

بررسی آزمایشگاهی رفتار ضربه ای نمونه های بتنی ساخته شده با مصالح بازیافتی لاستیکی



امیر حسین طاهری طلب
کارشناس ارشد سازه دانشگاه سمنان



محمد کاظم شریبتدار
دانشیار دانشکده مهندسی
عمران دانشگاه سمنان

چکیده

بتن های تهیه شده با لاستیک های ضایعاتی بازیافتی به شکل های مختلف بخصوص بصورت پودر باعث بالا بردن مقاومت ضربه و انعطاف پذیری و ارتقای خواص مکانیکی شده و از به هدر رفتن مواد سودمند بالقوه (ذخیره ای) جلوگیری کرده و موجب کاهش مصرف مواد خام اولیه می شوند. از فواید این نوع بتن ها می توان به کاهش مصرف انرژی، کاهش آلودگی هوا حاصل از سوختن مواد و آلودگی آب ها حاصل از تدفین زباله های لاستیکی در خاک اشاره کرد. در مقاله حاضر که حاصل پژوهش آزمایشگاهی می باشد ۴۰ نمونه استوانه بتنی بابعاد ۳۰*۱۵ سانتیمتر و نهایتاً ۱۶۰ نمونه آزمایش ضربه و در ۴ سری طرح اختلاط حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد لاستیک با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ ساخته شدند و نمونه های ساخته شده سپس تحت آزمایش مخصوص ضربه در سنین ۲۸ روزه قرار گرفته است. نتایج آزمایشات نشان داد که افزایش ۱۵٪ پودر لاستیک ضایعاتی باعث افزایش ۳۰ و ۲۵٪ مقاومت ضربه در ایجاد ترک های اولیه و نهایی شد و تاثیر افزایش پودر لاستیک بوضوح نشان داده شد. کلمات کلیدی: بتن، لاستیک بازیافتی، مقاومت ضربه، نمونه استوانه ای

۱- مقدمه

امروزه، بتن به عنوان یکی از پرمصرف ترین مصالح جهان و به عنوان ماده ساختمانی قرن بیست و یکم شناخته شده

است. ساخت این ماده مرکب با استفاده از ارزان ترین و در دسترس ترین مواد ساده از یک سو، انعطاف پذیری، خواص و مقاومت و دوام آن از سوی دیگر و نیز استفاده از موادی در ساخت آن، که به پاکسازی و کاهش آلودگی

محیط زیست کمک می‌نماید، موجب آن شده است که بتن به عنوان مصالحی ممتاز مطرح شود. علی‌رغم سادگی و تهیه و ساخت بتن، به علت وجود مواد مختلف در آن و نیز اندر کنش این مواد به ویژه در ناحیه بین سنگدانه‌ها و خمیر، هنوز در این ماده و محصول نهایی حاصل از ساخت اجزای آن پیچیدگی‌ها و نادانسته‌های فراوانی وجود دارد [۱]. با توجه به زنده بودن بتن و ادامه واکنش‌های سیمان در بتن به مرور زمان، تاثیرات محیطی وارده بر بتن و تغییرات خواص آن با گذشت زمان، شناخت واقعی این ماده نیاز به نگرشی عمیق و وسیع دارد. بیشتر این ماده به ریز ساختار آن وابسته است و این ساختار با گذشت زمان و بر اثر عوامل مختلف تغییر می‌یابد [۲]. پیشرفت علم و تکنولوژی در زمینه بتن و کاربرد مواد و مصالح مختلف در آن، از جمله افزودنی‌ها و مواد زائد و آلوده‌کننده محیط زیست و نیز تکنیک‌های جدید و پیشرفته ساخت موجب آن شده است که در سال‌های اخیر بتن‌هایی با دوام زیاد در محیط‌های مختلف به میزان بسیار چشمگیری تولید شود. علی‌رغم حصول چنین پیشرفت‌هایی شگرف، دانش مهندسان عمران در زمینه مواد و مصالح و تکنولوژی بتن به خصوص در کشورهای در حال توسعه آن چنان تحولی نداشته است و آثار نامطلوب عدم شناخت این ماده در کارهای عظیم عمرانی این کشورها را مشاهده می‌کنیم و به سازه‌های بتنی ای برمی‌خوریم که تحت اثر بارهای وارده و عوامل محیطی در طول مدت بهره‌برداری از آنها دچار تخریب‌های زیاد و وسیعی گشته و عمر مفید کوتاهی داشته‌اند [۳]. در دهه‌های اخیر، با تلاش و تحقیق این امر امکان پذیر شده است که تولیدات موجود در صنعت مانند خاکستر بادی، دوده سیلیسی، سرباره آهن کوره، خرده شیشه، پلاستیک، لاستیک، نخاله و غیره در صنعت عمران سازه به کار رود. پتانسیل استعمال تولیدات صنعتی در بتن با جایگزین نمودن آنها با بخشی از مصالح سنگی و یا بخشی از سیمان مصرفی به ترکیب شیمیایی و

اندازه دانه‌های این مواد وابسته است. استفاده از این مواد در بتن به علت مصرف بی‌خطر این تولیدات برای جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی است [۴].

در ۲۰ سال اخیر، تمرکز زیادی بر روی قابلیت استفاده از انواع زباله‌های شهری در صنایع مواد ساختمانی رواج داده شده است و تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. که در بسیاری از مواد اضافه نمودن مواد بازیافتی علاوه بر فوایدی که برای حفظ محیط زیست به همراه دارد موجب تاثیرات خوبی بر روی خواص محصولات نهایی شده است [۵]. در این مقاله به بررسی رفتار بتن ساخته شده با مواد بازیافتی لاستیکی در آزمایش ضربه ای می‌پردازیم. خطیب و بایومی بر روی کارایی بتن لاستیکی تحقیق کردند و چنین گزارش نمودند که کاهش در اسلامپ با افزایش در میزان لاستیک به عنوان جایگزین در درصدی از کل حجم سنگدانه‌ها وجود دارد. آنها همچنین اظهار نمودند که در میزان ۴۰٪ لاستیک، اسلامپ تقریباً صفر بود و بتن کارایی نداشته است. [۶]. رقوان و همکاران گزارش نمودند که ملات‌های ترکیبی با خرده‌های لاستیک دارای کارایی برابر یا بهتر از ملات کنترلی بدون ذرات لاستیک است [۷]. سیدیک نایک گزارش نمودند که ملات‌های حاوی خرده لاستیک کارایی برابر یا بهتر از ملات بدون ذرات لاستیک از خود نشان دادند، همچنین مشاهده نمودند که مخلوط‌های ساخته شده با خرده لاستیک ریز، کارایی بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های درشت لاستیک یا ترکیب خرده لاستیک ریز و درشت دارند [۸]. سیدیک و نایک گزارش نمودند که ملات‌های حاوی خرده لاستیک کارایی برابر یا بهتر از ملات کنترلی بدون ذرات لاستیک از خود نشان دادند، همچنین مشاهده نمودند که مخلوط‌ها ساخته شده با خرده لاستیک ریز، کارایی بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های درشت لاستیک یا ترکیب خرده لاستیک ریز و درشت دارند [۸]. در گزارشات متعدد

دانه (شن) به ابعاد ۵ تا ۱۲ میلی متر استفاده شده است. سنگدانه های معمولی از سنگدانه های معادن شرق سمنان استفاده گردیده، که مشخصات آن ها مطابق جدول ۳ می باشد. همچنین منحنی دانه بندی هر یک از سنگدانه های معمولی در شکل ۱ ارائه گردیده است.

لاستیک بازیافتی از شرکت پارمیدا (تولید کننده لاستیک های استفاده شده در درب ماشین و ...) تهیه شده و برای انجام آزمایشات مورد نظر بصورت پودر در آمده است که نمونه ای از این پودر ها در شکل ۲ دیده می شود و مشخصات دانه بندی پودر نیز در نمودار شکل ۳ مشخص شده است.

از آب شرب شهری به عنوان آب مورد استفاده در انجام آزمایشات این تحقیق استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

ردیف	مشخصه فیزیکی	واحد	مقدار میانگین
۱	نرمی (بلین)	cm ² /gr	۳۳۰۹
۲	انبساط	درصد	۰,۰۳۹
۳	الف زمان گیرش اولیه	دقیقه	۱۴۰
	ب زمان گیرش نهایی	ساعت	۳:۳۰
۴	الف مقاومت فشاری ۷ روزه	kg/cm ²	۳۷۲
	ب مقاومت فشاری ۲۸ روزه	kg/cm ²	۴۶۹

کاربرد ذرات خرده پلاستیک جایگزین سنگدانه گزارش شده است [۹]. تانتالا و همکاران در مورد تافنس مخلوط های بتن کنترلی و مخلوط های بتن لاستیکی با ۵٪ و ۱۰٪ حجمی سنگدانه درشت، تحقیق نمودند. آنها گزارش نمودند که تافنس مخلوط بتن لاستیکی بیشتر از مخلوط بتن کنترلی می باشد. با این وجود، تافنس مخلوط بتن لاستیکی با ۱۰٪ لاستیک (۲-۶ میلی متر) کمتر از بتن لاستیکی با ۵٪ لاستیک بود و این به علت کاهش در مقاومت فشاری می باشد [۱۰].

۲- مشخصات مواد و مصالح مصرفی

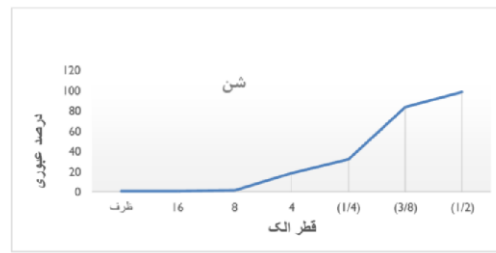
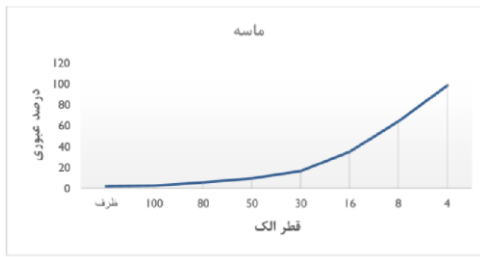
سیمان استفاده شده در این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان شاهرود بوده که دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی مندرج در جداول ۱ و ۲ می باشد. از سنگدانه های معمولی و هر یک نیز شامل ریز دانه (ماسه) و درشت

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

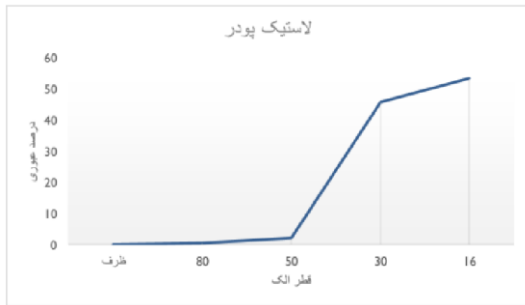
نمونه استاندارد	درصد تشکیل دهنده	مولکول شیمیایی
>۲۰	۲۱,۵۶	SiO ₂
<۶	۴,۴۰	Al ₂ O ₃
<۶	۳,۳۲	Fe ₂ O ₃
-	۶۳,۸۸	CaO
<۵	۳,۰۴	MgO
<۳	۱,۵۷	SO ₃
<۳	۱,۲۲	L.O.I
<۰,۷۵	۰,۳۴	I.R
-	۵۷,۴۲	C ₃ S
-	۱۸,۵۲	C ₂ S
<۸	۶,۰۴	C ₃ A
-	۱۰,۱۰	C ₄ AF
-	۳۱۰۳	Blaine

جدول ۳. مشخصات سنگدانه

مشخصات نوع	شکل ظاهری	وزن مخصوص (kg/m ³)	چگالی نسبی	مدول نرمی	درصد جذب
شن معمولی	نسبتاً تیز گوشه	۱۵۹۰	۲,۵۷	-	۱,۶۶
ماسه معمولی	نسبتاً تیز گوشه	۱۷۷۰	۲,۵۱	۳	۲,۲۸



شکل ۱. منحنی دانه بندی شن و ماسه



شکل ۳. منحنی دانه بندی پودر لاستیک

شکل ۲. لاستیک پودر شده

C و ۱۵٪ حجمی پودر لاستیک جایگزین ماسه با علامت D نام گذاری شد و نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ نیز می باشد. برای محاسبه وزن پودر لاستیک جایگزین، حجم واقعی ماسه در طرح اختلاط مرجع از حجم کل بتن معادل یک مترمکعب محاسبه می شود سپس ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد آن مشخص می شود سپس حاصلضرب چگالی (وزن مخصوص واقعی) پودر لاستیک در احجام موردنظر، وزن مورد نیاز لاستیک در هر طرح اختلاط بدست می آید.

۳- طرح اختلاط بتن

با توجه به متغیرهای موجود در این تحقیق که شامل سنگدانه ها و لاستیک می باشند چهار نوع طرح اختلاط مطابق جدول ۴ بر اساس مقدار لاستیک طرح ریزی گردید. این طرح های اختلاط شامل سنگدانه های کاملاً معمولی بدون پودر لاستیک (طرح مرجع) با علامت A و مخلوط ۵٪ حجمی پودر لاستیک جایگزین ماسه با علامت B و ۱۰٪ حجمی پودر لاستیک جایگزین ماسه با علامت

جدول ۴. طرح اختلاط یک متر مکعب بتن (kg)

نام طرح اختلاط	آب اولیه	آب نهایی	سیمان	شن	ماسه	درصد پودر لاستیک	وزن پودر لاستیک	وزن کل
مرجع (A)	۲۰۵	۲۳۷	۳۸۰	۹۷۶	۷۴۵	۰	۰	۲۳۳۸
B	۲۰۵	۲۳۶،۰۷۶	۳۸۰	۹۷۶	۷۰۸	۵	۱۵،۲۲	۲۳۱۵،۱۹۶
C	۲۰۵	۲۳۵،۲۶	۳۸۰	۹۷۶	۶۷۱	۱۰	۳۰،۴۴	۲۲۹۲،۷
D	۲۰۵	۲۳۴،۴۴	۳۸۰	۹۷۶	۶۳۴	۱۵	۴۵،۶۶	۲۲۷۰،۱

شکل ۴- دستگاه تست ضربه



شکل ۵. نمونه های استوانه ای

۵- نتایج آزمایش ضربه ای

در آزمایش ضربه ای هر نمونه استوانه به ۴ قسمت که هر قسمت به اندازه ۶۴ میلی متر می باشد تقسیم شد و مجموعاً ۱۶۰ نمونه تهیه و تحت آزمایش ضربه قرار گرفتند. پس از انجام آزمایشات، تاثیر متغیرهای مختلف شامل میزان سنگدانه ها و مقدار لاستیک در مقاومت ضربه ای نمونه ها با مشاهده نمونه ها مطابق شکل ۶ بعد از آزمایشات و نتایج آن ها بررسی شد. جدول ۵ تعداد ضربات لازم برای ایجاد ترک اول و نهایی را در نمونه های آزمایش شده بعد از پایان آزمایشات را نشان می دهد و جدول ۶ نتایج داده شده تاثیر استفاده از پودر لاستیک در جدول ۵ را به صورت میانگین نشان می دهد.

