

## مدل سازی عددی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP انعطاف پذیر در دماهای بالا

محمود نادری<sup>۱\*</sup>، سیامک اسمعیلی زاده<sup>۲</sup>

۱- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

### چکیده

مدتی است که استفاده از پلیمرهای مسلح شده با الیاف کربن (CFRP)، بعنوان یک روش کارآمد برای مقاوم سازی سازه‌ها رایج شده است. در پژوهش حاضر برای مدل سازی تیرهای مقاوم شده با CFRP انعطاف پذیر در دماهای بالا، از روش المان محدود، و برای مدل سازی عددی، از نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. نتایج بدست آمده از روش المان محدود با نتایج آزمایش‌های پیشین انجام شده توسط نویسندگان مقایسه شده اند. مطالعه نمونه‌ها با آزمایش چهار نقطه خمشی تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP انعطاف پذیر با سه مقاومت بتنی متفاوت در دماهای ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. مدل سازی نمونه‌ها، همانند روند آزمایشگاهی، در دو مرحله متوالی انجام گرفته است. در مرحله اول، نمونه‌ها تا دماهای مورد نظر گرم شده و در مرحله بعد تحت همان دمای بالا، تحت بارگذاری مکانیکی تا گسیختگی، قرار گرفتند. نتایج مدل سازی با توجه به مقدار بارنهایی، روند منحنی‌های بارنهایی- جابجایی و الگوی ترک خوردگی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که نشان از تطابق خوب روند مکانیکی با مدل های عددی بود. همچنین تاثیر کرنش های حرارتی نسبت به کرنش های ناشی از بار مکانیکی خارجی، مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که نقش عدم تناسب ضریب انبساط حرارتی، کمتر از نقش کاهش مشخصات مکانیکی در اثر حرارت بوده است. در نهایت نتایج المان محدود با مدل های تحلیلی ارائه شده برای محاسبه کرنش در CFRP، تنش برشی و نرمال در بتن ناشی از تغییر دما مقایسه و تطابق قابل قبولی مشاهده شد.

کلمات کلیدی: مدل سازی، روش المان محدود، تیر بتنی، مقاوم سازی با CFRP، دما، مدل پلاستیک آسیب دیده بتن

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.105927.1385	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.105927.1385	۱۳۹۸/۰۹/۰۱	۱۳۹۷/۰۲/۱۴	۱۳۹۷/۰۲/۱۴	۱۳۹۶/۱۲/۲۰	۱۳۹۶/۰۸/۲۵
			محمود نادری		*نویسنده مسئول:
			naderi-m@ikiu.ac.ir		پست الکترونیکی:

# Numerical Modelling of Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded CFRP Fabrics, at High Temperatures

Mahmood Naderi <sup>1\*</sup>, Siamak Smeali zadeh <sup>2</sup>

1-Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2-M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

## ABSTRACT

The use of externally bonded fiber reinforced polymers has been proven to be an effective and efficient system for strengthening deficient concrete components and structures. This paper presents numerical modelling of the debonding behavior of concrete beams, strengthened with externally bonded CFRP fabrics. This study was carried out, using the commercial package Abaqus, by employing finite element analysis. The simulation was validated against laboratory four point bending tests of nine plain concrete beams previously performed by the authors. The behavior of concrete beams with three different design concrete strength of 20, 30 and 40 MPa was investigated. These beams were strengthened by externally bonded CFRP fabrics. The temperature ranges considered were -20, +20, +50 and +80 degree Celsius. Linear elastic isotropic and orthotropic models were used for the CFRP and a cohesive bond model was used for the concrete-CFRP interface. A plastic damage model was used for the concrete. In the finite element analysis similar to laboratory tests, the specimens were first heated up to elevated temperatures, and then loaded up to failure. With regard to the failure loads, load-displacement response and crack patterns, the results obtained, show good agreement with the recorded experimental data. The finite element results belonging to the thermal strains in CFRP and the stresses in the concrete were also compared with the thermal strains and stresses determined using analytical models.

## ARTICLE INFO

Received: 16/11/2017

Revised: 11/03/2018

Accepted: 04/05/2018

## Keywords:

CFRP strengthening,  
Numerical modelling,  
High Temperatures,  
Concrete Beams,  
Plastic Damage Model.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.105927.1385

\*Corresponding author: Mahmood Naderi  
Email address: naderi-m@ikiu.ac.ir

## ۱- مقدمه

کامپوزیت های FRP عموماً دهه های ۶۰ و ۷۰ میلادی کاربردهای فراوانی در صنایع دریایی، خودرویی و فضایی کاربردهای مختلفی داشته است [۱]. استفاده از مقاوم سازی با استفاده از پوشش های بیرونی الیاف مسلح شده کربن (CFRP) بطور فزاینده ای در دو دهه اخیر مورد استقبال صنعت ساخت و ساز قرار گرفته است [۲]. مقاوم سازی اعضای سازه ای بتن مسلح مانند تیرها که در معرض تنش های خمشی و برشی قابل توجهی هستند، در شرایط عدم کفایت مقاومتی و سرویس دهی این اعضا، اجتناب ناپذیر است. دلایل مختلفی مانند مقاومت بالا، سبکی، سهولت اجرا و مقاومت در برابر خوردگی، موجب افزایش توجه به CFRP گردیده است [۳].

علیرغم مزیت های CFRP نسبت به مصالح سنتی، نگرانی از رفتار این سیستم در دماهای بالا مانعی برای استفاده گسترده آن شده است. در آئین نامه هایی از جمله (ACI 440.2R-02, fib Bulletin 14 - 2001) و نشریه شماره ۳۴۵ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور جمهوری اسلامی ایران، اثر آتش سوزی روی سازه های تقویت شده با FRP بصورت یک بار ویژه به شمار می رود که در آن سهم FRP در مقاومت، ناچیز در نظر گرفته شده است. این موضوع بدان معناست که پس از فقدان FRP، سازه باید توانایی مقاومت در برابر بارهای وارده با ضرایب ایمنی (ضرایب بار و مصالح) مورد نظر را داشته باشد [۴]. اعتقاد بر این است که بدین ترتیب از ریزش ناگهانی سازه تقویت شده با FRP در مرحله ای که چسبندگی بین لایه ای (بین بتن و FRP) از بین می رود، مانند هنگام آتش سوزی و یا خرابکاری، جلوگیری می شود. این پیشنهادها، مقدار حداکثر افزایش مقاومت حاصله را به تفاوت ضرایب ایمنی مربوط به ترکیب بارهای ویژه و ترکیب بارهای نهایی محدود می کند. در مطالعات صورت گرفته، مشخص شده است که چسبندگی موجود بین بتن و لایه FRP، در نزدیکی و یا بالای دمای گذار شیشه ای چسب (T<sub>g</sub>)، از بین می رود. طبق تعریف آیین نامه ACI 440.2r-08 دمای گذار شیشه ای، دمایی است که در آن مواد بی شکل مانند شیشه یا پلیمرهایی با جرم مولکولی بالا، از حالت شکنندگی به حالت خمیری تبدیل می شوند [۵]. اثر دما بر روی رفتار چسبندگی بتن و FRP را می توان بصورت عددی مورد مطالعه قرار داد. تحلیل عددی مسائل مهندسی سازه عموماً براساس روش المان محدود است. با استفاده از تحلیل المان محدود می توان اثرات دما را بصورت جداگانه مورد مطالعه قرار داد. علاوه بر این می توان پارامترهایی را که در آزمایشها، براحتی قابل اندازه گیری نمی باشند، مورد مطالعه قرار داد.

در این مقاله، برای مدل سازی تیرهای مقاوم شده با CFRP انعطاف پذیر در دماهای بالا، از روش المان محدود استفاده شده است. همچنین برای تصدیق مدل سازی، از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط نادری و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر روی تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP در دماهای بالا، استفاده شده است [۶].

## ۲- مطالعات پیشین

دی توماسو و همکاران [۷] با بکار گیری نمونه های ۱۰۰×۱۰۰×۸۰۰ میلی متری از بتن ساده، تحقیقاتی انجام دادند که نمونه های تیر، در دمای اتاق با دو نوع ورق FRP با مدول یانگ معمولی و بالا، مقاوم سازی شده و به ترتیب در دماهای منفی ۱۰۰ درجه سانتی گراد، منفی ۳۰، مثبت ۲۰ و مثبت ۴۰ درجه سانتی گراد مورد آزمایش قرار گرفتند. چسب مورد استفاده نیز دارای دمای گذار شیشه ای حدود ۶۰ درجه سانتی گراد بوده است. براساس این نتایج، در هر دو نوع FRP بکار رفته، مقاومت مشاهده شده پس از افزایش دما به ۴۰ درجه سانتی گراد، نسبت به مقاومت نهایی در دمای اتاق یعنی مثبت ۲۰ درجه سانتی گراد، کاهش می یابد. همچنین در هر دو نوع FRP، مقاومت مشاهده شده پس از کاهش دما به منفی ۳۰ درجه سانتی گراد، نسبت به مقاومت نهایی در دمای اتاق، کاهش می یابد. در دمای منفی ۱۰۰ درجه سانتی گراد، نمونه های مقاوم شده با FRP با مدول یانگ بالا مقاومت کمتری نسبت به دمای اتاق داشته، و نمونه های مقاوم شده با FRP با مدول یانگ معمولی، مقاومت بیشتری در مقایسه با نتایج متناظر در دمای اتاق نشان دادند. بعلاوه این محققین [۷] مدلی تحلیلی برای محاسبه تنش برشی در بتن و تنش نرمال در بتن ناشی از تغییرات درجه حرارت ارائه کرده اند. این مدل با فرض رفتار الاستیک خطی بتن و FRP و صرف نظر کردن از لایه چسب بین بتن و FRP ارائه شده است.

