

اثر پومیس، متاکائولین و ضایعات معدن مس بر روی بتن غلتکی ساخته شده با استفاده از سیمان‌های محصول منطقه‌ی سیستان و بلوچستان

سید روح اله موسوی *

نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

یاسر مودی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

ابوذر محمدپور

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

امیر شهبان

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به مشکلات و مسائل روسازی آسفالت و بتنی، استفاده از بتن غلتکی در روسازی راه‌ها مورد استقبال گسترده قرار گرفته است. این امر را می‌توان به توجه فنی و اقتصادی این روش جدید ساخت نسبت داد. مانند بتن معمولی، مواد سیمانی یکی از اجزای اصلی در ساخت بتن غلتکی هستند. یافتن مواد به‌عنوان جایگزین برای بخشی از سیمان مورد استفاده در بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر استفاده از پومیس تفتان و متاکائولین با مقدار بهینه به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن غلتکی پرداخته شده است. همچنین، اثر استفاده از ضایعات معدن مس با مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سیمان بر روی مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم‌شدگی، مقاومت خمشی و عمق نفوذ آب با دو سیمان تولید محلی (نوع ۲) منطقه سیستان و بلوچستان پرداخته شده است. در نهایت با استفاده از نتایج به‌دست آمده، مقدار بهینه ضایعات معدن مس برای افزایش خواص مکانیکی بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان و خاش محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد مقدار بهینه ضایعات معدن مس برای افزایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی در بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان به ترتیب برابر ۵/۶۳، ۱۴/۹۶ و ۳/۵ درصد و این مقادیر در بتن غلتکی حاوی سیمان خاش به ترتیب ۵/۶۴، ۹/۱۶ و ۸/۸۵ می‌باشد. همچنین تأثیر استفاده از ضایعات معدن مس برای افزایش خواص مکانیکی بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان بیشتر از بتن غلتکی حاوی سیمان خاش است.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، پومیس، متاکائولین، سیمان منطقه سیستان و بلوچستان.

* نویسنده مسئول: s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir

۱- مقدمه

الیاف در دو حالت خشک و اشباع در بتن غلتکی توسط حسنی و بذرافکن [۹] مورد بررسی قرار گرفت و نشان دادند استفاده از گاه گندم باعث افزایش مقاومت کششی بتن غلتکی می‌گردد.

واحدی فر و همکاران [۱۰]، کارایی، مقاومت فشاری و مقاومت در برابر یخبندان بتن غلتکی حاوی دوده‌ی سیلیس و پومیس را بررسی کردند و نشان دادند استفاده از پومیس کارایی بتن را افزایش می‌دهد ولی مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد.

یکی از مواد ضایعاتی که به میزان قابل توجه در گوشه و کنار جهان تولید می‌شود، سرباره مس است. در هنگام تولید یک تن مس خالص تقریباً ۲/۳-۳ تن ضایعات سرباره مس تولید می‌شود [۱۱]. از سرباره مس به صورت محدود در تولید تجهیزات برنده و ساینده، تولید کاشی و سرامیک، ساخت انواع شیشه، لایه‌های زیرسازی و روسازی، مصالح پرکننده و زهکشی، صنعت بتن و سند بلاست استفاده می‌شود [۱۲]. مشخصات برجسته سرباره مس مانند دانسیته زیاد، سختی بالا، جذب آب کم، مقاومت سایشی بالا امکان استفاده از این سرباره به عنوان جایگزین سیمان و سنگ‌دانه در بتن را فراهم می‌کند [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷].

در مطالعات گذشته از ضایعات مختلف در بتن غلتکی استفاده کرده‌اند که برخی از آنها در ادامه ارائه می‌گردد. در سال ۲۰۱۸ از خرده لاستیک به عنوان جایگزین سنگ‌دانه ریز برای بهبود عمر خستگی بتن غلتکی استفاده شده است و نشان داده شد استفاده از خرده لاستیک و نانو سیلیس در بتن غلتکی مقاومت فشاری و عمر خستگی بتن را افزایش می‌دهد [۱۸]. در سال ۲۰۲۰، توکلی و همکاران [۱۹] به بررسی اثر استفاده از ضایعات سرامیک، ضایعات بتن و ضایعات شیشه به عنوان سنگ‌دانه ریز در بتن غلتکی پرداختند. در مطالعه آنها برای بهبود اثرات منفی ناشی از این ضایعات، از نانو SiO_2 در بتن غلتکی استفاده کردند و خواص مکانیکی این بتن را بررسی کردند. اشتیاق^۲ و همکاران [۲۰] در مطالعه‌ای به بررسی اثر استفاده از ضایعات سیمان سفید در تولید بتن غلتکی پرداختند. همچنین در مطالعه‌ای دیگر از خاکستر شیل نفتی به عنوان جایگزین سیمان با درصد‌های مختلف در بتن غلتکی سبز پرداختند و نشان دادند استفاده از خاکستر شیل نفتی اثر قابل توجهی بر روی خواص مکانیکی بتن غلتکی دارد [۲۱]. در سال

بتن غلتکی بتنی است با اسلامپ صفر که در هنگام اجرا با غلتک کوبیده و متراکم می‌شود. عمده‌ترین زمینه استفاده از آن در ساخت سدهاست و فکر استفاده از چنین مصالحی از صنعت سدسازی آغاز شده است. بتن غلتکی در ساخت، کف‌سازی محوطه‌های صنعتی و نظامی در معرض عبور وسایل نقلیه سنگین، بندرگاه‌ها، باراندازها، محل پارکینگ هواپیماها و راهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. پارامترهای مختلفی بر روی خواص بتن غلتکی اثر می‌گذارد. محققان زیادی اثر این پارامترها را در مطالعاتشان بررسی کرده‌اند. هاشمی و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۸ به بررسی اثر نسبت درشت‌دانه به ریزدانه بر خواص بتن تازه و سخت شده‌ی غلتکی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که افزایش نسبت درشت‌دانه به ریزدانه باعث می‌شود تخلخل در بتن غلتکی کاهش یابد. شفیق و همکاران [۳] به بررسی اثر نسبت رطوبت بر روی خواص مهندسی بتن غلتکی پرداختند و نشان دادند که دوام و مقاومت بالا با یک درصد رطوبت کمتر از رطوبت بهینه به دست می‌آید. اثر سرباره آسیاب‌شده کوره بلند دانه‌بندی‌شده بر روی خواص مکانیکی بتن غلتکی توسط آقای‌پور و مدخان [۴] بررسی شد و نشان داده شد که بالاترین مقاومت مربوط به بتن حاوی ۴۰ درصد سرباره می‌باشد.

در سال ۲۰۲۱، پورخورشیدی و رمضانپور [۵] با استفاده از جایگزینی دو نوع پوزولان طبیعی، اثر پوزولان و نسبت آب به سیمان بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی را بررسی کردند و نشان دادند که جایگزینی ۱۵ درصد پوزولان همراه با آب به سیمان ۰/۴۵ بهترین عملکرد را دارد. خواص مکانیکی بتن غلتکی حاوی پودر سنگ آهک، دوده‌ی سیلیس و خاکستر بادی توسط شن^۱ و همکاران [۶] بررسی شد. در سال ۲۰۲۱، رحمانی و همکاران [۷] به بررسی اثر مقدار سیمان بر روی پارامترهای شکست بتن غلتکی پرداختند.

