن باعث ایجاد ترک در مراحل اولیه بتن‌ریزی می‌گردد که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی از ایجاد و گسترش ترک جلوگیری به عمل آورد. در این تحقیق مقدارهای مختلف الیاف شامل ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی در بتن استفاده و سپس نمونه‌های ساخته‌شده در معرض سه نوع شرایط محیطی قرارگرفته‌اند. درنهایت بررسی‌ها نشان داده که بتن الیافی با میزان ۰/۳ درصد الیاف، بهترین تاثیر را در کاهش ترک‌های سطحی داشته‌است.

قدوسی و همکاران [۸]، به بررسی جمع‌شدگی خمیری و خشک‌شدگی انواع ملات های تعمیری جهت استفاده درترمیم رویه‌های بتنی فرودگاهی پرداختند. آن‌ها برای ساخت ۶ ملات در آزمایشگاه، انواع افزودنی‌ها شامل میکروسیلیس، متاکائولن، الیاف پلی‌پروپیلن، افزودنی ضد جمع‌شدگی و افزودنی شیمیایی اصلاح‌کننده لزجت استفاده کردند. در آزمایش جمع‌شدگی خمیری مشاهده کردند زودترین زمان پیدایش اولین ترک مربوط به ملات‌های حاوی میکروسیلیس بوده و در هر سه نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلنی هیچ ترکی مشاهده نشد. در پایان به این نکته اشاره شد که الیاف پلی‌پروپیلنی نقش عمده‌ای در کاهش استعداد ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری داشته‌است. به‌طوریکه در مخلوط‌های حاوی الیاف و لاتکس استایرن‌بوتادین در شرایط هوای گرم هیچ‌گونه ترکی مشاهده نشده‌است.

فروغی و همکاران [۹]، به بررسی اثر الیاف میکروپلی‌پروپیلن با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر و مقدارهای مصرف ۰/۳۵، ۰/۷ و ۱/۴ کیلوگرم در مترمکعب بر روی مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن غلتکی پرداختند. آن‌ها اعلام کردند که با افزودن ۱/۴ کیلوگرم الیاف ۶ میلی‌متری بیشترین مقدار مقاومت فشاری حاصل می‌شود و علت آن را پخش بهتر این الیاف‌ها در مقایسه با الیاف‌های ۱۲ میلی‌متری اعلام کرد، در مورد تاثیر طول الیاف در مقاومت کششی بتن غلتکی، به دلیل ضخامت بزرگ‌تر ملات بین سنگ‌دانه و ناحیه انتقال، الیاف با طول بلندتر بهتر نیروها را بین سنگ‌دانه منتقل می‌کند و با کاهش ریزترک در ناحیه انتقال، مقاومت بهتری می‌دهند و مقدار بهینه الیاف برای طول الیاف ۶ میلی‌متری ۰/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب و برای طول ۱۲ میلی‌متری مقدار ۰/۷ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست‌آمده است، و در هر حالت تقریبا ۲۰ درصد مقاومت کششی را افزایش می‌دهند.

Perry [۱۰] به مقایسه الیاف پلی‌پروپیلن با الیاف فولادی برای مسلح کردن کف های بتنی پرداخت. دلیل اصلی وی در انجام این پژوهش این بود که سایش سطح کف‌سازی‌ها (پیاده‌روها و عبور وسایل نقلیه) موجب بیرون‌زدگی و در معرض دید قرار گرفتن الیاف فولادی می‌گردد که این امر می‌تواند بسیار خطرناک باشد. او در انجام این پژوهش از یک دال کوچک مخصوص کف سازی بتنی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن تک‌رشته‌ای به طول ۵۰ میلی‌متر و به مقدار ۶/۹ کیلوگرم در مترمکعب و الیاف فولادی با انتهای قلاب‌دار به طول ۶۰ میلی‌متر و به مقدار ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب استفاده نمود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به‌ترتیب ۵۳ و ۷۸ درصد افزایش‌یافته است. هم‌چنین مقاومت خارجی در برابر سایش در صورت استفاده از الیاف فولادی، ۲۰ درصد و الیاف پلی‌پروپیلن، ۴۱ درصد افزایش یافته‌است. بنابراین وی نتیجه گرفت که الیاف پلی‌پروپیلن برای مسلح نمودن کف‌سازی‌ها ازلحاظ سایش و کنترل ترک به‌مراتب بهتر از الیاف فولادی عمل می‌کند.

Banthia و همکاران [۴] به بررسی مدول گسیختگی و طاقت بتن‌های الیافی پرداختند. در این پژوهش دو سری آزمایش صورت پذیرفت. در آزمایش اول از دو نوع الیاف پلی‌پروپیلن یکی ریسه‌ای و دیگری تک‌رشته‌ای با مقاومت بالا استفاده گردید. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که الیاف تک‌رشته‌ای طاقت بتن الیافی را به‌مراتب بهتر از الیاف ریسه‌ای افزایش می‌دهد. در آزمایش دوم آن‌ها با بررسی الیاف فولادی قلاب‌دار و موجدار به این نتیجه رسیدند که الیاف فولادی قلاب‌دار طاقت بهتری نسبت به الیاف فولادی موجدار در بتن الیافی از خود نشان می‌دهد.

در پژوهشی Hsie و همکاران [۱۲]، در سال ۲۰۰۸ با استفاده از ترکیب دو نوع الیاف پلی‌پروپیلن، ماکرو و میکرو، به بررسی خواص مکانیکی بتن هیبریدی معمولی پرداختند. در این پژوهش از الیاف ماکرو به میزان ۳ ، ۶ و ۹ کیلوگرم در مترمکعب و الیاف میکرو به میزان ۰/۶ کیلوگرم در مترمکعب استفاده شده‌است. نتایج آزمایش نشان‌دهنده این موضوع است که مقاومت کششی، فشاری و خمشی بتن الیافی هیبریدی در همه ترکیب‌ها در مقایسه با بتن بدون الیاف بهتر بوده‌است.

