

بررسی آزمایشگاهی تاثیر ترکیب های نسبت های سرباره و ژئولیت بر مقاومت فشاری پیش ماده ملات ژئوپلیمری با غلظت های متفاوت هیدروکسید سدیم



محمد کاظم شریبتدار
استاد دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه سمنان عضو
حقیقی انجمن بتن ایران



سینا پارکی
کارشناس ارشد سازه
دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه سمنان

چکیده

طبق تحقیقات محققین، هر ساله روند تقاضای جهانی برای سیمان پرتلند معمولی افزایش می یابد و در چرخه ی تولید سیمان پرتلند معمولی، به ازای تولید هر ۱ تن سیمان حدود ۱ تن دی اکسید کربن تولید می شود. تغییرات اقلیمی ناشی از پدیده ی گرمایش جهانی به یکی از جدی ترین نگرانی های محیط زیست در سراسر جهان تبدیل شده است. علت اصلی پدیده ی گرمایش جهانی، انتشار گازهای گلخانه ای است که در میان گازهای گلخانه ای دی اکسید کربن با میزان انتشار ۶۵٪ بیشترین نقش را در پدیده ی گرمایش جهانی را دارا است. به همین علت، باید به دنبال مصالح جایگزین برای سیمان پرتلند معمولی بود که هم از مقاومت کافی برخوردار باشد و هم مفهوم توسعه پایدار و حفظ محیط زیست را در نظر بگیرد. با توجه به بالا بودن حجم تولید سرباره و فراوانی معادن ژئولیت در کشور، در این مقاله نتایج تحقیق آزمایشگاهی ترکیب این دو به عنوان پیش ماده اصلی ملات ژئوپلیمری ارائه شده است که با توجه به گران بودن سرباره نسبت به ژئولیت و فراوانی معادن ژئولیت در کشور بتوان در کنار رسیدن به یک طرح اختلاط اقتصادی بهینه، از نظر مقاومت فشاری ملات هم به یک حد قابل قبولی به منظور استفاده در پروژه ها رسید. در این تحقیق از دو طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری با غلظت هیدروکسید سدیم ۱۲ و ۱۸ مولار، نسبت ماسه به پیش ماده (سرباره و ژئولیت) ۲.۵ و ۱.۵ و از قالب های مکعبی ۵۰ میلی متر برای ساخت نمونه ها برای آزمایش مقاومت فشاری استفاده گردید. درصدهای اضافه شدن ژئولیت به پیش ماده اصلی (سرباره) مقدار ۰ و ۱۵ و ۳۰ و ۴۵٪ و بازه ی زمانی بررسی مقاومت فشاری سن ۲۸ روز در نظر گرفته شده است. ترکیب های بدون ژئولیت دارای مقاومت فشاری بالایی بودند و با بالا رفتن درصد ژئولیت تا ۴۵ درصد، روند کاهشی مقاومت فشاری نسبت به حالت پیش ماده فقط سرباره تا حدود ۶۰ درصد مشاهده گردید اما در درصدهای مشخص متوسط ۱۵ و ۳۰ درصد ژئولیت، نتایج قابل قبولی از مقاومت فشاری به منظور استفاده در پروژه های عمرانی حاصل شد. کلمات کلیدی: ملات ژئوپلیمری، ژئولیت، سرباره، مقاومت فشاری، پیش ماده.

۱. مقدمه

یکی از مسائلی که امروز ذهن انسان را به خود مشغول کرده است، رابطه ی انسان با محیط پیرامون یا به عبارت دقیق تر محیط زیست است. با پیشرفته شدن صنعت در

طول سال ها، حجم ورود آلودگی به محیط زیست به شکل قابل توجهی افزایش یافته است. بشر در طی مسیر پیشرفت صنعت به راه حل هایی برای برطرف کردن نیازهای خود در همان مقطع زمانی می رسید اما بعضی از این راه حل ها

خود منجر به وجود آمدن مشکلات جدیدی برای انسان شده است. در مباحث عمرانی و ساخت و ساز با افزایش رشد جمعیت، نیاز بشر برای مصرف مواد ساختمانی به خصوص سیمان پرتلند معمولی افزایش پیدا کرده است اما فرآیند تولید سیمان پرتلند معایب عمده ای نیز به دنبال دارد. تولید سیمان پرتلند باعث رها سازی مقادیر زیادی از دی اکسید کربن به محیط زیست می شود [۱]. به طوریکه به ازای تولید ۱ تن سیمان پرتلند در صنعت سیمان باعث تولید ۱ تن دی اکسید کربن می شود [۲]. تغییرات اقلیمی ناشی از پدیده ی گرمایش جهانی به یکی از جدی ترین نگرانی های محیط زیست در سراسر جهان تبدیل شده است. علت اصلی پدیده ی گرمایش جهانی، انتشار گازهای گلخانه ای است که در میان گازهای گلخانه ایی دی اکسید کربن با میزان انتشار ۶۵٪ بیش ترین نقش را در پدیده ی گرمایش جهانی را داراست [۳]. طبق تحقیقات صورت گرفته تولید سیمان پرتلند باعث ۵ الی ۷ درصد از کل میزان انتشار جهانی گاز دی اکسید کربن است [۴] به همین جهت باید به دنبال مصالح جایگزین برای سیمان بود که دارای ۲ ویژگی مهم باشند اولاً از لحاظ مقاومتی بتواند جایگزین سیمان پرتلند شوند و ثانیاً بتوانند در مقایسه با فرآیند تولید سیمان دی اکسید کربن کمتری را تولید کند که خطرات کمتری را برای محیط زیست به ارمغان آورد. ژئوپلیمرها هم می توانند از نظر مقاومتی جای سیمان پرتلند را بگیرند و هم به خاطر انتشار دی اکسید کربن بسیار پایین در موقع تولید در مقایسه با سیمان پرتلند در حال کسب علاقه ی محققان هستند [۶]. طبق مطالعاتی که انجام شده است استفاده از ژئوپلیمرها در مقابل فرآیند تولید سیمان، انتشار گازهای گلخانه ایی را تا ۸۰ درصد به حداقل می رساند [۶]. جای گزین کردن ژئوپلیمر به جای سیمان پرتلند دارای مزایایی چون: مقاومت فشاری و خمشی و کششی زیاد [۷-۹]، سخت شدن سریع [۱۰]، مقاومت در برابر آتش سوزی و حرارت

های زیاد [۱۱-۱۳]، نفوذپذیری کم و مقاومت در برابر حمله نمک ها و اسیدها [۱۴، ۷]، خزش کم [۱۵]، کاهش تولید دی اکسید کربن و انرژی تولید بسیار کمتر نسبت به سیمان پرتلند معمولی و استفاده موثر از ضایعات جانبی و پسماندهای صنعتی مانند خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و .. می توان نام برد. مشخصات مکانیکی ملات ژئوپلیمری تابع عوامل بسیاری می باشند. به عنوان مثال نوع مواد آلومینا سیلیکاتی، انواع محلول قلیایی، طرح های اختلاط با درصد های مختلف که به عنوان مواد تولید کننده ی ملات ژئوپلیمری به کار می رود. در بحث مواد آلومینا سیلیکاتی مانند سرباره کوره بلند، خاکستر پوسته برنج، خاکستر بادی، زئولیت و متاکائولن هر کدام به متغیرهایی مثل موقعیت جغرافیایی، نوع معدن، اقتصادی بودن، در دسترس بودن ماده و غیره بستگی دارند. یکی از مواد آلومینا سیلیکاتی که به راحتی در دسترس است و به وفور یافت می شود سرباره کوره بلند است. یکی دیگر از منابع آلومینا سیلیکاتی در کشور زئولیت می باشد که در ایران معادن بسیار زیادی موجود می باشد و قیمت بسیار ارزانی را داراست که از نظر اقتصادی بسیار مناسب می باشد. در مقایسه سرباره کوره بلند و زئولیت، سرباره کوره بلند هم قابلیت فعال شدن بیشتری توسط مواد قلیایی و هم قدرت چسبندگی را نسبت به زئولیت دارا می باشد. اما از نظر اقتصادی زئولیت بسیار ارزان تر است، برای حل این مشکل می توان از سرباره کوره بلند و زئولیت به صورت درصد های مختلف در ترکیب با هم و استفاده از آن به عنوان ماده ی اصلی آلومینا سیلیکاتی استفاده کرد که باعث اقتصادی شدن طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری می گردد و در این مقاله در این زمینه مطالعات آزمایشگاهی مربوطه را ارائه خواهد داد.

۲. معرفی مصالح

یکی از مهم ترین مصالح در ساخت بتن ها آب می باشد. با توجه به مراحل ساخت بتن ژئوپلیمری علاوه بر

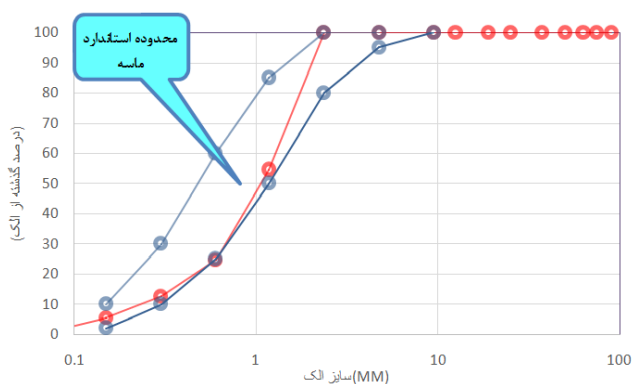
اصلی تشکیل دهنده ملات ژئوپلیمری می باشد. در این تحقیق در دو طرح اختلاط از دو نسبت ۲ و ۲,۵ سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم استفاده گردیده است. در تعیین سیلیکات سدیم پارامتری به نام Ratio مطرح است که بر اساس آن کارایی آن متفاوت است. Ratio عبارت است از نسبت $\frac{SiO_2}{Na_2O}$ (نسبت اکسید سیلیس به اکسید سدیم) در این تحقیق از سیلیکات سدیم محلول شرکت صنایع سیلیکات ایران با مشخصات Ratio=2.35 با غلظت ۴۸٪ استفاده شده است. درصد ترکیبات شیمیایی سدیم سیلیکات مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۱-درصد ترکیبات شیمیایی سیلیکات سدیم مورد استفاده

ترکیب شیمیایی	درصد (%)
Na ₂ O	۱۴/۳۰
SiO ₂	۳۳/۶۰
H ₂ O	۵۲

هیدروکسید سدیم (NaOH) یک ترکیب معدنی جامد و سفید رنگ می باشد با دمای ذوب ۳۱۸ سانتی گراد و چگالی یک ترکیب معدنی جامد و سفید رنگ و چگالی ۲,۱۳ گرم بر سانتیمتر مکعب و با جرم مولی ۴۰,۱ گرم بر مول می باشد. این ترکیب در تماس با پوست دارای اثر خورندگی است و برای جلوگیری از اثرات سوزانندگی آن هنگام استفاده رعایت نکات ایمنی اعم از استفاده دستکش و ماسک باید مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق از دو غلظت ۱۲ و ۱۸ مولار در دو طرح اختلاط استفاده گردیده است. سرباره کوره بلند (GGBFS) محصولی مصنوعی و جانبی است که به هنگام جداسازی آهن در کوره های ذوب آهن از ناخالصی های موجود در سنگ آهن باقی می ماند. سرباره کوره بلند منبع غنی از آلومینیوسیلیکاتی است. سرباره استفاده شده در این تحقیق محصول جانبی کارخانه ذوب اصفهان است و میزان ریز بودن ذرات تشکیل دهنده آن برابر با $4000 \text{ cm}^2/g$ می باشد و وزن مخصوص آن

آبی که در طرح اختلاط به صورت جداگانه به مواد دیگر اضافه می شود آب موجود در محلول های سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم نیز باید توجه داشت که جمع آب های خالص شامل آب به تنهایی و آب در محلول سیلیکات سدیم و آب در محلول هیدروکسید سدیم نسبت کل آب مورد استفاده در تهیه بتن ژئوپلیمری این نسبت نباید از مقدار مشخصی تجاوز کند به این علت که آب بیش از اندازه موجب آب رفتگی پدید آمدن ترکهای ریز، کاهش دوام ضعف در مقاومت نهایی بتن و غیره خواهد شد. آب مورد استفاده در این پایان نامه آب لوله کشی شهری می باشد. هدف از این تحقیق مطالعه بر روی ملات های ژئوپلیمری بوده است، به همین علت از ماسه معمولی شسته شده و عبوری از الک نمره ۸ که بزرگترین دانه عبوری از قطر آن برابر ۲,۳۶ m.m استفاده شده است که در شکل ۱ منحنی دانه بندی مربوطه نشان داده شده است. ماسه مورد نظر دارای درصد جذب برابر ۱,۳۵ درصد بود.



شکل ۱- نمودار دانه بندی ماسه به کار رفته در ساخت نمونه ها

سدیم سیلیکات به ترکیباتی متفاوت شامل Na₂O و SiO₂ اطلاق می شود که همین دلیل دارای خواص شیمیایی متفاوتی دارند. این ترکیبات به طور کلی جامدات شفاف و یا پودر سفید رنگ می باشند و در مقادیر مختلف محلول در آب هستند و در الکل و اسید حل نمی شوند. سیلیکات سدیم به همراه هیدروکسید سدیم نقش فعال سازی را برعهده دارند و از جمله مواد

برابر با $2,754 \text{ gr/cm}^3$ است و مشخصات آن مطابق جدول ۲ است.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی ترکیبات موجود در سرباره مورد استفاده

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	MnO
درصد	۳۵.۷	۱۱.۳	۱.۳	۳۷	۱۱	۰.۶۸	۰.۶	۰.۰۰۲	۱.۵۸

زئولیت ماده ای معدنی است که عمدتاً از آلومینوسیلیکات ها تشکیل شده است. این ماده از دسته ی کانی های رسی هستند که همچون سایر کانی های رسی از پایه هیدروسیلیکات های آلومینیوم همراه با برخی کاتیون ها و اکسید های فلزات قلیایی و قلیایی خاکی تشکیل شده اند. زئولیت مورد استفاده در این تحقیق از زئولیت طبیعی و تهیه شده از معادن استان سمنان می باشد.

۳. طرح اختلاط، نحوه ترکیب مصالح، عمل آوری و آزمایش

نحوه اختلاط مصالح جهت ساخت ملات

روشی که برای اختلاط برای تهیه ی ملات زئوپلیمری انتخاب شد با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه بوده است. در ابتدا با توجه به جداول طرح اختلاط، مواد توزین می شوند و سپس ماسه و سرباره و زئولیت به مدت ۶۰ ثانیه به صورت خشک مخلوط می شوند. در مرحله ی بعدی محلول قلیا فعال که حاصل ترکیب هیدروکسید سدیم و سدیم سیلیکات با نسبتی که در جداول آورده شده است به مخلوط خشک پیش ماده اضافه می شود و به مدت ۳۰ ثانیه ترکیب می شود. مرحله سوم اضافه کردن آب توزین شده به مخلوط می باشد و به مدت ۶۰ ثانیه اختلاط ادامه می یابد. پس از مرحله ی سوم دستگاه میکسر خاموش می شود و با ابزاری متناسب با ظرف میکسر به زیر و کردن ملات جهت اطمینان از مخلوط شدن کامل مصالح پرداخته می شود و سپس به مدت ۹۰ ثانیه میکسر روشن

شده تا عمل اختلاط ادامه یابد و خمیر ملات زئوپلیمری آماده ریختن در قالب ها می شود.

عمل آوری

از انواع روش ها برای عمل آوری ملات تازه زئوپلیمری استفاده می شود (مانند پرس گرم، اتوکلاو و غیره) و با توجه به تحقیقات صورت گرفته، در این تحقیق از عمل آوری درون آون تحت دمای مشخص که منجر به کسب مقاومت بیشتر و گیرش نهایی خوبی میشود استفاده شد. ملات تازه زئوپلیمری در درون قالب ها ریخته شده و تحت دمای ۶۰ سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت درون آون قرار گرفت لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از ایجاد ترک بر روی نمونه ها و از دست دادن آب نمونه ها از یک محافظ پلاستیکی بر روی قالب ها استفاده گردید.

آزمایش مقاومت فشاری

این آزمایش بر روی نمونه های مکعبی با ابعاد mm ۵۰*۵۰*۵۰ و طبق استاندارد C39 ASTM انجام می گیرد. روند آزمایش به این صورت است که نمونه های مکعبی زیر جک هیدرولیکی قرار داده می شوند و در جهت قائم، تحت فشار قرار می گیرند تا در آخر از هم گسیخته شد و بیشترین فشار یا تنشی که برای شکستن نمونه بر حسب MPa مورد نیاز بوده است، توسط دستگاه ثبت می شود. ظرفیت دستگاه مورد استفاده ۳۰۰۰ کیلونیوتون می باشد.

طرح های اختلاط و نتایج اولیه

هدف از این تحقیق بررسی جایگزین کردن درصدی از پیش ماده ی ملات زئوپلیمری بر پایه سرباره با زئولیت و تاثیر آن بر مقاومت فشاری است. در این مقاله دو طرح اختلاط نسبت های مختلف از مصالح استفاده گردید که از هر طرح اختلاط ابتدا ۵ نمونه فقط با پیش ماده سرباره ساخته شد و مورد آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه قرار گرفت. سپس به هر طرح اختلاط درصدهای ۱۵ و ۳۰ و ۴۵٪ از درصد وزنی پیش ماده با زئولیت جایگزین

ماده است. ضمناً نتایج اولیه مقاومت فشاری نمونه ها در جداول ۳ تا ۶ ارائه شده اند.

۴. تحلیل نتایج

همانطور که در بخش ۳ بیان شد در این تحقیق از دو طرح اختلاط S1 و S2 استفاده شد. در توضیح این دو طرح اختلاط لازم به ذکر است که طرح اختلاط S1 از نظر مقدار مصالح اقتصادی تر است اما مقاومتی فشاری که مشاهده شد از این طرح اختلاط نسبت به طرح اختلاط S2 کمتر می باشد. برای بررسی تاثیر اضافه شدن درصد های مختلف ژئولیت در هر طرح اختلاط بر مقاومت فشاری، نمودار و جداول متعددی در این بخش ارائه و تحلیل شده اند.

