

## مطالعه آزمایشگاهی مشخصات مکانیکی بتن های حاوی الیاف های فولادی و پلی پروپیلن در دماهای بالا

مجید قلهکی<sup>۱\*</sup>، قاسم پاچیده<sup>۲</sup>، امید رضائی فر<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

استفاده از الیاف در بتن، باعث بهبود مقاومت، شکل پذیری و دوام بتن می شود. بتن دارای خواص ضد حریق بوده لکن بیشترین نگرانی از سازه های بتن آرمه در زمان آتش سوزی مربوط به میلگردهاست. لذا یکی از پیشنهادات به منظور کاهش خطرات فوق، استفاده از مصالح جایگزین نظیر الیاف است. در این مقاله به مطالعه ی آزمایشگاهی اثر دماهای مختلف بر روی مشخصات مکانیکی بتن های با عیار سیمان متفاوت حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن پرداخته شده است. اگرچه نمونه ها، تحت دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه ی سانتیگراد قرار گرفتند، اما نتایج نشان داد که اثرات آتش بر روی بتن های حاوی الیاف فولادی مخرب تر بوده و همچنین مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها در دمای ۲۵ درجه ی سانتیگراد و مقاومت کششی در دمای ۲۵۰ درجه ی سانتیگراد بیشترین مقادیر را به خود اختصاص می دهند. مقاومت فشاری و کششی بتن های حاوی الیاف فولادی، ۴۰٪ و ۵۰٪ بیشتر از بتن های حاوی الیاف پلی پروپیلن بود. اما مقاومت خمشی آن ها تقریباً با یکدیگر برابر بود. همچنین مقاومت خمشی نمونه های با عیار ۴۰۰ و عیار ۷۰۰ می توان نتیجه گرفت که نمونه های با عیار ۴۰۰ حدود ۱۰ الی ۴۰ درصد مقاومت بیشتری دارند.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، الیاف فولادی و پلی پروپیلن، دمای بالا، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی.

\*نویسنده مسئول: مجید قلهکی

پست الکترونیکی: mgholhaki@semnan.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.77392.1072

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.77392.1072>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۳

## ۱- مقدمه

در دهه ی ۱۹۴۰ مطالعاتی بر روی خواص مکانیکی بتن معمولی تحت حرارت انجام شد. نتایج این مطالعات که بر روی رفتار سیمان، ملات، نمونه های بتنی و اعضای بتن مسلح انجام شد، زیربنایی برای ضوابط و توصیه های بسیاری از آئین نامه ها جهت تعیین مقاومت بتن در حرارت بالا گردید. پس از گذشت ۴۰ سال مطالعات اثر حرارت بر روی رفتار بتن های با مقاومت بالا آغاز شد. این مطالعات نشان دادند که وقوع پوسته شدگی انفجاری در بتن با مقاومت بالا تحت افزایش حرارت به سرعت رخ می دهد. از طرفی با افزایش دما، مقاومت و مدول الاستیسیته در بتن های با مقاومت بالا به شدت کاهش می یابد [۱].

هرتز در سال های ۱۹۸۴ و ۱۹۹۱ با آزمایشاتی که انجام داد به بررسی اثر آتش بر روی بتن پرداخت [۲ و ۳]. وی دو سری آزمایش با مقادیر مختلف دما، اندازه ی نمونه ی استوانه ای و درصد الیاف فولادی به منظور کاهش خطر انفجار انجام داد. در سری اول آزمایشات، تعداد ۱۵ نمونه ی استوانه ای به ابعاد  $20 \times 10$  سانتی متر با مقدار میکروسلیس ۱۴ الی ۲۰ درصد مطابق روش آزمایش مقاومت پسماند بررسی شد.

دیدریکس و همکاران در سال ۱۹۸۸ با انجام آزمایش بر روی بتن با مقاومت بالا به بررسی اثر آتش بر بتن با مقاومت بالا پرداختند [۴]. آنها چهار نوع بتن را مورد ارزیابی قرار دادند. کاستیلو و دورانی در سال ۱۹۹۰ بر روی دو نوع بتن با مقاومت معمولی و مقاومت بالا، اثر افزایش دمای گذرا بر روی مقاومت و رفتار بار-جابجایی را مطالعه کردند [۵].

فلیستی و همکاران در سال ۱۹۹۶ با آزمایشاتی خواص بتن های با مقاومت بالا پس از قرارگیری در معرض آتش را بررسی کردند [۶]. روشی که در این مطالعه برای بررسی خواص بتن مورد ارزیابی قرار گرفت روش مقاومت پسماند بود. بتن های مورد آزمایش با سیلیکافوم ساخته و دارای مقاومت ۷۲ و ۹۵ مگاپاسکال بودند.

فان و کارینو در سال ۲۰۰۲ طی یک برنامه ی آزمایشگاهی به بررسی اثر دمای بالا بر روی خواص مکانیکی و قابلیت ایجاد پوسته شدگی در بتن با مقاومت بالا پرداختند [۷]. در این آزمایش خواص مکانیکی نمونه های بتنی استوانه ای با مقاومت بالا با افزایش حرارت تا ۶۰۰ درجه ی سانتی گراد بررسی شد.

هان و همکاران در سال ۲۰۰۴ پدیده ی پوسته شدگی در بتن های حاوی الیاف پلی پروپیلن را مورد ارزیابی قرار دادند. طرح اختلاطی که استفاده کردند حاوی ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی بتن از الیاف فولادی بود. با افزایش مقدار پلی پروپیلن در بتن، پوسته شدگی کاهش یافت [۸].

