

بررسی خواص مکانیکی بتن سبک سازه ای حاوی پشم سنگ و پرلیت

دکتر سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد ، شکیب ایرانی

shakibirani@yahoo.com

چکیده

امروزه فن آوری های مختلف بتن به سرعت در حال رشد و توسعه در بخش های مختلف هستند و هر روز کاربرد های جدیدی با ظهور فن آوری های نوین به عرصه ساخت و ساز معرفی می گردد. پشم سنگ در واقع از تارهای بسیار ریز سنگ بازالت تشکیل شده است. به نظر می رسد خواص عایق حرارتی این مصالح از یک سو و نیاز به عایق نمودن بتن به عنوان یک پوشش ساختمانی را می توان از عوامل اصلی در تعریف این پروژه نام برد. ۹ نسبت مخلوط با درصد های مصرفی حجمی ۰.۵ تا ۵ پشم سنگ در این مطالعه تعریف گردید و آزمون های مقاومت فشاری، خمشی، کشش غیرمستقیم و مافوق صوت و آزمایش کوره حرارتی روی نمونه ها انجام شد و نتایج نشان می دهند که افزایش درصد پشم سنگ تا ۴ درصد حجمی هرچند منجر به کاهش مقاومت های فشاری و خمشی گردیده است اما مقاومت نمونه ها در برابر حرارت به طرز محسوسی با افزایش همراه بود، به گونه ای که پشم سنگ در درصد حجمی ۲ ، پس از عمل آوری تا ۱۴,۷ درصد افزایش را نیز در مقاومت نشان داده است.

فن آوری بتن امروز نسبت به قرن گذشته شاهد رشد فزاینده ای بوده است و هر روزه مواد جدید و روش های نوآورانه ای برای بهبود کیفیت و کاهش قیمت این مصالح پر کاربرد مورد آزمایش قرار می گیرد [۳-۱]. امکان افزایش مقاومت مکانیکی تا بیش از ۲۰۰ مگاپاسکال برای بتن های امروزی نیز فراهم شده است [۴]. استفاده از بتن در صنایع مختلف عمرانی به شدت رواج دارد و در سازه های متنوع به دلیل ارزانی و استحکام بالا، کاربردهای گسترده ای از زمان پیدایش سیمان در این صنعت داشته و دارد. ساخت انواع سازه های قابی و پوسته ای با هندسه های مختلف و به کارگیری انواع سیمان و افزودنی های معدنی و شیمیایی از جمله فعالیت های در حال توسعه است که تمام کشورها در حال بهره برداری از آن ها در مقیاس صنعتی هستند [۵]. تحقیقات بسیاری در زمینه توسعه بتن های پایدار و با صرفه اقتصادی در حال انجام است که بتن های بازیافتی و بتن سبک، امروزه سهم قابل توجهی از این تحقیقات را به خود اختصاص می دهند.

یکی از کاربردهای قابل توجه این کامپوزیت ارزشمند و اقتصادی، ساخت سازه هایی با دوام و شرایط مقاومتی بالا در برابر عوامل مخرب و تغییرات شدید دمایی می باشد. شرایط دمایی نامساعد که می تواند باعث افت شدید راندمان و هدررفت انرژی در سازه های بتنی باشد، موضوع مطالعه جمعی از پژوهشگران این حوزه است. بررسی اثرات کاربرد پشم سنگ بازیافتی در بتن، عاملی تعیین کننده در پیش بینی شدت عبور حرارت و میزان عایق بودن بتن می تواند محسوب گردد. مهمترین ویژگی پشم سنگ، مقاومت زیاد آن در برابر آتش، عایق برای حرارت و صوت می باشد [۶]. پشم سنگ نمی سوزد، بنابراین می توان آن را به عنوان ماده ای محافظ در برابر آتش سوزی استفاده کرد. همچنین از آنجایی که پشم سنگ می تواند بازیافت شده و دوباره مورد استفاده قرار گیرد می تواند تاثیر بسزایی بر روی کاهش آلودگی محیط زیست و انتشار گاز دی اکسید کربن داشته باشد [۷ و ۸]. پرلیت یک سبکدانه صنعتی تلقی می شود که توسط حرارت در کوره های مخصوص تولید می شود و عایق حرارتی می باشد. برای کاهش هزینه بالای انرژی در هنگام استفاده از ساختمان ها استفاده از عایق های حرارتی را ضروری می سازد.

ونتسی و کارکی [۹] به جمع آوری اطلاعات در مورد پشم سنگ و بازیافت آن پرداختند. در مطالعه ونتسی و کارکی آمده است که کشورهای اصلی تولید کننده پشم سنگ آلمان، فرانسه و انگلیس هستند و مقدار تولید دقیق دیگر کشورهای اروپایی به طور دقیق مشخص نیست. آن ها مقدار حدود ۳ میلیون تن را برای سال ۲۰۱۲ تخمین زدند. تحقیقات بسیار محدودی در زمینه کاربرد پشم سنگ در بتن صورت گرفته است که از آن جمله می توان به پژوهش لین و همکارانش [۱۰] اشاره نمود. آنها از زباله های پشم سنگ و پوزولان های همچون سرباره و خاکستر بادی و دوده سیلیسی استفاده کردند و خواص فیزیکی و مکانیکی بتن های ساخته شده را همراه با تصاویر ریزساختار گرفته شده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که پشم سنگ بازیافتی می تواند به عنوان یک پرکننده یا افزودنی معدنی در بتن عمل کرده و اثر منفی بسیار ناچیزی (در برخی موارد اثر مثبت) داشته باشد. همچنین چنگ و همکارانش [۷] نیز بر روی کاربرد پشم سنگ بازیافتی در کامپوزیت های سیمانی مطالعه کردند. آنها در یافتند که با کاربرد پشم سنگ های متنوعی در محدوده اندازه ای ۱۷ تا ۲۵۰

میکرون می توان جایگزینی موفقی با درشت دانه ها و ریزدانه ها انجام داد. در تحقیق دیگری که توسط لین [۱۱] صورت گرفت، اثرات ریزساختاری با دقت بیشتری دنبال شد و مشاهده گردید که کاربرد پشم سنگ منجر به افزایش تراکم و کاهش نفوذپذیری در بتن های ساخته شده گشته است.

کیرون و همکارانش [۱۲] روشی برای استفاده از پشم سنگ به عنوان مواد اولیه سیمانی ژئوپلیمرها ارائه دادند. آنها توانستند به ژئوپلیمرهایی با مقاومت فشاری ۱۲ مگاپاسکال با ۳۳٪ پشم سنگ و ۴۷٪ خاکستر بادی به دست آورند. لین و همکارانش [۸] مطالعه جامعی روی کامپوزیت های سیمانی حاوی پشم سنگ انجام دادند. آنها مشخصات مکانیکی کامپوزیت های سیمانی شامل مقاومت فشاری و نفوذ یون کلر را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که مقاومت فشاری نمونه های ۹۱ روزه حاوی پشم سنگ مقاومت فشاری بالاتر و نفوذ یون کمتری به دلیل کاهش مقدار کلسیم هیدروکسید دارند. با توجه به مطالعات مرور شده و مطالب ذکر شده در این تحقیق به بررسی میزان تاثیر پشم سنگ و پرلیت بر خواص مکانیکی بتن سبک سازه ای و سپس به ارزیابی میزان عایق بودن بتن سبک حاوی پرلیت و پشم سنگ در برابر حرارت و صوت پرداخته شده است.

