



تأثیر جنس و دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه و بافت سطحی مختلف بر پایایی مقاومت سایشی رویه بتن غلتکی

مصطفی آدرسی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران .

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۷/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹

کلمات کلیدی:

روسازی بتن غلتکی
مقاومت سایشی
بافت ریز
بافت درشت
طرح اختلاط بهینه

خلاصه: مشکل اصلی استفاده از رویه‌های بتن غلتکی، مقاومت اصطکاکی و بعضاً مقاومت سایشی کم آن به ترتیب به دلیل کوبیدگی مخلوط و عدم عمل‌آوری مناسب در حین اجرا است. برای رفع این دو مشکل، در این مقاله بافت‌های مختلف درشت بر روی نمونه‌های بتنی ایجاد شدند. همچنین به منظور بهبود بافت ریز در این تحقیق از ریزدانه‌های سیلیسی، آهنی و ترکیب ۵۰-۵۰ درصد این دو با هم به صورت شکسته و طبیعی، در مجموع ۸ طرح اختلاط استفاده شد. هدف از این مقاله بررسی پایایی مقاومت سایشی بافت‌های میکرو و ماکرو مخلوط‌های بتن غلتکی به روش شبیه‌سازی پیشنهاد شده در استاندارد ASTM C ۹۴۴ است. نتایج نشان داد که بافت‌های مختلف درشت مقاومت سایشی تقریباً یکسانی دارند. نتایج مختلف نشان داد که مقاومت سایشی با حساسیت بیشتری به طرح اختلاط بتن وابسته است. نتایج نشان داد که به جز ماسه سیلیسی شکسته که بهترین مقاومت سایشی را ایجاد می‌کند، ترکیب مصالح آهنی و سیلیسی طبیعی با هم باعث بهبود مقاومت سایشی مخلوط نسبت به مخلوط‌های ساخته شده با هر یک از این سه نوع ماسه می‌شود.

۱- مقدمه

ماسه به عنوان عامل تأثیرگذار تعیین شد و لذا ۸ ترکیب مختلف بتن بر اساس تغییرات جنس و درصد شکستگی ماسه ساخته شد. همچنین از آنجا که وجود بافت درشت در دفع آب سطحی و کاهش پتانسیل هیدروپلانینگ بسیار مؤثر است سعی شد بر اساس تغییرات ممکن در فرایند ساخت، بافت درشت محتمل بر روی رویه‌های بتن غلتکی ایجاد گردد. برای این منظور سه نوع بافت درشت، دانه نشانی، نقش اندازی و جاروکشی، که اجرای آن محتمل بود طرح‌ریزی شد.

برای اجرای بافت نقش اندازی بر روی رویه بتنی غلتکی در فرایند اجرا، می‌توان در پاس آخر، از غلتک با درام طرح دار که به صورت برعکس (دنده عقب) بر روی روسازی حرکت می‌کند استفاده کرد و طرحی را روی روسازی ایجاد نمود این روند اجرا یک ایده نوآورانه است و تجربه اجرایی آن تا به حال وجود ندارد. همچنین برای اجرای بافت دانه نشانی بر روی روسازی بتن غلتکی می‌توان از فنی که در روسازی‌های رولد آسفالت برای ایجاد بافت سطحی استفاده می‌کنند، با اندکی تغییر در اندازه دانه‌ها استفاده کرد. برای ایجاد این بافت لازم است بخشی از فرایند غلتک کاری را انجام

روسازی بتن غلتکی یکی از انواع روسازی صلب است که به دلیل وجود تجربه اجرایی در کشور، هزینه نسبتاً پایین‌تر آن نسبت به روسازی آسفالتی و عدم نیاز به فنآوری و دستگاه‌های پیچیده در فرایند ساخت می‌تواند به عنوان یک گزینه اقتصادی، بادوام و منطبق با سیاست‌های اقتصاد مقاومتی (کاهش وابستگی به نفت و مشتقات آن) در دستور راه‌سازان کشور قرار گیرد. عمده مشکلی که در این بین مانع استفاده از این روسازی، به عنوان رویه اصلی راه که در تماس مستقیم با ترافیک است، شده است مقاومت اصطکاکی و بعضاً مقاومت سایشی کم آن به ترتیب به دلیل کوبیدگی مخلوط و عدم عمل‌آوری مناسب در حین اجرا است. در این مقاله با فرض اجرای صحیح و عمل‌آوری بتن غلتکی با سطح نسبتاً صیقلی روبرو خواهیم بود ولی مقاومت اصطکاکی آن به دلیل کوبیدگی زیاد در زیر غلتک‌های مختلف بعضاً کاهش یافته و عموماً به دلیل ضعف بافت درشت روسازی احتمال پدیده هیدروپلانینگ در آن افزایش یافته است. برای حل این مسئله بعد از بررسی منابع مختلف در خصوص عوامل مؤثر بر اصطکاک رویه‌های بتنی، جنس و میزان شکستگی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Adresi@sru.ac.ir



برای سنجش مقاومت سایشی درشت‌دانه آزمایش لس‌آنجلس و میکرو داوول پیشنهاد شده است [۸-۱۰]. جنس درشت‌دانه‌ها تأثیر زیادی بر میزان سایش سطح روسازی دارند، استفاده از گرانیت و سنگ آهکی دولمیتی مقاومت خوبی در برابر سایش ایجاد می‌کند در حالی که سنگ آهک سست مقاومت کمی در برابر سایش دارد.

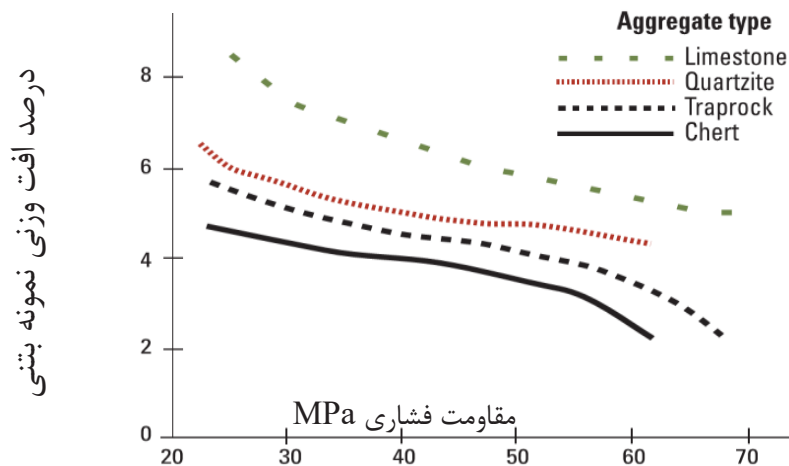
مقاومت در برابر لغزندگی تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر ترافیک، جاده، وسیله نقلیه و محیط قرار دارد که مهم‌ترین آن‌ها بافت سطحی جاده است [۱۱-۱۳]. مهم‌ترین عامل سایش رویه روسازی، عبور ترافیک بر روی روسازی بتنی در مجاورت ذرات ریز و مواد شیمیایی ضد یخ زدگی اتفاق می‌افتد. بافت سطحی جاده در دو مقیاس ریز و درشت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بافت ریز به میزان ناهمواری‌هایی که در سطح سنگ‌دانه‌ها با طول موج‌های کمتر یا مساوی ۰/۵ میلی‌متر گفته می‌شود و بیانی از زبری و صیقلی بودن سنگ‌دانه‌های موجود در مخلوط بتن است. بافت درشت همان ارتفاع بیرون زدگی سنگ‌دانه‌ها از سطح رویه که طول موج ناهمواری‌های آن بین ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر متغیر است. این بافت به دلیل ایجاد کانال‌های باریک، جریان آب سطحی را در هنگام بارندگی به سرعت از سطح جاده به بیرون منتقل می‌کند و از عمل هیدروپلانینگ جلوگیری می‌نماید. بافت درشت برخلاف بافت ریز عامل مقاومت در سرعت‌های بالا بوده و به عنوان عامل پسفافت (هیستریزیس) شناخته می‌شود [۱۰].

در روسازی‌های بتن غلتکی به دلیل کوبیده شدن سطح بتن با غلتک این بافت به شدت کاهش می‌یابد و لذا این نوع روسازی‌ها برای سرعت‌های بالا توصیه نمی‌شود. از این رو در این تحقیق سعی می‌شود به روش‌های مختلف به افزایش مقاومت اصطکاکی این گونه مخلوط‌ها توجه شود تا شاید بتوان راهی برای استفاده از این نوع رویه‌های بتنی در راه‌های پرسرعت استفاده کرد. مقاومت در برابر لغزش در روسازی‌های بتنی تحت تأثیر بافت ریز و بافت درشت روسازی است. که بافت ریز مربوط به خصوصیات مصالح در فاز ملات و بافت درشت وابسته به روش‌های مختلف پرداخت سطحی و ایجاد بافت است [۱۶]. مقاومت سایشی و جلوگیری از صیقلی شدن سطح رویه بتن غلتکی این امکان را به وجود می‌آورد که از این نوع روسازی بدون لایه آسفالت ثانوی در بزرگراه‌ها و آزادراه‌ها با سرعت بالای ۶۰ کیلومتر بر ساعت استفاده کرد. شهاب حسن‌پور بهبود خواص سطحی را در شیوه تراش زدن و شیاراندازی توسط سر مته‌هایی از جنس الماس می‌داند. و همچنین جهت ترمیم روسازی‌های بتن غلتکی و بتن معمولی این روش را پیشنهاد می‌کند [۱۷].

داد (بعد از عبور غلتک و بیره و غلتک چرخ لاستیکی که باعث بالا آمدن شیره سیمان بر روی سطح می‌شود و قبل از عبور غلتک دوچرخ فلزی) و بعد ماسه مرطوب با سطح خشک را بر روی روسازی پاشید و در انتها فرایند غلتک کاری را تا نشانیدن همه دانه‌ها در خمیر سیمان ادامه داد. برای اجرای این فن نیاز به نسبت‌های بالای خمیر به سنگدانه با حفظ اسلامپ صفر است. فن بعدی بافت‌دهی با جارو یا چیتایی است که می‌توان به صورت یک طرفه یا دو طرفه آن را اجرا نمود. این فن در حال حاضر در ایالات متحده در حال اجرا است [۱]. برای این منظور از آنجا که رویه بتن غلتکی بسیار خشن و کم آب است، بعد از اتمام عملیات غلتک کاری سطح رویه بتنی با محلول سخت کننده، مرطوب می‌شود و بلافاصله سطح با ماله برقی پرداخت می‌شود. این عمل باعث تجمع شیره سیمان بر روی سطح رویه بتن غلتکی می‌شود و امکان ایجاد بافت با جارو یا چیتایی‌کشی را فراهم می‌کند. هدف از مقاله حاضر بررسی پایایی و دوام بافت‌های ریز و درشت ایجاد شده در برابر ترافیک عبوری است. بر اساس استاندارد ASTM C ۹۴۴ میزان سایشی که ابراز سایشی در وزن و تعداد دور مشخص بر روسازی ایجاد می‌کند برابر عبور ترافیک حجم سنگین است لذا این استاندارد می‌تواند شبیه‌ساز سایش عبور جریان ترافیک سنگین بر روی روسازی باشد [۲]. از این رو نمونه‌های بتنی با بافت ریز و درشت متفاوت تحت این استاندارد بررسی می‌شوند و تأثیر شکل بافت، جنس و دانه‌بندی مصالح بتنی در میزان سایش نمونه بتنی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- پیشینه تحقیق

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های روسازی بتنی، داشتن مقاومت اصطکاکی کافی است که با داشتن یک رویه مقاوم در برابر سایش تضمین می‌شود [۳ و ۴]. مقاومت سایشی به مقاومت سطح بتن در برابر سایش گفته می‌شود و مقاومت سایشی رویه‌های بتنی به دو پارامتر عمده نوع سنگ‌دانه و مقاومت فشاری بتن مرتبط است [۵]. در این رابطه پارامترهای دیگری همچون مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، کیفیت بافت سطحی و نحوه عمل‌آوری نیز جزء عوامل تأثیرگذار بر مقاومت سایشی برشمرده شده‌اند [۶ و ۷]. این دو اثر بر اساس استاندارد ASTM C ۱۱۳۸ در شکل ۱ نمایش داده شده است. بر اساس این استاندارد بهترین مقاومت سایشی در حالتی که از سنگ‌دانه سخت در بتن پر مقاومت استفاده شده باشد ایجاد می‌شود. از نظر شیمیایی سنگ‌دانه‌هایی که مقاومت کمتری در برابر حل شدگی در اسید داشته باشند از مقاومت سایشی کمتری نیز برخوردارند [۴].



