



The effect of hybrid fibers with various dimensions on the impact strength of concrete containing mineral additives

Ahmad Ramazani¹, Maysam Samadi^{1*}, Mohammad Fayyaz²

¹ Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

² Department of Civil Engineering, University of Imam Hussein (AS), Tehran, Iran

ABSTRACT: Improving the mechanical characteristics of concrete as the most basic material in the construction of various structures, especially its tensile, bending, and impact resistance, has long been the focus of various researchers. In this research, the effect of adding different steel fibers along with polypropylene fibers in different dimensional ratios together with commonly used mineral additives to improve the impact resistance of concrete has been investigated. The considered parameters included the percentage of polypropylene and steel fibers, the ratio of length to diameter of steel fibers (L/D), the percentage of fly ash, microsilica, and epoxy additives, and the age of the specimen. Experiments aimed at determining the impact, tensile, bending, and compressive strength of the studied concrete specimens were carried out. To determine the impact resistance, a new laboratory method was introduced and used. The results obtained from the strength of concrete samples at different ages of 7, 28, and 90 days show the significant effect of using composite fibers with optimal aspect ratio on increasing the tensile and impact resistance and to a lesser extent on the compressive and bending strength of concrete. These values have increased by 23% for tensile strength and 11% and 18% for compressive and bending strength, respectively, compared to the control sample in 28-day samples. Also, it was observed that the use of mineral additives is more effective in increasing the flexural strength of concrete than the use of fibers. A comparison of samples with L/D ratio of different steel fibers showed that fibers with a lower L/D ratio lead to greater improvement in the mechanical properties of concrete. Finally, using combined fibers with optimal L/D and mineral additives has increased the impact resistance and energy absorption by 4.97 times of the optimal concrete samples compared to the witness concrete sample.

Review History:

Received: Mar. 12, 2024

Revised: Jun. 22, 2024

Accepted: Jul. 21, 2024

Available Online: Aug. 03, 2024

Keywords:

Fiber Concrete

Impact Resistance

Mechanical Properties

Hybrid Fibers

Aspect Ratio

Mineral Additive

1- Introduction

Concrete is a brittle material that, in addition to its desirable compressive strength, to improve its tensile properties, steel rebars are used to withstand tensile forces after cracking in concrete structures. The strain of concrete in the crack is much less than the yield stress of steel bars, which causes the concrete to crack before the bars are significantly loaded. Also, one of the other applications of rebars is to limit the width of cracks in-service loads. Fibers have advantages over rebars in concrete, such as being spread uniformly in the concrete composition, the presence and reinforcement of concrete coating, the distance between fibers being less than the distance of rebars, and the performance of fibers in controlling the width of cracks can be expressed. In the issue of using composite fibers to improve the performance of concrete, several researches have been conducted, and the positive effects of the combined use of fibers to improve the performance of concrete have been reported. In concretes containing metal fibers and polypropylene, the ratio of 85% to 15% has been suggested as the optimal ratio to improve

concrete performance]]In the investigation carried out on concretes containing different mineral additives along with fibers, positive results were obtained and the triple combination of 15% by weight of air gray, 12% of microsilica and 1% of steel fibers relative to the weight of cement was suggested to improve the mechanical behavior of concrete with different strengths [2]. In the comparison of the results of the drop ball impact tests conducted with the tests of others, they provide 2 to 3 times the numbers compared to the standard criteria, which indicates the mismatch between the regulations and the test. For fiber concrete reinforced with polypropylene fibers, the impact resistance test shows a weak correlation with normal distribution, so a new method should be devised to perform the impact test [3]. By examining various articles among the above methods, the most common method is the weight drop test, according to ASTM D 1557 [4], in which a 4.54 kg weight is placed on a steel ball and falls on the concrete sample and the number of times it falls until the first crack And it is counted until the failure of the sample. One of the drawbacks of this test is the high

*Corresponding author's email: maysamsamadi@yahoo.com



dispersion of the results, which have different percentages in different articles and show a weak correlation with the normal distribution [5-6]. In the current research, the main goal is to achieve concrete with high resistance to impact loads. In this regard, in addition to introducing and using a new concrete impact loading test, the optimal length-to-diameter (L/D) ratio of steel fibers combined with polypropylene fibers in the concrete matrix containing mineral additives was obtained. Based on previous research, the mineral additives used in concrete samples included fly ash and microsilica, which were used as a partial substitute for cement [2]. To achieve the best performance, three types of steel fibers with different L/D ratios and one type of polypropylene fibers have been used to prepare the concrete mixture. The mechanical properties of concrete were obtained under static and dynamic loading conditions. The amount of cement, water-cement ratio, granulation, and volume ratio of fibers (the appropriate values of which were obtained from previous research) were kept constant in all the samples of this article, and only the L/D ratio of metal fibers was included as a variable. Also, to investigate the effect of research parameters on the process of increasing concrete strength, all tests were performed on samples aged 7, 28, and 90 days. Among the applications of this concrete can be mentioned for slabs resistant to dynamic loads including projectile impact and explosion, pavement, and even some beams and columns with special use.

2- Methodology

2- 1- Concrete mixing plan

Two groups of mixing designs were used for the tested concrete samples. The mixing plan of the first group included samples without epoxy to determine the optimal concrete mixing plan, which was prepared based on the ACI 211.4R standard. In the second group of samples, the resulting optimal mixing plan was used, and in order to determine the effect of the ratio of epoxy resin and hardener on the mechanical characteristics of concrete, samples with different ratios of these two materials were made.

2- 2- Experiments

Concrete static tests including compressive strength tests were performed according to B.S. 1881.16 standard, for this purpose, $10 \times 10 \times 10$ cubic samples processed under standard conditions at different ages were made and tested. Tensile strength test based on ASTM C496 standard. On samples with a height of 20 cm and a diameter of 10 cm, which were brought under standard conditions, and ASTM C1018 standard was also used to measure the flexural strength of fiber concrete. Samples with dimensions of $50 \times 10 \times 10$ cm were placed under concentrated load at two points in the middle third of the distance between the supports, and the loading continued until the sample broke, and the flexural breaking capacity of each sample was obtained.

Among the methods of testing the impact resistance of fiber concrete, the most common method is the weight drop test, according to ASTM D 1557 [4], in which a 4.54 kg weight from a height of 457.2 mm is placed on a steel

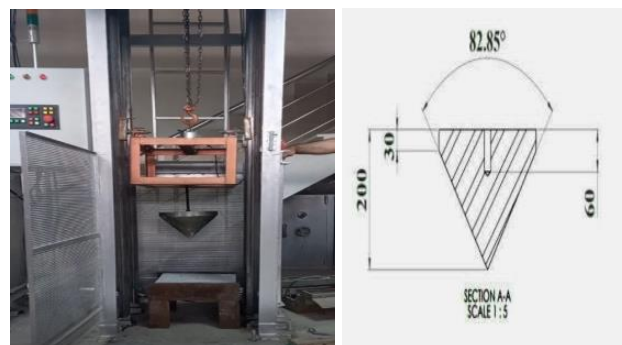


Fig. 1. How to place concrete samples in the introduced impact test system

ball placed on a concrete sample. it falls, and the number of times it falls, and the total energy input until the first crack and until the failure of the sample are counted and calculated. One of the drawbacks of this test is the high dispersion and poor correlation of the results with the normal distribution [5-6]. Another drawback of this test is the dependence of the results on individual judgment regarding the initiation of cracking and the final destruction of concrete. Other disadvantages of this test include the need for a large number of hits and the lack of concentration of the impact point and the time-consuming test, the impactor's spherical shape and lightweight, the small dimensions of the samples, and not considering the support conditions. But perhaps the most important form of this test is the filling under the concrete sample and the complete reliance of its bottom on a sheet that absorbs most of the incoming energy. Considering the above defects in the conventional impact test, in this research, instead of a concrete sample resting on the floor, a concrete slab with linear support on the two opposite edges, which was empty underneath, was used. The test was carried out on concrete slab samples with dimensions of $10 \times 40 \times 40$ cm, which are rigidly restrained in the supports on the two facing edges, and the edges of the slab are free on the other two sides. To test the impact resistance of the concrete slab sample, a new device based on the fall of a heavy cone-shaped weight was used. In this test, the metal ball on the concrete sample was removed and a conical impactor weighing 57 kg made of steel was used along with a chassis weighing 80 kg in order not to deviate the impactor from a free fall elevator with a load capacity of 120 kg and height The height is 7.5 meters, the impactor moves in the straight path of the rail and has the ability to release at different heights and create different energies. The purpose of introducing this new test system with a conical impactor is to create a concentrated and point load in the center of the slab. The reduction in the number of blows was due to the creation of adjustable energy and finally the creation of more obvious ruptures due to the dimensions and support conditions of the slab.

3- Results and discussion

The results of averaging the compressive strength of three cubic samples made for each mixing plan at the age of 7, 28, and 90 days in comparison of the control concrete with the concrete containing micro-silica mineral additive and fly ash in the 7, 28, and 90-day test show an increase of 2,11,18% respectively. It is a percentage of compressive strength compared to the control sample.

The results of the average tensile strength indicates that the best tensile strength results are obtained from metal fibers with the lowest ratio of length to diameter. The results obtained from the average tensile strength of cylinder samples that mineral additives at the ages of 7, 28, and 90 days have caused an increase of 9, 12, and 9% respectively in the tensile strength of concrete. Also, the optimal combination of metallic composite fibers with mineral additives in the best sample has led to an increase in tensile strength of 23, 29, and 23% respectively at the ages of 7, 28, and 90 days compared to the control samples. Also, the optimal combination of metallic composite fibers with mineral additives in the best sample has led to an increase in tensile strength of 23, 29, and 23% respectively at the ages of 7, 28, and 90 days compared to the control samples.

The flexural strength of concrete samples with the presence of mineral additives alone at the ages of 7, 28, and 90 days has increased by 4, 18, and 37%, respectively, compared to normal concrete. Also, the bending strength in the presence of composite fibers with mineral additives has increased compared to the samples that are 5, 18, and 44 respectively. These results all confirm the insignificant effect of fibers compared to mineral additives at different ages. It can be concluded that mineral additives have the main effect in improving the bonds between different components of the concrete matrix compared to fibers. The presence of mineral additives due to their micrometer size as well as the adhesion and filling properties of such materials occupy the very small holes in the matrix, which is a weak point in ordinary concrete, and cause the integration of the concrete matrix and ultimately improve the bending strength.

In the examination of the results obtained by adding epoxy in different proportions on the compressive, tensile, and bending strengths of the 28-day samples, 16, 42 and 47%, respectively, are observed in the strengths compared to the optimal samples. These results show that the decrease in bending strength increases with the increase in the ratio of hardener to resin.