گرچه مطالعاتی در زمینه بتن های سبک حاوی پشم سنگ انجام شده است ولی اطلاعات جامعی در مورد مقاومت های مکانیکی و دیگر خصوصیات این بتن ها در دست نیست. در این مقاله علاوه بر بررسی مقاومت های فشاری، خمشی و کشش غیر مستقیم نمونه های حاوی درصدهای مختلف پشم سنگ به بررسی رفتار نمونه ها بعد از حرارت دیدن و همچنین سرعت امواج فراصوت پرداخته شده است تا معیاری از میزان عایق بودن پشم سنگ در بتن به دست آید.

۲. مصالح و روش آزمایشگاهی

۱،۲ مصالح

برای این پژوهش از سیمان تپ II هگمتان با وزن مخصوص ۲/۹ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده گردید. مشخصات سیمان مصرفی در جدول ۱ آورده شده است. شن مصرفی در این مطالعه از نوع مصالح رودخانه ای می باشد که از بستر رودخانه سفید رود تهیه گردید. شن از نوع شکسته و دارای حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلیمتر می باشد. وزن مخصوص آن ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و دارای جذب آب ۱،۰۱ درصد می باشد. منحنی دانه بندی شن مصرفی مطابق استاندارد ASTM C778 [۱۳] می باشد. برای ریزدانه این کامپوزیت از ماسه سیلیسی معادن همدان و رد شده از الک ۳۰ (کوچکتر از ۶۰۰ میکرون) استفاده شده است. پرلیت کاسپین قزوین در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت با وزن مخصوص ۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۴۰ درصد و همچنین از پشم سنگ با وزن مخصوص ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۶۰ درصد در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت

جدول ۱: ترکیب شیمیایی سیمان^۱

درصد تشکیل دهنده	ترکیبات
۶۴,۳۸	CaO
۲۱,۰۸	SiO ₂
۵,۳۶	Al ₂ O ₃
۳,۶۴	Fe ₂ O ₃
۲	MgO
۰,۸۲	K ₂ O
۰,۵	Na ₂ O
۲,۱	SO ₃
-	C
۰,۲۸	IR ^۲
۰,۹	L.O.I

فوق روان کننده ی پلی کربوکسیلات مورد استفاده با نام تجاری FARCO PLAST P10-3R محصول شرکت شیمی ساختمان و بر پایه ی پلی کربوکسیلات

های اصلاح شده می باشد. با توجه به اینکه در نسبت های مخلوط درصدهای متفاوتی از پشم سنگ استفاده شده است و این موضوع روانی را تحت تاثیر قرار

می دهد نسبت های متفاوتی از فوق روان کننده در نسبت های مخلوط برای حفظ روانی در حد قابل قبول استفاده شده است.

۲,۲ نسبت مخلوط

جدول ۲: نسبت های مخلوط

معرف مخلوط	عیار سیمان	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	نسبت آب به مواد سیمانی	دوده سیلیسی (kg/m ³)	نسبت پرلیت به شن (%)	فوق روان کننده (%)	پشم سنگ حجمی (%)
R0	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۵	۰
R1	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۵۵	۰,۵
R2	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۶	۱
R3	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۶۵	۱,۵
R4	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۷	۲

۱. <https://www.britannica.com/technology/cement-building-material>

۲. Insoluble Residue

۳. Loss On Ignition

R5	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۷۵	۲,۵
R6	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۸	۳
R7	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۸۵	۳,۵
R8	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۹	۴
R9	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۰,۹۵	۴,۵
R10	۴۶۰	۲۹۱	۸۰۰	۰,۳	۴۰	۷۰	۱	۵

۳,۲ قالب گیری و عمل آوری

بتن تولید شده در قالب های تمیز و روغن کاری شده در چند لایه ریخته شده و هر لایه به کمک چکش تراکم، به صورت دستی متراکم گردید. برای انجام آزمایش فشاری و جذب آب از نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی متری استفاده گردید. نمونه ها پس از متراکم شدن به مدت ۲۴ ساعت با پوشش پارچه کرباسی نمودار درون قالب نگهداری شده و سپس با دقت زیاد و بدون ضربه به قالب و صدمه خوردن، از قالب ها خارج شد و نمونه های کنترل مورد نیاز تا قبل از آزمایش به حوضچه آب با دمای $20 \pm 2^\circ \text{C}$ منتقل گردید. همچنین، نمونه های مورد نیاز جهت آزمایش در حالت خشک، بیرون از آب و در محیط آزمایشگاه نگهداری گردید. بتن های سبک ساخته شده با توجه به وزن مخصوص حدود ۱۷۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب در محدوده استاندارد تعیین شده برای بتن های سبک سازه ای قرار داشتند. علاوه بر این همانطور که در نتایج دیده خواهد شد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها در محدوده ۲۷ تا ۳۱ مگاپاسکال بوده است که در محدوده نتایج گزارش شده برای بتن های سبک سازه ای قرار دارد.

۴,۲ آزمایش ها

۱,۴,۲ مقاومت فشاری

این آزمایش در سنین ۳ و ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز بر روی مکعب های $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر و بر اساس استاندارد BS1881-116 [۱۴] انجام گرفت. برای هر نسبت مخلوط سه آزمونه مورد آزمایش قرار گرفته و مقاومت فشاری از میانگین گیری این سه مقاومت به دست آمده است. این آزمایش در آزمایشگاه تحکیم بنیان سازه رشت انجام شد.

۲,۴,۲ مقاومت خمشی

این آزمون بر اساس استاندارد ASTM C348 [۱۵] صورت گرفت. تکیه گاه در فاصله یک سانتیمتر از لبه ها قرار گرفته (دهانه ۱۴ سانتیمتر) و فک بالا با کمک میله ای استوانه ای بار را بر خط وسط نمونه منشوری (به ابعاد ۷×۷×۲۸ سانتیمتر) وارد نمود. این آزمایش در آزمایشگاه تحکیم بنیان سازه رشت انجام شد.

۳,۴,۲ مقاومت کشش غیر مستقیم

این آزمایش به منظور تعیین مقاومت کششی تک محوری غیر مستقیم تحت عنوان تست برزلی بر اساس استاندارد ASTM C496 [۱۶] انجام میگیرد. این آزمایش در آزمایشگاه تحکیم بنیان سازه رشت انجام شد.