گردید و مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت. در مجموع در این تحقیق ۱۰ نمونه فقط با پیش ماده سرباره جهت آزمایش فشاری و ۳۰ نمونه با درصد های مختلف جایگزینی ژئولیت به جای سرباره جهت آزمایش مقاومت فشاری ساخته شدند. در جداول ۳ تا ۶ طرح های اختلاط نمونه ها، مقادیر مصالح استفاده شده برای ساخت هر طرح اختلاط به ازای یک متر مکعب ملات ژئوپلیمری داده شده اند. لازم به ذکر است طرح اختلاط S1 و S2 طرح اختلاط پیش ماده فقط سرباره و طرح اختلاط S1Z1 و S1Z2 و S1Z3 طرح اختلاط S1 با جایگزینی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ و ۴۵٪ ژئولیت به جای سرباره در پیش ماده و طرح اختلاط S2Z1 و S2Z2 و S2Z3 طرح اختلاط S2 با جایگزینی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ و ۴۵٪ ژئولیت به جای سرباره در پیش

جدول ۳- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های با پیش ماده فقط سرباره

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	Activator (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Zeolite (kg/m ³)	Slag (kg/m ³)	نام نمونه	s/sh	Molarity of NaOH	Sand / Slag
۷۴.۶۱	۶۷.۵۹	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۰	۵۱۸.۵	S1-1	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۷۴.۶۶	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۰	۵۱۸.۵	S1-2	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۷۷.۸۲	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۰	۵۱۸.۵	S1-3	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۷۶.۵۷	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۰	۵۱۸.۵	S1-4	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۷۶.۳۹	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۰	۵۱۸.۵	S1-5	۲.۵	۱۲	۲.۵
۹۴.۳۷	۸۶.۷۱	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۰	۶۸۸.۵	S2-1	۲	۱۸	۱.۵
	۸۷	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۰	۶۸۸.۵	S2-2	۲	۱۸	۱.۵
	۹۱.۹۳	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۰	۶۸۸.۵	S2-3	۲	۱۸	۱.۵
	۱۰۱.۱۲	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۰	۶۸۸.۵	S2-4	۲	۱۸	۱.۵
	۱۰۵.۰۱	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۰	۶۸۸.۵	S2-5	۲	۱۸	۱.۵

جدول ۴- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های با پیش ماده سرباره و ۱۵٪ ژئولیت

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	Activator (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Zeolite (kg/m ³)	Slag (kg/m ³)	نام نمونه	s/sh	Molarity of NaOH	Sand / Slag + Zeolite
۶۱.۳۱	۵۷.۸۹	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۷۷.۸	۴۴۰.۷	SiZ1-1	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۶۹.۹۹	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۷۷.۸	۴۴۰.۷	SiZ1-2	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۶۳.۱۶	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۷۷.۸	۴۴۰.۷	SiZ1-3	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۵۴.۵۳	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۷۷.۸	۴۴۰.۷	SiZ1-4	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۶۱.۰۱	۲۰.۷۴	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶	۷۷.۸	۴۴۰.۷	SiZ1-5	۲.۵	۱۲	۲.۵
۴۰.۴	۳.۹۹	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۱۰۳.۳۷	۵۸۵.۲۴۲	StZ1-1	۲	۱۸	۱.۵
	۳.۵۲	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۱۰۳.۳۷	۵۸۵.۲۴۲	StZ1-2	۲	۱۸	۱.۵
	۳.۹۷	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۱۰۳.۳۷	۵۸۵.۲۴۲	StZ1-3	۲	۱۸	۱.۵
	۴.۱۹	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۱۰۳.۳۷	۵۸۵.۲۴۲	StZ1-4	۲	۱۸	۱.۵
	۴.۵۳	۲۷.۵۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸	۱۰۳.۳	۱۰۳۳	۱۰۳.۳۷	۵۸۵.۲۴۲	StZ1-5	۲	۱۸	۱.۵

جدول ۵- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های با پیش ماده سرباره و ۳۰٪ زئولیت

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	Activator (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Zeolite (kg/m ³)	Slag (kg/m ³)	نام نمونه	s/sh	Molarity of NaOH	Sand / Slag + Zeolite
۵۰.۵۸	۴۵.۴۴	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۱۵۵.۵۵	۳۶۲.۹۵	S1Z2-1	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۵۰.۷۵	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۱۵۵.۵۵	۳۶۲.۹۵	S1Z2-2	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۵۴.۸۸	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۱۵۵.۵۵	۳۶۲.۹۵	S1Z2-3	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۵۳.۲۷	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۱۵۵.۵۵	۳۶۲.۹۵	S1Z2-4	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۴۸.۵۴	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۱۵۵.۵۵	۳۶۲.۹۵	S1Z2-5	۲.۵	۱۲	۲.۵
۶۱.۴۷	*	۲۷۵.۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸۰	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۲۰۶.۵۶	۴۸۱.۹۶	S2Z2-1	۲	۱۸	۱.۵
	۶۰.۱۵	۲۷۵.۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸۰	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۲۰۶.۵۶	۴۸۱.۹۶	S2Z2-2	۲	۱۸	۱.۵
	۶۴.۵۳	۲۷۵.۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸۰	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۲۰۶.۵۶	۴۸۱.۹۶	S2Z2-3	۲	۱۸	۱.۵
	۶۴.۳	۲۷۵.۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸۰	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۲۰۶.۵۶	۴۸۱.۹۶	S2Z2-4	۲	۱۸	۱.۵
	۵۶.۸۸	۲۷۵.۴۱	۱۸۳.۶۱	۹۱.۸۰	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۲۰۶.۵۶	۴۸۱.۹۶	S2Z2-5	۲	۱۸	۱.۵

جدول ۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های با پیش ماده سرباره و ۴۵٪ زئولیت

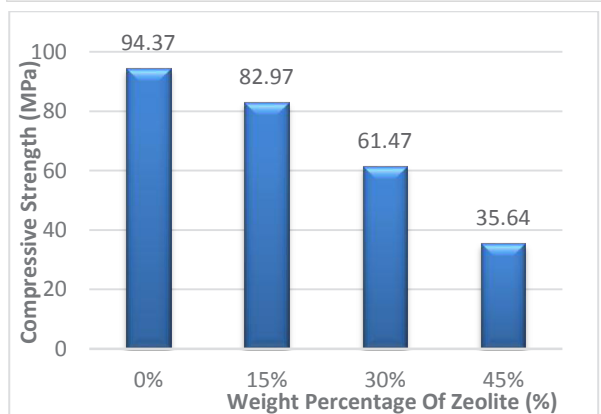
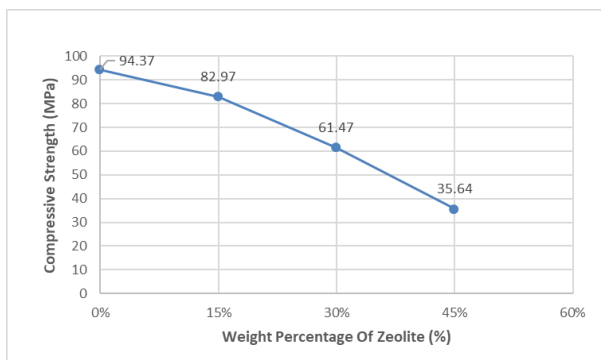
میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	Activator (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Zeolite (kg/m ³)	Slag (kg/m ³)	نام نمونه	s/sh	Molarity of NaOH	Sand / Slag + Zeolite
۳۰.۳۴	۲۷.۴۷	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۲۳۳.۳۳	۲۸۵.۱۸	S1Z3-1	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۳۰.۵۵	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۲۳۳.۳۳	۲۸۵.۱۸	S1Z3-2	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۳۱.۷۹	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۲۳۳.۳۳	۲۸۵.۱۸	S1Z3-3	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۲۹.۶۵	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۲۳۳.۳۳	۲۸۵.۱۸	S1Z3-4	۲.۵	۱۲	۲.۵
	۳۲.۲۲	۲۰۷.۴۰	۱۴۸.۱۴	۵۹.۲۶	۷۷.۷۸	۱۲۹۶.۲۵	۲۳۳.۳۳	۲۸۵.۱۸	S1Z3-5	۲.۵	۱۲	۲.۵
۳۵.۶۴	۳۶.۷۶	۲۷۵.۴۱	۱۹۶.۷۲	۷۸.۶۹	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۳۰۹.۸۳	۳۷۸.۶۹	S2Z3-1	۲	۱۸	۱.۵
	۳۳.۹۷	۲۷۵.۴۱	۱۹۶.۷۲	۷۸.۶۹	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۳۰۹.۸۳	۳۷۸.۶۹	S2Z3-2	۲	۱۸	۱.۵
	۳۳.۴۴	۲۷۵.۴۱	۱۹۶.۷۲	۷۸.۶۹	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۳۰۹.۸۳	۳۷۸.۶۹	S2Z3-3	۲	۱۸	۱.۵
	۳۴.۴۷	۲۷۵.۴۱	۱۹۶.۷۲	۷۸.۶۹	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۳۰۹.۸۳	۳۷۸.۶۹	S2Z3-4	۲	۱۸	۱.۵
	۳۵.۵۵	۲۷۵.۴۱	۱۹۶.۷۲	۷۸.۶۹	۱۰۳.۲۸	۱۰۳۲.۷۸	۳۰۹.۸۳	۳۷۸.۶۹	S2Z3-5	۲	۱۸	۱.۵

طرح اختلاط S1

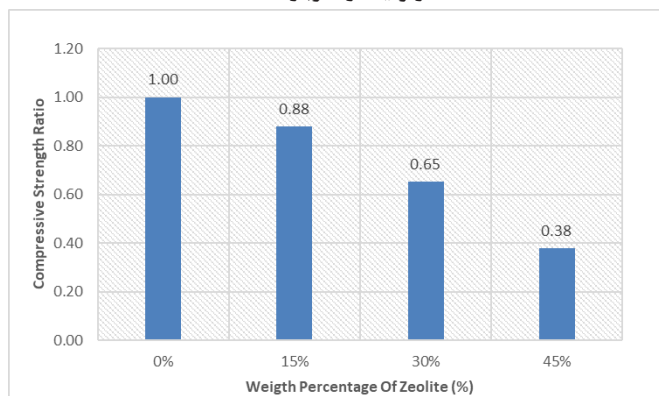
شکل ۲ آورده شده است. شیب کاهش مقاومت فشاری در بازه ۰٪ تا ۳۰٪ زئولیت، تقریباً برابر بوده ولی پس از افزودن بیش از ۳۰٪ زئولیت، مقاومت فشاری با سرعت بیشتری رو به کاهش گذاشته است. با توجه به نمودار شکل ۳، مشخص است که طرح S1Z1 که مقدار ۱۵ درصد زئولیت در ترکیب پیش ماده خود دارد، با افت مقاومت فشاری ۱۸ درصدی نسبت به طرح S1 که زئولیتی در ترکیب پیش ماده خود ندارد، مواجه شده است. با بالا رفتن درصد زئولیت در طرح های S1Z2 و S1Z3 به ترتیب میزان کاهش مقاومت فشاری برابر با ۳۸٪ و ۵۹٪ بوده است.

جایگزینی بخشی از سرباره با زئولیت در پیش ماده، سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی شد. ولی این کاهش مقاومت به صورتی است که کماکان امکان استفاده از محصول نهایی در پروژه های با سطح نیاز پایین تر مقاومت فشاری، وجود دارد و مقاومت فشاری نسبتاً قابل قبولی را نتیجه می دهد. یکی دیگر از تأثیرات استفاده از زئولیت، که در زمان ساخت ملات مشاهده شد، کاهش کارایی مخلوط به علت خاصیت جذب آب بالای آن می باشد. بنابراین در صورت استفاده از این ماده در ساخت مخلوط، استفاده از فوق روان کننده ها می تواند موثر واقع شود. نتایج مقاومت فشاری متوسط نمونه های مکعبی در

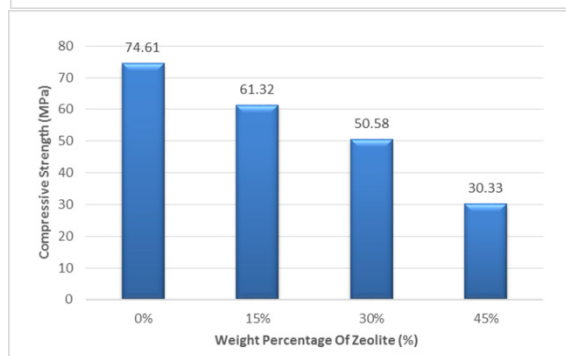
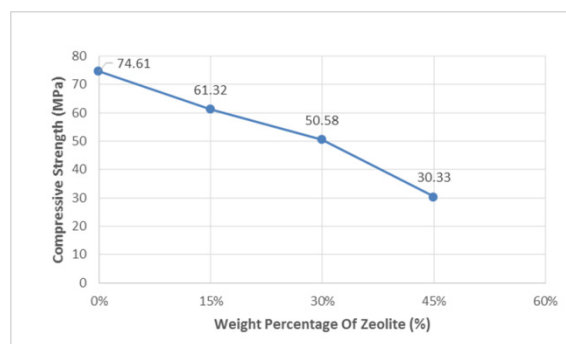
نمونه‌ی با پیش ماده سربراره مشاهده شد. در طرح S2Z2 نیز این افت به اندازه ی ۳۵٪ درصد می باشد و در طرح S2Z3 این افت به اندازه ی ۶۲٪ مشاهده شد. با توجه به نمودار ۵ افت شیب نمودار تا ۱۵٪ ژئولیت با شیب ملایم تر رو به کاهش است نسبت به زمانی که جایگزینی ژئولیت به ۳۰٪ به بالا می رسد.



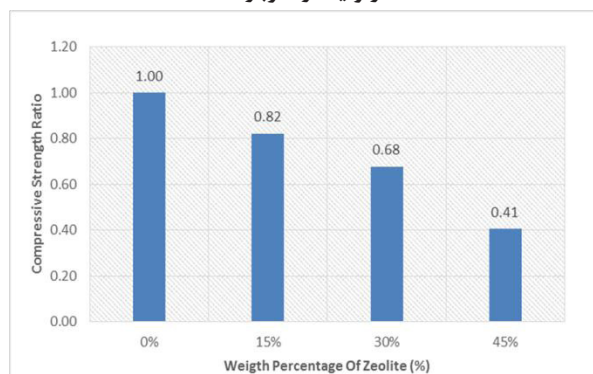
شکل ۴- نمودار تأثیر مقدار ژئولیت موجود در پیش ماده طرح اختلاط S2 بر مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری با پیش ماده ترکیبی ژئولیت و سربراره



شکل ۵- نمودار نسبی تأثیر ژئولیت موجود در پیش ماده طرح اختلاط S2 بر مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری با پیش ماده ترکیبی ژئولیت و سربراره



شکل ۲- نمودار تأثیر مقدار ژئولیت موجود در پیش ماده طرح اختلاط S1 بر مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری با پیش ماده ترکیبی ژئولیت و سربراره



شکل ۳- نمودار نسبی تأثیر ژئولیت موجود در پیش ماده طرح اختلاط S1 بر مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری با پیش ماده ترکیبی ژئولیت و سربراره

طرح اختلاط S2

طبق انتظارات جایگزینی بخشی از سربراره با ژئولیت در پیش ماده باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۵۰*۵۰*۵۰ mm شد. اما نکته ی قابل ذکر است این می باشد هنوز هم می توان از این جایگزین کردن مقداری از سربراره با ژئولیت، در پروژه هایی که مقاومت فشاری کمتری را نیازمند هستند استفاده کرد. با توجه به نمودار ۴ طرح S2Z1 که مقدار جایگزینی ژئولیت ۱۵٪ می باشد افت مقاومت فشاری به اندازه ی ۱۲٪ نسبت به

پس از بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی، مشاهده شد که هرچه درصد ژئولیت در پیش ماده افزایش یافت مقاومت فشاری هم کاهش می یابد. با مشاهده نمودارها به این نکته می توان رسید که جایگزین کردن ژئولیت به مقدار زیاد تا ۴۵ درصد در پیش ماده ملات ژئوپلیمری مقاومت فشاری شرایط مطلوبی برای استفاده در پروژه ها را به ارمغان نمی آورد. اما اگر به صورت ترکیبی و در حدود تا ۳۰ درصد با پیش ماده سرباره مورد استفاده قرار گیرد علاوه بر اینکه مقاومت مطلوبی جهت استفاده در پروژه ها را می توان به ارمغان می آورد باعث کم هزینه شدن طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری می گردد که با توجه به معادن غنی ژئولیت در کشور می توان از آن در چرخه ی صنعت وابسته به سیمان و بتن از ژئولیت استفاده کرد و باعث کم شدن آثار تخریب محیط زیست توسط چرخه ی تولید سیمان شود.

1. Davidovits J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World resource review*, 6:263-278.
2. Malhotra VM. (2006). Reducing CO2 Emissions. *ACI Concrete International*, 28:42-45.
3. McCaffrey R. (2002). Climate Change and the Cement Industry. *Global Cement and Lime Magazine, (Environmental Special Issue):15-19*.
4. Alzeer M, MacKenzie K. (2013). Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax). *Applied Clay Science*, 75-76:148-152.
5. Davidovits J., 1998. "Chemistry of Geopolymeric systems, Terminology, Geopolymer" 99 International conference, France, pp. 3077-308
۶. مرادی خو، امیر بهادر "مطالعه آزمایشگاهی نقش الیاف هیبریدی دو گانه کوپلیمری و نانو سیلیس بر مقاومت های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن". فصلنامه مصالح و سازه های بتنی، دوره: ۴، شماره: ۲، ۱۳۹۸.
7. Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. (2004). On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, 101:467-472.
8. Duxson P, Provis JL, Lukey GC, van Deventer JSJ. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*, 37:1590-1597.
9. Amnadhua K, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C. (2013). Strength, water permeability, and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash. *Materials & Design*, 51:894-901.
10. Lee WKW, van Deventer JSJ. (2002). The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211:115-126.
11. Cheng TW, Chiu JP. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16:205-210.
12. Sakkas K, Panyas D, Nomikos PP, Sofianos AI. (2014). Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43:148-156.
13. Sarker PK, Kelly S, Yao Z. (2014). Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials & Design*, 63:584-592.
14. Palomo A, Blanco-Varela MT, Granizo ML, Puertas F, Vazquez T, Grutzeck MW. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 29:997-1004
15. Zhang M, Guo H, El-Korchi T, Zhang G, Tao M. (2013). Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 47:1468-1478.

ارتباط بین نتایج آزمایش های چکش اشमित و مقاومت فشاری

آزمونه های مکعبی ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلی متر



فرهاد عواففی هویدا
مسئول آزمایشگاه شرکت فهاب بتن



آرش فروتن مهر
عضو هیات مدیره شرکت فهاب بتن
عضو حقوقی انجمن بتن ایران



علی ذوالقدری
کارشناسی ارشد راه و ترابری
دانشگاه زنجان

چکیده

تعیین مقاومت فشاری بتن یکی از دغدغه های اصلی محققان از زمان استفاده از این ماده و همچنین مهم ترین ضابطه برای قضاوت در مورد کیفیت آن بوده است. در این مطالعه ارتباط بین نتایج مقاومت فشاری حاصل از چکش اشमित به عنوان آزمایش غیر مخرب و آزمایش استاندارد مقاومت فشاری به عنوان آزمایش مخرب بررسی شده است. به منظور واسنجی نتایج چکش اشमित، آزمونه های مکعبی نمونه گیری شده در پروژه های در حال اجرا مورد استفاده قرار گرفتند. پس از عمل آوری استاندارد تا سن ۲۸ روز، روی ۵۵ آزمونه، آزمون مقاومت فشاری و همچنین آزمون چکش اشमित در دو جهت (افقی و قائم) انجام گرفت. نتایج حاصل از رگرسیون نشان داد که ارتباطی قوی بین نتایج حاصل از مقاومت فشاری استاندارد و آزمایش غیرمخرب با استفاده از چکش اشमित با ضریب $R^2 = 0.971$ وجود دارد. چکش اشमित می تواند به منظور انجام فرآیند کنترل کیفیت بتن، با اعمال ضرایب کالیبراسیون حاصله، در تخمین نتایج مقاومت فشاری با دقت قابل قبول مورد استفاده قرار گیرد. کلمات کلیدی: چکش اشमित، مقاومت فشاری بتن.

