

تأثیر الیاف ترکیبی با نسبت ابعادی مختلف بر مقاومت ضربه ای بتن پرمقاومت حاوی افزودنی های معدنی

احمد رضانی^۱، میثم صمدی^{۲*}، محمد فیاض^۳

۱- دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۲- استادیار، گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۳- دانشیار، گروه عمران، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

* maysamsamadi@yahoo.com

چکیده

بهبود مشخصات مکانیکی بتن به عنوان پایه‌ای‌ترین ماده در ساخت سازه‌های مختلف، به‌ویژه مقاومت کششی، خمشی و ضربه‌ای آن از دیرباز موردتوجه پژوهشگران مختلف بوده است. در این تحقیق به بررسی اثر افزودن الیاف فولادی در نسبت ابعادی مختلف به همراه الیاف پلی‌پروپیلن با افزودنی‌های معدنی پرکاربرد به‌منظور بهبود مقاومت ضربه‌ای بتن پرداخته شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده شامل درصد الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی، نسبت طول به قطر الیاف فولادی (L/D)، درصد افزودنی‌های خاکستریادی، میکروسیلیس و اپوکسی، در سنن مختلف نمونه‌ها بوده است. آزمایش‌هایی باهدف تعیین مقاومت ضربه-ای، کششی، خمشی و فشاری روی نمونه‌های بتنی تحقیق انجام شد. برای تعیین مقاومت ضربه‌ای، روش آزمایشگاهی نوینی معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های بتن در سنن مختلف ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، بیانگر تأثیر چشمگیر استفاده از الیاف ترکیبی با نسبت ابعادی بهینه بر افزایش مقاومت کششی و ضربه‌ای و تا حدودی ضعیف‌تر بر مقاومت فشاری و خمشی بتن است که این مقادیر در نمونه‌های ۲۸ روزه برای مقاومت کششی ۲۳ درصد و مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب ۱۱ و ۱۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده‌اند. همچنین تأثیرگذاری بیشتر استفاده از افزودنی‌های معدنی بر افزایش مقاومت خمشی بتن نسبت به استفاده از الیاف مشاهده گردید. مقایسه نمونه‌ها با نسبت L/D الیاف فولادی مختلف نشان داد که الیاف با نسبت L/D کمتر به بهبود بیشتری در مشخصات مکانیکی بتن منجر می‌شوند. نهایتاً استفاده از الیاف ترکیبی با L/D بهینه و افزودنی‌های معدنی باعث افزایش مقاومت ضربه‌ای جذب انرژی ۴/۹۷ برابری نمونه‌های بتنی بهینه نسبت به نمونه بتن شاهد گردیده است.

کلمات کلیدی

بتن الیافی، مقاومت ضربه‌ای، خواص مکانیکی، الیاف ترکیبی، نسبت ابعادی الیاف، افزودنی معدنی

بتن ماده‌ای ترد است که عموماً در کنار مقاومت فشاری مطلوب آن برای بهبود مشخصه کششی آن از میلگردهای فولادی برای تحمل نیروهای کششی بعد از ایجاد ترک در سازه‌های بتنی استفاده می‌شود. کرنش کششی بتن در ترک، بسیار کمتر از کرنش تسلیم میلگردهای فولادی است که این امر مسبب ترک خوردن بتن قبل از بارگذاری قابل توجه به میلگردها می‌گردد. همچنین از کاربردهای دیگر میلگردها محدود کردن عرض ترک‌ها در بارهای سرویس است. الیاف‌ها نسبت به میلگردها در بتن دارای مزیت‌هایی هستند که از آن جمله می‌توان پخش به صورت یکنواخت در ترکیب بتن، حضور و تسلیح پوشش بتنی روی آرماتور، کمتر بودن فاصله بین الیاف نسبت به فاصله میلگردها، توانایی و عملکرد مؤثر الیاف در کنترل عرض ترک‌ها را می‌توان نام برد. الیاف با توانایی بالایی ترک خوردگی را در بتن کنترل می‌کند و مقاومت بتن در برابر خستگی، ضربه و انقباض یا تنش حرارتی را افزایش می‌دهد. الیاف به صورت ریز الیاف و درشت الیاف بر اساس قطر و طولشان دسته‌بندی می‌شوند. بتن‌های حاوی الیاف ترکیبی به بتن‌های الیافی که در آن‌ها به صورت هم‌زمان از چند نوع الیاف استفاده می‌شود، اطلاق می‌گردد. می‌توان با استفاده از الیاف درشت و ریز و یا جنس‌های متفاوت الیاف، از مزایای بهینه این الیاف بهره برد. به طور مثال می‌توان با استفاده از الیاف ریز جهت کنترل ریزترک‌ها و الیاف درشت جهت کنترل درشت‌ترک‌ها به منظور بهبود عملکرد بتن‌های الیافی استفاده برد. بیش از ۳۰۰۰ سال پیش از الیاف طبیعی برای مصالح شکننده مانند خشت استفاده می‌شد اولین مطالعه علمی در مورد استفاده از الیاف فولادی در بتن به دهه ۱۹۶۰ باز می‌گردد [۱-۲]. از آن زمان تاکنون مطالعات متعددی در خصوص ارزیابی بتن‌های الیافی صورت پذیرفته است. بررسی‌های مختلفی در خصوص تأثیر مثبت الیاف بر مشخصات استاتیکی بتن در انواع مختلف الیاف با میزان درصد متفاوت و اشکال هندسی مختلف صورت پذیرفته است که به اثرگذاری مثبت الیاف در مقاومت کششی و خمشی بتن و به مقدار کمتر بر مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف اشاره شده است [۳]. در خصوص تأثیر استفاده از الیاف در بتن‌های تحت بارگذاری دینامیکی با نرخ‌های کرنش مختلف عوامل مؤثری همچون مقدار الیاف، خواص الیاف و نسبت طولی بر رفتار بتن تحت بار دینامیکی در کنترل ترک‌ها، شکل پذیری و پوسته پوسته شدن اثرگذار گزارش شده‌اند. [۴-۱۱] در موضوع استفاده از الیاف ترکیبی جهت بهبود عملکرد بتن تحقیقات متعددی صورت پذیرفته است که تأثیرات مثبت استفاده ترکیبی از الیاف در جهت بهبود عملکرد بتن گزارش شده است. در بتن‌های شامل الیاف فلزی و پلی‌پروپیلین، نسبت ۸۵ به ۱۵ درصد به عنوان نسبت بهینه جهت بهبود عملکرد بتن پیشنهاد گردیده است [۱۲-۱۵]. میزان حجمی الیاف فلزی در نسبت‌های مختلف در بارگذاری دینامیکی و استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان یک درصد به عنوان درصد بهینه به منظور بهبود عملکرد بتن و جلوگیری از شکست شکننده پیشنهاد گردیده است [۱۶]. در بررسی صورت گرفته بر روی بتن‌های حاوی افزودنی‌های معدنی مختلف به همراه الیاف، نتایج مثبتی حاصل گردیده و ترکیب سه‌گانه ۱۵ درصد وزنی خاکستری بادی، ۱۲ درصد میکروسیلیس و یک درصد الیاف فولادی نسبت به وزن سیمان جهت بهبود رفتار مکانیکی بتن با مقاومت‌های مختلف، پیشنهاد گردیده است [۱۷]. در بتن‌های پلیمری با استفاده از پلیمرهایی مانند رزین اپوکسی به عنوان جایگزین سیمان می‌توان خواص مکانیکی بتن را نسبت به بتن معمولی بهبود بخشید. مقاومت بتن‌های پلیمری تابع میزان رزین بوده که با افزایش میزان رزین مقاومت‌های کششی و خمشی بتن افزایش پیدا می‌کند [۱۸-۲۱]. به منظور بررسی آثار کاربرد الیاف در مقاومت‌های کششی، خمشی و ضربه‌ای نمونه‌های بتنی و همچنین بررسی رفتار نمونه‌های بتنی در مقابل پرتابه‌ها با سرعت کم و زیاد با انجام آزمایش سقوط آزاد و بروز اولین ترک در آزمایش سقوط وزنه نتایج حاصل بیانگر اثر مثبت کاربرد الیاف در افزایش مقاومت نمونه‌های بتنی است در این بررسی‌ها توجه به نسبت ابعادی الیاف نگردیده است [۲۲-۲۴]. به منظور ساخت بتنی اقتصادی مقاوم به ضربه و نفوذ، از ترکیب خاکستر پوسته برنج و تراشه فولادی استفاده شده است. خاکستر پوسته برنج، غنی از سیلیس و ارزان قیمت بوده و سیلیس موجود در خاکستر پوسته برنج نقش مهمی در افزایش مقاومت فشاری بتن دارد. همچنین جهت تقویت مقاومت کششی بتن، از تراشه‌های فولادی که ارزان بوده و از ضایعات تراشکاری به دست می‌آید استفاده شده است. آزمایش نفوذ پرتابه صلب به کمک تفنگ گازی بر روی نمونه‌های بتنی انجام پذیرفته است که با جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با خاکستر پوسته برنج و اضافه کردن ۱ درصد تراشه فولادی نسبت به نمونه بتنی بدون تراشه و خاکستر، حداکثر ۱۷ درصد کاهش عمق نفوذ قابل‌دستیابی است [۲۵]. در بررسی مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های ضربه‌ای گوی افتان انجام شده با آزمایش‌های دیگران اعدادی ۲ تا ۳ برابر را نسبت به معیارهایی استاندارد ارائه می‌دهند که این نشانگر عدم تطابق آیین‌نامه و

