

مطالعه آزمایشگاهی بر روی رفتار نمونه‌های کامپوزیت سنگ- بتن مسلح به الیاف فولادی، تحت آزمایش مقاومت فشاری

مقاله علمی - پژوهشی

علی لکی روحانی*، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

محمد حدادیان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rou001@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۱۷۹-۱۹۸

چکیده

بتن مسلح به الیاف فولادی به عنوان پوشش موقت یا دائمی بر روی جدار سنگی تونل‌ها و یا شیب مجاور جاده‌ها استفاده می‌شود. بنابراین بررسی رفتار اندرکنشی بتن متصل به سنگ زیرین دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این مقاله با استفاده از آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری رفتار مقاومتی نمونه‌های کامپوزیت ماسه‌سنگ/بتن مسلح به الیاف فولادی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیت، از درصد‌های مختلف الیاف فولادی برای بخش بتنی نمونه‌ها استفاده شد و همچنین ارتفاع بخش بتنی و سنگی نمونه‌ها نیز متغیر در نظر گرفته شد. مطابق با نتایج بدست آمده، همبستگی مثبت متوسطی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و درصد الیاف فولادی وجود دارد. به عبارت دیگر با افزایش درصد الیاف فولادی مقاومت نمونه کامپوزیت افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع بخش بتنی نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد و همبستگی منفی متوسطی بین مقاومت فشاری و ارتفاع بخش بتنی نمونه‌ها وجود دارد. در همه نمونه‌ها مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه کامپوزیت بین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه بتنی و مقاومت فشاری نمونه سنگ بکر قرار دارد. فرم ترک‌خوردگی پیش از گسیختگی در بخش بتنی به صورت مورب و در بخش سنگی به صورت ترک‌های طولی می‌باشد. با کاهش ارتفاع بخش بتنی، محصور شدگی بخش بتنی بین فکه صلب بالایی از یک طرف و بخش سنگی از طرف دیگر، بیشتر می‌شود و مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. همبستگی معنی داری در نمونه‌های کامپوزیت بین سرعت موج فشاری و درصد الیاف فولادی یا بین سرعت موج فشاری و نسبت ارتفاع بخش بتنی به ارتفاع کل نمونه، مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: سنگ-بتن، نمونه کامپوزیت، سطح تماس، مقاومت فشاری تک‌محوری، ماسه سنگ

۱- مقدمه

کامپوزیتی بتن-سنگ در مقابل بارهای وارده ایجاد می‌شود. تحت اثر نیروی فشاری محوری، لایه سنگ و لایه بتن مسلح به الیاف فولادی از طریق سطح مشترک خود با یکدیگر در تعامل خواهند بود که این بر رفتار کلی لایه کامپوزیتی موثر است. در کنار تکنیک بتن شاتکریتی تکنیک‌های دیگری نیز برای محافظت و تثبیت شیب‌های سنگی در کنار جاده‌ها استفاده می‌شود مثل سیستم حائل بتن محصور شده که کنترل فراوانی در مکانیزم خرابی سنگ‌های سست دارد (Wang et al.

امروزه بتن مسلح به الیاف فولادی به طور گسترده‌ای برای پوشش مصالح سنگی در تونل‌های زیرزمینی، حاشیه جاده‌ها و شیب‌ها استفاده می‌شود. علت استفاده گسترده از بتن مسلح به الیاف فولادی عملکرد بسیار مناسب این نوع پوشش و خصوصیات مکانیکی و انعطاف‌پذیری آن می‌باشد و البته تناسب رفتاری زیاد بین بتن و سنگ نیز فاکتور موثر دیگری است. در صورتیکه بتن مسلح به الیاف فولادی اتصال مکانیکی مناسبی به لایه سنگی زیرین خود داشته باشد، یک لایه مقاوم

(پسماند) در منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های سنگ-بتن در شرایط پیچیده تنش رخ می‌دهد. با افزایش فشار محصور کننده، ناحیه حلقه هیستریزس افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مدول الاستیک با افزایش زیری سطح مشترک افزایش می‌یابد و نسبت تغییر شکل جانبی نمونه سنگ-بتن بارگذاری شده با افزایش تعداد چرخه‌ها افزایش می‌یابد، اما با افزایش ارتفاع زیری، کاهش می‌یابد (Zhao et al. 2022). امروزه با توسعه روش‌های عددی تلاش‌های متعددی نیز برای شبیه‌سازی رفتار سطح مشترک سنگ-بتن انجام شده است و در آنها مد گسیختگی نمونه‌های کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته است (Gutiérrez et al. 2018). در این مقاله با استفاده از آزمایشات مقاومت فشاری تک‌محوری به بررسی خصوصیات مقاومتی نمونه‌های کامپوزیتی ماسه‌سنگ طبیعی- بتن مسلح به الیاف فولادی پرداخته می‌شود. برای این منظور نمونه‌های کامپوزیتی با ارتفاع‌های مختلف بخش سنگی و بخش بتنی و با درصدهای مختلف الیاف فولادی تهیه شده و تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج فشاری قرار می‌گیرند و همبستگی بین مقاومت نمونه‌ها با درصد الیاف و ارتفاع بخش سنگی نمونه‌های کامپوزیتی بررسی می‌گیرد. برای بخش سنگی از ماسه سنگ‌های طبیعی سازند قرمز بالایی واقع در ماهنشان استان زنجان استفاده شده است. به دلیل معادن زیادی که در این منطقه می‌باشد برای برخی از پوشش‌های موقت شیب‌های معادن روباز از بتن شانکریتی استفاده می‌شود و به همین دلیل بررسی مقاومت و رفتار کامپوزیت‌های سنگ-بتن از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. بدین ترتیب در بخش بعد به معرفی مصالح استفاده شده در این تحقیق پرداخته شده است و بخش سوم مقاله مربوط به آزمایشات انجام شده و نتایج آنها می‌باشد.

۲- معرفی مصالح مصرفی و نتایج آزمایشات

مقدماتی بر روی آنها

۲-۱- سنگ

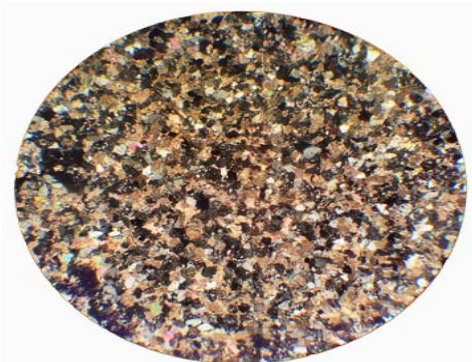
برای بخش سنگی نمونه‌های کامپوزیتی از ماسه سنگ سازند قرمز بالایی استفاده شده است. نمونه‌های مکعبی از این سازند تهیه شد و برای مغزه‌گیری به آزمایشگاه دانشگاه زنجان منتقل شد. سازند قرمز بالایی متشکل از ماسه‌سنگ، سیلت سنگ و مارن است. این سازند بخشی از دوران میوسن است و گسترش قابل توجهی در شمال و شمال‌غرب ایران دارد. این سازند در منطقه مورد مطالعه ۹۵۰ متر ضخامت دارد و از پایین به بالا متشکل از چهار بخش شامل: الف: مارن‌های سبز ژیبس‌دار،

(Do and Dias 2017; 2017). تماس و ارتباط مکانیکی بین بتن و سنگ محدود به پوشش تونل‌ها نمی‌شود بلکه فونداسیون‌های سازه‌های بلند و سد نیز بر روی لایه‌های سنگی قرار می‌گیرند و از اینرو مطالعه رفتار کامپوزیت سنگ-بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با وجود اهمیت زیاد شناخت رفتار اندرکنشی و مقاومتی نمونه‌های کامپوزیتی سنگ-بتن تاکنون مطالعات اندکی در این ارتباط انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. آزمایشات آزمایشگاهی روش اصلی در تعیین رفتار مکانیکی مصالح شبه سنگ و کامپوزیت‌های سنگی می‌باشند. اولین بار خصوصیات مکانیکی ماکروسکوپی و مکانیسم شکست میکروسکوپی نمونه‌های کامپوزیتی سنگ- بتن شانکریتی از طریق چرخه‌های ذوب- انجماد و آزمایشات مقاومت فشار تک‌محوری و سه‌محوری تحت تنش‌های محصور کننده کم تا متوسط و آزمایش برش مستقیم تحت سربراهای کم تا متوسط مورد مطالعه قرار گرفت و بر اساس نتایج بدست آمده یک مدل رفتاری بر اساس مکانیک آسیب نرم‌شونده برای نمونه‌های کامپوزیتی ارائه شد (Xiang and Liu 2010). در مقاله دیگری با استفاده از آزمایش برش مستقیم اثرات مورفولوژی و توجع سطح سنگ و همچنین اثرات اندازه بر روی رفتار برشی سطح مشترک سنگ-بتن و مقاومت برشی، مطالعه و بررسی شد (Mouzannar et al. 2017). در مطالعه دیگری رفتار مقاومتی و گسیختگی نمونه‌های کامپوزیتی سنگ-بتن با استفاده از آزمون‌های مقاومت فشاری تک محوری، شاخص بار نقطه‌ای و شکافت کششی مورد بررسی قرار گرفت و در آن اثر زاویه شیب سطح مشترک سنگ-بتن بر روی مقاومت و مد خرابی نمونه‌ها بحث شد (Selçuk & Aşma 2019). همچنین با استفاده از میله فشار هاپکینسون آزمایش‌های فشرده سازی دینامیکی بر روی نمونه‌های کامپوزیتی شانکریت-سنگ انجام شد و دریافت شد که مقاومت نمونه‌های کامپوزیتی بستگی به سن بتن شانکریتی و همچنین نرخ بارگذاری در دستگاه دارد و اتصال و اصطکاک در سطح مشترک باعث ایجاد محدودیت متقابل بین سنگ و بتن، تحت بار محوری می‌شود که این مساله باعث تغییر در حالت تنش در بخش سنگی و بخش بتنی نمونه می‌شود (Guo et al. 2019). در مطالعه دیگری تأثیر محدودیت و زیری سطح تماس بر خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیت سنگ-بتن تحت بارهای فشاری با استفاده از آزمون‌های سه‌محوری، مورد تحقیق قرار گرفت و در آن با استناد به منحنی‌های تنش- کرنش محوری و همچنین مد گسیختگی نتایج تحقیق بررسی شد (Zhao et al. 2020). آزمایشات بارگذاری و باربرداری سیکلیک بر روی نمونه‌های کامپوزیتی سنگ-بتن نشان داد که هیستریزس

