

Investigation of the Behavior of Reinforced Concrete Cylinders with Glass Fibers Under High Temperatures

Golriz Gharaei (MSc. Student, Department of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran)

Amir Darvishi (MSc. Student, Department of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran)

Hadi Ziaadiny (Assistant Professor, Department of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran)

Amirhosein Raisszadeh (Assistant Professor, Department of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran)

1- Introduction

Concrete is recognized as one of the most widely used construction materials in civil engineering projects, yet it becomes vulnerable under special conditions, particularly when exposed to fire and elevated temperatures, which can significantly reduce its strength. Elevated temperature may lead to the degradation of cement paste bonds, the development of thermal cracks, spalling of concrete, and ultimately a reduction in the load-bearing capacity of the structure. Demolition or reconstruction of such damaged structures is not only costly but also time-consuming and poses various execution challenges. In recent years, fiber-reinforced polymers (FRP) have emerged as an efficient and economical method for repairing and strengthening concrete structures. Due to their advantages such as high tensile strength, durability, light weight, and resistance to corrosion, FRP composites have been considered a suitable alternative to traditional methods like steel and concrete jacketing, showing successful results in strengthening columns, bridges, and other structural elements. Nevertheless, the main limitation of FRP lies in its poor performance under high temperatures, since the polymer resins used in these systems lose their mechanical properties above the glass transition temperature, leading to reduced adhesion between the fibers and concrete. Numerous studies have shown that at temperatures above 200–300 °C, the strength of FRP-strengthened members decreases significantly. Therefore, a thorough understanding of the behavior

of FRP-confined concrete under elevated temperatures is essential for safe design and operation.

2- Materials and Methods

In this study, twelve standard cylindrical concrete specimens with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm were prepared. The mix design was based on ACI-211 guidelines, targeting a compressive strength of 35 MPa at 28 days. The concrete mixture consisted of Type II Portland cement, crushed river gravel with uniform grading, washed sand free of impurities, and potable water. The water-to-cement ratio was set at 0.51 to achieve both adequate workability and desirable strength. After casting into standard cylindrical molds, the specimens were kept in laboratory conditions for 24 hours, followed by curing in water at a constant temperature of 23 °C for 28 days.

After curing, the specimens were prepared for GFRP confinement. The surface of the concrete was roughened using a grinder and steel brush to enhance the bond between the epoxy resin and concrete, then thoroughly cleaned and dried. Glass fiber sheets (GFRP) with a tensile strength of 2300 MPa, modulus of elasticity of 90 GPa, and ultimate strain of 3.9% were used for confinement. A two-part epoxy resin with a compressive strength of 60 MPa and tensile strength above 45 MPa was applied as adhesive. The fibers were applied using the hand lay-up wet method: first, a layer of resin was applied to the specimen surface, then the GFRP sheet was wrapped circumferentially with a defined overlap. After ensuring uniform coverage and removing air bubbles, a second layer was applied in the same manner. The specimens were left at laboratory temperature for seven days to allow complete curing of the epoxy resin and to ensure the FRP system achieved its full strength.

The specimens were divided into four groups: one control group (no heating) and three groups exposed to elevated temperatures of 100, 200, and 300 °C. Heating was performed in an electric oven with precise temperature control. The heating rate was set at 2.5 °C per minute to avoid thermal shock. Each specimen was maintained at the target temperature for one hour, followed by gradual cooling inside the oven to simulate real fire exposure and natural cooling after extinguishment.

Compressive strength tests were conducted in accordance with ASTM C39. A hydraulic loading machine of adequate capacity was used to apply axial compressive load until failure occurred. During testing, axial load and deformation were continuously recorded using precise sensors and LVDTs, with data transferred to a computer system. This allowed plotting of stress–strain curves and calculation of mechanical parameters including ultimate compressive strength, failure strain, and modulus of elasticity. To ensure reliability, all tests were performed under consistent conditions, and average values were considered for final analysis.

3- Results

The experimental results indicated that confinement with GFRP sheets significantly improved the stress–strain behavior of concrete. Compared to unconfined specimens, the confined specimens exhibited steeper ascending branches in their stress–strain curves. These curves consisted of parabolic and linear portions, with the linear section reducing and the transition point shifting as temperature increased. On average, confinement improved the compressive strength of specimens by about 11.54%. However, elevated temperatures had a negative effect on this strength: reductions of 1.45% at 100 °C and 7.89% at 200 °C were observed, while at 300 °C a slight increase of 2.18% compared to the control was recorded.

Axial strain generally decreased with temperature. At 100 °C, axial strain was 2.81% lower, and at 300 °C it was reduced by 24.6% compared with the control specimen. Interestingly, at 200 °C a 6.24% increase was observed. The initial modulus of elasticity decreased by 5%, 15%, and 20% at 100, 200, and 300 °C respectively, while the secondary modulus showed considerable increases of 1.7%, 76%, and 54% under the same conditions. Finally, a strength modification factor was proposed for confined specimens under different thermal conditions, enabling estimation of the behavior of FRP-confined concrete at elevated temperatures.

4- Conclusion

The present study demonstrated that confinement with GFRP sheets improves the compressive strength and overall mechanical behavior of concrete, with confined specimens performing better than unconfined ones under all conditions. However, elevated temperatures negatively affected

compressive strength and axial strain, reducing ductility. The greatest reduction was observed at 200 °C, whereas between 200 and 300 °C a slight strength recovery occurred due to structural changes in the cement matrix and moisture loss. Modulus of elasticity results showed that confined concrete undergoes behavioral changes under heat, with the initial modulus decreasing but the secondary modulus increasing. Given the sensitivity of polymer resins to temperature and the inherent weakness of FRP under fire exposure, the use of these materials in fire-prone structures requires special considerations and reduction factors in design. Overall, it can be concluded that GFRP confinement is highly effective under normal conditions but has performance limitations at elevated temperatures, which must be carefully addressed in fire-resistant structural design.

بررسی رفتار استوانه های بتنی تقویت شده با الیاف شیشه تحت دماهای های بالا

گلریز قزایی^۱، امیر درویشی^۲، هادی ضیاءالدینی دشتخاکی^۳، امیر حسین رئیس زاده^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

چکیده

یکی از بهترین روش های ترمیم و تقویت اعضای سازه های بتن آرمه استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف تحت عنوان FRP¹ است. این پلیمرهای تقویت شده به دلیل دارا بودن دوام طولانی، مقاومت کششی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، سبک بودن و همچنین اقتصادی بودن مورد استقبال قرار گرفته اند. با این حال آتش سوزی یک تهدید برای سازه های بتنی محسوب می شود و می تواند مقاومت سازه های بتنی تقویت شده با FRP را تحت تاثیر قرار دهد. با توجه به تحقیقات کمی که در مورد تاثیر آتش بر روی مقاومت بتن تقویت شده با الیاف وجود دارد، در این تحقیق به تاثیر دما بر روی نمونه های استوانه ای بتن محصور شده با ورقه های شیشه پرداخته شده است. به این منظور ۱۲ نمونه استوانه ای بتنی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر را با دولایه ورقه شیشه تقویت و عمل آوری شده و سپس تحت اثر الگوهای حرارتی محیط، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته اند. تمامی نمونه ها پس از قرار گرفتن در کوره و رسیدن به دمای مورد نظر به مدت یک ساعت درون کوره باقی ماندند و پس از خنک شدن در دمای آزمایشگاه، تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوره قرار گرفتند. نتایج تست به خوبی نشان می دهد که محصور کردن نمونه های بتنی با ورقه های شیشه باعث افزایش مقاومت فشاری آنها می شود اما دمای بالا و حرارت باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به نمونه های شاهد می شود.

