






# Assessing the Impact of Fire on the Behavior of GFRP-reinforced Lightweight Concrete Deep Beams with Varied Stirrup Spacing: An Experimental Analysis

Ali Mohammad Ali Alarjy<sup>1</sup>, Amir Houshang Akhaveissy<sup>2\*</sup>, Bahaa Al-Abbas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Kerbala University, Kerbala, Iraq.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 07.22.2023

**Revised:** 10.22.2023

**Accepted:** 12.26.2023

### Keyword:

Deep Beam

Fire

Lightweight Concrete

GFRP Bars

Distance of Stirrups

## ABSTRACT

Fire poses a constant risk to reinforced concrete (RC) structures, and as such, this study aimed to compare the performance of lightweight concrete (LC) deep beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) before and after exposure to fire. Four experimental specimens of LC deep beams reinforced with GFRP rebars were fabricated and tested using a four-point bending method, including two specimens with 60 mm stirrup spacing and two with 150 mm stirrup spacing. The findings revealed that the failure mode of the specimens shifts from shear to bending after exposure to fire, and the ultimate load capacity decreases by 22% and 27% in the laboratory specimens with 60 mm and 150 mm stirrup spacing, respectively. However, reducing the stirrup spacing from 150 mm to 60 mm increases the ultimate load capacity by 11.4% and 19.2% at normal temperature and after exposure to fire, respectively. Fire caused spalling and cracking of the concrete cover, but the amount of damage was less severe in the specimen with a stirrup spacing of 60 mm.

### \*Corresponding Author:

Amir Houshang Akhaveissy

**Email:** [ahakhaveissy@razi.ac.ir](mailto:ahakhaveissy@razi.ac.ir)



---

**EXTENDED ABSTRACT**


---

### Introduction

The safety of reinforced concrete (RC) structures exposed to fire is a critical design requirement, and numerous studies have investigated the effects of fire on concrete and the use of new materials like fibre-reinforced polymers (FRPs) to improve structure behaviour. Deep beams, which are commonly used in high-rise buildings, tanks, and silos, require particular attention when exposed to fire due to their minimal thickness compared to other geometrical dimensions. Recent research has explored the effects of adding fibres and heating concrete specimens experimentally and numerically in both normal and deep RC beams. However, there is a lack of research on the behaviour of lightweight concrete (LC) deep beams reinforced with GFRP rebars under fire. Therefore, this study aimed to investigate the behaviour of LC deep beams reinforced with GFRP rebars before and after fire exposure, considering stirrup spacing as a variable. Four laboratory specimens were cast and tested, and various parameters were evaluated, including load-displacement diagram, ultimate load, cracking load, failure mode, and cracking pattern. The results of this study will contribute to the understanding of the behaviour of LC deep beams reinforced with GFRP rebars under fire and provide insights into their performance and safety under such conditions.

### Methodology

#### *Experimental program*

This study used LC to create laboratory specimens, which were prepared using cement, LECA, sand, and superplasticizer as per the mixing plan in Table 1. An aggregate grading test was conducted based on ASTM C136 criteria. The specimens were tested for compressive and tensile strength before and after exposure to fire for 60 minutes in a furnace according to ASTM-E119. Four deep beam laboratory specimens, reinforced with steel and GFRP, were evaluated before and after fire exposure, with two specimens having a 60 mm stirrup distance and two having a 150 mm stirrup distance. The specimens had a thickness of 100 mm, a cross-section height of 450 mm, and a clear length of 1400 mm, with a shear span/depth ratio of 2.02. The specimens were exposed to thermal load according to the standard time-temperature diagram specified in ASTM-E119, as presented in Figure 1.

**Table 1. LC mixing plan (per cubic meter).**

Material	Cement (kg)	W/C	Course Agg. (LECA) (kg)	Fine Agg. (sand) (kg)	Superplasticizer (kg)
Proportion (kg/m <sup>3</sup> )	510	0.41	475	625	5.5

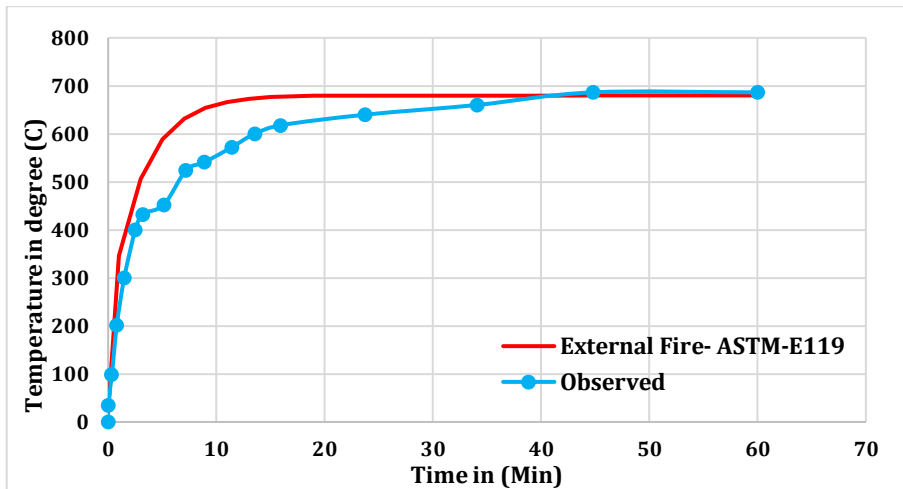


Figure 1. Time-temperature diagram of ASTM-E119 and experimental models.

### *Experimental setup specifications*

In Figure 2, the supports for the deep beam specimens are simple and the loading is applied symmetrically at two points. A completely rigid I-shaped section transfers the load of the jack to the upper face of the beam. Steel plates with dimensions of 90 mm width and 100 mm length were used at the load application and support to prevent local failure of the specimens. The force applied to the jack was measured using a spoke-type DYLF-102 high-precision weighing load cell and an NI PCI-6251 M-Series multifunction DAQ data logger device. The displacement value of the beam was measured using a Miniature spring automatic reset electronic ruler KTR displacement sensor (LVDT) installed under the beam.



Figure 2. Experimental setup to test experimental specimens of the deep beam.

## Results and discussion

In Figure 3, the load-displacement diagram of LC deep beam specimens reinforced with GFRP shows that fire reduces the initial stiffness and mechanical characteristics of the specimens. The ultimate tolerable load decreases due to fire, and reducing the stirrup distance before the fire and increasing the concrete confinement can increase the ultimate load. The ACI standard produces conservative results, possibly due to weaker interlocking of LC and lower tensile capacity of reinforcements. The Strut and Tie model indicates that tie strength is the limiting factor, and reducing the distance between reinforcements increases the cracking load. Table 6 shows that reducing the stirrup distance increases the deformation of the mid-span of the beam, and fire reduces the deformation of the mid-span of the beam, resulting in a more brittle fracture.

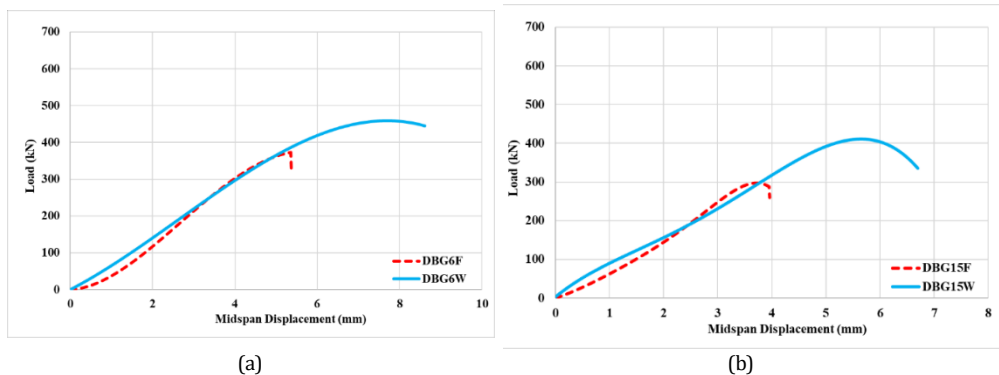


Figure 3. Load-displacement diagram of laboratory specimens: a) DBG6F & DBG6W, b) DBG15F & DBG15W.

Fire causes spalling and concrete cracking, leading to a shift in failure mode. GFRP reinforcement may rupture due to loss of mechanical characteristics or separation from LC.

