

# اثر کاربرد سنگدانه‌های باطله معدنی بر عملکرد مقاومتی روسازی بتن غلتکی

محمدفتاحی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران  
محمد مهدی خبیری\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران  
علیرضا یار احمدی بافقی، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۹۶/۱۰/۰۵ - پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۰

صفحه ۱۳۴-۱۱۹

## چکیده

استفاده از روسازی بتن غلتکی در کشور رو به رشد است. با توجه به هزینه ساخت کم و عمر بالای این روسازی لزوم داشتن رویه با دوام و مقاوم در برابر عوامل بارگذاری الزامی است. ویژگی‌های مقاومتی و جنس مصالح سنگی از جمله تاثیرگذارترین عوامل در مقاومت روسازی‌های بتنی می‌باشد. با توجه به این که بیش از ۸۵ درصد روسازی بتن غلتکی را مصالح سنگی تشکیل می‌دهد. مهمترین عامل در مقاومت باربری می‌باشد. لذا در این تحقیق، تاثیر جنس مصالح سنگی در مساله مقاومت رویه این روسازی بررسی می‌گردد. در این پژوهش به منظور بررسی جنس مصالح از یک مصالح سنگی شاهد و چهار نوع سنگ مختلف که از باطله معادن چغارت و سایر معادن تهیه شد، استفاده گردید. جنس سنگدانه‌های استفاده شده در این تحقیق شامل سنگ آهک، دولومیت، کلسیت، آمفیبولیت و کوارتزآلبیتوفی است. در ابتدا برای مشخص کردن کیفیت سنگدانه آزمایش‌های مکانیکی سنگ از جمله آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی مصالح سنگی انجام گردید و سپس نمونه‌های بتن غلتکی برای تعیین درصد رطوبت بهینه با روش تراکم از با دانه‌بندی پیوسته با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی متر ساخته شد. سپس نمونه‌های بتنی با رطوبت بهینه در قالب استوانه‌ای توسط روش تراکم ساخته شد. بر روی نمونه‌های بتنی سخت شده آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی انجام گرفت. در این پژوهش استفاده از سنگدانه کوارتزی موجب بهبود مقاومت فشاری بتن به مقدار بیست درصد گردید. از طرفی نتایج نشان داد که مقاومت کششی بتن به جنس مصالح سنگدانه‌ای بستگی ندارد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت باربری، مصالح سنگدانه‌ای، باطله معدنی، بتن غلتکی، روسازی

## ۱- مقدمه

شکستگی می‌باشند، کاربرد دال بتنی به عنوان یک لایه مقاوم و بادوام باعث رفع مشکلات مزبور و کاهش دوره تعمیرات نیز خواهد شد. همچنین با کاربرد روسازی بتنی، به مرور زمان، فن آوری و تجربه کافی در این زمینه را فراهم و بستر رقابت جدی برای روسازی‌های آسفالتی با توجه به افزایش

یکی از زمینه‌های کاربرد پر مصرف سیمان، کاربرد سیمان در جاده سازی و به عبارت دیگر احداث روسازی بتنی است، که در کشور ما از آن استفاده نشده است. با توجه به مشکلات روسازی‌های آسفالتی در محورهای سنگین، که اغلب دارای ناهمواری، موج‌های بلند و متوالی و گاهی

به‌طور کلی مقاومت فشاری و خمشی بتن غلتکی می‌تواند در حد مقاومت بتن معمولی باشد. بدیهی است برای یک مخلوط بتن غلتکی با افزایش مقدار مواد سیمانی که منجر به کاهش نسبت آب به مواد سیمانی می‌گردد مقاومت مخلوط افزایش می‌یابد. نکته دیگری که شایان توجه است، مسئله افزایش مقاومت بتن غلتکی در طی زمان است که مشابه با بتن‌های معمولی به علت توسعه فرایند هیدراتاسیون سیمان صورت می‌گیرد [شعبانی و سلیمانی، ۱۳۹۴]. در آمریکا مقدار حداقل مقاومت فشاری برای روسازی بتن غلتکی عمدتاً در مشخصات فنی بیش از ۲۷/۶ مگاپاسکال قید می‌گردد [نشریه ۱۳۹۶، ۷۳۱]. در کشورهایی نظیر سوئد که الزامات بارگذاری و یا شرایط جوی شدیدتری حاکم است، مقاومت بالاتری مد نظر قرار گرفته می‌شود. در این کشور بتن غلتکی روسازی باید دارای حداقل مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال در ۲۸ روز و دوام مناسب در برابر ذوب و انجماد و سایش باشد [Jacksha and Abrams, 1987]. در پژوهشی که بر روی تاثیر مصالح رودخانه‌ای و کوهی در روسازی بتن غلتکی انجام گرفت. بتن ساخته شده با مصالح تمام رودخانه‌ای نسبت به بتن با مصالح تمام شکسته موجب بهبود سی درصدی مقاومت فشاری بتن غلتکی گردید و بتن ساخته شده از بتن حاوی ۵۰٪ مصالح رودخانه‌ای و ۵۰٪ مصالح کوهی شکسته نسبت به بتن با مصالح تمام شکسته بیش از ۴۰ درصد مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان داد. همچنین در این تحقیق با جایگزینی خاکستر بادی به جای سیمان نشان داد که خاکستر بادی موجب کاهش مقاومت فشاری و خمشی بتن غلتکی می‌گردد [ACI 325.10] [2000]. توسط رآو کریسنا و ساروانا در دو پژوهش اخیر بر روی تاثیر جایگزین سیمان با سرباره کوره ذوب گرانول انجام شد نشان داد با جایگزین ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصدی سرباره کوره ذوب گرانول با سیمان در بتن غلتکی حاوی مصالح تمام شکسته موجب بهبود مقاومت فشاری بیست و هشت روزه بتن به مقدار ۷، ۲۳ و ۱۹ درصد می‌گردد [Rao et al., 2016-a, Rao et al., 2016-b] در تحقیقی که در سال ۲۰۱۷ توسط جارینگام و همکاران با جایگزینی سرباره کوره قوس الکتریکی با درشت‌دانه در بتن

قیمت ایجاد می‌نماید که در نتیجه موجب ارتقاء کیفیت روسازی در شبکه راه‌ها و کاهش هزینه‌های تعمیرات می‌گردد. از طرفی روند توسعه کارخانه‌های تولید سیمان در کشور دلیل مناسبی برای معرفی و کاربرد این مصالح در پروژه‌های راهسازی درون و برون شهری با برنامه ریزی و هماهنگی بین دستگاه‌های مرتبط می‌باشد.

