

Influence of Parent Concrete Quality on the Mechanical Properties and Impact Performance of Steel Fiber-Reinforced Recycled Aggregate Concrete

Arash Bayat ^{1✉} 

1. Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: abayat@razi.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-12-21

Received in revised form

2026-02-28

Accepted

2026-03-13

Available online

2026-03-29

Keywords:

Recycled Aggregate Concrete,
Steel Fiber,
Impact Resistance,
Parent Concrete,
Interfacial Transition Zone(ITZ)

ABSTRACT

Given the vast consumption of concrete today, recycling demolition waste and its reuse is considered a key strategy for improving environmental sustainability. The present study evaluates the impact of parent concrete quality on the mechanical properties and impact performance of steel fiber-reinforced recycled aggregate concrete (RAC). For this purpose, coarse aggregates were sourced from two types of parent concrete with different strengths (Series A and B) and used to replace natural aggregates at levels of 0%, 50%, and 100%. Additionally, steel fibers were added at a volume fraction of 1% to enhance ductility. Experimental results for compressive strength, tensile strength, and drop-weight impact (according to ACI 544) indicated that Series B recycled aggregates led to a 9% improvement in 91-day compressive strength, attributed to stronger mechanical interlocking in the new Interfacial Transition Zone (ITZ). Furthermore, steel fibers compensated for the inherent tensile weakness of recycled concrete through the stitching effect mechanism, shifting the failure mode from brittle to ductile. The results revealed that fibers significantly increased the interval between the first crack (\$N_1\$) and final failure (\$N_2\$) blows, an effect that was more pronounced in recycled concrete. Ultimately, the findings suggest that a 50% replacement level of recycled aggregate combined with steel fiber reinforcement serves as an optimal replacement level to achieve performance competitive with conventional concrete.

Cite this article: Bayat, Arash. (2026). Influence of Parent Concrete Quality on the Mechanical Properties and Impact Performance of Steel Fiber-Reinforced Recycled Aggregate Concrete. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 3(1),19-35. DOI:10.22126/amcen.2026.13421.1067



© The Author(s).

DOI:10.22126/amcen.2026.13421.1067

Publisher: Razi University

Introduction

The ecological perspective on concrete is gaining increasing importance today due to its significant global consumption volume in the construction industry. The recycling of demolition concrete and its application as aggregate in new concrete, alongside the use of various fibers to control cracking, are among the methods employed by researchers to both increase concrete service life and improve environmental conditions.

The substantial volume of concrete production in industrialized and developing countries for essential infrastructure has led to the depletion of natural resources required for aggregate production. The approach of using recycled concrete aggregate (RCA) in new concrete helps preserve these natural reserves, preventing the massive waste of God-given resources. Furthermore, the use of RCA helps prevent environmental degradation. The lack of space for disposing of demolition waste presents another critical problem that directly harms the environment. The transportation cost of these waste materials is also a significant drawback associated with the disposal of demolition concrete.

RCA Characteristics and Performance

Recycled aggregates are a composite material consisting of natural aggregates and adhered mortar. After the recycling process of demolition concrete, a certain amount of hardened cement paste remains attached to the recycled aggregates, known as adhered mortar. The properties of the parent concrete (the concrete demolished to obtain the aggregate) and the crushing method significantly influence the mechanical characteristics of the resulting recycled concrete. The properties of the parent concrete are often unknown.

Substituting recycled aggregates typically leads to a reduction in concrete strength. This negative impact is attributed to the inherent weakness of the recycled aggregates themselves and the presence of a weak interfacial transition zone (ITZ) in the recycled concrete. Nevertheless, most literature indicates that adding up to 25% of recycled aggregates (both coarse and fine) does not significantly affect the mechanical properties of the concrete [1, 2]. Researchers have striven to improve the mechanical properties of RAC using various methods, such as reducing the water-to-cement ratio, increasing the cement content, adding mineral admixtures, and incorporating fibers, all of which have proven effective.

Compressive and Tensile Strength Review

Various studies indicate that the compressive strength of recycled concrete at 28 days is typically lower than that of conventional concrete. Results show that increasing the substitution percentage of RCA decreases the compressive strength. Etxeberria et al.'s studies [3] showed that RAC achieved approximately 12–15% compressive strength gain between 21 and 28 days, compared to approximately 20% gain in conventional concrete. They concluded that RAC with 50% and 100% RCA substitution requires a 4% to 10% reduction in the water-to-cement ratio and a 5% to 10% increase in cement content to achieve the same 28-day compressive strength as conventional concrete.

Numerous studies have been conducted on the tensile strength of recycled concrete. Results consistently show that increasing the percentage of RCA substitution decreases the tensile strength. This observation is evident from the studies by Liu et al. [4] and Xiao and Lan [5] on the direct tensile strength of RAC. For RCA substitution up to 20%, the reduction in tensile strength is considered negligible. Visual observations of tensile-split failure surfaces

indicate that failure in conventional concrete occurs at the boundary between the adhered mortar and the aggregate. This suggests that the Interfacial Transition Zone (ITZ) is the weakest link in conventional concrete during failure. However, in RAC with high RCA content, the failure path has been observed to pass not only through the new ITZ but also through the old ITZ present within the recycled aggregates [3, 6].

Tavakoli and Soroushian [7] used two types of parent concrete with different strengths obtained from the demolition of concrete structures in Michigan in their research. Their results suggest that a higher compressive strength of the parent concrete compared to the control concrete can lead to increased strength in the resulting RAC relative to the control concrete.

Fiber Reinforcement and Impact Resistance

Conventional concrete incorporating fibers is known as Fiber-Reinforced Concrete (FRC). Fibers are used in various shapes, sizes, and materials, although steel fibers are employed more frequently than other types. Researchers have identified significant improvements in the post-cracking behavior of FRCs. In other words, although compressive strength may not increase significantly, the strain at failure is enhanced. Consequently, FRCs exhibit greater toughness and higher impact resistance compared to plain concrete. Furthermore, some drawbacks of recycled concrete, such as lower tensile strength, flexural strength, and modulus of elasticity, are improved by fiber addition [8].

The standard ACI Committee 544 impact test [9] is performed by repeatedly dropping a 44.7 N weight from a height of 457 mm onto a 63.5 mm diameter steel sphere placed on a cylindrical concrete specimen (150 mm diameter and 63.5 mm height). The number of blows to achieve the first visible crack and the final failure crack is the determinant factor for impact resistance, where an increase in the number of blows indicates an increase in impact resistance.

Nili and Afrough Tabat [10] showed that conventional concrete with 1% steel fiber content and w/c ratios of 0.46 and 0.36 increased the number of blows for the first crack by 883% and 532%, respectively, and the number of blows for final failure by 111% and 615%, respectively. Erdem et al. [11] studied the impact resistance of fiber-reinforced recycled concrete. The substituted recycled aggregates were reclaimed materials from municipal incinerator bottom ash, which is a heterogeneous mixture of brick, stone, glass, ferrous and non-ferrous metals, and unburned organic matter. The results indicated that RAC has low impact resistance, a characteristic that is effectively improved by the addition of fibers.

Materials and Mixing Procedure

In this research, the cement used was Portland Cement Type I-425. The water employed for preparing the mix specimens was potable city water (tap water), with a measured pH value of approximately 7.5.

The superplasticizer (SP) utilized to adjust the workability and ensure proper homogeneity of the mix was a third-generation, polycarboxylate-based type, commercially known as GLENIUM 110P, supplied by BASF.