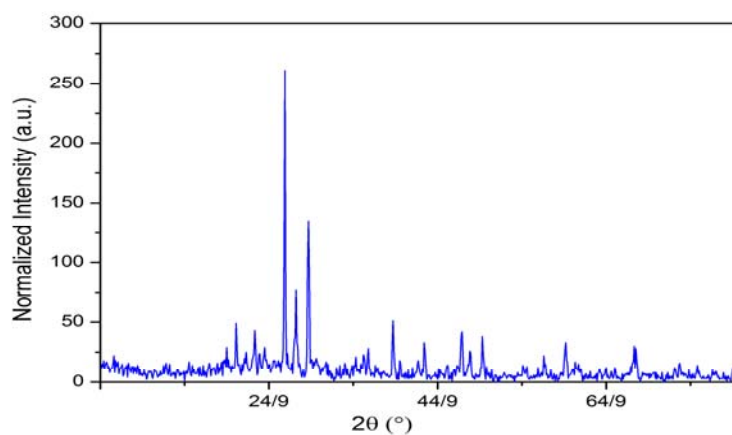
مخصوص به لام با ابعاد تقریبی $45 \times 1 \times 25 \text{ mm}^3$ چسبانده می‌شود. پس از آن، ضخامت اضافی بلوک نصب‌شده روی لام برای رسیدن به ضخامت استاندارد (حدود $30 \mu\text{m}$) به کمک پودر ساییده ساییده می‌شود. مقاطع تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان موجود در آزمایشگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد و تصویر میکروسکوپی آن تهیه می‌شود. شکل ۱ تصویر میکروسکوپی برش نازک از یکی از نمونه‌های مغزه گیری شده را نشان می‌دهد. این تصویر در آزمایشگاه دانشگاه زنجان تهیه شده است. برای تعیین ترکیب کانی‌شناسی ماسه‌سنگ انتخابی از آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. شکل ۲ نتیجه آنالیز XRD را برای این نمونه نشان می‌دهد و مطابق با نتیجه به‌دست‌آمده، کوارتز (سیلیس) کانی اصلی تشکیل دهنده نمونه‌های ماسه‌سنگ می‌باشد. همچنین نتایج آنالیز XRF بر روی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه برای بررسی ترکیب شیمیایی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

ب: تناوب مارن‌های قرمز و ماسه‌سنگ‌های خاکستری و قرمز، ج: تناوب مارن‌های قرمز و سبز و د: مارن‌های سبز، است. زمینه تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها عمدتاً متشکل از گل کربناته و با فراوانی کمتر، سیمان‌های کلسیتی و تبخیری است (Ghasemlooytakantapeh et al. 2023).

به کمک مطالعات میکروسکوپی می‌توان انواع کانی‌های هر سنگ، آرایش دانه‌ها، شکل دانه‌ها، بافت سنگ، شکل تماس دانه‌ها و سیمانی که دانه‌ها را به هم متصل کرده، تشخیص داد. خصوصیات ریزساختار سنگ‌ها بر روی رفتار مکانیکی آنها تأثیر به‌سزایی دارد. یکی از روش‌های بررسی خصوصیات ریزساختار سنگ‌ها بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی آنها می‌باشد. برای تهیه مقطع نازک، ابتدا باید نمونه سنگ موجود به شکل مکعب مستطیل برش داده شود. پس از برش، به کمک صفحه چدنی با پودر سیلیکون کاربید به طور کامل ساییده می‌شود. سپس سطح ساییده شده با استفاده از چسب



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی از برش نازک تهیه شده از یکی از نمونه‌های مغزه گیری شده (قطر برش نازک ۴ میلی‌متر می‌باشد)



شکل ۲. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) برای ماسه‌سنگ مورد مطالعه

جدول ۱. نتایج آنالیز XRF برای ماسه سنگ مورد مطالعه

SiO ₂	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O		
سیلیس	آلومینیوم اکسید	باریت	کلسیم اکسید	هماتیت	کارنوتیت	نام اکسید	واحد
%	%	%	%	%	%		
50.65	17.92	0.06	16.35	3.90	0.71	مقدار	

MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	LOI		
منیزیت	منگنز	سدیم اکسید	فسفات	گوگرد	تیتانیوم دی اکسید	افت حرارتی	نام اکسید	واحد
%	%	%	%	%	%	%		
1.82	0.10	2.02	0.10	0.14	0.45	15.77	مقدار	

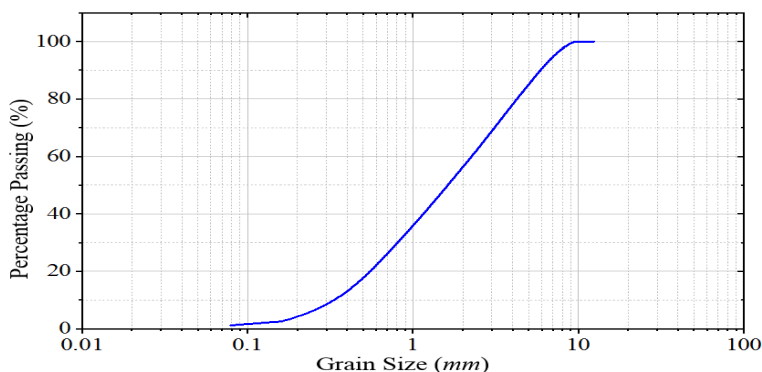
۲-۲- مصالح و خصوصیات بتن مسلح به الیاف فولادی

دانه (D_{50})، ضریب یکنواختی (C_u)، ضریب انحنای (C_c)، مربوط به ماسه، در جدول ۲ آورده شده است.

ماسه مورد استفاده برای ساخت بخش بتنی نمونه، از یکی از معادن ماسه اطراف شهر زنجان تهیه شده است. متوسط اندازه

جدول ۲. متوسط اندازه دانه، ضریب یکنواختی و ضریب انحنای برای ماسه استفاده شده

D ₅₀ (mm)	C _u	C _c
1.70	6.25	1.06



شکل ۳. نمودار دانه بندی ماسه

۲۵ میلی‌متر می‌باشد. (شکل ۴). قلاب انتهایی الیاف فولادی تأثیر زیادی در افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی در بتن دارد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است.

الیاف مورد استفاده در بتن عمدتاً شامل الیاف فولادی، شیشه، پلی‌پروپیلن، آزیست و کربن می‌باشند. اما در پژوهش حاضر با توجه به اهداف و انگیزه تحقیق از الیاف فولادی با مقطع دایره‌ای شکل و با انتهایی قلاب‌دار استفاده شد. طول هر الیاف



شکل ۴. الیاف فولادی

جدول ۳. مشخصات فیزیکی الیاف فولادی مصرفی بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده

یکا	طول	قطر	نسبت طول به قطر الیاف	چگالی	تنش گسیختگی
واحد	mm	mm	---	kg/m ³	MPa
مقدار	25	0.70	35.7	7700	535

استفاده شد. مقدار مصرف این فوق روان‌کننده بین ۰/۳ تا ۰/۹ وزن سیمان، پیشنهاد شده است که در این تحقیق به اندازه ۰/۹ وزن سیمان، استفاده شد. مشخصات این فوق‌روان‌کننده در جدول ۴ آورده شده است. وزن سیمان در هر مترمکعب از بتن الیافی ۳۹۰ کیلوگرم، نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، و وزن ماسه ۴۷۰ کیلوگرم، بوده است.