امروزه روسازی بتنی به طور گسترده در سطح راه‌ها، عرشه پل‌ها، باند پرواز فرودگاه‌ها، محوطه پارکینگ‌ها، محوطه‌های صنعتی و انواع کف‌ها به کار می‌رود. چنانچه روسازی‌های بتنی با مصالح با دوام و پایدار طراحی و ساخته شوند. می‌تواند دهه‌های زیادی را بدون هیچ تعمیری و یا تعمیر اندک سپری کنند. بتن عموماً هزینه‌های ابتدایی بالایی نسبت به آسفالت دارد اما عمر بیشتر و هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمتر دارد. یکی از انواع این نوع روسازی روسازی بتن غلتکی RCCP است. بتن غلتکی یکی از انواع بتن‌های بدون اسلامپ است که برای تراکم نیاز به اعمال نیروی خارجی دارد. این نوع بتن بتنی است که در حالت تازه امکان عبور غلتک برای تراکم فراهم کرده و خصوصیات آن مشابه بتن معمولی می‌باشد. به علت عدم روانی این بتن نسبت به بتن معمولی مقدار خمیر کمتر و حجم سنگدانه بیشتر آن می‌باشد. این نوع بتن در حالت متراکم نشده تفاوت فاحشی با بتن معمولی دارد. در چنین حالتی هیچگونه اثری از شیره بتن در مخلوط نمایان نیست و بتن شباهت زیادی به شن مرطوب که در زیر سازی جاده‌ها به کار برده می‌شود دارد، ولی پس از آنکه به وسیله غلتک متراکم شد شبیه به بتن معمولی می‌شود. مزیت این روش ساخت بتن، هزینه‌ی کمتر از انواع بتن در روسازی به علت عدم نیاز به قالب‌بندی که موجب سرعت اجرایی بسیار زیاد آن بوده و در عین حال دارای خواص مکانیکی مورد نیاز بتن معمولی است اخیراً در کشور ما توجه جدی به طراحی و اجرای روسازی‌های بتن غلتکی شده است و این روسازی در حال حاضر متداول‌ترین و پر استفاده‌ترین روسازی بتنی مورد استفاده در ایران است. خصوصیات مقاومتی بتن غلتکی شباهت زیادی با بتن معمولی دارد. این خصوصیات به مقدار آب، نسبت آب به سیمان، کیفیت سنگدانه‌ها و میزان تراکم بتن بستگی دارد.

غلتنکی انجام گرفت، نشان داد که با جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصدی سرباره کوره قوس الکتریکی با درشت دانه مقاومت فشاری بتن نسبت به سنگدانه معمول، موجب کاهش ۸ و ۹ درصدی مقاومت فشاری می‌گردد. [Jaritngam, 2017] در پژوهش دیگری مشخص گردید با جایگزینی فیلر کوارتزی با سیمان موجب کاهش مقاومت فشاری و کششی می‌گردد ولی باعث افزایش مقاومت سایشی می‌گردد [Popek, and Szymanowski, 2017] در تحقیقی که در ایران بر روی تغییرات مقاومت فشاری بتن غلتنکی با بهبود ضریب کارایی سیمان انجام گرفت، نشان داد که با اضافه کردن مواد روان‌ساز به علت کاهش نسبت آب به سیمان مقاومت

فشاری نمونه‌های بتن غلتنکی افزایش می‌یابد [RCCP-design, 1995]. همچنین در این تحقیق اضافه کردن دیرگیرکننده نیز موجب افزایش مقاومت فشاری بتن گردید. [Hashemi et. al., 2018] تحقیق حاضر بر اساس بررسی مشخصات عملکردی و مقاومت روسازی بتن غلتنکی پرداخته است. با توجه به آنکه رویه‌های بتن غلتنکی در معرض شرایط آسیب‌رسان ناشی از بار قرار دارند و حجم سنگدانه در آن‌ها از سایر انواع روسازی بتنی بیشتر است. لذا لازم است سنگدانه‌ها مورد استفاده در این بتن مشخصات مکانیکی و عملکرد مطلوبی در برابر بار داشته باشند. در این تحقیق به بررسی اثر استفاده از باطله معادن در مقاومت باربری روسازی بتن غلتنکی پرداخته شده است.



شکل ۱. سنگدانه‌های استفاده‌شده در این تحقیق

جدول ۱. محل تهیه و نوع سنگ‌ها

نوع مصالح	نام سنگ	جنس سنگ	محل تهیه سنگ	وزن مخصوص خشک ( $\text{gr/cm}^3$ )
سنگ ۱	مهریز شماره یک	سنگ آهک	معادن سنگ مهریز	۲/۷۳
سنگ ۲	مهریز شماره دو	کلسیت	معادن سنگ مهریز	۲/۷۲
سنگ ۳	چغارت شماره یک	کوارتز آلپیتوفی	معادن چغارت بلوک تکنونیک ۱	۲/۶۵
سنگ ۴	چغارت شماره دو	آمفیبولیت	معادن چغارت بلوک تکنونیک ۴-۲	۳/۳۲
سنگ ۵	چک چک	دولومیت	معادن مزرعه بزرگ چک چک	۲/۸۹

#### ۱-۲- تعیین سختی و اجهشی اشیت سنگ

مطالعات نشان داده است که سختی سنگ‌ها با مقاومت فشاری تک محوری و مدول کشسانی سنگ‌ها در ارتباط است در واقع سختی یکی از مفاهیم رایج است که برای توصیف رفتاری سنگ‌ها به کار می‌رود. سختی تابعی از عوامل

سختی و مدول کشسانی سنگ‌ها در ارتباط است در واقع سختی یکی از مفاهیم رایج است که برای توصیف رفتاری سنگ‌ها به کار می‌رود. سختی تابعی از عوامل

توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM) به صورت استاندارد در آمده است.

این آزمایش بر روی سنگ‌های برش خورده که برای مغزه گیری آماده شده بودند توسط چکش اشमित نوع (L) بر اساس استاندارد (ASTM C805) انجام گرفت [ASTMC805,2002]. در این آزمایش پنجاه بار بر روی هر سنگ عدد چکش اشमित خوانده شد. که میانگین بیست و پنج عدد بالای به عنوان عدد چکش در نظر گرفته شد. نتایج این آزمایش در جدول ۲ پس از اعمال ضریب تصحیح زاویه انحراف و آنویل کالیبراسیون آورده شده است.

