

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

رفتار خمشی تیرهای بتنی ساخته شده از بتن فوق توانمند مسلح با الیاف فولادی در معرض حرارت بالا

نگارنده

آیلین منعمی

اساتید راهنما

دکتر ابراهیم زمانی بیدختی

دکتر فرشید جندقی علائی

بهمن ۱۳۹۸

شماره: ۹۸، ۸۶ / ۴۸
تاریخ: ۱۳ / ۱۲ / ۹۸

باسم تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم آبلین منعی با شماره دانشجویی ۹۵۱۶۶۳۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان **رفتار خمشی تیرهای بتنی ساخته شده از بتن فوق توانمند مسلح با الیاف فولادی در معرض حرارت بالا** که در تاریخ ۹۸/۱۱/۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸
 ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶ (د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴
 هـ) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
 نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادهای اول	دکتر ابراهیم زمانی	استادیار	
۲- استادهای دوم	دکتر فرشید جندقی علایی	دانشیار	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر جلیل شقایب	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر میثم جلالی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر وحیدرضا کلاتچاری	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

دانشگاه مهندسی عمران
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصوه: در صورتی که نمره قبولی شود حداکثر یکبار امکان دارد در مدت مجاز تحصیل (در صورتی که توله از پایان نامه خود دفاع نماید) دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود.

تقدیم به

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است
به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم
به سبزترین نگاه زندگی‌ام، چشمان سبز مادرم
که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانی‌تان
را سپاس نتوانم بگویم.
به یار و همراه همیشگی همسرم:
که سایه مهربانی‌اش سایه‌سار زندگی‌ام می‌باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را
برایم تسهیل نمود.

تشکر و قدردانی

از استادان گرامی جناب آقای دکتر ابراهیم زمانی و جناب آقای دکتر فرشید علائی بسیار سپاسگزارم
چراکه بدون راهنمایی‌های ایشان تأمین این پایان‌نامه بسیار مشکل می‌نمود و همچنین به دلیل
یاری‌ها و راهنمایی‌های بی‌چشمداشت ایشان که بسیاری از سختی‌ها را برایم آسان‌تر نمودند.

تعمیر نامه

اینجانب آیلین منعمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه رفتار خمشی تیرهای بتنی ساخته شده از بتن فوق توانمند مسلح با الیاف فولادی در معرض حرارت بالا تحت راهنمایی آقای دکتر ابراهیم زمانی بیدختی و آقای فرشید جدقی علایی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

سازه‌های ساخته شده از بتن ممکن است شرایط مختلف دما را در طول عمر خود تجربه کنند. باین حال ارزیابی رفتار این سازه‌ها در معرض حرارت بالا ضرورت بسیاری دارد. خرد شدن بتن تحت حرارت بالا مهم‌ترین عامل برای کاهش مقاومت آن در برابر آتش‌سوزی است. خردشدگی معمولاً در اثر فشار بالا در منافذ و تنش حرارتی ایجاد می‌شود. از این رو بررسی اثرات دما بر روی بتن به‌ویژه بتن فوق توانمند الیافی که انتظار مقاومت بالایی از آن می‌رود، بسیار مهم است. فرارگیری بتن در حرارت زیاد یکی از شدیدترین شرایطی است که ممکن است بتن در معرض آن قرار گیرد. در این تحقیق به کمک نرم‌افزار توانمند اجزای محدود ABAQUS به مدل‌سازی سه نمونه تیر بتنی ساخته شده از بتن فوق توانمند حاوی الیاف فولادی با مقاومت فشاری‌های مختلف ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال پرداخته شد. سپس تأثیر دما بر مقاومت خمشی و همچنین انرژی شکست بتن در دمای محیط و در دماهای ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با ۲ درصد الیاف بررسی گردید. نمونه‌های خمشی با ابعاد $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر تحت اثر حرارت بالا، به صورت یک تیر سه‌نقطه‌ای مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد که مقاومت خمشی نمونه‌ها در دمای ۲۰۰ درجه بیشترین مقدار و در دمای ۷۰۰ درجه کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. به‌طور میانگین برای هر سه نمونه، نمودار افزایش مقاومت خمشی به‌اندازه ۱۵ درصد در دمای ۲۰۰ درجه را نشان داد اما بعد از گذشت زمان و رسیدن دما به ۷۰۰ درجه نمودار روند نزولی خود را طی کرد و مقدار آن به ۳۴ درصد کمتر از دمای اتاق رسید. همچنین، افزایش مقاومت فشاری بتن باعث افزایش مقاومت خمشی و انرژی شکست در دمای بالاتر گردید.

واژه‌های کلیدی: بتن فوق توانمند، الیاف فولاد، مقاومت خمشی، حرارت بالا، روش اجزاء محدود

فهرست مطالب

ی	فهرست جداول
ک	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه.....
۲	۲-۱- معرفی بتن فوق توانمند حاوی الیاف فولاد (UHPFRC).....
۴	۱-۲-۱- اهمیت الیاف.....
۵	۲-۲-۱- مکانیزم عمل الیاف.....
۵	۳-۲-۱- طبقه بندی.....
۵	۱-۳-۲-۱- بتن با الیاف کم.....
۶	۲-۳-۲-۱- بتن با الیاف متوسط.....
۶	۳-۳-۲-۱- بتن با الیاف بالا.....
۶	۴-۲-۱- انواع الیاف.....
۷	۳-۱- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق.....
۸	۴-۱- اهداف تحقیق.....
۹	۵-۱- روش تحقیق.....
۹	۶-۱- ساختار فصول پایان نامه.....
۱۱	فصل ۲: مروری بر منابع
۱۲	۱-۲- مقدمه.....
۱۲	۲-۲- تاریخچه پژوهش اثر حرارت بر بتن فوق توانمند الیافی.....
۱۷	فصل ۳: مدل سازی اجزای محدود و صحت سنجی نتایج
۱۸	۱-۳- مقدمه.....
۱۸	۲-۳- تشریح کامل روش تحقیق.....
۱۸	۳-۳- علت انتخاب روش.....
۱۹	۴-۳- توضیحاتی در خصوص نرم افزار آباکوس.....
۱۹	۵-۳- المان مورد استفاده.....

۱۹	۳-۵-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل سازی عددی
۲۱	۳-۶-۱- مدل سازی و صحت سنجی
۲۱	۳-۶-۱-۱- مدل سازی عددی کدور بدون اثر حرارت
۲۱	۳-۶-۱-۱-۱- رفتار تنش - کرنش UHPFRC
۲۵	۳-۶-۱-۲- مدل پلاستیک آسیب دیده بتن
۲۵	۳-۶-۱-۳- نحوه مدل سازی
۲۹	۳-۶-۱-۴- مش بندی مدل اجزا محدود و آنالیز حساسیت نسبت به چگالی مش
۳۱	۳-۶-۱-۵- مقایسه مدل سازی عددی با نتایج کدور
۳۱	۳-۶-۲- مدل سازی آزمایشگاهی ژنگ با اثر حرارت
۳۳	۳-۶-۲-۱- خصوصیات مکانیکی باقیمانده بتن پس از حرارت بالا طبق روابط وای و ویل
۳۴	۳-۶-۲-۱-۱- مقاومت فشاری پسماند
۳۵	۳-۶-۲-۱-۲- مقاومت کششی پسماند
۳۶	۳-۶-۲-۱-۳- مدول الاستیسیته پسماند
۳۷	۳-۶-۲-۲- مقایسه مدل سازی عددی با نتایج ژنگ در اثر حرارت

فصل ۴: نتایج و تفسیر آن‌ها

۴۱	
۴۲	۴-۱- مقدمه
۴۲	۴-۲- شرح مدل
۴۲	۴-۳- مقایسه اثر حرارت در تیرهای با مقاومت فشاری مختلف
۴۲	۴-۳-۱- نمونه B100
۴۴	۴-۳-۲- نمونه B150
۴۶	۴-۳-۳- نمونه B200
۵۰	۴-۴- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تیرها با مقاومت فشاری های مختلف در دمای یکسان
۵۳	۴-۵- انرژی شکست

فصل ۵: جمع بندی و ارائه پیشنهادات

۵۵	
۵۶	۵-۱- مقدمه
۵۶	۵-۲- جمع بندی نتایج
۵۷	۵-۳- پیشنهادات

فهرست جداول

- جدول ۳-۱. طرح اختلاط بتن ۲۷
- جدول ۳-۲. مشخصات مصالح UHPFRC ۲۸
- جدول ۳-۳. مشخصات فولاد مورد استفاده در آزمایش ۲۸
- جدول ۳-۴. مقاومت فشاری پسماند ۳۴
- جدول ۳-۵. مدول الاستیسیته پسماند ۳۶
- جدول ۳-۶. مشخصات بتن فوق توانمند پس از قرار گرفتن در معرض حرارت بالا ۳۸
- جدول ۳-۷. مقایسه نتایج مقاومت خمشی تیرها در دمای بالا از آزمایش و تحلیل اجزای محدود ۳۹
-
- جدول ۴-۱. مقاومت کششی و مقاومت فشاری برای B100 در دمای مختلف ۴۳
- جدول ۴-۲. مدول الاستیسیته برای B100 در دمای مختلف ۴۳
- جدول ۴-۳. مقاومت کششی و مقاومت فشاری برای B150 در دمای مختلف ۴۵
- جدول ۴-۴. مدول الاستیسیته برای B150 در دمای مختلف ۴۵
- جدول ۴-۵. مقاومت فشاری برای B200 در دمای مختلف ۴۷
- جدول ۴-۶. مدول الاستیسیته برای B200 در دمای مختلف ۴۷

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. بتن حاوی الیاف فولاد..... ۵
- شکل ۳-۱. نمودار تنش- کرنش در فشار و اجزای مختلف آن..... ۲۳
- شکل ۳-۲. نمودار تنش- کرنش UHPFRC (a) در فشار و (b) در کشش..... ۲۴
- شکل ۳-۳. نمودار تنش- کرنش فولاد..... ۲۴
- شکل ۳-۴. شرایط بار گذاری و مقطع تیرهای UHPFRC..... ۲۶
- شکل ۳-۵. اندرکنش میان بتن و میلگردهای فولادی..... ۲۹
- شکل ۳-۶. مشخصات مش بندی، مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تیر..... ۳۰
- شکل ۳-۷. مش بندی بهینه تیر UHPFRC..... ۳۰
- شکل ۳-۸. صحت سنجی مدل کدور..... ۳۱
- شکل ۳-۹. هندسه تیر بتنی مورد استفاده در خمش سه نقطه‌ای..... ۳۲
- شکل ۳-۱۰. مش بندی بهینه تیر UHPFRC..... ۳۳
- شکل ۳-۱۱. منحنی دما- زمان کوره در دمای هدف مختلف..... ۳۴
- شکل ۳-۱۲. مقاومت فشاری پسماند بتن فوق توانمند..... ۳۵
- شکل ۳-۱۳. مدول الاستیسیته پسماند بتن فوق توانمند..... ۳۷
- شکل ۳-۱۴. مقایسه مقاومت خمشی تیر ها در دمای بالا از نتایج آزمایش و تحلیل اجزای محدود..... ۳۹
- شکل ۴-۱. نمودار نیرو-جابجایی B100 در دمای ۷۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰، ۳۰ درجه سانتی گراد..... ۴۳
- شکل ۴-۲. نمودار مقاومت خمشی B100 بر حسب دما..... ۴۴
- شکل ۴-۳. نمودار نیرو-جابجایی B150 در دمای ۷۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰، ۳۰ درجه سانتی گراد..... ۴۵
- شکل ۴-۴. نمودار مقاومت خمشی B150 بر حسب دما..... ۴۶
- شکل ۴-۵. نمودار نیرو-جابجایی B200 در دمای ۷۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰، ۳۰ درجه سانتی گراد..... ۴۷
- شکل ۴-۶. نمودار مقاومت خمشی B200 بر حسب دما..... ۴۸
- شکل ۴-۷. مقایسه مقاومت خمشی B200, B150, B100 در دمای ۷۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰، ۳۰ درجه..... ۴۸
- شکل ۴-۸. مقایسه مقاومت فشاری B200, B150, B100 در دمای ۷۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی گراد..... ۴۹

- شکل ۴-۹. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ مگا پاسکال در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد..... ۵۰
- شکل ۴-۱۰. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ مگا پاسکال در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد..... ۵۱
- شکل ۴-۱۱. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ مگا پاسکال در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد..... ۵۱
- شکل ۴-۱۲. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ مگا پاسکال در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد..... ۵۲
- شکل ۴-۱۳. مقایسه انرژی شکست B100، B150 و B200 در دمای ۳۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی گراد..... ۵۴

فصل ۱: کلیات

۱-۱- مقدمه

در اکثر موارد به بتن به عنوان ماده‌ای مقاوم در برابر نیروهای فشاری نگریده شده است. انجام پروژه‌های تحقیقاتی بر روی مواد مختلف تشکیل دهنده بتن و آزمایش بتن‌های مختلف با مواد جدید در اواخر قرن اخیر منجر به پیدایش بتن‌هایی شده است که علاوه بر تأمین مقاومت، خواص دیگری از این ماده نظیر دوام، کارایی، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر عواملی چون آتش، محیط و هوازگی را دستخوش تغییرات اساسی نموده است.

۱-۲- معرفی بتن فوق توانمند حاوی الیاف فولاد (UHPFRC)

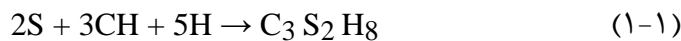
امروز از بتن توانمند با کارایی بالا^۱ (UHPC) که از آن به عنوان بتن پودری واکنش‌پذیر^۲ (RPC) نیز یاد می‌شود، به دلیل مقاومت فشاری بسیار بالا که معمولاً بیش از ۱۰۰ مگا پاسکال، کارایی و دوام زیاد رواج یافته است. مقاومت فشاری بالای UHPC باعث می‌شود که رفتاری نسبتاً شکننده‌تر از بتن معمولی داشته باشد. برای غلبه بر رفتار شکننده آن، الیاف فولادی، پلیمری یا کربنی اغلب به UHPC اضافه می‌شوند. این نوع بتن به عنوان بتن الیافی فوق توانمند^۳ شناخته شده است. [۱، ۲]. بتن پودری واکنشی‌پذیر (RPC) از جمله بتن‌های فوق توانمندی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی برتر است RPC با بهره‌گیری از سیمان و مصالح پودری بسیار ریزدانه شامل ماسه کوارتزی، میکروسیلیس، مقادیر کم نسبت آب به سیمان و استفاده از فوق روان کننده، تولید می‌گردد.

^۱ Ultra High Performance Concrete

^۲ Reactive powdered concrete

^۳ Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)

به علاوه طرح اختلاط این نوع بتن شامل آب، میکرو سیلیس^۱، سیمان، ماسه ریزدانه، فوق روان کننده و پودر سنگ‌هایی مانند کوارتز می‌باشد. واکنش پوزولانی بین هیدروکسید کلسیم^۲ در سیمان و دوده سیلیس^۳ باعث ایجاد کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) می‌شود. کلسیم سیلیکات هیدرات ترکیبی است که محصول اصلی هیدراسیون سیمان پرتلند است و همچنین عامل اصلی مقاومت سیمان و همه محصولات بر پایه سیمان، از جمله بتن می‌باشد. رابطه ۱-۱ واکنش اکسید سیلیسیم، هیدروکسید کلسیم و آب را نشان می‌دهد [۳]:



S: SiO₂

CH: Ca(OH)₂

H: H₂O

C: CaO

محصولات این واکنش باعث می‌شوند که بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی در برابر مواد شیمیایی مقاوم‌تر باشد. این مقاومت به دلیل کاهش نفوذپذیری ناشی از تولید بیشتر C-S-H است [۳]. این نوع بتن نسبت آب به مواد سیمان بسیار پایینی دارد و میزان روانی آن برای کارا بودن بایستی با فوق روان کننده تأمین شود. در مقایسه با سایر مصالح با پایه سیمان معمولی، مشخصات ساختاری بتن فوق توانمند مانند یکنواختی اندازه ذرات، تخلخل و ساختارهای میکروسکوپی بهبود یافته است. این نوع بتن به دلیل تخلخل و موبینگ کم، تقریباً غیرقابل نفوذ است و همین امر باعث شده تا بسیاری از ضعف‌های

^۱Micro Silica

^۲Ca(OH)₂

^۳Silica Fume

بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل‌های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله یون‌های کلر در بتن فوق توانمند اصلاح شود [۴].

افزودن الیاف فولادی^۱ به بتن باعث افزایش مقاومت خمشی و همچنین مقاومت در مقابل ترک خوردگی است که این خاصیت راه‌حل مناسبی برای کاهش خاصیت تردی و شکنندگی بتن معمولی است. الیاف فولادی در بتن، علاوه بر افزایش قابلیت هدایت گرمایی، باعث بهبود مقاومت بتن در تغییرات ناگهانی دما و درجه حرارت زیاد می‌شوند. مهم‌ترین تأثیر به‌کارگیری الیاف در بتن، تأخیر و کنترل شکست در آن است [۵]. الیاف در شکل‌ها و اندازه‌های متفاوت و از جنس فولاد، شیشه، مواد مصنوعی و مواد طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶]. با این وجود، در بیشتر اعضای سازه‌ای و غیر سازه‌ای، الیاف فولادی بیشتر از انواع دیگر الیاف استفاده می‌شوند [۵]. در ادامه به اهمیت الیاف در بتن و بررسی انواع آن پرداخته شده است.