سیف‌اللهی و محمدی [۸] نشان دادند افزودن الیاف فولادی تا ۱ درصد حجم بتن و افزودن نانو سیلیس تا ۱ درصد وزن سیمان به بتن غلتکی، باعث افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت و مقاومت خمشی می‌شود. امکان‌سنجی استفاده از گاه گندم به عنوان

² Ashteyat¹ Shen

این ضایعات با مقادیر مختلف در طرح‌ها استفاده شد. ضایعات کنسانتره معدن مس به میزان ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، جایگزین سیمان مصرفی استفاده شد. با توجه به تفاوت در میزان ضایعات کنسانتره مس مصرفی و ثابت بودن نسبت آب به مواد سیمانی، بررسی اثر ضایعات کنسانتره معدن مس امکان‌پذیر می‌باشد. از متاکائولین و پومیس تفتان به عنوان بخشی از سیمان به مقدار بهینه (به ترتیب ۱۵ و ۲۰ درصد)، که در مطالعات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است، استفاده شد. این دو ماده در جهت مقایسه کردن با ضایعات معدن مس مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ قابل مشاهده است. نام گذاری نمونه‌ها به صورت ABC می‌باشد. که در آن A نشان دهنده نوع مصالح جایگزینی سیمان می‌باشد که شامل P، MU و RE می‌شود. P نشان‌دهنده پومیس، MU نشان‌دهنده متاکائولین RE نشان‌دهنده ضایعات کنسانتره مس می‌باشد. B نشان‌دهنده درصد جایگزینی مصالح ذکر شده می‌باشد. C نشان‌دهنده نوع سیمان مصرفی می‌باشد که شامل K و S می‌باشد. K نشان‌دهنده سیمان خاش و S نشان‌دهنده سیمان سیستان می‌باشد. قابل ذکر است نوع سیمان‌های مصرفی در این مطالعه، سیمان پرتلند تیپ ۲ است که در دو کارخانه سیمان سیستان و سیمان خاش تولید می‌شوند.

آزمایشات مورد بررسی بر روی طرح‌های ذکر شده عبارتند از: آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش مقاومت کششی و آزمایش مقاومت خمشی در سنین ۷ و ۲۸ روزه و آزمایش نفوذ تحت فشار آب در سن ۲۸ روزه.

۲۰۲۴ یاسین و همکاران [۲۲] به بررسی و امکان‌سنجی توسعه بتن غلتکی با استفاده از مواد معدنی محلی در دسترس پرداختند. در مطالعه آنها از پودر آجر، پودر شیشه و سرباره فولاد به عنوان جایگزینی برای سیمان استفاده شد.

با وجود استفاده از ضایعات مختلف در بتن غلتکی، استفاده از ضایعات سرباره مس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن غلتکی در مطالعات گذشته محدود شده است. در این مطالعه به بررسی اثر استفاده از سرباره مس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان با درصد‌های مختلف (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰) پرداخته می‌شود. همچنین در این مطالعه به بررسی اثر استفاده از پومیس و متاکائولین به عنوان بخشی از سیمان در بتن غلتکی پرداخته می‌شود. اثرات استفاده از این جایگزین‌های سیمان با استفاده از آزمایشات مقاومت فشاری، کشش دو نیم شدن، مقاومت خمشی و عمق نفوذ آب تحت فشار مورد بررسی قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در مطالعه باقرنژاد [۲۳] طرح‌های مختلفی برای بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفته است و در میان آن‌ها بهینه‌ترین طرح ارائه گردید. در این مطالعه بهینه‌ترین طرح ارائه شده توسط باقرنژاد [۲۳] مورد استفاده قرار گرفته است. متغیرهای این مطالعه مقدار ضایعات معدن مس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان و نوع سیمان مصرفی در بتن است. استفاده یا عدم استفاده از پومیس یا متاکائولین از دیگر متغیرهای این مطالعه می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد ضایعات کنسانتره معدن مس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان،

جدول ۱- طرح اختلاط بر حسب کیلوگرم در یک متر مکعب

| نام طرح | درصد مس سرباره‌ای | نوع دانه | | سیمان مصرفی | آب | مواد جایگزین | |
|--------------|-------------------|-----------|---------|-------------|-----|--------------|-------|
| | | درشت‌دانه | ریزدانه | | | ضایعات مس | پومیس |
| RE0K, RE0S | ۰ | ۱۰۹۶ | ۹۶۱ | ۲۸۰ | ۱۴۰ | ۰ | ۰ |
| P20K, P20S | ۰ | ۱۰۹۶ | ۹۶۱ | ۲۲۴ | ۱۴۰ | ۰ | ۵۶ |
| MU15K, MU15S | ۰ | ۱۰۹۶ | ۹۶۱ | ۲۳۸ | ۱۴۰ | ۰ | ۴۲ |
| RE5K, RE5S | ۵ | ۱۰۹۶ | ۹۶۱ | ۲۶۶ | ۱۴۰ | ۱۴ | ۰ |
| RE10K, RE10S | ۱۰ | ۱۰۹۶ | ۹۶۱ | ۲۵۲ | ۱۴۰ | ۲۸ | ۰ |
| RE15K, RE15S | ۱۵ | ۱۰۹۶ | ۹۶۱ | ۲۳۸ | ۱۴۰ | ۴۲ | ۰ |
| RE20K, RE20S | ۲۰ | ۱۰۹۶ | ۹۶۱ | ۲۲۴ | ۱۴۰ | ۵۶ | ۰ |

برای هر طرح در هر سن، ۳ آزمون ساخته شده که میانگین بین ۳ نمونه، به عنوان نتیجه آزمایش در سن مورد نظر، مقایسه می‌گردد. همچنین آزمایش نفوذ تحت فشار آب فقط در سن ۲۸ روزه با استفاده از ۳ آزمون انجام شد.

۱-۲- مصالح مصرفی

در این مطالعه از سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی شکسته با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر با وزن مخصوص 2656 kg/m^3 و ریزدانه طبیعی شکسته با وزن مخصوص 3604 kg/m^3 استفاده شد.

در این پژوهش از دو نوع سیمان موجود در استان سیستان و بلوچستان استفاده شده است: سیمان تیپ II خاش و سیمان تیپ II سیستان. آنالیز شیمیایی و فیزیکی سیمان سیستان به ترتیب در جداول ۲ آورده شده است.