کلامر و همکاران [۸ و ۹]، مطالعاتی در زمینه اثرات تغییرات دمایی بر روی رفتار جداشدگی سطح تماس بتن و FRP در تیرهای با مقیاس کوچک بتنی و آزمایش خمش سه نقطه ای، انجام دادند. این آزمایشات در گستره دمایی بین ۲۰- تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد انجام

شد. با افزایش دما تا حدود دمای گذار شیشه ای چسب (۶۲ درجه سانتی گراد)، افزایش بار گسیختگی و در دمای بالاتر از دمای گذار شیشه ای چسب، کاهش بار گسیختگی گزارش شد. در دمای بالای دمای گذار شیشه ای چسب، محل گسیختگی از نزدیکی بتن در تماس با FRP، به لایه بین سطحی بتن و FRP منتقل می شود. این محققین همچنین مطالعات آزمایشگاهی نمونه های تیر بتنی مقاوم شده با ورقه های CFRP چسبانده شده در دماهای بالا را توسط نرم افزار تجاری دیانا<sup>۱</sup> مدل سازی کردند.

لئون و همکاران [۱۰] اثر دماهای بالا (۲۰، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی گراد) بر روی رفتار چسبندگی اتصال بتن و FRP را مورد مطالعه قرار دادند. در این آزمایشات، از الیاف مسلح شده کربن (CFRP) سخت و انعطاف پذیر و الیاف مسلح شده شیشه (GFRP) انعطاف پذیر استفاده شد. در نمونه های مقاوم شده با CFRP انعطاف پذیر با افزایش دما تا دمای گذار شیشه ای چسب (۵۵ درجه سانتی گراد)، بار نهایی افزایش یافته و در دماهای بالاتر از دمای گذار شیشه ای چسب، کاهش بار نهایی گزارش شد. در نمونه های مقاوم شده با CFRP سخت در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد روند برعکس گزارش شد و بار گسیختگی پایین تری نسبت به دمای اتاق مشاهده شد در حالیکه نمونه ها در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد، بار گسیختگی بالاتری نسبت به دمای اتاق داشتند.

آرودا و همکاران [۱۱] تحقیقاتی روی مدلسازی عددی چسبندگی بین بتن و CFRP را در دماهای بالا و هر دو روش چسبیده خارجی<sup>۲</sup> و نزدیک سطح<sup>۳</sup> انجام دادند. مدلسازی عددی توسط نرم افزار آباکوس انجام شد و با تحقیقات پیشین نویسندگان از لحاظ بار نهایی، منحنی بار-جابجایی و توزیع کرنش مقایسه شد. با افزایش دما در هر دو روش مقاوم سازی، کاهش سختی گزارش شد و ماکزیمم تنش برشی در روش نزدیک سطح بیشتر از روش چسبیده بوده است.

### ۳- نتایج مطالعات آزمایشگاهی

آزمایش هایی که توسط نویسندگان انجام شده اند [۶]، شامل ۹ تیر بتنی بدون آرماتور با ابعاد ۳۵۰×۳۵۰×۱۰۰ میلی متری مقاوم شده با CFRP انعطاف با رده های بمقاومت بتنی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال می باشند. برای هر رده مقاومت بتنی سه تیر مشابه در سه دمای مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و چسب مورد استفاده در این تحقیقات، یک چسب دو جزئی رزینی با نام تجاری اپیکوت ۸۲۸ و جزء سخت کننده آن با نام تجاری اپیکور اف ۲۰۵ شناخته می باشد. رزین اپوکسی بر پایه دی گلیسرل اترنول و سخت کننده بر پایه جزء عمل آورنده آمینی می باشد. طبق اطلاعات کارخانه تولید کننده چسب، نسبت استوکیومتری اختلاط این دو جزء بصورت ۵۸ جزء عمل آور به ازای ۱۰۰ واحد وزنی رزین اپوکسی می باشد. چانگ [۱۲] تحقیقات گسترده ای بر روی دمای گذار شیشه ای و مدول الاستیسیته اپوکسی استفاده شده در این مطالعه، با تغییر نسبت جزء سخت کننده انجام داده است. در این تحقیقات، برای رعایت استوکیومتری در اختلاط دو جزء چسب، با توجه به توضیحات بالا، طبق نتایج چانگ [۱۲] مقدار دمای گذار شیشه ای ( $T_g$ ) و مدول الاستیسیته (E) در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد بصورت زیر می باشند:

$$T_g = +70^{\circ}c$$

$$E' = 3400MPa$$

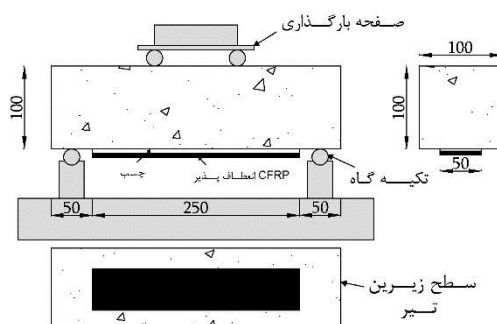
از هر رده مقاومتی بتن، یک نمونه در شرایط محیطی اتاق، یک نمونه در دمای مثبت ۵۰ درجه سانتی گراد (پایین تر از دمای گذار شیشه ای چسب) و یک نمونه در دمای مثبت ۸۰ درجه سانتی گراد که بالاتر از دمای گذار شیشه ای چسب می باشد، مورد آزمایش قرار گرفته اند. برای تعیین بار نهایی نمونه ها در آزمایش خمشی چهار نقطه ای، تیرها را بر روی یک تکیه گاه مفصلی و یک تکیه گاه غلطکی قرار داده و در یک سوم دهانه، بارگذاری گردیدند. طول دهانه بارگذاری نیز ۳۰ سانتی متر انتخاب شد. ورقه های CFRP انعطاف پذیر چسبیده، با پهنای ۵۰ میلی متر، ضخامت یازده صدم میلی متر و طول ۲۵۰ میلی متر استفاده شد. تمامی نمونه ها در همان دمای مورد نظر تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند. تغییر مکان عمودی وسط دهانه نیز توسط کرنش سنج دستی اندازه گیری گردید. برای اعمال شرایط دمای بالا، تیرهای تقویت شده، با پنج سیکل ۴۸ ساعته در درون آون قرار داده شدند. برای هر سیکل، نمونه

<sup>1</sup> DIANA

<sup>2</sup> Externally bonded reinforcement (EBR)

<sup>3</sup> Near surfaced mounted (NSM)

ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵۰ و یا ۸۰ درجه و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند و در طی افزایش دمای درون آن، سطح تقویت شده با CFRP رو به بالا قرار داده شد. برای انجام آزمون خمشی، نمونه های قرار داده شده در آن، تحت همان دما مورد آزمایش قرار گرفتند. دستگاه آزمون خمشی بصورت چهار نقطه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: دستگاه تست خمشی چهار نقطه ای

روند شکست تیرهای قرار گرفته در دمای اتاق، بصورت گسیختگی در وسط دهانه و جدایش ورقه ها به دلیل وجود ترک های خمشی بوده است. این مکانیزم جدایش ورقه ها توسط ماتیس [۴] تحت عنوان پل زدن ترک های خمشی تعریف شده اند. تنش کششی در محل ترک های خمشی توسط FRP تحمل شده و در نتیجه باعث ایجاد تمرکز تنش کششی در محل اتصال FRP با ترک خواهد شد. این تمرکز تنش بوسیله تنش های برشی در دو سمت ترک به بتن منتقل می شود.

روند شکست در تیرهای قرار گرفته در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد و ۸۰ درجه سانتی گراد بصورت گسیختگی در یک سوم دهانه ناشی از تنش های برشی بالا بوده است. این نوع مکانیزم جدایش ورقه ها، می تواند از نوک ترک برشی آغاز شود. همانطور که توسط ماتیس [۴] توضیح داده شده است، بدلیل شکل مورب ترک های برشی هر دو نوع جابجایی افقی و عمودی بین دو سمت ترک اتفاق می افتد. جابجایی عمودی موجب ایجاد تنش های برشی عمود بر سطح بتن در یک طرف ترک می شود که در ترکیب با تنش برشی داخل بتن می تواند فرآیند جدایش FRP را آغاز کند. این وضعیت معمولاً در مناطقی با ترکیبی از تنش برشی بالا و نیروی خمشی و ترک های مایل کمتر، ایجاد می شود.

