

بررسی تأثیر مشخصات شیارها بر مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی شیارزنی شده

سعید دورانی*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت

مدرس، تهران

ابوالفضل حسینی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

امیر کاوسی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: Saeed.dorani@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۳ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

چکیده

تأمین مقاومت لغزندگی کافی یکی از مسائل مهم در ساخت روسازی‌های بتنی می‌باشد و با توجه به عدم اصطکاک کافی در رویه‌های صاف و بدون بافت، از این نوع رویه‌ها فقط می‌توان در محل‌هایی مثل پارکینگ و انبارها که مسئله‌ی لغزندگی اهمیت چندانی ندارد، استفاده کرد. با وجود آن که دستورالعمل جامعی جهت ایجاد بافت روی روسازی‌های بتنی وجود ندارد، اما روش‌هایی مانند شیاردار کردن سطح رویه، گونی‌کشی، جارو زنی و نیز در معرض قرار دادن سنگ‌دانه‌ها، جهت ایجاد بافت روی روسازی و افزایش اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، روش شیارزنی روی بتن تازه، با استفاده از آزمایش‌های آونگ انگلیسی و پخش ماسه مورد مطالعه قرار گرفت. لذا، شیارهایی در سه فاصله‌ی مرکز تا مرکز (۱۲/۷، ۱۹ و ۲۵/۴ میلی‌متر)، سه پهنا (۲/۵، ۳/۲ و ۳/۸ میلی‌متر) و سه راستا (عرضی، مورب و طولی) روی نمونه‌های بتنی ایجاد شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عمق بافت ایجاد شده، با افزایش فاصله و کاهش پهنای شیارها، کمتر می‌شود. مقدار اصطکاک تولید شده در هر سه راستای شیارزنی، با افزایش فاصله‌ی شیارها، کاهش یافته و با افزایش پهنای شیارها، ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. مطابق نتایج، شیارهای عرضی بیشترین مقاومت لغزندگی را حاصل می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتنی، مقاومت لغزندگی، بافت درشت، شیارزنی، اصطکاک.

۱. مقدمه و مروری بر مطالعات پیشین

در دنیای امروز، حمل و نقل یکی از مهم‌ترین اجزای اقتصاد هر کشور محسوب شده و تسهیلات حمل و نقلی نقشی زیربنایی در اقتصاد ملی دارد. در میان تمام روش‌های حمل و نقل، حمل و نقل زمینی (خصوصاً به شکل جاده‌ای) بیشترین استفاده‌کننده را دارد. با توجه به آمار سرسام‌آور تعداد تصادفات در ایران، شناسایی عوامل این تصادفات و بررسی روش‌های کاهش آن از اهمیت دوچندانی برخوردار است (طاری‌بخش، ۱۳۹۰).

از طرفی، مواردی مثل صاف و هموار بودن سطح راه، ایمنی، دوام و سازگاری با محیط‌زیست، مشخصاتی هستند که در ساخت یک روسازی خوب، مد نظر مهندسان می‌باشند. در این راستا، مهندسان و طراحان روسازی‌های بتنی را به عنوان یک گزینه مناسب معرفی می‌کنند. نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر نسبت به رویه‌های آسفالتی، قابلیت اجرا روی بسترهای ضعیف، طول عمر مفید خدمت‌دهی بیشتر، سطح روشن‌تر و در نتیجه دید بهتر، از جمله مزایای روسازی‌های بتنی می‌باشند (حسینی و همکاران، ۱۳۸۵).