The Natural Coarse Aggregates (NCA) were of the crushed type. The maximum nominal aggregate sizes were 19 mm for the coarse gravel and 9.5 mm for the medium gravel.

The Recycled Coarse Aggregates (RCA) were obtained by crushing parent concrete specimens cast with two different water-to-cement (w/c) ratios: 0.6 and 0.4. The RCA derived from the w/c ratio of 0.6 was designated as Code A, and the RCA from the w/c ratio of 0.4 was designated as Code B. The maximum nominal size of the recycled aggregates was 19 mm.

The fibers utilized in this research were steel fibers supplied by Zanjan Wire Industries Company.

Mixing Procedure

For the preparation of the specimens, the aggregates were used in a Saturated Surface Dry (SSD) condition. The mixing procedure was strictly followed:

Preparation: Before introducing the materials, the interior drum of the mixer was slightly moistened using a damp cloth.

Dry Mixing: Sand and cement were simultaneously poured into the mixer and dry-mixed for 1 minute.

Initial Wet Mixing: Approximately half of the total mixing water was added to the dry materials, and mixing continued for 2 minutes.

Admixture Solution: The superplasticizer (SP) was added to the remaining half of the water to ensure better dispersion of the ingredients and achieve a homogeneous mixture.

Aggregate Addition: The coarse aggregates were added to the mixer. Subsequently, the remaining water containing the superplasticizer was slowly poured into the mix.

Final Mixing (Plain Concrete): The mixing process was continued for another 3 minutes until a concrete mixture with suitable quality and workability was obtained.

Fiber Addition (FRC): For the production of Fiber-Reinforced Concrete (FRC), the fibers specified in the mix designs were slowly and carefully added over the top of the mixer at the completion of all the above steps. Mixing was then extended for an additional 5 minutes to ensure adequate workability and uniform dispersion of the fibers within the concrete matrix.

Results

Effect of Recycled Aggregates on Compressive Strength

The results regarding the recycled aggregates' effect on the compressive strength gain process in plain concrete specimens (without steel fibers) show that the 50% to 100% substitution of Series A recycled aggregates resulted in a limited decrease in the specimens' compressive strength. This strength reduction was approximately 4% at 91 days.

Conversely, 100% substitution of Series B recycled aggregates led to an increase in compressive strength by 9% at 91 days.

The distinct effects of the two series of recycled aggregates on the strength development process can be attributed to the strength of the parent concrete from which the aggregates were produced. Since the compressive strength of the parent concrete for Series B aggregates was approximately 1.5 times that of Series A aggregates, the utilization of aggregates derived from high-strength parent concrete had a significantly positive influence on the final compressive strength of the test specimens.

Effect of Fibers on Recycled Aggregate Concrete

The results also demonstrate that the extent of improvement from adding steel fibers to the specimens prepared with recycled aggregates is influenced by the type of recycled aggregate. Specifically, the incorporation of steel fibers into specimens made with Series B recycled aggregates achieved a higher strength gain compared to those made with Series A.

Effect of Fibers on Cracking Behavior

In Fiber-Reinforced Concrete (FRC) specimens, the difference (gap) between the first visible crack and ultimate failure significantly increases, whereas in plain concrete (without fibers), the gap between the initial crack and ultimate failure is only 1 blow (or negligible). This phenomenon is attributed to the fiber's ability to enhance the ductility of the concrete, which allows the concrete to transition from a brittle state to a more plastic state, thereby requiring more energy absorption for crack propagation and final fracture.

Mechanism of Fibers and Impact Resistance of RAC

The hooked ends of the steel fibers contribute to increased energy absorption because, during fiber pull-out, a greater number of impact blows is required for the hooked ends to straighten out before the fiber begins to slide within the concrete matrix.

The overall effect of steel fibers was beneficial across all mixtures. Steel fibers demonstrated a significantly greater improving effect on Recycled Aggregate Concrete (RAC), particularly concerning ultimate failure.

In the fiber-reinforced concrete mixtures, the impact resistance of the RC50-A design showed an increase of 8% and 15% for the initial crack and ultimate failure, respectively, compared to the plain conventional concrete. The impact resistance of the fiber-reinforced RC50-B mixture was close to that of the fiber-reinforced control concrete.

Steel fibers partially mitigated the negative effect of recycled aggregate substitution on impact resistance. However, increasing the substitution percentage of recycled aggregates generally led to a decrease in impact resistance.

In the combined state, the inclusion of steel fibers in the RC-B mixture resulted in a sharp reduction in impact resistance at 50% RCA substitution. Conversely, at 100% RCA substitution, the impact resistance showed a slight improvement compared to the 50%

substitution level. Among all Recycled Aggregate Concrete (RAC) mixtures, the RC-A design exhibited the highest resistance to impact loading.

Conclusions

Based on the results obtained from this research, the following conclusions can be drawn:

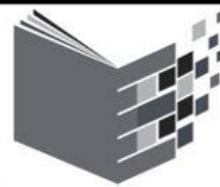
- The utilization of aggregates derived from high-strength parent concrete had a positive effect on the compressive strength of the specimens. Specifically, 100% substitution of Series A and B recycled aggregates resulted in a compressive strength reduction of approximately 4% and an increase of approximately 9% at 91 days, respectively.
- The effect of adding steel fibers to specimens prepared with recycled aggregates is also influenced by the type of recycled aggregate used. Specimens prepared with Series B recycled aggregates achieved a higher compressive strength gain compared to Series A when steel fibers were incorporated. Furthermore, the positive influence of steel fibers on the increase in compressive strength was more pronounced in the recycled aggregate samples than in the reference sample.
- The substitution of Series A recycled aggregates led to a reduction in tensile strength. Results indicate that the presence of steel fibers significantly increased the tensile strength. The substitution of Series B recycled aggregates had a negligible effect on the tensile strength. The findings suggest that the use of recycled aggregates in concrete mixes should be limited to a maximum of 50%, and that steel fibers can be utilized to effectively improve the tensile strength of recycled concrete.
- The gap between the first visible crack and ultimate failure significantly increases in both Natural Aggregate Concrete (NAC) and Recycled Aggregate Concrete (RAC) reinforced with steel fibers. In contrast, this gap is limited to only 1 blow in plain concrete specimens (without fibers). Steel fibers drastically enhanced the impact resistance of both NAC and RAC. The effect of steel fibers on the impact resistance of RAC was slightly greater than that observed in NAC. Steel fibers also partially mitigated the negative impact of recycled aggregate substitution on impact resistance.
- Impact resistance exhibited a considerable reduction when 100% of the natural aggregate was replaced with RCA. However, a 50% substitution of recycled aggregates did not have a significant effect on the concrete's impact resistance.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



تأثیر کیفیت بتن مادر بر خواص مکانیکی و عملکرد ضربه‌ای بتن بازیافتی مسلح به الیاف فولادی