شکل ۱- ضایعات کنسانتره معدن مس

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سیمان‌های مصرفی

جدول ۳- آنالیز شیمیایی ضایعات کنسانتره معدن مس

| میزان بر حسب درصد | عنصر |
|-------------------|--------------------------------|
| ۴۱/۴۲ | SiO ₂ |
| ۰/۰۲ | BaO |
| ۳ | CaO |
| ۱۰/۲ | Fe _t |
| ۱/۱ | K ₂ O |
| ۱۱/۴ | MgO |
| ۰/۳۶ | MnO |
| ۰/۱ | P ₂ O ₅ |
| ۱/۵۲ | S |
| ۰/۵۲ | TiO ₂ |
| ۰/۰۳ | Cr ₂ O ₃ |
| ۰/۵۲ | Cu |
| ۰/۶۷ | Pb |
| ۱/۸۵ | Zn |

| عنصر | سیمان خاش میزان بر حسب درصد | سیمان سیستان میزان بر حسب درصد | الزامات ASTM [۲۴] C150 |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| SiO ₂ | ۲۱/۳-۲۲/۵ | ۲۱/۳۶ | - |
| Al ₂ O ₃ | ۵-۵/۶ | ۵/۳۷ | حداکثر ۶ درصد |
| Fe ₂ O ₃ | ۳/۵-۲/۴ | ۳/۷۱ | حداکثر ۶ درصد |
| MgO | ۲/۲-۲/۷ | ۱/۸۴ | حداکثر ۶ درصد |
| CaO | ۶۳/۵-۶۵/۵ | ۶۲/۲۳ | - |
| SO ₃ | ۱/۶-۲/۲ | ۲/۹۷ | - |
| Na ₂ O | <۰/۸۵ | ۰/۶۶ | - |
| K ₂ O | ۰/۹۵ | ۰/۵۴ | - |
| IR | ۰/۷۴ | ۰/۷۴ | - |
| LOI | <۰/۸ | ۱/۴۲ | حداکثر ۳ درصد |
| TOTAL | ۱۰۰/۱ | ۱۰۰/۱ | - |
| C ₃ A | <۸ | ۷/۹۶ | حداکثر ۸ درصد |

در طرح اختلاط‌های این مطالعه از آب آشامیدنی شهر زاهدان با PH برابر با ۷/۷۱ استفاده شده است.

مواد افزودنی مورد استفاده در این پژوهش ضایعات معدن مس چهل کوره می‌باشد که در شکل ۱ این ماده معدنی قابل مشاهده است. این معدن در شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. این مواد به‌عنوان جایگزین مناسبی برای سیمان در بتن

۲-۲- آماده‌سازی، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

به منظور تهیه مخلوطی یک‌نواخت باید تمامی مراحل ساخت نمونه‌ها یکسان باشند تا احتمال وقوع خطا در هنگام ساخت نمونه‌ها

جدول ۴- آنالیز شیمیایی پومیس تفتان

| عنصر | میزان برحسب درصد |
|--------------------------------|------------------|
| SiO ₂ | ۵۹-۶۲ |
| Al ₂ O ₃ | ۱۷/۸-۱۹ |
| Fe ₂ O ₃ | ۴/۶-۵/۵ |
| CaO | ۷-۸/۵ |
| K ₂ O | <۲/۲ |
| MgO | <۲/۷ |
| Na ₂ O | <۱/۹ |
| Cl | <۰/۰۴ |
| So ₃ | <۰/۴ |
| L.O.I | <۲/۸ |



شکل ۲- قالب و سرچکشی مربوطه

نمونه‌های ساخته شده پس از ساخت با پلاستیک پوشانده و به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد عمل آوری شدند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج و تا موعد مقرر در حوضچه آب عمل آوری شدند. پس از عمل آوری در آب نمونه‌ها باید مورد آزمایش قرار بگیرند. ۲۴ ساعت قبل از آزمایش نمونه‌ها باید از آب خارج گردد [۲۷]، [۲۸].

۲-۳- آزمایشات بتن سخت شده

مقاومت فشاری بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی بیشتر از بتن غلتکی در ساخت سد می‌باشد. حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز بتن در بتن غلتکی استفاده شده در روسازی ۲۷/۶ مگاپاسکال و در

به حداقل برسد. مخلوط کن مورد استفاده در این مطالعه دارای حجم ۲۵۰ لیتری بوده است و در هر بار مخلوط ۶۰ لیتر بتن ساخته شده است. مراحل ساخت بتن برای تمام نمونه‌ها یکسان بوده است. قالب‌های مورد استفاده در این پژوهش به دو صورت استوانه و منشوری بود. برای آزمایشات مقاومت فشاری و کششی و آزمایش نفوذ آب تحت فشار از قالب استوانه‌ای و برای آزمایش مقاومت خمشی از قالب منشوری استفاده شده است. تراکم بتن در هر دو نوع قالب با استفاده از چکش لرزه‌ای صورت می‌گیرد.

در این پژوهش تراکم نمونه‌ها در آزمایشگاه از روش چکش لرزاننده مطابق استاندارد ASTM C 1435 [۲۵] استفاده شده است. در این روش از چکش لرزاننده، کفشک فولادی (صفحه‌ی فولادی جوش شده به سنبه و یا قلم مخصوص چکش به وزن ۳ کیلوگرم و به قطر ۱۴/۵ سانتی‌متر)، نیم‌قالب به منظور تراکم لایه‌ی انتهایی استفاده می‌شود. در قالب‌های استوانه‌ای بتن ساخته شده باید در ۴ لایه‌ی مساوی تقسیم گردد. به این ترتیب ضخامت هر لایه کوبیده شده، ۷/۵ سانتی‌متر می‌باشد. بعد از ریختن بتن در قالب، بتن با کمک کفشک فولادی متصل به چکش لرزاننده به مدت ۲۰ تا ۲۴ ثانیه کوبیده می‌شود. همچنین در لایه انتهایی از نیم‌قالب (بست)، به منظور تراکم بهتر استفاده می‌گردد. در قالب‌های منشوری، تراکم در ۲ لایه و با استفاده از چکش لرزاننده و کفشک فولادی ۱۰ سانتی‌متری، صورت گرفته است [۲۶]. با توجه به اینکه استاندارد برای تراکم نمونه‌های منشوری توسط چکش لرزاننده وجود ندارد، برای محاسبه زمان تراکم در هر طرح، ابتدا افت حجم بتن در قالب استوانه‌ای در همان طرح در مدت زمان مشخص شده را برداشت کرده و با توجه به اینکه باید ارتفاع بتن متراکم شده در قالب‌های مکعبی ۵ سانتی‌متر باشد، ارتفاع بتن متراکم نشده را در قالب مکعبی متناسب با قالب استوانه‌ای بدست آورده و زمان عملیات تراکم را تا رسیدن ارتفاع بتن متراکم شده به ۵ سانتی‌متر ادامه می‌دهیم. همچنین در ساخت ورق کف قالب، برای جلوگیری از لرزش و جداشدگی سنگ‌دانه، از ورق فولادی ضخیم‌تری استفاده شده است. پس از اتمام بتن ریزی و تراکم لایه-ی انتهایی به منظور آماده سازی نمونه‌ها برای فشار یکنواخت، با کمک صفحه فلزی سطح رویه را مسطح کرده و سپس نمونه آماده برای عمل آوری می‌گردد [۲۶]. در شکل ۲ نمونه قالب و سرچکشی مناسب قابل مشاهده است.

ابعاد ۴۰*۱۰*۱۰ سانتی متر استفاده شده است. نمونه‌های مذکور مطابق با استاندارد ASTM C 293 [۳۳] با بارگذاری میانی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مقاومت خمشی نمونه با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد:

$$f_r = \frac{2Pl}{bd^2} \quad (2)$$

f_r مقاومت خمشی (MPa) و d ، b و l به ترتیب عرض، ارتفاع و طول نمونه (mm) می‌باشد.