زیاری و بهنود در سال ۲۰۰۸ به بررسی مقاومت پسماند بتن با مقاومت بالا در برابر افزایش حرارت پرداختند [۹]. سهماران و همکاران در سال ۲۰۱۰ خواص مکانیکی و ریزساختار بتن مقاومت بالای آسیب دیده از افزایش حرارت را بررسی کردند [۱۰]. ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی بتن های GGBS حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن تحت دماهای بالا پرداختند. آن ها برای بتن هایی که در دماهای بالای ۸۰۰ درجه قرار می گیرند، مقاومتی را پیشنهاد دادند [۱۱].

چن و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی مقاومت فشاری بتن های حاوی الیاف فولادی با سنگدانه های مختلف تحت دماهای بالا پرداختند. ترکیبات الیاف فولادی به نسبت حجمی بتن عبارتند از ۰، ۵/۱۰، ۱ و ۱/۵ درصد. نتایج نشان داد که تا دمای ۲۵۰ درجه ۸۵٪ مقاومت بتن بدست آمده و تا دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه ۵۹٪ و ۳۱٪ از مقاومت بتن نسبت به حالتی که تحت دما قرار ندارد کاهش یافته است [۱۲].

جمران و همکاران در سال ۲۰۱۵ رفتار بتن های الیافی با الیاف های فولادی و پلی پروپیلن را تحت حرارت های بالا بررسی کردند. آن ها دو طرح اختلاط مختلف برای الیاف ها دادند، بطوری که این دو الیاف بطور همزمان در بتن با نسبت های ۱۰۰-۰ و ۷۵-۲۵ و ۵۰-۵۰ و ۲۷ و ۲۰۰ درجه ی سانتی گراد مورد بررسی قرار گرفت و نسبت های الیاف فولادی و پلی پروپیلن ۱۰۰-۰ و ۷۵-۲۵ مقاومت بهتری نسبت به دیگر حالات داشتند [۱۳].

دماهای بالا باعث ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی، عامل مخربی برای بتن هستند [۱۴ و ۱۵]. سرانو و همکاران در سال ۲۰۱۶ تحقیقاتی را در زمینه ی بتن های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن تحت آتش انجام دادند. آن ها تست فشار و کشش روی نمونه های

استوانه ای انجام دادند. آزمایش آتش روی این نمونه ها داخل کوره ی الکتریکی نبوده، بلکه در معرض مستقیم آتش بود. نتایج نشان داد که افزودن الیاف در بتن حدود ۱ الی ۲ درصد مقاومت را افزایش داده اما پس از رسیدن به مقاومت ماکزیمم، شکل پذیری آن ها کم می شود [۱۶].

الیاف فولادی بعلت رفتار غیرخطی که در بتن دارند، مقاومت کششی را افزایش داده و بعلت شکل پذیری بالا، از رشد ترک ها جلوگیری می کنند [۱۷-۲۱].

پرماک و همکاران در سال ۲۰۱۷ اثر دماهای بالا بر بتن های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن را بررسی کردند. نوع بتن مورد استفاده از نوع بتن های با مقاومت بالا (HSC) بوده و تحت چندین دمای مختلف آزمایشات انجام شد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش حرارت، رسانایی الکتریکی بتن کم شده و با سرد شدن تدریجی نمونه ها، این مقدار افزایش می یابد [۲۲].

با توجه به مطالعات انجام شده، در این مقاله خصوصیات مکانیکی دو نوع بتن با عیار سیمان ۴۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم در مترمکعب تحت دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه ی سانتی گراد بررسی می شود. بتن ها حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن با درصد حجمی ۰/۶ می باشند. علاوه بر مشخصات مکانیکی، نحوه ی رشد ترک ها در هر آزمایش بررسی گردید.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه تعداد ۱۲۰ عدد نمونه حاوی ۰/۶ درصد الیاف فولادی و پلی پروپیلن جهت تعیین مقاومت فشاری، کششی و خمشی ساخته و تحت دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه ی سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفتند.

### ۲-۱- مشخصات مصالح طرح اختلاط

جدول ۱ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت بتن های مورد آزمایش را نشان می دهد. همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف های فولادی و پلی پروپیلن در جدول ۲ آورده شده است.

الیاف فولادی بکار رفته در این پژوهش از شرکت صنایع مفتولی زنجان و همچنین روان کننده ی مورد استفاده از شرکت بتن شیمی خاتم تهیه شد. شکل ۱ تصویر الیاف و فوق روان کننده ی مصرفی در این مطالعه را نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات مصالح مصرفی در بتن

سیمان	شن	ماسه	آب	نوع روان کننده
تیپ ۲ (شاهرود)	ریزدانه (گوهر)	دوبار شور	آب شرب شهر تهران	فوق روان ساز کربوکسیلاتی (BC20)

جدول ۲: خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف های مصرفی

مقطع	طول (mm)	قطر (mm)	قطر/طول	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (GPa)
الیاف فولادی	دایره ۵۰	۰/۸	۶۲/۵۰	>۱۲۰۰	۷۸۵۰	۱۶۰
الیاف پلی پروپیلن	دایره ۳۶	بسیار ناچیز	-	۴۰۰	۹۱۰	۳/۵ - ۳/۹



