




Effect of Polypropylene Fibers Versus Macrobarchip on the Characteristics of Plastic Concrete

Research Article

Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad¹ , Arian Darvishalinezhad², Masoud Saber Bazkiagourabi³

DOI: [10.22067/jfeci.2024.80952.1215](https://doi.org/10.22067/jfeci.2024.80952.1215)

1- Introduction

A method of controlling the leakage of water stored behind earthen dams is the use of watertight walls, in which plastic concrete materials are used. The waterproof walls have the characteristics of high flexibility, low permeability, and compressive strength proportional to the applied pressure. Therefore, they are used in areas with loose, weak, and highly permeable soil. The strength and permeability of plastic concrete are low, but its ductility is more than ordinary concrete. In conventional concrete, which is a semi-brittle material, failure occurs first at weak interfaces between the mortar and the grain, where cracks exist even before loading. For several decades, all kinds of fibers have been used to fix this mechanical defect of concrete. Moreover, due to low strength, cracks spread quickly in ordinary concrete and lead to breakage. Fibers are used to improve the breaking behavior of concrete. By using these fibers in concrete, the speed of crack propagation decreases and leads to ductility. Adding fibers improves the properties of concrete in a way that the randomly distributed fibers prevent the joining of microcracks to form a large crack and delay this process. Fibers enhance the strength of concrete to some extent and also mainly improve fatigue resistance, ductility, energy absorption capacity, and the life of concrete. These properties boost the resistance of the structure against impact, explosion, and earthquake. Fibers increase the fracture energy by stitching micro-cracks and shortening their width. The appropriate percentage of fiber addition in concrete, the method of mixing, and the economic and practicality of the methods need further investigation. Due to the presence of plastic concrete in the soil environment and its constant exposure to moisture, it is necessary to be careful in choosing the type of fibers so that it has a less negative impact on the efficiency and fluidity of concrete and can be justified from an economic point of view. Among the types of fibers [e.g., metal, glass, propylene, and polypropylene (PP)], the PP fibers have the best performance for adding to plastic concrete because of being hydrophobic and having a very low specific weight.

Due to their high ductility, these fibers are well distributed inside the concrete and perform well in not placing materials next to each other and unfavorable compaction. Considering the importance of plastic concrete and the increasing role of fibers in structural issues, this article examines the effect of macrosynthetic fibers in plastic concrete. The innovation of this research is the study of some characteristics of plastic concrete under the influence of barchip macrosynthetic fibers compared to PP fibers in plastic concrete, which has not been considered so far.

2- Materials

2-1- Cement. The cement used in the plastic concrete mixing project of the waterproof wall was type two of the Neka cement factory.

2-2- Bentonite. Bentonite plays an important role in making plastic concrete and the specifications of the used powder must be under the API standard.

2-3- Water. The quality of concrete mix water plays an important role in the final quality of hardened concrete. In this project, the drinking water of the city of Rahim Abad, from the districts of Rudsar, was used.

2-4- Fibers. In the experiments, two types of fibers manufactured by Nano Nakh Sirjan Company, PP with a length of 12 mm, and MacroBarchip fibers with a length of 30 mm were used.

3- Performed Tests

3-1- Determining the properties of fresh concrete. In the concrete slump test, the flow rate of concrete is measured in terms of being loose or stiff. The use of PP fibers reduces the amount of slump. The results of the tests on fresh concrete are shown in Table 1.

*Manuscript received February 5, 2023, Revised June 3, 2023, Accepted June 24, 2023.

1- Corresponding author. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. **Email:** h.mosavi@guilan.ac.ir

2 MS.c. Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

3 Master of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Table 1: Test results on fresh concrete

Sample	Slump Reduction (%)	Slump (mc)	Specific Weight Loss (%)	Specific Weight
C	-	22	-	2.1
0.3PP12	9.1%	20	1.4%	2.1
0.7PP12	34.1%	14.5	5.1%	2
1PP12	52.3%	10.5	5.1%	2
0.3M30	4.5%	21	2.3%	2.1
0.7M30	15.9%	18.5	3.7%	2.1
1M30	43.2%	12.5	3.7%	2.1

3-2- Ultrasonic Test. Ultrasonic testing of concrete, ASTM C597, is one of the non-destructive tests of concrete. By presenting the quality and relative strength and measuring the length and dimensions of cracks in concrete, this test allows designers and experts to make the right decision in the field of strengthening or verification of operations.

3-3- Compressive strength. The compressive strength test is performed to measure the quality of hardened concrete. Due to the low strength of plastic concrete, this test is performed according to the ASTM D4832 standard.

3-4- Determining the modulus of elasticity. This test was performed according to ASTM C469 on standard cylindrical samples with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm at the age of 28 days.

3-5- Stress-Strain results. Cylindrical samples with a height of 300 mm and a diameter of 150 mm with fibers of 0.3%, 0.7%, and 1% were cured at a temperature of $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ in a water tank for 28 days. A compression and tension testing device with a capacity of 1000 kilonewtons was used to compress the samples. According to ASTM C469, a controllable loading speed with a constant strain of 0.2 mm/min was applied.

3-6- Permeability. The permeability test was performed according to the CRD-C48-92 standard [51] on cylindrical samples with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm.

3-7- Scanning electron microscopy. One of the methods of producing microstructure images is scanning an electron beam on the sample surface by a scanning electron microscope (SEM). By this method, three-dimensional images of the microstructure of the sample are obtained.

4- Conclusion

Based on our results, the effect of 12 mm PP fibers and 30 mm barchip macrofibers caused a decrease in slump values and specific weight. The weight reduction of samples with PP fibers is 14.5% in the PP12 sample and 74.3% in 30 mm macrobarchip fibers in the 1M30 sample. The maximum slump reduction is 52.17% in PP fibers and 18% in macrofibers. The results of the ultrasonic test on the samples showed that the addition of fibers led to a decrease in the wave speed. The maximum value of this decrease was 9.47% in PP fibers in the 1PP12 sample and 14.17% in macrofibers in the 1M30 sample. Examining the results

of the 28-day compressive strength tests shows that fibers have a reducing effect on the compressive strength of plastic concrete. In the case of PP fibers, the maximum amount of this decrease is 27.20% in the 1PP12 sample and 23.32% in macrofibers in the 1M30 sample. The decline in the compressive strength results from the increase in replacement and can be related to the rise in porosity and weakness of the transfer zone. The results showed that the use of 0.3% PP fibers reduced the compressive strength due to the phenomenon of flocculation in concrete. The modulus of elasticity test was performed to determine the pre-peak stress-strain behavior of fiber plastic concrete. The results revealed that with increasing the amount of fibers, the modulus of elasticity decreases. In the case of PP fibers, the maximum amount of this reduction was 16.98% in sample 1PP12 and 24.70% in macrofiber in sample 1M30. According to the results of the stress-strain curve tests of plastic concrete, the change of the axial shape of plastic concrete increased with adding fibers. The normalized curves coincide regardless of the fiber percentage. Compared to the control sample, PP fibers raised permeability by 17% on average, while the permeability of the sample containing macrobarchip fibers was reduced by 30% on average compared to the control sample. The permeability of PP fibers in plastic concrete was higher than that of macrobarchip fibers. Therefore, the application of macrobarchip fibers is more suitable due to the low permeability in plastic concrete waterproof walls compared to the control plastic concrete sample. In the case of PP fibers, the maximum amount of increase in permeability in the 0.7 PP sample rose by approximately 49% and in macrobarchip fibers in 0.30M sample decreased by approximately 21%. The results of SEM images showed the disruption of the uniformity of plastic concrete and the creation of voids. As a result, it led to an increase in permeability and a decrease in the compressive strength.



تأثیر الیاف پلی پروپیلن در مقابل ماکرو بارچیب بر مشخصات بتن پلاستیک

مقاله پژوهشی

مسعود صابر بازکیاگورابی^(۳)

آرین درویشعلی نژاد^(۲)

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2024.80952.1215

چکیده بتن پلاستیکی به طور گسترده در ساخت دیوارهای بریده سدهای خاکی استفاده می‌شود. خواص مکانیکی و رفتار مصالح به کار رفته در ساخت چنین دیوارهایی به دلیل بارهای وارده بر پی و ضد آب بودن دیوار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انرژی شکست مهمترین عامل تأثیرگذار در توصیف رفتار شکست در نظر گرفته می‌شود که در واقع مکانیسم ترک‌خوردگی بتن را توصیف می‌کند. این تحقیق با هدف بررسی اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن ۱۲ میلیمتری و الیاف ماکروبارچیب ۳۰ میلیمتری برای بتن پلاستیک تقویت‌کننده دیوارهای بریده انجام شده است. خواص مورد مطالعه عبارتند از: آزمایش تعیین اسلامپ مخلوط بتن، آزمایش اولتراسونیک بتن، مدول الاستیسیته، منحنی تنش-کرنش، نفوذپذیری بتن، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه. نتایج به دست آمده از مخلوط های بتن تازه نشان می‌دهد که وزن مخصوص و اسلامپ برای هر دو نوع الیاف کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش در الیاف پلی پروپیلن ۱۲، ۵۲، ۲۷٪ بود. نتایج آزمایش اولتراسونیک نشان دهنده کاهش ۹، ۴۷٪ سرعت موج برای الیاف پلی پروپیلن و ۱۴، ۱۷٪ برای الیاف های ماکرو است. بر اساس نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه، افزودن الیاف باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. بیشترین مقدار برای الیاف پلی پروپیلن ۲۰، ۲۷، ۲۰٪ و برای الیاف ماکرو ۲۳، ۳۲٪ بود. با توجه به نتایج مدول الاستیسیته، افزودن الیاف این ویژگی بتن پلاستیک را کاهش می‌دهد به طوری که بالاترین مقدار برای الیاف پلی پروپیلن ۱۶، ۹۸٪ و برای الیاف ماکروبارچیب ۲۴، ۷۰٪ است.

واژه‌های کلیدی الیاف پلی پروپیلن، الیاف ماکرو، بتن پلاستیک، نفوذپذیری، سرعت امواج فرا صوت.

Effect of Polypropylene Fibers versus Macrobarchip on the Characteristics of Plastic Concrete

S. H. Ghasemzadeh Mousavinejad

A. Darvishalinezhad

M. Saber Bazkiagourabi

Abstract Plastic concrete is widely used in the construction of cut-off walls of earth dams. The mechanical properties and behavior of the materials used in the construction of such walls are of particular importance due to the loads on the foundation and the waterproofness of wall. Fracture energy is considered to be the most important influencing factor in the description of fracture behavior, which actually describes the cracking mechanism of concrete. This research aims to study the effect of adding 12 mm polypropylene fibers and 30 mm macrobarchip fibers to reinforce plastic concrete of cut-off walls. The studied properties include: concrete mix slump determination test, concrete ultrasonic test, modulus of elasticity, stress-strain curve, concrete permeability, scanning electron microscope (SEM) and compressive strength at the age of 28 days. The results obtained from fresh concrete mixtures show that the specific weight and slump are reduced for both types of fibers. The highest decrease in PP fibers was 52.27%. The results of the ultrasonic test indicate a 9.47% decrease in wave speed for PP fibers and 14.17% for macro fibers. Based on the 28-day compressive strength results, the addition of fibers have reduced the compressive strength as much as 27.20% for PP fibers and 23.32% for macro fibers. According to the results of the modulus of elasticity, adding fibers reduces this characteristic of plastic concrete. such that the highest value for PP fibers is 16.98% and 24.70% for macro fibers.

Key words Polypropylene Fibers, Macro Fibers, Plastic Concrete, Permeability, Ultrasonic Wave Velocity.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۱/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۴/۳ می‌باشد.

Email: h.mosavi@guilan.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(۳) دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

مقدمه

یک روش کنترل فرار آب ذخیره شده در پشت سدهای خاکی استفاده از دیوارهای آب‌بند است که در آنها از مصالح بتن پلاستیک استفاده می‌شود. دیوارهای آب‌بند دارای خصوصیات انعطاف‌پذیری بالا، نفوذپذیری کم و مقاومت فشاری متناسب با فشار اعمال شده است؛ از این رو در مناطقی با خاک پی سست، ضعیف و نفوذپذیری بالا کاربرد دارند. مقاومت و نفوذپذیری بتن پلاستیک پایین ولی شکل‌پذیری آن بیشتر از بتن معمولی است.

Padron و Zollo [1] اثر دو نوع الیاف پلی‌پروپیلن را در کاهش ترک‌های آبرفتگی پلاستیک در ملات سیمان و بتن بررسی کردند. آنان برای ایجاد ترک، بتن تازه را به مدت ۱۶ ساعت در معرض جریان هوا با سرعت $22/5 \text{ Km/h}$ قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان داد که استفاده از $0/1$ درصد حجمی الیاف با طول 19 mm در بتن، ترک‌ها را تا حدود 20% مقدار نمونه بدون الیاف کاهش می‌دهد.