۱-۲-۱- اهمیت الیاف

بتن معمولی، دارای تعداد زیادی ترک‌های مویین است که به دلیل توسعه سریع ترک‌های مویین تحت تنش‌های اعمال شده، مقاومت کششی بتن کم است. با به‌کاربردن الیاف در فواصل نزدیک به یکدیگر، از توسعه ترک‌های مویین جلوگیری شده و در نتیجه، مقاومت‌های کششی و خمشی بتن به میزان زیادی افزایش می‌یابد. همچنین الیاف، شروع ترک‌های کششی را به تأخیر انداخته و در نتیجه باعث افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود. شکل ۱-۱ نمونه‌ای از بتن حاوی الیاف فولاد را نشان می‌دهد.

^۱Steel Fiber



شکل ۱-۱. بتن حاوی الیاف فولاد

۱-۲-۲- مکانیزم عمل الیاف

بتن الیافی، بعد از ایجاد اولین ترک در خمیر سیمان، بار وارده را تحمل می‌کند، به شرط آنکه مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن آن‌ها در اولین ترک، بیش از بار در هنگام وقوع اولین ترک باشد. در مقطع ترک خورده، خمیر سیمان هیچ کششی را تحمل نمی‌کند و الیاف، تمام بار وارد بر مقطع مرکب را تحمل می‌کند.

۱-۲-۳- طبقه‌بندی

یکی از انواع طبقه‌بندی بتن الیافی بر اساس حجم الیاف در داخل بتن است [۷]:

- حجم کم: حجم الیاف در داخل بتن کمتر از ۱٪ است
- حجم متوسط: حجم الیاف در داخل بتن بین ۱٪ و ۲٪ است
- حجم بالا: حجم الیاف در داخل بتن بیش از ۲٪ است

۱-۲-۳-۱- بتن با الیاف کم

در بتن با حجم کم الیاف که معمولاً در دال‌ها و روسازی بکار می‌روند، الیاف عموماً به‌منظور کاهش جمع

شدگی استفاده می‌شوند. الیاف پراکنده مزیت‌های عمده‌ای نسبت به آرماتور فلزی دارد:

- الیاف به‌طور یکنواختی در سه بعد پخش شده و موجب توزیع متناسب باربری می‌شوند.
- الیاف در مقایسه با آرماتور حساسیت کمتری نسبت به خوردگی دارند
- استفاده از الیاف می‌تواند هزینه‌های اجرایی مربوط به آرماتور گذاری را کاهش دهد [۷].

۱-۲-۳-۲- بتن با الیاف متوسط

کاربرد این مقدار از الیاف موجب افزایش مدول گسیختگی، سختی و مقاومت ضربه‌ای بتن می‌شود. این

نوع از بتن‌ها در انواع مختلف دستگاه‌های ساخت نظیر شات کريت کاربرد دارند. کاربرد این نوع بتن در

سازه‌هایی که نیاز به قابلیت جذب انرژی بالا و افزایش مقاومت خستگی دارند کاربرد دارد.

۱-۲-۳-۳- بتن با الیاف بالا

کاربرد حجم زیادی از الیاف منجر به سختی کرنشی مجموعه می‌شود. به خاطر این بهبود رفتار، معمولاً این

ترکیبات به عنوان بتن مسلح الیافی فوق توانمند شناخته می‌شوند. در دهه گذشته و به واسطه پیشرفت‌های

به وجود آمده، نسل جدیدی از این مواد با عنوان بتن مسلح الیافی فوق توانمند شناخته شدند.

۱-۲-۴- انواع الیاف

انواع بسیار متنوعی از الیاف در ساخت بتن الیافی در سطح آزمایشگاهی و تجاری به کار می‌روند که

دسته‌بندی اصلی آن‌ها به شرح زیر است [۸، ۹]:

- الیاف فولادی^۱

^۱Steel Fiber

- الیاف شیشه‌ای^۱
- الیاف مصنوعی^۲
- الیاف طبیعی^۳

می‌توان گفت که تأثیر عمده الیاف، نه بر روی مقاومت بتن، بلکه بر روی طاقت خمشی آن است. اساساً مزیت عمده بتن الیافی، بهبود طاقت خمشی (کل انرژی جذب‌شده در هنگام شکست نمونه در خمش) است. به دلیل افزایش طاقت خمشی، مقاومت در برابر خستگی و مقاومت در برابر ضربه نیز به مقدار زیادی افزایش می‌یابد.

۱-۳- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

بتن در سطح جهان، با توجه به تولید بالا، به عنوان یکی از مصالح سازه‌ای پرمصرف قرار دارد. به دلایل مختلف حجم زیادی از این بتن در معرض ترک‌خوردگی قرار می‌گیرد و عمده ترک‌ها به دلیل ضعف ذاتی این ماده در کشش است. استفاده از الیاف تا حد زیادی قابلیت شکل‌پذیری، تحمل بارها و بخصوص جذب انرژی بتن را بالا می‌برد. همچنین الیاف ترک‌های ناشی از خزش و انقباض بتن را نیز کاهش می‌دهد و به‌طور کلی با فراهم آوردن یکپارچگی و نرمی بیشتر جلوی گسترش ترک‌ها در بدنه بتن را می‌گیرد. اهمیت این موضوع از آن جهت است که بتن تحت بارهای دینامیکی، حرارت‌های بالا و یا سیکل‌های یخبندان بیشتر در معرض ترک‌خوردگی قرار می‌گیرد و همچنین استفاده از الیاف بیش از هر چیز قابلیت جذب انرژی بتن را بالا می‌برد.

^۱Glass Fiber

^۲Synthetic Fiber

^۳Natural Fiber

وقتی که درجه حرارت بتن زیاد می‌شود، این ماده دچار تغییراتی در ترکیبات شیمیایی و ساختار فیزیکی می‌شود. این تغییرات در وهله اول در خمیر سیمان به وقوع می‌پیوندد و از تجزیه هیدروکسید کلسیم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع و تا نابودی کامل کلسیم سیلیکات هیدرات (C-H-S) در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه پیدا می‌کند. سنگدانه‌ها نیز برحسب نوع آن‌ها (کوارتز و یا کربناتی) رفتار متفاوت دارند [۱۰].

دو علت عمده برای ایجاد ضعف‌های ذکرشده به‌ویژه ترک‌خوردگی بتن در مراجع بیان شده است. یک احتمال آن است که ترک‌خوردگی به علت انرژی کرنشی ذخیره‌شده در نمونه به علت عدم سازگاری بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها باشد. زمانی که نمونه تحت حرارت قرار می‌گیرد، در مراحل اولیه سنگدانه‌ها منبسط می‌شوند، درحالی‌که خمیر سیمان به علت از دست دادن آب منقبض می‌شود و باعث به وجود آمدن تنش حاصل از جمع شدگی ناشی از خشک شدن می‌شود. در بتن‌های توانمند ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه متراکم‌تر بوده و باعث به وجود آمدن تنش بیشتری می‌شود [۱۱]. همچنین تنش داخلی در بتن از تغییرات ریزساختاری در بتن به علت فشار ایجادشده ناشی از بخارآب در خلل و فرج بتن نیز به وجود می‌آید [۱۲، ۱۳]. در واقع فشار زیاد بخارآب که نمی‌تواند از بتن خارج شود (به علت حفرات ریز) باعث ترک‌خوردگی بتن می‌شود؛ بنابراین هراندازه بتن متراکم‌تر باشد، خطر ترک‌خوردگی افزایش می‌یابد [۱۴]. مقاومت در برابر حرارت بالا به پارامترهایی نظیر هندسه المان، مواد استفاده‌شده در ساخت بتن، شدت بار، سرعت گرم کردن و خصوصیات حرارت بستگی دارد.

۱-۴- اهداف تحقیق

امروزه بیشتر به خصوصیات مکانیکی UHPFRC در دمای اتاق توجه شده است [۱۵، ۱۶]؛ اما مطالعات کمی در مورد خصوصیات مکانیکی باقیمانده این نوع بتن پس از افزایش درجه حرارت انجام شده است.

در این پژوهش رفتار و عملکرد تیرهای بتنی فوق توانمند حاوی الیاف فولاد در برابر حرارت بالا مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در ادامه به بررسی تأثیر حرارت بر مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته بتن فوق توانمند و همچنین انرژی شکست پرداخته شده است.

۱-۵- روش تحقیق

- مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی بتن‌های فوق توانمند حاوی الیاف فولاد و تأثیر حرارت بر آن‌ها
- صحت سنجی نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس و مقایسه نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی
- مدلسازی مختلف از بتن‌های فوق توانمند حاوی الیاف فولاد در دماهای مختلف و با مقاومت فشاری‌های متفاوت
- بررسی مقاومت خمشی و نمودار نیرو-جابجایی و همچنین انرژی شکست مدل‌های ساخته شده و مقایسه‌ی آن‌ها

۱-۶- ساختار فصول پایان نامه

در فصل دوم به مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی بتن‌های فوق توانمند و همچنین تأثیر حرارت بر آن‌ها پرداخته شده است. در فصل سوم ابتدا به معرفی نرم افزار آباکوس^۱ و علت انتخاب آن جهت مدلسازی پرداخته شده است. در ادامه، مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی منتخب جهت مدلسازی ارائه و مقایسه‌ای میان نتایج نرم افزار و نمونه‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. در فصل چهارم به مدلسازی تیر بتنی UHPFRC در چهار محدوده دما و مقاومت فشاری مختلف پرداخته شده است. سپس

^۱Abaqus

مقاومت خمشی و نمودارهای نیرو-جابجایی مدل‌ها تجزیه و تحلیل شده و عملکرد این مدل‌ها بررسی شده است. در فصل پنجم نتیجه‌گیری مربوط به پایان‌نامه و پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده ارائه شد.

فصل ۲: مروری بر منابع

۲-۱- مقدمه

ایده اضافه کردن الیاف به مخلوط‌های ترد و شکننده که توان کششی ناچیزی دارند؛ از زمان‌های قدیم وجود داشته است. مصریان قدیم از کاه برای مسلح کردن آجرهای گلی استفاده می‌کردند. علاوه بر این از الیاف پنبه نسوز و موی اسب نیز برای تسلیح استفاده می‌شده است [۶]. در طی سال‌های گذشته استفاده از بتن‌های فوق توانمند دارای الیاف به دلیل مقاومت بالا رواج یافته است. ارزیابی رفتار این بتن‌ها در معرض حریق ضرورت بسیاری دارد. خرد شدن بتن تحت حرارت بالا مهم‌ترین عامل برای کاهش مقاومت آن در برابر آتش‌سوزی است. خردشدگی معمولاً در اثر فشار بالا در منافذ و تنش حرارتی ایجاد می‌شود. از این‌رو بررسی اثرات دما بر روی بتن به‌ویژه بتن فوق توانمند الیافی که انتظار مقاومت بالایی از آن می‌رود، بسیار مهم است.

۲-۲- تاریخچه پژوهش اثر حرارت بر بتن فوق توانمند الیافی

دماهای بالا به علت ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی، عامل مخربی برای بتن هستند [۱۷، ۱۸]. سرانو و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۹] تحقیقاتی را در زمینه بتن‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تحت اثر آتش انجام دادند. آن‌ها آزمون فشار و کشش روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام دادند. آزمایش آتش روی این نمونه‌ها داخل کوره‌ی الکتریکی نبود، بلکه در معرض مستقیم آتش بود. نتایج نشان داد که افزودن الیاف در بتن حدود ۱ الی ۲ درصد مقاومت را افزایش داد اما پس از رسیدن به مقاومت ماکزیمم، شکل‌پذیری آن‌ها کم شد.

ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۷] به بررسی تجربی روابط تنش-کرنش در بتن با مقاومت بالا حاوی الیاف فولادی در حرارت بالا پرداختند. آزمایش با درصد‌های مختلف الیاف در دمای ۲۰-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته این نوع بتن در ابتدا افزایش می‌یابد، سپس با افزایش دما کاهش می‌یابد و از بین رفتن مدول الاستیسیته سریع‌تر از مقاومت

فشاری است. مقادیر کرنش اوج و کرنش نهایی به ترتیب مربوط به دمای ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۲۰] به بررسی مقاومت خمشی و مقاومت کششی چند نمونه بتن پر مقاومت حاوی الیاف فولاد پرداختند. تأثیر الیاف فولادی و دمای گرمایش بر استحکام خمشی و کششی بتن تقویت شده با الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش حجم الیاف فولادی، مقاومت خمشی و کششی بتن تقویت شده با الیاف فولادی بعد از افزایش درجه حرارت به میزان قابل توجهی بهبود یافت. نتایج آن‌ها نشان داد مقاومت خمشی و مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش حرارت در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و دمای بحرانی به ترتیب ۲۰۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد است. چان و همکارش [۲۱] بتن‌های توانمند حاوی میکرو سیلیس و خاکستر بادی^۱، در معرض حرارت ۸۰۰ درجه و به مدت زمان یک ساعت که به صورت تدریجی خنک شده بودند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افت مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی توانمند در مقایسه با نمونه‌های شاهد، زیادتر بوده، ولی همچنان مقاومت فشاری باقی‌مانده نمونه‌های بتنی توانمند در مقایسه با نمونه‌های شاهد بیشتر است.

بررسی‌های دمیرل و آگوچان [۲۲] بر روی نمونه‌های بتنی حاوی پومیس - میکروسیلیس^۲ و پومیس^۳ که در معرض دمای ۴۰۰-۸۰۰ درجه قرار گرفت و به‌طور تدریجی خنک شده بودند، نشان داد که مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ در مقایسه با مقاومت فشاری در دمای اتاق افزایش داشت،

^۱Fly Ash

^۲Micro Silica

^۳Pumice

ولی با افزایش دما از این مقدار، افت مقاومت فشاری مشاهده شد. همچنین نمونه‌های حاوی پومیس - میکروسیلیس در مقایسه با نمونه‌های حاوی پومیس، از افت بیشتری در مقاومت فشاری برخوردار بودند. یانگ و همکاران [۲۳] در تحقیقی بر روی نمونه‌های بتنی در معرض حرارت، مشاهده کردند که افزایش مدت زمان بعد از مواجهه با حرارت های زیاد (عمل آوری نمونه های حرارت دیده در هوا) کمک چندانی به بهبود مقاومت فشاری نمی‌کند.

کورینالدسی و همکارش [۲۴] به ارزیابی رفتار مکانیکی و حرارتی بتن‌های فوق توانمند مجهز به الیاف پرداختند. آزمایش‌ها نشان داد که کارایی و عملکرد مکانیکی مطلوب با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴ به دست می‌آید. همچنین هدایت حرارتی برای همان UHPFRC در حضور و در غیاب الیاف فولادی تعیین شد. این کار به منظور بررسی تأثیر الیاف فولادی بر ضریب هدایت حرارتی، به منظور پیش بینی ظرفیت UHPFRC برای از دست دادن گرما بود.

گوران و همکاران [۲۵] به بررسی و مطالعه تجربی و عددی اثرات اندازه تیرهای بتنی فوق توانمند مسلح به الیاف فولادی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که بتن فوق توانمند مسلح با الیاف فولادی یک ماده ساختمانی نسبتاً جدید با مقاومت بالا، سختی گسیختگی و انعطاف پذیری زیاد است و اگرچه بسیاری از جنبه‌های UHPFRC به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته شده بود؛ اما اثرات اندازه بر روی استحکام ساختاری اعضا به دلیل عدم وجود داده‌های تجربی کافی و قابل اطمینان UHPFRC تا حد زیادی ناشناخته بود. آن‌ها به بررسی اثرات اندازه بر استحکام خمشی تیرهای شیاردار مشابه، تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اثر اندازه بر روی مقاومت اسمی تیر، به علت قابلیت انعطاف‌پذیری بالا، کم است.

فلیستی و همکاران [۲۶] در سال ۱۹۹۶ با آزمایش‌هایی خواص بتن‌های با مقاومت بالا، پس از قرارگیری در معرض آتش را بررسی کردند. روشی که در این مطالعه برای بررسی خواص بتن مورد ارزیابی قرار

گرفت روش مقاومت پسماند بود. بتن‌های مورد آزمایش با دوده سیلیس ساخته شده بودند و دارای مقاومت ۷۲ و ۹۵ مگا پاسکال بودند.

جیاچو و زربینو [۲۷] به بررسی رفتار مکانیکی بتن فوق توانمند مسلح به الیاف فولاد در برابر حرارت پرداختند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که ترکیب الیاف فولادی می‌تواند رفتارهای شکننده بتن را جبران کند. نوع و محتوای الیاف به‌عنوان متغیرها گنجانده شده بود. یک ملات و یک بتن الیافی نرمال در دو شرایط مختلف ابتدا به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه و ۲۴ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه نیز مورد آزمایش قرار گرفتند. FRC^۱ رفتار فشاری مشابه بتن ساده را به همراه داشت اما حضور الیاف سبب افزایش مقاومت و ایجاد تنش‌هایی در محل ترک‌ها شده بود. آزمایش‌های خمشی بر روی تیرهای دارای شیار نشان داد که شکل منحنی بار-تغییر مکان در FRC در معرض دمای ۱۵۰ درجه شبیه به بتن سالم بود اما کاهش مقاومت خمشی در FRC نسبت به بتن ساده کمتر بود.

وای و ویل [۳] به بررسی تأثیر حرارت بر خصوصیات مکانیکی پسماند بتن فوق توانمند ساخته شده با الیاف (UHPRC) پس از قرار گرفتن در معرض دما از ۱۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد پرداختند. نمونه‌های در معرض دمای ۱۳۵-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش معنی‌داری در مقاومت فشاری باقیمانده را برای بتن در این تحقیق نشان دادند. نتایج آن‌ها کاهش در مدول الاستیک باقیمانده پس از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان دادند.

احمد و همکاران [۱] به بررسی تأثیر مدت‌زمان قرار گرفتن در معرض حرارت بالابر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌ها در معرض دمای بالا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بتن فوق توانمند (UHPC) تقویت شده با درصد مختلف الیاف فولادی پرداختند. باین‌حال، مدول الاستیسیته و استحکام خمشی با افزایش مدت‌زمان قرار گرفتن در معرض حرارت بالا کاهش چشمگیری داشتند.