ج- فوق روان کننده ی مصرفی



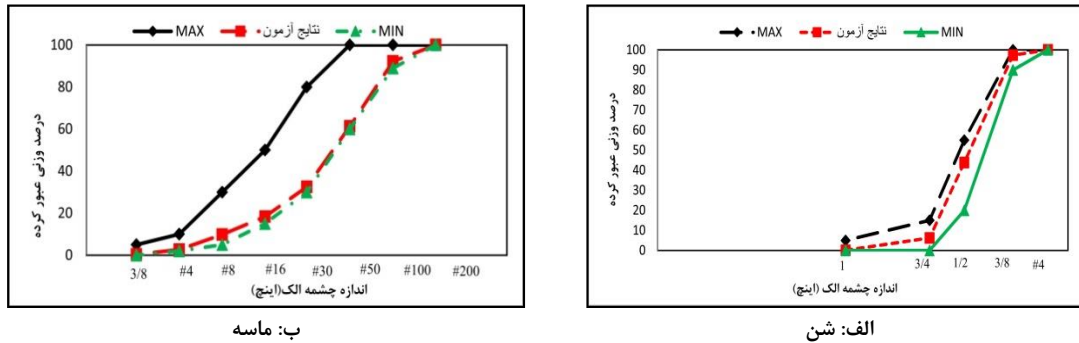
ب- الیاف پلی پروپیلن مصرفی



الف- الیاف فولادی مصرفی

شکل ۱: الیاف ها و فوق روان کننده ی مصرفی.

شن و ماسه ی مورد نیاز از معدن تیغاب پاکدشت فراهم شده که شکل ۲ مشخصات دانه بندی مصالح ریزدانه و درشت دانه مورد استفاده در بتن ها را نشان داده است.



شکل ۲: منحنی دانه بندی سنگدانه ها.

همانطور که مشاهده می شود دانه بندی مصالح از پیوستگی و یکنواختی مناسبی پیروی می کند.

## ۲-۲- طرح اختلاط بتن مصرفی

مطابق جدول ۳، نسبت آب به سیمان مورد استفاده در این پژوهش برابر با ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. همچنین از مجموع سنگدانه ها ( شن و ماسه)، ۵۵٪ شن و ۴۵٪ ماسه استفاده و نحوه ی اختلاط الیاف فولادی و پلی پروپیلن به نسبت حجمی کل بتن صورت گرفت. آزمایشات در آزمایشگاه های کوره الکتریکی و تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان صورت پذیرفت.

## ۲-۳- روش آزمایش

عمل آوری نمونه ها مطابق استاندارد ISIRI581 [۲۳] و بر روی بتن های ۲۸ روزه اعمال گردید. ابتدا به میزان مورد نظر (طرح اختلاط) مخلوط بتن به همراه الیاف و فوق روان کننده ساخته، سپس نمونه گیری بتن ها در نمونه های استوانه ای ۲۰\*۱۰ سانتیمتر و نمونه های مکعبی ۵۰\*۱۰\*۱۰ سانتیمتر به تعداد مجموعاً ۱۲۰ عدد (برای هر دما و هر تست، ۲ عدد نمونه ساخته شد) انجام شد. هر قالب، در سه مرحله بتن ریزی و در هر بار و بیبره گردید. پس از مدت ۲۴ ساعت قالب ها باز و داخل حوضچه ی آب (دمای ۲۵ درجه ی سانتی گراد) قرار داده و نمونه ها پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه ی آب، به خارج و سپس در کوره الکتریکی قرار داده شد.

پس از عمل آوری نمونه ها، دماهای انتخابی برای انجام آزمایش در کوره ی الکتریکی به ترتیب ۲۵ - ۱۰۰ - ۲۵۰ - ۵۰۰ - ۷۰۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. نرخ افزایش درجه حرارت تا رسیدن به دمای مورد نظر برابر ۵ درجه سانتیگراد بر هر دقیقه انتخاب گردید.

سپس نمونه ها به مدت یک ساعت، پس از رسیدن دمای داخلی کوره به دمای مورد نظر، بمنظور اینکه قسمت درونی بتن نیز به دمای مدنظر برسد و تمام نمونه هم دما شود، در دمای مطلوب قرار گرفتند. بعلت اینکه کاهش دمای نمونه ها به آرامی صورت پذیرد، کوره به مدت یک ساعت نیز در حالت خاموش قرار گرفته و سپس درب کوره باز شده و پس از چند دقیقه نمونه ها خارج شدند. این فرآیند، مانع از ایجاد شوک دمایی به نمونه ها می گردد.

پس از انجام عملیات حرارتی، کلیه نمونه ها در زیر جک، تحت آزمایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی قرار گرفتند. سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بر طبق استاندارد EN-12390-13 [۲۴] انتخاب گردید.

در شکل ۳، تصاویر برخی از نمونه ها پس از انجام عملیات حرارتی نشان داده شده است. (کلمه ی SF نمایانگر الیاف فولادی و حرف PPF نمایانگر الیاف پلی پروپیلن بوده و اعداد ۴۰۰ و ۷۰۰ نشان دهنده ی عیار بتن مصرفی هستند).

جدول ۳: طرح اختلاط بتن مصرفی در آزمایشات

مصالح	شن (kg)	ماسه (kg)	سیمان (kg)	آب (kg)	سیمان/آب	الیاف فولادی (%)	فوق روان کننده برای الیاف های فولادی (%)	الیاف پلی پروپیلن (%)	فوق روان کننده برای الیاف های پلی پروپیلن (%)
بتن با عیار ۴۰۰	۱۰۰۰	۸۵۰	۴۰۰	۱۸۰	۰/۴۵	۰/۶	۰/۵	۰/۶	۰/۳۳
بتن با عیار ۷۰۰	۸۰۰	۶۵۰	۷۰۰	۳۲۰					



ب: پوسته شدن نمونه در دمای بالا



الف: تغییر شکل ظاهری سطح مقطع نمونه ی PPF در دمای بالا

شکل ۳: تغییر شکل ظاهری و پوسته شدن نمونه ها.