۴,۴,۲ کوره حرارتی

این آزمایش به منظور مقایسه مقاومت فشاری بتن تحت حرارت و بتن در شرایط معمولی انجام میگیرد. در این آزمایش ابتدا نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در اون (گرم خانه) قرار میگیرد که آب سطحی و ظاهری آن خشک شده سپس در داخل کوره به مدت حدود ۶ ساعت تحت حرارت قرار گرفتند تا کوره به دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد برسد. پس از رسیدن به دمای ۶۰۰ درجه ، ۱ ساعت در دمای مذکور حرارت دیدند. آزمایش مقاومت فشاری روی تعدادی از نمونه ها پس از خارج شدن از کوره و خنک شدن صورت گرفت. هم چنین، آزمایش مقاومت فشاری روی تعدادی از نمونه های انتخابی پس از نگهداری در مخزن آب به مدت یک ماه صورت گرفت تا مشخص شود که نمونه ها تا چه مقدار قابلیت بهبود مقاومت خود را دارند. این آزمایش در موسسه آموزش عالی دیلمان لاهیجان انجام شد.

۵,۴,۲ مافوق صوت

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C597 [۱۷] انجام می شود. از جمله آزمایش های غیرمخرب بتن ، تست التراسونیک بتن می باشد. آزمایش مافوق صوت با ارائه کیفیت ، مقاومت نسبی و طول و ابعاد ترک های موجود در بتن ، به طراحان و کارشناسان امکان تصمیم گیری در زمینه طرح های مقاوم سازی و تقویت و یا صحت سنجی عملیات ها را فراهم می سازد. این آزمایش در دانشگاه آزاد واحد فومن و شفت انجام شد.

۳. نتایج و تفسیر

۱,۳ مقاومت فشاری

آزمون های مقاومت فشاری در چهار سن ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه های ساخته شده صورت گرفت و نتایج آنها در زیر به تفکیک ارائه می

گردد. در شکل ۱ میتوان مشاهده نمود که بیشترین مقاومت فشاری در طرح R5 و در سن ۳ روز به دست آمده است. روند افزایشی مقاومت تا طرح R5 وجود دارد و پس از آن کاهش مقاومت دیده می شود به گونه ای که از طرح R7، مقاومت ها از طرح شاهد نیز کمتر می شوند. روند مشابهی برای مقاومت فشاری نمونه های ۷ روزه در مقایسه با سن ۳ روزه در شکل ۲ دیده می شود. با این تفاوت مشهود که طرح R7 نیز از سن ۷ روز به بعد مقاومتی تقریباً هم اندازه طرح شاهد دارد و بدین ترتیب، کاربرد پشم سنگ تا ۳،۵٪ حجمی، توجیه پذیر می شود. در سن ۲۸ روز نیز طرح R7 همچنان مقاومت بالاتری نسبت به طرح R0 دارد. ضمن اینکه مقاومت حداکثر ۳۱،۵ مگاپاسکال از طرح R5 حاصل گردید. روند مقاومت در سن ۹۰ روز نیز دچار تغییر چندانی نشده است

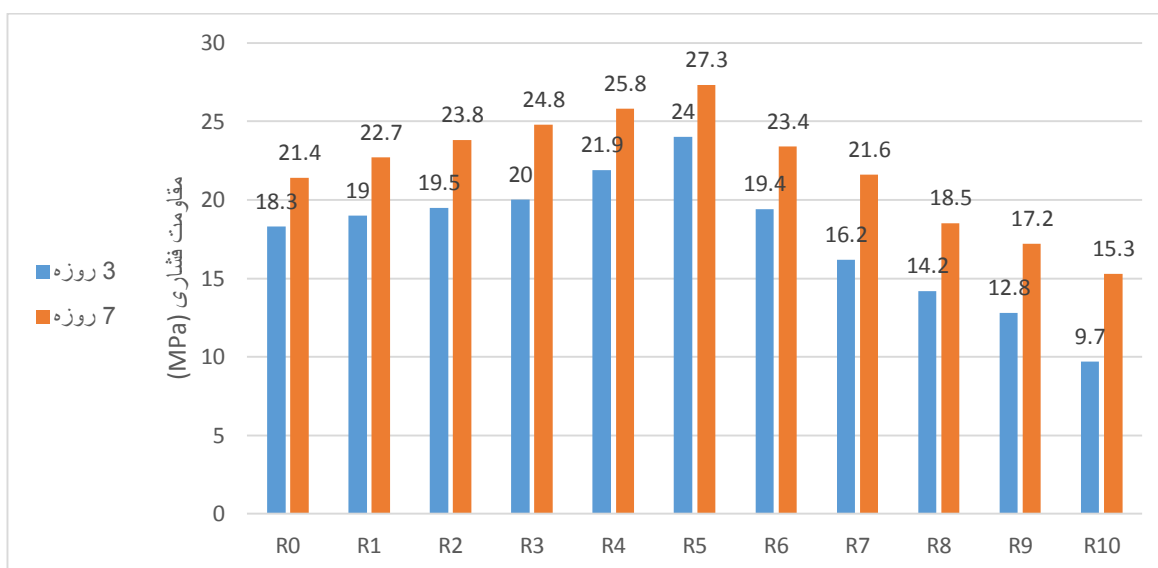
و مانند سنین قبلی تا R5 افزایش مقاومت مشاهده می شود. در تحقیقی که توسط لین و همکارانش [۸] انجام شد مشخص شد که افزودن درصد های بالای

پشم سنگ (بالای ۱۰٪) در تمام سنین منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه ها می شود، ولی همانطور که مشخص می شود درصد های پایین پشم سنگ به

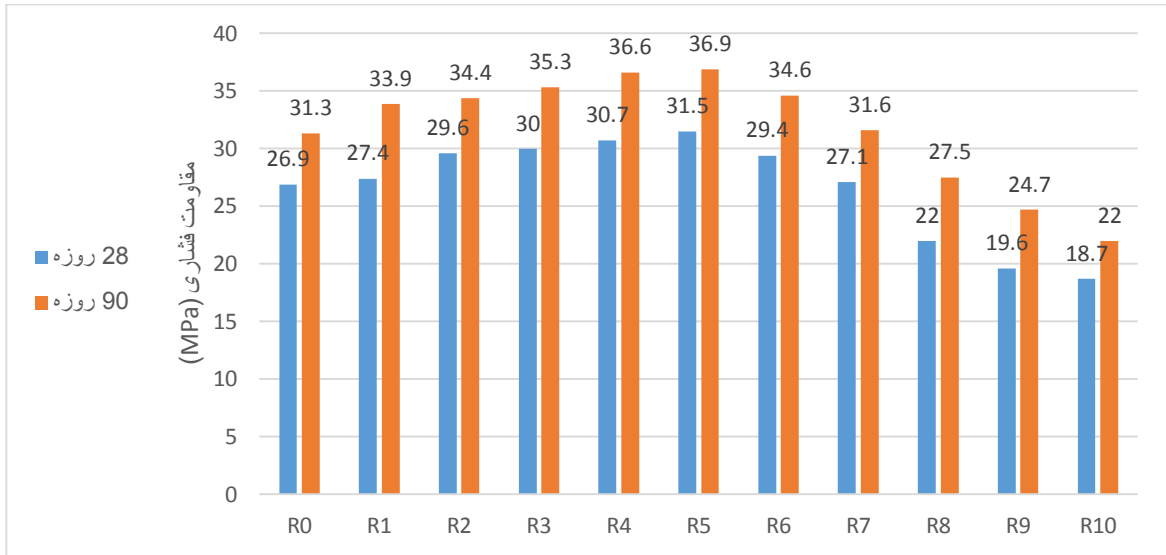
افزایش مقاومت فشاری کمک بسزایی می کند. همچنین در تحقیق چنگ و همکارانش [۷] نشان داده شد که با افزودن پشم سنگ تا ۱۰٪ مقاومت فشاری