در این تحقیق، تاثیر استفاده از دو نوع الیاف پلیمری شامل الیاف‌های ماکرو (پلی‌الفین) و میکرو (پلی‌پروپیلن) بر مشخصات مکانیکی بتن‌های غلتکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی (مدول گسیختگی و جذب انرژی) و هم‌چنین دوام این نوع بتن‌ها شامل دوام در در برابر پوسته‌شدن سطح در حضور نمک‌های یخزدا و نفوذپذیری تحت‌فشار آب مورد بررسی قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۸، Smirnova و همکاران، اثر الیاف پلی الفین را بر روی خواص مقاومتی و شکل‌پذیری رویه‌های بتنی بررسی نمودند. در این مطالعه، تغییرات نسبت آب به سیمان ۰/۳۱ تا ۰/۵۵ بر روی خواص بتن غلتکی الیافی مورد مطالعه قرار گرفته و هم‌چنین نشان داده شد که الیاف نقش موثری بر بهبود عملکرد این رویه‌ها ایفا می‌نماید [۱۳].

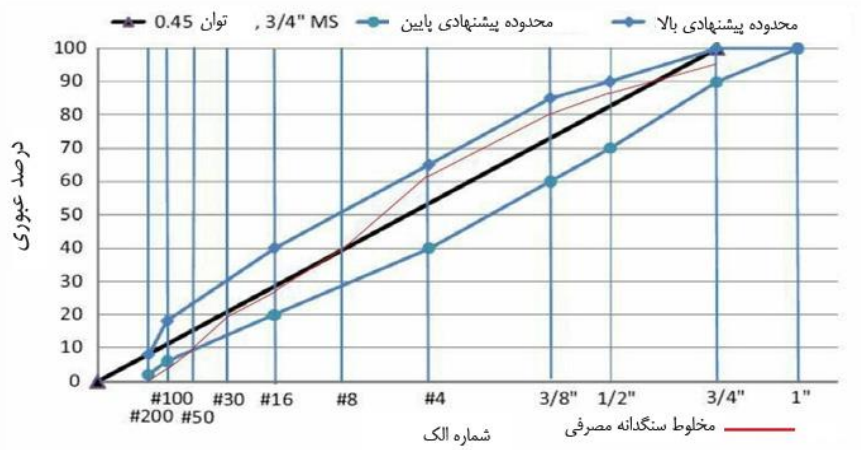
۲- مواد و مصالح و طرح مخلوط

سنگدانه‌های مصرفی در این تحقیق، در دو بخش ریزدانه و درشت‌دانه شامل: ۷۵ میکرومتر تا ۴/۷۵ میلی‌متر و ۴/۷۵ تا ۱۹ میلی‌متر می‌باشند. مشخصات این سنگ‌دانه‌ها در جدول شماره ۱ ذکر شده‌است. نمودار دانه‌بندی بهینه براساس توصیه PCA و منحنی فولر– تامپسون با توان ۰/۴۵ در شکل ۱ ارائه شده‌است [۱۴]. سیمان پرتلند مصرفی در این پروژه از نوع ۱ و محصول کارخانه سیمان دلیجان بوده که مشخصات مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۲ ارائه شده‌است. آب مصرفی در ساخت نمونه‌ها از آب شرب شهری تهیه شده‌است. در این مطالعه دو نوع الیاف شامل الیاف میکرو

جدول ۱. مشخصات سنگ‌دانه‌های مصرفی

Table 1. Specifications of aggregates

سنگ‌دانه	حداکثر قطر سنگ‌دانه (mm)	مدول نرمی	چگالی در حالت اشباع با سطح خشک (gr/cm^3)	جذب آب (%)
ماسه	۴/۷۵	۳/۲۷	۲/۵۵	۳/۱۱
شن	۱۹	-	۲/۶۲	۲/۶۵



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه مصرفی

Fig. 1. Aggregate grading curve

جدول ۲. مشخصات سیمان مصرفی

Table 2. Cement specifications

خواص	مشخصات	مقدار مجاز	نتیجه آزمون
مکانیکی (MPa)	مقاومت فشاری ۳ روزه	--	۲۴/۷
	مقاومت فشاری ۷ روزه	--	۳۶/۱
	مقاومت فشاری۲۸ روزه	حداقل، ۴۲/۵	۵۲/۱
شیمیایی (٪)	SiO_2	--	۲۳/۱۹
	Al_2O_3		۳/۵۶
	Fe_2O_3		۳/۲۹
	CaO		۶۳/۰۷
	SO_3		۱/۶۳۸
	MgO		۱/۳۱
	Na_2O		۰/۱۹
	K_2O		۰/۶۶
	C_3S		۴۷/۲۲
	C_2S		۳۰/۸۶
	C_3A		۳/۸۷
	C4AF		۱۰/۰۱
فیزیکی	سطح مخصوص به‌دست‌آمده از آزمایش بلین cm^2/gr	حداقل ۲۸۰۰	۳۱۵۵
	انبساط در آزمایش اتوکلاو (درصد)	حداکثر ۰/ ۸	۰/۸۲
	زمان گیرش اولیه به‌دست آمده از آزمایش با سوزن ویکات (دقیقه)	حداقل ۴۵	۱۲۰
	زمان گیرش نهایی به‌دست آمده از آزمایش با سوزن ویکات (دقیقه)	حداکثر ۳۶۰	۲۲۰

پلی‌پروپیلنی و ماکرو پلی‌الفین استفاده شده‌است، که مشخصات آن‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌است. جهت تعیین درصدهای الیاف مصرفی پس از بررسی ادبیات فنی موضوع و راهنماهای موجود، مانند راهنمای طراحی و ساخت روسازی بتن غلتکی[۱ و ۲]، مقرر گردید که از مقدار مصرف ۳ کیلوگرم الیاف ماکرو در مترمکعب استفاده شود.