۱. مقدمه

بتن جزو معمول ترین مصالحی است که در ساخت و ساز مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. تعیین مقاومت فشاری بتن یکی از دغدغه های اصلی محققان از زمان استفاده از این

ماده و همچنین مهم ترین ضابطه برای قضاوت در مورد کیفیت آن بوده است. روش های آزمایش غیر مخرب و مخرب مختلفی برای تعیین این پارامتر از بتن مورد استفاده قرار گرفته است. هدف اصلی این آزمایش ها کنترل تولید

بتن و تعیین عمر سرویس‌دهی آن در طول زمان است. با این اوصاف، روش‌های مخرب بعضاً هزینه بر و زمان بر هستند. علاوه بر این، نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی که در آزمایشگاه ساخته شده باشند نماینده‌ای از بتن اجرا شده نیستند. به علاوه کرگیری از اجزای سازه‌ای باعث کاهش ظرفیت باربری عضو خواهد شد. آزمون غیر مخرب در واقع روشی است برای تعیین مقاومت فشاری بتن به صورت غیر مستقیم که اندازه‌گیری آن در محل کارگاه نیز امکان‌پذیر است [2]. فواید آزمون غیر مخرب در مقایسه با مغزه‌گیری (آزمون مخرب) توسط لشینسکی^۱ ارائه شده است [3]:

۱- کاهش نیروی کارگر در هنگام انجام آزمایش

۲- کاهش تخریب عضو بتنی مورد آزمایش

۳- عدم احتمال آسیب به اعضای که در صورت کاهش ظرفیت مقطع نیاز به آرماتور گذاری دارند

۴- امکان انجام آزمایش در سازه‌هایی که امکان کرگیری وجود ندارد (دیوارهای با ضخامت کم، سازه‌های با حجم آرماتور بسیار زیاد و ...)

۵- استفاده از تجهیزات با هزینه‌ی بسیار پایین‌تر

این فواید در حالی است که نتایج قابل اعتماد باشند و تا حد قابل قبولی به نتایج واقعی حاصل از اندازه‌گیری به روش مخرب نزدیک باشند [4]. محدودیت‌های اصلی مربوط به آزمون غیر مخرب، ناهمسانی^۲ و غیر همگنی^۳ مواد و مصالح، محدود بودن محل انجام آزمایش، سختی سطحی که مورد استفاده قرار می‌گیرد و جهت انجام آزمایش (افقی، قائم یا زوایای دیگر) است [5]. به منظور غلبه بر این محدودیت‌ها، نتایج حاصل از انجام آزمایش باید با خروجی نتایج آزمون مخرب همبستگی داشته باشند. در واقع این نمودارهای همبستگی توسط تولید کننده‌ی تجهیزات برای استفاده کنندگان داده شده است. این نمودارها برای

آزمونه‌های بتنی بین ۱۴ تا ۵۶ روزه ساخته شده است (روی چکش اشمیت نمایش داده شده است). با این وجود، این نمودارها ممکن است در عمل نتایج متفاوتی با واقعیت به دست دهند. در نتیجه تخمین مقاومت فشاری با همبستگی اعداد برجهندگی و نتایج مقاومت فشاری حاصل از آزمایش استاندارد مخرب امکان‌پذیر است.

هنگامی که در یک مجموعه کنترل کیفیت از آزمایش غیر مخرب برای ارزیابی مقاومت بتن استفاده می‌شود برای قابل اعتماد و اطمینان بودن نتایج حاصل از آزمایش، باید با توجه به مصالح و مواد مورد استفاده، نتایج دستگاه با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش غیر مخرب بررسی و نمودارهای همبستگی برای آنها بدست آید. معمولاً پارامترهایی که روی این نمودارها اثر می‌گذارند، صافی سطح، اندازه، شکل، صلبیت نمونه، سن نمونه، رطوبت سطحی و عمقی نمونه، نوع سنگدانه درشت، نوع سیمان، وجود حباب هوا در سطح، دما، نوع قالب مورد استفاده، کرناسیون سطحی نمونه و همچنین کالیبراسیون چکش اشمیت است [6]. تحقیقات زیادی در خصوص این که چکش اشمیت وسیله‌ای قابل اعتماد برای تخمین مقاومت فشاری هست یا خیر انجام گرفته است. تحقیقات علمی انجام گرفته نشان می‌دهد که چکش اشمیت می‌تواند اطلاعات مفیدی را در خصوص کیفیت بتن ارائه کند، و این در صورتی است که دستگاه برای نوع بتنی که مورد استفاده قرار می‌گیرد کالیبره شده باشد [7]. این تحقیق به منظور واسنجی نتایج آزمون چکش اشمیت روی آزمونه‌های مکعبی ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلی‌متر بتن‌های تولید شده، و در سن ۲۸ روز انجام شده است. در این تحقیق، نمونه‌های بتن از بتن‌های تولید شده در کارخانه فهاب بتن اخذ شده است.

¹ Leshchenko

² Anisotropy

³ Heterogeneity

۲-۱. آزمون غیر مخرب بتن با استفاده از چکش

اشمیت

در میان روش‌های غیر مخرب، تعیین مقاومت فشاری بتن با استفاده از چکش اشمیت معمول‌ترین روش عملی است. این روش با توجه به سادگی، سرعت انجام بالا، و هزینه‌ی پایین آن در تمام دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش انجام آزمایش با چکش اشمیت در [8] ASTM C805 و [9] BS 1881: Part 202 شرح داده شده است. این آزمایش به عنوان یک روش سختی سنجی دسته بندی شده و بر اساس برگشت الاستیک یک جسم با توجه به سختی سطح برخورد اندازه‌گیری می‌شود. انرژی دریافت شده توسط بتن به مقاومت آن بتن بستگی دارد. این آزمایش با انتخاب صحیح سطح و آماده سازی آن سطح شروع می‌شود. با توجه به تاثیر جهت برخورد چکش به سطح آزمون که در مقدار برجهندگی تاثیرگذار است، آزمایش عمود بر سطوح انجام می‌گیرد و زاویه‌ی چکش با افق در هنگام آزمایش در نتایج حاصله تاثیر گذار است. اعداد برجهندگی باید برای حداقل ۱۰ نقطه طبق استاندارد ASTM و ۱۲ نقطه طبق استاندارد BS، اندازه‌گیری گردند. پس از اندازه‌گیری، نتایج حاصل از آزمایش چکش اشمیت با نتایج آزمایش مخرب بررسی و نمودارها ترسیم می‌گردند. مطالعات مختلفی به منظور بررسی تاثیر هر یک از پارامترهای ذکر شده در مقدمه روی نتایج چکش اشمیت انجام گرفته است. برای مثال آماساکی^۱ [10] تاثیر کربوناسیون را روی عدد برجهندگی بررسی کرده است و گریب^۲ [11] به بررسی تاثیر نوع سنگدانه روی عدد برجهندگی پرداخته است.

۲. فعالیت میدانی و آزمایشگاهی

هدف این تحقیق بدست آوردن نمودار همبستگی ساده‌ای است که بتواند توسط مهندسان مجموعه کنترل کیفیت

برای ارزیابی بتن تولید شده، مورد استفاده قرار بگیرد است. آزمون‌ها، از بتن‌های در حال اجرا اخذ شده است که توسط تکنسین‌ها در قالب‌های ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلی‌متر به روش استاندارد ساخته شده‌اند. آزمون‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، از آب خارج شده و سطح آنها با استفاده از دستمال خشک شد. صاف ترین سطوح آزمون‌ها به منظور آزمون غیر مخرب انتخاب شد. این آزمون در دو حالت افقی و قائم طبق تصویر شماره ۱ انجام گرفت.

به منظور انجام آزمون با چکش اشمیت در حالت افقی، آزمون‌ها زیر یک مقاومت فشاری با تنش بسیار پایین (۷۰ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب) قرار گرفتند (در استاندارد [9] BS 1881-202 برای اندازه‌گیری اعداد برجهندگی آزمون‌های مکعبی در حالت افقی توصیه شده است)، سپس نیرو به چکش روی سطح مورد آزمون اعمال شد تا عدد برجهندگی به دست آید. فواصل قرائت اعداد برجهندگی در حدود ۲۵ میلی‌متر از یکدیگر در مرکز آزمون انتخاب شد. در حالت قائم، این مراحل روی آزمون‌ها با گذاشتن آزمون روی زمین سخت و صاف مطابق شکل ۱ انجام گرفت. در هر مرحله ۱۴ قرائت انجام گرفت و میانگین و انحراف معیار آنها محاسبه شد. طبق استاندارد [8] ASTM C805، در صورت مشاهده‌ی اختلاف بیش از ۶ واحدی در قرائت اعداد برجهندگی، آزمایش روی سطح مناسب دیگری انجام گرفته و در صورت تکرار این امر، آزمون از آزمایش حذف گردید.

پس از اندازه‌گیری اعداد برجهندگی قائم و افقی، آزمون مقاومت فشاری مطابق استاندارد ملی ۳-۱۶۰۸ [12] انجام گرفت. در پایان به منظور تخمین مقاومت فشاری بتن با استفاده از اعداد ارائه شده توسط شرکت سازنده‌ی چکش، در دو حالت افقی و قائم، نمودار شکل ۲ ترسیم و نتایج استخراج شد.

¹ Amasaki

² Grieb

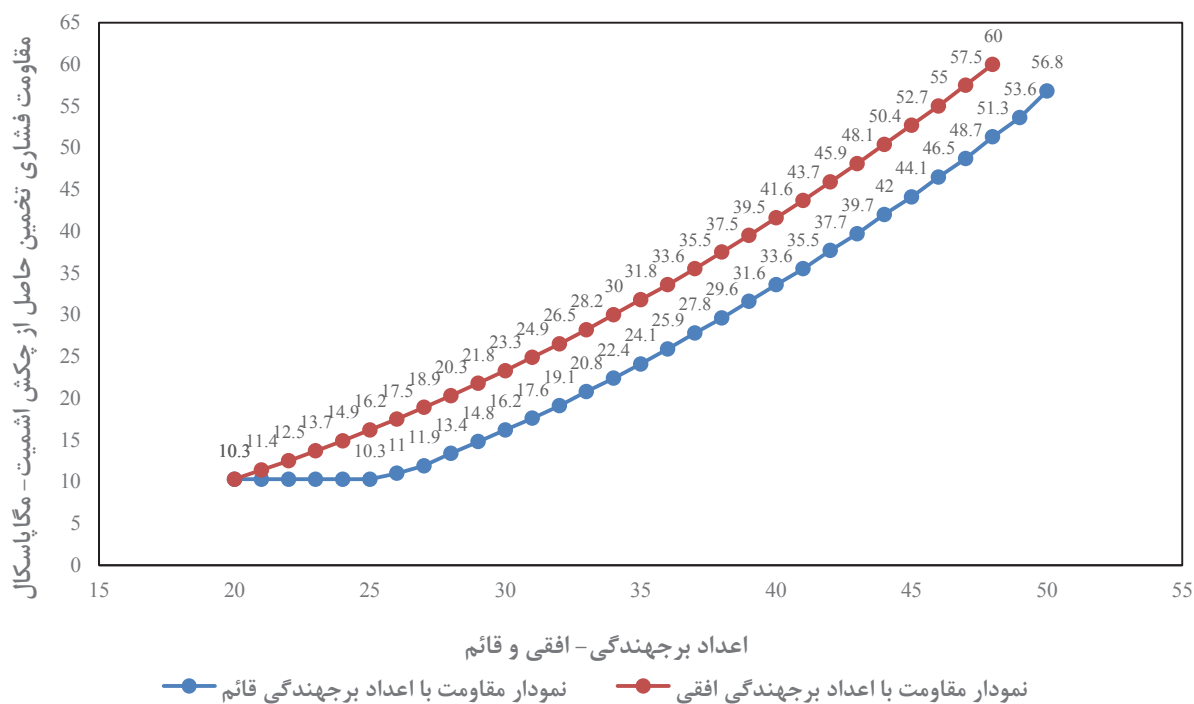


حالت قائم



حالت افقی

شکل ۱- حالت افقی و قائم اندازه‌گیری اعداد برجهندگی با استفاده از چکش اشمیت



شکل ۲- نمودار شرکت سازنده‌ی چکش اشمیت برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن با استفاده از اعداد ریباند

نمودار شکل ۲، به منظور کالیبراسیون چکش اشمیت با نتایج واقعی که از شکست آزمون‌های بتنی حاصل شد، رگرسیون ساده خطی برقرار شد. نتایج ارتباط بین آزمایش مقاومت فشاری بتن و نتایج بدست آمده از چکش اشمیت

۳. نتایج و بحث

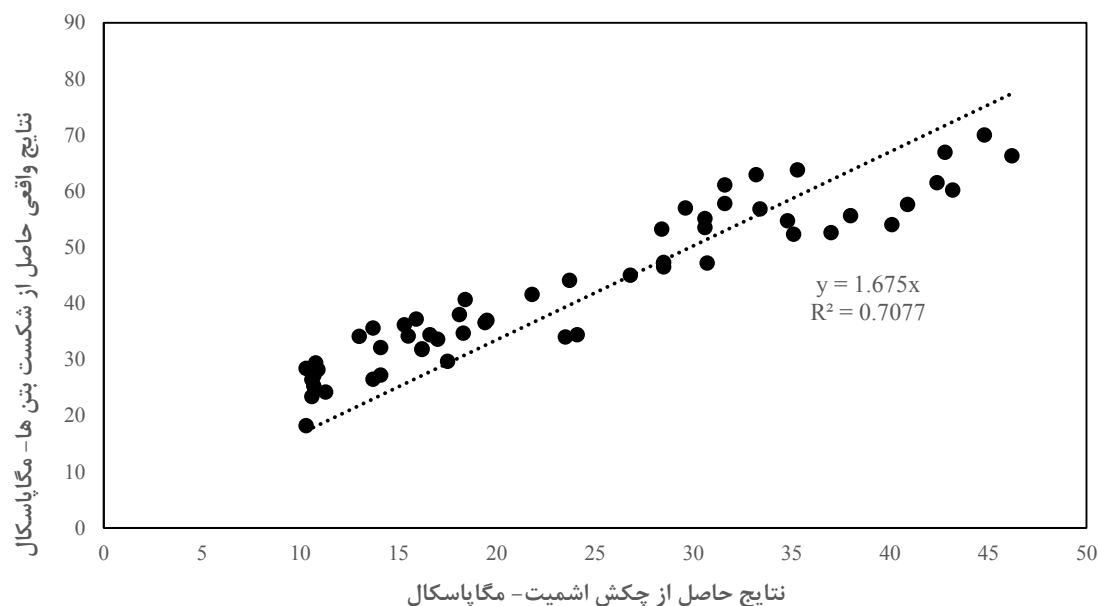
پس از محاسبه‌ی نتایج تخمین مقاومت حاصل از چکش اشمیت و استخراج اعداد مقاومت فشاری با استفاده از

در دو حالت افقی و قائم به ترتیب در تصویر ۳ و ۴ نشان داده شده است. ارتباط بین نتایج چکش اشمیت اندازه گیری شده در حالت قائم و افقی و مقاومت فشاری به ترتیب در روابط ۱ و ۲ آورده شده است.

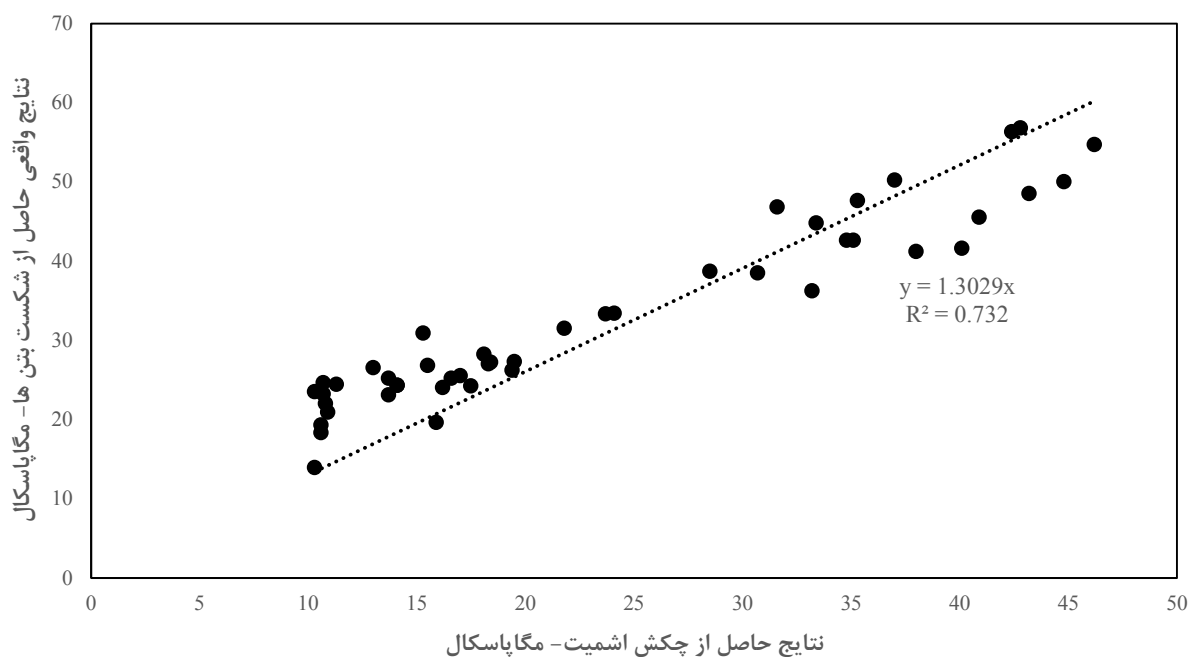
$$C_s = 1.675(S-P), R^2=0.973 \quad (1)$$

$$C_s = 1.3029(S-H), R^2=0.971 \quad (2)$$

که به ترتیب C_s نشان دهنده‌ی مقاومت فشاری بتن، مگاپاسکال؛ S-P نتیجه آزمایش چکش اشمیت در حالت قائم، مگاپاسکال؛ S-H نتیجه آزمایش چکش اشمیت در حالت افقی، مگاپاسکال است.