برای تأمین مقاومت لغزندگی کافی روی روسازی‌های بتنی به روش‌های مختلفی بافت سطحی ایجاد می‌شود تا میزان اصطکاک سطح روسازی به مقدار قابل قبولی برسد. در صورت ناکافی بودن مقاومت لغزندگی و از بین رفتن بافت سطحی رویه، تعداد و تلفات تصادفات به طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند. در این خصوص، روسازی‌های بتنی مشکلات مضاعفی نیز دارند زیرا پس از اتمام فرایند بتن‌ریزی و ویبره و تسطیح، رویه‌ی بتنی معمولاً سطحی کاملاً صاف و فاقد بافت درشت دارد و زبری رویه به هیچ وجه کافی نمی‌باشد. لذا، در شرایط بارانی، سطح رویه کاملاً لغزنده بوده و مستعد تصادفات زیادی خواهد بود.

در اوایل دهه‌ی ۷۰ میلادی، صاف بودن سطح رویه‌ی بتنی موجب تصادفات رانندگی بسیاری در ایالات متحده

آمریکا شد و پژوهشگران را بر آن داشت که با ابداعاتی نظیر شیارزنی روی سطح بتن، ضمن توجه به مسئله‌ی آلاینده‌ی صوتی، حفظ کیفیت سواری و دوام رویه، بافت درشت و مقاومت لغزندگی مورد نیاز را در سطح رویه‌ی بتنی ایجاد کنند (طاری‌بخش، ۱۳۹۰).

هر ساله، ۱۵٪ از تصادفات منجر به جراحت یا مرگ در شرایط هوای مرطوب اتفاق می‌افتد (طاری‌بخش، ۱۳۹۰). یکی از دلایل زیاد بودن تصادفات در آب و هوای مرطوب می‌تواند عدم وجود اصطکاک کافی بین روسازی و لاستیک باشد که منجر به تأمین نشدن مقاومت کافی در برابر لغزش شده و خطرآفرین می‌شود.

مهم‌ترین عامل در تأمین مقاومت لغزشی کافی، بافت سطحی روسازی است. بافت ریز و بافت درشت سطح روسازی عواملی هستند که در تأمین اصطکاک کافی و مقاومت لغزشی تأثیرگذار می‌باشند. بافت ریز، مقیاس کوچکی از بافت اجزا و مؤلفه‌های مصالح می‌باشد. در واقع، این بافت زبری‌های سطح خود مصالح می‌باشد و توسط مصالح زبر و درشت تولید می‌شود و بافت درشت، مقیاس بزرگتری از بافت مصالح می‌باشد که به نحوه‌ی دانه‌بندی، تراکم، اندازه و شکل دانه‌های درشت بستگی دارد. به عبارت دیگر، این بافت به نحوه‌ی قرارگیری ذرات در سطح روسازی وابسته است. بنا به مطالعات انجام شده، بافت ریز در تمامی سرعت‌ها در تأمین مقاومت لغزندگی مشارکت دارد. اما بافت درشت فقط در سرعت‌های زیاد و با تخلیه آب‌های سطحی روسازی مؤثر است (طاری‌بخش، ۱۳۹۰).

روش‌های مختلفی جهت ایجاد بافت درشت روی روسازی‌های بتنی وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند. معمولاً بلافاصله پس از انجام بتن‌ریزی، با استفاده از روش‌هایی مثل شیارزنی، بافت درشت مورد نیاز روی سطح بتن ایجاد می‌شود و یا پس از سخت شدن بتن، با استفاده از دستگاه‌های مخصوص، سطح رویه‌ی بتنی را بهبود داده و بافت درشت آن را

ایجاد بافت سطحی مناسب، اصطکاک و مقاومت لغزندگی کافی را تأمین می‌کند. همچنین، می‌تواند زهکشی روسازی را بهبود بخشیده و با کاهش پدیده‌ی آب‌پروازی موجب کاهش تصادفات شود. مطالعه‌ی میزان تصادفات بزرگراه ادن در ایلینویز ایالات متحده آمریکا به مدت چهار سال، نشان داد که شیارزنی عرضی سطح روسازی بتنی موجب کاهش ۲۲/۹ درصدی کل تصادفات و ۴۰/۸ درصدی تصادفات در شرایط مرطوب و یخبندان می‌شود. قابل ذکر است که تصادفات در شبکه راه خارج از این بزرگراه به میزان ۸/۹ درصد افزایش یافت (احامد و تیگه، ۲۰۰۸).