One of the main goals of this research, besides examining the mechanical properties in static conditions, was to study its behavior against dynamic loading with low strain rates. Using the new test system, the test was performed on the samples made with different mixing designs. The total potential energy of weight falls on each sample until crack formation in the slab sample is calculated. Three samples of slabs with the characteristics of the reference concrete were tested to determine the critical height of cracking by trial and error, and in other slabs, the weight was dropped from the critical height, and the subsequent falls were made from

higher heights with increments of 50 millimeters until the first sign of failure appeared. The slab continued and finally, the total potential energy of the weights until the occurrence of cracks was calculated according to equation 1 [7].

$$E = \sum mgh \quad (1)$$

The presented results show the very impressive effect of using fibers and mineral additives on the impact resistance of concrete slabs. In the meantime, it seems that the fibers have increased the cohesion and tensile strength, and energy absorption of concrete against dynamic loads, and mineral additives have been able to help increase the energy absorption capacity of concrete by creating better adhesion and integrity of the concrete matrix, and in general, the simultaneous use of fibers with additives Minerals cause much greater impact resistance of concrete samples against dynamic loads. It should be noted that in comparison of the used metal fibers, the metal fibers with a smaller length to diameter were more effective in absorbing energy.

4- Conclusions

The used composite fibers and mineral additives both have a positive effect on increasing the compressive, tensile, and impact strength in all ages of concrete, and the small amount of their positive effect was investigated in different parts of the article; But in increasing the bending strength, mineral additives were much more effective than the used composite fibers. The increase in flexural strength of concrete containing mineral additives at the age of 90 days compared to the control sample was about 37%, and the addition of fibers to this concrete could only increase this increase to 44%, which indicates that it is less effective than mineral additives.

The triple static compressive, tensile, and bending resistances are completely dependent on the ratio of length to diameter of steel fibers. In fibers with different lengths and the same diameter, fibers with shorter lengths are more effective, and compared to fibers with equal lengths and different diameters, fibers with larger diameters improve resistance. Being more effective, therefore, according to the defined fraction of the length to the diameter of the fibers, the fibers with the lowest aspect ratio (L/D) lead to the greatest increase in triple resistances.

In slabs under dynamic impact load, the use of fibers by increasing the tensile strength and limiting the crack width and the use of mineral additives by increasing the adhesion and filling of the concrete matrix led to an increase in the impact energy absorption capacity; Therefore, the simultaneous use of composite fibers and mineral additives causes a significant increase in the impact resistance of concrete slabs against dynamic impact loads.

References

- [1] Afroughsabet, V, & Ozbakkaloglu, T, Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers, *Construction and building*

- materials, 94 (2015)73-82.Author, A., 1986. Book Name. Publisher Name, Address.
- [2] Kumar, M. H., Saikrishnamacharyulu, I., Mohanta, N. R., Ashutosh, A., Mishra, P., & Samantaray, S, Mechanical behaviour of high strength concrete modified with triple blend of fly ash, silica fume and steel fibers, *Materials Today: Proceedings*, 65 (2022) 933
- [3] Badr.A, Ashour.AF, Platten.A., Statistical Variations in Impact Resistance of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete, *International Journal of Impact Engineering* 32, (2006), 1907–1920.
- [4] ASTM D 1557, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort.
- [5] Badr.A, Ashour.AF, Platten.A., Statistical Variations in Impact Resistance of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete, *International Journal of Impact Engineering* 32, (2006), 1907–1920.
- [6] ACI 544-2R. Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete; American Concrete Institute: Indianapolis, IN, USA, 1999
- [7] British Standards Institute, Testing Sprayed Concrete: Determination of Energy Absorption Capacity of Fiber Reinforced Slab Specimens, BSI Standards, SN: BS EN 14488-5:2006. ISBN:0580482.



تأثیر الیاف ترکیبی با نسبت ابعادی مختلف بر مقاومت ضربه ای بتن پرمقاومت حاوی افزودنی های معدنی

احمد رضانی^۱، میثم صمدی^{۱*}، محمد فیاض^۲

۱- گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۲- گروه عمران، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳

کلمات کلیدی:

بتن الیافی

مقاومت ضربه ای

خواص مکانیکی

الیاف ترکیبی

نسبت ابعادی الیاف

افزودنی معدنی

خلاصه: بهبود مشخصات مکانیکی بتن به عنوان پایه‌ای‌ترین ماده در ساخت سازه‌های مختلف، به‌ویژه مقاومت کششی، خمشی و ضربه‌ای آن از دیرباز موردتوجه پژوهشگران مختلف بوده است. در این تحقیق به بررسی اثر افزودن الیاف فولادی در نسبت ابعادی مختلف به همراه الیاف پلی‌پروپیلن با افزودنی‌های معدنی پر کاربرد به‌منظور بهبود مقاومت ضربه‌ای بتن پرداخته شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده شامل درصد الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی، نسبت طول به قطر الیاف فولادی (L/D)، درصد افزودنی‌های خاکستر بادی، میکروسیلیس و اپوکسی، در سنین مختلف نمونه‌ها بوده است. آزمایش‌هایی باهدف تعیین مقاومت ضربه‌ای، کششی، خمشی و فشاری روی نمونه‌های بتنی تحقیق انجام شد. برای تعیین مقاومت ضربه‌ای، روش آزمایشگاهی نوینی معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های بتن در سنین مختلف ۲۸، ۹۰ روزه، بیانگر تأثیر چشمگیر استفاده از الیاف ترکیبی با نسبت ابعادی بهینه بر افزایش مقاومت کششی و ضربه‌ای و تا حدودی ضعیف‌تر بر مقاومت فشاری و خمشی بتن است که این مقادیر در نمونه‌های ۲۸ روزه برای مقاومت کششی ۲۳ درصد و مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب ۱۱ و ۱۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده‌اند. همچنین تأثیرگذاری بیشتر استفاده از افزودنی‌های معدنی بر افزایش مقاومت خمشی بتن نسبت به استفاده از الیاف مشاهده گردید. مقایسه نمونه‌ها با نسبت L/D الیاف فولادی مختلف نشان داد که الیاف با نسبت L/D کمتر به بهبود بیشتری در مشخصات مکانیکی بتن منجر می‌شوند. نهایتاً استفاده از الیاف ترکیبی با L/D بهینه و افزودنی‌های معدنی باعث افزایش مقاومت ضربه‌ای جذب انرژی ۴/۹۷ برابر برای نمونه‌های بتنی بهینه نسبت به نمونه بتن شاهد گردیده است.

۱- مقدمه

می‌توان نام برد. الیاف با توانایی بالایی ترک‌خوردگی را در بتن کنترل می‌کند و مقاومت بتن در برابر خستگی، ضربه و انقباض یا تنش حرارتی را افزایش می‌دهد. الیاف به‌صورت ریز الیاف و درشت الیاف بر اساس قطر و طولشان دسته‌بندی می‌شوند. بتن‌های حاوی الیاف ترکیبی به بتن‌های الیافی که در آن‌ها به‌صورت هم‌زمان از چند نوع الیاف استفاده می‌شود، اطلاق می‌گردد. می‌توان با استفاده از الیاف درشت و ریز و یا جنس‌های متفاوت الیاف، از مزایای بهینه این الیاف بهره برد. به طور مثال می‌توان با استفاده از الیاف ریز جهت کنترل ریزترک‌ها و الیاف درشت جهت کنترل درشت‌ترک‌ها به‌منظور بهبود عملکرد بتن‌های الیافی استفاده برد. بیش از ۳۰۰۰ سال پیش از الیاف طبیعی برای مصالح شکننده مانند خشت استفاده می‌شد اولین مطالعه علمی در مورد استفاده از الیاف فولادی در بتن به دهه ۱۹۶۰ باز می‌گردد [۱-۲]. از آن زمان تاکنون مطالعات متعددی در خصوص ارزیابی بتن‌های الیافی صورت پذیرفته است. بررسی‌های مختلفی در خصوص تأثیر مثبت الیاف بر

بتن ماده‌ای ترد است که عموماً در کنار مقاومت فشاری مطلوب آن برای بهبود مشخصه کششی آن از میلگردهای فولادی برای تحمل نیروهای کششی بعد از ایجاد ترک در سازه‌های بتنی استفاده می‌شود. کرنش کششی بتن در ترک، بسیار کمتر از کرنش تسلیم میلگردهای فولادی است که این امر مسبب ترک‌خوردن بتن قبل از بارگذاری قابل توجه به میلگردها می‌گردد. همچنین از کاربردهای دیگر میلگردها محدود کردن عرض ترک‌ها در بارهای سرویس است. الیاف‌ها نسبت به میلگردها در بتن دارای مزیت‌هایی هستند که از آن جمله می‌توان پخش به‌صورت یکنواخت در ترکیب بتن، حضور و تسلیح پوشش بتنی روی آرماتور، کمتر بودن فاصله بین الیاف نسبت به فاصله میلگردها، توانایی و عملکرد مؤثر الیاف در کنترل عرض ترک‌ها را