شکل ۳- ارتباط بین مقاومت فشاری پیش بینی شده توسط چکش اشمیت در حالت قائم و مقاومت فشاری استاندارد



شکل ۴- ارتباط بین مقاومت فشاری پیش بینی شده توسط چکش اشمیت در حالت افقی و مقاومت فشاری استاندارد

با توجه به ضرایب حاصل شده از رگرسیون خطی، مشاهده می‌گردد که نتایج حاصل از انجام آزمایش در حالت افقی، از دقت بالاتری برخوردار است (ضریب X پایینتری دارد) و در صورت عدم اعمال ضریب حاصل از رگرسیون، نتایج تخمین حاصل از چکش اشمیت به نتایج واقعی نزدیکتر است. این در حالی است که با توجه به نمودار شکل ۳، در صورت استفاده از تخمین مقاومت فشاری با استفاده از چکش اشمیت در حالت قائم و بدون اعمال ضریب واسنجی حاصل شده، نتایج واقعی می‌توانند به طور متوسط ۶۷ درصد کمتر باشند و این موضوع اهمیت انجام واسنجی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، ضرایب تعیین (R^2) در هر دو نمودار بدست آمده بالاست و نشان از ارتباط قوی بین نتایج واقعی و نتایج تخمین با آزمایش غیر مخرب حاصل از آزمایش چکش اشمیت دارد. همانطور که پیش‌تر در مقدمه بحث شد، با توجه به تاثیر عوامل مختلف در نتایج حاصل از چکش اشمیت از قبیل: صافی سطح، اندازه، شکل، صلبیت نمونه، سن آزمونه، رطوبت سطحی و عمقی آزمونه، نوع سنگدانه درشت، نوع سیمان، وجود حباب هوا در سطح، دما، نوع قالب مورد استفاده کرناسیون سطحی نمونه و همچنین واسنجی چکش اشمیت، سعی شد که متغیرهای اندازه‌گیری تنها به واسنجی چکش اشمیت محدود گردد و سایر موارد در تمامی آزمونه‌ها مشابه باشد که این امر به بالاتر رفتن دقت حاصل از اندازه‌گیری منجر شد. توسط محققین مختلفی نیز ارتباط قوی بین نتایج حاصل از چکش اشمیت و همچنین مقاومت فشاری بتن یافت شده است و در این بین نظرات متضاد و مختلفی نیز در میان محققین در مورد دقت تخمین مقاومت فشاری از اعداد برجهندگی قرائت شده و ارتباطات همبستگی وجود دارد. ضریب تغییرات مقاومت فشاری برای محدوده‌ی زیادی از نمونه‌ها به طور میانگین ۱۸/۸ درصد و برای گروهی دیگری

بیش از ۳۰ درصد گزارش شده است [13]. فرهات آیدین^۱ و سربیبیک^۲ [14]، روی نتایج حاصل از کرگیری و نمونه‌های آزمایشگاهی، آزمایش چکش اشمیت و مقاومت فشاری انجام دادند و نتیجه گرفتند که برای بدست آوردن نتایج قابل قبول، انجام واسنجی چکش بسیار اهمیت دارد و با استفاده از چکش اشمیت می‌توان کرگیری از سازه‌های بتنی را بسیار کاهش داد. در تحقیق دیگری که توسط همدانیان و همکاران [15] با استفاده از ترکیب چکش اشمیت و امواج التراسونیک انجام گرفت، نشان داده شد که نتایج حاصل از چکش اشمیت بین ۱۵± تا ۲۰± درصد با نتایج اندازه‌گیری واقعی اختلاف دارد.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده حاصل از چکش اشمیت به عنوان آزمایش غیر مخرب و مقاومت فشاری مکعبی استاندارد روی آزمونه‌های نمونه‌گیری شده از بتن‌های تولید شده نتایج زیر حاصل شده است:

استفاده از چکش اشمیت نیازمند مطالعه‌ی دقیق آزمایشگاهی است. به دلیل تاثیر متغیرهای مختلف از جمله مصالح مورد مصرف در تولید بتن آماده، لازم است تا نتایج چکش با توجه به این مصالح کالیبره و مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به نتایج رگرسیون حاصل شده، با ضریب تعیین $R^2=0.97$ ، استفاده از چکش اشمیت به عنوان آزمون غیر مخرب می‌تواند نتایج قابل قبولی داشته باشد و توسط واحد کنترل کیفیت مجموعه‌ی بتن آماده مورد استفاده قرار گیرد.

این واقعیت باید مد نظر قرار گیرد که چکش اشمیت نمی‌تواند جایگزین آزمایش استاندارد مقاومت فشاری گردد، اما به منظور یکنواختی بتن تولید شده و همچنین مقایسه‌ی آنها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

¹ Aydin

² Saribiyik

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس خود را نسبت به حمایت‌های مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و شرکت فهاب بتن اعلام می‌دارند.

- [1] Orr, J. (2012). *Flexible formwork for concrete structures* (Doctoral dissertation, University of Bath).
- [2] Yüksel, I. (1995). *Determination of concrete strength using combined nondestructive tests and application on a reinforced concrete structure* (Doctoral dissertation, MSc. Thesis, Yildiz Technic University, Science of Technology Institute, Istanbul).
- [3] Leshchinsky, A. (1991, June). Non-destructive methods instead of specimens and cores, quality control of concrete structures. In *Proceedings of the International Symposium held by RILEM, Belgium, E&FN Spon, UK* (pp. 377-386).
- [4] Turgut, P. (2004). Research into the correlation between concrete strength and UPV values. *NDT. net*, 12(12), 1-9.
- [5] Yilmaz, I. (2009). A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(8), 1349-1357.
- [6] Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2003). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC press.
- [7] Brencich, A., Cassini, G., Pera, D., & Riotto, G. (2013). Calibration and reliability of the rebound (Schmidt) hammer test. *Civil Engineering and Architecture*, 1(3), 66-78.
- [8] ASTM C805/C805M. (2013). *Standard test method for rebound number of hardened concretes*. West Conshohocken, USA: American Society for Testing and Materials.
- [9] BS 1881: Part 202. (1986) *Recommendations for Surface Hardness Tests by the Rebound Hammer*. BSI, U.K.,
- [10] Amasaki, S. (1991). Estimation of strength of concrete structures by the rebound hammer. *CAJ Proc Cem Conc*, 45, 345-351.
- [11] Grieb, W. E. (1958). Use of Swiss hammer for estimating compressive strength of hardened concrete. *Highway Research Board Bulletin*, (201).
- [12] استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۶۰۸ (۱۳۹۲) تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده - روش آزمون.
- [13] Schmidt, E., *The concrete test hammer (Der Beton-Prüfhammer)*, Schweiz. Bauz. (Zurich), 68(28), 378, 1950.
- [14] Aydin, F., & Saribiyik, M. (2010). Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings. *Scientific Research and Essays*, 5(13), 1644-1648.
- [15] Hamidian, M., Shariati, A., Khanouki, M. A., Sinaei, H., Toghroli, A., & Nouri, K. (2012). Application of Schmidt rebound hammer and ultrasonic pulse velocity techniques for structural health monitoring. *Scientific Research and Essays*, 7(21), 1997-2001.

مروری بر اثر دماهای بالا و عمل آوری مجدد بر ریزساختار و مشخصات مکانیکی بتن



محمد شکرچی زاده

استاد دانشکده فنی دانشگاه تهران
عضو هیات مدیره انجمن بتن ایران



بابک احمدی

استادیار، مهندسی بخش فناوری بتن
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



ندا فرهودی

استادیار، بخش مهندسی آتش
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



حامد خرازی

دانشجوی کارشناسی ارشد
مهندسی عمران، دانشکده فنی
دانشگاه تهران

چکیده

گسترش جمعیت، توسعه فناوری و نیازهای روزافزون، بشر را به سمت احداث زیرساخت‌های متعدد نظیر پل‌ها، ساختمان‌های بلند، نیروگاه‌ها و غیره سوق داده است. طراحی و ساخت این گونه سازه‌ها نیازمند یک تحلیل دقیق و اجرای بی نقص می باشد. بتن یکی از پرمصرف ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز است. دلیل اصلی استفاده از بتن، مقاومت فشاری بالا، در دسترس بودن مصالح و سایر مشخصات مکانیکی مطلوب آن است. بتن برای دستیابی به مشخصات مکانیکی مناسب می بایست تخلخل و نفوذپذیری کمی داشته باشد.

با وجود آنکه عموماً در المان‌های بتنی طراحی خاصی برای ایمنی در برابر آتش انجام نمی شود، ممکن است در زمان بهره برداری تحت دماهای بالا قرار گیرند. بتن زمانی که در برابر دماهای بالا قرار گیرد، عملکرد متفاوتی از خود نشان می دهد. زمانی که خمیر سیمان در معرض دمای بالا قرار می گیرد، دچار تغییرات فیزیکی و شیمیایی زیادی می شود. بسیاری از آسیب‌ها در دو ساعت اولیه قرارگیری در معرض آتش رخ می دهد. زمانی که بتن سرد شود، المان‌های سازه‌ای ممکن است توانایی تحمل بارهای وارده بر سازه را نداشته باشند؛ بنابراین سازه زمانی می تواند به کاربری خود ادامه دهد که بخش‌های آسیب دیده تعمیر شوند. رایج ترین روش جهت تعمیر بتن، حذف لایه‌های ضعیف شده بتن و جایگزینی آن با بتن تازه است. همچنین استفاده از مواد پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) در دهه‌های اخیر رایج شده است. زمانی که نمونه‌های آسیب دیده در برابر حرارت، مجدداً در هوای مرطوب و یا آب عمل آوری شوند، بخشی از مقاومت خود را دوباره بدست می آورند. در این تحقیق به بررسی مشخصات مکانیکی نمونه‌ها پس از عمل آوری مجدد پرداخته می شود.

کلمات کلیدی: بتن، دماهای بالا، عمل آوری مجدد، پوزولان

مقدمه

گسترش جمعیت، توسعه فناوری و نیازهای روزافزون، بشر را به سمت احداث زیرساخت‌های متعدد نظیر پل‌ها، ساختمان‌های بلند، نیروگاه‌ها و غیره سوق داده است.

طراحی و ساخت این گونه سازه‌ها نیازمند یک تحلیل دقیق و اجرای بی نقص می باشد.

بتن یکی از پرمصرف ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز است. دلیل اصلی استفاده از بتن، مقاومت فشاری بالا، در دسترس بودن مصالح و سایر مشخصات مکانیکی مطلوب

آن است. بتن برای دستیابی به مشخصات مکانیکی مناسب می‌بایست تخلخل و نفوذپذیری کمی داشته باشد.

با وجود آنکه عموماً در المان‌های بتنی طراحی خاصی برای ایمنی در برابر آتش انجام نمی‌شود، ممکن است در زمان بهره‌برداری تحت دماهای بالا قرار گیرند. بتن زمانی که در برابر دماهای بالا قرار گیرد، عملکرد متفاوتی از خود نشان می‌دهد. این موضوع در آتش‌سوزی در تونل مون‌بلان^۱ واقع در حدفاصل فرانسه و ایتالیا مشخص گردید. تونل مون‌بلان در ۲۴ مارس سال ۱۹۹۹ به علت آتش‌گرفتن موتور یک کامیون بلژیکی دچار ترک‌خوردگی و قله‌کن‌شدن^۲ گردید. در این حادثه ۳۹ نفر جان خود را از دست دادند. این موضوع عمدتاً به علت تنش‌های بالای حرارتی و فشار زیاد بخار آب بود. در حقیقت گرادیان حرارتی بالا عامل تنش‌های هیدرو-مکانیکی زیاد در المان بتنی بود. از طرفی دیگر، نفوذپذیری کم بتن مانع از خروج بخار آب داخل بتن گشته که این مسئله موجب افزایش فشار داخلی در بتن شد. همچنین در ۱۴ ژوئن سال ۲۰۱۷ ساختمان ۲۴ طبقه‌ای گرنفل^۳ واقع در لندن دچار آتش‌سوزی شد. در این حادثه ۷۲ نفر جان خود را از دست دادند. علت این حادثه یک یخچال معیوب در طبقه‌ی چهارم ساختمان بود که سبب آتش‌سوزی گردید. این ساختمان حدود ۶۰ ساعت در آتش سوخت و سپس اطفای حریق توسط آتش‌نشان‌ها انجام شد.

بررسی رفتار و عملکرد بتن در بارگذاری حرارتی در سازه‌های هسته‌ای و یا عمرانی همواره پراهمیت بوده است. آسیب در سازه‌های بتنی ناشی از قرارگیری آن‌ها در دماهایی بالاتر از دمای ۵۰°C مشاهده شده است. این موضوع در سازه‌های صنعتی نظیر کوره‌ها، دودکش‌ها،

راکتورهای هسته‌ای و یا در شرایط تصادفی نظیر انفجار و یا آتش رخ می‌دهد [۱].

رفتار مصالح بتنی، به خصوص بتن‌های پرمقاومت و توانمند در دماهای بالا در سال‌های گذشته مورد بررسی محققان واقع شده است [۲-۷].

احتراق

احتراق روند سوختن ماده‌ی اشتعال‌زا است. برای آنکه احتراق رخ دهد، حضور سه عنصر اصلی ماده‌ی سوختنی، اکسیژن (هوا) و حرارت به صورت همزمان نیاز است. روند احتراق با گرم‌شدن ماده‌ی اشتعال‌زا و رسیدن به دمایی بالاتر از دمای احتراق خود در حضور اکسیژن آغاز می‌گردد. بر اثر حرارت ناشی از احتراق، پیوندهای شیمیایی ماده‌ی اشتعال‌زا از هم گسیخته می‌شود. در صورتی که احتراق به صورت کامل رخ دهد، سه عنصر کربن، هیدروژن و سولفور با اکسیژن موجود در محیط واکنش داده و کربن‌دی‌اکسید، بخار آب و سولفور دی‌اکسید را تولید می‌نمایند. همچنین به مقدار کمی سولفور تری‌اکسید نیز تشکیل می‌گردد. روند تشکیل آتش متشکل از چهار مرحله بوده که عبارتند از: پیدایش^۴، گسترش^۵، کاملاً توسعه یافته^۶ و زوال^۷.

تقسیم‌بندی آتش

تقسیم‌بندی انواع حریق بر اساس منبع سوخت حریق می‌باشد. معیار اصلی در این تقسیم‌بندی، براساس حداکثر درجه حرارت ایجادشده در محیط نبوده بلکه مدت زمان لازم برای رسیدن درجه حرارت محیط به درجه نهایی آتش است.

4 Incipient

5 Growth

6 Fully Developed

7 Decay

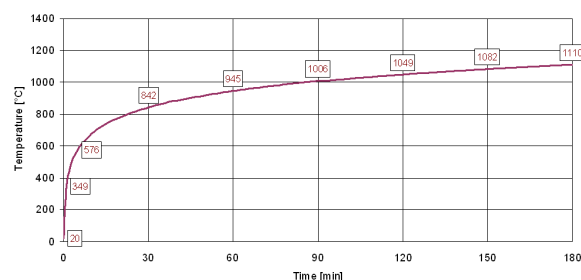
1 Mont Blanc Tunnel

2 Spalling

3 Grenfell

حریق سلولزی

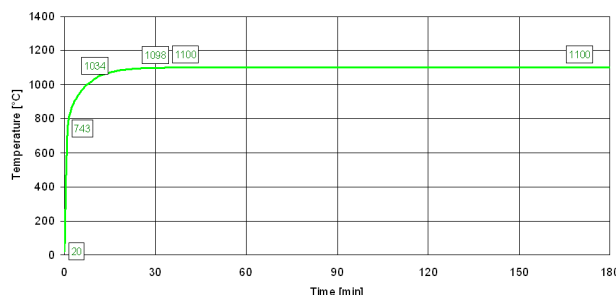
این نوع از حریق در سازه‌ها و ساختمان‌های مسکونی، تجاری، اداری، بیمارستان‌ها، هتل‌ها، مراکز خرید، مدارس و غیره اتفاق می‌افتد که ماده‌ی سوختنی آن‌ها بیشتر مواد سلولزی است. در این نوع حریق، درجه حرارت برحسب منحنی استاندارد دما-زمان ISO 834 [۸] پس از گذشت حدود ۳ دقیقه به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و برای رسیدن به دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۹۰ دقیقه زمان نیاز دارد (شکل ۱).



شکل ۱- نمودار حریق سلولزی ISO 834 [۸]

۲- حریق هیدروکربنی

این گونه حریق‌ها به واسطه مواد شیمیایی و سوخت‌هایی مانند گاز و یا سوخت‌های مایع، در سازه‌های دارای مواد مشتعل‌شونده نظیر پالایشگاه‌ها و انبارهای مواد شیمیایی، مراکز صنعتی و تأسیسات صنایع نفت، گاز و پتروشیمی اتفاق می‌افتد. به طور معمول در این نوع حریق، درجه حرارت برحسب منحنی استاندارد دما-زمان ISO 834 [۸] پس از گذشت ۸ دقیقه حرارت به ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و دما تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار حریق هیدروکربنی ISO 834 [۸]

اثر حرارت بر بتن

زمانی که خمیر سیمان در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد، اثرات زیر به ترتیب بر آن رخ می‌دهد که عبارتند از (شکل ۳):

تبخیر آب آزاد و آغاز از دست‌رفتن آب‌های چسبنده‌ی شیمیایی در دمای 105°C [۹]

• دی‌هیدراته شدن اترینگایت در دمای $110-150^{\circ}\text{C}$ [۱۰]

• تجزیه کلسیم هیدروکسید در دمای $450-500^{\circ}\text{C}$ [۱۱]

• آغاز تجزیه شدن سیلیکات کلسیم هیدراته در دمای 560°C [۱۲]

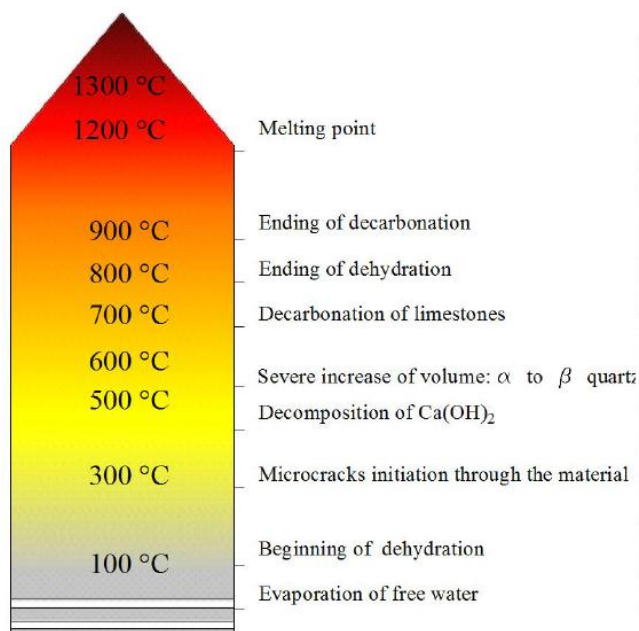
• تجزیه‌ی کلسیم کربنات به کلسیم اکسید در دمای 750°C [۱۳]

• تجزیه کامل سیلیکات کلسیم هیدراته و کلسیت در دمای $700-800^{\circ}\text{C}$ [۱۲]

• پایان دی‌هیدراته شدن بتن در دمای 800°C [۱۴]

• پایان دی‌کربناته شدن بتن در دمای 900°C [۱۵]

• ذوب بتن در دمای 1200°C [۱۴]



شکل ۳- اثرات فیزیکی و شیمیایی حرارت بر بتن [۱۴]

آسیب‌های واردشده بر بتن ناشی از اعمال حرارت

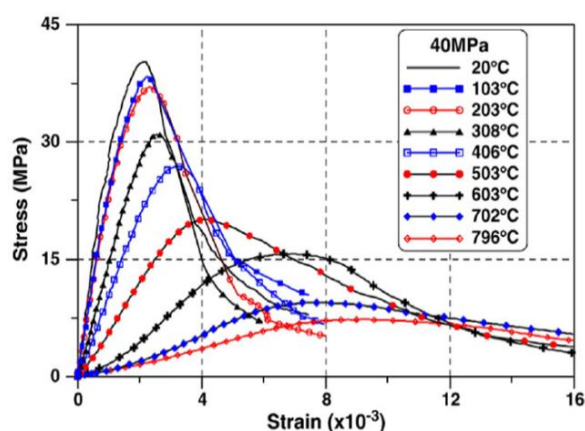
آسیب‌دیدگی در بتن ناشی از حرارت، تنها وابسته به مقدار دمای اعمالی بر آن نیست بلکه شدت آسیب‌دیدگی به مدت زمان قرارگیری بتن در برابر آتش و نحوه سردشدن

المان‌های بتنی نظیر سازه‌های بتنی، تونل‌ها و ساختمان‌ها زمانی که در برابر آتش قرار گیرند، دچار آسیب‌هایی خواهد شد. قلوه‌کن‌شدن در دماهایی بین 250°C – 400°C رخ می‌دهد. این آسیب سبب گسیختگی المان سازه‌ای و تخریب آن می‌شود. قلوه‌کن‌شدن به گونه‌ای است که به نظر می‌رسد المان سازه‌ای دچار انفجار شده‌است. کانما^۵ و همکاران [۱۹] آزمون‌هایی آسیب‌دیده ناشی از اعمال حرارت 300°C با نرخ $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ را در شکل ۳ نشان دادند. آزمون‌های موجود در شکل ۴ از قرارگیری قطعه‌های تخریب شده بتن مورد آزمایش در کوره در کنار یکدیگر بدست آمده‌اند.



شکل ۴- قلوه‌کن‌شدن؛ آزمون‌های حرارت دیده تا دمای 300°C [۱۹]

رابطه تنش-کرنش در بتن برای پیش‌بینی رفتار سازه‌های بتنی بسیار پراهمیت است. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش دمای اعمالی بر آزمون‌های بدون بارگذاری، مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی کاهش می‌یابد [۲۰].



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش در رژیم‌های مختلف حرارتی در آزمون‌های بدون بارگذاری [۲۰]

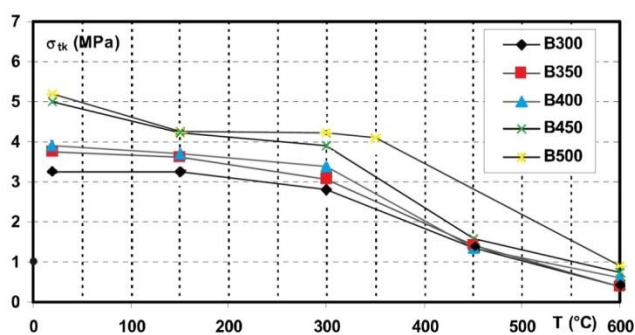
آن نیز بستگی دارد. تحقیقات حاکی از آن است که بسیاری از آسیب‌ها در دو ساعت اولیه‌ی قرارگیری در معرض آتش رخ می‌دهد. همچنین نشان داده شده است که مقاومت بتن حرارت‌دیده که پیش از آزمایش سرد نشده است، بیش از مقاومت بتنی است که پیش از آزمایش مقاومت فشاری سرد شده است؛ علاوه بر موارد ذکر شده، سرعت سردشدن هم بر مقاومت نهایی اثرگذار است. بتنی که با سرعت بیشتری سرد شود مقاومت کمتری داشته که علت این امر تغییرات در ریزساختار بتن ناشی از تنش‌های کششی است [۱۶ و ۱۷]. لی^۱ و همکاران [۶] بیان نمودند که باتوجه به آنکه آتش‌نشان‌ها از آب برای خاموش کردن آتش استفاده می‌نمایند، آزمون‌های حرارت‌دیده می‌بایست توسط آب به طور ناگهانی سرد شوند تا به واقعیت نزدیک‌تر باشد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این سردشدن ناگهانی سبب آسیب بیشتری بر بتن گردیده و مقاومت نهایی آزمون‌ها به شدت کاهش می‌یابد. علت این امر شوک حرارتی اعمالی بر آزمون‌ها ناشی از سردشدن ناگهانی است.

در میان مهم‌ترین اثرات ناشی از حرارت بر بتن، بازانت^۲ و کاپلان^۳ [۱۶] و اولم^۴ و همکاران [۱۸] به موارد زیر اشاره نمودند:

- دی‌هیدراته شدن خمیر سیمان
- افزایش تخلخل
- تغییر در رطوبت بتن
- انبساط حرارتی
- ترک حرارتی ناشی از ناسازگاری حرارتی
- تغییر در فشار بخار آب منفذی
- کاهش مقاومت و مدول الاستیسیته
- جمع شدگی
- خزش حرارتی
- قلوه‌کن‌شدن ناشی از فشار بخار آب منفذی زیاد

1 Y.Li
2 Bažant
3 Kaplan
4 Ulm

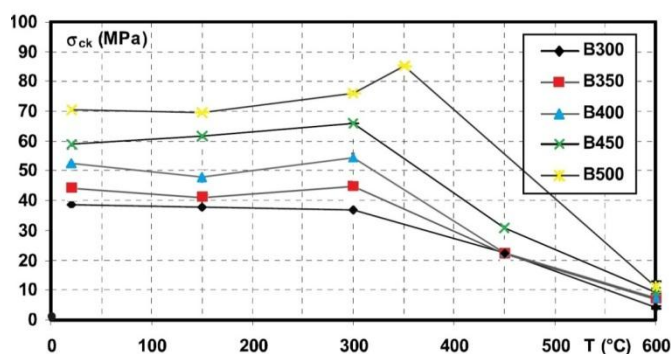
در آزمایش مقاومت کششی نیز روند نمودار مشابه مقاومت فشاری بوده و نزولی است. کانما و همکاران [۱۹] نشان دادند که در آزمون‌هایی با نسبت آب به سیمان بالا، مقاومت کششی تا دمای 150°C کاهش نمی‌یابد (شکل ۷). در این آزمایش نیز نوع سنگدانه نقش مهمی را ایفا می‌نماید. کمپل-آلن^۴ و دسای^۵ [۲۳] نشان دادند که آزمون‌های بتنی که دارای سنگدانه‌های سبک و یا سنگدانه‌های شنی هستند، زمانی که در معرض حرارت قرار گیرند، در مقایسه با بتن‌های شامل سنگدانه‌های آهکی مقاومت کششی کمتری از خود نشان می‌دهند.



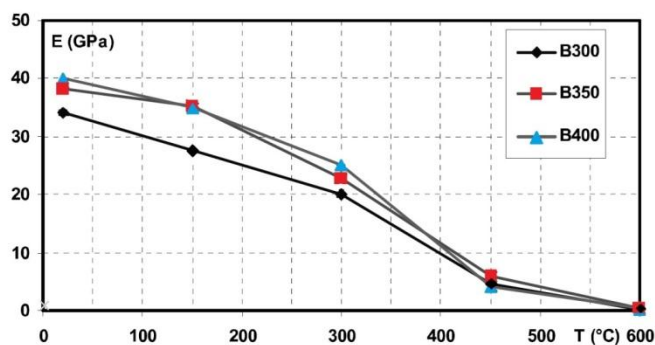
شکل ۷- مقاومت کششی در رژیم‌های مختلف حرارتی [۱۹]

مدول الاستیسیته یکی از مشخصات مکانیکی مهم در تعیین رفتار کلی بتن و توزیع تنش در ساختار آن است. مدول الاستیسیته نشانگر سختی مصالح بوده و همانند سایر مشخصات مکانیکی بتن، پس از قرارگیری در رژیم‌های حرارتی مختلف، کاهش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهد. کانما و همکاران [۱۹] نشان دادند که مدول الاستیسیته در اثر افزایش حرارت اعمالی به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد. آن‌ها علت این روند نزولی را شکستگی در چسبندگی موجود در سطح تماس سنگدانه‌ها و سیمان بتن بیان نمودند. این روند نزولی در شکل ۸ در نسبت‌های آب به سیمان مختلف قابل مشاهده است.

اثر دمای زیاد بر مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین عناوین جهت مطالعه‌ی رفتار حرارتی بتن بوده است. از آن جایی که بتن به علت مقاومت فشاری بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد، در ادبیات فنی تحقیقات گسترده‌ای بر مقاومت فشاری بتن‌های در معرض حرارت صورت گرفته است. لی^۱ و استرادلینگ^۲ [۲۱] به بررسی رفتار بتن در آتش پرداختند و به کاهش مقاومت فشاری در دمای 300°C رسیدند. فارس^۳ و همکاران [۲۲] دریافتند که در آزمایش مقاومت فشاری برای تمامی آزمون‌ها از دمای 20°C تا دمای $300-350^{\circ}\text{C}$ ، عملاً تغییری در مقاومت آزمون‌ها مشاهده نشده و گاهی در برخی از آزمون‌ها کمی افزایش مقاومت در بازه دمایی $150-300^{\circ}\text{C}$ مشاهده می‌شود. علت این موضوع شرایط اتوکلاو حاصل از بخار آب است. این موضوع سبب هیدراته‌شدن سیمان‌های هیدراته نشده می‌گردد [۶]. همچنین کانما و همکاران [۱۹] به بررسی آزمون‌های بتنی با نسبت آب به سیمان متفاوت تحت حرارت پرداختند و متوجه شدند که در بتن‌های توانمند در دماهای کمتر از 300°C حتی افزایش مقاومت نیز مشاهده می‌شود (شکل ۶). آن‌ها نشان دادند که با کاهش نسبت آب به سیمان (افزایش سیمان موجود در یک متر مکعب بتن) شاهد افزایش مقاومت در بازه دمایی $150-300^{\circ}\text{C}$ هستند. در بازه دمایی $300-600^{\circ}\text{C}$ مقاومت آزمون‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۶).



شکل ۶- مقاومت فشاری در رژیم‌های مختلف حرارتی [۱۹]



شکل ۸- مدول الاستیسیته در رژیم‌های مختلف حرارتی [۱۹]

راهکارهای پیشنهادی جهت بهبود مشخصات مکانیکی بتن حرارت‌دیده

همان‌طور که ذکر شد زمانی که بتن در معرض دماهای بالا قرار می‌گیرد، دچار آسیب‌های شدیدی می‌شود. زمانی که بتن سرد شود، المان‌های سازه‌ای ممکن است توانایی تحمل بارهای وارده بر سازه را نداشته باشند؛ بنابراین سازه زمانی می‌تواند به کاربری خود ادامه دهد که بخش‌های آسیب‌دیده تعمیر شوند. رایج‌ترین روش جهت تعمیر بتن، حذف لایه‌های ضعیف شده‌ی بتن و جایگزینی آن با بتن تازه است. همچنین استفاده از مواد پلیمری مسلح‌شده با الیاف (FRP) در دهه‌های اخیر رایج شده است. این روش‌ها سبب هزینه‌های بسیار زیادی می‌گردند. بنابراین محققین به دنبال راهکارهای مناسب‌تری هستند.

عمل‌آوری مجدد آزمون‌های آسیب‌دیده

زمانی که بتن در معرض حرارت قرار گیرد، دچار آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی می‌شود. در سال‌های گذشته تحقیقاتی صورت گرفته که حاکی از آن است که بتن می‌تواند مقاومت خود را بدون تعمیر کردن بدست آورد. محققان نشان دادند که زمانی که آزمون‌های آسیب‌دیده در برابر حرارت، مجدداً در هوای مرطوب و یا آب عمل‌آوری شوند، بخشی از مقاومت خود را دوباره بدست می‌آورند [۳، ۴، ۶ و ۲۴-۲۶]. در حقیقت در این حالت، قسمت عمده‌ای از تغییرات شیمیایی و بخشی از تغییرات فیزیکی ایجادشده

در بتن بهبود می‌یابد. این ایده نخستین بار توسط کروک^۱ و موری^۲ [۲۷] که در حال مطالعه‌ی کفپوش بتنی و حرارت‌دهی بر بتن تا دمای ۶۲۰°C درجه بودند، ارائه شد. در این حالت مقاومت بتن حرارت‌دیده به شدت کاهش یافت. زمانی که بلوک‌ها در آب به مدت کوتاهی غوطه‌ور شدند، بخش قابل توجهی از مقاومت از دست‌رفته احیا شد. آن‌ها اشاره کردند که با قرار دادن آزمون‌ها به مدت بیشتری در آب، مقاومت آن‌ها بیشتر شده و حتی در یک مورد از مقاومت اولیه خود نیز بیشتر می‌شود. علت این امر آن است که ژل سیمان، منافذ مویینه بتن را اشغال نموده و زمانی که حرارت اعمال می‌شود، این منافذ باز می‌گردند. حال زمانی که بتن در آب غوطه‌ور می‌شود، محصولات هیدراتاسیون مجدد ریزتری ناشی از حضور رطوبت تولید می‌شود. این محصولات، ساختار بتن را بهبود بخشیده و به تبع آن کاهش تخلخل و افزایش مقاومت رخ می‌دهد.

پون^۳ و همکاران [۷] بیان کردند که زمانی که بتن در هوای مرطوب و یا آب عمل‌آوری مجدد می‌گردد، هیدراته شدن مجدد به علت برخی از واکنش‌های زیر رخ می‌دهد:

- هیدراته شدن مجدد جزئی سیلیکات کلسیم جدیداً تشکیل شده.
- هیدراته شدن دانه‌های سیمان هیدراته نشده.
- هیدراته شدن مجدد آهک آزاد.
- واکنش‌های پوزولانی میان پوزولان هیدراته نشده و پرتلندیت جدیداً تشکیل شده.
- کربناسیون آهک آزاد.

هنری^۴ و همکاران [۲۸] بیان نمودند که در عمل‌آوری مجدد آزمون‌های بتنی، ترک‌های موجود در خمیر سیمان و فصل مشترک خمیر و سنگدانه بهبود می‌یابد و این عمل تأثیری بر ترک‌های ایجادشده در سنگدانه ندارد (شکل ۹).

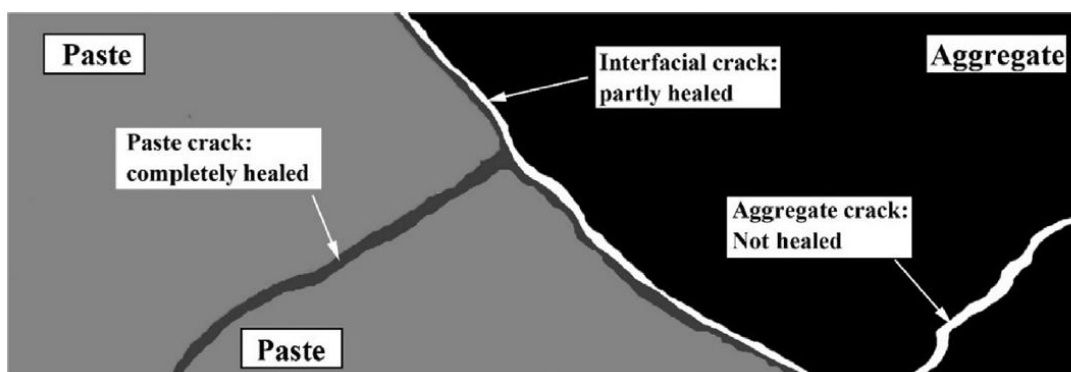
1 Crook

2 Murray

3 Poon

4 Henry

فصلنامه



بهبود ترک با عمل آوری [۲۸]

متصل شده به یکدیگر بیشتر از حالت اولیه آزمون است [۲۷].

لی^۱ و همکاران [۲۶] نشان دادند که پس از ۳۰ روز عمل آوری مجدد در محیطی با رطوبت بیش از ۹۵ درصد، ترک‌های حرارتی کاهش یافته و مشخصات مکانیکی بتن بهبود می‌یابد. پون و همکاران [۷] دریافتند که در حالتی که آزمون‌ها در معرض حرارت 600°C و یا 800°C قرار داده شوند و سپس به مدت یک، چهار و یا هشت هفته در آب عمل آوری شوند، بخشی از مقاومت اولیه خود را مجدداً بدست می‌آورند. مشابه حالت عمل آوری مجدد در هوای مرطوب، این مقاومت از مقاومت آزمون‌های حرارت دیده بیشتر بوده و کمتر از مقاومت همان آزمون‌ها پیش از اعمال حرارت است. لازم به ذکر است که طی تحقیقات آن‌ها مشخص شد که عمل آوری مجدد در آب سبب بهبود بیشتری در آزمون‌ها نسبت به عمل آوری در هوای مرطوب با شرایط یکسان می‌شود. زمانی که درجه حرارت اعمالی بر بتن کم باشد، پس از عمل آوری مجدد با آب، بخش قابل ملاحظه‌ای از مشخصات مکانیکی بهبود می‌یابد. حال هرچه این درجه حرارت اعمالی بیشتر شود، بهبود بتن کمتر شده و مقدار این بهبود به طرح اختلاط بتن وابسته است.

عمل آوری مجدد در هوا

زمانی که آزمون‌ها در معرض حرارت قرار گیرند و بلافاصله مورد آزمایش واقع شوند، مشخصات مکانیکی ضعیفی از خود نشان می‌دهند. در برخی از تحقیقات، آزمون‌های حرارت داده شده را در هوای مرطوب قرار داده که در اثر این رطوبت واکنش‌هایی در بتن رخ می‌دهد و به دنبال آن مشخصات مکانیکی بتن تغییر می‌نماید.

پون و همکاران [۷] نشان دادند که در حالتی که آزمون‌ها در معرض حرارت 600°C و یا 800°C قرار داده شوند و سپس به مدت یک، چهار و یا هشت هفته در هوای مرطوب عمل آوری مجدد شوند، بخشی از مقاومت اولیه خود را بدست می‌آورند. این مقاومت از مقاومت آزمون‌های حرارت دیده بیشتر بوده و کمتر از مقاومت همان آزمون‌ها پیش از اعمال حرارت است.

عمل آوری مجدد در آب

در این حالت آزمون‌های حرارت داده شده در آب قرار می‌گیرند. به علت آنکه کلسیم هیدروکسید تولید شده ناشی از واکنش کلسیم اکسید و کربن‌دی‌اکسید در آب حل می‌شود، افزایش حجم آن اثری منفی بر آزمون‌های بتنی نخواهد داشت. در این نوع عمل آوری، بسته به مدت زمان قراردهی در آب، مقدار بهبود بتن متفاوت خواهد بود. زمانی که آزمون در آب قرار می‌گیرد، حجم حفرات به مقدار پیش از اعمال حرارت بازگشته اما حجم حفرات

علاوه بر مشخصات مکانیکی بتن، مشخصات دوامی آن نیز پس از عمل‌آوری مجدد بهبود می‌یابد. به طور مثال پی^۱ و همکاران [۲۹] بیان نمودند که نفوذپذیری بتنی که در معرض دمای 70°C قرار گرفته است، حدود 400 برابر نفوذپذیری همان بتن تحت حرارت اعمالی 105°C است. این در حالی است که نفوذپذیری آزمونه پس از عمل‌آوری مجدد به حدود 10 برابر نفوذپذیری بتن تحت حرارت اعمالی 105°C می‌رسد.

لازم به ذکر است که با وجود آنکه عمل‌آوری مجدد، تخلخل و میانگین اندازه‌ی حفرات موجود در بتن را به مقدار پیش از اعمال حرارت باز می‌گرداند اما مشخصات مکانیکی و دوامی به مقدار اولیه خود باز نمی‌گردند. لی و همکاران [۳۰] علت این موضوع را در سه مورد بیان نمودند:

ترک‌های موجود در سنگدانه‌های بتن پس از عمل‌آوری مجدد بهبود نمی‌یابند.

روش‌های مورد استفاده جهت تعیین تخلخل تنها اندازه حفرات را بیان می‌نمایند و در ارتباط با موقعیت آن‌ها صحبتی نمی‌نمایند.

آزمایش‌های به کار رفته جهت تعیین اندازه حفرات، توانایی شناسایی حفرات بزرگتر از 100 میکرومتر را ندارند.

به طور کلی آن‌ها بیان نمودند که بیشترین بهبود مربوط به بتن‌هایی است که دمای اعمالی بر آن‌ها حداکثر 600°C باشد. در دماهای اعمالی بیشتر، محصولات دی‌هیدراته‌شده تغییر یافته که برای بهبود بتن چندان مناسب نیستند.

استفاده از پوزولان‌ها و عمل‌آوری مجدد

همانطور که اشاره شد، زمانی که کلسیم اکسید حاصل از تجزیه‌ی پرتلندیت و کلسیم کربنات با بخار آب واکنش دهد، حدود 44 درصد افزایش حجم می‌دهد. این افزایش حجم سبب آسیب‌های زیادی به بتن می‌شود و ترک‌های جدیدی را ایجاد می‌نماید. بدین منظور محققان به این نتیجه رسیدند که در صورتی که از پوزولان‌ها استفاده نمایند، این اثر کاهش می‌یابد. در این حالت پوزولان با پرتلندیت حاصل از عمل‌آوری مجدد واکنش داده و ژل سیمان تولید می‌شود. این ژل سبب بهبود مشخصات بتن می‌شود.

پون و همکاران [۷] در ارتباط با اثرات خاکستر بادی، دوده‌ی سیلیسی، سرباره و متاکائولن تحقیق نمودند. آن‌ها متوجه شدند پس از عمل‌آوری مجدد، خاکستر بادی و سرباره بر مقاومت فشاری اثر مثبتی داشته اما استفاده از دوده‌ی سیلیسی و متاکائولن سبب کاهش آن می‌شوند. همچنین خاکستر بادی به هیدراته شدن مجدد ژل سیمان کمک می‌نماید. آن‌ها در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که جایگزینی 30 درصد خاکستر بادی به جای سیمان و اعمال دماهای بالا و عمل‌آوری مجدد بر آزمونه‌ها، در مقایسه با بتن بدون خاکستر بادی و با شرایط مشابه، سبب بهبود حدوداً 25 درصد بیشتر در مقاومت فشاری می‌شود. همچنین خاکستر بادی سبب بهبود بیشتری در تخلخل و اندازه‌ی حفرات می‌گردد.

بر خلاف تحقیق پون و همکاران، سرشار^۲ و خوری^۳ [۳۱] بیان نمودند که دوده‌ی سیلیسی مشابه سرباره و خاکستر بادی با پرتلندیت واکنش داده و مانع از تخریب بیشتر بتن می‌شود. همچنین آن‌ها بیان نمودند که زمانی که آزمونه‌های حاوی خاکستر بادی به مدت 180 روز عمل‌آوری مجدد شوند، بهترین عملکرد را نسبت به سایر پوزولان‌ها از خود نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

احتراق روند سوختن ماده‌ی اشتعال‌زا است. برای آنکه احتراق رخ دهد، حضور سه عنصر اصلی ماده‌ی سوختنی، اکسیژن (هوا) و حرارت به صورت همزمان نیاز است. بتن زمانی که تحت حرارت قرار گیرد، مشخصات مکانیکی و ساختار منافذ آن بسته به مقدار دمای اعمالی تغییر می‌نماید. از جمله‌ی این آسیب‌ها می‌توان به قلوه‌کن شدن بتن، تغییر نمودار تنش و کرنش، کاهش مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته اشاره کرد. زمانی که بتن سرد شود، المان‌های سازه‌ای ممکن است توانایی تحمل بارهای وارده بر سازه را نداشته باشند؛ بنابراین سازه زمانی می‌تواند به کاربری خود ادامه دهد که بخش‌های آسیب‌دیده تعمیر شوند. رایج‌ترین روش جهت تعمیر بتن، حذف لایه‌های ضعیف شده‌ی بتن و جایگزینی آن با بتن تازه است. همچنین استفاده از مواد پلیمری مسلح‌شده با

الیاف (FRP) در دهه‌های اخیر رایج شده است. یک روش مناسب دیگر عمل آوری مجدد بتن در هوا و یا آب می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که در این حالت واکنش‌هایی در بتن رخ می‌دهد که در نتیجه‌ی آن بخشی از مشخصات مکانیکی بتن بهبود می‌یابد. در صورتی که مدت عمل آوری مجدد بیشتر باشد، مقدار بهبود بیشتر می‌گردد. عمل آوری در آب سبب بهبود بیشتری نسبت به عمل آوری در هوایی مرطوب در مشخصات مکانیکی بتن می‌گردد. اکثر پوزولان‌ها نیز اثری مثبت در در عمل آوری مجدد پس از قرارگیری در دمای بالا از خود نشان دادند. بنابراین باتوجه به اثرات زیست‌محیطی سیمان، استفاده از پوزولان‌هایی نظیر خاکستر بادی در بتن برای مقابله با آتش پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1]. Dal Pont, S., Durand, S., Schrefler, B.A. (2007). "A multiphase thermo-hydro-mechanical model for concrete at high temperatures — Finite element implementation and validation under LOCA load". *Nucl Eng Des.*, Vol. 237, pp2137–50.
- [2]. Luo, X., Sun, W., Chan, Y.N. (2000). "Residual compressive strength and microstructure of high performance concrete after exposure to high temperature". *Mater Struct Constr.*, Vol. 33(5), pp294–8.
- [3]. Akca, A.H., Özyurt, N. (2018). "Effects of re-curing on microstructure of concrete after high temperature exposure". *Constr Build Mater.*, Vol. 168, pp431–41. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.122>
- [4]. Akca, A.H., Özyurt, N. (2018). "Effects of re-curing on residual mechanical properties of concrete after high temperature exposure". *Constr Build Mater.*, Vol. 159, pp540–52. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.005>
- [5]. Chan, S.Y.N., Peng, G.F., Chan, J.K.W. (1996). "Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature". *Mater Struct Constr.*, Vol. 29(10), pp616–9.
- [6]. Li, Y., Yang, E.H., Tan, K.H. (2019). "Effects of heating followed by water quenching on strength and microstructure of ultra-high performance concrete". *Constr Build Mater.*, Vol. 207, pp403–11. Available from: https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Effects+of+heating+followed+by+wat

er+quenching+on+strength+and+microstructure+of+ultra-high+performance+concrete&btnG=

- [7]. Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y.L. (2001). "Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing". *Cem Concr Res.*, Vol. 31(9), pp1307–18.
- [8]. ISO 834. (1985). "Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction". *Int Organ Stand Switz.*,.
- [9]. Feldman, R.F., Ramachandran, V.S. (1971). "Differentiation of interlayer and adsorbed water in hydrated portland cement by thermal analysis". *Cem Concr Res.*, Vol. 1(6), pp607–20.
- [10]. Taylor, H.F. London; (1997). "Cement chemistry (Vol. 2)". 1997. Telford T, editor.,.
- [11]. Henry, M., Hashimoto, K., Darma, I.S., Sugiyama, T. (2016). "Cracking and chemical composition of cement paste subjected to heating and water re-curing". *J Adv Concr Technol.*, Vol. 14(4), pp134–43.
- [12]. Peng, G.F., Huang, Z.S. (2008). "Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures". *Constr Build Mater.*, Vol. 22(4), pp593–9.
- [13]. Mendes, A., Sanjayan, J.G., Collins, F. (2009). "Long-term progressive deterioration following fire exposure of OPC versus slag blended cement pastes". *Mater Struct Constr.*, Vol. 42(1), pp95–101.
- [14]. Ruta, D. Doctoral dissertation, University of Stuttgart; (2018). "Numerical and experimental study of concrete structures exposed to impact and fire". 2018.
- [15]. Piasta, J., Sawicz, Z., Rudzinski, L. (1984). "Changes in the structure of hardened cement paste due to high temperature". *Matériaux Constr.*, Vol. 17(4), pp291–6.
- [16]. Bažant, Z.P., Kaplan, M.F. (1996). "Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models". London Longman Gr Ltd., pp416.
- [17]. Di Maio, A., Giaccio, G., Zerbino, R. (1999). "Relación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico de hormigones expuestos d altas temperaturas". *Memorias de CONPAT.*, Vol. 99, pp331–8.
- [18]. Ulm, F.J., Coussy, O., Bažant, Z.P. (1999). "The "Chunnel" fire. I: Chemoplastic softening in rapidly heated concrete". *J Eng Mech.*, Vol. 125(3), pp272–82.
- [19]. Kanema, M., De Moraes, M.V.G., Noumowe, A., Gallias, J.L., Cabrillac, R. (2007). "Experimental and numerical studies of thermo-hydrous transfers in concrete exposed to high temperature". *Heat Mass Transf.*, Vol. 44(2), pp149–64.
- [20]. Chang, Y.F., Chen, Y.H., Sheu, M.S., Yao, G.C. (2006). "Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures". *Cem Concr Res.*, Vol. 36(10), pp1999–2005.
- [21]. Lea, F.C., Stradling, R.E. (1922). "The resistance to fire of concrete and reinforced concrete". *ournal Soc Chem Ind.*, Vol. 41(18), pp395R–396R.
- [22]. Fares, H., Remond, S., Noumowe, A., Cousture, A. (2010). "High temperature behaviour of self-consolidating concrete. Microstructure and physicochemical properties". *Cem Concr Res.*, Vol. 40(3), pp488–96. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.006>
- [23]. Campbell-Allen, D., Desai, P.M. (1967). "The influence of aggregate on the behaviour of concrete at elevated temperatures". *Nucl Eng Des.*, Vol. 6(1), pp65–77.

- [24]. Harada,T., Takeda,J., Yamane,S., Furumura,F.J.S.P. (1972). "Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures". *Spec Publ.*, Vol.34, pp377–406.
- [25]. Henry,M., Darma,I.S., Sugiyama,T. (2014). "Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT". *Constr Build Mater.*, Vol.67, pp37–46. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.007>
- [26]. Li,L., Jia,P., Dong,J., Shi,L., Zhang,G., Wang,Q. (2017). "Effects of cement dosage and cooling regimes on the compressive strength of concrete after post-fire-curing from 800 °C". *Constr Build Mater.*, Vol.142, pp208–20. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.053>
- [27]. Crook,D.N., Murray,M.J. (1970). "Regain of strength after firing of concrete". *Magazine of Concrete Research*, 22(72)., pp149–54.
- [28]. Henry,M., Suzuki,M., Kato.,Y. (2011). "Behavior of fire-damaged mortar under variable re-curing conditions". *ACI Mater J.*, Vol.108(3), pp281–9.
- [29]. Pei,Y., Agostini,F., Skoczylas,F. (2017). "Rehydration on heat-treated cementitious materials up to 700 °C-coupled transport properties characterization". *Constr Build Mater.*, Vol.144, pp650–62. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.100>
- [30]. Li,L., Shi,L., Wang,Q., Liu,Y., Dong,J., Zhang,H., et al. (2020). "A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing". *Constr Build Mater.*, Vol.237, pp117564. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117564>
- [31]. Sarshar,R., Khoury,G.A. (1993). "Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures". *Mag Concr Res.*, Vol.45(162), pp51–61.

مطالعه و بررسی اثر تقویت دیوار برشی بتنی دارای باز شو توسط ورق‌های *GFRP* و *CFRP* تحت تحلیل اجزاء محدود *FEM*



سیدعلی موسوی داودی
فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه
دانشکده فنی مهندسی عمران
مرکز آموزش عالی طبری
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

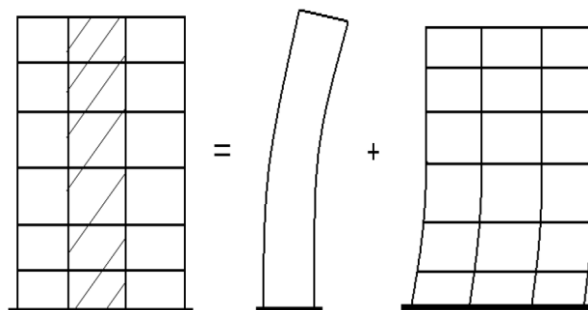
در مهندسی سازه، دیوار برشی دیواری است که از قطعات مهارتی (قطعات برشی) ساخته شده و وظیفه ی خنثی کردن اثر بارهای جانبی وارد شده بر سازه را بر عهده دارد. دیوار برشی برای مقابله با بارهای جانبی متداولی، همچون بار باد و بار زلزله طراحی می شود. طبق آیین نامه های ساختمانی، تمام دیوارهای خارجی در سازه هایی، با اسکلت بتنی و فولادی، باید مقید شوند. دیوارهای برشی نوعی از سیستم های سازه ای است، که مقاومت جانبی ساختمان یا سازه را تأمین می کند، در بعضی از مواقع بسته به نوع طرح و نقشه معماری، بازشوهایی در دیوار برشی با اشکال هندسی متغیر ایجاد می شود، از این رو این باز شو باعث تضعیف عملکرد دیوارشی در سیستم سازه می شود، از این رو در این پژوهش بمنظور بررسی اثر تقویتی ورق های *GFRP* و *CFRP* بر روی باز شوهای ایجاد شده در دیوار برشی تحت تحلیل اجزاء محدود از ۸ نمونه مطالعاتی با باز شوهای دایره ای و مربعی با ابعاد مختلف استفاده می شود بمنظور مدلسازی عددی از برنامه اجزای محدود آباکوس استفاده شد، بعد از انجام مدلسازی و تحلیل عددی نتیجه شد که اثر الیاف *CFRP* نسبت به نمونه *GFRP* سبب عملکرد بهتر رفتار دیوار برشی شد. کلمات کلیدی: دیوار برشی بتنی، الیاف *CFRP*، الیاف *GFRP*، اجزاء محدود.

۱- مقدمه

دیوارهای سازه ای یا دیوارهای برشی معمولاً برای تحمل بخش اعظمی از بار جانبی استفاده می شوند. سیستم های مقاوم در برابر بار جانبی در سازه های بتنی شامل قاب خمشی، دیوار برشی و یا ترکیب آن دو دسته است. استفاده کردن از قاب خمشی ب عنوان عنصر مقاوم در برابر بار جانبی نیازمند در نظر گرفتن تمهیدات خاصی برای افزایش

شکل پذیری آن است که عموماً مقرارتی دست و پاگیر و دارای جزئیات زیاد است و اجرای آن نیازمند وجود نظارت قوی در کارگاه است. بنابراین استفاده کردن از دیوار برشی به عنوان عنصر مقاوم در برابر بار جانبی در ترکیب با قاب خمشی گزینه ای مناسب برای سیستم بایری جانبی ساز است [۱-۲]. از سوی دیگر عملکرد دیوارهای برشی در زلزله های به وقوع پیوسته نشان دهنده قدرت بالای جذب انرژی این عناصر است به شرط اینکه هنگام طراحی و

اجرای این عناصر بعضی نکات خاص مانند در نظر گرفتن اجزای لبه و درگیری ارماتورهای طولی رعایت شده باشد. عملکرد دیوار برشی به صورت یک تیر طره عمیق است که در صورتی که دیوار کوتاه باشد عموماً برش و اگر دیوار بلند باشد عموماً خمش تعیین کننده است. ولی به هر حال دیوار برشی باید برای خمش و برای برش طراحی و کنترل شود. عملکرد مناسب دیوارهای برشی در سازه های نسبتاً بلند نمود بیشتری پیدا می کند [۳]. در این سازه ها دیوار برشی به صورت نیم تیر طره بلند عمل می کند و بنابراین تغییرشکل خمشی است. از سویی دیگر قاب خمشی دارای تغییر شکل های برشی است [۴-۵]. در این حالت اندرکنش قاب خمشی و دیوار برشی باعث می شود در پایین سازه که تغییرشکل های برشی قاب خمشی زیاد و تغییر شکل های خمشی دیوار برشی کم است، تغییرشکل سازه توسط برش محدود شود و در مقابل در بالای سازه که تغییرشکل های خمشی زیاد و تغییرشکل های برشی کم است تغییرشکل های سازه توسط قاب خمشی محدود شود و به این ترتیب می توان تغییرشکل های سازه های بلند مرتبه را تا حدی کنترل و محدود کرد [۶-۷].



شکل ۱- نمایی از عملکرد دیوار برشی [۷]

Ayman و همکاران در سال ۲۰۱۸ آزمایشی را بر روی ۸ تیر T شکل تقویت شده با خاموت های FRP انجام دادند که در ۶ تای آنها از خاموت فولادی استفاده نشده بود که در این آزمایش از میلگرد $CFRP$ استفاده نمودند و آنها را توسط رزین در داخل شیارها تثبیت کردند و مشاهده کردند که مقاومت برشی تیرها در مقابل برش در غیاب

خاموت های فولادی تا حدود ۱۰۶ درصد افزایش پیدا کرد و حتی درصدی از میلگردها به حد نهایی مقاومت خود نرسیده بودند [۸].

$De Lorenzis$ و همکاران در سال ۲۰۱۷ آزمایشاتی را بر روی ۹ تیر انجام دادند که این تیرها به صورت مقطع عرضی مستطیلی بودند و یکی از این نمونه ها به صورت تیر کنترل و یکی از آنها با ورق های FRP تقویت شده بود و ۵ تا از نمونه ها با میلگردهای $NSM FRP$ تقویت شده است ولی با زوایای ۹۰ درجه و ۴۵ درجه و با فواصل گوناگون و دو رزین مختلف و دو تا از نمونه ها را با تسمه های نواری FRP و در دو فاصله متفاوت و دو زاویه مختلف و با یک نوع رزین تقویت شده بودند. نتایجی که از این آزمایش بدست آمده است این که ظرفیت باربری تیری که با میلگرد $NSM FRP$ تقویت شده است در همه حالتها بیشتر از حالت معمولی می باشد ولی در حالتیکه فاصله بین خاموتهای $FRP 75mm$ می باشد و خاموت های FRP به صورت قائم کار گذاشته شده اند، بیشترین مقدار افزایش مقاومت را داریم ضمناً نتیجه دیگری که بدست آمده بود این بود که نوع رزین به کار رفته شده جهت پرکردن شیار بسیار در میزان باربری تاثیر گذار می باشد [۹].

۲- مواد و روش تحقیق

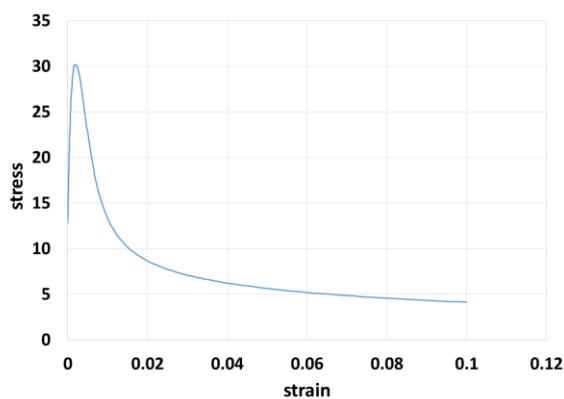
۲-۱ معرفی نمونه های تحقیق

به منظور بررسی مطالعه و بررسی اثر تقویت دیوار برشی دارای بازشو توسط ورق های $GFRP$ و $CFRP$ تحت تحلیل اجزاء محدود FEM ، لازم به ذکر می باشد که تمامی نمونه ها توسط برنامه آباکوس^۱ مورد مدلسازی و تحلیل قرار خواهند گرفت در جدول (۱) مشخصات مدل های مورد آزمایش و پارامترهای موثر ارائه شده است.

^۱ Abaqus

جدول ۱- مشخصات و جزئیات نمونه‌های مطالعاتی

ردیف	نام دیوار برشی	ابعاد بازشو	نوع بازشو	محل بازشو
۱	GFRP-Sq-۱۵۰	۱۵۰ cm	مربع	یک سوم دهانه تیر
۲	GFRP-Sq-۲۰۰	۲۰۰ cm	مربع	یک سوم دهانه تیر
۳	GFRP-C-۱۵۰	۱۵۰ cm	دایره	یک سوم دهانه تیر
۴	GFRP-C-۲۰۰	۲۰۰ cm	دایره	یک سوم دهانه تیر
۵	CFRP-Sq-۱۵۰	۱۵۰ cm	مربع	یک سوم دهانه تیر
۶	CFRP-Sq-۲۰۰	۲۰۰ cm	مربع	یک سوم دهانه تیر
۷	CFRP-C-۱۵۰	۱۵۰ cm	دایره	یک سوم دهانه تیر
۸	CFRP-C-۲۰۰	۲۰۰ cm	دایره	یک سوم دهانه تیر



شکل ۲- نمودار تنش-کرنش بتن

۲-۲ معرفی مشخصات مصالح مصرفی

در این پژوهش از بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال استفاده شده است که رفتار از خاصیت الاستیک و پلاستیک تبعیت می‌کند. در شکل ۲ نمودار تنش-کرنش بتن نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی بتن مصرفی

نام ماده	دانشیه Kg/m^3	نسبت پواسون	مدول یانگ (Gpa)	مقاومت فشاری (Mpa)	کرنش کششی اولیه
بتن	2485	0.35	33	30	0.0004

در این تحقیق میلگرد فولادی از نوع S400 است. برای تعریف ساده‌تر رفتار غیرخطی مکانیکی میلگردهای فولادی، منحنی تنش-کرنش فولاد به صورت دو خطی فرض شده است. بنابراین کافی است دو شیب به عنوان مدل الاستیسیته اولیه و ثانویه و مقدار تنش جاری شدن مشخص گردد. مشخصات فولاد S400 مصرفی استفاده شده در این مدل‌سازی در جدول ۳ تا ۷ نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات مکانیکی میلگرد

نوع میلگرد	مدول الاستیسیته (Mpa)	جرم مخصوص Kg/m^3	ضریب پواسون
S400	$2.05E10^5$	7850	0.3

جدول ۴- مشخصات ایزوتروپیک خطی مکانیکی فولاد

مدول الاستیسیته (Mpa)	ضریب پواسون
$2.05E10^5$	0.3

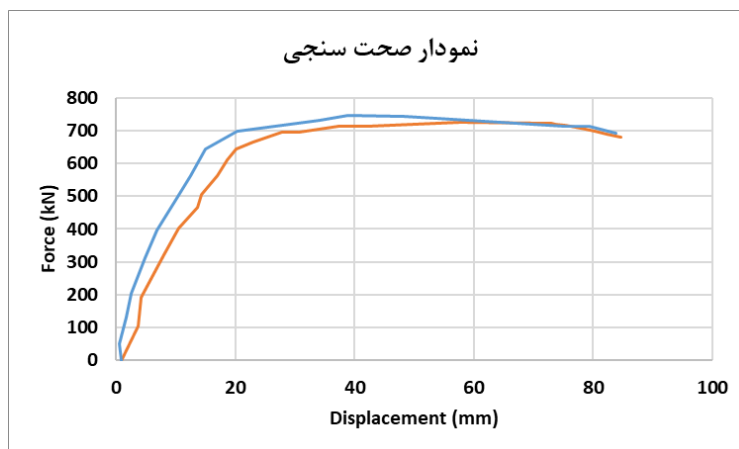
جدول ۵- مشخصات ایزوتروپیک دو خطی مکانیکی فولاد

کرنش	تنش (MPa)
0	465
0.12	600

جهت صحت نمونه نرم افزاری برنامه آباکوس از مطالعات آزمایشگاهی Wang و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۷ استفاده گردید، بعد از مدلسازی نمونه آزمایشگاهی مطالعات انجام شده، در نرم افزار آباکوس و مقایسه دو نمودارهای هیستریزیس دیدیم که اختلاف این نمودارهای دو نمونه بسیار کم بوده و داری اختلاف ناچیزی در حدود ۳ درصد هستند.



شکل ۳- شکل هندسی نمونه صحت سنجی شده دیوار برشی بتنی مطالعات آزمایشگاهی Wang و همکاران



شکل ۴- نمودار صحت سنجی نمونه آزمایشگاهی Wang و همکاران و تحلیل عددی

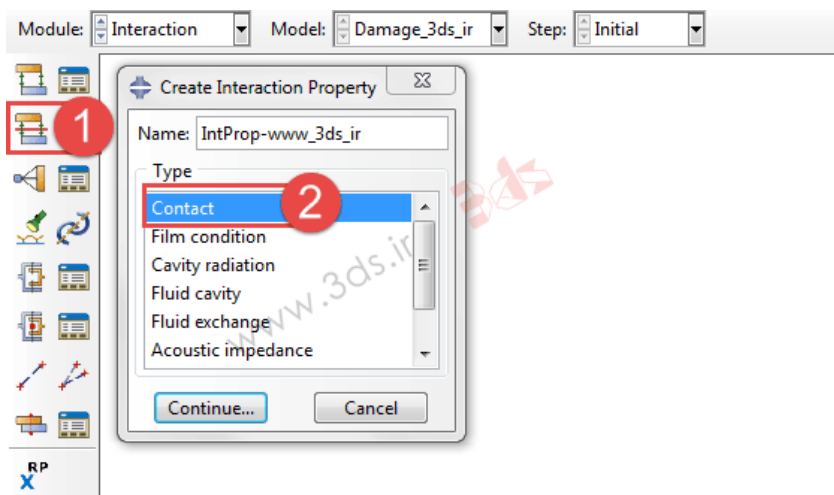
۲- روند مدلسازی

برای مدلسازی قطعات بتنی از المان سالید^۱ استفاده شد. و الیاف فولادی از المان وایر^۲ استفاده شد. مدول الاستیسیته فولاد ۱۹۹ گیگاپاسکال و بتن مورد استفاده در این مدلسازی از بتن با رفتار محصور شده با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال

^۱ Solid

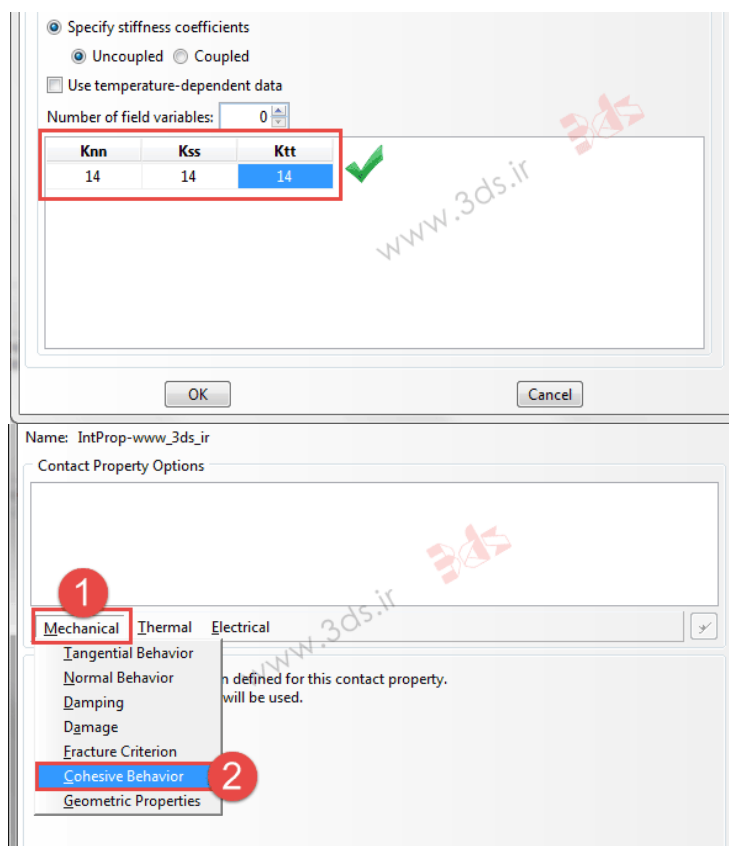
^۲ Wire

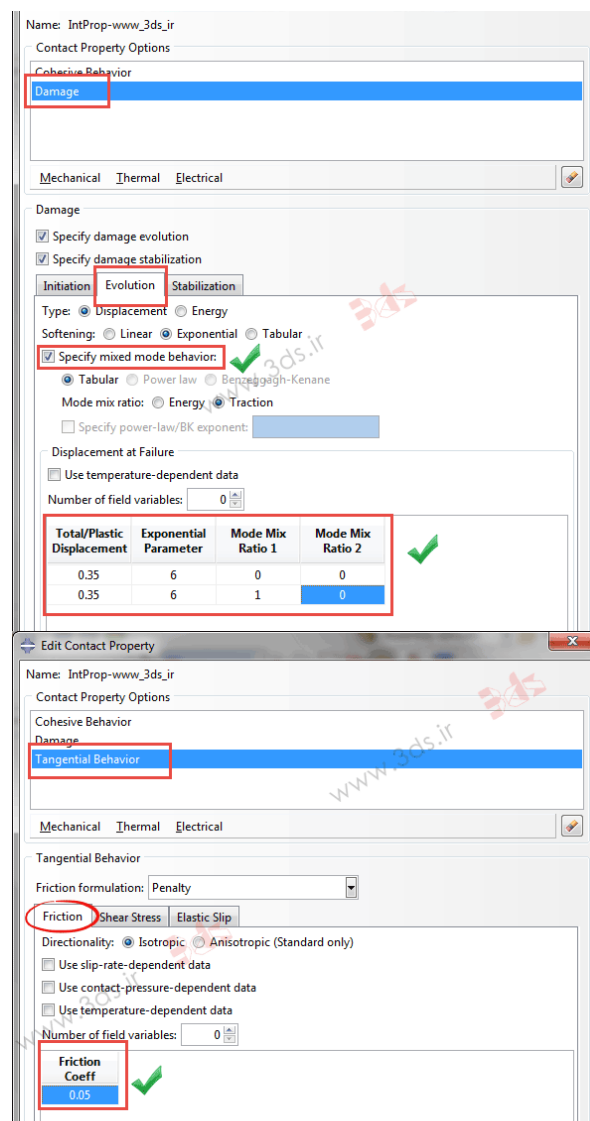
برای نمونه‌ها استفاده شد است. بعد از تعریف مشخصات مصالح بتن و الیاف فولاد در این ماژول اختصاص مصالح را انجام می‌شود ، بعد از تعریف مصالح و اختصاص درست مدل مورد نظر در محیط گرافیکی برنامه آباکوس به رنگ سبز در می‌آید، در شکل ۷ می‌توان اختصاص مصالح به مدل مورد نظر را مشاهده کرد. جهت مدل‌سازی الیاف *FRP* از المان *Shell* استفاده می‌شود.



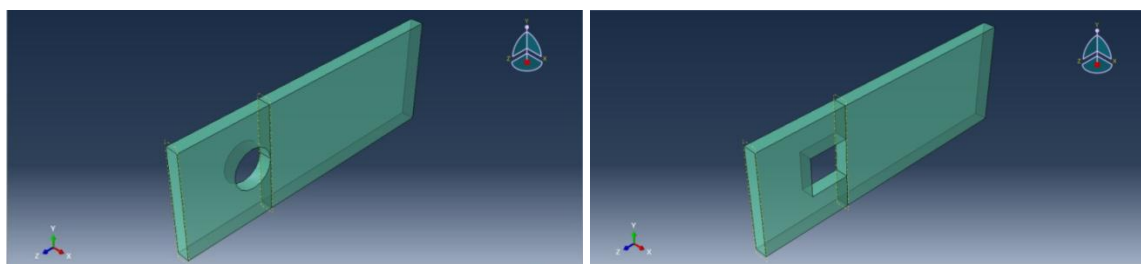
شکل ۵- نمایی از ماژول Interaction

برای تعریف رابطه لغزش-اتصال در مدل‌سازی رفتار چسبنده بین سطوح، بر روی گزینه *Cohesive Behavior* از قسمت *Mechanical* در آباکوس کلیک کنید.





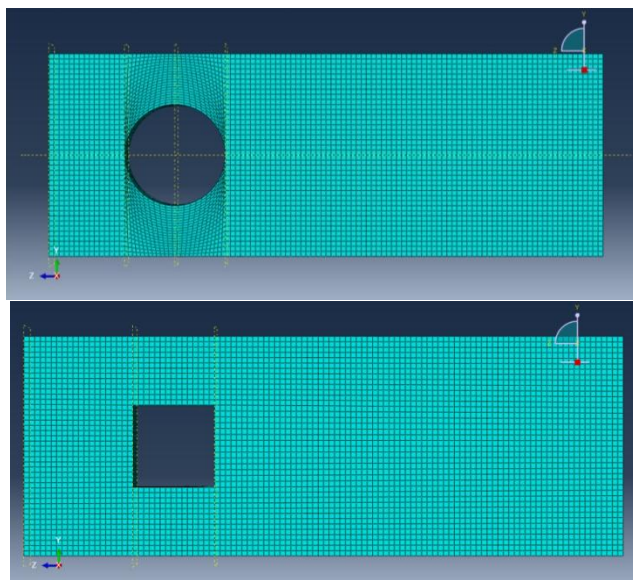
شکل ۶- مشخصات الیاف در محیط آباکوس



شکل ۷- نمای مدل در محیط گرافیکی اختصاص مصالح

از ماژول اسمبلی^۱ برای مونتاژ مدل استفاده می‌شود، در این قسمت به تولید قسمت‌های هر قسمت از مدل پرداخته می‌شود و آنها مونتاژ می‌گردد. بعد از اتمام مونتاژ مدل می‌توان شکل نهایی مدل را در محیط گرافیکی اسمبلی مشاهده کرد.

در ماژول مش^۳ کار مش‌بندی مدل انجام می‌شود، اندازه مش‌ها اختصاص داده شده ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد، در شکل ۱۰ نحوه مش‌بندی‌ها ارائه شده است.

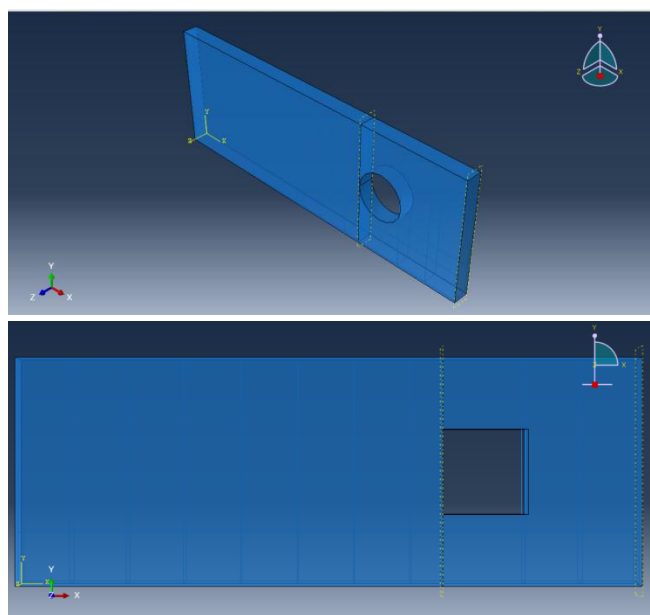


شکل ۱۰- مش بندی مدل در ماژول مش در برنامه آباکوس

۳- نتایج تحلیل

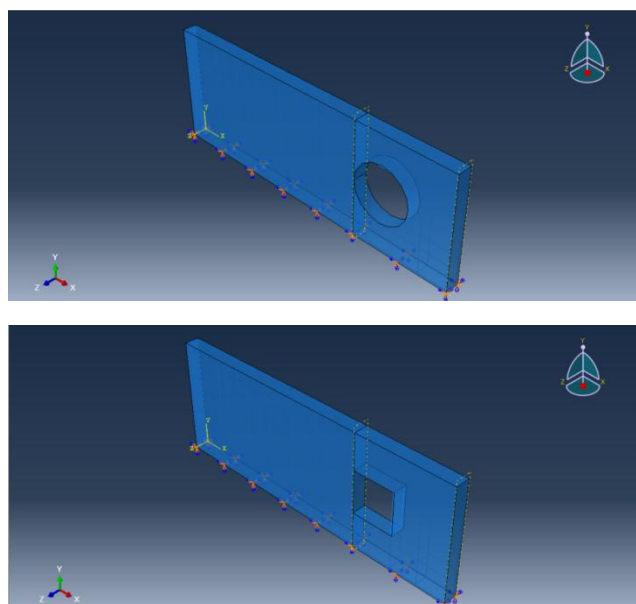
بعد از انجام تحلیل مدل‌های مطالعاتی در محیط ویزولیشن^۴ می‌توان کانتورهای پارامترهای تحلیلی مختلف را مشاهده کرد، در شکل زیر کانتور تغییرمکان نمونه مدل‌های مطالعاتی را مشاهده کرد.

در شکل ۱۱ کانتور توزیع تغییرمکان نمونه‌های مطالعاتی ارائه شده است، با توجه به مقایسه اشکال مشاهده گردید که مقدار تغییرمکان و کرنش ایجاد شده در مدل با بازشوهای کوچکتر نسبت به نمونه با باشو بزرگتر تغییرمکان کمتری در اطراف بازشوها ایجاد شده است.



شکل ۸- نمای مدل در محیط گرافیکی اسمبلی

بمنظور تعریف خواص بین سطوح از ماژول اینترکشن^۱ استفاده می‌شود، در این محیط خاصیت فیزیکی تماس بین سطوح تعریف می‌شود. همچنین به منظور اعمال بارگذاری فشاری در ماژول بارگذاری^۲ نوع بارگذاری فشاری برای مدل تعریف می‌شود. در شکل ۹ می‌توان نواحی تعریف شده بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها را مشاهده کرد.



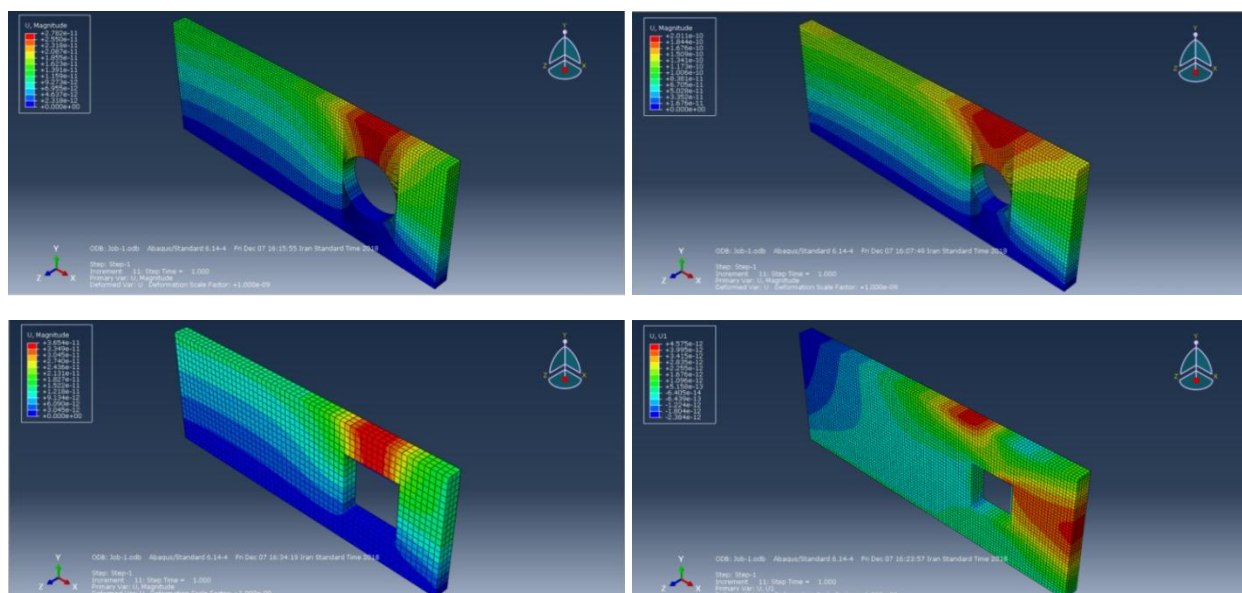
شکل ۹- محل اعمال بار در محیط بارگذاری برنامه آباکوس

³ Mesh

⁴ Visualization

¹ Intraction

² Load

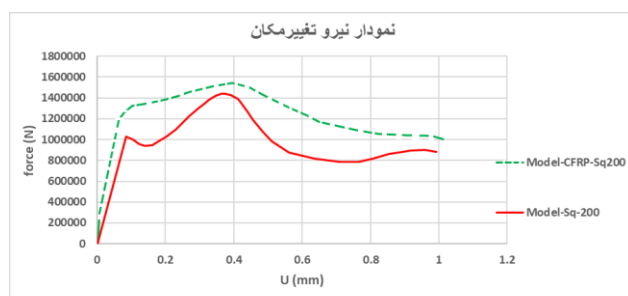


شکل ۱۱- توزیع تغییرمکان دیوار برشی

بردن ورق های *cfrp* نسبت به حالت با ورق *GFRP* مشاهده شد که سختی نمونه *Cfrp-Sq150* نسبت به نمونه *Sq150* ۱۱,۳۲ درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری مقطع نمونه *Cfrp-Sq150* نسبت به نمونه *Sq150* نیز افزایش ۱۸,۸۲ درصد افزایش داشت.

۴-۲ قیاس مدل های *GFRP Sq200* و *Cfrp-Sq200*

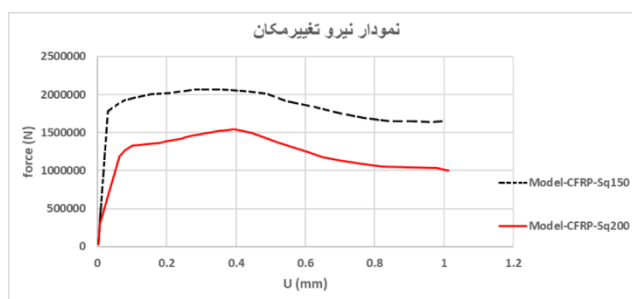
بعد از انجام تحلیل مدل های *GFRPSq200* و *Cfrp-Sq200* در محیط برنامه آباکوس می توان نمودار پارامترهای تحلیلی مختلف را مشاهده کرد، در شکل ۱۳ می توان مقایسه نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه *GFRPSq200* و *Cfrp-Sq200* را مشاهده کرد.



شکل ۱۳- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان

۴-۱ قیاس مدل های *GFRPSq150* و *Cfrp-Sq150*

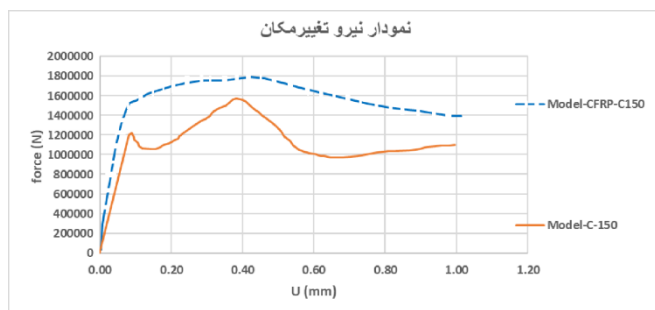
بعد از انجام تحلیل مدل های *GFRPSq150* و *Cfrp-Sq150* در محیط برنامه آباکوس می توان نمودار پارامترهای تحلیلی مختلف را مشاهده کرد، در شکل ۱۲ می توان مقایسه نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه *GFRPSq150* و *Cfrp-Sq150* را مشاهده کرد.



شکل ۱۲- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان

با توجه به مقایسه نمودار نیرو تغییرمکان مدل های *GFRP Sq150* و مدل *Cfrp-Sq150* مشاهده شد، با به کار بردن ورق های تقویتی *cfrp* در نمونه *Cfrp-Sq150* شاهد افزایش ۲۱,۳۹ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه *GFRP Sq150* شده است. همچنین نیز با به کار

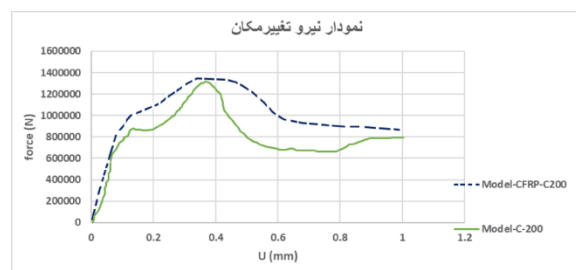
مقطع نمونه *Cfrp-C150* نسبت به نمونه *GFRP C150* نیز افزایش ۱۰,۳۴ درصد افزایش داشت.



شکل ۱۵- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان

۴-۴ قیاس مدل‌های *GFRP-C200* و *Cfrp-C200*

بعد از انجام تحلیل مدل‌های *GFRPC200* و *Cfrp-C200* در محیط برنامه آباکوس می‌توان نمودار پارامترهای تحلیلی مختلف را مشاهده کرد، در شکل ۱۶ می‌توان مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه *GFRP C200* و *Cfrp-C200* را مشاهده کرد.



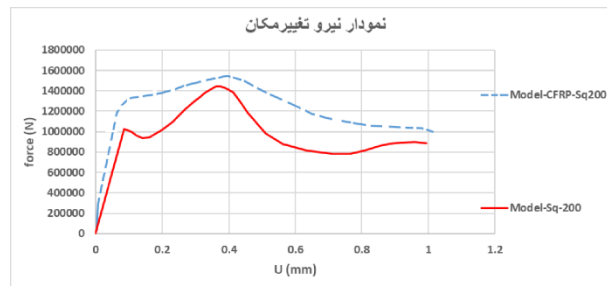
شکل ۱۶- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان مدل

با توجه به مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان مدل‌های *GFRPC200* و مدل *Cfrp-C200* مشاهده شد، با به کار بردن ورق‌های تقویتی *Cfrp* در نمونه *Cfrp-C200* شاهد افزایش ۲۵,۳۹ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه *GFRPC200* شده است. همچنین نیز با به کار بردن ورق‌های *cfrp* نسبت به حالت با ورق *Gfrp* مشاهده شد که سختی نمونه *Cfrp-C200* نسبت به نمونه *Cfrp-C150* ۱۰,۴۱ درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری مقطع نمونه *Cfrp-C200* نسبت به نمونه *C200* نیز افزایش ۱۶,۵۲ درصد افزایش داشت.

با توجه به مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان مدل‌های *Sq200* و مدل *Cfrp-Sq200* مشاهده شد، با به کار بردن ورق‌های تقویتی *Cfrp* در نمونه *Cfrp-Sq200* شاهد افزایش ۲۳,۶۲ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه *GFRPSq200* شده است. همچنین نیز با به کار بردن ورق‌های *cfrp* نسبت به حالت با ورق *GFRP* مشاهده شد که سختی نمونه *Cfrp-Sq200* نسبت به نمونه *A ۱۲,۵۲* درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری مقطع نمونه *Cfrp-Sq200* نسبت به نمونه *Sq200* نیز افزایش ۱۸,۸۲ درصد افزایش داشت.

۴-۳ قیاس مدل‌های *GFRPC150* و *Cfrp-C150*

بعد از انجام تحلیل مدل‌های *GFRPC150* و *Cfrp-C150* در محیط برنامه آباکوس می‌توان نمودار پارامترهای تحلیلی مختلف را مشاهده کرد، در شکل ۱۴ می‌توان مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه *GFRPC150* و *Cfrp-C150* را مشاهده کرد.

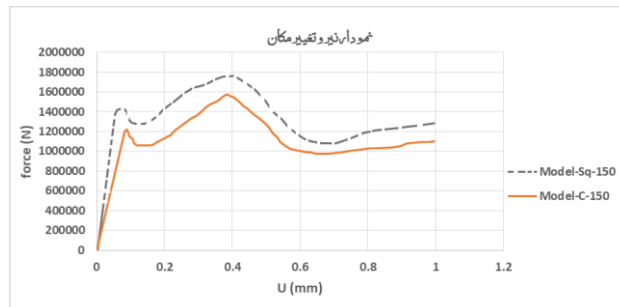


شکل ۱۴- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان

با توجه به مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان مدل‌های *GFRP C150* و مدل *Cfrp-C150* مشاهده شد، با به کار بردن ورق‌های تقویتی *Cfrp* در نمونه *Cfrp-C150* شاهد افزایش ۲۷,۲۶ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه *C150* شده است. همچنین نیز با به کار بردن ورق‌های *Cfrp* نسبت به حالت با ورق *GFRP* مشاهده شد که سختی نمونه *Cfrp-C150* نسبت به نمونه *A ۱۴,۸۵* درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری

۴-۵ قیاس مدل‌های $GFRP\ C150$ و $GFRP\ Sq150$

بعد از انجام تحلیل مدل‌های $GFRP\ C150$ و $Sq150$ در محیط برنامه آباکوس می‌توان نمودار پارامترهای تحلیلی مختلف را مشاهده کرد، در شکل ۱۷ می‌توان مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه $GFRP\ C150$ و $GFRP\ Sq150$ را مشاهده کرد.

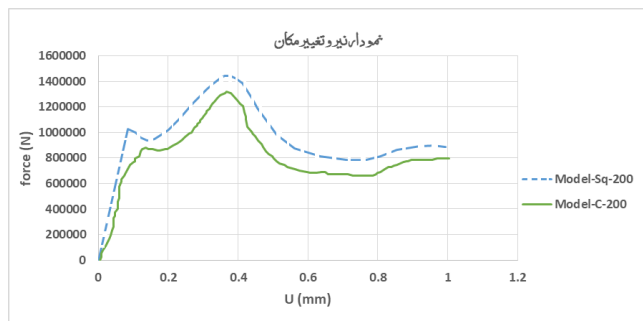


شکل ۱۷- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان

با توجه به مقایسه نمودار نیرو تغییر مکان مدل‌های $GFRP\ C150$ و مدل $GFRP\ Sq150$ مشاهده شد، با به کار باز شو مربعی در نمونه $GFRP\ Sq150$ شاهد افزایش ۱۷٫۸۲ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه با باز شو دایره‌ای $GFRP\ C150$ شده است. همچنین نیز با ایجاد بازشوی مربعی با ابعاد ۱۵۰ میلیمتر نسبت به باز شوی دایره‌ای با قطر ۱۵۰ میلیمتر مشاهده شد که سختی نمونه $GFRP\ Sq150$ نسبت به نمونه $A\ ۸٫۴۱\%$ درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری مقطع نمونه $GFRP\ Sq150$ نسبت به نمونه $GFRP\ C150$ نیز افزایش ۱۲٫۴۲ درصد افزایش داشت.

۴-۶ قیاس مدل‌های $GFRPC200$ و $GFRP\ Sq200$

بعد از انجام تحلیل مدل‌های $GFRP\ C200$ و $Sq200$ در محیط برنامه آباکوس می‌توان نمودار پارامترهای تحلیلی مختلف را مشاهده کرد، در شکل ۱۸ می‌توان مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه $GFRP\ C200$ و $GFRP\ Sq200$ را مشاهده کرد.



شکل ۱۸-مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان مدل

با توجه به مقایسه نمودار نیرو تغییر مکان مدل‌های $GFRP\ C200$ و مدل $GFRP\ Sq200$ مشاهده شد، با به کار باز شو مربعی در نمونه $GFRP\ Sq200$ شاهد افزایش ۱۲٫۷۲ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه با باز شو دایره‌ای $GFRP\ C200$ شده است. همچنین نیز با ایجاد بازشوی مربعی با ابعاد ۲۰۰ میلی‌متر نسبت به بازشوی دایره‌ای با قطر ۲۰۰ میلی‌متر مشاهده شد که سختی نمونه $GFRP\ Sq200$ نسبت به نمونه $A\ ۸٫۴۱\%$ درصد افزایش یافت، همچنین شکل‌پذیری مقطع نمونه $GFRP\ Sq200$ نسبت به نمونه $GFRP\ C200$ نیز افزایش ۱۶٫۵۲ درصد افزایش داشت.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مقایسه نمودار نیرو تغییر مکان مدل‌های $GFRP\ Sq150$ و مدل $Cfrp-Sq150$ مشاهده شد، با به کار بردن ورق‌های تقویتی $cfrp$ در نمونه $Cfrp-Sq150$ شاهد افزایش ۲۱٫۳۹ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه $GFRP\ Sq150$ شده است. همچنین نیز با به کار بردن ورق‌های $cfrp$ نسبت به حالت با ورق $GFRP$ مشاهده شد که سختی نمونه $Cfrp-Sq150$ نسبت به نمونه $GFRP\ Sq150$ ۱۱٫۳۲ درصد افزایش یافت، همچنین شکل‌پذیری مقطع نمونه $Cfrp-Sq150$ نسبت به نمونه $GFRP\ Sq150$ نیز افزایش ۱۸٫۸۲ درصد افزایش داشت.

با توجه به مقایسه نمودار نیرو تغییر مکان مدل های $GFRP Sq200$ و مدل $Cfrp-Sq200$ مشاهده شد، با به کار بردن ورق های تقویتی $cfrp$ در نمونه $Cfrp-Sq200$ شاهد افزایش ۲۳،۶۲ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه $GFRP Sq200$ شده است. همچنین نیز با به کار بردن ورق های $cfrp$ نسبت به حالت ورق $cfrp$ مشاهده شد که سختی نمونه $Cfrp-Sq200$ نسبت به نمونه $12.52A\%$ درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری مقطع نمونه $Cfrp-Sq200$ نسبت به نمونه $GFRP Sq200$ نیز افزایش ۱۸،۸۲ درصد افزایش داشت.

با توجه به مقایسه نمودار نیرو تغییر مکان مدل های $C150$ و مدل $Cfrp-C150$ مشاهده شد، با به کار بردن ورق های تقویتی $CFRP$ در نمونه $Cfrp-C150$ شاهد افزایش ۲۷،۲۶ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه $GFRPC150$ شده است. همچنین نیز با به کار بردن ورق های $cfrp$ نسبت به حالت بدون ورق $CFRP$ مشاهده شد که سختی نمونه $Cfrp-C150$ نسبت به نمونه $14.85A\%$ درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری مقطع نمونه $Cfrp-C150$ نسبت به نمونه $GFRPC150$ نیز افزایش ۱۰،۳۴ درصد افزایش داشت.

با توجه به مقایسه نمودار نیرو تغییر مکان مدل های $GFRP C200$ و مدل $Cfrp-C200$ مشاهده شد، با به کار بردن ورق های تقویتی $cfrp$ در نمونه $Cfrp-C200$ شاهد افزایش ۲۵،۳۹ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه $GFRPC200$ شده است. همچنین نیز با به کار بردن ورق های $cfrp$ نسبت به حالت ورق $GFRP$ مشاهده شد که سختی نمونه $Cfrp-C200$ نسبت به نمونه $10.41A\%$ درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری مقطع نمونه $Cfrp-C200$ نسبت به نمونه $GFRP C200$ نیز افزایش ۱۶،۵۲ درصد افزایش داشت.

با توجه به مقایسه نمودار نیرو تغییر مکان مدل های $GFRPC150$ و مدل $Sq150GFRP$ مشاهده شد، با به کار f باز شو مربعی در نمونه $GFRPSq150$ شاهد افزایش ۱۷،۸۲ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه با باز شو دایره ایی $GFRPC150$ شده است. همچنین نیز با ایجاد باز شوی مربی با ابعاد ۱۵۰ میلیمتر نسبت به باز شوی دایره ایی با قطر ۱۵۰ میلیمتر مشاهده شد که سختی نمونه $Sq150GFRP$ نسبت به نمونه $8.41A\%$ درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری مقطع نمونه $GFRP Sq150$ نسبت به نمونه $GFRP C150$ نیز افزایش ۱۲،۴۲ درصد افزایش داشت.

با توجه به مقایسه نمودار نیرو تغییر مکان مدل های $GFRPC200$ و مدل $GFRP Sq200$ مشاهده شد، با به کار باز شو مربعی در نمونه $GFRPSq200$ شاهد افزایش ۱۲،۷۲ درصدی مقاومت مقطع نمونه نسبت به نمونه با باز شو دایره ایی $GFRP C200$ شده است. همچنین نیز با ایجاد باز شوی مربی با ابعاد ۲۰۰ میلیمتر نسبت به باز شوی دایره ایی با قطر ۲۰۰ میلیمتر مشاهده شد که سختی نمونه $GFRP Sq200$ نسبت به نمونه $8.41A\%$ درصد افزایش یافت، همچنین شکل پذیری مقطع نمونه $GFRP Sq200$ نسبت به نمونه $GFRP C200$ نیز افزایش ۱۶،۵۲ درصد افزایش داشت.

۵- مراجع

[۱] بهرنیا، کیاچهر و علیرضا سیاح، ۱۳۹۶، بررسی اثر تقویتی ورقهای FRP بر ظرفیت نهایی دیوار برشی بتنی دارای

بازشو با استفاده از روش اجزاء محدود، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد

[۲] پناهی بروجنی، مینو، ۱۳۹۵، معرفی روش نوین مقاوم سازی تیربتنی با استفاده از الیاف پلیمری FRP به روش نزدیک به سطح NSM، اولین کنفرانس ملی بنای ماندگار، مشهد، معاونت شهرسازی و معماری شهرداری مشهد

[۳] کریمی، جمال الدین و امید کهنه پوشی، ۱۳۹۸، ارزیابی و مقاوم سازی دیوار برشی بتنی با استفاده از ورقهای پلیمری کربنی مسلح شده به الیاف CFRP، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و زیرساخت های شهری، تبریز، دبیرخانه دائمی کنفرانس

[۴] شاکری بروجنی، رضا؛ حامد صفاری و هومن ابراهیم پور کومله، ۱۳۹۸، بررسی تحلیلی تاثیر جنس FRP ها بر روی مقاوم سازی تیرهای بتنی به روش NSM، کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در علوم، مهندسی و فناوری با محوریت پژوهش های نیاز محور، مشهد، مؤسسه فراز اندیشان دانش بین الملل

- [5] Sinan Altina, Yağmur Kopramanb, Mehmet Baranc. Strengthening of RC walls using externally bonding of steel strips. *Engineering Structures*. Volume 49, April 2016, Pages 686–695
- [6] Teng JG, De Lorenzis L, Wang B, Rong L, Wong TN, Lam L. "Debonding failures of RC beams strengthened with near-surface mounted CFRP strips". *J Compos Constr, ASCE* 2019;102:92– 105
- [7] Blaschko M. Zum tragverhalten von betonbauteilen mit in schlitze eingeklebten CFK-lamellen. Bericht 2001 aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, TU Mu'nchen, 2018. 147 pp [in German].
- [8] Ayman S. Mosallam a, Ahmed Nasr. Structural performance of RC shear walls with post-construction openings strengthened with FRP composite laminates. *Composites Part B xxx* (2017) 1-17
- [9] De Lorenzis L. "Strengthening of RC structures with near surface mounted FRP rods". PhD Thesis, Department of Innovation Engineering, University of Lecce, Italy, 2018.
- [10] Li, Z.J and Balendra, T and Tan, K.H and Kong, K.H., (2017), "Finite element modeling of cyclic behavior of shear wall structure retrofitted using GFRP", *Proceeding, Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, ACI, Farmington Hills, Mi., Paper No. 74.*