نحوه اختلاط بدین ترتیب بود که ابتدا مواد خشک، شامل سنگدانه و سیمان به همراه بخشی از آب مخلوط جهت اختلاط اولیه و جذب آب سنگدانه‌ها در داخل مخلوط کن به مدت تقریبا ۳۰ تا ۶۰ ثانیه بهم زده‌شد. سپس با اضافه کردن الیاف و باقیمانده آب، کل مواد به مدت حدود ۲ دقیقه مخلوط گردید. شایان ذکر است، پس از ساخت

جدول ۳. مشخصات الیاف میکرو پلی‌پروپیلنی
Table 3. Specifications of micro-polypropylene fibers

مشخصه	ویژگی مواد	استاندارد ASTM D7508 [۱۷]
ساختمان شیمیایی	٪۱۰۰ پلی‌پروپیلنی	٪۱۰۰ پلی‌پروپیلنی
قطر مقطع(µm)	دایره‌ای (قطر ۲۰)	دایره‌ای (قطر ۲۰۰ تا ۲۰)
وزن مخصوص	۰/۹۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب	۰/۹ تا ۰/۹۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب
مدول الاستیسیته (GPa)	۳/۷	۳/۵ تا ۱۵
مقاومت کششی (MPa)	۲۵±۳۶۰	۲۰۰ تا ۷۶۰
طول (mm)	۱۲	۳ تا ۵۰
تعداد در کیلوگرم	>۱۰۰۰۰۰۰۰۰	--
نسبت طول به قطر	۶۰۰	--

جدول ۴. مشخصات الیاف ماکرو پلی‌الفین
Table 4. Specifications of macro-polyolefinfibers

مشخصه	ویژگی مواد	استاندارد ASTM D7508 [۱۷]
ساختمان شیمیایی	اُلفین اصلاح‌شده	٪۸۵ پروپیلن و اتیلن
قطر مقطع (mm)	دایره‌ای (قطر۰/۳)	دایره‌ای (بزرگتر از ۰/۳mm)
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۰/۹۱	۰/۹ تا ۰/۹۲
مدول الاستیسیته (GPa)	۷	۳/۵ تا ۱۵
مقاومت کششی (MPa)	۶۲۰	بزرگتر از ۳۴۴
طول (mm)	۵۸	۱۲ تا ۶۵
تعداد در کیلوگرم	۵۳۸۰۰	--
نسبت طول به قطر	۱۹۳	--

طرح اول و با توجه به ماهیت بتن غلتکی (بدون اسلامپ بودن) عملا امکان تراکم با مقدار الیاف بیش از ۳ کیلوگرم در مترمکعب، بدون افزودنی‌های روان‌کننده میسر نبود، بنابراین تصمیم گرفته شد که از مقدار کمتر ۲ کیلوگرم در مترمکعب (معادل ۰/۲۲ درصد حجمی بتن) در این پژوهش استفاده شود (جدول ۵). در جدول ۶ درصدهای پیشنهادی در ادبیات فنی براساس حداکثر اندازه سنگ‌دانه آورده شده‌است [۱۵ و ۱۶]. خاطر نشان می‌شود با توجه به استفاده از مواد اصلاح سطح در الیاف مورد استفاده، نیاز به هیچ‌گونه تمهیداتی برای جلوگیری از تجمع و به هم پیوستن الیاف و توزیع آن‌ها در زمان اختلاط لازم نشده و مستقیما این الیاف پس از تماس با آب مخلوط و عمل اختلاط به راحتی از هم باز می‌شوند.

۳- آزمون‌ها و روش‌ها

در این مطالعه، آزمایش‌های مکانیکی مقاومت فشاری [۱۸] و مقاومت خمشی [۱۹] و دوام در مقابل پوسته‌شدگی سطحی در حضور نمک‌های یخزدا [۲۰] و نفوذپذیری تحت فشار آب [۲۱] بر روی

جدول ۵. نسبت‌های مخلوط بتن غلتکی شاهد و الیافی
Table 5. Mix proportion of reference and FRCC

شناسه	نوع الیاف	نسبت آب به سیمان	واحد وزن (kg/m^3)			
			سیمان	الیاف	آب	سنگ‌دانه
RF	شاهد	/۳۸	۳۵۰	۰	۱۳۲/۷	۱۹۰۳
FC-PO2	الیاف ماکرو (پلی‌الفین)	/۳۸	۳۵۰	۲	۱۳۲/۷	۱۹۰۳
FC-PP2	الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن)	/۳۸	۳۵۰	۲	۱۳۲/۷	۱۹۰۳

جدول ۶. درصدهای پیشنهادی الیاف براساس حداکثر اندازه سنگ‌دانه [۱۵ و ۱۶]

Table 6. Proposed percentages of fibers based on maximum aggregate size [15 and 16]