## Conclusion

This research aimed to study how fire affects the behaviour of LC deep beams reinforced with GFRP. Four laboratory specimens, two with a stirrup distance of 60 mm and two with 150 mm, were tested before and after fire using a four-point test. The results showed that fire reduces compressive and tensile strength, stiffness, ultimate load, and deformation of the beams. The failure mode shifts from shear to bending, and reducing stirrup distance improves the behaviour of the beam in pre- and post-fire conditions. These findings can be useful in designing structures to resist fire and ensure their safety.



## اثر آتش سوزی بر رفتار تیر عمیق بتن سبک مسلح شده با آرماتور GFRP با در نظر گرفتن اثر فاصله خاموت‌ها: مطالعه آزمایشگاهی

علی محمد علی الاعرجی<sup>۱</sup>، امیر هوشنگ اخویسی<sup>۲\*</sup>، بها العباس<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۳- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه کربلا، کربلا، عراق.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

یکی از خطراتی که همواره سازه‌های بتن مسلح را تهدید می‌کند آتش سوزی است. بنابراین، هدف اصلی در این تحقیق، مقایسه رفتار تیر عمیق بتن سبک مسلح شده با آرماتور GFRP در شرایط قبل و بعد از آتش سوزی می‌باشد. به این منظور چهار نمونه آزمایشگاهی تیر عمیق بتن سبک مسلح شده با میلگردهای GFRP، شامل دو نمونه با فاصله خاموت ۶۰ میلی‌متر و دو نمونه با فاصله خاموت ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شده و به وسیله آزمایش چهار نقطه خمشی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که آتش سوزی موجب تغییر مود گسیختگی نمونه‌های آزمایشگاهی از برشی به خمشی می‌شود و بار نهایی بر اثر آتش سوزی، در نمونه آزمایشگاهی با فاصله خاموت ۶۰ و ۱۵۰ میلی‌متر، به ترتیب ۲۲ و ۲۷ درصد افت می‌کند. همچنین کاهش فاصله آرماتورها از ۱۵۰ میلی‌متر به ۶۰ میلی‌متر در دمای معمولی و در نمونه‌های تحت اثر آتش قرار گرفته، باعث افزایش بار نهایی به ترتیب به میزان ۱۱.۴ درصد و ۱۹.۲ درصد می‌شود. آتش سوزی سبب پوسته شدگی و ترک خوردگی پوشش بتن می‌شود اما در نمونه با فاصله خاموت ۶۰ میلی‌متر، میزان آسیب‌های ناشی از آتش سوزی کمتر می‌باشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵

### کلید واژگان:

تیر عمیق

آتش سوزی

بتن سبک

آرماتور GFRP

فاصله خاموت‌ها

\*نویسنده مسئول: امیر هوشنگ اخویسی

پست الکترونیکی:

ahakhaveissy@razi.ac.ir

## مقدمه

سازه‌ها همواره در خطر در معرض آتش قرار گرفتن می‌باشند. بنابراین یکی از مهمترین نیازهای طراحی سازه‌های بتن مسلح، تأمین ایمنی آن در برابر آتش‌سوزی است. تحقیقات زیادی مبنی بر کاهش مشخصات مکانیکی بتن ناشی از حرارت آتش‌سوزی انجام گرفته است [۱-۴]. با توجه به استفاده از تیرهای عمیق در سازه‌هایی مانند ساختمان‌های بلند مرتبه، مخازن و سیلوها، بررسی رفتار این نوع تیرها زمانی که در معرض آتش قرار می‌گیرند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. مطابق با آیین‌نامه ۳۱۸-۱۴ ACI [۵] تیرهایی که نسبت دهانه آزاد به ارتفاع آن کمتر از ۴ باشد، تیر عمیق محسوب می‌شود [۶-۸]. در تیرهای عمیق، ضخامت نسبت به سایر ابعاد هندسی ناچیز است، به عبارت دیگر، نیروهای اعمالی به آن، حالت تنش صفحه‌ای را ایجاد می‌کنند. به همین دلیل رفتار و مکانیزم گسیختگی تیرهای عمیق پیچیده‌تر و متفاوت‌تر از تیرهای معمولی بتن مسلح است [۹-۱۲]. در سالیان اخیر تحقیقات فراوانی بر روی تیرهای عمیق و نرمال بتن مسلح با اضافه کردن الیافها و تحت حرارت قرار دادن نمونه‌های بتنی به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام شده است [۱۳-۱۶].

در پژوهش آلبو-حسن و ال-ثایری<sup>۱</sup> [۱۵] بر روی تیرهای معمولی بتنی مسلح شده با میلگردهای GFRP، مشاهده شده است که شکست تمام نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی افزایشی، به صورت برشی می‌باشد. در این پژوهش نمونه‌ها تحت حرارت‌های متفاوت از ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفته‌اند که بار نهایی نمونه‌ها در ۷۰۰ درجه نسبت به دمای معمولی ۵۳ درصد کاهش می‌یابد. آزمایش چهار نقطه خمشی<sup>۲</sup> الروزان<sup>۳</sup> [۱۷] بر روی تیرهای بتن آرمه غیر عمیق نشان می‌دهد با استفاده از نوارهای CFRP می‌توان مقاومت برشی تیر را بالا برد. در این تحقیق با بررسی نمونه‌ها تحت دماهای ۲۳، ۱۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس با توجه به تعداد نوارهای استفاده شده در هر نمونه، تحمل بار نهایی در دمای ۵۰۰ درجه نسبت به دمای ۲۳ درجه به صورت میانگین ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. در مطالعات القرنی<sup>۴</sup> و همکاران [۱۳] با بررسی عملکرد برشی تیرهای عمیق بتنی مسلح با سنگدانه‌های آهکی و کوارتزی که به ترتیب دارای چگالی ۱۴۸۷ و ۱۵۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشند، در دمای ۶۰۰ درجه نسبت به دمای ۲۵ درجه نمونه‌های دارای سنگدانه آهکی و کوارتزی به ترتیب به میزان ۲۳.۱ درصد و ۴۰.۵ درصد ظرفیت مقاومت برشی کمتری دارند. با بررسی اثر افزایش دما بر روی تیرهای معمولی در تحقیقات دباغی و همکاران [۱۸] بار نهایی تحمل شده در نمونه‌های با بتن سبک و بتن نرمال در دمای ۷۵۰ درجه نسبت به دمای ۲۵ درجه به ترتیب ۲۱.۳ درصد و ۳۷ درصد کاهش می‌یابد.

استفاده از مصالح نوین مانند FRPها برای بهبود رفتار سازه‌ها امروزه فراگیر شده است. در مطالعات نسیف<sup>۵</sup> و همکاران [۱۹]، جایگذاری میلگردهای GFRP به جای میلگردهای فولادی در تیرهای عمیق با بتن دارای مقاومت فشاری ۶۰ مگاپاسکال، سبب افزایش تحمل بار وارده به میزان ۴ درصد می‌شود اما تغییر شکل تیر را به میزان ۳۹ درصد کاهش می‌دهد. مقاومت برشی تیرهای عمیق تقویت شده با نوارهای پلیمری از ترکیب الیاف کربن و شیشه در تحقیق ابراهیم<sup>۶</sup> و همکاران [۲۰] ۵۵.۸ درصد افزایش می‌یابد و تغییر شکل نهایی به طور میانگین ۶۲.۱ درصد بیشتر می‌شود و با این حال شکست نمونه‌ها همچنان به صورت برشی می‌باشند. در مطالعات فرقلی و بنموکران<sup>۷</sup> [۸] بر روی اثر میزان نسبت آرماتورهای GFRP در تیرهای عمیق بتنی، با افزایش نسبت آرماتورهای GFRP تغییری در ظرفیت بار