^۱Fiber Reinforced Concrete

مطالعه هاثم [۲۸] بر روی بتن‌های توانمند در معرض حرارت‌های ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد که با دو روش مختلف، یکی قرار گرفتن در معرض هوا و دیگری با استفاده از آب‌خنک شدند، نشان داد که استفاده از آب برای خنک کردن نمونه‌های بتنی حرارت دیده‌ای که از سنگ‌دانه‌های آهکی در ساخت آن‌ها استفاده شده است، می‌تواند سبب افت بیشتر مقاومت گردد. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های بتن توانمند در معرض حرارت‌های بالای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد که توسط آب‌خنک شده بودند، به دلیل ازهم‌پاشیدگی نمونه‌ها انجام نشد.

پیرماک و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۲۹] اثر دماهای بالابر بتن‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن را بررسی کردند. نوع بتن مورد استفاده از نوع بتن‌های با مقاومت بالا بود و تحت چندین دمای مختلف آزمایش‌هایی انجام شد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش حرارت، رسانایی الکتریکی بتن کم شده و با سرد شدن تدریجی نمونه‌ها، این مقدار افزایش می‌یابد.

قلهکی و همکاران [۳۰] به مطالعه مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن در دماهای بالا پرداختند. اگرچه نمونه‌ها، تحت دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، اما نتایج نشان داد که اثرات آتش بر روی بتن‌های حاوی الیاف فولادی مخرب‌تر بوده و همچنین مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و مقاومت کششی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقادیر را به خود اختصاص می‌دهند. مقاومت فشاری و کششی بتن‌های حاوی الیاف فولادی، ۴۰٪ و ۵۰٪ بیشتر از بتن‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن بود؛ اما مقاومت خمشی آن‌ها تقریباً با یکدیگر برابر بود. همچنین مقاومت خمشی نمونه‌های با عیار ۴۰۰ و عیار ۷۰۰ می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های با عیار ۴۰۰ حدود ۱۰ الی ۴۰ درصد مقاومت بیشتری دارند.

فصل ۳: مدل سازی اجزای محدود و صحت سنجی نتایج

۳-۱- مقدمه

از آنجاکه در نظر است اثر درجه حرارت بر مقاومت خمشی تیرهای ساخته شده از بتن فوق توانمند مسلح با الیاف فولادی با استفاده از نرم افزار توانمند اجزای محدود آباکوس مورد بررسی قرار گیرد، در همین راستا در این فصل ابتدا توضیحاتی در مورد نرم افزار آباکوس آورده شده است. در ادامه به شرح کامل مسئله مورد بررسی و هدف از آن پرداخته می شود.

۳-۲- تشریح کامل روش تحقیق

روش المان محدود^۱ یا اصطلاحاً (FEM) یک روش عددی برای حل مسائل موجود در حوزه های مهندسی است. این روش در مسائلی نظیر تحلیل سازه ها، انتقال حرارت، دینامیک سیالات، انتقال جرم و پتانسیل الکترومغناطیسی کاربرد دارد. برای حل این گونه مسائل از طریق روش های تحلیلی، باید جواب چندین مسئله مقدار مرزی را برای معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی به دست آورد.

۳-۳- علت انتخاب روش

پیچیدگی هندسی، رفتار پیچیده ماده و شرایط مرزی موجود در مسائل واقعی، رسیدن به حل دقیق را با دشواری روبرو ساخته است. روش اجزای محدود یک روش عددی برای رسیدن به حل تقریبی در بسیاری از مسائل فیزیکی و مهندسی است که رفتار حاکم بر آنها توسط یک معادله دیفرانسیل بیان می شود [۳۱].

^۱Finite Element Method

هدف اصلی در روش اجزای محدود، یافتن حل یک مسئله پیچیده از طریق جایگزینی آن با یک مدل ساده‌تر است. در روش اجزای محدود ناحیه حل به صورت مجموعه‌ای از زیر ناحیه‌های کوچک متصل به هم به نام المان و یا اجزای محدود در نظر گرفته می‌شود.

۳-۴- توضیحاتی در خصوص نرم‌افزار آباکوس:

یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارها در زمینه‌ی انجام آنالیزهای اجزای محدود، نرم‌افزار ABAQUS است. لغت ABAQUS برگرفته از کلمه abacus می‌باشد که در انگلیسی به معنای چرتکه و در یونانی به معنی تخته پوشیده شده از ماسه است. این نرم‌افزار به واسطه قدرت بسیارش در تحلیل و مدل‌سازی ساده‌ترین معادلات خطی تا پیچیده‌ترین معادلات غیرخطی استفاده می‌شود و استفاده از آن تنها محدود به مسائل مکانیک جامدات نمی‌شود. در ادامه مراحل مدل‌سازی در نرم‌افزار به طور کامل شرح داده می‌شود [۳۱].

۳-۵- المان مورد استفاده

تیرهای UHPFRC با استفاده از المان (C3D8R) مدل‌سازی شده‌اند. المان C3D8R یک المان ۸ گره‌ای با انتگرال کاهش یافته است که در هر گره دارای سه درجه آزادی در جهت X,Y,Z است. ترجیحاً باید نوعی از المان را انتخاب نمود که حجم محاسباتی کمتری را به مدل اعمال کند. درجات آزادی کمتر، سبب کاهش اندازه حجم ماتریس‌های محاسباتی و نقاط انتگرال‌گیری کمتر، تعداد مراحل میانمایی را در محاسبات کاهش می‌دهد [۳۱].

۳-۵-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

بتن مسلح یکی از پیچیده‌ترین مصالح برای مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزا محدود است. در مدل‌سازی عددی، تعریف رفتار دقیق مصالح در فشار و کشش در دو فاز الاستیک و پلاستیک می‌تواند اثرات زیادی در نتایج خروجی‌های نرم‌افزار اجزا محدود داشته باشد. مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن، تکنیکی است که قابلیت نشان دادن رفتار غیرخطی و خصوصیات خرابی مواد شبه ترد همانند بتن را دارد. در این مدل

رفتار کاملاً فشاری باید شامل هر دو رفتار الاستیک و پلاستیک کامل بتن در نرم شدگی کرنشی آن باشد. همچنین درکشش نیز باید خواص بتن در دو فاز الاستیک و پلاستیک، شامل نرم شدگی کششی و سخت شدگی کششی تعریف شود. مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی عددی سازه‌های بتن مسلح تعیین رفتار غیرخطی آن می‌باشد [۳۲]. در نرم‌افزار ABAQUS برای در نظر گرفتن خرابی و همچنین تعریف رفتار غیرخطی بتن که باید در بخش خواص مصالح مشخص گردد، به سه روش تعریف می‌شود:

۱- مدل ترک اندود^۱

۲- مدل ترک شکننده^۲

۳- مدل پلاستیک آسیب‌دیده^۳

مدل پلاستیک آسیب‌دیده، تنها مدلی است که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است. در مدل پلاستیک آسیب‌دیده دو فرض اصلی، ترک‌خوردگی کششی و خرد شدن فشاری در مکانیزم گسیختگی در نظر گرفته می‌شود. در ترک‌خوردگی کششی در اثر کشش تک‌محوره، منحنی تنش-کرنش تا نقطه تنش خرابی به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه است. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی‌ها به صورت ترک‌های قابل مشاهده درمی‌آیند که به صورت منحنی نرم شوندگی در فضای تنش-کرنش نمایش داده می‌شود. در خرد شدن فشاری بتن، تحت فشار تک‌محوره، رفتار تا رسیدن به نقطه جاری‌شدگی به صورت الاستیک خواهد بود و رفتار در ناحیه پلاستیک عموماً به صورت منحنی سخت‌شوندگی بیان می‌شود که در نهایت با رسیدن

^۱Smeared Cracking

^۲Brittle Cracking

^۳Concrete Damage Plasticity

به نقطه‌ی تنش نهایی، منحنی‌ها به صورت منحنی نرم شوندگی درمی‌آید. این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی خصوصیات اصلی بتن را ارضا می‌نماید [۳۳].

۳-۶-مدلسازی و صحت سنجی

در این پایان‌نامه به مطالعه اثر درجه حرارت بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی ساخته شده از بتن فوق توانمند مسلح با الیاف فولادی ۲ درصد پرداخته شد. در این راستا به منظور مدلسازی عددی از برنامه اجزا محدود آباکوس به صورت سه بعدی استفاده شد و تمام تیرها به طور کامل مدلسازی شدند. در این پژوهش در صحت سنجی اول رفتار تیر UHPFRC بدون اثر حرارت مطابق پژوهش کدور [۳۳] انجام شد. در صحت سنجی دوم اثر حرارت بر مدل رفتاری UHPFRC اعمال شد و نتایج اجزا محدود با مدل آزمایشگاهی ژنگ [۲۰] مقایسه شد.

۳-۶-۱-مدلسازی عددی کدور بدون اثر حرارت [۳۳]

کدور و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی تیر UHPFRC در دمای اتاق تحت بارگذاری خمشی توسط نرم افزار آباکوس پرداختند. در ادامه رفتار تنش-کرنش و خصوصیات مکانیکی بتن به طور کامل شرح داده شد.

۳-۶-۱-۱-رفتار تنش-کرنش UHPFRC [۳۳]

رفتار تنش-کرنش UHPFRC، توسط آزمون های تجربی ارائه شده توسط سینگ و همکاران [۳۴] که در شکل ۳-۱ آمده مدل شده است. مقدار کرنش غیر الاستیک در فشار (ϵ_c^{in}) از اختلاف کرنش کل (ϵ_c) و کرنش الاستیک (ϵ_c^{el}) به دست می‌آید؛ که در آن E_0 مدول الاستیسیته است. و همچنین مقدار کرنش غیر الاستیک در کشش (ϵ_t^{in}) از اختلاف کرنش کل (ϵ_t) و کرنش الاستیک (ϵ_t^{el}) به دست می‌آید.

(ϵ_c^{Pl}) و (ϵ_t^{Pl}) همچنین به ترتیب نشان‌دهنده کرنش پلاستیک در فشار و کشش می‌باشند. پارامتر آسیب در فشار (d_c) و در کشش (d_t) از صفر تا یک متغیر است و به توصیف درجه سختی مواد کمک می‌کند که در حالت آسیب‌ناپذیر برابر صفر و در حالت آسیب به‌طور کامل برابر یک است. با استفاده از این پارامتر، تنش فشاری σ_c ، تنش کششی σ_t به ترتیب به شرح معادله‌های ۳-۱ و ۳-۵ است.

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\epsilon_c - \epsilon_c^{pl}) \quad (1-3)$$

$$\epsilon_c^{pl} = \epsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (2-3)$$

$$\epsilon_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_c^{el} \quad (3-3)$$

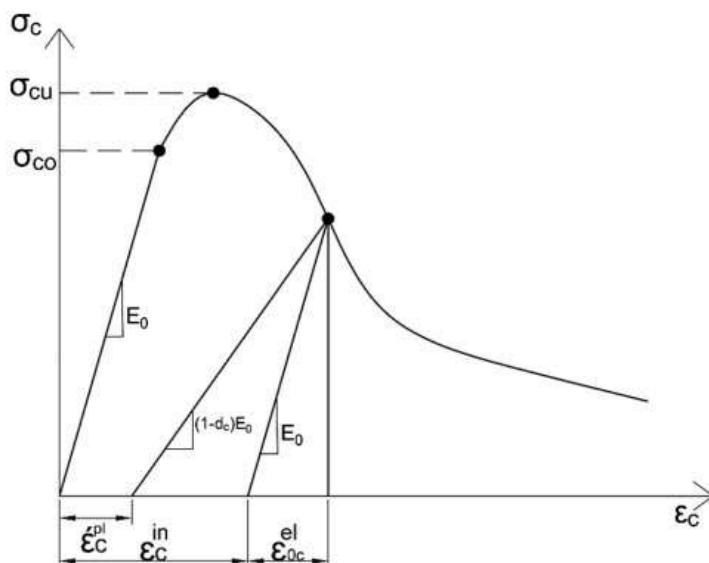
$$\epsilon_c^{el} = \sigma_c / E_0 \quad (4-3)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\epsilon_t - \epsilon_t^{pl}) \quad (5-3)$$

$$\epsilon_t^{pl} = \epsilon_t^{in} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (6-3)$$

$$\epsilon_t^{in} = \epsilon_t - \epsilon_t^{el} \quad (7-3)$$

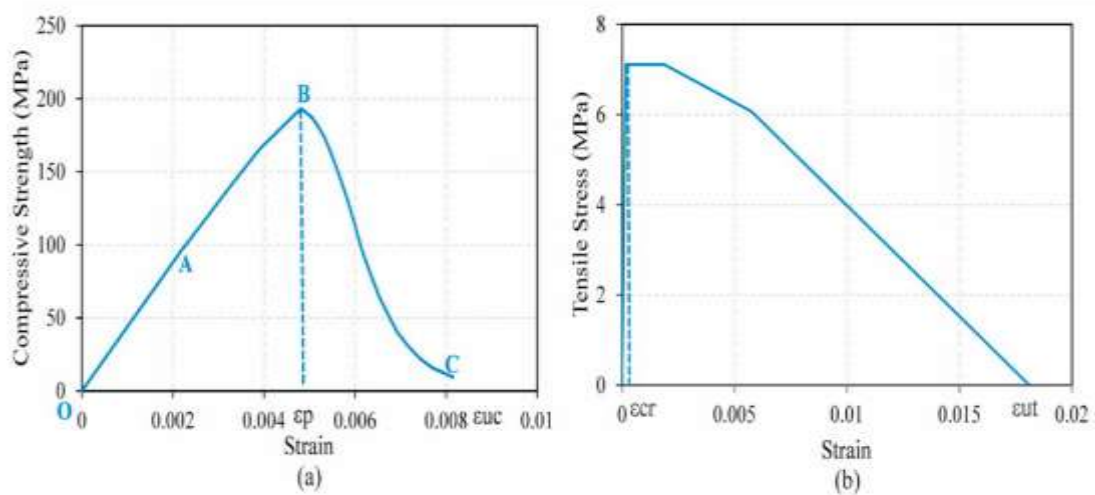
$$\epsilon_t^{el} = \sigma_t / E_0 \quad (8-3)$$



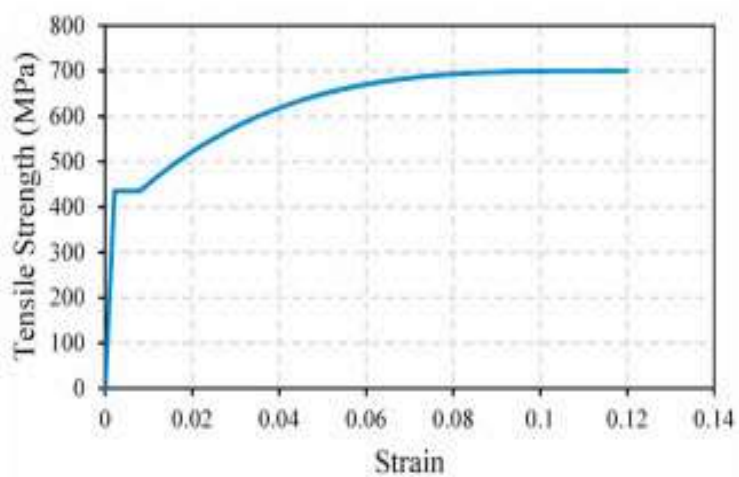
شکل ۳-۱. نمودار تنش-کرنش در فشار و اجزای مختلف آن [۳۴].

نمودار تنش-کرنش در فشار و در کشش برای ارزیابی رفتار UHPFRC در شکل ۳-۲ آمده است. نمودار تنش-کرنش UHPFRC در فشار، قبل از رسیدن به تنش تسلیم به صورت خطی تغییر می‌کند (ناحیه OA). پس از تسلیم مقداری افزایش تنش با شیب کم نسبت به ناحیه کشسانی رخ می‌دهد که به سخت‌شوندگی کرنشی معروف است (ناحیه AB) و در نهایت نمودار روند نزولی را طی می‌کند و به گسیختگی می‌رسد (ناحیه BC) [۳۳].

رفتار کششی UHPFRC تحت بارگذاری مستقیم کششی، قبل از ترک توسط پاسخ منحنی تنش-کرنش، در ناحیه الاستیک خطی مدل می‌شود؛ برای مرحله بعد از ترک خوردگی، از منحنی نرمی کشش دو خطی یو و همکاران [۳۵] بر اساس نتایج آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای در نمونه‌های منشوری استفاده می‌شود. نمودار تنش-کرنش فولاد هم در شکل ۳-۳ آمده است [۳۳].



شکل ۳-۲. نمودار تنش-کرنش UHPFRC در فشار و (a) در کشش [۳۳].



شکل ۳-۳. نمودار تنش-کرنش فولاد [۳۳].

۳-۶-۱-۲- مدل پلاستیک آسیب دیده بتن

جهت تعریف رفتار بتن در مدل CDP (Concrete Damage Plasticity)، از پنج پارامتر آسیب پلاستیک که عبارتند از: زاویه اتساع^۱، خروج از محوریت^۲ (e)، نسبت تنش فشاری حداکثر دوماحوره به یک محوره (σ_{b0}/σ_{c0})، نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف‌النهار کششی به همین مقدار روی نصف‌النهار فشاری (k_c) و پارامتر ویسکوزیته^۳ (μ) استفاده می‌شود [۳۶، ۳۷]. مقادیر این پنج پارامتر در جدول ۳-۲ بر اساس مطالعات گذشته و آنالیز حساسیت انجام شده در پژوهش کدور آمده است [۳۳، ۳۸-۴۰].