#### ۴- توسعه چارچوب مدل سازی

تمرکز اصلی این بخش توسعه چارچوب مدل سازی برای نشان دادن رفتار تیرهای مقاوم سازی شده با FRP می باشد. این مسئله شامل جنبه های مختلف تئوری و عملی می باشد. پارامترهای مهم این بخش شامل مدل سازی مواد، نوع المان، مش بندی، همگرایی و شرایط مرزی است. به منظور تصدیق کیفیت مدل، نتایج آن بایستی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شوند. چگونگی کنترل این موضوع در این بخش توضیح داده شده است. البته بایستی در نظر داشت که نتایج المان محدود عموماً با تقریبی نسبت به واقعیت و وابسته به مدل سازی صحیح مسئله ارائه شده است.

#### ۴-۱- برنامه المان محدود

روش المان محدود روشی کاملاً پذیرفته و مستدل است که می توان از آن برای تحلیل مسائل مهندسی سازه استفاده کرد. بطور مثال در تئوری، محاسبه تنش ها در یک تیر مقاوم سازی شده در معرض بارگذاری خارجی بوسیله حل یک سری معادلات دیفرانسیل امکان پذیر می باشد. این معادلات بایستی رفتار واقعی سازه مانند رفتار مصالح، بارگذاری خارجی، تکیه گاه ها و ... را پوشش دهد. در بسیاری از موارد این مسئله باعث ایجاد معادلات بسیار پیچیده می شود که براحتی قابل حل نیستند [۱۳]. روش المان محدود، روشی برای تقریب پاسخ معادلات دیفرانسیل بوسیله گسسته سازی مسائل پیوسته به تعدادی از المان های محدود می باشد. این المان ها را می توان

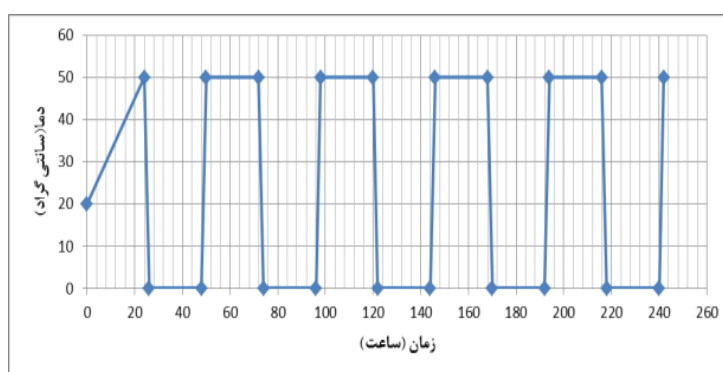
بوسیله یک سری از معادلات جبری قابل حل، تعریف کرد که برای حل آنها می‌توان از کامپیوتر کمک گرفت [۱۴]. برای مدلسازی المان محدود در این پروژه از بسته نرم‌افزاری آباکوس استاندارد استفاده شده است. این بسته المان محدود شامل مدل‌های مواد و المان‌های بسیار مختلف می‌باشد؛ که شامل موارد ضروری در این موضوع خاص نیز می‌باشد.

#### ۴-۲- روند مدل سازی

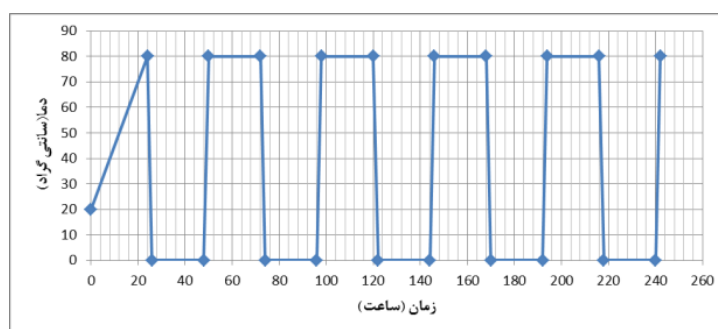
برای تحلیل جداولی مصالح CFRP از سطح بتن، تست‌های مقاومت خمشی در آزمایشگاه، در دو مرحله انجام شده‌اند. در مرحله اول نمونه‌ها درون آون گرما دیده و در مرحله دوم نمونه‌ها در دستگاه بارگذاری خمشی تست شدند. این توالی مراحل در تحلیل المان محدود نیز اتخاذ شده‌اند.

#### ۴-۲-۱- گرم و سرد کردن نمونه‌ها

در تحلیل اجزای محدود، در مرحله اول، دمای نمونه‌ها از دمای اتاق (۲۰ درجه سانتی‌گراد) تا دمای مورد نظر بالا برده شده‌اند. سیکل‌های حرارتی اعمال شده به نرم‌افزار در این مرحله همانند روند سیکل‌های دمایی اعمال شده به نمونه‌ها در آزمایشگاه به مدت ۱۰ روز می‌باشد. مشخصات وابسته به دمای مصالح و ضریب انبساط حرارتی در مصالح مختلف برای شبیه‌سازی اثر تغییر دما نیز اعمال می‌گردد. اثرات ممکن سیکل‌های دمایی و همچنین اثر دما در مشخصات مصالح در نتایج المان محدود، در قسمت‌های بعد توضیح داده شده است. سیکل‌های دمایی در دماهای ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: سیکل دمایی اعمال شده در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد



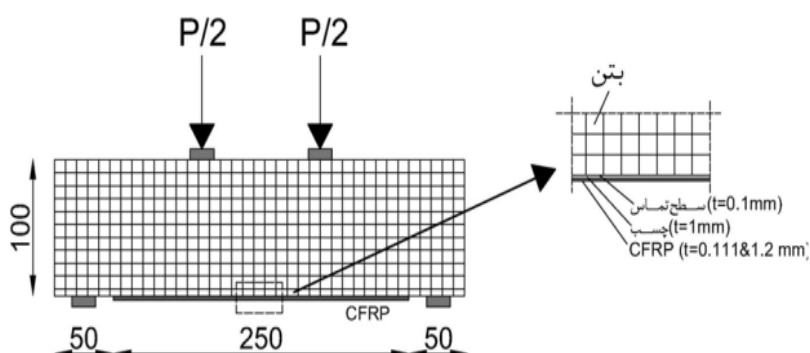
شکل ۳: سیکل دمایی اعمال شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد

## ۴-۲-۲- بارگذاری نمونه ها

پس از گرم کردن نمونه ها، اولین نقطه مرحله دوم مدل سازی، مرحله اعمال بارگذاری خارجی می باشد. در این مرحله مشخصات وابسته به دمای مصالح ثابت نگه داشته شده و بار مکانیکی اعمال شده در آزمایشگاه به مدل ایجاد شده اثر داده می شود.

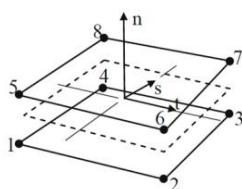
## ۴-۳- مدل های پیوسته المان محدود

مدل المان محدود آزمایش خمشی چهار نقطه ای خمشی، در شکل ۴ نشان داده شده است. برای تحلیل المان محدود، در قسمت پایین تیر دو تکیه گاه صلب به عرض ۲ سانتی متر در نظر گرفته شده است. بارگذاری نیز در یک سوم دهانه توسط دو صفحه صلب به عرض ۲ سانتی متر که تنها مقید به حرکت در جهت عمود بر محور تیر است، اعمال می شود.

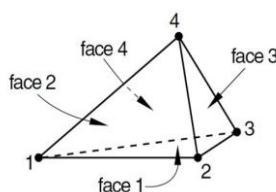


شکل ۴: مدل المان محدود بارگذاری چهار نقطه ای آزمایش خمشی نمونه ها

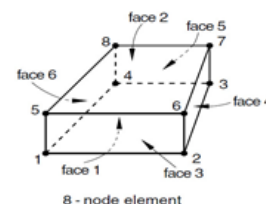
برای مدل سازی بتن از المان های هشت گره ای سه بعدی مرکب برای حرارت و جابجایی به نام C3D8RT و برای CFRP از المان چهار نقطه ای غشای نازک با ۵ درجه آزادی در هر گره به نام S4RT و برای چسب از المان هشت نقطه ای سه بعدی چسب (Cohesive) به نام COH3D8 استفاده شده است. پیکر بندی المان ها در شکل ۵ نشان داده شده است.