واژه گان کلیدی: آتش، حرارت، الیاف کامپوزیت، بتن، آسیب ناشی از آتش.

Investigation of the behavior of reinforced concrete cylinders with glass fibers under high temperatures

Abstract

Fiber-reinforced polymers (FRP) are widely used for strengthening and rehabilitating reinforced concrete (RC) structures due to their high tensile strength, corrosion resistance, light weight, and durability, offering a more efficient alternative to conventional techniques that increase structural mass and member dimensions. Despite these advantages, fire represents a critical hazard for FRP-confined concrete, as elevated temperatures can deteriorate both the concrete matrix and the polymeric resin, thereby reducing the effectiveness of confinement. Although FRP systems are increasingly applied in structural retrofitting, limited research has addressed the residual mechanical performance of FRP-strengthened concrete after exposure to high temperatures. This study investigates the influence of elevated temperatures on cylindrical concrete specimens confined with glass fiber sheets. Twelve concrete cylinders (100 mm in diameter and 200 mm in height) were wrapped with two layers of glass fiber reinforcement, cured, and then exposed to temperatures of 100°C, 200°C, and 300°C for one hour before being gradually cooled to room temperature. The specimens were

¹ Fiber-Reinforced Plastic (Also known as Fiber-Reinforced Polymer)

subsequently tested under uniaxial compression. The results demonstrate that glass fiber confinement enhances compressive strength, while increasing temperature levels reduce this strength gain compared with unheated control specimens.

Keywords: Fire, Heat, Composite Fibers, Concrete, Fire Damage.

نسخه
پیش
انتشار

۱- مقدمه

رخدادهای پیش‌بینی نشده‌ای نظیر آتش‌سوزی می‌توانند خسارات قابل‌توجهی به سازه‌های بتنی وارد کنند، به‌ویژه در سازه‌های صنعتی که به‌طور مداوم در معرض دماهای بالا قرار دارند و احتمال وقوع حریق در آن‌ها بیشتر است. دمای زیاد موجب تغییر در ساختار درونی بتن شده و تأثیر منفی بر مقاومت فشاری و یکپارچگی آن می‌گذارد. از آنجا که فرآیند تخریب، بازسازی یا جایگزینی اجزای آسیب‌دیده سازه مستلزم صرف هزینه و زمان قابل‌توجهی است، بهره‌گیری از روش‌های ترمیم و تقویت موضعی، راهکاری مقرون‌به‌صرفه و مؤثر محسوب می‌شود. در این میان، استفاده از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP) یکی از کارآمدترین رویکردهای بهبود عملکرد سازه‌های بتنی در برابر آسیب‌های حرارتی و مکانیکی است. طی دو دهه اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه بررسی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی این مواد و نیز میزان تأثیر آن‌ها بر افزایش مقاومت و دوام بتن انجام شده است. به همین دلیل، سامانه‌های FRP امروزه به‌عنوان مصالحی مؤثر در تقویت، بهسازی و ترمیم سازه‌های بتنی در سطح جهانی شناخته می‌شوند. [۵-۱]

FRPها با توجه به مزایای بی‌شماری که دارند از جمله دوام بالا، مقاومت زیاد، مقاومت در برابر خوردگی و مواد شیمیایی و قابلیت کششی و انعطاف‌پذیری، استقامت بالا در مقابل خستگی و ضریب حرارتی کم (در جهت فایده) و دیگر مزایا، یک جایگزین مناسب بجای تقویت‌کننده‌های فولادی برای سازه‌های بتنی هستند و از آن‌ها برای تقویت پل‌ها، ستون‌ها، پارکینگ‌ها و... استفاده می‌شود. [۹-۶]

۲- تاریخچه و بیان موضوع

تا کنون مطالعات متعددی به بررسی رفتار ستون‌های دایره‌ای محصور شده با FRP پرداخته‌اند [۱۸-۱۰]. اما اثر دماهای بالا بر بتن محصور شده با FRP کمتر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.

مقاومت در برابر دماهای بالا به رزینی (ماتریس) که برای FRPها استفاده می‌شود بستگی دارد زیرا به دماهای بالا حساس

هستند و در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه به‌سرعت مقاومت خود را از دست می‌دهند و نرم می‌شوند. آستانه بحرانی دمای انتقال شیشه T_g بستگی به ترکیبات خاص و همین‌طور عوامل دیگر بستگی دارد و معمولاً از ۶۵ تا ۸۲ درجه سانتی‌گراد برای سیستم‌های خارجی متغیر است. [۲، ۱۳، ۲۳-۱۹]

برای مثال در یک تحقیق نمونه‌های پیچیده شده با CFRP (پلیمر با الیاف کربن) در دمای بالای ۶۰۰ درجه، دچار آسیب شدید شدند و با ظرفیت بارمحوری ستون‌های مربعی پس از قرار گرفتن در معرض ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۴۴ درصد کاهش یافت و نمونه‌ها با پارگی ورق‌های FRP در آزمایش ناموفق شدند. [۲۹-۲۴]

مطالعات اولیه در مورد تأثیر آتش بر بتن و سازه‌های بتنی از سال ۱۹۹۲ آغاز شد و اساس آن مبنای شناخت رفتار مصالح در برابر آتش و دمای بالا و تعیین ایمنی و ضریب اطمینان سازه‌ها در برابر حریق بوده است [۳۰، ۳۱]، به همین دلیل مقاومت در برابر آتش پارامتر مهمی است که در طول طراحی ساختمان باید مورد بررسی قرار بگیرد. به طوری‌که انتخاب درست مصالح ساختمانی نقش کلیدی در برابر آتش دارند و می‌تواند آسیب‌های سازه‌ای یا آسیب‌های جانی که مهم‌ترین پارامتر طراحی در هر سازه‌ای می‌باشد را کاهش دهد [۳۲].