بهبود پیدا می کند ولی همانطور که پیداست در این تحقیق افزودن پشم سنگ بیش از ۲،۵٪ منجر به کاهش مقاومت فشاری شده است. البته لازم به توضیح

است که نسبت آب به سیمان در نمونه های ساخته شده در آزمایش چنگ بسیار بالاتر بود (۰،۵۵ و ۰،۶۵).

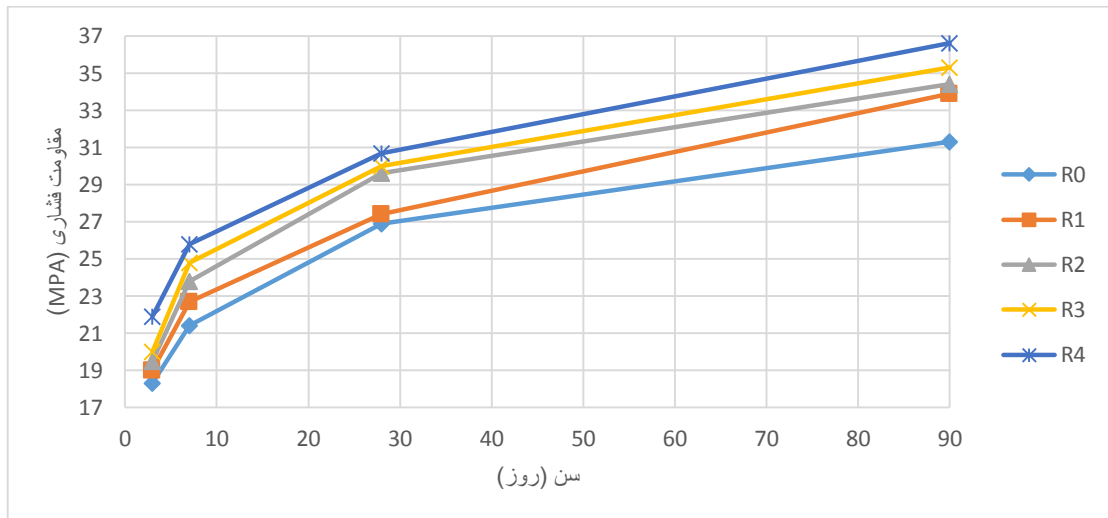


شکل ۱: مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه

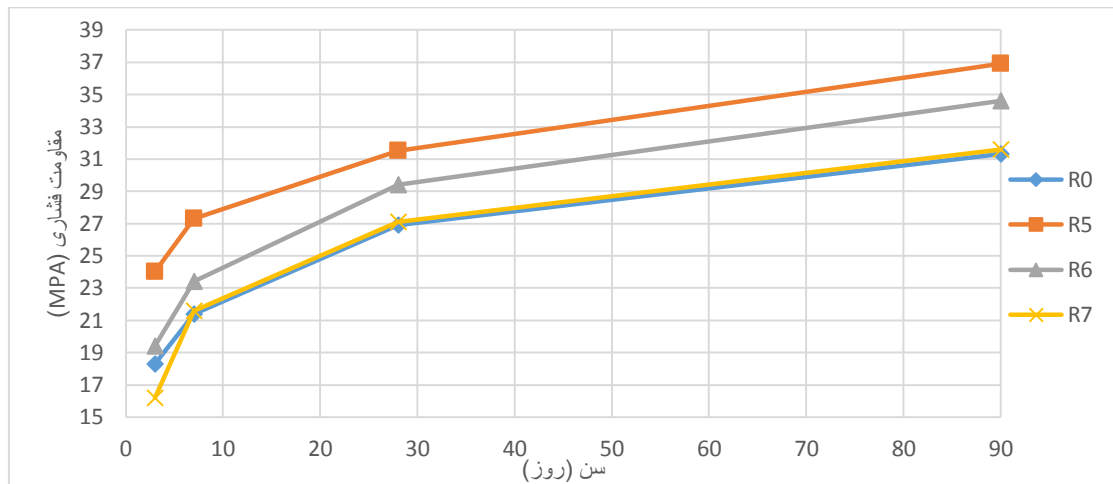


شکل ۲: مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه

با مقایسه تغییرات مقاومتی نسبت به سن نمونه ها در ۵ طرح اول (شکل ۵) روند یکنواخت افزایش مقاومت به خوبی دیده می شود که حکایت از تأثیر مثبت پشم سنگ بر مقاومت فشاری در تمام سنین برای درصدهای به کار رفته (تا ۲.۵٪ حجمی) دارد.

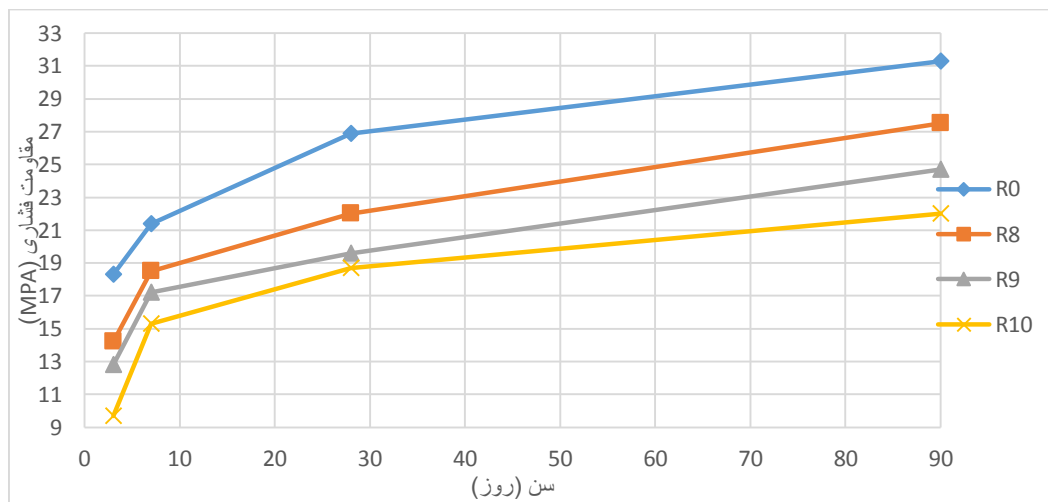


شکل ۳: روند تغییرات مقاومت فشاری حاوی درصدهای پایین پشم سنگ



شکل ۴: روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۲,۵ و ۳ و ۳,۵ درصد پشم سنگ در مقایسه با طرح کنترل

طرح های R8 تا R10 همگی مقاومتی پایین تر نسبت به طرح شاهد دارند و از نظر مشخصات مکانیکی رقیب طرح شاهد محسوب نمی شوند اما می توان از زوایای دیگری همچون دوام و مقاومت در برابر حرارت آنها را مورد بررسی قرار داد.