شکل ۱. ارتباط مقاومت فشاری-درصد وزنی مصالح سائیده شده [۵]

1. Compression of compressive strength vs abrasion weight loss percentage

تعیین تأثیر مشخصات مصالح، طرح اختلاط و نوع بافت سطح بر مقاومت لغزیدن روسازی‌های بتنی نشان داد که مصالح ریزدانه بیشترین تأثیر را بر مقاومت لغزیدن دارند. به طوری که استفاده از مصالح ریزدانه طبیعی با درصد سیلیس بالا در روسازی بتنی بیشترین مقاومت لغزیدن را ایجاد می‌کند [۱۹]. به دلیل این که مصالح دانه‌ای حدود ۸۰٪ حجم بتن را به خود اختصاص می‌دهد، نقش مهم‌تری نسبت به خمیر سیمان در مقاومت سایش بتن دارد. همچنین مصالح دانه‌ای در مقایسه با خمیر سیمان سخت شده، مستحکم‌تر بوده و در مقابل سایش مقاوم‌تر عمل می‌کند. مقاومت خمیر نیز بر سختی خمیر و در نهایت مقاومت سایش بتن مؤثر است. از جمله عوامل مؤثر بر مقاومت خمیر می‌توان به نوع چسباننده و منافذ موجود در آن اشاره کرد [۲۰]. تأثیر سختی مصالح دانه‌ای بر مقاومت سایش بتن در صورت عدم چسبندگی کافی آن با خمیر سیمان بی‌اهمیت خواهد بود. در حالی که مقاومت خمیر کافی وجود نداشته باشد باعث جدا شدگی مصالح دانه‌ای از ماتریس سیمان خواهد شد. بنابراین یک خمیر قوی برای مقاومت سایش خوب نقش مهم و حیاتی دارد [۲۰]. مقاومت فشاری بتن بعضاً در عمق و سطح بتن متفاوت است. بدین معنی که اگر بتن دچار جدا شدگی شود و یا به دلیل آب انداختگی نسبت آب به سیمان بتن سطحی با بتن زیرین متفاوت شود، مقاومت فشاری لایه سطحی بتن کاهش می‌یابد از این رو علاوه بر مقاومت بتن باید به نحوه عمل‌آوری و پرداخت بتن نیز توجه ویژه شود [۲۱].

محمد شکرچی زاده و همکاران در بررسی خواص سطحی بتن غلتکی راه‌ها بر این عقیده است که بتن غلتکی دارای سطحی خشن و ناصاف است و خواص سطحی باید از نقطه نظر بافت سطح، همواری سطح و نفوذپذیری در برابر آب بررسی شود. اندازه و نوع سنگ‌دانه‌های موجود در بتن در شکل و بافت سطحی ایجاد شده نقش اصلی را ایفا می‌کند. هر چه اندازه بزرگ‌ترین سنگ‌دانه کوچک‌تر انتخاب شود سطح به دست آمده دارای بافت ریزتر و یکنواخت‌تر خواهد بود [۱۸]. استفاده از ماشین‌های راه‌سازی که در تراکم آسفالت با چگالی زیاد به کار می‌روند به ایجاد سطحی هموار برای روسازی بتن غلتکی کمک می‌کند، بافت غیریکدست سطح روسازی ساخته شده با بتن غلتکی میزان نفوذپذیری آب به داخل بتن را افزایش می‌دهد، که در اثر نفوذ آب به داخل بتن، ساز و کارهای مربوط به یخ زدن و ذوب شدن و دیگر خسارت‌های ناشی از ورود آب به سطح روسازی شروع می‌شوند. با توجه به نتایج به دست آمده نفوذپذیری آب به داخل روسازی‌های بتن غلتکی از روسازی‌های بتن معمولی بیشتر است. اما با این وجود بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نفوذپذیری اثری بر روی روسازی‌های بتن غلتکی ندارد، به ویژه اینکه هیچ گزارشی مبنی بر تخریب این نوع بتن تحت اثر یخ زدن و ذوب شدن حتی پس از گذشت چند دهه از ساخت آن در مناطق سردسیر مانند کانادا وجود ندارد [۱۸].

از بین رفتن اصطکاک، بیشتر تحت تأثیر سایش است. انجام آزمایش‌های سایش بر روی نمونه‌های ملات و بتن توسط ویتنی و همکاران به منظور

بهترین مصالح دانه‌ای در واقع ترکیبی از مصالح دانه‌ای سخت و مقاوم در سایش با مصالح نرم‌تر است. این ترکیب می‌تواند بهترین خروجی برای دستیابی به مقاومت سایشی مناسب ارائه دهد. به عنوان یک مقدار حداقل، پیشنهاد شده است که حداقل ۲۵٪ ماسه مصرفی در روسازی بتنی سیلیسی باشد تا مقاومت اصطکاکی حداقل حاصل گردد [۴]. در این رابطه بر طبق راهنمای اداره تحقیقات بزرگراهی ایالتی (NCHRP)، میزان سختی و توجه به کانی سنگ از جمله مشخصات مصالح دانه‌ای است که تأثیر قابل توجه بر عملکرد اصطکاکی روسازی بتنی دارد. رویه بتنی ساخته شده از کانی‌های سخت عمدتاً از مقاومت سایش خوبی برخوردار است، ولی مطالعات نشان داده است که کانی سخت به سرعت تحت عبور ترافیک صیقلی می‌شود. در عوض بتنی که از مصالح نسبتاً نرم ساخته شده باشد، تحت عبور ترافیک به سرعت ساییده می‌شود اما در برابر صیقل شدن مقاومت می‌کند. از این رو ترکیبی از مصالح دانه‌ای سخت و مقاوم در سایش با مصالح کمی نرم‌تر، بهترین خروجی برای دستیابی به مقاومت لغزیدن خوب در روسازی بتنی را ایجاد می‌کند [۲۲ و ۱۹]. وزارت حمل و نقل انگلستان نیز مشابه این نتیجه را گزارش نموده است، آن‌ها پیشنهاد نمودند که استفاده از چندین نوع مصالح ریزدانه مانند استفاده از ماسه طبیعی با درصد سیلیس بالا همیشه مقاومت لغزیدن بهتری در مقایسه با ماسه نرم یا مصالح ریزدانه شکسته نشان می‌دهد [۱۹].

استفاده از ماسه شکسته در صورتی که آزمایش میکرودیوال بر روی آن انجام شده باشد می‌تواند موفقیت‌آمیز باشد. مقاومت سایش بتن به شدت متأثر از مقاومت فشاری بتن، سختی مصالح دانه‌ای (سنگ‌دانه‌های مصرفی)، سختی خمیر سیمان، چسبندگی بین مصالح دانه‌ای و خمیر سیمان، روش‌هایی که برای پرداخت نهایی سطح به کار برده می‌شوند و در نهایت روش‌هایی که برای عمل‌آوری بتن استفاده می‌شوند است [۲۳ و ۲۴]. بررسی خواص مکانیکی روکش بتن غلتکی حاوی پسماندهای زغال سنگ و پودر سنگ آهک به عنوان جایگزینی جزئی سیمان نتایج نشان داد که استفاده از این ضایعات باعث افزایش نسبت آب به سیمان می‌شود، نسبت مواد و ترکیب پودر سنگ آهک و خاکستر زباله‌های زغال سنگ به خاصیت مکانیکی بالاتری منجر شده است، به ویژه در سن‌های ۲۸ و ۹۰ روز [۲۵]. راثو و همکاران مقاومت سایشی و خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی با سرباره کوره آهن‌گدازی را مورد مطالعه قرار داد و نتایج به دست آمده نشان داد که

جایگزینی سیمان با شصت درصد سرباره باعث کاهش مقاومت فشاری، استحکام خمشی و مقاومت کششی در سن ۳ روز می‌شود، اما پیشرفت مداوم و معنی‌داری در مقاومت در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مشاهده شده است. آن‌ها همچنین دریافتند که مقاومت در برابر سایش در بتن غلتکی حاوی سرباره به عنوان ماده افزودنی، بدون توجه به میزان سرباره، تحت تأثیر مقاومت فشاری آن است [۲۶]. همچنین آن‌ها نشان دادند که مقاومت سایشی بتن غلتکی مستقل از سرباره بوده و علاوه بر مقاومت فشاری به شدت تحت تأثیر استحکام مقدار ماسه مصرفی در بتن است. راثو و همکاران نشان دادند که با افزایش سن عمل‌آوری، مقاومت سایشی بتن غلتکی افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها همبستگی آماری زیادی بین مقاومت سایشی بتن غلتکی با مقاومت فشاری را گزارش نمودند و اظهار داشتند که این همبستگی قوی آماری بین مقاومت سایشی با مقاومت کششی و خمشی وجود ندارد [۲۷]. راثو و همکاران در تحقیق دیگری با اضافه کردن مقادیر متفاوت خاکستر بادی و ساخت بتن غلتکی با سه نوع ماسه طبیعی گرد گوشه رودخانه‌ای، ماسه کارخانه‌ای و ترکیب این دو به میزان مساوی، مقاومت سایشی بتن را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها دریافتند که اضافه نمودن خاکستر بادی باعث افزایش مقاومت سایشی می‌شود. همچنین نتایج نشان داد مقاومت سایشی با مقاومت فشاری رابطه قوی دارد و مقاومت سایشی نمونه‌هایی که از ماسه ترکیبی استفاده می‌کردند از دو نمونه دیگر بیشتر است [۲۸ و ۲۹].

از بررسی منابع مختلف نتیجه می‌شود که بررسی توأمان پایای مقاومت سایشی بافت درشت و ریز که نقش اساسی در بهبود مقاومت لغزندگی رویه‌های بتن غلتکی دارند، می‌توان به عنوان نوآوری این تحقیق به حساب آید. همچنین بررسی بافت‌های درشت ایجاد شده بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی علاوه بر اینکه توانایی اجرا شدن در شرایط میدانی را تا حدودی نشان می‌دهند می‌توانند در انتخاب بافت مناسب از نظر دوام در برابر سایش شبیه‌سازی شده از دیگر نوآوری‌های این تحقیق به حساب آید. در انتها پیشنهاد طرح اختلاط بهینه برای مخلوط‌های بتن غلتکی به منظور نیل به مقاومت سایشی مناسب می‌تواند نوآوری دیگر این تحقیق باشد.

۳- مصالح و روش انجام آزمایش

۳-۱- مصالح مورد استفاده و تهیه طرح‌های اختلاط بتن غلتکی

جمع‌بندی مطالعات گذشته نشان داد که نوع و کانی مصالح ریزدانه و همچنین مقاومت فشاری تأثیر زیادی بر مقاومت سایشی رویه‌های بتنی معمولی دارند. در این تحقیق به منظور بررسی پایایی مقاومت سایشی با

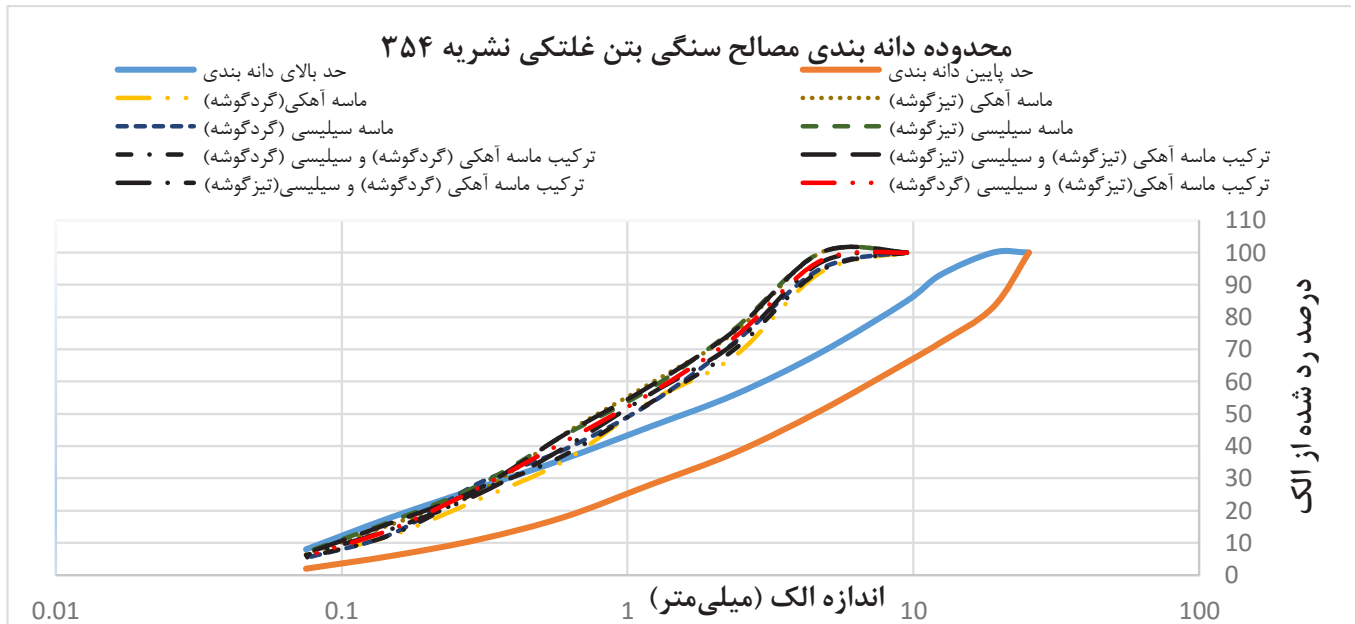
می‌دهد. آنالیز شیمیایی بر چهار نوع ماسه اصلی برای تعیین میزان اکسید سیلیس و اکسید کلسیم موجود در آن‌ها انجام شده است. جدول شماره ۱ آنالیز شیمیایی ماسه‌های مورد استفاده را نمایش می‌دهند. اجزا تشکیل دهنده دیگر طرح‌های اختلاط بتن غلتکی نظیر شن، سیمان و آب در تمام طرح‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. جدول ۲ مشخصات سیمان مورد استفاده را نشان می‌دهد.

فرض ثابت نگه داشتن مقاومت فشاری از چهار نوع ماسه سیلیسی، آهکی به صورت طبیعی و شکسته استفاده شده است که با ترکیب آن‌ها با یکدیگر به میزان وزنی مساوی چهار نوع ماسه دیگر به دست می‌آید. در این پژوهش جمعاً هشت نوع طرح اختلاط که هر کدام از آن‌ها یکی از انواع ماسه‌های مذکور را نمایندگی می‌کند، طراحی شده است. نمودار شماره ۲ دانه‌بندی هشت نوع ماسه مورد استفاده در طرح‌های اختلاط بتن غلتکی را نمایش

جدول ۱. جدول آنالیز شیمیایی ماسه‌های مورد استفاده در طرح‌های اختلاط هشت گانه

Table 1. Table of chemical analysis of sands used in eight mixing schemes

ردیف	نوع ماسه	اکسید سیلیس SiO_2	اکسید کلسیم CaO	عناصر دیگر
۱	ماسه آهکی (گرد گوشه)	٪ ۲۲/۳	٪ ۵۶/۴	٪ ۲۱/۳
۲	ماسه آهکی شکسته (تیز گوشه)	٪ ۲۱/۷	٪ ۵۸/۴	٪ ۱۹/۹
۳	ماسه سیلیسی (گرد گوشه)	٪ ۸۶/۳	٪ ۴/۵۲	٪ ۹/۱۸
۴	ماسه سیلیسی شکسته (تیز گوشه)	٪ ۷۹/۵	٪ ۷/۷۴	٪ ۱۲/۷۸
۵	پودر سنگ	٪ ۱/۹۳	٪ ۸۳/۳	٪ ۱۴/۷۷



شکل ۲. نمایش منحنی دانه‌بندی ماسه‌های مورد استفاده در طرح‌های اختلاط بتن غلتکی

Fig. 2. Shows the aggregate grading curve used in roller compacted concrete mixing designs

جدول ۲. مشخصات مقاومتی و مهندسی سیمان مورد استفاده در طرح‌های اختلاط بتن غلتکی

Table 2. Strength and engineering specifications of cement used in roller compacted concrete mixing designs

نوع سیمان	غلظت نرمال %	زمان گیرش اولیه min	زمان گیرش نهایی min	بلین سیمان cm ² /gr	چگالی ویژه سیمان gr/m ³
۴۲۵-۱ دلیجان	۲۲/۸	۱۵۵	۲۱۰	۳۳۸۵	۳/۰۸

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده بر اساس الزامات استاندارد ملی ایران به شماره ۱۶۹۲

Table 3. Chemical composition of cement used in accordance with the requirements of National Standard No. 1692

نوع سیمان	SiO ₂ درصد	CaO درصد	Fe ₂ O ₃ درصد	Al ₂ O ₃ درصد	MgO درصد	SO ₃ درصد	K ₂ O درصد	Na ₂ O درصد
دلیجان	۲۰/۶۴	۶۴/۰۱	۴/۲۸	۴/۵۸	۱/۰۹	۱/۷۴	۰/۷۴	۰/۵۴

جدول ۴. نتایج آزمون مقاومت فشاری ملات سیمان تیپ ۱-۴۲۵ مورد استفاده در طرح های اختلاط

Table 4. Results of compressive strength test of cement mortar type I-425 used in mixing designs

نوع سیمان	مقاومت فشاری نمونه مکعبی ساخته شده با ملات Kg/cm ²			شماره استاندارد
	۲ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	
تیپ ۱-۴۲۵ دلیجان	۲۱۷	۳۷۵/۵	۴۷۰	ASTM C109

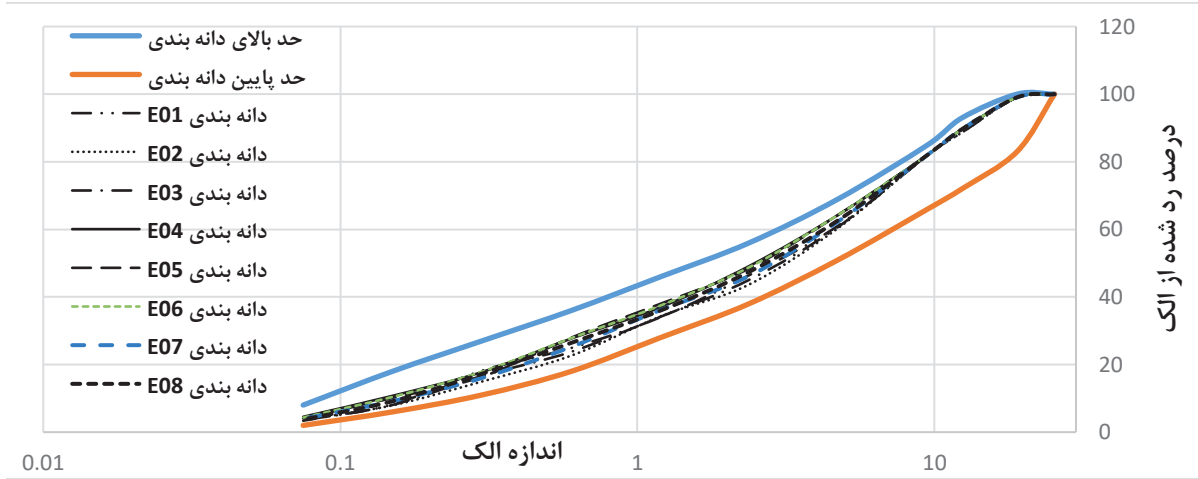
طرح اختلاط از ترکیب ماسه‌های به کار رفته در آن طرح اختلاط انتخاب شود. بر این اساس اگر ماسه به کار رفته آهکی باشد حروف اختصاری CA و اگر سیلیسی باشد حروف اختصاری SI استفاده شد. اگر ماسه طبیعی باشد N و اگر شکسته باشد C استفاده شد. همچنین درصد ماسه نیز از هر نوع در ادامه ذکر شده است.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود نسبت‌های اختلاط با ثابت بودن سیمان و فرض یکسان شدن زمان وی بی تعیین شدند که همگی در این جدول نمایش داده شده‌اند. در ادامه به منظور افزایش اصطکاک از فن ایجاد بافت بر روی نمونه‌های مختلف به گونه‌ای که در مقدمه تشریح شد استفاده شد. از این رو از هر طرح اختلاط، ۷ نمونه دوتایی ساخته شد و همانند جدول ۶ بافت سازی شد.

در جدول ۳ ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده بر اساس الزامات استاندارد ملی ایران به شماره ۱۶۹۲ ارائه شده است و همچنین به منظور کنترل سیمان مصرفی مقاومت فشاری نمونه مکعبی سیمان مطابق با استاندارد ASTM C109 در جدول ۴ نشان داده شده است.

۳-۲- روش انجام آزمایش

به منظور ساخت طرح‌های اختلاط هشت‌گانه، در مرحله اول مصالح مختلف مطابق جدول ۵ با هم مخلوط شدند تا منحنی دانه‌بندی نهایی در محدود مجاز دانه‌بندی نشریه ۳۵۴، مطابق شکل ۳ قرار گیرند. برای نام‌گذاری طرح‌های اختلاط مختلف به دلیل این که عمده تفاوت طرح‌های اختلاط، تفاوت در جنس و ساختار مصالح ریزدانه (ماسه) بود سعی شد عنوان



شکل ۳. منحنی دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده در طرح های اختلاط

Fig. 3. Aggregate grading curve of stone materials used in mixing designs

جدول ۵. اجزا تشکیل دهنده مخلوط تازه بتن غلتکی در طرح های اختلاط هشتگانه

Table 5. Mixing design proportions of fresh roller compacted concrete

Ca50CSI50N	Ca50NSi50C	Ca50CSI50C	Ca50NSi50N	Ca100C	Si100C	Ca100N	Si100N	عنوان طرح مواد سازنده
۴۶۴	۴۵۶	۴۶۶	۴۵۴	۴۵۴	۴۶۰	۴۵۳	۴۵۶	درشت دانه نخودی ۴/۷۵ تا ۹/۵۰
۱۶۳	۱۶۰	۱۶۴	۱۶۰	۱۵۹	۱۶۲	۱۵۹	۱۶۰	درشت دانه بادامی ۹/۵۰ تا ۱۹/۵۰
۶۴۷/۵ +	۶۳۵/۵ +	۶۵۰ +	۶۳۳ +	۱۲۶۴/۲۵	۱۲۸۲	۱۲۶۳	۱۲۷۲	ریزدانه ماسه و فیلر ۰ تا ۴/۷۵
۶۳۷/۵	۶۳۵/۵	۶۵۰	*۶۳۳					
۱۲۸	۱۴۴	۱۲۸	۱۲۸	۱۴۴	۱۴۴	۱۴۴	۱۴۴	حجم آب
۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	عیار سیمان
۲۳۷۷	۲۳۵۱	۲۳۷۸	۲۳۶۶	۲۳۳۴	۲۳۶۸	۲۳۳۹	۲۳۵۲	چگالی (Kg/m ³)
۳۹	۳۴	۳۷	۳۸	۳۶	۳۵	۳۵	۳۶	زمان وی بی (ثانیه)

* یعنی از دو نوع ماسه به اندازه های ذکر شده استفاده شده است.

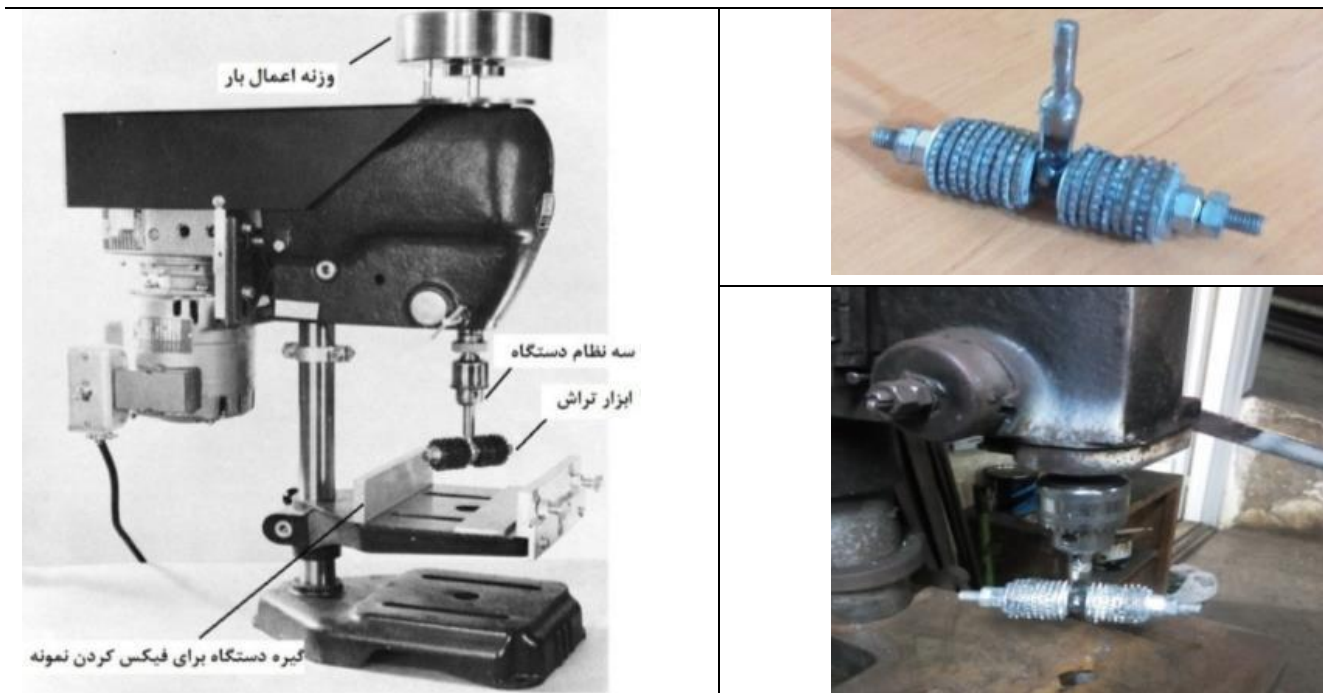
جدول ۶. بافت‌های مختلف ایجاد شده در این تحقیق

Table 6. Different macro textures created in this research

بافت نقش اندازی		
با طوری به ابعاد $4 \times 4 \text{ cm}^2$ به ضخامت ۴ میلی‌متر		با طوری به ابعاد $3 \times 3 \text{ cm}^2$ به ضخامت ۳ میلی‌متر
		
بافت دانه نشانی		
دانه نشانی با سنگ‌دانه $۹/۵۰ - ۴/۷۵$	دانه نشانی با سنگ‌دانه $۴/۷۵ - ۲/۳۸$	دانه نشانی با سنگ‌دانه $۲/۳۸ - ۱/۱۹$
		
برومینگ یا چیتایی کشی		
دو طرفه		یک طرفه
		

قرار داده شد و به اندازه یک سوم زمان باقی‌مانده ویبره شد. برای ایجاد بافت بر روی نمونه‌های برومینگ تفاوت اندکی در روند بافت‌دهی ایجاد شد بدین صورت که بعد از ویبره شدن به اندازه زمان وی بی، نمونه با برس سیمی نرم به صورت یک طرفه و دو طرفه بافت‌دهی شد. بعد از خروج نمونه‌ها از قالب، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز طبق استاندارد ASTM C1۹۲M در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد در حوضچه آب نگهداری و عمل‌آوری شدند [۳۰]. در انتها به منظور سنجش پایایی بافت ریز و درشت ایجاد شده بر روی نمونه‌های بتنی، از آزمون سایش بر اساس توصیه‌ها و الزامات استاندارد ASTM C۹۴۴ مطابق شکل ۴ بهره گرفته شد [۲].

برای ساخت نمونه، بتن در قالب‌های مکعبی ۲۰ سانتی‌متری ریخته شد به طوری که ارتفاع نمونه در حدود ۱۰ سانتی‌متر شود. در ادامه با اعمال سربار مناسب و ویبره نمودن نمونه‌ها به اندازه زمان وی بی مربوط به هر طرح اختلاط، نمونه مورد نظر ساخته شد. برای ایجاد بافت‌های نقش اندازی بعد از سپری شدن دو سوم زمان ویبره، دستگاه ویبره خاموش و سربار برداشته شد در این زمان شابلون مورد نظر روی نمونه‌ها قرار گرفت بعد سربار بر روی شابلون قرار داده شد و به میزان یک سوم باقی‌مانده ویبره شد. برای ساخت نمونه‌های دانه نشانی نیز همانند روش نقش اندازی اقدام شد با این تفاوت که به جای شابلون سنگ‌دانه بر روی بتن پاشیده شد و بعد سربار بر روی آن‌ها



شکل ۴. دستگاه دریل معرفی شده توسط استاندارد ASTM C944 سمت چپ و نمونه دستگاه استفاده شده در این تحقیق در سمت راست

Fig. 4. Abrasion drill machine introduced by ASTM C944 standard on the left and the machine used in this research on the right

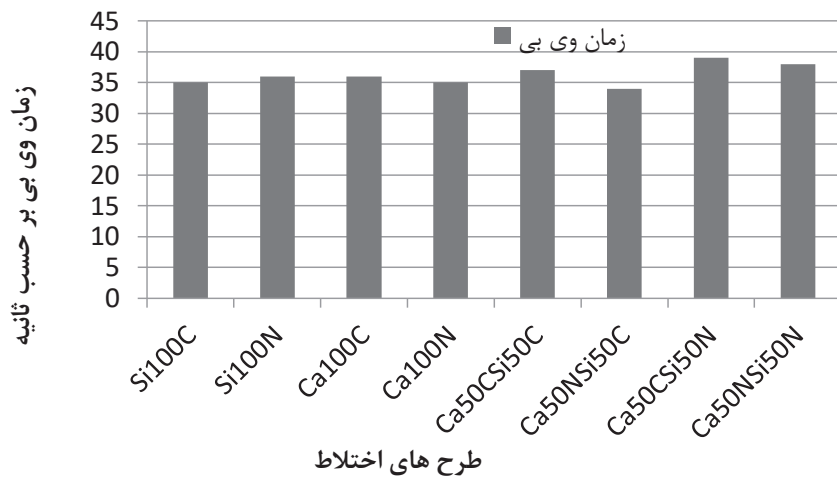
نشریه ۳۵۴ که خود برگرفته از استاندارد ۲۰۷.۵R-۹۹ ACI است به دست آمد [۲۷]. نتایج وی بی طرح‌های مخلوط در نمودار شکل ۵ نمایش داده شده است. زمان‌های به دست آمده در محدوده توصیه شده آیین‌نامه قرار دارد. آیین‌نامه زمان بین ۳۵ تا ۶۰ ثانیه را برای روسازی‌های بتن غلتکی مناسب می‌داند. بر اساس شکل ۵ زمان‌های وی بی هر یک از طرح‌های مخلوط تقریباً در یک محدوده قرار گرفته‌اند. زمان وی بی به دست آمده برای طرح مخلوط CA5۰CSI5۰N (ترکیب ماسه آهکی طبیعی شکسته و ماسه سیلیسی طبیعی) دارای بیشترین مقدار است. بدین معنی که این مخلوط از بقیه سفت‌تر است. زمان وی بی، به نوعی نشانگر کارایی مخلوط است. در این رابطه، با توجه به این نکته که در مخلوط‌ها با اسلامپ صفر، مقدار حجم خمیر (مجموع سیمان و آب) بیشتر از مقدار نسبت آب به سیمان می‌توان در میزان کارایی مخلوط تأثیر داشته باشد لذا در این تحقیق با توجه به ثابت نگه داشتن مقدار سیمان، مقدار آب را به مقدار جزئی تغییر دادیم تا زمان وی بی مخلوط‌ها تقریباً یکسان شوند.

بر اساس توصیه‌ها و الزامات استاندارد ASTM C 944 ساییدگی نمونه را با اعمال یک سربار نرمال ۹۸ نیوتنی برای مدت محاسبه شده (معادل ۴۰۰ دور) به نمونه بتنی اعمال می‌شود. این مقدار سایش در سه مرحله ۴۰۰ دوری و در مجموع ۱۲۰۰ دور بر روی نمونه با استفاده از یک سر ویژه مضرس که در شکل ۴ مشخص است اعمال می‌شود و بعد از هر مرحله، جرم نمونه ساییده شده با وزن کردن نمونه با ترازوی دقیق با دقت ۰/۱ گرم تعیین می‌شود. این کار را باید سه بار تکرار کرد و در هر مرحله وزن ساییده شده را محاسبه نمود. از تفاضل وزن نمونه قبل و بعد از سایش می‌توان به میزان سایش رسید. هر چه میزان افت وزنی نمونه تحت میزان سایش معین کمتر باشد مقاومت سایشی نمونه بیشتر خواهد بود.

۴- تحلیل و تفسیر نتایج

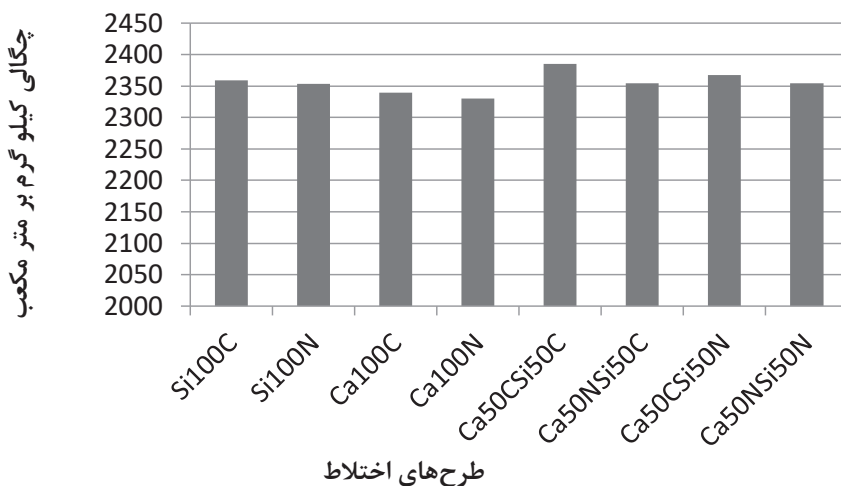
۴-۱- تعیین زمان وی بی طرح‌های مختلف اختلاط

به منظور ساخت نمونه‌های مختلف طرح اختلاط، زمان وی بی بر اساس



شکل ۵. نمایش زمان وی بی به دست آمده از هر یک از طرح های مخلوط بتن غلتکی

Fig. 5. Ve Be time results obtained from each of the roller compacted concrete mix designs



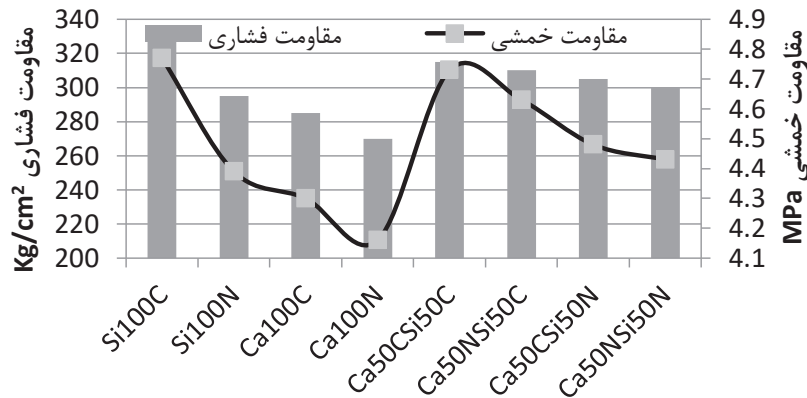
شکل ۶. نمایش چگالی هر یک از طرح های مخلوط تحقیق

Fig. 6. shows the density of each of the mix designs

کمترین مقدار چگالی است. اختلاف بین حداقل و حداکثر حدود ۵۵ کیلوگرم بر متر مکعب معادل ۲ درصد متوسط چگالی طرح های اختلاط است. روند افزایش مقدار چگالی در طرح های اختلاط نشان می دهد که با افزایش مقدار چگالی مقاومت سایشی نیز افزایش می یابد. در طرح هایی که از ماسه ترکیبی استفاده شده اند اکثراً از مقدار چگالی بالاتری برخوردار می باشند. وجود سنگ دانه های ترکیبی موجب بهبود در تراکم بتن تازه همچنین مقاومت فشاری و سایر پارامترهای وابسته شده است.

۴-۲- بررسی چگالی طرح های مختلف اختلاط

در ادامه چگالی توده های مخلوط های ساخته شده در شکل ۶ نمایش داده شده است. طرح اختلاط CA50CSI50C که در آن از ترکیب ماسه آهکی شکسته و ماسه سیلیسی شکسته با نسبت های یکسان استفاده شده است، بیشترین مقدار چگالی توده ای را نشان می دهد. هر چه مخلوط فضای خالی کمتری داشته باشد مقدار چگالی بالاتری را نشان می دهد. طرح CA50C دارای SI50C در شکل ۶ دارای بالاترین چگالی و طرح CA100N دارای



شکل ۷. نمایش مقاومت فشاری و خمشی ساخته شده با هر یک از طرح های مخلوط

Fig.7. The compressive and flexural strengths made with each of the mixed designs

در خصوص مقاومت خمشی نمونه‌های اندازه‌گیری شده تفاوت فراوانی در روند تغییرات آن نسبت به روند تغییرات مقاومت فشاری مشاهده نمی‌شود. و نتایج مقاومت خمشی رفتاری مشابه نتایج مقاومت فشاری را نشان می‌دهد که در مقایسه با منابع مختلف این رفتار قابل پیش‌بینی بوده و بر یافته‌های پیشین مطابقت دارد.

۴-۴- بررسی پایایی مقاومت سایشی طرح‌های مختلف اختلاط

به منظور بررسی مقاومت سایشی طرح‌های مختلف اختلاط و بافت‌های مختلف، بر اساس استاندارد ASTM C944 در سه مرحله و هر مرحله ۴۰۰ دور فک سایش دهنده با سربرار مشخص بر روی نمونه‌ها می‌چرخد و با وزن نمودن نمونه قبل و بعد از سایش، میزان سایش نمونه‌ها در هر مرحله تعیین شدند. بررسی مقاومت سایشی مخلوط‌های مختلف در این بخش به سه طریق بصری، از منظر طرح اختلاط و از منظر بافت مورد توجه است. طبیعی است هر چه میزان سایش کمتر باشد مخلوط از منظر طرح اختلاط یا بافت ایجاد شده دارای پایایی و دوام بیشتری است.

به منظور مقایسه بصری مقاومت سایشی مخلوط‌های مختلف شکل ۸ در ادامه ارائه شده است.

همان‌طور که مشخص است بافت‌های دانه نشانی شده به شدت در برابر سایش در مقایسه با دیگر بافت‌های برومینگ و نقش اندازی ضعیف‌تر بوده و از سایش بیشتری برخوردار است. این یافته از قبل هم پیش‌بینی می‌شد

۴-۳- ارزیابی مقاومت فشاری طرح‌های مختلف اختلاط

مقاومت فشاری و خمشی طرح‌های اختلاط مختلف بر اساس استانداردهای ASTM C ۳۹ و ASTM C ۷۸ – ۲۰۰۲ در ادامه در شکل ۷ نشان داده شده‌اند [۳۳ و ۳۴]. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های سیلندری استاندارد تهیه شده در هر یک از طرح‌های اختلاط این تحقیق میانگین دو نمونه مختلف است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، طرح مخلوط SI100C که از ماسه سیلیسی شکسته در آن استفاده شده است بیشترین مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. در مقابل طرح مخلوط CA100N که از ماسه آهکی طبیعی در آن استفاده شده است کمترین مقدار مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. با مقایسه طرح مخلوط حاوی ماسه سیلیسی مشخص است که مقاومت فشاری نمونه‌های درست شده از ماسه شکسته بیشتر از نمونه‌های درست شده از ماسه طبیعی است و این روند در ماسه آهکی نیز مشاهده می‌شود.

از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که با اختلاط دو ماسه مختلف سیلیسی و آهکی با هم، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش بسیار بیشتر از مقدار مقاومت فشاری است که توسط هر کدام از انواع ماسه حاصل شده است. نکته قابل تأمل در روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ماسه ترکیبی در مقایسه با نمونه‌های حاوی ماسه یک دست نشان می‌دهد که با ترکیب چند نوع ماسه با هم مقاومت فشاری کمتر به درصد شکستگی مصالح وابسته خواهد شد.

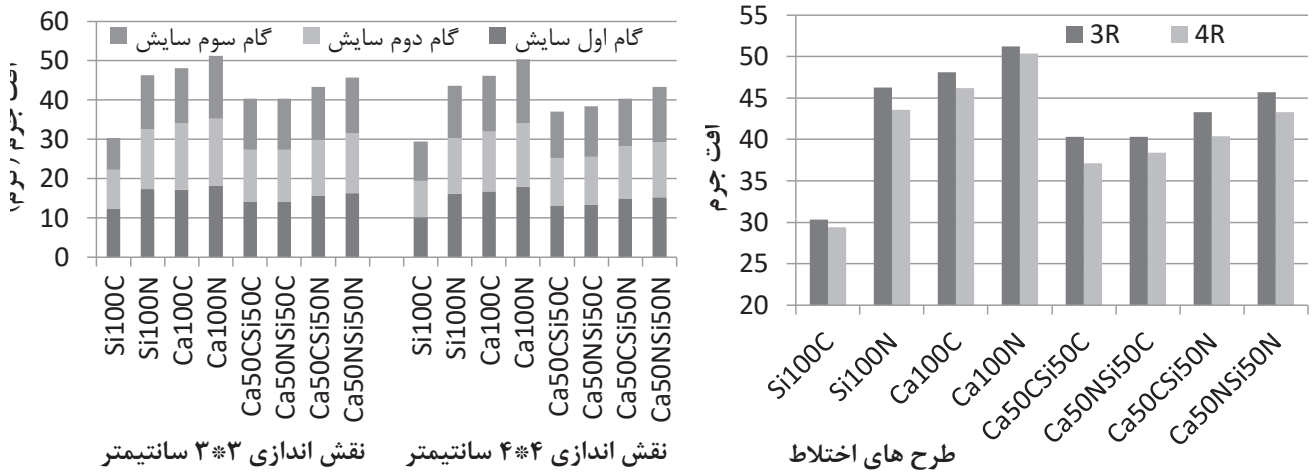


شکل ۸. نمایش نمونه‌ها بعد از آزمون سایش

Fig. 8. Samples views after abrasion test

بافت‌های مختلف است که می‌تواند به عنوان تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد. بررسی‌های بصری نشان داد که بافت نقش اندازی کمترین ساییدگی را بین دیگر بافت‌ها دارد. بافت برومینگ به صورت یک طرفه و دو طرفه نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در تصاویر مشخص است ساییدگی این نوع بافت تقریباً مانند بافت نقش اندازی است. نکته با اهمیت در خصوص این نوع بافت اینکه به دلیل پایین بودن میزان خمیر در بتن غلتکی ایجاد این نوع بافت مستلزم فرایند خاصی است که در مقدمه بدان اشاره شد ولی بررسی بصری نشان داد که ساییدگی بافت برومینگ به هیچ وجه از زبری سطح نمی‌کاهد و کنده شدن بعضی از دانه‌ها که به دلیل جارو یا گونی کشی که به صورت نمایان بر روی این سطح وجود دارد زبری جدیدی را ایجاد می‌کند. تفاوت این بافت با بافت دانه نشانی اینکه کنده شدگی دانه‌ها در این حالت بسیار کمتر از بافت دانه نشانی است.

زیرا تمام سنگ‌دانه‌های اضافه شده به سطح نمونه در خمیر سیمان فرو نرفته و از نظر چسبندگی خمیر به سنگ‌دانه از وضعیت نسبتاً ضعیفی برخوردار بودند. اما باید توجه داشت که کنده شدن سنگ‌دانه‌ها به معنی کاهش زبری سطح نیست. مشاهدات نمونه‌ها قبل و بعد از سایش نشان داد با کنده شدن سنگ‌دانه‌های نشانداده شده از روی سطح بتن، مجدداً سطح بتن به دلیل خالی شدن نقاطی که قبلی با سنگ‌دانه پر شده بود دارای ناهمواری مناسبی بوده و در واقع با این فن بعد از کنده شدن دانه‌ها مجدداً بافت احیا می‌شود. این احیا بافت در نمونه‌هایی که از دانه‌های بزرگ‌تر برای دانه نشانی در آن‌ها استفاده می‌شده بیشتر مشخص بود. بافت‌های نقش اندازی نسبت به دیگر بافت‌ها از تغییرات کمتری در سطح برخوردار است. سطح روسازی نقش انداز شده به دلیل شیاردار بودن بهتر می‌تواند آب را هدایت کند و از هیدروپلانینگ جلوگیری کند. نکته مغفول مانده در این تحقیق بررسی آلودگی صوتی بین



شکل ۹. مقایسه نتایج سایش دو بافت نقش اندازه در برابر ترکیب‌های مختلف طرح اختلاط بتن

Fig. 9. Comparison of abrasion results of two stamping macro textures against different combinations of concrete mixing design

اختلاط غیرترکیبی به جزء طرح اختلاط ماسه سیلیسی شکسته بیشتر است. برای مثال اگر ماسه سیلیسی طبیعی را با ماسه آهکی طبیعی مخلوط کنیم (طرح اختلاط $CA_{50}NSi_{50}N$) مخلوط حاصل دارای مقاومت سایشی بیشتر نسبت به هر یک از طرح‌های اختلاط ماسه سیلیسی طبیعی، آهکی شکسته و طبیعی است.

در ادامه سه نوع بافت دانه نشانی مختلف با هم بررسی خواهند شد. این سه نوع بافت در مقابل طرح‌های مختلف اختلاط در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.

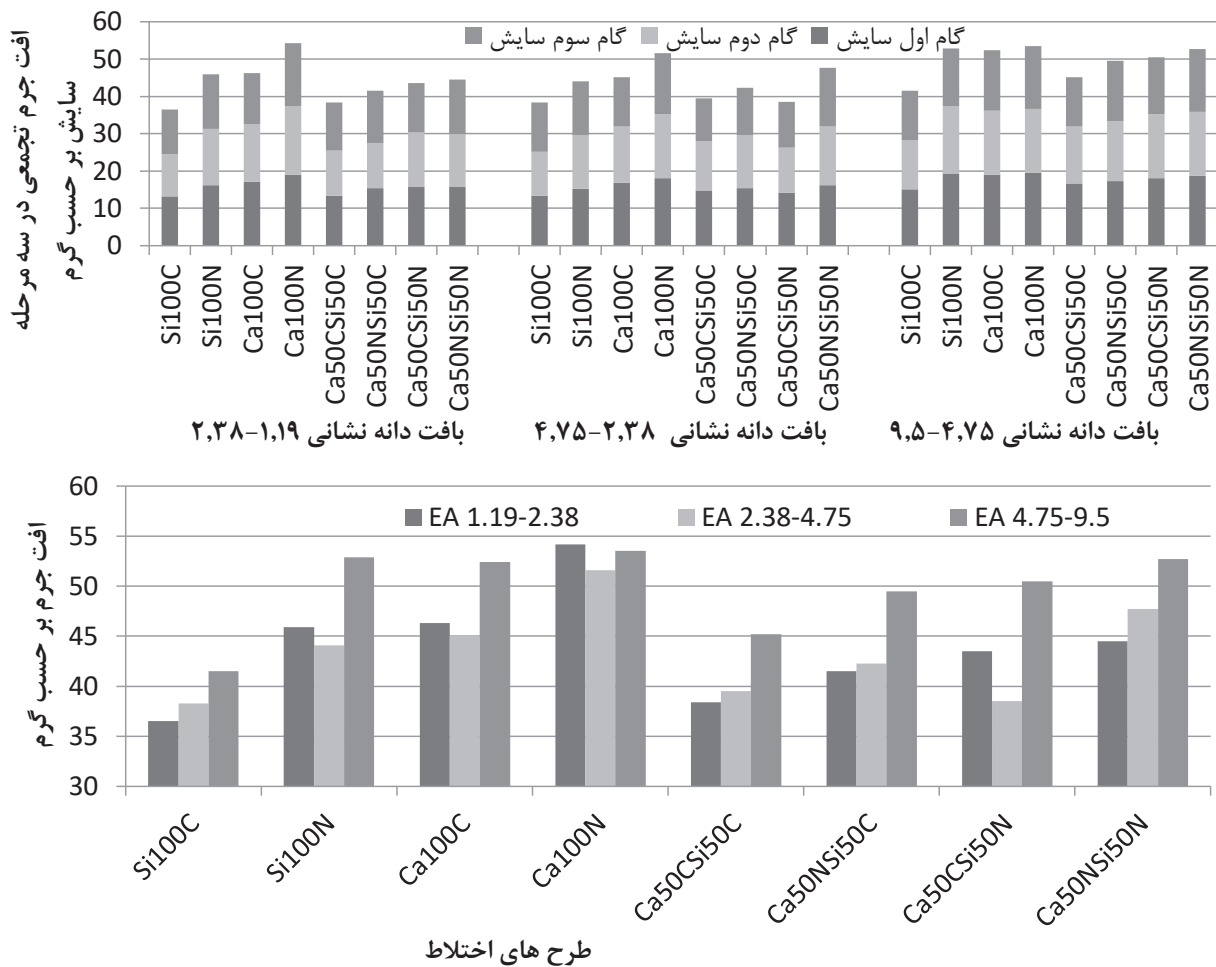
بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، از منظور بافت‌های مختلف دانه نشانی، بافت‌های دانه نشانی شده در محدوده دانه‌های $2/38-4/75$ و $1/19-2/38$ میلی‌متر تفاوت چندانی از نظر مقاومت سایشی با هم ندارند و این دو بافت عموماً در تمام ترکیبات مختلف طرح اختلاط از نظر مقاومت سایشی بهتر از بافت دانه نشانی شده با دانه‌هایی در محدوده $4/75-9/5$ میلی‌متر است. از نظر بصری با توجه به حجم محدود خمیر در این‌گونه بتن‌ها، پیش‌بینی می‌شد که دانه‌های درشت در محدوده $4/75-9/5$ میلی‌متر خیلی در رویه بتن غلظتی وارد نشوند و مقاومت ضعیفی را با سطح بتن ایجاد کنند. که نتایج آزمایش‌ها سایش نیز این مهم را اثبات می‌کند. به عنوان کار تحقیقاتی آینده شاید بتوان این نقص را با پاشش یک لایه قیر امولسیون بعد از اتمام فرایند دانه نشانی بر روی روسازی بتنی بهبود بخشید این ایده از یک منظر باعث افزایش چسبندگی

در ادامه مقاومت سایشی هر کدام از بافت‌های مختلف به تنهایی از نظر تفاوت در طرح اختلاط مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای این منظور بافت نقش اندازه در دو حالت ۳ در ۳ و ۴ در ۴ سانتی‌متر در شکل ۹ نشان داده شده است.

در سمت چپ شکل ۹، دو بافت نقش اندازه به تفکیک اندازه چشمه‌ها و به تفکیک میزان سایش در هر کدام از مراحل سه گانه سایش نمایش داده شده است. در سمت راست برای اینکه مقایسه بهتری بین این دو بافت امکان‌پذیر باشد، مقدار نهایی سایش برای هر دو بافت در کنار هم ترسیم شده‌اند.

از نظر مقایسه بین دو بافت نقش اندازه، بافت ۴ در ۴ سانتی‌متر نسبت به بافت ۳ در ۳ سانتی‌متری از افت کمتری در آزمایش سایش برخوردار است. دلیل این موضوع آن است که تراکم بافت در واحد سطح در بافت ۳ در ۳ بیشتر است و لذا برخورد فک سایشی با لبه‌های بافت بیشتر از بافت ۴ در ۴ سانتی‌متری خواهد بود و مصالح بیشتری ساییده خواهد شد.

از نظر مقایسه بین ترکیبات مختلف طرح اختلاط مشخص است که وجود ماسه سیلیسی شکسته در هر ترکیب می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت سایشی را افزایش دهد. باید توجه داشت که ترکیب ماسه‌ها از جنس‌های مختلف سیلیسی و آهکی در حالات مختلف شکسته و طبیعی باعث افزایش مقاومت سایشی رویه در این نوع بافت شده است به گونه‌ای که مقاومت سایشی طرح‌های اختلاط ترکیبی از مقاومت سایشی طرح‌های



شکل ۱۰. نتایج افت جرم ناشی از سایش برای بافت‌های ایجاد شده به روش دانه نشانی

Fig. 10. Results of abrasion mass loss due to abrasion seeding macro texturers

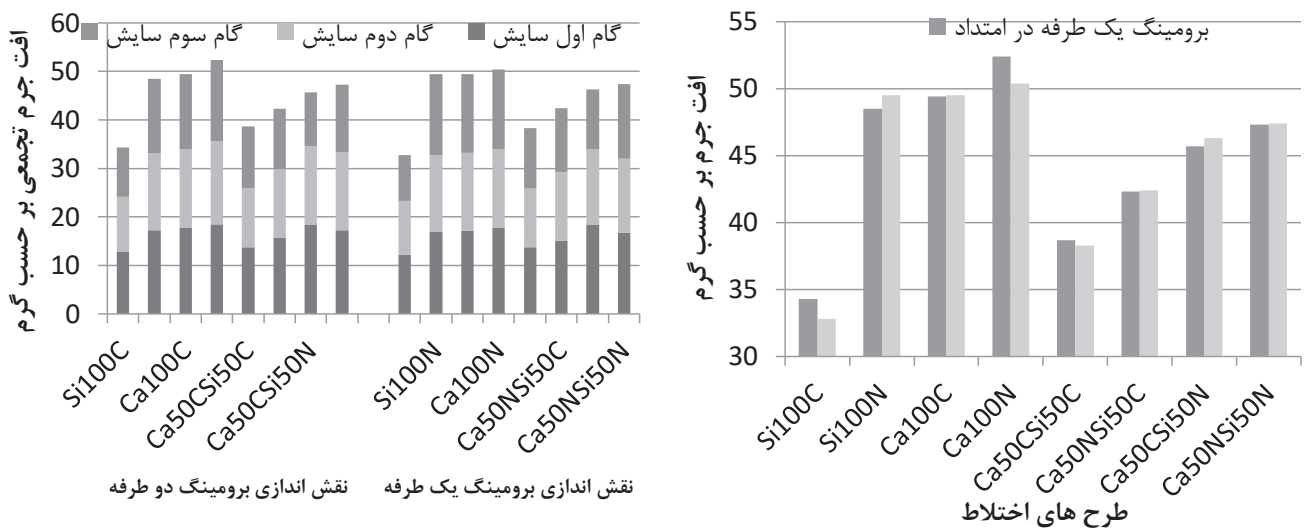
اختلاط ترکیبی با توجه به قیمت تمام شده و کارایی در برابر سایش، بیشترین بازدهی را در برابر سایش داشته باشند.

دو بافت نهایی که در این تحقیق بر روی روسازی بتن غلتکی ایجاد شد، بافت شیاراندازی به روش برومینگ (چارو زنی) یا چیتایی کشی است که به صورت یک طرفه و دو طرفه انجام شد و نتایج آن در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

با بررسی این دو بافت مشخص می‌شود که مقاومت سایشی این دو بافت تفاوت چندانی با هم نمی‌کند. از نظر سایش در گام‌های مختلف به نظر می‌رسد روند سایش در هر سه گام تقریباً با یک روند مشخص رو به کاهش است بدین معنی که در گام اول بیشترین سایش و در گام سوم کمترین سایش را شاهد هستیم. عمده تغییرات در مقادیر سایش مربوط

بهتر دانه‌ها به سطح و به هم می‌شود و از طرفی پاشش قیر امولسیون بر روی سطح بتن غلتکی باعث بهبود عمل‌آوری مخلوط بتنی می‌گردد و به دلیل وجود بافت دانه‌ای بر روی سطح بتن از کاهش اصطکاک نیز جلوگیری خواهد شد.

با بررسی مراحل سه گانه سایش در نمودار فوقانی شکل ۱۰ مشخص می‌شود که میزان سایش در مرحله اول از دو مرحله دیگر بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که بخش اعظمی از دانه‌ها در این مرحله از سطح رویه بتن جدا شده‌اند. همچنین با بررسی طرح‌های مختلف اختلاط در این روش بافت‌دهی مشخص شد که طرح اختلاط حاوی سیلیس شکسته و در ادامه طرح‌های اختلاط ترکیبی بهترین مقاومت را در برابر سایش از خود نشان می‌دهند. با توجه به قیمت مصالح مختلف در بازار شاید استفاده از طرح‌های



شکل ۱۱. نتایج افت جرم ناشی از سایش برای بافت های برومینگ (جاروکشی یا چیتایی کشی) یک طرفه و دو طرفه

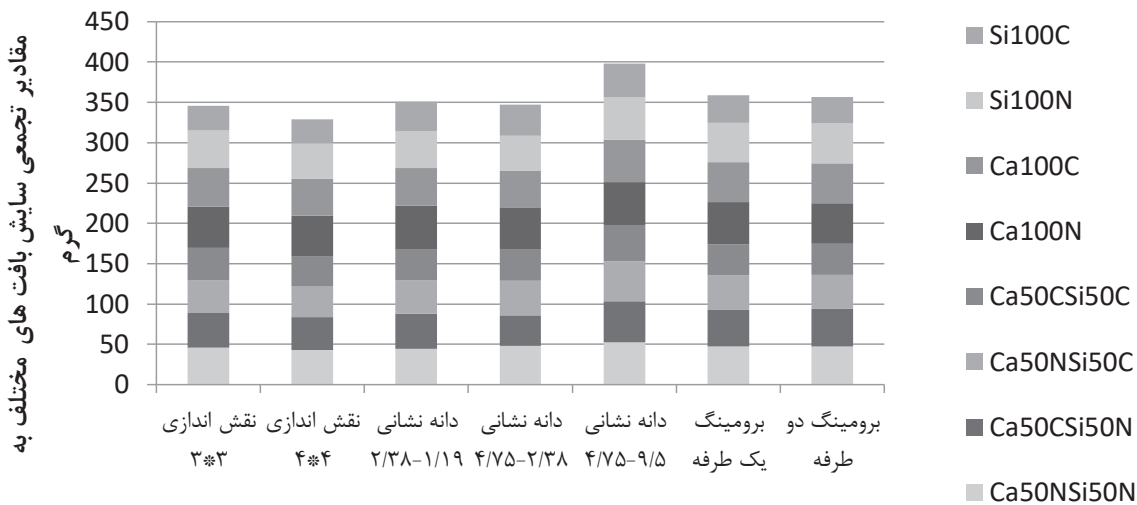
Fig.11. Results of abrasion mass loss against one/two ways brooming macro textures

بر اساس نتایج به دست آمده در شکل ۱۳، طرح اختلاط حاوی ماسه شکسته سیلیسی دارای مقاومت سایشی حداکثر و طرح حاوی ماسه آهکی طبیعی دارای مقاومت سایشی حداقل است. بر اساس نتایج مشاهده شده در این تحقیق، با ترکیب ماسه آهکی و سیلیسی با درصدهای مختلف شکستگی، مقاومت سایشی نسبت به طرح‌های اختلاط غیرترکیبی به جزء ماسه سیلیسی شکسته، ارتقاء یافت. بر این اساس هر چه درصد شکستگی بیشتر باشد مقاومت سایشی بیشتر شده است. نتایج نشان داد اگر درصد شکستگی ترکیب دو نوع ماسه یکسان و برابر ۵۰ درصد باشد، اگر از ماسه سیلیسی شکسته به جای ماسه آهکی شکسته استفاده نموده باشیم، مقاومت سایشی بیشتر خواهد بود. نتایج نشان داد اگر از بین ماسه آهکی شکسته و سیلیسی طبیعی مجبور به انتخاب یک ماسه برای ساخت باشیم به نظر انتخاب ماسه آهکی شکسته با توجه به هزینه نسبتاً بالای ماسه سیلیسی طبیعی و نایاب بودن این نوع ماسه، بسیار اقتصادی خواهد بود هر چند اگر بتوانیم این دو را باهم مخلوط نماییم اثر بهتری را خواهیم گرفت.

نتایج نشان داد برای همه نمونه‌های مختلف فارغ از نوع بافت ماکرو ایجاد شده، ضعیف‌ترین مقاومت سایشی برای مخلوطی است که از ارزان‌ترین و متداول‌ترین ماسه در فرایند ساخت بتن یعنی ماسه آهکی با دانه‌بندی گرد گوشه (طبیعی) استفاده شده است. بتن ساخته شده با این ماسه به دلیل ضعف در سختی کانی‌های سازنده و شکل گرد گوشه دانه‌ها، از چسبندگی

به طرح‌های مختلف اختلاط است. همانند قبل طرح حاوی ماسه سیلیسی شکسته کمترین سایش و طرح‌های ترکیبی به نوبه خود بسته به میزان شکستگی کل مصالح و میزان سیلیس شکسته در مرتبه بعدی مقاومت سایشی قرار دارند و در ادامه طرح‌های اختلاط سیلیسی طبیعی و ماسه آهکی شکسته و طبیعی قرار دارند. همانند قبل تغییرات زیادی بین طرح اختلاط حاوی سیلیس شکسته با سیلیس طبیعی و مصالح آهکی وجود دارد که نشان دهنده تأثیر زیاد مصالح سیلیس شکسته در مقاومت سایشی رویه بتنی دارد. در ادامه به منظور بررسی مقاومت سایشی بافت‌های مختلف فارغ از طرح‌های مختلف اختلاط، نتایج تجمعی سایش تمام طرح‌های اختلاط مختلف برای بافت‌های یکسان جهت مقایسه مقاومت سایشی آن‌ها در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت، مقاومت سایشی بافت‌های مختلف تفاوت اندکی با هم دارند. از بین بافت‌های مختلف، بافت دانه نشانی به اندازه دانه‌های ۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر به عنوان ضعیف‌ترین بافت و بافت نقش اندازی ۴×۴ سانتی‌متری به عنوان مقاوم‌ترین بافت شناخته می‌شوند. از این رو به نظر می‌رسد بافت منتخب برای اجرا بافت نقش اندازی ۴×۴ سانتی‌متری است که از نظر فن اجرا نیز کم دردمترین و راحت‌ترین بافت است.

در ادامه به منظور بررسی همه جانبه مقاومت سایشی طرح‌های اختلاط مختلف بدون توجه به نوع بافت آن‌ها، شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۲. مقایسه مقاومت سایشی بافت‌های مختلف

12. Comparison of abrasion resistance of different macro textures

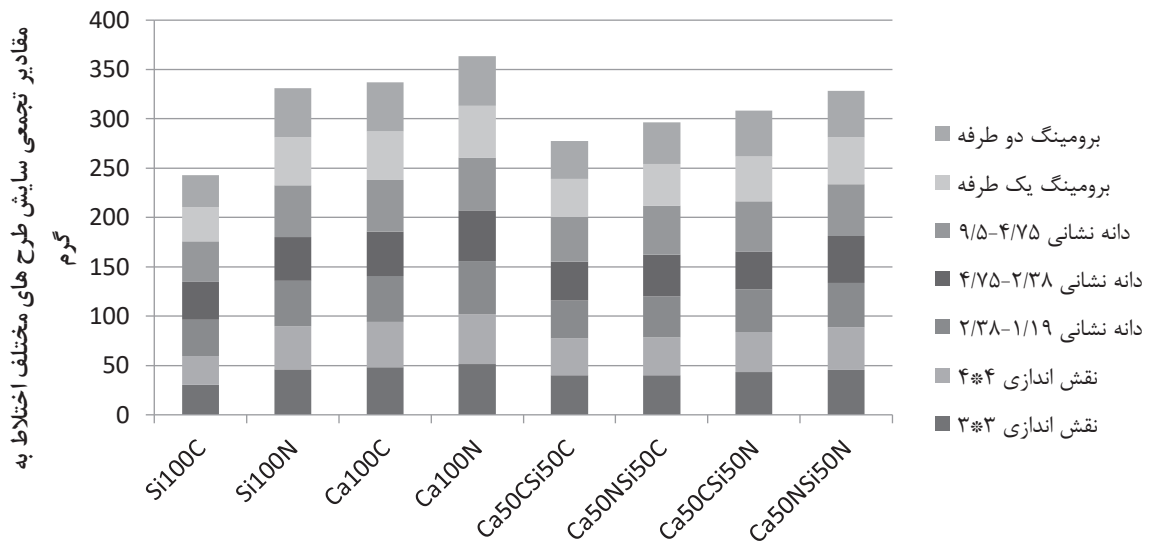
با ماسه سیلیسی طبیعی و شکسته مشاهده شده است و از این رو خرید ماسه سیلیسی شکسته توجه بیشتری دارد. البته باید توجه داشت که ماسه سیلیسی عموماً از معادن سنگ سیلیسی با انفجار و شکستن سنگ‌ها حاصل می‌شود و لذا در شکل طبیعی آن کمتر یافت می‌شود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که اگر صرفاً نیل به مقاومت سایشی حداکثر مدنظر باشد، استفاده از ماسه سیلیسی شکسته (SI \cdot C) برای ساخت بتن در اولویت است. اما اگر هدف رسیدن به یک مقاومت سایشی خوب و در عین حال یک طرح اقتصادی مدنظر باشد به نظر می‌رسد ترکیب ماسه آهکی گرد گوشه و سیلیس شکسته (CA \cdot NSI \cdot C) گزینه معقولی به نظر برسد البته کاندیدای بعدی می‌توان ساخت بتن با استفاده از ماسه آهکی شکسته و ماسه سیلیسی شکسته (CA \cdot CSI \cdot C) باشد.

۵- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی پایایی بافت‌های ریز و درشت به مرور زمان زیر ترافیک عبوری پر حجم است. ایجاد یک بافت مقاوم در برابر سایش قطعاً می‌تواند مقاومت لغزندگی مناسبی را در طول دوره بهره‌برداری تضمین کند. بر این اساس به منظور افزایش بافت ماکرو و میکرو سطح روسازی به ترتیب از فن بافت‌دهی و استفاده از مصالح مختلف ریزدانه با منشأ و درصد

ضعیف‌تری نسبت به دیگر انواع ماسه با خمیر سیمان برخوردار است از این رو دارای مقاومت سایشی کمی است. این در حالی است که هر چه سختی مجموع سنگ‌دانه‌ها با کاهش مقدار ماسه آهکی و افزایش مقدار ماسه سیلیسی افزایش یابد و همچنین هر چه مقدار چسبندگی سنگ‌دانه‌ها به خمیر سیمان با کاهش ماسه طبیعی و افزایش ماسه شکسته افزایش یابد، مقاومت سایشی بیشتر می‌شود. از این رو توجه به یک طرح اختلاط بهینه فنی و اقتصادی در ساخت رویه بتنی از اهمیت زیادی برخوردار است.

به منظور نیل به یک طرح اختلاط بهینه با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی از جمله قیمت مصالح طبیعی و شکسته در بازار می‌توان نتیجه گرفت که، در صورتی که از ماسه آهکی استفاده شود، با توجه به اینکه تفاوت چندانی بین مقاومت سایشی ماسه آهکی طبیعی و شکسته وجود ندارد و با توجه به تفاوت قیمت مصالح، شاید انتخاب ماسه آهکی طبیعی مناسب‌تر باشد زیرا این ماسه به دلیل گرد گوشگی دارای کارایی بیشتری نسبت به بتن با ماسه شکسته است لذا برای نیل به یک کارایی ثابت می‌توان نسبت آب به سیمان آن را کاهش داد و با این کار به مقاومت فشاری و در نتیجه مقاومت سایشی مساوی یا شاید بیشتری نسبت به بتن درست شده با ماسه آهکی شکسته رسید. اما این نکته در مورد ماسه سیلیسی متفاوت است. زیرا تفاوت عمده‌ای بین مقاومت فشاری و سایشی بتن ساخته شده



شکل ۱۳. مقایسه مقاومت سایشی طرح های مختلف اختلاط

Fig. 13. Comparison of abrasion resistance of different mixing designs

هر چه میزان شکستگی مصالح ترکیبی بیشتر شود مقاومت سایشی بهبود خواهد یافت.

۵- با جمع بندی نتایج این تحقیق در شکل ۱۳ می توان نتیجه گرفت که مقاومت سایشی نمونه بتنی نسبت تغییر جنس مصالح ریزدانه، درصد شکستگی آن ها و ترکیبات مختلف ماسه ها حساس بوده و تغییرات زیادی دارد. از جهتی با توجه به یافته های خلاصه شده در شکل ۱۲ می توان دریافت که نوع بافت ماکرو، شاید بتواند اصطکاک را بهبود بخشید ولی تأثیر چندانی بر مقاومت سایشی روسازی بتنی نخواهد داشت. لذا می توان ادعا کرد که شبیه سازی سایش جریان ترافیک موضوع استاندارد ASTM C 944 بر روی بتن های غلتکی بیشتر به طرح مخلوط بتن تا شکل بافت ایجاد شده بر روی آن وابسته است. این مطلب از آن جهت اهمیت پیدا می کند که می توان بر اساس ایجاد بافت های مختلف بر روی رویه بتن غلتکی مشکل مقاومت لغزشی این رویه را بهبود بخشید و اطمینان داشت در صورتی که از مصالح مناسب در ساخت بتن استفاده شده باشد، سایش جریان ترافیک در طولانی مدت بر روی بافت ماکرو تأثیر چندانی بر پایایی مقاومت سایشی روسازی بتنی نخواهد داشت.

۶- به منظور نیل به یک طرح اختلاط بهینه با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی از جمله قیمت مصالح طبیعی و شکسته در بازار می توان نتیجه

شکستگی متفاوت استفاده شد. بر این اساس نتایج نشان داد که:

۱- به غیر از مخلوط ساخته شده با ماسه سیلیسی شکسته، مخلوط های ساخته شده با ترکیب ماسه های مختلف دارای چگالی، مقاومت خمشی و فشاری بیشتر نسبت به مخلوط های ساخته شده با یک نوع ماسه است. عموماً ترکیب سنگ دانه های با اندازه ها و شکل های مختلف، به دلیل ایجاد اندرکنش مناسب منتهی به عملکرد مقاومتی بهتر، از جمله مقاومت فشاری و مقاومت خمشی خواهد شد.

۲- بافت های مختلف، مقاومت سایشی تقریباً یکسانی دارند و از این بین بافت دانه نشانی با اندازه دانه های ۹/۵-۴/۷۵ میلی متر ضعیف ترین مقاومت سایشی و بافت نقش اندازی ۴×۴ سانتی متر پایترین مقاومت سایشی را دارد. ۳- از بعد طرح اختلاط بتن غلتکی، مقاومت سایشی با تغییرات بیشتری همراه بود. بدین معنی که ماسه سیلیسی شکسته بیشترین مقاومت سایشی و ماسه آهک طبیعی کمترین مقاومت سایشی را داشت.

۴- نتایج نشان داد به جز ماسه سیلیسی شکسته که بهترین مقاومت سایشی را ایجاد می کرد، ترکیب مصالح آهکی (شکسته یا گرد گوشه) و سیلیسی طبیعی با هم باعث بهبود مقاومت سایشی مخلوط نسبت به مخلوط های ساخته شده با هر یک از این سه نوع ماسه می شود. همچنین در بین مخلوط های ساخته شده با ماسه های ترکیبی، می توان نتیجه گرفت،

- [8] ASTM C131/C131M. Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. n.d.
- [9] Kandhal PS, F. Parker J. NCHRP Report 405: Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements. 1998.
- [10] ASTM C535. Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. n.d.
- [11] EUPAVE. Roller compacted concrete: making concrete pavements available to the whole pavement building industry. 2020.
- [12] Tavakoli D, Dehkordi RS, Divandari H, de Brito J. Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂. *Constr Build Mater* 2020;249:118747.
- [13] Komaragiri S, Amirkhani A, Bhasin A. Friction and Texture Retention of Concrete Pavements. *Transp Res Rec* 2020;2674:457–65.
- [14] ACI 325.9R-15. Guide for Construction of Concrete Pavements. 2015.
- [15] Ameri M, Afandi S, Moghadam M, Hasan Mirayee. Investigating the methods of measuring the skid resistance of the road surface and how to evaluate it at the road surface (in persian). *Fourth Natl. Congr. Civ. Eng. Tehran*, 1387.
- [16] Gonzalez M. Nanotechnology applied in the design of the next generation of Canadian concrete pavement surfaces. 2014.
- [17] Pour SH. Presentation of methods to increase skid resistance and flexural strength of roller compacted concrete pavements in road and airport (in persian). *5th Annu. Int. Conf. Iran. Concr.*, 1394: تهران.
- [18] Zadeh mohamad shekarchi, Chini M, Aslanian Z. A review based on the design and characteristics of roller compacted concrete pavement (in persian). *Fifth Annu. Natl. Iran. Concr. Conf.*, 1394: تهران.
- [19] NCHRP Project 01-43. Guide for Pavement Friction.

گرفت که اگر صرفاً نیل به مقاومت سایشی حداکثر مدنظر باشد، استفاده از ماسه سیلیسی شکسته (SI₅₀C) برای ساخت بتن در اولویت است. اما اگر هدف رسیدن به یک مقاومت سایشی خوب و در عین حال یک طرح اقتصادی مدنظر باشد به نظر می‌رسد ترکیب ماسه آهکی گرد گوشه و سیلیس شکسته (CA₅₀NSI₅₀C) گزینه معقولی به نظر برسد البته کاندیدای بعدی می‌توان ساخت بتن با استفاده از ماسه آهکی شکسته و ماسه سیلیسی شکسته (CA₅₀CSI₅₀C) باشد.

تشکر و قدردانی

شایسته است از موسسه شهید رجایی و آقایان مهندس قنبری، خزعلی، امیدی و دیگر کادر فنی که در فرآیند اجرای این اثر فعالیت داشته و زحمات زیادی کشیده‌اند کمال تشکر و قدردانی خود را ابراز دارم. همچنین این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق قرارداد به شماره ۱۸۰۲۷ مورخ ۱۳۹۷ انجام گردیده است.

منابع

- [1] (NRR) NRR. 2018_ACPA_Quarterly_CCP. 2018.
- [2] ASTM C944. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method. vol. 99. 2005. doi:10.1520/mnl10913m.
- [3] Liu TC, McDonald JE. Abrasion-Erosion Cement, Resistance of Fiber-Reinforced Concrete. *Cem Concr Aggregates* 1981;3.
- [4] Taylor P, Dam T Van, Sutter L, Fick G. *Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual*. 2019.
- [5] ASTM C1138. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method). n.d.
- [6] Pranav S, Aggarwal S, Yang EH, Kumar Sarkar A, Pratap Singh A, Lahoti M. Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review. *Constr Build Mater* 2020;236. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117609.
- [7] Cheng H, Weng X, Xiangcheng A. A review of surface properties enhancement of pavement concrete. *Earth Environ. Sci.*, 2021.

- with GGBS. *Constr Build Mater* 2016;114:925–933.
- [27] Rao, M., Yang, H., Lin, Y., Li, J., & Shi Y. Influence of maximum aggregate sizes on the performance of RCC. *Constr Build Mater* 2016;115:42–47.
- [28] Rao SK, Sravana P, Rao TC. Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of Fly Ash Roller Compacted Concrete (FRCC). *Constr Build Mater* 2016;118.
- [29] Rao SK, Sravana P, Rao TC. Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of Roller Compacted Concrete containing GGBS S. *Constr Build Mater* 2016;122.
- [30] Astm:C192/C192M-13. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. *ASTM Int* 2013;04:1–8. doi:10.1520/C0192.
- [31] Scanlon JM, Tarbox GS, Hess JR, Hulshizer AJ. *Roller-Compacted Mass Concrete*. 1999.
- [32] System O of T and E. Guide to designing and implementing roller compacted concrete in Iran national road networks. 1388.
- [33] ASTM C39/C39M-04a. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM Int West Conshohocken, PA* 2004.
- [34] ASTM C78. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). *ASTM Int West Conshohocken, PA* 2012:12–4. doi:10.1520/C0293.
- 2009.
- [20] Samani S, Senior S, MacDonald C. Development of a Mortar Abrasion Test for Fine Aggregates and Wear Resistance of Concrete Pavements. *TAC 2016 Effic. Transp. - Manag. Demand - 2016 Conf. Exhib. Transp. Assoc. Canada*, 2016.
- [21] ACI201.2R-16. *Guide to Durable Concrete*. 2016.
- [22] Dumitru I, Song T, Bornstein B, Sirivivatnanon V. Constraints in Using Manufactured Sands in Concrete Pavements in Australia. *Cem Concr Aggregates Aust* 2015.
- [23] Samani SG, Senior S, MacDonald CA. Development of a Mortar Abrasion Test for Fine Aggregates and Wear Resistance of Concrete Pavements-Paper. In *TAC 2016: Efficient Transportation-Managing the Demand-2016 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada*. 2016.
- [24] Papenfus N. Applying concrete technology to abrasion resistance. 7th Int. Conf. 'Concrete block paving,' Sun City, South Africa: n.d., p. 11.
- [25] Hesami, Modarres A, Soltaninejad M, Madani H. Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Constr Build Mater* 2016;11:625–636.
- [26] Rao SK, Sravana P, Rao TC. Abrasion resistance and mechanical properties of roller compacted concrete

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Adresi, *The effect of mineralogy and grain size of fine aggregate and different macro textures on the durability of the RCCP surface under abrasion conditions*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 343-362.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18816.6967