به نقل از مقاله‌ی احامد و تیگه، مطالعه‌ی زیپکس در سال ۱۹۷۶، انشان‌دهنده تأثیر قابل توجه تراشیدن سطح صیقلی شده روسازی در بهبود زهکشی است که موجب کاهش ضخامت فیلم آب روی سطح روسازی شده و تماس بهتر لاستیک و سطح روسازی را تأمین می‌کند و در نتیجه میزان تصادفات را کاهش می‌دهد و لزوم مطالعات بیش‌تر در این راستا را نشان می‌دهد. مقاله‌ی احامد و تیگه، همچنین به مطالعه داهیر و گرم‌لینگ در سال ۱۹۹۰ اشاره می‌کند که مطابق آن، بافت سطحی موجب تولید یک نیروی تأخیری در سطح تماس لاستیک با روسازی می‌شود که هنگام ترمزگیری در برابر لغزش مقاومت می‌کند. کاهش میزان آب پاشیده شده روی شیشه اتومبیل و همچنین کاهش خیرگی نور به دلیل زبرتر شدن سطح، از دیگر مزایای عمق بیشتر بافت می‌باشد که با بهبود دید، موجب کاهش میزان تصادفات می‌گردد. مطابق مقاله‌ی احامد و تیگه در سال ۲۰۰۸، مطالعات ایوی و مک‌فارلند در سال ۱۹۸۱ نشان می‌دهد که بافت سطحی بهتر و اصطکاک بیشتر می‌تواند منفعت اقتصادی نیز به دنبال داشته باشد چرا که موجب کاهش میزان تصادفات و نیز کاهش هزینه‌های روکش کردن سطح روسازی می‌شود. اگرچه، از طرف دیگر، میزان صدای حاصل از اندرکنش

افزایش می‌دهند. در انتخاب روش ایجاد بافت، علاوه بر بحث مقاومت لغزندگی، بایستی به دوام رویه در برابر سایش نیز توجه کرد. به طور کلی، باید گفت که انتخاب روش پرداخت سطح رویه، عاملی است که تأثیر بسیار زیادی بر اصطکاک نهایی و دوام سطح روسازی دارد. با این حال، دستورالعمل جامعی جهت شناسایی و انتخاب روش ایجاد بافت روی روسازی‌های بتنی که تمامی عوامل فنی، اقتصادی، ایمنی و زیست‌محیطی را در بر گیرد وجود ندارد و لذا مطالعات بیشتر در این راستا ضروری به نظر می‌رسد (لی و همکاران، ۲۰۰۳؛ هال و همکاران، ۲۰۰۹).

همان‌طور که توضیح داده شد، مقاومت لغزندگی رویه از بافت ریز و بافت درشت آن حاصل می‌شود. بافت ریز، زبری روسازی در مقیاس کوچک است که مستقیماً به ماهیت سنگ‌دانه‌ها و سطح آن‌ها مربوط است. بافت درشت، مقیاس بزرگتری از بافت مصالح می‌باشد که به نحوه‌ی دانه‌بندی، تراکم، و اندازه و شکل دانه‌های درشت بستگی دارد. در واقع، نحوه‌ی چینش سنگ‌دانه‌ها روی سطح روسازی است که میزان بافت درشت را تعیین می‌کند. بافت درشت، زبری‌هایی در سطح روسازی است که به صورت عامدانه روی سطح ایجاد می‌شود. به نقل از مقاله‌ی احامد و تیگه و طبق مطالعه هوترنر و همکاران در سال ۲۰۰۳، بافت ریز مناسب در سرعت‌های کمتر از ۷۲ کیلومتر بر ساعت، موجب تأمین اصطکاک کافی جهت عملیات ترمزگیری و توقف می‌شود؛ در حالی که برای سرعت‌های بیش از ۷۲ کیلومتر بر ساعت و یا در شرایطی که زهکشی آب‌های سطح روسازی اهمیت ویژه‌ای داشته باشد، بافت درشت اهمیت پیدا می‌کند (احامد و تیگه، ۲۰۰۸). لذا، بایستی با استفاده از روش‌های مناسب، بافت سطحی مورد نیاز روی روسازی‌های بتنی اجرا شوند تا از وجود مقاومت لغزندگی کافی در تمامی شرایط آب‌وهوایی و سرعت‌های مختلف وسیله‌ی نقلیه اطمینان حاصل گردد.