تا دمای ۲۵۰ درجه ی سانتی گراد تغییری در شکل ظاهری نمونه ها مشاهده نشد. لکن با افزایش دما به ۵۰۰ درجه ی سانتیگراد همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود پدیده پوسته شدگی و تغییر سطح مقطع نمونه از مربع به حالت قوس زدگی رخ داد. علاوه بر این در دماهای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه، نمونه های بتن حاوی SF به دلیل افزایش حجم الیاف فولادی، دچار خردشدگی و شکست کامل نمونه گردیدند (شکل ۴).



شکل ۴: خرد شدن نمونه SF در دمای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه ی سانتیگراد.

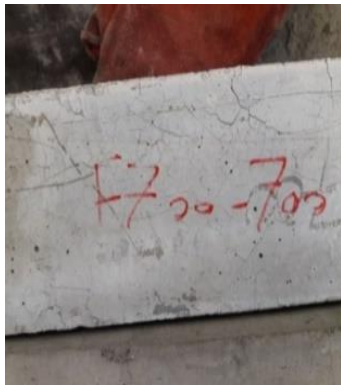
پس از اعمال حرارت های بالا، در نمونه های حاوی SF عمدتاً ترک های سطحی بر روی نمونه ها مشاهده شد. در حالی که در نمونه های حاوی PPF ترک های سطحی به همراه پوسته شدگی مشاهده گردید. به بیان دیگر، پس از انجام عملیات حرارتی، شکل ظاهری نمونه های حاوی SF همچنان صیقلی بوده و فقط ترک های جزئی در سطح و بدنه ی آن ایجاد، اما در نمونه های حاوی PPF علاوه بر ایجاد ترک، کلیه سطوح از حالت صیقلی خارج شده و سطح دچار زبری گردید (شکل ۵).



ب- ایجاد ترک های سطحی نمونه ی SF400 در دمای ۵۰۰ درجه



الف- ایجاد ترک های سطحی نمونه ی PPF700 در دمای ۷۰۰ درجه



د- ایجاد ترک های سطحی نمونه ی منشوری SF700 در دمای ۷۰۰ درجه



ج- ایجاد ترک های سطحی نمونه ی PPF400 در دمای ۷۰۰ درجه

شکل ۵: ایجاد ترک پس از خارج شدن نمونه ها از کوره.

### ۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه ها

پس از گذشت ۴۸ تا ۷۲ ساعت از پایان عملیات حرارتی، مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه ها اندازه گیری شد.

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های استوانه ای توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه، در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود گسترش ترک بصورت کمربند افقی یا قائم صورت پذیرفت.



(ب)

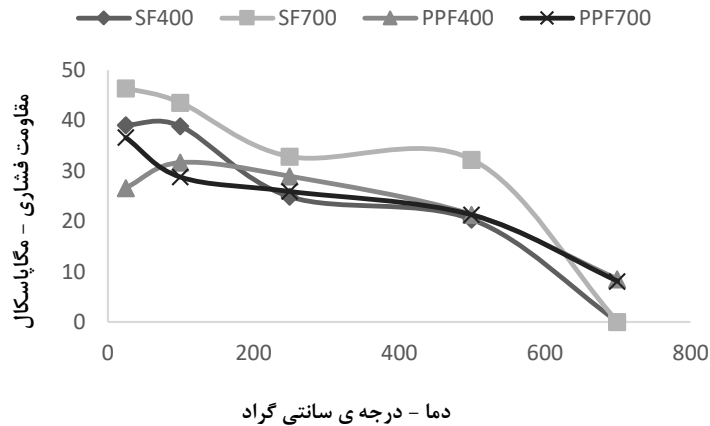


(الف)

شکل ۶: آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها. الف: نحوه ی قرارگیری نمونه در زیر جک، ب: رشد ترک در نمونه ها پس از انجام آزمایش.

شکل ۷ مقاومت فشاری نمونه های مختلف تحت دماهای متفاوت را نشان می دهد. آنچه مشخص است، با افزایش دمای آتش، مقاومت فشاری کاهش یافته و در دمای ۷۰۰ درجه ی سانتیگراد، بتن الیافی مقاومت خود را از دست می دهد. نتایج نشان می دهد که افزایش عیار سیمان، در دو حالت ۴۰۰ و ۷۰۰، باعث افزایش مقاومت نمونه ها می شود.

در حالت کلی افزودن الیاف فولادی، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به الیاف پلی پروپیلن ایجاد می کند.



شکل ۷: مقاومت فشاری بر حسب افزایش دما.

### ۳-۲- مقاومت کششی

نحوه ی انجام آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه های استوانه ای در شکل ۸-الف نشان داده شده است. جک هیدرولیک مورد استفاده، دارای ظرفیت ۳۰۰۰ کیلو نیوتن بوده و با سرعت ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بار را اعمال می کند. مقاومت کششی به روش تست برزلی انجام گرفت. با توجه به شکل ۸-ب ترک ها در وسط سطح مقطع نمونه ها ایجاد شده و در هر دو نوع بتن حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن در کنار دیواره ی سطح مقطع، ترک ها بصورت شاخه ای رشد یافت. بنابراین به لحاظ مقدار عرض ترک ها و شکل ظاهری آن، تفاوت چندانی بین نمونه ها مشاهده نمی شود.



(ب)

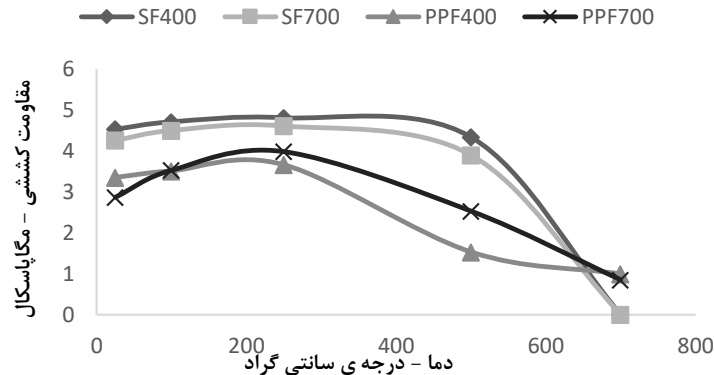


(الف)

شکل ۸: آزمایش مقاومت کششی نمونه ها. الف: نحوه ی قرارگیری نمونه در زیر جک، ب: رشد ترک در نمونه ها پس از انجام آزمایش.