در این زمینه تحقیق‌هایی صورت گرفته است که به چند مورد آن اشاره می‌کنیم:

هولوی در سال ۲۰۱۰ در یک مطالعه مروری، متوجه شد که دما یکی از پارامترهای فیزیکی مهم است که بر موارد FRP تأثیر دارد و اندازه‌گیری‌ها یک درجه حرارت بحرانی را نشان می‌دهند که دمای انتقال شیشه نام دارد و این دما به ساختار شیمیایی مواد پلیمر بستگی دارد. [۳۳]

السنادی و یوسف السالوم در سال ۲۰۱۱ به بررسی رفتار بتن محصورشده با CFRP و GFRP پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا پرداختند. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد که در دمای ۱۰۰ درجه که از دمای انتقال شیشه کمی بیشتر است به دلیل ذوب شدن رزین، نمونه‌ها مقاومت کمی را از دست دادند. در دمای ۲۰۰ درجه نمونه‌ها مقاومت بیشتری را از دست دادند زیرا

در دمای بیشتر از دمای انتقال شیشه (Tg) مقاومت و پیوند ماتریس پلیمری دچار تخریب می‌شود. [۲]

یعقوب و همکاران در سال ۲۰۱۱ عملکرد ستون‌های مربعی مسلح که پس از حرارت دیدن با FRP یک‌جهت ترمیم‌شده بودند را مطالعه کردند. [۲۵، ۳۴]

در پژوهشی که توسط السنادی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ انجام شد به بررسی تأثیر دماهای بالا بر رفتار ستون‌های استوانه‌ای بتنی مسلح که با GFRP و CFRP تقویت‌شده‌اند پرداختند. [۳۵]

در یک مطالعه که توسط وو یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام شد مقاومت فشاری اعضای بتنی محصورشده با CFRP و GFRP با دو نوع رزین که یکی رزین اپوکسی و دیگری رزین فنل بود محصور و در معرض دماهای بالا مورد بررسی قرار گرفت. [۳۶]

داگلاس کلیری و همکاران در سال ۲۰۰۳ استحکام و شکل‌پذیری سیلندرهای بتنی که با یک سیستم تقویت‌کننده کامپوزیت محصورشده بودند و در معرض دماهای بالا قرارگرفته بودند را مورد بررسی قرار دادند. [۳۷]

کلیری و همکاران در تحقیقی مشابه در سال ۲۰۰۲ سیلندرهای بتنی پیچیده شده با GFRP را در معرض طیف وسیعی از درجه حرارت‌های بالا قرار دادند. [۳۸]

در رابطه با بحث استحکام و سختی بلونتراک و همکاران طی تحقیقی که در این زمینه انجام دادند اظهار داشتند که استحکام و سختی کامپوزیت‌های GFRP در دماهای نزدیک به دمای انتقال شیشه، رزین پلیمری آن‌ها به سرعت تخریب می‌شود. [۳۹]

مطالعات چن و تنگ در سال ۲۰۰۱ هم نشان می‌دهد که با افزایش دما خصوصیات پیوند بین بتن و FRP به سرعت روبه‌زوال می‌رود و این در نهایت می‌تواند منجر به لایه‌لایه شدن و یا تغییر شکل FRP و از بین رفتن چسبندگی و پیوند بین بتن و FRP می‌شود. [۴۰]

سافی و رومین در سال ۲۰۰۲ عملکرد نمونه‌های استوانه‌ای بتنی محصورشده با GFRP تحت دماهای مختلف را بررسی کردند. دمای انتقال شیشه (Tg) این سیستم FRP، ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرارگرفته است و دماهای انتخاب‌شده

برای این آزمایش برابر با ۰/۵، ۱ و ۲ برابر Tg انتخاب‌شده است. نمونه‌ای که در دمای دو برابر Tg به مدت ۳ ساعت قرار گرفت مقاومت فشاری و شکل‌پذیری آن در مقایسه با نمونه قرارگرفته در دمای ۰/۵ برابر Tg به‌طور قابل توجهی یعنی ۵۰ درصد کاهش یافت با این حال مقاومت باقیمانده هنوز نسبت به مقاومت سرویس بیشتر است. [۴۱]

پونمالار در سال ۲۰۱۲ تحقیقی را در رابطه با تعداد لایه‌های GFRP و دما انجام داد. [۴۲]

طی سالهای اخیر همچنین مطالعاتی بر روی تأثیر دما بر مصالح FRP پرداخته‌اند. [۴۳-۴۵]

سن در سال ۱۹۹۳ آزمایشاتی بر روی الیاف شیشه با ترکیبات شیمیایی مختلف انجام داد تا تأثیر دو درجه حرارت مختلف را بر روی مقاومت کششی بررسی کند. [۴۶]

فوجیساکا در سال ۱۹۹۳ به بررسی وابستگی مقاومت کششی به دما برای یک شبکه ترکیبی از الیاف کربن و شیشه در حین و بعد از گرم شدن پرداخت. [۴۷]

فاستر و بیسی در سال ۲۰۰۵ خواص مقاومت باقی‌مانده ورقه‌های شیشه و کربن را پس از قرار گرفتن در دمای بالا (تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که کاهش شدید مقاومت کششی و سختی باقی‌مانده زمانی به وجود می‌آید که دما از دمای تجزیه حرارتی ماتریس پلیمری اپوکسی (4Tg) بیشتر شود. [۴۸-۵۱]

در مقاله حاضر به منظور ارائه داده‌ها و اطلاعات بیشتر در مورد رفتار ستون‌های بتنی دایره‌ای محصور شده با کامپوزیت‌های FRP پس از حرارت دیدن، ۱۲ عدد نمونه بتنی استوانه‌ای محصور شده با الیاف GFRP ساخته شده و تحت دماهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. همچنین رابطه ای جهت پیش بینی مقاومت فشاری بتن محصور شده با GFRP تحت دماهای بالا ارائه شده است.

۳- کلیات آزمایش

۳-۱- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

در این آزمایش ۱۲ عدد نمونه بتنی استوانه‌ای به ابعاد ۱۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر استفاده شده است که با دولایه ورق GFRP محصور شده‌اند. هر کدام از این نمونه‌ها به ۴ دسته ۳ تایی تقسیم

ACI	طرح اختلاط
803	شن
902	ماسه
422	سیمان
216	آب
0.51	نسبت آب به سیمان
35	مقاوت ۲۸ روزه بتن (MPa)

Table2. Consumption concrete mixing plan

۳-۳- مشخصات ورقه های GFRP مصرفی

کامپوزیت FRP مورد استفاده در این آزمایش از الیاف شیشه یک جهته به ضخامت ۰/۱۵۷ میلی متر و با نام تجاری QUANTOM Wrap 400 G است و مشخصات مکانیکی آن طبق شرکت سازنده در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی الیاف GFRP

QUANTOM Wrap 400G	نام محصول
0.157	ضخامت (mm)
2.54	چگالی (Kg/m^3)
2300	مقاومت کششی (MPa)
90	مدول الاستیسیته (GPa)
3.9%	کرنش در گسیختگی
400	وزن واحد سطح (gr/m^2)

Table3. Mechanical properties of GFRP fibers

۴-۳- مشخصات رزین مصرفی

برای چسباندن ورقه های FRP به سطح نمونه ها از یک چسب رزین اپوکسی با نام تجاری QUANTOM EPR 3001 استفاده شد که یک چسب با مقاومت و کیفیت بالاست. عموماً برای نصب ورقه های FRP با جنس های مختلف مثل الیاف کربن، شیشه و آرامید بر روی سطوح بتنی و سایر سطوح دیگر از آن استفاده قرار می شود. چسب رزین اپوکسی دارای دو بخش مجزا غیر حلال شامل رزین و هاردنر است که طبق ضوابط استاندارد ASTM C880 است. مشخصات کامل رزین مورد استفاده و میزان مصرف آن طبق شرکت سازنده جداول (۴) و (۵) آورده شده است.