آرش بیات^۱

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: abayat@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹	
کلیدواژه‌ها: بتن بازیافتی، الیاف فولادی، مقاومت ضربه، بتن مادر، ناحیه انتقال وجهی (ITZ)	امروزه با توجه به حجم گسترده مصرف بتن، بازیافت بتن‌های تخریبی و استفاده مجدد از آن‌ها، راهکاری کلیدی جهت بهبود پایداری زیست‌محیطی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، تأثیر کیفیت بتن مادر بر خواص مکانیکی و عملکرد ضربه‌ای بتن بازیافتی مسلح به الیاف فولادی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، سنگدانه‌های درشت از بازیافت دو نوع بتن مادر با مقاومت‌های متفاوت (سری A و B) تهیه شده و با درصد‌های ۰، ۵۰ و ۱۰۰ جایگزین سنگدانه‌های طبیعی گردیدند؛ همچنین الیاف فولادی به میزان ۱ درصد حجمی به مخلوط‌ها اضافه شد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و ضربه وزنه افتان (مطابق با ضوابط آیین‌نامه ACI 544 و استاندارد ACI 544.2R) نشان داد که سنگدانه‌های سری B در سن ۹۱ روز منجر به بهبود ۹ درصدی مقاومت فشاری شدند که این امر ناشی از قفل و بست مکانیکی قوی‌تر در ناحیه انتقال وجهی (ITZ) جدید است. همچنین، الیاف فولادی با بهبود مقاومت کششی از طریق مکانیزم دوختگی ترک (Stitching Effect)، ضعف ذاتی در کشش را در بتن‌های بازیافتی جبران کرده و ماهیت شکست را از ترد به شکل‌پذیر تغییر دادند. نتایج حاکی از آن است که الیاف به‌طور چشمگیری فاصله بین تعداد ضربات اولین ترک (N1) و گسیختگی نهایی (N2) را افزایش می‌دهند؛ به‌طوری‌که این تأثیر در بتن‌های بازیافتی مشهودتر بود. در نهایت، یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که جایگزینی ۵۰ درصدی سنگدانه بازیافتی به همراه مسلح‌سازی الیافی به عنوان تراز جایگزینی بهینه برای دستیابی به عملکردی رقابتی با بتن معمولی پیشنهاد می‌گردد.
استناد: بیات، آرش. (۱۴۰۵). تأثیر کیفیت بتن مادر بر خواص مکانیکی و عملکرد ضربه‌ای بتن بازیافتی مسلح به الیاف فولادی. <i>مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران</i> ، ۳(۱)، ۳۵-۱۹.	DOI:10.22126/amcen.2026.13421.1067
ناشر: دانشگاه رازی.	© نویسندگان.



۱. مقدمه

امروزه استفاده از بتن های بازیافتی در تولید بتن های جدید به یکی از مباحث کلیدی در حوزه های اقتصادی و زیست محیطی صنعت ساخت و ساز تبدیل شده است. حجم عظیم تولید بتن در کشورهای صنعتی و در حال توسعه برای اجرای زیرساخت ها، منجر به کاهش شدید منابع طبیعی سنگدانه شده است. رویکرد استفاده از بتن بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه، نه تنها به حفظ ذخایر طبیعی کمک می کند، بلکه معضل کمبود فضا برای دفع ضایعات ساختمانی و هزینه های حمل و نقل این مصالح دورریز را نیز کاهش می دهد.

سنگدانه های بازیافتی (Recycled Aggregates) ترکیبی از سنگدانه طبیعی و ملات سیمانی سخت شده هستند که به سطح سنگدانه چسبیده اند (Adhered Mortar). مطالعات نشان داده است که مشخصات "بتن مادر (Parent Concrete)" و فرآیند خرد کردن آن، تأثیر مستقیمی بر ویژگی های مکانیکی بتن بازیافتی دارد. با این حال، در بسیاری از پروژه های عملی، مشخصات بتن مادر نامعلوم باقی می ماند. جایگزینی سنگدانه های بازیافتی معمولاً باعث کاهش مقاومت بتن می شود که علت اصلی آن وجود ناحیه انتقال فاز (ITZ) ضعیف در اطراف سنگدانه های بازیافتی است. با این وجود، تحقیقات نشان می دهند که جایگزینی تا ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی (ریزی و درشتی) تأثیر منفی شدیدی بر مشخصات مکانیکی ندارد [۱، ۲]. محققان با روش هایی نظیر کاهش نسبت آب به سیمان، افزایش عیار سیمان، استفاده از پوزولان ها و افزودن الیاف، سعی در جبران این کاهش مقاومت داشته اند.

در رابطه با مقاومت فشاری، مطالعات سیلوا و همکاران [۳] (به روز شده از انگزیریا) نشان داد که بتن های بازیافتی با نرخ جایگزینی بالا، برای رسیدن به مقاومت معادل بتن شاهد، به ۵ تا ۱۰ درصد افزایش عیار سیمان نیاز دارند. در بحث مقاومت کششی نیز تحقیقات لیو [۴] و شیائ [۵] نشان دهنده کاهش مقاومت با افزایش درصد جایگزینی است. مشاهدات بصری نشان می دهد که در بتن معمولی، شکست غالباً در ناحیه انتقال فاز (ITZ) رخ می دهد، اما در بتن بازیافتی، مسیر گسیختگی علاوه بر ITZ جدید، از میان ملات چسبیده قدیمی و ITZ قدیمی نیز عبور می کند [۳-۶].

یکی از عوامل کلیدی و کمتر بررسی شده، کیفیت بتن مادر است. توکلی و سروشیان [۷] نشان دادند که اگر مقاومت فشاری بتن مادر بالاتر از بتن شاهد باشد، می تواند باعث بهبود مقاومت بتن بازیافتی حاصل از آن گردد. از سوی دیگر، برای بهبود تردی بتن، استفاده از الیاف (به ویژه الیاف فولادی) راهکاری موثر است. الیاف با ایجاد چقرمگی (Toughness) بیشتر، رفتار پس از ترک خوردگی را بهبود بخشیده و مقاومت در برابر ضربه را افزایش می دهند [۸].

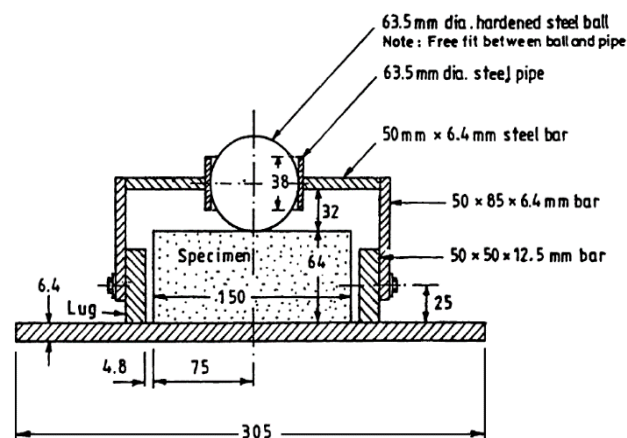
آزمایش ضربه پیشنهادی کمیته ACI 544 بوسیله سقوط یک وزنه ۴۴/۷ نیوتن از ارتفاع ۴۵۷ میلی متر بصورت تکرار شونده روی یک کره فلزی با قطر ۶۳/۵ میلی متر که روی یک نمونه بتنی استوانه ای به قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۶۳/۵ میلی متر قرار دارد، انجام می شود شکل ۱. تعداد ضربه برای ترک اولیه قابل رویت و ترک نهایی عامل تعیین مقاومت ضربه است بطوریکه افزایش تعداد ضربه برای گسیختگی، نشان دهنده افزایش مقاومت ضربه ای است [۹].

نیلی و افروغ ثابت [۱۰] نشان دادند که افزودن ۱٪ الیاف فولادی به بتن معمولی با نسبت های آب به سیمان ۴۶/۰ و ۳۶/۰، منجر به افزایش چشم گیر مقاومت ضربه ای می شود؛ به طوری که تعداد ضربات برای ایجاد ترک اولیه به ترتیب ۸۸۳٪ و ۵۳۲٪ و برای گسیختگی نهایی ۱۱۱٪ و ۶۱۵٪ بهبود یافت.