ذاتی چون نوع کانی‌ها، ابعاد دانه‌ها، چسبندگی مرزی کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ می‌باشد. ترکیب و اندرکنش این عوامل، تعیین کننده سختی یک سنگ است. روش‌های متعددی برای تعیین سختی سنگ پیشنهاد شده است که یکی از این روش‌ها بکارگیری وسیله ای به نام چکش اشमित، معروف به آزمایش واجهشی یا دینامیکی است. این روش آزمایش برای تعیین سختی سنگ با استفاده از چکش اشमित در صحرا یا آزمایشگاه به کار می‌رود. با استفاده از این سختی می‌توان خصوصیات دیگر سنگ و بتن را مانند مقاومت فشاری آن، تخمین زد. این روش که

جدول ۲. سختی واجهشی اشमित سنگ

نوع مصالح	مقدار سختی اشमित $\text{kg/cm}^2$
سنگ شماره ۱	۵۴/۳
سنگ شماره ۲	۵۲/۶
سنگ شماره ۳	۷۱/۳
سنگ شماره ۴	۶۶/۸
سنگ شماره ۵	۶۳/۱

است. لازم به توضیح است که با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره علاوه بر به دست آوردن مقاومت فشاری هر نمونه، ضریب (مدول) یانگ (E) (عبارتست از نسبت تنش محوری به کرنش محوری متناظر آن تحت بار یک‌محوره) نیز به دست می‌آید.

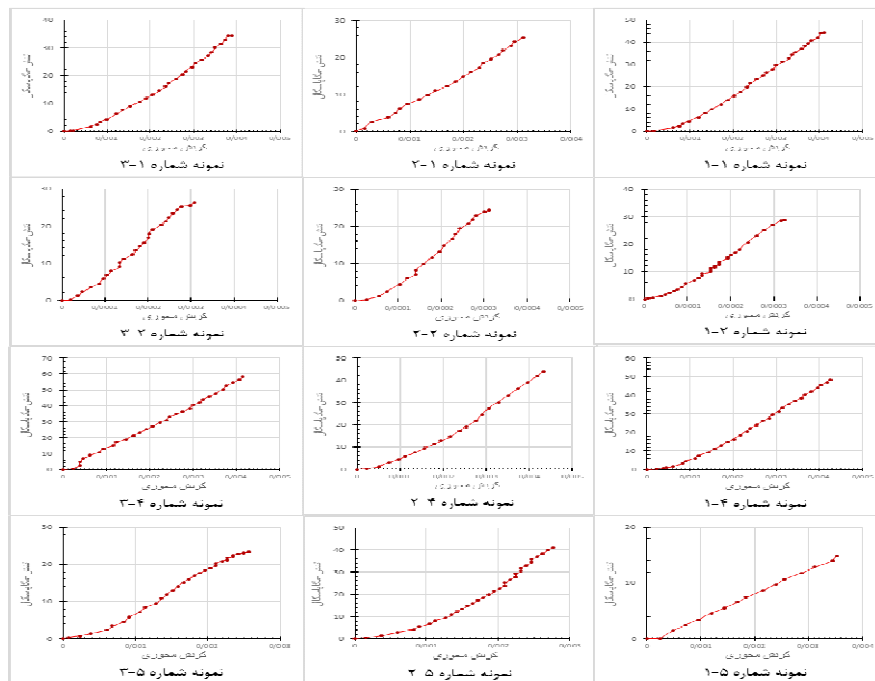
۱-۲-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ  
به‌طور خلاصه به منظور تعیین پارامترهای الاستیک سنگ‌های مورد تحقیق جمعا تعداد ۱۲ آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری برای هر سنگ سه مدل توسعه یافت. این آزمایش توسط دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری انجام شد. این آزمایش مطابق با استاندارد (ASTM D2938) انجام گرفت [ASTM D2938, 2005] به صورت خلاصه نتایج این آزمون در جدول ۳ گزارش شده و نمودارهای رفتاری این نمونه‌ها برای تعیین مدول یانگ رسم شد. که در شکل ۲ به نمایش در آمده است.

## ۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ

این آزمایش برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی نمونه‌های استوانه‌ای و رسم منحنی‌های تنش-کرنش و همچنین محاسبه‌ی مدول یانگ و ضریب پواسون به‌کار می‌رود. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری یا نامحصور، مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر است که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است، این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی انجام گرفته و به‌ندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌های مقاومت فشاری تک‌محوری مورد نیاز نباشد. اگر چه این آزمایش عمدتاً به عنوان شاخصی برای مقایسه سنگ‌ها شناخته می‌شود، لیکن کاربردهای وسیع دیگری نیز در حل مسائل عملی مکانیک سنگ پیدا کرده است. مقاومت ماده سنگی یا سنگ بکر به عنوان یک پارامتر اصلی در اکثر سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت ماده سنگ حد بالای مقاومت توده سنگ

جدول ۳. خواص مقاومتی نمونه‌های آزمون تک‌محوری

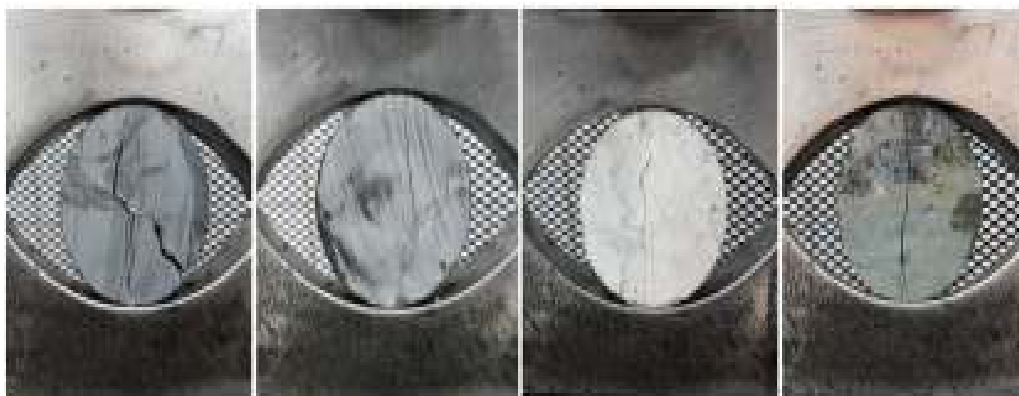
نوع مصالح	شماره نمونه	مقاومت فشاری تک‌محوری (مگاپاسکال)	مدول یانگ ۰.۵٪ (گیگاپاسکال)
سنگ شماره ۱	۱-۱	۴۴/۴۶	۹/۲۶
	۱-۲	۲۵/۳۱	۶/۶۶
	۱-۳	۳۴/۳۳	۷/۱۵
	میانگین	۳۴/۷۰	۷/۶۹
سنگ شماره ۲	۲-۱	۲۸/۸۴	۷۷/۹۶
	۲-۲	۲۴/۴۴	۶۷/۹۰
	۲-۳	۲۶/۱۷	۷۶/۹۷
	میانگین	۲۶/۴۹	۷۴/۲۷
سنگ شماره ۳	میانگین	۶۲/۱۷	۱۳/۴۸
سنگ شماره ۴	۴-۱	۴۸/۵۴	۹/۳۷
	۴-۲	۴۳/۹۵	۷/۸۵
	۴-۳	۵۸/۲۰	۱۳/۲۸
	میانگین	۵۰/۲۳	۱۰/۳۴
سنگ شماره ۵	۵-۱	۱۴/۹۰	۴/۰۳
	۵-۲	۴۱/۰۹	۱۰/۸۱
	۵-۳	۲۳/۲۹	۸/۳۲
	میانگین	۳۲/۱۹	۹/۵۶