<sup>1</sup> Albu-Hassan & Al-Thairy

<sup>2</sup> four point bending test

<sup>3</sup> Al-Rouzan

<sup>4</sup> Al-Qarni

<sup>5</sup> Nassif

<sup>6</sup> Ibrahim

<sup>7</sup> Farghaly & Benmokrane

ترک‌خوردگی ایجاد نمی‌شود، اما ظرفیت بار نهایی به میزان ۳۱.۷ درصد افزایش می‌یابد. هاسن<sup>۱</sup> و همکاران [۲۱] به وسیله نمونه‌های با دو نسبت طول دهانه برشی به ارتفاع ۱ و ۱.۷۵ و نسبت‌های صفر و ۰.۴ درصد آرماتورهای برشی، اثر افزودن لایه‌های CFRP را در تیرهای عمیق بررسی کردند. در این پژوهش میزان اثری جذب شده در نمونه‌ها در نسبت‌های طول دهانه به ارتفاع ۱ و ۱.۷۵ با توجه به نوع پیکربندی CFRP‌ها به ترتیب ۱۵ و ۵۱ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش برای نسبت آرماتورهای برشی صفر و ۰.۴ درصد به ترتیب ۱۵ و ۸۶ درصد می‌باشد. کوماری و نایاک<sup>۲</sup> [۲۲] مطالعاتی در مورد تیرهای عمیق بتن آرمه دارای بازشو که به وسیله لایه‌های GFRP و اتصال دهنده‌های گازی مقاوم سازی شده‌اند انجام دادند. با آزمایش نمونه‌های مختلف تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای نتایج نشان می‌دهد وجود بازشوها در جان تیر عمیق می‌تواند مقاومت برشی را تا ۷۲ درصد کاهش دهد در حالی که اضافه کردن لایه‌های GFRP و اتصال دهنده‌های گازی مقاومت برشی را ۶۴ درصد افزایش می‌دهد. وکیلی و همکاران [۲۳] مطالعات تجربی بر روی مقاومت برشی تیرهای غیر عمیق بتنی سبک مسلح شده با میلگردهای GFRP، تحت اثر الیاف‌ها را انجام دادند. هدف اصلی این پژوهش بررسی هم‌زمان اثر الیاف‌ها بر بتن‌های سبک دارای میلگردهای GFRP می‌باشد. برای این منظور دوازده طرح اختلاط مختلف شامل الیاف‌های شیشه‌ای، الیاف‌های میکرو پلی پروپیلن و الیاف‌های فولادی در نظر گرفته شده است. با آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف‌ها به بتن سبک باعث افزایش ظرفیت بار نهایی به میزان ۵۵ درصد در تیرهای بتنی می‌شود. ناواز<sup>۳</sup> و همکاران [۲۴] تیرهای بتنی مسلح غیر عمیق را با استفاده از بتن سبک و بتن نرمال مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد با توجه به ایجاد ترک‌های قطری کششی در یک طرف تیر، همه نمونه‌ها به صورت برشی دچار شکست می‌شوند. ضریب کاهش مقاومت برای نمونه‌های بتن سبک ۲۸ روزه و ۵۶ روزه در بازه ۰.۷۸-۱.۰ می‌باشد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مطالعاتی مبنی بر اثر آتش بر روی مشخصات رفتاری بتن [۱-۳]، افزایش حرارت و در معرض آتش قرار گرفتن تیرهای عمیق بتنی [۱۳؛ ۱۴؛ ۱۶]، تیر معمولی با بتن سبک [۱۸؛ ۲۵] و تیر معمولی تقویت شده با FRP [۱۵؛ ۱۷] صورت پذیرفته است. همچنین رفتار FRP‌ها در تیرهای بتنی عمیق [۸؛ ۱۰؛ ۱۹-۲۲] و در تیرهای معمولی با بتن سبک [۲۳؛ ۲۶] مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال هنوز مطالعه‌ای بر روی رفتار تیرهای عمیق با بتن سبک مسلح شده با میلگردهای GFRP تحت آتش‌سوزی صورت نگرفته است. بنابراین هدف اصلی در این تحقیق، بررسی اثر آتش‌سوزی بر روی تیر عمیق بتن سبک مسلح با GFRP و مقایسه رفتار آن قبل و بعد از آتش‌سوزی است. همچنین اثر فاصله خاموت‌ها نیز به عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شود. به همین منظور ۴ نمونه آزمایشگاهی، شامل ۲ نمونه تیر عمیق بتن سبک مسلح با GFRP با فاصله خاموت ۶ سانتی متر و ۲ نمونه تیر عمیق بتن مسلح با فاصله خاموت ۱۵ سانتی متر ساخته شده است. سپس نمونه در شرایط قبل و بعد از آتش‌سوزی مورد آزمایش قرار می‌گیرد و در نهایت نمودار بار-تغییر مکان، بار نهایی، بار ترک خوردگی، مد گسیختگی و الگوی ترک‌خوردگی نمونه‌ها مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

## برنامه آزمایشگاهی

### مشخصات مصالح و طرح اختلاط

نمونه‌های آزمایشگاهی در این تحقیق با استفاده از بتن سبک ساخته شده‌اند، بنابراین در این تحقیق در تهیه بتن سبک از سیمان، لیکای سازه‌ای، ماسه و فوق روان کننده مطابق با طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۱ استفاده گردیده

<sup>1</sup> Hason

<sup>2</sup> Kumara and Nayak

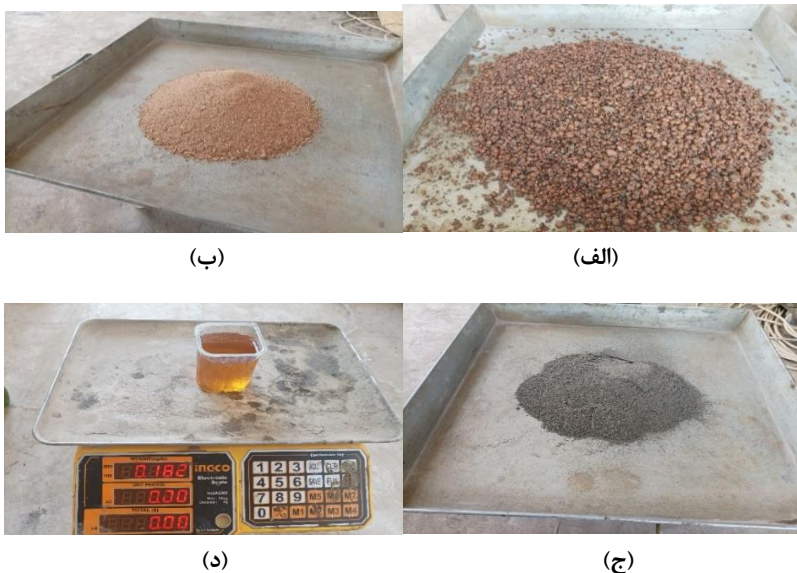
<sup>3</sup> Nawaz

است. شکل ۱ مصالح استفاده شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقدار فوق روان کننده مصرف شده به اندازه ۱ درصد وزن سیمان است و سیمان استفاده شده، تیپ ۲ و از کارخانه سیمان کربلا تهیه گردیده است. از لیکای سبک سازه‌ایی کارخانه کاشان ایران، به عنوان درشت دانه طبیعی استفاده شده و ماسه به کار رفته از معدنی در اطراف شهر کربلا تهیه گردیده است. آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها که در شکل ۲ نشان داده شده با استفاده از ضوابط موجود در آیین‌نامه ASTM C۱۳۶ [۲۷] انجام داده شده است.

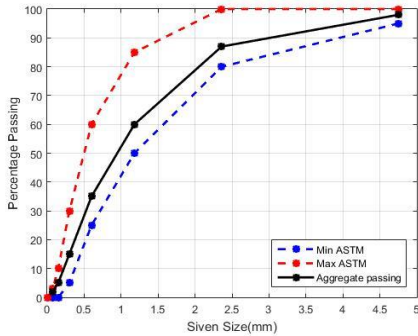
جدول ۱. طرح اختلاط بتن سبک (برای یک متر مکعب).