در مطالعه حاضر بر اساس آزمایش‌های اولیه انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی، استفاده از الیاف فولادی در طرح اختلاط بتن موجب بالا رفتن درصد تخلخل و کم شدن کارایی بتن شده و از طرفی یکی از فاکتورهای مهم در بالا بردن کیفیت بتن، کم بودن نسبت آب به سیمان می‌باشد که به حفظ یکپارچگی بتن کمک فراوانی می‌کند، بنابراین در طرح اختلاط نهایی از فوق روان‌کننده با نام تجاری Power Plast- RM

جدول ۴. مشخصات فوق روان‌کننده مصرفی

مقدار مصرف	بنیان شیمیایی	وزن مخصوص	حالت فیزیکی	یون کلر
(وزن سیمان) 0.9 %	پلی کربوکسیلات	1.12 ± 0.05 gr/cm ³	مایع	ندارد (کمتر از استاندارد ISIRI 2930)

۳-۲- مشخصات و نحوه ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

با استفاده از روغن، روغن‌کاری شد. در انتها به منظور کنترل شکاف طولی و همچنین قطر نمونه دو عدد بست یکی در بالا و یکی در پایین نمونه استفاده شد و برای کنترل خروج شیره ملات، قالب‌ها با استفاده از چسب حرارتی به سینی‌های فلزی ضخیم و محکم، چسبانده شدند. هر بار پس از عمل‌آوری اولیه، قالب‌ها تمیز شده و مجدداً عملیات فوق برای ملات ریزی نمونه‌های سری بعد، تکرار می‌شدند. ملات ریزی در چهار مرحله با توجه به درصد الیاف موجود فولادی و طرح

نمونه‌های کامپوزیتی دارای دو بخش سنگی و بتنی هستند. بخش سنگی و بخش بتنی دارای ارتفاع‌های مختلفی هستند هرچند ارتفاع کلی نمونه‌ها یکسان و ۱۱ سانتیمتر می‌باشد. برای ساخت بخش بتنی با ارتفاع‌های مختلف از قالب‌های پی‌وی‌سی نشان داده شده در شکل ۵ استفاده شد. این قالب‌ها دارای قطر خارجی ۶۰ میلی‌متر می‌باشند. برای سهولت در خارج نمودن نمونه‌ها پس از گیرش اولیه با استفاده از دستگاه برش موجود، روی هر لوله یک شکاف ایجاد شد و داخل قالب

بلوک‌های سنگی گرفته شد. جهت و امتداد همه مغزه‌ها نسبت به سطح بلوک یکسان انتخاب شد تا تاثیر ریزساختار بر روی مقاومت نمونه‌ها به حداقل برسد. سپس برای تهیه طول‌های مختلف برای بخش سنگی نمونه‌های کامپوزیت، از دستگاه برش نشان داده شده در شکل ۷ استفاده شد و ابتدا و انتهای نمونه‌ها مطابق با الزامات ISRM (1979a) آماده گردید. برای اتصال بخش سنگی و بخش بتنی سطوح اتصال قدری سمباده‌زنی شد تا به درجه‌ای از زبری مناسب برسند و در نهایت اتصال دو بخش به یکدیگر با استفاده از چسب بتن بر پایه رزین اپوکسی انجام شد. شکل ۶-ب بخش سنگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد که به ارتفاع‌های مختلف آماده شده‌اند و شکل ۶-ج نمونه کامپوزیت را قبل از انجام آزمایشات مقاومت فشاری نشان می‌دهد.

اختلاط ارائه شده در بخش قبل انجام شد. به کمک میز ویبره، لرزش مورد نیاز برای تراکم کامل نمونه‌های بتنی ایجاد شد و با استفاده از میله نازک فلزی به تعداد ۲۵ ضربه، میله زنی شد. در پایان عملیات و برای خروج کامل حباب‌های هوا، به تعداد مشخصی به هر کدام از قالب‌ها به آرامی ضربه وارد شد. قالب‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری و پس از گذشت ۲۴ ساعت و گیرش اولیه، نمونه‌ها از قالب خارج شدند و به مدت ۲۸ روز داخل آب قرار گرفتند. پس از گذشت ۲۸ روز و گیرش نهایی، نمونه‌ها از آب خارج شده و سطح نمونه‌ها به کمک پارچه خشک شد. سپس سطح نمونه‌های دارای سطوح زبر و ناصاف به کمک سمباده صاف و مسطح گردید. شکل ۶-الف بخش بتنی آماده شده برای تهیه نمونه‌های کامپوزیت را نشان می‌دهد. اما برای آماده کردن بخش سنگی نمونه‌های کامپوزیت، مغزه‌های مناسبی از



شکل ۵. قالب نمونه‌های بتنی با ارتفاع‌های مختلف ۱۱، ۸، ۵/۵ و ۳

(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۶. نمونه‌های الف: بتنی، ب: سنگی و ج: کامپوزیت



شکل ۷. دستگاه برای برش مفره‌ها

۲-۴- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و اندازه‌گیری سرعت موج برشی

صورت متحرک می‌باشد، به سمت پایین به اندازه‌ای جابجا می‌شود تا بر روی صفحه قرار گرفته روی نمونه، مماس شود. پس از انجام کنترل‌های اولیه و تنظیمات مربوطه به داده‌های ورودی در نرم‌افزار، آزمایش با نرخ جابجایی ثابت ۱ میلی‌متر بر ثانیه آغاز می‌شود. دستگاه داده‌های نیرو و تغییر طول نمونه متناظر با آن را تا لحظه گسیختگی و شکست نمونه، ثبت می‌کند. در نهایت، از روی داده‌های ثبت شده، می‌توان منحنی تنش- کرنش مربوط به هر نمونه را رسم کرد. شکل ۸ تصویر دستگاه استفاده شده را نشان می‌دهد. آزمایش دیگر انجام شده در این تحقیق، اندازه‌گیری سرعت موج فشاری بوده است، سرعت موج فشاری به عنوان شاخصی از مقاومت شناخته می‌شود. در این مطالعه سرعت موج فشاری برای همه نمونه‌ها و قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری، اندازه‌گیری شده است. برای انجام این آزمایش از دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج فشاری مدل Plus Pundit شرکت FARNELL CNS در آزمایشگاه دانشگاه زنجان استفاده شد (شکل ۹).

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری یا محصور نشده مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی جهت مطالعات مکانیکی روی سنگ و بتن می‌باشد که با وجود ظاهری ساده، باید به صورت دقیق انجام شود. در پژوهش حاضر، برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری از دستگاه یونیورسال سنتام مدل SRM-250 دانشگاه زنجان، استفاده شد (شکل ۸)، دستگاه سنتام بر اساس کنترل جابه‌جایی می‌باشد و می‌توان سرعت بارگذاری را بر اساس مقدار جابجایی فک دستگاه در واحد زمان تنظیم نمود و ثبت داده‌ها در آن به صورت خودکار از طریق دیتالاگر انجام می‌شود. داده‌ها شامل نیرو و تغییر مکان می‌باشند که توسط حسگرهای فک متحرک (فک بالایی دستگاه) اندازه‌گیری می‌شوند. انجام آزمایشات مطابق با استاندارد (ISRM, 1979a) می‌باشند و نرخ بارگذاری برای همه نمونه‌ها ۱ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد. پس از آن که نمونه روی نشیمنگاه کروی پایین و دقیقاً در مرکز آن قرار می‌گیرد، صفحه بالایی روی نمونه به صورت هم مرکز و متقارن با صفحه پایین قرار می‌گیرد. فک بالایی دستگاه که به



شکل ۸. دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری



شکل ۹. دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج فشاری

۳- نتایج

آزمایش قرار گرفتند. برای مقایسه بهتر نتایج ۱۲ نمونه بتن مسلح به الیاف فولادی (غیر کامپوزیتی) و ۳ نمونه سنگ بکر (غیر کامپوزیتی) نیز تحت آزمایش تک محوری قرار گرفتند که نتایج آزمایشات در ادامه آورده می‌شود.

در مجموع ۵۱ نمونه استوانه‌ای به قطر تقریبی ۵۴ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر $H/D = 2$ آماده برای انجام آزمایش شد. ۳۶ نمونه کامپوزیت سنگ-بتن مسلح به الیاف فولادی با وزن‌های مختلف الیاف و ارتفاع‌های مختلف برای بخش بتنی و بخش سنگی مورد

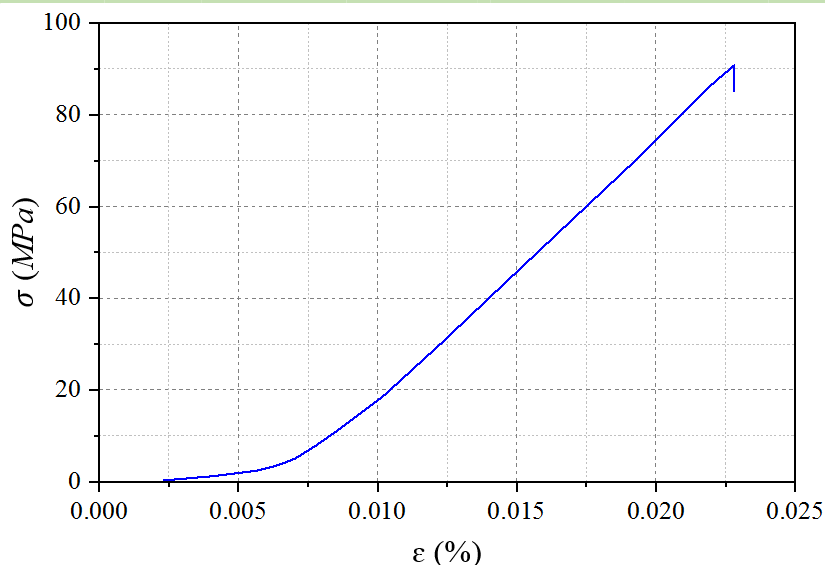
۳-۱- نتایج آزمایشات انجام شده بر روی سنگ بکر

قرار دارد و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) سه نمونه بین ۶۳/۸ مگاپاسکال و ۸۷/۹ مگاپاسکال قرار دارد با میانگین ۷۳/۳ مگاپاسکال که نشان‌دهنده اینست که ماسه‌سنگ مورد آزمایش در گروه ماسه‌سنگ‌های قوی می‌باشد. میانگین سرعت موج فشاری (V_p) در نمونه‌ها ۳۶۳۸ متر بر ثانیه می‌باشد که سرعت موج متوسطی است (Anon, 1979). شکل ۹ منحنی تنش-کرنش محوری را برای نمونه R01 نشان می‌دهد.