نفوذ مایعات از سطح به داخل بتن یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های دوام سازه‌های بتنی محسوب می‌شود. روش آزمایش نفوذپذیری، عبور آب تحت فشار از داخل نمونه و اندازه‌گیری میزان تراوش در اثر فشار معین است. مطابق استاندارد DIN 1048 [۳۴] آلمان، نمونه‌های ساخته شده پس از عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز، با استفاده از دستگاه نفوذ آب در بتن، آب با فشار ۵ اتمسفر به مدت ۷۲ ساعت روی نمونه‌های تحت آزمایش قرار گرفته و آب با فشار به سطح نمونه‌ها تزریق شده است. سپس نمونه‌ها بلافاصله بعد از خروج از دستگاه، مشابه با روش شکستن نمونه‌های مقاومت کششی، شکسته شده و نفوذ آب با استفاده از کولیس اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۳ آزمایشات ذکر شده نشان داده شده است.

سدسازی بین ۷ و ۲۸ مگاپاسکال می‌باشد [۲۹]، [۳۰]. در روسازی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن غلتکی مدنظر می‌باشد در صورتی که در بتن غلتکی استفاده شده در سدسازی به منظور کاهش حرارت هیدراتاسیون و ترک‌های حرارتی، از مقدار سیمان کمتری استفاده می‌شود که باعث کاهش خصوصیات مکانیکی می‌گردد [۲۹].

در این پژوهش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C 39 [۳۱] با نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵*۳۰ سانتی متر انجام می‌شود.

مقاومت کششی با نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد و مطابق ASTM C 496 [۳۲] مورد آزمایش قرار می‌گیرد. نمونه استوانه به صورتی زیر جک قرار می‌گیرد که نیرو به ارتفاع استوانه وارد شود. برای توزیع یکنواخت روی ارتفاع استوانه از صفحه فولادی استفاده شده است. پس از آزمایش و به دست آوردن مقدار نیرو با استفاده از رابطه‌ی (۱) تنش کششی دو نیم شدن نمونه محاسبه می‌شود:

$$f_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

که در آن f_t ، مقاومت کششی دو نیم شدن (MPa). P بار وارده (N)، d قطر نمونه‌های استوانه‌ای (mm) و l ارتفاع نمونه استوانه (mm) برای محاسبه مقاومت خمشی، از نمونه‌های منشوری به



شکل ۳- آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و نفوذ آب تحت فشار

خاش و سیستان به صورت جداگانه ارائه گردیده است.

۳- نتایج آزمایش و تفسیر آن

در این بخش به بررسی و نقد نتایج به دست آمده از آزمایش‌های فشاری، برزیلی، خمشی و عمق نفوذ آب در سنین مختلف پرداخته خواهد شد و نتایج حاصل از آزمایش‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج حاصل از این آزمایشات در جداول ۵ برای سیمان

۳-۱- مقاومت فشاری

همانطوری که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های کنترلی (بدون افزودنی) استفاده از سیمان خاش یا سیمان سیستان تفاوت

چندانی بر روی مقاومت فشاری ندارد، به طوری که تفاوت مقاومت فشاری نمونه‌های REOS و REOK به میزان ۴ و ۷ درصد به ترتیب در سن ۷ و ۲۸ روزه می‌باشد. برای مقایسه اثر استفاده از افزودنی بر روی مقاومت فشاری، مقدار افزایش یا کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی متناظر (بر حسب درصد) در جدول ۶ ارائه گردیده است. منفی نشانه

کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد می‌باشد. استفاده از پومیس و متاکائولین با مقادیر بهینه در بتن غلتکی به ترتیب باعث کاهش و افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی می‌شود. همانطوری که جدول ۶ مشاهده می‌شود، اثر افزودن متاکائولین برای افزایش مقاومت فشاری در بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان بیشتر از بتن غلتکی حاوی سیمان خاش می‌باشد.

جدول ۵- نتایج آزمایشگاهی

| عمق نفوذ آب (mm) | مقاومت کششی ۲۸ روزه (MPa) | مقاومت کششی ۷ روزه (MPa) | مقاومت خمشی ۲۸ روزه (MPa) | مقاومت خمشی ۷ روزه (MPa) | مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa) | مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa) | نمونه |
|------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-------|
| سیمان سیستان | | | | | | | |
| ۳۳ | ۲/۶ | ۲ | ۴ | ۳/۷ | ۲۶ | ۱۹/۳ | REOS |
| ۲۴/۵ | ۲/۶ | ۲/۱ | ۳/۱ | ۲/۷ | ۲۰ | ۱۴/۳ | P20S |
| ۲۲ | ۲/۴ | ۲/۱ | ۴/۱ | ۳/۸ | ۳۱ | ۲۴/۲ | MU15S |
| ۲۸/۸ | ۲/۷ | ۲/۳ | ۴ | ۳/۷ | ۳۰ | ۲۳/۸ | RE5S |
| ۲۴ | ۲/۵ | ۲/۲ | ۴/۳ | ۳/۹ | ۲۸/۱۹ | ۲۲/۲ | RE10S |
| ۲۴/۲ | ۲/۴ | ۲/۱ | ۴/۵ | ۴/۱ | ۲۵/۲ | ۱۸ | RE15S |
| ۲۲ | ۲/۱ | ۱/۸ | ۳/۹ | ۳/۶ | ۲۳/۱ | ۱۴ | RE20S |
| سیمان خاش | | | | | | | |
| ۳۱ | ۲/۴ | ۲/۱ | ۴/۲ | ۳/۹ | ۲۸ | ۲۰ | RE0K |
| ۲۳/۶ | ۲/۷۵ | ۲/۳۱ | ۳/۴ | ۲/۷۵ | ۲۲/۶ | ۱۴/۷ | P20K |
| ۱۸ | ۲/۳ | ۱/۸ | ۳/۹ | ۳/۵ | ۲۳/۹ | ۲۲/۷ | MU15K |
| ۲۷/۸ | ۲/۶ | ۱/۹۷ | ۴/۶ | ۳/۴ | ۳۲/۳ | ۲۰/۵ | RE5K |
| ۲۴/۶ | ۲/۸۵ | ۲/۱۶ | ۴/۷ | ۱/۴ | ۲۹/۶ | ۱۸/۹ | RE10K |
| ۲۳/۲ | ۲/۵ | ۱/۹۵ | ۴/۵ | ۳/۸ | ۲۷/۸ | ۱۷/۲ | RE15K |
| ۲۲/۷ | ۲/۲ | ۱/۸ | ۴ | ۳/۵ | ۲۵/۳ | ۱۶/۱ | RE20K |

افزودن ضایعات کنسانتره معدن مس با مقادیر مختلف به بتن غلتکی باعث افزایش یا کاهش مقاومت فشاری می‌شود. افزودن ضایعات کنسانتره با مقادیر کم (۵ و ۱۰ درصد) باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود، اما افزودن این ضایعات با مقادیر زیاد (۱۵ و ۲۰ درصد) همواره باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. با توجه به ماهیت پوزولانی ضایعات معدن مس، افزودن ضایعات کنسانتره مس در مقادیر کم باعث بهبود واکنش‌های شیمیایی در سیمان و افزایش تراکم می‌شود که در نتیجه موجب بهبود مقاومت فشاری بتن می‌گردد. اما در مقادیر زیاد این ضایعات به کاهش

نسبت سیمان به آب منجر شده و ساختار بتن را ضعیف‌تر می‌کند. این کاهش ممکن است به دلیل افزایش تخلخل و کاهش تراکم بتن باشد. این مورد با نتایج اسماعیلی و اصلانی [۳۵]، [۳۶] مطابقت دارد. اثر افزودن ضایعات کنسانتره معدن مس (با مقادیر کم) برای افزایش مقاومت فشاری در بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان بیشتر از سیمان خاش می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت ضایعات کنسانتره مس با سیمان سیستان سازگاری بیشتری دارند. قابل عرض است، استفاده از ضایعات کنسانتره مس با مقادیر بالا در بتن غلتکی حاوی سیمان خاش بهتر از بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان عمل می‌کند.