مصالح	سیمان	نسبت آب به سیمان	درشت‌دانه (لیکا)	ریز دانه (ماسه)	فوق روان کننده
مقدار (کیلوگرم بر متر مکعب)	۵۱۰	۰.۴۱	۴۷۵	۶۲۵	۵.۵

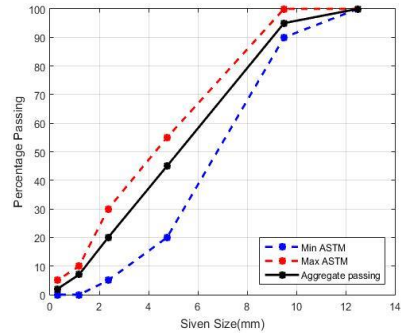
پس از ساخت بتن سبک مطابق با طرح اختلاط، نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی بتنی مطابق با استاندارد ASTM C۳۱ [۲۸] عمل آوری می‌شوند. جهت بررسی مقاومت فشاری در شرایط قبل از آتش‌سوزی ۳ نمونه و در شرایط پس از آتش‌سوزی ۳ نمونه مکعبی به ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر و جهت بررسی مقاومت کششی در شرایط قبل و بعد از آتش‌سوزی نیز هریک ۳ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر آزمایش می‌شوند. پس از ۲۸ روز، نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی مطابق با شکل ۳ در کوره قرار داده می‌شود و با توجه به تجهیزات تا حد امکان مطابق با استاندارد ASTM E۱۱۹ [۲۹] بر اساس نمودار ارائه شده در شکل ۷ نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه در معرض آتش قرار می‌گیرند و بعد از خاموش کردن کوره، به صورت تدریجی نمونه‌ها خنک می‌شوند و پس از ۲۴ ساعت مورد آزمایش قرار می‌گیرند. جدول ۲ مقادیر چگالی، مقاومت کششی و فشاری نمونه‌های بتن سبک در شرایط قبل و بعد از آتش‌سوزی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. الف) لیکای سبک سازه‌ای (ب) ماسه (ج) سیمان (د) فوق روان کننده.



(ب)



(الف)

شکل ۲. دانه بندی سنگدانه‌ها (الف) لیکای سبک سازه‌ایی (ب) ماسه.



شکل ۳. نمونه‌های استوانه‌ای بتن سبک در کوره.

در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق، از آرماتورهای فولادی و آرماتورهای GFRP استفاده می‌شود که مشخصات مکانیکی آنها در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲ چگالی، مقاومت کششی و فشاری در شرایط قبل و بعد از آتش بتن سبک.

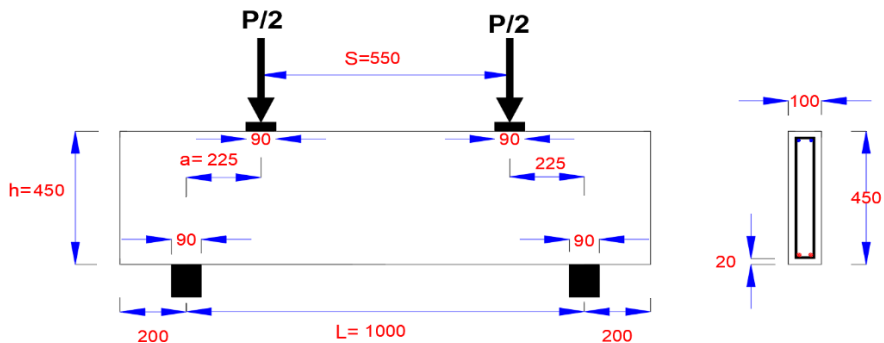
Specimen	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Avg (Kg/m <sup>3</sup> )	Compressive Strength (MPa)	Avg (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Avg (MPa)	Fire condition
S01	۱۷۶۶		۳۷.۲		۲.۶۵		No
S02	۱۸۰۳	۱۷۷۳.۳۳	۳۸.۲۴	۳۷.۸۱	۲.۸۴	۲.۷۸	No
S03	۱۷۵۱		۳۸		۲.۸۶		No
S04	۱۷۱۱		۲۵.۵		۱.۳۶		Yes
S05	۱۷۳۷	۱۷۲۳.۶۷	۲۶.۱	۲۵.۳۳	۱.۶	۱.۴۸	Yes
S06	۱۷۲۳		۲۴.۴		۱.۴۹		Yes

جدول ۳. مشخصات مکانیکی آرماتور فولادی و GFRP.

Steel Rebar	Yield strength (MPa)	۵۴۰
	Ultimate Tensile strength (MPa)	۶۳۷
	Maximum tensile strain (%)	۲۱
	Elastic modulus (GPa)	۲۱۲
GFRP Rebar	Nominal Diameter (mm)	۱۰
	Nominal Area (mm <sup>2</sup> )	۷۱.۲۶
	Ultimate Tensile load (Kn)	۵۹
	Guaranteed Tensile strength (Mpa)	۸۲۷
	Modulus of elasticity (Gpa)	۴۶

### مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، در مجموع چهار نمونه آزمایشگاهی تیر عمیق، شامل دو نمونه با فاصله خاموت ۶ سانتی‌متر و ۲ نمونه با فاصله خاموت ۱۵ سانتی‌متر، در شرایط قبل و بعد از آتش‌سوزی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نمونه‌های DBG6W می‌باشد که فاصله خاموت‌های آن ۶ سانتی‌متر می‌باشد و در دمای معمولی بارگذاری می‌شود. در حالی که DBG6F تیر عمیقی است که فاصله خاموت‌ها ۶ سانتی‌متر می‌باشد و نمونه تحت اثر آتش قرار گرفته است. در همه نمونه‌های آزمایشگاهی، خاموت‌ها و آرماتورهای طولی فشاری (بالای مقطع) فولادی و آرماتورهای کششی (پایین مقطع) از جنس GFRP هستند. مشخصات آرماتوربندی نمونه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴، نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق دارای ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع مقطع ۴۵۰ میلی‌متر و طول خالص ۱۴۰۰ میلی‌متر با نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۲.۰۲ هستند که پوشش بتن در همه آنها ۲۰ میلی‌متر است.

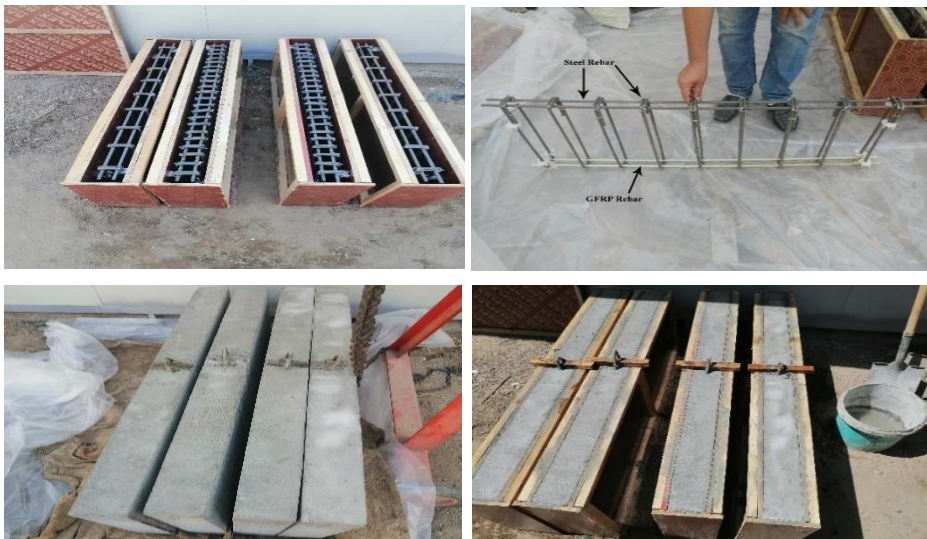


شکل ۴. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق.

جدول ۴. جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق.

Beam Specimen	Reinforcement		Traversal Bars (Steel rebar)	Fire Condition
	Top (Steel rebar)	Bottom (GFRP rebar)		
DBG6W	۲Φ۱۰	۲Φ۱۰	Φ۱۰@۶۰	No
DBG6F	۲Φ۱۰	۲Φ۱۰	Φ۱۰@۶۰	Yes
DBG15W	۲Φ۱۰	۲Φ۱۰	Φ۱۰@۱۵۰	No
DBG15F	۲Φ۱۰	۲Φ۱۰	Φ۱۰@۱۵۰	Yes

شکل ۵، مراحل ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق را نشان می‌دهد. برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، ابتدا آرماتوربندی سپس قالب‌بندی و بتن ریزی انجام می‌شود. در نهایت نمونه‌های آزمایشگاهی به منظور عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز در آب با دمای  $20 \pm 2$  درجه سلسیوس نگهداری می‌شوند.