۴. مشخصات نمونه ها و نحوه و انجام آزمایشات

در این آزمایش ابتدا آزمونهای دیسکی شکل بتنی به قطر ۱۵۲ و ضخامت ۶۳٫۵ میلی متر از آزمونهای استوانه ۱۵۰ × ۳۰۰ استاندارد که در شرایط محیطی آزمایشگاه و به مدت حداکثر ۲۸ روز در وان آب نگهداری شدند بریده می شوند و مجموعاً ۴۰ دیسک در هر طرح اختلاط تهیه شدند. آزمایش سقوط وزنه با ضربات تکرار شونده، ساده ترین نوع آزمایش ضربه است. تعداد ضربه برای ایجاد سطح مشخص از گسیختگی یا شکست در آزمون در این آزمایش به دست می آید که نشان دهنده ای کیفی از ظرفیت جذب انرژی مصالح می باشد. این آزمایش برای مقایسه کیفی بتن های الیافی با بتن معمولی، مناسب است. لذا برای مقایسه رفتار نسبی دو آزمون با ضخامت های مختلف تحت ضربه به کار می آید. برای انجام این آزمایش بر اساس توصیه نامه *ACI-544.2R*، چکش متراکم کننده استاندارد به وزن 4.54 کیلو گرم و قطر ۴۵۷ میلی متر، کره فولادی به قطر ۶۳٫۵ میلی متر، یک صفحه فولادی مسطح، و قالب بتن به قطر ۱۵۲ میلی متر و ضخامت ۶۳٫۵ میلی متر مورد نیاز می باشد که در شکل ۴ دستگاه تست ضربه و جزئیات پلان و مقطع دستگاه نشان داده شده است. دیسک های بتن پس از آماده سازی سطوح برابر مطابق شکل ۵، در سطح زیرین به صفحه فولادی متصل می شود.



شکل ۶. نمونه های دیسک بعد از آزمایشات ضربه

جدول ۵. نتایج آزمایش ضربه همه نمونه ها (تعداد ضربات)

D		C		B		A		نمونه های مکعبی
ترک نهایی	اولین ترک	ترک نهایی	اولین ترک	ترک نهایی	اولین ترک	ترک نهایی	اولین ترک	
۹	۷	۸	۵	۱۰	۷	۱۰	۷	۱
۱۲	۱۰	۹	۶	۸	۶	۱۱	۹	۲
۱۰	۸	۸	۶	۹	۷	۱۱	۸	۳
۹	۷	۹	۷	۸	۷	۷	۵	۴
۱۱	۹	۹	۷	۹	۷	۷	۶	۵
۹	۷	۱۱	۹	۱۱	۹	۵	۴	۶
۱۲	۱۰	۸	۶	۱۰	۸	۸	۶	۷
۱۰	۸	۱۰	۷	۱۳	۱۲	۷	۵	۸
۹	۸	۱۱	۸	۶	۴	۹	۷	۹
۱۲	۹	۱۰	۸	۷	۵	۸	۷	۱۰
۹	۷	۸	۵	۷	۶	۱۱	۹	۱۱
۹	۸	۱۱	۹	۶	۴	۶	۴	۱۲
۱۰	۹	۷	۵	۶	۵	۸	۶	۱۳
۱۰	۸	۱۳	۱۱	۹	۷	۵	۴	۱۴
۱۲	۱۰	۷	۵	۶	۴	۵	۴	۱۵
۱۰	۸	۹	۷	۷	۵	۶	۴	۱۶
۱۱	۸	۹	۷	۶	۵	۸	۶	۱۷
۹	۷	۷	۵	۷	۶	۱۰	۹	۱۸
۱۰	۸	۱۰	۸	۶	۵	۱۲	۱۰	۱۹
۹	۷	۷	۵	۵	۳	۱۱	۸	۲۰
۱۱	۹	۱۲	۱۰	۷	۶	۵	۴	۲۱
۸	۶	۷	۵	۴	۳	۱۰	۷	۲۲
۹	۷	۸	۶	۸	۶	۷	۵	۲۳
۱۱	۹	۹	۷	۶	۵	۶	۵	۲۴
۱۰	۸	۱۰	۸	۱۲	۱۰	۱۳	۱۰	۲۵
۹	۷	۷	۶	۸	۶	۱۱	۸	۲۶
۱۰	۸	۱۰	۸	۹	۷	۶	۵	۲۷
۸	۷	۱۴	۱۱	۱۰	۹	۵	۴	۲۸
۱۰	۸	۹	۷	۷	۵	۶	۵	۲۹
۸	۶	۱۰	۸	۹	۸	۷	۵	۳۰
۹	۸	۸	۶	۶	۴	۷	۵	۳۱
۱۴	۱۱	۱۰	۸	۱۰	۸	۷	۶	۳۲
۱۱	۹	۱۱	۹	۶	۴	۹	۶	۳۳
۱۰	۸	۸	۵	۷	۵	۷	۶	۳۴
۱۱	۱۰	۹	۷	۸	۶	۱۱	۹	۳۵
۱۲	۱۰	۹	۷	۶	۴	۶	۴	۳۶
۱۰	۸	۱۰	۷	۱۱	۹	۶	۵	۳۷
۹	۷	۱۰	۸	۸	۷	۸	۵	۳۸
۱۰	۸	۷	۵	۷	۵	۶	۵	۳۹
۹	۶	۸	۶	۷	۵	۱۴	۱۱	۴۰

جدول ۶. میانگین نتایج آزمایش ضربه (تعداد ضربات)

نمونه D	نمونه C	نمونه B	نمونه A	ترک ها
۸,۰۷۵	۷	۶,۱	۶,۲	ترک اول
۱۰,۰۲۵	۹,۱۷۵	۷,۸	۸,۰۵	ترک نهایی

مقابل توزیع مورد انتظار نشان داده شده است که نشان از رفتار تقریباً خطی بین این دو پارامتر در همه نمونه ها حتی در صورت اضافه شدن پودر لاستیک ضایعاتی خواهد داشت.

۷. نتیجه گیری

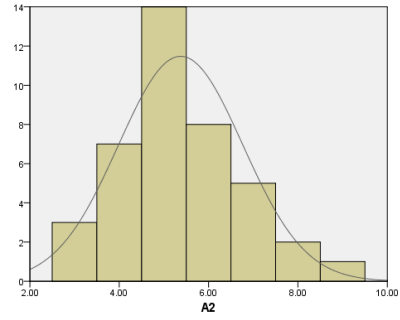
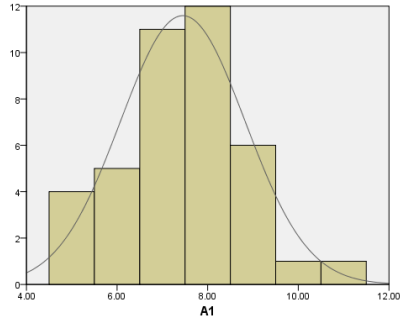
براساس آزمایشات انجام شده ضربه بر روی دیسک های بتنی بریده شده از استوانه های استاندارد ساخته شده از ۴ نوع طرح اختلاط بتن حاوی صفر و ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد پودر لاستیک ضایعاتی بازیافتی و بدست آوردن تعداد ضربات لازم برای ایجاد ترک های اولیه و نهایی، نتایج زیر حاصل گردید:

طبق آزمایشات انجام شده با اضافه شدن تدریجی پودر لاستیک، مقاومت ضربه هم به تدریج افزایش یافته و تاثیر مثبت خود را نشان داده است. گرچه اضافه کردن ۵٪ پودر لاستیک تفاوت قابل توجه نسبت به طرح اختلاط مرجع نداشت ولی افزایش مقادیر ۱۰٪ و ۱۵٪ پودر لاستیک تاثیر بسیار خوبی در مقاومت ضربه داشته است. به طوریکه مقاومت ضربه ایجاد اولین ترک در بتن های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد پودر لاستیک به ترتیب ۱۳ و ۳۰ درصد افزایش یافته و مقاومت ضربه ایجاد ترک های نهایی نیز به ترتیب ۱۴ و ۲۵٪ افزایش یافته که نشان دهنده افزایش مناسب پودر در افزایش ظرفیت ضربه بتن ها می باشد. مقایسه نمودارهای هیستوگرام با نمودارهای توزیع احتمالی نشان دهنده توزیع احتمال نرمال در همه نمودارها می باشد و رابطه خطی بین توزیع احتمال جمعیتی مشاهده شده و مورد انتظار هم در همه طرح های اختلاط وجود داشت که نشان از پراکندگی منطقی بین نتایج در نمونه های حاوی پودر لاستیک ضایعاتی می باشد.

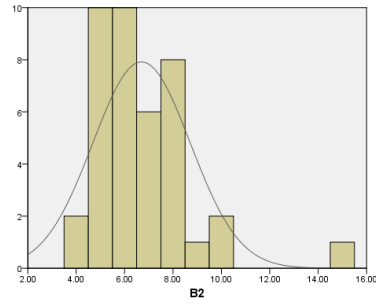
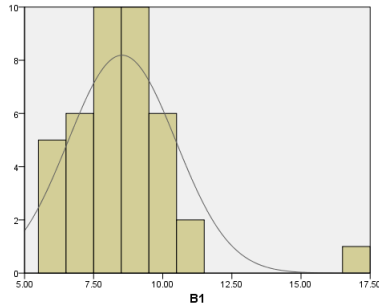
نتایج آزمایشات تاثیر استفاده از پودر لاستیک را نشان می دهد همانطور که در جدول ۶ دیده می شود افزایش تدریجی پودر لاستیک باعث افزایش نسبی مقاومت ضربه شده است بطوریکه افزایش ۵٪ پودر لاستیک در نمونه های B تاثیر قابل توجهی نداشته و با مقاومت ضربه بتن معمولی یکسان است ولی افزایش ۱۰ درصد پودر لاستیک باعث افزایش ۱۳ و ۱۴ درصدی مقاومت ضربه در ایجاد ترک های اولیه و نهایی شده است ولی افزایش ۱۵ درصد پودر لاستیک باعث افزایش ۳۰ و ۲۵ درصدی مقاومت ضربه در ایجاد ترک های اولیه و نهایی شده است، بنابراین افزایش ۱۵٪ بعنوان بهترین درصد افزایش پودر لاستیک می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۶- تحلیل آماری نتایج مقاومت ضربه

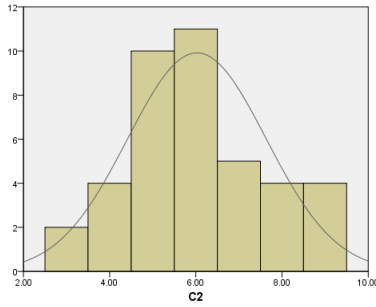
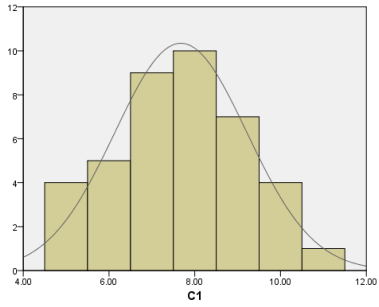
از هر طرح اختلاط ۴۰ نمونه تهیه شده و مقاومت اولیه و نهایی ضربه که دارای پراکندگی و متوسط متفاوت می باشد و تحلیل آماری و ترسیم نمودارهای هیستوگرام و منحنی های توزیع احتمالی بخصوص تطابق با نمودار توزیع احتمال نرمال و توزیع جمعیتی احتمالی بعنوان یکی از تکنیک های مناسب برای تفسیر نتایج می باشد. در شکل ۷ نمودار هیستوگرام مربوط به نمونه های استوانه ای آزمایشات ضربه ۴ نوع طرح اختلاط در دو حالت مقاومت اولیه با اندیس شماره ۲ و مقاومت نهایی با اندیس شماره ۱ نشان داده شده است ضمناً بر روی هر یک از نمودارهای هیستوگرام، نمودار توزیع احتمال نرمال هم ترسیم شده است. نمودارهای هیستوگرام و توزیع احتمال نرمال تمامی نمونه ها نشان دهنده نرمال بودن داده ها می باشد. در شکل ۸ نمودار توزیع احتمالی جمعیتی مشاهده شده در



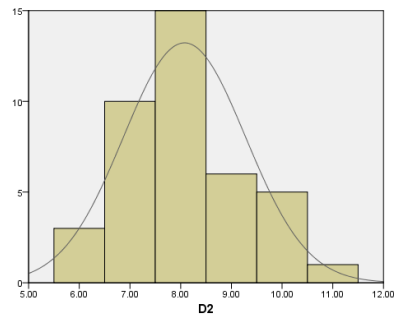
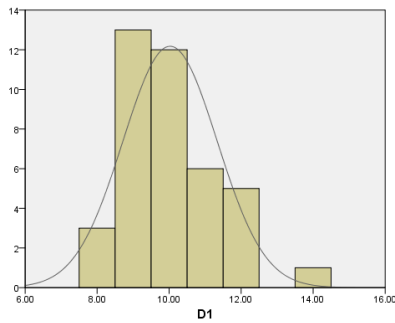
الف- نمونه های طرح اختلاط A



ب- نمونه های طرح اختلاط B

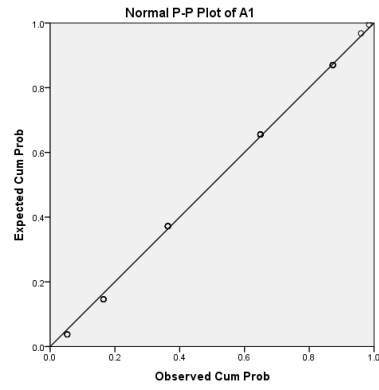
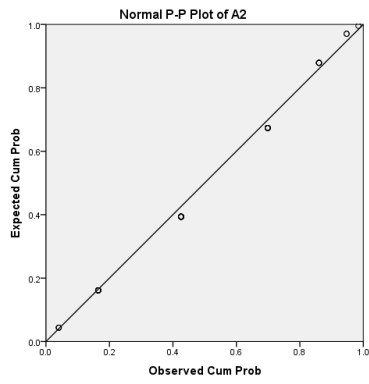


