

Optimization of fiber reinforced polymer concrete mix design based on DBA

Mohammad Hossein Taghavi Parsa^{1*} , Morteza Esmaili², Mohammad Reza Adlparvar¹¹ Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran.² Faculty of Railway Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: This paper investigates the behavior of fiber-reinforced concrete containing three polymer-based fibers, namely polypropylene, Barchip 48, and Forta-ferro, intending to optimize mix design using the DBA statistical approach. Two concrete mix designs were considered: a medium-strength mix and a high-strength mix. Fiber contents of 0.5% and 1% by concrete volume were used, and the specimens were tested at 7, 28, and 90 days. The study shows that the effect of fiber reinforcement depends strongly on fiber type, concrete strength class, and curing age. According to the results, Forta-ferro and Barchip generally improved compressive strength, while polypropylene reduced strength in some cases. The optimum combinations identified by DBA indicate that medium-strength concrete performs best with 0.5% polypropylene at 7 days, 0.5% Forta-ferro at 28 days, and 0.5% Barchip at 90 days; for high-strength concrete, 0.5% Forta-ferro was the best option at all ages. Overall, the findings confirm that polymer fiber selection plays a decisive role in the mechanical performance of concrete and that DBA can be used effectively for mix optimization.

Review History:

Received: Nov. 01, 2025

Revised: Apr. 27, 2026

Accepted: May, 14, 2026

Available Online: Jun. 26, 2026

Keywords:

Fiber Concrete

Compressive Strength

Tensile Strength; Flexural Strength;

Polymer Fibers

1- Introduction

According to the definition provided by ACI Committee 544 of the American Concrete Institute, fiber-reinforced concrete is a mixture of cement, water, aggregates, and discrete fibers. The fibers must not exceed 76 mm in length and 1 mm in diameter [1].

In the present study, polymer-based fibers were used. Polypropylene fibers are manufactured from homopolymers, a type of polymer commonly employed in the textile industry. The principal characteristic of this fiber type is its adequate durability under alkaline-siliceous conditions. Where as its drawbacks include poor fire resistance, susceptibility to light and oxygen, low modulus of elasticity (0.5 to 8 GPa), and weak bond with concrete [2]. BarChip fibers represent one of the most recent types of polymer-based fibers and can serve as a substitute for steel fibers. The surface of these fibers features protrusions that provide adequate mechanical interlock with the cement mortar. One recent application of this fiber type has been in tunnel segments, where it has been used as an alternative to steel fibers in precast tunnel segments [3].

Forta-Ferro fibers consist of a composite material made from a copolymer, formed into very fine twisted strands and a network of filament fibers. These fibers reduce plastic and drying shrinkage of concrete, enhance impact resistance, increase

fatigue resistance, and improve concrete toughness [4].

In 2013, Ramezani-pour et al. conducted a study on the effect of polypropylene and steel fibers on concrete. Their research demonstrated that polypropylene fibers possess the ability to bridge micro-cracks but have little effect on the post-cracking strength of concrete. Furthermore, replacing steel fibers with a higher proportion of polypropylene fibers results in reductions in flexural strength, energy absorption, and impact resistance [5].

To date, numerous comparisons have been made regarding the effect of fiber size and volume fraction of various fiber types on the strength of normal- and high-strength concrete. However, a comprehensive comparison of the influence of different polymer-based fibers on the mechanical strength of normal- and high-strength concrete, along with the optimization of fiber-reinforced concretes using the DBA statistical method, has not yet been conducted. In this research, the effect of adding polymer-based fibers on the compressive, tensile, and flexural strengths of normal- and high-strength concretes has been investigated. Finally, employing the DBA statistical method and considering the cost of fiber procurement as a highly important parameter, the most optimal fiber-reinforced mix designs at ages of 7, 28, and 90 days are introduced for both normal- and high-strength concretes.

*Corresponding author's email: mh.taghavi@stu.qom.ac.ir

Table 1. Mix design of the two concrete mixtures used in the study.

Mix design	Cement	Water	Sand	Gravel	Superplasticizer
Mix 1	380	240	636	1079	No
Mix 2	500	234	871	718	0.6% of cement weight

Table 2. Properties of fibers used in the research.

Fiber type	Density	Length	Tensile strength	Elastic modulus
Polypropylene	910	12 mm	400 MPa	2700 Mpa
Barchip 48	910	48 mm	640 MPa	12000 Mpa
Forta-ferro	910	54 mm	660 MPa	9500 Mpa

**Fig. 1. Fibers used in the study, (a) Polypropylene (b) Barchip 48 (c) Forta-ferro.**

2- Methodology

The experimental program was organized around two concrete mix designs. The first mix was a medium-strength concrete designed according to ACI 544 guidance, and the second was a high-strength concrete mix with higher cement content and lower water-cement ratio. The first mix contained cement, water, sand, gravel, and no superplasticizer, while the second mix included more cement, less water, removal of coarse aggregate larger than 19 mm, and the use of a superplasticizer (102NPC) at 0.6% of cement weight. The mix details are given in Table 1 of the paper.

The fiber types used in the study were polypropylene, Barchip 48, and Forta-ferro. Their basic properties, including density, length, tensile strength, and elastic modulus, are presented in Table 2. The corresponding fiber images are shown in Figure 1.

Specimens were prepared with fiber contents of 0.5% and 1% by volume of concrete. The mixing procedure differed slightly depending on fiber type. For Barchip 48, aggregates

were first mixed with cement and water, and fibers were then added during the mixing process. For polypropylene and Forta-ferro, the aggregates were initially mixed, then fibers were added to avoid balling, followed by cement and water. In the high-strength mix, the reduced water-cement ratio and increased cement content were intended to improve the matrix quality and provide a more suitable environment for fiber action.

Compressive strength tests were conducted on $15 \times 15 \times 15$ cm cube specimens at 7, 28, and 90 days, using the relevant ASTM and Iranian national standards cited in the paper. Specimens were water-cured and demolded after 24 hours. The study primarily focused on compressive strength, while the abstract also indicates that tensile and flexural behavior were considered in the broader discussion of fiber performance.

3- Results and Discussion

This study employed the DBA (Distance from Best

Available) method to optimize fiber-reinforced concrete mixes. Four attributes were considered: compressive, tensile, and flexural strength, as well as fiber cost per cubic meter of concrete. In the DBA framework, the worst condition for each attribute among all alternatives was assigned a value of zero in the criterion matrix. For strength properties (where higher is better), other values were calculated as the absolute difference from the worst performance. For cost (where lower is better), the zero value represented the most expensive fiber in that group, and other values indicated the cost difference from that worst economic condition. All values were then standardized using Z-scores, and the Compound Distance (CD) to the ideal condition was calculated. The mix with the lowest CD was selected as optimal.

The results show that in normal-strength concrete, the optimal fiber type varies with age. Polypropylene 0.5% performs best at 7 days (CD = 1.09), likely due to its early-age bonding characteristics despite its overall poor adhesion. At 28 days, Fortaferro 0.5% becomes optimal (CD = 1.82), and at 90 days, Barchip 0.5% shows the best performance (CD = 1.60). This shift suggests that different fiber types activate their reinforcement mechanisms at different stages of concrete hardening.

In high-strength concrete, Fortaferro 0.5% is the optimal mix across all ages (CD = 1.21, 0.92, and 0.90 at 7, 28, and 90 days, respectively). This consistency indicates that the improved matrix strength enhances fiber-matrix bonding, allowing Fortaferro fibers to perform effectively from early to late ages. Polypropylene fibers, in contrast, showed poor bonding and led to strength reductions of up to 15% in compressive strength and 12% in tensile strength. Barchip fibers displayed mixed results, increasing early strength but sometimes reducing later-age strength, depending on the mix design.

From an economic perspective, the DBA cost analysis identified the most expensive fibers (zero cost value) as Barchip 1.0% and Fortaferro 1.0%, while the most economical acceptable mix was Polypropylene 0.5%. For high-strength concrete, despite its higher cost, Fortaferro 0.5% remains the most efficient choice due to its superior and stable mechanical performance.

Overall, the DBA method successfully integrates mechanical and economic criteria, providing clear, age-specific recommendations for fiber selection in both normal and high-strength concrete.

4- Conclusion

According to the results, increasing the concrete strength leads to enhancements in the compressive, tensile, and flexural strengths of polymer-based fiber-reinforced concrete, owing to the improved bond performance between the cement paste and the fibers. The findings of this study can be summarized as follows:

Increasing the strength of the concrete matrix improves fiber-matrix bonding. This leads to higher compressive, tensile, and flexural strength in polymer-based fiber-reinforced concrete.

Fibers have a minimal effect on compressive strength

in normal-strength concrete and may even reduce it in some cases. In contrast, for high-strength concrete, fibers significantly improve compressive strength compared to normal-strength concrete.

Polypropylene fiber exhibits poor bonding with the cement matrix. It reduces compressive strength by up to 15% and tensile strength by 12%, and is only acceptable at early ages (7 days) in normal-strength concrete.

Barchip fiber shows mixed performance depending on the mix design and age. It increases early-age strength by approximately 10% but may reduce later-age strength by 11% in some mixes. However, Barchip 1.0% consistently increases 90-day strength by up to 29%.

Fortaferro fiber achieves the highest compressive strength among all fibers, averaging approximately 60 MPa. It increases early-age strength by about 20% in one mix design, while in another mix design, Fortaferro 1.0% increases strength by up to 20% across all ages.

In normal-strength concrete, the optimal fiber type varies with concrete age. Polypropylene 0.5% is optimal at 7 days (CD = 1.09), Fortaferro 0.5% at 28 days (CD = 1.82), and Barchip 0.5% at 90 days (CD = 1.60).

In high-strength concrete, Fortaferro 0.5% is the optimal mix at all ages. It achieves CD values of 1.21, 0.92, and 0.90 at 7, 28, and 90 days, respectively.

In the DBA method, a zero value in the cost column indicates the most expensive fiber in that group. The most expensive mixes are Barchip 1.0% and Fortaferro 1.0%, while the most economical acceptable mix is Polypropylene 0.5%.

For normal-strength concrete, fiber type should be selected based on the target age. Polypropylene is recommended for early-age applications, while Fortaferro or Barchip are better for later ages.

For high-strength concrete, Fortaferro 0.5% is the most efficient and robust choice for all ages. This recommendation is consistent across all mechanical and economic criteria considered in the DBA analysis.

References

- [1] ACI Committee 544, State-of-the-art report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-96), American Concrete Institute, Detroit, 1996, pp. 2-3.
- [2] A. Bentur, S. Mindess, *Fibre reinforced cementitious composites*, CRC Press, 2014.
- [3] A.G. Nitschke, R. Winterberg, Performance of macro synthetic fiber reinforced tunnel linings, in: *Proceedings of the 2016 World Tunneling Congress*, 2016.
- [4] F. Hasan-Nattaj, M. Nematzadeh, The effect of Fortaferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica, *Construction and Building Materials*, 137 (2017) 557-572.
- [5] A.A. Ramezani-pour, P. Rashid Dadash, Polypropylene-steel fiber reinforced concrete, *Journal of AUT*, 44 (2013) 75-83. (In Persian).



بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن‌های مسلح به الیاف پایه پلیمری براساس روش DBA

محمدحسین تقوی پارسا^{۱*}، مرتضی اسماعیلی^۲، محمدرضا عدل‌پرور^۱

۱- دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران.
۲- دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵

کلمات کلیدی:

بتن الیافی
مقاومت فشاری
مقاومت کششی
مقاومت خمشی
الیاف پلیمری

خلاصه: امروزه استفاده از بتن‌های الیافی با توجه به نتایج پژوهش‌های تجربی در حوزه بتن و نیز بهبود ویژگی‌هایی نظیر شکل‌پذیری، کاهش میزان ترک‌ها و قابلیت حذف یا کاهش آرماتورها، نسبت به بتن‌های معمولی با افزایش چشم‌گیری همراه بوده است. هدف از این پژوهش بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن‌های مسلح به الیاف پایه پلیمری براساس روش DBA است. در این مطالعه مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های ۲۸، ۷ و ۹۰ روزه ساخته شده با الیاف پایه پلیمری، با بتن معمولی مقایسه شده است. در ضمن رابطه بین مقاومت فشاری و کششی با آیین‌نامه‌های مختلف بررسی شده است. برای ساخت نمونه‌های بتن الیافی از الیاف فورتافروفر، بارچپ و پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۵ و ۱ درصد حجمی بتن استفاده شده است. در تهیه نمونه‌های بتنی از دو نوع طرح اختلاط به منظور دستیابی به بتن با مقاومت متوسط و بالا استفاده شده است. همچنین جهت بهینه‌سازی بتن‌های الیافی در سنین مختلف با در نظر گرفتن تاثیر هزینه الیاف، از روش آماری DBA استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده افزایش مقاومت فشاری دو نوع بتن الیافی با الیاف فورتافروفر و بارچپ و کاهش مقاومت در نمونه‌های با الیاف پلی‌پروپیلن است. با توجه به نتایج بررسی، افزایش مقاومت بتن موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی پایه پلیمری می‌شود. همچنین نتایج حاصل از آنالیز DBA نشان می‌دهد، در بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط، طرح‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، ۰/۵ درصد الیاف فورتافروفر و ۰/۵ درصد الیاف بارچپ در سنین ۲۸، ۷ و ۹۰ روز به عنوان طرح‌های بهینه معرفی شده‌اند در حالیکه در بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در تمامی سنین، طرح حاوی ۰/۵ درصد الیاف فورتافروفر طرح بهینه است.

۱- مقدمه

طبق تعریف کمیته ۵۴۴ انستیتو بتن آمریکا، بتن الیافی در واقع مخلوطی از سیمان، آب، سنگدانه و الیاف به صورت گسسته است. الیاف نباید طولی بیشتر از ۷۶ میلی‌متر و قطری بیشتر از ۱ میلی‌متر داشته باشند [۱]. در حال حاضر بیش از نیم قرن از استفاده بشر از بتن الیافی گذشته و طی این سال‌ها محققین از انواع الیاف در تحقیقات خود استفاده کرده‌اند. در این میان الیاف پایه پلیمری بیشترین کاربرد را در صنعت داشته است. الیاف پلی‌پروپیلن، از هموپلیمرها^۱ که یک نوع پلیمر مورد استفاده در صنعت نساجی است، ساخته می‌شوند. ویژگی اصلی این نوع الیاف دوام مناسب در شرایط قلیایی سیلیسی و از معایب آن می‌توان به مقاومت ضعیف در برابر آتش‌سوزی، حساس بودن به نور و اکسیژن، مدول الاستیسیته پایین (۰/۵ تا ۸ گیگاپاسکال) و پیوستگی

ضعیف با بتن اشاره کرد [۲]. الیاف بارچپ^۲ از جدیدترین نوع الیاف پایه پلیمری است که می‌تواند جایگزین الیاف فولادی باشد. سطح ظاهری این الیاف دارای برجستگی‌هایی است که باعث ایجاد درگیری مناسب با ملات بتن می‌شود. یکی از کاربردهای اخیر این نوع الیاف در سگمنت تونل بوده که به عنوان جایگزین الیاف فولادی در سگمنت پیش ساخته تونل مورد استفاده قرار گرفته است [۳].