ساعت است و برای سرعت‌های کمتر، مقدار عدد لغزندگی کوچکتر است (احامد و تیگه، ۲۰۰۸). آیین‌نامه TRRL نیز حداقل مقادیر مجازی برای عدد آونگ انگلیسی را در شرایط مرطوب ذکر کرده است که در جدول ۱ آورده شده است.

لاستیک و روسازی را افزایش داده و سایش لاستیک‌ها و مصرف سوخت را بیشتر می‌کند (احامد و تیگه، ۲۰۰۸). آژانس‌های بزرگراهی در آمریکا مقادیر حداقلی را برای عدد لغزندگی تعیین کرده‌اند که در بازه‌ی ۳۰ تا ۴۰ قرار دارند. این مقادیر برای سرعت‌های بیش از ۶۵ کیلومتر بر

جدول ۱. حداقل مقدار مجاز عدد آونگی در محل‌های مختلف (هاسکینگ، ۱۹۹۲)

سطح محل	نوع محل	عدد آونگ انگلیسی در شرایط مرطوب
	میدان‌ها	
A	فوس‌های افقی با شعاع کمتر از ۱۵۰ متر	۶۵
	فوس‌های قائم با شیب بزرگ‌تر از ۱/۲ درصد و طول بیشتر از ۱۰۰ متر	
B	رویگردهای نزدیک به چراغ راهنمایی	۵۵
	بزرگراه‌ها، شاهراه‌ها و جاده‌های پرتردد در نواحی داخل شهری (ترافیک بیشتر از ۲۰۰۰ وسیله نقلیه در روز)	
C	سایر راه‌ها	۴۵

مقاومت سایشی از دستگاه سایش چرخ پهن استفاده گردید و نتیجه شد که برس‌کشی عرضی یا طولی روی بتن تازه، موجب بهبود ۳۲ الی ۳۸ درصدی مقاومت لغزندگی می‌گردد. نکته‌ی قابل توجه در این مطالعه، مشابه بودن نتایج روش‌های برس‌کشی عرضی و طولی از نظر مقاومت لغزندگی می‌باشد. در حالی که نمونه‌های برس‌کشی‌شده‌ی طولی حدود ۴ درصد مقاومت سایشی بیشتری از خود نشان دادند و این موضوع نشان‌دهنده‌ی ارجحیت روش برس‌کشی در جهت طولی می‌باشد. یک روش مرسوم دیگر جهت ایجاد بافت روی بتن تازه، در معرض قرار دادن سنگ‌دانه‌های آن با شستن ملات سطحی و یا پخش سنگ‌ریزه روی سطح آن می‌باشد. حداکثر اندازه‌ی سنگ‌دانه در این روش از ۸ تا ۱۶ میلی-متر متغیر است. همچنین، محدوده ۲/۴ تا ۳۲ میلی‌متر نیز پیشنهاد شده است. عمق بافت پیشنهاد شده برای این