ج) المان سه بعدی ۸ گره ای cohesive



ب) المان سه بعدی ۴ گره ای shell



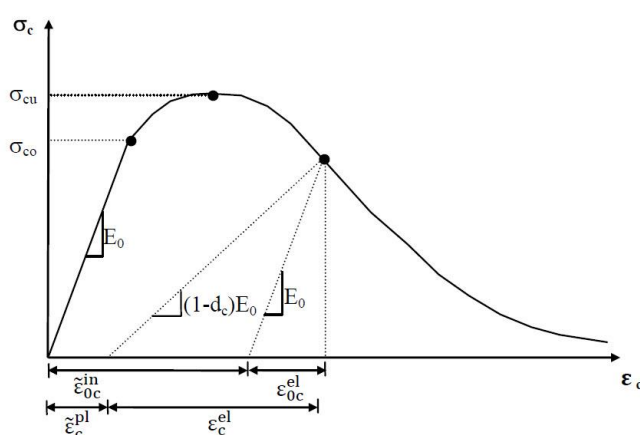
الف) المان سه بعدی ۸ گره ای solid

شکل ۵: پیکر بندی المان های مورد استفاده در تحلیل المان محدود

## ۴-۳-۱- بتن

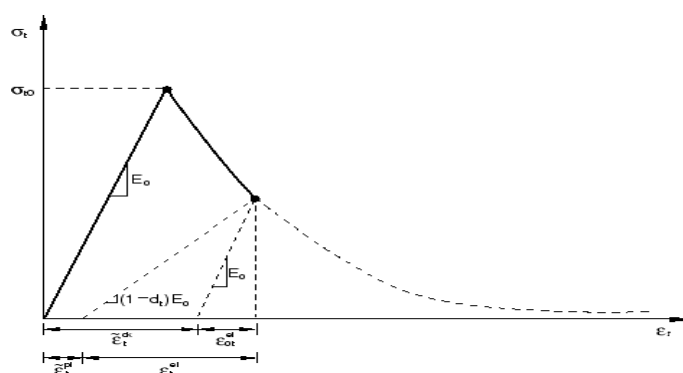
در دهه اخیر مدل های پیوسته بسیاری که توانایی پیش بینی رفتار بتن شامل ترک ها و خورد شدن را دارا می باشند، توسعه یافته اند. برای پیش بینی رفتار بتن در Abaqus دو رویکرد وجود دارد: مدل پلاستیک آسیب دیده (Plastic Damage Model) و مدل ترک اندود (Smearred Crack). مدل پلاستیک آسیب دیده بخاطر پتانسیل همگرایی بیشتر نسبت به مدل ترک اندود، برای این تحقیق انتخاب شده است. مدل پلاستیک آسیب دیده فرض می کند که دو مکانیزم اصلی شکست بتن، ترک خوردگی و خورد شدن فشاری بتن می باشد. گسترش ترک با استفاده از مکانیزم های شکست پیوسته و کاهش سختی مدل می شود [۱۵]. مدل پلاستیک آسیب دیده به مقدار مدول

الاستیسیته، نسبت پواسون، پارامترهای آسیب پلاستیک و تعریف رفتار فشاری و کششی نیاز دارد. در مدل مذکور، فرض می‌گردد که پاسخ به کشش و فشار تک محوره به وسیله معیار خرابی پلاستیک کنترل می‌شود که در شکل ۶ نشان داده شده است. در اثر کشش تک محوره منحنی تنش - کشش تا نقطه تنش خرابی به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک های ریز در بتن مقارن می‌باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی ها به صورت ترک های قابل مشاهده در می‌آیند که به صورت منحنی «نرم شدگی» در فضای تنش - کرنش نمایش داده می‌شوند. تحت فشار تک محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدگی به صورت الاستیک خواهد بود و در ناحیه پلاستیک رفتار عموماً به وسیله منحنی سخت شدگی بیان می‌شود که در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی، منحنی ها به صورت منحنی نرم شدگی در می‌آیند. این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی، خصوصیات اصلی بتن را ارضاء می‌کند [۱۶]. منحنی تنش کرنش پس از تنش نهایی می‌تواند بصورت رژیم نرم شوندگی کرنش تعریف شود. کرنش فشاری غیر الاستیک  $\epsilon_{0c}^{in}$  از رابطه کرنش کل منهای کرنش الاستیک ( $\tilde{\epsilon}_{0c}^{in} = \epsilon_c - \epsilon_{0c}^{el}$ ) بدست می‌آید که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: منحنی پاسخ بتن در بارگذاری تک محوره فشاری [۱۶]

رفتار بتن در کشش بوسیله رویکرد الاستیک خطی تا شروع ترک خوردگی در مقاومت کششی مدل می‌شود. پس از شروع ترک، نرم شوندگی آغاز می‌شود که به ما اجازه تعریف رفتار نرم شوندگی کرنش برای بتن ترک خورده را می‌دهد. نرم شوندگی کششی در مدل پلاستیک آسیب دیده مورد نیاز است. این مسئله در شکل ۷ نشان داده شده است [۱۷].



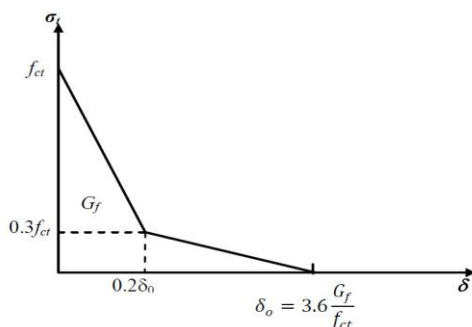
شکل ۷: منحنی پاسخ بتن در بارگذاری تک محوره کششی [۱۶]

در این مقاله از فرضیه انرژی شکست هیلزبورگ استفاده شده است که با استفاده از مفاهیم شکست ترد، انرژی مورد نیاز برای تشکیل سطح واحد شکست ( $G_f$ ) را بعنوان یک پارامتر ماده تعریف می‌نماید. در این روش، رفتار ترد بتن بیشتر با منحنی تنش - جابجایی



مشخص می‌شود تا منحنی تنش - کرنش تحت کشش.

از سوی دیگر  $G_f$  را می‌توان به عنوان یک ویژگی از ماده فرض کرد. در نتیجه تنش شکست  $f_{ct}$  که مقاومت کششی تک محوره بتن می‌باشد، به عنوان تابعی از آن بدست می‌آید و کاهش انرژی بصورت خطی فرض می‌شود. منحنی نرم شوندهگی بتن تحت کشش در شکل ۸ نشان داده شده است [۱۸].



شکل ۸: منحنی نرم شوندهگی بتن تحت کشش تک محوری [۱۸]

مقادیر رایج  $G_f$ ، بین ۴۰ نیوتن بر متر برای بتن معمولی (با مقاومت فشاری در حدود ۲۰ مگاپاسکال) تا ۱۲۰ نیوتن بر متر برای بتن با مقاومت بالا (مقاومت فشاری در حدود ۴۰ مگاپاسکال) متغیر است [۱۶]. مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن را می‌توان برترتیب از روابط ۱ و ۲ (ACI318-99) بدست آورد [۱۹].

$$f_{ct} = 0.33\sqrt{f'_c} \text{ MPa} \quad (1)$$

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \text{ MPa} \quad (2)$$

همانطور که در شکل های ۶ و ۷ دیده می‌شود در اثر باربرداری از نمونه در قسمت نرم شوندهگی، شیب منحنی باربرداری کمتر از شیب منحنی الاستیک است که نشان دهنده آسیب دیدگی نمونه می‌باشد. کاهش سختی الاستیک بوسیله دو متغیر  $d_t$  و  $d_c$  مشخص می‌شود. متغیرهای آسیب می‌توانند مقداری از صفر (نشان دهنده ماده بدون آسیب) تا یک (نشان دهنده از دست دادن کامل مقاومت) داشته باشند. بین متغیرهای آسیب و تنش ها رابطه خطی فرض می‌شود. مقدار  $d_c$  و  $d_t$  از روابط ۳ و ۴ بدست می‌آید [۲۰].

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} \left( \frac{1}{b_c} - 1 \right) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (3)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_t^{pl} \left( \frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_t E_c^{-1}} \quad (4)$$

که در آن  $\sigma_c$  تنش فشاری بتن،  $\sigma_t$  تنش کششی بتن،  $E_c$  مدول یانگ بتن و مقادیر  $b_t$  و  $b_c$  عددی بین صفر و یک می‌باشد. با توجه به مقالات در این پروژه  $b_t = 0.1$  و  $b_c = 0.7$  پروژه در این منحنی تنش-کرنش تک محوری فشاری مورد استفاده در این پروژه از رابطه تنش-کرنش پیشنهادی ساز (رابطه ۵) استفاده شده است [۲۱].

$$\sigma_c = \frac{E_c \epsilon_c}{1 + (R + R_E - 2) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - (2R - 1) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 + R \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^3} \quad (5)$$

$$R = \frac{R_E(R_E - 1)}{(R_E - 1)^2} - \frac{1}{R_E}, R_E = \frac{E_c}{E_0}, E_0 = \frac{f'_c}{\epsilon_0}, \epsilon_0 = 0.0025, R_E = 4, R_\sigma = 4 \quad \text{که در آن:}$$

نسبت پواسون برای بتن ۰/۲ در نظر گرفته شده است. همانطور که گفته شد برای تعیین مدول یانگ و مقاومت کششی از آئین نامه ACI318-99 (روابط ۱ و ۲) استفاده شده است. همچنین در آئین نامه ACI 216-89 نمودارهایی برای تغییرات مدول یانگ و مقاومت

فشاری بتن در دماهای بالا و با توجه به نوع سنگدانه ارائه شده است که برای تخمین این پارامترها از این آئین نامه استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات بتن مورد استفاده و همچنین اثر دما بر روی مشخصات بتن که در آنالیز المان محدود اعمال شده است نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات بتن مورد استفاده در تحلیل المان محدود