شکل ۲. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های سنگی

مقاومت کششی سنگ غلبه کند باعث گسیختگی آن می‌شود. در راستای محاسبه مقاومت کششی غیرمستقیم، تست برزیلی بر روی تعداد ۱۳ نمونه دیسکی شکل از سنگ‌های مورد تحقیق توسعه یافت. مشخصات و نتایج این آزمایش هادر جدول ۴ گزارش شده است. الگوی شکست نمونه‌های تست برزیلی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳-۲- تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم (روش برزیلی)  
این آزمایش برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ بکر به طور غیرمستقیم به کار می‌رود. شکل ۴ دستگاه مربوط به این آزمایش را نشان می‌دهد. این آزمایش به طور غیر مستقیم برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ بکر به کار می‌رود و مبتنی بر این است که با اعمال فشار قطری به نمونه استوانه‌ای سنگ، تنش کششی در امتداد عمود بر محور بار گذاری گسترش یافته و زمانی که بر



شکل ۳. تصویر وسیله آزمایشگاهی اندازه گیری مقاومت کششی غیر مستقیم (بالا) و الگوی شکست نمونه‌های تست برزیلی (پایین)

جدول ۴. مشخصات هندسی و نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برزلی نمونه‌های سنگ

نوع مصالح	شماره نمونه	ضخامت نمونه (mm)	قطر نمونه (mm)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
سنگ شماره ۱	۱-۱	۵۲/۹۸	۲۵/۲۴	۳/۱۰
	۱-۲	۵۲/۸۸	۲۷/۳۶	۳/۰۸
	۱-۳	۵۲/۹۰	۲۷/۰۱	۲/۹۹
	میانگین			۳/۰۵
سنگ شماره ۲	۲-۱	۵۳/۱۸	۲۵/۳۴	۲/۱۷
	۲-۲	۵۲/۸۴	۲۵/۹۸	۲/۲۷
	۲-۳	۵۳/۳۶	۲۸/۱۲	۲/۸۰
	میانگین			۲/۴۲
سنگ شماره ۳	میانگین			۵/۳۷
سنگ شماره ۴	۴-۱	۵۲/۹۴	۲۲/۸۲	۳/۹۵
	۴-۲	۵۲/۹۲	۲۶/۱۱	۳/۴۱
	۴-۳	۵۲/۹۲	۲۴/۷۲	۴/۳۸
	۴-۴	۵۳/۸۸	۲۶/۰۰	۵/۱۸
	میانگین			۴/۲۳
سنگ شماره ۵	۵-۱	۵۲/۴۲	۲۵/۴۴	۶/۷۸
	۵-۲	۵۲/۳۷	۲۶/۹۰	۷/۹۱
	۵-۳	۵۲/۴۳	۲۵/۰۱	۳/۹۸
	میانگین			۶/۲۳

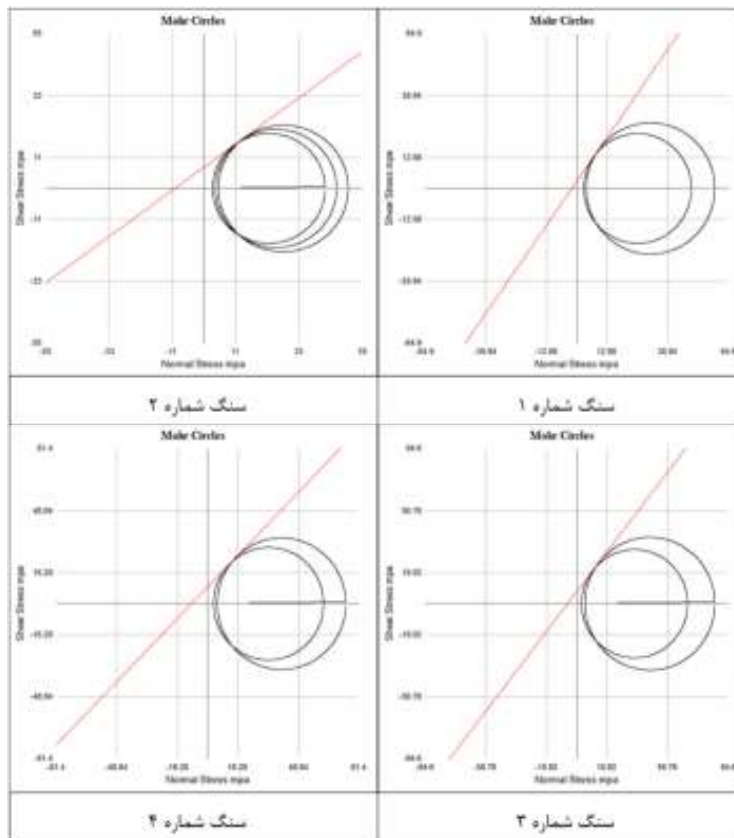
#### ۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره

با توجه به این که در اکثریت قریب به اتفاق موارد، شکست سنگ در محل، معلول برش است و بنابراین مقاومت برشی سنگ را باید معیار مهمی در مساله طراحی به حساب آورد. برای ایجاد شرایط لازم به منظور اندازه‌گیری مقاومت برشی، از دو روش موسوم به آزمایش برشی مستقیم و آزمایش سه‌محوره بهره گرفته می‌شود که در اینجا آزمایش سه‌محوره توضیح داده می‌شود. برای انجام یک تست واقعی سه‌محوره، فشارهای مختلفی بر هر یک از سه جفت سطوح یک مکعب، بلوک صفحه‌ای و یا منشور مستطیلی اعمال می‌شود. مسأله عمده چنین آزمایشی اثر اساسی عامل تأثیر انتها بر توزیع تنش در بدنه نمونه است که خود باعث خطای قابل ملاحظه‌ای می‌شود. در آزمایش سه‌محوری که اکنون مرسوم است، فشار محوری  $\sigma_1$  بزرگتر از فشار جانبی  $\sigma_2 = \sigma_3$  است. برای کاربردهای معمولی مهندسی از وسیله‌ای شبیه سلول هوک و فرانکلین می‌توان استفاده کرد برای به دست