إردم و همکاران [۱۱] نیز در مطالعه بر روی بتن های بازیافتی حاوی سنگدانه های ناهمگن (حاصل از خاکستر کوره زباله سوز)، دریافتند که اگرچه بتن بازیافتی به خودی خود مقاومت ضربه ای پایینی دارد، اما حضور الیاف می تواند این نقیصه را به خوبی جبران کند. در همین راستا، تحقیقات اخیر در سال های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ بر این نکته تأکید دارند که کیفیت بتن مادر و بهینه سازی درصد الیاف، نقش کلیدی در بهبود چقرمگی ضربه ای و کنترل عرض ترک ها در بتن های سبز ایفا می کنند [۱۲، ۱۳]. با این حال، تأثیر همزمان کیفیت بتن مادر سنگدانه های بازیافتی و مقادیر مختلف الیاف فولادی بر رفتار ضربه ای بتن، همچنان نیازمند بررسی های دقیق تر آزمایشگاهی است که در تحقیق حاضر به آن پرداخته شده است.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی

عنوان	درصد
SiO ₂	۲۱/۴۱
Al ₂ O ₃	۴/۸۸
Fe ₂ O ₃	۳/۸۲
CaO	۶۳/۶۹
MgO	۱/۵۶
SO ₃	۲/۳۶
Na ₂ O	۰/۴۷
K ₂ O	۰/۶۵



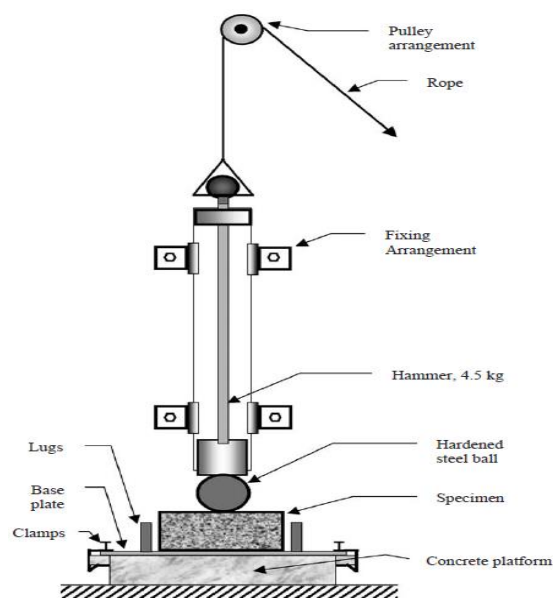
شکل ۱. الف) قرارگیری نمونه

آب: آب مورد استفاده در ساخت مخلوطها از آب شرب شهری تأمین شد. pH این آب در حدود ۷/۵ اندازه گیری شد. افزودنی شیمیایی: برای تنظیم کارایی و دستیابی به همگنی مناسب در مخلوطها، از فوق روان کننده نسل سوم میتنی بر پلی کربوکسیلات با نام تجاری GLENIUM 110P (تأمین شده از شرکت BASF) استفاده شد.

سنگدانه های معمولی: شن معمولی مصرفی از نوع شکسته بود. حداکثر اندازه اسمی (Nominal Maximum Aggregate Size) برای شن بادامی ۱۹ میلی متر و برای شن نخودی ۹/۵ میلی متر تعیین شد.

سنگدانه های بازیافتی (درشت): سنگدانه های بازیافتی درشت (RA) از خرد کردن بتن های مادر با دو نسبت آب به سیمان (۰/۴ و ۰/۶) به دست آمدند. سنگدانه های بازیافتی با نسبت آب به سیمان ۰/۶ با کد A و سنگدانه های با نسبت ۰/۴ با کد B مشخص شدند. حداکثر اندازه اسمی شن های بازیافتی مصرفی نیز ۱۹ میلی متر بود.

دانه بندی: منحنی دانه بندی کلیه مصالح سنگی (شامل ماسه، شن های معمولی و شن های بازیافتی) در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. ب) نمای کلی دستگاه ضربه

۲. مشخصات مصالح مصرفی

در این تحقیق، از سیمان پرتلند نوع ۱ با رده مقاومتی ۴۲/۵ مگاپاسکال استفاده شده، که خواص شیمیایی و فیزیکی این سیمان در جدول ۱ ارائه شده است.

رساندن جذب آب اولیه توسط دستگاه، ابتدا سطح داخلی مخلوط کن (میکسر) با استفاده از یک پارچه نمناک مرطوب گردید.

مراحل اختلاط بتن پایه

(۱) اختلاط مواد خشک: پس از آماده‌سازی میکسر، ابتدا ماسه و سیمان به‌صورت همزمان درون دستگاه ریخته شده و به مدت ۱ دقیقه تحت اختلاط اولیه قرار گرفتند.

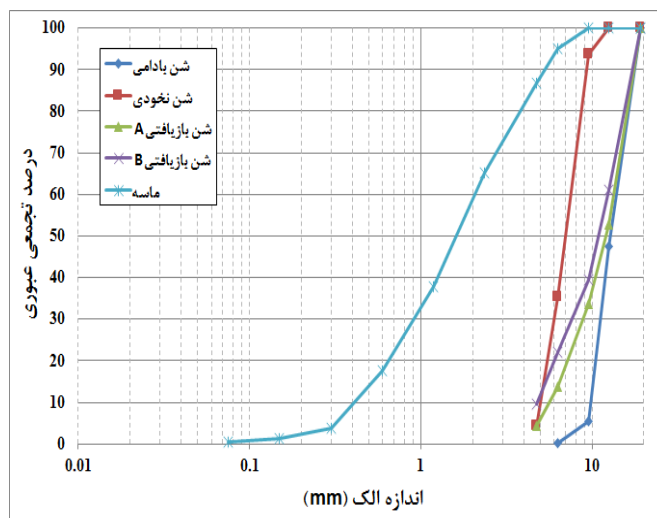
(۲) افزودن آب اولیه: تقریباً نیمی از آب مورد نیاز طرح اختلاط به مخلوط افزوده شد و فرآیند هم‌زدن برای ۲ دقیقه دیگر ادامه یافت.

(۳) بهبود کارایی و افزودن سنگدانه: به‌منظور تضمین همگنی مطلوب و بهبود کارایی، فوق‌روان‌کننده در نیمه باقی‌مانده آب حل شده و در این مرحله، سنگدانه‌های درشت به میکسر اضافه و سپس محلول آب حاوی فوق‌روان‌کننده نیز به آرامی به مخلوط افزوده شد.

(۴) اختلاط نهایی: اختلاط به مدت ۳ دقیقه دیگر ادامه یافته تا بتن پایه با کیفیت و کارایی مطلوب حاصل شود.

ساخت بتن مسلح به الیاف (FRC)

برای تهیه بتن‌های الیافی، پس از اتمام کامل مراحل ذکر شده برای بتن پایه، الیاف مورد نظر به تدریج از دهانه بالایی مخلوط‌کن به مخلوط افزوده شده و در نهایت، عمل اختلاط به مدت ۵ دقیقه دیگر ادامه یافت تا از پخش یکنواخت و کامل الیاف در ماتریس بتن اطمینان حاصل گردد و کارایی مورد نظر به دست آید. بطوری‌که جزئیات دقیق و مقادیر مربوط به طرح اختلاط بتن‌های اصلی در جدول ۳ ارائه شده است.