۳-۶-۱-۳- نحوه مدلسازی

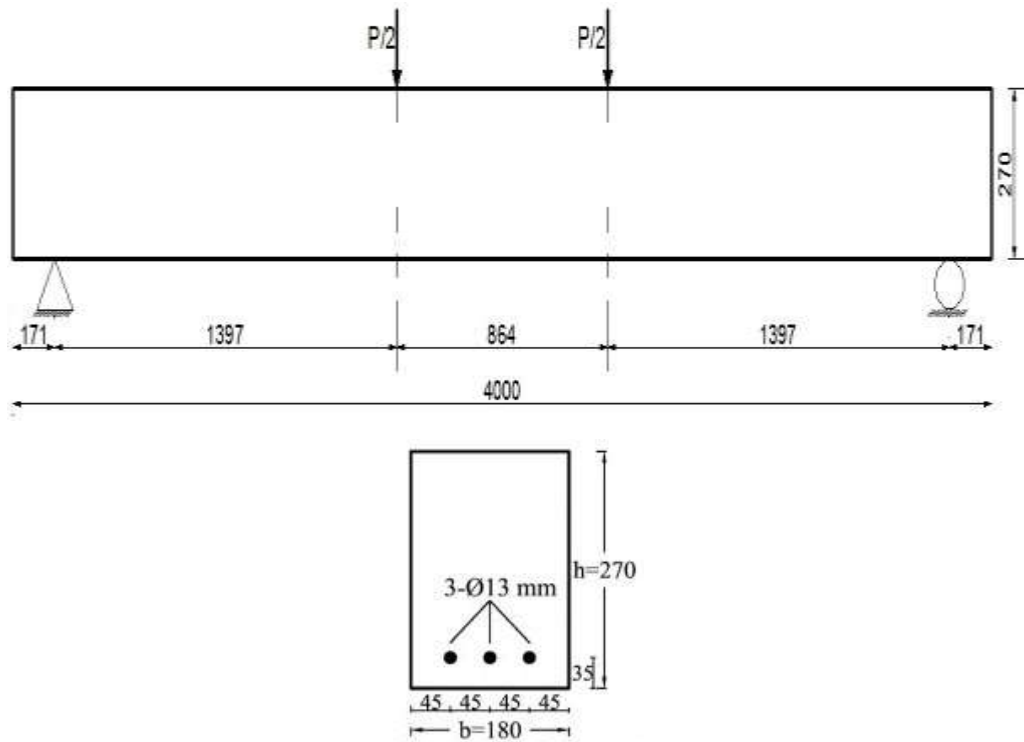
مقاومت فشاری، کرنش مربوط و مدول الاستیسیته UHPFRC که از طریق آزمایش مواد روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد به دست آمد، به ترتیب ۱۹۳ مگا پاسکال، ۰/۰۰۴۴ و ۴۳۹۷۰ مگا پاسکال است. هندسه اولیه مدل شامل یک تیر بتنی UHPFRC با تکیه‌گاه مفصلی است که بار متمرکز مطابق شکل ۳-۴ اثر می‌کند. شرایط بارگذاری و مقطع تیرها نیز در شکل ۳-۴ مشخص شده است. مدلسازی بتن به صورت solid و از نوع Extrusion و مدلسازی آرماتورها به صورت wire و از نوع planar می‌باشد. برای تعریف اندرکنش بین بتن و میلگرد از قید Region Embedded به معنی ناحیه مدفون شده استفاده شده است. این نوع اندرکنش تمامی جابجایی‌ها و شرایط مرزی را بین فولاد و بتن منتقل می‌کند شکل ۳-۵. لازم به ذکر است برای جلوگیری از تمرکز تنش و خرابی موضعی بتن در نقاط اعمال بار و تکیه‌گاه‌ها از صفحه‌هایی در تست خمش استفاده می‌شود. بدین منظور در مدلسازی آباکوس به منظور

^۱Dilation Angel

^۲Eccentricity

^۳Viscosity Parameter

مقید کردن حرکت یک سطح به حرکت یک نقطه در محل قرارگیری صفحه ها، از قید coupling استفاده شده است. بارگذاری تحت خمش چهار نقطه‌ای برابر با حداکثر مقدار جابجایی، ۱۲۰ میلی‌متر است.



شکل ۳-۴. شرایط بارگذاری و مقطع تیرهای UHPFRC (تمام ابعاد به میلی‌متر است) [۳۳].

طرح اختلاط بتن در جدول ۱-۳ آمده است. الیاف فولادی از نوع مستقیم (بدون قلاب) با قطر ۰/۲ میلی متر و طول ۱۳ میلی متر می باشند. خصوصیات UHPFRC و همچنین آرماتورهای فولادی برای شناسایی در مدل CDP در جدول ۲-۳ و ۳-۳ آورده شده است. مقادیر ϵ_u و ϵ_y به ترتیب بیانگر کرنش تسلیم و کرنش نهایی فولاد می باشند.

جدول ۳-۱. طرح اختلاط بتن [۳۳]

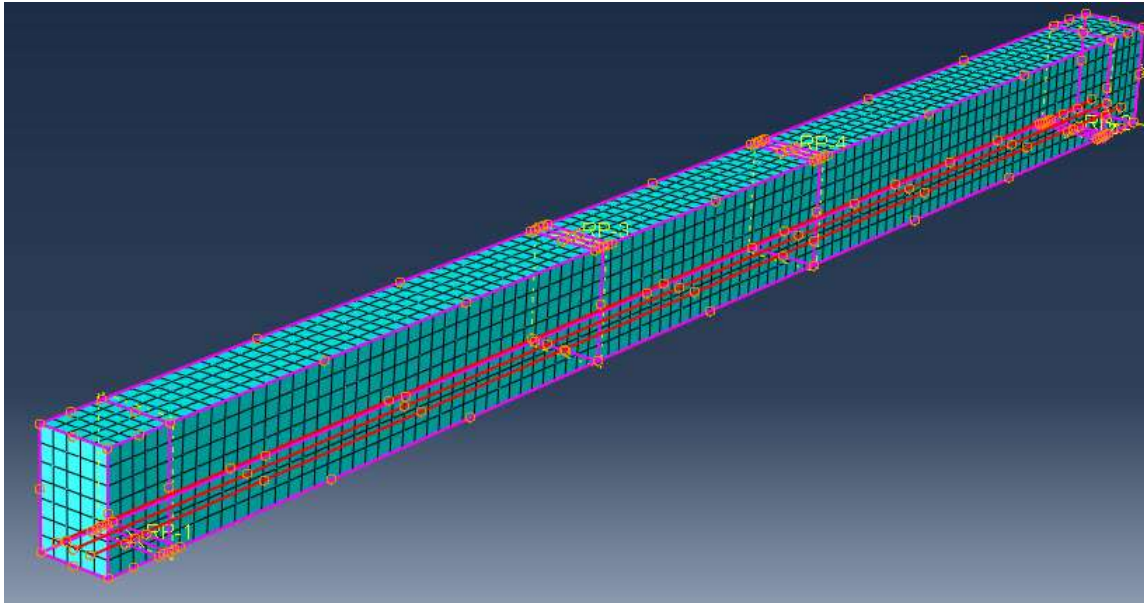
مصالح	Kg/m ³
کل مصالح	۱۲۵۱/۴
مصالح درشت	۴۷۵/۵
شن و ماسه سیلیس	۷۷۵/۹
مواد سیمانی	۹۳۸/۶
سیمان نوع I	۴۶۹/۳
دوده سیلیس	۲۰۶/۵
سرباره	۹۳/۹
پودر سنگ آهک	۱۶۸/۹
آب	۱۲۱/۸
الیاف فولاد	٪۲

جدول ۳-۲. مشخصات مصالح UHPFRC [۳۲]

مشخصه UHPFRC	مقدار
E (MPa)	۴۳۹۷۰
f _c (MPa)	۱۹۳
ε _p	۰/۰۰۴۴
ε _{up}	۰/۰۰۸
f _t (MPa)	۷/۱۱
ε _{cr}	۰/۰۰۰۱۶
ε _{ut}	۰/۰۱۸۱
چگالی (kg/m ³)	۲۵۶۵
ضریب پواسن	۰/۲
زاویه اتساع	۳۹°C
k _c	۲/۳
σ _{b0} / σ _{c0}	۱/۱۶
پارامتر ویسکوزیته	۰/۰۰۰۱
خروج از مرکزیت	۰/۱

جدول ۳-۳. مشخصات فولاد مورد استفاده در آزمایش [۳۲]

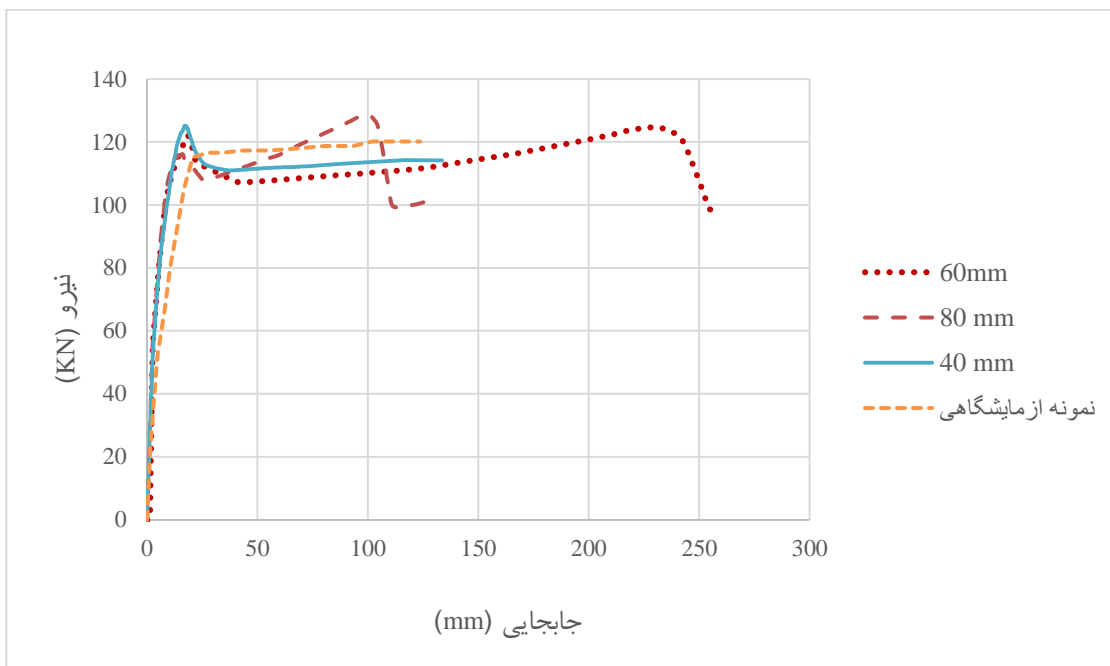
مشخصه آرماتورهای فولادی	مقدار
E(GPa)	۲۰۷
f _y (MPa)	۴۳۵
ε _y	۰/۰۰۲۱
f _u (MPa)	۷۰۰
ε _u	۰/۱۲
چگالی (kg/m ³)	۷۸۵۰
ضریب پواسن	۰/۳



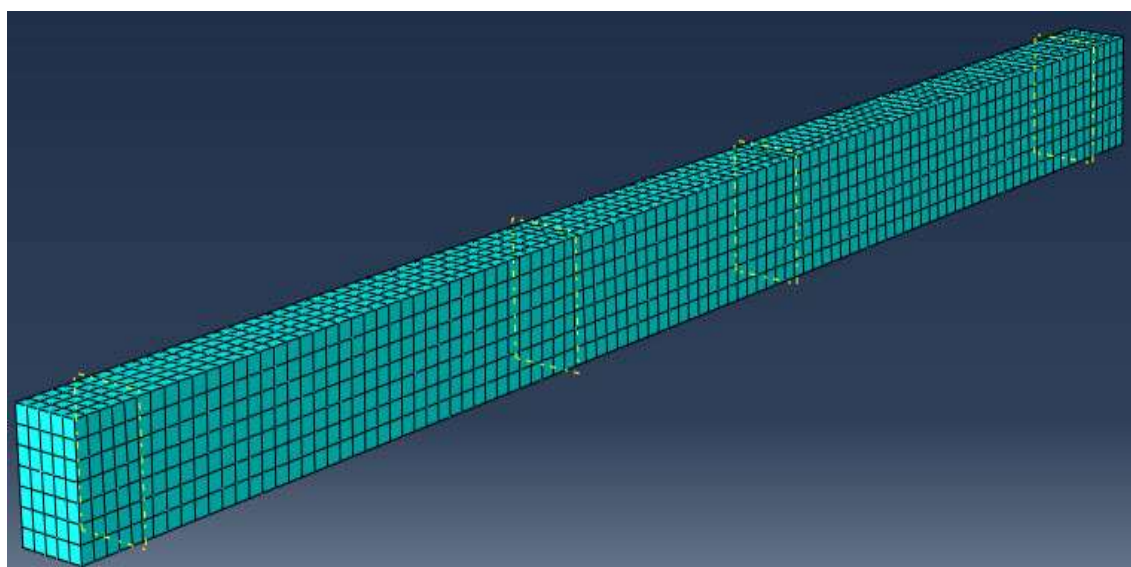
شکل ۳-۵. اندرکنش میان بتن و میلگردهای فولادی

۳-۶-۱-۴-مش بندی مدل اجزا محدود و آنالیز حساسیت نسبت به چگالی مش

دقت و همگرایی نتایج عددی به طور مستقیم به چگالی مش وابسته است. برای به دست آوردن تعداد بهینه مش یک آنالیز حساسیت نسبت به مش صورت گرفت تا اثر ریزتر شدن المانها بر نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه تیر بررسی گردد. بدین منظور سه آنالیز با اعداد مش ۴۰، ۶۰، ۸۰، میلی متر انجام شد که دقت نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است شکل ۳-۶؛ بنابراین، مدل با مش ۴۰ میلی متر مطابقت خوبی با نمونه آزمایشگاهی دارد و از آن می توان به عنوان مش بندی بهینه یاد کرد شکل ۳-۷.



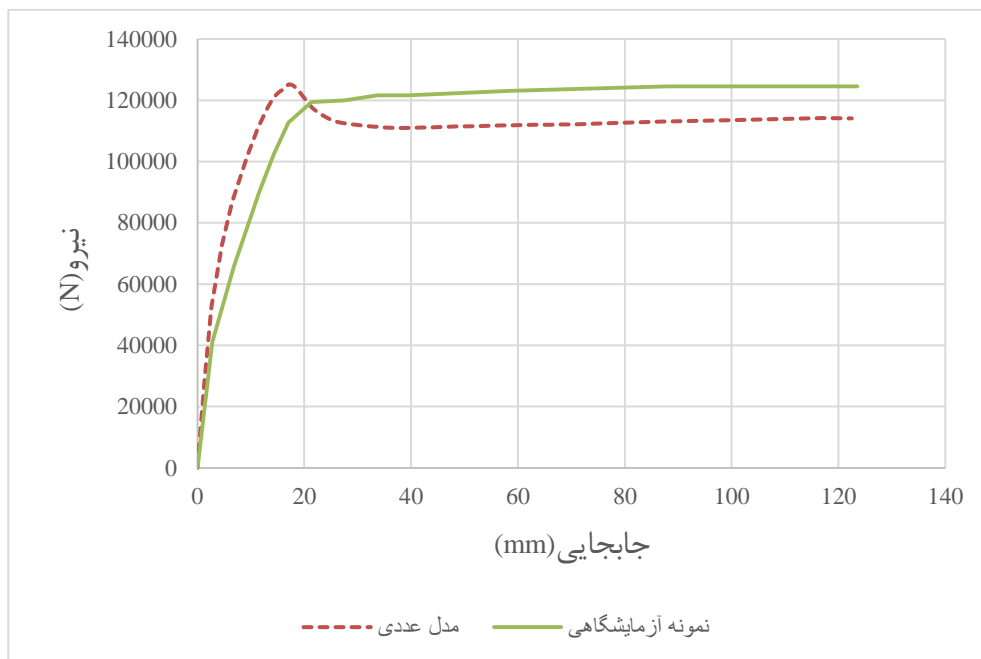
شکل ۳-۶. مشخصات مش بندی، مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تیر



شکل ۳-۷. مش بندی بهینه تیر UHPFRC

۳-۶-۱-۵-مقایسه مدلسازی عددی با نتایج کدور [۳۳]

پس از شبیه‌سازی این نمونه در نرم‌افزار، نتایج تحلیل به صورت زیر بوده است. در نهایت نتایج عددی به دست آمده از نرم‌افزار با نتیجه به دست آمده از مقاله میرزایی و کدور [۳۳] مقایسه شده است. به وجود آمدن ناحیه نرم شوندگی در مدل عددی احتمالاً به علت تغییر نحوه بارگذاری در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی است. در مدل عددی بارگذاری از نوع جابجایی کنترل برابر با حداکثر مقدار جابجایی، ۱۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد ولی در مدل آزمایشگاهی بارگذاری از نوع نیرو کنترل بوده است. با توجه به شکل ۳-۸ نتایج حاصل از دو روش مطابقت قابل قبولی دارند.



شکل ۳-۸. صحت سنجی مدل کدور [۳۳].