شکل ۹، مقاومت کششی نمونه ها با توجه به تغییرات دما را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، مقاومت کششی نمونه های حاوی SF بیشتر از نمونه های حاوی PPF است. در نمونه های SF400 مقاومت کششی بیشتر از نمونه های SF700 بوده، اما در نمونه

های PPF700 مقاومت کششی بیشتر از نمونه های PPF400 است. بنابر این با افزایش مقدار سیمان در بتن های با الیاف فولادی از مقاومت کششی کاسته شده، در حالی که در بتن های با الیاف پلی پروپیلن به مقاومت کششی اضافه گردیده است. همچنین با توجه به روند نمودارها، مقاومت کلیه ی نمونه ها در دمای حدود ۶۵۰ درجه ی سانتی گراد با یکدیگر برابر شده است.



شکل ۹: مقاومت کششی بر حسب افزایش دما.

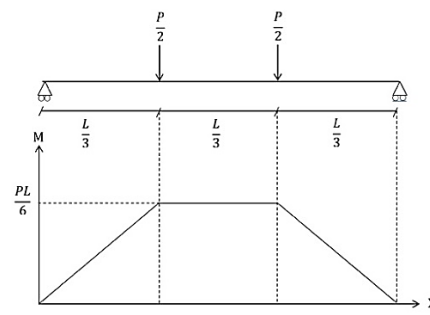
### ۳-۳- مقاومت خمشی

برای انجام آزمایش مقاومت خمشی، از تست چهار نقطه ای استفاده شد. نحوه ی انجام آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

شکل ۱۱ نحوه ی شکست نمونه ها را در زیر جک مقاومت خمشی نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود نمونه های حاوی PPF بصورت ترد ترک خورده و شکل پذیری کمی دارد. اما در نمونه های حاوی SF عرض ترک ها بیشتر بوده و شکل پذیری زیادی از خود نشان داده است. عرض ترک ها در نمونه های حاوی SF تقریباً بیش از ۱۰ برابر عرض ترک در نمونه های حاوی PPF می باشد. همچنین کلیه ی ترک ها در نمونه ها در یک سوم میانی که بارگذاری انجام شده است، رخ داده است.



(ب)



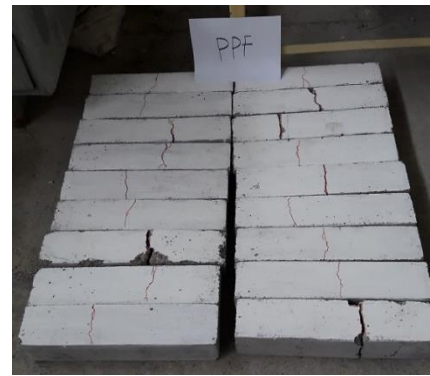
(الف)

شکل ۱۰: نحوه ی انجام آزمایش خمش بر روی نمونه ها. الف: بارگذاری در یک سوم میانی تیر، ب: نمای کلی جک بارگذاری.





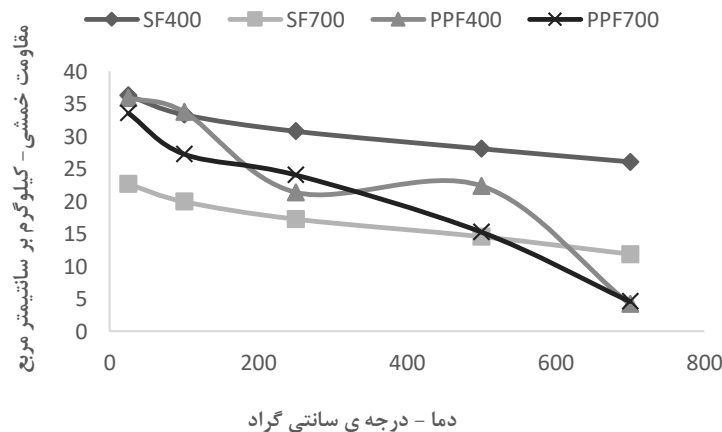
(ب)



(الف)

شکل ۱۱: نحوه ی شکست نمونه ها در آزمایش خمش. الف: PPF، ب: SF.

با توجه به شکل ۱۲ که روند تغییرات مقاومت خمشی نمونه ها به ازای دماهای مختلف را نشان می دهد، می توان بیان کرد که بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه های SF400 بوده که روند تغییرات مقاومت خمشی در این نمونه تقریباً بصورت خطی کاهش یافته است. همچنین در نمونه های SF700 نیز روند تغییرات مقاومت خمشی مشابه نمونه های SF400 بوده با این تفاوت که حدوداً در همه ی دماها به میزان ۲۰ کیلوگرم متر مقاومت کمتری دارند. در دمای ۲۵ درجه ی سانتی گراد، بجز نمونه های SF700، مابقی نمونه ها مقاومت تقریباً برابری از خود نشان داده اند. در بتن های PPF400 روند تغییرات نامنظم می باشد. اما در بتن های PPF700 بطور کلی با افزایش دما با شیب ملایمی، از مقاومت نمونه ها کاسته شده است. همچنین در دمای ۷۰۰ درجه ی سانتی گراد مقاومت نمونه های PPF400 و PPF700 با یکدیگر برابر شده است.