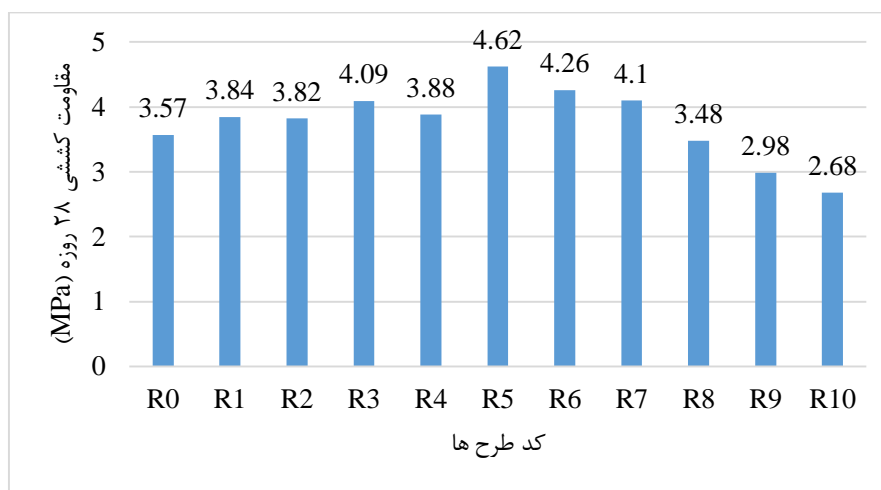


شکل ۵: تغییرات مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۴ و ۴,۵ و ۵ درصد پشم سنگ در مقایسه با طرح شاهد

۲,۳ مقاومت کشش غیر مستقیم

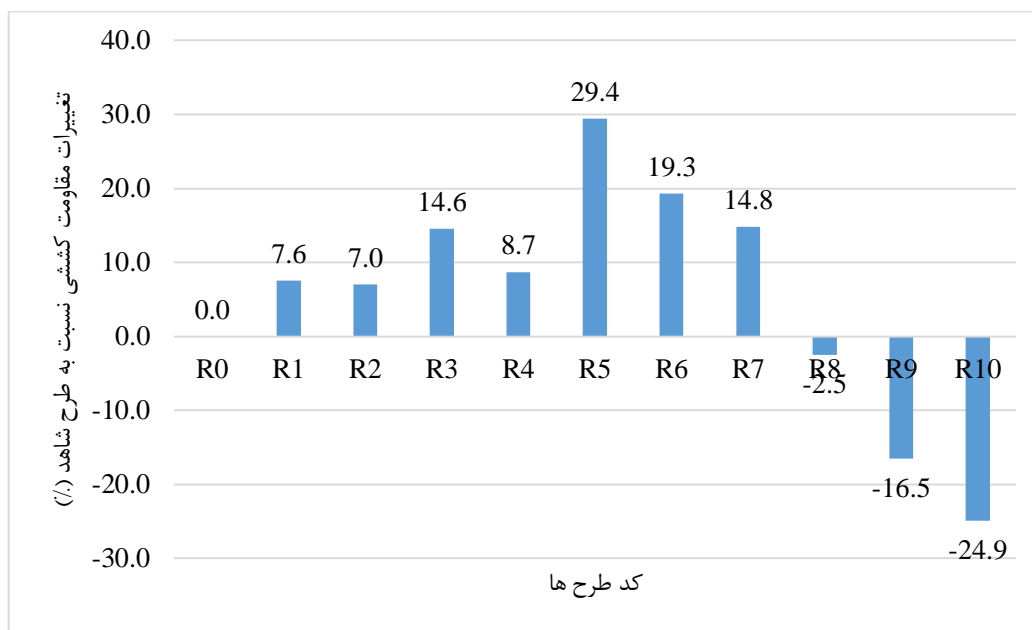
این آزمون که بر روی نمونه های استوانه ای ۲۸ روزه با قطر ۱۵ cm و ارتفاع ۳۰ cm صورت گرفت، بیانگر رفتار کششی نمونه است که به صورت غیرمستقیم و در اثر دو نیم شدن تحت فشار به دست می آید. نتایج آزمون ها جهت بررسی تأثیر پشم سنگ با یکدیگر مقایسه شده اند. بیشترین مقاومت کششی

در طرح R5 به دست آمده است اما پیش از آن بی نظمی هایی هرچند کوچک در طرح های R2 و R4 دیده می شود که دلیل احتمالی آن را می توان نسبت سبکدانه به پشم سنگ و برهم خوردن توزیع مناسب تحت بار کششی نسبت داد.



شکل ۶: مقاومت کشش غیر مستقیم ۲۸ روزه

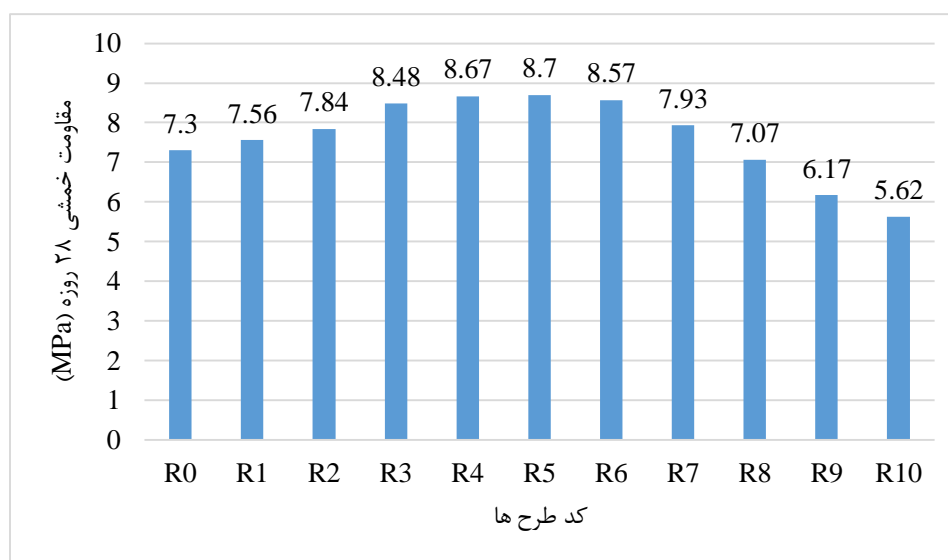
بر اساس شکل ۷ بیشترین افزایش مربوط به طرح R5 به میزان ۲۹,۴٪ و بیشترین کاهش مربوط به طرح R10 با ۲۴,۹٪ افت نسبت به طرح شاهد محسوب می شود. همچنین طرح R8 نیز اختلاف بسیار اندکی (۲,۵٪ کاهش) را با طرح شاهد نشان می دهد. همانند نتایج مقاومت فشاری طرح حاوی ۲,۵٪ پشم سنگ بیشترین افزایش را نسبت به طرح شاهد نشان داده است. در تحقیق چنگ و همکارانش [۷] نیز مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه های بتن حاوی پشم سنگ اندازه گیری شد که نتایج آنها نیز نشان داد به افزودن پشم سنگ تا درصد بهینه می توان افزایش مقاومت کشش غیرمستقیم را شاهد بود.