الیاف فورتافروفر^۳ متشکل از مواد ترکیبی ساخته شده از کوپلیمرها^۴ بصورت رشته‌های بسیار نازک پیچ‌خورده در هم و یک شبکه الیاف رشته‌ای است. این الیاف باعث کاهش جمع‌شدگی بتن تازه و سخت، افزایش ضربه‌پذیری و افزایش مقاومت در برابر خستگی و افزایش سختی بتن می‌شوند [۴].

2. Barchip
3. Forta-Ferro
4. Copolymer

1. Homopolymer

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mh.taghavi@stu.qom.ac.ir



[۱۱]. در سال ۲۰۱۳ رمضانپور و همکاران مطالعه‌ای بر روی تاثیر الياف پلی‌پروپیلن و الياف فولادی بر روی بتن داشتند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌داد الياف پلی‌پروپیلن قابلیت پل زدن بر ریزترک‌ها را دارد ولی تاثیر چندان بر مقاومت بتن پس از اولین ترک ندارد. همچنین جایگزینی بیش‌تر الياف پلی‌پروپیلن نسبت به الياف فولادی باعث کاهش مقاومت خمشی، جذب انرژی و مقاومت به ضربه می‌شود [۱۲]. در سال ۲۰۱۵ تحقیقات کامفورتی^۵ و همکاران در تحقیقاتشان که بر روی چند نمونه تیر بتنی انجام شده بود، نشان می‌داد استفاده از الياف پایه‌پلیمری باعث افزایش مقاومت برشی بتن می‌شود [۱۳]. در سال ۲۰۱۷ لرج^۶ و همکاران طی تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که اگر زمان اختلاط بتن با الياف سنتتیک و پایه‌پلیمری زیاد شود، باعث به وجود آمدن آسیب به الياف و در نتیجه پایین آمدن سطح کیفیت بتن اليافی می‌شود [۱۴]. در سال ۲۰۱۸ ریکابی^۷ و همکاران طی تحقیقاتشان با استفاده از بتن اليافی کاهش میزان آرماتورها در لوله‌ها بتنی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند با توجه به افزایش مقاومت و شکل‌پذیری بتن اليافی نسبت به بتن معمولی، استفاده از بتن اليافی کاهش درصد آرماتورها و ضخامت لوله‌های بتنی را امکان‌پذیر می‌کند [۱۵].

در دهه اخیر، با گسترش دامنه تحقیقات، تمرکز مطالعات به سمت بررسی اثر نوع الياف، درصد حجمی و اندرکنش ماتریس و الياف سوق یافته است. پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه نشان می‌دهند که الياف فولادی و پلیمری، به‌ویژه در قالب نمونه‌های اليافی ترکیبی، نقش بسزایی در افزایش مقاومت خمشی و کششی بتن ایفا می‌کنند. در همین راستا، در سال ۲۰۱۹ پژوهشی بر روی تاثیر الياف فولادی و پلی‌پروپیلن در تراورس‌های بتنی، با انجام آزمایش‌های فشاری، کششی و خمشی بر روی ۱۲۰ نمونه صورت پذیرفت. نتایج نشان دادند که در حالی که مقاومت‌های فشاری و کششی در مخلوط‌های حاوی یک درصد الياف فولادی به حداکثر می‌رسد، ترکیب ۰/۶ درصد الياف فولادی با ۰/۴ درصد الياف پلیمری منجر به افزایش ۳/۵ برابری مقاومت خمشی می‌شود؛ همچنین این ترکیب توانایی کاهش ۴۰ درصدی میلگردهای پیش‌تنیده و کنترل ترک‌های عمیق را داراست [۱۶].

در سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای بر روی بتن سبک پلاستیکی، اثر الياف فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه‌ای را بر مقاومت‌های پس از حرارت (تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) ارزیابی شد. یافته‌ها حاکی از آن بود که الياف فولادی نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود مقاومت (بیش از ۴۰ درصد در برخی موارد) دارند،

کوبایاشی^۱ و همکاران به بررسی مقاومت بتن اليافی فولادی با بتن دارای الياف پلی‌اتیلن پرداخت. نتایج تحقیق او نشان می‌دهد که مقاومت بتن تا اولین ترک در صورت استفاده از الياف پلی‌اتیلن افزایش قابل توجهی نمی‌کند، در حالی که الياف فولادی سختی بتن را افزایش می‌دهد. همچنین برخلاف الياف فولادی، در صورت استفاده از الياف پلی‌اتیلن با درصد حجمی ۳ یا بیش‌تر، بیش‌ترین حد مقاومت پس از اولین ترک، در ناحیه غیرخطی بدست می‌آید [۵].

با پیشرفت تکنولوژی استفاده از بتن با مقاومت بالا به مرور افزایش یافت. با افزایش مقاومت بتن، رفتار آن نیز تردتر می‌شود. استفاده از الياف در بتن باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری آن می‌شود [۶]. تاکنون تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. نخستین بار در سال ۱۹۸۷ ونگ^۲ و همکاران مطالعاتی را در زمینه استفاده از الياف سنتتیک انجام دادند. نتیجه تحقیقات آن‌ها نشان می‌داد؛ رفتار بتن با استفاده از این الياف بهبود یافته و مقاومت فشاری، خمشی و کششی آن افزایش یافته است [۷]. در سال ۲۰۰۱ پانتازوپولو^۳ و همکاران با افزودن اليافی که مخلوطی از الياف در مقیاس بزرگ و بسیار کوچک بود، مطالعات خود را روی بتن اليافی انجام دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد الياف با سایز بسیار کوچک باعث افزایش سختی بتن در بیشینه مقاومت آن و الياف با سایز بزرگ باعث افزایش طاقت بتن پس از رسیدن به مقاومت بیشینه آن است [۸]. در سال ۲۰۰۳ محمدی و همکاران با بررسی افزودن الياف با طول‌های مختلف به بتن معمولی نشان دادند مقاومت بیشینه و طاقت بتن اليافی در این حالت نسبت به حالتی که در آن تنها از الياف با ابعادی یکسان استفاده می‌شود بهبود می‌یابد [۹]. در سال ۲۰۰۷ کامینولی^۴ و همکاران موضوع جمع‌شدگی و طاقت بتن اليافی را بررسی کردند. آن‌ها طی تحقیقات خود با انجام تست خمش بر روی چندین دال ساخته شده از بتن اليافی به این نتیجه رسیدند که الياف پایه‌پلیمری می‌توانند باعث کاهش جمع‌شدگی، افزایش مقاومت و افزایش سختی بتن اليافی شوند [۱۰]. در سال ۲۰۱۱ حسن و همکاران طی تحقیقاتشان بر روی نمونه‌های بتن اليافی با الياف سنتتیک نشان دادند رفتار کششی و برشی بتن معمولی در مقایسه با بتن اليافی تردتر است. آن‌ها از سه درصد مختلف بتن اليافی استفاده کردند که نشان می‌داد افزایش درصد حجمی الياف تا ۵۱/۰ درصد حجمی باعث بهبود بیش‌تر رفتار بتن اليافی می‌شود.

1. Kobayashi
2. Wang
3. Pantazopoulou
4. Cominoli

5. Conforti
6. Lerch
7. Rikabi

تصمیم‌گیری چندمعیاره تحلیل می‌شوند. این رویکرد، خلأ موجود در ادبیات علمی، یعنی فقدان تحلیل یکپارچه عملکرد و هزینه در طرح‌های مختلف بتن الیافی، را به‌طور مستقیم پوشش می‌دهد. در شکل (۱) فلوچارتی مدون و هدفمند از روند انجام مقاله ترسیم شده است.

۲- ساخت نمونه‌ها

۲-۱- مصالح

مصالح مصرفی برای این پژوهش شامل سیمان پرتلند تیپ ۲ تهران-شمال، شن درشت دانه با حداکثر قطر سنگدانه ۲/۵۴ و ماسه با مدول نرمی ۵/۵۱ بوده و دانه بندی مناسب طبق راهنمای ملی طرح مخلوط بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شد [۲۳]. مشخصات الیاف استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ بیان شده است. همچنین شکل ۲ الیاف مورد استفاده را نشان می‌دهد.

۲-۲- روش ساخت نمونه‌ها

روش ساخت نمونه‌های بتنی، با توجه به طرح‌های اختلاط (۱) و (۲) انجام گرفت. در طرح شماره ۲ در راستای بهبود طرح اولیه، عیار سیمان از ۳۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب به ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب رسیده است. همچنین نسبت آب به سیمان در طرح شماره ۲ از ۰/۶۳ به ۰/۴۷ کاهش پیدا کرد. همچنین به منظور بهبود عملکرد الیاف و جلوگیری از تخلخل بیش از حد، سنگدانه‌های درشت‌تر از ۱۹ میلی‌متر (مانده روی الک ۳/۴) در طرح شماره ۲ حذف شدند. در این طرح برای افزایش روانی بتن نیز از فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات بتن شیمی با نام تجاری NPC ۱۰۲ به نسبت ۰/۶ درصد وزن سیمان استفاده شده است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی محصول فوق روان‌کننده طبق اعلام تولید کننده در جدول شماره ۲ آمده است.

در این پژوهش برای الیاف بارچپ ۴۸ ابتدا سنگدانه‌های خشک درشت و ریز با یکدیگر مخلوط شده سپس سیمان مورد نظر به مخلوط اضافه شد، تا سیمان به خوبی در همه جای مخلوط خشک پخش شود، سپس آب مورد نیاز اضافه شده و ۴ دقیقه اجازه اختلاط به بتن داده شد. پس از مخلوط شدن بتن، الیاف در مخلوط پخش گردید. سپس پخش الیاف با استفاده از میکسر به مدت ۳ دقیقه انجام گرفت تا الیاف به خوبی در مخلوط پخش شوند.

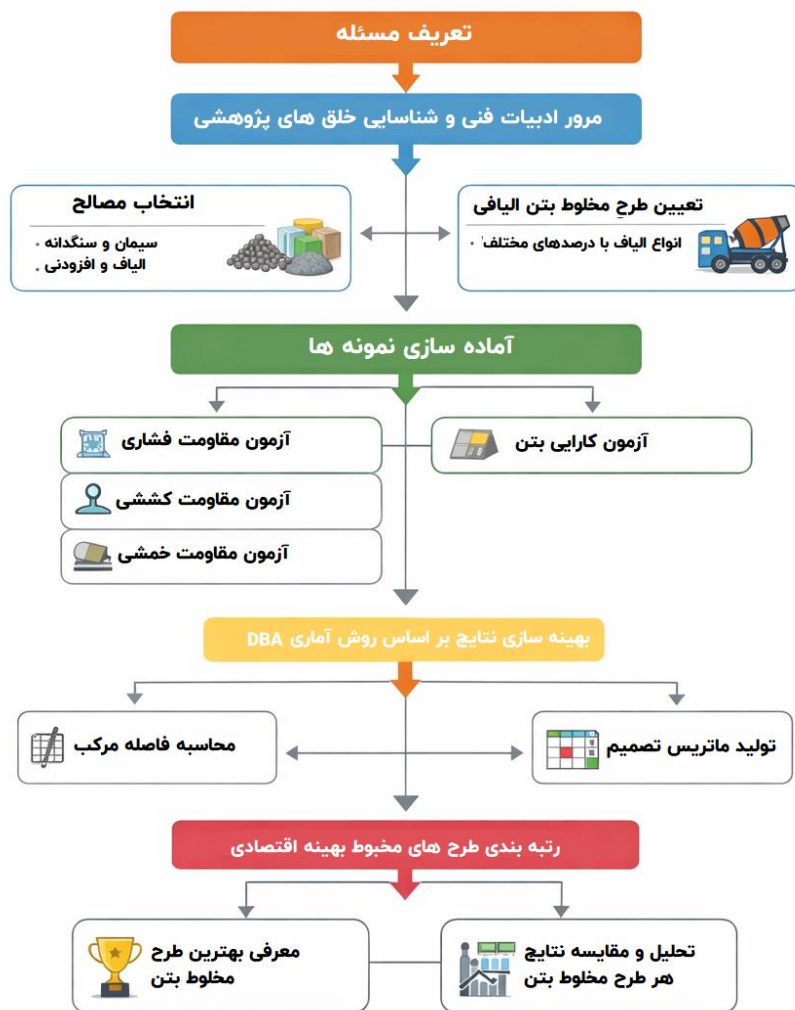
برای الیاف پلی‌پروپیلن و فورتافروفر در ابتدا سنگدانه‌های درشت و ریز را با یکدیگر مخلوط کرده سپس الیاف اضافه گردید تا سنگدانه‌های درشت و ریز از گلوله شدن الیاف پلی‌پروپیلن جلوگیری کنند. همچنین برای

در حالی که تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه‌ای بر عملکرد پس از حرارت به دلیل ویژگی‌های فیزیکی‌شان ناچیز بوده است [۱۷].

در سال‌های اخیر پاچیده و همکاران، با تمرکز بر جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، استفاده از فنرهای فولادی کربن‌پایین گالوانیزه را در بتن خودتراکم بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی آنان نشان داد که استفاده از فنرهایی با قطر ۱۲ میلی‌متر، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را به‌ترتیب ۲۹، ۵۲ و ۳۶ درصد افزایش می‌دهد [۱۸]. آنها همچنین عملکرد بتن حاوی فنرهای فولادی بازیافتی را در دماهای بین ۲۵ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی کردند. نتایج مقایسه‌ای آنان نشان داد که مقاومت فشاری بهینه در نمونه‌های حاوی فنر، ۲ تا ۳ برابر بیشتر از نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در دماهای مختلف است و استفاده از این الیاف در بتن، عرض ترک‌های ناشی از آزمایش کشش دونیم‌شدگی را تا سه برابر کاهش می‌دهد [۱۹].

مرور جامع پژوهش‌های منتشرشده در دهه اخیر نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه شناخت رفتار بتن‌های الیافی حاصل شده است، اما بخش عمده مطالعات موجود بر یک ویژگی مکانیکی خاص، یک نوع الیاف مشخص یا یک سن معین از بتن تمرکز داشته‌اند [۲۰-۲۲]. در مقابل، تحلیل هم‌زمان چندین شاخص عملکردی نظیر مقاومت کششی، مقاومت خمشی و ملاحظات اقتصادی، به‌ویژه در قالب یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌ندرت در ادبیات موضوع گزارش شده است. همچنین تاکنون مقایسه‌های بسیاری بین اثر سازه الیاف و درصد حجمی انواع الیاف بر روی مقاومت بتن با مقاومت متوسط و بالا صورت پذیرفته است. اما مقایسه جامعی بین تأثیر انواع الیاف پایه‌پلیمری بر روی مقاومت مکانیکی بتن با مقاومت متوسط و بالا و بهینه‌سازی بتن‌های الیافی براساس روش آماری DBA صورت نگرفته است. در این پژوهش تأثیر افزودن الیاف پایه‌پلیمری بر روی مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن‌های با مقاومت متوسط و بالا مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها با استفاده از روش آماری DBA براساس هزینه تهیه الیاف به عنوان یک ویژگی بسیار مهم، بهینه‌ترین طرح الیافی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه برای بتن‌های با مقاومت متوسط و بالا معرفی شده است.