آزمایش است. برای بتن الیافی مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن، آزمایش مقاومت در برابر ضربه، همبستگی ضعیفی را با توزیع نرمال نشان می‌دهد، به همین جهت باید روش جدیدی برای انجام آزمایش ضربه ابداع شود [۲۶]. آزمایش‌های مورد استفاده در تحقیقات جهت تعیین مقاومت ضربه‌ای بتن عبارت‌اند از آزمایش سقوط وزنه، پاندول شاریپی، آزمایش با نرخ کرنش ثابت، پرتابه، انفجار، پاندول ابرازگذاری شده، آزمایش میله هاپکینسون که توسط کمیته ACI544-2R پیشنهاد شده‌اند [۲۷]. با بررسی مقالات مختلف از میان روش‌های فوق، مرسوم‌ترین روش، آزمایش سقوط وزنه است که مطابق ASTM D 1557 [۲۸] در آن یک وزنه ۴/۵۴ کیلوگرمی روی یک گوی فولادی قرار گرفته بر روی نمونه بتنی سقوط می‌کند و تعداد دفعات سقوط تا اولین ترک و تا شکست نمونه شمارش می‌گردد. یکی از اشکالات این آزمایش، پراکندگی بالای نتایج است که در مقالات مختلف درصد‌های مختلفی دارند و همبستگی ضعیفی را با توزیع نرمال نشان می‌دهد [۲۶-۲۷]. اشکال دیگر این آزمایش وابستگی نتایج به قضاوت فردی از شروع ترک و تکمیل تخریب بتن است. در این تحقیق، برای آزمایش مقاومت به ضربه نمونه دال بتنی فاقد میلگرد، از دستگاهی که مبتنی بر سقوط وزنه سنگین مخروطی شکل است، استفاده گردید

در پژوهش حاضر، هدف اصلی دستیابی به بتن با مقاومت بالا در برابر بارهای ضربه‌ای است. در این راستا علاوه بر معرفی و استفاده از آزمایش جدید بارگذاری ضربه‌ای بتن، نسبت طول به قطر (L/D) بهینه الیاف فولادی ترکیب شده با الیاف پلی پروپیلن در ماتریس بتن حاوی افزودنی‌های معدنی به دست آمد. بر مبنای تحقیقات پیشین افزودنی‌های معدنی مورد استفاده در نمونه‌های بتنی شامل خاکستر بادی و میکروسیلیس بودند که به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان به کار رفتند [۱۷]. به‌منظور رسیدن به بهترین عملکرد، از سه نوع الیاف فولادی با نسبت‌های مختلف L/D و یک نوع الیاف پلی پروپیلن برای تهیه مخلوط بتن استفاده شده است. ویژگی‌های مکانیکی بتن تحت شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی به دست آمد. مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، دانه‌بندی و نسبت حجمی الیاف (که مقادیر مناسب آن‌ها از تحقیقات پیشین به دست آمده بود) در تمامی نمونه‌های این مقاله ثابت نگه داشته شده و فقط نسبت L/D الیاف فلزی به‌عنوان متغیر لحاظ شد. همچنین برای بررسی تأثیر پارامترهای تحقیق بر روند افزایش مقاومت بتن، کلیه آزمایش‌ها روی نمونه‌هایی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. از جمله کاربرد این بتن برای دال‌های مقاوم به بارهای دینامیکی شامل برخورد پرتابه و انفجار، روسازی و حتی بعضی از تیر و ستون‌ها با کاربری خاص را می‌توان نام برد.

۲- مصالح

۱-۲- سیمان

در تمامی نمونه‌ها از سیمان تیپ ۲ پرتلند با مشخصات فیزیکی و شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد.

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان

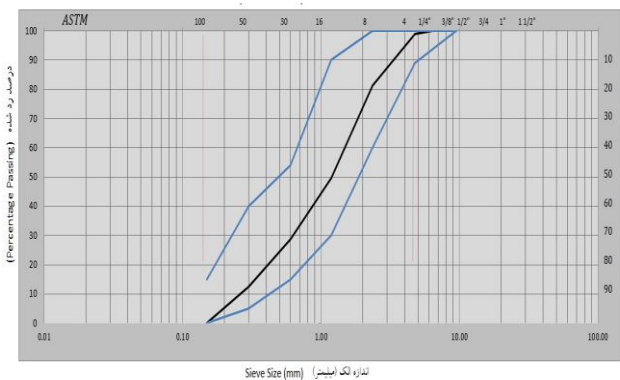
نام	اندازه
SiO ₂	٪۲۱/۳
Al ₂ O ₃	٪۴/۸
Fe ₂ O ₃	٪۳/۵۵
MgO	٪۳/۹
NaO	٪۰/۱۸
K ₂ O	٪۰/۵۱
CaO	٪۶۲/۸
C ₃ S	٪۵۵
C ₂ S	٪۲۲
C ₄ AF	٪۱۰
چگالی Kg/m ³	۳۱۵۰
سطح مخصوص Kg/m ²	۳۰۰

۲-۲- مصالح سنگی

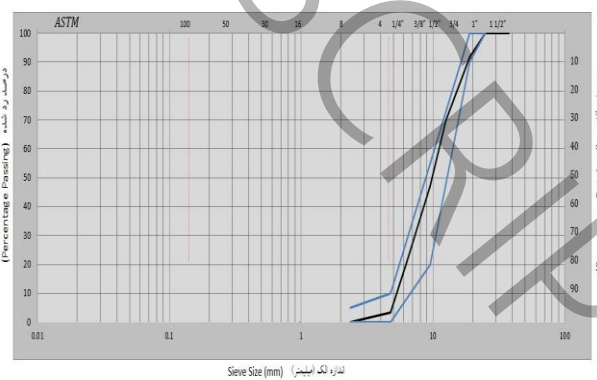
مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق شامل درشت‌دانه با ظاهری شکسته و نسبتاً گرد گوشه با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر و رد شده از الک سه‌چهارم اینچ و ماسه مصرفی دوبار شستشو با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر و رد شده از الک نمره ۴ است. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه در جدول شماره ۲ و منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ برای درشت‌دانه و ریزدانه مطابق استاندارد ملی ۳۰۲ آورده شده است.

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی سنگدانه

نام	اندازه
چگالی درشت دانه Kg/m ³	۲۴۲۹
چگالی ریزدانه Kg/m ³	۲۵۸۰
درصد جذب آب ریزدانه	٪۰/۰۰۸
درصد جذب آب درشت	۰/۰۴
مدول نرمی	٪۲/۸
SE ریزدانه	۰/۸۰



شکل ۱-ب: منحنی ریزدانه



شکل ۱-الف: منحنی درشت دانه

۳-۲- آب

در ساخت مخلوط بتن از آب شرب شهر تهران استفاده گردیده است.

۴-۲- فوق روان کننده

در این تحقیق از فوق روان کننده پلی کربسیلات با قابلیت فقط کارایی بتن با نام تجاری MEGAMIX AX 1000 شرکت فرآیندکاران شیمی پارس مطابق با استانداردهای ASTM C494:TYPEG- EN934-2 و ISIRT 2930-2 استفاده شد و در جدول ۳ ویژگی های فنی محصول آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات فوق روان کننده

نام	اندازه
جرم مخصوص Kg/m ³	۱۱۰۰
درصد هوازایی	≤ ۲٪
PH	۷±۱

۵-۲- خاکستر بادی

خاکستر بادی مورد استفاده در این تحقیق از نوع کلاس F و مطابق استاندارد ASTM C494-TYPE G و ASTM-618-CLASS F از شرکت صنایع فروآلیاژ ایران تهیه گردیده اند. خصوصیات فیزیکی و نتایج تجزیه شیمیایی محصول خاکستر بادی استفاده شده در جدول ۴ و ۵ آمده است.

جدول ۴- خصوصیات فیزیکی خاکستر بادی

نام	اندازه
چگالی Kg/m ³	۱۶۰۰
اندازه ذرات (میکرون)	-۰/۱۲
PH	۸
سطح ویژه (mm ² / g)	۱۲-۱۸

جدول ۵- ترکیبات شیمیایی خاکستر بادی

نام	اندازه
SiO ₂	٪۸۸/۵
Al ₂ O ₃	٪۴/۲
Fe ₂ O ₃	٪۱/۶
MgO	٪۰/۱۸
Na ₂ O	٪۰/۰۸
K ₂ O	٪۰/۵۱
CaO	٪۱/۸۲
SO ₃	٪۰/۰۲
TiO ₂	٪۰/۰۴

۶-۲- میکروسلیس

میکروسلیس مورد استفاده در این پژوهش شرکت فرو آلیاژ ایران شهرستان ازنا با استاندارد ASTM C1240- EN 13263 انطباق دارد که خواص فیزیکی و نتایج تجزیه شیمیایی آن در جداول ۶ و ۷ آورده شده است.

جدول ۶- خصوصیات فیزیکی میکروسیلیس

اندازه	نام
۳۱۰	چگالی Kg/m^3
<۱	اندازه ذرات (میکرون)
۸-۹	PH
۱۵	سطح ویژه (mm^2 / g)

جدول ۷- ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس

اندازه	نام
%۹۰	SiO_2
%۰/۶	Al_2O_3
%۱/۲	Fe_2O_3
%۰/۶	MgO
%۰/۳	Na_2O
%۰/۴	K_2O
%۰/۵	CaO
%۰/۸	C
%۰/۰۴	S
%۱/۵	L.O.I

۲-۷- الیاف

الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت فراتاو در چهار نوع که همگی از نوع قلابدار بودند که در شکل ۲ و جدول ۸ تصویر و ویژگی های فیزیکی آن ها آورده شده است. همچنین مشخصات الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده با طول ۱۲ میلی متر در جدول ۸ آورده شده است.



شکل ۲- اشکال مختلف الیاف فولادی و پلی پروپیلن

جدول ۸- ویژگی های الیاف فلزی و پروپیلن

نوع الیاف	شکل الیاف	طول الیاف (mm)	قطر الیاف (mm)	L/D	مدول الاستیسته (Gpa)	مقاومت کششی (Gpa)
فلزی ۱	قلابدار	۵۰	۰/۸	۶۳	۲۰۰	۱۱۰۰
فلزی ۲	قلابدار	۳۵	۰/۸	۴۴	۲۰۰	۱۱۰۰
فلزی ۳	قلابدار	۳۵	۰/۴	۸۸	۲۰۰	۱۱۰۰
پروپیلن	سرراست	۱۲	۰/۰۳۵	۳۴۲	۳,۵	۳۵۰

۸-۲ اپوکسی

اپوکسی مورد استفاده در این پژوهش از نوع دوجزئی شامل رزین با سخت کننده HE 1515 PL/2025 هستند، ویسکوزیته و چسبانندگی اپوکسی در دمای ۲۵ درجه پس از ترکیب و همچنین خصوصیات فیزیکی در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹- خصوصیات فیزیکی اپوکسی

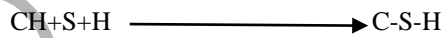
نام	اندازه
چگالی Kg/m^3	۱۱۰۰
جنس	مایع
رنگ	شفاف
چسبانندگی	Cp440

۹-۲- طرح اختلاط

دو گروه طرح اختلاط برای نمونه های بتنی مورد آزمایش استفاده شدند. طرح اختلاط گروه اول شامل نمونه های بدون اپوکسی برای تعیین طرح اختلاط بتن بهینه بود که بر اساس استاندارد ACI 211.4R تهیه شد و در جدول ۱۰ ارائه شده است. در گروه دوم نمونه ها از طرح اختلاط بهینه حاصل استفاده شد و باهدف تعیین تأثیر نسبت رزین اپوکسی و سخت کننده بر مشخصات مکانیکی بتن، نمونه های با نسبت های مختلف این دو ماده ساخته شدند.

در نمونه های بتنی گروه اول از شش طرح اختلاط شامل نمونه شاهد، نمونه حاوی افزودنی معدنی بدون الیاف و چهار نمونه حاوی الیاف فولادی مختلف به همراه الیاف پلی پروپیلن در بتن های حاوی افزودنی معدنی استفاده شد. بتن حاوی افزودنی معدنی بدون الیاف اختصاراً با F.S، بتن حاوی افزودنی معدنی و ۱٪ الیاف فولادی نسبت ابعادی ۶۳ با A.C، بتن حاوی افزودنی معدنی با الیاف فولادی نسبت ابعادی ۶۳ و الیاف پلی پروپیلن A.1.C، بتن حاوی افزودنی معدنی با الیاف فولادی نسبت ابعادی ۴۴ به همراه الیاف پلی پروپیلن A.2.C و بتن حاوی افزودنی معدنی با الیاف نسبت ابعادی ۸۸ همراه الیاف پلی پروپیلن C.A.3 نام گذاری شده اند. بر مبنای تحقیقات پیشین میزان افزودنی های معدنی و درصد الیاف به صورت بهینه ۱۵ درصد خاکستر بادی، ۱۲ درصد سیلیس و یک درصد الیاف فلزی از

میزان کل سیمان مصرفی تعیین گردید [۱۷]. در واکنش پوزولانی افزودنی معدنی، سیلیس به‌عنوان جز اصلی یک پوزولان با هیدروکلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیلیکات کلسیم واکنش داده که فعل انفعال اصلی به‌صورت رابطه ۱ است:



رابطه (۱)

در هنگام استفاده از خاکستر بادی به‌عنوان جایگزین ترکیب C-S-H با این ترکیب در هیدراتاسیون سیمان تفاوتی ندارد. از آنجایی که واکنش پوزولانی سبب افزایش حجم جامد می‌شود با حضور افزودنی معدنی تخلخل خمیر کاهش می‌یابد و در نتیجه مقاومت و دوام بیشتر بتن را نسبت به بتن بدون افزودنی معدنی را ایجاد می‌کند [۲۹]. از طرفی الیاف در یک درصد مزبور به‌صورت ترکیبی ۸۵٪ از الیاف فلزی و ۱۵٪ از یک درصد، الیاف پروپیلن انتخاب گردید [۱۲].

جدول ۱۰: طرح اختلاط بتن بدون اپوکسی بر اساس ACI211.4R

نوع اختلاط	N.C	S.F	A.C	A.1.C	A.2.C	A.3.C
سیمان (kg)	۵۰۰	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵
شن (kg)	۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹
ماسه (kg)	۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵
آب (L)	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵
میکروسلیس (kg)	۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
خاکستر بادی (kg)	۰	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵
الیاف فلزی (kg)	۰	۰	۵۰	۴۲/۵	۴۲/۵	۴۲/۵
الیاف پروپیلن (kg)	۰	۰	۰	۷/۵	۷/۵	۷/۵
روان کننده (L)	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
نسبت w/c	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵
اسلامپ (mm)	۴۰	۳۵	۲۲	۲۵	۳۰	۲۵
L/D الیاف فولادی	۰	۰	۶۳	۶۳	۴۴	۸۸
L/D الیاف پلی پروپیلن	۰	۰	۳۴۲	۳۴۲	۳۴۲	۳۴۲

پس از تعیین نتایج آزمایش مجموعه نمونه‌های با طرح اختلاط اول، به‌منظور بهبود مشخصات مکانیکی بتن سعی گردید اثر کاربرد اپوکسی به‌عنوان جایگزین سیمان در کنار میکروسلیس و خاکستر بادی در این اختلاط نیز بررسی گردد؛ لذا در بتن منتخب گروه اول، در سه تناسب ۲۵-۸۰، ۲۰-۸۵ و ۱۵-۸۵ (به ترتیب برای نسبت رزین و سخت‌کننده) نمونه‌هایی ساخته شد. مقدار کل اپوکسی مورد استفاده در نمونه‌ها بر مبنای ۰/۲ درصد کل وزن سیمان معادل ۱ لیتر بر مترمکعب بتن بوده است. طرح اختلاط نمونه‌های گروه دوم (حاوی اپوکسی) در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱- طرح اختلاط بتن بهینه با اپوکسی

A.2.C.E3	A.2.C.E2	A.2.C.E1	A.2.C	نوع اختلاط
۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	سیمان (kg)
۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	۱۰۶۹	شن (kg)
۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	۶۴۵	ماسه (kg)
۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	آب (L)
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	میکروسلیس (kg)
۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	خاکستر بادی (kg)
۴۲/۵	۴۲/۵	۴۲/۵	۴۲/۵	الیاف فلزی (kg)
۷/۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵	الیاف پروپیلن (kg)
۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	روان کننده (L)
۰/۷۵	۰/۸	۰/۸۵	۰	اپوکسی (L)
۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۵	۰	سخت کننده (L)
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	نسبت w/c
۲۵	۲۲	۳۵	۳۰	اسلامپ (mm)
۴۴	۴۴	۴۴	۴۴	L/D الیاف فولادی
۳۴۲	۳۴۲	۳۴۲	۳۴۲	L/D الیاف پلی پروپیلن

۳. آزمایش ها

۳-۱ آزمایش تعیین مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد B.S.1881.16 [۳۰] انجام شد که بدین منظور نمونه‌های مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. نحوه قرارگیری یکی از نمونه‌ها در این آزمایش در شکل ۳.الف آمده است.

۳-۲ آزمایش تعیین مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496 [۳۱] بر روی نمونه‌هایی با ارتفاع ۲۰ سانتی متر و قطر ۱۰ سانتی متر که در شرایط استاندارد عمل آورده شدند و در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. نحوه قرارگیری نمونه در این آزمایش در شکل ۳.ب نمایش داده شده است.

۳-۳ آزمایش تعیین مقاومت خمشی

برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی بتن الیافی از استاندارد ASTM C1018 استفاده شد. [۳۲] نمونه‌هایی در ابعاد ۱۰*۱۰*۵۰ سانتی متر که در شرایط استاندارد عمل‌آوری شده و در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها مطابق شکل ۳.ج در دو

نقطه در یک سوم میانی فاصله بین تکیه گاه‌ها، تحت بار متمرکز قرار گرفتند و بارگذاری تا زمان گسیختگی نمونه ادامه پیدا کرد و ظرفیت گسیختگی خمشی هر نمونه بدست آمد.

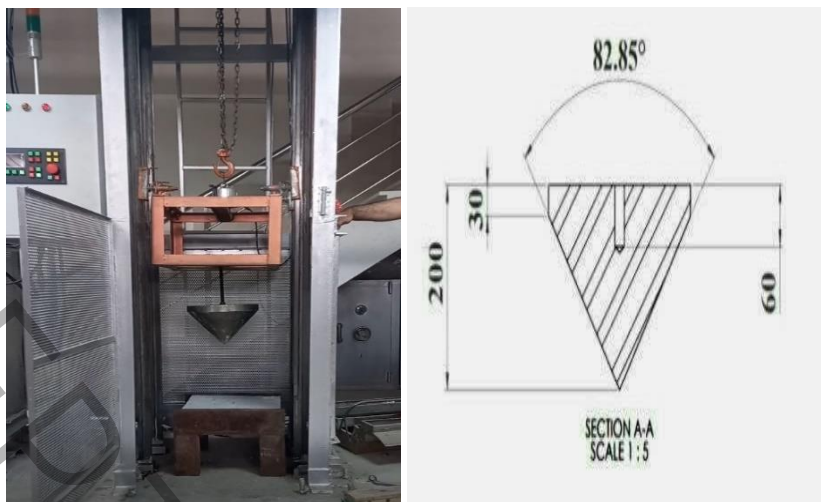


شکل ۳. نحوه قرارگیری نمونه ها تحت آزمایش

۴-۳ آزمایش تعیین مقاومت ضربه ای

از میان روش‌های آزمایش مقاومت بتن الیافی در برابر ضربه، مرسوم ترین روش، آزمایش سقوط وزنه است که مطابق ASTM D 1557 [۲۸] در آن یک وزنه $4/54$ کیلوگرمی از ارتفاع $457/2$ میلیمتری روی یک گوی فولادی که بر روی نمونه بتنی قرار گرفته، سقوط می‌کند و تعداد دفعات سقوط و مجموع انرژی وارده تا اولین ترک و تا شکست نمونه شمارش و محاسبه می‌گردد. یکی از اشکالات این آزمایش، پراکندگی بالا و همبستگی ضعیف نتایج را با توزیع نرمال است [۲۶-۲۷]. اشکال دیگر این آزمایش وابستگی نتایج به قضاوت فردی در خصوص شروع ترک و تخریب نهایی بتن است. از دیگر معایب این آزمایش می‌توان نیاز به تعداد ضربات زیاد و عدم تمرکز نقطه برخورد و زمان بر بودن آزمایش، شکل کروی ضربه‌زننده و وزن کم وزنه، ابعاد کوچک نمونه‌ها و عدم در نظر گرفتن شرایط تکیه-گاهی را برشمرد. اما شاید مهمترین اشکال این آزمایش، پر بودن زیر نمونه بتنی و اتکای کامل کف آن روی یک ورق باشد که بخش عمده انرژی وارده را جذب می‌کند.

با عنایت به نقایص فوق در آزمایش مرسوم ضربه، در این تحقیق به جای نمونه بتنی متکی بر کف، از دال بتنی با تکیه‌گاه خطی در دو لبه روبرو که زیر آن خالی بود استفاده شد. آزمایش روی نمونه‌های دال بتنی به ابعاد $40 \times 40 \times 10$ سانتیمتر که در دو لبه روبرو به صورت صلب در تکیه‌گاه‌ها مهار شده‌اند و در دو ضلع دیگر لبه‌های دال آزاد است، انجام شد. برای آزمایش مقاومت ضربه‌ای نمونه دال بتنی، از دستگاه جدیدی که مبتنی بر سقوط وزنه سنگین مخروطی شکل است، استفاده گردید. در این آزمایش گوی فلزی روی نمونه بتنی حذف شده و از ضربه‌زننده مخروطی با وزن 57 کیلوگرم از جنس فولاد که به همراه شاسی کشنده معادل 80 کیلوگرم وزن گردیده استفاده شده است به منظور عدم انحراف ضربه‌زننده از یک آسانسور سقوط آزاد داری ظرفیت باربری 120 کیلوگرم و ارتفاع اوج‌گیری $7/5$ متر است که ضربه‌زننده در مسیر مستقیم ریل حرکت می‌کند و توانایی رهاسازی در ارتفاع‌های متفاوت و ایجاد انرژی‌های مختلف را دارد استفاده گردیده است، هدف از معرفی این سامانه جدید آزمایش با ضربه‌زننده مخروطی، ایجاد بار متمرکز و نقطه‌ای در مرکز دال، کاهش تعداد ضربات به واسطه ایجاد انرژی قابل تنظیم و نهایتاً ایجاد گسیختگی‌های واضح‌تر به واسطه ابعاد و شرایط تکیه‌گاهی دال بود. در شکل ۴ سامانه آزمایش و نحوه قرارگیری نمونه و ابعاد مخروطی ضربه‌زننده نشان داده شده است. در این آزمایش توان جذب انرژی تا بروز اولین ترک نمونه دال‌های بتنی ساخته شده با طرح اختلاط‌های مختلف محاسبه گردید.



شکل ۴- نحوه قرارگیری نمونه های بتنی در سامانه آزمایش ضربه معرفی شده

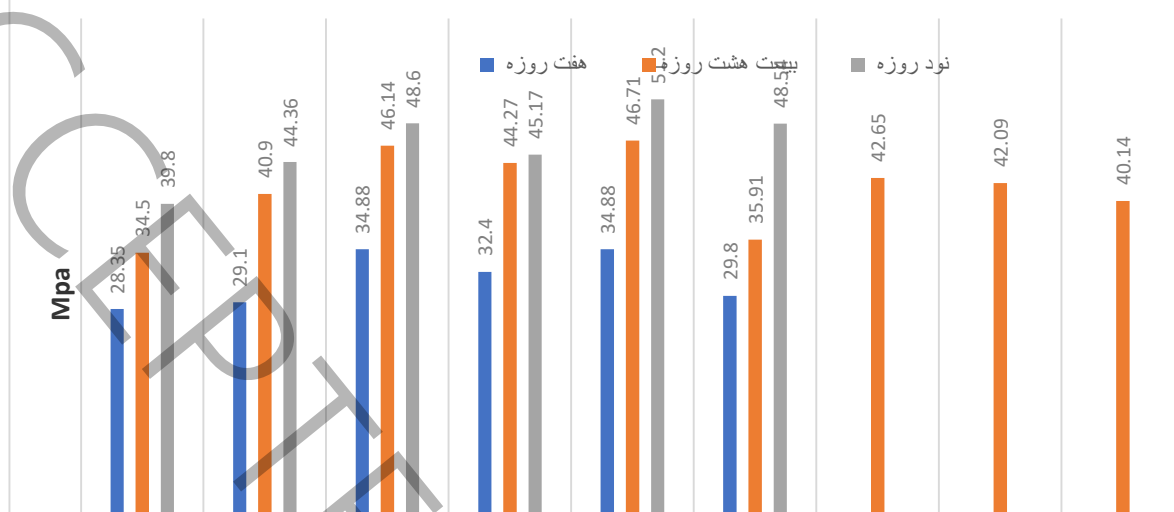
۴. بررسی و تفسیر نتایج

۴-۱- مقاومت فشاری

نمودار نتایج حاصل از میانگین گیری مقاومت فشاری سه نمونه مکعبی ساخته شده برای هر طرح اختلاط در سن ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۵ و نحوه شکست آن‌ها در شکل ۶ نمایش داده شده است. در مقایسه بتن شاهد با بتن حاوی افزودنی معدنی میکروسیلیس و خاکستر بادی در آزمایش ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بیانگر افزایش به ترتیب ۲، ۱۱ و ۱۸ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد است که نشان دهنده تأثیر حضور میکروسیلیس بر مشخصات مکانیکی بتن در کوتاه مدت و خاکستر بادی در بلندمدت است، لازم به ذکر است در نمونه شاهد هم ملاحظه می شود که رشد در نمونه ۹۰ روزه بیشتر بوده که به دلیل دیرگیر بودن سیمان تیپ ۲ مصرفی است؛ ولی نسبت مقاومت ۹۰ روزه به ۲۸ روزه که مطابق مراجع فنی برای سیمان تیپ ۲ باید معادل حدود ۱,۳۳ باشد، در این آزمایش‌ها به مراتب کمتر به دست آمد. همچنین در میان نمونه‌های بتن الیافی حاوی افزودنی معدنی، نمونه بتن A.2.C بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه را به ترتیب با افزایش ۲۳، ۳۵ و ۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد نشان داد. همچنین ملاحظه می شود که حضور الیاف فلزی با نسبت ابعادی کمتر باعث ایجاد بیشترین افزایش مقاومت فشاری شده و میزان تأثیرگذاری الیاف در افزایش مقاومت فشاری حدوداً با استفاده از پوزولان برابر حاصل گردید. همچنین مقایسه نتایج نمونه‌های با بتن حاوی الیاف نوع اول (A.C) و (A.1.C) نشان می دهد، جایگزین کردن بخشی از الیاف فولادی با الیاف پلی پروپیلن منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه شده است. به نظر می رسد این مطلب ناشی از مقاومت بالای ماتریس اصلی بتن به دلیل استفاده از افزودنی‌های معدنی است و در این ماتریس مقاوم، پلی پروپیلن با مقاومت و سختی کم خود، اثر سوء بر جا می گذارد.

در بررسی نتایج افزودن اپوکسی در نسبت‌های مختلف بر مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه، کاهش ۱۱ الی ۱۶ درصدی (بسته به نسبت رزین به سخت کننده) در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی اپوکسی نسبت به نمونه بهینه است. مکانیزم منشأ این کاهش نیز مشابه سوء اثر استفاده از الیاف پلی پروپیلن به نظر می رسد. در شکل ۶ شاهد افزایش شکل پذیری، انسجام بهتر نمونه‌ها و تغییر حالت شکست از ترد به شکل پذیر به واسطه حضور الیاف در قیاس با بتن شاهد هستیم.

مقاومت فشاری



شکل ۵- نمودار مقاومت فشاری نمونه ها ۲۸، ۷ و ۹۰ روز



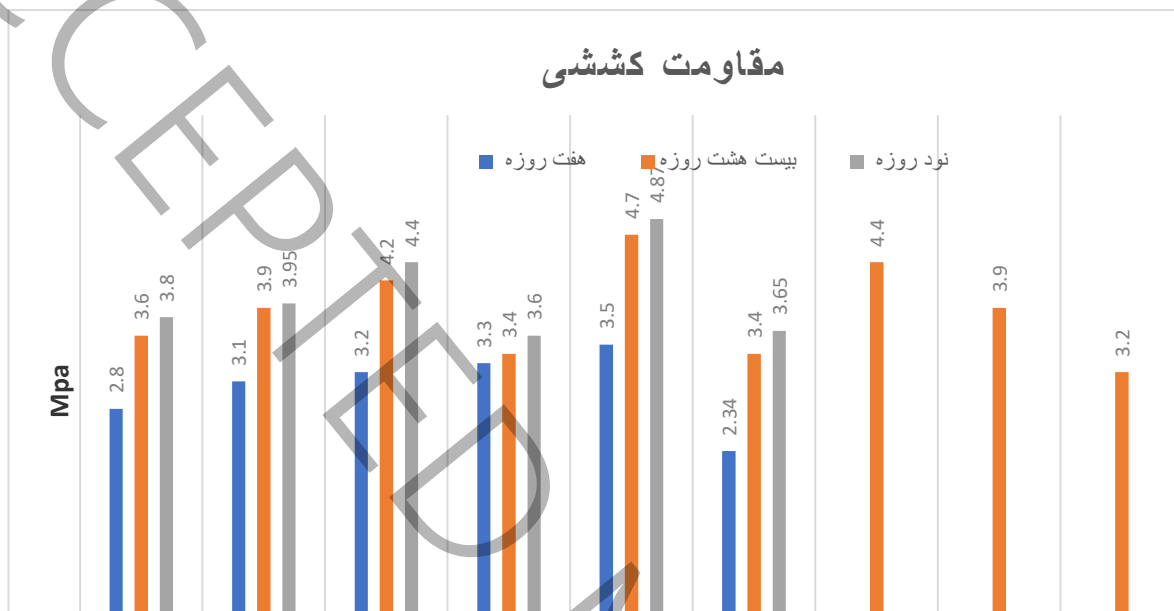
شکل ۶- نحوه شکست نمونه ها در سن ۲۸ روز

۴-۲- مقاومت کششی

نمودار نتایج حاصل از میانگین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای در ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۷ و نحوه‌ی شکست کششی آن‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. مهم‌ترین ضعف بتن معمولی مقاومت کششی پایین آن است که برای غلبه بر این ضعف از الیاف و افزودنی‌های معدنی استفاده شده است که به‌طور کلی باعث بالارفتن مقاومت کششی و کاهش عرض ترک‌ها و افزایش شکل‌پذیری بتن خواهند شد. نتایج این نمودار نشان می‌دهد افزودنی‌های معدنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب باعث افزایش ۹، ۱۲ و ۹ درصدی در مقاومت کششی بتن شده‌اند. همچنین ترکیب بهینه الیاف ترکیبی فلزی همراه با افزودنی‌های معدنی در بهترین نمونه (A.2.C) به افزایش مقاومت کششی به ترتیب ۲۳، ۲۹ و ۲۳ درصدی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نسبت به نمونه‌های شاهد منجر شده است. این امر بیانگر آن است که بهترین نتایج مقاومت کششی از الیاف فلزی با کمترین نسبت طول به قطر به دست می‌آید.

با مقایسه میزان بهبود مقاومت کششی حاصل از الیاف و افزودنی‌های معدنی مشخص می‌شود که ترکیب الیاف و افزودنی معدنی (نمونه A.2.C) بهبودی حدوداً دو برابری در مقاومت کششی نسبت به بتن حاوی افزودنی‌های معدنی به تنهایی (نمونه S.F) ایجاد می‌کند که می‌تواند ناشی از حضور الیاف فلزی باشد که با ساختار و شکل خاص خود باعث بهبود موثرتری در مقاومت کششی نمونه‌ها می‌گردند.

در بررسی نتایج افزودن اپوکسی در نسبت‌های مختلف اپوکسی، کاهش ۱۱ الی ۴۲ درصدی در مقاومت کششی نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه بهینه فاقد اپوکسی با طرح اختلاط مشابه (A.2.C) ملاحظه می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهند با افزایش نسبت مقدار هاردنر به رزین، مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش بیشتری پیدا می‌کند. همچنین در شکل ۸ شاهد افزایش شکل‌پذیری و تغییر اندازه‌های ترکها و تغییر حالت شکست نمونه‌های بتنی و حفظ بهتر انسجام، به واسطه حضور الیاف در آزمایش کششی هستیم.



شکل ۷- مقاومت کششی نمونه‌ها ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه



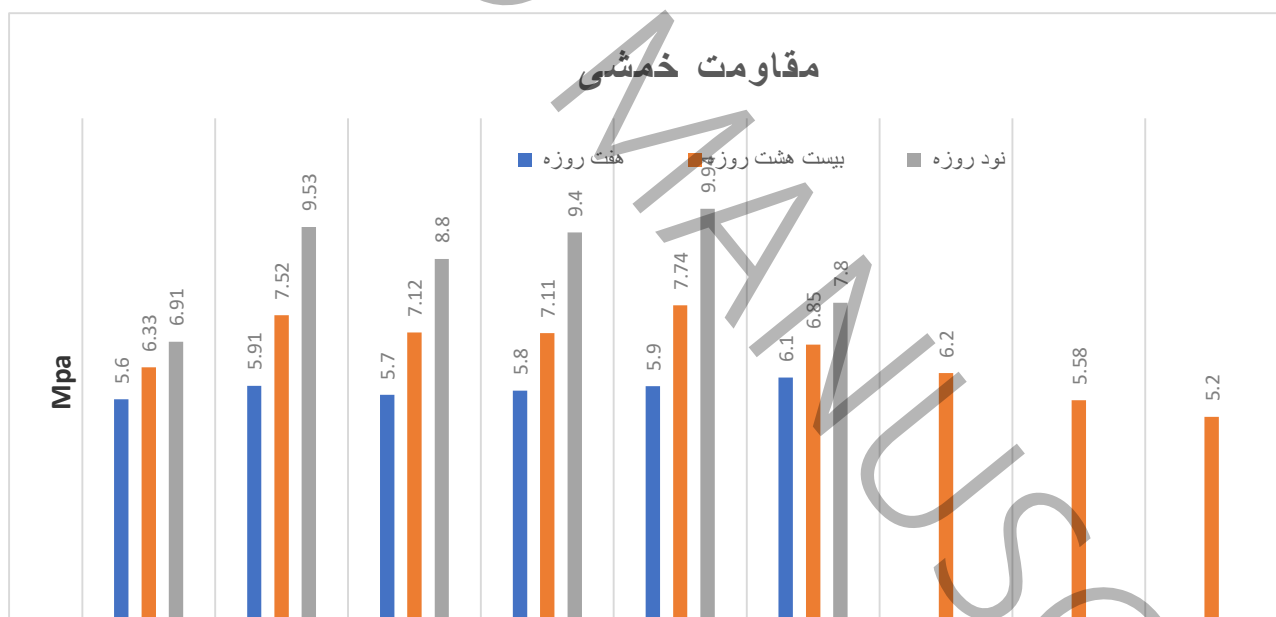
شکل ۸- نحوه شکست نمونه‌های ۲۸ روزه

۳-۴- مقاومت خمشی

سطح اتصال بین الیاف و ماتریس بتن نقش اصلی در تعیین ویژگی‌های بتن مسلح شده با الیاف را برعهده دارد. با حضور الیاف و افزودنی‌های معدنی، پیوندهای مستحکم‌تری در بین ماتریس بتن اتفاق می‌افتد و این امر باعث افزایش مقاومت خمشی بتن الیافی نسبت به بتن معمولی می‌شود. مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی با حضور افزودنی معدنی به‌تنهایی (نمونه S.F) در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰

روزه به ترتیب ۴، ۱۸ و ۳۷ درصد نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است. همچنین مقاومت خمشی در حضور الیاف ترکیبی همراه با افزودنی‌های معدنی (نمونه A.2.C) در مقایسه با نمونه‌های شاهد به ترتیب ۵، ۱۸ و ۴۴ افزایش یافته است. این نتایج همگی موید تأثیرگذاری ناچیز الیاف نسبت به افزودنی‌های معدنی در سنین مختلف است. می‌توان نتیجه گرفت که افزودنی‌های معدنی تأثیر اصلی را در بهبود پیوندهای بین اجزای مختلف ماتریس بتن نسبت به الیاف دارند. حضور افزودنی‌های معدنی با توجه به اندازه‌های میکرومتری و همچنین خاصیت چسبندگی و پرکنندگی این گونه مواد، حفرات خیلی ریز موجود در ماتریس که یک نقطه ضعف در بتن معمولی است، را اشغال نموده و باعث یکپارچه‌سازی ماتریس بتن و نهایتاً بهبود مقاومت خمشی می‌گردد. نمودار نتایج حاصل از میانگین مقاومت خمشی نمونه‌ها در ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۹ و نحوه شکست خمشی آن‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در بررسی نتایج حاصل از افزودن اپوکسی در نسبت‌های مختلف بر مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۸ روزه کاهش ۱ الی ۴۷ درصدی در مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های بهینه ملاحظه می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهند کاهش میزان مقاومت خمشی با افزایش نسبت مقدار هاردنر به رزین افزایش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد در نمونه‌های بتن بررسی شده، به دلیل وجود ترکیب مناسبی از افزودنی‌های معدنی و الیاف ترکیبی، ماتریس بتنی یکنواخت، با اتصال مناسب بین اجزا حتی در مقیاس میکرومتری وجود داشته و ترکیب رزین اپوکسی و سخت‌کننده که چسبانندگی را در مقیاس بزرگتری ایجاد می‌کنند نه تنها نتوانسته کمک بیشتری به ماتریس نماید؛ بلکه با جایگزینی به جای ماتریس مناسب اصلی، باعث کاهش چسبندگی در نقاط جایگزینی شده است.



شکل ۹- نتایج مقاومت خمشی نمونه‌ها در سن ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه



شکل ۱۰- نحوه شکست نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه

۴-۴- مقاومت ضربه‌ای

یکی از اهداف اصلی این پژوهش، در کنار بررسی خصوصیات مکانیکی در شرایط استاتیکی بتن، مطالعه رفتار آن در برابر بارگذاری دینامیکی با نرخ کرنش پایین بوده است. با استفاده از سامانه آزمایش ضربه معرفی شده در بخش ۳-۴ آزمایش نمونه‌های دال ساخته شده با طرح اختلاط‌های مختلف انجام شد. مجموع انرژی پتانسیل سقوط‌های وزنه روی هر نمونه تا ایجاد ترک در نمونه دال محاسبه شد. سه نمونه دال با مشخصات بتن شاهد مورد آزمایش قرار گرفتند تا ارتفاع بحرانی ایجاد ترک با سعی و خطا تعیین گردد و در سایر دال‌ها سقوط وزنه از ارتفاع بحرانی آغاز و سقوط‌های بعدی از ارتفاع‌های بالاتر با گام‌های افزایشی ۵۰ میلیمتری انجام شده و تا ظهور اولین علامت شکست دال ادامه یافته و نهایتاً مجموع انرژی پتانسیل وزنه‌ها تا بروز ترک مطابق رابطه ۲ محاسبه گردید [۳۳]. نتایج آزمایش‌های ضربه در جدول ۱۲ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. این نتایج بیانگر همسو بودن پاسخ بتن در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی است؛ بدین صورت که همان نمونه بهینه در آزمایش‌های استاتیکی A.2.C، در آزمایش ضربه‌ای هم بیشترین ظرفیت تحمل انرژی را نشان داده است. در شکل ۱۱-الف-۱ و ۲، شکست در نمونه دال‌های ساخته شده با بتن معمولی را نشان می‌دهد. شکل الف-۲ شکست نمونه N.C.1 را پس از سقوط وزنه از ارتفاع ۳۰۰ میلیمتری نشان می‌دهد که کاملاً ترد و با ایجاد ترک خمشی کاملاً گسیخته شده و شکل الف-۱ نمونه N.C.3 را پس از سقوط وزنه از ارتفاع ۱۵۰ میلیمتری (معادل با انرژی ۱۱۹,۷۶ ژول) نشان داده که در آن ترکی در تکیه‌گاه‌ها ایجاد شده است. از میان دال‌های آزمایش شده، نمونه دال ساخته شده با بتن S.F که در آن از افزودنی‌های معدنی استفاده شده توانسته انرژی مجموعاً ۲۷۹,۲۸ ژول تحمل نماید که افزایشی حدوداً ۲,۳ برابری را باعث شده است. همچنین نمونه حاوی افزودنی‌های معدنی همراه با الیاف ترکیبی با نسبت بهینه الیاف (A.2.C) که در شکل ۱۱-ب-۱ و ب-۲ تصویر آن در پایان آزمایش نشان داده شده، بیشترین انرژی شکست (معادل با انرژی مجموعاً ۵۹۵,۸ ژول) که حدود ۵ برابر نمونه با بتن شاهد است، را تحمل نموده است.

$$E = \sum mgh$$

(۲)

نتایج ارائه شده بیانگر اثر بسیار چشمگیر استفاده از الیاف و افزودنی‌های معدنی بر مقاومت ضربه‌ای دال بتنی است. در این میان به نظر می‌رسد الیاف باعث افزایش انسجام و مقاومت کششی و جذب انرژی بتن در برابر بارهای دینامیکی شده و افزودنی‌های معدنی هم با ایجاد چسبندگی و یکپارچگی بهتر ماتریس بتن توانسته به افزایش ظرفیت جذب انرژی بتن کمک کند و در مجموع استفاده هم‌زمان الیاف با افزودنی‌های معدنی باعث ایجاد مقاومت ضربه‌ای بسیار بیشتر نمونه‌های بتنی در برابر بارهای دینامیکی می‌گردد. لازم به ذکر است در مقایسه الیاف فلزی به کار برده شده الیاف فلزی با میزان طول به قطر کمتر هم در جذب انرژی، اثرگذارتر عمل نمودند.

جدول ۱۲- نتایج شکست نمونه‌ها تحت بار دینامیکی

$E=\sum mgh$	ارتفاع: ۳۰۰ mm انرژی: ۲۳۹/۵۲J	ارتفاع: ۲۵۰ mm انرژی: ۱۹۹/۶J	ارتفاع: ۲۰۰ mm انرژی: ۱۵۹/۶۸J	ارتفاع: ۱۵۰ mm انرژی: ۱۱۹/۷۶J	نوع
۰	شکست	.....	.....	.....	N.C.1
۰	.....	.....	شکست	.....	N.C.2
۱۱۹/۶۷J	.....	.....	.....	بروز ترک	N.C.3
۲۷۹/۲۸J	.....	.....	بروز ترک	.....	S.F
۳۵۹/۲۸J	.....	بروز ترک	.....	.....	A.C
۳۵۹/۲۸J	.....	بروز ترک	.....	.....	A.1.C
۵۹۵/۲۸J	بروز ترک	.....	.....	.....	A.2.C
۳۵۹/۲۸J	.....	بروز ترک	.....	.....	A.3.C



الف-۲



الف-۱



ب-۲



ب-۱

شکل ۱۱- شکست نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه

۴- نتیجه گیری

با انجام آزمایش‌های فشاری، کششی، خمشی و ضربه‌ای روی نمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، اثر استفاده از افزودنی‌های معدنی و الیاف ترکیبی فلزی-پلی‌پروپیلن بر بهبود مشخصات مکانیکی بتن بررسی شد. برای آزمایش ضربه، سامانه جدید آزمایشی که نمونه دال را به جای نمونه دیسک بتنی متکی بر کف مورد بررسی قرار می‌دهد، معرفی و به کار رفت. اهم نتایج حاصل به شرح زیر در ادامه بیان شده است.

الیاف ترکیبی استفاده شده و افزودنی‌های معدنی، هر دو بر افزایش مقاومت فشاری، کششی و ضربه‌ای در همه سنین بتن تأثیر مثبت دارند که میزان کمی تأثیر مثبت آن‌ها در بخش‌های مختلف مقاله بررسی شد؛ ولی در افزایش مقاومت خمشی، افزودنی‌های معدنی نسبت به الیاف ترکیبی استفاده شده بسیار مؤثرتر بودند. افزایش مقاومت خمشی بتن حاوی افزودنی معدنی در سن ۹۰ روزه نسبت به نمونه شاهد حدود ۳۷ درصد بود و افزودن الیاف به این بتن، تنها توانست این افزایش را به ۴۴ درصد برساند که بیانگر اثرگذاری کمتر آن نسبت به افزودنی‌های معدنی است.

حضور الیاف ترکیبی باعث افزایش هر سه مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن می‌گردد؛ ولی بیشترین تأثیر مثبت آن در افزایش مقاومت کششی به میزان ۲۳ درصد ملاحظه شد که این امر نشان‌دهنده تأثیر عمده الیاف استفاده شده در بهبود مقاومت کششی بتن است.

افزودن اپوکسی با هر نسبت رزین به سخت‌کننده به بتن حاوی افزودنی‌های معدنی میکروسیلیس و خاکستر بادی و الیاف ترکیبی، باعث کاهش مقاومت‌های سه‌گانه گردید. با افزایش نسبت سخت‌کننده به رزین، این افت مقاومت‌ها بیشتر می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده بیانگر همبستگی نتایج پاسخ بتن به بارهای استاتیکی با دینامیکی هستند و در کل استفاده از الیاف و افزودنی معدنی باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی ضربه‌ای و محدودیت ترک‌های ایجاد شده در بتن در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی می‌گردد.

مقاومت‌های سه‌گانه استاتیکی فشاری، کششی و خمشی کاملاً وابسته به نسبت طول به قطر الیاف فولادی هستند در الیاف با طول متفاوت و قطر یکسان، الیاف با طول کمتر مؤثرتر و در مقایسه الیاف با طول برابر و قطر متفاوت، الیاف با قطر بیشتر در بهبود مقاومت‌ها اثرگذارتر بودن لذا با توجه به کسر طول به قطر الیاف تعریف شده، الیاف با کمترین نسبت ابعادی (L/D) منجر به بیشترین افزایش در مقاومت‌های سه‌گانه می‌شوند.