ج- نمونه های طرح اختلاط C

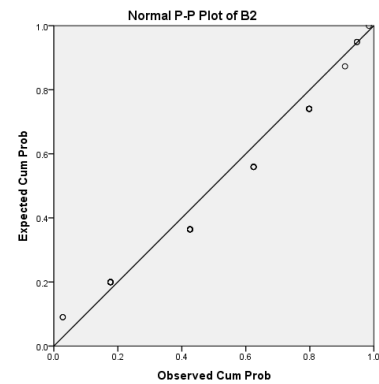
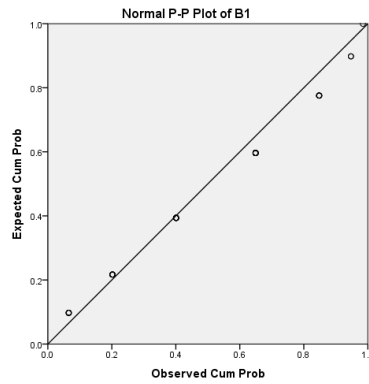


د- نمونه های طرح اختلاط D

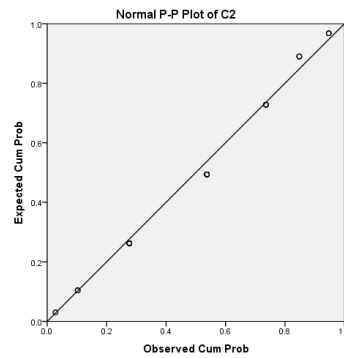
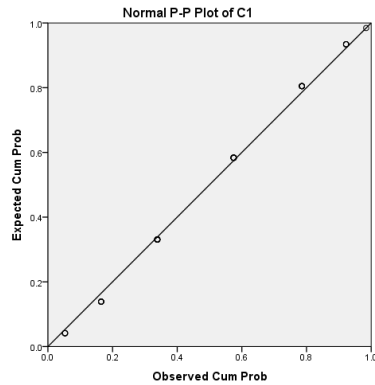
شکل ۷- نمودارهای هیستوگرام و توزیع احتمال نرمال نمونه های آزمایشگاهی



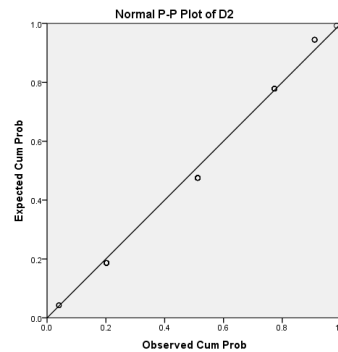
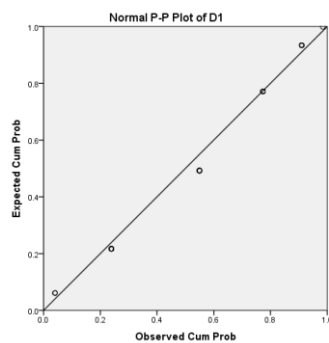
الف- نمونه های طرح اختلاط A



ب- نمونه های طرح اختلاط B



ج- نمونه های طرح اختلاط C



د- نمونه های طرح اختلاط D

شکل ۸- نمودارهای رابطه بین توزیع احتمالی تجمعی مشاهده شده در مقابل مورد انتظار

- [۱] طاهری، وحید. ۱۳۸۹، " بررسی آزمایشگاهی خواص بتن سیمانی حاوی مخلوط آسفالت بازیافتی. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف، ایران.
- [۲] بهفرنیا، کیاچهر. حسن زاده، محسن. اعتمادی، محسن. عظیمی فر، فرهاد. ۱۳۹۳. " بررسی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی پودر لاستیک تایر ضایعاتی "، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [۳] رئیس زاده ضیابری، علی. ۱۳۹۲. " بررسی خواص مکانیکی بتن‌های ساخته شده از ضایعات لاستیک‌های فرسوده حاوی افزودنی‌های پوزولانی " دانشگاه گیلان. پایان نامه کارشناسی ارشد.
- [4] Fattuhi N.I., Clark N.A., 1997 "cement-based materials containing tire rubber". *Journal of construction and building material*, page: 229-236
- [۵] خالو، علیرضا. خداویردی زنجان، محمد مهدی. حسینی، پیام. ۱۳۸۸ بررسی ساخت بتن خودتراکم با استفاده از درشت دانه های بازیافتی، دانشگاه صنعتی شریف، ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- [6] Khatib Z.K., Bayomy F.M., 1999. " rubberized Portland cement concrete ". *ASCE journal of material in civil engineering* page: 206-213.
- [7] Raghvan D., Huynh H., Ferraris C.F., 1998. *Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tire rubber-filled cementations composite* ". *journal of material science*, page: 1745-1752.
- [8] Siddique R, Naik T.R., 2004. " properties of concrete containing scrap-tire rubber " *waste management*, page:563-569.
- [9] Ismail Z.Z., AL-Hashmi E.A., 2009, "use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement". *Waste management*, page: 241-247.
- [10] Tantala M.W., Lepore J.A., Zandi I., 2007 "quasi-elastic behavior of included concrete ". in Ronald mersky (Ed), *proceeding of 12th International conference on solid waste technology and management*, Philadelphia, p.p.92-101.

بررسی برخی خصوصیات مکانیکی بتن‌های بازیافتی

حاوی زئولیت



ابراهیم قیاسوند
استادیار دانشکده فنی کبودرآهنگ،
دانشگاه بوعلی سینا

چکیده

حرکت به سمت توسعه پایدار در صنعت سیمان و بتن، از اقداماتی است که لازم است مورد توجه دست‌اندرکاران این صنعت قرار گیرد. استفاده از مواد مکمل سیمانی، به عنوان جایگزین کلینکر و مصالح سنگی بازیافتی از بتن‌های قدیمی، به عنوان جایگزین تمام یا بخشی از مصالح سنگی مصرفی در بتن‌های جدید را می‌توان در این راستا قلمداد نمود. مقاله حاضر به ارزیابی برخی خصوصیات مکانیکی بتن‌های بازیافتی (صفر، ۴۰ و ۸۰ درصد مصالح سنگی درشت با مصالح سنگی بازیافتی درشت جایگزین شده‌اند) حاوی زئولیت (صفر، ۷/۵ و ۱۵ درصد) پرداخته است. جهت انجام این پژوهش، پس از تهیه سنگدانه‌های بازیافتی حاصل از نمونه‌های بتنی اخذ شده از ساختمان‌های بتنی ساخته شده در شهرستان همدان و سایر مصالح مصرفی و ساخت نمونه‌ها، اقدام به انجام آزمایش‌هایی چون مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمودیم. نتایج این پژوهش نشان داد، استفاده از مصالح بازیافتی، خواص مکانیکی این بتن‌ها را به میزان مشهودی تضعیف نمود. واژه‌های کلیدی: بتن‌های بازیافتی، مصالح سنگی، زئولیت، خواص مکانیکی

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، سرمایه‌گذاری‌های هنگفت صورت گرفته در صنعت ساختمان بواسطه افزایش نیاز بشر به ساخت و ساز، نیاز به مصالح ساختمانی مناسب را به شدت افزایش

داده است. به عنوان مثال، مصرف سالیانه شن و ماسه در ایالات متحده نزدیک به ۱۵۰ میلیون تن تخمین زده شده است. سنگدانه‌ها به عنوان یکی از عناصر اصلی تشکیل‌دهنده بتن که قسمت اعظم آن را تشکیل می‌دهد (۷۰ تا

۸۰ درصد حجم بتن توسط سنگدانه‌ها پر می‌شود)، تأثیر بسزایی در خصوصیات مقاومتی و مکانیکی آن دارند. در صورتی که بتوان بخشی از این مصالح سنگی را با مصالح بازیافتی جایگزین نماییم، گام بزرگی در جهت حفظ معادن شن و ماسه در سطح دنیا و به طور کلی حرکت به سمت توسعه پایدار برداشته‌ایم [۱]. بر اساس گزارش‌های انجمن تخریب اروپا، از مجموع ۲۰۰ میلیون تن زباله تولید شده در طی یک‌سال، حدود ۳۰ درصد بازیافت می‌شود. ضمناً انجمن بازیافت مصالح و مواد ساختمانی آمریکا، تخمین می‌زند که سالانه حدود ۱۰۰ میلیون تن بتن در آمریکا بازیافت می‌شود [۲]. در سال ۲۰۰۰، بیش از ۹۵ درصد مصالح سنگی بازیافتی در کشور ژاپن، به عنوان مصالح مصرفی در بستر راه‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۳]. برجسته‌ترین ویژگی مصالح سنگی بازیافتی اتصال خمیر سیمان با این نوع از سنگدانه‌هاست که آن را متخلخل و ناهمگن کرده و تراکم آن را در بتن را کمتر می‌نماید [۴]. برخی محققین نشان دادند حدود ۲۰ درصد خمیر سیمان به این نوع سنگدانه‌ها چسبیده است [۵]. *Abdelfatah* و *Tabsh* نشان داد زمانی که مصالح سنگی بازیافتی جایگزین درشت‌دانه طبیعی می‌شود، جهت دستیابی به روانی (اسلامپ) یکسان در مقایسه با بتن طبیعی، نیاز به حدود ۱۰ درصد آب اضافی است [۲]. طبیعت متخلخل مصالح سنگی بازیافتی باعث جذب آب بالاتر آن‌ها شده است. به بیان دیگر، ظرفیت جذب آب مصالح سنگی بازیافتی دو تا سه برابر بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است و ممکن است تا ۱۲ درصد نیز متغییر باشد. با توجه به برخی از توصیه‌های کمیته بین‌المللی، مصالح سنگی بازیافتی درشت‌دانه با داشتن ظرفیت جذب آب بیش از ۷

درصد و ریزدانه بیش از ۱۳ درصد برای بتن مناسب است [۱]. *Limbachiya* و همکاران در مطالعه خود نشان دادند که چگالی سنگدانه‌های بازیافتی در حالت اشباع با سطح خشک در حدود ۸ درصد پایین‌تر از سنگدانه‌های طبیعی است و جذب آب آن‌ها دو برابر بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است [۶].

محققین مختلفی در رابطه با خواص مکانیکی بتن‌های ساخته‌شده از مصالح سنگی بازیافتی فعالیت نموده‌اند. نتایج پژوهش این محققین نشان می‌دهد با افزایش میزان جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با مصالح سنگی بازیافتی، خواص مکانیکی بتن تضعیف می‌شود. هرچند این تضعیف خصوصیات مکانیکی، هنگامی که سطح جایگزینی مصالح سنگی بازیافتی کمتر از ۴۰ درصد باشد، چندان محسوس نیست [۱، ۷ و ۸]. از جمله دلایل تضعیف خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی می‌توان به افزایش تخلخل، ضعیف شدن ناحیه انتقالی و وجود ترک در این نوع بتن‌ها نسبت داد.

Xiao و همکاران در سال ۲۰۰۹، بتن‌های بازیافتی را متشکل از پنج فاز مندرج در ذیل می‌دانند:

- مصالح طبیعی
 - ملات سیمان سخت شده قدیمی
 - ملات سیمان سخت شده جدید
 - ناحیه انتقالی بین ملات سخت شده قدیمی و سنگدانه‌های سخت (ناحیه انتقالی قدیمی)
 - ناحیه انتقالی بین سنگدانه بازیافتی و ملات سخت شده جدید (ناحیه انتقالی جدید)
- این محققین بیان نمودند بتن‌های بازیافتی دارای دو فاز بیشتر نسبت به بتن‌های معمول است [۹].

در پژوهش حاضر، برخی خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته) بتن‌های بازیافتی حاوی زئولیت مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از افزودن زئولیت به این نوع بتن بهبود خواص این بتن‌ها بوده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲ مصالح مصرفی

سیمان پرتلند نوع دو مورد استفاده در این پژوهش، از کارخانه سیمان هکمتانه تهیه شد. ضمناً زئولیت مصرفی نیز با وزن مخصوص ۲۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب از سیمان تأمین شده است. در این تحقیق از دو نوع سنگدانه

طبیعی و بازیافتی با حداکثر اندازه‌ی ۱۹ میلی‌متر به عنوان درشت‌دانه استفاده گردید. سنگدانه‌های بازیافتی از نمونه‌های بتنی جمع‌آوری شده از ساختمان‌های بتنی ساخته شده در شهرستان همدان تهیه شد. به این منظور پس از جمع‌آوری نمونه‌ها، آنها به یک واحد تولیدی شن و ماسه انتقال یافت و سپس نسبت به شکستن و تأمین مصالح سنگی درشت‌دانه از آنها اقدام نمودیم. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی در جدول ۳-۲ ارائه شده است.

در جداول ۱ و ۲ به ترتیب، ویژگی‌های سیمان و سنگدانه‌های مصرفی در این پژوهش ارائه شده است. ضمناً طرح مخلوط بتن‌های مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی اجزای سازنده سیمان پرتلند تیپ دو

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
0.52	Sodium oxide (Na_2O) (%)	63.54	Calcium oxide (CaO) (%)
0.15	Titanium oxide (TiO_2) (%)	21.44	Silicon dioxide (SiO_2) (%)
0.05	Phosphorus oxide (P_2O_5) (%)	1.48	Magnesium oxide (MgO) (%)
1.4	LOI (%)	4.52	Aluminium oxide (Al_2O_3) (%)
۱۵۳.	Specific Gravity	3.69	Ferric oxide (Fe_2O_3) (%)
۳۲۵۰	Blaine (cm^2/gr)	2.26	Sulphate oxide (SO_3) (%)
		0.72	Potassium oxide (K_2O) (%)

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سنگدانه

مقدار	مشخصه
۲۶۵۰ kg/m^3	جرم مخصوص شن طبیعی (در حالت اشباع با سطح خشک)
۲۵۲۶ kg/m^3	جرم مخصوص شن بازیافتی (در حالت اشباع با سطح خشک)
۲۵۷۰ kg/m^3	جرم مخصوص ماسه (در حالت اشباع با سطح خشک)
۱/۵	جذب آب شن طبیعی (درصد)
۴	جذب آب شن بازیافتی (درصد)
۲/۶	جذب آب ماسه (درصد)

جدول ۳: طرح مخلوط بتن‌های مورد بررسی در پژوهش

طرح مخلوط	درصد مصالح سنگی			وزن اجزای سازنده (کیلوگرم)		
	شن ماسه	شن طبیعی	شن بازیافتی	سیمان	زئولیت	آب آزاد
C-0-0	۱۰۰	۱۰۰	۰	۳۷۵	۰	۱۷۸/۱۲۵
C-0-40	۱۰۰	۶۰	۴۰	۳۷۵	۰	۱۷۸/۱۲۵
C-0-80	۱۰۰	۲۰	۸۰	۳۷۵	۰	۱۷۸/۱۲۵
C-7.5-0	۱۰۰	۱۰۰	۰	۳۴۶/۸۷۵	۲۸/۱۲۵	۱۷۸/۱۲۵
C-7.5-40	۱۰۰	۶۰	۴۰	۳۴۶/۸۷۵	۲۸/۱۲۵	۱۷۸/۱۲۵
C-7.5-80	۱۰۰	۲۰	۸۰	۳۴۶/۸۷۵	۲۸/۱۲۵	۱۷۸/۱۲۵
C-15-0	۱۰۰	۱۰۰	۰	۳۱۸/۷۵	۵۶/۲۵	۱۷۸/۱۲۵
C-15-40	۱۰۰	۶۰	۴۰	۳۱۸/۷۵	۵۶/۲۵	۱۷۸/۱۲۵
C-15-80	۱۰۰	۲۰	۸۰	۳۱۸/۷۵	۵۶/۲۵	۱۷۸/۱۲۵

۲-۲ روش انجام آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی به روش دونیم‌شدن و مدول الاستیسیته انجام شد. در ادامه، روش انجام و جزئیات مربوط به این آزمایش‌ها ذکر شده است:

- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با استفاده از نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز تعیین شد. به این منظور، نمونه‌های بتنی پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان ریختن در داخل قالب، از قالب بیرون آمده و تا سن انجام آزمایش، در محلول آب و آهک اشباع عمل-آوری شدند.

- آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای در این پژوهش بر روی نمونه‌های $8 \times 10 \times 40$ سانتی‌متری انجام شد. به این منظور، نیرو به صورت پیوسته و با سرعتی یکنواخت افزایش یافت تا نمونه گسیخته شود. لازم به یادآوری است چنانچه سطح نمونه که زیر تیغه‌های بارگذاری است ناصاف باشد باید قبل از آزمایش آن را صاف کرد تا تیغه‌ها در تمام

سطح با بتن در تماس باشند. این آزمایش نیز در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد.

- آزمایش مقاومت کششی بتن با روش غیر مستقیم (به روش دونیم‌شدن) در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۶۰۴۷ [۱۰] انجام شد. در این آزمایش نمونه بتنی استوانه‌ای از پهلو به نحوی بین صفحات دستگاه آزمایش قرار می‌گیرد که محور آن افقی باشد. سپس بار افزایش یافته تا شکستگی به صورت دو نیم شدن، به وجود آید. مقاومت کششی از این روش، از رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$T = \frac{2P}{ld\pi} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، T تنش کششی (kg/cm^2)، P حداکثر نیروی وارده (kg)، l طول نمونه و d قطر نمونه است.

- آزمایش مدول الاستیسیته بتن در این پژوهش در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۲۰۱-۱ [۱۱] انجام شد.

در شکل ۱، تصاویری از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش ارائه شده است.



ب) آزمایش مقاومت خمشی



الف) آزمایش مقاومت فشاری



ب) آزمایش مدول الاستیسیته



الف) آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

شکل ۱ - تصاویری از انجام آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

۳- شرح و تفسیر نتایج

۱-۳ مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری مرتبط با طرح مخلوط‌های مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۴، ارائه شده است.

جدول ۴: مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های مورد بررسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

طرح مخلوط	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	
	۹۰ روزه	۲۸ روزه
C-0-0	۵۹۰	۵۱۰
C-0-40	۵۴۵	۵۰۰
C-0-80	۵۴۰	۴۸۰
C-7.5-0	۶۰۰	۴۶۵
C-7.5-40	۶۲۰	۵۳۰
C-7.5-80	۵۴۵	۴۴۰
C-15-0	۵۳۰	۴۸۰
C-15-40	۴۷۵	۴۱۰
C-15-80	۴۴۰	۳۷۵

با دقت در نتایج، می‌توان بیان نمود استفاده از مصالح سنگی بازیافتی منجر به کاهش مقاومت فشاری در بتن‌های مورد بررسی، به میزان قابل ملاحظه‌ای نشده است. به عنوان مثال، جایگزینی ۸۰ درصد مصالح سنگی درشت با مصالح سنگی بازیافتی تنها منجر به کاهش ۸ درصدی مقاومت در سن ۹۰ روز شده است. هم‌چنین، استفاده از ۷/۵ پوزولان ژئولیت به عنوان جایگزین سیمان، منجر به افزایش مقاومت فشاری در سن ۹۰ روز نسبت به نمونه‌های شاهد متناظر شده است. این موضوع را می‌توان به واکنش‌های موثر پوزولانی این ماده در این سطح از جایگزینی (۷/۵ درصد) نسبت داد. اما در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پوزولان، کاهش مقاومت فشاری با افزایش

مصالح سنگی بازیافتی در مقایسه با نمونه‌های شاهد متناظر، از شدت بیشتری برخوردار است. این موضوع بیانگر عملکرد ضعیف این پوزولان، در مقادیر جایگزینی بالاتر است. به طور مثال در سن ۹۰ روز، بیشترین و کمترین میزان مقاومت فشاری، به ترتیب مرتبط با طرح‌های C-15-80 و C-7.5-40 می‌باشد. بهبود مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی حاوی ۴۰ درصد پوزولان زئولیت می‌تواند ناشی از بهبود ریزساختار بتن و تقویت ناحیه انتقالی به دلیل وجود این نوع پوزولان باشد.

۲-۳ مقاومت کششی غیر مستقیم

نتایج مقاومت کششی کلیه نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، در جدول ۵ ارائه شده است. با دقت در نتایج ملاحظه می‌شود در نمونه‌های شاهد (فاقد پوزولان زئولیت)، در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روز با افزایش مقادیر جایگزینی مصالح سنگی با مصالح سنگی بازیافتی، از میزان مقاومت کششی کاسته شده است. اما در نمونه‌های حاوی پوزولان (خصوصاً در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پوزولان) این موضوع کمتر ملاحظه شده است. به عبارت دیگر افزودن پوزولان زئولیت تا حدودی مانع کاهش مقاومت ناشی از افزایش سنگدانه‌های بازیافتی، شده است. علاوه بر این، با افزایش مقادیر پوزولان زئولیت، مقاومت کششی کاهش یافته است. به طور مثال در سن ۹۰ روز، بیشترین و کمترین میزان مقاومت کششی، به ترتیب مرتبط با طرح‌های C-0-0 و C-15-80 می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود در این پارامتر نیز ضعیف‌ترین عملکرد مرتبط با طرح مخلوط حاوی ۱۵ درصد پوزولان زئولیت و ۸۰ درصد سنگدانه‌های درشت بازیافتی است.

۳-۳ مقاومت خمشی

نتایج مقاومت خمشی کلیه نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در مقایسه با نتایج مقاومت فشاری و کششی غیر مستقیم که در بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳ ارائه شد، مقاومت خمشی کلیه نمونه‌ها به میزان کمتری متاثر از سنگدانه‌های بازیافتی بوده است. این موضوع در سن ۹۰ روز، مشهودتر است. به طور مثال در این سن، استفاده از ۸۰ درصد شن بازیافتی به جای شن طبیعی، تنها منجر به کاهش حدود ۵ درصدی مقاومت خمشی در نمونه‌های شاهد (حاوی صفر درصد زئولیت) شده است. هم‌چنین استفاده از این پوزولان منجر به افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها شده است. با دقت در نتایج ملاحظه می‌شود کمترین و بیشترین مقاومت خمشی نمونه‌ها در سن ۹۰ روز، به ترتیب متعلق به طرح مخلوط‌های C-0-0 و C-7.5-80 می‌باشد.

جدول ۶: مقاومت خمشی طرح مخلوط‌های مورد بررسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

مقاومت خمشی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)		
طرح مخلوط	مقاومت خمشی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	
	۲۸ روزه	۹۰ روزه
C-0-0	۵۴	۶۳
C-0-40	۵۸	۶۴
C-0-80	۵۹	۶۰
C-7.5-0	۶۱	۶۷
C-7.5-40	۵۹	۷۱
C-7.5-80	۵۵	۷۴
C-15-0	۶۵	۷۰
C-15-40	۶۰	۶۹
C-15-80	۵۳	۶۶

۳-۴ مدول الاستیسیته

به چنین نتیجه‌ای دست یافت. در آن بخش، نمونه‌های حاوی پوزولان در مقایسه با نمونه‌های شاهد متناظر، از مقاومت کششی غیر مستقیم کمتری برخوردار بودند. به عبارت دیگر رفتار شکننده‌تری داشتند.

نتایج آزمایش مدول الاستیسیته طرح مخلوط‌های مورد بررسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سن (از ۲۸ به ۹۰ روز)، به دلیل انجام بیشتر واکنش‌های هیدراسیون، مدول الاستیسیته همانند سایر مشخصه‌های مورد بررسی در این پژوهش نظیر مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش یافته است. هم‌چنین با افزایش مصالح سنگی بازیافتی در کلیه طرح‌ها (دارا و فاقد پوزولان ژئولیت)، از میزان مدول الاستیسیته کاسته شده است. به طور مثال، در سن ۹۰ روز، مدول الاستیسیته طرح C-0-80 در مقایسه با طرح C-0-0، حدود ۱۳ درصد کاهش یافته است. ضمناً نمونه‌های حاوی پوزولان، مدول الاستیسیته بیشتری در مقایسه با نمونه‌های شاهد متناظر داشته‌اند. از این رو به نظر می‌رسد، استفاده از پوزولان ژئولیت در این نوع از بتن‌ها منجر به کاهش شکل‌پذیری (افزایش سختی) شده است. با دقت در نتایج مندرج در بخش ۳-۲ نیز می‌توان

جدول ۷: مدول الاستیسیته طرح مخلوط‌های مورد بررسی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

طرح مخلوط	مقاومت خمشی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	
	۲۸ روزه	۹۰ روزه
C-0-0	۲۳۳۵۳۰	۲۵۳۸۴۰
C-0-40	۲۲۷۴۱۰	۲۴۹۳۶۰
C-0-80	۲۰۰۵۵۰	۲۲۰۱۵۰
C-7.5-0	۲۹۳۴۵۰	۳۱۸۲۰۰
C-7.5-40	۲۷۵۴۰۰	۲۹۴۸۰۰
C-7.5-80	۲۲۰۶۴۰	۲۳۳۳۰۰
C-15-0	۲۸۵۷۵۰	۳۱۰۹۲۰
C-15-40	۲۶۰۱۹۰	۲۸۰۷۱۰
C-15-80	۱۹۶۸۴۰	۲۱۰۱۵۰

۴ نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت مندرج در ذیل بیان نمود:

- با جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با مصالح سنگی بازیافتی تا سقف ۴۰ درصد، کاهش خواص مکانیکی محسوس رخ نمی‌دهد و حتی در برخی موارد شاهد بهبود خواص نیز بوده‌ایم.
- به طور کلی استفاده از ۷/۵ درصد پوزولان ژئولیت، منجر به بهبود نسبی نتایج شده است.
- تضعیف خواص مکانیکی نمونه‌های بتن‌های بازیافتی با افزایش مصالح سنگی جایگزین را می‌توان به عواملی چون: افزایش تخلخل در این بتن‌ها، وجود ترک‌های بیشتر و ناحیه انتقالی ضعیف‌تر در آن‌ها نسبت داد.
- به نظر می‌رسد، در صورت استفاده از پوزولان ژئولیت، رفتار محصولات پایه سیمانی نظیر بتن، تردتر می‌شود.

[1] Behera Monalisa, Bhattacharyya S.K, Minocha A.K, Deoliya R, Maiti S., "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review", *Construction and Building Materials*, 2014, 68, pp. 501-516.

[2] Tabsh Sami W, Abdelfatah Akmal S., "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete", *Construction and Building Materials*, 2009, 23, pp. 1163-1167.

Tushar R, Pimplikar Sunil S., "Use of recycled aggregate in concrete", *Mechanical and Civil* [3] Sonawane 2013, pp.52–59. *Engineering*,

[4] Butler L, West J.S, Tighe S.L., "The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement", *Cement and Concrete* 2011,41(10) , pp.1037–1049. *Research*,

[5] Nassar Roz-Ud-Din, Soroushian Parviz., "Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement", *Construction and Building Materials*, 2012,29, pp. 368–377.

recycled concrete aggregate in high-strength [6] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K., "Use of *Materials and Structures*, 2000, 33, pp. 574–580. concrete",

K.N., "Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using Vivian W.Y, Tam C.M., Le [7] Tam pre-soaking approaches", *Resources, Conservation and Recycling* , 2007,50, pp.82–101.

aggregate in concrete [8] Tam Vivian W.Y, Tam C.M, Wang Y., "Optimization on proportion for recycled using two-stage mixing approach", *Construction and Building Materials*, 2007, 21 (10), pp. 1928-1939.

[9] Xiao J Z, Liu Q, Tam V., "Numerical simulation on damage and failure of recycled aggregate concrete 2009, 417-418: pp. 689–692. with a lattice model". *Key Engineering Materials*,

[۱۰] استاندارد ملی ایران به شماره ۶۰۴۷، تعیین مقاومت کششی دونیم کردن آزمون‌های استوانه‌ای بتن، سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۹۴.

[۱۱] استاندارد ملی ایران به شماره ۳۲۰۱-۱۰، تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی در آزمون فشار، سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۳۹۲.

بررسی اثر دورپیچ *GFRP* به صورت نوارهای مجزا در رفتار ستون های بتن آرمه



امیرصمد قدس
استادیار، گروه مهندسی عمران،
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد



محمدرضا توکلی زاده
استادیار، گروه مهندسی عمران،
دانشگاه فردوسی مشهد



بیژن اجتماعی
کارشناس ارشد مهندسی عمران، سازه،
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات
خراسان رضوی نیشابور

چکیده

یکی از موثرترین روش ها در بهبود عملکرد سازه های بتن آرمه، مقاوم سازی ستون ها با روش محصور کردن به وسیله پلیمرهای مسلح شده با الیاف *FRP* می باشد. علیرغم مزایای خوب *FRP* در مقاوم سازی ستون ها، خلاهای ایجاد شده و جداسدگی بوجود آمده بین *FRP* و بتن، به خاطر ضعف مهارتی در نصب، باعث کاهش کارایی سازه های آنها، برخلاف انتظار خواهد شد. به منظور کاهش این جداسدگی و سهولت نصب، نوارهای *FRP* بصورت مجزا پیشنهاد شده است. با توجه به کمبود مطالعات عددی در زمینه تاثیر ورق های مجزای *FRP* بر منحنی تنش- کرنش ستون های با ابعاد واقعی، در این جا سعی بر جبران خلاهای موجود شده -است. در این مقاله ۲۱ عدد ستون بتن آرمه استوانه ای و دور پیچ شده با نوارهای *GFRP*، تحت بارگذاری مستقیم فشاری در نرم افزار اجزای محدود *Abaqus* مدل شده است. ستون ها با متغیرهایی شامل عرض، فاصله و تعداد لایه ورق های *GFRP*، طراحی و مدل شدند و تاثیر این متغیرها، بر روی منحنی تنش- کرنش ستون بررسی شد. پس از تحلیل مدل ها و ترسیم منحنی های ظرفیت و تفسیر هر کدام از آنها، بر اساس نتایج، محصور شدگی بتن بوسیله دورپیچ *GFRP*، تکنیکی موثر برای افزایش مقاومت و شکل پذیری است. پیکربندی دور پیچ تأثیری قابل ملاحظه روی اثر بخشی دور پیچ *GFRP* دارد، طوری که در مدل هایی که تمام ارتفاع ستون با کامپوزیت محصور شده است، ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. اما در مورد اعضای با دور پیچ مجزا در قسمتی از بتن که محصور نشده است، فشار محصور کننده نهایی کمی حاصل شده است، در نتیجه افزایش مقاومت و ظرفیت باربری با در نظر گیری ملاحظات اقتصادی، در این گونه ستون ها، جهت مقایسه با ستون های با دور پیچ کامل، رابطه مستقیم با چیدمان منطقی الیاف و تعداد لایه های الیاف خواهد داشت.