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: maysamsamadi@yahoo.com



مشخصات استاتیکی بتن در انواع مختلف الیاف با میزان درصد متفاوت و اشکال هندسی مختلف صورت پذیرفته است که به اثرگذاری مثبت الیاف در مقاومت کششی و خمشی بتن و به مقدار کمتر بر مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف اشاره شده است [۳]. در خصوص تأثیر استفاده از الیاف در بتن‌های تحت بارگذاری دینامیکی با نرخ‌های کرنش مختلف عوامل مؤثری همچون مقدار الیاف، خواص الیاف و نسبت طولی بر رفتار بتن تحت بار دینامیکی در کنترل ترک‌ها، شکل‌پذیری و پوسته‌پوسته شدن اثرگذار گزارش شده‌اند. [۱۱-۴] در موضوع استفاده از الیاف ترکیبی جهت بهبود عملکرد بتن تحقیقات متعددی صورت پذیرفته است که تأثیرات مثبت استفاده ترکیبی از الیاف در جهت بهبود عملکرد بتن گزارش شده است. در بتن‌های شامل الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن، نسبت ۸۵ به ۱۵ درصد به‌عنوان نسبت بهینه جهت بهبود عملکرد بتن پیشنهاد گردیده است [۱۲-۱۵]. میزان حجمی الیاف فلزی در نسبت‌های مختلف در بارگذاری دینامیکی و استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان یک درصد به‌عنوان درصد بهینه به‌منظور بهبود عملکرد بتن و جلوگیری از شکست شکننده پیشنهاد گردیده است [۱۶]. در بررسی صورت‌گرفته بر روی بتن‌های حاوی افزودنی‌های معدنی مختلف به همراه الیاف، نتایج مثبتی حاصل گردیده و ترکیب سه‌گانه ۱۵ درصد وزنی خاکستری بادی، ۱۲ درصد میکروسلیس و یک درصد الیاف فولادی نسبت به وزن سیمان جهت بهبود رفتار مکانیکی بتن با مقاومت‌های مختلف، پیشنهاد گردیده است [۱۷]. در بتن‌های پلیمری با استفاده از پلیمرهایی مانند رزین اپوکسی به‌عنوان جایگزین سیمان می‌توان خواص مکانیکی بتن را نسبت به بتن معمولی بهبود بخشید. مقاومت بتن‌های پلیمری تابع میزان رزین بوده که با افزایش میزان رزین مقاومت‌های کششی و خمشی بتن افزایش پیدا می‌کند [۱۸-۲۱]. به منظور بررسی آثار کاربرد الیاف در مقاومت‌های کششی، خمشی و ضربه‌ای نمونه‌های بتنی و همچنین بررسی رفتار نمونه‌های بتنی در مقابل پرتابه‌ها با سرعت کم و زیاد با انجام آزمایش سقوط آزاد و بروز اولین ترک در آزمایش سقوط وزنه نتایج حاصل بیانگر اثر مثبت کاربرد الیاف در افزایش مقاومت نمونه‌های بتنی است در این بررسی‌ها توجه به نسبت ابعادی الیاف نگردیده است [۲۲-۲۴]. به‌منظور ساخت بتنی اقتصادی مقاوم به ضربه و نفوذ، از ترکیب خاکستر پوسته برنج و تراشه فولادی استفاده شده است. خاکستر پوسته برنج، غنی از سیلیس و ارزان‌قیمت بوده و سیلیس موجود در خاکستر پوسته برنج نقش مهمی در افزایش مقاومت فشاری بتن دارد. همچنین جهت تقویت مقاومت کششی بتن، از تراشه‌های فولادی که ارزان بوده و از ضایعات تراشکاری به دست می‌آید استفاده شده است. آزمایش

نفوذ پرتابه صلب به کمک تفنگ گازی بر روی نمونه‌های بتنی انجام پذیرفته است که با جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با خاکستر پوسته برنج و اضافه کردن ۱ درصد تراشه فولادی نسبت به نمونه بتنی بدون تراشه و خاکستر، حداکثر ۱۷ درصد کاهش عمق نفوذ قابل‌دستیابی است [۲۵]. در بررسی مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های ضربه‌ای گوی افتان انجام شده با آزمایش‌های دیگران اعدادی ۲ تا ۳ برابر را نسبت به معیارهایی استاندارد ارائه می‌دهند که این نشانگر عدم تطابق آیین‌نامه و آزمایش است. برای بتن الیافی مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن، آزمایش مقاومت در برابر ضربه، همبستگی ضعیفی را با توزیع نرمال نشان می‌دهد، به همین جهت باید روش جدیدی برای انجام آزمایش ضربه ابداع شود [۲۶]. آزمایش‌های مورد استفاده در تحقیقات جهت تعیین مقاومت ضربه‌ای بتن عبارت‌اند از آزمایش سقوط وزنه، پاندول شارپی، آزمایش با نرخ کرنش ثابت، پرتابه، انفجار، پاندول ابزارگذاری شده، آزمایش میله هاپکینسون که توسط کمیته ACI 544-2R پیشنهاد شده‌اند [۲۷]. با بررسی مقالات مختلف از میان روش‌های فوق، مرسوم‌ترین روش، آزمایش سقوط وزنه است که مطابق ASTM D 1557 [۲۸] در آن یک وزنه ۴/۵۴ کیلوگرمی روی یک گوی فولادی قرار گرفته بر روی نمونه بتنی سقوط می‌کند و تعداد دفعات سقوط تا اولین ترک و تا شکست نمونه شمارش می‌گردد. یکی از اشکالات این آزمایش، پراکندگی بالای نتایج است که در مقالات مختلف درصد‌های مختلفی دارند و همبستگی ضعیفی را با توزیع نرمال نشان می‌دهد [۲۶-۲۷]. اشکال دیگر این آزمایش وابستگی نتایج به قضاوت فردی از شروع ترک و تکمیل تخریب بتن است. در این تحقیق، برای آزمایش مقاومت به ضربه نمونه دال بتنی فاقد میلگرد، از دستگاهی که مبتنی بر سقوط وزنه سنگین مخروطی شکل است، استفاده گردید

در پژوهش حاضر، هدف اصلی دستیابی به بتن با مقاومت بالا در برابر بارهای ضربه‌ای است. در این راستا علاوه بر معرفی و استفاده از آزمایش جدید بارگذاری ضربه‌ای بتن، نسبت طول به قطر (L/D) بهینه الیاف فولادی ترکیب شده با الیاف پلی‌پروپیلن در ماتریس بتن حاوی افزودنی‌های معدنی به دست آمد. بر مبنای تحقیقات پیشین افزودنی‌های معدنی مورد استفاده در نمونه‌های بتنی شامل خاکستر بادی و میکروسلیس بودند که به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان به کار رفتند [۱۷]. به‌منظور رسیدن به بهترین عملکرد، از سه نوع الیاف فولادی با نسبت‌های مختلف L/D و یک نوع الیاف پلی‌پروپیلن برای تهیه مخلوط بتن استفاده شده است. ویژگی‌های مکانیکی بتن تحت شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی به دست آمد. مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، دانه‌بندی و نسبت حجمی الیاف (که

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی سنگدانه

Table 2. Physical properties of aggregate

اندازه	نام
۲۴۲۹	چگالی درشت دانه Kg/m^3
۲۵۸۰	چگالی ریزدانه Kg/m^3
٪۰/۰۰۸	درصد جذب آب ریزدانه
۰/۰۴	درصد جذب آب درشت
٪۲/۸	مدول نرمی
۰/۸۰	SE ریزدانه

مقادیر مناسب آن‌ها از تحقیقات پیشین به دست آمده بود) در تمامی نمونه‌های این مقاله ثابت نگه داشته شده و فقط نسبت L/D الیاف فلزی به عنوان متغیر لحاظ شد. همچنین برای بررسی تأثیر پارامترهای تحقیق بر روند افزایش مقاومت بتن، کلیه آزمایش‌ها روی نمونه‌هایی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. از جمله کاربرد این بتن برای دال‌های مقاوم به بارهای دینامیکی شامل برخورد پرتابه و انفجار، روسازی و حتی بعضی از تیر و ستون‌ها با کاربری خاص را می‌توان نام برد.

۲- مصالح

۲-۱- سیمان

در تمامی نمونه‌ها از سیمان تیپ ۲ پرتلند با مشخصات فیزیکی و شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد.

۲-۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق شامل درشت‌دانه با ظاهری شکسته و نسبتاً گرد گوشه با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر و رد شده از الک سه‌چهارم اینچ و ماسه مصرفی دوبر شستشو با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر و رد شده از الک نمره ۴ است. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه در جدول شماره ۲ و منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ برای درشت‌دانه و ریزدانه مطابق استاندارد ملی ۳۰۲ آورده شده است.

۲-۳- آب

در ساخت مخلوط بتن از آب شرب شهر تهران استفاده گردیده است.

۲-۴- فوق روان کننده

در این تحقیق از فوق روان کننده پلی کربکسیلات با قابلیت فقط کارایی بتن با نام تجاری MEGAMIX AX 1000 شرکت فرآیندکاران شیمی پارس مطابق با استانداردهای ASTM C494:TYPE G- EN934-2 و ISIRT 2930-2 استفاده شد و در جدول ۳ ویژگی‌های فنی محصول آورده شده است.

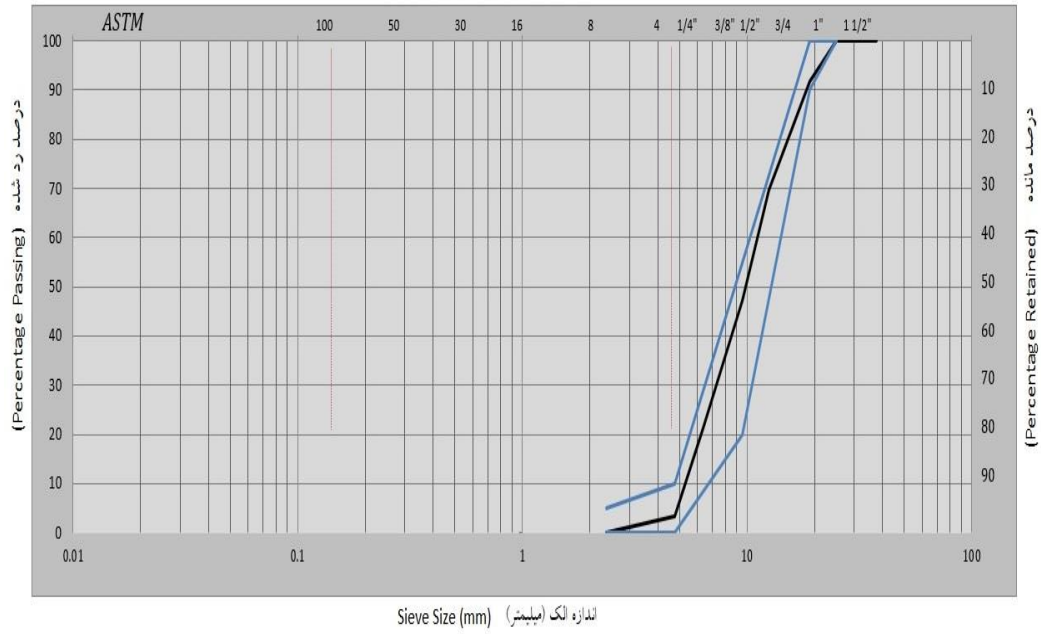
۲-۵- خاکستر بادی

خاکستر بادی مورد استفاده در این تحقیق از نوع کلاس F و مطابق استاندارد ASTM-618-CLASS F و ASTM C494-TYPE G و نتایج شرکت صنایع فروآلباژ ایران تهیه گردیده‌اند. خصوصیات فیزیکی و نتایج