جدول ۶- مقدار افزایش یا کاهش مقاومت فشاری در اثر اضافه

کردن افزودنی (درصد)

| نمونه | ۷ روزه | ۲۸ روزه |
|-------|--------|---------|
| P20S | -۲۵/۹۱ | -۲۳/۰۸ |
| MU15S | ۲۵/۳۹ | ۱۹/۲۳ |
| RE5S | ۲۳/۳۲ | ۱۵/۳ |
| RE10S | ۱۵/۰۳ | ۸/۴۲ |
| RE15S | -۶/۷۴ | -۳/۰۸ |
| RE20S | -۲۷/۴۶ | -۱۱/۱۵ |
| P20K | -۱۹/۲۹ | -۲۶/۵۰ |
| MU15K | ۱۷/۵۰ | ۱۳/۵۰ |
| RE5K | ۱۵/۳۶ | ۲/۵۰ |
| RE10K | ۵/۷۱ | -۵/۵۰ |
| RE15K | -۰/۷۱ | -۱۴/۰۰ |
| RE20K | -۹/۶۴ | -۱۹/۵۰ |

مقدار ضایعات باعث کاهش مقاومت فشاری شده بود. برای بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان بالاترین افزایش مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد ضایعات کنسانتره معدن مس می‌باشد. در صورتی که در سیمان خاش بالاترین افزایش مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد ضایعات کنسانتره معدن مس می‌باشد. همچنین باید ذکر گردد اثر افزودن ضایعات کنسانتره معدن مس بر روی افزایش مقاومت خمشی برای بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان بیشتر است.

جدول ۷- مقدار افزایش یا کاهش مقاومت خمشی در اثر اضافه

کردن افزودنی (درصد)

| نمونه | ۷ روزه | ۲۸ روزه |
|-------|--------|---------|
| P20S | -۲۲/۵۰ | -۲۷/۰۳ |
| MU15S | ۲/۵۰ | ۲/۷۰ |
| RE5S | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| RE10S | ۷/۵۰ | ۵/۴۱ |
| RE15S | ۱۲/۵۰ | ۱۰/۸۱ |
| RE20S | -۲/۵۰ | -۲/۷۰ |
| P20K | -۱۹/۰۵ | -۲۹/۴۹ |
| MU15K | -۷/۱۴ | -۱۰/۲۶ |
| RE5K | ۹/۵۲ | ۱۰/۲۶ |
| RE10K | ۱۱/۹۰ | ۵/۱۳ |
| RE15K | ۷/۱۴ | -۲/۵۶ |
| RE20K | -۴/۷۶ | -۱۰/۲۶ |

۲-۳- مقاومت خمشی

برای مقایسه اثر استفاده از افزودنی بر روی مقاومت خمشی، مقدار افزایش یا کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی متناظر (بر حسب درصد) در جدول ۷ ارائه گردیده است. همانند مقاومت فشاری، استفاده از پومیس باعث کاهش مقاومت خمشی بتن غلتکی در سن ۷ و ۲۸ روزه می‌شود. اما بر خلاف مقاومت فشاری استفاده از متاکائولین باعث افزایش مقاومت خمشی نمی‌شود. استفاده از متاکائولین در بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان باعث افزایش ناچیز مقاومت خمشی می‌شود، اما در بتن حاوی سیمان خاش باعث کاهش مقاومت خمشی می‌شود.

در خصوص مقاومت خمشی بتن حاوی سیمان خاش و سرباره مس در ۵ درصد، که برخلاف سیمان سیستان دارای مقاومت خمشی بالاتر است، باید گفت که این تغییرات ممکن است ناشی از تفاوت‌های مکانیزم‌های مختلف مقاومت خمشی و فشاری در این دو نوع سیمان باشد. سیمان خاش به دلیل خصوصیات خاص خود ممکن است توانایی بهتری در تقویت مقاومت خمشی بتن داشته باشد، به‌ویژه در ترکیب با سرباره مس که ممکن است باعث بهبود چسبندگی و پر کردن فضاهای خالی در ساختار میکروسکوپی بتن شود. در حالی که در خصوص مقاومت فشاری، ممکن است سرباره مس در سیمان خاش باعث افزایش تخلخل یا ایجاد نواحی ضعیف‌تر در بتن شود که در نتیجه مقاومت فشاری آن کمتر از بتن RE5S (حاوی ۵ درصد ضایعات کنسانتره مس) گزارش شده

در خصوص اثر افزودن ضایعات کنسانتره معدن مس بر روی مقاومت خمشی باید ذکر گردد که استفاده از ۵ درصد ضایعات کنسانتره معدن مس، باعث تغییر چشمگیری در مقاومت خمشی بتن غلتکی نمی‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل ناکافی بودن مقدار سرباره برای تأثیرگذاری قابل توجه بر روی ساختار بتن در ناحیه کششی باشد، که در مقادیر بالاتر قابل مشاهده است. در نسبت‌های بالاتر اثر کنسانتره معدن مس بر مقاومت خمشی نسبت به اثر آن بر روی مقاومت فشاری بیشتر است به طوری که افزودن این ضایعات به مقدار ۱۵ درصد سیمان همواره باعث افزایش مقاومت در سن ۲۸ روزه شده است، در صورتی که افزودن این

افزودن پومیس تفتان تأثیری بر روی مقاومت کششی بتن غلتکی حاوی سیمان سیمان سیستان ندارد، اما در بتن غلتکی حاوی سیمان خاش باعث افزایش ۱۵ درصدی مقاومت کششی ۲۸ روزه می‌شود. استفاده از متاکائولین همواره باعث کاهش مقاومت کششی بتن غلتکی می‌شود.

همانطور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود افزودن ضایعات معدن مس با مقادیر کم (۵ و ۱۰ درصد) تا حدودی باعث افزایش مقاومت کششی بتن غلتکی حاوی سیمان خاش می‌گردد که ممکن است به دلیل بهبود تراکم و واکنش‌های شیمیایی در سیمان باشد. اما ضایعات معدن مس با مقادیر بالا باعث کاهش مقاومت کششی بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان و خاش می‌شود که احتمالاً به دلیل افزایش تخلخل و کاهش تراکم بتن است. این اثر منفی در مطالعات مختلف دیگری نیز گزارش شده است. قابل توجه است اثر افزودن ضایعات معدن مس برای افزایش مقاومت کششی در بتن غلتکی حاوی سیمان خاش بیشتر است.