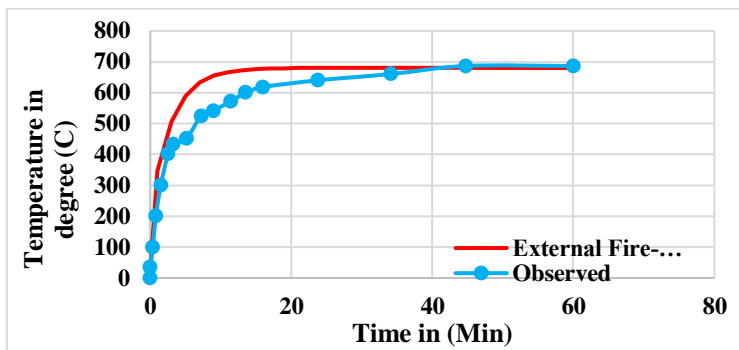
شکل ۵. مراحل ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق.

### مشخصات کوره و نحوه اعمال حرارت

پس از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق، برای بررسی اثر حرارت، نمونه‌ها در کوره قرار می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، شعله‌های کوره طوری تنظیم شده‌اند که فقط از زیر تیر حرارت اعمال می‌شود. نرخ افزایش حرارت در کوره با استفاده از ترموکوپل نصب شده در کوره، ثبت می‌شود. در این پژوهش سعی شده است، مطابق با نمودار زمان-حرارت استاندارد ASTM E119 [۲۹] بار حرارتی به نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق اعمال شود. در شکل ۷، نمودار زمان-حرارت اعمال شده به نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۶. نمایش کوره و نحوه قرارگیری نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق در کوره



شکل ۷. نمودار زمان-حرارت استاندارد ASTM E119 [۲۹] و مدل‌های آزمایشگاهی

#### ۴-۲- مشخصات ستاپ آزمایشگاهی

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، تکیه‌گاهها به صورت ساده هستند و بارگذاری به صورت دو نقطه‌ای و متقارن اعمال می‌شود. به این صورت که بار جک به وسیله یک مقطع I شکل کاملاً صلب، به وجه فوقانی تیر منتقل می‌گردد. جهت جلوگیری از خرابی موضعی نمونه‌های آزمایشگاهی، در محل اعمال بار و تکیه‌گاهها پلیتهای فولادی به عرض ۹۰ میلیمتر و طول ۱۰۰ میلیمتر استفاده می‌شود. مقدار نیروی اعمالی جک با استفاده از لودسل (spoke type DYLF-102 high precision weighing) و دستگاه دیتالایگر و مقدار جابجایی تیر با استفاده از جابجایی سنج‌ها (LVDT) که در زیر تیر نصب شده اند، استخراج می‌گردد.

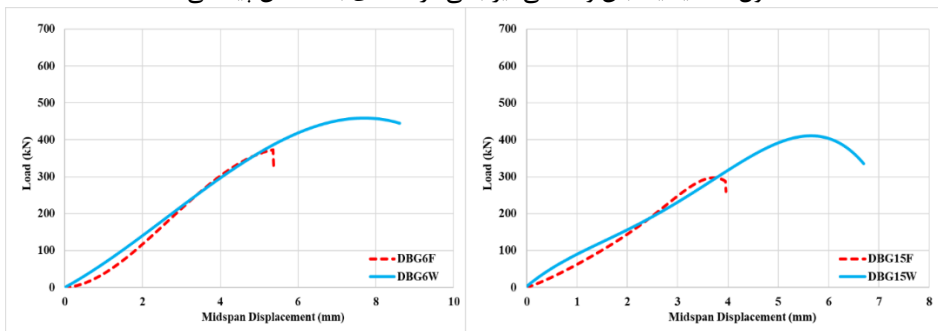


شکل ۸. ستاپ آزمایشگاهی برای تست نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق.

## بحث و بررسی نتایج آزمایشگاهی

### نمودار بار-جابجایی

در شکل ۹ نمودار بار-جابجایی نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق بتن سبک مسلح شده با GFRP نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آتش‌سوزی سبب کاهش سختی اولیه نمونه‌های آزمایشگاهی می‌شود. در نمونه‌های با فاصله خاموت‌های ۱۵۰ میلی‌متر، بعد از در معرض آتش قرار گرفتن سختی اولیه ۳۰.۳ درصد کاهش می‌یابد و در نمونه‌های با فاصله ۶۰ میلی‌متری سختی اولیه نزدیک به صفر می‌شود. به نظر می‌رسد علت این کاهش سختی اولیه، کاهش مدول الاستیسیته و مقاومت بتن در اثر افزایش حرارت است، به همین صورت در تحقیقات دیگری نیز نشان داده شده است که مدول الاستیسیته بتن و سختی تیر بتنی در دماهای بالا کاهش پیدا می‌کند [۳۰-۳۲].



(ب)

(الف)

شکل ۹. نمودار بار-جابجایی نمونه‌های آزمایشگاهی (الف) DBG۱۵F و DBG۱۵W (ب) DBG۶F و DBG۶W.

بر اساس شکل ۹، به دلیل کاهش مشخصات مکانیکی بتن سبک و آرماتور GFRP، آتش‌سوزی باعث کاهش سطح زیر نمودار بار-جابجایی می‌شود، در حالی که کاهش فاصله خاموت‌ها از ۱۵۰ به ۶۰ میلی‌متر، به علت افزایش محصورشدگی

سبب افزایش سطح زیر نمودار بار-جابجایی می‌شود. در واقع کاهش فاصله خاموت‌ها سبب افزایش ظرفیت باربری و تغییر شکل بیشتری می‌شود در حالی که آتش‌سوزی اثر معکوس دارد.

### بار نهایی و بار ترک خوردگی

بر اساس جدول ۵ که مقادیر بار نهایی و بار ترک‌خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است، آتش‌سوزی باعث کاهش بار نهایی قابل تحمل نمونه‌های آزمایشگاهی می‌شود. به گونه‌ای که در نمونه آزمایشگاهی با فاصله خاموت ۶۰ میلی‌متر، آتش‌سوزی باعث افت بار نهایی از ۴۶۳.۴۷ به ۳۶۱.۳ کیلونیوتن می‌شود و در نمونه آزمایشگاهی با فاصله خاموت ۱۵۰ میلی‌متر، به سبب آتش‌سوزی افت بار نهایی از ۴۱۵.۹۷ به ۳۰۳.۰۴ کیلونیوتن تقلیل می‌یابد. به عبارت دیگر در نمونه آزمایشگاهی با فاصله خاموت ۶۰ و ۱۵۰ میلی‌متر، آتش‌سوزی به ترتیب باعث کاهش ۲۲ و ۲۷ درصدی بار نهایی می‌شود. دلایل افت بار نهایی در اثر آتش‌سوزی، تغییر شیمیایی خمیر سیمان و سنگدانه‌ها، انبساط و انقباض بین سنگدانه‌ها، افزایش فشار بخار آب و پوسته‌شدگی و ترک‌خوردگی بتن می‌تواند باشد [۳۳]. همچنین طبق تحقیقات سن<sup>۱</sup> و همکاران [۳۴] در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس، مقاومت کششی GFRP حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. در تیر عمیق با فاصله خاموت ۶۰ میلی‌متر، بعد از آتش‌سوزی مقدار افت بار نهایی کمتر از تیر با فاصله خاموت ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. علت این پدیده می‌تواند ناشی از اثر خاموت‌ها در کنترل گسترش ترک‌هایی باشد که از پوسته شدن بتن در معرض آتش قرار گرفته، ایجاد می‌شود [۳۵؛ ۳۶]. طبق نتایج این پژوهش، کاهش فاصله خاموت‌ها از ۱۵۰ به ۶۰ میلی‌متر، در شرایط قبل از آتش‌سوزی با توجه به افزایش محصورشدگی بتن موجب افزایش بار نهایی از ۴۱۵.۹۷ به ۴۶۳.۴۷ کیلونیوتن یا در واقع افزایش ۱۰ درصدی بار نهایی می‌شود.