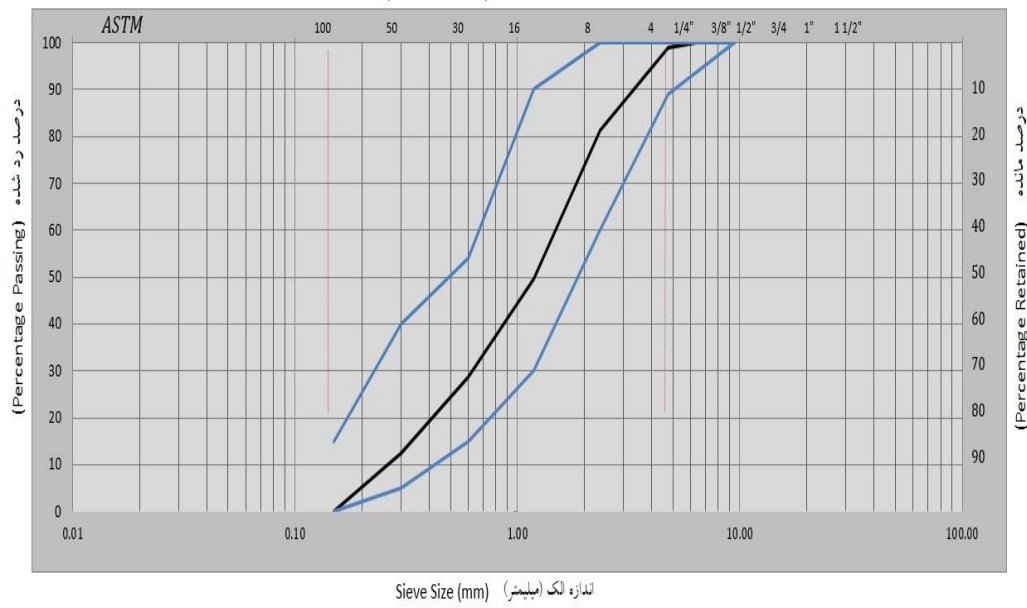
جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان

Table 1. Physical and chemical properties of cement

اندازه	نام
٪۲۱/۳	SiO_2
٪۴/۸	Al_2O_3
٪۳/۵۵	Fe_2O_3
٪۳/۹	MgO
٪۰/۱۸	Na_2O
٪۰/۵۱	K_2O
٪۶۲/۸	CaO
٪۵۵	C_3S
٪۲۲	C_2S
٪۱۰	C_4AF
۳۱۵۰	چگالی Kg/m^3
۳۰۰	سطح مخصوص Kg/m^2



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف: منحنی درشت دانه، ب: منحنی ریزدانه

Fig. 1. a. Coarse grain curve. b. Fine grain curve

جدول ۳. مشخصات فوق روان کننده

Table 3. Physical properties of aggregate

اندازه	نام
۱۱۰۰	جرم مخصوص Kg/m^3
$\leq 2\%$	درصد هوازایی
7 ± 1	PH

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی خاکستر بادی

Table 4. Physical properties of fly ash

اندازه	نام
۲۴۲۹	چگالی درشت دانه Kg/m^3
۲۵۸۰	چگالی ریزدانه Kg/m^3
0.008	درصد جذب آب ریزدانه
0.04	درصد جذب آب درشت
$2/8$	مدول نرمی
0.80	SE ریزدانه

تجزیه شیمیایی محصول خاکستر بادی استفاده شده در جداول ۴ و ۵ آمده است.

۲-۶- میکروسلیس

میکروسلیس مورد استفاده در این پژوهش شرکت فرو آلیاژ ایران شهرستان ازنا با استاندارد ASTM C1240- EN 13263 انطباق دارد که خواص فیزیکی و نتایج تجزیه شیمیایی آن در جداول ۶ و ۷ آورده شده است.

۲-۷- الیاف

الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت فراتاو در چهار نوع که همگی از نوع قلابدار بودند که در شکل ۲ و جدول ۸ تصویر و ویژگی‌های

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی خاکستر بادی

Table 5. Chemical composition of fly ash

اندازه	نام
88.5	SiO_2
4.2	Al_2O_3
1.6	Fe_2O_3
0.18	MgO
0.08	Na_2O
0.51	K_2O
1.82	CaO
0.02	SO_3
0.04	TiO_2

جدول ۶. خصوصیات فیزیکی میکروسلیس

Table 6. Physical properties of microsilica

اندازه	نام
۳۱۰	چگالی Kg/m^3
< 1	اندازه ذرات (میکرون)
۸-۹	PH
۱۵	سطح ویژه (mm^2/g)

فیزیکی آن‌ها آورده شده است. همچنین مشخصات الیاف پلی پروپیلین مورد استفاده با طول ۱۲ میلی متر در جدول ۸ آورده شده است.

۲-۸- اپوکسی

اپوکسی مورد استفاده در این پژوهش از نوع دوجزئی شامل رزین با سخت کننده HE 1515 PL/2025 هستند، ویسکوزیته و چسبانندگی اپوکسی در دمای ۲۵ درجه پس از ترکیب و همچنین خصوصیات فیزیکی در جدول ۹ آورده شده است.



شکل ۲. اشکال مختلف الیاف فولادی و پلی پروپیلن

Fig. 2. Different forms of steel and polypropylene fibers

در جدول ۱۰ ارائه شده است. در گروه دوم نمونه‌ها از طرح اختلاط بهینه حاصل استفاده شد و باهدف تعیین تأثیر نسبت رزین اپوکسی و سخت‌کننده بر مشخصات مکانیکی بتن، نمونه‌های با نسبت‌های مختلف این دو ماده ساخته شدند.

در نمونه‌های بتنی گروه اول از شش طرح اختلاط شامل نمونه شاهد، نمونه حاوی افزودنی معدنی بدون الیاف و چهار نمونه حاوی الیاف فولادی مختلف به همراه الیاف پلی‌پروپیلن در بتن‌های حاوی افزودنی معدنی استفاده شد. بتن حاوی افزودنی معدنی بدون الیاف اختصاراً با F.S، بتن حاوی افزودنی معدنی و ۱٪ الیاف فولادی نسبت ابعادی ۶۳ با A.C، بتن حاوی افزودنی معدنی با الیاف فولادی نسبت ابعادی ۶۳ و الیاف پلی‌پروپیلن A.I.C، بتن حاوی افزودنی معدنی با الیاف فولادی نسبت ابعادی ۴۴ به همراه الیاف پلی‌پروپیلن A.2.C و بتن حاوی افزودنی معدنی با الیاف نسبت ابعادی ۸۸ همراه الیاف پلی‌پروپیلن C.A.3 نام‌گذاری شده‌اند. بر مبنای تحقیقات پیشین میزان افزودنی‌های معدنی و درصد الیاف به‌صورت بهینه ۱۵درصد خاکستر بادی، ۱۲درصد سیلیس و یک درصد الیاف فلزی از میزان کل سیمان مصرفی تعیین گردید [۱۷]. در واکنش پوزولانی افزودنی معدنی، سیلیس به‌عنوان جز اصلی یک پوزولان با هیدروکلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیلیکات کلسیم واکنش داده که فعل انفعال اصلی به‌صورت رابطه ۱ است:

۲-۹- طرح اختلاط

دو گروه طرح اختلاط برای نمونه‌های بتنی مورد آزمایش استفاده شدند. طرح اختلاط گروه اول شامل نمونه‌های بدون اپوکسی برای تعیین طرح اختلاط بتن بهینه بود که بر اساس استاندارد ACI 211.4R تهیه شد و

جدول ۷. ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس

Table 7. Chemical composition of microsilica

اندازه	نام
٪۹۰	SiO ₂
٪۰/۶	Al ₂ O ₃
٪۱/۲	Fe ₂ O ₃
٪۰/۶	MgO
٪۰/۳	Na ₂ O
٪۰/۴	K ₂ O
٪۰/۵	CaO
٪۰/۸	C
٪۰/۰۴	S
٪۱/۵	L.O.I

جدول ۸. ویژگی های الیاف فلزی و پروپیلن

Table 8. Characteristics of metal fibers and propylene

نوع الیاف	شکل الیاف	طول الیاف (mm)	قطر الیاف (mm)	L/D	مدول الاستیسته (Gpa)	مقاومت کششی (Gpa)
فلزی ۱	قلابدار	۵۰	۰/۸	۶۳	۲۰۰	۱۱۰۰
فلزی ۲	قلابدار	۳۵	۰/۸	۴۴	۲۰۰	۱۱۰۰
فلزی ۳	قلابدار	۳۵	۰/۴	۸۸	۲۰۰	۱۱۰۰
پروپیلن	سراسر	۱۲	۰/۰۳۵	۳۴۲	۳،۵	۳۵۰

جدول ۹. خصوصیات فیزیکی اپوکسی

Table 9. Physical properties of epoxy

نام	اندازه
چگالی Kg/m ³	۱۱۰۰
جنس	مایع
رنگ	شفاف
چسبانندگی	Cp440

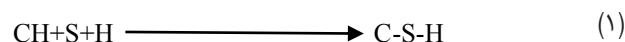
خمیر کاهش می‌یابد و در نتیجه مقاومت و دوام بیشتر بتن را نسبت به بتن بدون افزودنی معدنی را ایجاد می‌کند [۲۹] از طرفی ترکیب الیاف در یک درصد مزبور به صورت ترکیبی ۸۵٪ از الیاف فلزی و ۱۵٪ از یک درصد، الیاف پروپیلن انتخاب گردید [۱۲].

پس از تعیین نتایج آزمایش مجموعه نمونه‌های با طرح اختلاط اول، به منظور بهبود مشخصات مکانیکی بتن سعی گردید اثر کاربرد اپوکسی به عنوان جایگزین سیمان در کنار میکروسیلیس و خاکستر بادی در این اختلاط نیز بررسی گردد؛ لذا در بتن منتخب گروه اول، در سه تناسب ۲۵-۷۵، ۸۰-۲۰ و ۸۵-۱۵ (به ترتیب برای نسبت رزین و سخت‌کننده) نمونه‌هایی ساخته شد. مقدار کل اپوکسی مورد استفاده در نمونه‌ها بر مبنای ۰/۲ درصد کل وزن سیمان معادل ۱ لیتر بر مترمکعب بتن بوده است. طرح اختلاط نمونه‌های گروه دوم (حاوی اپوکسی) در جدول ۱۱ ارائه شده است.

۳- آزمایش‌ها

۳-۱- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد B.S.1881.16 [۳۰] انجام شد که بدین منظور نمونه‌های مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند.



در هنگام استفاده از خاکستریادی به عنوان جایگزین ترکیب C-S-H با این ترکیب در هیدراتاسیون سیمان تفاوتی ندارد. از آنجایی که واکنش پوزولانی سبب افزایش حجم جامد می‌شود با حضور افزودنی معدنی تخلخل

جدول ۱۰. طرح اختلاط بتن بدون اپوکسی بر اساس ACI211.4R

Table 10. Mixing scheme for epoxy-free concrete based on ACI211.4R

A.3.C	A.2.C	A.1.C	A.C	S.F	N.C	نوع اختلاط
۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	۵۰۰	سیمان (kg)
۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	شن (kg)
۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	ماسه (kg)
۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	آب (L)
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۰	میکروسلیس (kg)
۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۰	خاکستر بادی (kg)
۴۲/۵	۴۲/۵	۴۲/۵	۵۰	۰	۰	الیاف فلزی (kg)
۷/۵	۷/۵	۷/۵	۰	۰	۰	الیاف پروپیلن (kg)
۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	روان کننده (L)
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	نسبت w/c
۳۵	۳۰	۲۵	۲۲	۳۵	۴۰	اسلامپ (mm)
۸۸	۴۴	۶۳	۶۳	۰	۰	L/D الیاف فولادی
۳۴۲	۳۴۲	۳۴۲	۳۴۲	۰	۰	L/D الیاف پلی پروپیلن

نحوه قرارگیری یکی از نمونه‌ها در این آزمایش در شکل ۳ الف آمده است.