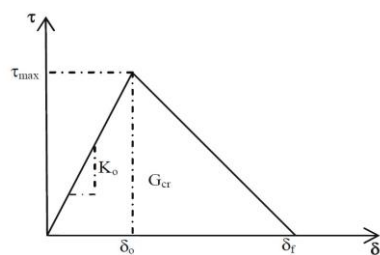
۴۰	۳۰	۲۰	رده مقاومتی (MPa)
۲۴۰۰	۲۴۰۰	۲۴۰۰	چگالی ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
			مدول یانگ (MPa)
۲۹۰۵۸	۲۶۰۶۳	۲۰۵۸۲	۲۰ درجه سانتی گراد
۲۷۷۸۵	۲۴۴۹۹	۱۹۶۰۱	۵۰ درجه سانتی گراد
۲۵۴۲۰	۲۲۴۱۴	۱۷۹۳۲	۸۰ درجه سانتی گراد
۰/۲	۰/۲	۰/۲	نسبت پوآسون
			مقاومت فشاری (MPa)
۳۹/۵۵	۳۰/۷۵	۱۹/۶۸	۲۰ درجه سانتی گراد
۳۷/۱۸	۲۸/۹۱	۱۸/۵۰	۵۰ درجه سانتی گراد
۳۴/۰۱	۲۶/۴۵	۱۶/۹۳	۸۰ درجه سانتی گراد
			مقاومت کششی (MPa)
۲۰/۸۱	۱۸/۳۶	۱۴/۶۰	۲۰ درجه سانتی گراد
۲۰/۱۱	۱۷/۷۲	۱۴/۲۳	۵۰ درجه سانتی گراد
۱۹/۲۸	۱۷/۰۳	۱۳/۶۷	۸۰ درجه سانتی گراد
۱۰-۰	۱۰-۰	۱۰-۰	ضریب انبساط حرارتی

## FRP - ۲-۳-۴

در این تحقیق، بدلیل اینکه کامپوزیت های مورد استفاده یک جهت می باشند، مصالح CFRP بصورت الاستیک خطی ارتوتروپیک در نظر گرفته شده است. برای مدول الاستیسیته در جهت الیاف مصالح یک جهت CFRP از مقدار ارائه شده توسط کارخانه تولید کننده استفاده شده است. برای مدل کردن مواد ارتوتروپیک از قوانین ترکیب [۲۲] استفاده می کنیم. مصالح CFRP مورد استفاده در این تحقیقات محصول کارخانه Korea RE & T Co., است که مشخصات CFRP انعطاف پذیر (با نام تجاری Kor-CFW200) با مدول یانگ ۲۳۰ گیگاپاسکال و مقاومت کششی ۴۹۰۰ مگاپاسکال و کرنش گسیختگی ۰/۰۲۱ بوده است.

## CFRP - ۳-۳-۴ - سطح تماس بتن

سطح تماس بتن و CFRP با استفاده از مدل منطقه چسبناک (Cohesive) مدل سازی شده است. شکل ۹ بصورت گرافیکی قانون خطی کشش-جداشدگی را که بوسیله پارامترهای کشش موثر  $\tau$  و تغییر مکان باز شدگی  $\delta$  را بیان می کند.



شکل ۹: قانون پیوسته خطی کشش-جداشدگی

سطح تماس بوسیله منطقه ای با ضخامت کم و سختی اولیه  $K_0$  مدل شده است. از شکل ۹ بوضوح مشخص است که برای تعریف روابط بین کشش و جدایشگی به  $K_0$ ، مقاومت موضعی مصالح ( $\tau_{max}$ )، تغییر مکان بازشدگی در شکست ( $\delta_f$ ) و انرژی مورد نیاز برای باز کردن ترک  $G_{cr}$  (سطح زیر منحنی کشش-جدایشگی) نیاز است. روابط ۶ و ۷ حد بالایی برای تنش برشی بیشینه را ارائه می‌دهد.

$$\tau_c = 1.5 \beta_w f_{ct} \quad (6)$$

$$\beta_w = \sqrt{\left(2.25 - \frac{b_f}{b_c}\right) / \left(1.25 + \frac{b_f}{b_c}\right)} \quad (7)$$

که در آن  $b_f$  عرض ورقه CFRP،  $b_c$  عرض بتن و  $f_{ct}$  مقاومت کششی بتن می‌باشد. محققان برای انرژی شکست  $G_{cr}$  اعدادی بین ۳۰۰ ژول بر مترمربع تا ۱۵۰۰ ژول بر مترمربع را ارائه کرده اند [۲۳]. طبق رابطه ۸ فرض می‌شود شروع آسیب، هنگامی اتفاق می‌افتد که در اثر تنش‌های اسمی، مجموع نسبت تابع تنش درجه دو به مقدار ۱ برسد.

$$\left\{\frac{\sigma_n}{\sigma_n^0}\right\}^2 + \left\{\frac{\tau_s}{\tau_s^0}\right\}^2 + \left\{\frac{\tau_t}{\tau_t^0}\right\}^2 = 1 \quad (8)$$

که در آن  $\sigma_n$  کشش در چسب و  $\tau_s$  و  $\tau_t$  تنش‌های برشی در سطح تماس می‌باشند. روند آسیب سطح تماس بوسیله پارامتر رهاسازی انرژی بیان می‌شود. تشریح این مدل در مجموعه المان‌های آباکوس موجود است. وابستگی به انرژی شکست بر پایه ضوابط ارائه شده توسط بنزاگ و کنان در سال ۱۹۹۶ [۱۸] تعریف می‌شود. این ضوابط شکست، بویژه وقتی که انرژی‌های شکست بحرانی در طی تغییر شکل در طول جهت‌های اولیه و ثانویه برشی با هم برابر هستند، مفید می‌باشد.

## ۵- نتایج عددی و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج عددی المان محدود و آزمایشگاهی از نظر بار نهایی و نمودارهای بار-جابجایی و الگوی ترک خوردگی با دیدگر مقایسه شده اند. در نهایت نتایج المان محدود با مدل‌های تحلیلی ارائه شده برای محاسبه کرنش در CFRP، تنش برشی و نرمال در بتن ناشی از تغییر دما مقایسه شده اند.

### ۵-۱- بار نهایی آزمایش خمشی ۴ نقطه‌ای

مقایسه نتایج بار نهایی نمونه‌ها در آزمایشگاه و بارنهایی بدست آمده از روش المان محدود و درصد اختلاف متناظر در جدول ۲ آورده شده است. می‌توان مشاهده کرد که اختلاف نسبی نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی پایین بوده و مدلسازی عددی المان محدود بطور کلی تطابق خوبی با شرایط آزمایشگاهی داشته است. در بین نمونه‌ها، مدل المان محدود تیرهای ساخته شده با بتن با رده مقاومتی ۳۰ مگاپاسکال تطابق بهتری با شرایط آزمایشگاهی داشته و همچنین در بین دمای مورد مطالعه مدلسازی هر سه رده بتن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد کمترین اختلاف نتایج را از نظر بار نهایی داشته است.

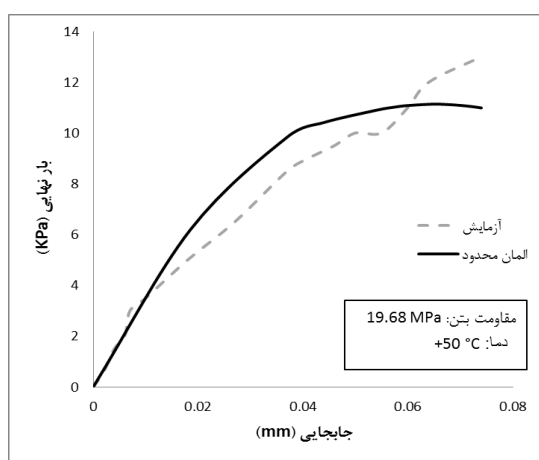
در دمای اتاق با افزایش رده مقاومتی بتن میزان خطای مدلسازی از ۱/۸۱ به ۱۳/۲۴ درصد افزایش پیدا کرده است، در حالیکه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد درصد خطا با افزایش رده مقاومتی بتن از ۱۵/۵۴ به ۰/۲۱ کاهش پیدا کرده است.

جدول ۲: مقایسه بار نهایی آزمایش و بار نهایی المان محدود

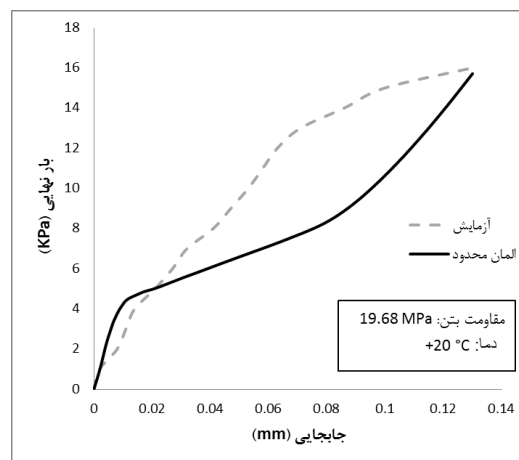
مقاومت فشاری استوانه ای نمونه (مگاپاسکال)	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	بار نهایی آزمایش (کیلو نیوتن)	بار نهایی تحلیل عددی (کیلو نیوتن)	اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی (درصد)
۱۹/۶۸	۲۰	۱۶	۱۵/۷۱	۱/۸۱
	۵۰	۱۳	۱۰/۹۸	۱۵/۵۴
	۸۰	۱۰	۱۰/۱۵	-۱/۵۰
۳۰/۷۵	۲۰	۱۸	۱۹/۴۳	-۷/۹۴
	۵۰	۱۵	۱۵/۴۵	-۳/۰۰
	۸۰	۱۴	۱۴/۹۳	-۶/۶۴
۳۹/۵۵	۲۰	۲۱	۲۳/۷۸	-۱۳/۲۴
	۵۰	۱۹	۱۸/۹۶	۰/۲۱
	۸۰	۱۸	۱۷/۸۳	۰/۹۴

### ۵-۲- منحنی های بار نهایی - جابجایی

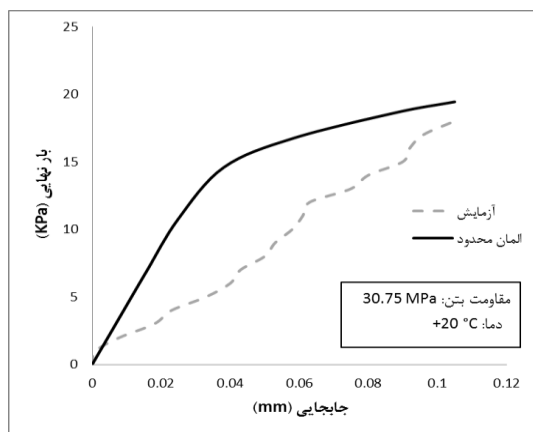
مقایسه منحنی های بار نهایی - تغییر مکان آزمایشگاهی (خط چین) و المان محدود (خط ممتد) در شکل ۱۰ رسم شده است. نتایج تحلیل المان محدود، همانند نتایج آزمایشگاهی، کاهش بار نهایی گسیختگی با افزایش دما را نشان می‌دهد. نمودارهای بار نهایی-تغییر مکان مشخص می‌کند که نمونه های با مقاومت مشخصه ۱۹/۶۸ و ۳۹/۵۵ مگاپاسکال در دماهای ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین انطباق را با نتایج آزمایشگاهی داشته اند.



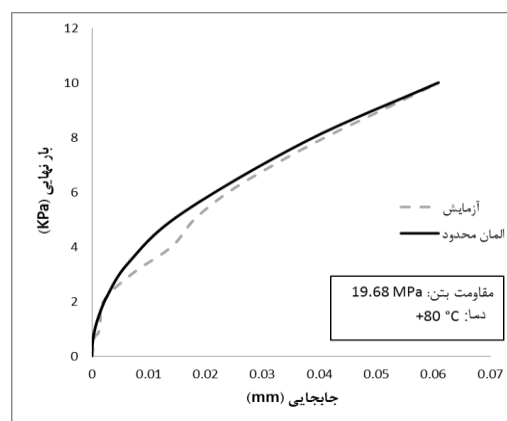
ب) منحنی بار-جابجایی آزمایشگاهی و المان محدود برای نمونه با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد



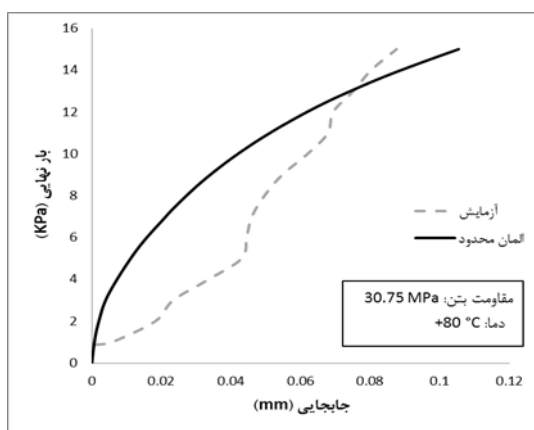
الف) منحنی بار-جابجایی آزمایشگاهی و المان محدود برای نمونه با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد



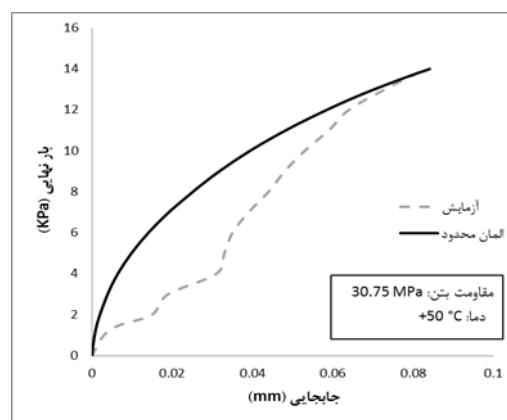
(ت) منحنی بار - جابجایی آزمایشگاهی و المان محدود برای نمونه با مقاومت فشاری ۳۰/۷۵ مگاپاسکال و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد



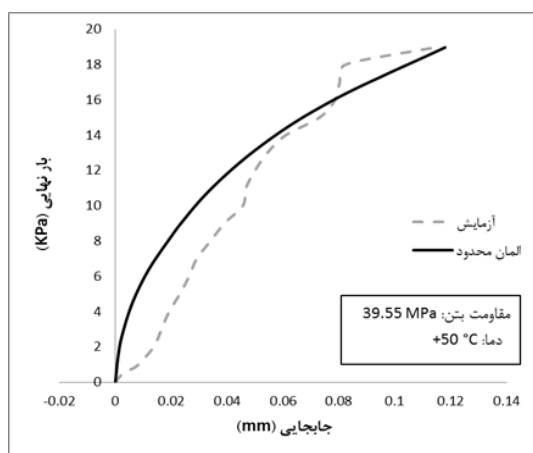
(پ) منحنی بار - جابجایی آزمایشگاهی و المان محدود برای نمونه با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد



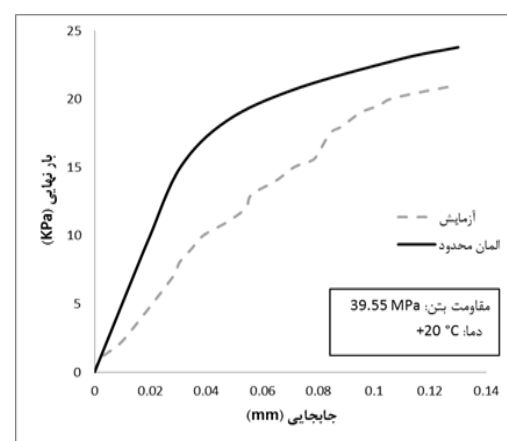
(ج) منحنی بار - جابجایی آزمایشگاهی و المان محدود برای نمونه با مقاومت فشاری ۳۰/۷۵ مگاپاسکال و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد



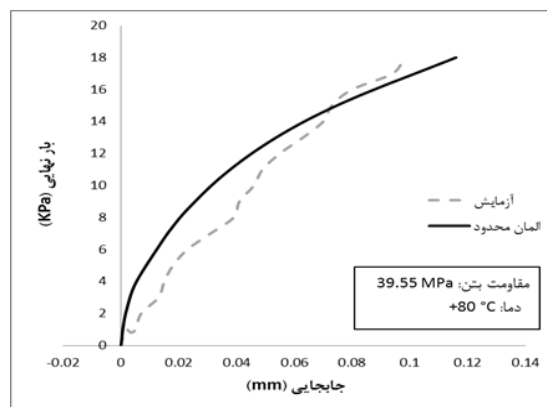
(ث) منحنی بار - جابجایی آزمایشگاهی و المان محدود برای نمونه با مقاومت فشاری ۳۰/۷۵ مگاپاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد



(ح) منحنی بار - جابجایی آزمایشگاهی و المان محدود برای نمونه با مقاومت فشاری ۳۹/۵۵ مگاپاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد



(چ) منحنی بار - جابجایی آزمایشگاهی و المان محدود برای نمونه با مقاومت فشاری ۳۹/۵۵ مگاپاسکال و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد



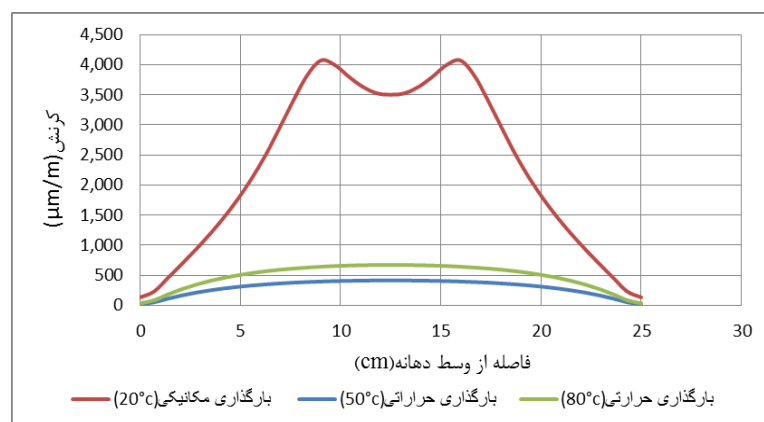
شکل ۱۰: نمودار بار نهایی-جابجایی آزمایشگاهی و المان محدود برای نمونه با مقاومت فشاری ۳۹/۵۵ مگاپاسکال و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد

شکل ۱۰: نمودار بار نهایی-جابجایی آزمایشگاهی و تحلیل المان محدود

تفاوت بین روند شکست نمونه‌ها برای دمای اتاق و دماهای بالا ممکن است ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی بتن و CFRP و توسعه تنش‌های برشی، علاوه بر تنش‌های برشی بارگذاری، به دلیل عدم وجود فولاد برشی موجب جدایش در ترک‌های برشی باشد. کلامر در سال ۲۰۰۹ ذکر کرده است که با تغییر درجه حرارت، تفاوت ضریب انبساط حرارتی بین بتن و CFRP، باعث ایجاد تنش‌های حرارتی داخل بتن و CFRP می‌شود [۹]. یک مدل سینماتیک توسط دی توماسو و همکاران در سال ۲۰۰۱ برای محاسبه تنش‌های برشی در بتن و تنش‌های نرمال در FRP ارائه شده است [۷]. از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که این تنش‌های حرارتی همانند تنش‌های ناشی از بارگذاری روی نمونه‌ها تاثیر می‌گذارند. مسئله دیگری که باید در نظر داشت کاهش مدول یانگ چسب با افزایش دما و تاثیر آن بر مقاومت چسبندگی بین سطح بتن و چسب است. بایستی توجه داشت که گرما هم بر رفتار منحصر به فرد مواد و هم بر پارامترهای اتصال بین FRP، چسب و بتن تاثیر می‌گذارد.