شدند که یک دسته در دمای آزمایشگاه و مابقی نمونه ها تحت دماهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی گراد و همگی به مدت یک ساعت درون کوره الکتریکی قرار داده شدند. نمونه ها پس از سرد شدن در دمای آزمایشگاه تحت آزمایش فشرده سازی تک محوره تا زمان شکست قرار گرفتند. در جدول (۱) مشخصات تمامی نمونه ها شامل نام نمونه، مقاومت بتن محصور نشده، تعداد لایه ها و همچنین الگوی حرارتی ذکر شده است.

۳-۲- مشخصات بتن و طرح اختلاط بتن مصرفی

طرح اختلاط برای ساخت مخلوط بتنی از آیین نامه ACI-211 با نسبت آب به سیمان ۰/۵۱ برای رسیدن به مقاومت فشاری ۳۵ Mpa استفاده شد. در تهیه مخلوط بتنی از سیمان پرتلند تیپ ۲ به همراه شن شکسته رودخانه ای در حالت SSD با حداکثر بعد $D=19\text{ mm}$ و همچنین ماسه شسته معمولی و آب شرب شهری استفاده شد. پس از گیرش اولیه، نمونه ها را از قالب خارج کرده و جهت عمل آوری درون حوضچه آب به مدت ۲۸ روز قرار داده شدند.

جدول ۱. جزئیات نمونه ها

ردیف	الگوی حرارتی	تعداد لایه ها	مقاومت بتن محصور نشده (MPa)	نام نمونه	شماره
۱	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای محیط	2	34	G2tr-1	1
2	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۱۰۰ درجه	2	34	G2tr-2	2
3	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۲۰۰ درجه	2	34	G2tr-3	3
4	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۳۰۰ درجه	2	34	G2t100-1	4
5	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۱۰۰ درجه	2	34	G2t100-2	5
6	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۲۰۰ درجه	2	34	G2t100-3	6
7	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۳۰۰ درجه	2	34	G2t200-1	7
8	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۱۰۰ درجه	2	34	G2t200-2	8
9	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۲۰۰ درجه	2	34	G2t200-3	9
10	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۳۰۰ درجه	2	34	G2t300-1	10
11	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۱۰۰ درجه	2	34	G2t300-2	11
12	نمونه ها تقویت شده بادولایه در دمای ۲۰۰ درجه	2	34	G2t300-3	12

Table1: Details of samples

جدول ۲. طرح اختلاط بتن مصرفی (kg/m^3)

جدول ۴. مشخصات رزین اپوکسی مصرفی

QUANTOM EPR 3001	نام محصول
Clear	رنگ
1.15 kg/1 (mixed)	چگالی
3.5 MPa (concrete > failed)	مقاومت چسبندگی
60 MPa (7days) at 35c	مقاومت فشاری
45MPa>	مقاومت کششی و خمشی
-35 to+65 C	دمای سرویس دهی
After 7 days (at 25 C)	عمل آوری
60 min (25 C)	عمر مفید

Table4. Specifications of consumable epoxy resin

جدول ۵. میزان صرف رزین جهت نصب QUANTOM Wrap 400G

شرح	مقدار مصرف رزین
لایه اول	1-1.5 Kg/M ²
لایه های بعدی	0.8-1.2 Kg/M ²

Table5. The amount of resin used to install QUANTOM Wrap 400G

۳-۵- نحوه محصور و چسباندن نمونه های بتنی با

الیاف GFRP

قبل از شروع کار، ابتدا سطح نمونه ها را با استفاده از سمباده نرم، صاف و تمیز گردید تا چسباندن ورقه های FRP به سیلندرها به درستی انجام شود. با توجه به نسبت ۳ به ۱ رزین و سخت کننده، مواد داخل یک ظرف تمیز به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند. تمامی نمونه ها با دولایه الیاف GFRP به روش wet lay_up محصور گردید به طوری که مقدار همپوشانی ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. پس از محصور شدن نمونه ها، جهت خشک شدن و رسیدن به مقاومت نهایی نمونه ها، به مدت یک هفته در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند.

۳-۶- قرار دادن نمونه ها تحت الگوهای حرارتی

به منظور بررسی مقاومت فشاری و کرنش نهایی نمونه های محصور شده، تمامی نمونه ها به صورت گروه های ۳ تایی تحت الگوهای حرارتی: دمای محیط، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی گراد و به مدت یک ساعت درون کوره الکتریکی با ظرفیت

۱۲۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند. دمای متوسط داخل کوره توسط یک ترموکوپل که در سقف آن قرار داشت اندازه گیری و ثبت گردید. شدت افزایش دما تا رسیدن به دمای مورد نظر برابر با ۲/۵ درجه در دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین جهت رسیدن به پایداری حرارتی مدت زمان نگهداری نمونه ها در کوره بعد از رسیدن به دمای هدف تا یک ساعت ادامه یافت، پس از اتمام فرایند حرارت دهی تا رسیدن دمای نمونه ها به دمای محیط، نمونه ها در کوره باقی ماندند. در نهایت به منظور جلوگیری از ایجاد هرگونه خطا و تمرکز تنش در هنگام بارگذاری، دو سطح بالا و پایین نمونه ها را با یک ملات زودگیر کپینگ گذاری شدند.

۳-۷- شیوه نصب فریم و LVDT روی نمونه ها

بارگذاری محوری خالص نمونه ها تا لحظه ی شکست نهایی توسط دستگاه Matest با استاندارد ASTM C39 انجام شد. نرخ سرعت افزایش بار در این آزمایش برابر با ۴ kN/s در نظر گرفته شد. مقدار بار نهایی وارده بر نمونه ها توسط Load Cell که در زیر نمونه ها قرار می گیرد اندازه گیری می شود. همچنین به منظور اندازه گیری کرنش محوری نمونه ها از ۲ عدد LDVT که با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم روی فریم مطابق شکل نصب می شود، استفاده شد. تمامی داده های اندازه گیری شده از Load Cell و LDVT ها به وسیله ی دستگاه Data Logger ثبت می شود. مقدار کرنش محوری نمونه ها از تقسیم میانگین مقادیر بدست آمده از LDVT بر ارتفاع فریم (۱۲cm) و تنش نیز از تقسیم نیروی به دست آمده به سطح مقطع سیلندر به دست می آید.

شکل ۱. نحوه بستن فریم و قرار دادن در دستگاه MATEST

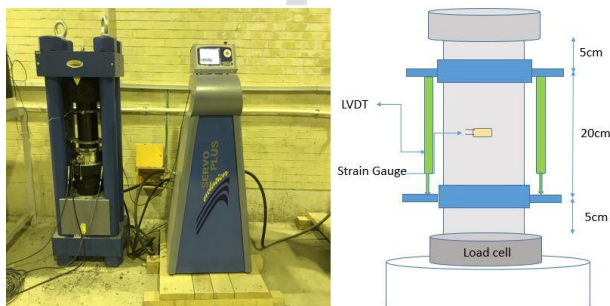


Fig. 1. How to close the frame and place it on the MATEST device

۴- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش

در این پژوهش نمونه‌ها تا زمان شکست تحت بارگذاری تک‌محوره قرار گرفتند. تقریباً تمامی نمونه‌ها در محلی خارج از محل همپوشانی دچار گسیختگی شدند.

۴-۱- بررسی رفتار تنش-کرنش نمونه‌ها

رفتار تنش-کرنش اکثر بتن‌های محصورشده با FRP به دودسته صعودی یا نزولی تقسیم می‌شوند. اگر محدود کردن با FRP تأثیرگذار نباشد و باعث تقویت بتن نشود رفتار تنش-کرنش به صورت نزولی خواهد بود ولی اگر بتواند مؤثر واقع شود و باعث تقویت بتن محصورشده بشود رفتار تنش-کرنش بتن به صورت صعودی خواهد بود. نمودارهای تنش-کرنش بتن محصورشده با FRP از دو قسمت سهمی شکل و خطی تشکیل شده است. با توجه به افزایش دما می‌بینیم که قسمت خطی نمودار از بین می‌رود و مقدار نقطه انتقال افزایش می‌یابد. این روند در سایر مطالعات بر روی بتن محصور شده با FRP تحت دما مشاهده شده است. [۳۵، ۳۶]

شکل ۲. مقایسه رفتار تنش-کرنش بتن محصور شده با GFRP تحت الگوهای حرارتی مختلف

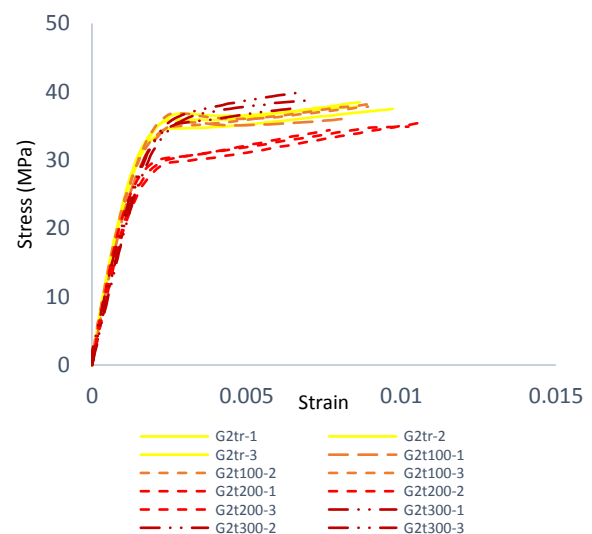


Fig. 2. Comparison of stress-strain behavior of GFRP-confined concrete under different thermal patterns

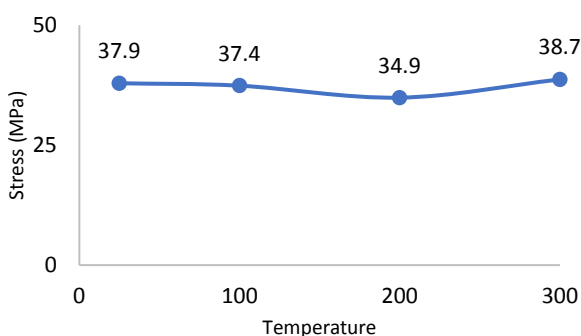
۴-۲- بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های محصور

شده با الیاف شیشه

پس از اتمام آزمایش‌ها، داده‌های به دست آمده مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند. یکی از جنبه‌های مهم این بررسی، ارزیابی رفتار فشاری نمونه‌های بتن محصورشده با الیاف GFRP در مقایسه با نمونه‌های فاقد محصورشدگی بود. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که استفاده از پوشش GFRP سبب بهبود قابل توجهی در ظرفیت فشاری بتن می‌شود؛ به گونه‌ای که محصور کردن نمونه‌ها با دو لایه GFRP افزایش حدود ۱۱ درصدی در مقاومت فشاری را نسبت به بتن بدون محصورشدگی ایجاد کرده است.

باین حال، زمانی که نمونه‌های محصورشده در معرض چرخه‌های حرارتی قرار گرفتند، کاهش محسوسی در مقاومت آن‌ها مشاهده شد. روند تغییرات مقاومت فشاری تا دمای حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نزولی بوده و بیانگر تأثیر منفی افزایش دما بر عملکرد سازه‌ای بتن محصورشده است. طبق نتایج ترسیم شده در نمودار، مقاومت فشاری نمونه‌های محصورشده در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب حدود ۱۰۴۵ و ۷۰۸۹ درصد کاهش جزئی داشته است اما نمودار در دمای ۳۰۰ درجه روند صعودی به خود گرفته است و مقاومت فشاری نمونه‌های محصورشده در دمای ۳۰۰ درجه نسبت به مقاومت نمونه‌های محصورشده در دمای محیط ۲/۱۸ درصد افزایش داشته است. برخی از پژوهشگران بر این باورند که علت اصلی افزایش مقاومت در محدوده خاص از دماها را خروج آب اضافی از منافذ و کامل شدن عمل هیدراتاسیون به هنگام تبخیر شدن آب مازاد در نمونه‌ها به همراه ایجاد نیروی بین ذرات ژل خمیر سیمان می‌باشد.

شکل ۳. مقایسه میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های محصور شده با الیاف شیشه تحت الگوهای حرارتی مختلف



۴-۴- بررسی مدول الاستیسیته نمونه‌های محصور شده

مدول الاستیسیته به دست آمده در این پژوهش بر اساس تعریف متداول آن، از نسبت تنش اعمالی به کرنش متناظر حاصل از همان تنش محاسبه شده است. با توجه به این که نمونه‌های مورد آزمایش در حالت محصور قرار داشته‌اند، منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون رفتاری آن‌ها دارای دو ناحیه مجزا با رفتار تقریباً خطی است. بخش نخست نمودار بیانگر رفتار بتن در مرحله قبل از اثرگذاری کامل محصورشدگی بوده، در حالی که بخش دوم نمایانگر ناحیه‌ای است که در آن تأثیر محصورشدگی ناشی از الیاف GFRP به طور محسوس ظاهر می‌شود.

بر این اساس، مدول الاستیسیته را می‌توان از شیب هر یک از نواحی خطی منحنی تنش-کرنش تعیین کرد. از آنجا که رفتار کلی نمونه دوخطی است، دو مقدار مجزا برای مدول الاستیسیته تعریف می‌شود:

E1 بیانگر مدول الاستیسیته در ناحیه خطی اولیه (پیش از اثرگذاری کامل محصورشدگی) و E2 نشان‌دهنده مدول الاستیسیته در ناحیه دوم است که در آن اثر محصورشدگی و تحمل تنش‌های بالاتر مشهودتر می‌شود.

شکل ۵. مقایسه مدول الاستیسیته ناحیه خطی اول

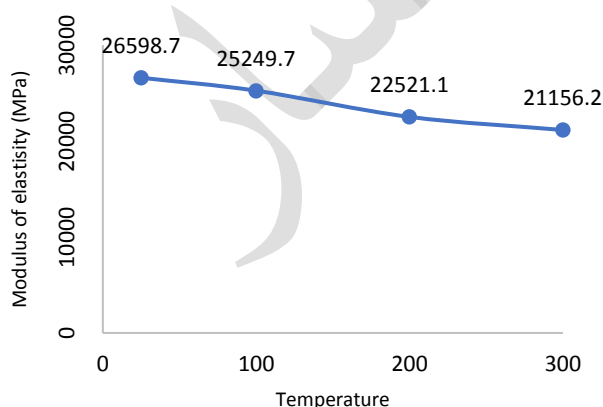


Fig. 5. Comparison of the modulus of elasticity (E1)

شکل ۶. مقایسه مدول الاستیسیته ناحیه خطی دوم

Fig. 3. Comparison of compressive strength of GFRP confined samples under different thermal patterns

۴-۳- بررسی کرنش محوری نمونه‌ها

با استناد به شکل (۲) و نمودار (۴)، تحلیل رفتار کرنش محوری نمونه‌های بتن محصورشده با الیاف GFRP در شرایط دمایی مختلف انجام شد. مقایسه بین مقادیر کرنش نهایی نمونه‌های قرارگرفته در الگوهای حرارتی و نمونه‌های محصورشده در دمای محیط نشان می‌دهد که به صورت کلی، افزایش دما موجب کاهش تدریجی کرنش محوری می‌گردد.