C1018 استفاده شد. [۳۲] نمونه‌هایی در ابعاد $10 \times 10 \times 50$ سانتی متر که در شرایط استاندارد عمل آوری شده و در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها مطابق شکل ۳ ج در دو نقطه در یک سوم میانی فاصله بین تکیه‌گاه‌ها، تحت بار متمرکز قرار گرفتند و بارگذاری تا زمان گسیختگی نمونه ادامه پیدا کرد و ظرفیت گسیختگی خمشی هر نمونه بدست آمد.

۳-۲- آزمایش تعیین مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی براساس استاندارد ASTM C496 [۳۱] بر روی نمونه‌هایی با ارتفاع ۲۰ سانتی متر و قطر ۱۰ سانتی متر که در شرایط استاندارد عمل آورده شدند و در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. نحوه قرارگیری نمونه در این آزمایش در شکل ۳ ب نمایش داده شده است.

۳-۴- آزمایش تعیین مقاومت ضربه ای

از میان روش‌های آزمایش مقاومت بتن الیافی در برابر ضربه، مرسوم ترین روش، آزمایش سقوط وزنه است که مطابق ASTM D 1557 [۲۸] در آن یک وزنه $4/54$ کیلوگرمی از ارتفاع $457/2$ میلیمتری روی یک گوی

۳-۳- آزمایش تعیین مقاومت خمشی

برای اندازه گیری مقاومت خمشی بتن الیافی از استاندارد ASTM

جدول ۱۱. طرح اختلاط بتن بهینه با اپوکسی

Table 11. Optimum concrete mixing scheme with epoxy

A.2.C.E3	A.2.C.E2	A.2.C.E1	A.2.C	نوع اختلاط
۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	سیمان (kg)
۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	شن (kg)
۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	ماسه (kg)
۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	آب (L)
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	میکروسلیس (kg)
۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	خاکستر بادی (kg)
۴۲/۵	۴۲/۵	۴۲/۵	۴۲/۵	الیاف فلزی (kg)
۷/۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵	الیاف پروپیلن (kg)
۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	روان کننده (L)
۰/۷۵	۰/۸	۰/۸۵	۰	اپوکسی (L)
۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۵	۰	سخت کننده (L)
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	نسبت w/c
۲۵	۲۲	۳۵	۳۰	اسلامپ (mm)
۴۴	۴۴	۴۴	۴۴	L/D الیاف فولادی
۳۴۲	۳۴۲	۳۴۲	۳۴۲	L/D الیاف پلی پروپیلن

را برشمرد. اما شاید مهمترین اشکال این آزمایش، پر بودن زیر نمونه بتنی و اتکای کامل کف آن روی یک ورق باشد که بخش عمده انرژی وارده را جذب می‌کند.

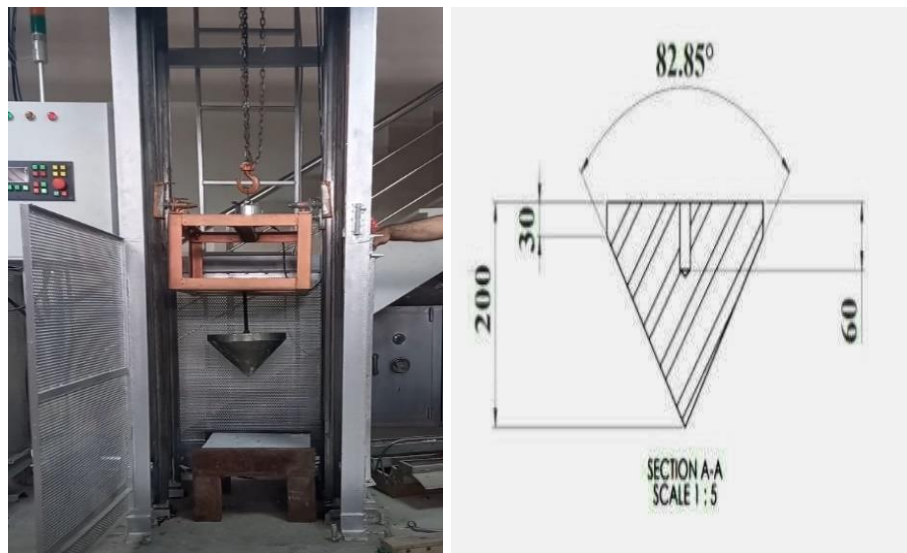
با عنایت به نقایص فوق در آزمایش مرسوم ضربه، در این تحقیق به جای نمونه بتنی متکی بر کف، از دال بتنی با تکیه‌گاه خطی در دو لبه روبرو که زیر آن خالی بود استفاده شد. آزمایش روی نمونه‌های دال بتنی به ابعاد ۱۰×۴۰×۴۰ سانتیمتر که در دو لبه روبرو به صورت صلب در تکیه‌گاه‌ها مهار شده‌اند و در دو ضلع دیگر لبه‌های دال آزاد است، انجام شد. برای آزمایش

فولادی که بر روی نمونه بتنی قرار گرفته، سقوط می‌کند و تعداد دفعات سقوط و مجموع انرژی وارده تا اولین ترک و تا شکست نمونه شمارش و محاسبه می‌گردد. یکی از اشکالات این آزمایش، پراکندگی بالا و همبستگی ضعیف نتایج را با توزیع نرمال است [۲۶-۲۷]. اشکال دیگر این آزمایش وابستگی نتایج به قضاوت فردی در خصوص شروع ترک و تخریب نهایی بتن است. از دیگر معایب این آزمایش می‌توان نیاز به تعداد ضربات زیاد و عدم تمرکز نقطه برخورد و زمان بر بودن آزمایش، شکل کروی ضربه‌زننده و وزن کم وزنه، ابعاد کوچک نمونه‌ها و عدم در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی



شکل ۳. نحوه قرارگیری نمونه ها تحت آزمایش

Fig. 3. How the samples are subjected to testing

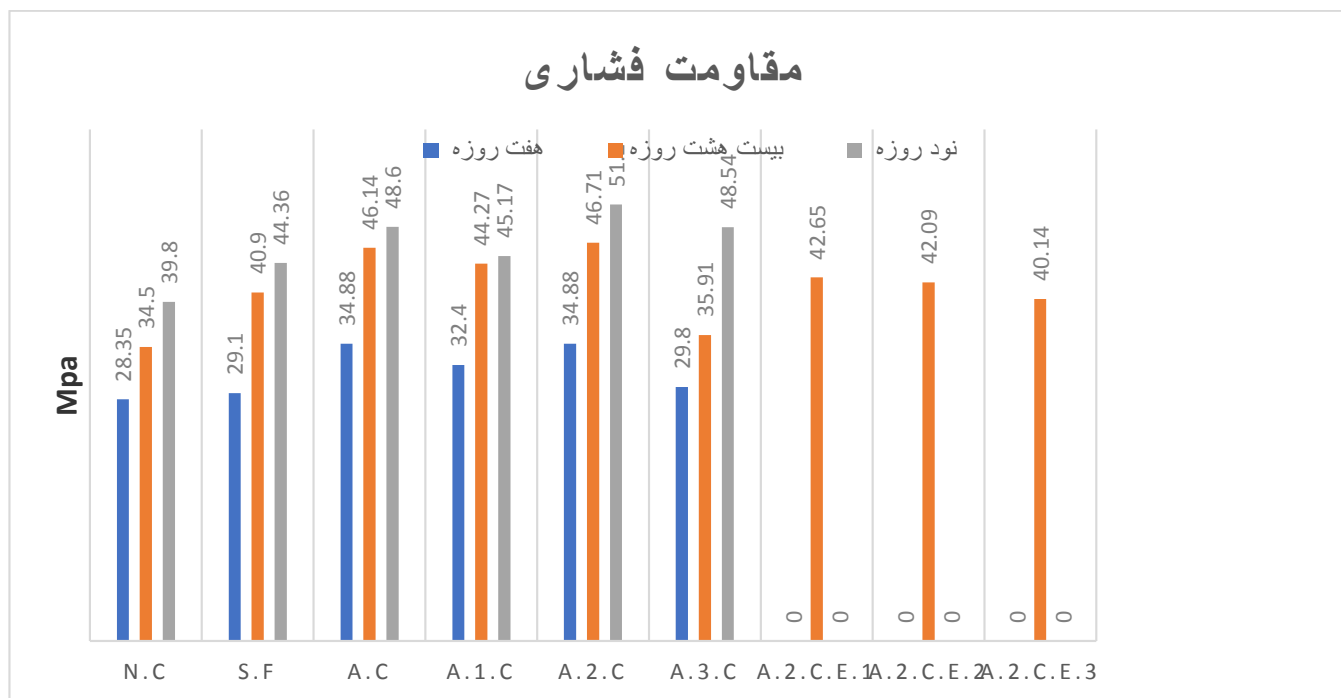


شکل ۴. نحوه قرارگیری نمونه های بتنی در سامانه آزمایش ضربه معرفی شده

Fig. 4. How to place concrete samples in the introduced impact test system

دارد استفاده گردیده است، هدف از معرفی این سامانه جدید آزمایش با ضربه‌زننده مخروطی، ایجاد بار متمرکز و نقطه‌ای در مرکز دال، کاهش تعداد ضربات به‌واسطه ایجاد انرژی قابل تنظیم و نهایتاً ایجاد گسیختگی‌های واضح‌تر به‌واسطه ابعاد و شرایط تکیه‌گاهی دال بود. در شکل ۴ سامانه آزمایش و نحوه قرارگیری نمونه و ابعاد مخروطی ضربه‌زننده نشان داده شده است. در این آزمایش توان جذب انرژی تا بروز اولین ترک نمونه دال‌های بتنی ساخته شده با طرح اختلاط‌های مختلف محاسبه گردید.

مقاومت ضربه‌ای نمونه دال بتنی، از دستگاه جدیدی که مبتنی بر سقوط وزنه سنگین مخروطی شکل است، استفاده گردید. در این آزمایش گوی فلزی روی نمونه بتنی حذف شده و از ضربه‌زننده مخروطی با وزن ۵۷ کیلوگرم از جنس فولاد که به همراه شاسی کشنده معادل ۸۰ کیلوگرم وزن گردیده استفاده شده است به‌منظور عدم انحراف ضربه‌زننده از یک آسانسور سقوط آزاد داری ظرفیت باربری ۱۲۰ کیلوگرم و ارتفاع اوج‌گیری ۷/۵ متر است که ضربه‌زننده در مسیر مستقیم ریل حرکت می‌کند و توانایی رهاسازی در ارتفاع‌های متفاوت و ایجاد انرژی‌های مختلف را



شکل ۵. نمودار مقاومت فشاری نمونه ها ۲۸، ۷ و ۹۰ روز

Fig. 5. Compressive strength diagram of 28, 7 and 90 day samples

نشان داد. همچنین ملاحظه می‌شود که حضور الیاف فلزی با نسبت ابعادی کمتر باعث ایجاد بیشترین افزایش مقاومت فشاری شده و میزان تأثیرگذاری الیاف در افزایش مقاومت فشاری حدوداً با استفاده از پوزولان برابر حاصل گردید. همچنین مقایسه نتایج نمونه‌های با بتن حاوی الیاف نوع اول (A.C) و (A.1.C) نشان می‌دهد، جایگزین کردن بخشی از الیاف فولادی با الیاف پلی‌پروپیلن منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه شده است. به نظر می‌رسد این مطلب ناشی از مقاومت بالای ماتریس اصلی بتن به دلیل استفاده از افزودنی‌های معدنی است و در این ماتریس مقاوم، پلی‌پروپیلن با مقاومت و سختی کم خود، اثر سوء بر جا می‌گذارد.

در بررسی نتایج افزودن اپوکسی در نسبت‌های مختلف بر مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه، کاهش ۱۱ الی ۱۶ درصدی (بسته به نسبت رزین به سخت‌کننده) در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی اپوکسی نسبت به نمونه پهنه است. مکانیزم منشأ این کاهش نیز مشابه سوءاثر استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به نظر می‌رسد. در شکل ۶ شاهد افزایش شکل‌پذیری، انسجام بهتر نمونه‌ها و تغییر حالت شکست از ترد به شکل‌پذیر به واسطه حضور الیاف در قیاس با بتن شاهد هستیم.

۴- بررسی و تفسیر نتایج

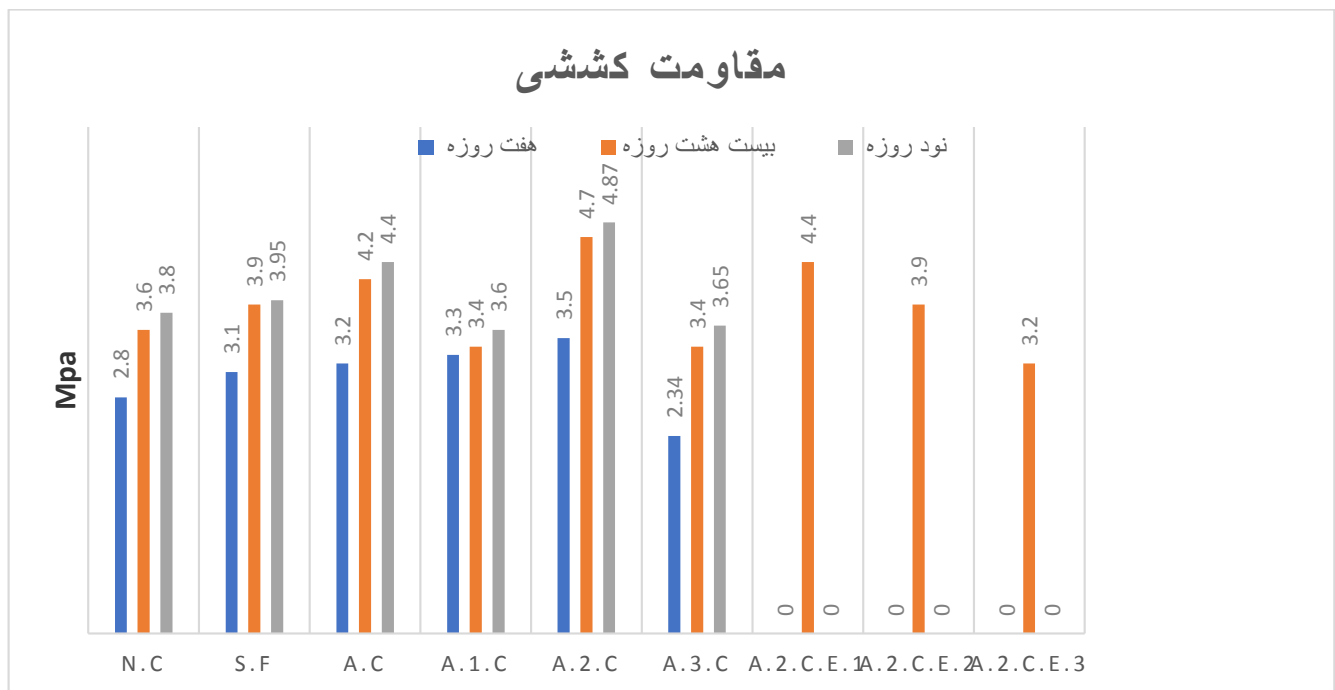
۴-۱- مقاومت فشاری

نمودار نتایج حاصل از میانگین‌گیری مقاومت فشاری سه نمونه مکعبی ساخته شده برای هر طرح اختلاط در سن ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۵ و نحوه شکست آن‌ها در شکل ۶ نمایش داده شده است. در مقایسه بتن شاهد با بتن حاوی افزودنی معدنی میکروسیلیس و خاکستر بادی در آزمایش ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بیانگر افزایش به ترتیب ۲، ۱۱ و ۱۸ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد است که نشان‌دهنده تأثیر حضور میکروسیلیس بر مشخصات مکانیکی بتن در کوتاه‌مدت و خاکستر بادی در بلندمدت است، لازم به ذکر است در نمونه شاهد هم ملاحظه می‌شود که رشد در نمونه ۹۰ روزه بیشتر بوده که به دلیل دیرگیر بودن سیمان تیپ ۲ مصرفی است؛ ولی نسبت مقاومت ۹۰ روزه به ۲۸ روزه که مطابق مراجع فنی برای سیمان تیپ ۲ باید معادل حدود ۱.۳۳ باشد، در این آزمایش‌ها به مراتب کمتر به دست آمد. همچنین در میان نمونه‌های بتن الیافی حاوی افزودنی معدنی، نمونه بتن A.2.C بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه را به ترتیب با افزایش ۲۳، ۳۵ و ۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد



شکل ۶. نحوه شکست نمونه ها در سن ۲۸ روز

Fig. 6. How the samples broke at the age of 28 days



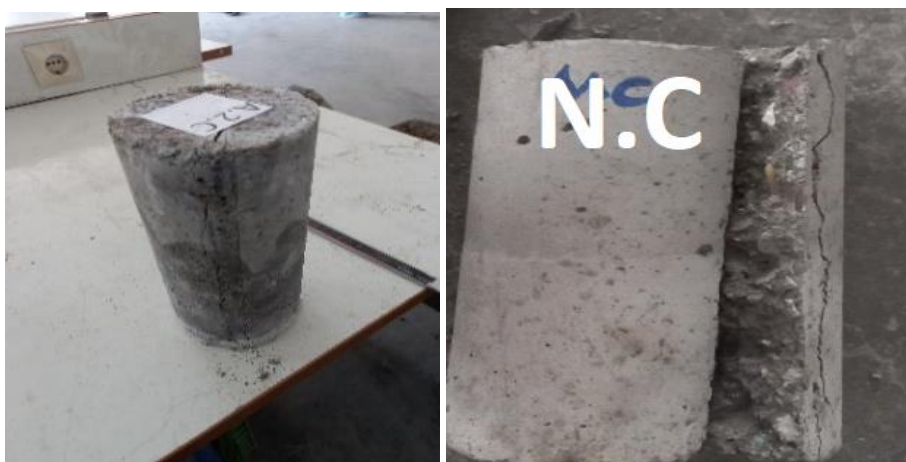
شکل ۷. مقاومت کششی نمونه ها ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز

Fig. 7. Tensile strength of 7, 28 and 90 day samples

و افزایش شکل پذیری بتن خواهند شد. نتایج این نمودار نشان می دهد افزودنی های معدنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب باعث افزایش ۹، ۱۲ و ۹ درصدی در مقاومت کششی بتن شده اند. همچنین ترکیب بهینه الیاف ترکیبی فلزی همراه با افزودنی های معدنی در بهترین نمونه (A.2.C) به افزایش مقاومت کششی به ترتیب ۲۳، ۲۹ و ۲۳ درصدی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نمونه های شاهد منجر شده است. این امر بیانگر آن است

۴-۲- مقاومت کششی

نمودار نتایج حاصل از میانگین مقاومت کششی نمونه های استوانه ای در ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۷ و نحوه شکست کششی آن ها در شکل ۸ نشان داده شده است. مهم ترین ضعف بتن معمولی مقاومت کششی پایین آن است که برای غلبه بر این ضعف از الیاف و افزودنی های معدنی استفاده شده است که به طور کلی باعث بالارفتن مقاومت کششی و کاهش ترک ها



شکل ۸. نحوه شکست نمونه های ۲۸ روزه

Fig. 8. How the 28-day samples break

پیوندهای مستحکمتری در بین ماتریس بتن اتفاق می افتد و این امر باعث افزایش مقاومت خمشی بتن الیافی نسبت به بتن معمولی می شود. مقاومت خمشی نمونه های بتنی با حضور افزودنی معدنی به تنهایی (نمونه S.F) در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۴، ۱۸ و ۳۷ درصد نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است. همچنین مقاومت خمشی در حضور الیاف ترکیبی همراه با افزودنی های معدنی (نمونه A.2.C) در مقایسه با نمونه های شاهد به ترتیب ۵، ۱۸ و ۴۴ افزایش یافته است. این نتایج همگی موید تأثیرگذاری ناچیز الیاف نسبت به افزودنی های معدنی در سنین مختلف است. می توان نتیجه گرفت که افزودنی های معدنی تأثیر اصلی را در بهبود پیوندهای بین اجزای مختلف ماتریس بتن نسبت به الیاف دارند. حضور افزودنی های معدنی باتوجه به اندازه های میکرومتری و همچنین خاصیت چسبندگی و پرکنندگی این گونه مواد، حفرات خیلی ریز موجود در ماتریس که یک نقطه ضعف در بتن معمولی است، را اشغال نموده و باعث یکپارچه سازی ماتریس بتن و نهایتاً بهبود مقاومت خمشی می گردد. نمودار نتایج حاصل از میانگین مقاومت خمشی نمونه ها در ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۹ و نحوه شکست خمشی آن ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

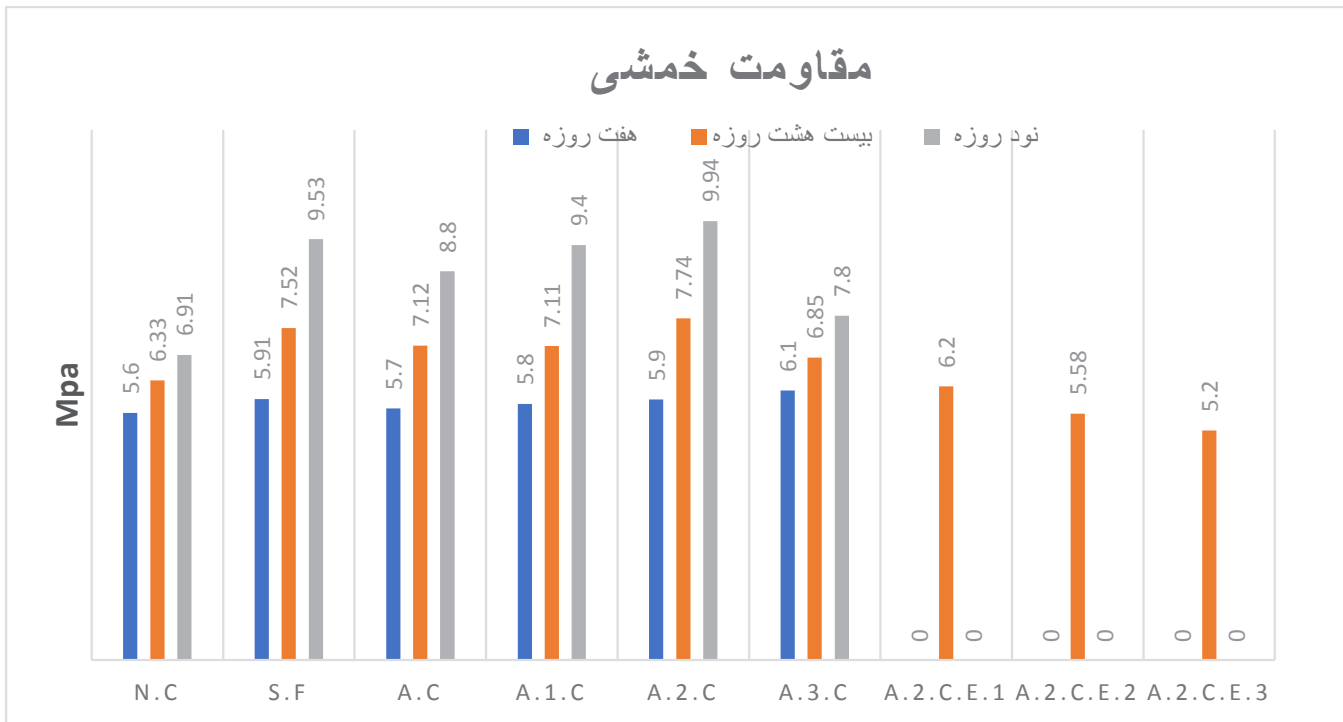
در بررسی نتایج حاصل از افزودن اپوکسی در نسبت های مختلف بر مقاومت خمشی نمونه های ۲۸ روزه کاهشی ۱ الی ۴۷ درصدی در مقاومت خمشی نسبت به نمونه های پهنه ملاحظه می گردد. این نتایج نشان

که بهترین نتایج مقاومت کششی از الیاف فلزی با کمترین نسبت طول به قطر به دست می آید. با مقایسه میزان بهبود مقاومت کششی حاصل از الیاف و افزودنی های معدنی مشخص می شود که ترکیب الیاف و افزودنی معدنی (نمونه A.2.C) بهبودی حدوداً دو برابری در مقاومت کششی نسبت به بتن حاوی افزودنی های معدنی به تنهایی (نمونه S.F) ایجاد می کند که می تواند ناشی از حضور الیاف فلزی باشد که با ساختار و شکل خاص خود باعث بهبود موثرتری در مقاومت کششی نمونه ها می گردند.

در بررسی نتایج افزودن اپوکسی در نسبت های مختلف اپوکسی، کاهشی ۱۱ الی ۴۲ درصدی در مقاومت کششی نمونه های ۲۸ روزه نسبت به نمونه پهنه فاقد اپوکسی با طرح اختلاط مشابه (A.2.C) ملاحظه می گردد. این نتایج نشان می دهند با افزایش نسبت مقدار هاردنر به رزین، مقاومت کششی نمونه ها کاهش بیشتری پیدا می کند. همچنین در شکل ۸ شاهد افزایش شکل پذیری و تغییر اندازه های ترکها و تغییر حالت شکست نمونه های بتنی و حفظ بهتر انسجام، به واسطه حضور الیاف در آزمایش کششی هستیم.

۳-۴- مقاومت خمشی

سطح اتصال بین الیاف و ماتریس بتن نقش اصلی در تعیین ویژگی های بتن مسلح شده با الیاف را برعهده دارد. با حضور الیاف و افزودنی های معدنی،



شکل ۹. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌ها در سن ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه

Fig. 9. The results of the bending strength of the samples at the age of 7, 28 and 90 days



شکل ۱۰. نحوه شکست نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه

Fig. 10. How the sample breaks at the age of 28 days

جدول ۱۲. نتایج شکست نمونه‌ها تحت بار دینامیکی

Table 12. Failure results of samples under dynamic load

نوع	ارتفاع: ۱۵۰ mm	ارتفاع: ۲۰۰ mm	ارتفاع: ۲۵۰ mm	ارتفاع: ۳۰۰ mm	$E=\sum mgh$
	انرژی: ۱۱۹/۷۶J	انرژی: ۱۵۹/۶۸J	انرژی: ۱۹۹/۶J	انرژی: ۲۳۹/۵۲J	
N.C.1	.....	.....	.....	شکست	۰
N.C.2	.....	شکست	.....	.....	۰
N.C.3	بروز ترک	.....	.....	.....	۱۱۹/۶۷J
S.F	.....	بروز ترک	.....	.....	۲۷۹/۲۸J
A.C	.....	.....	بروز ترک	.....	۳۵۹/۲۸J
A.1.C	.....	.....	بروز ترک	.....	۳۵۹/۲۸J
A.2.C	.....	.....	.....	بروز ترک	۵۹۵/۲۸J
A.3.C	.....	.....	.....	بروز ترک	۳۵۹/۲۸J

ترک در نمونه دال محاسبه شد. سه نمونه دال با مشخصات بتن شاهد مورد آزمایش قرار گرفتند تا ارتفاع بحرانی ایجاد ترک با سعی و خطا تعیین گردد و در سایر دال‌ها سقوط وزنه از ارتفاع بحرانی آغاز و سقوط‌های بعدی از ارتفاع‌های بالاتر با گام‌های افزایشی ۵۰ میلیمتری انجام شده و تا ظهور اولین علامت شکست دال ادامه یافته و نهایتاً مجموع انرژی پتانسیل وزنه‌ها تا بروز ترک مطابق رابطه ۲ محاسبه گردید [۳۳]. نتایج آزمایش‌های ضربه در جدول ۱۲ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. این نتایج بیانگر همسو بودن پاسخ بتن در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی است؛ بدین صورت که همان نمونه بهینه در آزمایش‌های استاتیکی A.2.C، در آزمایش ضربه‌ای هم بیشترین ظرفیت تحمل انرژی را نشان داده است. در شکل ۱۱-الف و ۲، شکست در نمونه دال‌های ساخته شده با بتن معمولی را نشان می‌دهد. شکل الف-۲ شکست نمونه N.C.1 را پس از سقوط وزنه از ارتفاع ۳۰۰ میلیمتری نشان می‌دهد که کاملاً ترد و با ایجاد ترک خمشی کاملاً گسیخته شده و شکل الف-۱ نمونه N.C.3 را پس از سقوط وزنه از ارتفاع ۱۵۰ میلیمتری (معادل بال انرژی ۱۱۹.۷۶ ژول) نشان داده که در آن ترکی در تکیه‌گاه‌ها ایجاد شده

می‌دهند کاهش میزان مقاومت خمشی با افزایش نسبت مقدار هاردنر به رزین افزایش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد در نمونه‌های بتن بررسی شده، به دلیل وجود ترکیب مناسبی از افزودنی‌های معدنی و الیاف ترکیبی، ماتریس بتنی یکنواخت، با اتصال مناسب بین اجزا حتی در مقیاس میکرومتری وجود داشته و ترکیب رزین اپوکسی و سخت‌کننده که چسبانندگی را در مقیاس بزرگتری ایجاد می‌کنند نه تنها نتوانسته کمک بیشتری به ماتریس نماید؛ بلکه با جایگزینی به جای ماتریس مناسب اصلی، باعث کاهش چسبندگی در نقاط جایگزینی شده است.

۴-۴- مقاومت ضربه‌ای

یکی از اهداف اصلی این پژوهش، در کنار بررسی خصوصیات مکانیکی در شرایط استاتیکی بتن، مطالعه رفتار آن در برابر بارگذاری دینامیکی با نرخ کرنش پایین بوده است. با استفاده از سامانه آزمایش ضربه معرفی شده در بخش ۳-۴ آزمایش نمونه‌های دال ساخته شده با طرح اختلاط‌های مختلف انجام شد. مجموع انرژی پتانسیل سقوط‌های وزنه روی هر نمونه تا ایجاد



الف-۲



الف-۱



ب-۲



ب-۱

شکل ۱۱. شکست نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه

Fig. 11. Failure of the sample at the age of 28 days

نتایج ارائه شده بیانگر اثر بسیار چشمگیر استفاده از الیاف و افزودنی‌های معدنی بر مقاومت ضربه‌ای دال بتنی است. در این میان به نظر می‌رسد الیاف باعث افزایش انسجام و مقاومت کششی و جذب انرژی بتن در برابر بارهای دینامیکی شده و افزودنی‌های معدنی هم با ایجاد چسبندگی و یکپارچگی بهتر ماتریس بتن توانسته به افزایش ظرفیت جذب انرژی بتن کمک کند و در مجموع استفاده هم‌زمان الیاف با افزودنی‌های معدنی باعث ایجاد مقاومت ضربه‌ای بسیار بیشتر نمونه‌های بتنی در برابر بارهای دینامیکی می‌گردد. لازم به ذکر است در مقایسه الیاف فلزی به کار برده شده الیاف فلزی با میزان طول به قطر کمتر هم در جذب انرژی، اثرگذارتر عمل نمودند.

است. از میان دال‌های آزمایش شده، نمونه دال ساخته شده با بتن S.F که در آن از افزودنی‌های معدنی استفاده شده توانسته انرژی مجموعاً ۲۷۹.۲۸ ژول تحمل نماید که افزایشی حدوداً ۲.۳ برابری را باعث شده است. همچنین نمونه حاوی افزودنی‌های معدنی همراه با الیاف ترکیبی با نسبت بهینه الیاف (A.2.C) که در شکل ۱۱-ب-۱ و ۲-ب-۲ تصویر آن در پایان آزمایش نشان داده شده، بیشترین انرژی شکست (معادل با انرژی مجموعاً ۵۹۵.۸ ژول) که حدود ۵ برابر نمونه با بتن شاهد است، را تحمل نموده است.

$$E = \sum mgh \quad (2)$$

۵- نتیجه گیری

مقاومت کششی و محدود نمودن عرض ترک و استفاده از افزودنی‌های معدنی با افزایش چسبندگی و پرکنندگی ماتریس بتن منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی ضربه‌ای شدند؛ لذا استفاده هم‌زمان از الیاف ترکیبی و افزودنی‌های معدنی باعث ایجاد افزایش بسیار چشمگیر مقاومت ضربه‌ای دال‌های بتنی در برابر بارهای ضربه‌ای دینامیکی می‌گردد.

۶- تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت علمی و آزمایشگاهی دانشگاه امام حسین (ع) در راستای طرح پژوهشی تعریف شده، انجام شده است.

منابع

- [1] Romualdi, J. P., & Batson, G. B, Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement, In Journal Proceedings, Vol. 60 (1963, June) No. 6, pp. 775-790.
- [2] Naaman, A. E., & Shah, S. P. , Pull-out mechanism in steel fiber-reinforced concrete, Journal of the Structural Division, 102(8) (1976) 1537-1548.
- [3] Dushimimana, A, Niyonsenga, A. A., & Nzamurambaho, F, A review on strength development of high performance concrete, Construction and Building Materials, 307(2021)124865.
- [4] Aoude, H., Dagenais, F. P., Burrell, R. P., & Saatcioglu, M, Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading, International Journal of Impact Engineering, 80 (2015) 185-202.
- [5] Luccioni, B., Isla, F., Codina, R., Ambrosini, D., Zerbino, R., Giaccio, G., & Torrijos, M. C, Effect of steel fibers on static and blast response of high strength concrete, International journal of impact engineering, 107(2017) 23-37.
- [6] Burrell, R. P., Aoude, H., & Saatcioglu, M, Response of SFRC columns under blast loads, Journal of Structural Engineering, 141(9) (2015) 04014209.
- [7] Lv, Y., Wu, H., Dong, H., Zhao, H., Li, M., & Huang, F, Experimental and numerical simulation study of fiber-reinforced high strength concrete at high strain rates, Journal of Building Engineering, 105812 (2023).

با انجام آزمایش‌های فشاری، کششی، خمشی و ضربه‌ای روی نمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، اثر استفاده از افزودنی‌های معدنی و الیاف ترکیبی فلزی-پلی‌پروپیلن بر بهبود مشخصات مکانیکی بتن بررسی شد. برای آزمایش ضربه، سامانه جدید آزمایشی که نمونه دال را به‌جای نمونه دیسک بتنی متکی بر کف مورد بررسی قرار می‌دهد، معرفی و به کار رفت. اهم نتایج حاصل به شرح زیر در ادامه بیان شده است.

الیاف ترکیبی استفاده شده و افزودنی‌های معدنی، هر دو بر افزایش مقاومت فشاری، کششی و ضربه‌ای در همه سنین بتن تأثیر مثبت دارند که میزان کمی تأثیر مثبت آن‌ها در بخش‌های مختلف مقاله بررسی شد؛ ولی در افزایش مقاومت خمشی، افزودنی‌های معدنی نسبت به الیاف ترکیبی استفاده شده بسیار مؤثرتر بودند. افزایش مقاومت خمشی بتن حاوی افزودنی معدنی در سن ۹۰ روزه نسبت به نمونه شاهد حدود ۳۷ درصد بود و افزودن الیاف به این بتن، تنها توانست این افزایش را به ۴۴ درصد برساند که بیانگر اثرگذاری کمتر آن نسبت به افزودنی‌های معدنی است.

حضور الیاف ترکیبی باعث افزایش هر سه مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن می‌گردد؛ ولی بیشترین تأثیر مثبت آن در افزایش مقاومت کششی به میزان ۲۳ درصد ملاحظه شد که این امر نشان‌دهنده تأثیر عمده الیاف استفاده شده در بهبود مقاومت کششی بتن است.

افزودن اپوکسی با هر نسبت رزین به سخت‌کننده به بتن حاوی افزودنی‌های معدنی میکروسیلیس و خاکستر بادی و الیاف ترکیبی، باعث کاهش مقاومت‌های سه‌گانه گردید. با افزایش نسبت سخت‌کننده به رزین، این افت مقاومت‌ها بیشتر می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده بیانگر همبستگی نتایج پاسخ بتن به بارهای استاتیکی با دینامیکی هستند و در کل استفاده از الیاف و افزودنی معدنی باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی ضربه‌ای و محدودیت ترک‌های ایجاد شده در بتن در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی می‌گردد.

مقاومت‌های سه‌گانه استاتیکی فشاری، کششی و خمشی کاملاً وابسته به نسبت طول به قطر الیاف فولادی هستند در الیاف با طول متفاوت و قطر یکسان، الیاف با طول کمتر مؤثرتر و در مقایسه الیاف با طول برابر و قطر متفاوت، الیاف با قطر بیشتر در بهبود مقاومت‌ها اثرگذارتر بودن لذا باتوجه به کسر طول به قطر الیاف تعریف شده، الیاف با کمترین نسبت ابعادی (L/D) منجر به بیشترین افزایش در مقاومت‌های سه‌گانه می‌شوند.

در دال‌های تحت بار دینامیکی ضربه‌ای، استفاده از الیاف با افزایش

- blend of fly ash, silica fume and steel fibers, *Materials Today: Proceedings*, 65 (2022) 933-942.
- [18] Nodehi, Mehra, Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review, *Innovative Infrastructure Solutions* 7, no. 1 (2022): 64.
- [19] Bedi, R., Chandra, R., & Singh, S. P, Mechanical properties of polymer concrete, *Journal of Composites*, (2013) 1-12.
- [20] Ataabadi, H. Sanaei, Abdolreza Zare, H. Rahmani, A. Sedaghatdoost, and E. Mirzaei, Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures: An experimental investigation, *Journal of Building Engineering* 34 (2021): 101878.
- [21] Karamzadeh, N. Shahni, M. R. M. Aliha, and H.R. Karimi, Investigation of the effect of components on tensile strength and mode-I fracture toughness of polymer concrete, *Arabian Journal of Geosciences* 15, no. 13 (2022): 1213.
- [22] Song, P. S., J. C. Wu, S. Hwang, and B. C. Sheu, Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Cement and concrete research* 35, no. 2 (2005): 393-399.
- [23] M. Rokhshani Mehr, & Bakhshi, investigation of Impact Behavior of High Strength Concrete and Ultra-High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete under Impact of Projectile, *Concrete research*, no. 1 (2015): 101-112 (in Persian)
- [24] GH. Sezari, M. Dehghani Ashkezar, Investigating the impact performance of concrete with high strength and high-strength fiber concrete under projectile impact, *Malik Ashtar University of Technology, Tehran*, (2018): 337-348 (in Persian)
- [25] H. R. Hasanpour Berijani, Emamzadeh, S. Sh, Experimental Study of Lightweight Projectiles Penetration in Concrete with Waste Steel Shavings and Rice Husk Ash, *magiran.com/p131997* (2014): 57-66 (in Persian)
- [26] Badr, A., Ashour, A.F., Platten, A., Statistical Variations in
- [8] Wu, H., Shen, A., Ren, G., Ma, Q., Wang, Z., Cheng, Q., & Li, Y, Dynamic mechanical properties of fiber-reinforced concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 366 (2023) 130145
- [9] Jiao, C., Sun, W., Huan, S., & Jiang, G, Behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete at medium strain rate, *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in china*, 3(2009)131-136.
- [10] Yang, L., Lin, X., Li, H., & Gravina, R. J, A new constitutive model for steel fibre reinforced concrete subjected to dynamic loads, *Composite Structures*, 221(2019)110849.
- [11] Yang, L., Lin, X., & Gravina, R. J, Evaluation of dynamic increase factor models for steel fibre reinforced concrete. *Construction and building materials*, 190 (2018) 632-644.
- [12] Afroughsabet, V, & Ozbakkaloglu, T, Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers, *Construction and building materials*, 94 (2015)73-82.
- [13] Chen, J., Yuan, Y., Zhu, Q., & Duan, J, High-temperature resistance of high-strength concrete with iron tailing sand. *Journal of Building Engineering*, 63(2023)105544.
- [14] Rai, B., & Singh, N. K, Statistical and experimental study to evaluate the variability and reliability of impact strength of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete, *Journal of Building Engineering*, 44 (2021) 102937
- [15] Hou, X., Cao, S., Zheng, W., Rong, Q., & Li, G, Experimental study on dynamic compressive properties of fiber-reinforced reactive powder concrete at high strain rates, *Engineering Structures*, 169 (2018) 119-130
- [16] Ojha, P. N., Singh, P., Singh, B., Singh, A., & Mittal, P, Fracture behavior of plain and fiber reinforced high strength concrete containing high strength steel fiber, *Research on Engineering Structures and Materials*, 8(3) (2022) 583-602.
- [17] Kumar, M. H., Saikrishnamacharyulu, I., Mohanta, N. R., Ashutosh, A., Mishra, P., & Samantaray, S, Mechanical behaviour of high strength concrete modified with triple

- [31] ASTM Standard C 496–90, Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concret Specimens, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1990
- [32] ASTM C1018-89 Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), Book of ASTM Standards, Part 04.02
- [33] British Standards Institute, Testing Sprayed Concrete: Determination of Energy Absorption Capacity of Fiber Reinforced Slab Specimens, BSI Standards, SN: BS EN 14488-5:2006. ISBN:0580482367
- Impact Resistance of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete, International Journal of Impact Engineering 32, (2006), 1907–1920.
- [27] ACI 544-2R. Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete; American Concrete Institute: Indianapolis, IN, USA, 1999
- [28] ASTM D 1557, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort
- [29] Mindess, Sidney, J. Francis Young, and David Darwin, (2003), Concrete. Prentice Hall.
- [30] BS 1881–116, Method for determination of compressive strength of concrete cubes, 1983.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ramazani, M. Samadi, M. Fayyaz, *The effect of hybrid fibers with various dimensions on the impact strength of concrete containing mineral additives*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(9) (2024) 1079-1102.

DOI: [10.22060/ceej.2024.23050.8097](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.23050.8097)