بر این اساس، نوآوری اصلی پژوهش حاضر در مقایسه با تحقیقات انجام‌شده در ۴ تا ۵ سال اخیر، ارائه یک رویکرد جامع ارزیابی چندمعیاره است که در آن اثر نوع و درصد الیاف بر رفتار مکانیکی بتن در سنین مختلف به‌صورت هم‌زمان بررسی شده و نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش‌های



شکل ۱. فلوچارت روند انجام مقاله.

Fig. 1. Flowchart of the research procedure.

جدول ۱. مشخصات الیاف استفاده شده در پژوهش.

Table 1. Properties of the fibers used in the study.

ردیف	الیاف	وزن مخصوص (kg/m^3)	طول (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)
۱	پلی پروپیلن	۹۱۰	۱۲	۴۰۰	۲۷۰۰
۲	بارچپ ۴۸	۹۱۰	۴۸	۶۴۰	۱۲۰۰۰
۳	فورتافرو	۹۱۰	۵۴	۶۶۰	۹۵۰۰



شکل ۲. الیاف مورد استفاده در طرح (الف) پلی پروپیلن، (ب) بارچیپ ۴۸، (ج) فورتافرو فرو

Fig. 2. Fibers employed in the study: (a) polypropylene, (b) BarChip 48, (c) Forta-Ferro

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی ماده افزودنی.

Table 2. Physical and chemical properties of the admixture.

رنگ	حالت فیزیکی	PH	قابلیت انحلال	یون کلر	وزن مخصوص (gr/cm ³)
قهوه ای	مایع	۷~	در آب	ندارد	۱/۰۵±۰/۰۵

۳- آزمون‌ها

۳-۱- آزمون مقاومت فشاری

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، طبق استاندارد ASTM C39 [۲۴] و استاندارد ملی (به شماره ۱۶۰۸-۳) [۲۶] از نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری استفاده شد. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه پس از عمل‌آوری در آب اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها طبق استاندارد ملی (به شماره ۱۶۰۸-۲) [۲۶] پس از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج گردیده و در داخل گرمخانه در دمای ۲۰ درجه قرار داده شدند. پیش از انجام هر آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌ها از آب خارج و در حالت اشباع با سطح خشک آزمایش شدند. همچنین سرعت بارگذاری برای این نمونه‌ها مطابق با بازه پیشنهادی آیین‌نامه ASTM C39، ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شد.

۳-۲- آزمون مقاومت کششی

در این پژوهش آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای

الیاف فورتافرو فرو که ظاهری رشته‌ای دارند، این مرحله را ۳ دقیقه ادامه داده، سپس سیمان را اضافه کرده و پس از آن آب مورد نیاز را افزوده و مدت ۴ دقیقه اجازه اختلاط داده شد. در شکل ۳ تصاویر نمونه‌های تهیه شده در داخل قالب بعد از عملیات ساخت و ویریه کردن نشان داده شده است.

۳-۲- طرح‌های اختلاط

در ساخت نمونه‌های بتنی از دو نوع طرح اختلاط به منظور تهیه بتن‌های با مقاومت متوسط و بالا استفاده شده است. در طرح اختلاط شماره (۱) که هدف فراهم نمودن بتن با مقاومت متوسط است و بر مبنای طرح پیشنهادی کمیته ۵۴۴ انستیتو بتن آمریکا^۱ می‌باشد، از فوق روان‌کننده استفاده نشده است. در طرح اختلاط پیشنهادی شماره (۲)، ضمن استفاده از فوق روان‌کننده، عیار سیمان نیز افزایش یافته است تا بتن با مقاومت بالا تهیه شود. مقدار الیاف استفاده شده در تمام نمونه‌ها، ۰/۵ و ۱ درصد حجمی بتن می‌باشد. مشخصات طرح اختلاط (۱) و (۲) در جدول ۳ آمده است.

1. ACI 544 Committee



شکل ۳. نمونه‌های ساخته شده (الف) نمونه مکعبی فشاری، (ب) نمونه استوانه‌ای کششی، (ج) نمونه تیر خمشی.

Fig. 3. Fabricated specimens: (a) cubic compressive, (b) cylindrical splitting tensile, (c) flexural beam.

جدول ۳. طرح اختلاط شماره (۱) و (۲).

Table 3. Properties of the fibers used in the study.

شماره طرح اختلاط	سیمان (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)	ماسه (Kg/m^3)	شن (Kg/m^3)	فوق روان کننده
۱	۳۸۰	۲۴۰	۶۳۶	۱۰۷۹	ندارد
۲	۵۰۰	۲۳۴	۸۷۱	۷۱۸	۰/۶ درصد وزن سیمان

با ابعاد 20×10 سانتی‌متری پس از ساخت و عمل‌آوری و نگهداری به مدت ۲۸، ۷ و ۹۰ روز در آب، مطابق استاندارد ASTM-C496 [۲۷] و استاندارد ملی به شماره ۶۰۴۷ [۲۸] انجام شد. مقاومت کششی غیرمستقیم مطابق رابطه شماره ۱ بدست می‌آید.

$$f_r = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$

در رابطه فوق f_r مقاومت خمشی بر حسب P، (MPa) حداکثر بار اعمالی بر حسب L، (N) فاصله تکیه‌گاه‌ها بر حسب b و d به ترتیب عرض و ارتفاع نمونه بر حسب (mm) است. در شکل ۴ تصاویر نمونه‌های بتنی تحت آزمایش‌های فشاری، کششی و خمشی نشان داده شده است.

۴- نتایج آزمون‌ها

۴-۱- مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری برای بتن‌های با مقاومت متوسط بر روی نمونه‌های مکعبی انجام گرفت، سپس آزمون برای بتن‌های با مقاومت بالا

با ابعاد 20×10 سانتی‌متری پس از ساخت و عمل‌آوری و نگهداری به مدت ۲۸، ۷ و ۹۰ روز در آب، مطابق استاندارد ASTM-C496 [۲۷] و استاندارد ملی به شماره ۶۰۴۷ [۲۸] انجام شد. مقاومت کششی غیرمستقیم مطابق رابطه شماره ۱ بدست می‌آید.

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

در رابطه فوق f_t مقاومت کششی غیرمستقیم بر حسب P، (MPa) حداکثر بار اعمالی بر حسب L، (N) طول نمونه استوانه‌ای بر حسب D و قطر نمونه استوانه‌ای بر حسب (mm) است.

۳-۳- آزمون مقاومت خمشی

به منظور تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های منشوری با ابعاد $50 \times 10 \times 10$ در سنین ۲۸، ۷ و ۹۰، از آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای مطابق با استاندارد



شکل ۴. نمونه‌ها تحت آزمون (الف) فشاری، (ب) کششی، (ج) خمشی.

Fig. 4. Specimens under testing: (a) compressive, (b) splitting tensile, (c) flexural.

جدول ۴. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های طرح ۱ (برحسب مگاپاسکال).

Table 4. Compressive strength results of Mix Design 1 specimens (in MPa).

نوع نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه						مقاومت فشاری ۲۸ روزه						مقاومت فشاری ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg.	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg.	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg.
بتن معمولی	۱۸/۴۰	۲۰	۱۷/۱	۱۶/۸	۱۸/۶	۱۸/۱۸	۲۵/۵۰	۳۳	۳۳/۱	۳۰/۵	۲۷/۳	۲۹/۸۸	۳۱/۰۰	۳۰/۴	۳۱/۲	۳۲/۹	۲۸/۳	۳۰/۷۶
بارچپ	۰/۵ درصد	۱۹/۲۰	۲۰/۳	۲۲/۱	۱۸/۹	۲۰/۵	۲۰/۲	۳۳/۷۰	۲۹/۸	۳۲/۳	۳۲/۱	۳۳/۳	۳۲/۲۴	۲۳/۸۰	۲۹/۴	۳۱/۱	۳۰	۲۸/۱
	۱ درصد	۲۲/۷۰	۲۲/۴	۲۰/۶	۲۱/۲	۲۱/۷	۲۱/۲۲	۳۴/۸۰	۳۳/۲	۳۲/۹	۳۵/۹	۳۱/۱	۳۳/۷۸	۳۲/۳۰	۳۱/۹	۳۰/۹	۳۱/۳	۲۸/۱
پلی پروپیلن	۰/۵ درصد	۲۲/۳۰	۲۱/۹	۱۷/۵	۱۹/۹	۲۱/۲	۲۰/۵۶	۲۶/۵۰	۲۱/۸	۲۸/۱	۲۸/۸	۲۸/۱	۲۶/۶۶	۲۵/۸۰	۲۷/۹	۳۱	۳۲/۷	۳۰/۲
	۱ درصد	۱۴/۷۰	۱۵/۸	۱۶/۵	۱۵/۹	۱۶/۱	۱۵/۸	۲۵/۸۰	۲۷/۷	۲۷/۹	۲۹/۱	۲۵/۲	۲۷/۱۴	۲۰/۲۰	۲۲/۰۰	۲۲/۲	۲۲/۸	۲۰/۵
فورتافرو	۰/۵ درصد	۲۱/۲۰	۱۹/۴	۱۸/۵	۱۸/۲	۲۰/۹	۱۹/۶۴	۳۸/۲۰	۳۴/۸	۳۵/۶	۳۶/۸	۳۸/۲	۳۶/۷۲	۲۴/۸۰	۲۸/۷	۲۶/۵	۲۶/۳	۳۰/۳
	۱ درصد	۲۲/۰۰	۲۲/۱	۲۱/۹	۱۸/۹	۲۱	۲۱/۱۸	۴۰/۲۰	۳۵/۱	۳۹/۲	۴۰/۹	۳۸/۷	۳۸/۸۲	۳۱/۸۰	۳۰/۴	۲۵/۸	۳۱/۵	۲۹/۲

الیاف پلی پروپیلن، جز در بتن‌های با مقاومت متوسط و در سن ۷ روز، مقاومت بتن را کاهش می‌دهد. در ادامه نتایج آزمون مقاومت فشاری کلیه نمونه‌ها در شکل شماره (۸) نشان داده شده است.

نتایج مقاومت فشاری نشان می‌دهد که اثر افزودن الیاف به بتن به‌طور مستقیم به نوع طرح اختلاط و درصد حجمی الیاف وابسته است. در طرح اختلاط شماره (۱)، که برای دستیابی به بتن با مقاومت متوسط طراحی شده است، افزایش درصد حجمی الیاف در برخی موارد منجر به کاهش مقاومت فشاری شده است. این رفتار به‌ویژه در نمونه‌های حاوی ۱ درصد حجمی الیاف مشهود بوده و نشان می‌دهد که در این طرح اختلاط، افزایش مقدار الیاف می‌تواند منجر به اختلال در تراکم و یکنواختی مخلوط گردد. در مقابل،

با تغییر عیار سیمان و نیز افزودن فوق روان‌کننده تکرار شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها برای طرح (۱) و (۲) به ترتیب در جداول شماره (۴) و (۵) ارائه شده است.

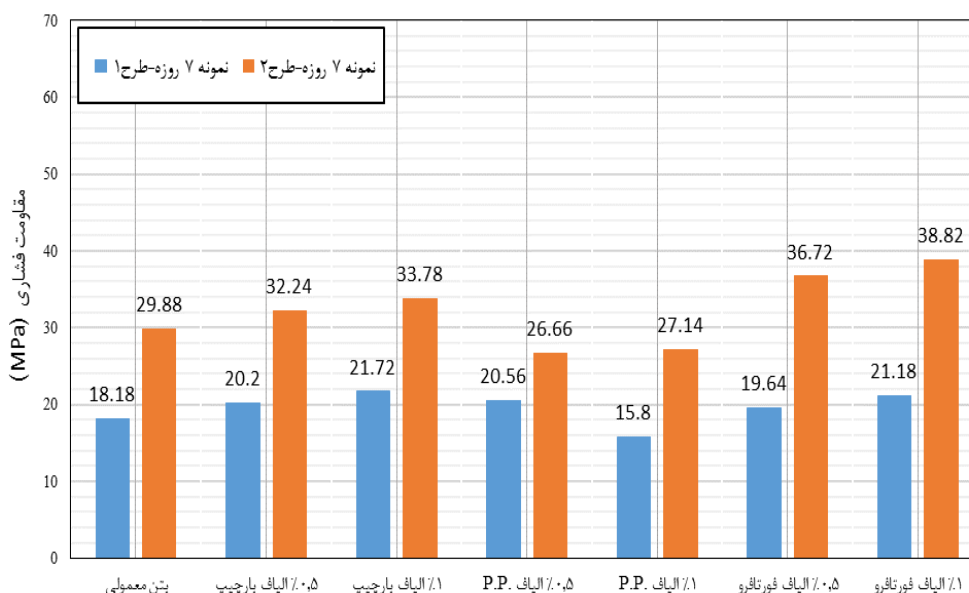
در اشکال (۵) تا (۷) به ترتیب مقایسه نتایج آزمون مقاومت فشاری طرح اختلاط شماره (۱) (بتن با مقاومت متوسط) و (۲) (بتن با مقاومت بالا) برای هر یک از الیاف در سنین مختلف نشان داده شده است.

همانطور که از نمودارهای فوق مشاهده می‌گردد، با افزودن عیار سیمان و فوق روان‌کننده نتایج آزمون مقاومت فشاری برای کلیه الیاف بهبود یافت. در این میان الیاف فورتافرو بیش‌ترین میزان افزایش مقاومت فشاری را نسبت به بتن معمولی داشته است. همچنین افزودن ۰/۵ درصد حجمی بتن از

جدول ۵. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های طرح ۲ (برحسب مگاپاسکال).

Table 5. Compressive strength results of Mix Design 2 specimens (in MPa).

نوع نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه						مقاومت فشاری ۲۸ روزه						مقاومت فشاری ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg
بتن معمولی	۲۵/۵۰	۳۳	۳۳/۱	۳۰/۵	۲۷/۳	۲۹/۸۸	۴۱/۹۰	۴۲/۶	۳۵/۱	۳۹/۲	۴۵/۲	۴۰/۸	۴۵/۵۰	۴۸/۲	۳۵/۲	۴۴/۹	۴۹/۸	۴۴/۷۲
بارچیب	۰/۵ درصد	۳۳/۷۰	۲۹/۸	۳۲/۳	۳۲/۱	۳۳/۳	۴۳/۲۴	۴۳/۰۰	۴۴/۲	۴۸/۴	۴۷/۳	۴۳/۱	۴۵/۲	۴۹/۶۰	۵۰/۱	۴۸/۸	۵۲/۱	۴۸/۰۰
	۱ درصد	۳۴/۸۰	۳۳/۲	۳۳/۹	۳۵/۹	۳۱/۱	۳۳/۷۸	۵۱/۰۰	۴۷/۴	۴۶/۲	۴۷/۵	۴۵/۲	۴۷/۴۶	۶۰/۷۰	۶۰/۲	۴۸/۹	۵۶/۷	۶۰/۳
پلی پروپیلن	۰/۵ درصد	۲۶/۵۰	۲۱/۸	۲۸/۱	۲۸/۸	۲۸/۱	۲۶/۶۶	۳۴/۸۰	۳۷/۳	۲۹/۱	۳۸/۲	۴۰/۶	۳۶/۰۰	۳۸/۹۰	۴۰/۵	۳۶/۹	۴۱/۷	۴۳/۱
	۱ درصد	۲۵/۸۰	۲۷/۷	۲۷/۹	۲۹/۱	۲۵/۲	۲۷/۱۴	۴۰/۵۰	۴۷/۰۰	۴۵/۱	۴۳/۳	۴۲/۲	۴۳/۶۲	۴۷/۵۰	۵۰/۳	۴۸/۹	۴۰/۱	۴۹/۰۰
فورتافرو	۰/۵ درصد	۳۸/۲۰	۳۴/۸	۳۵/۶	۳۶/۸	۳۸/۲	۳۶/۷۲	۵۵/۳۰	۴۸/۴	۵۲/۰۰	۵۱/۲	۵۴/۰۰	۵۲/۱۸	۶۰/۹۰	۶۰/۲	۵۷/۲	۶۰/۹	۶۱/۲
	۱ درصد	۴۰/۲۰	۳۵/۱	۳۹/۲	۴۰/۹	۳۸/۷	۳۸/۸۲	۵۴/۴۰	۵۱/۵	۴۸/۷	۵۵/۹	۵۴/۹	۵۳/۰۸	۶۲/۱۰	۵۹/۹	۵۸/۱	۶۲/۲	۵۹/۱



شکل ۵. آزمون مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها.