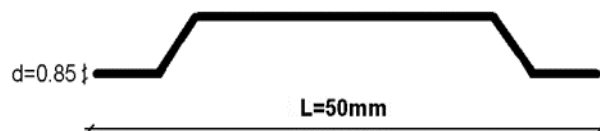


شکل ۲. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح سنگی

الیاف مورد استفاده در این پژوهش، الیاف فولادی تهیه شده از شرکت صنایع مفتولی زنجان بود. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف در جدول ۲ بیان شده است. ابعاد الیاف در شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات الیاف فولادی

شکل	مقاومت کششی (N/mm ²)	چگالی (g/cm ³)	قطر (mm)	طول (mm)
قلاب‌دار	1309	7.8	0.85	50



شکل ۳. ابعاد الیاف فولادی

در فرآیند ساخت نمونه‌ها، کلیه مصالح در وضعیت اشباع با سطح خشک (SSD) مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور به حداقل

جدول ۳. طرح اختلاط بتن های اصلی

الیاف فولادی	شن بازیافتی	شن بادامی	شن نخودی	ماسه	سیمان	وزن آب آزاد	W / C	کد طرح
(kg/m ³)								مقدار مصرفی
0	0	637	273	910	380	152	0.4	NC* ¹
78	0	628	269	897	380	152	0.4	FNC
0	446	312	134	893	380	152	0.4	RC50-A
0	876	0	0	876	3	152	0.4	RC100-A
78	440	308	132	880	380	152	0.4	FRC50-A
78	864	0	0	864	380	152	0.4	FRC100-
0	448	313	134	895	380	152	0.4	RC50-B
0	882	0	0	882	380	152	0.4	RC100-B
78	441	309	132	883	380	152	0.4	FRC50-B
78	869	0	0	869	380	152	0.4	FRC100-

۳. آزمایش های انجام شده

آزمایش های انجام شده شامل تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی، تعیین مقاومت کششی ناشی از آزمون برزلی یا دونیم شدن (Split-Tensile Test) و تعیین مقاومت ضربه ای نمونه های بتنی بود. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن های مادر کد A (۲۶ Mpa) و کد B (۴۱ Mpa) اندازه گیری شد.

۳-۱. نتایج مقاومت فشاری

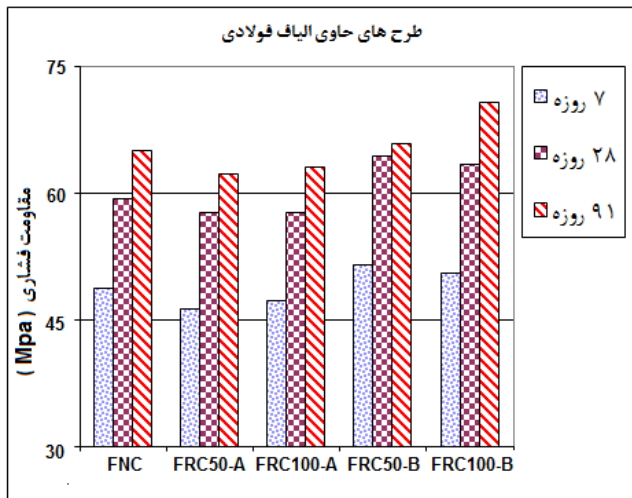
جدول ۴ نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۱۰۰ میلی متری را در سنین عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۱ روز ارائه می دهد. مقادیر گزارش شده در این جدول، میانگین نتایج سه نمونه برای هر طرح اختلاط است. در اینجا، سری ۱ مربوط به بتن مرجع (شاهد) بوده و سری های ۲ و ۳ به ترتیب معرف نمونه های ساخته شده با سنگدانه های بازیافتی A و B هستند.

۳-۱-۱. تاثیر سنگدانه های بازیافتی بر نتایج آزمون ها

الف) آزمون های فاقد الیاف فولادی

تأثیر سنگدانه های بازیافتی (RA) بر روند کسب مقاومت فشاری نمونه های فاقد الیاف، بیانگر آن است که جایگزینی ۵۰ تا ۱۰۰ درصد از سنگدانه های بازیافتی سری A منجر به کاهش ناچیزی در مقاومت فشاری گردیده است. این کاهش در سن ۹۱ روز حدود ۴ درصد بوده است. در مقابل، جایگزینی ۱۰۰ درصد

¹ NC: بتن شاهد RC: بتن بازیافتی F: بتن حاوی الیاف فولادی
FRC100-B: بتن الیافی حاوی ۱۰۰٪ سنگدانه های بازیافتی از سری B



شکل ۵. مقاومت فشاری طرح‌های حاوی الیاف فولادی در سنین مختلف

تأثیر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت فشاری، تحت تأثیر نوع سنگدانه بازیافتی قرار دارد. به‌طور خاص، نمونه‌های سری B در مقایسه با سری A، افزایش مقاومت بیشتری را نشان دادند. مقایسه تأثیر الیاف بر روند کسب مقاومت فشاری برای سری‌های ۱، ۲ و ۳ در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. مقایسه تأثیر الیاف فولادی بر روند کسب مقاومت فشاری

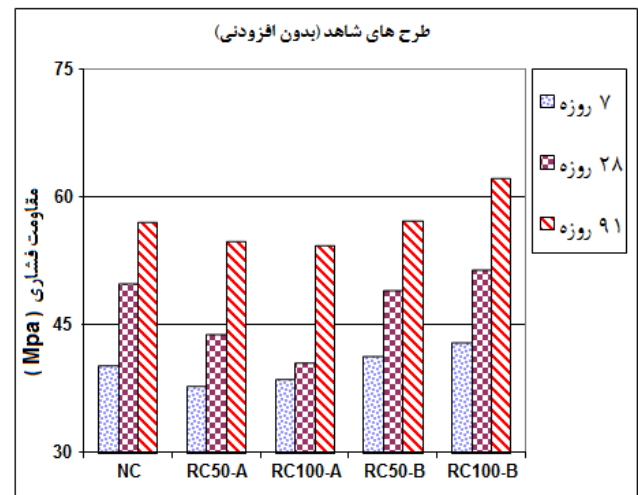
سری	طرح	درصد رشد مقاومت فشاری		
		روزه ۹۱	روزه ۲۸	روزه ۷
سری ۱	NC	21.84	19.48	14.08
سری ۲	RC-A	23.38	32.23	13.71
		23.08	42.94	16.48
سری ۳	RC-B	25.30	31.77	15.13
		18.17	23.51	13.85

افزایش مقاومت فشاری ناشی از حضور الیاف فولادی، در نمونه‌های حاوی سنگدانه بازیافتی به مراتب بیشتر از نمونه‌های مرجع (بدون سنگدانه بازیافتی یا بدون الیاف) مشاهده شد. بیشترین میزان بهبود مقاومت مربوط به آزمونه‌های FRC100-A بود که در آن مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز، به ترتیب ۱۶٪، ۴۳٪ و ۲۳٪ نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف افزایش یافته است.

سنگدانه‌های بازیافتی سری B باعث افزایش مقاومت فشاری تا ۹ درصد در سن ۹۱ روز شده است.

لذا تأثیرات متفاوت سنگدانه‌های بازیافتی بر روند کسب مقاومت آزمونه‌ها، به احتمال زیاد ناشی از اختلاف مقاومت بتن مادر است. از آنجایی که مقاومت فشاری بتن مادر سری B تقریباً ۱/۵ برابر سری A بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سنگدانه‌های حاصل از بتن پرمقاومت، تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری نمونه‌های جدید داشته است.