در جدول ۵ مقدار بار نهایی قابل تحمل برای نمونه‌ها بر اساس آیین نامه ACI318-11 [۳۷] محاسبه شده است. با توجه به بارگذاری دو نقطه‌ای نمونه‌ها، مقدار بار نهایی از دو برابر کردن ظرفیت برشی تیرهای عمیق به دست می‌آید. رابطه موجود در آیین نامه ACI [۳۷] بر اساس آزمایش‌های تجربی زیادی ارائه شده است. بر اساس روابط ارائه شده، مقاومت برشی اسمی تیرهای عمیق با نسبت طول دهانه به ارتفاع بین ۲ و ۵ مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود و این مقدار با اثر مقاومت برشی خاموت‌ها جمع می‌شود. در مطالعات پیشین موارد محاسبه شده توسط این آیین نامه نتایجی محافظه کارانه داشته است [۳۸؛ ۳۹]. در این تحقیق بار تحمل شده توسط نمونه‌ها در آزمایشگاه کمتر از مقدار محاسبه شده توسط آیین نامه ACI [۳۷] می‌باشد، که این نتیجه می‌تواند ناشی از ضعیف‌تر بودن در هم قفل‌شدگی بتن سبک و کمتر بودن ظرفیت کششی آرماتورهای GFRP باشد.

$$V_n = \frac{2}{3} \left(10 + \frac{l_n}{d}\right) \sqrt{f_c'} b_w d \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $V_n$  مقاومت برشی اسمی تیر عمیق،  $d$  عمق مؤثر مقطع،  $l_n$  طول خالص دهانه،  $b_w$  عرض تیر و  $f_c'$  مقاومت فشاری بتن می‌باشد. این رابطه بر اساس واحد اینچ-پوند است که باید از تبدیلات مناسب استفاده شود. با محاسبه مقاومت برشی تیرهای عمیق با استفاده از مدل استرات اند تای<sup>۲</sup> ارائه شده در آیین نامه ACI [۳۷] مشاهده می‌شود که مقاومت تای محدود کننده می‌باشد. پاره‌شدن میلگردهای GFRP در آزمایشگاه که تحت کشش قرار می‌گیرند و در شکل ۱۰ نشان داده شده است، می‌تواند تاییدی بر محاسبات باشد. بار نهایی به دست آمده برای نمونه‌ها از روش استرات اند تای در جدول ۵ ارائه گردیده است [۴۰].

<sup>1</sup> Sen

<sup>2</sup> Strut and Tie

بر اساس اطلاعات جدول ۵، آتش سوزی سبب کاهش بار ترک خوردگی و همچنین کاهش فاصله آرماتورها سبب افزایش بار ترک خوردگی می‌شود.

جدول ۵. مقادیر بار نهایی (آزمایشگاهی، ACI و Strut and Tie) و بار حد ترک خوردگی.

Specimen	Cracking Load (KN)	Ultimate load experimental (KN)	Ultimate load ACI (KN)	Ultimate load Strut and Tie (KN)
DBG۱۵W	۷۰	۴۱۵.۹۷	۴۷۸.۷۶	۴۴۴.۲
DBG۱۵F	۶۰	۳۰۳.۰۴	-	-
DBG۶W	۱۲۰	۴۶۳.۴۷	۶۷۰.۱	۵۴۴.۸
DBG۶F	۱۰۰	۳۶۱.۳	-	-

### تغییر شکل (خیز)

در این تحقیق، مقدار تغییر شکل نمونه‌ها در لحظه ایجاد ترک خوردگی و در لحظه شکست در جدول ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش فاصله خاموت‌ها از ۱۵۰ mm به ۶۰ mm در دمای معمولی و بعد از آتش سوزی به ترتیب باعث افزایش تغییر شکل وسط دهانه تیر به میزان ۲۸ درصد و ۳۱ درصد می‌شود. همچنین در نمونه‌های با فاصله خاموت ۱۵۰ mm حرارت ناشی از آتش باعث کاهش تغییر شکل وسط دهانه تیر به میزان ۴۰.۸ درصد می‌شود و این مقدار برای نمونه‌های با فاصله خاموت ۶۰ mm برابر با ۳۹.۷ درصد می‌باشد. بر این اساس آتش سوزی سبب کاهش تغییر شکل تیرها می‌شود و نمونه‌ها شکست تردتری را نشان می‌دهند که این نتایج با پژوهش‌های دیگر نیز سازگاری دارد [۱۵؛ ۴۱].

جدول ۶. مقادیر تغییر شکل نمونه‌های آزمایشگاهی.

Specimen	Mid-span cracking deflection (mm)	Mid-span failure deflection (mm)
DBG۱۵W	۰.۸۱	۶.۷
DBG۱۵F	۰.۹۶	۳.۹۶
DBG۶W	۱.۷۲	۸.۶۱
DBG۶F	۱.۸۷	۵.۱۹

### الگوی ترک خوردگی و مد شکست

در شکل ۱۱، الگوی ترک خوردگی و مد شکست نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق بتن سبک مسلح شده با GFRP را نشان می‌دهد. در نمونه DBG۱۵W، شکل ۱۱-الف، اولین ترک مویی مایلی در بار ۷۰ کیلونیوتن و در قسمت کششی در اطراف تکیه‌گاه مشاهده ایجاد می‌شود. به تدریج ترک‌های مویی اطراف تکیه‌گاه رشد و گسترش پیدا می‌کنند. در بار ۱۲۰ کیلونیوتن ترکی دیگر در وسط دهانه تیر مشاهده می‌شود. با افزایش بار اعمالی، عرض ترک‌های اطراف تکیه‌گاه بیشتر شده تا در نهایت در راستای تکیه‌گاه به سمت محل بارگذاری، بتن کامل خرد و هم‌زمان با آن آرماتورهای GFRP دچار شکست می‌شود، شکل ۱۰، و گسیختگی نمونه آزمایشگاهی به صورت برشی اتفاق می‌افتد. پس از بارگذاری این نمونه، اولین ترک مویی در بار ۶۰ کیلونیوتن و در وسط دهانه نمونه اتفاق می‌افتد. با افزایش بار وارد بر آن، عرض ترک‌ها در این ناحیه بیشتر می‌شود و ترک‌ها به سمت تکیه‌گاه‌ها گسترش پیدا می‌کنند. شایان

توجه است که شکست<sup>۱</sup> نمونه در وسط دهانه تیر رخ داده است و قبل از این که تیر عمیق به ظرفیت برشی خود برسد گسیخته<sup>۲</sup> می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حرارت ناشی از آتش سبب تغییر مود شکست از برشی به خمشی در تیر عمیق با بتن سبک می‌شود. در نهایت در بار ۳۰۳ کیلونیوتن، این نمونه دچار گسیختگی خمشی می‌شود. لازم به ذکر است که در این نمونه در لحظه گسیختگی کامل تیر، آرماتور طولی GFRP نیز دچار شکست شده است.



شکل ۱۰. گسیختگی آرماتور GFRP در نمونه DBG15W

همان‌طور که در شکل ۱۱-ج نشان داده شده است، پس از بارگذاری نمونه DBG6W، در راستای تکیه‌گاه به سمت محل بارگذاری، در ابتدا ترک‌های مویی مشاهده می‌شود و با افزایش بار اعمالی، از سمت تکیه‌گاه کرنش فشاری بتن افزایش می‌یابد تا این که در بار ۴۶۰ کیلونیوتن بتن در نواحی تکیه‌گاهی خرد می‌شود و نمونه آزمایشگاهی دچار گسیختگی برشی می‌شود. در این نمونه در لحظه گسیختگی نمونه آزمایشگاهی، آرماتور GFRP دچار گسیختگی نشده است.

قبل از بارگذاری نمونه DBG6F، شکل ۱۱-د و بعد از خنک‌سازی آن، در سطح رویه نمونه پوسته‌شدگی و همچنین در قسمت پایین مقطع نمونه آزمایشگاهی ترک‌هایی مشاهده می‌شود که مقدار و شدت آن کمتر از نمونه آزمایشگاهی DBG15F می‌باشد. به نظر می‌رسد علت کاهش آسیب‌های وارده، کاهش فاصله بین آرماتورهای عرضی باشد. پس از بارگذاری این نمونه آزمایشگاهی، اولین ترک در وسط دهانه تیر رخ می‌دهد و با افزایش بار اعمالی عرض ترک افزایش می‌یابد و ترک‌های دیگری از قسمت کششی نزدیک تکیه‌گاه‌ها به صورت قطری شروع به رشد و گسترش می‌نمایند. تا در نهایت در بار ۳۶۰ کیلونیوتنی این نمونه آزمایشگاهی، دچار گسیختگی خمشی می‌شود. در این نمونه هم‌زمان با گسیختگی، آرماتور GFRP نیز دچار شکست می‌شود. بنابراین مشاهدات انجام گرفته بر روی هر دو نوع تیر با فواصل خاموت متفاوت نشان می‌دهد که مود شکست تیر عمیق بتن سبک مورد مطالعه در این تحقیق به دلیل حرارت ناشی از آتش از مود برشی به مود خمشی تغییر می‌یابد.

بر اساس شکل ۱۱، آتش‌سوزی باعث تغییر مود خرابی از برشی به خمشی شده که به نظر می‌رسد علت آن این است که در اثر بخار آب موجود در فضای متخلخل بتن، پدیده پوسته‌شدگی رخ داده و همچنین با بالا رفتن حرارت، در نمونه‌های آزمایشگاهی تمایل به انبساط به وجود آمده و در نتیجه کرنش‌های حرارتی سبب ترک‌خوردگی بتن می‌گردد [۴۲؛ ۴۳]. همچنین افت مقاومت کششی و فشاری بتن به علت حرارت ناشی از آتش بر روی تیرهای مورد مطالعه سبب تغییر مود گسیختگی می‌شوند.

<sup>1</sup> fracture

<sup>2</sup> failure

همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، نمونه هایی که پس از آتش سوزی تست شده اند، همزمان با گسیختگی، آرماتورهای طولی نیز دچار شکست می شوند که به نظر می رسد علت آن افت مشخصات مکانیکی آرماتورهای GFRP در اثر افزایش حرارت و همچنین جداشدگی آرماتور GFRP از بتن سبک و یا کاهش چسبندگی بین آرماتور GFRP و بتن سبک در اثر آتش سوزی است. علت جداشدگی میلگردها از بتن در آتش سوزی، این است که به دلیل نفوذ ناپذیری ناحیه اطراف میلگردها فشار بخار آب در این ناحیه بسیار بالا می رود و در نتیجه این ناحیه مستعد جداشدگی و ترک خوردگی شعاعی می شود [۴۳].



(الف)

(ب)



(ج)

(د)

شکل ۱۱. مد گسیختگی نمونه آزمایشگاه تیر عمیق (الف) DBG۱۵W (ب) DBG۱۵F (ج) DBG۶W (د) DBG۶F

### نتیجه گیری

در این تحقیق، هدف اصلی بررسی اثر آتش سوزی بر رفتار تیر عمیق بتن سبک مسلح شده به آرماتور GFRP بوده است. برای این منظور ۴ نمونه آزمایشگاهی تیر عمیق، شامل ۲ نمونه با فاصله خاموت ۶۰ میلیمتر و ۲ نمونه با فاصله خاموت ۱۵۰ میلیمتر ساخته شده است که مشخصات هندسی نمونه ها یکسان بوده فقط تفاوت آنها فاصله خاموت ها می باشد. نمونه ها در شرایط قبل و بعد از آتش سوزی با آزمایش چهار نقطه ای بارگذاری می شوند. برای آزمایش نمونه ها بعد از شرایط آتش سوزی، ابتدا آنها را در کوره مطابق با استاندارد ASTM E۱۱۹ [۲۹] حرارت داده و بعد از رسیدن دمای نمونه ها به دمای محیط مورد آزمایش قرار می گیرند. نتایج این پژوهش به صورت خلاصه به شرح زیر است:

- در اثر افزایش حرارت آتش تا حدود ۶۸۰ درجه سلسیوس، مقاومت فشاری نمونه های مکعبی از ۳۷.۸۱ به ۲۵.۳۳ مگاپاسکال کاهش می یابد یعنی حدود ۳۳ درصد دچار افت می شوند. همچنین مقاومت کششی نمونه های استوانه ای از ۲۰.۷۸ به ۱۰.۴۸ مگاپاسکال به عبارت بهتر حدود ۴۷ درصد کاهش می یابد.

- ۲- در نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق، افزایش حرارت سبب کاهش سختی نمونه با فاصلهٔ خاموت ۱۵۰ میلی‌متر به اندازهٔ ۳۰.۳ درصد می‌شود. نمونه با فاصلهٔ خاموت ۶۰ میلی‌متر بعد از در معرض آتش قرار گرفتن سختی اولیه نزدیک به صفر را نشان می‌دهد.
- ۳- در نمونهٔ آزمایشگاهی با فاصلهٔ خاموت ۶۰ میلی‌متر، آتش‌سوزی باعث افت بار نهایی از ۴۶۳.۴۷ به ۳۶۱.۳ کیلونیوتن می‌شود و در نمونهٔ آزمایشگاهی با فاصلهٔ خاموت ۱۵۰ میلی‌متر، باعث افت بار نهایی از ۴۱۵.۹۷ به ۳۰۳.۰۴ کیلونیوتن می‌شود. به عبارت بهتر، به دلیل آسیب‌هایی نظیر انقباض و انقباض سنگدانه‌ها، افزایش فشار بخار آب و پوسته‌شدگی و کاهش مشخصات مکانیکی آرماتور GFRP در اثر آتش‌سوزی، بار نهایی تیرهای عمیق با فاصلهٔ خاموت ۶۰ و ۱۵۰ میلی‌متر، به ترتیب ۲۲ و ۲۷ درصد کاهش می‌یابند.
- ۴- آتش‌سوزی در نمونه‌های با فاصلهٔ خاموت ۱۵۰ mm و ۶۰ mm به ترتیب باعث کاهش تغییر شکل وسط دهانه تیر به میزان ۴۰.۸ درصد و ۳۹.۷ درصد می‌شود.
- ۵- آتش‌سوزی سبب تغییر مود گسیختگی نمونه‌های آزمایشگاهی تیر عمیق، از برشی به خمشی می‌شود.
- ۶- در نمونه‌های با فاصلهٔ خاموت کمتر، بار نهایی قابل تحمل بیشتر می‌باشد همچنین آسیب کمتری پس از آتش‌سوزی در آنها مشاهده می‌شود. بنابراین کاهش فاصلهٔ خاموت‌ها، سبب بهبود رفتار تیر عمیق بتن مسلح سبک مسلح شده با GFRP در شرایط قبل و بعد از آتش‌سوزی می‌شود.

## References

- [1] Miah, M. J., Lo Monte, F., Felicetti, R., Pimienta, P., Carré, H., & La Borderie, C. (2023). Impact of external biaxial compressive loading on the fire spalling behavior of normal-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 366, 130264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130264>
- [2] Liu, C., Zhou, B., Guo, X., Liu, C., & Wang, L. (2023). Analysis and prediction methods for the static properties of reinforced concrete beams under fire. *Structures*, 47, 2319-2330. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.041>
- [3] Qin, H., Yang, J., Yan, K., Doh, J-H., Wang, K., & Zhang, X. (2021). Experimental research on the spalling behaviour of ultra-high performance concrete under fire conditions. *Construction and Building Materials*, 303, 124464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124464>
- [4] Hasani, S. M. R., & Nematzadeh, M. (2022). Compressive Behavior and Durability of Concrete Containing Waste Aggregates as A Replacement of Coarse Aggregates and Marble Powder as a Replacement of Cement. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 19(1), 83-105. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.314386.1831>
- [5] American Concrete Institute. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (ACI 318-14). ACI. [https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U14&Language=English&Units=US\\_Units](https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U14&Language=English&Units=US_Units)
- [6] Salami, M., Kobayashi, H., & Unjoh, S. (2005). Experimental and analytical study on RC deep beams. *Asian Journal Of Civil Engineering*, 6(5), 409-421. <https://ajce.bhrc.ac.ir/Volumes-Issues/agentType/View/PropertyID/7675>
- [7] Russo, G., Venir, R., & Pauletta, M. (2005). Reinforced concrete deep beams-shear strength model and design formula. *American Concrete Institute Structural Journal*, 102(3), 429. <https://trid.trb.org/View/756124>
- [8] Farghaly, A. S., & Benmokrane, B. (2013). Shear Behavior of FRP-Reinforced Concrete Deep Beams without Web Reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 17(6), 04013015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000385](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000385)

- [9] Abbas, Y. M., Tuken, A., & Siddiqui, N. A. (2022). Improving the structural behavior of shear-deficient RC deep beams using steel fibers: Experimental, numerical and probabilistic approach. *Journal of Building Engineering*, 46, 103711. <https://doi.org/10.1016/j.jbe.2021.103711>
- [10] Mustafa, T. S., Beshara, F. B. A., Abd El-Maula, A. S., & Fathi, M. G. (2023). Strut-and-tie model for FRP effectiveness in shear strengthening of RC deep beams. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(1), 593-608. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2056248>
- [11] Kulkarni, S., & Halkude, S. (2022). Experimental Investigation on Hybrid Fibre-Reinforced Concrete Deep Beams. *Journal of algebraic statistics*, 13(3), 2889-2897. <https://www.publishoa.com/index.php/journal/article/view/963>
- [12] Pochinok, V. P., Greshkina, E. V., & Tamov, M. M. (2022). Finite Element Modeling of Complexly Stressed Reinforced Concrete Structures. In N. Vatin, S. Roshchina, & D. Serdjuks (Eds.), *Proceedings of Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering 2021* (pp. 161-171). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_13)
- [13] Alqarni, A. S., Albidah, A. S., & Abadel, A. A. (2022). Shear performance of reinforced concrete deep beams using different coarse aggregates under the effect of elevated temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01087. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01087>
- [14] Fan, S., Tan, K. H., & Nguyen, M. P. (2018). Numerical Model to Determine Shear Capacity of Reinforced Concrete Deep Beams Exposed to Fire. In D. A. Hordijk & M. Luković (Eds.), *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet* (pp. 1410-1419). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2\\_162](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_162)
- [15] Albu-Hassan, N. H., & Al-Thairy, H. (2020). Experimental and numerical investigation on the behavior of hybrid concrete beams reinforced with GFRP bars after exposure to elevated temperature. *Structures*, 28, 537-551. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.079>
- [16] Fan, S., Zhang, Y., & Tan, K. H. (2020). Experimental and analytical studies of reinforced concrete short beams at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 212, 110445. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110445>
- [17] Al-Rousan, R. Z. (2021). Impact of elevated temperature and anchored grooves on the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP composites. *Case Studies in Construction Materials*, 14(2), e00487. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00487>
- [18] Dabbaghi, F., Yang, T. Y., Tanhadoust, A., Emadi, S. B., Dehestani, M., & Yousefpour, H. (2022). Experimental and numerical investigation on post-fire seismic performance of light weight aggregate reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 268(3), 114791. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114791>
- [19] Nassif, M. K., Erfan, A. M., Fadel, O. T., & El-sayed, T. A. (2021). Flexural behavior of high strength concrete deep beams reinforced with GFRP bars. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00613. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00613>
- [20] Ibrahim, M., Wakjira, T., & Ebead, U. (2020). Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using near-surface mounted hybrid carbon/glass fibre reinforced polymer strips. *Engineering Structures*, 210, 110412. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110412>

- [21] Hason, M. M., Hanoon, A. N., Saleem, S. J., Hejazi, F., & Al Zand, A. W. (2021). Characteristics of experimental ductility energy index of hybrid-CFRP reinforced concrete deep beams. *Springer Nature Applied Sciences*, 3(2), 200. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04202-6>
- [22] Kumari, A., & Nayak, A. N. (2021). An experimental approach for strengthening of RC deep beams with web openings using GFRP fabrics and gas actuated fasteners. *Journal of Building Engineering*, 35(1), 102027. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102027>
- [23] Vakili, S. E., Homami, P., & Esfahani, M. R. (2019). Effect of fibers and hybrid fibers on the shear strength of lightweight concrete beams reinforced with GFRP bars. *Structures*, 20(2), 290-297. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.006>
- [24] Nawaz, W., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Alajmani, H. S., Abuzayed, I. H., Ataya, H., & Mohamed, H. A. (2019). Experimental study on the shear strength of reinforced concrete beams cast with Lava lightweight aggregates. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(4), 981-996. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.05.003>
- [25] Alshannag, M. J., & Alshenawy, A. O. (2021). Enhancing the flexural performance of lightweight reinforced concrete beams exposed to elevated temperatures. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2575-2583. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.020>
- [26] Nawaz, W., Elchalakani, M., Yehia, S., Xie, T., Liu, H., Yang, B., & Guo, X. (2023). Shear strengthening performance of GFRP reinforced lightweight SCC beams: Experimental and analytical study. *Engineering Structures*, 278, 115545. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115545>
- [27] American Society for Testing and Materials. (2006). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates* (ASTM C136-06). ASTM. <https://www.astm.org/c0136-06.html>
- [28] American Society for Testing and Materials. (2012). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field* (ASTM C31/C31M-10). ASTM. [https://www.astm.org/c0031\\_c0031m-10.html](https://www.astm.org/c0031_c0031m-10.html)
- [29] American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials* (ASTM E119-18ce1). ASTM. <https://www.astm.org/e0119-18ce01.html>
- [30] Jeyashree, T. M., Kannan Rajkumar, P. R., & Satyanarayanan, K. S. (2022). Developments and research on fire response behaviour of prestressed concrete members – A review. *Journal of Building Engineering*, 57(4), 104797. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104797>
- [31] Saleheen, Z., Krishnamoorthy, R. R., & Nadjai, A. (2022). A review on behavior, material properties and finite element simulation of concrete tunnel linings under fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 126, 104534. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104534>
- [32] Moharrer, A., Gholhaki, M., Rezaeifar, O., & Kheyroddin, A. (2021). Examining the Impact of Magnetic Field on Compressive Strength of Cement Paste with Quartz Aggregate and Zeolite. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 18(Special Issue 1), 151-166. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.132815>
- [33] Akca, A. H., & Özyurt, N. (2020). Post-fire mechanical behavior and recovery of structural reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 253, 119188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119188>

- [34] Sen, R., Mariscal, D., & Shahawy, M. (1993). Investigation of S-2 glass/epoxy strands in concrete. *Special Publication*, 138, 15-34. <https://www.concrete.org/restrictedcount ry.aspx>
- [35] Xu, X., & Zhao, Y. (2021). Corrosion-induced cracking propagation of RC beams subjected to different corrosion methods and load levels. *Construction and Building Materials*, 286, 122913. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122913>
- [36] Shang, X-Y., Yu, J-T., Li, L-Z., & Lu, Z-D. (2020). Shear strengthening of fire damaged RC beams with stirrup reinforced engineered cementitious composites. *Engineering Structures*, 210(1), 110263. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110263>
- [37] American Concrete Institute. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (ACI 318-11). ACI. [https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U11&Language=English&Units=US\\_Units](https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U11&Language=English&Units=US_Units)
- [38] Hussein, G., Sayed, S. H., Nasr, N. E., & Mostafa, A. M. (2018). Effect of loading and supporting area on shear strength and size effect of concrete deep beams. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 2823-2831. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.11.002>
- [39] Oh, J-K., & Shin, S-W. (2001). Shear strength of reinforced high-strength concrete deep beams. *Structural Journal*, 98(2), 164-173. [https://www.researchgate.net/publication/292665076\\_Shear\\_strength\\_of\\_reinforced\\_high-strength\\_concrete\\_deep\\_beams](https://www.researchgate.net/publication/292665076_Shear_strength_of_reinforced_high-strength_concrete_deep_beams)
- [40] Arabzadeh, A., Rahaei, A., & Aghayari, R. (2009). A simple strut-and-tie model for prediction of ultimate shear strength of RC deep beams. *International Journal of Civil Engineering*, 7(3), 141-153. <https://www.iust.ac.ir/ijce/article-1-285-en.html>
- [41] Abdulrahman, A. S., & Kadir, M. R. A. (2021). Behavior and flexural strength of fire-damaged high-strength reinforced rectangular concrete beams with tension or compression zones exposed to fire repaired with CFRP sheets. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00779. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00779>
- [42] Ganasini, D., Effting, C., Schackow, A., & Gomes, I. R. (2022). High-Performance Concrete with Polypropylene Microfibers for Fire Safety. *American Concrete Institute Structural Journal*, 119(4), 197-209. <https://doi.org/10.14359/51734652>
- [43] Anderberg, Y., & Thelandersson, S. (1976). *Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures. 2. Experimental investigation and material behaviour model*. Lund Institute of Technology. <https://portal.research.lu.se/en/publications/stress-and-deformation-characteristics-of-concrete-at-high-temper>