Ma و همکاران [2] با بررسی کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با انواع مختلف الیاف از پلی‌پروپیلن، پلی‌استر، پلی‌اتیلن، نایلون و کربن برای مقاوم‌سازی مقاومت‌های فشاری، خمشی و برشی استفاده کردند. نتایج حاصل از اختلاط الیاف با بتن، نشان دهنده عملکرد مناسب الیاف بر روی خصوصیات فیزیکی بتن بود و باعث افزایش 5% مقاومت فشاری و خمشی بتن شد.

Balaguru [3] به بررسی نقش الیاف در کاهش ترک کامپوزیت‌های سیمانی در دوره گیرش اولیه و نهایی پرداخت. با استفاده از قالب‌های مستطیلی با شیارهایی در کف برای تسریع ترک‌خوردگی در بتن ساخته شده با الیاف پلی‌پروپیلن با طول 19 mm دریافت که این الیاف در ملات‌های سیمانی، میزان ترک‌ها را به حدود 60% ترک‌های نمونه بدون الیاف کاهش می‌دهد.

Berke و Dallaire [4] با استفاده از قالب‌های پیشنهادی استاندارد ICBO، برای بررسی اثر الیاف پلی‌پروپیلن در کاهش ترک‌های آبرفتگی پلاستیک بتن آزمایش‌هایی انجام دادند و نتیجه گرفتند که الیاف با طول بیشتر در کاهش ترک‌ها تأثیر چشم‌گیری دارد.

Soroushian و همکاران [5] ترک‌خوردگی انقباض

پلاستیک بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که الیاف پلی‌پروپیلن در ناحیه ترک‌خوردگی انقباض پلاستیک، حداکثر عرض ترک‌خوردگی را به $0/1$ درصد کاهش می‌دهد. آنها همچنین نشان دادند که بتن مسلح به الیاف درازتر در $0/1$ و $0/2$ درصد ترک‌های کوچکتری ایجاد می‌کند. Alhozaimy و Soroushian [6] در پژوهش‌های خود با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن (با طول‌های 12 mm و 19 mm) با درصدهای اختلاط $0/1$ ، $0/2$ ، $0/3$ و $0/4$ درصد نسبت به وزن سیمان جهت مقاوم‌سازی مشاهده کردند که مقاومت فشاری تا 7% و مقاومت خمشی تا 8% افزایش می‌یابد.

Bernard [7] با مقایسه دوام بتن مسلح با الیاف ماکروسینتیک بارچیب HT48 و الیاف فولادی پس از ترک‌خوردگی در محیط‌های خورنده نشان داد که انرژی جذب شده پس از ترک در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی با افزایش عرض ترک کاهش یافت. این شدت کاهش عملکرد نمونه‌های حاوی الیاف فولادی برای عرض ترک‌خوردگی تا $0/2 \text{ mm}$ زیاد بود، اما بعد از آن با شیب کمتری دچار ضعف در عملکرد شدند. دوام شاکریت حاوی الیاف ماکروسینتیک بارچیب در هر دو محیط آزاد و درون آب دریا بسیار مطلوب بود. به عبارتی افزایش عرض ترک منجر به بدتر شدن عملکرد جذب انرژی الیاف بارچیب نشد.

Bazant و Becq-Giraudon [8] اثر هندسه الیاف را بر ترک‌خوردگی انقباض بتن پلاستیک مطالعه کردند. در این بررسی چهار نوع از الیاف PP، سه نوع تک رشته‌ای (فلامنت) و یک نوع از الیاف شبکه‌ای با درصد مختلف به بتن در حین اختلاط اضافه شد و این نتایج به دست آمد: الیاف PP اثر زیادی بر کنترل ترک‌خوردگی انقباض پلاستیک بتن دارد. افزودن الیاف در ناحیه ترک‌خوردگی، ماکزیمم عرض ترک و تعداد ترک‌ها را کاهش می‌دهد و افزایش درصد حجمی الیاف در بتن، سبب افزایش تأثیر آن بر کنترل ترک‌خوردگی انقباض پلاستیک بتن می‌شود.

Murshid و Teklo [9] تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن را با چهار درصد حجمی مختلف الیاف (صفر، $0/5$ ، 1 و $1/5$ درصد) بر روی طاق خمشی بتن بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش مقدار الیاف پلی‌پروپیلن در بتن، میزان جذب انرژی و به خصوص طاق خمشی بتن افزایش می‌یابد.

Bahmani و Mostofinejad [15] به بررسی خواص مکانیکی بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف پلی- پروپیلن و الیاف ماکروی مصنوعی (بارچیب) پرداختند. نتایج محققان نشان داد که هر سه نوع الیاف به کار رفته می‌توانند در بهبود مدول گسیختگی مؤثر باشند. اما فقط الیاف فولادی توانسته بر مقاومت فشاری تأثیر مثبت داشته است و سایر الیاف‌ها سبب کاهش مقاومت فشاری در بتن شدند.

Afzali Naniz و همکاران [16] به بررسی اثر الیاف میکرو و ماکروسنتتیک بر جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بتن پرداختند. بررسی نتایج نشان داد که استفاده از هر دو نوع الیاف میکرو و ماکرو در کنارهم بهترین عملکرد را در زمان ایجاد نخستین ترک و نیز کنترل عرض ترک داشته است.

امینی [17] به بررسی تأثیر الیاف پلیمری ماکروسنتتیک بر روی خصوصیات مکانیکی بتن تراورس پرداخت. با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن الیافی و مشاهده تأثیر الیاف MEX-200 در ترکیب با پودر میکروسیلیس و فوق روان‌کننده بر روی رفتار بتن تراورس، مشخص شد که استفاده از مقدار مشخصی الیاف MEX-200 سبب بهبود مقاومت فشاری و مقاومت خمشی می‌شود.

باقری و همکاران [18] به مقایسه عملکرد الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فولادی به لحاظ کنترل ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خشک‌شدن بتن پرداختند. نتایج محققان نشان داد که الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فولادی در مقادیر کم و متوسط (۰/۲۵ و ۰/۵) درصد مصرفی عملکرد مشابهی داشت. آنها با ۰/۵ درصد مصرف الیاف توانستند عرض ترک‌ها را تا حدود ۵۰٪ کاهش دهند. با افزایش مقدار مصرف به ۱٪، عملکرد الیاف فولادی در کنترل ترک‌خوردگی و جمع‌شدگی بهتر از الیاف پلیمری ماکرو بود.

Eshta و Salighehzadeh [19] به مطالعه آزمایشگاهی خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی دوده سیلیسی و الیاف بارچیب پرداختند و دریافته‌اند که دوده سیلیس در کاهش جذب آب نیم‌ساعته و افزایش مقاومت ویژه الکتریکی، فشاری و خمشی بتن مؤثر بوده و با استفاده توأم از دوده سیلیس و الیاف بارچیب مقاومت خمشی بتن تا ۶۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین افت مقاومت ویژه الکتریکی و افزایش مقاومت فشاری و جذب آب نیم‌ساعته با افزودن الیاف بارچیب به ترکیب بتن حاوی

Tahershamsi و همکاران [10] در یک بررسی آزمایشگاهی به مطالعه تأثیر نوع و میزان کانی‌های رسی بر مقاومت فشاری بتن پلاستیک پرداختند. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که در ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌ها، افزودن رس بتونیتی پیامدهای مطلوب‌تری نسبت به رس کائولینیتی در بتن پلاستیک دارد.

Singh و همکاران [11] به بررسی مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن پرداختند. آنها برای آزمایش مقاومت فشاری از قالب‌های مکعبی به ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر و برای آزمایش مقاومت خمشی از قالب‌های مکعب مستطیل به ابعاد $100 \times 100 \times 500$ میلی‌متر استفاده کردند. نمونه‌های بتنی مسلح به ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن با نسبت‌های ۱۰۰-۰٪، ۷۵-۲۵٪، ۵۰-۵۰٪، ۲۵-۷۵٪ و ۰-۱۰۰٪ از حجم کل بتن ساخته شد. آنها با انجام آزمایش‌ها دریافته‌اند که بهترین ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، ترکیب ۷۵٪ الیاف فولادی و ۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن است.

مدرسی و همکاران [12] به مطالعه تأثیر آب خلیج فارس بر خواص مقاومتی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن پرداختند. آنها برای ساخت بتن از مصالح سنگی سیلیسی و سیمان پرتلند تیپ ۵ استفاده کردند و دریافته‌اند که مقاومت فشاری بتن با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن کاهش می‌یابد و با افزایش میزان الیاف، تأثیر سوء شرایط مخرب خلیج فارس بر مقاومت فشاری بتن کاهش پیدا می‌کند. شرایط محیطی خلیج فارس باعث کاهش مقاومت خمشی بتن می‌شود؛ اما با افزودن 3 kg الیاف پلی‌پروپیلن در هر متر مکعب بتن می‌توان تأثیر سوء شرایط محیطی خلیج فارس را بر مقاومت خمشی بتن خنثی کرد.

Kazemian و همکاران [13] تأثیر تغییرات بتونیت روی مشخصات فیزیکی بتن پلاستیک را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که کاربرد بتونیتی که مشخصه خمیری بیشتری دارد به دلیل وجود آب کمتر در آن، سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد.

Mehmandoost Kotlar و همکاران [14] به بررسی اصلاح یک مدل رفتاری الاستو پلاستیک در بتن پلاستیک پرداختند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد مدل رفتاری اصلاح شده کارایی بسیار مناسبی در شبیه‌سازی رفتار مصالح بتن پلاستیک دارد.

دوده سیلیس مشهود است.

خدا بنده لو و اسدی زینالی [20] به بررسی بهینه‌یابی میزان مصرف الیاف ماکروسینتتیک در هم‌تنیده برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن پرداختند. مقایسه نتایج آزمون‌ها نشان داد که بتن‌های مسلح به الیاف، نسبت به بتن‌های معمولی مقاومت فشاری، خمشی و ضریب کشسانی بیشتری دارند.

رزاقیان قادیکلانی و همکاران [21] در پژوهشی به مطالعات آزمایشگاهی کارایی، رفتار مکانیکی و خصوصیات دوامی ملات سیمانی مسلح شده با الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن پرداختند و دریافته‌اند که استفاده هم‌زمان این دو الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری ملات سیمانی نداشته است؛ در حالی که نتایج، عملکرد مطلوب و قابل توجه الیاف‌های مذکور در افزایش مقاومت خمشی و کششی را نشان دادند. همچنین حضور هم‌زمان الیاف‌های بازالت و پلی‌پروپیلن موجب بهبود خصوصیات مکانیکی و دوامی ملات سیمانی می‌شود، در حالی که در صورت استفاده مجزا از هر یک از این الیاف‌ها دستیابی به چنین نتیجه مطلوبی دور از انتظار است.

رستمی نجف آبادی [22] و همکاران به مطالعه تأثیر آب دوستی الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی بتن الیافی پرداختند و نتایج نشان داد از آنجا که آب یکی از ترکیبات بتن است، تمایل الیاف به خیس‌شدگی و جذب آب از عوامل تأثیر گذار در میزان چسبندگی الیاف به ماتریس بتنی به شمار می‌رود. عدم جذب رطوبت و خنثی بودن الیاف پلی‌پروپیلن موجب ایجاد پیوندهای ضعیف‌تری بین الیاف و ماتریس بتنی شده است. افزودن الیاف آب دوست به بتن در مجموع موجب افزایش ۱۱٪ مقاومت فشاری، ۴۵٪ مقاومت کششی و ۷۷٪ مقاومت خمشی بتن شده است. الیاف آب دوست ۵٪ مقاومت فشاری، ۷٪ مقاومت کششی و ۲٪ مقاومت خمشی بتن مسلح شده را در مقایسه با بتن مسلح شده با الیاف آب‌گریز ارتقاء بخشیده‌اند.

پاچیده و قلهکی [23] به مطالعه آزمایشگاهی اثرات افزودن الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به بتن و مقاومت آن پس از دماهای مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که اثرات آتش بر روی بتن حاوی الیاف فولادی آسیب بیشتری دارد. همچنین مقاومت فشاری و مدول گسیختگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و مقاومت کششی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقادیر

را دارند. مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی الیاف فولادی به ترتیب ۴۰٪ و ۵۰٪ بیشتر از بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن بود. با این حال قدرت خمشی آنها تقریباً برابر بود. با مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌ها با ۴۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ها با ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد مقاومت بیشتری دارند.

پاچیده و قلهکی [24] به مطالعه آزمایشگاهی بر روی عملکرد بتن ریزدانه حاوی فنر فولادی بازیافتی در معرض شرایط اسیدی پرداختند و نتایج حاکی از آن بود که افزودن الیاف فولادی و فنر بازیافتی به ترتیب ۵۰ و ۶۰ درصد استحکام فشاری و کششی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این نمونه‌های حاوی فنر بازیافتی در مقایسه با نمونه‌های شامل الیاف فولادی در برابر محیط‌های اسیدی بهتر مقاومت می‌کنند. به طور کلی مشخص شد که به دلیل تفاوت ناچیز بین مقاومت نمونه‌ها، استفاده از فنر بازیافتی فلزی در بتن ریزدانه از نظر فنی و اقتصادی قابل توجیه است.