شکل ۴ روند کسب مقاومت فشاری آزمونه‌ها را تحت تأثیر دو نوع سنگدانه سری A و B در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۱ روز نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقاومت فشاری طرح‌های شاهد در سنین مختلف

ب) تأثیر الیاف فولادی

تأثیر الیاف فولادی بر آزمونه‌های تهیه شده توسط سنگدانه‌های بازیافتی در شکل ۵ نشان داده شده است.

۲-۳. نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن (برزیلی)

خلاصه‌ای از نتایج آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن آزمون‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، در جدول ۶ و شکل ۶ ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که هر عدد گزارش شده، میانگین نتایج حاصل از سه آزمون مشابه می‌باشد

جدول ۶. نتایج مقاومت کششی ناشی از آزمون برزیلی در سن ۲۸ روز

نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری	مقاومت کششی در سن ۲۸ روز (MPa)	طرح‌ها	طرح های اختلاط
0.07	3.47	NC	سری مرجع ۱
0.10	6.19	FNC	
0.06	2.55	RC50-A	سری A ۲
0.06	2.52	RC100-A	
0.12	7.21	FRC50-A	
0.13	7.30	FRC100-A	
0.08	3.83	RC50-B	سری B ۳
0.06	3.16	RC100-B	
0.12	7.58	FRC50-B	
0.12	7.52	FRC100-B	

نتایج آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه در جدول ۶ و شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس یافته‌های تجربی، افزودن الیاف فولادی به مخلوط‌های شاهد (سری ۱)، ارتقای قابل توجه ۷۸ درصدی را در مقاومت کششی رقم زده است. در آزمون‌های سری ۲، جایگزینی شن طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی نوع A، اگرچه منجر به تضعیف مقاومت کششی گردید، اما حضور الیاف فولادی به شکلی کارآمد این نقیصه را مرتفع ساخت. به عنوان نمونه، مقاومت کششی در طرح FRC100-A به میزان با رسیدن به مقدار ۷/۳ مگاپاسکال، افزایشی معادل ۲/۹ برابر نسبت به نمونه متناظر فاقدالیاف RC100-A نشان می‌دهد. الگوی تغییرات در آزمون‌های سری ۳ نیز انطباق بالایی با نتایج سری ۲ دارد.

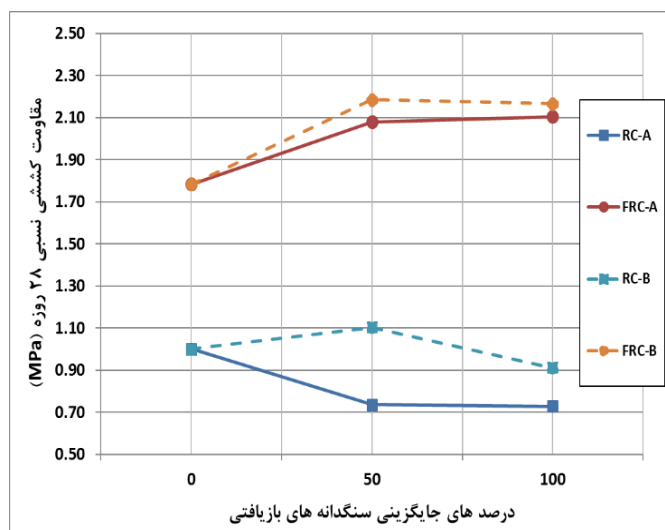
در تفسیر و بیان نتایج می‌توان گفت که سنگدانه‌های بازیافتی ناشی از بتن مادر کم‌مقاومت، باعث ایجاد ضعف در لایه‌های مرزی مشترک با خمیر سیمان (موسوم به ناحیه انتقال فاز یا ITZ) می‌شوند. افزایش حجم این نواحی مستعد ترک‌خوردگی، دلیل اصلی افت مقاومت کششی در نمونه‌های فاقد الیاف است. در مقابل، الیاف فولادی با پل زدن بر روی این ترک‌های مرزی، از گسترش ناگهانی آن‌ها جلوگیری کرده و با توزیع یکنواخت تنش، باعث ارتقای مقاومت و گذار از رفتار ترد به شکل‌پذیر شده‌اند.

۳-۳. تحلیل نتایج مقاومت ضربه‌ای (Impact Resistance)

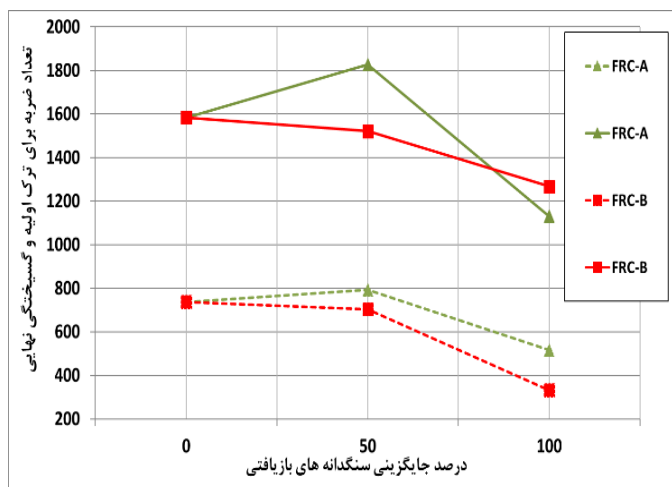
نتایج آزمایش مقاومت ضربه جهت تعیین تعداد ضربات متناظر با «ظهور ترک اولیه» و «گسیختگی نهایی»، به همراه مقادیر انرژی ضربه در سن ۲۸ روز در جدول ۷ ارائه شده است. مقادیر گزارش شده، میانگین حاصل از آزمایش بر روی ۶ نمونه برای هر طرح اختلاط می‌باشد. جهت محاسبه انرژی ضربه (U) از رابطه ۱ استفاده شده است:

$$V = \sqrt{2gh} \quad U = \frac{1}{2} m V^2 n \quad (1)$$

که در آن m جرم وزنه، g شتاب ثقل، h ارتفاع سقوط، V سرعت وزنه در لحظه برخورد با نمونه و n تعداد ضربات ثبت شده تا لحظه شکست می‌باشد. همچنین، اثر متقابل جایگزینی سنگدانه‌های



شکل ۶. تأثیر درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی سری A و B بر مقاومت کششی نسبی ۲۸ روزه آزمون‌های بتنی ساده و الیافی



شکل ۹. تعداد ضربه بتن‌های الیافی و تاثیر درصدهای مختلف جایگزینی سنگدانه‌های باز یافتی

(خط چین: ترک اولیه خط ممتد: گسیختگی نهایی)

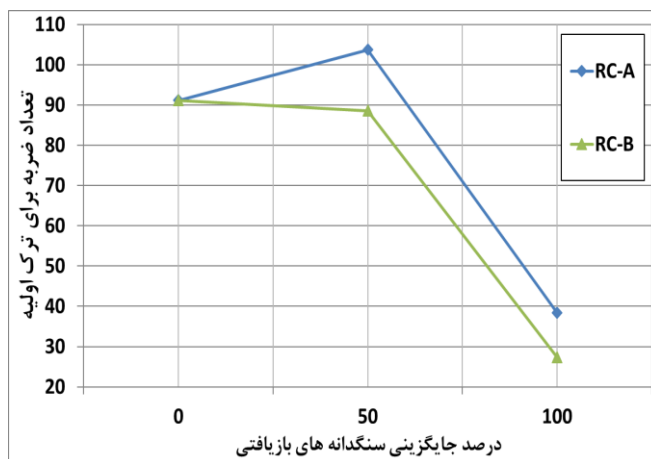
مطابق با نتایج استخراج شده، جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه‌های باز یافتی نوع A در هر دو گروه بتن‌های ساده و الیافی، منجر به ارتقای ۱۵ درصدی مقاومت ضربه‌ای (در هر دو مرحله ترک اول و گسیختگی نهایی) شده است؛ در حالی که جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه نوع B تأثیر محسوسی بر این پارامتر نشان نمی‌دهد. با این حال، افزایش سطح جایگزینی به ۱۰۰٪ در هر دو نوع سنگدانه باز یافتی، افت چشمگیر مقاومت ضربه‌ای را نسبت به بتن شاهد در پی داشته است.