آوردن مقاومت برشی نزدیک به مقدار واقعی حداکثر آن، می‌توان از آزمایش سه‌محوره استفاده کرد. در این آزمایش روی نمونه یک تیوب پلاستیکی کشیده و آن را در سلول مخصوص قرار می‌دهند. آنگاه فشار جانبی  $\sigma_3$  به وسیله سیالی بر آن اعمال و در خلال آزمایش ثابت نگه داشته می‌شود. سپس تنش محوری بر نمونه وارد و به تدریج افزایش داده می‌شود تا شکست در آن روی دهد. همین مراحل در فشارهای جانبی مختلف مورد نظر تکرار می‌گردد. پوش مقاومت برشی حاصل که مماس بر دایره‌های مور کشیده می‌شود یا به صورت خطی است. در حالتی که پوش مذکور مستقیم خطی است (که پوش مقاومت یا شکست کولن هم نامیده می‌شود)، به علت ثابت بودن پارامترهای مقاومت برشی یعنی چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک ( $\phi$ ) متناظر با مقادیر مختلف تنش عمودی ( $\sigma_n$ )، ارزیابی نتایج حاصله از آزمایش به سادگی مقدور است. به طور خلاصه به منظور تعیین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

نمونه ها در شکل ۴ نشان داده شده است. این آزمایش مطابق با استاندارد (ASTM D2664) انجام گرفت [ASTM D2664, 2005]

سنگ‌های مورد تحقیق مورد تحقیق جمعا تعداد ۱۰ آزمون مقاومت فشاری سه توسعه یافت. نتایج زاویه اصطکاک و چسبندگی در جدول ۵ و پوش مقاومت برشی حاصل از رفتار



شکل ۴. پوش مقاومت برشی حاصل از رفتار نمونه‌های سنگی

جدول ۵. زاویه اصطکاک و چسبندگی نمونه‌های سنگی

نوع مصالح	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (مگاپاسکال)
سنگ شماره ۱	۵۴/۹	۳/۰۰
سنگ شماره ۲	۳۶/۸۷	۷/۵۰
سنگ شماره ۳	۴۳/۹۴	۱۳/۰۸
سنگ شماره ۴	۵۲/۱۴	۷/۴۶
سنگ شماره ۵	۴۵/۵۸	۸/۹۸

### ۳- آماده سازی و آزمایشهای نمونه بتن غلتکی

دارد استفاده از چکش و بیره (ASTM C1176) یا بر اساس روش تراکم توسط کوبه (ASTM D1557) وجود دارد که در این تحقیق از روش تراکم بر اساس استفاده شد [ASTM D1557, 2012 and ASTM C1176, 1998] تعیین چگالی خشک حداکثر نمونه بتنی با درصد رطوبت‌های

تعیین درصد رطوبت بهینه برای رابطه بین چگالی خشک نمونه با مقدار رطوبت آن هستند و تعیین چگالی خشک حداکثر که نشان دهنده کمترین درصد حفره هوا و بهینه‌ترین مقدار آب انجام می‌گیرد. برای ساخت نمونه بتن غلتکی بر اساس تعیین چگالی خشک حداکثر، دو روش کلی وجود



نمونه‌های بتن غلتکی طرح اختلاط استفاده شد. نتایج این آزمایش در جدول ۶ آورده شده است [شعبانی و سلیمانی، ۱۳۹۴].

متفاوت و با برازش یک منحنی مقدار چگالی حداکثر تعیین می‌گردد. در این تحقیق مقدار آب با درصدهای مختلف از ۵ تا ۹ درصد مقدار برای هر کدام از مصالح سنگی و دانه‌بندی نشریه ۷۳۱ با حداکثر اندازه دانه ۱۹ میلیمتر برای ساخت

جدول ۶. درصد رطوبت بهینه

نوع مصالح	وزن مخصوص خشک حداکثر ( $\text{kg/m}^3$ )	درصد رطوبت بهینه
سنگ ۱	۲۴۹۸/۲۵	۷/۱۱
سنگ ۲	۲۵۳۴/۷۵	۶/۱۰
سنگ ۳	۲۴۲۳/۴۷	۷/۱۶
سنگ ۴	۲۹۳۵/۹۲	۷/۳۱
سنگ ۵	۲۶۳۸/۴۰	۶/۱۲

آب قرار گفتند. نمونه‌های بتنی ساخته شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی به منظور ارزیابی بتن‌های غلتکی ساخته شده با عیار سیمان ۲۵۰، جهت بررسی تاثیر پنج نوع مصالح سنگی با ویژگی‌های مقاومتی مختلف بر مقاومت فشاری بتن غلتکی این آزمایش انجام گرفت. این آزمایش فقط بر روی نمونه‌های با هفت روز عمل آوری و پس از ۷ روز عمل آوری انجام شد. که نتایج آن در جدول ۷ و نمودار رفتاری این نمونه‌ها برای تعیین مدول یانگ رسم شد که در شکل ۶ آورده شده است.

پس از تهیه نمونه‌های طرح اختلاط بتن غلتکی و تعیین درصد رطوبت بهینه که در قسمت قبل توضیح داده شد، نمونه‌های بتن غلتکی، توسط روش تراکم در قالب استاندارد ۱۰ سانتی‌متر بتن با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر ساخته شد. که برای هر مصالح ۵ نمونه و جمعاً ۲۵ نمونه بتنی تهیه شد. برای ساخت هر نمونه مصالح جداگانه توزین شد. برای دقیق‌تر شدن اختلاط مصالح از روش حجمی و بر اساس وزن مخصوص مصالح استفاده گردید. مصالح ساخته در قالب بتنی پس از ۲۴ ساعت از قالب در آورده شد و وزن شدند و به منظور عمل آوری، نمونه‌های بتنی به مدت یک هفته در