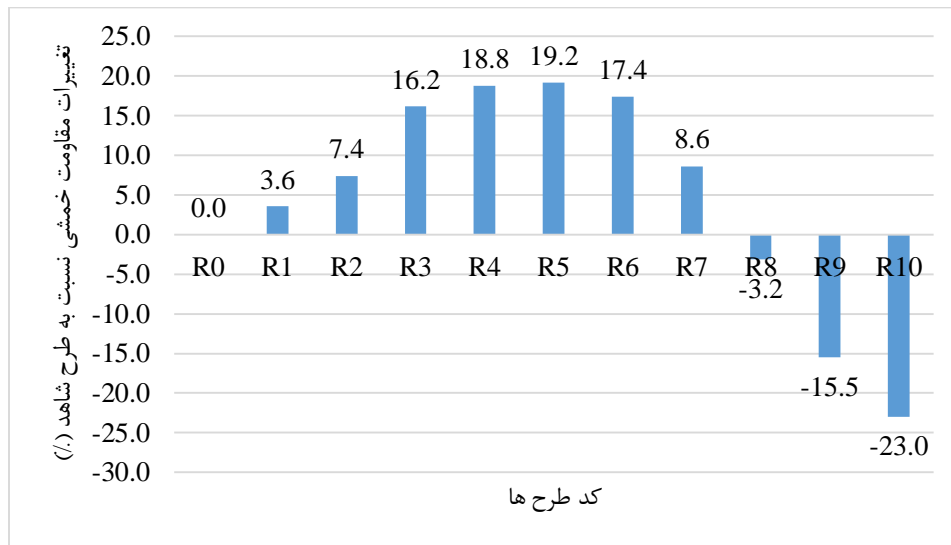
شکل ۷: تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم نسبت به طرح شاهد

۳,۳ مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه های منشوری ۲۸ روزه به طول ۲۸ cm و ابعاد جانبی ۷ cm انجام شد که نتایج در نمودارهای زیر با هم مقایسه شده اند. حداکثر مقاومت خمشی در طرح R5 به میزان ۸,۷ مگاپاسکال به دست آمده است که آن را به طرحی بهینه از نظر مشخصات مکانیکی بدل می کند.



شکل ۸: مقاومت خمشی ۲۸ روزه



شکل ۹: تغییرات مقاومت خمشی نسبت به طرح شاهد

در نتایج مقاومت های مکانیکی دیده می شود که طرح ۵ بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. با مقایسه مقاومت های فشاری و خمشی ۲۸ روزه دیده می شود که طرح ۵ با ۲,۵٪ پشم سنگ به ترتیب ۱۹,۲ و ۱۷,۱٪ افزایش را نسبت به طرح شاهد نشان داده اند. این نشان می دهد که افزایش درصد پشم سنگ تا ۲,۵٪ نه تنها تلخل را بالا نبرده است بلکه به بهبود مقاومت های مکانیکی نیز کمک شایانی کرده است. علاوه بر این مشاهده می شود که با افزایش درصد پشم سنگ به ۴٪ و بیشتر مقاومت خمشی و فشاری دچار کاهش نسبت به طرح شاهد شده اند و نسبت این کاهش با افزایش درصد پشم سنگ افزایش یافته است.

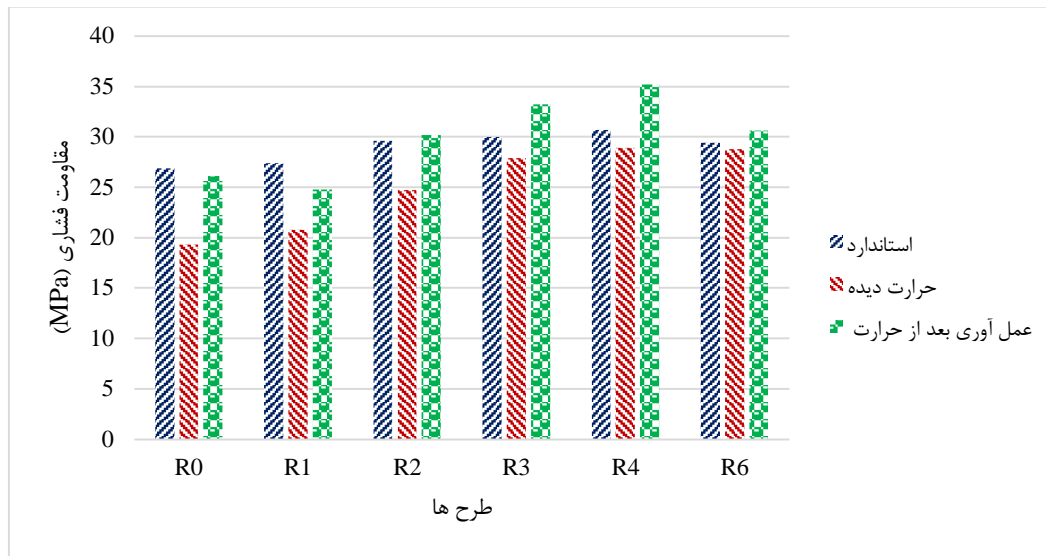
با مقایسه نتایج مقاومت فشاری و کشش غیر مستقیم نیز نتایج مشابهی دیده می شود. تا درصد ۲,۵٪ پشم سنگ مقاومت کشش غیر مستقیم نیز افزایش قابل توجهی یافته است مشابه به نتایج مقاومت فشاری، با افزایش درصد به ۵ و بالاتر مقاومت کشش غیر مستقیم همچون مقاومت فشاری و خمشی دچار کاهش چشمگیری نسبت به طرح شاهد شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در مقاومت های مکانیکی می توان نسبت مخلوط R5 را به عنوان طرح بهینه انتخاب کرد وقتی که مقاومت های مکانیکی مد نظر باشند.