شکل ۱۲: مقاومت خمشی بر حسب افزایش دما.

### ۳-۴- بررسی و تفسیر نتایج آزمایشات

نتایج کلی حاصل از انجام آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی نمونه ها، در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به نتایج، بیشترین مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه ها به ترتیب در دماهای ۲۵، ۲۵۰ و ۲۵۰ درجه می باشد. لذا می توان نتیجه گرفت که در بتن های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن تا دمای ۲۵۰ درجه ی سانتی گراد، به مقاومت بتن افزوده و از این دما به بعد از مقاومت بتن کاسته می شود.

با توجه به اینکه فولاد در دمای بالا دچار انبساط حجمی می شود، لذا نمونه های استوانه ای حاوی SF400 و SF700 پس از رسیدن دمای داخلی کوره به ۷۰۰ درجه ی سانتی گراد، کاملاً خرد شده و قابلیت انجام آزمایش های مقاومت فشاری و کششی را نداشتند. از بین

مقاومت های فشاری، کششی و خمشی، بیشترین مقاومت به ترتیب مربوط به نمونه های SF700، SF400 و SF400 می باشد. لذا می توان نتیجه گرفت که الیاف فولادی عملکرد به مراتب بهتری نسبت به الیاف پلی پروپیلن دارند. ضعف عمده ی الیاف فولادی، عملکرد نامطلوب در برابر حرارت های بالا می باشد. تغییرات ابعاد، وزن و مدول الاستیسیته ی نمونه ها بر اثر حرارت در جدول ۵ و ۶ نمایش داده شده است. W، H، D، E به ترتیب درصد تغییر وزن، ارتفاع، قطر (طول ضلع) و مدول الاستیسیته ی نمونه ها نسبت به نمونه ی مرجع در دمای ۲۵ درجه می باشد. همچنین C و B به ترتیب نشان دهنده ی نمونه های استوانه ای و منشوری است.

جدول ۴: مقاومت فشاری و کششی (مگاپاسکال) و خمشی (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) نمونه ها

دما	۲۵	۱۰۰	۲۵۰	۵۰۰	۷۰۰	دمایی که بیشترین مقاومت را دارد.
مقاومت فشاری	SF400	۳۹/۱۱	۳۸/۸۴	۲۴/۸۳	۲۰/۳۱	انهدام کامل در کوره
	SF700	۴۶/۳۷	۴۳/۴۸	۳۲/۷۷	۳۲/۲۰	انهدام کامل در کوره
	PPF400	۲۶/۵۹	۳۱/۶۲	۲۸/۹۰	۲۱/۲۹	۸/۴۶
	PPF700	۲۶/۵۹	۲۸/۷۴	۲۵/۸۸	۲۱/۲۲	۸/۰۴
مقاومت کششی	SF400	۴/۵۲۱	۴/۷۰	۴/۸۰	۴/۳۳	انهدام کامل در کوره
	SF700	۴/۲۵	۴/۴۹	۴/۵۹	۳/۸۹	انهدام کامل در کوره
	PPF400	۳/۳۴	۳/۵۰	۳/۶۵	۱/۵۲	۰/۹۸۷
	PPF700	۲/۸۶	۳/۵۲	۳/۹۸	۲/۵۳	۰/۸۴۴
مقاومت خمشی	SF400	۳۶/۳	۳۳/۳۵	۳۰/۷۸	۲۸/۰۷	۲۶/۰۵
	SF700	۲۲/۶۷	۱۹/۹۷	۱۷/۲۷	۱۴/۵۷	۱۱/۸۷
	PPF400	۳۵/۸۹	۳۳/۷۵	۲۱/۴۰	۲۲/۳۹	۴/۲
	PPF700	۳۳/۶	۲۷/۳	۲۴/۱۰	۱۵/۳	۴/۶۰

جدول ۵: تغییرات وزنی و مدول الاستیسیته ی نمونه ها پس از عملیات حرارتی به درصد

مشخصات اولیه	۲۵		۱۰۰		۲۵۰		۵۰۰		۷۰۰		دما (سانتیگراد)
	مشخصات اولیه		مشخصات اولیه		مشخصات اولیه		مشخصات اولیه		مشخصات اولیه		
	E	W	E	W	E	W	E	W	E	W	
SF400-C	۳/۹۷	۰/۴	-۱/۶	-۶/۱	-۷/۸	-۶/۱	-۵/۹	-۸/۳	-۶/۱	-۷/۸	انهدام
SF700-C	۴/۰۳	۰/۱	-۲/۵	-۰/۷	-۸/۳	-۰/۷	-۵/۹	-۸/۳	-۵/۹	-۸/۳	انهدام
PPF400-C	۳/۹۲	۰/۱	-۱/۷	+۳۲/۱	-۴/۳	+۳۲/۱	+۲۲/۲	-۸/۱	+۹/۹	-۸/۱	انهدام
PPF700-C	۳/۷۹	۰/۱	-۰/۸	-۸/۴	-۴/۸	-۸/۴	-۱۷/۲	-۸/۵	-۰/۸	-۸/۵	انهدام
SF400-B	۱۱/۳۵	-	-۳/۹	-	-۴/۵	-	-	-۶/۹	-	-۶/۹	-
SF700-B	۱۱/۵۸	-	-۴/۱	-	-۵/۲	-	-	-۷/۴	-	-۷/۴	-
PPF400-B	۱۱/۱۹	-	-۷/۸	-	-۷/۴	-	-	-۵/۶	-	-۵/۶	-
PPF700-B	۱۱/۰۱	-	-۳/۰	-	-۱۰/۳	-	-	-۱۰/۶	-	-۱۰/۶	-