واژه های کلیدی: ستون بتن آرمه، دور پیچ مجزای *GFRP*، محصور شدگی، مدل سازی اجزای محدود، شکل پذیری

می‌گیرد، بنابراین مقاومت فشاری و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. در ستون‌های بتن‌آرمه، عمل محصورشدگی جانبی توسط تنگ‌های بسته و خاموت، نتیجه می‌شود.

تقویت خارجی ستون‌های بتن‌آرمه جهت افزایش پدیده محصورشدگی، در گذشته با قرار دادن ژاکت فولادی و غلاف بتنی در اطراف ستون انجام می‌گرفت، که در دهه‌های اخیر جای خود را به دورپیچ‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف *Fiber Reinforced Polymers (FRP)* داده است [۳].

سیستم *FRP* بدین صورت تعریف می‌شود که الیاف و رزین‌ها برای ساخت چند لایه مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرند، به نحوی که رزین‌های مصرفی به منظور چسباندن چند لایه مرکب به سطح بتن زیرین و پوشش‌ها به منظور محافظت مصالح ترکیب شده، استفاده می‌شوند [۴].

استفاده از دورپیچ *FRP* در تقویت ستون نه تنها به دلیل سهولت نصب، زیبایی و انعطاف‌پذیری، بلکه به دلیل نسبت مقاومت به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی بسیار مورد توجه واقع شد. این سیستم‌ها همچنین می‌توانند در سطوحی با دسترسی‌های محدود یا جاهایی که اجرای شیوه‌های متعارف با مشکلاتی مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرند.

طراحی ایمن و اقتصادی فقط در صورت درک صحیح و مدل‌سازی دقیق بتن محصور در *FRP* امکان دارد [۴]. جهت ایجاد محصور شدگی در ستون‌های بتن‌آرمه، بیشتر مطالعات و کارهای اجرایی مقاوم‌سازی به دورپیچ کامل ستون‌ها توجه داشته و پرداخته‌اند، و به دورپیچ با نوارهای فاصله‌دار یا مجزای *FRP* توجه کمی شده‌است، علیرغم آن‌که ممکن است این روش یک روش طراحی کارآمد و اقتصادی باشد، با ملاحظه این‌که یک نسبت حجمی مکانیکی برای میلگردهای عرضی موجود، در ستون‌ها

بسیاری از سازه‌های بتن‌آرمه در ایران و سایر نقاط دنیا، عمری بیش از چند دهه دارند و به خاطر حوادث طبیعی از قبیل زلزله و باد یا بر اثر خستگی مصالح و یا عوامل خورنده، آسیب دیده‌اند. از آن‌جا که این سازه‌ها عموماً اهمیت زیادی داشته و تعداد آن‌ها نیز فراوان است، جایگزین کردن آن‌ها با سازه‌های جدید، اکثراً فاقد توجیه اقتصادی بوده و از نظر اجرایی غیرعملی می‌باشد؛ در حالی که تعمیر و تقویت آن‌ها در بیشتر موارد امری ضروری و مقرون به صرفه می‌باشد.

امروزه نگهداری از سازه‌ها به دلیل هزینه ساخت و تعمیر بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مطالعه سازه‌های بتنی نشان می‌دهد، با توجه به عوامل متعددی مانند: برخی از بارهای استثنایی (از قبیل ضربه، انفجار، یا بارهای لرزه‌ای)، افزایش بار و تغییر در تقاضای ظرفیت بار به دلیل خطای طراحی یا ساخت، افزایش کاربری یا یک تغییر کاربری سازه‌ای، تغییر در آیین‌نامه‌های طراحی، و نارسایی‌های ناشی از فرسایش سازه (خوردگی میلگرد و واکنش قلیایی سنگدانه)، نیاز به تقویت و تعمیر اعضای آن‌ها، احساس می‌شود.

ستون‌ها، در ساختمان‌های بتن مسلح، اهمیت بسزایی دارند، زیرا که مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی این اعضا در عملکرد سازه بسیار مهم هستند [۱]. پارامترهای بسیاری از قبیل: کلاس مقاومتی بتن، میزان فولاد طولی و عرضی، حالات مختلف پیکربندی میلگردهای عرضی و فاصله آن‌ها در خصوصیات رفتاری ستون‌ها موثرند؛ با این وجود پدیده محصورشدگی تاثیر بسزایی در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌ها، ممانعت از کمانش موضعی میلگردهای طولی، خرابی زودرس پوشش بتن و همچنین بالا بردن ظرفیت برشی ستون، دارا می‌باشد [۲]. با تأمین فشار محصورکنندگی جانبی، بتن در معرض یک وضعیت سه محوره تنش قرار

وجود دارد [۵]. از طرفی نیز در ایجاد شرایط محصورشدگی در ستون، شرایط چسبندگی بین *FRP* و بتن خیلی مهم است، طوری که اساساً به مهارت نصب بستگی دارد. شرایط چسباندن ناقص، مخصوصاً وجود فضاها و حباب‌های هوای بزرگ، می‌تواند بی‌عیبی و امنیت سازه را کاهش دهد، علیرغم آن‌چه و برخلاف آن‌چه که از مقاوم‌سازی موردنیاز است.

در این بررسی علمی، به منظور ایجاد حداقل حباب‌های هوا، نصب آسان و همچنین با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، مولف کارگیری نوارهای مجزای *FRP*، شبیه به خاموت‌های عرضی را پیشنهاد می‌دهد. این روش پیشنهادی، آزادسازی همه هواهای به دام‌افتاده را آسان کرده و اطمینان می‌دهد که نوارهای *FRP*، به صورت کامل به بتن چسبیده اند.

این پژوهش اساساً روی کارهای تحلیلی و آزمایشگاهی وابسته به ستون‌های بزرگ مقیاس بارگذاری شده به صورت محوری، و محصورشده با دورپیچ‌های تقویتی خارجی *FRP* تمرکز می‌کند. طراحی سازه‌های بتنی از جهت بهینه‌سازی و دقیق نمودن محاسبات، به روش‌هایی توانمند نیاز دارد. بهترین روش برای توصیف رفتار، مطمئناً انجام آزمایش بر روی سازه‌های حقیقی می‌باشد، اما متأسفانه اغلب آزمایش‌ها هزینه‌بر و بعضاً غیرقابل اجرا می‌باشند. روش دیگر در این بررسی، روش اجزای محدود *Finite Element Method (FEM)* است. با توجه به اهداف تحقیق، در این مطالعه علمی برای مدل‌سازی رفتار ستون‌های بتنی تقویت شده، از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود *Abaqus* استفاده شده و در پایان، دقت روابط پیشنهادی محققین، برای پیش‌بینی مقاومت نهایی بتن محصور در *FRP* را با نتایج مدل‌سازی مقایسه می‌کند. در این بررسی، مدل پلاستیسیته آسیب بتن برای مدل نمودن ستون‌های بتن‌آرمه مورد استفاده قرار گرفته است؛ در این راستا مدل اجزای محدود ستون موردنظر با نتایج آزمایشگاهی کالیبره

گردید. پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی، با تغییر در پارامترهای موردنظر از قبیل تاثیر ضخامت، پهنا و فاصله نوارهای *FRP*، برای هر نمونه منحنی تنش-کرنش استخراج گردیده و به بررسی مشخصات *FRP* استفاده شده بر شکل‌پذیری ستون بتن‌آرمه پرداخته شد.

۲. گذری بر پژوهش‌های پیشین

ماتیس و همکاران [۶]، اقدام به بررسی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی ستون‌های بزرگ مقیاس با ارتفاع ۲ متر، قطر ۴۰۰ میلی‌متر، مقدار میلگرد طولی ۰/۹٪ و خاموت‌های با قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۱۴۰ میلی‌متر، محصورشده با دورپیچ *FRP* تحت بار مستقیم فشاری نمودند. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی مقاومت نهایی بتن محصور شده با *FRP* بازبینی شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، محصور شدگی بتن بوسیله دورپیچ *FRP*، تکنیکی موثر برای افزایش مقاومت و شکل‌پذیری است؛ با این وجود پیکربندی دورپیچ، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی اثربخشی دورپیچ *FRP* دارد. در مورد اعضای با دورپیچ مجزا قسمتی از بتن که محصور نشده است، فشار محصور کننده نهایی کمی (افزایش ۱۰ درصدی) نمایش داده بود. به خاطر چندین عامل تأثیرگذار، از جمله گسیختگی نزدیک تمرکز تنش‌های موضعی، یک کرنش متوسط گسیختگی *FRP* کاهش یافته، برای نمونه‌های دورپیچ شده، یافته و پی برده شد. برای مدل‌سازی این وضعیت یک ضریب کاهش با عنوان ضریب کرنش موثر *FRP* معرفی شده بود، که برابر ۰/۶ است.

فریرا و باروس [۷]، برای دستیابی به میزان تاثیر دورپیچ مجزای *FRP* ۱۰۸ نمونه ستون بتن‌آرمه استوانه‌ای با ارتفاع ۶۰۰ و قطر ۲۰۰ میلی‌متر را با آرایش‌های متفاوت *CFRP* محصور کرده و تحت بار محوری آزمایش کردند. متغیرها عبارت بود از: سختی ورق *CFRP*، فاصله بین نوارهای مجزای *CFRP*، عرض و تعداد لایه‌های *CFRP*، مقاومت بتن و میزان تسلیح داخلی. نتایج به دست آمده از

این تحقیق نشان می‌دهد، بین افزایش نسبت حجمی الیاف و مقاومت، یک روند خطی مشاهده گردید. برای ستون‌های دورپیچ شده با الیاف مجزا، همراه با افزایش نسبت حجمی الیاف، میزان کرنش محوری نهایی بتن بصورت خطی افزایش یافت. عموماً برای نمونه‌های دارای حجم الیاف معادل، ظرفیت تحمل بار برای نمونه‌های با دورپیچ مجزا کمی کمتر از نمونه‌های با دورپیچ کامل است؛ هرچند که کاربرد الیاف در نمونه‌های با دورپیچ مجزا، سریع‌تر و راحت‌تر است. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، مدل محصورشدگی پیشنهاد شده توسط لم و تنگ در سال ۲۰۰۳، برای ستون‌های با دورپیچ مجزای *FRP*، کاربردی و مفید ارزیابی و پیشنهاد گردید.

آچیلو پولو و همکاران [۸]، سعی در معرفی عملکرد مدل-های تنش کرنش موجود که برای محصورشدگی ستون‌های بتن‌آرمه با دورپیچ مجزای *GFRP* تحت بار یکنواخت فشاری بکار رفته‌اند، دارند. چهار مدل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی حاصله از یک تحقیق مربوط به ۱۶ عدد ستون بتن‌آرمه مربعی با ارتفاع ۷۵۰ و بعد ۱۵۰ میلی‌متر که با الیاف شیشه بصورت مجزا محصور شده‌اند، مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، محصورشدگی بصورت مجزا توسط *GFRP* می‌تواند بصورت قابل ملاحظه‌ای مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌آرمه را افزایش دهد. تاثیر دورپیچ مجزا در مورد ستون‌ها با تسلیح داخلی بیشتر است. از بین چهار مدل بررسی شده جهت پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش، مدل باروس و فریرا ۲۰۰۸ پیش‌بینی نسبتاً خوبی از رفتار تنش کرنش ستون‌های بتن‌آرمه محصور در *FRP* بصورت مجزا فراهم می‌کند.

پارک و همکاران [۹]، با یک تحقیق آزمایشگاهی سعی در بررسی تاثیر اعمال نوارهای مجزا مارپیچی *CFRP* داشتند. ۶۰ استوانه بتنی (با ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر) با فواصل مختلف نوارهای مجزا از هم،

عرض‌ها، تعداد لایه‌ها و سطوح مقطع متفاوت ورقه‌های *CFRP*، تحت بار فشاری تست شدند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، استفاده از نوارهای مجزای *CFRP* برای محصورکردن بتن، روشی موثر برای بهبود مقاومت و شکل‌پذیری است.

تاثیر محصورشدگی روی افزایش مقاومت فشاری با تعداد لایه‌های *CFRP* رابطه خطی نداشته و حتی اگر تعداد لایه‌ها دو برابر شود، مقاومت نهایتاً ۱/۵۴ افزایش می‌یابد.

چارالامبیدی و همکاران [۵]، روی پروژه‌ای تحلیلی و با تمرکز بر روی مدل‌سازی اجزای محدود ۱۲ عدد ستون بتن‌آرمه مربعی کم مقاومت (با ارتفاع ۷۵۰ و بعد ۱۵۰ میلی‌متر) محصور شده با *GFRP* مجزا کار کردند. از مدل خرابی دراگر پراگر برای بتن در نرم‌افزار اجزای محدود *Abaqus* استفاده گردید. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، تنش پارگی *FRP* در میانه وجه ستون و ارتفاع آن واقع شده است. وجود میلگردهای طولی و عرضی باعث استفاده بیشتری از ظرفیت تنش کششی *FRP* می‌شود.

سعادت‌منش و همکاران [۱۰]، تکنیکی جدید برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ستون‌های بتن‌آرمه معرفی کردند. این تکنیک از نوارهای کامپوزیتی مقاومت بالا به صورت دورپیچ مجزا در اطراف ستون، برای بهبود محصورشدگی و در نتیجه شکل‌پذیری و مقاومت استفاده کرده است و مدل‌های تحلیلی در این خصوص معرفی شده‌اند. یک مطالعه پارامتریک برای امتحان تاثیرات پارامترهای متغیر طراحی از قبیل مقاومت فشاری بتن، ضخامت و فاصله نوارهای *FRP* و نوع نوارها انجام شد. نتایج نشان داد که اگرچه *GFRP* در محل پارگی، تغییر طول بیشتری نسبت به *CFRP* دارد، الیاف کربن ظرفیت بیشتری در خصوص جذب انرژی دارند. با افزایش مقاومت فشاری بتن، نرخ افزایش بار محوری نهایی، شکل‌پذیری و ماگزیم ظرفیت خمشی کاهش می‌یابد. فاکتور شکل‌پذیری بصورت خطی

با افزایش ضخامت نوارها، زیاد و با افزایش فاصله نوارها کم می‌شود.

۳. مدل‌سازی اجزای محدود

در این پژوهش، رفتار فشاری بتن محصورشده با *FRP* و تاثیر تغییر عرض، فاصله، تعداد لایه‌ها، سطح مقطع ورق-های *FRP* بر روی آن بررسی می‌شود. در اینجا برای رسیدن به نتایج واقعی و معتبر، بر خلاف بسیاری از مقالات که از استوانه‌های بتنی غیر مسلح کوچک مقیاس استاندارد با قطر ۱۵۲ و ارتفاع ۳۰۵ میلیمتر استفاده کرده‌اند، از ستون‌های بتن‌آرمه بزرگ‌مقیاس با ارتفاع ۲ متر و قطر ۴۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. این استوانه‌ها، به صورت کامل و مجزا با مصالح *FRP* دورپیچ و محصور شده‌اند. بتن و *FRP* به صورت ماده‌ای که قابلیت تغییرشکل پیدا کردن دارد، تعریف می‌شوند. همچنین دوسر ابتدا و انتها، جهت اعمال بارگذاری به صورت یکنواخت، بصورت کاملاً صلب تعریف شدند. با توجه به هندسه مدل، دستگاه مختصات استوانه‌ای تعریف و به بتن و دورپیچ *FRP* اختصاص داده شد. در محل تکیه‌گاه استوانه بتنی و نیز در وجه بالایی آن، شرایط مرزی به صورت گیردار کامل تعریف شده و بنابراین، کلیه درجات آزادی دورانی و انتقالی در پایین و بالای استوانه بسته خواهند بود، به جز درجه آزادی انتقالی در راستای محور طولی در بالای استوانه، که از آن جهت اعمال بار به صورت یک تغییر مکان یکنواخت استفاده می‌شود. برای مش‌بندی بتن، از المان *C3D8R* استفاده می‌شود. در مش‌بندی دورپیچ *FRP*، المان *S4R* به کار می‌رود و از گونه پوسته‌ای می‌باشد. با توجه به بزرگ‌مقیاس بودن ستون، ابعاد مش‌بندی نیز پس از انجام تحلیل حساسیت، برای بتن ۵۰ میلی‌متر و برای دورپیچ *FRP*، ۲۵ میلی‌متر برای ستون‌های با دورپیچ مجزا و برای بتن ۵۰ میلی‌متر و برای دورپیچ *FRP*، ۵۰ میلی‌متر برای ستون‌های با دورپیچ کامل انتخاب شده است. جهت استخراج تنش محوری،

واکنش تکیه‌گاهی محوری بر مساحت استوانه بتنی تقسیم می‌شود. کرنش محوری، از تقسیم جابجایی محوری دو نقطه اختیاری بر روی سطح خارجی استوانه بتنی، بر فاصله آنها به دست می‌آید. کرنش جانبی نیز از تقسیم جابجایی شعاعی یک نقطه در میان‌ارتفاع و روی سطح خارجی دورپیچ *FRP*، بر شعاع آن حاصل می‌گردد. که در اینجا با توجه به استوانه‌ای بودن مختصات، جابجایی در جهت ۱ متفاوت از جابجایی آن نقطه در جهت ۲ می‌باشد؛ لذا لازم است جابجایی‌های بدست‌آمده در امتداد ۱ و ۲ در این نقطه، به توان ۲ رسیده، و در زیر رادیکال به قوه ۲ با هم جمع گردد و عدد حاصله تقسیم بر شعاع که همان ۰/۲ متر است، گردد تا کرنش پیرامونی یا جانبی نیز بدست آید.

دورپیچ *FRP*، با استفاده از ثابت‌های مهندسی آن و به صورت یک ماده ارتوتروپ که دارای مشخصات متفاوت در سه راستای عمود بر هم مشترک است، مدل‌سازی شد. باید دانست، در شرایط تنش صفحه‌ای، مانند شرایط حاکم در یک المان پوسته‌ای، تنها مقادیرهای $E1$ ، $E2$ ، $\nu12$ ، $G12$ ، $G13$ و $G23$ برای تعریف رفتار یک ماده ارتوتروپ مانند *FRP* مورد نیاز هستند. همچنین، گسیختگی استوانه‌های بتنی محصورشده با *FRP*، با پارگی *FRP* کنترل می‌شود. به سخن دیگر، از معیار گسیختگی کرنش محیطی (حلقوی) بیشینه *FRP* استفاده می‌گردد. در هنگام مدل‌سازی به منظور صحت‌سنجی اعتبار آن، مقدار این کرنش بیشینه از نتایج آزمایشگاهی موجود که برای صحت‌سنجی استفاده می‌شوند، به دست می‌آید.

برای تعریف رفتار غیرخطی بتن محصورشده با *FRP*، از مدل رفتاری ترکیبی پلاستیک - خسارت بتن *Concrete Damage Plasticity*، که پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری می‌باشد، استفاده شد. به منظور مدل‌سازی بر اساس مدل ترکیبی پلاستیک-خسارت بتن در *Abaqus*، پنج پارامتر اصلی زاویه اتساع، خروج از

$$\sigma_c = f'_{co} \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که در این رابطه σ_c و ϵ_c به ترتیب تنش و کرنش فشاری، f'_{co} و ϵ'_c به ترتیب مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن غیر محصور و کرنش متناظر با آن می‌باشد. مدل کنت و پارک اساساً برای بتن‌های محصور شده توسط میلگرد عرضی می‌باشد، اما چون این مدل افزایش مقاومتی را برای بتن ناشی از محصورشدگی در نظر نمی‌گیرد، استفاده از آن برای مدل سازی بتن‌های محصور در میلگرد عرضی، به میزان قابل ملاحظه‌ای محافظه‌کارانه خواهد بود. در این جا، از این مدل برای تعریف رفتار بتن پوشش که محصور در میلگرد عرضی نیست، استفاده شد.

میرمیران و شه‌اوی در سال ۱۹۹۶، اسپولترا و مونتی در سال ۱۹۹۹، فام و ریز کالا در سال ۲۰۰۱ و چان و پارک در سال ۲۰۰۲، در مطالعات خود، مدل ارائه شده توسط ماندنر [۱۴] در سال ۱۹۸۸ را برای بتن محصور در میلگرد عرضی به‌عنوان مدل بتن تحت فشار محصورشدگی فعال پذیرفتند. طبق روابط ۲ و ۳، با فرض رفتار الاستوپلاستیک برای فولاد بعد از تسلیم شدن، رفتار بتن محصور در آن، تقریباً همانند رفتار بتن تحت فشار محصورشدگی فعال در نظر گرفته می‌شود. این محققان معادله تنش-کرنش محوری که برای اولین بار توسط پوپوویچ در سال ۱۹۷۳، ارائه و توسط ماندنر برای بتن محصور در میلگرد عرضی پذیرفته شد را استفاده کردند.

$$\frac{\sigma_c}{f'_{cc}} = \frac{r(\epsilon_c/\epsilon_{cc})}{r-1+(\epsilon_c/\epsilon_{cc})^r} \quad (2)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - \left(\frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \right)} \quad (3)$$

در این معادلات، f'_{cc} مقاومت فشاری بتن محصور شده و ϵ_{cc} ، کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری بتن محصور شده و EC مدول الاستیسیته بتن غیر محصور هستند.

همچنین برای به‌دست‌آوردن مقاومت فشاری بتن محصور از رابطه ۴، پیشنهاد شده توسط ماندنر استفاده کردند.

مرکزیت، نسبت مقاومت فشاری دو محوره به یک محوره، نسبت مقاومت برشی بین دو حالت فشار دو محوره به سه محوره، ویسکوزیته مورد نیاز هستند. همچنین، منحنی تنش-کرنش کششی و منحنی تنش-کرنش فشاری به منظور تعریف سخت‌شدگی مدل ترکیبی پلاستیک-خسارت بتن، باید محاسبه و در نرم‌افزار وارد شوند. بسته به نوع مساله، طبقه یافتن این پارامترها متفاوت خواهد بود. در این پژوهش، نسبت پواسن بتن برابر ۰/۱۵ و مدول الاستیسیته آن، EC نیز برابر $15900\sqrt{f'_{co}}$ فرض گردید.

در محاسبه پارامترهای مورد نیاز جهت مدل سازی رفتار پلاستیک بتن، به مقدار کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری بتن محصور نشده، ϵ'_c ، نیاز می‌باشد. چنانچه مقدار این پارامتر موجود نباشد، بر اساس رابطه $0.0009374\sqrt{f'_{co}}$ محاسبه می‌شود [۱۱].

پارامترهای لازم برای تعریف رفتار بتن در این مدل به شرح زیر می‌باشد:

زاویه اتساع برای قسمت پوشش بتن ۳۵ درجه انتخاب شد. میزان زاویه اتساع برای بتن‌های محصور در میلگرد عرضی، کمتر از بتن‌های غیرمحصور می‌باشد. در این تحقیق مقدار مربوطه برابر ۲۱ درجه در نظر گرفته می‌شود. خروج از مرکزیت برابر ۰/۱، نسبت مقاومت فشاری دو محوری به یک محوره برابر ۱/۱۶، نسبت مقاومت برشی بین دو حالت فشار دو محوره به سه محوره مساوی ۰/۶۶ و ویسکوزیته برابر ۰/۰۰۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

در ادامه برای تعریف منحنی رفتار تک محوره بتن غیر محصور می‌توان از نتایج آزمایشگاهی استفاده نمود یا اینکه از مدل‌های رفتاری موجود در این زمینه مانند مدل هاگنستاد بهره برد [۱۳]. در این پژوهش از یکی از مشهورترین مدل‌های رفتاری بتن غیر محصور یعنی مدل کنت و پارک استفاده می‌گردد. رابطه این مدل بصورت زیر می‌باشد:

در این معادله، f'_{co} مقاومت فشاری بتن محصور نشده و ϵ_{co} کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری بتن محصور نشده هستند. منحنی تنش-کرنش نیز بر اساس رابطه‌های زیر تولید می‌شود:

$$\frac{\sigma_c}{f'_{cc}} = \frac{\left(\frac{\epsilon_l}{\epsilon'_{cc}}\right)^r}{r-1 + \left(\frac{\epsilon_l}{\epsilon'_{cc}}\right)^r} \quad (8)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - f'_{cc} / \epsilon'_{cc}} \quad (9)$$

$$\frac{f'_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.5 \frac{\sigma_l}{f_{co}} \quad (10)$$

$$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + 17.5 \frac{\sigma_l}{f_{co}} \quad (11)$$

۴. نتایج صحت‌سنجی مدل‌سازی

ستون‌ها طول ۲ متر، قطر ۴۰۰ میلی‌متر، مقدار میلگرد طولی ۱٪ و خاموت‌های با قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۱۴۰ میلی‌متر دارند [۶]. جداول ۱ و ۲، به ترتیب مشخصه‌های مکانیکی به دست آمده از آزمایش کشش و پارامترهای آزمایشگاهی ستونهای دورپیچ شده را نشان می‌دهند [۶].

$$f'_{cc} = f'_{co} (-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}}}) \quad (4)$$

کرنش محوری حداکثر در تنش محوری حداکثر نیز از رابطه ۵، پیشنهاد شده توسط ریچارت در سال ۱۹۲۹، به دست می‌آید.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} [1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f_{co}} - 1\right)] \quad (5)$$

رفتار تنش کرنش بتن محصور شده با FRP بر اساس مدل تحلیلی تنگ و همکاران [۱۵] در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، فشار محصورکنندگی تامین شده توسط FRP به صورت رابطه ۶ داده می‌شود:

$$\sigma_l = \frac{E_{frp} t_{frp} \epsilon_h}{R} \quad (6)$$

که در آن E_{frp} مدول الاستیسیته FRP در راستای محیطی، t_{frp} ضخامت دورپیچ FRP، شعاع هسته بتنی محصور شده و ϵ_h برابر با $-\epsilon_l$ ، که کرنش جانبی بتن است. معادله کرنش پیشنهادی این مدل به قرار زیر است:

$$\phi \left(\frac{-\epsilon_l}{\epsilon_{co}} \right) = \frac{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}}{1 + 8 \frac{\sigma_l}{f_{co}}} = 0.85 \left\{ \left[1 + 0.75 \left(\frac{-\epsilon_l}{\epsilon_{co}} \right) \right]^{0.7} - \exp \left[-7 \left(\frac{-\epsilon_l}{\epsilon_{co}} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

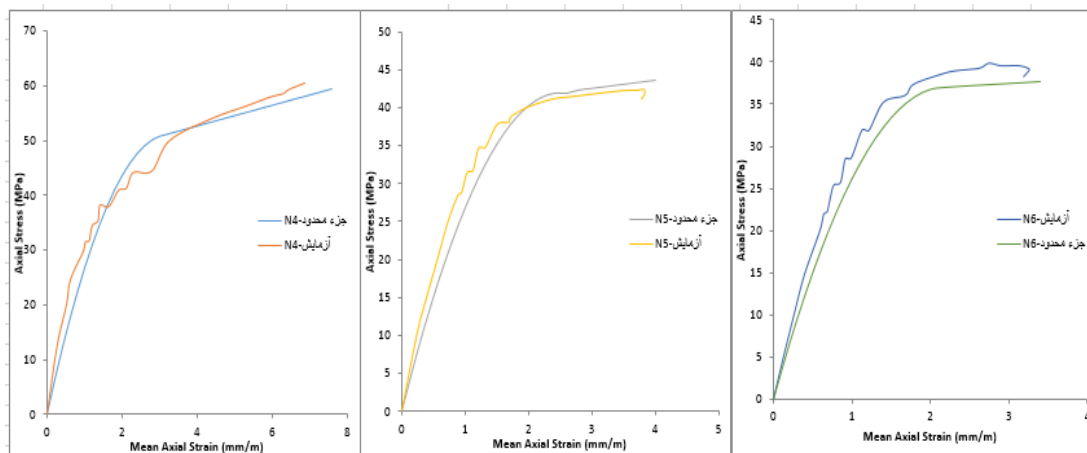
جدول ۱- مشخصه‌های مکانیکی به دست آمده از آزمایش کشش [۶]

نوع	ابعاد اسمی (mm)	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش نهایی، %	مدول الاستیسیته (MPa)
میلگرد شماره 8	8	560	610	2.77	200000
میلگرد شماره 12	12	620	720	8.73	200000
GFRP	200 x 0.300	-----	780	1.3	60000

جدول ۲- پارامترهای آزمایشگاهی ستون‌های دورپیچ شده [۶]

نوع دورپیچ	فاصله خالص بین الیاف (mm)	عرض الیاف (mm)	تعداد لایه‌ها	نوع FRP	مقاومت مشخصه بتن (MPa)	قطر ستون (mm)	نمونه‌ها
کامل	0	200	6	GFRP	39.3	400	N4
کامل	0	200	2	GFRP	39.3	400	N5
مجزا	200	200	4	GFRP	35.8	400	N6

نمودارهای تنش-کرنش محوری حاصل از نتایج صحت‌سنجی مدل‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی ذکر شده، در شکل ۱ دیده می‌شوند. بنابراین، مدل‌سازی اجزای محدود بر اساس مدل پلاستیسیته آسیب بتن از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و می‌تواند برای مطالعات پارامتریک به کار رود.