۳-۴- نفوذ آب

یکی از شاخصه‌های مهم برای تعیین دوام بتن، عمق نفوذ آب در بتن است. نتایج عمق نفوذ آب در جدول ۵ ارائه شده است. استفاده از افزودنی‌ها همواره باعث کاهش عمق نفوذ آب در بتن غلتکی می‌شود و این کاهش باعث افزایش دوام بتن می‌شود. کمترین نفوذ آب مربوط به نمونه‌های دارای متاکائولن با مقدار بهینه می‌باشد. قابل عرض است افزودن ضایعات معدن مس همواره باعث کاهش عمق نفوذ آب در بتن غلتکی می‌شود. افزایش درصد ضایعات معدن مس باعث کاهش عمق نفوذ آب در بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان و خاش می‌شود.

۴- تعیین درصد بهینه ضایعات معدن مس

برای تعیین درصد بهینه استفاده از ضایعات معدن مس، نمودارهای روند تغییر مقاومت‌های ۲۸ روزه (فشاری، خمشی و کششی) در مقابل مقدار درصد ضایعات معدن مس در شکل‌های ۴ تا ۶ رسم شده است. برای به دست آوردن مقدار بهینه ضایعات معدن مس، بهترین منحنی برازش شده بر روی نمودارهای ذکر شده رسم شد و معادله بهترین منحنی رسم شده استخراج شد. معادلات منحنی‌ها در شکل‌های ۴ تا ۶ آورده شده است.

این در حالی است که نفوذ در این دو نوع بتن تقریباً مشابه است، که نشان‌دهنده این است که تفاوت‌ها در مقاومت خمشی و فشاری بیشتر به تأثیرات مختلف مواد و ترکیب شیمیایی در این دو نوع سیمان مربوط می‌شود. به‌طور کلی، تفاوت‌های مشاهده شده در مقاومت خمشی و فشاری می‌تواند به دلیل تغییرات در ساختار میکروسکوپی بتن و تأثیرات متفاوت سرباره مس بر این ساختار باشد. همچنین، مکانیزم‌های مختلف مقاومت خمشی و فشاری به‌طور متفاوت تحت تأثیر افزودنی‌ها و سیمان‌های مختلف قرار می‌گیرند، که این تغییرات را توجیه می‌کند.

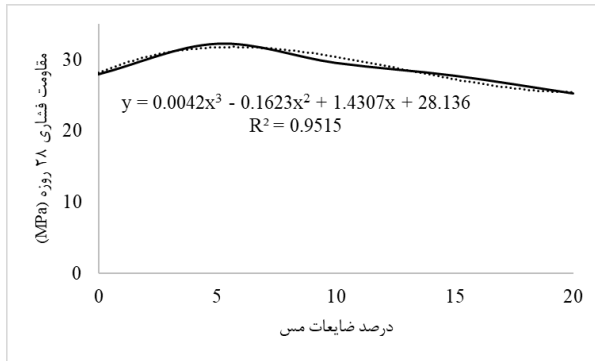
۳-۳- مقاومت کششی

با استفاده از روشی که در بخش‌های قبل ذکر شد، آزمایش کشش برزیلی بر روی نمونه‌ها انجام شد و نتایج در جدول ۵ ارائه گردید. همانطوری که مشاهده می‌شود استفاده از افزودنی‌ها باعث افزایش و کاهش مقاومت کششی بتن غلتکی می‌شود. کمترین مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های دارای ۲۰ درصد ضایعات کنسانتره معدن مس می‌باشد. برای مقایسه بهتر اثر افزودنی‌ها بر روی مقاومت کششی، مقدار افزایش یا کاهش مقاومت کششی نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی متناظر (بر حسب درصد) در جدول ۸ ارائه گردیده است.

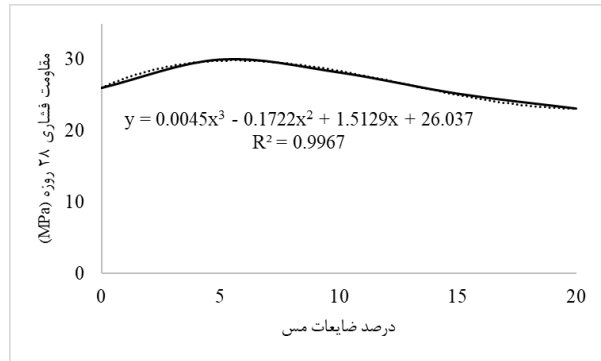
جدول ۸- مقدار افزایش یا کاهش مقاومت کششی در اثر اضافه

کردن افزودنی (درصد)

| نمونه | ۷ روزه | ۲۸ روزه |
|-------|--------|---------|
| P20S | ۰/۰۰ | ۵/۰۰ |
| MU15S | -۷/۶۹ | ۵/۰۰ |
| RE5S | ۳/۸۵ | ۱۵/۰۰ |
| RE10S | -۳/۸۵ | ۱۰/۰۰ |
| RE15S | -۷/۶۹ | ۵/۰۰ |
| RE20S | -۱۹/۲۳ | -۱۰/۰۰ |
| P20K | ۱۴/۵۸ | ۱۰/۰۰ |
| MU15K | -۴/۱۷ | -۱۴/۲۹ |
| RE5K | ۸/۳۳ | -۶/۱۹ |
| RE10K | ۱۸/۷۵ | ۲/۸۶ |
| RE15K | ۴/۱۷ | -۷/۱۴ |
| RE20K | -۸/۳۳ | -۱۴/۲۹ |

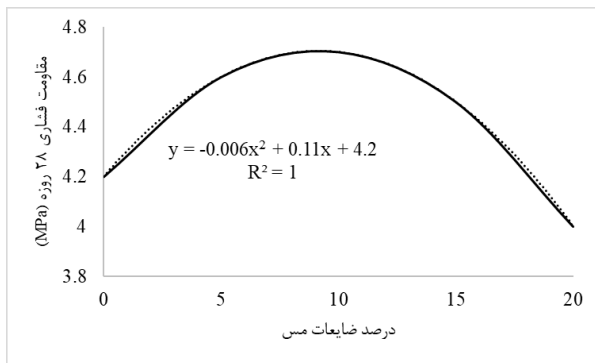


ب

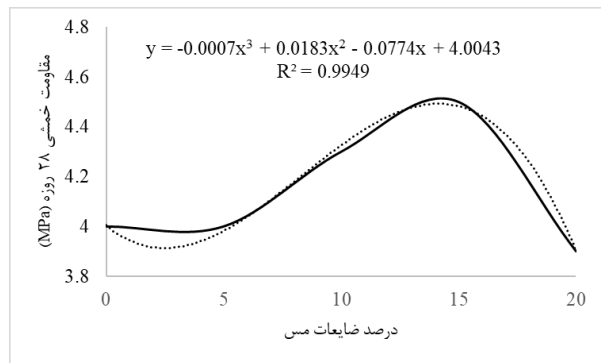


الف

شکل ۴- روند تغییر مقاومت فشاری با تغییر مقدار ضایعات معدن مس: الف) سیمان سیستان و ب) سیمان خاش