نتایج آزمایشات انجام شده بر روی سه نمونه از ماسه‌سنگ بکر در جدول ۵ آورده شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که وزن واحد (ρ) سه نمونه به طور میانگین ۲/۴۵ گرم بر سانتی‌متر بر مترمکعب می‌باشد که مطابق با طبقه‌بندی ارائه شده برای سنگ‌ها، ماسه‌سنگ انتخابی در گروه سنگ‌های با وزن واحد متوسط قرار می‌گیرد (Anon, 1979). همچنین تخلخل (n) میانگین سه نمونه ۰/۳ است که بیانگر اینست که ماسه‌سنگ انتخابی در گروه ماسه‌سنگ‌های با تخلخل کم

جدول ۵. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی انجام شده بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگ بکر

Symbol	H	ρ	n	V_p	UCS	ϵ_{peak}
Unit	mm	gr/cm ³	%	m/s	MPa	%
Standard	---	ISRM,1979b	ISRM,1979b	Aydin,2014	ISRM,1979a	---
Sample NO.						
R01	111	2.46	3	3700	87.94	2.50
R02	111	2.45	3	3580.64	63.79	2.84
R03	109	2.45	3.2	3633.33	68.36	2.08
Mean	110.33	2.453	3.06	3637.99	73.36	2.47



شکل ۱۰. منحنی تنش محوری - کرنش محوری در نمونه R01

۳-۲- تحلیل و بررسی نتایج آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی و نمونه‌های کامپوزیت

شدند: ۰٪ و ۱٪ و ۳٪ و ۶٪ که به ترتیب برابر با مقدار الیاف ۰ و ۲۲ و ۶۶ و ۱۳۲ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. در جداول ۶ تا ۹ نتایج برای هر ۴ گروه نمونه آورده شده است.

جدول ۶ نتایج بدست آمده برای نمونه‌های بتنی را نشان می‌دهد و در جداول ۷ تا ۹ نتایج برای نمونه‌های کامپوزیت آورده شده است. همانطور که قبلاً گفته شد بخش بتنی نمونه‌های کامپوزیت، با ۴ درصد مختلف الیاف فولادی ساخته

در جداول ۶ تا ۹، H ارتفاع نمونه می‌باشد، n تخلخل نمونه است، ρ وزن واحد نمونه است، V_p بیانگر سرعت موج فشاری است، UCS مقاومت فشاری تک‌محوری است، ϵ_{peak} کرنش در زمان پیک است و $\frac{H_c}{H}$ بیانگر نسبت ارتفاع بخش بتنی نمونه (H_c) به ارتفاع کل نمونه (H) است، این نسبت برای نمونه‌های بتنی (غیر کامپوزیتی) که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است، ۱ می‌باشد $\left(\frac{H_c}{H} = 1\right)$.

همچنین برای هر نمونه درصد الیاف فولادی استفاده شده برای بخش بتنی، در ستون جداگانه‌ای مشخص شده است. در ادامه شکل گرافیکی نتایج و همبستگی بین درصد الیاف فولادی و یا ارتفاع بخش بتنی نمونه با مقاومت و سایر خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ ارائه شده است. نکته قابل توجه اینست که در ترسیم شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ و بدست‌آوردن ضرایب همبستگی از نتایج جدول ۵ که مختص به نمونه‌های سنگ بکر است استفاده نشده است.

شکل ۱۱ همبستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و درصد الیاف فولادی را به ازای مقادیر مختلف نسبت ارتفاع بتنی نمونه به ارتفاع کل نمونه $\left(\frac{H_c}{H}\right)$ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود همبستگی مثبت متوسطی بین UCS و درصد الیاف فولادی وجود دارد، به عبارت دیگر با افزایش درصد الیاف فولادی، مقاومت نمونه کامپوزیت افزایش یافته است. نتیجه دیگر که از این شکل بدست می‌آید اینست که با افزایش $\frac{H_c}{H}$ ضریب همبستگی افزایش یافته است. نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۲، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) را در مقابل $\frac{H_c}{H}$ نشان می‌دهد. این نمودارها به ازای مقادیر مختلف درصد الیاف فولادی به کاربرده شده در بخش بتنی، می‌باشند. در این نمودارها دیده می‌شود که با افزایش ارتفاع بخش بتنی نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد و همبستگی منفی متوسطی

بین UCS و $\frac{H_c}{H}$ وجود دارد. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۵ و ۶ میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های سنگ بکر بیش از نمونه‌های بتنی است بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش ارتفاع بخش بتنی نمونه‌ها، مقاومت کاهش یابد. در مجموع می‌توان گفت که میانگین مقاومت نمونه‌های کامپوزیت کمتر از مقاومت سنگ بکر و بیشتر از مقاومت نمونه‌های بتنی می‌باشد. شکل ۱۳ تغییرات کرنش لحظه پیک را در مقابل درصد الیاف فولادی به ازای مقادیر مختلف $\frac{H_c}{H}$ نشان می‌دهد. در نمودارهای این شکل دیده می‌شود که با افزایش درصد الیاف فولادی کرنش در لحظه پیک افزایش می‌یابد و همبستگی مثبت متوسطی بین این دو پارامتر وجود دارد. کرنش در لحظه پیک بیانگر ظرفیت تغییرشکل نمونه در زمان گسیختگی می‌باشد و با افزایش درصد الیاف فولادی این ظرفیت در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ تغییرات کرنش پیک را در مقابل $\frac{H_c}{H}$ نشان می‌دهد و در اینجا دیده می‌شود که با افزایش ارتفاع بخش بتنی نمونه‌ها کرنش در زمان پیک کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر ظرفیت تغییرشکل نمونه کاهش یافته است.

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب تغییرات سرعت موج فشاری را در مقابل درصد الیاف فولادی و $\frac{H_c}{H}$ نشان می‌دهند، در نمودارهای این دو شکل دیده می‌شود که همبستگی معنی‌داری در نمونه‌های کامپوزیتی بین سرعت موج و درصد الیاف یا بین سرعت موج و $\frac{H_c}{H}$ وجود ندارد. تنها در حالتی همبستگی وجود دارد که نمونه به طور خالص بتنی باشد، در شکل ۱۵ زمانیکه $\frac{H_c}{H} = 1$ ، همبستگی مثبت متوسطی بین V_p و درصد الیاف وجود دارد، یعنی در نمونه‌های خالص بتنی همانگونه که با افزایش درصد الیاف مقاومت نمونه افزایش می‌یابد، سرعت موج فشاری هم افزایش یافته است.

در جداول ۶ تا ۹، H ارتفاع نمونه می‌باشد، n تخلخل نمونه است، ρ وزن واحد نمونه است، V_p بیانگر سرعت موج فشاری است، UCS مقاومت فشاری تک‌محوری است، ϵ_{peak} کرنش در زمان پیک است و $\frac{H_c}{H}$ بیانگر نسبت ارتفاع بخش بتنی نمونه (H_c) به ارتفاع کل نمونه (H) است، این نسبت برای نمونه‌های بتنی (غیر کامپوزیتی) که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است، ۱ می‌باشد $\left(\frac{H_c}{H} = 1\right)$.

همچنین برای هر نمونه درصد الیاف فولادی استفاده شده برای بخش بتنی، در ستون جداگانه‌ای مشخص شده است. در ادامه شکل گرافیکی نتایج و همبستگی بین درصد الیاف فولادی و یا ارتفاع بخش بتنی نمونه با مقاومت و سایر خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ ارائه شده است. نکته قابل توجه اینست که در ترسیم شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ و بدست‌آوردن ضرایب همبستگی از نتایج جدول ۵ که مختص به نمونه‌های سنگ بکر است استفاده نشده است.

شکل ۱۱ همبستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و درصد الیاف فولادی را به ازای مقادیر مختلف نسبت ارتفاع بتنی نمونه به ارتفاع کل نمونه $\left(\frac{H_c}{H}\right)$ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود همبستگی مثبت متوسطی بین UCS و درصد الیاف فولادی وجود دارد، به عبارت دیگر با افزایش درصد الیاف فولادی، مقاومت نمونه کامپوزیت افزایش یافته است. نتیجه دیگر که از این شکل بدست می‌آید اینست که با افزایش $\frac{H_c}{H}$ ضریب همبستگی افزایش یافته است. نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۲، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) را در مقابل $\frac{H_c}{H}$ نشان می‌دهد. این نمودارها به ازای مقادیر مختلف درصد الیاف فولادی به کاربرده شده در بخش بتنی، می‌باشند. در این نمودارها دیده می‌شود که با افزایش ارتفاع بخش بتنی نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد و همبستگی منفی متوسطی

جدول ۶. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی با درصد‌های مختلف الیاف فولادی $\left(\frac{H_c}{H} = 1\right)$