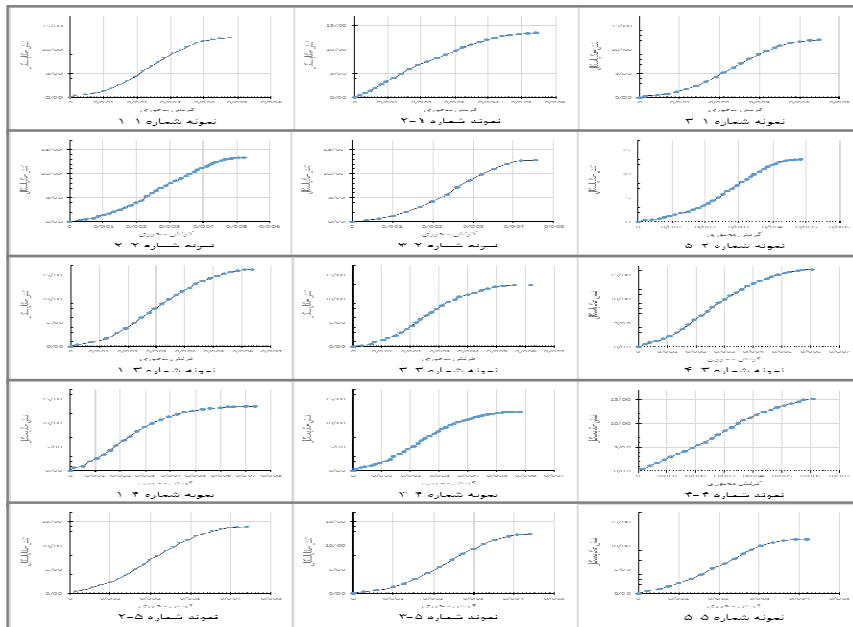
شکل ۵. نمونه‌های بتن غلتکی ساخته شده جهت آزمایش‌ها

جدول ۷. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

نوع مصالح	شماره نمونه	مقاومت فشاری هفت روزه (MPa)	مدول یانگ ۴۰٪ (GPa)
سنگ شماره ۱	۱-۱	۱۲/۴۸	۲/۸۳
	۱-۲	۱۳/۶۱	۳/۹۶
	۱-۳	۱۲/۰۸	۲/۷۵
	میانگین	۱۲/۷۲	۳/۱۸
سنگ شماره ۲	۲-۲	۱۳/۴۲	۲/۳۳
	۲-۳	۱۲/۱۹	۲/۸۳
	۲-۵	۱۳/۰۷	۲/۱۰
	میانگین	۱۲/۸۹	۲/۳۹
سنگ شماره ۳	۳-۱	۱۶/۱۳	۲/۸۳
	۳-۳	۱۲/۹۴	۲/۶۷
	۳-۴	۱۶/۲۳	۳/۰۳
	میانگین	۱۵/۱۰	۳/۰۴
سنگ شماره ۴	۴-۱	۱۳/۷۶	۳/۴۱
	۴-۳	۱۲/۳۶	۲/۵۴
	۴-۴	۱۵/۱۳	۲/۶۹
	میانگین	۱۳/۷۵	۲/۸۸
سنگ شماره ۵	۵-۲	۱۳/۹۸	۳/۵۸
	۵-۳	۱۲/۳۶	۲/۸۹
	۵-۵	۱۱/۴۷	۳/۳۱
	میانگین	۱۲/۶۰	۳/۲۶

۴-۲- نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم و تحلیل نتایج  
 آزمایش کشش غیر مستقیم (مقاومت برزیلی) به منظور ارزیابی مقاومت کششی بتن‌های غلتکی ساخته شده با عیار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم، جهت بررسی تاثیر پنج نوع مصالح سنگی با ویژگی‌های مقاومتی مختلف) بر مقاومت کششی بتن غلتکی این آزمایش انجام گرفت. نتایج این آزمایش در جدول ۸ و نمودار مقایسه نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم مصالح سنگی به به مصالح سنگی شاهد (مصالح شماره یک) در شکل ۸ آورده شده است.

مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی که در جدول ۷ و شکل ۷ آورده شده است پس از اعمال ضریب تبدیل ۱/۰۲ (بر اساس جدول مبحث نهم مقررات ملی ساختمان) برای تبدیل مقاومت نمونه استوانه‌ای با ابعاد ۲۰ در ۱۰ به نمونه استاندارد بتنی با ابعاد ۳۰ در ۱۵ می‌باشد.



شکل ۶. نمودار رفتاری مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

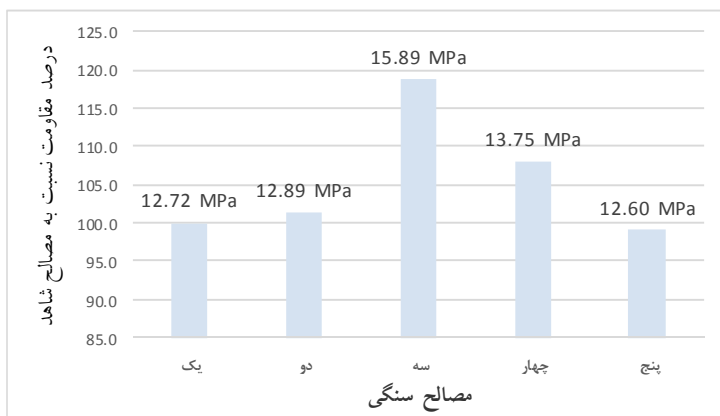
جدول ۸. نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های بتنی

نوع مصالح	شماره آزمون	قطر میلی متر	ارتفاع میلی متر	مقاومت کششی غیر مستقیم (MPa)
سنگ شماره ۱	۱	۱۰۳	۷۶/۱	۱/۶۱
	۲	۱۰۳	۹۷/۴	۱/۷۶
	۳	۱۰۳	۹۴/۹	۲/۰۳
میانگین				
سنگ شماره ۲	۴	۱۰۳	۷۴/۹	۱/۱۶
	۵	۱۰۳	۹۴/۶	۱/۲۷
	۶	۱۰۳	۷۶/۳	۱/۱۸
میانگین				
سنگ شماره ۳	۷	۱۰۳	۷۴/۹	۱/۴۹
	۸	۱۰۳	۹۴/۸	۱/۹۰
	۹	۱۰۳	۷۳/۶	۱/۷۸
میانگین				
سنگ شماره ۴	۱۰	۱۰۳	۹۶/۴	۱/۹۳
	۱۱	۱۰۳	۷۴/۲	۱/۶۹
	۱۲	۱۰۳	۷۴/۷	۱/۸۵
میانگین				
سنگ شماره ۵	۱۳	۱۰۳	۹۵/۵	۲/۰۰
	۱۴	۱۰۳	۷۶/۹	۱/۸۶
	۱۵	۱۰۳	۷۶/۱	۱/۸۵
میانگین				
۱/۹۰				