جدول ۶: تغییرات ابعادی نمونه ها پس از عملیات حرارتی به درصد

مشخصات اولیه	۲۵		۱۰۰		۲۵۰		۵۰۰		۷۰۰		دما (سانتیگراد)
	مشخصات اولیه		مشخصات اولیه		مشخصات اولیه		مشخصات اولیه		مشخصات اولیه		
	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	
SF400-C	۲۰	۱۰	+۰/۳	+۰/۱	-۰/۳	+۰/۱	+۰/۹	-۰/۳	انهدام	انهدام	انهدام
SF700-C	۲۰	۱۰	-۰/۱	-۰/۴	-۰/۱	-۰/۴	-۰/۴	-۰/۱	انهدام	انهدام	انهدام
PPF400-C	۲۰	۱۰	-۰/۸	-۰/۲	+۱/۰	+۰/۳	-۰/۷	-۱/۱	+۰/۳	+۰/۶	انهدام
PPF700-C	۲۰	۱۰	+۰/۸	+۰/۶	-۰/۸	+۰/۶	+۱/۵	+۰/۷	+۱/۵	+۰/۷	انهدام
SF400-B	۵۰	۱۰	۰	۰	-۰/۵	+۰/۲	-۰/۴	-۰/۴	۰	۰	۰
SF700-B	۵۰	۱۰	۰	۰	-۰/۴	+۰/۱	+۰/۷	-۰/۴	+۰/۲	+۰/۴	۰
PPF400-B	۵۰	۱۰	۰	۰	-۰/۳	۰	۰	+۰/۳	+۱/۴	+۱/۱	۰
PPF700-B	۵۰	۱۰	۰	۰	-۰/۲	+۰/۳	+۰/۲	+۰/۱	+۰/۱	+۱/۴	۰

جدول ۷: معادلات پیشنهادی جهت پیش بینی مقاومت نمونه ها بر حسب دما و نوع الیاف

نوع آزمایش	نمونه	تابع رگرسیون	ضریب رگرسیون ( $R^2$ )
کششی	SF400	$Y = -2E-05X^2 + 0.0115X + 3.9499$	0.9504
	SF700	$Y = -2E-05X^2 + 0.0103X + 3.7852$	0.9695
	PPF400	$Y = -5E-06X^2 - 0.0004X + 3.5584$	0.8943
	PPF700	$Y = -1E-05X^2 + 0.0073X + 2.8417$	0.9691
فشاری	SF400	$Y = -3E-05X^2 - 0.0311X + 39.886$	0.9475
	SF700	$Y = -1E-04X^2 + 0.0105X + 43.524$	0.9038
	PPF400	$Y = -8E-05X^2 + 0.0286X + 27.359$	0.9777
	PPF700	$Y = -2E-05X^2 - 0.0238X + 34.375$	0.9319
خمشی	SF400	$Y = 3E-05X^2 - 0.0427X + 60.645$	0.9843
	SF700	$Y = 2E-05X^2 - 0.0392X + 37.898$	0.985
	PPF400	$Y = -3E-05X^2 - 0.046X + 59.099$	0.8818
	PPF700	$Y = -3E-05X^2 - 0.04X + 53.67$	0.9702

با توجه به نتایج آزمایشات بدست آمده، می توان با برازش منحنی های درجه ۲، به پیش بینی مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه ها با توجه به نوع نمونه و دمای مربوطه پرداخت. جدول ۷ معادلات پیشنهادی و ضریب رگرسیون معادلات را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، ضریب رگرسیون تمامی معادلات نزدیک به ۱ بوده، لذا معادلات پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردارند. در این معادلات  $Y$ ، مقاومت فشاری، کششی یا خمشی نمونه ها و  $X$  پارامتر مربوط به دما بر حسب درجه ی سانتیگراد می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، تعداد ۱۲۰ عدد نمونه ی بتن الیافی در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه ی سانتی گراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و آزمایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی آنها انجام شد. نمونه های بتن ساخته شده حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن با درصد حجمی ۰/۶ درصد و در قالب دو عیار سیمان ۴۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم در مترمکعب بوده و نتایج زیر بدست آمد:

بطور کلی در همه ی طرح ها، بیشترین مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها در دمای ۲۵ درجه ی سانتی گراد و بیشترین مقاومت کششی در دمای ۲۵۰ درجه ی سانتی گراد حاصل شد.

در نمونه های استوانه ای، کاهش یا افزایش مقاومت کششی و فشاری تا دمای ۲۵۰ درجه با شیب ملایمی صورت پذیرفت. اما پس از این دما این روند با شیب تندتری ادامه یافته، بطوری که پس از دمای ۵۰۰ درجه ی سانتی گراد تقریباً ۳ برابر از مقاومت بتن کاسته شد. با توجه به نتایج آزمایشات می توان پیش بینی نمود که در دمای ۸۰۰ درجه کلیه ی نمونه ها (طبق طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش) منهدم خواهند شد.

مقاومت فشاری و کششی بتن های حاوی الیاف فولادی، ۴۰٪ و ۵۰٪ بیشتر از مقاومت فشاری و کششی بتن های حاوی الیاف پلی پروپیلن بود. اما مقاومت خمشی آن ها تقریباً با یکدیگر برابر بود. در مقایسه ی مقاومت خمشی نمونه های با عیار ۴۰۰ و عیار ۷۰۰ می توان نتیجه گرفت که نمونه های با عیار ۴۰۰ حدود ۱۰ الی ۴۰ درصد مقاومت بیشتری دارند.