Symbol	H	ρ	n	Fiber Percentage	V_p	UCS	ϵ_{peak}
Unit	mm	gr/cm ³	%	%	m/s	MPa	%
Standard	---	ISRM,1979	ISRM,1979	---	ISRM,2014	ISRM,1979	---
Sample NO.							
Con-0-01	109.3	2.21	7.61	0	3643.33	32.81	0.87
Con-0-02	108.3	2.19	7.68	0	3493.54	26.64	1.37
Con-0-03	109.7	2.19	7.94	0	3556.66	20.64	1.84
Con-1-01	108	2.24	6.84	1	3857.14	37.66	1.28
Con-1-02	107	2.24	7.28	1	3821.42	39.34	1.43
Con-1-03	106	2.24	6.53	1	3655.17	37.48	1.38
Con-3-01	109.8	2.30	5.96	3	3786.20	31.97	1.62
Con-3-02	108.9	2.31	6.42	3	3755.17	38.51	1.52
Con-3-03	110.1	2.31	5.95	3	3440.62	35.95	1.75
Con-6-01	107	2.32	6.12	6	3821.42	41.59	1.59
Con-6-02	107.7	2.34	5.67	6	3713.79	38.56	1.73
Con-6-03	108	2.35	5.66	6	3857.14	39.16	1.29

جدول ۷. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های کامپوزیتی، ارتفاع بخش بتنی: ۳۰ سانتی متر $\left(\frac{H_c}{H} = 0.27\right)$

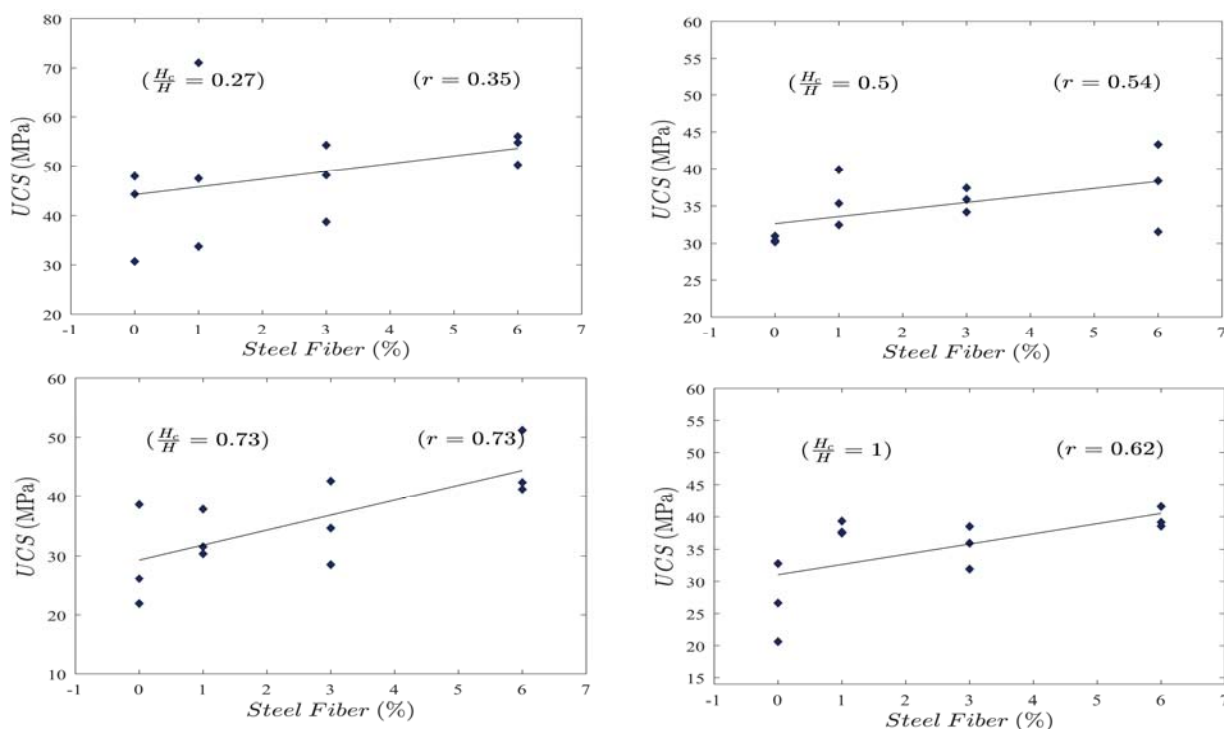
Symbol	H	H _{Concrete}	H _{Rock}	Fiber Percentage	V_p	UCS	ϵ_{peak}
Unit	mm	mm	mm	%	m/s	MPa	%
Standard	---	---	---	---	ISRM,2014	ISRM,1979	---
Sample NO.							
Com-0-01	109.3	30	79.3	0	3525.80	44.32	1.50
Com-0-02	109.5	30	79.5	0	3421.87	47.94	1.58
Com-0-03	110.6	30	80.6	0	3453.12	30.70	2.39
Com-1-01	110.7	30.3	80.4	1	3570.96	33.82	1.85
Com-1-02	110.1	30.3	79.8	1	3666.66	71.05	2.04
Com-1-03	110.5	30.4	80.1	1	3810.34	47.48	1.52
Com-3-01	109.6	30.2	79.4	3	3653.33	54.24	1.97
Com-3-02	110.4	30.3	80.1	3	3345.45	38.75	2.04
Com-3-03	110.5	30	80.5	3	3806.89	48.16	1.97
Com-6-01	109.5	30.3	79.2	6	3650	56.00	1.76
Com-6-02	110.8	30.2	80.6	6	3775.86	50.21	1.96
Com-6-03	109.9	30.3	79.6	6	3330.30	54.76	2.45

جدول ۸. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های کامپوزیتی، ارتفاع بخش بتنی: ۵۵ سانتی متر $\left(\frac{H_c}{H} = 0.50\right)$

Symbol	H	H _{Concrete}	H _{Rock}	Fiber Percentage	V_p	UCS	ϵ_{peak}
Unit	mm	mm	mm	%	m/s	MPa	%
Standard	---	---	---	---	ISRM,2014	ISRM,1979	---
Sample NO.							
Com-0-01	110.2	55	55.2	0	3443.75	30.39	1.58
Com-0-02	109.5	55	54.5	0	3910.71	30.99	1.50
Com-0-03	107.9	54.3	53.6	0	3720.68	30.20	1.31
Com-1-01	107.8	54.3	53.5	1	3477.41	32.47	1.53
Com-1-02	110.3	55.3	55	1	3803.44	39.88	1.65
Com-1-03	109.4	54.4	55	1	3646.66	35.34	1.57
Com-3-01	109.1	55.2	53.9	3	3762.06	37.43	1.70
Com-3-02	109.3	54.4	54.9	3	4048.14	35.87	1.80
Com-3-03	110.4	55.4	55	3	3942.85	34.18	1.59
Com-6-01	109	55.1	53.9	6	3516.12	43.30	1.61
Com-6-02	108.7	54.3	54.4	6	3623.33	38.36	1.68
Com-6-03	109.1	54.7	54.4	6	3762.06	31.55	1.50

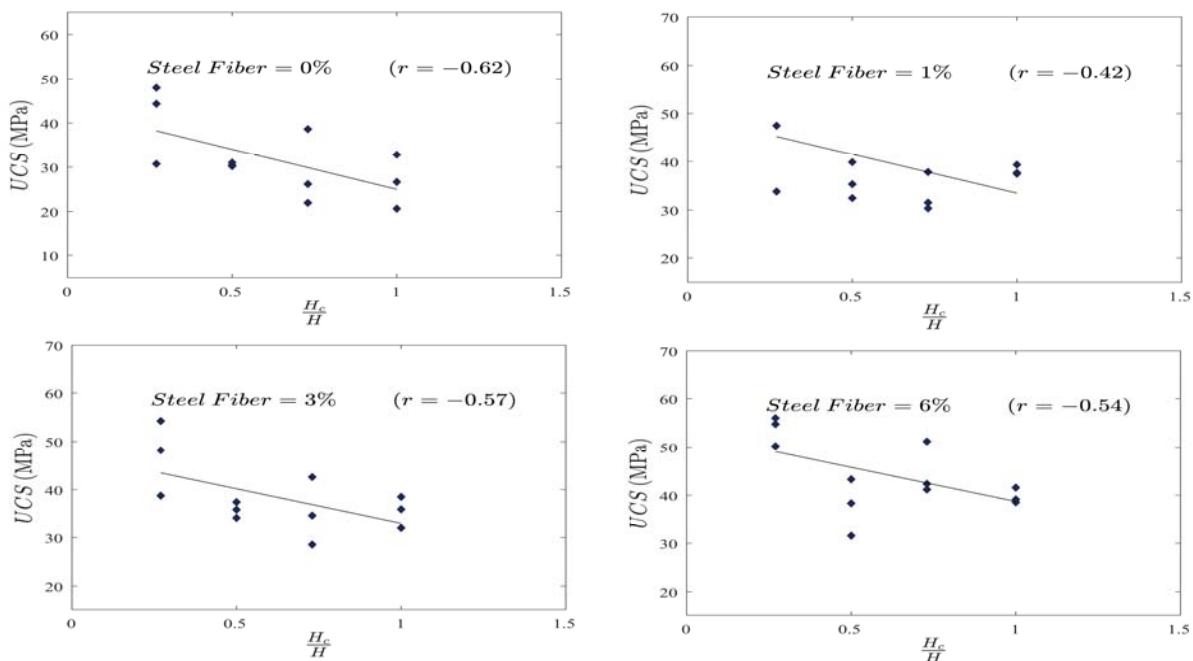
جدول ۹. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های کامپوزیتی، ارتفاع بخش بتنی: ۸۰ سانتی متر ($\frac{H_c}{H} = 0.73$)

Symbol	H	H _{Concrete}	H _{Rock}	Fiber Percentage	V _p	UCS	ε _{peak}
Unit	mm	mm	mm	%	m/s	MPa	%
Standard Sample NO.	---	---	---	---	ISRM,2014	ISRM,1979	---
Com-0-01	108.8	79.8	29	0	3108.57	38.61	1.40
Com-0-02	110	80	30	0	3333.33	26.17	1.48
Com-0-03	109.9	80.3	29.6	0	3434.37	21.94	1.63
Com-1-01	108.5	78.8	29.7	1	3616.66	30.36	1.92
Com-1-02	109.1	79	30.1	1	4196.15	37.84	1.56
Com-1-03	109	79	30	1	3516.12	31.53	1.90
Com-3-01	108.8	79.1	29.7	3	3200	28.55	1.57
Com-3-02	108.4	78.7	29.7	3	3387.5	42.59	1.87
Com-3-03	110.7	79.6	31.1	3	3690	34.66	1.63
Com-6-01	108.4	78.2	30.2	6	3496.77	42.36	1.19
Com-6-02	109.4	79.5	29.9	6	3907.14	51.19	1.86
Com-6-03	109.8	79.8	30	6	3229.41	41.19	2.14

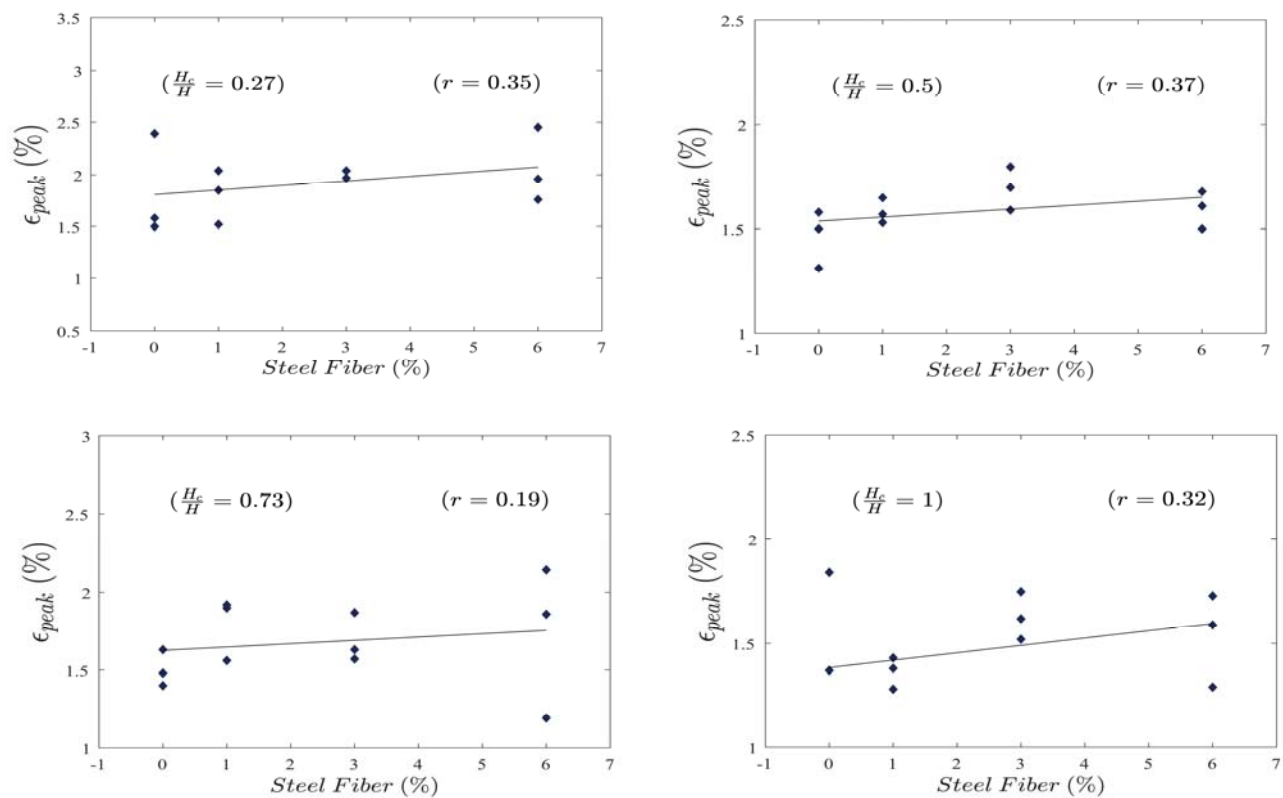


شکل ۱۱. همبستگی بین مقاومت فشاری تک محوری و درصد الیاف فولادی استفاده شده در بخش بتنی نمونه‌های کامپوزیت به ازای مقادیر

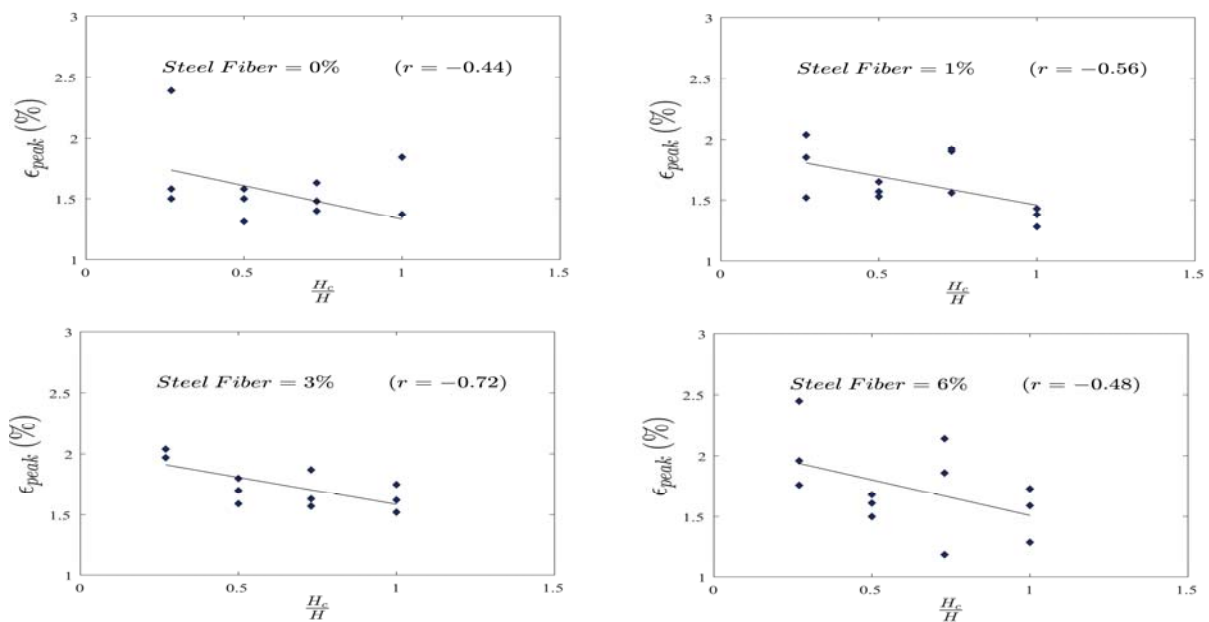
مختلف $\frac{H_c}{H}$ (نسبت ارتفاع بخش بتنی نمونه به ارتفاع کل نمونه)



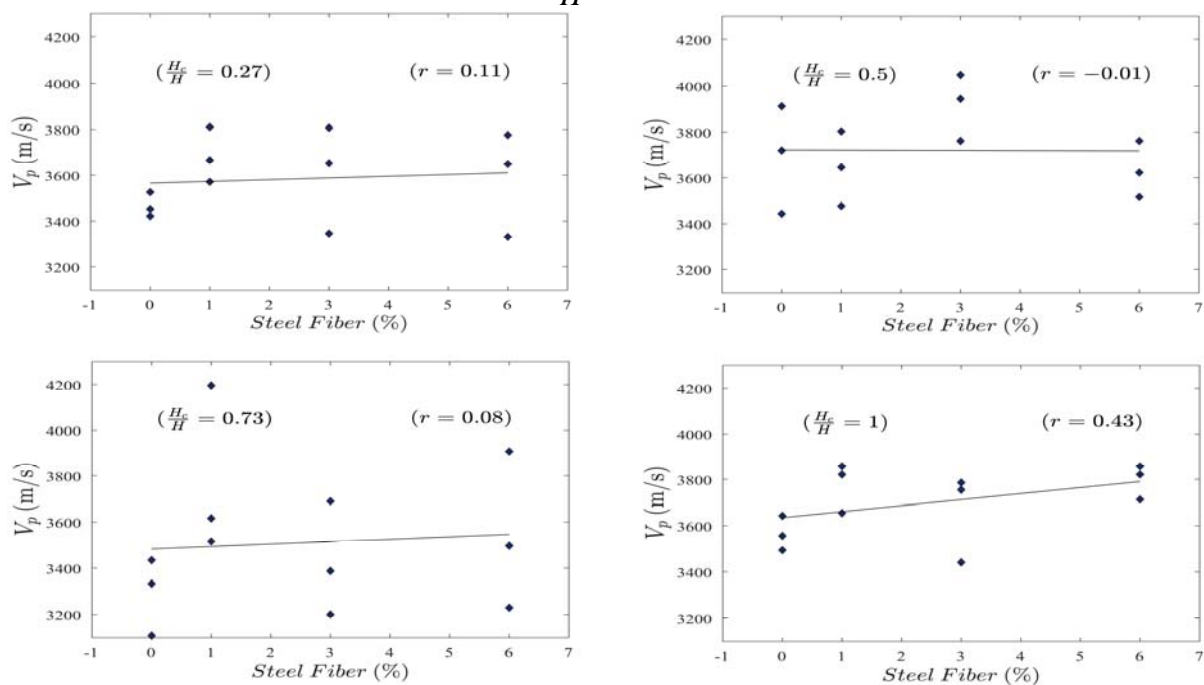
شکل ۱۲. همبستگی بین مقاومت فشاری تک محوری و $\frac{H_c}{H}$ به ازای مقادیر مختلف درصد الیاف فولادی



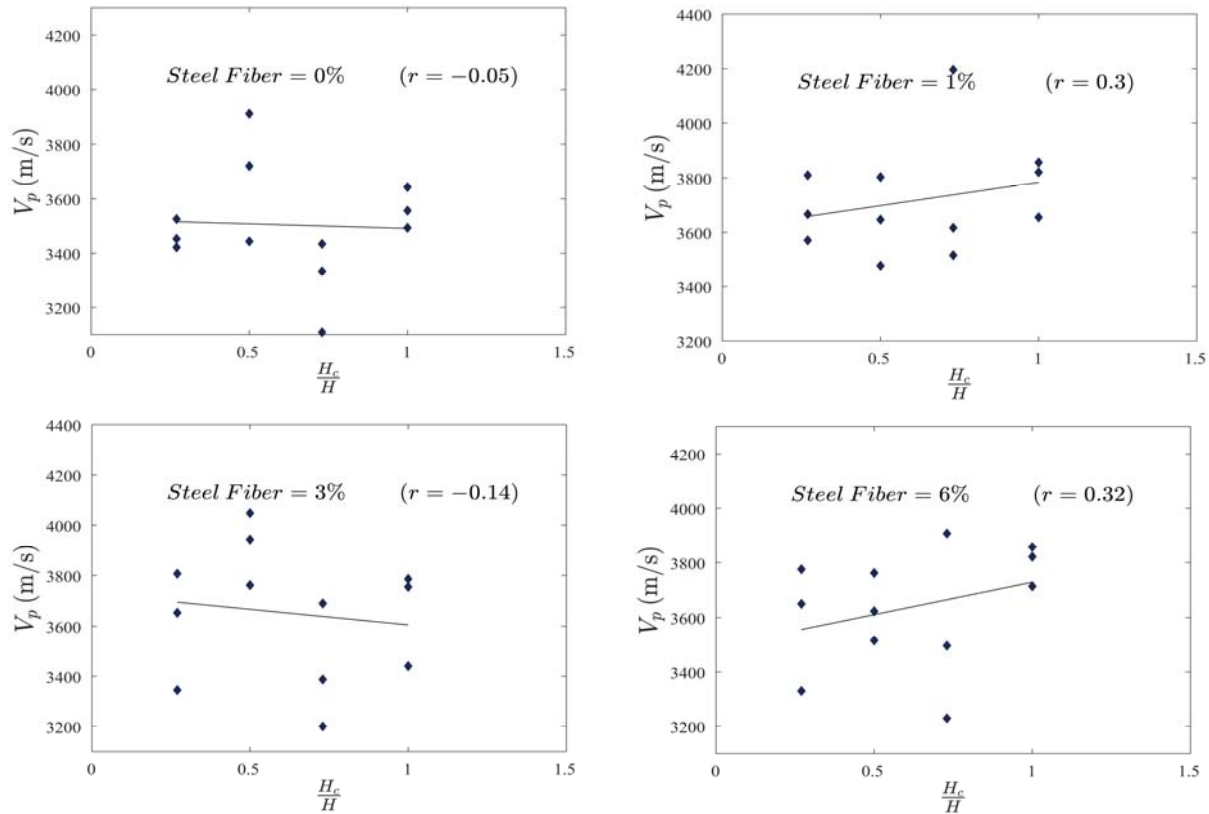
شکل ۱۳. همبستگی بین کرنش در لحظه پیک و درصد الیاف فولادی به ازای مقادیر مختلف $\frac{H_c}{H}$



شکل ۱۴. همبستگی بین کرنش در لحظه پیک و $\frac{H_c}{H}$ به ازای مقادیر مختلف درصد الیاف فولادی



شکل ۱۵. همبستگی بین سرعت موج فشاری و درصد الیاف فولادی

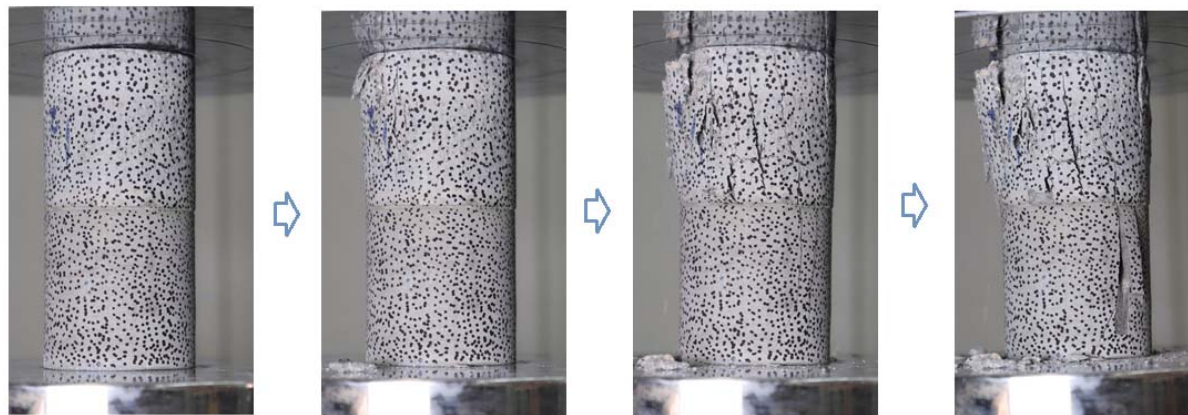


شکل ۱۶. همبستگی بین سرعت موج فشاری و $\frac{H_c}{H}$

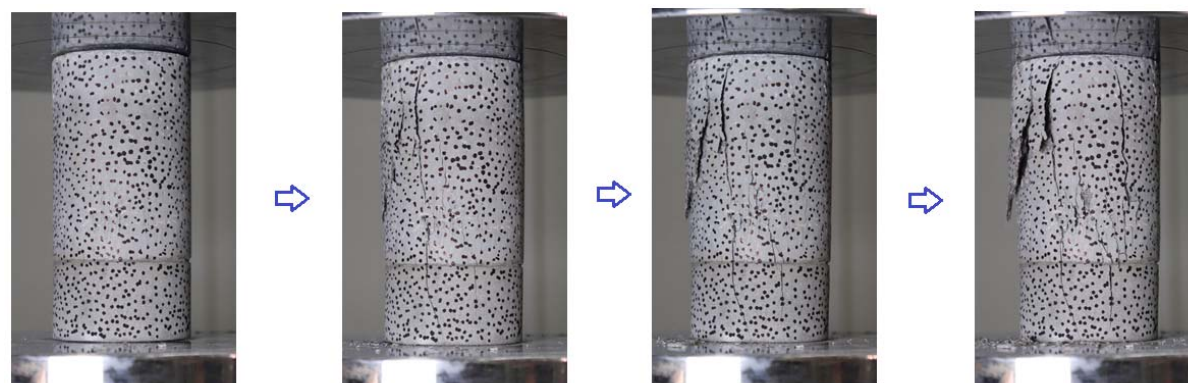
۳-۳- مد گسیختگی در نمونه‌های کامپوزیت

انهدام بخش بتنی دچار گسیختگی کامل می‌شوند. هر چقدر که ارتفاع بخش بتنی نمونه کامپوزیت، کوتاه‌تر باشد، توسعه ترک در این ناحیه کمتر و مقاومت نمونه افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر شرایط محصورشدگی بتن بین فک صلب بالایی دستگاه و بخش سنگی باعث افزایش مقاومت نمونه می‌شود. از طرف دیگر با افزایش ارتفاع بخش بتنی، شرایط تنش‌ترکیبی در بخش بتنی کمتر می‌شود و مقاومت نمونه کاهش می‌یابد. لازم به توضیح است که نقاط مشاهده شده بر روی سطوح نمونه‌ها در شکل‌های ۱۷ و ۱۸، نقاطی است که تعدا بر روی نمونه‌ها قرار داده شد تا با استفاده از تکنیک پردازش تصاویر نیز بتوان مسیر رشد ترک و گسیختگی نمونه‌ها را دنبال کرد.