یکی از بارزترین مشاهدات در این بخش، تفاوت رفتار بتن‌های ساده و الیافی در فاصله بین ظهور ترک اول (N_1) و گسیختگی نهایی (N_2) است. در بتن‌های فاقد الیاف، گسیختگی بلافاصله پس از ظهور اولین ترک (تنها با اختلاف ۱ ضربه) رخ می‌دهد که نشان‌دهنده رفتار کاملاً ترد (Brittle) این آزمونه‌هاست. در مقابل، در بتن‌های الیافی، فاصله میان ترک اولیه و انهدام نهایی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. این پدیده مستقیماً به نقش اصلاحی الیاف فولادی در بهبود شکل‌پذیری بتن انتساب می‌یابد؛ الیاف با جذب انرژی لرزه‌ای و دینامیکی، از گسیختگی ناگهانی جلوگیری کرده و باعث می‌شوند انرژی بیشتری صرف گسترش ترک و شکست پیوندها گردد. در این راستا، قلاب‌های انتهایی (Hooked-ends) الیاف فولادی نقش کلیدی در جذب انرژی ایفا می‌کنند؛ چرا که در لحظه بیرون کشیده شدن الیاف، بخش عمده‌ای

باز یافتی و حضور الیاف فولادی بر نتایج مقاومت ضربه‌ای در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است.

جدول ۷. نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای

انرژی ضربه‌ای (U)	طرح‌ها	تعداد ضربه		ترک اولیه	گسیختگی نهایی
		ترک اولیه	گسیختگی نهایی		
سری مرجع ۱	NC	91	92	1862	1883
	FNC	737	1584	15055	32351
سری A ۲	RC50-A	104	105	2119	2139
	RC100-A	38	39	784	805
	FRC50-A	793	1827	16199	37322
	FRC100-A	515	1130	10520	23073
سری B ۳	RC50-B	89	90	1810	1830
	RC100-B	27	28	558	579
	FRC50-B	704	1521	14385	31071
	FRC100-B	331	1267	6770	25882



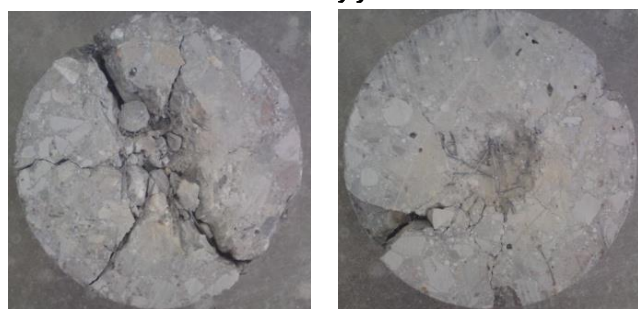
شکل ۸. تعداد ضربه جهت بروز ترک اولیه در بتن‌های بدون الیاف و تاثیر درصد های مختلف جایگزینی سنگدانه های باز یافتی



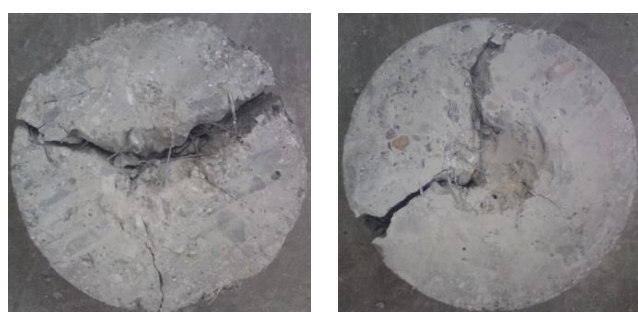
آزمونه NC



آزمونه FNC



آزمونه FRC50-A

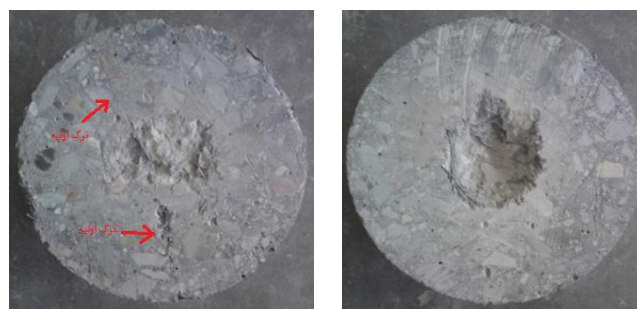


آزمونه FRC50-B

از انرژی ضربه صرف تغییر شکل پلاستیک قلابها و تبدیل آنها به حالت مستقیم می شود تا لغزش الیاف در ماتریس بتن آغاز گردد. نتایج نشان می دهد که اثر بهبوددهنده الیاف در بتن های حاوی سنگدانه بازیافتی، به ویژه در مرحله گسیختگی نهایی، بسیار مشهودتر است. به عنوان نمونه، مقاومت ضربه ای نمونه های الیافی RC50-A در مراحل ترک اولیه و گسیختگی نهایی به ترتیب ۸٪ و ۱۵٪ نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است.

همچنین مشاهده شد که الیاف فولادی تا حد زیادی توانسته اند اثرات منفی جایگزینی سنگدانه های بازیافتی را تعدیل کنند، هرچند با افزایش درصد جایگزینی، روند کلی مقاومت ضربه ای کاهش یافته است. در یک مورد استثنایی در طرح های سری B، با افزایش سطح جایگزینی از ۵۰٪ به ۱۰۰٪ در حالت ترکیبی با الیاف، بهبود نسبی در مقاومت ضربه ای نسبت به حالت ۵۰٪ مشاهده شد. با این حال، طرح حاوی سنگدانه بازیافتی نوع A همچنان مقاوم ترین عملکرد را در برابر ضربه از خود نشان داده است.

مطابق با مشاهدات ثبت شده در شکل ۱۰، که نمایی همزمان از وجه بارگذاری شده و وجه تحتانی آزمونه بتن الیافی را نشان می دهد، فرآیند تخریب با ظهور اولین ترک در وجه تحتانی (ناحیه کششی) آغاز شده و با تداوم ضربات، به سمت وجه بارگذاری شده (ناحیه فشاری) گسترش یافته است. نحوه گسیختگی نهایی آزمونه ها نیز در شکل ۱۱ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱۰. بروز ترک اولیه در نمونه های بتن الیافی
الف. وجه بارگذاری شده ب. وجه تحتانی

شکل ۱۱. بروز گسیختگی در نمونه ها
الف. وجه بارگذاری شده ب. وجه تحتانی

ایجاد قفل و بست مکانیکی قوی‌تر در ناحیه انتقال وجهی (ITZ) جدید نسبت داده می‌شود.