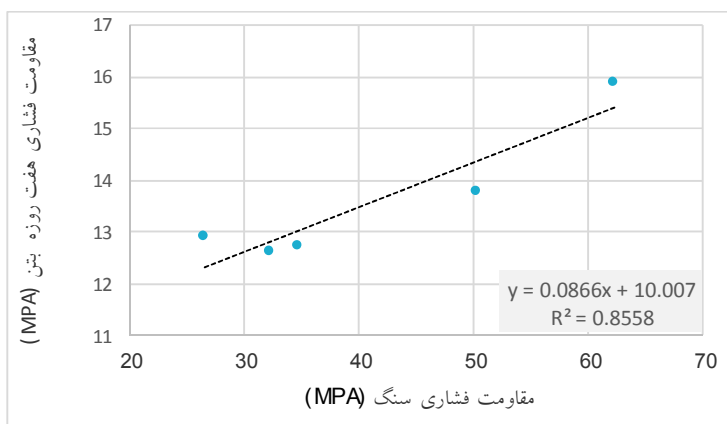
## ۴-ارائه نتایج و تحلیل داده‌ها

درصد و مصالح شماره سه، نوزده درصد بهبود نسبت به مصالح شاهد پیدا کرده است. که این به علت مقاومت بالای این سنگ‌ها می‌باشد. تاثیر مقاومت فشاری سنگ بر مقاومت بتن‌های ساخته در شکل ۸ آورده شده است.

در شکل ۷ نمودار مقایسه مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با مصالح شماره دو تا پنج با مصالح شماره یک (نمونه شاهد) آورده شده است. که همان طور که در این نمودار مشخص است. مصالح آهکی شماره دو و پنج تغییر مقاومت محسوس نبوده ولی مقاومت بتن با مصالح چهار، هشت



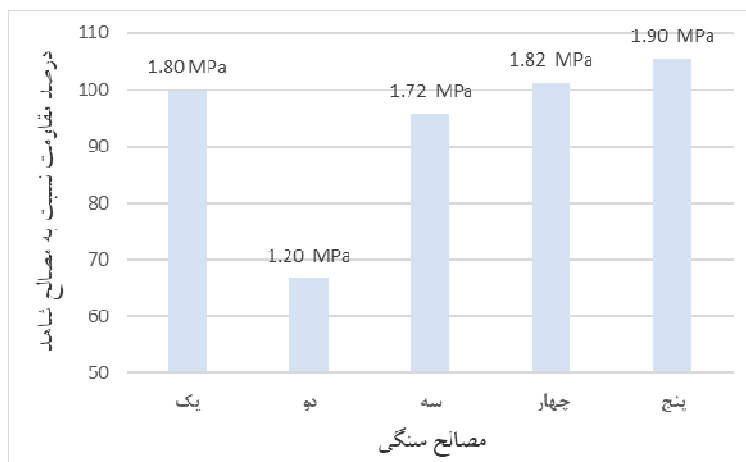
شکل ۷. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی با نمونه شاهد



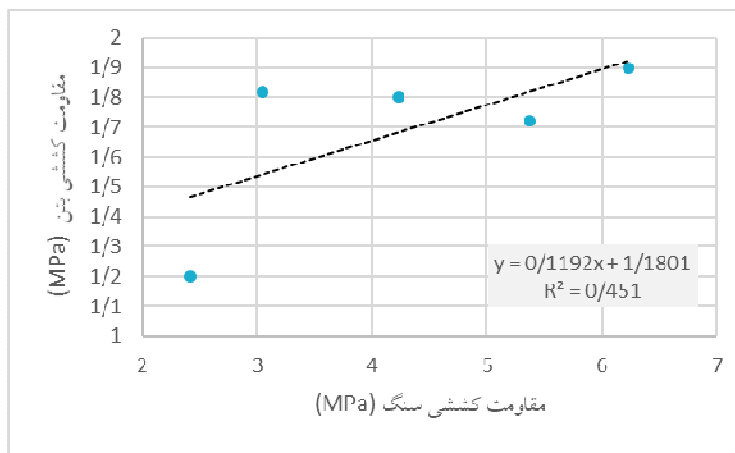
شکل ۸. روند تغییرات مقاومت فشاری سنگ به مقاومت فشاری بتن

مقاومت بتن‌های ساخته در شکل ۱۱ آورده شده است. همانطور که در شکل ۹ مشخص نتایج مقاومت کششی سنگ شماره ۲ از مابقی مصالح بیش از سی درصد کمتر بوده و مابقی مصالح مقاومت کششی در حدود هم دارند که می‌توان از تغییرات آن صرف نظر کرد. به طور کلی مقدار مقاومت کششی بیشتر متاثر از مقدار سیمان می‌باشد.

همانطور که از شکل ۸ مشخص است مقاومت فشاری سنگ به مقاومت فشاری بتن رابطه مستقیم دارد و با افزایش ۷۹ درصدی مقاومت سنگ مقاومت بتن ۱۹ درصد افزایش پیدا کرده است. در شکل ۹ نمودار مقایسه مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با مصالح شماره دو تا پنج با مصالح شماره یک (نمونه شاهد) و تاثیر مقاومت فشاری سنگ بر



شکل ۹. مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های بتن غلتکی با نمونه شاهد



شکل ۱۰. روند تغییرات مقاومت کششی سنگ به مقاومت کششی بتن

جدول ۹. مقایسه کلیه نتایج مصالح باطله با مصالح شاهد در این تحقیق

مصالح شماره	سنگ			بتن	
	مقاومت فشاری سنگ	مدول یانگ سنگ	مقاومت کششی سنگ	مقاومت فشاری بتن	مقاومت کششی بتن
۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۰/۷۶۳	۹/۶۶	۰/۷۹۳	۱/۰۱۶	۰/۶۶۷
۳	۱/۷۹	۱/۷۵	۱/۷۶	۱/۱۸۹	۰/۹۵۶
۴	۱/۴۵	۱/۳۴	۱/۳۹	۱/۰۷۹	۱/۰۱۱
۵	۰/۹۲۸	۱/۲۴	۲/۰۴	۰/۹۹۲	۱/۰۵۵

آورده شده در این تحقیق از کیفیت بالاتری برخوردارند. برای تعیین ارتباط بین داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده در این تحقیق به یکدیگر، مقدار همبستگی پیرسون آن‌ها توسط نرم افزار اکسل محاسبه گردید. داده‌های که به نسبت بیش از ۰/۹ با هم ارتباط برقرار کرده‌اند (به صورت مستقیم یا معکوس) در جدول ۱۰ آورده شده است.