خلیلی و همکاران [25] به مطالعه آزمایشگاهی اثر دماهای بالا بر عملکرد بتن سبک پلاستیک حاوی الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه پرداختند و دریافته‌اند که الیاف فولادی در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن سبک پلاستیک بسیار مفید بود؛ به طوری که در بعضی از مراحل آزمایش مقاومت فشاری و کششی بتن را پس از حرارت به بیش از ۴۰٪ افزایش می‌دهد؛ اما الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه به خاطر خصوصیات فیزیکی و ظاهری آنها در مقایسه با الیاف فولادی تأثیر اندکی در مقاومت فشاری و کششی بتن پس از حرارت داشته‌اند تا جایی که در دماهای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه، الیاف شیشه هیچ‌گونه تأثیری در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن سبک پلاستیک نداشته‌اند.

اسماعیلی و قهاری (۱۳۹۱) [26] در یادداشت تحقیقاتی به بررسی آزمایشگاهی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار بتن تراورس پرداختند. نتایج نشان داد که الیاف استفاده شده - وزن مخصوص پایینی دارند - از آنجا که جایگزین بخشی از مصالح بتن شده است، توانسته وزن مخصوص بتن را کاهش دهد. از سوی دیگر با توجه به ایجاد فضای خالی و افزایش تخلخل به وسیله الیاف در بتن، انتظار می‌رود که میزان روانی بتن کاهش پیدا کند. نتایج محققان در آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که در تمام نمونه‌ها با افزایش الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری

دریافتند که در نسبت الیاف ۰/۰۰۳ بیشتر مشخصه‌های بتن معمولی و سبک کاهش می‌یابد و با نسبت الیاف ۰/۰۰۲ تغییر چندانی نمی‌کند که علت آن پخش نامناسب الیاف در نسبت‌های بالا است. محققان در آزمایش تعیین مدول الاستیسیته دریافتند که با افزودن نانوسیلیس به بتن‌های حاوی الیاف دو حالت پیش می‌آید. حالت اول مربوط به دانسیته بتن است که با افزودن نانوسیلیس دانسیته بتن افزایش می‌یابد و موجب افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. حالت دوم نیز به خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس مربوط می‌شود که تا جایی که خلل و فرج سیمان و بتن پر نشده باشد، افزایش نانوسیلیس موجب افزایش مدول الاستیسیته خواهد شد؛ ولی زمانی که مقدار نانوسیلیس بیش از حد در مخلوط افزایش می‌یابد موجب کاهش مدول الاستیسیته می‌شود [29].

فانلا و نامان در تحقیقاتشان نشان دادند شاخه نرم شدگی پساییک منحنی تنش-کرنش فشاری بتن دارای الیاف فولادی صاف‌تر از بتن ساده به نظر می‌رسد. به عبارتی تنش در ناحیه پساییک در بتن دارای الیاف فولادی بیشتر است. معادلات روابط تنش-کرنش بتن ساده را نمی‌توان برای منحنی تنش-کرنش بتن الیافی بکار برد؛ چرا که این معادلات به مقدار الیاف استفاده شده در بتن بستگی خواهد داشت [30].

در بتن معمولی که ماده‌ای شبه ترد است، شکست ابتدا در سطوح ضعیف بین ملات و دانه اتفاق می‌افتد که در آن ترک‌هایی حتی قبل از بارگذاری وجود دارد. چندین دهه است که برای رفع این نقص مکانیکی بتن از انواع الیاف استفاده می‌شود. همچنین در بتن معمولی به دلیل طاقت پایین، ترک‌ها به سرعت گسترش یافته و منجر به گسیختگی آن می‌گردد. به منظور بهبود رفتار گسیختگی در بتن از الیاف استفاده می‌شود. با استفاده از این الیاف در بتن، سرعت گسترش ترک‌ها کاهش می‌یابد و منجر به شکل‌پذیری آن می‌گردد.

افزودن الیاف به بتن خصوصیات آن را بهبود می‌بخشد. الیاف که به صورت تصادفی پخش شده‌اند از به هم پیوستن میکرو ترک‌ها برای تشکیل یک ترک بزرگ جلوگیری می‌کنند و این فرآیند را به تعویق می‌اندازند. الیاف نه تنها مقاومت بتن را تا حدی افزایش می‌دهند؛ بلکه به طور عمده‌ای مقاومت در برابر خستگی، شکل‌پذیری، توان جذب انرژی و عمر بتن را نیز بهبود می‌بخشند. این خواص باعث بهتر شدن مقاومت سازه در مقابل ضربه، انفجار و زمین لرزه می‌شوند. الیاف، انرژی

کاهش پیدا کرده است؛ اما نمی‌توان رابطه ای خطی بین این دو عامل پیدا کرد. از مقدار الیاف $2 \frac{Kg}{m^3}$ و بیشتر از این مقدار، مقاومت فشاری به شدت کاهش پیدا کرده است. در مقدار الیاف $0.7 \frac{Kg}{m^3}$ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد، کاهش برابر ۸/۷ درصد را نشان داده است.

رزاقیان قادیکلای و همکاران [21] در پژوهشی به مطالعات آزمایشگاهی کارایی، رفتار مکانیکی و خصوصیات دوامی ملات سیمانی مسلح شده به الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن پرداختند و نتایج محققان در آزمایش مربوط به خواص بتن تازه نشان داد با افزایش درصدهای الیاف میزان کارایی (اسلامپ و میز جریان) ملات سیمانی کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش مربوط به نمونه حاوی ۰/۱۲۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن (PBYY) به میزان ۲۹٪ برای اسلامپ و میز جریان است. بنابراین برای جبران کارایی در نمونه‌های حاوی الیاف با ثابت ماندن آب، میزان فوق روان‌کننده را افزایش داد. این پدیده را می‌توان به ساختار شبکه‌ای ایجاد شده توسط الیاف‌ها در کامپوزیت سیمانی نسبت داد که از روانی و جداسدگی در ملات جلوگیری می‌کنند [27]. همچنین با توجه به این که سطح مخصوص الیاف‌ها از سنگدانه‌ها بیشتر است، خمیر سیمان بیشتری اطراف الیاف قرار می‌گیرند که موجب افزایش لزجت ملات و کاهش کارایی آن می‌شود [28]. نتایج محققان در آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک نشان داد که افزودن الیاف به ملات سیمانی سرعت پالس اولتراسونیک را نسبت به نمونه کنترل افزایش می‌دهد که نشان دهنده کاهش میزان حفرات موجود در کامپوزیت سیمانی است. نمونه حاوی ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصد الیاف بازالت (PBXY) بهترین عملکرد را در این آزمایش نشان داده است و میزان سرعت پالس التراسونیک را ۴/۹۲ درصد نسبت به نمونه کنترل افزایش داده است. نتایج محققان در ارتباط با آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که افزودن الیاف بازالت و پلی‌پروپیلن تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ملات سیمانی نداشته است. نتایج حاکی از آن است که ترکیب هیبریدی ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۱۲۵ درصدی الیاف بازالت در کامپوزیت سیمانی (PBXY)، بیشترین افزایش مقاومت فشاری را به میزان ۱۵ درصد ۷ روزه و ۹/۳ درصد ۲۸ روزه نتیجه داده است [21].

محمدی و سیف الهی در پژوهشی تأثیر نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن بر خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی و بتن سبک را مورد مطالعه قرار دادند و در آزمایش مقاومت فشاری

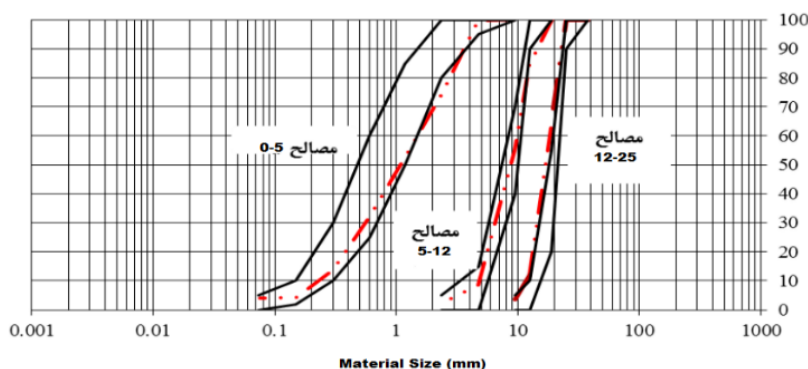
مصالح در کنار یکدیگر و تراکم نامطلوب، عملکرد خوبی دارند. با توجه به اهمیت موضوع بتن پلاستیک و نقش روزافزون الیافها در مباحث سازه‌ای، این مقاله به بررسی تأثیر الیاف ماکروسنتتیک در بتن پلاستیک می‌پردازد. نوآوری این تحقیق مطالعه برخی مشخصات بتن پلاستیک تحت تأثیر الیاف ماکروسنتتیک بارچپ در مقایسه با الیاف پلی پروپیلن در بتن پلاستیک است که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است.

دانه‌بندی

نمونه‌برداری مصالح سنگی ریزدانه و درشت‌دانه بر اساس استاندارد ASTM D75 [31] و آزمایش دانه‌بندی آنها مطابق با استاندارد ASTM C136 [32] انجام شد که نتایج آن در شکل (۱) و خصوصیات دیگر در جدول (۱) آمده است.

شکست را به وسیله دوختن میکرو ترک‌ها و کوتاه کردن عرض آنها افزایش می‌دهند.

از موارد قابل بررسی، درصد مناسب افزودن الیاف در بتن، نحوه اختلاط و بررسی اقتصادی و کاربردی بودن این روش است. با توجه به حضور بتن پلاستیک در محیط خاکی و در معرض رطوبت بودن دائمی آن، لازم است در انتخاب نوع الیاف دقت شود تا تأثیر منفی کمتری بر روی کارایی و روانی بتن داشته و از لحاظ اقتصادی نیز قابل توجیه باشد. در بین انواع الیاف نظیر فلزی، شیشه‌ای و پروپیلن، الیاف پلی پروپیلن بهترین عملکرد را برای افزودن به بتن پلاستیک داراست؛ زیرا علاوه بر خاصیت آب‌گریز بودن و تأثیر نامطلوب از حضور آب، وزن مخصوص بسیار کمی دارد. این الیاف به دلیل شکل‌پذیری بالا به خوبی در داخل بتن توزیع شده و در عدم قرارگیری



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی [39]

عنوان آزمایش	شن درشت	شن ریز	ماسه
ضریب نرمی (ASTM C136) [32]	-	-	۳/۲
هم ارز ماسه‌ای (ASTM D2419) (%) [33]	-	-	۸۹
افت وزنی در مجاورت سولفات سدیم (ASTM C88) (%) [34]	۱/۶	۱/۷	۰/۸
درصد مواد زیر الک ۲۰۰ (ASTM C136) [32]	۰/۶	۰/۸	۴/۵
افت وزنی در مقابل سایش (لس آنجلس ASTM C151 و ASTM C535) [35,36]	نوع دانه‌بندی	A	C
	تعداد دور دستگاه	۵۰۰	۵۰۰
	درصد سایش	۱۴	۲۳
	درصد تطویل	۵	۴
تطویل و تورق	درصد تورق	۳	۲
	ظاهری	۲/۷۵۸	۲/۷۶۵
	حقیقی	۲/۶۷۸	۲/۶۳۸
وزن مخصوص و جذب آب (ASTM C127 و ASTM C128) [37,38]	جذب آب (%)	۱/۱	۱/۳
			۲

جدول ۲ مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان [40]

مشخصات استاندارد تپ 2	مقدار برای نمونه	نوع آزمایش
۰/۸	۰/۰۸	انبساط اتوکلاو (%)
۱۴۵۰	۲۶۳۰	مقاومت فشاری ۳ روزه بر حسب $(\frac{N}{mm^2})$
۲۴۷۰	۳۵۲۰	مقاومت فشاری ۷ روزه بر حسب $(\frac{N}{mm^2})$
-	۴۷۷۰	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر حسب $(\frac{N}{mm^2})$
۲۸۰	۲۹۲	نرمی به روش بلین بر حسب $(\frac{m^2}{Kg})$
حداقل ۶۰	۱۵۵	زمان گیرش اولیه بر حسب (Min)
حداکثر ۳۷۵	۲۵۰	زمان گیرش ثانویه بر حسب (Min)
حداقل ۲۰	۲۰/۴۵	درصد دی اکسید سیلیسیوم (SiO ₂)
حداکثر ۶	۵/۲	درصد اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃)
حداکثر ۶	۳/۲۶	درصد اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)
حداکثر ۶	۱/۱۷	درصد اکسید منیزیم (MgO)
حداکثر ۳	۳/۱۹	تری اکسید گوگرد (SO ₃)
حداکثر ۳	۲/۰۶	افت وزنی در اثر حرارت
حداکثر ۰/۸	۰/۱۹	باقی مانده نامحلول
حداکثر ۸	۸	درصد C ₃ A

می‌گذارند و یا باعث ایجاد خوردگی میلگردها می‌شوند. آب مخلوط نباید حاوی مواد آلی نامطلوب یا مقادیر بیش از حد مجاز مواد معدنی باشد. در این پروژه از آب شرب شهر رحیم آباد از توابع رودسر استفاده شده است.