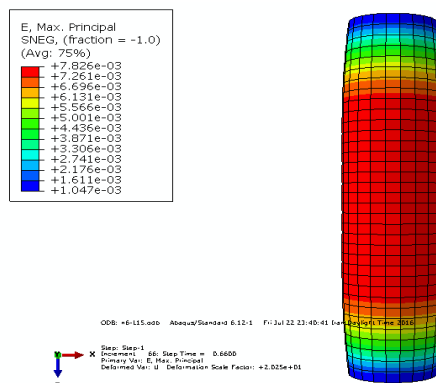


شکل ۱- نتایج صحت‌سنجی مدل‌سازی با نمونه‌های آزمایشگاهی موجود در مرجع [۶]

مقدار میلگرد طولی ۱٪، خاموت‌های با قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۱۴۰ میلی‌متر و بر اساس توضیحات بخش ۳.۳ در نرم‌افزار مدل‌سازی شد. مشخصات مهندسی دورپیچ *GFRP* به کار رفته به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر که از دو تا ۴ لایه استفاده شده‌اند، در جدول ۳ آورده شده‌اند. در این جدول، ϵ_{frp} کرنش کششی نهایی اسمی الیاف است.

در جدول ۴ نامگذاری نمونه‌ها بر اساس نوع دورپیچ که می‌تواند، کامل یا مجزا باشد، تعداد لایه‌ها، عرض لایه‌ها و فاصله خالص بین لایه‌های *GFRP* که مشخص‌کننده درصد پوشش الیاف روی سطح پیرامونی ستون است، انجام شده است. در این جدول نمونه‌ها دارای یک نام کوتاه و یک نام اصلی هستند که مشخصات آنها را نشان می‌دهد. عدد بعد از *N* نشان دهنده تعداد لایه *FRP*، عدد بعد از *w* معرف عرض الیاف و عدد بعد از *P* معرف درصد پوششی الیاف هستند.

شکل ۲. توزیع کرنش‌های جانبی در *GFRP* نشان می‌دهد، که بیشترین کرنش جانبی در میانه ارتفاع لایه *GFRP* اتفاق می‌افتد، بنابراین شکست ستون با پارگی *GFRP* در ارتفاع میانی همراه است.



شکل ۲- توزیع کرنش جانبی در ارتفاع *FRP*

۵. مطالعه پارامتری

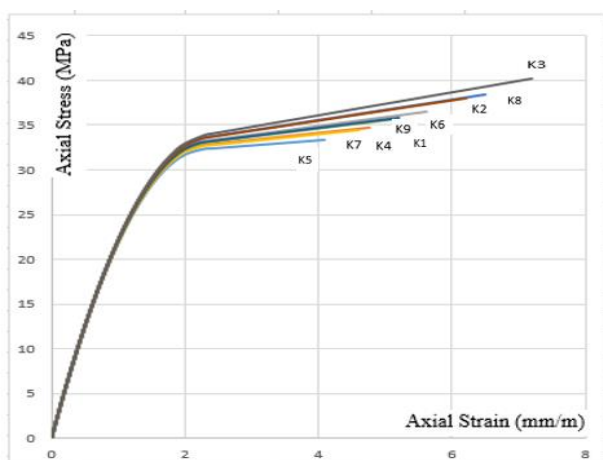
در این پژوهش، تاثیر فاصله الیاف مجزا بر رفتار فشاری بتن محصورشده با *GFRP* بررسی شد. به منظور بررسی تاثیر این عامل، نمونه ستون بتن مسلح با مقاومت‌های فشاری اولیه ۲۵ مگاپاسکال، طول ۲ متر، قطر ۴۰۰ میلی‌متر،

جدول ۳- مشخصات مهندسی مصالح *GFRP* به کار رفته در مطالعه پارامتری

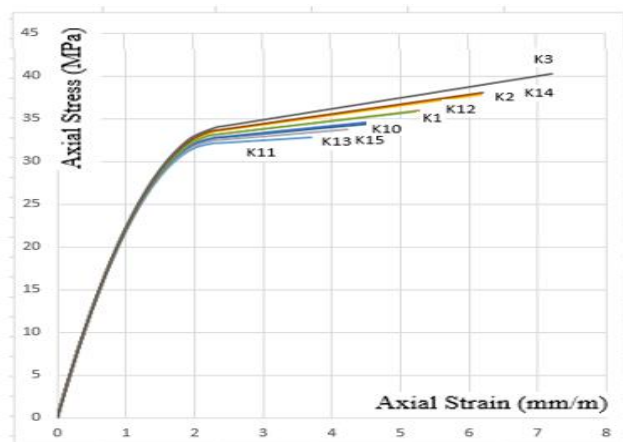
$E1(GPa)$	$E2(GPa)$	ν_{12}	$G_{12}(GPa)$	$G_{13}(GPa)$	$G_{23}(GPa)$	ϵ_{frp}
60	20	0.25	10	10	3.846	0.013

جدول ۴- نامگذاری نمونه‌ها جهت مطالعه پارامتری

نام اصلی	نام کوتاه	نام اصلی	نام کوتاه	نام اصلی	نام کوتاه	نام اصلی	نام کوتاه
N0W0P0	K0	N2W50P75	K4	N2W100P75	K10	N2W200P75	K16
N2W200P100	K1	N2W50P50	K5	N2W100P50	K11	N2W200P50	K17
N3W200P100	K2	N3W50P75	K6	N3W100P75	K12	N3W200P75	K18
N4W200P100	K3	N3W50P50	K7	N3W100P50	K13	N3W200P50	K19
		N4W50P75	K8	N4W100P75	K14	N4W200P75	K20
		N4W50P50	K9	N4W100P50	K15	N4W200P50	K21

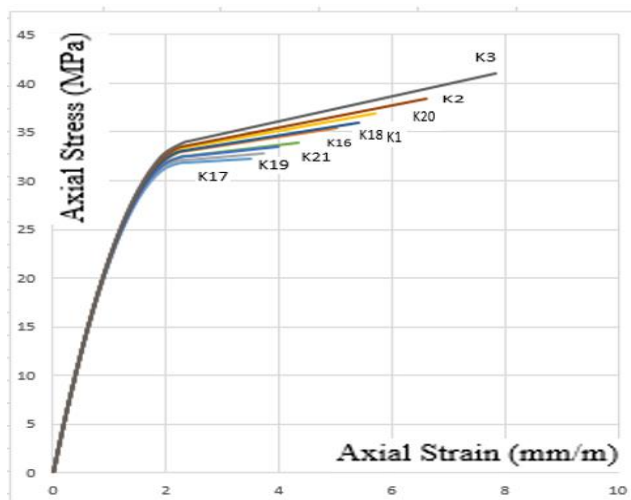


شکل ۳- نمودارهای تنش-کرنش محوری برای ستون با دورپیچ کامل و نمونه‌های با دورپیچ مجزای ۵۰ میلی‌متری



شکل ۴- نمودارهای تنش-کرنش محوری برای ستون با دورپیچ کامل و نمونه‌های با دورپیچ مجزای ۱۰۰ میلی‌متری

شکل‌های ۳، ۴ و ۵ منحنی‌های تنش محوری-کرنش محوری نمونه‌های مدل‌سازی شده را نشان می‌دهند. نتایج برداشت شده از نمودارهای تنش-کرنش ستون‌ها، شامل مقاومت فشاری نهایی، شکل‌پذیری و فاکتور تاثیر کرنش گسیختگی $GFRP$ ، در جدول ۶ نشان داده شده است. کرنش‌های ذکر شده، برابر مقادیر متوسط اندازه‌گیری‌های کرنش در ارتفاع یک متر و ۲۰۰ میلی‌متری میانه ارتفاع ستون‌ها هستند. در جدول ۵، ϵ_{ccu} ، کرنش فشاری محوری نهایی بتن محصور شده متناظر با نقطه گسیختگی عضو، ϵ_c' ، کرنش ماگزیمم بتن غیر محصور، که در اینجا برابر 0.002 است، ϵ_{fu} ، کرنش گسیختگی طراحی $GFRP$ بر اساس آزمایش کششی مستقیم، ϵ_{fe} ، کرنش موثر $GFRP$ بدست آمده در هنگام گسیختگی، k_e ، فاکتور تاثیر کرنش گسیختگی $GFRP$ ، f'_{co} ، مقاومت فشاری مشخصه بتن غیر محصور، f'_{c1} ، مقاومت فشاری بتن آرمه غیر محصور (بتن و میلگرد طولی و عرضی)، f'_{cc} ، مقاومت فشاری بتن آرمه محصور شده می‌باشد.



شکل ۵- نمودارهای تنش-کرنش محوری برای ستون با دور پیچ کامل و نمونه‌های با دور پیچ مجزای ۲۰۰ میلی‌متری

جدول ۵- نتایج مقاومت فشاری، شکل پذیری و فاکتور تاثیر کرنش گسیختگی GFRP در نمونه‌ها

نمونه	ϵ_{ccu} , mm/mm	$\epsilon_{ccu}/\epsilon'_c$	ϵ_{fu} , mm/mm	ϵ_{fe} , mm/mm	$k_\epsilon = \epsilon_{fe}/\epsilon_{fu}$	f'_{co} , MPa	f'_{c1} , MPa	f'_{cc} , MPa	f'_{cc}/f'_{c1}
K0	0.0032	1.6	-	-	-	25	31	-	1
K1	0.0054	2.7	0.013	0.0088	0.68	25	31	36	1.16
K2	0.0066	3.3	0.013	0.0088	0.68	25	31	38.5	1.24
K3	0.0078	3.9	0.013	0.0088	0.68	25	31	41	1.32
K4	0.0047	2.35	0.013	0.0084	0.65	25	31	34.7	1.12
K5	0.0041	2.05	0.013	0.0078	0.6	25	31	33.3	1.075
K6	0.0056	2.8	0.013	0.0084	0.65	25	31	36.5	1.18
K7	0.0046	2.3	0.013	0.0078	0.6	25	31	34.5	1.11
K8	0.0065	3.25	0.013	0.0084	0.65	25	31	38.4	1.24
K9	0.0051	2.55	0.013	0.0078	0.6	25	31	35.7	1.15
K10	0.0046	2.3	0.013	0.0081	0.62	25	31	34.4	1.11
K11	0.0038	2.9	0.013	0.0069	0.53	25	31	32.8	1.06
K12	0.0054	2.7	0.013	0.0081	0.62	25	31	36.1	1.165
K13	0.0042	2.1	0.013	0.0069	0.53	25	31	33.8	1.09
K14	0.0062	3.1	0.013	0.0081	0.62	25	31	37.8	1.22
K15	0.0046	2.3	0.013	0.0069	0.53	25	31	34.7	1.12
K16	0.0043	2.15	0.013	0.0076	0.58	25	31	34	1.10
K17	0.0035	1.75	0.013	0.0056	0.43	25	31	32.2	1.04
K18	0.005	2.5	0.013	0.0076	0.58	25	31	35.4	1.14
K19	0.0037	1.85	0.013	0.0056	0.43	25	31	32.8	1.06
K20	0.0057	2.85	0.013	0.0077	0.59	25	31	37	1.19
K21	0.004	2	0.013	0.0056	0.43	25	31	33.4	1.08

در شکل ۶، توسط نمودار ستونی افزایش مقاومت در نمونه‌های مختلف نسبت به مقاومت اولیه بتن غیر محصور، تصویر شده است. افزایش مقاومت تا ۱/۳۲ برای ستون‌های با دورپیچ کامل و ۱/۲۴ برای ستون‌های با دورپیچ مجزای مختلف دیده می‌شود و این افزایش مقاومت شدیداً به طرح‌بندی دورپیچ و مقدار آن بستگی دارد.