Fig. 5. 7-days compressive strength test results of the specimens.

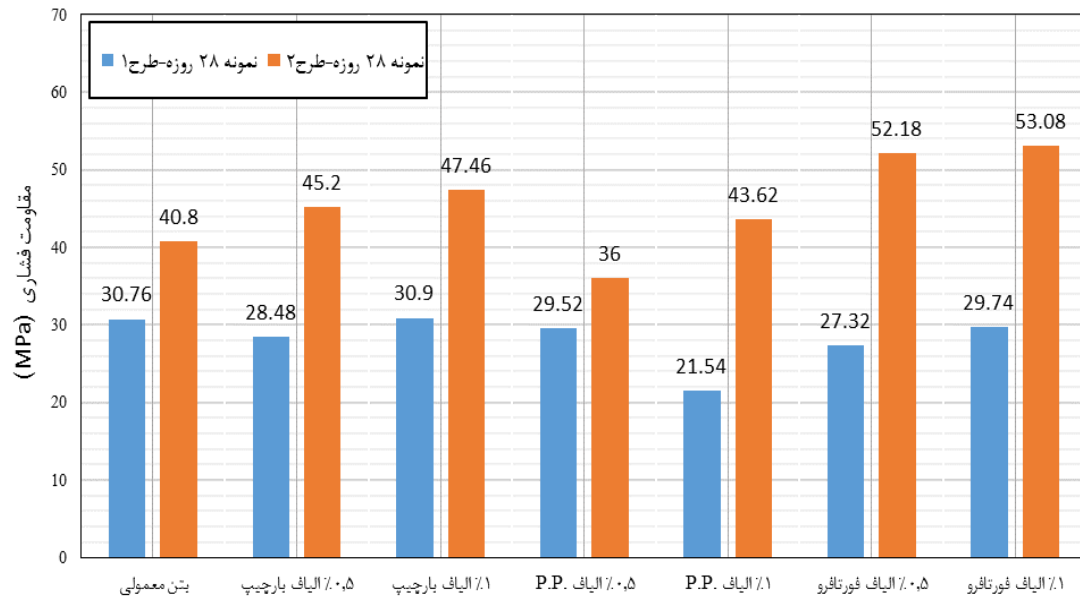
به ترتیب در جداول شماره (۶) و (۷) قابل مشاهده است. همچنین در اشکال (۹) تا (۱۱) مقایسه نتایج آزمون هر دو طرح در سنین مختلف برای هر یک از الیاف، نشان داده شده است.

همانطور که از جداول (۶) و (۷) و نیز نمودارهای شماره (۹) تا (۱۱) مشخص است، افزایش عیار سیمان و فوق روان کننده نتایج آزمون مقاومت کششی را برای کلیه الیاف بهبود می‌دهد. الیاف فورتافرو بیشترین میزان افزایش مقاومت کششی را نسبت به بتن معمولی داشته است. همچنین

در طرح اختلاط شماره (۲)، که دارای عیار سیمان بالاتر و فوق‌روان کننده است، افزودن الیاف به‌ویژه الیاف فورتافرو موجب بهبود یا حفظ مقاومت فشاری شده است که بیانگر نقش تعیین‌کننده کیفیت خمیر سیمان در عملکرد بتن الیافی است.

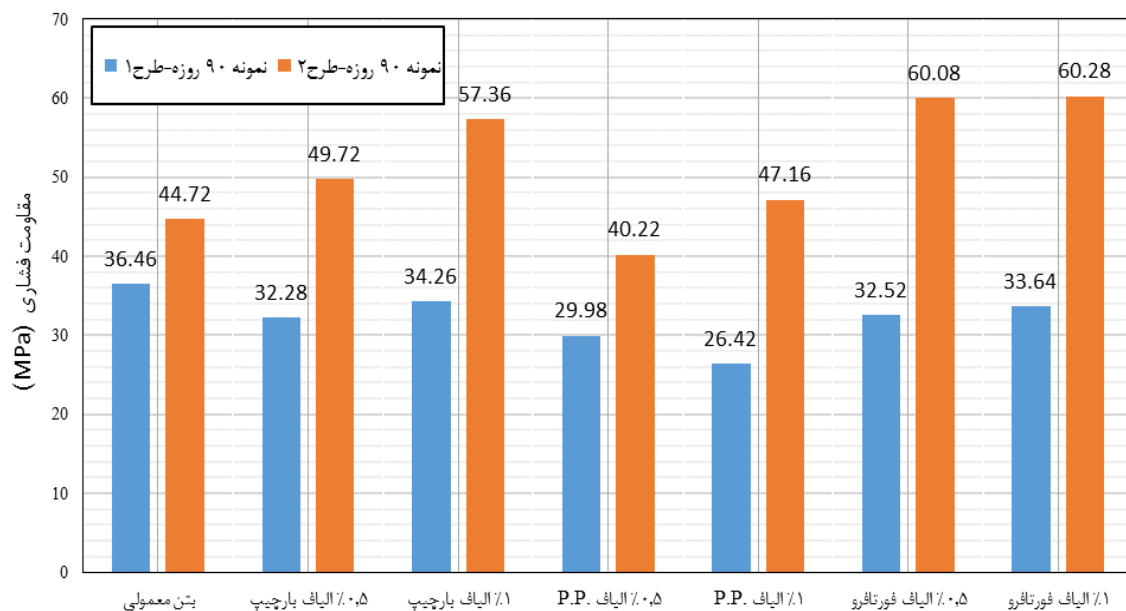
۴-۲- مقاومت کششی

همانند آزمون مقاومت فشاری، آزمایش کشش غیرمستقیم برای طرح اختلاط شماره (۱) و (۲) انجام گرفت. نتایج این آزمون برای طرح (۱) و (۲)



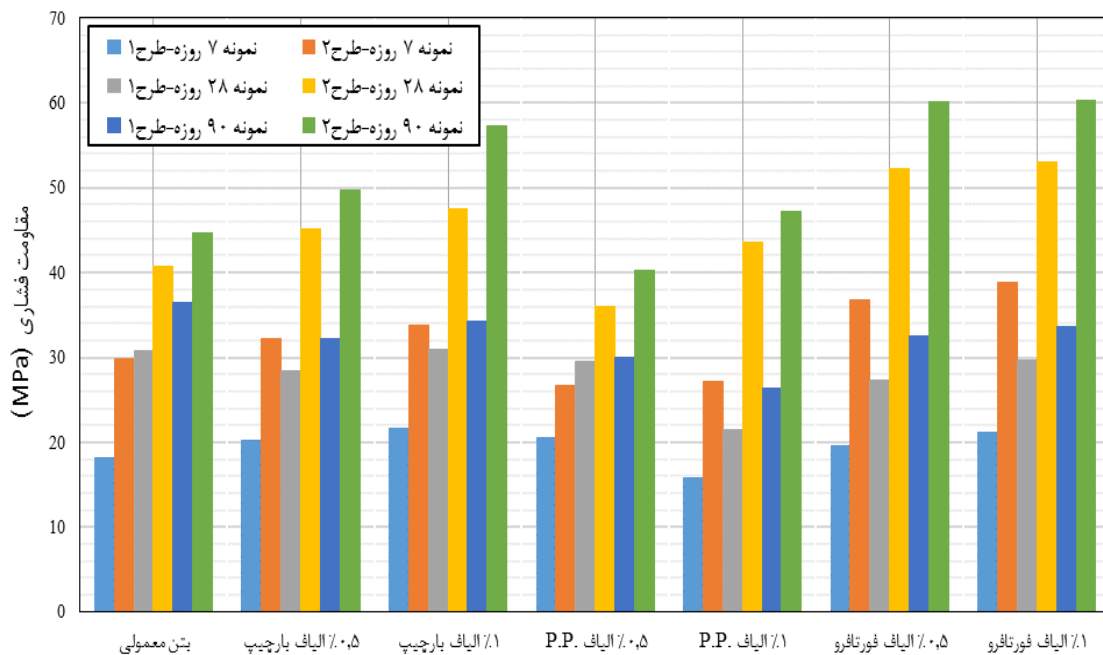
شکل ۶. نتایج آزمون مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها.

Fig. 6. 28-days compressive strength test results of the specimens.



شکل ۷. نتایج آزمون مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌ها.

Fig. 7. 90-days compressive strength test results of the specimens.



شکل ۸. نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های طرح اختلاط ۱ و ۲.

Fig. 8. Compressive strength test results of Mix Design 1 and 2 specimens.

جدول ۶. نتایج مقاومت کششی نمونه‌های طرح ۱ (برحسب مگاپاسکال).

Table 6. Tensile strength results of Mix Design 1 specimens (in MPa).

نوع نمونه	مقاومت کششی ۷ روزه						مقاومت کششی ۲۸ روزه						مقاومت کششی ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg
بتن معمولی	۱/۷۱	۱/۸۳	۱/۶۲	۱/۶۰	۱/۷۳	۱/۷۰	۲/۵۷	۲/۵۳	۲/۵۸	۲/۶۸	۲/۴۲	۲/۵۵	۲/۷۳	۲/۸۹	۲/۹۵	۲/۸۷	۲/۹۶	۲/۸۸
بارچپ	۰/۵ درصد	۱/۷۷	۱/۸۵	۱/۹۸	۱/۷۵	۱/۸۶	۲/۱۰	۲/۴۸	۲/۵۷	۲/۵۱	۲/۴۰	۲/۴۱	۲/۹۳	۲/۰۷	۲/۶۰	۲/۸۹	۲/۶۵	۲/۶۳
	۱ درصد	۲/۰۲	۲/۰۰	۱/۸۷	۱/۹۱	۱/۹۵	۲/۶۵	۲/۶۲	۲/۵۶	۲/۵۹	۲/۴۰	۲/۵۶	۲/۹۳	۲/۷۰	۲/۶۰	۲/۸۹	۲/۶۵	۲/۷۵
پلی پروپیلن	۰/۵ درصد	۱/۹۹	۱/۹۶	۱/۶۵	۱/۸۲	۱/۹۱	۲/۲۴	۲/۳۹	۲/۵۷	۲/۶۶	۲/۵۲	۲/۴۸	۲/۱۳	۲/۲۵	۲/۶۹	۲/۶۸	۲/۷۲	۲/۴۹
	۱ درصد	۱/۴۵	۱/۵۳	۱/۵۸	۱/۵۴	۱/۵۵	۱/۸۴	۱/۹۷	۱/۹۸	۲/۰۳	۱/۸۶	۱/۹۳	۲/۳۹	۲/۴۲	۲/۰۵	۲/۲۷	۲/۲۹	۲/۲۸
فورتافرو	۰/۵ درصد	۱/۹۱	۱/۷۹	۱/۷۲	۱/۷۰	۱/۸۹	۲/۱۷	۲/۴۴	۲/۲۹	۲/۲۸	۲/۵۳	۲/۳۴	۲/۲۹	۲/۹۶	۲/۳۳	۲/۸۳	۲/۹۲	۲/۶۶
	۱ درصد	۱/۹۷	۱/۹۸	۱/۹۶	۱/۷۵	۱/۹۰	۲/۶۲	۲/۵۳	۲/۲۴	۲/۶	۲/۴۶	۲/۴۹	۲/۸۲	۲/۷۴	۲/۸	۲/۷۳	۲/۵۰	۲/۷۲

به‌ویژه در طرح اختلاط شماره (۱)، افزایش درصد الیاف به ۱ درصد حجمی با کاهش مقاومت کششی همراه بوده است. این موضوع بیانگر آن است که در صورت عدم تأمین شرایط مناسب اختلاط و پخش یکنواخت الیاف، افزایش مقدار الیاف لزوماً به بهبود عملکرد کششی منجر نمی‌شود. در مقابل، در طرح اختلاط شماره (۲)، رفتار کششی نمونه‌ها پایدارتر بوده و اثر منفی افزایش درصد الیاف کمتر مشاهده شده است.

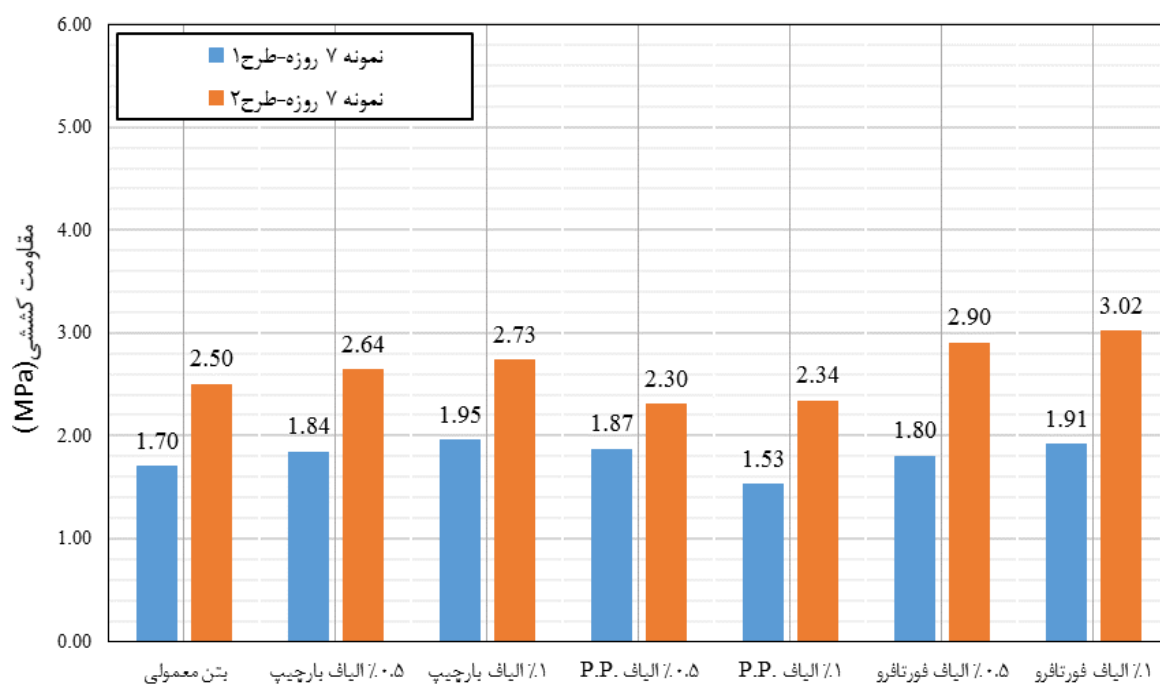
افزودن ۰/۵ درصد حجمی بتن، از الیاف پلی‌پروپیلن، جز در بتن‌های با مقاومت متوسط و در سن ۷ روز، مقاومت بتن را کاهش می‌دهد. در ادامه نتایج آزمون مقاومت کششی کلیه نمونه‌ها در شکل شماره (۱۲) نشان داده شده است.