۲. تعامل الیاف فولادی و سنگدانه‌های بازیافتی: اثربخشی الیاف فولادی در بتن‌های بازیافتی به مراتب بیشتر از بتن مرجع مشاهده شد. این موضوع نشان‌دهنده قابلیت بالای الیاف در ایجاد محصورشدگی (Confinement) برای سنگدانه‌های بازیافتی و ممانعت از گسترش ریزترک‌ها در ساختار متخلخل این بتن‌ها است.

۳. بهبود مقاومت کششی از طریق مکانیزم دوختگی ترک: الیاف فولادی با ایجاد اثر دوختگی (Stitching Effect) بر روی لبه ترک‌ها، ضعف ذاتی سنگدانه‌های بازیافتی در برابر تنش‌های کششی را به خوبی پوشش دادند. این مکانیزم باعث شد تا افت مقاومت کششی ناشی از جایگزینی سنگدانه، به طور کامل جبران گردد.

۴. تحول در رفتار ضربه‌ای و ظرفیت جذب انرژی: مهم‌ترین یافته دینامیکی تحقیق، تغییر ماهیت شکست از ترد به شکل‌پذیر بود. الیاف فولادی با افزایش قابل ملاحظه فاصله بین ضربات ترک اول (N_1) و گسیختگی نهایی (N_2)، مانع از فروپاشی ناگهانی آزمون‌ها شدند که این امر ناشی از جذب انرژی در فرآیند بیرون کشیدگی (Pull-out) الیاف است.

۵. درصد جایگزینی بهینه سنگدانه بازیافتی: با تحلیل توأم پارامترهای مکانیکی، مشخص گردید که جایگزینی ۵۰ درصدی سنگدانه بازیافتی، "نقطه بهینه" برای حفظ تعادل میان ملاحظات زیست‌محیطی و الزامات سازه‌ای است. در این تراز، عملکرد بتن بازیافتی الیافی کاملاً با بتن معمولی رقابت می‌کند.

۶. ارزیابی الگوی شکست و انسجام ساختاری: مشاهده گردید که در بتن‌های بازیافتی فاقد الیاف، شکست به صورت خردشدگی ناگهانی و جداسازی سنگدانه‌ها رخ می‌دهد، ولیکن در نمونه‌های مسلح شده، الیاف با حفظ انسجام ماتریس، حتی پس از رسیدن به ظرفیت نهایی، از متلاشی شدن نمونه جلوگیری کرده و "نرمی" (Ductility) سیستم را به شدت ارتقا دادند.

بررسی الگوی شکست نشان می‌دهد که در نمونه‌های فاقد الیاف، میزان تخریب سطحی بسیار محدود بوده و حتی اثر لهیدگی موضعی (Indentation) ناشی از برخورد گوی فولادی در مرکز آزمون به سختی قابل رویت است. این موضوع ناشی از رفتار ترد بتن ساده است که بلافاصله پس از ترک‌خوردگی، دچار شکست ناگهانی و جدایش قطعات می‌شود. در مقابل، افزودن الیاف فولادی به طور محسوسی بر مقاومت دینامیکی و ظرفیت جذب انرژی بتن افزوده است؛ به طوری که عمق فرورفتگی موضعی در مرکز نمونه‌های الیافی، به دلیل پایداری بیشتر ماتریس و تداوم باربری تحت ضربات متوالی، افزایش یافته است. همچنین، با حضور الیاف، مکانیسم شکست از حالت «شکست ساده قطری» به سمت گسیختگی با قطرهای متقاطع (Cross-diagonal failure) تغییر یافته که در اکثر طرح‌های الیافی مشاهده شد. شایان ذکر است که در تمامی موارد، شدت تخریب و عرض ترک‌ها در وجه تحتانی آزمون به مراتب بیشتر از وجه بارگذاری شده گزارش گردیده است؛ این پدیده مستقیماً با تمرکز تنش‌های کششی ناشی از خمش در تار تحتانی، تحت بارگذاری ضربه‌ای افتان (مطابق با ضوابط آیین‌نامه ACI-544 و مقررات ملی ساختمان) در ارتباط است. در واقع، الیاف با توزیع یکنواخت‌تر تنش در کل مقطع، مانع از فروپاشی ناگهانی آزمون‌ها شده و پایداری ماتریس را تا لحظه گسیختگی نهایی حفظ نموده‌اند.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر کیفیت بتن مادر و نقش بهبوددهنده الیاف فولادی بر ویژگی‌های مکانیکی و عملکرد ضربه‌ای بتن بازیافتی مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های کلیدی این تحقیق به شرح ذیل است:

۱. تأثیر کیفیت بتن مادر بر روند کسب مقاومت: نتایج نشان داد که کیفیت بتن مادر لزوماً تعیین‌کننده نهایی مقاومت نیست؛ در حالی که سنگدانه سری A پایداری بالایی داشت، سنگدانه‌های سری B در سن ۹۱ روز منجر به بهبود ۹ درصدی مقاومت فشاری شدند. این پدیده به زبری سطحی بیشتر سنگدانه‌های ضعیف‌تر و

- Composites, vol. 46, pp. 65-72, Feb. 2014.
[Online]. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.006.
- [9] ACI Committee 544, "Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete," ACI-544.4R-23, American Concrete Institute, 2023. [Standard].
- [10] M. Nili and V. Afroughsabet, "Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, no. 8, pp. 879-886, Aug. 2010. [Online]. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.03.003.
- [11] L. Li, et al., "Dynamic mechanical properties and impact response of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 415, p. 135021, Feb. 2024. [Online]. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135021.
- [12] H. Guo, et al., "Evaluating the impact performance and durability of fiber-reinforced green concrete with high-quality recycled aggregates," *Journal of Building Engineering*, vol. 82, p. 108245, Jan. 2025. [Online]. doi: 10.1016/j.jobbe.2024.108245.
- [13] S. Zhang, et al., "Experimental investigation on impact toughness and cracking resistance of steel fiber recycled aggregate concrete," *Structures*, vol. 71, p. 107682, Feb. 2025. [Online]. doi: 10.1016/j.istruc.2024.107682.
- ## References
- [1] K. Rahal, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate," *Building and Environment*, vol. 42, no. 1, pp. 407-415, Jan. 2007. [Online]. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.033.
- [2] V. Corinaldesi, "Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 9, pp. 1616-1620, Sept. 2010. [Online]. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031.
- [3] R. V. Silva, J. de Brito, and R. K. Dhir, "A review on the mechanical properties of recycled aggregate concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 344, p. 131046, Apr. 2022. [Online]. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131046. (Updated version of Etxeberria et al., 2007).
- [4] S. Liu, K. Fang, and L. Zeng, "Experimental study on mechanical properties of recycled aggregate concrete," *Coal Ash China*, no. 5, pp. 18-19, 2005.
- [5] J. Xiao, W. Li, and J. Zheng, "Mechanical behavior and sustainable analysis of recycled aggregate concrete: A state-of-the-art review," *Journal of Building Engineering*, vol. 65, p. 105745, May 2023. [Online]. doi: 10.1016/j.jobbe.2022.105745.
- [6] M. C. Rao, S. K. Bhattacharyya, and S. V. Barai, "Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 69-80, Jan. 2011. [Online]. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.055.
- [7] J. Wang, et al., "Influence of parent concrete strength on the performance of recycled aggregate concrete," *Materials*, vol. 14, no. 11, p. 2901, June 2021. [Online]. doi: 10.3390/ma14112901.
- [8] J. A. Carneiro, P. R. L. Lima, M. B. Leite, and R. D. Toledo Filho, "Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete," *Cement and Concrete*