۴,۳ کوره حرارتی

نمونه های طرح های انتخابی پس از قرار گرفتن در کوره تحت تأثیر حرارت قرار گرفتند و نتایج مقاومت فشاری به دست آمده از آنها در نمودار زیر با نتایج نمونه های سالم مقایسه گردید. نتایج نشان می دهند که پشم سنگ تا ۲۶٪ به کاهش آسیب ناشی از حرارت دیدن نمونه کمک کرده است به گونه ای که در طرح R6 تنها ۲٪ کاهش مقاومت نسبت به طرح شاهد دیده می شود. اما پس از قراردادن نمونه ها در آب و یک ماه عمل آوری مرطوب، طرح های حاوی پشم سنگ قابلیت بازبایی مقاومت از خود نشان دادند و در طرح R4 تا ۱۴,۷٪ بهبود مقاومت نسبت به طرح شاهد، ملاحظه گردید. همانطور که دیده می شود طرح شاهد حرارت دیده حدود ۲۸,۳٪ کاهش مقاومت فشاری از خود نشان داده است که با توجه به نبود پشم سنگ طبیعی محسوب می شود. روند

شکل ۱۱ کاملاً گویای تاثیر پشم سنگ بر حفظ مقاومت نمونه ها بعد از حرارت دادن است و می توان گفت که یکی از شاخصه های مهم پشم سنگ برای

استفاده در بتن همین کاهش آسیب ناشی از حرارت بر نمونه ها است.



شکل ۱۰: مقاومت فشاری طرح های مختلف در سن ۲۸ روز تحت سه شرایط محیطی متفاوت

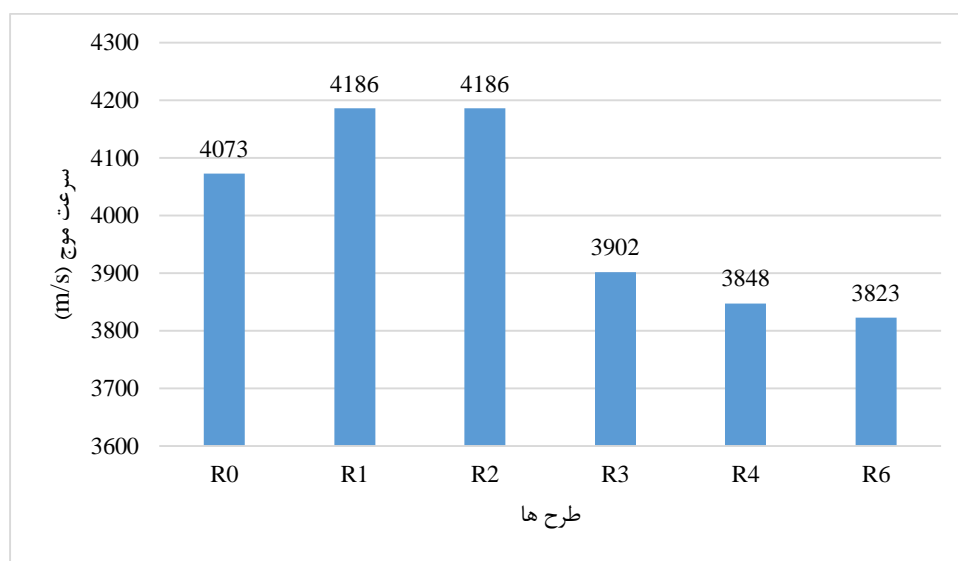


شکل ۱۱: تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها در اثر حرارت و عمل آوری پس از آن نسبت به شرایط استاندارد

۵,۳ سرعت عبور امواج مافوق صوت

آزمون مافوق صوت بر روی نمونه های انتخابی جهت بررسی تاثیر پشم سنگ بر میزان تخلخل و تراکم نمونه های ساخته شده، انجام شد که نتایج در نمودار زیر دیده می شوند. سرعت عبور قابل توجهی در طرح های R1 و R2 دیده می شود. از آنجایی که پشم سنگ بافتی بسیار متخلخل دارد، لزوماً مفهوم افزایش تراکم را نمی توان از نتایج استخراج نمود. ضمن اینکه کاهش شدید سرعت در طرح های بعدی، این تخلخل را به خوبی نشان می دهد، حال آنکه

مقاومت فشاری تا طرح R5 روندی افزایشی داشته است. بنابراین کاهش سرعت موج به مفهوم افت مشخصات مکانیکی نمونه ها نیست و می تواند دلیلی بر بهبود مشخصات عایق حرارتی و صوتی بتن های ساخته شده باشد. در نتایج آزمایش مقاومت فشاری دیده شد که با افزایش درصد پشم سنگ مقاومت افزایش پیدا کرد. طرح های R1, R2, R3, R4, R6 به ترتیب افزایش ۳,۷، ۱۰، ۱۱,۵، ۱۴,۱ و ۹,۲ درصدی را نسبت به طرح شاهد در مقاومت فشاری نشان دادند. اما همانطور که مشاهده می شود در آزمایش مافوق صوت با افزایش درصد پشم سنگ به بالاتر از ۱,۵ درصد سرعت موج کاهش قابل توجهی پدیدار شده است. در واقع این می تواند نشان از این باشد که با وجود افزودن درصد قابل توجهی پشم سنگ مقاومت فشاری دچار افت نشده ولی سرعت موج کاهش نشان داده است که این را می توان به خاصیت عایق بودن پشم سنگ نسبت داد. در واقع می توان گفت اگر فقط مقاومت های مکانیکی مدنظر باشد حدود ۲,۵٪ پشم سنگ می تواند بهترین نتیجه را به دست دهد و لی همانطور که مشاهده می شود از نقطه نظر سرعت امواج مافوق صوت نمونه حاوی ۳٪ پشم سنگ نیز بیشترین کاهش سرعت را نشان داده است. در نتیجه اگر اهداف عایق بودن پشم سنگ مدنظر باشد حتی درصدهای بالاتر را می توان به بتن اضافه کرد.