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مد شکست و مراحل گسیختگی دو نمونه کامپوزیت را در حالتی که $\frac{H_c}{H} = 0.50$ و $\frac{H_c}{H} = 0.73$ را به ترتیب نشان می‌دهد. در این دو شکل بخش بتنی نمونه‌های کامپوزیت، بخش بالایی می‌باشد. مشاهده می‌شود که ریزترک‌ها و ترک‌های سطحی از بخش بتنی شروع می‌شوند و توسعه پیدا می‌کنند. توسعه ترک‌ها در بخش بتنی به صورت مورب می‌باشد و بعد از عبور از سطح مشترک، ترک‌ها در بخش سنگی نمونه، در راستای قائم امتداد پیدا می‌کنند. توسعه ترک‌ها در بخش سنگی نمونه‌ها بسیار محدودتر از بخش بتنی است و دارای عمق و عرض کمتری هستند. در نهایت نمونه‌ها در اثر توسعه ترک‌های مورب در بخش بتنی و



شکل ۱۷. مراحل توسعه خرابی نمونه کامپوزیت، شروع و توسعه از بخش بتنی $\left(\frac{H_c}{H} = 0.50\right)$



شکل ۱۸. مراحل توسعه خرابی در نمونه کامپوزیت $\left(\frac{H_c}{H} = 0.73\right)$

۵- نتیجه گیری

موج فشاری بر روی نمونه‌های سنگی، بتنی و کامپوزیت انجام شد. نمونه‌های کامپوزیت با درصد‌های مختلف الیاف فولادی تهیه شدند و در آنها نسبت ارتفاع بخش بتنی به ارتفاع کل نمونه متغیر در نظر گرفته شد تا اثر درصد الیاف فولادی و همچنین ضخامت بخش بتنی بر روی مقاومت کامپوزیت مورد بررسی قرار گیرد. به طور خلاصه نتایج به صورت زیر می‌باشد. -مقاومت فشاری نمونه‌های کامپوزیت سنگ-بتن، کمتر از مقاومت فشاری سنگ بکر و بیشتر از مقاومت فشاری نمونه بتنی می‌باشد.

-با افزایش درصد الیاف فولادی بخش بتنی نمونه‌های کامپوزیت، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد و همبستگی مثبت با حداکثر ضریب همبستگی $r = 0.73$

بتن مسلح به الیاف فولادی غالباً به صورت شاتکریت بر روی جداره‌های تونل‌ها و یا شیب مجاور جاده‌ها بر روی سطوح سنگی به عنوان پوشش موقت یا پوشش دائمی اجرا می‌شود. با توجه به اتصال بتن به سنگ زیرین نوعی کامپوزیت سنگ-بتن ایجاد می‌شود که در برابر بارهای فشاری ناشی از پوشش بتن مسلح دائمی تونل و یا فشار سنگ از بیرون، مقاومت می‌کند. به دلیل گستردگی استفاده از این نوع مصالح، بررسی رفتار آن در سطح مشترک سنگ/بتن دارای اهمیت ویژه‌ای است. هدف از این مقاله بررسی رفتار تحت فشار کامپوزیت سنگ/بتن مسلح به الیاف فولادی با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بود. بدین منظور ۵۱ آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش سرعت

و ارتفاع بخش بتنی نمونه، وجود ندارد. تنها در حالتی همبستگی وجود دارد که نمونه به طور خالص بتنی باشد، در این حالت ضریب همبستگی بین سرعت موج فشاری و درصد الیاف فولادی $r = 0.43$ بدست می‌آید، یعنی در نمونه‌های خالص بتنی همانگونه که با افزایش درصد الیاف فولادی، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد، سرعت موج فشاری هم افزایش یافته است.

-تاثیر ارتفاع بخش بتنی و بخش سنگی نمونه‌ها در شکل گسیختگی نمونه‌ها قابل مشاهده است. توسعه ترک در بخش بتنی نمونه به صورت مورب بوده و در بخش سنگی به شکل ترک‌های طولی است. ریزترک‌ها از بخش بتنی آغاز می‌شوند و با توسعه و عبور از سطح مشترک وارد بخش سنگی می‌شوند. هرچقدر ارتفاع بخش بتنی کوتاه‌تر باشد محصورشدگی بتن بین فکه صلب بالایی و ناحیه سنگی بیشتر می‌شود و مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. گسیختگی نمونه در نتیجه گسیختگی بخش بتنی، رخ می‌دهد.

بین مقاومت فشاری تک‌محوری و درصد الیاف فولادی بدست آمد.

-همبستگی منفی متوسط با حداکثر ضریب $r = -0.62$ بین مقاومت فشاری تک‌محوری و ارتفاع بخش بتنی نمونه‌های کامپوزیت وجود دارد، یعنی با افزایش ضخامت لایه بتنی مقاومت نمونه‌های کامپوزیت کاهش می‌یابد.

-با افزایش درصد الیاف فولادی، کرنش در لحظه پیک افزایش می‌یابد، حداکثر ضریب همبستگی در این حالت $r = 0.37$ بدست آمد. به عبارت دیگر با افزایش درصد الیاف فولادی، نمونه در لحظه پیک، کرنش و تغییرشکل بیشتری را تجربه می‌کند، همانطور که مقاومت بالاتری هم دارد.

-با افزایش ارتفاع بخش بتنی نمونه‌ها، کرنش نمونه در زمان پیک کاهش می‌یابد، حداکثر ضریب همبستگی در این حالت $r = -0.72$ می‌باشد.

-در نمونه‌های کامپوزیت همبستگی معنی‌داری بین سرعت موج فشاری و درصد الیاف فولادی یا بین سرعت موج فشاری

۶-مراجع

Marine and Petroleum Geology, 153, 106275.
doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106275

-GUO Dong-ming, YAN Peng-yang, ZHANG Ying-shi, et al. (2019). Experimental research on the sprayed concrete-surrounding rock combined body subjected to cyclic impact loading. *Journal of Vibration and Shock*, 38(10):105-111.

-Gutiérrez-Ch, J. G., Senent, S., Melentijevic, S., & Jimenez, R. (2018). Distinct element method simulations of rock-concrete interfaces under different boundary conditions. *Engineering Geology*, 240, 123-139.
doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.017

-ISRM (1979a), Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 16, 135-140.

-ISRM (1979b), Suggested method for determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and

-Anon, (1979). Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part I-Rock and Soil Materials. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 19, 364-371.

doi.org/10.1007/BF02600503

-Aydin, A. (2014). Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1), 255-259.

doi.org/10.1007/s00603-013-0454-z

-Do, N.-A., & Dias, D. (2018). Tunnel lining design in multi-layered grounds. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 103-111.

doi.org/10.1016/j.tust.2018.07.005

-Ghasemlooytakantapeh, S., Zohdi, A., & Lakirouhani, A. (2023). Petrography and geochemistry of the Miocene Upper Red Formation sandstones in NW Iran; with an application to the origin and tectonic setting.

-XIANG Wei, LIU Xun. (2010). Experimental study on mechanical properties of rock shotcrete composite specimens under freeze-thaw cycles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(12): 2510-2521.

-Zhao, B., Liu, Y., Liu, D., Huang, W., Wang, X., Yu, G., & Liu, S. (2020). Research on the influence of contact surface constraint on mechanical properties of rock-concrete composite specimens under compressive loads. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(2), 322-330.

doi.org/10.1007/s11709-019-0594-7

-Zhao, Y., Shen, M., Bi, J., Wang, C., Yang, Y., Du, B., & Ning, L. (2022). Experimental study on physical and mechanical characteristics of rock-concrete combined body under complex stress conditions. *Construction and Building Materials*, 324, 126647.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126647

Swelling and Slake-durability Index Properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 16(2), 141-156.

-Mouzannar, H., Bost, M., Leroux, M., & Virely, D. (2017). Experimental Study of the Shear Strength of Bonded Concrete-Rock Interfaces: Surface Morphology and Scale Effect. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(10), 2601-2625.

doi.org/10.1007/s00603-017-1259-2

-Selçuk, L., & Aşma, D. (2019). Experimental investigation of the Rock-Concrete bi materials influence of inclined interface on strength and failure behavior. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 123, 104119.

doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104119

-Wang, Q., Pan, R., Jiang, B., Li, S. C., He, M. C., Sun, H. B., Luan, Y. C. (2017). Study on failure mechanism of roadway with soft rock in deep coal mine and confined concrete support system. *Engineering Failure Analysis*, 81, 155-177.

doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.003

Laboratory Study on the Behavior of Rock-Steel Fiber Reinforced Concrete Composite Samples under Compressive Strength Test

Ali Lakirouhani, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Mohammad Hadadian, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: rou001@znu.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

Steel fiber reinforced concrete is used as a temporary or permanent lining on the rock wall of tunnels or the slope of roadways, so investigating the interaction behavior of concrete attached to the surrounding rock is of particular importance. In this article, using uniaxial compressive strength test, the strength behavior of sandstone/steel fiber reinforced concrete composite samples is investigated. To make composite samples, different percentages of steel fibers were used for the concrete part of the samples, and also the height of the concrete and rocky parts of the samples were considered variable. According to the obtained results, there is a moderate positive correlation between the uniaxial compressive strength and the percentage of steel fibers, in other words, by increasing the percentage of steel fibers, the strength of the composite sample increases. As the height of the concrete part of the samples increases, the uniaxial compressive strength decreases and there is a moderate negative correlation between the compressive strength and the height of the concrete part of the samples. In all samples, the uniaxial compressive strength of the composite sample is between the uniaxial compressive strength of the concrete sample and the compressive strength of the intact rock sample. The pattern of cracking before failure is diagonal in the concrete part and longitudinal cracks in the stone part. By reducing the height of the concrete part, the confinement of the concrete part between the upper rigid plate on one side and the rock part on the other side increases and the strength of the sample increases. There is no significant correlation in composite samples between compression wave velocity and the percentage of steel fibers or between compression wave velocity and the ratio of the height of the concrete section to the height of the whole sample.

Keywords: Rock-Concrete, Composite Specimen, Contact Surface, Uniaxial Compressive Strength, Sandstone