در دال‌های تحت بار دینامیکی ضربه‌ای، استفاده از الیاف با افزایش مقاومت کششی و محدود نمودن عرض ترک و استفاده از افزودنی‌های معدنی با افزایش چسبندگی و پرکنندگی ماتریس بتن منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی ضربه‌ای شدند؛ لذا استفاده هم‌زمان از الیاف ترکیبی و افزودنی‌های معدنی باعث ایجاد افزایش بسیار چشمگیر مقاومت ضربه‌ای دال‌های بتنی در برابر بارهای ضربه‌ای دینامیکی می‌گردد.

۵- تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت علمی و آزمایشگاهی دانشگاه امام حسین (ع) در راستای طرح پژوهشی تعریف شده، انجام شده است.

- [1] Romualdi, J. P., & Batson, G. B, Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement, In Journal Proceedings ,Vol. 60 (1963, June) No. 6, pp. 775-790.
- [2] Naaman, A. E., & Shah, S. P. , Pull-out mechanism in steel fiber-reinforced concrete, Journal of the Structural Division, 102(8) (1976) 1537-1548.
- [3] Dushimimana, A, Niyonsenga, A. A., & Nzamurambaho, F, A review on strength development of high performance concrete, Construction and Building Materials, 307(2021)124865.
- [4] Aoude, H., Dagenais, F. P., Burrell, R. P., & Saatcioglu, M, Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading, International Journal of Impact Engineering, 80 (2015) 185-202.
- [5] Luccioni, B., Isla, F., Codina, R., Ambrosini, D., Zerbino, R., Giaccio, G., & Torrijos, M. C, Effect of steel fibers on static and blast response of high strength concrete, International journal of impact engineering, 107(2017) 23-37.
- [6] Burrell, R. P., Aoude, H., & Saatcioglu, M, Response of SFRC columns under blast loads, Journal of Structural Engineering, 141(9) (2015) 04014209.
- [7] Lv, Y., Wu, H., Dong, H., Zhao, H., Li, M., & Huang, F, Experimental and numerical simulation study of fiber-reinforced high strength concrete at high strain rates, Journal of Building Engineering, 105812 (2023).
- [8] Wu, H., Shen, A., Ren, G., Ma, Q., Wang, Z., Cheng, Q., & Li, Y, Dynamic mechanical properties of fiber-reinforced concrete: A review, Construction and Building Materials, 366 (2023) 130145
- [9] Jiao, C., Sun, W., Huan, S., & Jiang, G, Behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete at medium strain rate, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in china, 3(2009)131-136.
- [10] Yang, L., Lin, X., Li, H., & Gravina, R. J, A new constitutive model for steel fibre reinforced concrete subjected to dynamic loads, Composite Structures, 221(2019)110849.
- [11] Yang, L., Lin, X., & Gravina, R. J, Evaluation of dynamic increase factor models for steel fibre reinforced concrete. Construction and building materials, 190 (2018) 632-644.
- [12] Afroughsabet, V, & Ozbakkaloglu, T, Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers, Construction and building materials, 94 (2015)73-82.
- [13] Chen, J., Yuan, Y., Zhu, Q., & Duan, J, High-temperature resistance of high-strength concrete with iron tailing sand. Journal of Building Engineering, 63(2023)105544.
- [14] Rai, B., & Singh, N. K, Statistical and experimental study to evaluate the variability and reliability of impact strength of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete, Journal of Building Engineering, 44 (2021) 102937
- [15] Hou, X., Cao, S., Zheng, W., Rong, Q., & Li, G, Experimental study on dynamic compressive properties of fiber-reinforced reactive powder concrete at high strain rates, Engineering Structures, 169 (2018) 119-130
- [16] Ojha, P. N., Singh, P., Singh, B., Singh, A., & Mittal, P, Fracture behavior of plain and fiber reinforced high strength concrete containing high strength steel fiber, Research on Engineering Structures and Materials, 8(3) (2022) 583-602.
- [17] Kumar, M. H., Saikrishnamacharyulu, I., Mohanta, N. R., Ashutosh, A., Mishra, P., & Samantaray, S, Mechanical behaviour of high strength concrete modified with triple blend of fly ash, silica fume and steel fibers, Materials Today: Proceedings, 65 (2022) 933-942.
- [18] Nodehi, Mehra ,Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review, Innovative Infrastructure Solutions 7, no. 1 (2022): 64.
- [19] Bedi, R., Chandra, R., & Singh, S. P, Mechanical properties of polymer concrete, Journal of Composites,(2013) 1-12.
- [20] Ataabadi, H. Sanaei, Abdolreza Zare, H. Rahmani, A. Sedaghatdoost, and E. Mirzaei, Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures: An experimental investigation, Journal of Building Engineering 34 (2021): 101878.
- [21] Karamzadeh, N. Shahni, M. R. M. Aliha, and H.R. Karimi, Investigation of the effect of components on tensile strength and mode-I fracture toughness of polymer concrete, Arabian Journal of Geosciences 15, no. 13 (2022): 1213.
- [22] Song, P. S., J. C. Wu, S. Hwang, and B. C. Sheu, Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete, Cement and concrete research 35, no. 2 (2005): 393-399.
- [23] M.Rokhshani Mehr, & Bakhshi, investigation of Impact Behavior of High Strength Concrete and Ultra-High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete under Impact of Projectile, Concrete research, no. 1 (2015): 101-112(in Persian)

- [24] GH. Sezari, M. Deghani Ashkezar, Investigating the impact performance of concrete with high strength and high-strength fiber concrete under projectile impact, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, (2018): 337-348(in Persian)
- [25] H. R. Hasanpour Berijani, Emamzadeh, S. Sh, Experimental Study of Lightweight Projectiles Penetration in Concrete with Waste Steel Shavings and Rice Husk Ash, *magiran.com/p131997* (2014): 57-66(in Persian)
- [26] Badr.A, Ashour.AF, Platten.A., Statistical Variations in Impact Resistance of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete, *International Journal of Impact Engineering* 32, (2006), 1907–1920.
- [27] ACI 544-2R. Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete; American Concrete Institute: Indianapolis, IN, USA, 1999
- [28] ASTM D 1557, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort
- [29] Mindess, Sidney, J. Francis Young, and David Darwin, (2003), Concrete. Prentice Hall.
- [30] BS 1881–116, Method for determination of compressive strength of concrete cubes, 1983.
- [31] ASTM Standard C 496–90, Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concret Specimens, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1990
- [32] ASTM C1018-89 Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), Book of ASTM Standards, Part 04.02
- [33] British Standards Institute, Testing Sprayed Concrete: Determination of Energy Absorption Capacity of Fiber Reinforced Slab Specimens, BSI Standards, SN: BS EN 14488-5:2006. ISBN:0580482367

The effect of hybrid fibers with various dimensions on the impact strength of concrete containing mineral additives

ABSTRACT

Improving the mechanical characteristics of concrete as the most basic material in the construction of various structures, especially its tensile, bending and impact resistance, has long been the focus of various researchers. In this research, the effect of adding different steel fibers along with polypropylene fibers in different dimensional ratios together with commonly used mineral additives to improve the impact resistance of concrete has been investigated. The considered parameters included the percentage of polypropylene and steel fibers, the ratio of length to diameter of steel fibers (L/D), the percentage of fly ash, microsilica and epoxy additives, and the age of specimen. Experiments aimed at determining the impact, tensile, bending and compressive strength of the studied concrete specimens were carried out. To determine the impact resistance, a new laboratory method was introduced and used. The results obtained from the strength of concrete samples at different ages of 7, 28 and 90 days show the significant effect of using composite fibers with optimal aspect ratio on increasing the tensile and impact resistance and to a lesser extent on the compressive and bending strength of concrete. These values have increased by 23% for tensile strength and 11% and 18% for compressive and bending strength, respectively, compared to the control sample in 28-day samples. Also, it was observed that the use of mineral additives is more effective in increasing the flexural strength of concrete than the use of fibers. Comparison of samples with L/D ratio of different steel fibers showed that fibers with lower L/D ratio lead to greater improvement in the mechanical properties of concrete. Finally, using combined fibers with optimal L/D and mineral additives has increased the impact resistance and energy absorption by 4.97 times of the optimal concrete samples compared to the witness concrete sample.

KEYWORDS

Fiber concrete, Impact resistance, mechanical properties, Hybrid fibers, Aspect ratio, Mineral additive.