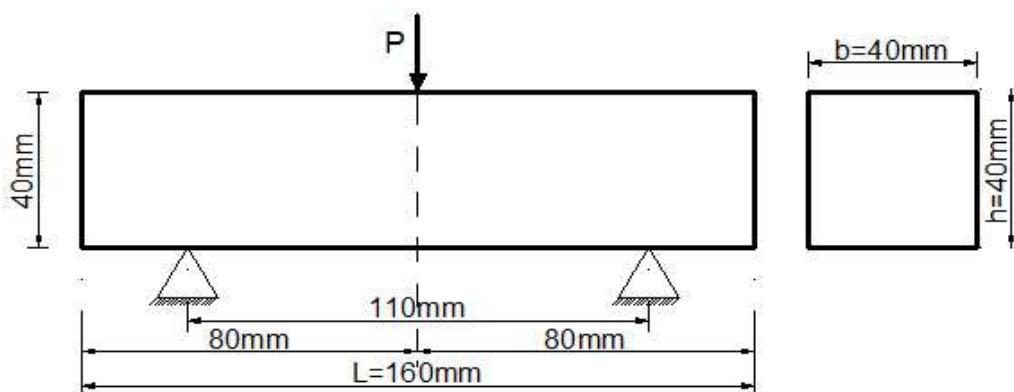
۳-۶-۲-مدلسازی آزمایشگاهی ژنگ با اثر حرارت [۲۰]

ژنگ و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۲ مقاومت خمشی بتن فوق توانمند حاوی الیاف فولاد، با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ی منشوری به ابعاد $۱۶۰ \times ۴۰ \times ۴۰$ میلی‌متر مطابق شکل ۳-۹ در اثر حرارت بررسی کردند.

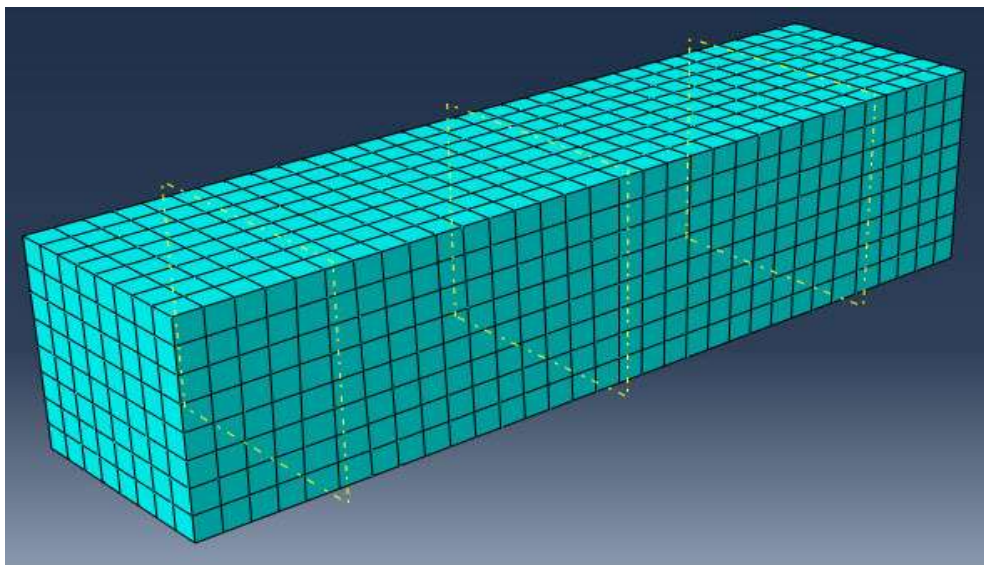
به منظور اطمینان از صحت مدلسازی از جمله بارگذاری، شرایط تکیه‌گاهی، مصالح و اندرکنش مصالح، خروجی نرم‌افزار با استفاده از نتایج ژنگ و همکاران [۲۰] مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در نرم‌افزار اجزای محدود، تیر به‌طور کامل و بدون آرماتورهای طولی و عرضی مدل شد. شرایط تکیه‌گاه در دو طرف تیر بتنی به‌صورت مفصلی در نظر گرفته شد و همچنین شرایط بارگذاری در وسط دهانه از نوع جابجایی به اندازه ۳ میلی‌متر به تیر اعمال گردید.

مدلسازی بتن به صورت solid و از نوع Extrusion می‌باشد. برای جلوگیری از تمرکز تنش و خرابی موضعی بتن در نقاط اعمال بار و تکیه‌گاه‌ها در مدلسازی آباکوس از قید coupling استفاده شد. مش بندی به اندازه ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است شکل ۳-۱۰.

خصوصیات UHPFRC (بدون آرماتور) برای شناسایی در مدل CDP مطابق جدول ۳-۲ در بخش ۳-۱-۶ بیان شد که به دلیل کمبود اطلاعات پارامترهای آسیب بتن ثابت در نظر گرفته شد. اثر حرارت از طریق خصوصیات مکانیکی پسماند مطابق با پژوهش‌های ویل [۳] در دمای بالا به رفتار UHPFRC اعمال شد. در نهایت مقاومت خمشی حاصل از تحلیل اجزای محدود، با نتایج آزمایشگاهی ژنگ و همکاران [۲۰] مقایسه شد.



شکل ۳-۹. هندسه تیر بتنی مورد استفاده در خمش سه‌نقطه‌ای [۲۰].



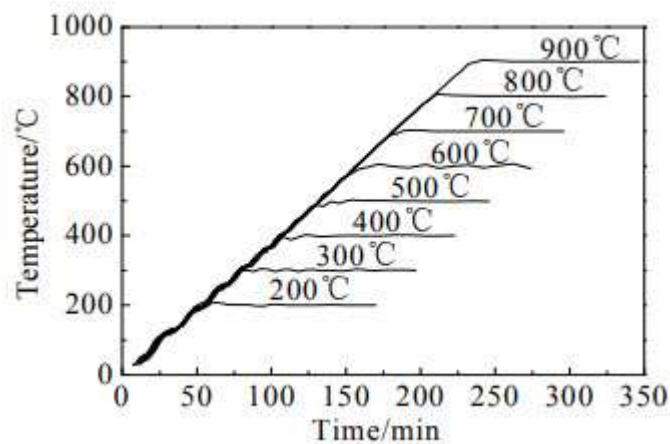
شکل ۳- ۱۰. مش بندی بهینه تیر UHPFRC

۳-۶-۲-۱- خصوصیات مکانیکی باقیمانده بتن پس از حرارت بالا طبق روابط وای و ویل

[۳]

وای و ویل [۳] در تحقیق خود از طریق خصوصیات مکانیکی پسماند در دمای مینا ۹۰ درجه خواص بتن فوق توانمند حاوی الیاف را در حرارت بالا مورد ارزیابی قراردادند. برای بررسی عملکرد عناصر بتنی تحت دمای بالا از منحنی های استاندارد زمان - دما استفاده شد. با توجه به امکانات کوره گرمایی از منحنی زمان - دما شکل ۳-۱۱ استفاده شد. نمونه ها در معرض چند سطح گرمایی متفاوت تا دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. پس از رسیدن به دمای هدف برای اینکه عمق نمونه های بتنی به دمای هدف برسد، دمای کوره به مدت دو ساعت در دمای هدف ثابت نگه داشته شد. پس از زمان دو ساعت نمونه ها در داخل کوره در مدت زمان ۲۴ ساعت به دمای محیط رسیدند

در این تحقیق خصوصیات مکانیکی پسماند در دمای مینا ۹۰ درجه سانتی گراد و با استفاده از برون یابی در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد به دست آمد. در ادامه به بررسی روابط هر کدام پرداخته شد.



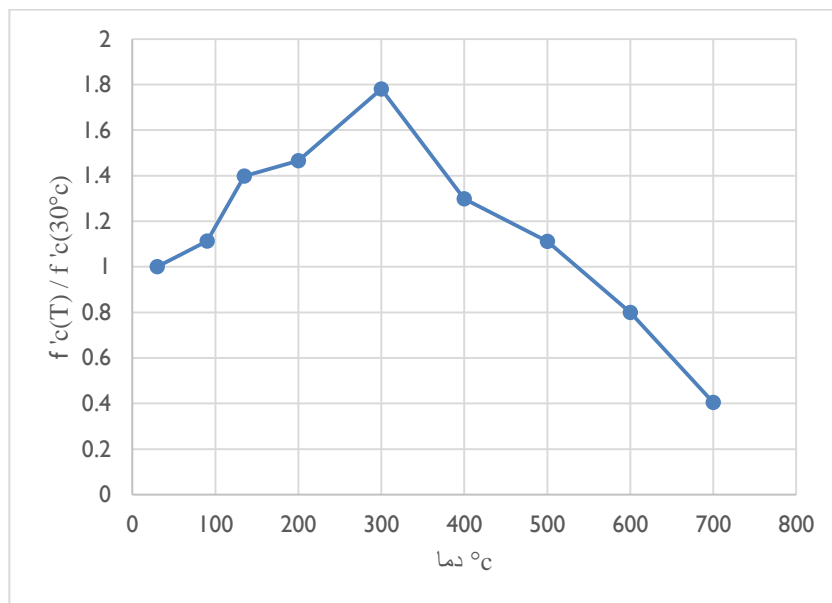
شکل ۳-۱۱. منحنی دما - زمان کوره در دمای هدف مختلف

۳-۶-۲-۱-۱-مقاومت فشاری پسماند

در دماهای بالا مقداری از آب بتن تبخیر شده و این فشار بخار موجب ایجاد تنش های داخلی در بتن شده و مقاومت فشاری آن را کاهش می دهد. مقادیر مقاومت فشاری پسماند طبق روابط وای و ویل ($f'_{c(T)} / f'_{c(30^{\circ}C)}$) مطابق جدول ۳-۴ و منحنی آن در شکل ۳-۱۲ آمده است. روابط آن نیز در معادله ۳-۹ بیان شده است.

جدول ۳-۴. مقاومت فشاری پسماند [۳]

$f'_{c(T)} / f'_{c(30^{\circ}C)}$	دما
۱	۳۰
۱/۱۱۳	۹۰
۱/۳۹۸	۱۳۵
۱/۴۶۵	۲۰۰
۱/۷۸۰	۳۰۰
۱/۲۹۸	۴۰۰
۱/۱۱۱	۵۰۰
۰/۸۰۰	۶۰۰
۰/۴۰۵	۷۰۰



شکل ۳-۱۲. مقاومت فشاری پسماند بتن فوق توانمند [۳]
(f'c(T) / (f'c(30°C)))

$$\frac{f'c(T)}{f'c(30^\circ C)} = \begin{cases} 2.9 \left(\frac{T}{1000}\right) + 0.88 & 30 \leq T \leq 300 \\ -3.2 \left(\frac{T}{1000}\right) + 2.7028 & 300 \leq T \leq 700 \end{cases} \quad (9-3)$$

شکل ۳-۱۲ افزایش مقاومت فشاری پسماند تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رانشان داد؛ اما این افزایش مقدار در مقاومت فشاری کوتاه‌مدت بود و بعد از دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نمودار روند نزولی خود را طی کرد و تا دمای ۷۰۰ درجه نیز ادامه داد. بتن‌های پر مقاومت در دمای بالای به دلیل پکیدگی، مقدار بیشتری از مقاومت فشاری خود را از دست می‌دهند.

۳-۶-۲-۱-۲-مقاومت کششی پسماند

مقاومت کششی بتن در مقابل مقاومت فشاری آن بسیار اندک است. مقادیر مقاومت کششی پسماند

بتن فوق توانمند در رابطه ۳-۱۰ آمده است:

$$\frac{f't(T)}{f't(30^\circ C)} = \begin{cases} 0.96 + 1.2 \left(\frac{T}{1000}\right) & 30 \leq T \leq 200 \\ 0.95 + 1.7 \left(\frac{T}{1000}\right) - 3 \left(\frac{T}{1000}\right)^2 & 200 \leq T \leq 800 \end{cases} \quad (10-3)$$

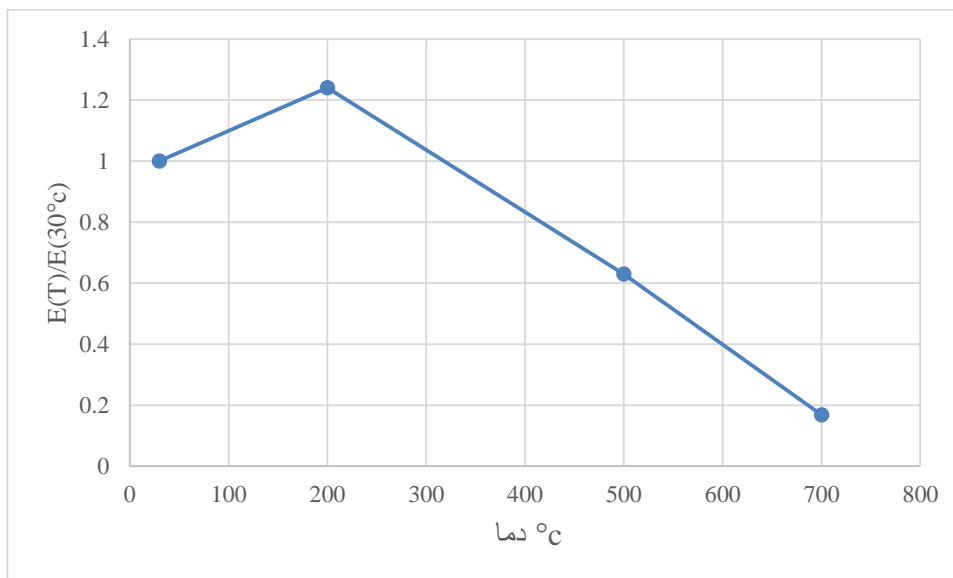
۳-۶-۲-۱-۳-مدول الاستیسیته پسماند

مدول الاستیسیته پسماند به عنوان شیب قسمت خطی ناحیه الاستیک از منحنی تنش- کرنش بعد از گرم کردن تا دمای معین و بازگشت به دمای محیط در نظر گرفته می شود.

مدول الاستیسیته پسماند ($E(T)/E(30^{\circ}C)$) در دمای مختلف مطابق جدول ۳-۵ و منحنی آن در شکل ۳-۱۳ آمده است. روابط آن نیز در معادله ۳-۱۱ بیان شده است.

جدول ۳-۵. مدول الاستیسیته پسماند [۳]

$E(T)/E(30^{\circ}C)$	دما
۱	۳۰
۱/۱۴۱	۹۰
۱/۲۴۶	۱۳۵
۱/۲۴۵	۲۰۰
۱/۱۸۲	۳۰۰
۰/۸۷۱	۴۰۰
۰/۶۳۸	۵۰۰
۰/۴۵۵	۶۰۰
۰/۱۶۸	۷۰۰



شکل ۳-۱۳. مدول الاستیسیته پسماند بتن فوق توانمند [۳]
(E(T)/ E(30°C))

$$\frac{E(T)}{E(30^{\circ}\text{C})} = \begin{cases} 1.4 \left(\frac{T}{1000}\right) + 0.957 & 30 \leq T \leq 200 \\ -2.1 \left(\frac{T}{1000}\right) + 1.676 & 200 \leq T \leq 700 \end{cases} \quad (11-3)$$

شکل ۳-۱۳ افزایش مدول الاستیسیته تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان داد. پس از دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نمودار کاهش مدول الاستیک را در پی دارد. به طوری که در دمای ۵۰۰ درجه به مقدار تقریباً ۴۰٪ نسبت به مدول الاستیک در دمای محیط کاهش می‌یابد. این کاهش تا دمای ۷۰۰ درجه نیز ادامه دارد.

۳-۲-۶-۲- مقایسه مدلسازی عددی با نتایج ژنگ [۲۰] در اثر حرارت

مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بعد از قرار گرفتن تیر در دمای بالا مطابق جدول ۳-۶ است. نام‌گذاری تیرها به صورت زیر که در آن عدد پس از B بیانگر مقاومت فشاری در دمای محیط و عدد پس از T بیانگر درجه حرارت است. مقاومت فشاری و خمشی بتن یکی از اصلی‌ترین پارامترهای طراحی سازه و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی و مشخصه کیفیت بتن می‌باشند.

مقدار نیروی اعمالی و مقدار خمشدگی تیر در یک نمودار دوبعدی رسم شد که در آن محور عمودی معرف نیرو و محور افقی معرف میزان خمشدگی می‌باشد. در اینجا، مقاومت خمشی بتن با یکای مگا پاسکال (MPa) از رابطه ۳-۱۲ به دست می‌آید.

$$f_f = \frac{1.5PL}{bd^2} \quad (۳-۱۲)$$

در این رابطه f_f مقاومت خمشی برحسب مگا پاسکال، P بار شکست (حداکثر نیرو در نمودار نیرو-جابجایی)، L طول دهانه، b عرض تیر و d عمق تیر می‌باشد.