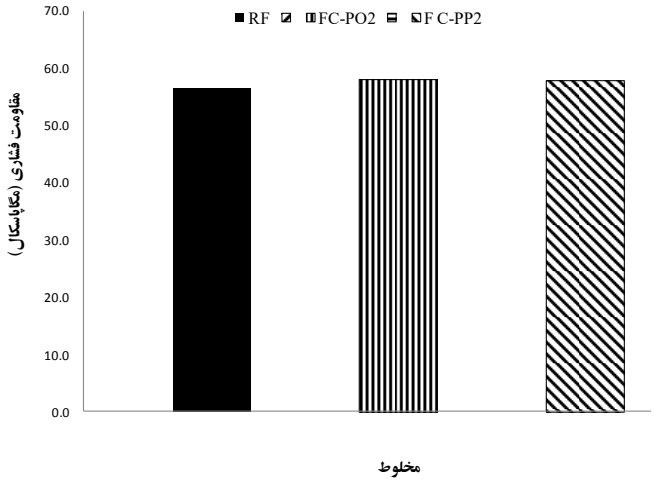
پارامترهای طرح مخلوط	حداکثر اندازه سنگدانه‌ها		
	۱۰ میلی‌متر	۲۰ میلی‌متر	۳۱/۵ میلی‌متر
مقدار الیاف (درصد حجمی)			
الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن)	۰/۵-۱/۰	۰/۲-۰/۶	۰/۱-۰/۳
الیاف ماکرو (پلی‌الفین)	۰/۱-۰/۳	۰/۱-۰/۳	۰/۳-۰/۶
عیار مواد سیمانی، kg/m^3	۴۰۰-۵۲۰	۳۸۰-۵۰۰	۳۵۰-۴۳۰
نسبت آب به مواد سیمانی	۰/۳۰-۰/۴	۰/۳۰-۰/۴۵	۰/۳-۰/۵۰
درصد ریزدانه به کل سنگدانه	۵۰-۶۸	۴۵-۶۰	۴۰-۵۰
درصد هوا	۴-۸	۴-۶	۳-۵

نمونه‌های تهیه‌شده به‌ترتیب مطابق با استانداردهای EN 12390-3، EN 12390-8 و ASTM C 672، ASTM C 1018 انجام گردید.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقاومت فشاری

نتایج میانگین آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز، برای ۳ طرح مخلوط ساخته‌شده در شکل ۲ ارائه شده‌است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که در هر دو نوع الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) و ماکرو (پلی‌الفین) در مقدارهای مصرف ۲ کیلوگرم (۰/۲۲ درصد حجمی) با افزایش ناچیز مقاومت فشاری روبرو هستیم. در رابطه با الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) می‌توان چنین بیان کرد که این الیاف‌ها به‌دلیل تعداد بسیار بالا و نحوه‌ی جهت‌گیری در بتن می‌توانند تمرکز تنش در نوک ترک‌ها را کاهش دهند، بنابراین باعث کاهش ترک‌خوردگی و



شکل ۲. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی الیافی و شاهد

Fig. 2. Compressive strength of specimens

افزایش مقاومت ترک‌خوردگی یا دوخت و دوز ترک‌های به‌وجودآمده در بتن شوند که این موضوع می‌تواند به افزایش مقاومت فشاری کمک کند. البته لازمه‌ی این موضوع استفاده از مقدارهای مصرف کافی می‌باشد (البته باید توجه شود که در مقدار مصرف‌های بالا از پدیده‌ی توپی‌شدن جلوگیری شود) [۲۲]. در رابطه با الیاف ماکرو (پلی‌الفین) می‌توان چنان اظهار داشت که این الیاف به دلیل داشتن مدول الاستیسیته بالا (در مقایسه با الیاف میکرو (پلیپروپیلن)) و بافت سطحی زبری که دارد، باعث مقداری افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد می‌شود و زمانی که در مقدار زیاد استفاده می‌شود، عملکردی مشابه الیاف فولادی دارد بنابراین ممکن است بتوانند مقدار بیشتری از فشار را تحمل کنند و با انسجام بهتری که به ماتریس بتن غلتکی می‌بخشند باعث افزایش مقاومت فشاری شوند.

۴-۲ مقاومت خمشی

۴-۲-۱ مدول گسیختگی

در شکل‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب تصاویری از نمونه مقاومت خمشی آماده بارگذاری و پس از بارگذاری را مشاهده می‌کنید.

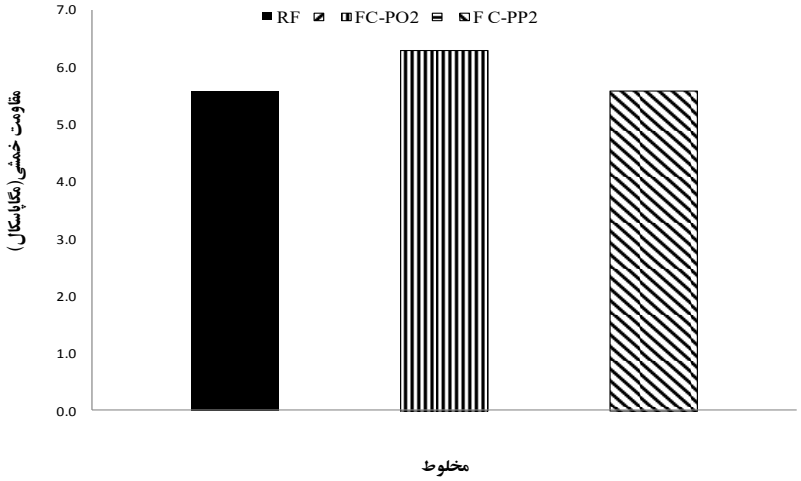
نتایج آزمایش خمشی جهت تعیین مدول گسیختگی در شکل ۵ ارائه شده‌است. نتایج حاکی از آن است که الیاف‌های میکرو (پلی‌پروپیلنی) به‌دلیل طول کوتاه و مدول الاستیسیته پایین نتوانسته‌اند تغییری در مقاومت خمشی ایجاد کنند و بهبودی نسبت به نمونه‌ی شاهد حاصل نشده‌است، ضمنا مشاهده می‌شود الیاف ماکرو (پلی‌الفین) در مقایسه با الیاف میکرو (پلی‌پروپیلنی) نقش مؤثرتری را در افزایش مدول گسیختگی داشته‌است. علت این امر