همانطور که در تمامی نتایج مشخص است سنگ شماره ۳ در تمامی نتایج به جز مقاومت کششی سنگ و بتن از سایر مصالح بهتر بوده که نشان دهنده کیفیت این سنگ برای استفاده در بتن غلتکی می‌باشد. سنگ شماره دو تقریباً در تمامی آزمایش‌ها به جز مقاومت فشاری بتن از سایر سنگدانه‌های استفاده شده در این تحقیق کیفیت پایین‌تری دارد. به طور مصالح سنگی چغارت از سایر مصالح سنگی

جدول ۱۰. داده‌های با همبستگی پیرسون بین ۰/۹ تا ۱

ردیف	مشخصات مصالح سنگی و بتن غلتکی	همبستگی
۱	مقاومت فشاری سنگ (Mpa)	سختی اشمیت بتن (Mpa) ۰/۹۴۷
۲	مقاومت فشاری سنگ (Mpa)	مقاومت فشاری بتن (Mpa) ۰/۹۳۸
۳	مدول یانگ سنگ (Gpa)	مقاومت کششی بتن (Mpa) -۰/۹۸۱
۴	مدول یانگ سنگ (Gpa)	مدول یانگ ۴۰٪ بتن (GPa) -۰/۹۱۹
۵	سختی اشمیت بتن (Mpa)	مقاومت فشاری بتن (Mpa) ۰/۹۵۱
۶	مقاومت کششی بتن (Mpa)	مدول یانگ ۴۰٪ بتن (GPa) ۰/۹۲۷

## ۵- نتایج

مقدار ۸۰ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی با عیار ۲۵۰ کیلوگرم تا ۲۰ درصد می‌گردد.

نتایج نشان داد که استفاده از سنگدانه شماره ۳ تهیه شده از معدن چغارت بلوک تکنونیککی یک موجب بهبود مقاومت فشاری به میزان بیست درصد نسبت به سایر مصالح آهکی استفاده شده در این تحقیق می‌شود. که جهت استفاده در نقاطی که روسازی بتن غلتکی در معرض تنش زیاد قرار دارد بسیار مناسب می‌باشد.

نتایج این پژوهش نشان داد که مقاومت کششی سنگ تاثیر بر روی مقاومت کششی بتن غلتکی ندارد. از جمله موضوعات، بررسی استفاده از اختلاط چند نوع سنگدانه با دانه‌بندی‌های مختلف در بتن غلتکی و بررسی روش ساخت و طرح اختلاط نمونه‌ها و تاثیر آن‌ها بر روی ویژگی‌های بتن غلتکی، می‌تواند مورد توجه سایر محققین قرار گیرد.

در این تحقیق برای تعیین خصوصیات مقاومتی مخلوط‌های بتن غلتکی با سنگدانه‌های مختلف که از باطله معادن چغارت، فرش راه مهریز و مزرعه بزرگ چک چک تهیه شد. در بخش اول از پنج نوع سنگ که تهیه شده‌اند خصوصیات مصالح سنگی توسط آزمایش‌های مکانیکی سنگ از جمله مقاومت فشاری تک محوره، سه محوره، کشش غیر مستقیم و سایر آزمایش‌های آورده در این تحقیق مشخص گردید. سپس برای آماده سازی سنگ‌ها برای خردایش توسط سنگ‌شکن، توسط پتک به اندازه‌های زیر ۱۰ سانتی متر خرد شدند و پس از آن توسط دستگاه سنگ شکن فکی برای اندازه‌های زیر ۱۹ میلی‌متر و سنگ‌شکن استوانه‌ای به اندازه زیر ۴/۷۵ خردایش انجام شد. خردایش سنگ‌ها با توجه به دانه‌بندی نشریه ۷۳۱ انجام شد. برخی از نتایج مهم این تحقیق عبارتند از:

نوع مصالح سنگی بر روی مقاومت فشاری بتن غلتکی تاثیر مستقیمی دارد به طوری که افزایش مقاومت فشاری سنگ به

## ۶- سپاسگزاری

- Jaritngam, Lam, M.N.T., S. and Le, D.H., (2017), "Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties". *Construction and Building Materials*, 154, pp.482-495.

-Popek, M.and J. Szymanowski, (2016), "Abrasion resistance of concrete containing selected mineral powders," vol. 153, pp. 617-622.

- Hashemi, M., Shafigh, P., Karim, M. R. B., & Atis, C. D. (2018). The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 169, 553-566.

-Roller-Compacted Concrete Pavement design, (1995), "Construction. Technical Letter ETL 1110-3-475," US Army Corps Eng.

-ASTM C805, (2002), "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete," American Society for Testing and Materials, no. c. American Society for Testing and Materials, pp. 2-4.

-ASTM D2938, (2005), "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens (Withdrawn 2005)." American Society for Testing and Materials.

-ASTM D2664, (2005), "Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength

این مقاله مستخرج از پایان نامه انجام شده در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه یزد توسط نویسنده اول زیر نظر نویسندگان بعدی است که از آزمایشگاه‌های دانشکده‌های مهندسی عمران و معدن دانشگاه یزد کمال سپاسگزاری دارند. همچنین از شرکتهای سنگ آهن مرکزی-فرش راه-چک و چک به دلیل در اختیار قرار دادن مصالح سنگی باطله و سایر مصالح تشکر می‌شود.

## ۷- مراجع

- شعبانی، ن. و سلیمانی بابرصاد، م. (۱۳۹۴)، "بررسی تغییرات ضریب کارایی سیمان در مخلوطهای بتن غلتکی در حضور مواد فرودنی شیمیایی مختلف"، همایش ملی افتخاری نوین در توانمندسازی و توسعه پایدار، سال دوم، ص. ۱۰.

-نشریه شماره ۷۳۱، (۱۳۹۶) "دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها"، وزارت راه و شهرسازی، تهران، ایران.

-Abrams, J.M and Jacksha, J.L. (1987), "An Airport Apron and County Roads", *Concrete International*, Feb. pp. 30-36.

-ACI 325.10 (2000), "State of Art Report on Roller Compacted Concrete Pavements," American Concrete Institute Report ACI 325.10-95.

-Rao, S. K. P. Sravana, and T. C. Rao, (2016), "Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of Fly Ash - Roller Compacted Concrete (FRCC)," vol. 118, pp. 352-363.

-Rao, S. K. P. Sravana, and T. C. Rao, (2016), "Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of Roller Compacted Concrete containing GGBS," vol. 122, pp. 191-201.

- ASTM C1435, (1998), “Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer.” American Society for Testing and Materials, pp. 5–7.

of Undrained Rock Core Specimens without Pore Pressure Measurements.” American Society for Testing and Materials.

-ASTM D1557, (2012), “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort 56, 000 ft-lbf / ft<sup>3</sup> (2, 700 kN-m / m<sup>3</sup>),” vol. 3. American Society for Testing and Materials, pp. 2–15.