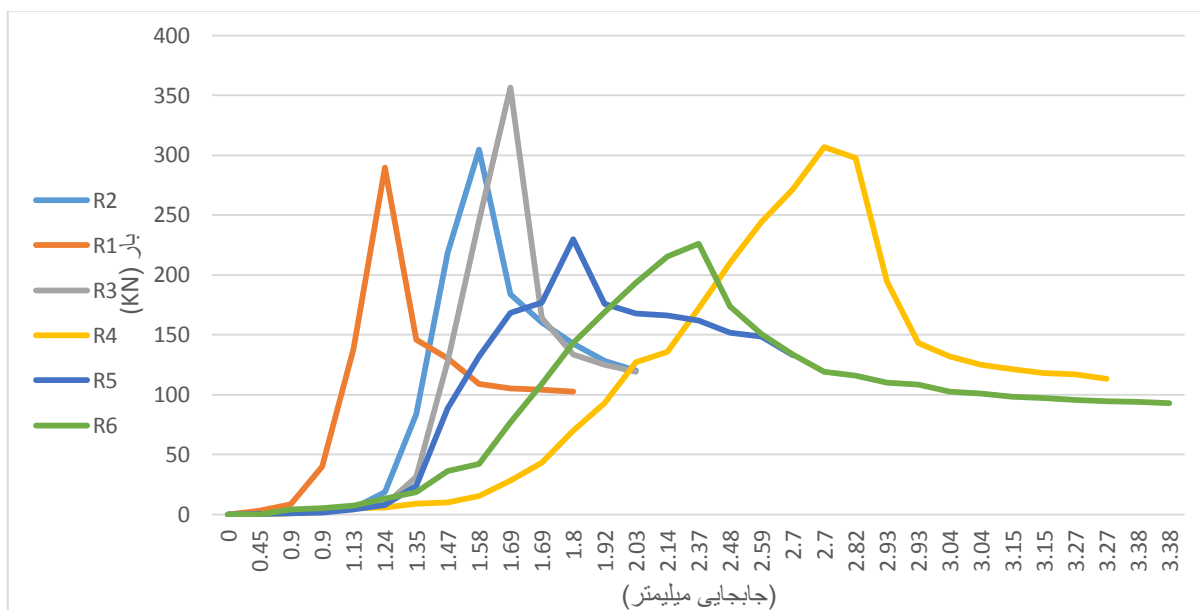
شکل ۱۲: سرعت عبور موج فراصوتی از نمونه های ۲۸ روزه طرح های انتخابی

۶,۳ نمودار بار-جابجایی

به منظور بررسی دقیق تر رفتار مکانیکی نمونه طرح های انتخابی، منحنی بار-جابجایی آنها ترسیم گردید. بی نظمی های قابل توجهی در نمودارها دیده می شود و روال مشهودی را بین آنها نمی توان یافت اما ناحیه نسبتاً خطی بارگذاری که الاستیک به نظر می رسد (با حذف نویزهای حاصل از لغزش سنسور جابجایی) پس از طی کورس حدود ۱,۵ میلیمتر توسط جک و آغاز اعمال بار به نمونه (مرحله جابجایی فک دستگاه روی نمونه) پدیدار گشته و تا نقطه شکست مسیر تقریباً همواری را طی می کنند. اما نکته دیگری در منطقه گسیختگی (رسیدن به حد مقاومت فشاری) وجود دارد و آن عدم سقوط قابل توجه نیرو در اثر گسیختگی است. شاید خطای بارگذاری و اندازه گیری سنسورها چنین تصور اشتباهی را ایجاد کرده باشد. همچنین فاصله بین نقاط اندازه گیری

جابجایی متغیر است که دو دلیل را می توان برای آن پیش بینی نمود: ۱. سرعت غیریکنواخت بارگذاری و ۲. عدم ثبات در اندازه گیری و ثبت داده توسط

سنسور



شکل ۱۳: نمودار بار-جابجایی

۴. نتیجه گیری

با مطالعه بر روی رفتار بتن های ساخته شده با سبکدانه پرلیت و پشم سنگ نتایج حاصل گشت که به صورت خلاصه در زیر آورده می شود:

۱. مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده تا ۲,۵٪ حجمی محتوای پشم سنگ، افزایش از خود نشان داده و با افزایش سن نمونه نیز این روند ادامه می یابد.

۲. ۴ تا ۴٪ حجمی مصرف پشم سنگ با اختلافی ناچیز، کاربرد سازه ای را برای این بتن امکان پذیر می سازد.

۳. طرح R7 نتایج مقاومت فشاری بسیار نزدیکی را به طرح شاهد می دهد.

۴. بیشترین مقاومت کششی در طرح R5 حاصل گردید که همخوانی مناسبی با نتایج مقاومت فشاری داشت.

۵. حداکثر مقاومت خمشی در طرح R5 به میزان ۸,۷ مگاپاسکال به دست آمد.

۶. طرح R5 در نتایج مدول الاستیسیته بر خلاف سایر نتایج مکانیکی، ۱۹,۲٪ افت از خود نشان می دهد.

۷. نتایج نشان می دهند که پشم سنگ تا ۲۶٪ به کاهش آسیب ناشی از حرارت دیدن نمونه کمک کرده است به گونه ای که در طرح R6 تنها ۲٪ کاهش مقاومت نسبت به طرح شاهد دیده می شود. اما پس از قراردادن نمونه ها در آب و یک ماه عمل آوری مرطوب، طرح های حاوی پشم سنگ قابلیت بازیابی مقاومت از خود نشان دادند و در طرح R4 تا ۱۴,۷٪ بهبود مقاومت نسبت به طرح شاهد، ملاحظه گردید.

۸. بیشتر سرعت عبور موج مافوق صوت در طرح های R1 و R2 مشاهده گردید.

مراجع

- [۱] نویل. آ. ام، ۱۳۶۹ " بتن شناسی"، ترجمه هرمز فامیلی، جهاد دانشگاهی علم صنعت ایران.
- [۲] زندی. ی، ۱۳۸۸، " تکنولوژی پیشرفته بتن " انتشارات فروزش ویراست دوم
- [۳] رمضانیان پور.ع.ا.، شاه نظری م.ر.، ۱۳۸۸، " تکنولوژی بتن"، نشر علم و صنعت
- [۴] نویل آ.ام، ۱۳۷۵، " بتن شناسی (خواص بتن)"، ترجمه هرمز فامیلی، نشر جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت ایران
- [5] ASTM C330/C330M- Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete
- [6] Muller A, Leydolph B, Stanelle K (2009) Recycling mineral wool waste—Technologies for the conversion of the fiber structure Part 1. Interceram 58:378–381
- [7] Cheng An, Lin Wei-Ting, Ran Huang, 2010, " Application of rock wool waste in cement-based composites "Materials and Design, volume 7, PP 636 – 642
- [8] Lin WT, Cheng A, Huang R, Yuan-Chieh Wu, Han TY. Rock wool wastes as a supplementary cementitious material replacement in cement-based composites. Comput Concrete, 2013; 11:93–104.
- [9] Väntsi.O, Kärki.T, Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods, Journal of Material Cycle Management, 16, (2014), 62-72
- [10] Lin.Wei-Ting, Cheng An, Huangc Ran, Zou Si-Yu, 2013, Improved microstructure of cement-based composites through the addition of rock wool particles, Materials Characterization, 84 (2013) 1–9
- [11] Lin W.T., using Rockwool Waste as a Partial Replacement of Cement in Cement-Based Composites, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 8(1), 2012, 489-494
- [12] Kinnunen . P, Yliniemi . J, Talling . B, Illikainen . M, Rockwool waste in fly ash geopolymer composites, Journal of Material Cycle Waste Management, (2016)
- [13] ASTM C778- Standard Specification for Standard Sand, ASTM International, Pennsylvania, USA
- [14] BS-1881-Part-116-83 - Method for determination of compressive strength of concrete cubes
- [15] ASTM C348- Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM International, Pennsylvania, USA
- [16] ASTM C496/C496M- Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, Pennsylvania, USA
- [17] ASTM C597- Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, Pennsylvania, USA