شکل ۳. دستگاه تعیین طاقت خمشی آزمونه بتن الیافی

Fig. 3. Flexural strength determination equipment

شکل ۴. آزمونه تیر بتنی پس از بارگذاری جهت تعیین ظرفیت خمشی و طاقت

Fig. 4. Concrete beam test after loading to determine flexural capacity and toughness



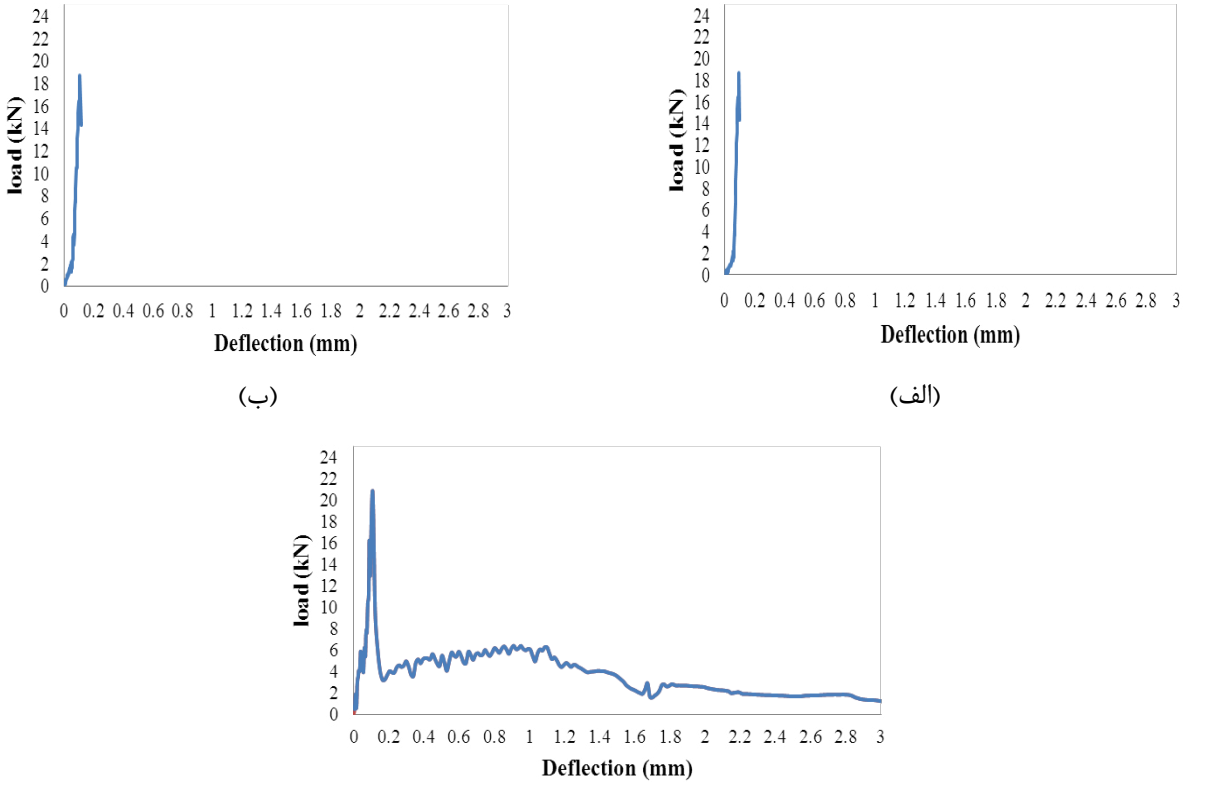
شکل ۵. مقاومت خمشی نمونه‌های بتن غلتکی الیافی و شاهد

Fig. 5. Flexural strength of specimens

مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بیشتر الیاف ماکرو (پلی‌الفین) نسبت به الیاف میکرو (پلی‌پروپیلنی) (تقریبا ۲ برابر) می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، مقاومت کششی و مدول الیاف، علاوه بر طول الیاف عامل مؤثر بر میزان مدول گسیختگی می‌باشد.

۴-۲-۲ طاقت

همان‌طور که در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب مشاهده می‌گردد، رفتار بتن غلتکی نمونه شاهد و الیافی مسلح به الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) از نوع شکست ترد می‌باشد که علت آن عدم وجود و یا حجم کم الیاف و کاربرد الیاف پلی‌پروپیلنی میکرو می‌باشد. پس از پیدایش اولین ترک افت ناگهانی مقاومت خمشی رخ می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی آن است که پس از ایجاد اولین ترک و هنگام گسترش ترک‌ها و تبدیل ترک‌های کوچک به ترک‌های بزرگ، الیاف پلی‌پروپیلنی توانایی کنترل ترک‌ها را (به دلیل مقاومت کششی و مدول الاستیسیته کم) نداشته و باربری نمونه از بین می‌رود. همان‌طور که در نمودار شکل ۶-ج مشاهده می‌شود با استفاده از الیاف ماکرو (پلی‌الفین) در



شکل ۶. الف) نمودار بار-تغییر مکان، الف- نمونه شاهد (RF)، ب) بتن الیافی حاوی ۲ کیلوگرم (۰/۲۲ درصد حجمی) الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) در مترمکعب (FC-PP۲) و ج) بتن الیافی حاوی ۲ کیلوگرم (۰/۲۲ درصد حجمی) الیاف ماکرو (پلی‌الفین) در مترمکعب (FC-PO۲)