به طور مشخص، نمونه‌های محصورشده که در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفتند، کاهش حدود ۲۰٫۸۱ درصدی در مقدار کرنش نسبت به نمونه‌های در دمای محیط از خود نشان دادند. در دمای ۲۰۰ درجه، رفتار متفاوتی مشاهده شد و کرنش نهایی در مقایسه با شرایط محیطی حدود ۶۰٫۲۴ درصد افزایش یافت که می‌تواند ناشی از تغییر در ریزساختار بتن یا توزیع مجدد تنش در اثر حرارت باشد. با این حال، در دمای ۳۰۰ درجه روند تغییرات مجدداً نزولی شده و کاهش قابل توجهی در کرنش نهایی، معادل حدود ۲۴٫۰۶ درصد نسبت به شرایط محیطی، مشاهده گردید. این نتایج و مشاهده نمودارهای تنش-کرنش بدست آمده از مطالعات سایر محققان نیز نشان دهنده کاهش شکل پذیری در اثر افزایش دما می‌باشد. [۳۸-۴۰]

شکل ۴. مقایسه میانگین کرنش محوری نمونه‌ها تحت الگوهای حرارتی مختلف

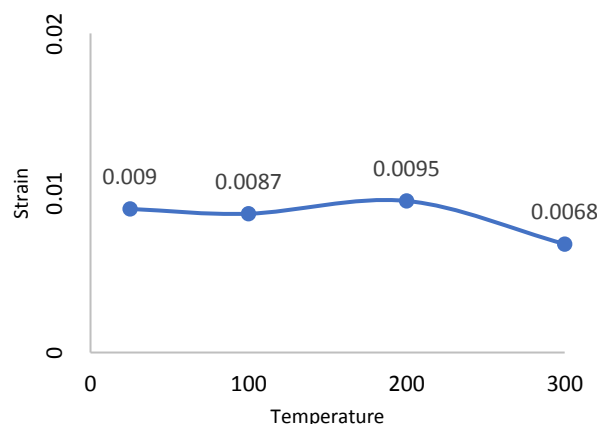


Fig. 4. Comparison of axial strain of samples under different thermal patterns

با رسم کردن خط روند تقریبی نمودار و بدست آوردن فرمول خط آن، ضریب زیر برای اصلاح پارامتر $F_{cc,t}$ بدست آمد.

$$\alpha = (4e - 8t^3) - (2e - 5t^2) + 0.0014t + 1.0895$$

با جایگذاری t یا همان دما، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های محصور شده با الیاف شیشه تحت دما بدست می‌آید.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این قسمت، نتایج به دست آمده از آزمایش تأثیر درجه حرارت بالا بر مقاومت فشاری و کرنش محوری نمونه‌های استوانه‌ای محصور شده با ورقه‌های GFRP ارائه شده است.

- تمامی نمونه‌های بتنی محصور شده بدون استثناء، مقاومت فشاری بالاتری را در مقایسه با نمونه‌های محصور نشده داشتند. این افزایش در نمونه‌های دولایه تا ۱۱/۵۴ درصد بود که نشان می‌دهد ورقه‌های GFRP در افزایش ظرفیت فشاری استوانه‌های بتنی مؤثر بوده‌اند.
- با افزایش دما مقاومت فشاری نمونه‌های محصور شده روند نزولی پیدا می‌کنند. این کاهش مقاومت در نمونه‌های دولایه در دمای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه برابر است با ۱/۴۵، ۷/۸۹ درصد کاهش و ۲/۱۸ درصد افزایش. طبق تحقیقاتی که در گذشته انجام شده و این پژوهش مقاومت فشاری بیشتر نمونه‌های بتنی بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه نسبت به دمای ۱۰۰ مقداری افزایش داشته که دلیل آن خروج آب بتن و به وجود آمدن تغییر در خواص پیوندی خمیر سیمان و ایجاد نیروی واندروالسی بین ذرات خمیر سیمان است و در دماهای بالاتر نیز به دلیل تبخیر کامل آب بتن، انبساط سنگ‌دانه‌ها، از بین رفتن خواص چسبندگی ملات سیمان و افزایش ترک‌های ریز، مقاومت بتن کاهش می‌یابد.

- باینکه قرار گرفتن نمونه‌های محصور شده در دماهای بالا تأثیر منفی بر مقاومت فشاری گذاشت، اما بازهم

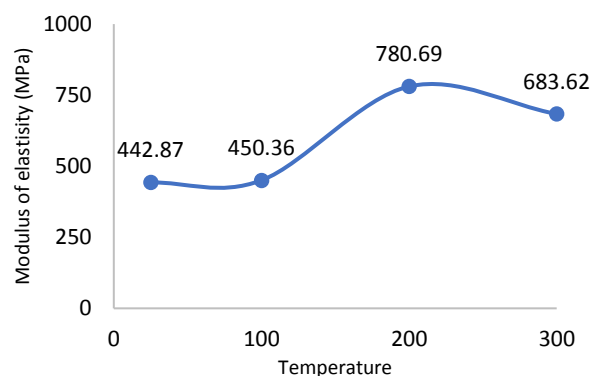


Fig. 6. Comparison of the modulus of elasticity (E2)

۵-۴ محاسبه F_{cc} بر حسب دما

در این آزمایش با توجه به نتایج تست و همچنین با استفاده از نمودار (۷) میتوان مقاومت فشاری ($F_{cc,t}$) نمونه‌های محصور شده با الیاف شیشه را در دماهای مختلف بدست آورد. ضریب اصلاح مقاومت فشاری نمونه‌های محصور شده از روش زیر بدست می‌آید:

$$F_{cc,t} = \alpha \cdot F_{cco}$$

$$\alpha = \frac{F_{cc,t}}{F_{cco}}$$

که α ضریب اصلاح، F_{cco} مقاومت فشاری نمونه محصور نشده و $F_{cc,t}$ مقاومت فشاری نمونه‌های محصور شده با الیاف شیشه تحت دماهای مختلف است.