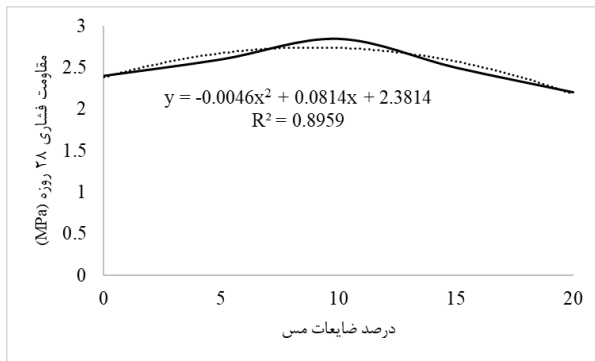


ب

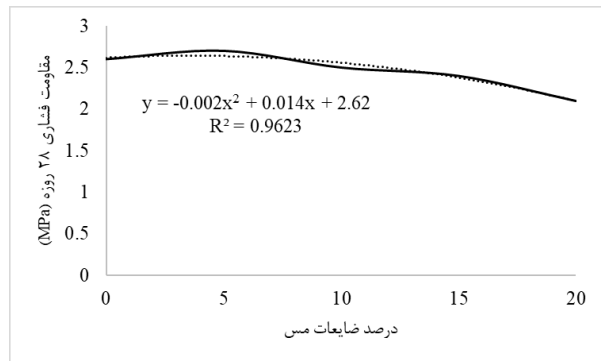


الف

شکل ۵- روند تغییر مقاومت خمشی با تغییر مقدار ضایعات معدن مس: الف) سیمان سیستان و ب) سیمان خاش



ب



الف

شکل ۶- روند تغییر مقاومت کششی با تغییر مقدار ضایعات معدن مس: الف) سیمان سیستان و ب) سیمان خاش

گردد. درصد بهینه ضایعات معدن مس برای بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان و سیمان خاش در سه آزمایش ذکر شده محاسبه و در جدول ۹ آورده شده است. همانطوری که در جدول ۹ مشاهده می شود، درصد بهینه ضایعات معدن مس برای مقاومت خمشی بیشتر است. با توجه به اینکه شاخص اصلی بتن مقاومت فشاری بتن آن می باشد، می توان درصد بهینه مصرف ضایعات معدن مس در بتن غلتکی را ۵ درصد در نظر گرفت.

جدول ۹- درصد بهینه ضایعات معدن مس برای بتن غلتکی

| سیستان | خاش | |
|--------|------|--------------|
| ۵/۶۳ | ۵/۶۴ | مقاومت فشاری |
| ۱۴/۹۶ | ۹/۱۶ | مقاومت خمشی |
| ۳/۵ | ۸/۸۵ | مقاومت فشاری |

در این مطالعه مقدار ضایعات معدن مس زمانی بهینه تعریف می شود که مقدار مقاومت (فشاری، خمشی و کششی) بیشترین مقدار

۵- نتیجه گیری

نمونه‌های دارای متاکائولن با مقدار بهینه می‌باشد.

- استفاده از پومیس و متاکائولین با مقادیر بهینه در بتن غلتکی به ترتیب باعث کاهش و افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی می‌شود.

قدردانی

این مقاله از طرح پژوهشی کاربردی ارائه شده در اداره کل راه، مسکن و شهرسازی استان سیستان و بلوچستان استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از آن اداره به عمل آورند.

۶- مراجع

- [1] M. Ashkar, V. Toufigh, M. Ghaemian, and M. Azizmohammadi, "Application of ultrasonic models for investigating the properties of the interface between roller compacted concrete (RCC) layers," *NDT & E International*, vol. 124, p. 102516, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.NDTEINT.2021.102516.
- [2] M. Hashemi, P. Shafigh, M. R. Bin Karim, and C. D. Atis, "The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement," *Constr Build Mater*, vol. 169, pp. 553-566, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.02.216.
- [3] P. Shafigh, M. Hashemi, B. H. Nam, and S. Koting, "Optimum moisture content in roller-compacted concrete pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 14, pp. 1769-1779, Dec. 2020, doi: 10.1080/10298436.2019.1567919.
- [4] A. Aghaeipour and M. Madhkhan, "Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) on Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement," *J Test Eval*, vol. 48, no. 4, pp. 2786-2802, Jul. 2020, doi: 10.1520/JTE20170786.
- [5] A. R. Pourkhorshidi and A. A. Ramezani pour, "Roller compacted concrete pavement using natural pozzolan: experimental investigation and salt-scaling durability model," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 22, no. 12, pp. 1582-1591, Oct. 2021, doi: 10.1080/10298436.2019.1703982.
- [6] L. Shen, Q. Li, W. Ge, and S. Xu, "The mechanical property and frost resistance of roller compacted concrete by mixing silica fume and limestone powder: Experimental study," *Constr Build Mater*, vol. 239, p. 117882, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117882.
- [7] E. Rahmani, M. K. Sharbatdar, and M. H.A.

تولید حجم زیاد ضایعات سرباره مس باعث آسیب به طبیعت و نگرانی‌های حافظان محیط زیست شده است. از طرفی کاربرد این مواد ضایعاتی به عنوان جایگزین سنگ‌دانه‌های طبیعی و سیمان در بتن رونق یافته و مستلزم تأیید علمی در محیط آزمایشگاه است. در این مطالعه، به‌عنوان مقدمات لازم برای انتخاب کردن نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایشات، ابتدا مطالعه جامعی بر روی تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی در زمینه بتن غلتکی حاوی انواع پوزولان انجام شد. در مطالعات گذشته یافتن مصالحی به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در بتن اهمیت خاصی دارد. در مطالعات گذشته از پومیس تفتان و متاکائولین و برخی از مصالح دیگر به عنوان جایگزین سیمان مصرفی در بتن استفاده شده است. در این مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر استفاده از ضایعات معدن مس با مقادیر مختلف به عنوان جایگزین سیمان بر روی خواص مکانیکی بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان و سیمان خاش پرداخته شده است. براساس مشاهدات آزمایشگاهی در این پژوهش نتایج زیر به دست آمده است:

- افزودن ضایعات کنسانتره سرباره مس، با مقادیر کم (۵ و ۱۰ درصد) باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود، اما افزودن این ضایعات با مقادیر زیاد (۱۵ و ۲۰ درصد) همواره باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. مقدار بهینه افزودن ضایعات کنسانتره معدن مس برای افزایش مقاومت فشاری در بتن حاوی سیمان سیستان و خاش به ترتیب برابر ۵/۶۳ و ۵/۶۴ است.

- افزودن ضایعات کنسانتره تا مقدار ۱۵ درصد سیمان همواره باعث افزایش مقاومت خمشی بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان و خاش می‌شود. همچنین، اثر افزودن ضایعات کنسانتره معدن مس بر روی افزایش مقاومت خمشی برای بتن غلتکی حاوی سیمان سیستان بیشتر است.

- افزودن ضایعات معدن مس نه تنها تأثیر چندانی بر روی افزایش مقاومت کششی ندارد (به جز افزودن ۵ درصدی ضایعات کنسانتره معدن مس در بتن غلتکی حاوی سیمان خاش که باعث افزایش ۸ درصدی مقاومت کششی شده است) بلکه افزودن این ضایعات باعث کاهش مقاومت کششی بتن می‌گردد.

- افزودن ضایعات معدن مس همواره باعث کاهش عمق نفوذ آب در بتن غلتکی می‌شود و همچنین، کمترین نفوذ آب مربوط به

waste copper slag as a substitute in cement and concrete-a review,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 982, no. 1, p. 012029, Mar. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/982/1/012029.

[17] C. Shi, C. Meyer, and A. Behnood, “Utilization of copper slag in cement and concrete,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 52, no. 10, pp. 1115–1120, Aug. 2008, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2008.06.008.