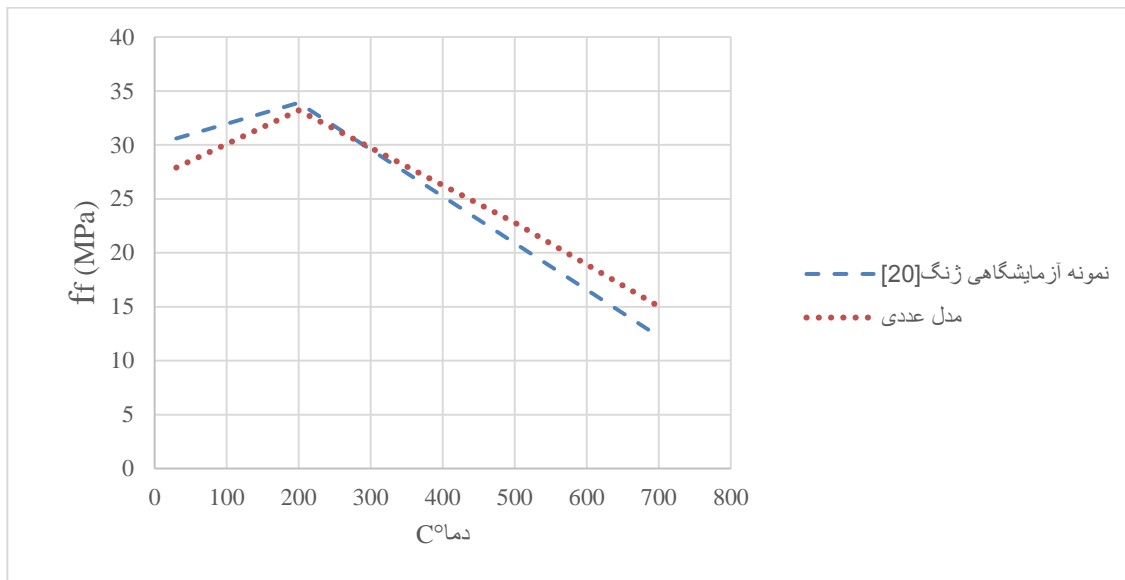
جدول ۳-۶. مشخصات بتن فوق توانمند پس از قرار گرفتن در معرض حرارت بالا

(f_t) (MPa)	E (GPa)	(f_c) (MPa)	(f_t) _T /(f_t) _{۳۰°C}	E_T / $E_{۳۰°C}$	(f_c) _T /(f_c) _{۳۰°C}	تیر
۷/۱۱	۴۳/۹۷	۱۹۳	۱	۱	۱	B193T30
۸/۶۰	۵۴/۷۴	۲۸۲/۷	۱/۲۱	۱/۲۴۵	۱/۴۶۵	B193T200
۷/۴۶	۲۸/۰۵	۲۱۴/۴۲	۱/۰۵	۰/۶۳۸	۱/۱۱۱	B193T500
۴/۴۷	۷/۳۸	۷۸/۱۶۵	۰/۶۳	۰/۱۶۸	۰/۴۰۵	B193T700

با مدل کردن تیر در دمای محیط و دمای ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی گراد مقادیر مقاومت خمشی تیر UHPFRC در دماهای بالا بدست آمد. نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی مطابق جدول ۳-۷ آمده است. همچنین نمودار شکل ۳-۱۴ نشان دهنده مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی است. درصد خطای به وجود آمده احتمالاً به دلیل مقاومت فشاری و تاریخچه متفاوت نمونه های آزمایشگاهی مدل وای و ویل و نمونه های ژنگ می باشد. با این وجود درصد خطا از ۰.۸٪ تا دمای ۵۰۰ درجه و از ۰.۲۲٪ تا دمای ۷۰۰ درجه فراتر نرفته است.

جدول ۳-۷. مقایسه نتایج مقاومت خمشی تیرها در دمای بالا از آزمایش و تحلیل اجزای محدود

درصد خطا	(f _f)T نمونه آزمایشگاهی	(f _f)T مدل عددی	دما °C
٪-۸	۳۰/۶	۲۷/۹	۳۰
٪-۲	۳۳/۹	۳۳/۲	۲۰۰
٪-۸	۲۰/۹۶	۲۲/۸	۵۰۰
٪-۲۲	۱۲/۲۵	۱۵/۰۳	۷۰۰



شکل ۳-۱۴. مقایسه مقاومت خمشی تیرها در دمای بالا از نتایج آزمایش و تحلیل اجزای محدود.

فصل ۴: نتایج و تفسیر آن‌ها

۴-۱-مقدمه

۴-۲-شرح مدل

در این فصل پس صحت سنجی مدل اولیه با مدل آزمایشگاهی، مدل‌های دیگری ساخته شد و اثر مقاومت فشاری و درجه حرارت‌های مختلف بر مقاومت خمشی، نمودار نیرو-جابجایی، انرژی شکست و به‌طور کلی رفتار تیر بتنی مورد بررسی قرار گرفت.

در این تحقیق سه نمونه تیر با مقاومت فشاری دلخواه ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مگا پاسکال در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفتند و تأثیر حرارت بر هرکدام از آن‌ها بررسی شد. نمونه‌های خمشی تحت خمش سه‌نقطه‌ای با ابعاد $۱۶۰ \times ۴۰ \times ۴۰$ میلی‌متر با الیاف ۲٪ می‌باشند. شرایط تکیه‌گاه در دو طرف تیر بتنی به‌صورت مفصلی در نظر گرفته شد.

۴-۳-مقایسه اثر حرارت در تیرهای با مقاومت فشاری مختلف

۴-۳-۱-نمونه B100

جداول ۴-۱ و ۴-۲ به ترتیب مقامت کششی و فشاری و مدول الاستیسیته B100 در دمای محیط و مقاومت فشاری پسماند و مدول الاستیسیته پسماند ناشی از افزایش دمای ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۴-۲ و جداول ۴-۱ و ۴-۲ مشخص است افزایش مقاومت خمشی به‌اندازه ۱۲/۱۸ درصد برای دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در نمونه با مقاومت ۱۰۰ مگا پاسکال به دست آمد؛ اما بعد از گذشت زمان و رسیدن دما به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نمودار به میزان ۸/۱۶ درصد افت مقاومت خمشی

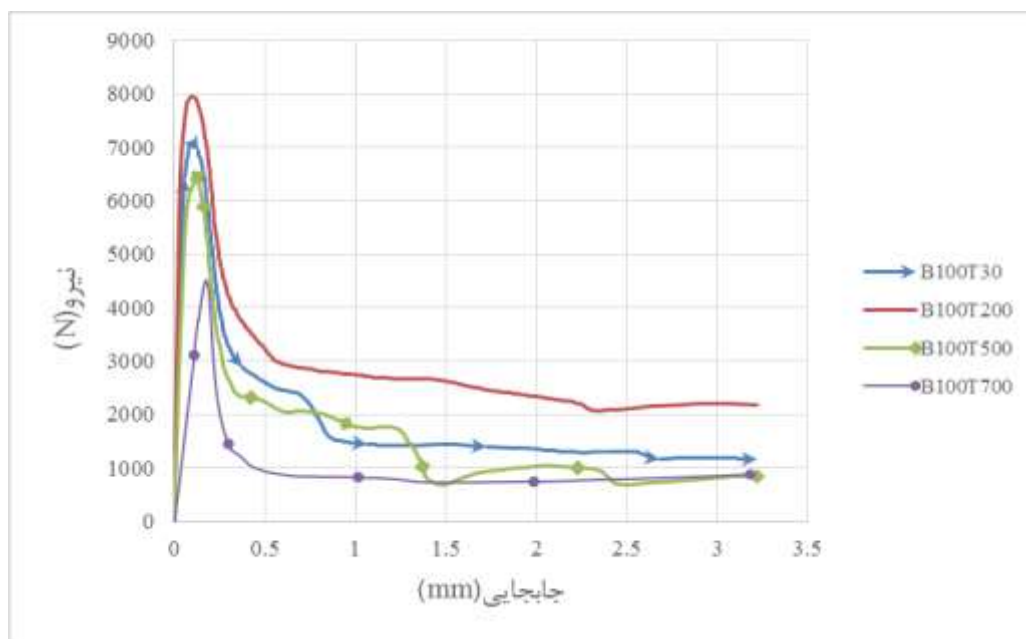
نسبت به دمای محیط را نشان داد. نمودار تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد روند نزولی خود را تا ۳۶/۲۳ درصد کمتر از دمای محیط طی کرد.

جدول ۴-۱. مقاومت کششی و مقاومت فشاری برای B100 در دمای مختلف

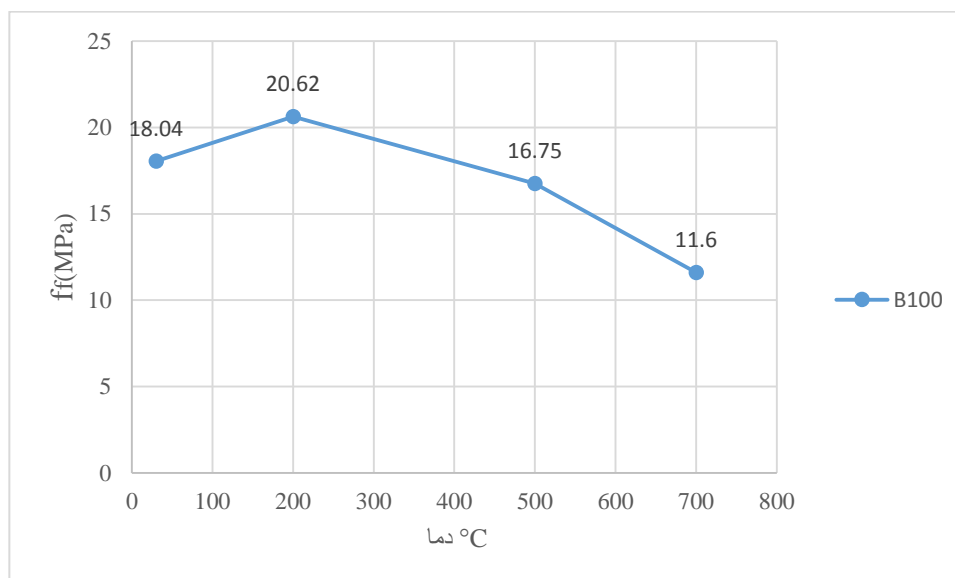
دما	$(ft)_T$ مقاومت کششی در دمای T بر حسب MPa	$(f'_c)_T$ مقاومت فشاری در دمای T بر حسب MPa
۳۰	۵/۱۱	۱۰۰
۲۰۰	۶/۱۸	۱۴۶/۵
۵۰۰	۵/۳۶	۱۱۱/۱
۷۰۰	۳/۲۲	۴۰/۵

جدول ۴-۲. مدول الاستیسیته برای B100 در دمای مختلف

دما	$(E)_T$ مدول الاستیسیته در دمای T بر حسب GPa
۳۰	۳۱/۶۵
۲۰۰	۳۹/۴۰
۵۰۰	۲۰/۱۹
۷۰۰	۵/۳۱



شکل ۴-۱. نمودار نیرو-جابجایی B100 در دمای ۳۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۴-۲. نمودار مقاومت خمشی B100 بر حسب دما

۴-۳-۲- نمونه B150

جداول ۳-۴ و ۴-۴ به ترتیب مقاومت کششی و فشاری و مدول الاستیسیته B150 در دمای محیط و مقاومت فشاری پسماند و مدول الاستیسیته پسماند ناشی از افزایش دمای ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

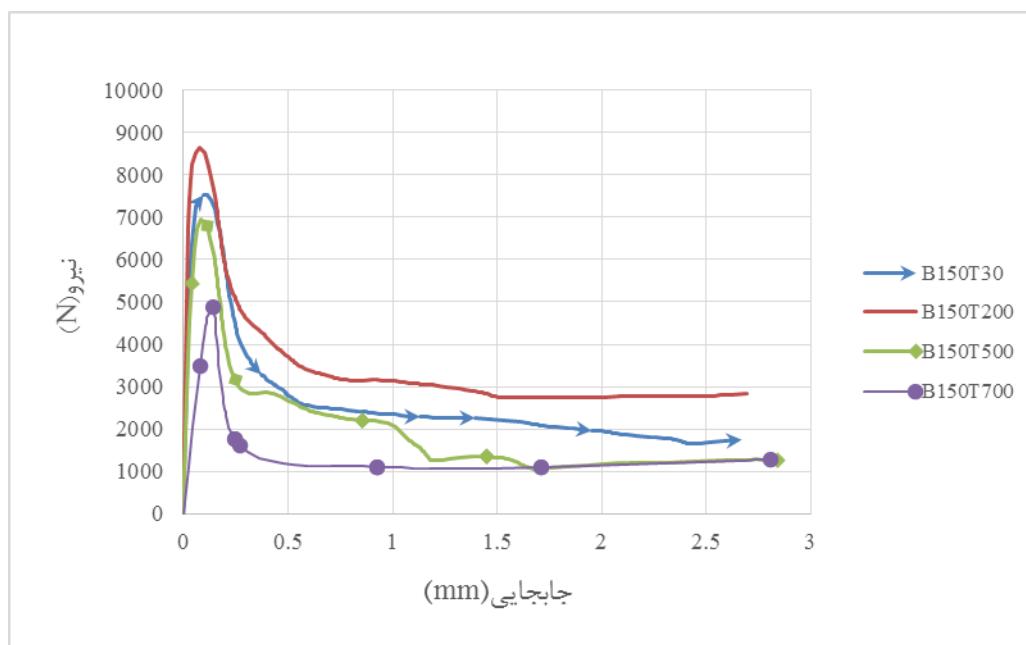
همان‌طور که در شکل ۴-۴ و جداول ۳-۴ و ۴-۴ مشخص است نمودار افزایش مقاومت خمشی به‌اندازه ۱۴/۶۲ درصد برای دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در نمونه با مقاومت ۱۵۰ مگا پاسکال به دست آمد؛ اما بعد از گذشت زمان و رسیدن دما به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نمودار به میزان ۷/۵۷ درصد افت مقاومت خمشی نسبت به دمای محیط را نشان داد. نمودار تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد روند نزولی خود را تا ۳۴/۳۷ درصد کمتر از دمای محیط طی کرد.

جدول ۳-۴. مقاومت کششی و مقاومت فشاری برای B150 در دمای مختلف

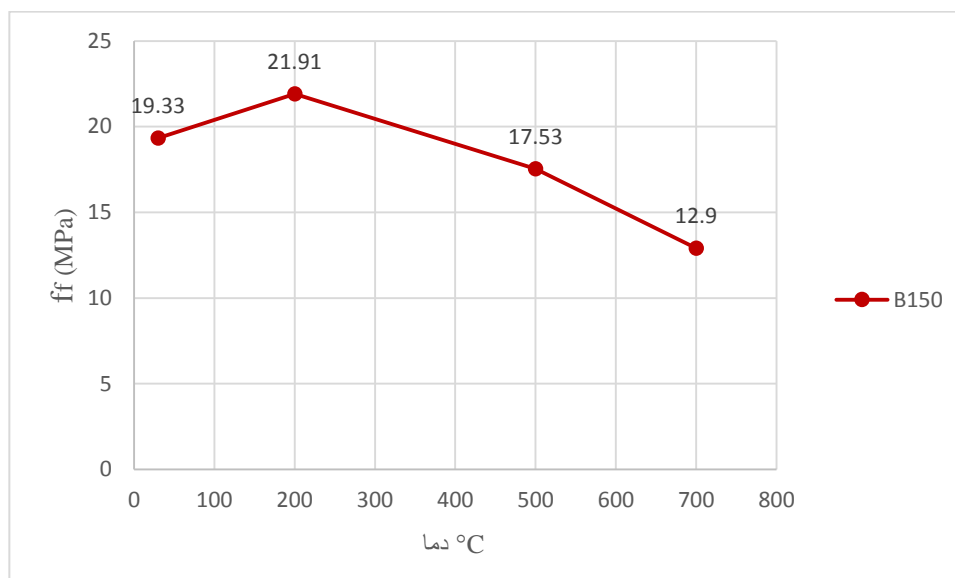
دما	$(ft)_T$ مقاومت فشاری در	$(f'_c)_T$ مقاومت فشاری در
	دمای T بر حسب MPa	دمای T بر حسب MPa
۳۰	۶/۲۵	۱۵۰
۲۰۰	۷/۵۷	۲۱۹/۷۵
۵۰۰	۶/۵۹	۱۶۶/۶۵
۷۰۰	۳/۹۸	۶۰/۷۵

جدول ۴-۴. مدول الاستیسیته برای B150 در دمای مختلف

دما	$(E)_T$ مدول الاستیسیته در دمای T بر حسب GPa
۳۰	۳۸/۷۶
۲۰۰	۴۸/۲۵
۵۰۰	۲۴/۷۲
۷۰۰	۶/۵۱



شکل ۳-۴. نمودار نیرو-جابجایی B150 در دمای ۳۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۴-۴. نمودار مقاومت خمشی B150 بر حسب دما

۳-۳-۴- نمونه B200

جداول ۴-۵ و ۴-۶ به ترتیب مقاومت کششی و فشاری و مدول الاستیسیته B200 در دمای محیط و مقاومت فشاری پسماند و مدول الاستیسیته پسماند ناشی از افزایش دمای ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

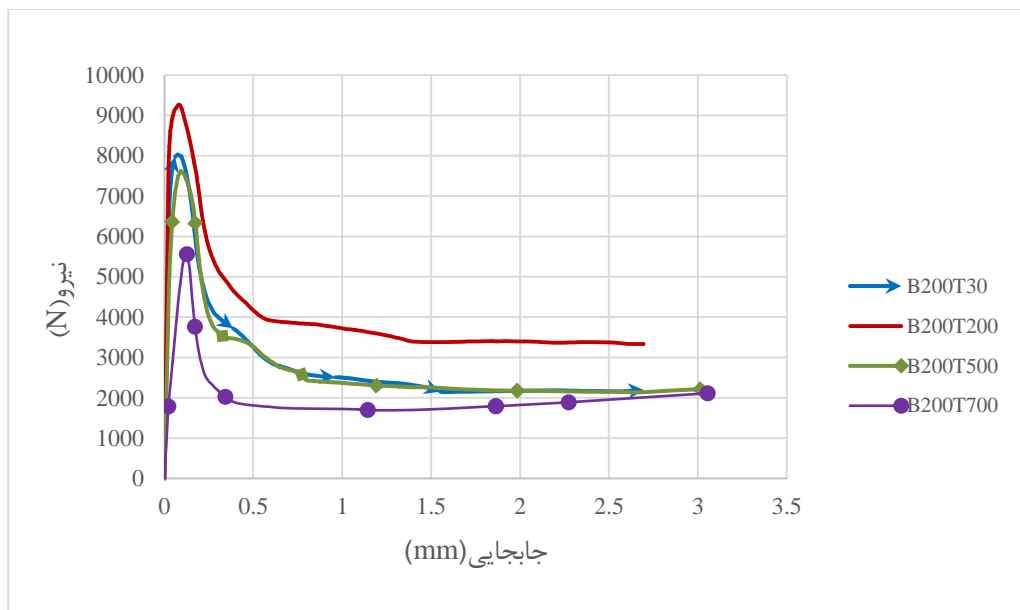
همان‌طور که در شکل ۴-۶ و جداول ۴-۵ و ۴-۶ مشخص است نمودار افزایش مقاومت خمشی به‌اندازه ۱۵/۴۳ درصد برای دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در نمونه با مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال به دست آمد؛ اما بعد از گذشت زمان و رسیدن دما به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نمودار به میزان ۵ درصد افت مقاومت خمشی نسبت به دمای محیط را نشان داد. نمودار تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد روند نزولی خود را تا ۳۰/۷۴ درصد کمتر از دمای محیط طی کرد. در نهایت نمودار شکل ۴-۷ مقاومت خمشی سه نمونه با مقاومت فشاری های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال را بر حسب دما نشان داد.