شکل ۷. نمودار $F_{cc,t}/F_{cco}$

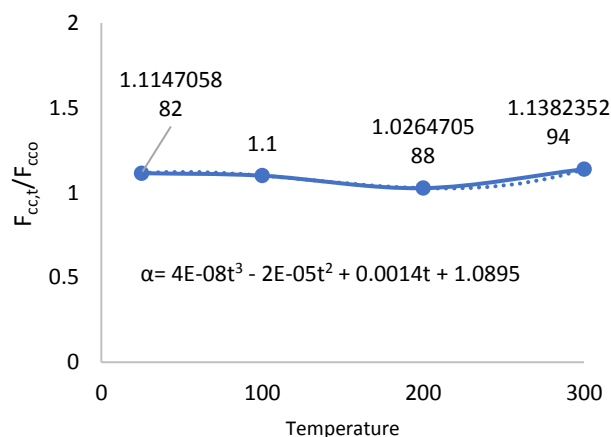


Fig. 7. $F_{cc,t}/F_{cco}$

صورت بالا بودن دما تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد (تقریباً ۲/۵ برابر دمای انتقال شیشه)، حداکثر بار طراحی شده % باید حداقل FRP ۲۵ برای اعضای تقویت شده با کمتر از مقدار مربوط به آن در دمای اتاق باشد. [۲]

۵- مراجع

- [1] K. H. K. Reddy, R. Nerella, and S. R. C. Madduru, "Different temperature effects on CFRP wrapped concrete," *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, pp. 1127-1131, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.582>.
- [2] Y. A. Al-Salloum, H. M. Elsanadedy, and A. A. Abadel, "Behavior of FRP-confined concrete after high temperature exposure," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 838-850, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.103>.
- [3] S. E. Gamal, "Behaviour of restrained concrete bridge deck slabs reinforced with FRP reinforcing bars under concentrated loads," Ph.D. thesis, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 2005. [Online]. Available: <https://www.proquest.com/openview/d926e1b2911a57c14ac69ae66d155134/1?pq-origsite=gscholar&cbl=36963>
- [4] S. El-Gamal, Y. Al-Salloum, S. Alsayed, and M. Aqel, "Performance of near surface mounted glass fiber reinforced polymer bars in concrete," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 31, no. 22, pp. 1501-1515, 2012, doi: <https://doi.org/10.1177/0731684412464088>.
- [5] Y. A. Al-Salloum, S. El-Gamal, T. H. Almusallam, S. H. Alsayed, and M. Aqel, "Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 835-844, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.004>.
- [6] Y. A. Al-Salloum, "Compressive Strength of FRP-Confined Concrete at Elevated Temperatures," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 16, no. 9, pp. 611-620, 2008, doi: <https://doi.org/10.1177/096739110801600905>.
- [7] B. Benmokrane, E. El-Salakawy, A. El-Ragaby, and S. El-Gamal, "Performance evaluation of innovative concrete bridge deck slabs reinforced with fibre-reinforced-polymer bars," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 298-310, 2007, doi: <https://doi.org/10.1139/106-173>.
- [8] S. E.-G. M. Eisa, E. El-Salakawy, D. Th  beau, B. Benmokrane, "Design and construction of first GFRP-CRCP slabs implemented on highway 40 east (Montréal)," presented at the Canadian Society for Civil Engineering - Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2008 - "Partnership for Innovation", Quebec City, QC, Canada, 2008.
- [9] S. El-Gamal, B. Benmokrane, E. El-Salakawy, P. Cousin, and A. Wiseman, "Durability and structural

مقاومت فشاری نمونه‌های قرارگرفته در دما بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌های محصور نشده بود.

- کرنش محوری در نمونه‌های دولایه در دمای ۲۰۰ درجه افزایش و در دیگر دماها مقدار کرنش محوری کاهش یافته است.

- مدول الاستیسیته ناحیه خطی اول (E1) با افزایش دما کاهش می‌یابد به طوری که مقدار مدول الاستیسیته نمونه‌های محصور شده تحت دماهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه نسبت به نمونه محصور شده شاهد، ۵، ۱۵ و ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده است و مدول الاستیسیته ناحیه خطی دوم (E2) با افزایش دما، رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد به طوریکه مقدار E2 نمونه‌های محصور شده تحت دماهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه نسبت به نمونه محصور شده شاهد برابر است با ۱/۷، ۷۶ و ۵۴ درصد افزایش.

- مواد FRP که به‌عنوان یک پوشش خارجی جهت تقویت نمونه‌های استوانه‌ای مورد استفاده قرار گرفت، به درجه حرارت‌های بالا حساس هستند. این مواد در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه (Tg) دچار تخریب در استحکام و پیوند بین بتن و ورقه‌های FRP می‌شوند.

- جهت جلوگیری از اثرات حرارت بر روی نمونه‌های محصورشده با FRP حتی‌المقدور درجه حرارت نباید بیشتر از دمای انتقال شیشه باشد؛ و یا در المان‌هایی که کمتر در معرض دماهای بالا قرار می‌گیرند مورد استفاده قرار گیرند.

- با استفاده از نتایج تست، یک ضریب اصلاح برای پارامتر F_{cc} تحت دماهای مختلف برای نمونه‌های محصور شده با الیاف شیشه بدست آمد.

$$\alpha = (4e - 8t^3) - (2e - 5t^2) + 0.0014t + 1.0895$$

- در پژوهشی که توسط یوسف السالوم و همکاران در سال ۲۰۱۱ انجام گرفت، به این نتیجه رسیدند که در