Fig. 6. load-displacement diagram, a- control sample (RF) , b -fiber concrete containing 2 kg (0.22% by volume) micro fibers (FC-PP2) and c- mixture containing 2 kg (0.22% by volume) macro fibers (FC-PO2)

نمونه‌های بتن الیافی سطح زیر نمودار پس از ایجاد اولین ترک و افت ناگهانی مجدد افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار بار- تغییر مکان مشخص می‌شود، پس از ایجاد اولین ترک افت مقاومت خمشی رخ می‌دهد، پس از ایجاد این افت ناگهانی در نمودار، یک‌روند افزایش مقاومت دیده می‌شود که علت آن ایفای نقش الیاف ماکروی پلی‌الفین می‌باشد. درواقع هنگام تبدیل ریزترک‌ها به ترک‌های بزرگ، الیاف پلی‌الفین بر ترک‌های بزرگ پل زده و مانع از رشد و گسترش آن‌ها شده‌است بدین ترتیب مشاهده می‌شود رفتار بتن الیافی پلی اُلفین از نوع کرنش نرم شونده می‌باشد.

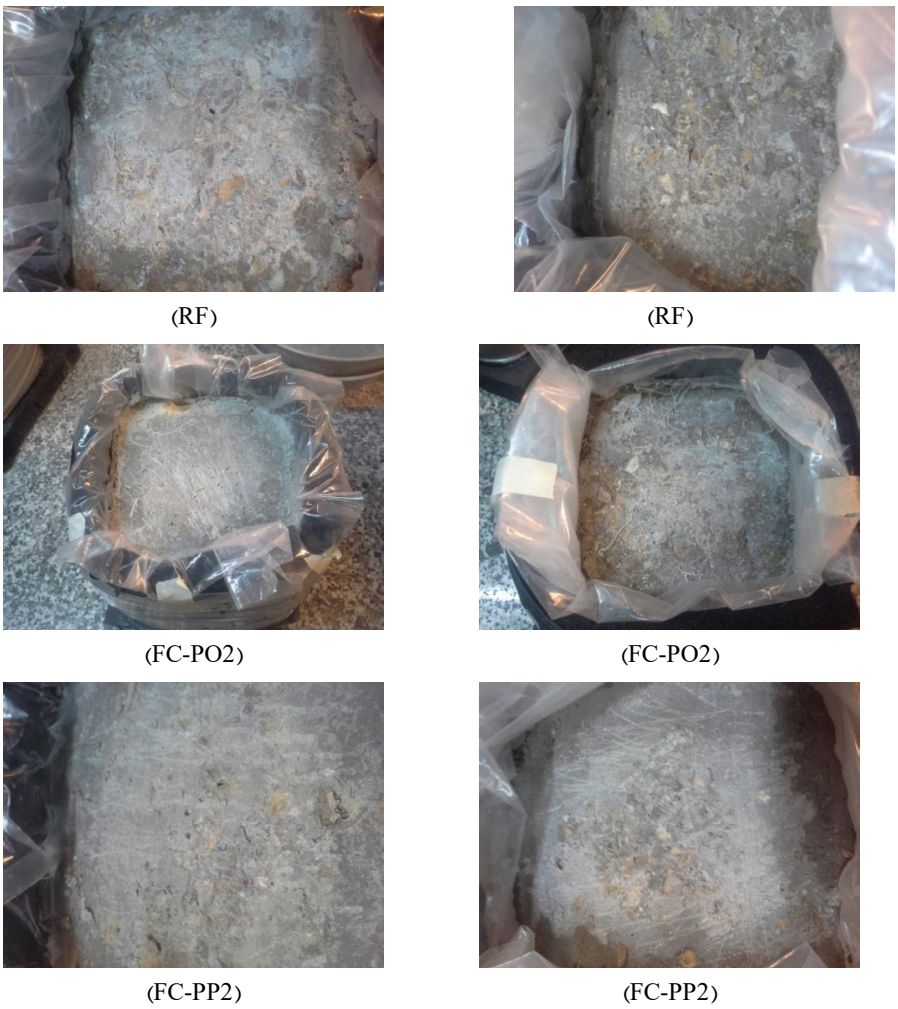
در جدول ۷ میزان اندیس‌های طاقت بتن الیافی مسلح به الیاف پلی‌پروپیلنی و پلی‌الفینی و شاهد به روش ASTM C 1018 آورده شده‌است.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۷، ملاحظه می‌گردد استفاده از الیاف میکرو پلی پروپیلنی تاثیری بر مقاومت پسماند نمونه‌ها نداشته‌است، لیکن استفاده ازالیاف ماکرو پلی‌الفینی در محدودهٔ مصرفی این مطالعه باعث رشد قابل‌ملاحظه‌ای در شاخص‌های طاقت در اندیس‌های I۵، I۱۰ و I۲۰ شده‌است. این بدان معنی است که استفاده از این نوع الیاف امکان جذب انرژی را بعد از رفتار خطی و حتی بعد از بروز اولین ترک تا محدودهٔ انهدام کامل، میسر می‌سازد.

جدول ۷. اندیس طاقت خمشی نمونه‌های بتن الیافی میکرو پلی‌پرویلنی، ماکرو پلی‌الفینی و شاهد

Table 7. Flexural strength index of micro- polypropylene and macro-polyolefinfibers fiber concrete samples

استاندارد	ASTM C 1018		
نام مخلوط	I5	I10	I20
RF	۱	۱	۱
FC-PP2	۱	۱	۱
FC-PO2	۲/۳۵	۳/۹۸	۷/۳۳



شکل ۷. وضعیت سطحی نمونه‌ها بعد از آزمون پوسته‌شدن سطحی در حضور نمک NaCl[1]

Fig. 7. Surface scaling in the presence of NaCl salt

۴-۳- آزمایش پوسته‌شدن سطح در حضور نمک‌های یخ‌زدا

نتایج آزمایش پوسته‌شدن سطح در حضور نمک‌های یخ‌زدا پس از ۵۰ سیکل ذوب و یخ، برای ۳ طرح مخلوط ساخته‌شده در جدول ۸ آورده شده‌است.