جدول ۴-۵. مقاومت فشاری برای B200 در دمای مختلف

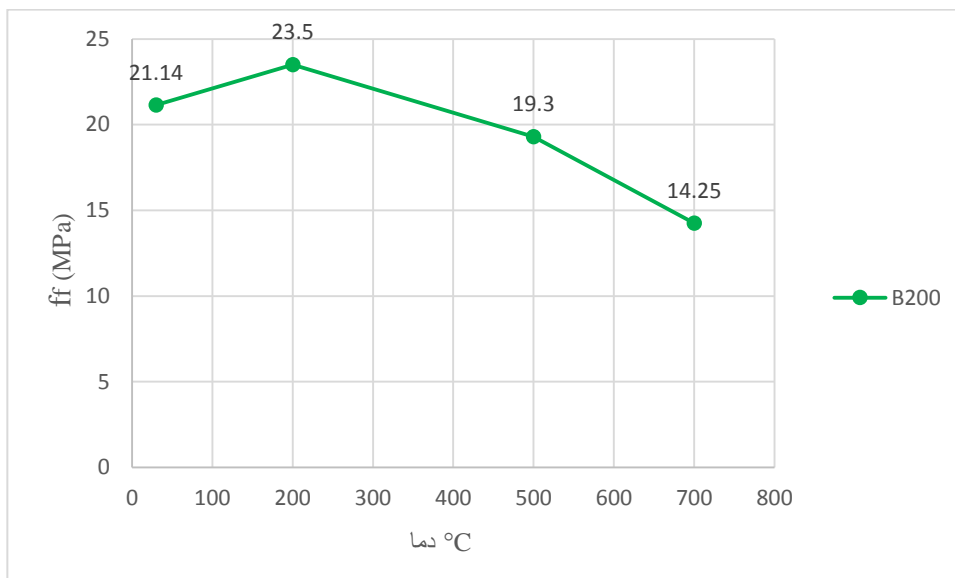
دما	$(ft)_T$ مقاومت فشاری در دمای T بر حسب MPa	$(f'c)_T$ مقاومت فشاری در دمای T بر حسب MPa
۳۰	۷/۲۲	۲۰۰
۲۰۰	۸/۷۴	۲۹۳
۵۰۰	۷/۶۱	۲۲۲/۲
۷۰۰	۴/۵۷	۸۱

جدول ۴-۶. مدول الاستیسیته برای B200 در دمای مختلف

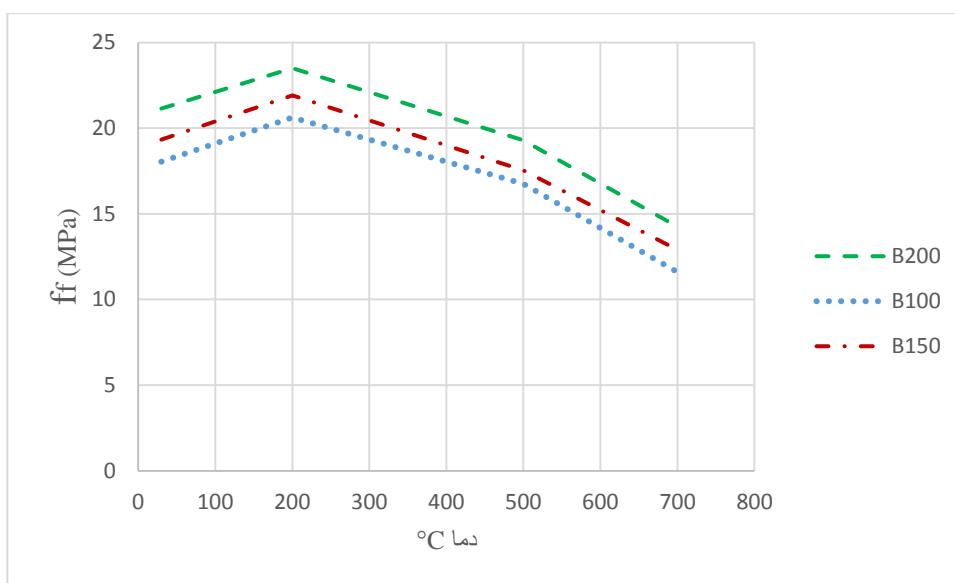
دما	$(E)_T$ مدول الاستیسیته در دمای T بر حسب GPa
۳۰	۴۴/۷۵
۲۰۰	۵۵/۷۱
۵۰۰	۲۸/۵۵
۷۰۰	۷/۵۱



شکل ۴-۵. نمودار نیرو-جابجایی B200 در دمای ۳۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ درجه سانتی گراد

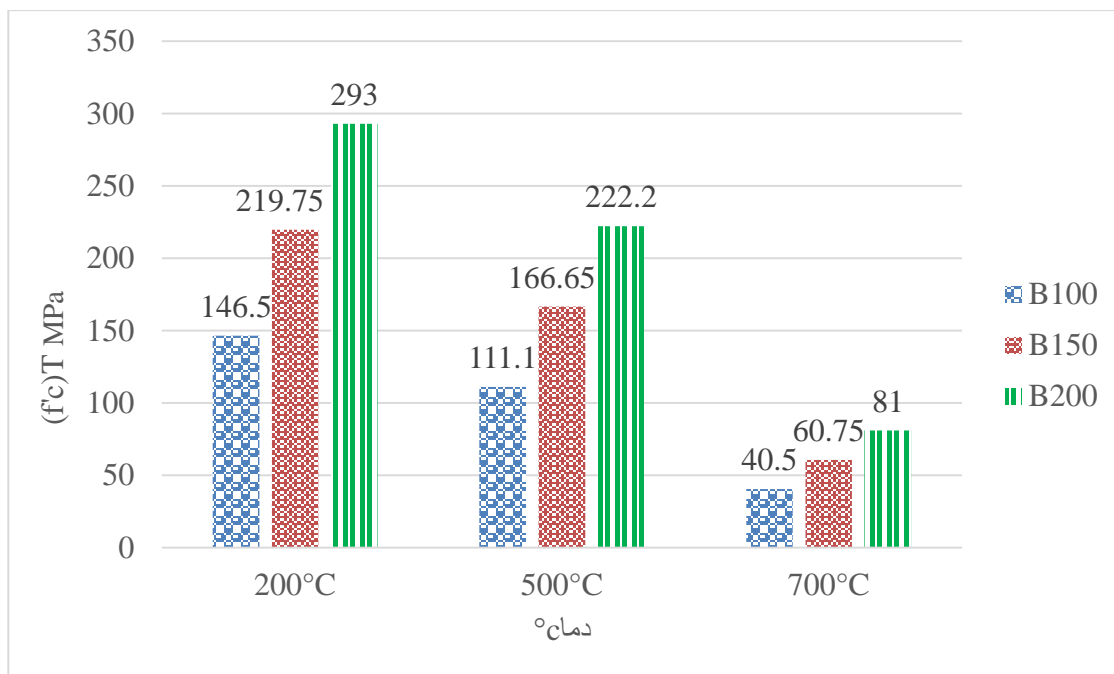


شکل ۴-۶. نمودار مقاومت خمشی B200 بر حسب دما



شکل ۴-۷. مقایسه مقاومت خمشی B200, B150, B100 در دمای ۳۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

نمودار میله‌ای شکل ۴-۸ مقاومت‌های فشاری B200, B150, B100 در دمای محیط و دمای ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان داد. برای هر سه تیر با افزایش دما به اندازه ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به میزان ۴۶/۵ درصد افزایش مقاومت فشاری را نشان داد. باگذشت زمان و رسیدن به دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نمودار به میزان ۲۴/۱۶ درصد نسبت به دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است و این روند نزولی تا دمای ۷۰۰ درجه به میزان ۷۲/۳۵ درصد نسبت به دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه یافته است.



شکل ۴-۸. مقایسه مقاومت فشاری B200, B150, B100 در دمای ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

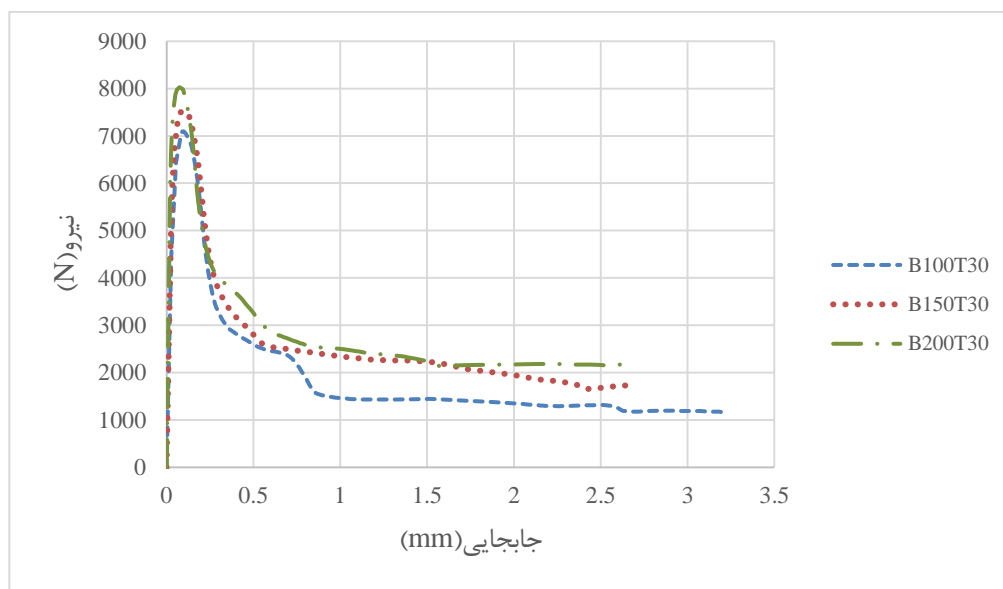
تجزیه و تحلیل فوق نشان داد که دمای بالا بر خواص مکانیکی UHPFRC تأثیر معنی داری دارد. اثر حرارت بر مقاومت خمشی بتن‌های فوق توانمند نشان داد که در دماهای بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به علت اینکه آب داخل بتن و همچنین آب داخل بافت ترکیبات بتن شروع به بخار شدن می‌کند و از آنجایی که برخی از حفرات و ریز کانال‌های بتن مسدود هستند و به بیرون راه ندارند بخار آب در درون آن‌ها حبس شده و با افزایش دما میزان بخار افزایش می‌یابد که موجب ایجاد فشار به دیواره‌های حفرات

می‌شود. این عامل ایجاد ریزترک را به همراه دارد و از آنجایی که بتن مقاومت چندانی در برابر کشش ندارد این ترک‌های کششی موجب افت مقاومت خمشی می‌شوند.

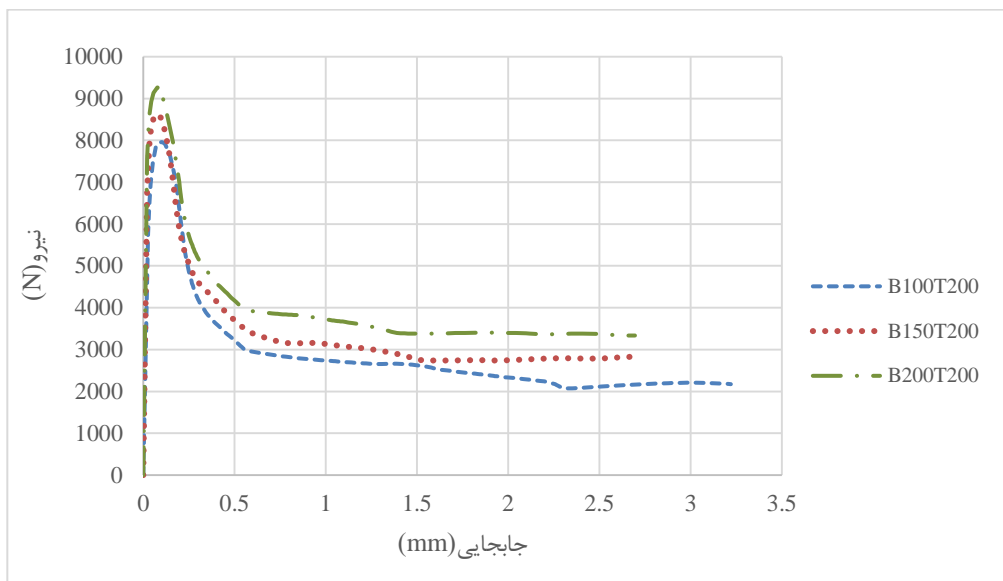
نتایج نشان داد افزایش مقاومت خمشی تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای بتن وجود دارد. هنگامی که دمای بتن کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است تبخیر آب مویرگی در بتن به وجود می‌آید. این فرآیند واکنش هیدراتاسیون سیمان و واکنش پوزولانی را تسریع می‌کند و محصول هیدراتاسیون (ژل C-S-H) را افزایش می‌دهد و اندازه منافذ را کاهش می‌دهد بنابراین مقاومت UHPFRC در این محدوده دما افزایش می‌یابد.

۴-۴- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تیرها با مقاومت فشاری‌های مختلف در دمای یکسان

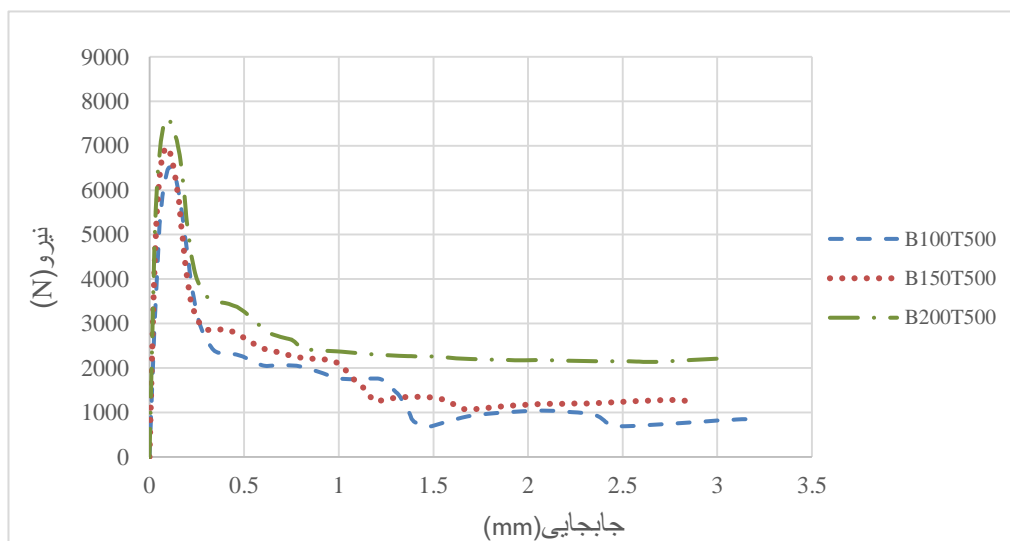
در ادامه به مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تیرها با مقاومت فشاری‌های مختلف در دمای یکسان پرداخته شده است. نمودارها نشان‌دهنده این است که هرچه مقاومت فشاری تیر بیشتر باشد در دمای یکسان، مقاومت خمشی تیر نیز افزایش می‌یابد.



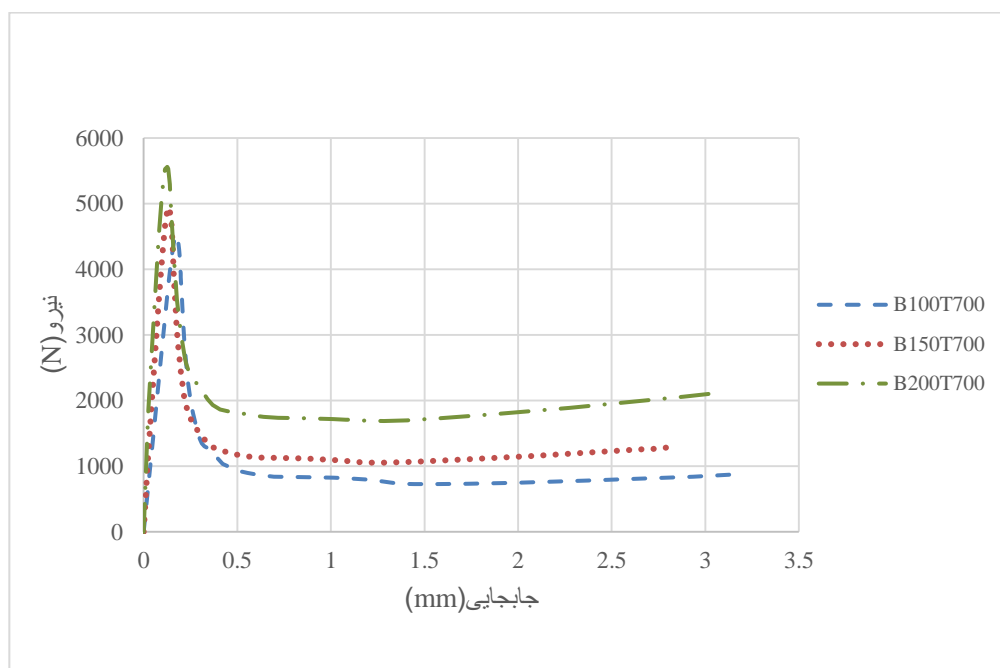
شکل ۴-۹. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ مگا پاسکال در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۴-۱۰. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ مگا پاسکال در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۴-۱۱. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ مگا پاسکال در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۴-۱۲. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ مگا پاسکال در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

شکل های ۴-۹ تا ۴-۱۲ نشان می دهد که مدل های با مقاومت زیادتر در دماهای بالاتر، رفتار بهتری به نسبت نمونه های با مقاومت پایین تر نشان می دهند. همچنین در نمونه های با مقاومت فشاری زیاد در دماهای بالاتر تغییر شکل انعطاف پذیر تر است.