الیاف مورد استفاده

در آزمایش‌ها از دو نوع الیاف ساخت شرکت نانو نخ سیرجان، پلی پروپیلن PP به طول ۱۲ mm و الیاف ماکرو بارچپ به طول ۳۰mm استفاده شده است. این الیاف‌ها برای افزایش خاصیت ضد کشیدگی بتن، افزایش مقاومت در برابر خوردگی، افزایش عملکرد ضد تورمی بتن، نفوذ ناپذیر کردن مخازن، کاهش شکست در هنگام زلزله، جلوگیری از آسیب به تاپرها و ... به کار می‌رود. الیاف پلی پروپیلن و ماکرو بارچپ برای سازه‌های در معرض تنش و خمش زیاد، لوله‌های تحت فشار کم، پل‌ها، راه‌ها، فرودگاه‌ها و سایر سازه‌های مهندسی کارایی دارد. شکل (۲) الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده را نشان می‌دهد. این نوع الیاف به عنوان افزودنی برای تقویت و مسلح کردن بتن و مخلوط‌های سیمانی و گچی کاربرد دارد و باعث افزایش مقاومت خمشی، کششی، برشی و سایشی می‌شود. علاوه بر

مصالح مورد استفاده

سیمان

سیمان مصرفی در طرح اختلاط بتن پلاستیک دیوار آب‌بند از نوع تپ دو کارخانه سیمان نکا است. جدول (۲) نتایج آزمایشات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی را نشان می‌دهد.

بتونیت

بتونیت در ساخت بتن پلاستیک نقش مهمی دارد؛ به گونه‌ای که مشخصات پودر مصرفی باید مطابق با استاندارد API باشد. برای افزودن پودر بتونیت به بتن ابتدا باید پودر را با نسبت مشخصی از آب مخلوط کرد تا با گذشت حداقل ۲۴ ساعت به صورت اشباع درآید. در این حالت امکان چرخش گل به وسیله پمپ نیز وجود دارد که به راحتی می‌توان گل بتونیت همگنی در سیلو ذخیره کرد و در حین ساخت بتن از آن استفاده نمود.

آب

کیفیت آب مخلوط بتن در کیفیت نهایی بتن سخت‌شده نقش مهمی ایفا می‌کند. ناخالصی‌های موجود در آب سبب اختلال در گیرش سیمان می‌گردند و به نحو نامطلوبی بر مقاومت بتن تأثیر

طرح اختلاط نمونه‌ها

نسبت ریزدانه به درشت‌دانه بر حسب وزن بر اساس ASTM C12-22a [42] ۱:۱ محاسبه و مطابق جدول (۵) استفاده شد. وزن مخصوص کل سنگدانه‌ها به طور متوسط $\frac{gr}{cm^3}$ ۲/۶۶ و درصد جذب آب متوسط سنگدانه‌ها ۱/۵۹ اندازه گیری شد. نسبت ریزدانه به درشت دانه بر حسب وزن و بر اساس ASTM C-125 [43] نسبت سنگدانه‌های مانده روی الک شماره ۴ (۴/۷۵mm) است. همچنین مصالح ریزدانه، سنگدانه‌های عبوری از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر) است [39].

جدول ۵ میزان مصالح سنگی به کار رفته در طرح نمونه‌ها

اندازه دانه بندی (mm)	وزنی مصالح (%)	وزن (Kg)	وزن مخصوص (g/cm ³)	جذب آب (%)
۵-۰	۵۰	۶۷۳	۲/۶۴	۲
۱۲-۵	۲۰	۲۷۳	۲/۶۷	۱/۳
۲۵-۱۲	۳۰	۴۱۰	۲/۶۸	۱/۱۰

روند ساخت نمونه‌ها

برای بررسی تأثیر میزان الیاف، نمونه‌هایی با مقادیر مختلف الیاف ماکرو بارچیب و الیاف پلی پروپیلن تولید شد. برای اختلاط الیاف با بتن باید نخست این الیاف‌ها به وسیلهٔ اپراتور به شکل مناسب از هم جدا شده و سپس به مخلوط بتن اضافه شوند [44]. در روند ساخت نمونه‌های بتن الیافی بر اساس ACI، اختلاط بتن همراه با الیاف حدود یک دقیقه طول می کشد تا از مخلوط شدن الیاف با بتن اطمینان حاصل شود [45]. پس از پایان عمل اختلاط، آزمایش‌های بتن تازه روی مخلوط انجام می‌گیرد و سپس برای اجرای آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته، مخلوط به درون قالب‌های منشوری mm ۱۵۰×۳۰۰ و mm ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰ و استوانه‌ای mm ۱۵۰×۳۰۰ ریخته می‌شود. نمونه‌ها پس از اعمال لرزش اولیه توسط میز ویریه به مدت ۲۴ ساعت درون قالب در اتاق مرطوب قرار می‌گیرد و در این مدت سطح نمونه‌ها به طور دائم توسط گونی مرطوب نگه داشته می‌شود. سپس قالب‌ها باز و بلافاصله برای عمل‌آوری درون مخزن آب در محدودهٔ دمای ۲۰ تا ۲۲ درجهٔ سانتی‌گراد

این، هنگام مخلوط شدن با بتن سبب ته‌نشین شدن و افزایش وزن بتن نمی‌شود و محیط قلیایی بتن را از بین نمی‌برد. در جدول (۳) و (۴) مشخصات الیاف ماکرو بارچیب و پلی پروپیلن آمده است.



شکل ۲ الیاف پلی پروپیلن استفاده شده

جدول ۳ مشخصات الیاف ماکرو بارچیب [41]

مقدار	نمونه
۰/۹۱	چگالی (gr/cm ³)
۵۴-۵۰-۴۰-۳۸-۳۰	طول (mm)
امباسینگ یا کبریتی یا بارچیب	شکل
۴۵۰-۶۵۰	مقاومت کشش (Mpa)
۳۵۰۰-۶۰۰۰	مدول الاستیک (Mpa)
۱/۱ ± ۰/۲ (mm)	قطر معادل
ندارد	جذب آب
≥ ۱۶۰	نقطه ذوب (°C)
۷-۱۰	سختی Tenacity

جدول ۴ مشخصات الیاف پلی پروپیلن مصرفی [41]

مقدار	مشخصات
۱۰۰٪ PP	نوع جنس
سفید و مشکی	رنگ ظاهری
۰/۹۱	وزن مخصوص (gr/cm ³)
۳۵، ۲۳	قطر (میکرون)
۴۰۰	مقاومت کششی (MPa)
۱۶۵	محدوده ذوب (°C)
بالا	مقاومت در برابر اسیدها و قلیاها
بالا	مقاومت در برابر نمک
۰/۶-۱	طول برش (mm)
۸۰	درصد ازدیاد طول (%)
۵-۳	غوطه وری در آب (S)

به طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول (۵) و (۶) آمده است. در بیان نتیجه‌ها به ترتیب بتن پلاستیک فاقد الیاف با C (بتن کنترل)، بتن دارای الیاف پلی‌پروپیلن با PP و بتن دارای الیاف ماکرو بارچپ با M نمایش داده شد. عدد قبل و بعد از نوع الیاف به ترتیب درصد و طول الیاف مصرفی را بیان می‌کند. برای مثال بتن پلاستیک حاوی ۰/۷ درصد حجمی از الیاف پلی‌پروپیلن ۱۲ mm به شکل 0.7 PP12 و بتن دارای ۰/۳ درصد الیاف ماکرو بارچپ ۳۰ mm به شکل 0.3M30 نوشته شده است. جدول ۵ میزان مصالح سنگی به کار رفته و جدول (۶) میزان مصالح مصرفی به کار رفته در طرح نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

گذاشته می‌شود. می‌توان الیاف را قبل، بعد یا در حین مخلوط شدن به مخلوط بتن اضافه کرد؛ ولی برای سهولت پخش باید به صورت خشک وارد مخلوط شود. باید توجه داشت در فرآیند ساخت بتن الیافی از ایجاد پدیده گلوله‌ای شدن که به دلیل استفاده از مقادیر زیاد و نادرست الیاف رخ می‌دهد جلوگیری به عمل آید؛ زیرا در این صورت پدیده انسداد در بتن صورت گرفته و اثر الیاف عملاً از بین خواهد رفت. پخش الیاف در حجم بتن به صورت نامنظم امکان مهار نیروهای داخلی را از جهات مختلف مهیا می‌سازد. عموماً درصد حجم الیاف به بتن ۳ ~ ۰/۱ درصد است که در این مطالعه با توجه به کارایی بتن به ۱٪ محدود شده است. اطلاعات مرتبط

جدول ۶ میزان مصالح مصرفی در طرح نمونه‌ها

نمونه	سیمان ($\frac{Kg}{m^3}$)	بتنویت ($\frac{Kg}{m^3}$)	سنگدانه‌ها ($\frac{Kg}{m^3}$)	آب ($\frac{Kg}{m^3}$)	درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن	درصد حجمی الیاف ماکرو بارچپ
C	۱۸۰	۲۵	۱۳۵۵	۴۰۱	۰	۰
۰/۳PP۱۲	۱۸۰	۲۵	۱۳۵۵	۴۰۱	۰/۳	۰
۰/۷PP۱۲	۱۸۰	۲۵	۱۳۵۵	۴۰۱	۰/۷	۰
۱PP۱۲	۱۸۰	۲۵	۱۳۵۵	۴۰۱	۱	۰
۰/۳M۳۰	۱۸۰	۲۵	۱۳۵۵	۴۰۱	۰	۰/۳
۰/۷M۳۰	۱۸۰	۲۵	۱۳۵۵	۴۰۱	۰	۰/۷
۱M۳۰	۱۸۰	۲۵	۱۳۵۵	۴۰۱	۰	۱

جدول ۷ نتایج آزمایش روی بتن تازه

نمونه	درصد کاهش اسلامپ	اسلامپ (mc)	درصد کاهش وزن مخصوص	وزن مخصوص
C	-	۲۲	-	۲/۱۴
۰/۳PP۱۲	۹٪	۲۰	۱٪/۴۰	۲/۱۱
۰/۷PP۱۲	۳۴٪	۱۴/۵	۵٪/۱۴	۲/۰۳
۱PP۱۲	۵۲٪/۳	۱۰/۵	۵٪/۱۴	۲/۰۳
۰/۳M۳۰	۴٪/۵	۲۱	۲٪/۳۴	۲/۰۹
۰/۷M۳۰	۱۵٪/۹	۱۸/۵	۳٪/۷۴	۲/۰۶
۱M۳۰	۴۳٪/۲	۱۲/۵	۳٪/۷۴	۲/۰۶

نتایج آزمایشات

تعیین خواص بتن تازه

یا بین اعضای آن، کشف وجود ترک و اندازه‌گیری عمق آن و دیگر نارسایی‌ها (مانند منافذ، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون دینامیکی و ...) را می‌توان بررسی کرد. همچنین تخریب ترک‌خوردگی سازه بتنی با این روش ممکن است. باید سرعت پالس را مستقل از ابعاد نمونه مورد آزمایش در نظر گرفت. سرعت پالس مافوق صوت تحت تأثیر خواص الاستیک و مکانیکی بتن قرار دارد [46]. بنابراین متغیر بودن سرعت پالس در طول مسیرهای مختلف در سازه، نشانه تغییر در کیفیت بتن به شمار می‌آید. برقراری رابطه تجربی بین سرعت پالس با مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی و مقاومت بتن امکان‌پذیر است؛ ولی این روابط تحت تأثیر برخی عوامل مانند نوع و مقدار سیمان، مواد افزودنی، نوع و اندازه سنگدانه‌ها، شرایط عمل‌آوری و سن بتن قرار دارد.

مولد الکترو صوتی، تولید کننده پالس ارتعاشات طولی است. این مولد روی سطح بتن تحت آزمایش قرار داده می‌شود. پس از عبور پالس از طول معین L از بتن، ارتعاشات پالس به وسیله مولد ثانویه (گیرنده) به علامت الکتریکی تبدیل می‌گردد. مدار الکتریکی دستگاه قادر است که زمان عبور پالس را بر حسب میکروثانیه T اندازه‌گیری کند. سرعت پالس V بر حسب $\frac{Km}{s}$ یا $\frac{m}{s}$ از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

که در آن L طول مسیر پالس (متر) و T زمان عبور پالس (ثانیه) و یا مدت زمان عبور پالس از طول L است.

اساس کار این آزمایش بر مبنای سرعت عبور امواج پالسی ماورای صوت از میان نمونه‌های بتنی است. نتایج به دست آمده از تست اولتراسونیک روی نمونه‌های مکعبی شکل ۱۰ cm در جدول (۸) آمده است.

جدول ۸ نتایج تست اولتراسونیک نمونه‌ها

نمونه	زمان عبور امواج (μsec)	سرعت عبور امواج $\frac{Km}{Sec}$
C	۳۸	۲/۶۳
۰/۳PP۱۲	۳۹/۲	۲/۵۵
۰/۷PP۱۲	۴۱/۴	۲/۴۲
۱PP۱۲	۴۲	۲/۳۸
۰/۳M۳۰	۴۰/۲	۲/۴۹
۰/۷M۳۰	۴۳/۵	۲/۳۰
۱M۳۰	۴۴/۳	۲/۲۶

کارایی تعیین کننده سهولت ریختن بتن و مقاومت در برابر جداشدگی تعریف می‌شود. یکی از روش‌های تعیین کارایی بتن، روش اندازه‌گیری اسلامپ آن است که برای بتنی که به روش لوله ترمی اجرا می‌شود مطابق مشخصات فنی برابر با ۱۸-۲۲ سانتی‌متر است. باید توجه داشت که به دلیل استفاده از پودر بنتونیت در بتن پلاستیک و خاصیت چسبندگی بالای آن، موضوع جدایی دانه‌ها در این نوع بتن متغی است. در آزمایش اسلامپ بتن مقدار روانی بتن از لحاظ شل یا سفت بودن آن اندازه‌گیری می‌شود. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن مقدار اسلامپ را کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر روی بتن تازه در جدول (۷) آمده است. با افزایش مقدار درصد الیاف، مقدار وزن مخصوص در تمام نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع به لحاظ فیزیکی به راحتی قابل تفسیر است؛ چرا که الیاف استفاده شده که وزن مخصوص پایین دارد، جایگزین بخشی از مصالح بتن می‌گردد و وزن مخصوص آن را پایین می‌آورد. از سوی دیگر با توجه به ایجاد فضای خالی و افزایش تخلخل توسط الیاف انتظار می‌رود میزان روانی آن کاهش یابد. این کاهش نشان دهنده تأثیر منفی فضای خالی ایجاد شده در بتن است. این به آن معناست که با افزایش الیاف پلی‌پروپیلن، کارایی بتن کاهش پیدا کرده و به همین دلیل زمان ریختن بتن در قالب، تراکم به خوبی صورت نگرفته و در نتیجه این موضوع باعث افزایش تخلخل و کاهش مقاومت شده است. در مورد الیاف با طول بیشتر، مقدار کاهش اسلامپ نیز زیاده‌تر است که این موضوع به دلیل وجود سطح بزرگتر الیاف درگیر در مخلوط بتنی است. به عبارتی می‌توان دو کمیت مقدار و طول الیاف را بر تغییرات اسلامپ تأثیرگذار دانست.

تست اولتراسونیک

تست التراسونیک بتن از جمله آزمایش‌های غیرمخرب بتن محسوب می‌شود. این آزمایش با ارائه کیفیت، مقاومت نسبی، اندازه‌گیری طول و ابعاد ترک‌های موجود در بتن، به طراحان و کارشناسان در زمینه طرح‌های مقاوم‌سازی، تقویت، یا صحت‌سنجی عملیات، امکان تصمیم‌گیری درست را می‌دهد. از طریق این آزمایش تعیین یکنواختی بتن در یک عضو سازه

پلی‌پروپیلن و ماکرو بارچپ جست‌وجو کرد. تقویت بتن با الیاف سبب ایجاد تغییرات در سطوح میکرو و ماکرو می‌گردد. در سطوح میکرو در صورت سختی کافی الیاف و اتصال مناسب به ماتریس، این الیاف از رشد میکروتکرها جلوگیری کرده، در سطوح ماکرو الیاف بازشدگی ترک را کنترل می‌کنند. این موضوع سبب افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود که این به میزان الیاف، تغییر شکل‌پذیری و پیوستگی با ماتریس سیمانی بستگی دارد. از طرفی افزودن الیاف سبب برهم‌خوردگی ماتریس سیمانی و ایجاد فضای خالی در آن شده که خود از مشکلات بتن به شمار می‌رود. بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری حاکی از این بود که در تمام موارد مقاومت فشاری بتن با افزایش درصد الیاف نسبت به نمونه فاقد الیاف، کاهش پیدا کرده است. این کاهش مؤید اثر منفی فضای خالی ایجاد شده با الیاف پلی‌پروپیلن و ماکرو و نشان دهنده عدم توانایی ملات سیمانی در تطابق با الیاف مورد استفاده در بتن است. کاهش مقاومت فشاری در مورد الیاف PP در بیشترین مقدار ۱٪ برابر ۲۷/۲۰ درصد و در مورد الیاف ماکرو در ۱٪ برابر ۲۳/۳۲ درصد است. در مقدار الیاف $\frac{Kg}{m^3}$ ۱، زمان گسیختگی بتن هیچ صدای ترکشی به گوش نرسیده و بتن همچنان قابلیت فشرده شدن دارد. اگر این موضوع بیانگر افزایش شکل‌پذیری بتن باشد، از نتایج به دست آمده این نکته استنباط می‌شود که بتن الیافی را می‌توان در دیوارها و دال‌های ساختمانی برای افزایش شکل‌پذیری و ایمنی در برابر زلزله استفاده کرد. نکته دیگر کمک الیاف به جلوگیری از پرتابش اجزا پس از شکست بوده است. این موضوع به نوعی افزایش مقاومت چسبندگی بتن الیافی را بیان می‌کند. به نظر می‌رسد الیاف‌ها در بحث مقاومت فشاری تنها سبب ممانعت از شکست ترد کامپوزیت سیمانی خواهند شد و افزایش چندان در مقاومت فشاری ایجاد نخواهند کرد. همانگونه که در شکل (۶-ج) در بخش نتایج تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان داده شده است، استفاده از ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن (PP) به دلیل پدیده فولکوله‌ای شدن در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. محققان در آزمایش مقاومت فشاری در مطالعه پژوهشی به نتایج یکسان دست یافتند:

از نتایج چنین بر می‌آید که سرعت عبور امواج با افزایش درصد الیاف روند کاهشی داشته است؛ به طوری که در ۰٪/۳، ۰٪/۷ و ۱٪ از الیاف PP کاهش سرعت ۳/۰۰٪، ۸٪/۱۶ و ۹٪/۴۷ و در ۰٪/۳، ۰٪/۷ و ۱٪ از الیاف ماکرو بارچپ این کاهش به ترتیب ۵٪/۳۲، ۱۲٪/۵۹ و ۱۴٪/۱۷ است. با توجه به افزایش خلل و فرج موجود در بتن پلاستیک با افزودن الیاف، این روند کاهشی توجیه پذیر به نظر می‌رسد. همچنین می‌توان کیفیت بتن را بر اساس نتایج آزمایش سرعت تعیین کرد. مطابق جدول (۹) و بر اساس نتایج به دست آمده، تمام نمونه‌ها در رده بتن‌های با کیفیت ضعیف دسته‌بندی می‌شوند. محققان در آزمایش اولتراسونیک در مطالعه پژوهشی به نتایج دیگری دست یافتند:

جدول ۹ طبقه‌بندی کیفیت بتن بر اساس آزمایش اولتراسونیک [47]

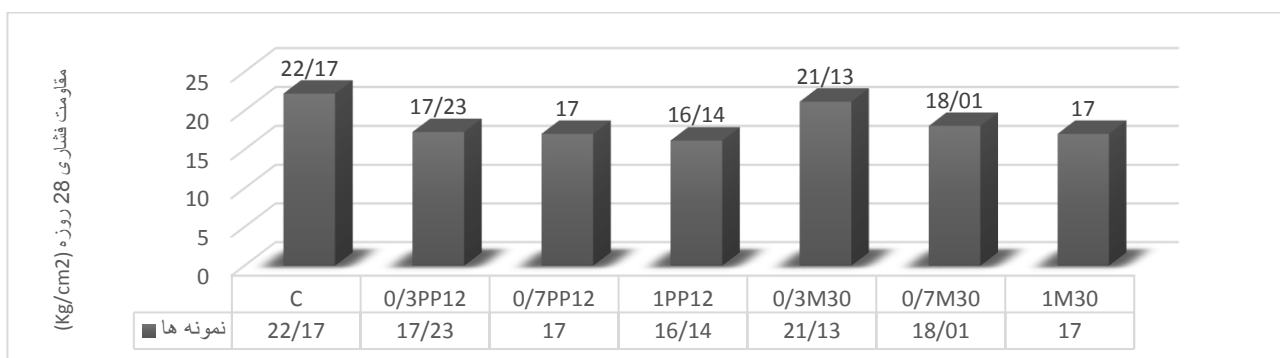
کیفیت بتن	سرعت پالس صوتی ($\frac{Km}{S}$)
عالی	بیشتر از ۴/۵
خوب	۳/۵ تا ۴/۵
مشکوک	۳ تا ۳/۵
ضعیف	۲ تا ۳
خیلی ضعیف	کمتر از ۲

مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری برای سنجش کیفیت بتن سخت‌شده انجام می‌شود. این آزمایش به دلیل مقاومت پایین بتن پلاستیک، مطابق استاندارد ASTM D4832 [48] صورت می‌گیرد. برای تعیین مقاومت فشاری هر طرح اختلاط سه نمونه استوانه‌ای ساخته شد. این آزمون‌ها پس از خارج شدن از قالب، برای عمل‌آوری به درون حوضچه آب با دمای تقریبی $20 \pm 2^\circ C$ انتقال یافتند و در سن ۲۸ روز از آب خارج و در محیطی با دمای $25 \pm 2^\circ C$ استفاده شد.

جدول (۱۰) نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه را برای نمونه‌های مختلف با درصد الیاف متفاوت نشان می‌دهد. با مطالعه نتایج در می‌یابیم که در تمام موارد مقاومت فشاری بتن با افزایش درصد الیاف نسبت به نمونه شاهد فاقد الیاف، کاهش پیدا کرده است. عامل اصلی در کاهش مقاومت فشاری را می‌توان در افزایش تخلخل به تناسب افزایش مقدار الیاف

جدول ۱۰ مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های دارای الیاف پلی پروپیلن (PP) و ماکرو بارچیب (M)



۲۴/۷۰ درصد بود. این کاهش را می‌توان مؤید افزایش شکل‌پذیری بتن پلاستیک با افزودن الیاف دانست.



شکل ۳ لحظه شکست نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش مقاومت مدول الاستیسیته

جدول ۱۱ مدول الاستیسیته نمونه‌های دارای الیاف پلی پروپیلن (PP) و

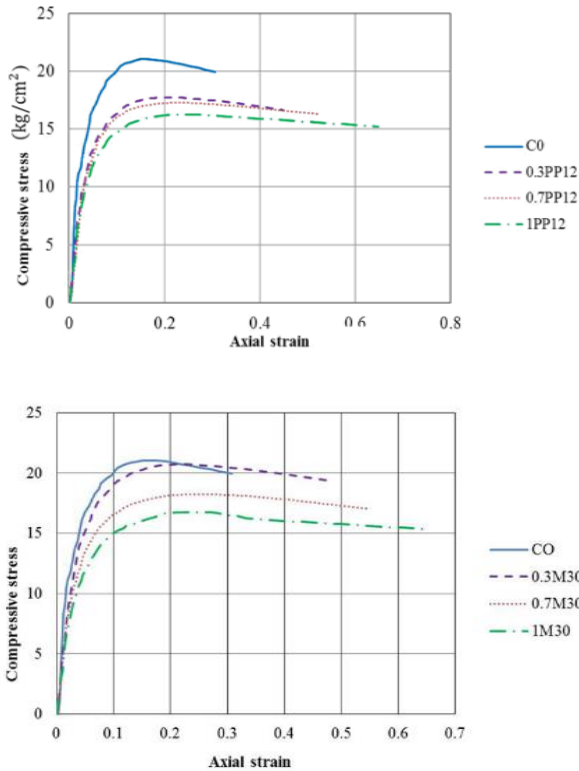
ماکرو بارچیب (M)

نمونه	مدول الاستیسیته ($\frac{Kg}{cm^2}$)
C	38453.5
۰/۳PP۱۲	36522
۰/۷PP۱۲	35743
۱PP۱۲	31925
۰/۳M۳۰	33966.5
۰/۷M۳۰	31050
۱M۳۰	28956.5

آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

این آزمایش مطابق ASTM C469 [49] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر در سن ۲۸ روز انجام گرفته است. برای آزمایش مدول الاستیسیته، نمونه‌های بتنی با استفاده از گوگرد مذاب کلاهیک گذاری شدند. ابتدا یک برآورد اولیه از مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی f'_c انجام گرفت. سپس در گام‌های متوالی تا مقدار $f'_c 0.35$ بر روی نمونه بارگذاری گردید و در گام‌های تنش مختلف، میزان کرنش قرائت شد تا به کمک آن مدول الاستیسیته تعیین گردد. باید توجه داشت که در مبانی تئوریک تا حدود $f'_c 0.4$ برای بتن رفتار الاستیک در نظر گرفته می‌شود و در حین بارگذاری و تعیین مدول الاستیسیته میزان مقاومت فشاری برآورد شده اصلاح می‌گردد. برای تعیین مدول الاستیسیته بارگذاری تا چند نوبت تکرار می‌شود تا در مراحل مختلف میزان مدول الاستیسیته به دست آمده یکسان بوده و تکرار شود. شکل (۳) لحظه شکست نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش مقاومت مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش مدول الاستیسیته در جدول (۱۱) آمده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد روند تغییرات مدول الاستیسیته کاهشی است. در مورد الیاف PP افزودن ۰/۳ درصد الیاف، کاهش ۵/۰۲ درصد را به دنبال داشت. در نمونه دارای ۰/۷ درصد الیاف ۷/۰۵ درصد کاهش را نشان داد. در نمونه ۰/۱ کاهش این مقدار برابر ۱۶/۹۸ درصد بود. با افزودن ۰/۳ درصد از الیاف ماکرو کاهش ۱۱/۶۷ درصد را نشان داد. کاهش مدول الاستیسیته در مورد نمونه دارای ۰/۷ درصد الیاف ماکرو برابر ۱۹/۲۵ درصد و در نمونه دارای ۰/۱ الیاف PP، برابر



شکل ۴ منحنی تنش-کرنش نمونه‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن و ماکرو در مقایسه با نمونه فاقد الیاف

جدول ۱۲ مقادیر تنش و کرنش پیک میانگین برای نمونه های مختلف

نمونه	f_{Peak} میانگین (Kg/cm ²)	ϵ_{Peak} میانگین
C	۲۲/۱۸	۰/۱۸
۰/۳PP۱۲	۱۷/۲۳	۰/۲۰
۰/۷PP۱۲	۱۷/۲۸	۰/۲۲
۱PP۱۲	۱۶/۱۴	۰/۲۴
۰/۳M۳۰	۲۱/۱۳	۰/۲۰
۰/۷M۳۰	۱۸/۰۱	۰/۲۳
۱M۳۰	۱۶/۷۵	۰/۲۴

منحنی های تنش-کرنش فشاری نرمال شده

با تقسیم تنش بر مقدار مقاومت فشاری و تقسیم کرنش بر کرنش معادل پیک تنش می‌توان منحنی نرمال تنش کرنش را به دست آورد. شکل (۵) نمودار منحنی تنش-کرنش فشاری نرمال میانگین را برای نمونه‌ها با درصد الیاف مختلف برای هر دو نوع الیاف نشان می‌دهد. این نمودارهای نرمال شده فارغ از نوع الیاف بر هم منطبق می‌شوند.

نتایج تنش-کرنش

منحنی تنش-کرنش

نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۳۰۰ و قطر ۱۵۰ mm با الیاف ۰/۳، ۰/۷ و ۱ درصد در دمای $20 \pm 2^\circ\text{C}$ در مخزن آب برای ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. از دستگاه تست فشار و کشش با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتون برای فشار نمونه‌ها استفاده شد. مطابق ASTM C469 [۴۹] سرعت بارگذاری قابل کنترل با کرنش ثابت $0.2 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ اعمال شد. از یک دیتا لاگر پر سرعت برای ثبت نیروی محوری نظیر تغییر شکل استفاده شد. بار اعمال شده با اکچویاتور (Actuator) ثبت گردید. به وسیله دو گیره پتانسیومتر در دو سمت مقابل استوانه، تغییر شکل محوری اندازه‌گیری شد. برای محاسبه میزان تنش فشاری باید بار اعمال شده را بر سطح مقطع نمونه استوانه‌ای تقسیم کرد. از دو طول اولیه و تغییر شکل محوری، اندازه طول کرنش محوری به دست خواهد آمد.

نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های دارای الیاف در شکل (۴) آمده است. نمونه‌های دارای بتن ساده و نمونه‌های دارای درصد الیاف کم به طرز شکننده‌ای پس از عبور از پیک مقاومت دچار شکست می‌شوند و به همین دلیل قسمت نرم-شدگی نمودار، میزان تنش-کرنش نمونه‌های فاقد الیاف را نمی‌توان به دست آورد. با افزودن الیاف شاخه نرم‌شدگی، پساپیک پایدار می‌شود و با افزایش درصد الیاف بیشتر می‌گردد.

مقاومت فشاری نمونه‌ها با توجه به نوع الیاف می‌تواند از مقاومت فشاری بتن فاقد الیاف بیشتر باشد. بنابراین با افزودن الیاف به بتن پلاستیک تغییر شکل‌پذیری بتن افزایش خواهد یافت. جدول (۱۲) مقادیر تنش و کرنش پیک میانگین برای نمونه های مختلف را نشان می‌دهد. پیک تنش در نمونه‌های فاقد الیاف بیشتر است. اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت فشاری را افزایش نمی‌دهد اما سبب افزایش چشمگیر در پیک کرنش و کاهش مقاومت فشاری در ناحیه پسا پیک می‌شود. به نظر می‌رسد که نمونه‌های حاوی الیاف ماکرو می‌توانند کرنش فشاری بیشتری را نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن تحمل کنند.

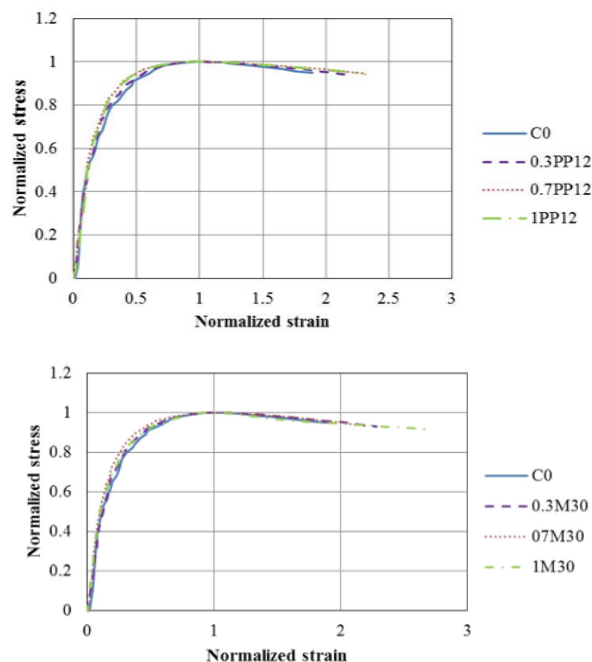
مطابق جدول (۱۳) افزودن الیاف در نمونه‌ها به افزایش در نفوذپذیری منجر شد. کمترین نفوذپذیری به نمونه بدون الیاف اختصاص داشت. با افزودن الیاف، حفرات موئینه داخل بتن، به دلیل تراکم نامناسب در مجاورت الیاف، بر روی نفوذپذیری تأثیر منفی داشته است. دلیل این اختلاف بسیار بین بتن پلاستیک و بتن معمولی به حفرات موئینه مربوط می‌شود. میزان نفوذپذیری در بتن پلاستیک به سبب نسبت بالای سیمان به آب و وجود بتونیت در میان ذرات سیمان، اختلاف مشهودی با بتن معمولی دارد.

نتایج آزمایش نفوذپذیری در رابطه با بتن الیافی نشان داد که با افزودن الیاف در بتن پلاستیک اثر مطلوبی مشاهده نشد. وجود الیاف با توجه به نوع و مقدار مصرف می‌تواند تا حدودی نفوذپذیری را کاهش دهد. این امر می‌تواند با تغییر اندازه دانه بندی و نیز نسبت آب به سیمان و بتونیت تغییر کند که باید اثرات این پارامترها را به صورت جداگانه بررسی کرد. نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری در جدول (۱۳) ارائه شده است.

جدول ۱۳ نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری نمونه‌های مختلف

نمونه	نفوذپذیری
C	5.7×10^{-8}
0.3PP12	6.9×10^{-8}
0.7PP12	8.5×10^{-8}
1PP12	4.6×10^{-8}
0.3M30	6.1×10^{-8}
0.7M30	4.7×10^{-8}
1M30	2.4×10^{-8}

با توجه به جدول (۱۳) در خصوص آزمایش نفوذپذیری برای الیاف ۰/۳ درصد پلی پروپیلن (PP) نسبت به نمونه شاهد، ۲۱٪ افزایش نفوذپذیری مشاهده شد. در الیاف ۰/۷ درصد پلی پروپیلن (PP) نسبت به نمونه شاهد ۴۹٪ افزایش نفوذپذیری مشاهده گردید؛ اما در ۱٪ پلی پروپیلن (PP) با توجه به نتایج آزمایش نفوذپذیری ۲۴٪ کاهش نسبت به نمونه شاهد حاصل شد. در مورد الیاف ماکرو بارچیب (M) ۳۰ میلیمتری در ۰/۳٪ افزایش ۷٪ نفوذپذیری نسبت به نمونه شاهد به دست آمد. در ۰/۷٪ الیاف ماکرو بارچیب (M) کاهش ۲۱٪ نفوذپذیری



شکل ۵ منحنی‌های تنش-کرنش نرمال شده نمونه‌های دارای الیاف پلی پروپیلن و ماکرو در مقایسه با نمونه فاقد الیاف

نفوذپذیری

آزمایش نفوذپذیری بر اساس استاندارد CRD-C48-92 [۵۰] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ mm انجام شد. ابتدا اطراف نمونه استوانه‌ای قیراندود و یک سر نمونه تحت فشار آب به میزان ۱۰ بار قرار داده شد. انتهای دیگر نمونه آزاد است تا آبی که از داخل نمونه نشت می‌کند از سمت دیگر خارج شود. فشار ۱۰ بار همیشه با افزودن آب و هوای فشرده ثابت نگه داشته می‌شود. میزان آب عبوری در زمان‌های مختلف طی چند روز قرائت می‌شود تا مقدار آن در زمان‌های مشخص به میزان ثابتی برسد و تغییر نکند و عدد نفوذپذیری به دست آید.

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی بتن، تعیین میزان نفوذپذیری آن است. نفوذپذیری بتن به صورت نفوذ مایع (سیالی متعارف مانند آب) و نفوذ گاز (گاز متعارفی مانند بخار آب) به داخل آن مورد سنجش قرار می‌گیرد. غیرقابل نفوذ بودن مایع به داخل بتن در رابطه با آب بندی مخازن مایعات و سازه هیدرولیکی و مسائل فشار هیدرولیکی بسیار مهم است. ورود رطوبت به داخل بتن بر خواص انتقال حرارت تأثیر خواهد گذاشت.

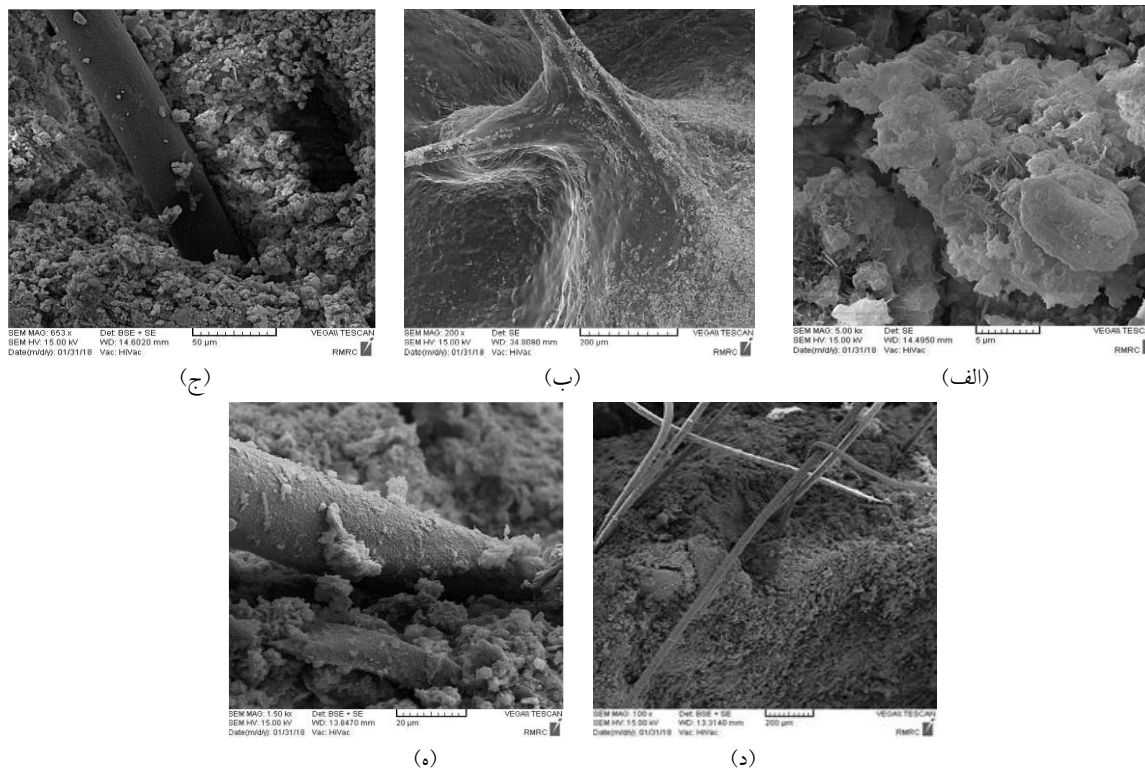
سولفوآلومینات کلسیم است که از بلورهای سوزنی شکل تشکیل شده است. در ساختار خمیر سیمان هیدراته شده، دانه‌های کلینکر هیدراته نشده‌ای را حتی مدت‌ها پس از هیدراتاسیون می‌توان یافت. این ذرات در حقیقت به سبب اندازه بزرگتر نسبت به سایر ذرات و نبود فضای مناسب، فرصتی برای هیدراته شدن ندارند. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که الیاف پلی‌پروپیلن (PP) توانسته است در سطح میکروسکوپی به بهبود ناحیه انتقال و کنترل ریز ترک‌ها کمک شایانی کند. در شکل (۶) و (۷) تصاویر ثبت شده میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای بتن پلاستیک حاوی ۰/۳ درصد از الیاف پلی‌پروپیلن و ماکرو بارچپ نشان داده شده است. پیوستگی مناسب میان الیاف و ماتریس سیمان نقش تعیین کننده‌ای بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن پلاستیک دارد. تجمع و عدم توزیع یکنواخت الیاف در بتن استفاده از الیاف به مقداری بیش از مقدار بهینه هم در فاز بتن تازه و هم در فاز بتن سخت‌شده تأثیرات منفی به همراه دارد. در فاز بتن سخت‌شده استفاده از درصدهای بالاتری از الیاف می‌تواند به افت مقاومت فشاری ناشی از افزایش خلل و فرج و به تبع آن باعث افزایش نفوذپذیری و انقباض بتن سخت‌شده منجر می‌شود. بنابراین باید علاوه بر آن که در زمان اختلاط از توزیع یکنواخت الیاف اطمینان یافت؛ بلکه باید در طرح اختلاط بتن درصد بهینه الیاف را به کار گرفت تا پیوند مناسبی میان الیاف و ماتریس سیمان برقرار گردد. پدیده فولکوله شدن الیاف (گلوله‌ای شدن) در بخشی از بتن در شکل ۶ (ج) مشاهده می‌شود. باید توجه داشت که وجود فضای خالی در بتن تأثیر به سزایی در کاهش مقاومت فشاری بتن دارد. کاهش این فضا و یکپارچگی بتن می‌تواند در افزایش مقاومت فشاری تأثیر به سزایی داشته باشد. این فضای خالی همان فضای موئینه است که با سیمان یا محصولات هیدراتاسیون پر نمی‌شود و به نسبت آب به سیمان و دمای هیدراتاسیون بستگی دارد. اندازه این فضاهای موئینه در مخلوط بتنی متغیر است. می‌توان چنین استنتاج کرد که الیاف سبب بر هم خوردگی یکنواختی بتن پلاستیک شده و موجب ایجاد فضای خالی در آن می‌گردند که این امر خود می‌تواند به افزایش نفوذپذیری و نیز کاهش مقاومت فشاری بتن پلاستیک بینجامد.

نسبت به نمونه شاهد نشان داد. در ۱٪ الیاف ماکروبارچپ (M) نسبت به نمونه شاهد مقدار ۱۳۷٪ کاهش نفوذپذیری حاصل شد. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی الیاف پلی‌پروپیلن (PP) به طور میانگین افزایش ۱۷٪ نفوذپذیری را نسبت به نمونه شاهد نشان داد؛ اما نفوذپذیری الیاف ماکروبارچپ (M) نسبت به نمونه شاهد به طور میانگین ۳۰٪ کاهش داشت.

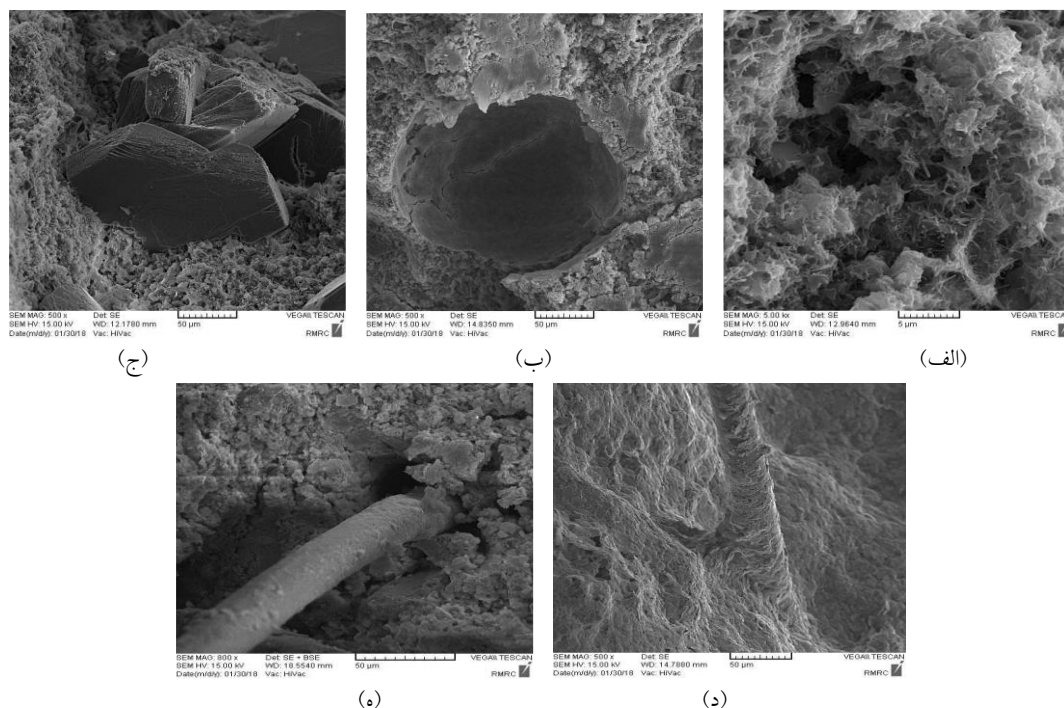
نتایج تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM)

یکی از روش‌های تولید تصاویر ریزساختار به وسیله روبش یک پرتو الکترونی بر روی سطح نمونه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام می‌گیرد. توسط این روش تصاویر سه بعدی از ریزساختار نمونه به دست می‌آید. در SEM نمونه با پرتو الکترونی باریکی به قطر ۱۰۰ آنگستروم بمباران می‌شود. در اثر برخورد پرتوهای الکترونی به نمونه، الکترون‌های ماده برانگیخته می‌شوند و در هنگام بازگشت به مدار اصلی خود به شکل پرتو الکترونی از سطح نمونه منتشر شده و توسط یک آشکارساز جمع‌آوری و آنالیز می‌شوند. این پرتوهای برگشتی از نمونه برای مشخصه‌یابی خواص مختلفی از ماده از قبیل: ترکیب شیمیایی، پستی و بلندی سطح، کریستالوگرافی، خواص الکتریکی و مغناطیسی و غیره به کار می‌روند. درخشندگی و وضوح هر نقطه از تصویر SEM، بستگی به شدت (تعداد) الکترون‌های بازگشتی از سطح نمونه دارد، که آن نیز شدیداً وابسته به کیفیت موضعی سطح است که بدین ترتیب می‌توان معیاری از پستی و بلندی سطح به دست آورد [۵۱].

فاز سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) در مخلوط سیمانی، حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد حجم مواد جامد خمیر هیدراته را تشکیل می‌دهد و مهم‌ترین بخش مواد جامد خمیر در تعیین خواص آن است. علت نشان دادن این ترکیب به شکل C-S-H آن است که نسبت ترکیبات آن کاملاً مشخص نشده و در آن نسبت C/S بین ۱/۵ تا ۲ و آب شیمیایی آن بسیار متغیر است. شکل ذرات C-S-H نیز از کریستال‌های ضعیف الیافی شکل تا شبکه‌های منسجم تغییر می‌کند. فاز هیدروکسید کلسیم با فرمول مشخص $Ca(OH)_2$ که ۲۰ تا ۲۵۴ درصد حجم قسمت مواد جامد خمیر هیدراته شده را تشکیل می‌دهند دارای بلورهای بزرگ با فرم منشوری شش وجهی است. همچنین ۱۵ تا ۲۰ درصد از حجم قسمت مواد جامد شامل



شکل ۶ ریزساختار نمونه 0.3PP12 حاوی الیاف PP، (الف) ژل C-S-H تشکیل شده در فضای موئینه در نمونه 0.3PP12، (ب) پیوند الیاف PP و ماتریس سیمانی در نمونه 0.3PP12، (ج) توزیع و تجمع الیاف PP و پدیده فولکوله‌ای شدن در بتن در نمونه 0.3PP12، (د) بیرون کشیده شدن الیاف PP از بتن در مقطع شکست در نمونه 0.3PP12، (ه) تشکیل ژل C-S-H روی الیاف PP و نحوه پیوند با ماتریس سیمانی در نمونه 0.3PP12



شکل ۷ ریزساختار نمونه 0.3M12 حاوی الیاف ماکرو بارچیب
 (الف) ژل C-S-H تشکیل شده در فضای موئینه نمونه 0.3M12، ب: بخش زجاجی ژل C-S-H در نمونه 0.3M12، ج: قرارگیری ذرات هیدراته نشدن سیمان در نمونه 0.3M12، د: نحوه پیوند الیاف ماکرو ۳۰ mm و تشکیل ژل C-S-H در نمونه 0.3M12، ه: فضای خالی ناشی از بیرون کشیده شدن الیاف ماکرو در مقطع شکست نمونه 0.3M12

نتیجه گیری

در این تحقیق با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر استفاده از الیاف پروپیلن و ماکرو بارچپ بر مشخصات بتن پلاستیک بررسی شده است. برای این منظور با تکیه بر ادبیات فنی موجود، میزان الیاف مصنوعی پلی پروپیلن و ماکرو بارچپ در محدوده مشخصی تغییر داده شد و تأثیر آن بر عواملی همچون تعیین خواص بتن تازه، مقاومت فشاری، اولتراسونیک بتن، نفوذپذیری بتن، منحنی تنش-کرنش، مدول الاستیسیته و تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM) بررسی شد. نتایج به دست آمده در این تحقیق به شرح زیر است:

بر اساس نتایج اثر الیاف پلی پروپیلن ۱۲ mm و الیاف ماکرو بارچپ ۳۰ mm باعث کاهش مقادیر اسلامپ و وزن مخصوص شده است. کاهش مقدار وزن مخصوص نمونه‌های دارای الیاف PP در نمونه 1PP12 برابر ۵/۱۴ درصد و در الیاف ماکرو بارچپ ۳۰ mm در نمونه 1M30 برابر ۳/۷۴ درصد است. حداکثر کاهش اسلامپ در الیاف PP برابر ۵۲/۱۷ درصد و در الیاف ماکرو برابر ۴۳/۱۸ درصد است. علت آن افزایش درصد تخلخل در بتن پلاستیک بود که موجب کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود.

نتایج تست اولتراسونیک روی نمونه‌ها نشان داد که افزودن الیاف کاهش سرعت موج را به دنبال داشت. حداکثر مقادیر این کاهش در الیاف PP در نمونه 1PP12 و ۹/۴۷ درصد و در الیاف ماکرو در نمونه 1M30 برابر ۱۴/۱۷ درصد بود. طبق نتایج این آزمایش بتن پلاستیک در رده بتن‌های کیفیت ضعیف قرار می‌گیرد. همچنین نتایج آزمایش تست اولتراسونیک نیز حاکی از افزایش تخلخل و افت خصوصیات نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن (PP) و ماکرو بارچپ (M) بود.

با توجه به خصوصیات الیاف‌ها و روند اثرگذاری آن‌ها بر نمونه‌های بتنی، به طور کلی بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی تأثیری ندارند. بررسی نتایج آزمایشات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان می‌دهد که الیاف بر مقاومت فشاری بتن پلاستیک اثر کاهنده دارد. در مورد الیاف PP حداکثر مقدار این کاهش در نمونه 1PP12 برابر ۲۷/۲۰ درصد و در الیاف ماکرو در نمونه 1M30 برابر ۲۳/۳۲٪ است. علت کاهش مقاومت فشاری ناشی از افزایش جایگزینی را می‌توان به افزایش میزان خلل و فرج و ضعف ناحیه انتقال مرتبط دانست. نتایج نشان

می‌دهد که استفاده از ۰/۳ درصد الیاف پلی پروپیلن (PP) به دلیل پدیده فولکوله‌ای شدن در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری شده است.

آزمایش مدول الاستیسیته برای تعیین رفتار پیش پیک تنش-کرنش بتن پلاستیک الیافی انجام شد. براساس آن با افزایش مقدار الیاف مدول الاستیسیته روند کاهشی دارد. در مورد الیاف PP حداکثر مقدار این کاهش در نمونه 1PP12 برابر ۱۶/۹۸ درصد و در الیاف ماکرو در نمونه 1M30 برابر ۲۴/۷۰ درصد است.

مطابق نتایج آزمایشات منحنی تنش-کرنش بتن پلاستیک، تغییر شکل محوری بتن پلاستیک با افزودن الیاف بیشتر شده است. منحنی‌های نرمال شده بدون توجه به درصد الیاف بر هم منطبق می‌شوند.

الیاف پلی پروپیلن (PP) در مقایسه با نمونه شاهد به طور میانگین ۱۷٪ نفوذپذیری را افزایش داد؛ اما نفوذپذیری حاوی الیاف ماکرو بارچپ (M) نسبت به نمونه شاهد به طور میانگین ۳۰٪ کاهش داشت. میزان نفوذپذیری الیاف پلی پروپیلن (PP) در بتن پلاستیک نسبت به نمونه الیاف ماکرو بارچپ (M) بیشتر بود. بنابراین کاربرد الیاف ماکرو بارچپ به سبب نفوذپذیری پایین در دیوارهای آب بند بتن پلاستیک در مقایسه با نمونه بتن پلاستیک شاهد مناسب‌تر است. در مورد الیاف PP حداکثر مقدار افزایش نفوذپذیری در نمونه ۰/۷PP۱۲ تقریباً ۰/۴۹٪ افزایش و در الیاف ماکرو بارچپ در نمونه ۰/۳M۳۰ تقریباً ۰/۲۱٪ کاهش یافته است.

الیاف باعث همبستگی بین اجزای تشکیل دهنده بتن شده و در هنگام شکست، باعث جلوگیری از هم پاشیدگی بتن می‌شود. در صورتی که بتن بدون الیاف پس از شکست، اجزای کناری آن خرد شده و از بتن جدا می‌شوند.

علت اصلی در افت ویژگی‌های بتن با استفاده از الیاف مصنوعی پلی پروپیلن (PP) و ماکرو بارچپ (M)، ایجاد پیوند ضعیف‌تر به دلیل چسبندگی کمتر مابین خمیرسیمان و الیاف است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش درصد جایگزینی الیاف-ها در کاهش میزان بار نهایی و ناحیه بعد از ترک خوردگی تأثیر منفی گذاشته و موجب کاهش پارامترهای مورد آزمایش می‌شود. همچنین الیاف پلی پروپیلن و ماکرو بارچپ با ایجاد

نفوذپذیری و کاهش مقاومت فشاری منجر می‌شود.

پدیده فولکوله‌ای شدن در بتن موجب کاهش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و افت رفتار مکانیکی بتن می‌شود.

نتایج تصاویر SEM بیانگر برهم خوردن یکنواختی بتن پلاستیک و ایجاد فضای خالی است؛ در نتیجه به افزایش

سپاسگزاری

مراجع

- [1] I. Padron, R. F. Zollo, "Effect of Synthetic Fibers on Volume Stability and Cracking of Portland Cement Concrete and Mortar," *ACI Materials Journal*, vol. 87, no. 4, pp. 327-332, (1990).
- [2] Y. Ma, M. Tan, K. Wu, "Effect of Different Geometric Polypropylene Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Cement Mortars," *Materials and Structures*, vol. 35, no. 3, pp. 165-169, (2002).
- [3] P. Balaguru, "Contribution of Fibers to Crack Reduction of Cement Composites During the Initial and Final Setting Period," *ACI Materials Journal*, vol. 91, no. 3, pp. 280-288, (1994).
- [4] P. J., Uno, Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas. *ACI Materials Journal*, 95, pp. 365-375, (1998).
- [5] A., Palos, N. A., D'Souza, C. T., Snively, & R. F. Reidy, Modification of cement mortar with recycled ABS. *Cement and Concrete Research*, 31(7), pp.1003–1007, (2001). doi:10.1016/s0008-8846(01)00531-2.
- [6] A. M. Alhozaimy; P. Soroushian; F. Mirza, "Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete and the Effects of Pozzolanic Materials," *Cement & Concrete Composites*, vol. 18, no. 2, pp. 85-92, (1996).
- [7] E. S. Bernard, "Durability of Cracked Fibre Reinforced Shotcrete," 1st ed, In *Shotcrete: More Engineering Developments*, p. 8, (2004).
- [8] Z. Bazant, P. E. Becq-Giraudon, "Statistical Prediction of Fracture Parameters of Concrete and Implications for Choice of Testing Standard," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 4, pp. 529-556, (2002).
- [9] M. R. Teklo, R., Murshid, "The Effect of Polypropylene Fibers on the Energy Absorption of Fiber Concrete," 4th *National Congress of Civil Engineering, University of Tehran, Iran, May 8, (2008).*
- [10] A. Tahershamsi, A. Bakhtiary, N. Binazadeh, "Effects of Clay Mineral Type and Content on Compressive Strength of Plastic Concrete," *Journal of Mining Engineering*, vol. 4, no. 7, pp. 35-42, (2009).
- [11] S. P. Singh; A. P Singh; V. Bajaj, "Strength and flexural toughness of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres," *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, vol. 11, no. 4, pp. 495-507, (2010).
- [12] M. H. Madrasi, H. Rahnema, A. Farahani, "Effect of Sea Water on the Properties of Concrete with Polypropylene Fibers," 6th *National Civil Engineering Congress, Semnan University, Iran, April 27, (2011).*
- [13] S. Kazemian, S. Ghareh, L. Torkanloo, "To Investigation of Plastic Concrete Bentonite Changes on its Physical Properties," *Procedia Engineering*, vol. 145, pp. 1080-1087, (2016).
- [14] M. Mehmandoost Kotlar, A. Akhtarpour, M. Salari, "A Strain Hardening/Softening Elasto-Plastic Constitutive Model for Plastic Concrete Materials," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 79-92, (2018).
- [15] H. Bahmani, D. Mostofinejad, "Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete Reinforced by Polypropylene Fibers and Synthetic Macro Fibers (Barchip)," *Concrete Research Quarely Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 15-26, (2019).

- [16] O. Afzali-Naniz; A. Doostmohammadi; J. Sobhani, "The Effects of Micro and Macro Synthetic Fibers on Drying Shrinkage of Restrained Concrete," *Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 4, no. 2, 114-129, (2019).
- [17] H. Amini, "Investigating the Effect of Macro Polymer Fibers on the Mechanical Properties of Traverse Concrete," *6th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering*, Tehran, Iran, June 9, (2019).
- [18] A. Bagheri, M. Gorgani Firoozjah, A. Jamali, H. Zanganeh, "Comparison of the Performance of Macro-Polymeric Fibers and Steel Fibers in Controlling Drying Shrinkage Cracks of Concrete," *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 36.2, no. 1.1, pp. 11-19, (2020).
- [19] S. A. Eshta, A. Salighehzadeh, "Laboratory Study of Mechanical Properties and Durability of Concrete Containing Silica fume and Barchip Fibers," *Analysis of Structure and Earthquake*, vol. 16, no. 4, pp. 33-43, (2020).
- [20] A. KhodaBandehLou, A. Asadi Zeynali, "Optimizing the Consumption of Intertwined Macro Synthetic Fibers to Improve the Mechanical Properties of Concrete," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 8, no. 10, pp. 206-224, (2021).
- [21] M. Razzaghian Ghadikolaee, M. Mirzaei, A. Habibnejad Korayem, "Experimental Studies of Workability, Mechanical Behavior and Durability Properties of Basalt-Polypropylene Fibers-Reinforced Cementitious Mortar," *Modares Civil Engineering journal (MCEJ)*; vol. 21, no. 1, pp.87-102, (2021).
- [22] R. Rostami, M. Zarrebini, K. Sanginabadi, D. Mostofinejad, S. M. Abtahi, H. Fashandi, "The Effect of Hydrophilicity of Macro-Polypropylene Fibers on Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete," *Modares Civil Engineering journal(MCEJ)*, vol. 21, no. 4, pp. 89-98, (2021).
- [23] G. Pachideh, M. Gholhaki, "An Experimental Study on the Effects of Adding Steel and Polypropylene Fibers to Concrete on its Resistance After Different Temperatures," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 47, no. 2, pp. 1606-1620, (2019).
- [24] G. Pachideh, M., Gholhaki, "An Experimental Study on the Performance of Fine-Grained Concrete Incorporating Recycled Steel Spring Exposed to Acidic Conditions," *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, no. 11, pp. 2458-2470, (2020).
- [25] M. Khalily, V. Saberi, H. Saberi, V. Mansouri, A. Sadeghi, G. Pachideh, "An Experimental Study on the Effect of High Temperatures on Performance of the Plastic Lightweight Concrete Containing Steel, Polypropylene and Glass Fibers," *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, vol. 8, no. 12, pp. 284-307, (2022).
- [26] M. Esmaeeli, S. Ghahari, "Laboratory Study on the Effect of Poly-Propylene Fiber Reinforced Concrete for Application in Sleeper," *Modares Civil Engineering journal (MCEJ)*; vol. 12, no. 3, pp. 91-101, (2012).
- [27] C. Jiang, K. Fan, F. Wu, D. Chen, "Experimental Study on the Mechanical Properties and Microstructure of Chopped Basalt Fibre Reinforced Concrete," *Materials & Design*, vol. 58, pp. 187-193, (2014).
- [28] B. Chen, J. Liu, "Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of the High-Strength Lightweight Concrete Having Good Workability," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 913-917, (2005).
- [29] Y. Mohammadi, F. Seifollahi, "The Effect of Nano-Silica and Polypropylene Fibers on Mechanical Properties and Durability of Normal and Light Weight Concretes," *Modares Civil Engineering journal (MCEJ)*; vol. 17, no. 4, pp. 187-198, (2017).
- [30] D. A. Fanella, A. E. Naaman, "Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression," *In Journal Proceedings*, vol. 82, no. 4, pp. 475-483, (1985).

- [31] ASTM D75/D75M-19, "Standard Practice for Sampling Aggregates," *Annual book of ASTM Standards*, vol. 04.03, p. 7, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2019).
- [32] ASTM C136-06, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates," *Annual book of ASTM Standards*, vol. 04.02, p. 5, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2015).
- [33] ASTM D2419-14, "Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate," *Annual book of ASTM Standards*, vol. 04.03, p. 10 West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2022).
- [34] ASTM C88-13, "Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate," *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.02, p. 5, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2022).
- [35] ASTM C151-05, "Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement," *Annual book of ASTM Standards*, vol. 04.01, p. 3, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2010).
- [36] ASTM C535-16, "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine," *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.02, p.3, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2016).
- [37] ASTM C127-15, "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate," *Annual book of ASTM standards.*, vol. 04.02, p. 5, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2016).
- [38] ASTM C128-15, "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate," *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.02, p. 6, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2016).
- [39] www.Masalehshop.com
- [40] <https://soufiancement.com>
- [41] <http://www.meisoon.com/fa/pages/204>
- [42] ASTM C12-22a, "Standard Practice for Installing Vitrified Clay Pipe Lines," *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.05, p. 9, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2022).
- [43] ASTM C125-21a, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates," *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02, p. 9, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2021).
- [44] R. N., Ratu, "Development of Polypropylene Fiber as Concrete Reinforcing Fiber," *University of British Columbia*, (2016).
- [45] A.J. Majumdar; R.W. Nurse, *Glass fibre reinforced cement*, 15(2-3), pp. 107–127. (1974). doi:10.1016/0025-5416(74)90043-3.
- [46] ASTM C597-22, "Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete," *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02, p. 4, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2016).
- [47] R., Jones, Testing of concrete by ultrasonic-pulse technique. *In Highway Research Board Proceedings*, Vol. 32, (1953).
- [48] ASTM D4832-16e1, "Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders," *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.08, p. 6, West Conshohocken, PA, USA:

American Society of Testing Materials, (2018).

- [49] ASTM C469/C469M-22, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression," *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.02, p.6, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, (2022).
- [50] CRD-C48-92, "Standard Test Method for Water Permeability of Concrete, U.S.," *Army Corps of Engineers (USACE)*, (1992).
- [51] F. Moodi, A. Ramezaniapor, F. Farhadian, P. Dashti, "Durability of Cementitious and Geopolymer Coating Mortars Against Sulfuric Acid Attack," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 9, pp. 3693-3707, (2021).