بررسی نتایج مقاومت کششی نشان می‌دهد که پاسخ بتن الیافی به افزایش درصد حجمی الیاف همواره یکنواخت نیست. در برخی نمونه‌ها،

جدول ۷. نتایج مقاومت کششی نمونه‌های طرح ۲ (برحسب مگاپاسکال).

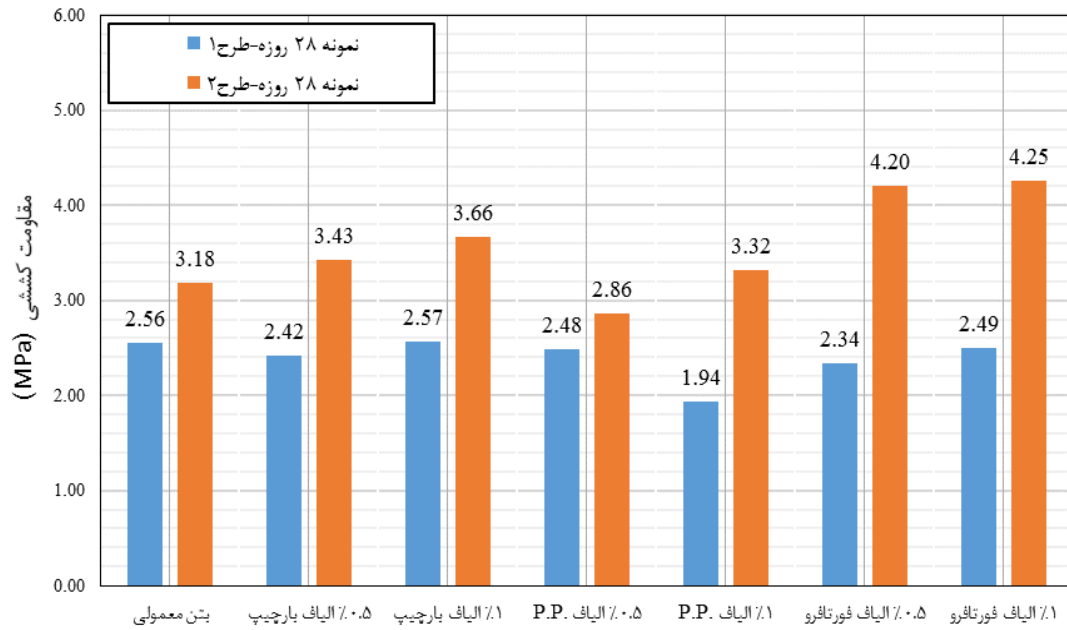
Table 7. Tensile strength results of Mix Design 2 specimens (in MPa).

نوع نمونه	مقاومت کششی ۷ روزه						مقاومت کششی ۲۸ روزه						مقاومت کششی ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg
بتن معمولی	۲/۲۲	۲/۶۸	۲/۶۹	۲/۵۴	۲/۳۵	۲/۴۹	۳/۲۱	۳/۰۵	۳/۳۵	۳/۰۴	۳/۲۵	۳/۱۸	۳/۴۵	۳/۶۴	۲/۸۱	۳/۴۰	۳/۷۴	۳/۴۱
بارچپ	درصد ۰/۵	۲/۷۳	۲/۵۰	۲/۶۴	۲/۶۳	۲/۷۰	۳/۳۴	۳/۵۵	۳/۶۱	۳/۴۹	۳/۱۲	۳/۴۲	۳/۷۳	۳/۷۶	۳/۶۸	۳/۸۷	۳/۶۲	۳/۷۳
	درصد ۱	۲/۷۹	۲/۶۹	۲/۷۳	۲/۸۵	۲/۵۷	۳/۶۷	۳/۸۶	۳/۹۳	۳/۴۱	۳/۴۵	۳/۶۶	۴/۳۰	۴/۲۸	۳/۶۹	۴/۱۳	۴/۲۸	۴/۱۳
پلی پروپیلن	درصد ۰/۵	۲/۲۹	۱/۹۵	۲/۴۰	۲/۴۴	۲/۴۰	۲/۹۶	۲/۶۷	۲/۹۴	۲/۷۸	۲/۸۹	۲/۸۵	۳/۰۲	۳/۲۱	۲/۹۰	۳/۱۸	۳/۲۷	۳/۱۲
	درصد ۱	۲/۲۴	۲/۳۷	۲/۳۹	۲/۴۶	۲/۲	۳/۴۱	۳/۳۸	۳/۳۰	۳/۲۹	۳/۲۱	۳/۳۲	۳/۵۹	۳/۷۷	۳/۶۹	۳/۰۹	۳/۶	۳/۵۵
فورتافرو	درصد ۰/۵	۲/۹۸	۲/۷۹	۲/۸۳	۲/۹۰	۲/۹۸	۴/۲۵	۴/۰۵	۴/۳۱	۴/۲۲	۴/۱۹	۴/۲۰	۴/۲۵	۴/۲۸	۴/۳۰	۴/۳۰	۴/۲۶	۴/۲۷
	درصد ۱	۳/۱۰	۲/۸۰	۳/۰۴	۳/۱۳	۳/۰۱	۴/۲۷	۴/۲۸	۴/۳۱	۴/۲۵	۴/۱۶	۴/۲۵	۴/۳۶	۴/۲۶	۴/۱۹	۴/۳۶	۴/۲۳	۴/۲۸



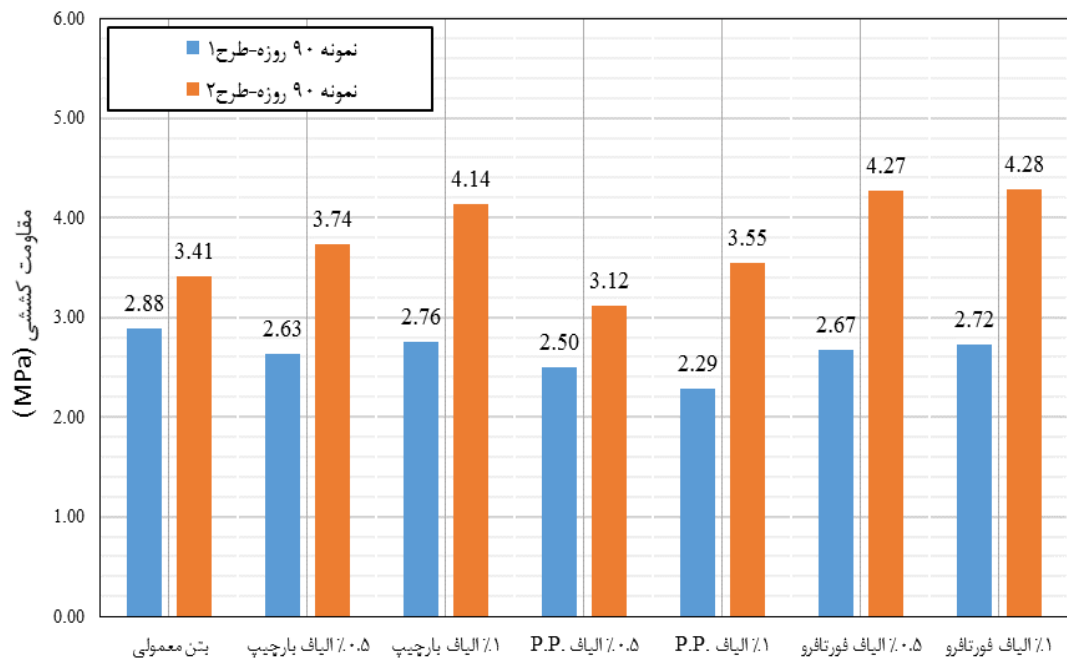
شکل ۹. نتایج آزمون مقاومت کششی ۷ روزه نمونه‌ها.

Fig. 9. 7-days tensile strength test results of the specimens.



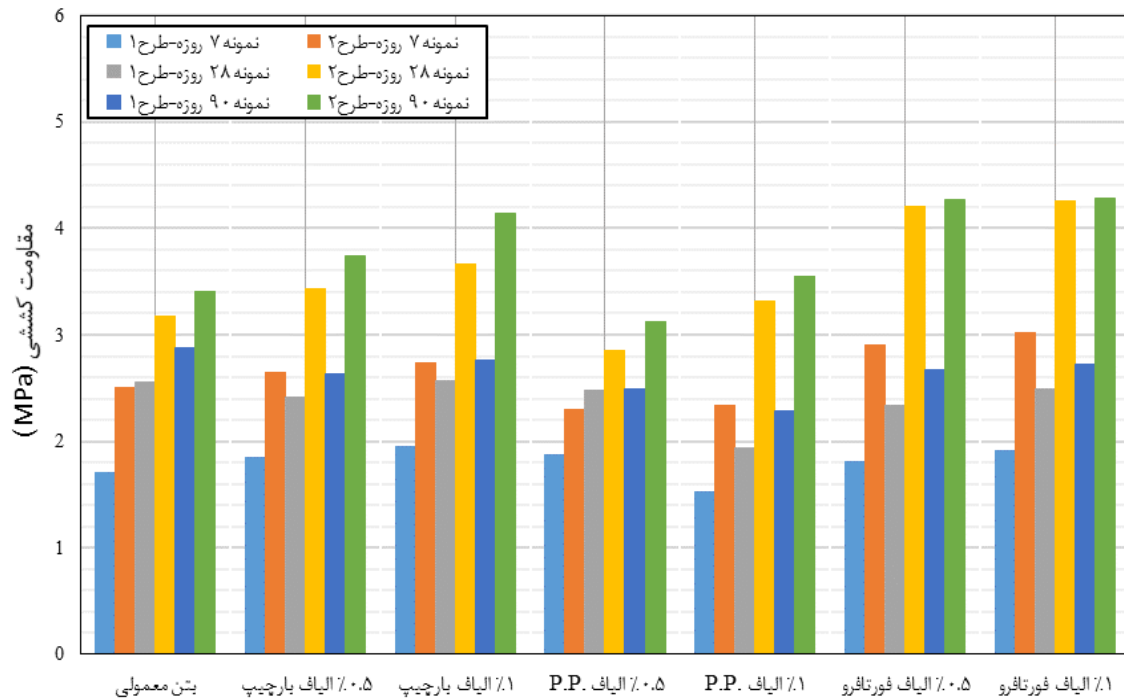
شکل ۱۰. نتایج آزمون مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌ها.

Fig. 10. 28-days tensile strength test results of the specimens.



شکل ۱۱. نتایج آزمون مقاومت کششی ۹۰ روزه نمونه‌ها.

Fig. 11. 90-days tensile strength test results of the specimens.



شکل ۱۲. نتایج آزمون مقاومت کششی نمونه‌های طرح اختلاط ۱ و ۲.

Fig. 12. Tensile strength test results of Mix Design 1 and 2 specimens.

۳-۴- رابطه مقاومت فشاری و کششی

در آیین‌نامه بتن ایران (آبا - ویرایش ۱۳۹۳) [۳۰] برای بتن‌های بدون الیاف، رابطه‌ای میان مقاومت کششی و فشاری از طریق معادله شماره (۱) تعریف می‌شود.

$$f_t = 0.23 \sqrt{f_c^3} \quad (3)$$

در رابطه فوق f_t مقاومت کششی و f_c مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال می‌باشند. در نمودار شکل ۱۳ و ۱۴ نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها، با رابطه ۱ و ۲ با محدوده بالا و پایین ارائه شده در آیین‌نامه FIB [۳۱] مقایسه گردیده است.

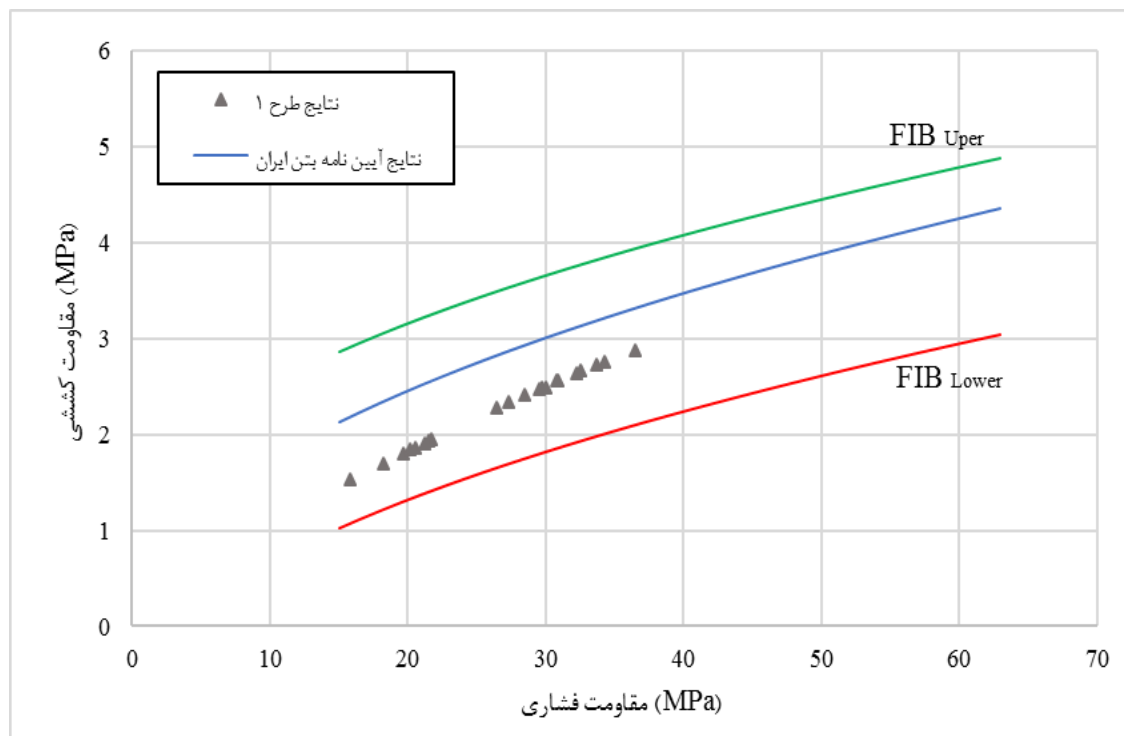
همانطور که در نمودارهای اشکال (۱۳) و (۱۴) مشاهده می‌گردد، نتایج مربوط به هر دو طرح در محدوده پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه FIB قرار می‌گیرد. در این میان نمونه‌های بتنی با مقاومت بالا و مسلح به الیاف طرح (۲) در مقایسه با طرح (۱) با تقریب بهتری توسط رابطه ارائه شده در آیین‌نامه بتن ایران قابل پیش‌بینی هستند. با این حال قرار گرفتن نتایج هر دو طرح در محدوده ارائه شده و نزدیکی به رابطه آیین‌نامه بتن ایران صحت نتایج را تایید می‌کند.