روش‌های مختلفی جهت ایجاد بافت درشت روی روسازی‌های بتنی وجود دارد. کشیدن گونی کرباسی تا اواسط دهه‌ی ۷۰ میلادی تنها روش ایجاد بافت روی بتن بود. اما پس از آن، با توجه به اینکه با استفاده از این روش، حداقل ضریب اصطکاک (یعنی ۰/۳) برای رویه‌های بتنی فراهم نمی‌شود، دیگر روش‌های ایجاد بافت توسعه یافت. برس‌کشی یا جارو زنی نیز یک روش مرسوم دیگر جهت ایجاد بافت می‌باشد که می‌تواند در دو جهت عرضی و طولی انجام شود و با ایجاد خراش‌های به عمق ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر، اصطکاک سطح رویه را افزایش دهد (هال و همکاران، ۲۰۰۹). جلال‌کمالی و همکاران (۲۰۲۱)، بافت ایجادشده به وسیله‌ی روش برس‌کشی را از نظر مقاومت لغزندگی و سایشی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، جهت بررسی مقاومت لغزندگی از دستگاه آونگ انگلیسی و جهت بررسی

صوتی داشته باشد. جهت بافت درشت به نوع کاربری مسیر بستگی دارد. استفاده از بافت طولی در شیب‌ها و قوس‌ها مناسب‌تر است؛ در حالی که بافت عرضی بیشتر در مکان‌های با سرعت زیاد استفاده می‌شود. آزمایش‌های میدانی نشان داده که ابعاد شیارها و فاصله آن‌ها از هم تأثیر زیادی در مقاومت لغزندگی رویه‌های بتنی دارد؛ به طوری که در شرایط مرطوب، افزایش عرض و عمق شیار و کاهش فاصله آن‌ها از هم باعث افزایش ۵۵ درصدی مقاومت لغزندگی رویه نسبت به حالت شیارزنی با عرض و عمق کم و فاصله زیاد می‌شود. در روش شیارزنی، معمولاً از شیارهایی به پهنای ۳ میلی‌متر و عمق ۱/۵ تا ۶ میلی‌متر با فاصله‌های مشخص و مختلف استفاده می‌گردد. اما ذکر این نکته ضروری است که مطالعات بیشتر در زمینه پهنای، عمق و فاصله شیارها ضروری به نظر می‌رسد؛ چرا که عوامل گوناگونی می‌توانند روی عملکرد شیارها و به تبع آن مشخصات ابعادی آن‌ها تأثیر بگذارد (فخری و طاری‌بخش، ۱۳۹۱). طی سال‌های اخیر، در ایالات متحده، استفاده از شیارهای طولی جهت تأمین ایمنی راه‌ها افزایش چشم‌گیری داشته است؛ چرا که این نوع شیارها ضمن تأمین مقاومت لغزندگی کافی، از نظر آلاینده‌گی صوتی نیز عملکرد مناسبی دارند (اشنایدر، ۲۰۰۶). فخری و طاری‌بخش (۱۳۹۱) طی مطالعه‌ای در زمینه تأثیر مشخصات شیار بر مقاومت لغزندگی، نتیجه گرفتند که در هر سه حالت شیارزنی عرضی، مورب و طولی، افزایش فاصله‌ی شیارها با مقاومت لغزندگی رابطه‌ی عکس دارد و با افزایش فاصله‌ی شیارها از ۱۳ به ۳۲ میلی‌متر، مقدار عدد آونگی کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش تعداد شیارهایی است که کفشک پاندول با آن‌ها تماس پیدا می‌کند. این مطالعه همچنین نشان داد که اصطکاک و افزایش پهنای شیارها رابطه‌ی مستقیم دارند. به عبارت دیگر، با افزایش پهنای شیارها، مقاومت لغزندگی افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش پهنای شیار، میزان اتلاف انرژی جنبشی هنگام عبور کفشک از روی

روش ۰/۹ میلی‌متر می‌باشد. قابل ذکر است که در روز-های اولیه، با عبور ترافیک، برخی از سنگ‌دانه‌ها از سطح بتن جدا می‌شوند که برای جلوگیری از ایجاد خطر باید به جمع‌آوری آن‌ها اقدام کرد. در حین تراشیدن روسازی‌های آسفالتی نیز مقدار زیادی مصالح خرده آسفالتی باقی می‌ماند که می‌توان از آن‌ها نیز جهت ایجاد بافت درشت روی روسازی بتنی استفاده کرد (احامد و تیگه، ۲۰۰۸؛ گاردزیزیک و گیراسیمیوک، ۲۰۱۸). شیاردار کردن سطح بتن، یکی از متداول‌ترین روش‌های ایجاد بافت روی روسازی‌های بتنی می‌باشد. این روش می‌تواند روی بتن تازه یا بتن سخت‌شده و یا برای احیای بافت موجود اجرا شده و مطابق مطالعات، مقاومت لغزندگی بسیار مناسبی را حاصل می‌کند. روش شیارزنی به منظور بهبود خصوصیات اصطکاک، کاهش پتانسیل آب‌پروازی، لغزش و تصادف در شرایط آب‌وهوایی مرطوب انجام می‌شود. نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که شیارزنی سطح رویه‌ی بتنی باعث کاهش ۲۰٪ از کل تصادفات، ۵۰٪ از تصادفات کشنده و مرگبار و ۷۰٪ از تصادفات در شرایط سطح روسازی خیس می‌شود (طاری‌بخش، ۱۳۹۰). اما هنوز مسائلی از قبیل آلاینده‌گی صوتی، دوام بافت در درازمدت، همواری سطح، قابلیت ساخت، قابلیت تعمیرپذیری و هزینه و بهره‌وری به طور جدی مدنظر قرار نگرفته است.

شیارزنی سطح رویه‌های بتنی می‌تواند در سه حالت عرضی و طولی و مورب انجام شود. در کشور آمریکا، شیارزنی عرضی رایج‌ترین الگوی ایجاد بافت روی روسازی بتنی می‌باشد زیرا پدیده‌ی آب‌پروازی را بهتر کنترل می‌کند و نیز طول خط ترمز را کاهش می‌دهد. در مقابل، نوع طولی و مورب، آلاینده‌گی صوتی را کاهش داده و کیفیت سواری را بهبود می‌بخشد (ریتر و همکاران، ۲۰۰۴).

عمق، فاصله و جهت‌گیری شیارها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های اصطکاک، همواری و آلاینده‌گی

شیارها پیشنهاد می‌دهد. شیارهای با عرض و فاصله‌ی کمتر که به صورت اتفاقی ایجاد شده باشند، سروصدای تولید شده را کاهش می‌دهند (جان‌محمدی، ۱۳۸۸).

ریث و همکاران (۲۰۲۰)، روش‌های شیارزنی عرضی، شیارزنی طولی و سنگ‌دانه‌ی در معرض را از نظر مقاومت لغزندگی در درازمدت، مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که رویه‌ی بتنی با سنگ‌دانه‌ی در معرض، در درازمدت، نسبت به رویه‌های شیاردار، عملکرد بسیار بهتری دارد. به عبارت دیگر، تحت عبور ترافیک، بافت رویه‌های شیاردار به سرعت مستهلک شده و این نوع رویه‌ها قابلیت سرویس‌دهی ایمن خود را از دست می‌دهند. علاوه بر این، نتایج حاصل از مطالعه‌ی گاردزیزیک و همکاران (۲۰۲۱)، در شرایطی که درصد وسایل نقلیه‌ی سنگین کمتر از ۲۰ درصد باشد، عمق متوسط بافت درشت (MPD) را برابر با ۰/۸ میلی‌متر و در صورتی که درصد وسایل نقلیه‌ی سنگین بیشتر از ۲۰ درصد باشد، عمق متوسط بافت را برابر با ۱/۲ میلی‌متر پیشنهاد می‌کند تا کمترین میزان آلاینده‌ی صوتی ایجاد گردد. هابلوویوکا و همکاران (۲۰۲۱) نیز طی مطالعه‌ی، رویه‌ی بتنی با سنگ‌دانه‌ی در معرض با حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ی ۸ میلی‌متر را با آسفالت ماستیک (SMA) با حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ی ۱۱ میلی‌متر مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که میزان آلاینده‌ی صوتی هر دو نوع روسازی تقریباً برابر است.

گیراسیمیوک و همکاران (۲۰۲۱) مقاومت لغزندگی سطح رویه‌های بتنی با بافت‌های سطحی مختلف را بررسی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که بیشترین مقاومت لغزندگی در حالتی ایجاد می‌شود که رویه‌ی بتنی با استفاده از شیارهای عرضی و یا جاروکشی مضرس شده باشد و کمترین اصطکاک نیز هنگامی حاصل می‌گردد که از روش‌های شیارزنی طولی یا گونی‌کشی استفاده شود.

شیار بیشتر شده و در نتیجه عدد BPN بیشتری حاصل خواهد شد. مطابق این تحقیق، مقاومت لغزندگی رویه‌های بتنی با حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها نیز رابطه‌ی مستقیم دارد و هرچه سنگ‌دانه‌های مخلوط درشت‌تر باشند، عدد آونگی بیشتر خواهد بود. اما این رابطه تأثیر زیادی ندارد و میزان تغییرات اندک است.

تراشیدن سطح روسازی با تیغه‌ی الماسی نیز یک روش احیای بافت می‌باشد که با استفاده از دستگاه‌های مخصوص، روی بتن سخت‌شده اجرا می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که در سطوح تراشیده‌شده با تیغه‌ی الماسی، طی یک سال، عمق بافت از ۰/۵۸ میلی‌متر به ۰/۴۶ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در حالی که برای سطوح شیارزنی شده، عمق بافت ۰/۵۸ میلی‌متر به ۰/۵۲ میلی‌متر می‌رسد و می‌توان نتیجه گرفت که سرعت از بین رفتن بافت در سطوح تراشیده‌شده با الماس بیشتر است. مطالعات همچنین نشان می‌دهند که مقادیر عدد لغزندگی به دست آمده با استفاده از تایر آج‌دار برای هر دو نوع روسازی تقریباً برابر است که دلیل آن یکسان بودن بافت ریز دو سطح (به دلیل تشابه مصالح دو روسازی) می‌باشد (برگ و همکاران، ۲۰۰۲).

به طور کلی، مقاومت لغزندگی با افزایش پهنا و عمق برش بیشتر می‌شود. اما ضریب زهکشی با افزایش فاصله‌ی برش‌ها کاهش می‌یابد. مطابق استاندارد FAA، برش‌ها بایستی دارای عمق و پهنا‌ی ۶ میلی‌متر و فاصله مرکز تا مرکز ۳۸ میلی‌متر باشند و حداقل ۶۰ درصد شیارها نباید عمقی کمتر از ۶ میلی‌متر داشته باشند (لی و همکاران، ۲۰۰۹). در فرودگاه‌های آمریکا، معمولاً از شیارهای به عمق و عرض ۴/۶ میلی‌متر و فاصله ۳۸/۱ میلی‌متر استفاده می‌شود. اما این اندازه‌ها می‌تواند تغییر کند. استاندارد کشور نیوزلند (TNZ P/26) نیز عرض و عمق ۶ میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۳۸ میلی‌متر را برای

³ - Stone Mastic Asphalt

¹ - British Pendulum Number

² - Mean Profile Depth

NGCS باعث ایجاد "بافت منفی" روی روسازی می-شود. در واقع، در این روش، ضمن تراشیدن سطح رویه، شیارهایی با اندازه مشخص و بدون بالآمدگی روی بتن ایجاد می-شود. از این روش، هم می-توان در روسازی جدید و هم جهت بهسازی روسازی‌های قدیمی استفاده کرد (گوادا و هنکاران، ۲۰۱۲).