### ۵-۳- تاثیر کرنش‌های حرارتی

برای تحقیق درباره تاثیر کرنش‌های حرارتی بر روی CFRP، مقدار کرنش در CFRP در نتیجه بارگذاری مکانیکی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد با کرنش بدست آمده توسط بارگذاری حرارتی در پایان گرم و سرد کردن نمونه‌ها از مدل المان محدود استخراج شده و با هم مقایسه شده‌اند. مقایسه کرنش در CFRP ناشی از حرارت در دماهای ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد و کرنش ناشی از بارگذاری مکانیکی در دمای اتاق در نمونه با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال در شکل ۱۱ رسم شده است.



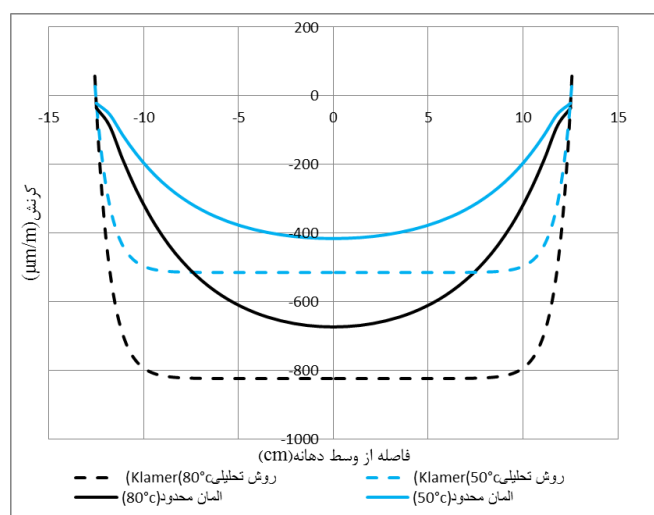
شکل ۱۱: مقایسه کرنش در CFRP ناشی از حرارت در دماهای ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد و کرنش ناشی از بارگذاری مکانیکی در دمای اتاق در نمونه‌های با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال

با مقایسه کرنش CFRP ناشی از بارگذاری در دمای اتاق و کرنش ناشی از حرارت بدست آمده از تحلیل المان محدود به این نتیجه می‌رسیم که نقش عدم تناسب ضریب انبساط حرارتی کمتر از نقش کاهش مشخصات مکانیکی در اثر حرارت می‌باشد.

#### ۵-۴- مقایسه نتایج المان محدود با نتایج تحلیلی

همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد عدم تناسب حرارتی بین بتن و CFRP، کرنش‌ها و تنش‌هایی را در بتن و CFRP در دماهای بالا ایجاد می‌کند. این مسئله بوسیله مدلی توسط دی توماسو در سال ۲۰۰۱ ارائه شده است [۷]. در این مدل فرض می‌شود که FRP در طول خود روی فنرهای الاستیک که نشان دهنده سختی برشی بتن ( $K_{GC}$ ) هستند، قرار گرفته است. این مدل توسط کلامر اصلاح شده و سختی برشی چسب بوسیله فنرهایی با سختی  $K_{GA}$  در محاسبات لحاظ شده است. بدین منظور برای تعیین کرنش حرارتی در CFRP از رابطه ۹ استفاده شد [۹]. مقایسه کرنش‌های حرارتی در CFRP پس از بالا رفتن دما توسط رابطه تحلیلی کلامر و تحلیل المان محدود در نمونه‌های با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال در شکل ۱۲ رسم شده است.

$$\varepsilon_{f\Delta T}(x) = \left[ \frac{\varepsilon_{\Delta T}}{\cosh(\omega \cdot l/2)} \cdot \cosh(\omega \cdot x) - \varepsilon_{\Delta T} \right] + \alpha_f \cdot \Delta T \quad (9)$$



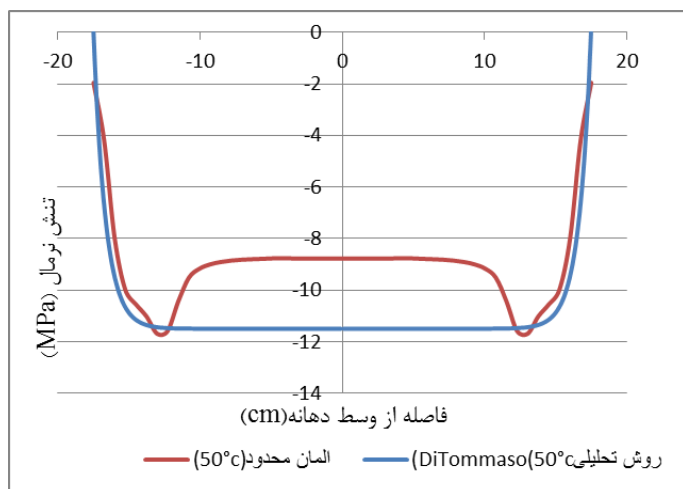
شکل ۱۲: مقایسه کرنش‌های حرارتی در CFRP پس از بالا رفتن دما توسط رابطه تحلیلی کلامر و تحلیل المان محدود در نمونه‌های با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال

توزیع تنش برشی و نرمال در بتن و در نزدیکی سطح تماس بتن و چسب را می‌توان به ترتیب از روابط ۱۰ و ۱۱ که توسط دی توماسو در سال ۲۰۰۱ ارائه شده، بدست آورد.

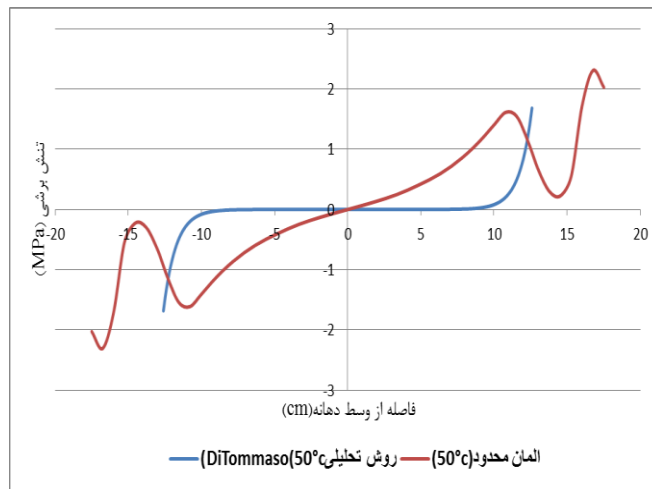
$$\tau_{c\Delta T}(x) = -E_f \cdot t_f \cdot \omega \cdot \frac{\varepsilon_{\Delta T}}{\cosh(\omega \cdot l/2)} \cdot \sinh(\omega \cdot x) \quad (10)$$

$$\sigma_{f\Delta T}(x) = -E_f \left[ \frac{\varepsilon_{\Delta T}}{\cosh(\omega \cdot l/2)} \cdot \cosh(\omega \cdot x) - \varepsilon_{\Delta T} \right] \quad (11)$$

مقایسه توزیع تنش برشی و نرمال در بتن بدست آمده از روابط ۱۰ و ۱۱ و نتایج المان محدود در نمونه‌های با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آمده است.