در شکل ۷ عکس‌های مربوط به هرکدام از ۳ طرح ساخته‌شده به‌طور جداگانه آورده شده‌است.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۸ و تصاویر آسیب‌های نمونه‌ها در چرخه‌های یخ زدن و آب شدن در حضور نمک یخ‌زدا،

جدول ۸. نتایج آزمایش پوسته‌شدن سطح برای ۳ طرح مخلوط

Table 8. Amount of surface scaling results for 3 mixtures

طرح اختلاط	پوسته‌شدن سطح در حضور نمک‌های یخ‌زدا		
	عمق پوسته‌شدگی (میلی‌متر)	سطح شن‌زدگی (درصد)	درجه‌بندی براساس استاندارد ASTM C 672
RF	۵	۵۰	۴
	۵/۸	۹۰	۵
FC-PO2	۷/۷	۹۵	۵
	–	–	–
FC-PP2	۱/۴	۱۰	۱
	۳/۴	۱۰	۱

به نظر می‌رسد الیاف‌های میکرو (پلی‌پروپیلن) دارای ناحیه انتقال مناسب‌تری بین الیاف و خمیر سیمان نسب به نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف ماکرو هستند و به‌خوبی در مخلوط بتن غلتکی پخش شده‌اند و همگنی مخلوط را از بین نبرده‌اند. باوجود خلل‌وفرج ایجادشده، این خلل‌وفرج به حدی زیاد و بزرگ نبوده‌اند که با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و بتوانند تاثیر منفی جدی بر روی نفوذپذیری سطح بگذارند. ازآن‌جا که عملکرد الیاف میکرو در کاهش نفوذپذیری غالب به اثر تخلخل ایجادشده به‌دلیل حضور الیاف و کاهش اندک کارایی بود شاهد عملکرد بهتر این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط شاهد هستیم. الیاف‌های ماکرو (پلی‌الفین) به‌دلیل اندازه بزرگ‌تر (نسبت به الیاف‌های میکرو) هم ناحیه انتقال ضعیف‌تری به‌وجود می‌آوردند و هم همگنی و کارایی مخلوط را کاهش می‌دهند و به‌دلیل همین کاهش کارایی پرداخت سطح به‌خوبی نمی‌تواند انجام شود که این موضوع به‌نوبه‌ی خود می‌تواند بر ریزساختار لایه سطحی که کنترل‌کننده‌ی پوسته‌شدن سطح است، تاثیرگذار باشد و در هنگام تراکم تخلخل ایجادشده در نمونه هم بیشتر خواهد بود. از طرفی الیاف‌هایی که مماس با سطح بوده‌اند و یا از سطح بیرون زده‌اند نواحی مستعدی برای نفوذ محلول یخزدا به داخل مخلوط ایجاد می‌کنند.

۴-۴- آزمایش نفوذپذیری تحت‌فشار آب

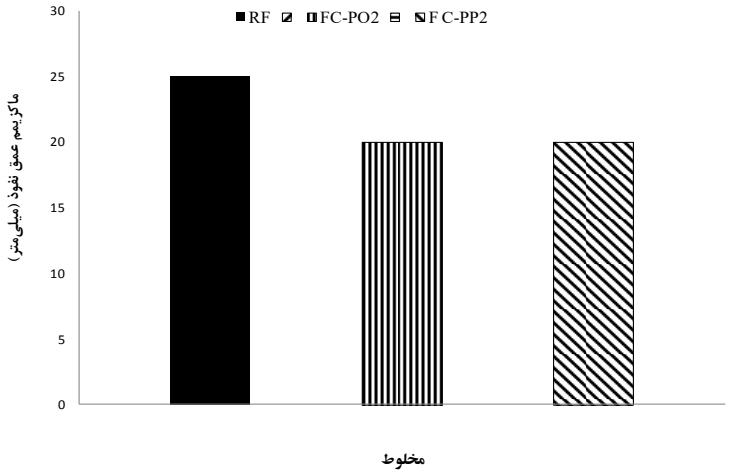
نتایج آزمایش نفوذپذیری تحت‌فشار آب در سن ۲۸ روز، برای ۳ طرح مخلوط ساخته‌شده در شکل ۸ ارائه شده‌است. با مشاهده نتایج آزمایش درمی‌یابیم که به‌طور کلی نفوذپذیری آزمون‌های بتنی با استفاده از الیاف کاهش می‌یابد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که الیاف میکرو (پلی پروپیلنی) و ماکرو (پلی‌الفین) در مقدار مصرف ۲ کیلوگرم (۰/۲۲ درصد حجمی) در مترمکعب می‌تواند نفوذپذیری بتن غلتکی را به میزان قابل‌توجهی (تا حدود ۲۰ درصد) کاهش دهد. علت بروز این کاهش، برقراری پل بین ریزترک‌ها و خلل‌وفرج موجود در خمیر سیمان و بهبود عملکرد بتن می‌باشد. با توجه به این عملکردها، الیاف می‌تواند نفوذپذیری بتن را تا حد مطلوبی بهبود بخشد و بدین ترتیب دوام آن را افزایش دهد.