۴-۴- مقاومت خمشی

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نیز همانند آزمایش مقاومت فشاری و کششی برای نمونه‌های بتنی با مقاومت متوسط و بالا انجام گرفت. نتایج این آزمون برای طرح (۱) و (۲) به ترتیب در جداول شماره (۸) و (۹) قابل مشاهده است. همچنین در اشکال (۱۵) تا (۱۷) مقایسه نتایج آزمون هر دو طرح در سنین مختلف برای هر یک از الیاف، نشان داده شده است.

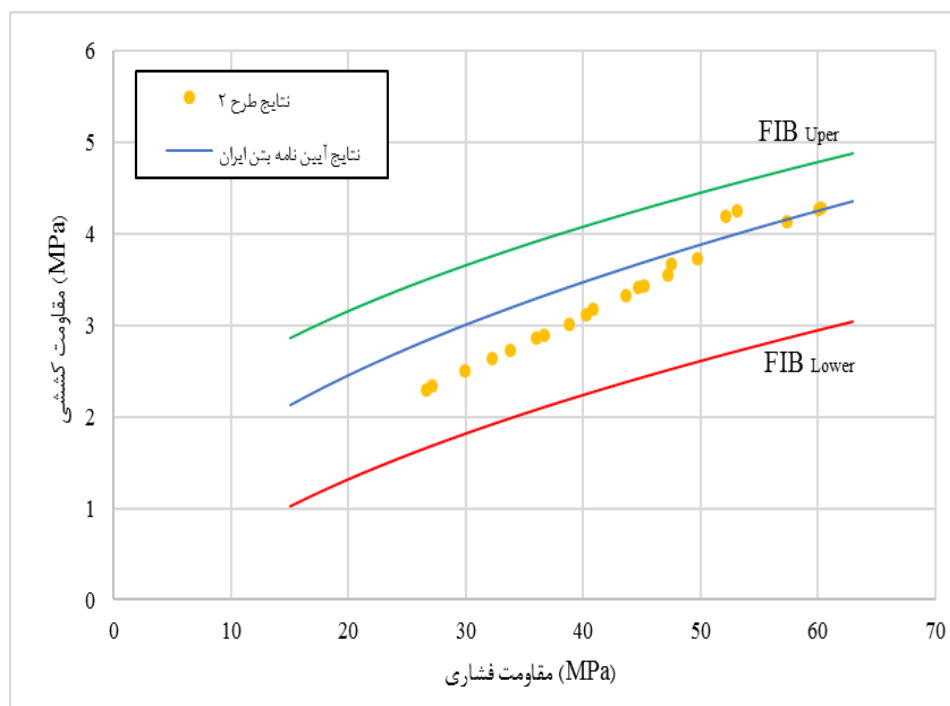
همانطور که از جداول (۸) و (۹) و نیز نمودارهای شماره (۱۵) تا (۱۷) مشخص است، افزایش مقاومت بتن نتایج آزمون مقاومت خمشی را برای کلیه الیاف بهبود می‌دهد. در حقیقت با افزایش مقاومت بتن، تاثیر وجود الیاف در افزایش مقاومت خمشی بیشتر خواهد بود. الیاف فورتافرو بیش‌ترین میزان افزایش مقاومت خمشی را نسبت به بتن معمولی داشته است. همچنین افزودن ۰/۵ درصد حجمی بتن از الیاف پلی‌پروپیلن، جز در بتن‌های با مقاومت متوسط و در سن ۷ روز، مقاومت بتن را کاهش می‌دهد. در ادامه نتایج آزمون مقاومت خمشی کلیه نمونه‌ها در شکل شماره (۱۸) نشان داده شده است.

نتایج آزمون مقاومت خمشی نشان می‌دهد که عملکرد خمشی بتن الیافی بیش از سایر خواص مکانیکی به نوع الیاف و درصد حجمی آن حساس است. کاهش مقاومت خمشی در برخی نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف،



شکل ۱۳. نمودار مقاومت کششی بر حسب مقاومت فشاری طرح شماره (۱).

Fig. 13. Tensile strength versus compressive strength for Mix Design No. 1.



شکل ۱۴. نمودار مقاومت کششی بر حسب مقاومت فشاری طرح شماره (۲).

Fig. 14. Tensile strength versus compressive strength for Mix Design No. 2.

جدول ۸. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های طرح ۱ (برحسب مگاپاسکال).

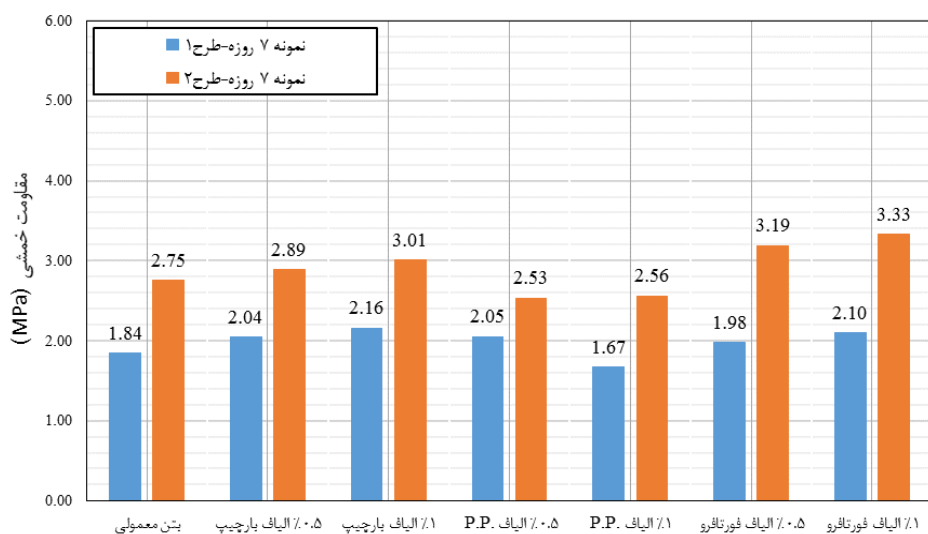
Table 8. Flexural strength results of Mix Design 1 specimens (in MPa).

نوع نمونه	مقاومت کششی ۷ روزه						مقاومت کششی ۲۸ روزه						مقاومت کششی ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg
بتن معمولی	۱/۸۷	۱/۹۸	۱/۷۸	۱/۷۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۲/۸۳	۲/۷۸	۲/۸۴	۲/۹۳	۲/۶۴	۲/۸۰	۳/۰۰	۳/۱۸	۳/۲۰	۳/۱۵	۳/۲۳	۳/۱۵
بارچپ	۰/۵ درصد	۱/۹۵	۲/۰۴	۲/۲۰	۱/۹۵	۲/۰۵	۲/۲۹	۲/۷۰	۲/۸۱	۲/۷۴	۲/۶۳	۲/۶۳	۳/۲۲	۲/۲۸	۲/۸۶	۳/۱۰	۲/۹۲	۲/۸۸
	۱ درصد	۲/۲۴	۲/۲۰	۲/۰۷	۲/۱۱	۲/۱۶	۲/۹۲	۲/۸۸	۲/۸۲	۲/۸۷	۲/۶۶	۲/۸۳	۳/۲۲	۲/۹۷	۲/۸۶	۳/۱۲	۲/۹۰	۳/۰۱
پلی پروپیلن	۰/۵ درصد	۲/۱۹	۲/۱۶	۱/۸۲	۲/۰۰	۲/۱۰	۲/۴۶	۲/۶۳	۲/۸۳	۲/۹۳	۲/۸۰	۲/۷۳	۲/۴۲	۲/۴۸	۲/۹۶	۲/۹۷	۲/۹۹	۲/۷۶
	۱ درصد	۱/۶۰	۱/۶۸	۱/۷۲	۱/۶۷	۱/۶۹	۲/۰۲	۲/۱۷	۲/۱۸	۲/۲۳	۲/۰۲	۲/۱۲	۲/۶۳	۲/۶۶	۲/۲۶	۲/۵۰	۲/۵۲	۲/۵۱
فورتافرو	۰/۵ درصد	۲/۱۰	۱/۹۷	۱/۸۹	۱/۸۷	۲/۰۸	۲/۳۹	۲/۶۸	۲/۵۲	۲/۵۱	۲/۷۸	۲/۵۸	۲/۵۲	۳/۲۶	۲/۵۶	۳/۱۱	۳/۲۱	۲/۹۳
	۱ درصد	۲/۱۷	۲/۱۸	۲/۱۶	۱/۹۳	۲/۰۹	۲/۸۸	۲/۷۸	۲/۴۶	۲/۸۶	۲/۷۱	۲/۷۴	۳/۱۰	۳/۰۱	۳/۰۶	۳/۰۰	۲/۷۳	۲/۹۸

جدول ۹. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های طرح ۲ (برحسب مگاپاسکال).

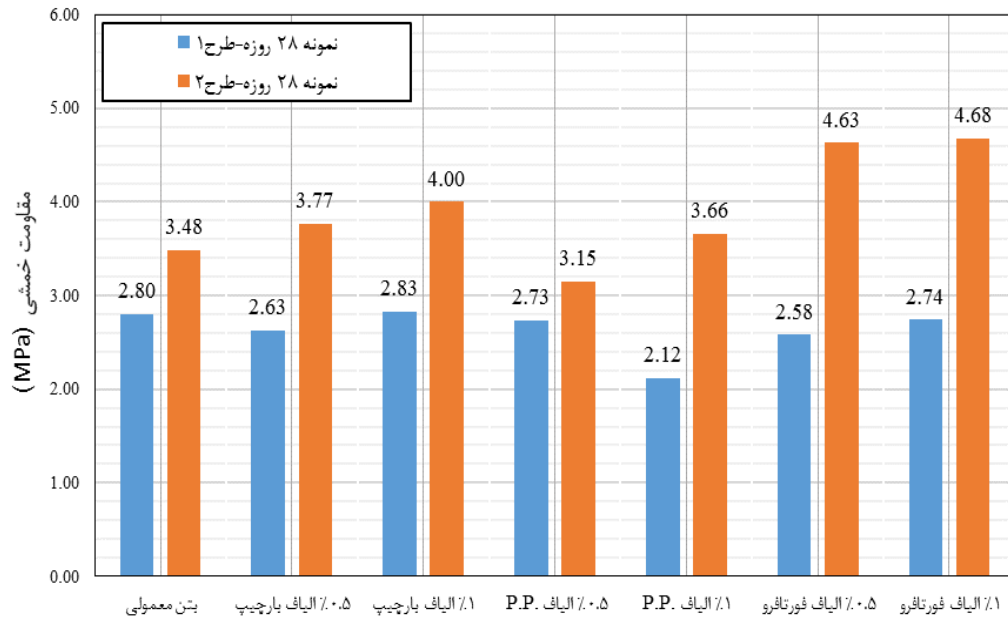
Table 9. Flexural strength results of Mix Design 2 specimens (in MPa).

نوع نمونه	مقاومت کششی ۷ روزه						مقاومت کششی ۲۸ روزه						مقاومت کششی ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg
بتن معمولی	۲/۴۴	۲/۹۵	۲/۹۶	۲/۷۹	۲/۵۹	۲/۷۵	۳/۴۸	۳/۳۶	۳/۶۳	۳/۳۴	۳/۵۸	۳/۴۸	۳/۸۰	۴/۰۰	۳/۰۹	۳/۷۴	۴/۱۱	۳/۷۵
بارچپ	۰/۵ درصد	۳/۰۰	۲/۷۵	۲/۸۸	۲/۸۶	۲/۹۷	۳/۶۷	۳/۹۱	۳/۹۷	۳/۸۴	۳/۴۵	۳/۷۷	۴/۱۰	۴/۱۴	۴/۰۵	۴/۲۶	۳/۹۸	۴/۱۱
	۱ درصد	۳/۰۷	۲/۹۷	۳/۰۰	۳/۱۴	۲/۸۵	۴/۰۴	۴/۱۱	۴/۳۲	۳/۸۰	۳/۷۵	۴/۰۰	۴/۷۳	۴/۷۱	۴/۰۶	۴/۴۹	۴/۶۶	۴/۵۳
پلی پروپیلن	۰/۵ درصد	۲/۵۲	۲/۱۵	۲/۶۴	۲/۶۸	۲/۶۴	۳/۲۶	۲/۹۸	۳/۲۳	۳/۱۱	۳/۱۸	۳/۱۵	۳/۳۲	۳/۵۳	۳/۳۱	۳/۵۰	۳/۶۰	۳/۴۵
	۱ درصد	۲/۴۶	۲/۶۱	۲/۶۳	۲/۶۸	۲/۴۲	۳/۷۵	۳/۷۲	۳/۶۳	۳/۶۲	۳/۵۶	۳/۶۶	۳/۹۸	۴/۱۵	۴/۰۶	۳/۴۶	۳/۹۶	۳/۹۲
فورتافرو	۰/۵ درصد	۳/۲۸	۳/۰۷	۳/۱۱	۳/۱۹	۳/۲۸	۴/۶۸	۴/۴۸	۴/۷۴	۴/۶۴	۴/۶۱	۴/۶۳	۴/۶۸	۴/۷۱	۴/۷۳	۴/۷۳	۴/۶۶	۴/۷۰
	۱ درصد	۳/۴۱	۳/۰۸	۳/۳۶	۳/۴۵	۳/۳۳	۴/۷۰	۴/۷۱	۴/۷۴	۴/۶۸	۴/۵۸	۴/۶۸	۴/۸۰	۴/۶۹	۴/۷۲	۴/۸۰	۴/۶۵	۴/۷۳



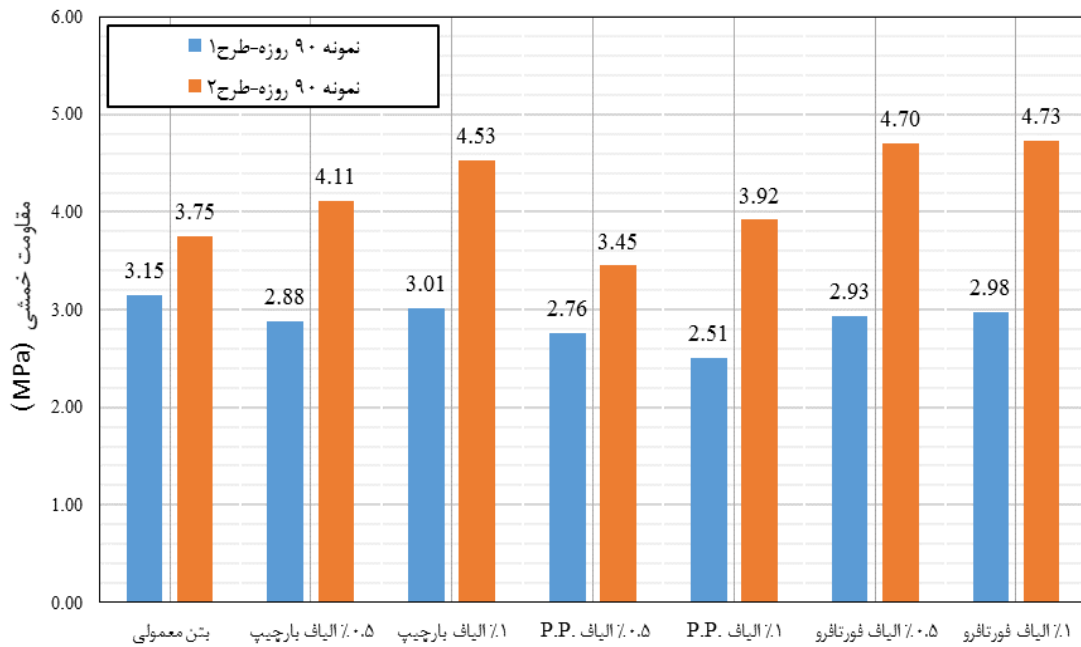
شکل ۱۵. نتایج آزمون مقاومت خمشی ۷ روزه نمونه‌ها.

Fig. 15. 7-days flexural strength test results of the specimens.



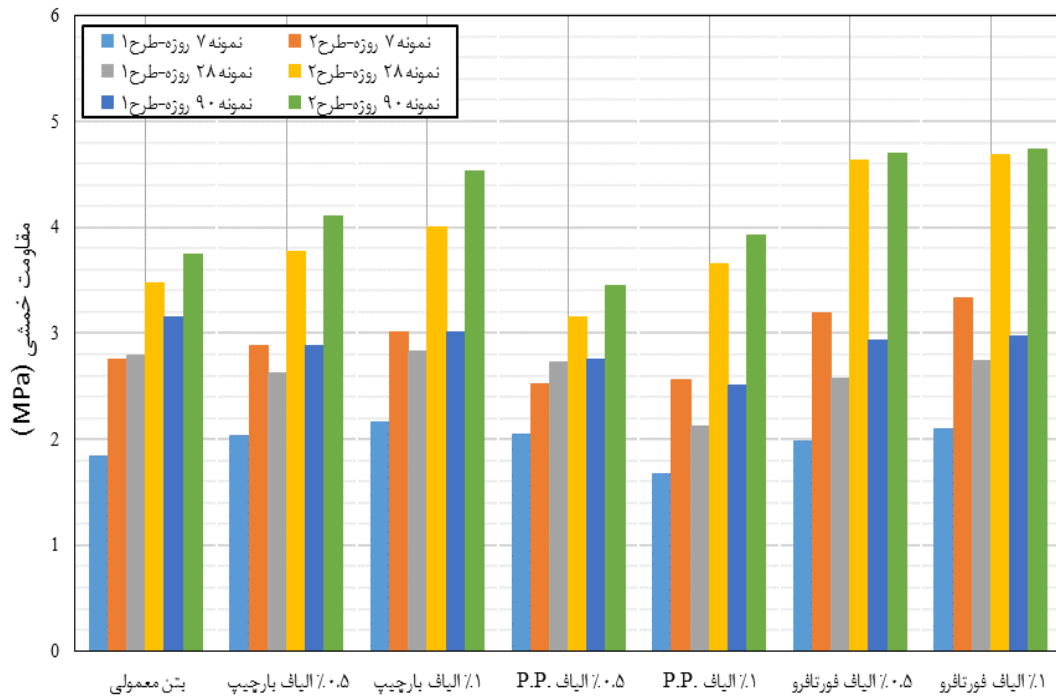
شکل ۱۶. نتایج آزمون مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌ها.

Fig. 16. 28-days flexural strength test results of the specimens.



شکل ۱۷. نتایج آزمون مقاومت خمشی ۹۰ روزه نمونه‌ها.

Fig. 17. 90-days flexural strength test results of the specimens.



شکل ۱۸. نتایج آزمون مقاومت خمشی نمونه‌های طرح اختلاط ۱ و ۲.

Fig. 18. Flexural strength test results of Mix Design 1 and 2 specimens.

بنابراین یک بردار در فضای m بعدی تشکیل می‌شود که n گزینه قابل بررسی را معرفی می‌نماید. این نکته باید اشاره شود که در هریک از m ویژگی (خصوصیت) یک گزینه در بدترین وضعیت قرار دارد که برای تشکیل ماتریس معیار این خصوصیت برای آن گزینه صفر در نظر گرفته شده و مقدار عددی آن ویژگی برای سایر گزینه‌ها از قدر مطلق تفاضل بدترین وضعیت از مقدار ویژگی موجود در هر گزینه به دست می‌آید.

در مرحله بعد می‌بایست فاصله بین مقادیر یک خصوصیت در تمام گزینه‌ها با بیشترین مقدار آن خصوصیت (مقدار بهینه) به دست آید. این کار منجر به تشکیل ماتریس دیگری به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} Z_{op1} - Z_{11} & Z_{op2} - Z_{12} & \cdots & Z_{opm} - Z_{1m} \\ Z_{op1} - Z_{21} & Z_{op2} - Z_{22} & \cdots & Z_{opm} - Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{op1} - Z_{n1} & Z_{op2} - Z_{n2} & \cdots & Z_{opm} - Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

در ماتریس فوق Z_{opj} ها بیشترین مقادیر عددی Z_{ij} در هر خصوصیت

به‌ویژه در طرح اختلاط شماره (۱)، حاکی از آن است که افزایش بیش‌ازحد الیاف می‌تواند موجب کاهش پیوستگی ماتریس بتن و ایجاد نواحی ضعیف در مقطع گردد. این رفتار در نمونه‌های طرح اختلاط شماره (۲) شدت کمتری داشته و نشان‌دهنده تأثیر مثبت طرح اختلاط غنی‌تر بر کنترل رفتار خمشی بتن الیافی است.

۴-۵- بهینه‌سازی نتایج با استفاده از روش آماری DBA

روش DBA^۱ یک روش آماری به منظور یافتن یک گزینه بهینه در میان تمام گزینه‌های موجود در یک فرایند است. به منظور پیاده‌سازی روش DBA، در یک مطالعه آماری n گزینه‌ای و دارای m ویژگی، یک گزینه به عنوان بهینه انتخاب می‌شود. این گزینه‌ها و ویژگی‌های مورد مطالعه، تحت عنوان ماتریس معیار به صورت زیر قابل توصیف هستند [۳۲].

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1. Distance Based Approach

جدول ۱۰. مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۷ روز.

Table 10. Criterion values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 7 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۷ روزه	بارچپ	۰/۵	۰/۳۷	۰/۳۱	۴/۴	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۴۹	۰/۴۲	۵/۹۲	.
	پلی‌پروپیلن	۰/۵	۰/۳۸	۰/۳۴	۴/۷۶	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	.	.	.	۲,۷۰۰,۰۰۰
	فورتافرو	۰/۵	۰/۳۱	۰/۲۷	۳/۸۴	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۴۳	۰/۳۸	۵/۳۸	.

شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی به همراه هزینه مصرفی (با فرض قیمت سال ۱۴۰۵ شمسی) جهت تهیه الیاف برای یک متر مکعب بتن به عنوان ویژگی‌های طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شده‌اند. در جداول ۱۰ الی ۱۵ مقادیر معیار برای تمامی گروه‌ها ارائه شده است.

لازم به ذکر است این مقادیر مستقیماً از نتایج آزمایشگاهی استخراج شده و رفتار مشاهده شده در بخش نتایج مکانیکی، مبنای اصلی امتیازدهی و رتبه‌بندی طرح‌ها در روش DBA را تشکیل می‌دهد. در جداول ۱۰ تا ۱۵ عدد صفر در ستون مقاومت‌ها نشان‌دهنده‌ی ضعیف‌ترین عملکرد مکانیکی در میان گزینه‌های همان گروه است و سایر اعداد، بیانگر مقدار مطلق فاصله (تفاضل) هر گزینه از این وضعیت بدترین بر حسب مگاپاسکال است و نه مقاومت مربوطه. همچنین عدد صفر در ستون هزینه، معرف گران‌ترین الیاف در گروه مربوطه است و سایر اعداد هزینه، مقدار مطلق فاصله ریالی هر گزینه از گران‌ترین حالت را نشان می‌دهند.

در مرحله بعد شاخص عملکرد ترکیبی (اثر مقاومت‌های مکانیکی) و شاخص اقتصادی (نسبت هزینه به عملکرد) به ترتیب با استفاده از میانگین و انحراف معیار طبق روابط (۷) و (۸) در مورد هر ویژگی که در روابط (۲) تا (۴) مطرح شد، مقادیر استاندارد شده به دست می‌آید. در جداول ۱۶ تا ۲۱ این مقادیر ارائه شده است.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

می‌باشند. در نهایت فاصله مرکب (CD^1) برای هر گزینه تا وضعیت بهینه از رابطه ۶ محاسبه می‌شود [۳۳]:

$$CD_i = \left[\sum_{j=1}^m (Z_{opj} - Z_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

که در آن CD_i فاصله مرکب هر گزینه تا وضعیت بهینه با توجه به خصوصیات معرفی شده برای آن است. گزینه بهینه در میان n حالت دارای کمترین فاصله مرکب است.

در مقاله حاضر ۶ نوع بتن الیافی با مقاومت متوسط و ۶ نوع بتن الیافی با مقاومت بالا مطرح شده است. از آنجا که یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده در انتخاب نوع و مقدار الیاف در بتن‌های الیافی، هزینه مورد نیاز جهت تامین الیاف است، علاوه بر خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی و خمشی)، هزینه تامین الیاف به عنوان یک ویژگی به سه ویژگی مذکور اضافه شده است.

در حقیقت در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روش DBA یک طرح الیافی در گروه بتن‌های با مقاومت متوسط و یک طرح الیافی در گروه بتن‌های با مقاومت بالا در سنین مختلف به عنوان طرح بهینه معرفی شوند. برای این منظور در ابتدا ضوابط و خصوصیت‌های تعیین شده در این تحقیق برای تمامی طرح‌های اختلاط تعیین می‌شوند. خواص مکانیکی

1. Composite Distance

جدول ۱۱. مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۷ روز.

Table 11. Criterion values for high-strength fiber-reinforced concretes at 7 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۷ روزه	بارچپ	۰/۵	۰/۳۶	۰/۳۴	۵/۵۸	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۴۸	۰/۴۳	۷/۱۲	.
	پلی پروپیلن	۰/۵	.	.	.	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۴۸	۲,۷۰۰,۰۰۰
	فورتافرو	۰/۵	۰/۶۶	۰/۵۹	۱۰/۰۶	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۸	۰/۷۲	۱۲/۱۶	.

جدول ۱۲. مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۲۸ روز.

Table 12. Criterion values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 28 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۲۸ روزه	بارچپ	۰/۵	۰/۵۱	۰/۴۸	۵/۵۸	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۷۱	۰/۶۳	۷/۱۲	.
	پلی پروپیلن	۰/۵	۰/۶۱	۰/۵۵	.	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	.	.	۰/۴۸	۲,۷۰۰,۰۰۰
	فورتافرو	۰/۵	۰/۴۶	۰/۴۱	۱۰/۰۶	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۶۲	۰/۵۶	۱۲/۱۶	.

جدول ۱۳. مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۲۸ روز.

Table 13. Criterion values for high-strength fiber-reinforced concretes at 28 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۲۸ روزه	بارچپ	۰/۵	۰/۶۲	۰/۵۷	۹/۲	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۸۵	۰/۸۱	۱۱/۴۶	.
	پلی پروپیلن	۰/۵	.	.	.	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	۰/۵۱	۰/۴۷	۷/۶۲	۲,۷۰۰,۰۰۰
	فورتافرو	۰/۵	۱/۴۸	۱/۳۵	۱۶/۱۸	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۱/۵۳	۱/۴	۱۷/۰۸	.

جدول ۱۴. مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۹۰ روز.

Table 14. Criterion values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 90 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	۰/۳۷	۰/۳۵	۶/۹۴	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۵	۰/۴۷	۹/۳۶	.
	پلی پروپیلن	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۱	۷/۹۸	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	.	.	.	۲,۷۰۰,۰۰۰
	فورتافرو	۰/۵	۰/۴۲	۰/۳۸	۵/۷۸	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۴۷	۰/۴۴	۸/۲	.

جدول ۱۵. مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۹۰ روز.

Table 15. Criterion values for high-strength fiber-reinforced concretes at 90 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	۰/۶۶	۰/۶۱	۹/۵	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۱/۰۸	۱/۰۱	۱۷/۱۴	.
	پلی پروپیلن	۰/۵	.	.	.	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	۰/۴۷	۰/۴۳	۶/۹۴	۲,۷۰۰,۰۰۰
	فورتافرو	۰/۵	۱/۲۵	۱/۱۵	۱۹/۸۶	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۱/۲۸	۱/۱۶	۲۰/۰۶	.

مطابق روش DBA، در بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط، طرح‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن، ۰/۵ درصد الیاف فورتافرو و ۰/۵ درصد الیاف بارچپ به ترتیب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به عنوان طرح‌های بهینه معرفی شده‌اند. در حالیکه در بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در تمامی سنین، طرح حاوی ۰/۵ درصد الیاف فورتافرو به عنوان طرح بهینه معرفی شده است.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (۸)$$

در نهایت فاصله مرکب برای کلیه طرح‌های اختلاط در سنین مختلف مطابق رابطه ۶ محاسبه می‌شود. نتایج روش DBA در جداول ۲۲ تا ۲۶ ارائه شده است.

جدول ۱۶. مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۷ روز.

Table 16. Standardized values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 7 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۷ روزه	بار چپ	۰/۵	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۴۵
		۱	۱/۰۱	۰/۹۵	۰/۹۷	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۳۷	۱/۳۴
		۱	-۲/۰۹	-۲/۱۲	-۲/۱	۰/۴۵
	فورتافرو	۰/۵	-۰/۱۳	-۰/۱۵	-۰/۱۱	۰/۴۵
		۱	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۹	-۱/۳۴

جدول ۱۷. مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۷ روز.

Table 17. Standardized values for high-strength fiber-reinforced concretes at 7 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۷ روزه	بار چپ	۰/۵	-۰/۱	-۰/۰۴	-۰/۰۷	۰/۴۵
		۱	۰/۳	۰/۳	۰/۰۲۷	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	-۱/۳۲	-۱/۳۲	-۱/۳۱	۱/۳۴
		۱	-۱/۲	-۱/۲	-۱/۲	۰/۴۵
	فورتافرو	۰/۵	۰/۹۱	۰/۹	۰/۹۲	۰/۴۵
		۱	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/۳۹	-۱/۳۴

جدول ۱۸. مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۲۸ روز.

Table 18. Standardized values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 28 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۲۸ روزه	بار چپ	۰/۵	۰/۰۹	۰/۱۹	-۰/۰۷	۰/۴۵
		۱	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۲۷	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	۰/۵۱	۰/۵۳	-۱/۳۱	۱/۳۴
		۱	-۲/۱۲	-۲/۱۲	-۱/۲	۰/۴۵
	فورتافرو	۰/۵	-۰/۱۳	-۰/۱۴	۰/۹۲	۰/۴۵
		۱	۰/۵۶	۰/۵۸	۱/۳۹	-۱/۳۴

جدول ۱۹. مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۲۸ روز.

Table 19. Standardized values for high-strength fiber-reinforced concretes at 28 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۲۸ روزه	بارچپ	۰/۵	-۰/۳۹	-۰/۴۱	-۰/۱۹	۰/۴۵
		۱	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۲۲	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	-۱/۵۴	-۱/۵۶	-۱/۸۶	۱/۳۴
		۱	-۰/۵۹	-۰/۶۱	-۰/۴۸	۰/۴۵
	فورتافرو	۰/۵	۱/۲۱	۱/۱۸	۱/۰۷	۰/۴۵
		۱	۱/۲۹	۱/۲۸	۱/۲۴	-۱/۳۴

جدول ۲۰. مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۹۰ روز.

Table 20. Standardized values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 90 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۴۵
		۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۷	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	-۰/۴۷	-۰/۶۲	۰/۵۲	۱/۳۴
		۱	-۱/۹۵	-۱/۹۳	-۲/۰۹	۰/۴۵
	فورتافرو	۰/۵	۰/۵۱	۰/۴۳	-۰/۲	۰/۴۵
		۱	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۵۹	-۱/۳۴

جدول ۲۱. مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۹۰ روز.

Table 21. Standardized values for high-strength fiber-reinforced concretes at 90 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	-۰/۲۸	-۰/۲۸	-۰/۳۷	۰/۴۵
		۱	۰/۶۳	۰/۶۶	۰/۶۶	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	-۱/۷۱	-۱/۷۲	-۱/۶۶	۱/۳۴
		۱	-۰/۶۹	-۰/۷۱	-۰/۷۲	۰/۴۵
	فورتافرو	۰/۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۳	۰/۴۵
		۱	۱/۰۶	۱/۰۱	۱/۰۶	-۱/۳۴

جدول ۲۲. نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۷ روز.

Table 22. DBA method results for normal-strength fiber-reinforced concretes at 7 days.

برترین نمونه	رتبه بندی نمونه‌ها	فاصله مرکب از معیار	مجموع مجذور فاصله از معیار	درصد الیاف	نمونه	سن نمونه
پلی پروپیلن ۰/۵ درصد	۲	۱/۶۲	۲/۶۴	۰/۵	بارچپ	۷ روز
	۴	۲/۶۸	۷/۱۹	۱		
	۱	۱/۰۹	۱/۱۹	۰/۵	پلی پروپیلن	
	۶	۵/۴۱	۲۹/۲۲	۱		
	۳	۲/۱۱	۴/۴۵	۰/۵	فورتافرو	
	۵	۲/۷۴	۷/۴۹	۱		

جدول ۲۳. نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۷ روز.

Table 23. DBA method results for high-strength fiber-reinforced concretes at 7 days.

برترین نمونه	رتبه بندی نمونه‌ها	فاصله مرکب از معیار	مجموع مجذور فاصله از معیار	درصد الیاف	نمونه	سن نمونه
فورتافرو ۰/۵ درصد	۲	۲/۶۸	۷/۱۶	۰/۵	بارچپ	۷ روز
	۴	۳/۲۹	۱۰/۷۹	۱		
	۶	۴/۶۷	۲۱/۸۵	۰/۵	پلی پروپیلن	
	۵	۴/۵۷	۲۰/۹	۱		
	۱	۱/۲۱	۱/۴۸	۰/۵	فورتافرو	
	۳	۲/۶۸	۷/۱۹	۱		

جدول ۲۴. نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۲۸ روز.

Table 24. DBA method results for normal-strength fiber-reinforced concretes at 28 days.

برترین نمونه	رتبه بندی نمونه‌ها	فاصله مرکب از معیار	مجموع مجذور فاصله از معیار	درصد الیاف	نمونه	سن نمونه
فورتافرو ۰/۵ درصد	۲	۲/۰۵	۴/۲۱	۰/۵	بارچپ	۲۸ روز
	۵	۲/۹۱	۸/۴۵	۱		
	۴	۲/۷۶	۷/۶۲	۰/۵	پلی پروپیلن	
	۶	۵/۱۱	۲۶/۱۳	۱		
	۱	۱/۸۲	۳/۳۲	۰/۵	فورتافرو	
	۳	۲/۷۳	۷/۴۶	۱		

جدول ۲۵. نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۲۸ روز.

Table 25. DBA method results for high-strength fiber-reinforced concretes at 28 days..

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	مجموع مجذور فاصله از معیار	فاصله مرکب از معیار	رتبه بندی نمونه‌ها	برترین نمونه
۲۸ روزه	بارچپ	۰/۵	۸/۵۱	۲/۹۲	۳	فورتافرو ۰/۵ درصد
		۱	۱۱/۲۴	۳/۳۵	۵	
	پلی‌پروپیلن	۰/۵	۲۵/۶۸	۵/۰۷	۶	
		۱	۱۰/۸۶	۳/۳	۴	
	فورتافرو	۰/۵	۰/۸۴	۰/۹۲	۱	
		۱	۷/۱۹	۲/۶۸	۲	

جدول ۲۶. نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۹۰ روز.

Table 24. DBA method results for normal-strength fiber-reinforced concretes at 90 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	مجموع مجذور فاصله از معیار	فاصله مرکب از معیار	رتبه بندی نمونه‌ها	برترین نمونه
۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	۲/۵۵	۱/۶	۱	بارچپ ۰/۵ درصد
		۱	۷/۱۹	۲/۶۸	۴	
	پلی‌پروپیلن	۰/۵	۴/۹۶	۲/۲۳	۳	
		۱	۲۷/۳۵	۵/۲۳	۶	
	فورتافرو	۰/۵	۲/۷۱	۱/۶۵	۲	
		۱	۷/۴	۲/۷۲	۵	

جدول ۲۷. نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۹۰ روز.

Table 27. DBA method results for high-strength fiber-reinforced concretes at 90 days.

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	مجموع مجذور فاصله از معیار	فاصله مرکب از معیار	رتبه بندی نمونه‌ها	برترین نمونه
۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	۶/۳۲	۲/۵۱	۲	فورتافرو ۰/۵ درصد
		۱	۷/۶۶	۲/۷۷	۴	
	پلی‌پروپیلن	۰/۵	۲۲/۵۳	۴/۷۵	۶	
		۱	۹/۹۸	۳/۱۶	۵	
	فورتافرو	۰/۵	۰/۸	۰/۹	۱	
		۱	۷/۱۹	۲/۶۸	۳	

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش بهینه سازی طرح اختلاط بتن های مسلح به الیاف با پایه پلیمری براساس روش DBA مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر مقاومت بتن بر روی بتن های الیافی بررسی و طی آن مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه های ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته شده با الیاف فورتافروفر، بارچپ و پلی پروپیلن به میزان ۰/۵ و ۱ درصد حجمی بتن، با بتن معمولی مقایسه گردید. از نتایج این تحقیق می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

(۱) با توجه به نتایج بررسی، با افزایش مقاومت بتن به دلیل بهبود عملکرد بین خمیر سیمان و الیاف، افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی پایه پلیمری حاصل می شود.

(۲) وجود الیاف در بتن با مقاومت متوسط تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد و در بعضی موارد کاهش مقاومت فشاری گزارش شد. به طوری که در طرح شماره (۱)، نمونه های ۹۰ روزه بتن معمولی بیشترین مقاومت را کسب کرد که این اتفاق به دلیل درشت بودن سنگدانه ها در طرح شماره (۱) است. با توجه به نتایج، تأثیر الیاف بر روی افزایش مقاومت فشاری بتن با مقاومت بالا، بسیار بیشتر از بتن با مقاومت متوسط است.

(۳) همانطور که از نتایج به دست می آید، الیاف پلی پروپیلن در طرح اختلاط شماره (۱) مقاومت فشاری را تا ۱۵ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش داده است. همچنین با افزودن نیم درصد حجمی از این الیاف به بتن در هر دو طرح اختلاط، مقاومت کششی به میزان ۱۲ درصد کاهش داشته است. دلیل این اتفاق آن است که این نوع الیاف چسبندگی خوبی با بتن ندارند.

(۴) الیاف نیم درصد بارچپ در طرح شماره (۱) مقاومت اولیه را حدود ۱۰ درصد افزایش و مقاومت ۲۸ روزه و ۹۰ روزه را ۱۱ درصد کاهش داده است، ولی در طرح شماره (۲) این میزان الیاف، مقاومت ۹۰ روزه بتن را به میزان ۱۰ درصد افزایش داده است. همچنین افزودن یک درصد حجمی از این الیاف نیز همواره مقاومت ۹۰ روزه بتن را تا ۲۹ درصد افزایش داده است.

(۵) در این پژوهش بیشترین مقاومت فشاری کسب شده با میانگین ۶۰ مگاپاسکال مربوط به الیاف فورتافروفر با ۰/۵ و ۱ درصد حجمی می باشد. در مورد الیاف فورتافروفر، افزودن هر میزان از این الیاف در طرح اختلاط شماره (۱) مقاومت اولیه را حدود ۲۰ درصد افزایش و در مقاومت ۲۸ روزه و ۹۰ روزه تأثیر چندانی نداشته است. اما افزودن یک درصد حجمی از این نوع الیاف همواره مقاومت بتن الیافی را در طرح

شماره (۲) تا ۲۰ درصد افزایش داده است.

(۶) مطابق روش DBA، در بتن های الیافی با مقاومت متوسط، طرح های حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن، ۰/۵ درصد الیاف فورتافروفر و ۰/۵ درصد الیاف بارچپ به ترتیب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به عنوان طرح های بهینه معرفی شده اند. در حالیکه در بتن های الیافی با مقاومت بالا در تمامی سنین، طرح حاوی ۰/۵ درصد الیاف فورتافروفر به عنوان طرح بهینه معرفی شده است.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

f_c مقاومت فشاری بتن، MPa

f_t مقاومت کششی بتن، MPa

منابع

- [1] ACI Committee 544, State-of-the-art report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-96), American Concrete Institute, Detroit, 1996, pp. 2-3.
- [2] A. Bentur, S. Mindess, Fibre reinforced cementitious composites, CRC Press, 2014.
- [3] A.G. Nitschke, R. Winterberg, Performance of macro synthetic fiber reinforced tunnel linings, in: Proceedings of the 2016 World Tunneling Congress, 2016.
- [4] F. Hasan-Nattaj, M. Nematzadeh, The effect of Forta-Ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica, Construction and Building Materials, 137 (2017) 557-572.
- [5] K. Kobayashi, R. Cho, Flexural behaviour of polyethylene fibre reinforced concrete, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 3(1) (1981) 19-25.
- [6] P. Bhargava, U.K. Sharma, S.K. Kaushik, Compressive stress-strain behavior of small scale steel fibre reinforced high strength concrete cylinders, Journal of Advanced

doi.org/10.1680/jstbu.18.00154

- [17] 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*, 8(12) (2022) 284-307. (In Persian) doi: 10.22065/jsce.2021.254752.2277
- [18] G. Pachideh, H. Ketabdari, Investigation of the mechanical properties of self-compacting concrete containing recycled steel springs; experimental and numerical investigation, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(14) (2023) 4026-4045. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2169355>
- [19] G. Pachideh, M. Gholhaki, A. Moshtagh, Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 173(1) (2018) 3-16. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00042>
- [20] S. Ahmad, P. Bhargava, U.K. Sharma, S.K. Kaushik, High-temperature performance of fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 157 (2017) 256-266.
- [21] A.A. El-Abbasy, Tensile, flexural, impact strength, and fracture properties of UHPFRC: A comprehensive review, *Construction and Building Materials*, 408 (2023) 133621.
- [22] M. Safiuddin, S.N. Raman, M.F.M. Zain, Mechanical properties of fiber reinforced concrete: A review, *Materials Today: Proceedings*, 68 (2022) 2066-2071.
- [23] Building and Housing Research Center (BHRC), The national method for concrete mix design, BHRC Publication No. S-479, 2008. (In Persian)
- [24] ASTM C39/C39M-12, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [25] INSO 1608-3, Hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens - Test method, 1st ed., Iranian National Standardization Organization, 2015. (In Persian)
- Concrete Technology, 4(1) (2006) 109-121.
- [7] Y. Wang, S. Backer, V.C. Li, An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites, *Journal of Materials Science*, 22(12) (1987) 4281-4291.
- [8] S.J. Pantazopoulou, M. Zanganeh, Triaxial tests of fiber-reinforced concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(5) (2001) 340-348.
- [9] S.K. Kaushik, Y. Mohammadi, Investigation on mechanical properties of steel fibre reinforced concrete with mixed aspect ratio of fibres, *Journal of Ferrocement*, 33(1) (2003) 1-14.
- [10] L. Cominoli, C. Failla, G. Plizzari, Steel and synthetic fibres for enhancing concrete toughness and shrinkage behaviour, in: *Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Coventry, United Kingdom, 2007, pp. 11-13.
- [11] M.J. Hasan, M. Afroz, H.M.I. Mahmud, An experimental investigation on mechanical behavior of macro synthetic fiber reinforced concrete, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 11(3) (2011) 18-23.
- [12] A.A. Ramezaniapour, P. Rashid Dadash, Polypropylene-steel fiber reinforced concrete, *Journal of AUT*, 44 (2013) 75-83. (In Persian)
- [13] A. Conforti, F. Minelli, A. Tinini, G.A. Plizzari, Influence of polypropylene fibre reinforcement and width-to-effective depth ratio in wide-shallow beams, *Engineering Structures*, 88 (2015) 12-21.
- [14] J.O. Lerch, H.L. Bester, A.S. Van Rooyen, R. Combrinck, W.I. de Villiers, W.P. Boshoff, The effect of mixing on the performance of macro synthetic fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 103 (2018) 130-139.
- [15] F.T. Al Rikabi, S.M. Sargand, J. Kurdziel, H.H. Hussein, Experimental investigation of thin-wall synthetic fiber-reinforced concrete pipes, *ACI Structural Journal*, 115(6) (2018) 1671-1681.
- [16] G. Pachideh, M. Gholhaki, Using steel and polypropylene fibres to improve the performance of concrete sleepers, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 173(9) (2019) 690-702. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00042>

- Code, Iranian concrete code (ABA), Vol. 1: Regulations, 3rd ed., Management and Planning Organization of Iran, 2014. (In Persian)
- [31] fib (Fédération Internationale du Béton), fib model code for concrete structures 2010, Ernst & Sohn, Berlin, 2013.
- [32] R. Kumar, R.K. Garg, Optimal selection of robots by using distance based approach method, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 26(5) (2010) 500-506.
- [33] A. Widiyanto, S. Kato, N. Maruyama, Optimizing selection of appropriate power generation systems in Indonesia by using distance based approach method, Journal of Energy Resources Technology, 126(1) (2004) 63-71.
- [26] INSO 1608-2, Hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests, 1st ed., Iranian National Standardization Organization, 2015. (In Persian)
- [27] ASTM C496/C496M-11, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [28] INSO 6047, Concrete - Determination of the splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens - Test method, 1st rev., Iranian National Standardization Organization, 2016. (In Persian)
- [29] British Standards Institution, BS 1881-118: Testing concrete - Method for determination of flexural strength, BSI, London, 1983.
- [30] Permanent Committee for Revising the Iranian Concrete

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. H. Taghavi Parsa, M. Esmaili, M. R. Adlparvar, Optimization of fiber reinforced polymer concrete mix design based on DBA, Amirkabir J. Civil Eng., 58(2) (2026) 271-296.

DOI: [10.22060/ceej.2026.23472.8375](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.23472.8375)