۵-۱. رفتار تنش - کرنش و تأثیر پیکربندی دورپیچ

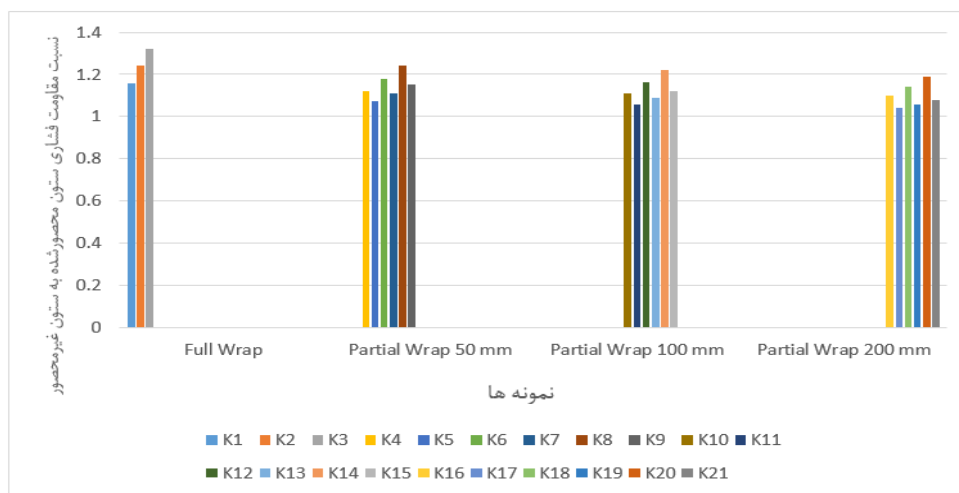
مقایسه ستون‌ها بصورت کامل دورپیچ شده و ستون‌های با دورپیچ مجزا با تعداد لایه‌های برابر $GFRP$ ، افزایش بیشتری در مقاومت و شکل‌پذیری در ستون‌ها بصورت کامل دور پیچ شده نشان داده است. در اینجا اساساً افزایش مقاومت به مقدار و نوع چیدمان $GFRP$ وابسته است. نسبت $\epsilon_{fe} / \epsilon_{fu}$ (کرنش نهایی پیرامونی / کرنش نهایی $GFRP$) برای ستون‌های بصورت کامل دورپیچ شده ۰/۶۸ و برای ستون‌های بصورت مجزا دورپیچ شده بین ۰/۴۳ تا ۰/۶۸ متغیر بود. این نسبت کمتر از یک که احتمالاً ناشی از تأثیرات ثانویه نزدیک گسیختگی، مثل تمرکز تنش در $GFRP$ به خاطر تغییر شکل‌های ناهمگن بتن آسیب‌دیده است، مهم و قابل توجه می‌باشد و باعث یک توزیع غیرخطی کرنش در دورپیچ $GFRP$ خواهد شد. به این مساله باید توجه شود که کرنش گسیختگی کششی نهایی ϵ_{fu} بالاتر از مقدار کرنش متوسط بدست آمده (ϵ_{fe}) در این پژوهش است. کرنش گسیختگی کششی نهایی الیاف که از آزمایش کشش مستقیم حاصل شده است، در اینجا ۱/۳٪ بوده است. مقایسه ستون‌های دورپیچ

شده کامل و جزئی با یک مقدار کلی FRP (جدول ۵ و شکل‌های ۳ تا ۵)، ستون‌های با دور پیچ جزئی در قسمتی از بتن که محصور شده نیستند، شکل‌پذیری کمتر و افزایشی کمتر در مقاومت نشان دادند. نسبت $\epsilon_{fe} / \epsilon_{fu}$ برای ستون‌های جزئی دورپیچ شده بین ۰/۴۳ تا ۰/۶۵ بدست آمد، که از ستون‌های گرد بصورت کامل دورپیچ شده کمتر است. بررسی جدول ۵، همچنین نشان می‌دهد در ستون‌هایی که درصد پوشش الیاف از ۷۵ به ۵۰ درصد کاهش یافته، ضریب K_e نیز افت زیادی نشان می‌دهد، که این نشان می‌دهد که تأثیرات ثانویه نزدیک گسیختگی و تمرکز تنش‌ها به علت محصورشدگی کم این نواحی به شدت افزایش یافته و باعث گسیختگی زودرس الیاف خواهد شد. و همچنین در درصدهای پوششی مساوی الیاف، هرچه عرض الیاف کمتر شود، ضریب K_e افزایش یافته و استفاده بهتری از مقاومت کششی الیاف می‌توان نمود.

۵-۲. انتخاب نمونه‌های با دورپیچ مجزا جایگزین

دورپیچ کامل، با ملاحظه رفتار تنش - کرنش

با توجه به جدول ۵، و دقت در مقاومت فشاری و کرنش محوری حاصل شده و همچنین بررسی نسبت مقاومت بتن محصور به بتن غیر محصور از شکل ۶، می‌توان از نمونه-های با دورپیچ مجزای $K6, K8, K9, K12, K14, K18$ و $K20$ به عنوان جایگزین نمونه $K1$ که در آن از دو لایه $GFRP$ برای دورپیچ کردن کامل ستون استفاده شده است، بهره برد.



شکل ۶- نسبت مقاومت فشاری ستون محصور به ستون غیر محصور

با توجه به جدول ۵، و دقت در مقاومت فشاری و کرنش محوری حاصل شده و همچنین بررسی نسبت مقاومت بتن محصور به بتن غیر محصور از شکل ۶، می‌توان از نمونه‌های با دورپیچ مجزای $k8$ و $K14$ به عنوان جایگزین نمونه $K2$ که در آن از سه لایه $GFRP$ برای دورپیچ کردن کامل ستون استفاده شده است، بهره برد.

با توجه به جدول ۵، و دقت در مقاومت فشاری و کرنش محوری حاصل شده و همچنین بررسی نسبت مقاومت بتن محصور به بتن غیر محصور از شکل ۶، از آنجا که در این کار پژوهشی تعداد لایه‌های $GFRP$ را به ۴ لایه محدود کرده‌ایم، نمونه‌ای با دورپیچ مجزا که از آن بتوان به عنوان جایگزین نمونه $K3$ که در آن از چهار لایه $GFRP$ برای دورپیچ کردن کامل ستون استفاده شده است، نخواهیم داشت و جهت دستیابی به این منظور نیاز به افزایش تعداد لایه‌ها در حالت مجزا نسبت به ۴ لایه خواهیم داشت.

۴-۵. انتخاب نمونه‌های با دورپیچ مجزا جایگزین دورپیچ کامل، با ملاحظه رفتار تنش - کرنش و ملاحظات اقتصادی

برای بررسی و مقایسه نمونه‌های انتخاب شده که معیار انتخاب آن‌ها مقاومت فشاری نهایی و شکل‌پذیری ستون بود، در جدول ۷، اقدام به محاسبه هزینه‌های مربوط به تهیه الیاف، چسب اپوکسی و هزینه آماده‌سازی و نصب برای هر کدام از ستون‌های انتخابی کرده‌ایم و نهایتاً نمونه‌هایی انتخاب می‌شوند که هم مقاومت فشاری نهایی و شکل‌پذیری آن‌ها قابل قبول باشد و هم از لحاظ اقتصادی قابل مقایسه با ستون با دورپیچ کامل باشند.

در جدول ۶ برای محاسبه هزینه الیاف مصرفی، مقدار مساحت الیاف مصرفی با توجه به عرض، فاصله خالص الیاف، تعداد لایه‌ها و مقدار هم‌پوشانی (اورلپ در محل

اتصال) ۱۰۰ میلی‌متر بدست آمده و در قیمت یک متر مربع الیاف شیشه که در بازار ایران حدوداً ۲۹۰۰۰ تومان می‌باشد، ضرب شده است. برای محاسبه هزینه رزین اپوکسی، وزن رزین با توجه به عرض و فاصله خالص الیاف بدست آمده و در قیمت یک کیلوگرم چسب اپوکسی که در بازار ایران حدوداً ۳۵۰۰۰ تومان می‌باشد، ضرب شده است. برای محاسبه وزن اپوکسی، مقدار آن در لایه اول $1/4$ کیلوگرم در متر مربع و در لایه‌های بعدی به ازای هر لایه ۶۰۰ گرم به مقدار مصرف شده در لایه اول اضافه می‌گردد. برای محاسبه هزینه آماده‌سازی و نصب، مساحت با توجه به عرض و فاصله خالص الیاف بدست آمده است. به ازای هر متر مربع آماده‌سازی شامل زدودن شیره سیمان، فرزکاری خطوط بجا مانده از قالب‌بندی و برآمدگی‌ها و پر کردن مک‌ها و حفرات و کرموهای سطحی با ملات مناسب، مبلغ ۲۰۰۰۰ تومان و هر متر مربع نصب برای هر لایه مبلغ ۳۰۰۰ تومان، بصورت تقریبی در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول ۶، و ملاحظه اقتصادی که شامل هزینه الیاف، چسب، آماده‌سازی و نصب می‌باشد، به نظر می‌رسد ستون $K9$ بهترین انتخاب در حالت دورپیچ مجزا برای جایگزینی با ستون $K1$ که با ۲ لایه $GFRP$ به صورت کامل دورپیچ شده است، می‌باشد. بعد از آن نیز ستون‌های $K6$ ، $K12$ و $K18$ با توجه به مزایای ذکر شده در خصوص نصب الیاف بصورت مجزا، مناسب به نظر می‌رسند. استفاده از ستون‌های $K8$ ، $K14$ و $K20$ به عنوان جایگزینی برای ستون $K1$ غیراقتصادی خواهد بود.

به ترتیب بالا، همچنین دو ستون $K8$ و $K14$ انتخاب‌های بسیار مناسبی در حالت دورپیچ مجزا، برای جایگزینی با ستون $K2$ که با ۳ لایه $GFRP$ به صورت کامل دورپیچ شده است، هستند.

جدول ۶- نتایج مربوط به ملاحظات اقتصادی برای نمونه‌های K1, K6, K8, K9, K12, K14, K18 و K20

نمونه	مقدار الیاف مصرفی (m2)	هزینه الیاف مصرفی (تومان)	مقدار چسب اپوکسی مصرفی (Kg)	هزینه چسب اپوکسی مصرفی (تومان)	مساحت آماده‌سازی و نصب (m2)	هزینه آماده‌سازی و نصب	جمع کل هزینه (تومان)
K1	5.424	157296	5.024	175840	2.512	65312	400000
K6	6.508	188755	5.224	182873	2.009	58278	430000
K8	8.678	251673	6.430	225075	2.009	64307	540000
K9	6.508	188755	4.823	168806	1.507	48230	405000
K12	6.508	188755	5.224	182873	2.009	58278	430000
K14	8.678	251673	6.430	225075	2.009	64307	540000
K18	6.508	188755	5.224	182873	2.009	58278	430000
K20	8.678	251673	6.430	225075	2.009	64307	540000

۶. نتیجه‌گیری

براساس آزمایش‌های انجام شده روی ستون‌های بزرگ مقیاس دورپیچ شده نتایج زیر بدست آمده است :

۱. محصور شدگی بتن بوسیله دورپیچ *GFRP*، تکنیکی موثر برای افزایش مقاومت و شکل‌پذیری است. با این وجود پیکربندی دورپیچ تأثیر قابل ملاحظه روی اثربخشی دورپیچ *GFRP* دارد. در مورد اعضای با دورپیچ مجزا قسمتی از بتن که محصور نشده است، فشار محصور کننده نهایی کم و در نتیجه افزایش مقاومت پایین نمایش داده بود.

۲. در کنار و به اضافه اثربخشی (تأثیر دورپیچ مجزا)، افزایش مقاومت عموماً به مقدار دورپیچ *GFRP* بستگی دارد.

۳. چونکه *GFRP* بصورت الاستیک خطی برخورد می‌کند، متناظر با افزایش در انبساط جانبی بتن، به یک فشار محصور کنندگی افزایشی تمایل دارد؛ اگر چه وضعیت نهایی عضو محصور شده با گسیختگی *GFRP* همزمان است، کرنش موثر گسیختگی *GFRP* کمتر از f_{frp} / E_{frp} است.

۴. به خاطر چندین فاکتور تأثیرگذار، از جمله گسیختگی نزدیک تمرکز تنش‌های موضعی، یک کرنش متوسط گسیختگی *GFRP* کاهش یافته، برای نمونه‌های دورپیچ شده، مشاهده شد.

۵. در ستون‌هایی که درصد پوشش الیاف از ۷۵ به ۵۰ درصد کاهش یافته، ضریب K_E یا ضریب تأثیر گسیختگی الیاف، افت زیادی نشان می‌دهد، که این نشان می‌دهد که تاثیرات ثانویه نزدیک گسیختگی و تمرکز تنش‌ها به علت محصورشدگی کم این نواحی به شدت افزایش یافته و باعث گسیختگی زودرس الیاف خواهد شد. همچنین در درصدهای پوششی مساوی الیاف، هرچه عرض الیاف کمتر شود، ضریب K_E افزایش یافته و استفاده بهتری از مقاومت کششی الیاف می‌توان نمود.

۶. در صورت انتخاب صحیح چیدمان و ضخامت، استفاده از نوارهای مجزای *GFRP*، یک روش موثر و اقتصادی، برای بهبود مقاومت و شکل‌پذیری بتن می‌باشد. پی برده شد که نصب ورقه‌های *GFRP* باریک مجزا، آسان بوده و فضای بین آنها باعث می‌شود که براحتی بتوانیم هوای ایجاد شده را خارج کرده و از کیفیت چسبندگی مطمئن بشویم.

1. Zihan Yan and Chris P. Pantelides. (2006), "Fiber-Reinforced Polymer Jacketed and Shape-Modified Compression Members: II—Model," *ACI Structural Journal*, V. 103, No. 91, pp. 894-903.
2. Houssam A. Toutanji. (1999), "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets," *ACI Material Journal*, V. 96, No. 50, pp. 397-404.
3. ACI Committee 440. (2008), "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," *American Concrete Institute, ACI 440.2R-08*, pp. 34-37.
۴. مرتضوی علوی، ن. (۱۳۸۹)، "مطالعه رفتار بتن محصور شده در FRP به روش اجزای محدود" پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
5. B.G. Charalambidi, T.C. Rousakis & A.I. Karabinis. (2012), "Finite element modeling of reinforced concrete columns seismically strengthened through jacketing partial FRP jacketing," *15 WCEE Lisboa*.
6. S. Matthys, H. Toutanji, K. Audenaert, and L. Taerwe. (2005), "Axial Load Behavior of Large-Scale Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Composites," *ACI Structural Journal*, V. 102, No. 26, pp. 258-267.
7. Ferreira, D.R.S.M, Barros, J.A.O. (2008), "Assessing the Efficiency of CFRP Discrete Confinement Systems for Concrete Cylinders," *ASCE, Journal of Composites for Construction*, DOI: 8.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(134).
8. S. Achillopoulou, D. Rousakis, and A. Karabinis. (2010), "Square Reinforced Concrete Columns Strengthen Through Fiber Reinforced Polymer (FRP) Sheet Straps."
9. Park, T. Na, U. Chung, L. Feng, M. (2008), "Compressive behavior of concrete cylinders confined by narrow strips of CFRP with spacing," *Composites: Part B* 1093-1103.
10. H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, and M. W. Li. (1994), "Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps," *ACI Structural Journal*, V. 91, No. 43, pp. 434-447.
۱۱. بنائی پور، ع. توکلی‌زاده، م.ر. (۱۳۹۴)، "بررسی تاثیر تغییر جهت الیاف بر رفتار فشاری بتن محصور شده با FRP" هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران.
۱۲. شهبازی، ر. یکرنگ‌نیا، م. (۱۳۹۳)، "راهنمای کاربردی *Abaqus* به همراه مسائل مهندسی عمران سازه و ژئوتکنیک"، تهران، نشر علم عمران، ص ۲۴۵، ۱۳۹۳.
13. Kent D.C. and Park R. (1971), "Flexural Members with Confined Concrete," *Journal of Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, Vol.97, No. ST7, 1969-1990.
14. Mander J.B., Priestley M.J.N., and Park R. (1988), "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering ASCE*, 114(8), 1804-1825.
15. Teng, J. G., and Lam, L. (2004), "Behavior and modeling of fiberreinforced polymer-confined concrete," *J. Struct. Eng.*, 130(11), 1713-1723