شکل ۱۴: نمودار تنش نرمال در بتن پس از بالا رفتن دما در نمونه های با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد

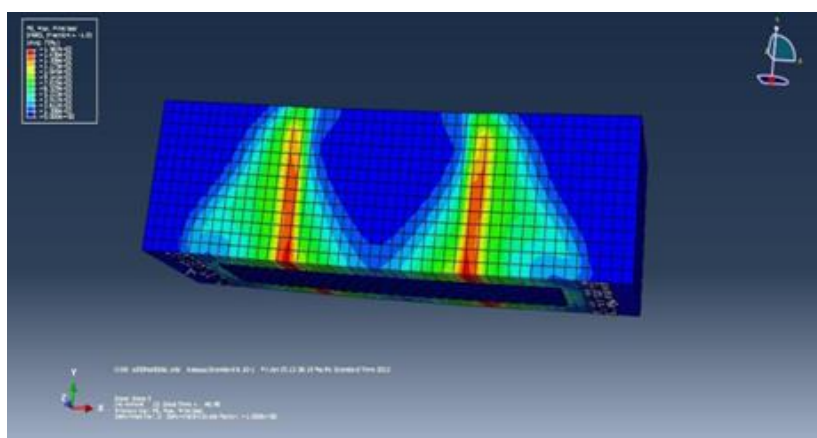


شکل ۱۳: نمودار تنش برشی در بتن پس از بالا رفتن دما در نمونه های با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد

علت اختلاف در پاسخ های المان محدود و تحلیل عددی را می توان ناشی از در نظر نگرفتن خواص کشش-جداشدگی سطح تماس در مدل تحلیلی در نظر گرفت. همینطور در مدل سازی تحلیلی، رفتار مصالح به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است، در صورتی که در تحلیل المان محدود مدل بتن بصورت مدل پلاستیک آسیب دیده تعریف شده است. همانطور که مشاهده می شود روش تحلیلی نتایج بیشتری را در قسمت مجاور CFRP از خود نشان می دهد اما در قسمت های تکیه گاه تا انتهای تیر این دو نمودار همپوشانی خوبی با یکدیگر دارند.

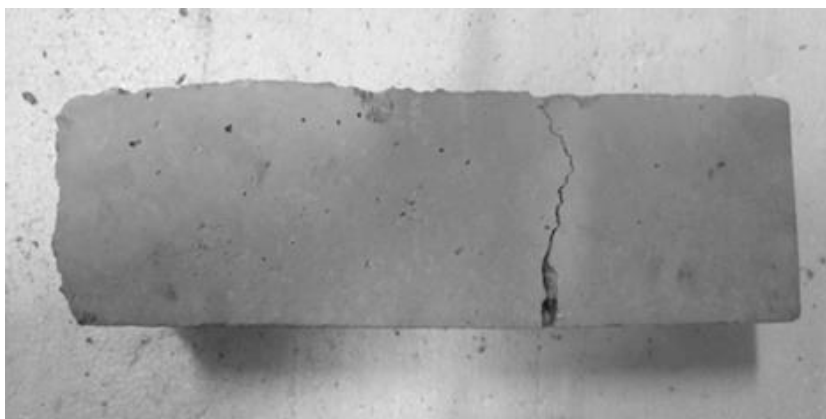
## ۵-۵- مقایسه روند ترک نمونه ها بوسیله المان محدود با نتایج آزمایشگاهی

روند ترک خوردگی اغلب نمونه های مورد آزمایش بصورت ترک عمودی در قسمت یک سوم دهانه می باشد که نتایج آنالیز المان محدود نیز این مسئله را نشان می دهد. در شکل ۱۵ نمونه ترک خوردگی تیر با مقاومت فشاری ۱۹/۶۸ مگاپاسکال در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد نشان داده شده است.



شکل ۱۵: مقایسه روند ترک خوردگی در آزمایشگاه و آنالیز المان محدود





ادامه شکل ۱۵:

## ۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیل المان محدود، یافته های این مطالعات بدین شرح است: نتایج آزمایشگاهی نشان می دهند: حرارت هم بر روی مقاومت نهایی و هم بر روی رفتار گسیختگی نمونه ها موثر است. تاثیر افزایش دما بر روی پخش تنش برشی ناشی از گسترش تنش حرارتی در نتیجه اختلاف ضریب انبساط حرارتی و کاهش سختی چسب و تغییرات وابسته به دمای مشخصات مکانیکی مصالح می باشد. اختلاف ضریب انبساط حرارتی موجب ایجاد تنش ها و کرنش های حرارتی اضافه شده که موجب کاهش مقاومت نهایی می شوند. روند شکست در تیرهای قرار گرفته در دمای اتاق بصورت گسیختگی در وسط دهانه (ناشی از ترک های خمشی) و در بقیه تیرها گسیختگی در قسمت یک سوم دهانه و زیر بار می باشد که ناشی از تنش های برشی زیاد می باشد.

نتایج آنالیز المان محدود تطابق خوبی با نمودار های آزمایشگاهی داشته و قابلیت مقایسه با روش های عددی ارائه شده در مقالات را به ما می دهد.

با توجه به نتایج آنالیز المان محدود، کرنش ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی نقش کمتری نسبت به کاهش مشخصات مکانیکی مصالح دارد. با مقایسه نتایج المان محدود با نتایج فرمول های ارائه شده در قسمت کرنش های CFRP، مقدار بدست آمده از المان محدود کمتر از روش عددی می باشد. تنش های برشی ناشی از حرارت در بتن تا انتهای صفحه CFRP اضافه شده و سپس تا تکیه گاه کاهش یافته و دوباره در قسمت انتهایی تیر به مقدار بیشینه خود می رسد ولی در روش تحلیلی این مقدار تقریباً تا انتهای CFRP صفر فرض شده و در انتها با شیب زیادی افزایش می یابد. این دو روش از لحاظ مقدار بیشینه در انتهای CFRP تقریباً برابر هستند. با مقایسه نتایج المان محدود و روش های تحلیلی، تنش نرمال در بتن مجاور با FRP ناشی از حرارت، روش تحلیلی نتایج بیشتری را در قسمت مجاور CFRP از خود نشان می دهد اما در قسمت های تکیه گاه تا انتهای تیر این دو نمودار همپوشانی خوبی با یکدیگر دارند.

## مراجع

- [1] Harries, K. A., Porter, M. L., and Busel, J. P. (2003). FRP materials and concrete - search needs. *Concrete International*, 25 (10), 69-74.
- [2] Yao, J., et al. (2005). Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, 36 (2), 99-113.
- [3] Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L. (2002). *FRP-strengthened RC structures*. Chichester, U.K: Wiley.
- [4] Matthys S. (2000). *Structural behavior and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement*. Ph.D. Thesis. Ghent University, Faculty of Applied Sciences department of Structural Engineering.
- [5] ACI Committee 440. (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for

Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-08 American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

[۶] نادری، محمود، اسمعیلی زاده، سیامک (۱۳۹۵). مقاومت نهایی تیرهای بتنی تقویت شده با FRP در شرایط دمایی بالا و یخ زدگی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۴۸(۱)، ۳۹-۵۲.

[7] Di Tommaso, A., Neubauer, U., Pantuso, A., and Rostásy, F. S. (2001). Behavior of adhesively bonded concrete-CFRP joints at low and high temperatures. *Mechanics of Composite Materials*, 37 (4), 327-338.

[8] Klamer, E. (2006). *The influence of temperature on concrete structures strengthened with externally bonded CFRP*. Report No. O-2006. 04, Eindhoven University of Technology, Department of Architecture, Building and Planning, Structural Design and Construction Technology, Concrete Section.

[9] Klamer, E. (2009). *Influence of temperature on concrete beams strengthened in flexure with CFRP*. Ph.D. thesis. Eindhoven Univ. of Technology, Eindhoven, Netherlands.

[10] Leone, M., Matthys, S., and Aiello, M. A. (2009). Effect of elevated service temperature on the bond between FRP EBR systems and concrete. *Compos. Part B: Eng*, 40 (1), 85-93.

[11] Arruda, M. R. T., et al. (2016). Numerical modelling of the bond between concrete and CFRP laminates at elevated temperatures. *Engineering Structures*. 110(Supplement C), 233-243.

[12] Chung J. (2006). *Nanoscale characterization of epoxy interphase on copper microstructures*. PhD thesis. TU Berlin. available from URL: <http://nbnresolving.de/urn:de:kobv:83-opus-12637>.

[13] Ernst L. Klamer & Dick A. Hordijk. (2008). The influence of temperature on RC beams strengthened with externally bonded CFRP reinforcement. *HERON*, 53 (3), 157-186.

[14] Jankowiak, T. and Lodygowski, T. (2005). Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Foundations of civil & environmental*, 6, 53-69.

[15] Obaidat, Y. T., et al. (2010). The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM. *Composite Structures*, 92 (6), 1391-1398.

[16] Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc. (2000). ABAQUS Theory manual, User manual and Example Manual, Version 6.7. Providence, RI.

[17] Wahalathantri, B.L., Thambiratnam, D.P., Chan, T.H.T., & Fawzia, S. (2011). A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS. In *Proceedings of the First International Conference on Engineering. Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing*, Queensland University of Technology, Brisbane, 260-264.

[18] Benzeggagh, M., and M. Kenane. (1996). Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus. *Composite Science and Technology*, 56, 439-451.

[19] ACI Committee 318. (1999). Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-99). Detroit (MI): American Concrete Institute.

[20] Mark, P. and Bender, M. (2010). Computational modeling of failure mechanisms in reinforced concrete structures. *Architecture and Civil Engineering*, 8 (1), 1-12.

[21] Saenz, LP. (1964). Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete. *ACI Journal*, 61, 1229-1235.

[22] Piggott M. (2002). *Load bearing fibre composites. 2nd ed.* Boston/Dordrecht/ London: Kluwer Academic Publishers.

[23] Lu XZ, Ten JG, Ye LP, Jaing JJ. (2005). Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Eng Struct*, 24 (5), 920-37.