با توجه به اینکه اگر عیار بتن از حدی بیشتر باشد از مقاومت بتن کاسته می شود (بعلت کاهش میزان سنگدانه ها و افزایش مقدار سیمان)، بنابراین نمونه های بتن با عیار ۷۰۰ کیلوگرم سیمان، مقاومت کششی و فشاری کمتری نسبت به نمونه های با عیار ۴۰۰ داشتند، تنها مورد استثناء در بتن عیار ۷۰۰ حاوی الیاف فولادی است که مقاومت فشاری به مراتب بیشتری نسبت به بتن با عیار ۴۰۰ حاوی الیاف فولادی دارد.

نمونه های حاوی الیاف های فولادی با عیار ۴۰۰ و ۷۰۰ استوانه ای در دمای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه بعلت انبساط زیاد الیاف فولادی، در کوره منهدم و قابلیت انجام تست فشار و کشش بر روی آن ها به وجود نیامد.

حرارت و آتش، بر مشخصات ظاهری و مدول الاستیسیته ی بتن تأثیرگذار بود به گونه ای که وزن، مدول الاستیسیته و ابعاد نمونه ها به ترتیب ۱ تا ۱۱ درصد، ۱ تا ۶۰ درصد و ۰/۱ تا ۱/۵ درصد تغییر نمود. هر چه دما افزایش یابد کاهش وزن و کاهش ابعاد نمونه ها بیشتر شده و بجز برای نمونه های PPF400 مدول الاستیسیته نیز کاهش یافت.

## مراجع

- [1] Metin, H. (2006) "The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high performance concrete" *Fire Safety Journal*, Volume 41, issue2, March 2006, pages 155-163.
- [2] Hertz, K. (1984) "Heat Induced Explosion of Dense Concretes" Report No. 166, *Institute of Building Design, Technical University of Denmark*.
- [3] Hertz, K. (1991). "Danish Investigations on Silica Fume Concretes at Elevated Temperatures" *Proceedings, ACI Spring Convention, Beton, MA*. Volume88, number4, pages 345-347.
- [4] Diederichs, U., Jumppanen, U.M. and Penttala, V. (1988) "Material Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures" *IABSE 13th Congress, Helsinki*.
- [5] Castillo, c., and Durrani, A. J. (1990) "Effect of transient high temperature on high-strength concrete" *ACI Material Journal*, Volume87, pp47-53.
- [6] Felicetti, R., Gambarova, P.G., Rosati, G.P., Corsi, F., and Giannuzzi, G. (1996) "Residual Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High-Temperature Cycles" *Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-performance Concrete*, Paris, France.
- [7] Phan, L.T., and Carino, N.J. (2002) "Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures," *ACI Materials Journal*, Volume99 (1), pp 54-66.
- [8] Cheon-Goo Han, Yin-Seong Hwang, Seong-Hwan Yang, N. Gowripalan (2004) "Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement," *Cement and Concrete Research*, Volume 35, issue9, pages 1747-1753.
- [9] Behnood, A., and Ziari, H. (2008) "Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures," *Cement & Concrete Composites*, Volume30, pages 106-112.
- [10] Sahmaran, M., Lachemi, M., and Li, V.C. (2010) "Assessing Mechanical Properties and Microstructure of Fire-Damaged Engineered Cementitious Composites," *ACI Materials Journal*, Volume107, pages 297-304.
- [11] Gao, Danying. Yan, Dongming. Li, Xiangyu. (2012) "Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures", *Fire Safety Journal*, Volume54, November 2012, pages 67-73.
- [12] Chen, G.M. He, Y.H. Yang, H. Chen, J.F. Guo, Y.C. (2014) "Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures", *Construction and Building Materials*. Volume71, 30 November 2014, pages 1-15.
- [13] Jameran, A. Ibrahim, I. Yazan, Siti Hamizah S. Rahim, Siti Nor A (2015) "Mechanical properties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature", *Procedia Engineering*, Volume125, pages 818-824.
- [14] M. Heikal. (2000) "Effect of Temperature on The Physico-Mechanical and Mineralogical Properties of Homra Pozzolanic Cement Pastes". *Cement & Concrete Research*. Volume30, pages 1835-1839.
- [15] Y. Xu, Y.L. Wong, C.S. Poon & M. Anson. (2001) "Impact of High Temperature on PFA Concrete". *Cement and Concrete Research*. 31, pages 1065-1073.
- [16] Serrano, Ruben. Cobo, Alfonso. Prieto, Maria Isabel. Gonzalez, Maria de las Nieves. (2016) "Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers". *Construction and Building Materials*. Volume122, pages 302-309.
- [17] AENOR, UNE-EN 14889-1:2008, (2008). Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad, AEN/CTN 83, Hormigón, España.
- [18] B. Haselwander, W. Jonas, H. Riech, (1995). Material equations for steel fibre reinforced concrete members, *Nucl. Eng. Des*. Volume 156, issue 1-2, pages 235-248.
- [19] J. Tailhan, P. Rossi, D. Daviau-Desnoyers, (2015). "Probabilistic numerical modelling of cracking in steel fibre reinforced concretes (SFRC)" structures, *Cem. Concr. Compos*. Volume 55, pages 315-321.
- [20] D.L. Nguyen, G.S. Ryu, K.T. Koh, D.J. Kim, . (2014). Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, *Compos*, Volume 58, pages 279-292.
- [21] A. Abrishambaf, J.A. Barros, V.M.C.F. Cunha, (2015). Tensile stress-crack width law for steel fiber reinforced self-compacting concrete obtained from indirect (splitting) tensile tests, *Cem. Concr. Compos*. Volume 57, pages 153-165.

- [22] Yermak, N. Pliya, P. Beaucour, A-L. Simon, A. Noumowe, A. (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, Volume 132, pages 240-250.
- [23] INSO581, (2015). concrete-making curing concrete test specimens in the laboratory- code of practice, 2nd.revision.
- [24] NF EN 12390-13 AFNOR, (2013). Testing hardened concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, pages 18-455.