[18] M. Adamu, B. S. Mohammed, N. Shafiq, and M. Shahir Liew, “Effect of crumb rubber and nano silica on the fatigue performance of roller compacted concrete pavement,” *Cogent Eng*, vol. 5, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1436027.

[19] D. Tavakoli, R. Sakenian Dehkordi, H. Divandari, and J. de Brito, “Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂,” *Constr Build Mater*, vol. 249, p. 118747, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118747.

[20] A. M. Ashteyat, Y. S. Al Rjoub, Y. Murad, and S. Asaad, “Mechanical and durability behaviour of roller-compacted concrete containing white cement by pass dust and polypropylene fibre,” *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 166–183, 2022, doi: 10.1080/19648189.2019.1652694.

[21] A. M. Ashteyat, Y. S. Al Rjoub, A. T. Obaidat, M. Kirgiz, M. Abdel-Jaber, and A. Smadi, “Roller Compacted Concrete with Oil Shale Ash as a Replacement of Cement: Mechanical and Durability Behavior,” *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 151–168, Jan. 2022, doi: 10.1007/S42947-022-00225-3/METRCS.

[22] M. H. Yaseen, S. F. S. Hashim, E. T. Dawood, and M. A. M. Johari, “Mechanical properties and microstructure of roller compacted concrete incorporating brick powder, glass powder, and steel slag,” *J Mech Behav Mater*, vol. 33, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1515/JMBM-2022-0307/MACHINEREADABLECITATION/RIS.

[23] G. Bagherinezhad, “Effect of Aggregates Quality on RCC,” Master’s thesis, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, 2014.

[24] ASTM C150, *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM International. 2009.

[25] ASTM C 1435, *Standard Practice For Molding Roller Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer*, Annual Book of ASTM. 2014.

[26] A. Omran, D. Harbec, A. Tagnit-Hamou, and R. Gagne, “Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study,” *Constr Build*

Beygi, “Influence of cement contents on the fracture parameters of Roller compacted concrete pavement (RCCP),” *Constr Build Mater*, vol. 289, p. 123159, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123159.

[8] ف. سيف اللهی ننه کران و ی. محمدی، “بررسی مشخصات مکانیکی بتن غلتکی روسازی حاوی نانوسیلیس و الیاف فولادی”، *تحقیقات بتن*, vol. 13, no. 2, pp. 31–43, Jun. 2020, doi: 10.22124/JCR.2020.14965.1405.

[9] ا. حسنی و م. بذرافکن، “بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از کاه گندم بر مقاومت فشاری، روانی و طاقت مخلوط بتن غلتکی روسازی”، *تحقیقات بتن*, vol. 10, no. 1, pp. 47–62, May 2017, doi: 10.22124/JCR.2017.2359.

[10] F. Vahedifard, M. Nili, and C. L. Meehan, “Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 12, pp. 2528–2535, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.06.003.

[11] C. Shi, C. Meyer, and A. Behnood, “Utilization of copper slag in cement and concrete,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 52, no. 10, pp. 1115–1120, Aug. 2008, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2008.06.008.

[12] I. Afshoon, M. Miri, and S. R. Mousavi, “Using the Response Surface Method and Artificial Neural Network to Estimate the Compressive Strength of Environmentally Friendly Concretes Containing Fine Copper Slag Aggregates,” *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, pp. 1–15, Jun. 2023, doi: 10.1007/S40996-023-01152-4/METRCS.

[13] K. S. Al-Jabri, M. Hisada, A. H. Al-Saidy, and S. K. Al-Oraimi, “Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 6, pp. 2132–2140, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2008.12.013.

[14] I. Afshoon, M. Miri, and S. R. Mousavi, “Evaluating the flexural behavior of green copper slag-contained steel fiber reinforced SCC beams with/without initial notches,” *Constr Build Mater*, vol. 395, p. 132316, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132316.

[15] R. Sharma and R. A. Khan, “Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials,” *J Clean Prod*, vol. 151, pp. 179–192, May 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.031.

[16] B. K. Chaitanya and I. S. Kumar, “Effect of

- Mater*, vol. 133, pp. 450–458, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.12.099.
- [27] M. AliAhmad, M. Miri, and M. Rashki, “Probabilistic and experimental investigating the effect of pozzolan and Lumachelle fine aggregates on roller compacted concrete properties,” *Constr Build Mater*, vol. 151, pp. 755–766, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.06.107.
- [28] ASTM C192/C192M, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,” *ASTM International*, 2009.
- [29] ACI 325.10R, *Report on Roller-Compacted Concrete Pavement*, ACI Committee. 2021.
- [30] ACI 207.5R-11, “Guide for Roller-Compacted Mass Concrete,” *American Concrete Institute (ACI)-Committee 207*, 2011.
- [31] ASTM C 39, *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*, Annual Book of ASTM. 1997.
- [32] ASTM C 496, *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International. 2011.
- [33] ASTM C 293, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (using Simple Beam with Third-point Loading)*, ASTM International. 2016.
- [34] DIN 1048-5, *Testing Methods for Concrete, Tests on Hardened*. 1991.
- [35] J. Esmaili and H. Aslani, “Use of copper mine tailing in concrete: strength characteristics and durability performance,” *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 21, no. 3, pp. 729–741, May 2019, doi: 10.1007/S10163-019-00831-7/METRICS.
- [36] J. Esmaili and H. Aslani, “A Study on the Mechanical Properties of Concrete Containing Copper Mine Tailing,” *Concrete Research*, vol. 12, no. 3, pp. 61–71, Sep. 2019, doi: 10.22124/JCR.2019.10567.1301.

The effect of Pumice, Metakaolin and Copper Mine Waste on Roller Compacted Concrete Made Using Local Cements of Sistan and Baluchestan Region

Seyed Roohollah Mousavi*

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Yaser Moodi

Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

Aboozar Mohammadpoor

Master's Degree Graduated in Department of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Amir Shahrian

Master's Degree Graduated in Department of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Abstract

In recent years, due to the problems and issues of asphalt and concrete pavements, the use of Roller Compacted Concrete (RCC) in road pavement has been widely welcomed. This can be attributed to the technical and economic justifications of this new method of construction. Like conventional concrete, cement materials are one of the main components in the manufacture of roller compacted concrete. Finding materials as a replacement for part of the cement used in concrete is of particular importance. In this experimental study, the effect of the use of Taftan pumice and metakaolin with the optimum amount as an alternative to the cement is discussed in roller compacted concrete. Also, the effect of copper mine waste on compressive strength, tensile strength, bending strength and depth of water penetration with two local cements in Sistan and Baluchistan have been dealt with. Finally, using the results obtained, the optimal amount of copper mine wastes was calculated to increase the mechanical properties of roller compacted concrete containing Sistan and Khash cement. The results show that the optimal amount of copper mine waste for increased compressive strength, bending strength and tensile strength in roller compacted concrete containing Sistan cement is 5.63, 14.96, and 3.5 %, respectively, and these values in roller compacted concrete containing Khach cement is 5.64, 9.6, and 8.85 %, respectively. Also, the effect of using copper mine waste to increase the mechanical properties of roller concrete containing Sistan cement is greater than that of roller compacted concrete containing khash cement.

Keywords: Roller Concrete, Pumice, Metakaolin, Cement of Sistan and Baluchestan Region.

* Corresponding Author: s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir