

M. Adresi*

Faculty of Civil Engineering,
Shahid Rajaei Teacher
Training University.

e-mail: m.adresi@sru.ac.ir

M. A. Ghanbari

PhD student, Islamic Azad
University, Research Sciences
Branch.

e-mail:
ma.ghanbari@srbiau.ac.ir

A. R. Omid

Master of Civil Engineering, in
Road and Transportation, Azad
University, South Tehran
Branch.

e-mail:
alirezaomidiamr@gmail.com

Investigation of the Effect of Various Mixing Designs and Macro Textures on the Skid Resistance of Roller Compacted Concrete Pavement Surface

The purpose of this study is to investigate strategies to improve the skid resistance of roller-compacted concrete. Since the main weakness of roller-compacted concrete is the lack of pavement macrotexture, in this study, three types of macro textures, 1-Seeding (in three aggregate sizes), stamping (in two sizes), and grooving (one-way and two-way) were considered. In this research, eight mixing designs were selected to make roller-compacted concrete samples. The skid resistance of treated samples for 28 days before and after abrasion was evaluated by a British pendulum test. The results showed that concrete surface abrasion reduces the skid resistance of concrete samples by about 10%. The results also showed that changing different mixing designs did not have a significant effect on skid resistance. While the skid resistance is completely dependent on the type of macrotexture so that the grooved macrotexture shows the highest and the seeding shows the lowest skid resistance before and after abrasion.

Keywords: Roller Compacted Concrete Pavement, Mixing Design, Skid Resistance, Micro/Macro-Texture, Abrasion.

* Corresponding author

Received 14 August 2021, Revised 29 September 2021, Accepted 10 October 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.7234.1281

بررسی تأثیر انواع طرح مخلوط و بافت درشت بر مقاومت لغزشی رویه بتن غلتکی

هدف از این تحقیق، بررسی راهکارهای ارتقای مقاومت لغزندگی رویه بتن غلتکی است. با توجه به اینکه عمده ضعف رویه‌های بتن غلتکی نداشتن بافت درشت روسازی است، در این تحقیق سه نوع بافت دانه‌نشانی (در سه اندازه)، نقش‌اندازی (در دو اندازه) و شیارکشی (یک جهت و دو جهت) مورد توجه قرار گرفت. بنابراین هشت طرح مخلوط برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی انتخاب شد. مقاومت لغزندگی نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز قبل و بعد از سایش توسط آزمون پاندول انگلیسی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که سایش سطح بتن، مقاومت لغزندگی نمونه‌های ساخته شده را حدود ۱۰ درصد کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد تغییر طرح‌های مختلف مخلوط، تأثیر محسوسی بر مقاومت لغزندگی ندارد. از طرفی، مقاومت لغزندگی به نوع بافت، کاملاً وابسته است به‌گونه‌ای که بافت شیارکشی، بیشترین و دانه‌نشانی، کمترین مقاومت لغزندگی را قبل و بعد از سایش نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: روسازی بتن غلتکی، طرح اختلاط، مقاومت لغزندگی، بافت ریز و درشت، سایش.

مصطفی آدرسی*

دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه تربیت دبیر شهید
رجایی.

پست الکترونیک:

m.adresi@sru.ac.ir

محمدعلی قنبری

دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد
اسلامی واحد علوم تحقیقات.

پست الکترونیک:

ma.ghanbari@srbiau.ac.ir

علیرضا امیدی

کارشناس ارشد مهندسی عمران
گرایش راه و ترابری دانشگاه آزاد
واحد تهران جنوب.

پست الکترونیک:

alirezaomidiamr@gmail.com

۱- مقدمه

روسازی‌های بتن مسلح درزدار به قدری زیاد است که کمتر پیمانکاری در داخل کشور توانایی اجرای اینگونه روسازی را دارا است. از این‌رو به نظر می‌رسد استفاده از رویه بتن غلتکی که از نظر اقتصادی توجیه مناسبی نسبت به آسفالت دارد [۱]. همچنین به این علت که نیاز به تجهیزات پیشرفته‌ای مانند رویه‌های بتن مسلح درزدار ندارد، می‌تواند برای کشور ایران به‌عنوان یک گزینه مؤثر در اجرای روسازی‌های بادوام و اقتصادی مطرح باشد. در حال حاضر، استفاده از این نوع روسازی در دنیا در حال گسترش است [۲].

روسازی‌های صلب یا بتنی دارای سختی خمشی نسبتاً بالایی در مقایسه با روسازی‌های انعطاف‌پذیر بوده، بارهای خارجی را با حداقل تغییرشکل روسازی در سطح نسبتاً وسیعی به خاک بستر منتقل می‌کنند و بستر

امروزه روسازی‌های انعطاف‌پذیر هرچند توان تحمل بار و ترافیک وارده را دارا می‌باشند، اما به دلیل ضعف‌هایی که دارند از طول عمر کمتری نسبت به رویه‌های بتنی برخوردارند. از طرفی رویه‌های بتنی انواع مختلفی دارند که در کشور ایران عمدتاً در قالب رویه‌های بتنی غیرمسلح درزدار (JPCP^۱) و بتن غلتکی اجرا شده‌اند. تجارب میدانی، هزینه‌های اجرا شامل هزینه ماشین‌آلات، نیروی متخصص برای پیمانکاران، داول‌بار و میل‌دوخت‌ها در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۵/۲۳، بازنگری ۱۴۰۰/۰۷/۰۷، پذیرش ۱۴۰۰/۰۷/۱۸.

DOI: 10.22091/cer.2021.7234.1281 شناسه دیجیتال

^۱- Jointed Plain Concrete Pavement

کیفیت اصطکاک سطح جاده یکی از عوامل مؤثر در ایمنی رانندگی است. اصطکاک تابع شرایط سطح رویه، سرعت، سطح تماس چرخ و میزان آج و فشار باد لاستیک ماشین و شرایط محیطی مانند رطوبت سطحی روسازی و دما است. همه روزه تعداد تلفات بسیاری بر اثر تصادفات در جاده‌ها گزارش می‌شود. درصد زیادی از این تصادفات بر اثر لغزندگی سطوح روسازی و توقف دیر هنگام خودروها در هنگام تصادف رخ می‌دهد. تعیین میزان اصطکاک سطح جاده‌ها به ویژه در نقاط حادثه‌خیز و شیب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقاومت در برابر لغزندگی یکی از عوامل سنجش کفایت ایمنی روسازی به خصوص در تصادفات ناشی از سرخوردن بر روی سطح خیس است [۲].

دستگاه‌هایی که معمولاً برای اندازه‌گیری خصوصیات اصطکاک رویه در آزمایشگاه و در محل استفاده می‌شوند، شامل آزمونگر آونگ انگلیسی (BPT^۴)، مطابق با AASHTO T278 یا ASTM E303 و آزمونگر اصطکاک دینامیکی (DFT^۵) مطابق با ASTM E1911 است. هر دو دستگاه، خواص اصطکاک را با افت انرژی جنبشی سرخوردن آونگ و چرخیدن دیسک در تماس با رویه، تعیین می‌کنند. افت انرژی جنبشی به دلیل نیروی اصطکاک است که بین پاندول و سطح روسازی وجود دارد. مزیت DFT نسبت به BPT قابلیت اندازه‌گیری اصطکاک رویه در سرعت‌های مختلف است [۶]. علاوه بر موارد گفته شده، روش تعیین اصطکاک با چرخ‌های قفل شده^۶ نیز مرسوم می‌باشد. از طرفی در روسازی بتن غلتکی به علت خصوصیات خاص خود، بحث اصطکاک رویه بسیار حائز اهمیت است. در یکی از اولین مطالعات، بررسی اصطکاک سطحی روسازی بتن غلتکی در امریکا که با روش کشیدن چرخ صاف در حالت سرش ۱۰۰ درصد (قفل) در سرعت ۴۰ مایل بر ساعت طبق

روسازی تحت تنش‌های کمتری قرار می‌گیرد [۳ و ۴]. این در حالی است که مقاومت خاک بستر در پایداری روسازی‌های آسفالتی نقش تعیین‌کننده‌ای دارد و به مقاومت رساندن خاک بستر خود، خالی از هزینه نیست و این نقش در رویه‌های بتنی بسیار کم‌رنگ‌تر است [۵]. اگر به موارد گفته شده موضوعات زیست‌محیطی، وابستگی به مشتقات نفتی روسازی‌های آسفالتی و هزینه‌های بالای اجرای روسازی‌های آسفالتی را اضافه نماییم، ضرورت جایگزین کردن موادی که بتوان در ساخت روسازی‌ها از آن به جای آسفالت استفاده نمود، محرز می‌شود. به نظر می‌رسد بتن‌های فشرده شده با غلتک که قدمت استفاده از آن به ساخت سدها برمی‌گردد، یکی از بهترین گزینه‌های جایگزین روسازی‌های آسفالتی خواهد بود. روسازی‌های بتن غلتکی، که به اختصار بدان RCCP^۲ گفته می‌شود، چند دهه است که در ساخت رویه‌ها، کف انبارهای صنعتی و محل دپو کانتینرها در بنادر و غیره استفاده می‌شوند. از نظر اجرایی نیز بتن غلتکی را می‌توان با استفاده از دستگاه و تجهیزات مورد استفاده در ساخت روسازی‌های آسفالتی اجرا نمود [۲].

بتن غلتکی دارای محدودیت‌هایی نظیر سروصدای بیشتر ناشی از حرکت خودرو نسبت به روسازی آسفالتی و سر خوردن خودرو به هنگام بارندگی به علت عدم وجود بافت درشت رویه و وقوع پدیده آب‌پیمایی^۳ مخصوصاً در سرعت‌های زیاد، می‌باشد. این مقاله سعی دارد با استفاده از روش‌های ایجاد بافت درشت، تغییر و اصلاح و ترکیب مصالح سنگی مورد استفاده در مخلوط بتن غلتکی، نشان دهد که مقاومت لغزندگی تحت تأثیر چه پارامترهایی قرار دارد تا بتوان با بهبود هریک از آنها مقاومت لغزشی سطح روسازی بتن غلتکی را بهبود بخشید.

۲- مروری بر ادبیات طرح

4- British pendulum tester

5- Dynamic friction tester

6- Locked Wheel Friction Test

2- Roller-compacted concrete pavement

3- Hydro planning

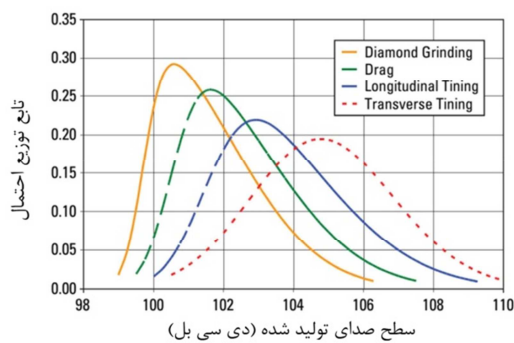
نتایج به دست آمده، نفوذپذیری آب به داخل روسازی‌های بتن غلتکی از روسازی‌های بتن معمولی بیشتر است؛ اما با این وجود، بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نفوذپذیری اثری بر روی روسازی‌های بتن غلتکی ندارد، به ویژه اینکه هیچ گزارشی مبنی بر تخریب این نوع بتن تحت اثر چرخه‌های ذوب و یخ حتی پس از گذشت چند دهه از ساخت آن در مناطق سردسیر مانند کانادا وجود ندارد [۱۰]. در اسپانیا در دهه ۸۰ تا ۹۰ میلادی حجم وسیعی از جاده‌های بیرون شهری مناطق شمالی این کشور از بتن غلتکی ساخته شدند که بعد از گذشت بیش از ۳۰ سال از کیفیت مناسبی برخوردارند [۱۱]. در ایالت میزوری برای بهبود مقاومت سایشی رویه‌های بتن غلتکی از یک ماله مکانیکی استفاده می‌شود. بافت به دست آمده به این روش برای سرعت‌های بیش از ۶۰ کیلومتر بر ساعت توصیه نمی‌شود؛ ولی برای خیابان‌های مسکونی، پارکینگ‌های صنعتی و غیره مناسب است [۱۲]. استفاده از پوشش آسفالتی بر روی روسازی بتن غلتکی باعث ایجاد سطحی هموارتر، مقاوم در برابر شن‌زدگی و با مقاومت اصطکاکی بیشتر می‌شود. مقادیر اصطکاک ایجاد شده با این روش بین ۰/۶ تا ۰/۸۲ اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری اصطکاک با دستگاه سنجش ضریب اصطکاک در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت انجام شده است که برای راه‌های با ترافیک سریع مناسب می‌باشد [۱۳]. انجمن روسازی بتنی اروپا اظهار دارد که روسازی بتن غلتکی به دلیل صافی سطح ناشی از غلتک‌کاری، مناسب راه‌های پرسرعت نیست و برای این راه‌ها، لازم است از رویه آسفالتی برای ایجاد مقاومت لغزندگی، همواری و یکدستی مناسب بر روی رویه بتن غلتکی استفاده شود. ضخامت رویه آسفالتی باید به گونه‌ای باشد تا پتانسیل ترک انعکاسی کاهش یابد. برای کاهش ریسک ترک انعکاسی و فعالیت کمتر درزها، پیشنهاد شده است به فواصل حداکثر سه متری از هم درز تازه در بتن تازه ریخته شده در حین فرایند متراکم‌سازی ایجاد شود. هرچند استفاده از

روش ASTM 274-90 صورت گرفت، نشان داده شد که عدد مقاومت لغزشی (SN^V)، که از ضرب ۱۰۰ در مقدار ضریب اصطکاک به دست می‌آید، در محدوده ۴۳ تا ۶۴ بوده است. نانی^۸ و همکاران، اعداد متعارف بر روسازی بتن معمولی را به طور متوسط عدد ۴۷ گزارش کردند و در آخر نتیجه‌گیری نمودند که مقاومت در برابر لغزش برای بتن غلتکی حداقل برابر و یا کمی بهتر از روسازی بتن معمولی است [۷]. باید توجه داشت که SN حداقل برای روسازی‌های پرتراфик ۴۲ می‌باشد [۸]. گرچه روسازی بتنی و بتن غلتکی در این تحقیق مقادیر حداقل اصطکاک مورد نیاز را تأمین کرده‌اند، ولی به نظر می‌رسد کمی باید به این نتیجه با احتیاط اعتماد نمود. حسن‌پور در مقاله‌ای جهت بهبود خواص اصطکاکی سطح روسازی، شیوه تراش‌زدن و شیاراندازی توسط سر مته‌هایی از جنس الماس را مؤثر می‌داند. همچنین جهت ترمیم روسازی‌های بتن غلتکی و بتن معمولی این روش را پیشنهاد می‌کند [۹]. شکرچی‌زاده و همکاران در بررسی خواص سطحی بتن غلتکی راه‌ها بر این عقیده‌اند که بتن غلتکی دارای سطحی خشن و ناصاف می‌باشد 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. هرچه اندازه بزرگترین سنگدانه کوچکتر انتخاب شود سطح به دست آمده دارای بافت ریزتر و یکنواخت‌تر خواهد بود [۱۰]. 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، دوام روسازی ناشی از چرخه‌های ذوب و یخ کاهش می‌یابد. با توجه به

7- Skid Number

8- Nanni

جنبشی شناخته می‌شود [۱۶]. برای تأمین حداقل اصطکاک لازم برای تردد ترافیک، با ایجاد بافت بر روی روسازی بتنی به روش‌های مختلف این مهم تأمین می‌شود. باید توجه داشت که بافت درشت بر روی صدای ایجاد شده ناشی از عبور و مرور ترافیک بسیار مؤثر است. در این راستا پژوهشگری دیگر، مطالعات جامعی در مورد زمان مناسب ایجاد بافت، انواع مختلف بافت‌های درشت روسازی و عملکرد هر یک ارائه داده است [۱۴]. مطالعات گسترده انجام شده در خصوص تأثیر بافت درشت بر میزان اصطکاک به روش چرخ قفل با سرعت ۴۰ مایل بر ساعت نشان دادند که ارتباط مشخصی بین نوع بافت درشت و مقاومت لغزشی وجود ندارد. در این راستا در شکل ۱- الف، تأثیر متقابل صدای روسازی، نوع بافت و عدد لغزندگی نشان داده شده است. براساس نتایج نشان داده شده، هیچ ارتباط معناداری بین نوع بافت و عدد لغزندگی مشاهده نمی‌شود. در مقابل با ترسیم متغیر بافت در مقابل تابع توزیع صدای تولید شده از عبور بر روی روسازی در شکل ۱- ب، مشاهده می‌شود که این دو متغیر ارتباط معناداری با هم دارند.

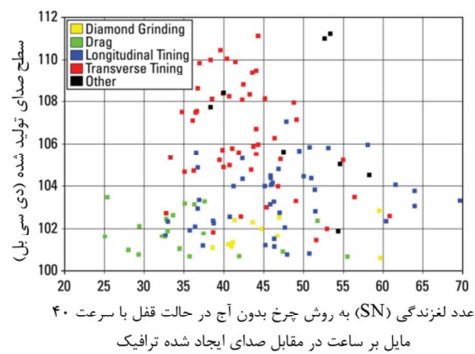


(ب)

شکل ۱- تأثیر متقابل عدد لغزندگی، نوع بافت و صدای تولید شده [۱۷]

بیشتر باشد، احتمال صیقل‌شدگی افزایش می‌یابد [۱۷]. مقاومت در برابر لغزش در روسازی‌های بتنی تحت تأثیر بافت ریز و بافت درشت روسازی است. بافت ریز مربوط به خصوصیات مصالح در فاز ملات و بافت درشت وابسته به روش‌های مختلف پرداخت سطحی و ایجاد بافت می‌باشد [۱۸]. مطالعات ابراز داشته‌اند که هرچه مصالح ریز

فینیش‌های خاص که از قابلیت تراکم بالا برخوردارند امکان ایجاد درز تازه را ناممکن خواهد نمود [۱۴]. گزینه دیگر پیشنهادی ایجاد بافت درشت بر روی سطح روسازی بتن غلتکی به وسیله تراش با تیغه‌های الماسه است [۱۵]. مقاومت در برابر لغزندگی تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر ترافیک، جاده، وسیله نقلیه و محیط قرار دارد که مهمترین آنها بافت سطحی جاده می‌باشد. 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 می‌باشد. بافت درشت همان ارتفاع بیرون‌زدگی سنگدانه‌ها از سطح رویه می‌باشد و دامنه 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 پدیده آب‌پیمایی جلوگیری می‌نماید. بافت درشت برخلاف بافت ریز، عامل مقاومت در سرعت‌های بالا بوده و به‌عنوان مضمحل نمودن انرژی



(الف)

بافت ریز روسازی تحت تأثیر سنگدانه‌های ریز و درشت و کیفیت شکست آنها تحت بار وارده از طرف ترافیک می‌باشد. هرچه سنگدانه‌ها از ساختار مولکولی ریزتری ساخته شده باشند احتمال صیقل‌شدگی بیشتری دارند. در مصالح ریزدانه، هرچه مقدار سیلیس کمتر باشد و در مصالح درشت‌دانه، هرچه مقدار کربنات غیرقابل حل

شکسته‌تر و خشن‌تر باشند، مقاومت اصطکاکی بهبود می‌یابد ولی از کارایی کاسته می‌شود [۱۷]. بهترین مصالح دانه‌ای برای ایجاد مقاومت لغزندگی مناسب، در واقع ترکیبی از مصالح دانه‌ای سخت و مقاوم در برابر سایش با مصالح نرم‌تر می‌باشد. این ترکیب می‌تواند بهترین خروجی برای دستیابی به مقاومت لغزندگی در طولانی‌مدت را ارائه دهد [۱۹].

در این راستا، در صورتی که از حداقل ۲۵ درصد مصالح ریزدانه سیلیسی در حالت شکسته به همراه مصالح آهکی شکسته یا رودخانه‌ای در ساخت بتن روسازی استفاده شود، مقاومت اصطکاکی لازم تأمین خواهد شد [۱۷]. همچنین استفاده از ماسه شکسته در صورتی که الزامات آزمایش میکرودوال را تأمین کند می‌تواند موفقیت‌آمیز باشد [۱۹]. مقاومت سایشی بتن در ماندگاری بافت درشت و تأمین اصطکاک برای مدت طولانی در زیر بار ترافیک مؤثر است. 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 می‌شود، می‌باشد [۲۰ و ۲۱]. فروولوا و سالایوویچ^۹، زبری قسمتی از روسازی ساخته شده با خرده‌های لاستیک را ارزیابی کردند گزارش دادند که افزودن لاستیک خرد شده باعث افزایش مقاومت لغزشی سطح جاده می‌شود. واضح است که لاستیک خرد شده به عنوان جایگزینی برای جزئی از سنگدانه‌ها به کار گرفته شده است. همچنین آنها نشان دادند که استفاده از نانوسیلیس در مخلوط بتن موجب افزایش مقاومت لغزشی سطح روسازی RCC می‌شود [۲۲]. از طرفی توکلی و همکاران با استفاده از مواد زائد به عنوان جایگزین سنگدانه‌های ریز در روسازی بتن غلتکی

(RCCP)، به بررسی خصوصیات سطحی آن پرداختند. علاوه بر این، آنها برای کاهش اثرات منفی احتمالی مخلوط‌های سرامیکی ضایعاتی و همچنین بهبود خواص مکانیکی خمیر سیمان، از نانو SiO_2 در طراحی مخلوط استفاده کردند. پس از آماده‌سازی مخلوط‌ها، زمان Vebe، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب، مقاومت در برابر سایش و مقاومت در برابر لغزش را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد مخلوط با مواد زائد مقاومت به لغزش بیشتری نسبت به مخلوط شاهد داشت. به طور کلی، مخلوط‌های سرامیکی ضایعاتی ویژگی‌های مکانیکی بهتری را نشان دادند و مخلوط‌های حاوی ضایعات شیشه از نظر جذب آب و مقاومت لغزشی عملکرد بهتری داشتند. علاوه بر این، استفاده از نانو SiO_2 منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی RCCP می‌شود. مقدار مطلوب نانو SiO_2 ، ۰/۷ درصد از وزن سیمان تعیین شده است [۲۳]. در مطالعه‌ای دیگر توسط کماراگیری و همکاران اصطکاک سطحی روسازی بتنی و نقش مواد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع، ۴۸ ترکیب مصالح و دو روش ایجاد بافت به عنوان بخشی از این مطالعه مورد آزمایش قرار گرفت. سه منبع مصالح سنگی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت: یک منبع سیلیسی، یک منبع آهکی سخت و یک منبع آهک نرم. نمونه‌ها با دستگاه شبیه‌ساز جریان ترافیک مرکز ملی فناوری آسفالت (NCAT^{۱۰}) سایش داده شدند. دستگاه تست اصطکاک متحرک برای ارزیابی مقادیر اصطکاک در نقاط مختلف از طریق فرآیند پس از سایش، بافت درشت مخلوط اندازه‌گیری شد. نتایج حاکی از آن است که به طور کلی، با افزایش محتوای سیلیس، از دست دادن اصطکاک کاهش می‌یابد. با این حال، برخی از روندها بسیار جزئی بودند و در چند مورد، سنگدانه‌های سیلیسی باعث از بین رفتن اصطکاک بیشتری شدند. موارد بیشماری وجود داشت که سطوح

¹⁰- National Center for Asphalt Technology

⁹- Frolova and Salaiova

تعیین میزان تأثیر جنس و شکل ظاهری آنها بر مقاومت لغزندگی و سایشی بتن غلتکی است. به این منظور در این پژوهش جمعا هشت نوع طرح مخلوط طراحی شده است که چهار نوع دارای یک نوع ماسه به تنهایی و چهار نوع به صورت ترکیبی (۵۰-۵۰) از دو نوع ماسه ساخته شده است. برای تعیین مقادیر اکسید سیلیس و اکسید کلسیم موجود در ماسه‌ها از آنالیز شیمیایی استفاده شد. جدول ۱ نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی را نمایش می‌دهد.

اجزای دیگر تشکیل‌دهنده طرح‌های مخلوط بتن غلتکی نظیر شن، سیمان و آب در تمام طرح‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. آب مورد استفاده در طرح‌ها، آب آشامیدنی شهری می‌باشد. جدول ۲ مشخصات سیمان مورد استفاده را نشان می‌دهد. ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده براساس الزامات استاندارد ملی ایران به شماره ۱۶۹۲ بوده و مقاومت آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

به منظور بررسی ریزی ماسه، مطابق استاندارد ASTM C136، آزمایش دانه‌بندی انجام و مقادیر مدول نرمی برای هرکدام از انواع ماسه تعیین گردید [۲۶]. در شکل ۲ مدول نرمی ماسه‌های مختلف به کار رفته در این تحقیق نشان داده شده است. قبل از شروع اختلاط برای هر یک از طرح‌های مخلوط، مصالح سنگی ریز و درشت به گونه‌ای با هم مخلوط شدند که در محدوده مجاز دانه‌بندی قرار گیرند.

روسازی کربناتی- سیلیسی عملکرد بهتری نسبت به سطوح روسازی بتنی سیلیسی داشتند [۲۴]. با این وجود دستورالعمل جامعی برای شناسایی و انتخاب روش ایجاد بافت روسازی‌های بتنی (غلتکی) که مجموعه عوامل فنی، زیست‌محیطی، اقتصادی و ایمنی راه را در برگیرد موجود یا در دسترس نیست [۲۵]. با بررسی مطالعات گذشته در خصوص بهبود مقاومت لغزندگی بر روی رویه‌های بتن غلتکی، به نظر می‌رسد با توجه به پیشنهادات مختلف از قبیل روکش آسفالت، ایجاد بافت درشت، کار بر روی طرح مخلوط و غیره، مسائل مبهم زیادی در این رابطه وجود دارد. از این رو بررسی دقیق این موضوع از نظر طرح مخلوط و نوع بافت درشت، می‌تواند برای حل مشکل کمبود اصطکاک این نوع روسازی مؤثر باشد. بنابراین نوآوری این تحقیق در خصوص بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت لغزندگی این نوع رویه‌های بتنی از منظر بافت ریز و درشت می‌باشد.

۳- مصالح مورد استفاده و مخلوط روش انجام

آزمایش

در این تحقیق از چهار نوع ماسه استفاده شده است، که با ترکیب آنها با یکدیگر چهار نوع ماسه دیگر به دست آمده است. ماسه‌ها از نظر جنس به مصالح نرم (کلسیمی) و سخت (سیلیسی) و از نظر شکل ظاهری به شکسته (معدنی) و گردگوشه (طبیعی) تقسیم می‌شوند. هدف،

جدول ۱- آنالیز شیمیایی ماسه‌های مختلف مورد استفاده

ردیف	نوع ماسه	اکسید سیلیس SiO ₂	اکسید کلسیم CaO	عناصر دیگر
۱	ماسه آهکی طبیعی (گردگوشه)	٪ ۲۲/۳	٪ ۵۶/۴	٪ ۲۱/۳
۲	ماسه آهکی شکسته (تیزگوشه)	٪ ۲۱/۷	٪ ۵۸/۴	٪ ۱۹/۹
۳	ماسه سیلیس طبیعی (گردگوشه)	٪ ۸۶/۳	٪ ۴/۵۲	٪ ۹/۱۸
۴	ماسه سیلیسی شکسته (تیزگوشه)	٪ ۷۹/۵	٪ ۷/۷۴	٪ ۱۲/۷۸
۵	پودر سنگ	٪ ۱/۹۳	٪ ۸۳/۳	٪ ۱۴/۷۷

جدول ۲- مشخصات مکانیکی سیمان مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتن غلتکی

ردیف	نوع سیمان	غلظت نرمال (٪)	زمان گیرش اولیه (min)	زمان گیرش نهایی (min)	نرمی سیمان (cm ² /gr)	چگالی سیمان (gr/m ³)
۲	۱-۴۲۵ دلیجان	۲۳/۸	۱۵۵	۲۱۰	۳۳۸۵	۳/۰۸

جدول ۳- نتایج آزمون مقاومت فشاری ملات سیمان تیپ ۴۲۵-۱ مورد استفاده در طرح‌های مخلوط

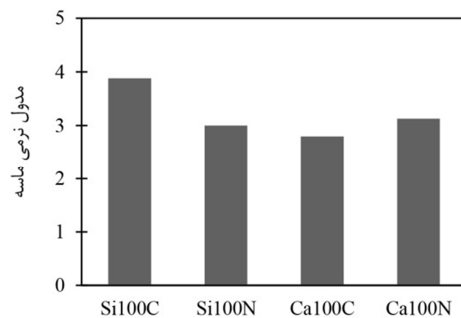
ردیف	نوع سیمان	مقاومت فشاری نمونه مکعبی ساخته شده با ملات (Kg/cm ²)		
		۲ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
۱	تیپ ۴۲۵-۱ دلیجان	۲۱۷	۳۷۵/۵	۴۷۰

هم منطبق باشند تا اثر دانه‌بندی در عملکرد بتن‌ها وارد نشود. شکل ۳ منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در هریک از طرح‌های مخلوط را نمایش می‌دهد. هریک از منحنی‌های دانه‌بندی با شماره مخلوط دانه‌بندی (متناظر با جدول ۴) نامگذاری شده‌اند. در ادامه، نمونه مکعبی، استوانه‌ای و منشوری به ترتیب برای ایجاد بافت، مقاومت فشاری و خمشی برای هریک از طرح‌های مخلوط ساخته شد.

بر روی نمونه‌های ساخته شده با هریک از طرح‌های مخلوط، بافت‌هایی ساخته شد. به‌طور کلی سه نوع بافت به قرار ذیل بر روی بتن ایجاد گردید:

۱- دو نوع بافت درشت نقش‌اندازی: که با قرار دادن توری فلزی به اندازه‌های ۳×۳ و ۴×۴ سانتیمتری بین وزنه و بتن حین فرایند متراکم کردن نمونه‌ها و بر اثر فرو رفتن توری‌های فلزی در سطح بتن تحت وزن سربار و انرژی ناشی از ارتعاش مخلوط بتنی در حین ویبره کردن ایجاد می‌شوند.

در ادامه، هریک از طرح‌های مخلوط با توجه به الزامات و توصیه‌های استاندارد ASTM C192 تهیه و با توجه به حجم مخلوط‌کن در واحدهای ۴۰ لیتری برای نمونه‌گیری آماده شدند [۲۷].

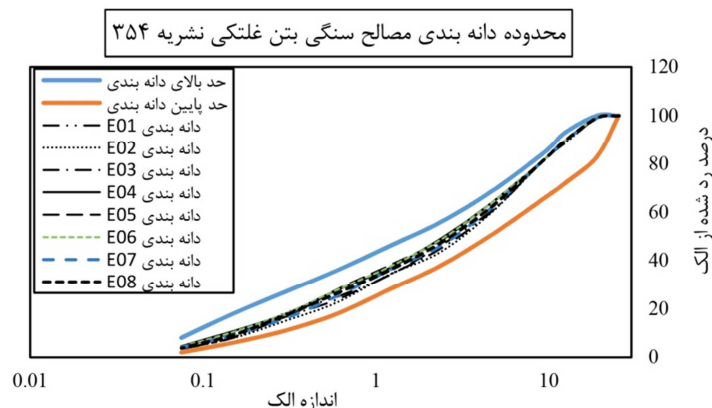


شکل ۲- معدل نرمی ماسه‌های مختلف

جدول ۴ جزئیات طرح‌های مخلوط مورد استفاده را نشان می‌دهد. در این جدول، Si به معنی منشاء سیلیسی، Ca به معنی منشاء کلسیمی، N به معنی ماسه طبیعی و C به معنی ماسه شکسته یا کوهی است. به عنوان مثال، طرح Ca50NSi50C به معنی اختلاط ۵۰ درصد ماسه کلسیومی طبیعی به همراه ۵۰ درصد ماسه سیلیسی شکسته است. در اختلاط مصالح مختلف سعی شد تا منحنی دانه‌بندی طرح‌های مختلف مخلوط تا حد امکان بر

جدول ۴- طرح‌های مخلوط مورد استفاده

شماره طرح	ماسه مورد استفاده از نظر جنس و نوع					
	ماسه رودخانه‌ای طبیعی	ماسه آهکی شکسته	ماسه معدنی طبیعی	ماسه کوهی شکسته	شماره دانه‌بندی	عیار سیمان (Kg/m ³)
Si100N	-	-	٪ ۱۰۰	-	E 01	۳۲۰
Ca100N	٪ ۱۰۰	-	-	-	E 02	۳۲۰
Ca50NSi50N	٪ ۵۰	-	٪ ۵۰	-	E 03	۳۲۰
Si100C	-	-	-	٪ ۱۰۰	E 04	۳۲۰
Ca100C	-	-	٪ ۱۰۰	-	E 05	۳۲۰
Ca50CSi50C	-	٪ ۵۰	-	٪ ۵۰	E 06	۳۲۰
Ca50NSi50C	٪ ۵۰	-	-	٪ ۵۰	E 07	۳۲۰
Ca50Cs150N	-	٪ ۵۰	٪ ۵۰	-	E 08	۳۲۰

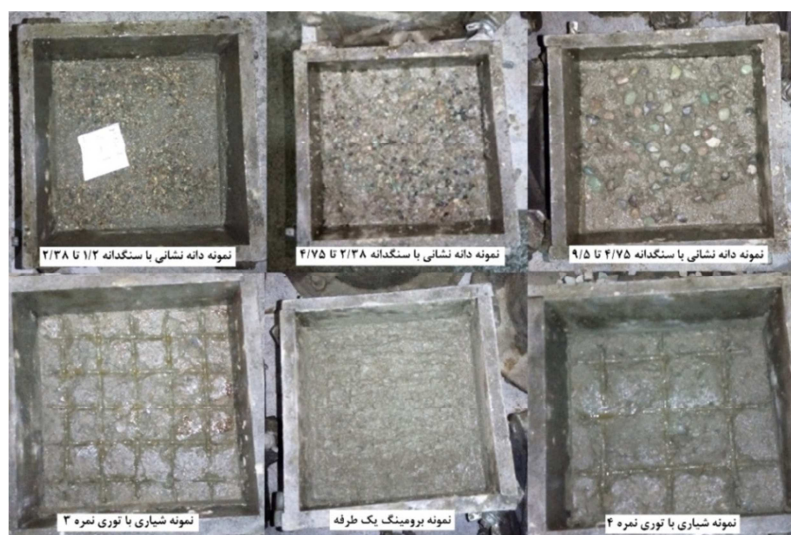


شکل ۳- دانه‌بندی مصالح سنگی در طرح‌های مخلوط

یک جهت یا دو جهت بر روی نمونه‌ها و تخلیه ریزدانه از بین درشت‌دانه‌ها ایجاد می‌شوند. تراکم نمونه‌ها براساس الزامات و توصیه‌های استاندارد شماره ASTM C1170 بر روی میز Vebe تحت سربار مشخص شده در استاندارد نامبرده انجام شد. در ادامه، نمونه بافت‌های ایجاد شده بر سطح نمونه‌های بتن غلتکی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

۲- سه نوع بافت دانه‌نشانی: که با ریختن سنگدانه بر روی بتن به اندازه‌های ۱/۱۹-۲/۳۸، ۲/۳۸-۴/۷۵ و ۴/۷۵ الی ۹/۵ میلیمتری و گذاشتن وزنه بر روی آنها و متراکم کردن بتن، در سطح بتن نشانده می‌شوند. این سنگدانه‌ها در حین فرایند متراکم کردن به بتن اضافه می‌شوند.

۳- دو نوع بافت برس‌کشی (شیاراندازی): که بعد از تراکم نمونه‌ها با کشیدن برس سیمی به صورت



شکل ۴- انواع بافت ایجاد شده بر روی نمونه‌ها

انگلیسی از روی سطح بتن مورد ارزیابی قرار گرفت. از آزمون پاندول انگلیسی عددی تحت عنوان BPN¹¹ استخراج می‌شود که بیانگر میزان مقاومت لغزندگی سطح

بعد از عمل‌آوری در حوضچه آب در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد به مدت ۲۸ روز، به منظور سنجش مقاومت لغزندگی مطابق با استاندارد ASTM E303، نمونه‌ها در شرایط مرطوب قبل و بعد از آزمایش سایش که مطابق با استاندارد ASTM C944 بر روی نمونه‌ها انجام شد، به وسیله اندازه‌گیری ۶ مرتبه عبور پاندول

¹¹- British Pendulum Number

این مقدار سایش در سه مرحله ۴۰۰ دوری و در مجموع ۱۲۰۰ دور بر روی نمونه اعمال می‌شود. شکل ۵-ب تصویر اهرم مضرس و دستگاه سایش را نشان می‌دهد. در این راستا مراجع مختلفی از این شیوه سایش برای ارزیابی مقاومت سایشی بتن استفاده نموده‌اند [۲۹-۳۱]. در شکل ۶ نمونه بتن غلتکی با سطح دانه‌نشانی قبل و بعد از سایش نشان داده شده است.

مورد آزمایش یک نمونه در محیط آزمایشگاه می‌باشد [۲۸]. شکل ۵-الف دستگاه پاندول انگلیسی حین آزمایش را نشان می‌دهد. براساس آزمون سایش که شبیه‌ساز حرکت و عبور ترافیک سنگین برای مدت نزدیک به دو سال بر روی روسازی است، یک اهرم T شکل که حاوی رینگ‌های مضرس می‌باشد تحت یک سربار ۹۸ نیوتنی برای مدت محاسبه شده (معادل ۴۰۰ دور گردش) به نمونه بتنی اعمال می‌شود.

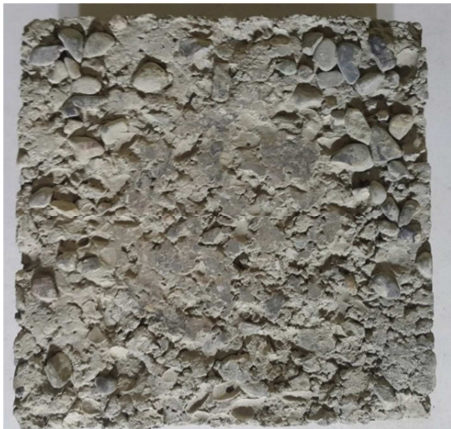


(ب)



(الف)

شکل ۵- (الف) دستگاه پاندول انگلیسی و (ب) دستگاه سایش به همراه اهرم T شکل



(ب)



(الف)

شکل ۶- نمونه بتن غلتکی با بافت دانه نشانی درشت (الف) قبل و (ب) بعد از سایش

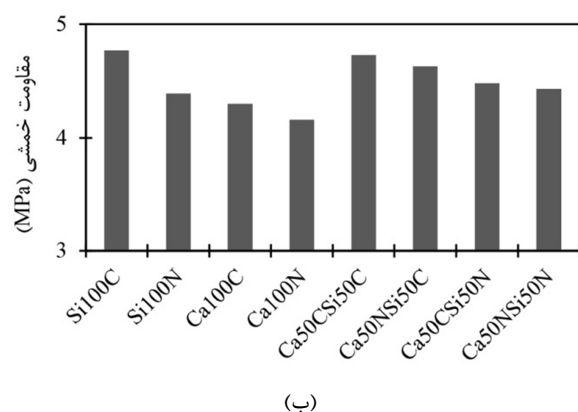
شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های سیلندری استاندارد تهیه شده در هریک از طرح‌های مخلوط این تحقیق میانگین سه نمونه مختلف است. همانطور که در شکل ۷ مشخص است، طرح مخلوط Si100C که از ماسه سیلیسی شکسته در آن استفاده

۴- تحلیل و تفسیر نتایج

۴-۱- خصوصیات مکانیکی بتن

مقاومت فشاری و خمشی طرح‌های مختلف مخلوط براساس استانداردهای ASTM C39 و ASTM C78 در

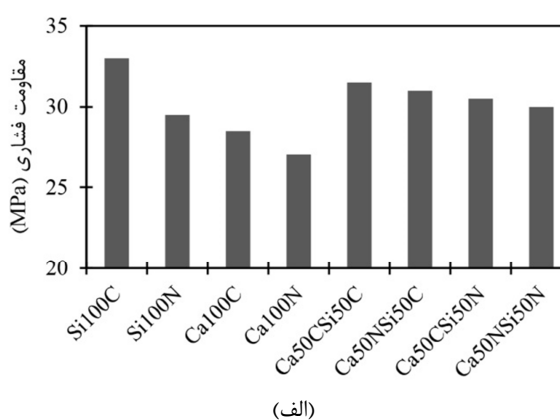
مقاومت فشاری است که توسط هرکدام از انواع ماسه حاصل شده است. نکته قابل تأمل در روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ماسه ترکیبی در مقایسه با نمونه‌های حاوی ماسه یکدست نشان داد که با ترکیب چند نوع ماسه با هم، مقاومت فشاری کمتر به درصد شکستگی مصالح وابسته است. در روند تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های اندازه‌گیری شده نسبت به روند تغییرات مقاومت فشاری تفاوت محسوسی مشاهده نشد، که در مقایسه با منابع مختلف این رفتار قابل پیش‌بینی بوده و بر یافته‌های پیشین مطابقت دارد.



(ب)

شده است بیشترین مقاومت فشاری را نشان داد. در مقابل، طرح مخلوط Ca100N که از ماسه آهکی شکسته در آن استفاده شده است کمترین مقدار مقاومت فشاری را نشان داد. با مقایسه طرح‌های مختلف مشخص است که مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده از ماسه شکسته بیشتر از نمونه‌های ساخته شده از ماسه طبیعی است و این روند در ماسه آهکی و سیلیسی نیز مشاهده شد.

از شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که با مخلوط دو ماسه مختلف سیلیسی و آهکی با هم، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش بسیار بیشتر از مقدار



(الف)

شکل ۷- مقاومت (الف) فشاری و (ب) خمشی بتن غلتکی در طرح‌های مختلف مخلوط

قبل از سایش مشاهده می‌شود. با مشاهده شکل ۸- الف می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مصالح شکسته، به‌ویژه مصالح شکسته کلسیمی (آهکی)، باعث افت بیشتر مقاومت لغزندگی بعد از سایش می‌شود. عدد پاندول در هیچ‌کدام از طرح‌های مخلوط از مقدار حداقل ۴۲ کمتر نیست و بنابراین می‌توان ادعا نمود که تمام بافت‌های ایجاد شده از این منظر حداقل‌های مورد نظر آیین‌نامه را دارا می‌باشند.

در شکل ۸- ب این موضوع کمی متفاوت است. در واقع استفاده از طرح‌های مخلوط حاوی سیلیس شکسته یا کلسیم طبیعی باعث تضعیف ساختار بتن شده که باعث افت مقاومت لغزندگی بعد از سایش در این نوع نمونه‌ها شده است. ولی در کل به دلیل اینکه ماهیت این نوع بافت خیلی به کنده شدن دانه از خمیر سیمان و میزان

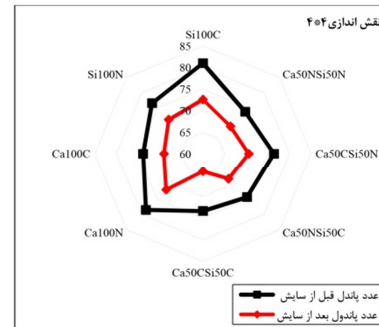
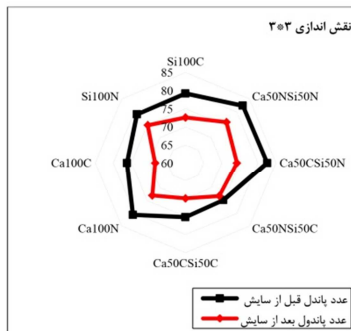
۴-۲- مقاومت لغزندگی قبل و بعد از سایش

در ادامه، به منظور بررسی توأمان تأثیر بافت طرح مخلوط بر مقادیر مقاومت لغزندگی قبل و بعد از سایش از نمودارهای راداری شکل ۸ استفاده شد. به دلیل پراکندگی داده‌های آزمایش و عدم مشاهده نظمی خاص در خصوص مقادیر عدد پاندول در مقابل طرح‌های مختلف مخلوط و به منظور فراهم آوردن یک دید کلی به جهت مقایسه بهتر بین داده‌ها از نمودار عنکبوتی استفاده شد.

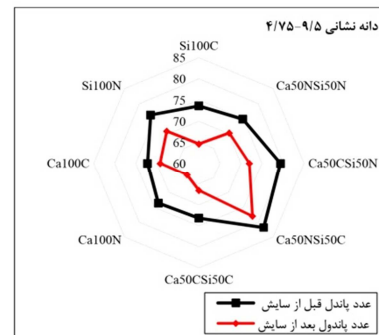
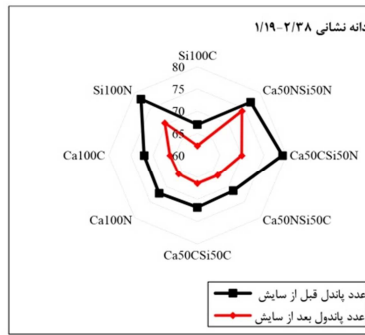
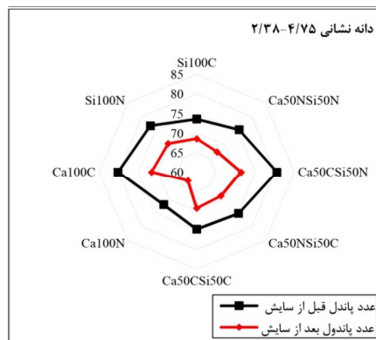
همانطور که از نتایج شکل‌های ۸- الف و ۸- ب مشخص است پراکندگی زیادی در نتایج مقاومت لغزندگی بین طرح‌های مختلف مخلوط در دو حالت قبل و بعد از سایش مشاهده می‌شود. قطعاً نکته اساسی مشترک در بین تمام شکل‌های ارائه شده، کاهش در مقاومت لغزندگی نمونه‌ها بعد از سایش در مقایسه با مقاومت لغزندگی نمونه‌های

مقاومت لغزندگی دارای پراکندگی زیادی می‌باشند.

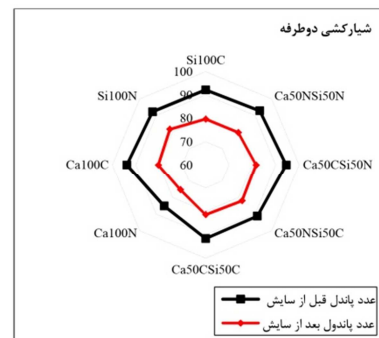
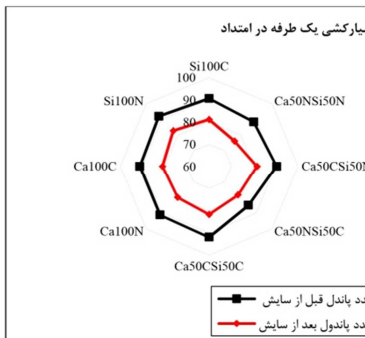
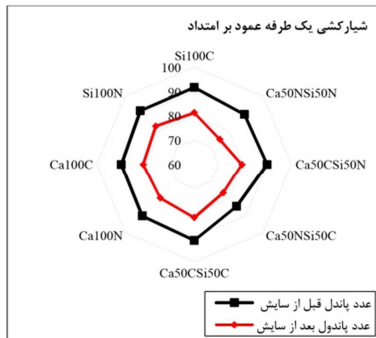
فرورفتگی جای دانه‌های کنده شده وابسته است نتایج



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۸- مقادیر مقاومت لغزندگی (BPN) در برابر طرح‌های مختلف مخلوط در (الف) دو بافت نقش‌اندازی، (ب) سه بافت دانه‌نشانی و (پ) دو بافت شیارکشی در شرایط قبل و بعد از سایش

۴-۲-۱ تحلیل آماری داده‌ها

در پروسه تحلیل و بررسی نتایج تحقیق به روش کیفی و با استفاده از نمودار، مزایای زیادی وجود دارد. یکی از مهمترین مزایای روش تحلیل نموداری، درک بهتر از شرایط و روند نتایج می‌باشد. در روش تحلیل نموداری با استفاده از نمودار یک تصور بهتر ذهنی از چگونگی روند موجود بین استراتژی‌های مختلف به‌وجود می‌آید و این امر به نتیجه‌گیری بهتر و راحت‌تر کمک می‌کند. همچنین روش تحلیل نموداری کمک بسزایی در کنترل نتایج

در خصوص نتایج مقاومت لغزندگی که در شکل ۸- پ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود نتایج مقاومت لغزندگی در بافت شیارکشی نسبتاً منظم‌تر از بقیه بافت‌ها است و به‌نظر می‌رسد در بافت شیارکشی یک‌طرفه، کم دوام‌ترین مخلوط، ترکیب ۵۰-۵۰ ماسه سیلیس طبیعی و کلسیم طبیعی، به دلیل افت شدید مقاومت لغزندگی بعد از سایش باشد. از این منظر در بافت شیارکشی دوطرفه، کم‌دوام‌ترین مخلوط، ترکیب ساخته شده از کلسیم شکسته می‌باشد.

متقابل یا عدم تأثیر متقابل مشخص می‌شود را با P-value نشان می‌دهند. مقدار P کمتر از ۰/۰۵ در آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان‌دهنده این است که حداقل یکی از انواع طرح مخلوط یا بافت‌های ایجاد شده با بقیه فرق دارد. این مقدار در آنالیز واریانس دوطرفه بدین صورت معنی دارد که دو متغیر بافت و طرح مخلوط نسبت به هم اثر متقابلی نداشته و می‌توان هرکدام را جداگانه مورد بررسی قرار داد.

در ادامه به منظور کنترل شرایط انجام آزمون واریانس، با بررسی منحنی چهارک-چهارک (Q-Q plot) مقادیر باقیمانده، نرمال بودن داده‌ها تأیید شد. از این رو امکان انجام آنالیز واریانس میسر است. در این قسمت نتایج آنالیز واریانس برای معیار مقاومت لغزندگی قبل و بعد از سایش در برابر متغیرهای بافت و طرح مخلوط در جدول ۵ ذکر شده است. براساس نتایج این جدول، روش‌های مختلف ایجاد بافت سطحی و انواع مختلف طرح مخلوط، برهم‌کنشی نداشته و یا خیلی ضعیف دارند و این بدین معنی است که اصولاً آنالیز واریانس دوطرفه برای تحلیل داده‌ها لازم نبوده و هر یک از استراتژی‌های را می‌بایست مستقلاً با آنالیز یک‌طرفه تحلیل کرد.

می‌کند. با یک نگاه اجمالی به نمودار می‌توان اشتباه احتمالی که در بیشتر موارد به دلیل وجود خطا است را تشخیص داد. ولی با این وجود، روش تحلیل نموداری دارای معایبی هم هست. یکی از اساسی‌ترین معایب این روش، کیفی بودن نتایج می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که مقایسه کمی بین نتایج مختلف به صورت دقیق میسر نمی‌باشد. در بررسی وقایعی که جنبه احتمالاتی زیادی دارند مانند داده‌های آزمایشگاهی، در بیشتر موارد، بین نتایج اختلافاتی به چشم می‌خورد. مشخص کردن سطح معناداری این اختلاف با استفاده از آزمون‌هایی از قبیل آزمون واریانس امکان‌پذیر است. برای استفاده از آزمون واریانس، در این تحقیق از نرم‌افزار MINITAB استفاده شد. قابل ذکر است در این تحقیق آنالیز واریانس به دو صورت یک‌طرفه و دوطرفه انجام شد.

با استفاده از آنالیز واریانس دوطرفه، استقلال یا وابستگی هرکدام از روش‌های مختلف ایجاد بافت سطحی و انواع مختلف طرح مخلوط در مورد هر یک از معیارهای هدف (عدد پاندول قبل و بعد از سایش) مستقلاً نسبت به هم و همچنین در رابطه با هم نیز سنجیده می‌شود. معیاری که با توجه به آن استقلال یا وابستگی، تأثیر

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس دوطرفه در خصوص معیار هدف عدد لغزندگی پاندول (BPN)

بعد از سایش						قبل از سایش					
P	F	متوسط مجموع مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	پارامتر	P	F	متوسط مجموع مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	پارامتر
صفر	۳۰/۰۵	۲۴۷/۹۷۵	۱۷۳۵/۸۲	۷	بافت‌ها	صفر	۵۷/۷۹	۴۷۱/۰۲۵	۳۲۹۷/۲	۷	بافت‌ها
۰/۱۹۱	۱/۴۹	۱۲/۳۳۳	۸۶/۳۳	۷	طرح‌های مخلوط	۰/۰۸۱	۱/۹۶	۱۵/۹۴۳	۱۱۱/۶	۷	طرح‌های مخلوط
-	-	۸/۲۵۲	۴۰۴/۳۳	۴۹	خطا	-	-	۸/۱۵۰	۳۹۹/۴	۴۹	خطا
-	-	-	۲۲۲۶/۴۹	۶۳	مجموع	-	-	-	۳۸۰۸/۱	۶۳	مجموع

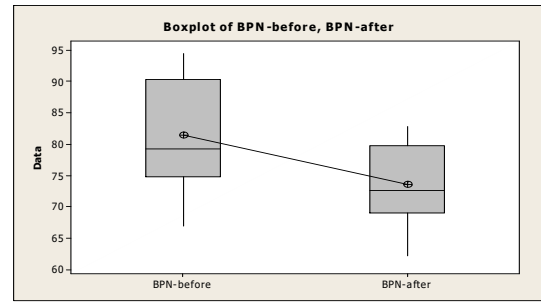
خطای ۵٪ به مقدار ۶/۴۴ است، از این‌رو، فرض صفر رد می‌شود و این دو مجموعه داده از نظر آماری دارای اختلاف معناداری می‌باشند. با تقسیم ۷/۸۸ بر میانگین داده‌های مقاومت لغزندگی قبل از سایش (۸۲) مقدار افت مقاومت لغزندگی نمونه‌های بعد از سایش نسبت به حالت

همچنین با استفاده از آزمون آماری T-student و فرض صفر (H_0)، تساوی نتایج لغزندگی مجموعه نمونه‌های قبل و بعد از سایش مشخص شد که مقدار اختلاف دو مجموعه همانطور که در شکل ۹ مشخص است ۷/۸۸ واحد می‌باشد که بیشتر از T-value در سطح

برای قبل و بعد از سایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. هدف از این نحوه نمایش فقط بررسی تأثیر طرح مخلوط مصالح بر مقاومت لغزندگی است.

در مقام مقایسه گرافیکی بین نمونه‌های مختلف مشخص است که یک روند مشخص بین نمونه‌های طرح مخلوط در مجموع همه بافت‌ها مشاهده شد. بر این اساس هم قبل و هم بعد از سایش این روند به‌طور مشابه مشاهده شد. براساس این روند، نمونه‌های ساخته شده از سیلیس طبیعی (Si100N) و ترکیب ۵۰-۵۰ کلسیم شکسته و سیلیس طبیعی (Ca50CSi50N) دارای بیشترین مقاومت لغزندگی می‌باشند.

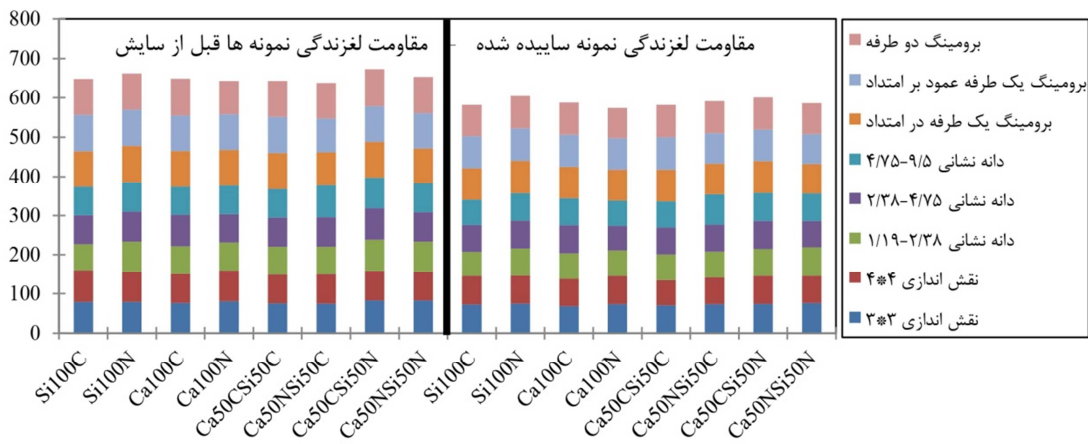
قبل از سایش در حدود ۱۰٪ تخمین زده می‌شود.



شکل ۹- بررسی آماری سطح معناداری دو مقدار مقاومت لغزندگی قبل و بعد از سایش

۳-۴- تأثیر طرح مخلوط بر مقاومت لغزندگی

در ادامه، مقادیر مجموع مقاومت لغزندگی بافت‌های مختلف سطحی در مقابل مقادیر طرح مخلوط متفاوت



شکل ۱۰- مقایسه مقاومت لغزندگی قبل و بعد از سایش نمونه‌های بتن غلتکی در برابر طرح‌های مختلف مخلوط

پایه مقایسه مقادیر میانگین این طرح‌ها با هم بنا شده است استفاده شد. با کمک آنالیز واریانس تنها با یک بار آزمون اختلاف بین میانگین تمام گروه‌ها آزمایش می‌شود بدون اینکه احتمال خطا افزایش یابد. در آنالیز واریانس یک‌طرفه فرض صفر (فرض اولیه) این است که هیچ اختلافی بین میانگین گروه‌های مورد آزمایش وجود ندارد و فرض مقابل این است که میان میانگین حداقل دو گروه اختلاف معناداری وجود دارد. در حالتی که فرض صفر (H_0) پذیرفته شود، می‌پذیریم که بین میانگین گروه‌ها اختلافی وجود ندارد و تحلیل به پایان می‌رسد؛ اما در حالتی که فرض صفر رد شود، قطعاً اختلافی میان گروه‌ها

همچنین ترکیب دارای ۱۰۰ درصد ماسه کلسیمی طبیعی و ترکیب ۵۰-۵۰ کلسیم طبیعی و سیلیس شکسته در دو حالت قبل و بعد از سایش دارای کمترین مقاومت لغزندگی است. سپس از بعد آماری این نتایج مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار می‌گیرند.

۳-۴-۱ تحلیل آماری نتایج طرح‌های مختلف مخلوط بر مقاومت لغزندگی

در قدم اول لازم است معناداری تغییراتی که بین گزینه‌های ۸گانه طرح مخلوط در رابطه با مقادیر مقاومت لغزندگی قبل و بعد از سایش مشاهده می‌شود بررسی شود. برای این منظور از آنالیز واریانس یک‌طرفه که بر

طرح‌های مختلف مخلوط معنادار نمی‌باشند؛ بدین معنی که با تغییر طرح مخلوط هیچ اختلاف معناداری در نتایج مقاومت لغزندگی رخ نخواهد داد. فرضا اگر اختلاف معنادار بود در گام بعد این سوال مطرح می‌شد که تفاوت میانگین بین کدام دو گروه معنی‌دار می‌باشد؟ در همین راستا روش‌های متنوعی برای مقایسه مقادیر میانگین بین گروه‌ها وجود دارد که یکی از آنها آزمون توکی است.

وجود دارد و باید اختلاف را بیابیم که این امر با استفاده از آزمون‌های تکمیلی (آزمون‌های تعقیبی مانند توکی)، که در ادامه بدان اشاره می‌شود، میسر می‌باشد. بر این اساس نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه در جدول ۶ نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۶ چون مقادیر P-Value بزرگتر از ۰/۰۵ می‌باشند بنابراین فرض صفر رد شده و نتایج مختلف مقاومت لغزندگی با تغییر

جدول ۶- آنالیز ANOVA یک‌طرفه بین نتایج مقاومت لغزندگی در برابر تغییرات طرح مخلوط قبل و بعد از سایش

بعد از سایش					قبل از سایش						
P	F	میانگین مجموع مربعات تنظیم شده	مجموع مربعات تنظیم شده	درجه آزادی	پارامتر	P	F	میانگین مجموع مربعات تنظیم شده	مجموع مربعات تنظیم شده	درجه آزادی	پارامتر
۰/۹۴۱	۰/۳۲	۱۲/۳۳	۸۶/۳۳	۷	طرح‌های مخلوط	۰/۹۷۳	۰/۲۴	۱۵/۹۴	۱۱۱/۶	۷	طرح‌های مخلوط
-	-	۳۸/۲۲	۲۱۴۰/۱۵	۵۶	خطا	-	-	۶۶/۰۱	۳۶۹۶/۵	۵۶	خطا
-	-	-	۲۲۲۶/۴۹	۶۳	مجموع	-	-	-	۳۸۰۸/۱	۶۳	مجموع

همانطور که در تحلیل گرافیکی نمودارها در مرحله قبل اشاره شد استفاده از سیلیس طبیعی به تنهایی یا با مصالح شکسته آهکی بیشترین مقاومت لغزندگی را باعث شد. در این آزمون نیز این مطلب بعد از مرتب شدن نزولی مقادیر مختلف مقاومت لغزندگی متناظر با هر طرح مخلوط، قابل مشاهده است.

همانگونه که در جدول ۷ ملاحظه می‌شود این آزمون تعقیبی، طرح‌های مختلف مخلوط در حالت قبل و بعد از سایش را همگی داخل دسته‌ای به نام A قرار داده است و عملاً از دید این آزمون، تفاوت معناداری بین مقادیر مقاومت لغزندگی با تغییر در طرح مخلوط وجود ندارد که در واقع تأییدی بر این یافته در آزمون واریانس است.

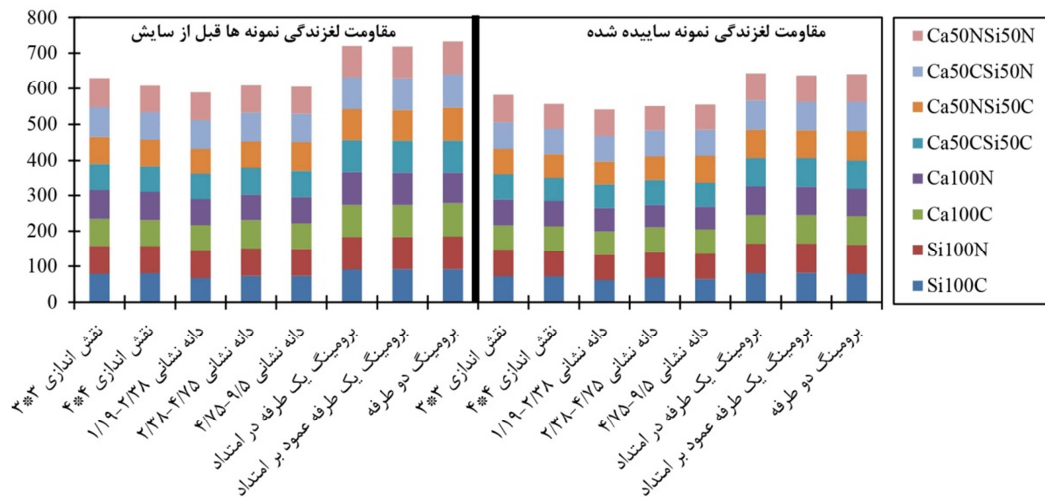
جدول ۷- نتایج آزمون تعقیبی توکی در خصوص مقاومت لغزندگی در برابر طرح‌های مختلف مخلوط قبل و بعد از سایش

بعد از سایش				قبل از سایش			
گروه‌بندی	متوسط	تعداد	طرح‌های مخلوط	گروه‌بندی	متوسط	تعداد	طرح‌های مخلوط
A	۷۵/۵۳	۸	Si100N	A	۸۴/۱۴	۸	Ca50CSi50N
A	۷۵/۰۸	۸	Ca50CSi50N	A	۸۲/۷۸	۸	Si100N
A	۷۳/۹۳	۸	Ca50NSi50C	A	۸۱/۷۳	۸	Ca50NSi50N
A	۷۳/۵۰	۸	Ca100C	A	۸۱/۱۷	۸	Ca100C
A	۷۳/۲۸	۸	Ca50NSi50N	A	۸۱/۱۱	۸	Si100C
A	۷۲/۸۰	۸	Si100C	A	۸۰/۴۵	۸	Ca100N
A	۷۲/۷۵	۸	Ca50CSi50C	A	۸۰/۴۴	۸	Ca50CSi50C
A	۷۱/۷۸	۸	Ca100N	A	۷۹/۸۱	۸	Ca50NSi50C

۴-۴- تأثیر بافت درشت بر مقاومت لغزندگی

۲/۳۸-۱/۱۹ میلیمتر تأثیر کمتری بر افزایش مقاومت لغزندگی در مقایسه با دو بافت دیگر دارد. در ادامه مشاهده می‌شود که بافت شیارکشی (یک‌طرفه یا دوطرفه) تفاوت چندانی با هم ندارند ولی نسبت به بقیه روش‌های ایجاد بافت بر روی بتن غلتکی از مقاومت لغزندگی بالاتری برخوردارند. بر این اساس ملاحظه می‌شود که ایجاد بافت شیاری در جهت یا عمود بر جهت حرکت جریان ترافیک تفاوت محسوسی در تأمین مقاومت لغزندگی ندارد. روندها و یافته‌های فوق در دو حالت قبل و بعد سایش تقریباً مشابه می‌باشند.

بر اساس نتایج مشاهده شده در شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که بافت نقش‌اندازی ۴×۴ سانتیمتری از مقاومت لغزندگی کمتری در برابر بافت نقش‌اندازی ۳×۳ سانتیمتری برخوردار است. در واقع بافت ۴×۴ سانتیمتری از تراکم بافت کمتری در واحد سطح در مقایسه با بافت نقش‌اندازی ۳×۳ سانتیمتری برخوردار می‌باشد، از این رو حرکت پاندول را کمتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که بافت دانه‌نشانی در سه سطح ریز، متوسط و درشت دارای نتایج تقریباً مشابهی است. با این وجود به‌نظر می‌رسد استفاده از دانه‌های ریز به اندازه



شکل ۱۱- بررسی مقاومت لغزندگی قبل و بعد از سایش در برابر بافت‌های مختلف

تغییر نوع بافت دارای معناداری مناسبی است. بنابراین می‌توان ادعا نمود که حداقل یک بافت وجود دارد که با بقیه اختلاف معناداری در میزان عدد لغزندگی دارد.

با استفاده از نتایج آزمون توکی در جدول ۹ اطلاعات بیشتری در مورد دسته‌بندی بافت‌های مشابه و رده‌بندی بافت‌های مختلف از منظر عدد لغزندگی ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود این آزمون تعقیبی، گروه‌ها را به سه دسته تقسیم می‌کند. گروه A شامل بافت‌های شیارکشی یک‌طرفه در جهت حرکت ترافیک و عمود بر آن و شیارکشی دوطرفه، گروه B شامل بافت‌های نقش‌اندازی ۳×۳ و ۴×۴ سانتیمتری و بافت‌های

۴-۴-۱- تحلیل آماری مقاومت لغزندگی در برابر انواع بافت درشت

یکی از مواردی که در اغلب تحقیقات مغفول مانده، بررسی آماری داده‌های به‌دست آمده می‌باشد. به طور کلی هرگاه پژوهشگر بخواهد نسبت به مقایسه دو متغیر وابسته نتیجه‌گیری نماید، می‌بایست این نتیجه با توجه به داده‌های آماری مورد صحت‌سنجی قرار گرفته و بررسی شود. بر این اساس نتایج آزمون واریانس یک‌طرفه در جدول ۸ نمایش داده می‌شود.

بر اساس نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه و با استناد به مقدار P، در دو حالت قبل و بعد از سایش، نتایج از نظر

شیارکشی دوطرفه، گروه B شامل بافت‌های نقش‌اندازی 3×3 و 4×4 سانتیمتری و بافت‌های دانه‌نشانی با اندازه متوسط و بزرگ و گروه C شامل بافت‌های سه‌گانه دانه‌نشانی به همراه بافت 4×4 نقش‌اندازی است.

دانه‌نشانی با اندازه متوسط و بزرگ و گروه C شامل بافت‌های سه‌گانه دانه‌نشانی به همراه بافت 4×4 نقش‌اندازی است. گروه A شامل بافت‌های شیارکشی یک‌طرفه در جهت حرکت ترافیک و عمود بر آن و

جدول ۸- آنالیز ANOVA یک‌طرفه بین نتایج مقاومت لغزندگی در برابر تغییرات بافت‌های مختلف قبل و بعد از سایش

بعد از سایش						قبل از سایش					
P	F	میانگین مجموع مربعات تنظیم شده	مجموع مربعات تنظیم شده	درجه آزادی	پارامتر	P	F	میانگین مجموع مربعات تنظیم شده	مجموع مربعات تنظیم شده	درجه آزادی	پارامتر
صفر	۵۱/۶۲	۴۷۱/۰۲۵	۳۲۹۷/۲	۷	طرح‌های مخلوط	صفر	۲۸/۳۰	۲۴۷/۹۷۵	۱۷۳۵/۸	۷	بافت‌ها
-	-	۹/۱۲۴	۵۱۱/۰	۵۶	خطا	-	-	۸/۷۶۲	۴۹۰/۷	۵۶	خطا
-	-	-	۳۸۰۸/۱	۶۳	مجموع	-	-	-	۲۲۲۶/۵	۶۳	مجموع

جدول ۹- نتایج آزمون تعقیبی توکی در خصوص مقاومت لغزندگی در برابر بافت‌های مختلف قبل و بعد از سایش

بعد از سایش					قبل از سایش						
گروه‌بندی	متوسط	تعداد	بافت‌ها	گروه‌بندی	متوسط	تعداد	بافت‌ها	گروه‌بندی	متوسط	تعداد	بافت‌ها
A	۹۱/۷۰	۸	نقش‌اندازی دوطرفه	A	۸۰/۳۷۵	۸	نقش‌اندازی یک‌طرفه (موازی)	A	۸۰/۱۲۵	۸	نقش‌اندازی دوطرفه
A	۹۰/۱۰۰	۸	نقش‌اندازی یک‌طرفه (موازی)	A	۷۹/۷۲۵	۸	نقش‌اندازی یک‌طرفه (عمود)	A	۷۲/۷۷۵	۸	نقش‌اندازی 3×3
A	۸۹/۸۲۵	۸	نقش‌اندازی یک‌طرفه (عمود)	B	۶۹/۶۲۵	۸	نقش‌اندازی 4×4	B	۶۸/۸۵۰	۸	دانه‌نشانی 4×4
B	۷۸/۷۵	۸	نقش‌اندازی 3×3	B	۶۸/۸۵۰	۸	دانه‌نشانی 4×4	B	۶۷/۷۳	۸	دانه‌نشانی $2/38-1/19$
C	۷۶/۰۷	۸	دانه‌نشانی $4/75-2/38$	C	۶۷/۷۳	۸	دانه‌نشانی $2/38-1/19$	C			
C	۷۶/۰۰	۸	نقش‌اندازی 4×4	C				C			
C	۷۵/۶۰	۸	دانه‌نشانی $9/5-4/75$	C				C			
C	۷۳/۵۷	۸	دانه‌نشانی $2/38-1/19$	C				C			

و دانه‌نشانی است. در بین بافت‌های مختلف دانه‌نشانی، بافت ریز قبل و بعد از سایش از مقاومت اصطکاکی کمی برخوردار می‌باشد. به نظر می‌رسد کل دانه‌ها در خمیر سیمان نفوذ نموده‌اند و عملاً در ایجاد مقاومت لغزندگی مؤثر نمی‌باشند. بافت دانه‌نشانی درشت قبل از سایش و بعد از سایش تغییر محسوسی را در بین دیگر بافت‌ها نشان نمی‌دهد ولی همانطور که در شکل ۶ نشان داده شد عموماً دانه‌های نشانداده شده از سطح بتن کنده شده‌اند. احتمالاً کنده‌شدن دانه‌ها از سطح بتن خود بافت جدیدی (از مثبت (برآمده) به حالت منفی (فرورفتگی)) را ایجاد نموده باشد که خود به نوعی ناهمواری ایجاد نموده و

در داخل دسته‌ها، تفاوت معنی‌داری بین اعضای هر دسته با هم وجود ندارد، اما میانگین دسته‌ها نسبت به هم تفاوت معنی‌داری دارد. نتایج مختلف بین مقادیر عدد پاندول قبل و بعد از سایش تقریباً مشابه است ولی ترتیب بافت‌های مختلف از منظر دوام بافت متفاوت شده است. به نظر می‌رسد بافت‌های دانه‌نشانی از افت بیشتری در فرایند سایش برخوردار بوده‌اند که این باعث کاهش ناهمواری سطحی در آنها شده است و از این رو باعث کاهش عدد لغزندگی در آنها شده است. بر این اساس بافت‌های مختلف بعد از سایش از جهت بیشترین مقدار مقاومت لغزندگی به ترتیب، بافت شیارکشی، نقش‌اندازی

سایش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به شرح زیر می‌باشد:

- سایش در حدود ۱۰ درصد از مقاومت لغزندگی نمونه‌های ساخته شد را کاهش می‌دهد ولی همچنان میزان عدد پاندول از مقادیر حداقل توصیه شده توسط آیین‌نامه‌های مختلف ($BPN \geq 42$) بیشتر است.

- همچنین نتایج مطالعه آماری نشان داد تغییر طرح‌های مختلف مخلوط، تأثیر محسوسی بر مقاومت لغزندگی ندارد. ولی به‌طور خیلی جزئی می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های ساخته شده از سیلیس طبیعی (Si100N) و ترکیب ۵۰-۵۰ کلسیم شکسته و سیلیس طبیعی (Ca50CSi50N) از بین دیگر طرح‌های مخلوط دارای بیشترین مقاومت لغزندگی می‌باشند.

- مطالعات آماری نشان داد که مقاومت لغزندگی به نوع بافت کاملاً وابسته است به‌گونه‌ای که بافت شیارکشی بیشترین و دانه‌نشانی کمترین مقاومت لغزندگی را قبل و بعد از سایش نشان می‌دهد.

- با توجه به نتایج به‌دست آمده برای مقاومت لغزندگی، می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که مقاومت لغزندگی برای هر دو حالت قبل و بعد از آزمون سایشی نسبت به بافت‌های شیارکشی شده حساسیت زیادتری نشان می‌دهند به‌گونه‌ای که بافت شیارکشی بیشترین مقدار عدد پاندول را دارا است.

- بافت نقش‌اندازی 3×3 سانتیمتری نسبت به بافت 4×4 سانتیمتری با توجه به تراکم بیشتر بافت بر روی سطح بتن غلتکی، مقاومت لغزندگی بیشتری قبل و بعد از سایش دارد.

مقاومت لغزندگی متأثر از بافت جدید (منفی) باشد. بافت دانه‌نشانی متوسط قبل و بعد از سایش دچار افت شدیدی شده است. این بدان معنی است که با کنده شدن دانه‌ها و عدم وجود حفره‌های عمیق در محل دانه‌های کنده شده، دلیلی بر کاهش شدید مقاومت لغزندگی قبل و بعد از سایش باشد.

با بررسی مطالعات گذشته در خصوص تأثیر طرح مخلوط بر مقاومت لغزندگی و مقایسه آنها با نتیجه این تحقیق به عدم تأثیر معنادار طرح مخلوط بر مقاومت لغزندگی، باید توجه داشت که در این تحقیق تأثیر همزمان طرح مخلوط و بافت درشت با هم مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجا که تأثیر بافت درشت به مراتب از تأثیر طرح مخلوط بر مقاومت لغزندگی بیشتر شده است به‌گونه‌ای که عملاً تغییرات مقاومت لغزندگی ناشی از طرح مخلوط مختلف در مقابل طرح‌های بافت درشت متفاوت ناچیز بوده، بنابراین آزمون‌های آماری عدم حساسیت نتایج مقاومت لغزندگی (که ناشی از تأثیر توأمان هر دو عامل بوده است) به تغییرات طرح مخلوط را در مقایسه با تغییرات زیاد ناشی از طرح‌های متفاوت بافت درشت، نامحسوس تشخیص داده‌اند که به‌نظر می‌رسد با واقعیت میدانی متفاوت باشد؛ ولی حداقل این نتیجه نشان‌دهنده این نکته می‌باشد که برای افزایش مقاومت لغزندگی یک روسازی، عامل ایجاد بافت سطحی نسبت به عامل طرح مخلوط مؤثرتر است.

۵- نتیجه‌گیری

به منظور رفع مشکل رویه‌های بتن غلتکی در زمینه مقاومت لغزندگی در این تحقیق اثر توأمان طرح مخلوط مختلف و بافت‌های درشت متفاوت در حالت قبل و بعد از

مراجع

[1] Islamic Republic of Iran Vice presidency for strategic planning and supervision. (2009). *Guideline For Design and Construction of Rolled Compacted Concrete Pavements*, No. 354, <http://tec.mporg.ir>.

- [2] Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C. V., Ceylan, H., & Bektas, F. (2010). *Guide for roller-compacted concrete pavements*. InTrans Project Reports. 102. https://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/102.
- [3] Heinrichs, K. W., Liu, M. J., Darter, M. I., Carpenter, S. H., & Ioannides, A. M. (1989). *Rigid pavement analysis and design* (No. FHWA-RD-88-068). United States. Federal Highway Administration.
- [4] Kim, S. M., Won, M. C., & Frank McCullough, B. (2002). "Dynamic stress response of concrete pavements to moving tandem-axle loads", *Transportation Research Record, 1809*(1), 32-41.
- [5] Lu, Q., & Steven, B. (2006). *Friction Testing of Pavement Preservation Treatments: Literature Review*. UC Davis: University of California Pavement Research Center. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/3jn462tc>
- [6] Zamani Abyaneh, M. R., Mousavi, S. M., Naderi, S., & Javidan, M. M. (2012). "Comparison of concrete and asphalt pavements", *1st National Conference of Concrete in City Kerman*, <https://civilica.com/doc/164628>.
- [7] Nanni, A., Ludwig, D., & Shoenberger, J. (1996). "Roller compacted concrete for highway pavements", *Concrete International, 18*(5), 33-38.
- [8] Ahammed, M. A., & Tighe, S. L. (2008). "Pavement surface mixture, texture, and skid resistance: A factorial analysis", In *Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future*, 370-384.
- [9] Hasan Pour, Sh., & Jannatiyan, M. R. (2016). "Presentation of methods to increase skid resistance and flexural strength of roller compacted concrete pavements in road and airport", *International Conference on Modern Research Results in Sciences, Engineering & Technology*, Mashhad, <https://civilica.com/doc/519753>.
- [10] Shekarchi Zadeh, M., Chini, M., & Aslanian, Z. (2013). "A review based on the design and characteristics of roller compacted concrete pavement", In *5th National Conference of Concrete*, <https://civilica.com/doc/240855>.
- [11] Jofré, C. (2019). "Roller Compacted Concrete: Making Concrete Pavements Available to the Whole Pavement Building Industry", *European Concrete Paving Association (EUPAVE)*, 16.
- [12] Khayat, K. H., & Farzadnia, N. (2020). *Field Implementation of Compacted Concrete Pavement* (No. cmr 20-004). Missouri. Department of Transportation. Construction and Materials Division.
- [13] Niknam, A. R. (2014). "The application of roller compacted concrete pavement in road construction", *Cement Technology Magazine*, No. 77, 57-64.
- [14] Rasmussen, R. O., Wiegand, P. D., Fick, G. J., & Harrington, D. S. (2012). *How to reduce tire-pavement noise: better practices for constructing and texturing concrete pavement surfaces*. No. DTFH61-06-H-00011 Work Plan 7; TPF-5 (139). United States. Federal Highway Administration.
- [15] Zollinger, D. (2016). *Roller-Compacted Concrete Pavement*, FHWA-HIF-16-003. 1200 New Jersey Avenue, SE Washington, DC, United States, 20590.
- [16] Ameri, M., Afandzade, Sh., & Mirabi Moghadam, M. H. (2008). "Investigating the methods of measuring the skid resistance of the road surface and how to evaluate it at the road", 4th National Congress on Civil Engineering, <https://civilica.com/doc/37699>.
- [17] Taylor, P. C., & Voigt, G. F. (2007). *Integrated materials and construction practices for concrete pavement: A state-of-the-practice manual* (No. FHWA HIF-07-004). United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.
- [18] Gonzalez, M. (2014). *Nanotechnology Applied in the Design of the Next Generation of Canadian Concrete Pavement Surfaces*. UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/8944>.
- [19] Dumitru, I., Song, T., Bornstein, B., & Sirivivatnanon, V. (2015). "Constraints in Using Manufactured Sands in Concrete Pavements in Australia", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9, 1318-1324.
- [20] Samani, S. G., Senior, S., & MacDonald, C. A. (2016). "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*.
- [21] Papenfus, N. (2003). "Applying concrete technology to abrasion resistance", In *Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Block Paving, Sun City, South Africa*.
- [22] Frolova, O., & Salaiová, B. (2017). "Analysis of road cover roughness on control road section with crumb tire rubber", *Procedia engineering, 190*, 589-596.
- [23] Tavakoli, D., Dehkordi, R. S., Divandari, H., & de Brito, J. (2020). "Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂", *Construction and Building Materials, 249*, 118747.
- [24] Komaragiri, S., Amirghanian, A., & Bhasin, A. (2020). "Friction and Texture Retention of Concrete Pavements", *Transportation Research Record, 2674*(6), 457-465.
- [25] Hall, J. W., Smith, K. L., & Littleton, P. C. (2009). *Texturing of concrete pavements* (Vol. 634). Transportation Research Board.
- [26] ASTM C136/C136M-14. (2014). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. Annual Book of ASTM Standards.

- [27] Test, C. C., Content, A., Rooms, M., & Concrete, P. (2002). ASTM C 192M-02. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the. Concrete, 4*, 1-8.
- [28] Qian, Z. D., Liu, Y., Liu, C. B., & Zheng, D. (2016). "Design and skid resistance evaluation of skeleton-dense epoxy asphalt mixture for steel bridge deck pavement", *Construction and Building Materials, 114*, 851-863.
- [29] Zaetang, Y., Sata, V., Wongsu, A., & Chindaprasirt, P. (2016). "Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials, 111*, 15-21.
- [30] Pyo, S., Abate, S. Y., & Kim, H. K. (2018). "Abrasion resistance of ultra high performance concrete incorporating coarser aggregate", *Construction and Building Materials, 165*, 11-16.
- [31] Abdel-Hafez, A. E., Hussein, A. A., & Bruneau, S. (2021). "Evaluating the ASTM C944 Rotating Cutters Method for Determining the Abrasion Resistance of Concrete", *Journal of Testing and Evaluation, 49*(6).