- Engineering Congress*, Cincinnati, Ohio, 1999: ASCE, pp. 260-266.
- [21] L. Bisby, "Fire behaviour of FRP reinforced or confined concrete," Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston, Canada, 2003.
- [22] F. I. d. B. (fib), "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures," fib Bulletin 14, fib Task Group 9.3, fib, Lausanne, Switzerland, 2001.
- [23] ACI 440.2R-02 - *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*, A. C. 440., Farmington Hills, Michigan, USA, 2002.
- [24] X. Shang and Z. Lu, "Impact of High Temperature on the Compressive Strength of ECC," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, pp. 1-7, 2014, doi: <https://doi.org/10.1155/2014/919078>.
- [25] M. Yaqub, C. G. Bailey, and P. Nedwell, "Axial capacity of post-heated square columns wrapped with FRP composites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 6, pp. 694-701, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.011>.
- [26] S. El-Gamal, K. Al-Jabri, A. Al-Mahri, and S. Al-Mahrouqi, "Effects of Elevated Temperatures on the Compressive Strength Capacity of Concrete Cylinders Confined with FRP Sheets: An Experimental Investigation," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, pp. 1-10, 2015, doi: <https://doi.org/10.1155/2015/549187>.
- [27] J. Zhou and L. Wang, "Repair of fire-damaged reinforced concrete members with axial load: a review," *Sustainability*, vol. 11, no. 4, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/su11040963>.
- [28] H. Komma, R. Nerella, and S. Madduru, "Art-of-review on CFRP Wrapping to Strengthen Compressive and Flexural Behavior of Concrete," *Revue des composites et des matériaux avancés*, vol. 29, no. 3, pp. 159-163, 2019, doi: <https://doi.org/10.18280/rcma.290305>.
- [29] S. El-Gamal, "Bond strength of glass fiber-reinforced polymer bars in concrete after exposure to elevated temperatures," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 23, pp. 2151-2163, 2014, doi: <https://doi.org/10.1177/0731684414555408>.
- [30] F. C. Lea, "The resistance to fire of concrete and reinforced concrete," *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 41, no. 18, 2007, doi: <https://doi.org/10.1002/jctb.5000411814>.
- [31] M. F. Kaplan, "A Report on the American Concrete Institute Seminar "Concrete for Nuclear Reactors"," in "Nuclear Engineering and Design," Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, 00295493, 1971, vol. 16.
- [32] J. Novak and A. Kohoutkova, "Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature," *Fire Safety Journal*, vol. 95, pp. 66-76, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.10.010>.
- [33] L. C. Hollaway, "A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil performance of carbon fibre reinforced polymer – reinforced concrete parking garage slabs," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 617-627, 2009, doi: <https://doi.org/10.1139/09-016>.
- [10] M. Shahawy, A. Mirmiran, and T. Beitelman, "Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns," *Composites Part B: Engineering*, vol. 31, no. 6-7, pp. 471-480, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/s1359-8368\(00\)00021-4](https://doi.org/10.1016/s1359-8368(00)00021-4).
- [11] Y. Xiao and H. Wu, "Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 139-146, 2000, doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2000\)12:2\(139\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2000)12:2(139)).
- [12] X. N. Jin, "Experimental study on the mechanical properties of axially symmetrical confined concrete," Ph.D. thesis, School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2002.
- [13] ACI 440.2R-08 - *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*, A. C. 440., Farmington Hills, Michigan, USA, 2008.
- [14] M. Demers and K. W. Neale, "Confinement of reinforced concrete columns with fibre-reinforced composite sheets - an experimental study," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 226-241, 1999, doi: <https://doi.org/10.1139/098-067>.
- [15] K. A. Harries and S. A. Carey, "Shape and "gap" effects on the behavior of variably confined concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 6, pp. 881-890, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)01085-2](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)01085-2).
- [16] M. N. Youssef, "Stress strain model for concrete confined by FRP composites," Ph.D. thesis, University of California, Irvine, Irvine, Calif, USA., 2003.
- [17] S. Matthys, H. Toutanji, K. Audenaert, and L. Taerwe, "Axial load behavior of large-scale columns confined with fiberreinforced polymer composites," *ACI Structural Journal*, vol. 102, no. 2, pp. 258-267, 2005. [Online]. Available: <https://www.proquest.com/openview/d926e1b2911a57c14ac69ae66d155134/1?pq-origsite=gscholar&cbl=36963>.
- [18] S. Rocca, N. Galati, and A. Nanni., "Experimental evaluation of FRP strengthening of large size reinforced concrete columns," in "Center for Infrastructure Engineering Studies (CIES)," University of Missouri-Rolla, Rolla, Mo, USA, 2006.
- [19] J. C. P. H. Gamage, M. B. Wong, and R. Al-Mahaidi, "Performance of CFRP Strengthened concrete members under elevated temperatures," presented at the Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005), Hong Kong, China, 2005.
- [20] F. Apicella and M. Imbrogno, "Fire performance of CFRP-composites used for repairing and strengthening concrete," in *Fifth ASCE Materials*

- [43] G. Rehm and L. Franke, "Kunstharzgebundene glasfaserstäbe als bewehrung im betonbau," *Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton*, vol. 304, 1979.
- [44] J. M. Plecnik, B. Bresler, J. D. Cunningham, and R. Iding, "Temperature Effects on Epoxy Adhesives," *Journal of the Structural Division*, vol. 106, no. 1, pp. 99-113, 1980, doi: <https://doi.org/10.1061/jsdeag.0005362>.
- [45] F. Rostásy, *Fiber Composite Elements and Techniques as Non-metallic Reinforcement of Concrete: Brite Project 4142/Breu-CT 91 05 15. Evaluation of Potentials and Production Technologies of FRP: Technical Report Task 1. Breu 1-92*. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 1992.
- [46] R. Sen, D. Mariscal, and M. Shahawy, "Investigation of S-2 glass/epoxy strands in concrete," *Special Publication*, vol. 138, pp. 15-34, 1993.
- [47] T. Fujisaki, T. Nakatsuji, and M. Sugita, "Research and development of grid shaped FRP reinforcement," *Special Publication*, vol. 138, pp. 177-192, 1993.
- [48] Y. Bai, T. Keller, and T. Vallée, "Modeling of stiffness of FRP composites under elevated and high temperatures," *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 15-16, pp. 3099-3106, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.07.005>.
- [49] T. Keller, A. Zhou, C. Tracy, E. Hugi, and P. Schnewlin, "Experimental study on the concept of liquid cooling for improving fire resistance of FRP structures for construction," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, no. 11, pp. 1569-1580, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.10.032>.
- [50] Y. Bai and T. Keller, "Modeling of mechanical response of FRP composites in fire," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 6-7, pp. 731-738, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.03.003>.
- [51] S. Foster and L. A. Bisby, "High temperature residual properties of externally bonded FRP systems," in *Proceedings of the 7th international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures (FRPRCS-7)*, SP-230-70, 2005, pp. 1235-52.
- infrastructure with reference to their important in-service properties," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 12, pp. 2419-2445, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062>.
- [34] M. Yaqub and C. G. Bailey, "Cross sectional shape effects on the performance of post-heated reinforced concrete columns wrapped with FRP composites," *Composite Structures*, vol. 93, no. 3, pp. 1103-1117, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.09.012>.
- [35] H. Elsanadedy, T. Almusallam, Y. Al-Salloum, and R. Iqbal, "Effect of high temperature on structural response of reinforced concrete circular columns strengthened with fiber reinforced polymer composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 51, no. 3, pp. 333-355, 2016, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998316645171>.
- [36] W. Jung, M. Kwon, and B. Ju, "Evaluation of compressive strength of concrete members laterally confined by various FRP composites and exposed to high temperatures," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 2410-2419, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0693-5>.
- [37] D. B. Cleary, C. D. Cassino, R. Tortorice, J. A. Newell, and B. W. Tyers, "Effect of Elevated Temperatures on a Fiber Composite Used to Strengthen Concrete Columns," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 22, no. 10, pp. 881-895, 2003, doi: <https://doi.org/10.1177/0731684403022010002>.
- [38] D. B. Clearly, C. D. Cassino, R. Tortorice, J. A. Newell, and B. W. Tyers, "Effect of Elevated Temperatures on a Fiber Composite Used to Strengthen Concrete Columns," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 20, no. 05, p. 1, 2002.
- [39] H. Blontrock, L. Taerwe, and P. Vandeveld, "Fire testing of concrete slabs strengthened with fibre composite laminates," in *5th conference on fibre reinforced plastics for reinforced concrete structures (FRPRCS-5)*, Cambridge, United Kingdom, 16-18 July 2001 2001, pp. 547-556. [Online]. Available: <https://biblio.ugent.be/publication/144863>. [Online]. Available: <https://biblio.ugent.be/publication/144863>
- [40] J. F. Chen and J. G. Teng, "Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete," *Journal of Structural Engineering*, vol. 127, no. 7, pp. 784-791, 2001, doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2001\)127:7\(784\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2001)127:7(784)).
- [41] M. Saafi and P. Romine, "Effect of fire on concrete cylinders confined with GFRP," in *2nd Int. Conf. on Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction*, 2002, pp. 512-521.
- [42] Ponmalar, "Strength comparison of Fiber Reinforced Polymer (FRP) wrapped concrete exposed to high temperature," *International Journal of Applied Science and Engineering Research*, vol. 1, no. 1, 2012, doi: <https://doi.org/10.6088/ijaser.0020101015>.