۴-۵-انرژی شکست

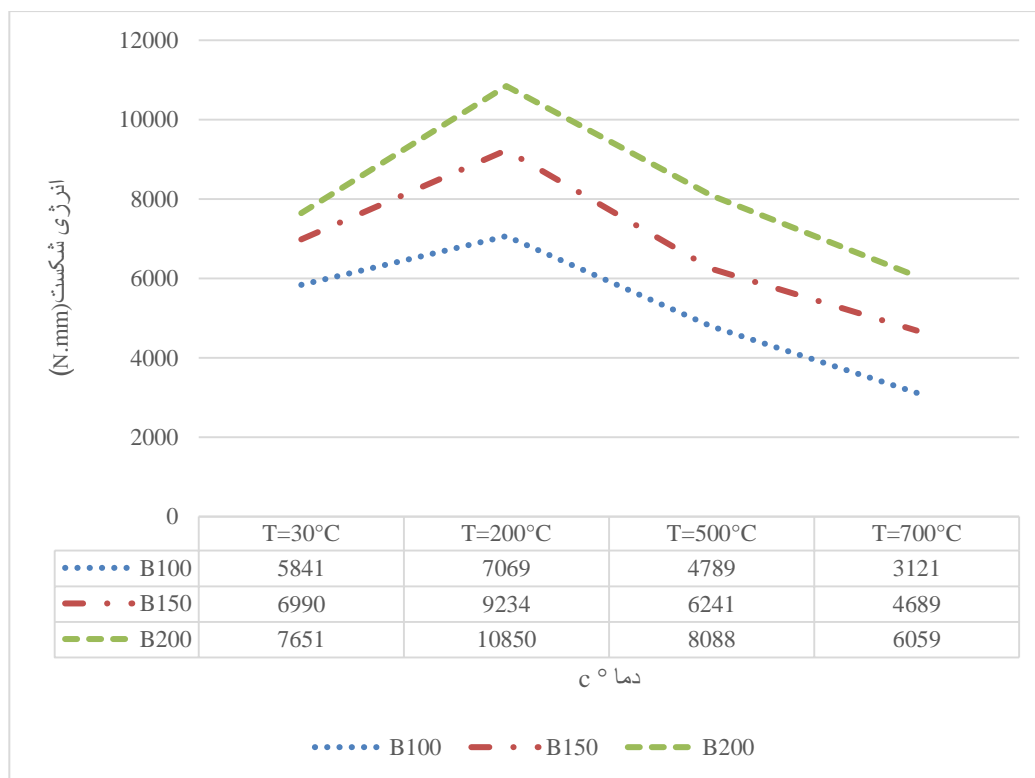
انرژی شکست بتن ، یکی از پارامترهای اساسی شکست و معرف مقاومت ترک خوردگی بتن است همچنین یکی از ویژگی های مهم بتن در ملاحظات طراحی سازه های بتنی است. مساحت زیر نمودار بار تغییر مکان به تفکیک برای تیرهای B100T30، B150T30 و B200T30 در دمای ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی گراد به عنوان انرژی شکست تعریف می شود. مقایسه شکل ۴-۱۳ حاکی از آن است که بتن فوق توانمند حاوی الیاف فولادی با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد قابلیت جذب انرژی بسیار بالایی دارد.

B100T30 با افزایش دما به اندازه ۲۰۰ درجه سانتی گراد به میزان ۲۱ درصد افزایش انرژی شکست را نشان داد. با گذشت زمان و رسیدن به دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد نمودار به میزان ۱۸ درصد نسبت به دمای محیط کاهش یافته است و این روند نزولی تا دمای ۷۰۰ درجه به میزان ۴۶/۵۶ درصد نسبت به دمای محیط ادامه یافته است.

B150T30 با افزایش دما به اندازه ۲۰۰ درجه سانتی گراد به میزان ۳۲/۱۰ درصد افزایش انرژی شکست را نشان داد. با گذشت زمان و رسیدن به دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد نمودار به میزان ۱۱ درصد نسبت به دمای محیط کاهش یافته است و این روند نزولی تا دمای ۷۰۰ درجه به میزان ۳۲/۹ درصد نسبت به دمای محیط ادامه یافته است.

B200T30 با افزایش دما به اندازه ۲۰۰ درجه سانتی گراد به میزان ۴۱/۸ درصد افزایش انرژی شکست را نشان داد. با گذشت زمان و رسیدن به دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد نمودار به میزان ۵/۷۰ درصد نسبت

به دمای محیط همچنان افزایش انرژی شکست را نشان داده است که احتمالاً به دلیل مقاومت فشاری بالای تیرمی باشد که قابلیت جذب انرژی همچنان تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه یافته است.



شکل ۴-۱۳. مقایسه انرژی شکست B100، B150 و B200 در دمای ۳۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

فصل ۵: جمع بندی و ارائه پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

بتن فوق توانمند حاوی الیاف فولاد، بتن نسبتاً جدیدی است که اخیراً در صنعت ساخت و ساز آغاز به کار کرده است. این تحقیق به منظور افزایش دانش در مورد تأثیر دمای بالا بر روی بتن فوق توانمند و بررسی خصوصیات مکانیکی آن انجام شده است.

سه تیر مشابه در دمای اتاق با مقاومت فشاری‌های مختلف ۱۰۰ و ۱۵۰، ۲۰۰ مگا پاسکال در چهار دمای مختلف ۳۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌های خمشی تحت خمش سه نقطه‌ای با ابعاد $۱۶۰ \times ۴۰ \times ۴۰$ میلی‌متر با الیاف ۲ درصد بودند.

۵-۲- جمع‌بندی نتایج

با توجه به نتایج و مشاهدات ارائه‌شده در این پایان‌نامه، می‌توان نتیجه‌گیری زیر راجع به اثر حرارت بالابر تیرهای UHPFRC را به دست آورد:

- با افزایش حرارت تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت خمشی تیر با مقاومت فشاری ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال به ترتیب به اندازه ۱۲/۱۸، ۱۴/۶ و ۱۵/۴۴ درصد افزایش یافت؛ در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نمودار روند نزولی خود را طی کرد و تا دمای ۷۰۰ درجه ادامه داد. نتایج نشان داد که بتن فوق توانمند با الیاف فولادی در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقدار مقاومت خمشی را دارند که این امر به علت کاهش ترک‌خوردگی در معرض حرارت بالا به دلیل وجود الیاف است.
- بعد از دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نمودار کاهش مقاومت خمشی را در پی داشت به طوری که در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت خمشی تیر با مقاومت فشاری ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال به ترتیب به اندازه ۸/۱۵، ۷/۵۷ و ۵ درصد نسبت به مقاومت خمشی در دمای محیط کاهش یافت. این کاهش تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز ادامه داشت و مقاومت

خمشی به ترتیب به میزان ۳۶/۲ ، ۳۴/۳۷ و ۳۰/۷۶ درصد نسبت به دمای محیط کاهش یافت. کاهش در مقاومت خمشی پس از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده تخریب شیمیایی و کمبود آب در بتن است که در این دما اتفاق می‌افتد.

- نتایج نشان داد افزایش مقاومت خمشی باقیمانده برای بازه ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای بتن وجود دارد. هنگامی که دمای بتن کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است تبخیر آب مویرگی در بتن به وجود می‌آید که این فرآیند واکنش هیدراتاسیون سیمان و واکنش پوزولانی را تسریع می‌کند. در نتیجه محصولات هیدراتاسیون (ژل C-S-H) را افزایش می‌دهد و اندازه منافذ را کاهش می‌دهد؛ بنابراین مقاومت UHPFRC در این محدوده دما افزایش می‌یابد. با افزایش دما، مقاومت فشاری و مدول الاستیک UHPC تقویت‌شده با الیاف فولادی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.
- مساحت زیر نمودار بار تغییر مکان به‌عنوان انرژی شکست تعریف می‌شود. نتایج نشان داد که بتن فوق‌توانمند حاوی الیاف فولادی با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قابلیت جذب انرژی بسیار بالایی دارد.

۳-۵-پیشنهادات

در ادامه تحقیقات پیشنهاد می‌شود یکی از اثرات زیر مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد:

- تاثیر درصد آرماتورهای مسلح‌کننده بر رفتار بتن فوق‌توانمند در حرارت بالا
- تحلیل ابعادی هندسه تیر بر رفتار فشاری و خمشی نمونه تحت حرارت بالا
- تاثیر نوع الیاف (فلزی، پلاستیکی و...) در رفتار بتن در حرارت بالا

مراج

- [1] Ahmad S., Rasul M., Kolawole Adekunle S., U. Al-Dulaijan S., Maslehuddin M., Ali S., (2019) "Mechanical properties of steel fiber-reinforced UHPC mixtures exposed to elevated temperature: Effects of exposure duration and fiber content.", *Composites Part B: Engineering*, 168: p 291-301.
- [2] Muttoni A. (2005) "Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete Structural Members", *Semsuis magazine of Concrete Research*.
- [3] Way R.T. and Wille K. (2015) "Effect of Heat-Induced Chemical Degradation on the Residual Mechanical Properties of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete.", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4): p 04015164.
- [4] رهباردار ح., قلعه نوی م. "ویژگی های بتن فوق توانمند و رفتار ترک خوردگی نمونه های کششی بتن مسلح" نشریه علمی پژوهشی مهندسی سازه و ساخت.
- [5] Bangi R., Horiguchi T. (2012), "Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures", *Cement and Concrete Research*, 42: p. 459-466.
- [6] Mehta P.k. (1986) , "Concrete: structure, properties, and materials", *prentice-hall inc.*, Englewood cliffs, (New Jersey).
- [7] Zheng W., Li H., Wang Y (2012), "Compressive stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures", *Construction and Building Materials*, 35: p. 931-940.
- [8] Naaman A. (1985) " Fiber Reinforcement for Concrete", *Concrete International*, 7(3): p. 21-25.
- [9] Tehrani F.M. (2008), "Performance of steel fiber-reinforced concrete in beam-column connections.", *Proquest, UMI Dissertation Publishing*. Los Angeles, CA.,
- [10] جبار خانی م., دهقانی اشکذری ق. (۱۳۹۳), "بررسی آزمایشگاهی خصوصیات حرارتی بتن فوق توانمند مسلح با الیاف فولادی" مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری های پدافند نوین, سال پنجم (شماره ۴), صفحه ۲۹۷-۳۰۵.
- [11] Bentz D.P. (2000), "Fibers, Percolation, and Spalling of High Performance Concrete", *ACI Materials J*, 97: p 351-359.
- [12] Chiang C.H. and Yang C. (2005), "Artificial Neural Networks in Prediction of Concrete Strength Reduction Due to High Temperature", *ACI Materials J*, 102: p. 93- 102.
- [13] Nassif A.Y., Burley E., Rigden S., (1995), "A New Quantitative Method of Assessing Fire Damage to Concrete Structures.", *Magazine of Concrete Research*, 47: p 271-278.
- [14] Kodur V.K.R. and Phan L., (2007), "Critical Factors Governing the Fire Performance of High Strength Concrete Systems.", *Fire Safety Journal*,. 42: p 482-488.

- [15] Yazıcı H., Yardımcı Mert Y., Huseyin Y. (2010), "Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag", *Cem. Concr. Compos.*, 32(8): p. 639-648
- [16] Bayard O., Ple O.(2003),"Fracture mechanics of reactive powder concrete: material modelling and experimental investigations.", *Eng. Fract. Mech*, 70(78): p. 839–51.
- [17] Heikal M., (2000),"Effect of Temperature on ThePhysico-Mechanical and Mineralogical Properties of HomraPozzolanic Cement Pastes.", *Cement & Concrete Research*, 30: p 1835-1839.
- [18] Xu Y., et al., (2001), "Impact of High Temperature on PFA Concrete.", *Cement and Concrete Research*, 31: p. 1065-1073.
- [19] Serrano R.,et al., (2016), "Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers.", *Construction and Building Materials*, 122: p 302-309.
- [20] Zheng W., Li H., Wang Y., Xie H., 2012," Tensile properties of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature. " *Advanced Materials Research*, **413**: p. 270-276.
- [21] Chan Y.N., Luo X. and Sun W., (2000),"Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800°C.", *Cement and Concrete Research* ,30(2): p 247-251.
- [22] Demirel B. and Keleştemur O., (2010),"Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume.", *Fire Safety Journal*, 45(6): p 385- 391.
- [23] Yang, H., et al., 2009 , "Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity". *Fire Safety Journal*, 44(1): p 121-130.
- [24] Corinaldesi V. and Moriconi G., (2012), "Mechanical and thermal evaluation of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes for engineering applications", *Construction and Building Materials*, 26(2): p 289-294.
- [25] Goran H.M., Zhenjun Y., and Aram M.T.H. (2013)," Experimental and numerical studies of size effects of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) beams.", *Construction and Building Materials*, 48: p 1027–1034.
- [26] Felicetti R., et al., (1996),"Residual Mechanical Properties of HighStrength Concrete Subjected to High-Temperature Cycles" *Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of HighStrength/High-performance Concrete*, Paris, France.
- [27] Giaccio G. and Zerbino R., (2005), "Mechanical behaviour of thermally damaged high-strength steel fibre reinforced concrete.", *Materials and Structures*, 38: p 335-342.
- [28] Husem M., (2006), "The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete.", *Fire Safety Journal of Materials in Civil Engineering*. 41: p 155-163.
- [29] Yermak N., et al., (2017),"Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties.", *Construction and Building Materials and Structures*, 132: p 240-250.

- [30] قلهکی م. ، پاچیده ق. ، رضایی فر ا.، "مطالعه آزمایشگاهی مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن در دماهای بالا" نشریه علمی پژوهشی مهندسی سازه و ساخت.
- [31] محمدی اصفهانی ح. ، سپهری ب.، (۱۳۹۳)، "مقدمه‌ای بر تحلیل اجزا محدود مسائل مهندسی به کمک نرم‌افزار آباکوس" جلد اول، چاپ اول، انتشارات سخن گستر ، مشهد.
- [32] عسکری زاده ن. محمدی زاده م. ، (۱۳۹۳) " تشریح پارامترها و نحوه بدست آوردن داده های ورودی در نرم افزار اجزا محدود آباکوس برای مدلسازی انواع سازه های بتن مسلح".
- [33] Solhmirzaei R. and Kodur V.K.R., (2017) "Modeling the response of ultra high performance fiber reinforced concrete beams.", *Procedia Engineering*, 210: p 211-219.
- [34] Singh M., et al., (2017), "Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams.", *Constr. Build. Mater.*, 138: p 12–25.
- [35] Yoo DY., Lee J H., and Yoon Y S., (2013), "Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites.", *Compos. Struct.*, 106: p 742–753.
- [36] Mahmud G.H., Yang Z., Hassan A.M.,(2013), " Experimental and numerical studies of size effects of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) beams", *Constr. Build. Mater.*, 48: p. 1027-1034.
- [37] ABAQUS,(2014),Version 6.14 documentation, Providence (RI): Dassault systems simulia corp.
- [38] Tysmans T., et al.,(2015)," Finite element modelling of the biaxial behaviour of high-performance fibre reinforced cement composites (HPRFRC) using Concrete Damaged Plasticity", *Finite Elem. Anal. Des.*, 100: p. 47-53.
- [39] Chen L., Graybeal B.A.,(2011)," Modeling structural performance of second-generation ultrahigh-performance concrete pi-girders", *J. Bridge Eng.*, 17: p. 634-643.
- [40] Speck K., (2007), "Concrete under multiaxial loading conditions—a constitutive model for short-time loading of high performance concretes".
- [41] ASTM C293, (2018), "Standard Test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)", West Conshohocken, PA: ASTM International

Abstract:

Concrete structures may experience different temperature conditions during their lifetime. However, it is very important to evaluate the behavior of these structures when exposed to high temperatures. Crushing concrete at high temperatures is the most important factor in reducing its fire resistance. Crushing is usually caused by high pressure in the pores and heat stress. Therefore, it is very important to study the effects of temperature on concrete, especially fiber-reinforced concrete, which is expected to have high strength. Exposure of concrete to high temperatures is one of the most severe conditions to which concrete may be exposed.

In this research, ABAQUS finite element software was used to model three concrete beams made of high strength concrete containing 100, 150 and 200 MPa compressive strengths. Then the effect of temperature on bending strength as well as fracture energy of concrete with 2% fibers at room temperature and temperatures of 200, 500 and 700°C was investigated. using three-point flexural loading on prism specimens of 40×40×160mm dimensions. The results showed that the flexural strength of the specimens had the highest value at 200°C and the lowest value at 700°C. On average, for all three specimens, the diagram showed an increase of bending strength by 15% at 200°C, but after time reached a temperature of 700°C, the diagram continued its downward trend, reaching 34% below the room temperature. This is due to the gradual progression of hydration and the pozzolanic reaction over longer periods at high temperatures. Increasing The concrete compressive strength led to higher resistance under higher temperatures and higher fracture energy.

Keywords: UHPFRC, Steel fibers, Flexural strength, High temperature, Finite element method



**Shahrood University of
Technology**

Faculty of Civil Engineering
M.Sc Thesis in Structural Engineering

Flexural Behavior of UHPFRC Beams Subjected to High Temperature

**By:
Ailin Monemi**

**Supervisor(s):
Dr. Ebrahim Zamani
Dr. Farshid Jandaghi Allaei**

January 2020