۵- نتیجه‌گیری

براساس مطالعات صورت‌گرفته و با در نظر گرفتن این مطلب که این نتایج منحصرا مربوط به مواد و روش‌های به‌کار رفته در این پروژه آزمایشگاهی بوده و در بسیاری موارد جهت اظهارنظر قطعی نیاز به برنامه آزمایشگاهی گسترده‌تری وجود دارد، موارد زیر قابل‌استنتاج و نتیجه‌گیری است:

استفاده از الیاف برای افزایش مقاومت فشاری گزینه‌ی مناسبی نیست.

نتایج آزمایش خمش نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که در مخلوط‌های بتن الیافی ماکرو (پلی‌الفین) و مخلوط بتن الیافی میکرو (پلی‌پروپیلن)، الیاف ماکرو (پلی‌الفین) نقش مؤثرتری را در افزایش مدول گسیختگی نسبت به الیاف میکرو (پلی پروپیلنی) ایفا نموده‌است. درواقع دو فاکتور مؤثر بر میزان مدول گسیختگی، تنش کششی و طول الیاف تواما می‌باشد.



شکل ۸. نفوذپذیری نمونه‌های بتن غلتکی

Fig. 8. Permeability of roller concrete specimens

با استفاده از الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) می‌توان مقاومت سطح در برابر پوسته‌شدن در حضور نمک‌های یخزدا را به میزان قابل‌توجهی بهبود بخشید اما برخلاف الیاف میکرو (پلی پروپیلنی)، الیاف ماکرو (پلی‌الفین) باعث ضعف سطح شده که از دلایل آن می‌توان به افت کارایی (عدم پرداخت خوب سطح) و افزایش تخلخل در هنگام تراکم اشاره کرد.

استفاده از الیاف (پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن) می‌تواند نفوذپذیری را تا حدود ۲۰ درصد کاهش دهد.

نتایج آزمون‌های مکانیکی و دوام نشان می‌دهد که بهبود خواص مکانیکی نمی‌تواند متضمن دوام این نوع روسازی‌ها تلقی گردد.

با توجه به نتایج برای دستیابی به عملکرد بهینه، استفاده از ترکیب دو نوع الیاف (میکرو و ماکرو) با مطالعات گسترده‌تر توصیه می‌گردد.

۶- تشکر و قدردانی

مقاله ارائه‌شده با حمایت مادی و معنوی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی صورت گرفته‌است.

مراجع

[1] ACI 325.10R. State of the-art report on roller compacted concrete pavement. American Concrete Institute (ACI); 1995.

[2] Guide to the design and implementation of roller concrete pavements, Ministry of Roads and Urban Development, Transportation Research Institute, , Journal No. 354, 2009. [in Persian]

[3] Instructions of quality control of rolled compacted concrete pavements, Road, housing and urban development research center, , Second edition, 2015. [in Persian]

] 4] N. Banthia, R. Gupta, Hybrid fiber reinforced concrete: fiber synergy in high strength matrices, RILEM, Materials and Structures, 37 (274) (2004)707-716.

[5[H.Rooholamini, A.M. Hassani, M.R. Aliha, Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology, Construction and Building Materials,159(20) (2018) 517-529.

[6] P. Rashid Dadash, Effect of natural pozzolans on Properties of fibrous concrete and its application in shotcrete, M.Sc. Thesis, Amirkabir University of Technology, IRAN, Tehran 2011. [in Persian]

[7] M. Motusalian, The effect of propylene fibers on cracks caused by shrinkage in self-compacting concrete, the first International Conference on Drinking Water Storage Tanks, IRAN, Rasht, 2011. [in Persian]

[8] P. Ghoddosii, A.A. Shirzadi Javid, Shrinkage of mortars containing repair additives for the repair of concrete structuers, First national conference of concrete pavements, Tarbiat Modares University, IRAN, Tehran, 2015. [in Persian]

[9] A. Foroughi Asl, W. Naderi Zar Naghi, Improved properties mechanical roller compacted concrete using polymer fibers, 6th conference annual national concrete, Iran, Tehran, 2014. [in Persian]

[10] B. Perry, Reinforcing external pavements with both large and small synthetic fibers, concrete, 37(8) (2003) 46-47.

[11] J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler, A.N. Amirkhanian, Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers, Construction and Building Materials, 135(15) (2017) 440-446.

[12] M. Hsie, C.H. Tua, P.S. Songb, Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete, Materials Science and Engineering, 494(1) (2008) 153-157.

[13] O. Smirnova, A. Kharitonov, Y. Belentsov, Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 6(4) (2019) 407-417.

[14] Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements, Portland Cement Association. Publication IS009. Skokie, IL: PCA (2004).

[15] Guidelines for design and construction of

fiber reinforced concrete pavements, Roads Congrees, First Revision, Kama Koti Marg Sector-6, R. K. Puram, New Dehli, 110(22), 20-30, Aug, (2013).

[16] Polypropylene Fibers In Portland Cement Concrete Pavements, US Department of the Army Waterways Experiment Station Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, 92(9) (1993) 18-36.

[17] ASTM D7508/D7508M, Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete, (2010) ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[18] EN 12390-3, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, (2009) British Standards.

[19] ASTM C 1018, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), (1997), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[20] ASTM C 672/C 672M, Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, (2003), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[21] EN 12390-8, Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure, (2009) British Standards.

[22] P. Berkowskia, M. Kazberukb, Effect of Fiber on the Concrete Resistance to Surface Scaling Due to Cyclic Freezing and Thawing, Procedia Engineering, 11 (2015) 121-127.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.A. Ramezanianpour, J. Sobhani, A.R. Pourkhorshidi, M. Lotfi, Comparison of the effects of micro and macro polymer fiber on the mechanical and durability of roller-compacted concrete pavements, Amirkabir J. Civil Eng., 52(4) (2020) 797-808.

DOI: 10.22060/ceej.2019.14895.5774