علاوه بر انواع روش‌های ایجاد بافت، توجه به طرح اختلاط بتن و استفاده از مواد افزودنی مختلف نیز می-تواند به بهبود عملکرد رویه‌های بتنی از نظر لغزندگی کمک کند. العسکر و همکاران (۲۰۲۱)، تأثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به طرح اختلاط بتن را از نظر مقاومت لغزندگی سطح آن به وسیله آزمایش آونگ انگلیسی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند که افزودن این الیاف می‌تواند اثر مثبتی در بهبود اصطکاک سطح رویه داشته باشد؛ به نحوی که با افزودن پلی‌پروپیلن به میزان ۱/۲۵ درصد، مقاومت لغزندگی و سایشی حدوداً به میزان ۲۵ درصد افزایش می‌یابد.

ارتعاش جانبی وسایل نقلیه روی روسازی‌های شیاردار طولی نیز موضوع مهمی است که لزوم تحقیقات بیشتر روی ابعاد و فاصله شیارها را نشان می‌دهد. ریو و همکاران (۲۰۲۲)، رویه‌های بتنی شیاردار طولی با مشخصات مختلف را با سه روش مشاهدات میدانی و بررسی شتاب، شبیه‌سازی رانندگی و المان محدود تحت بررسی قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند که با پهنای شیار ۲ یا ۳ میلی‌متر، عمق شیار ۳ میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز شیار ۱۹ یا ۱۶ میلی‌متر بهترین عملکرد را از نظر کنترل ارتعاش جانبی وسایل نقلیه دارند. مطالعات آنها همچنین نشان داد که به طور کلی شیارهای با پهنای کمتر، احتمال ارتعاش جانبی را کاهش داده و فاصله‌ی تصادفی بین شیارها، احتمال ارتعاش را افزایش می‌دهد. با وجود آنکه برای تمام روش‌های ایجاد بافت، مقادیری توسط محققان ارائه شده است، به دلیل عدم وجود یک دستورالعمل جامع برای اجرای هر کدام از این روش‌ها،

همچنین، نتایج این مطالعه نشان داده است که روش در معرض قرار دادن سنگ‌دانه‌ها، در طولانی‌مدت بهینه‌ترین روش جهت مضرس‌سازی سطح روسازی‌های بتنی می-باشد زیرا رویه‌ی حاصل از این روش بر خلاف شیارزنی عرضی، مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش و صیقلی-شدن دارد.

به نقل از مقاله‌ی بوده‌اواراپو و همکاران، دراکاپولوس و همکارانش در سال ۱۹۹۸، ۳۰ سطح روسازی بتنی تراشیده شده با تیغه‌ی الماسی و ۲۱ سطح روسازی بتنی با شیارهای عرضی را در طول ۴۰۵ کیلومتر و در مدت ۶ سال مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به نتایج مطالعه آنها، میزان تصادفات در سطوح تراشیده شده با تیغه‌ی الماسی، ۴۲ درصد کمتر از سطوح شیارزنی‌شده‌ی عرضی می-باشد. محققان دلیل این آمار را جلوگیری از جابه‌جایی جانبی و کنترل بهتر وسیله نقلیه در سطوح تراشیده شده طولی می‌دانند (بوده‌اواراپو و همکاران، ۲۰۱۳). برخی مطالعات دیگر نیز نشان می‌دهد که تراشیدن طولی سطح روسازی بتنی با تیغه‌ی الماسی، نسبت به حالت شیارزنی-شده‌ی عرضی، مقاومت لغزندگی بیشتری را در حالت مرطوب حاصل می‌کند. البته با گذشت زمان، اختلاف مقاومت لغزندگی در این دو نوع بافت سطحی کمتر شده و حدوداً بعد از یک‌سال، مقدار مقاومت لغزندگی این دو سطح تقریباً برابر می‌گردد. همچنین، قابل ذکر است که در شرایط خشک، برای هر دو سطح تراشیده شده طولی با تیغه‌ی الماسی و شیارزنی شده عرضی، مقدار مقاومت لغزندگی یکسانی نتیجه می‌شود که به دلیل یکسان بودن مواد و مصالح و بافت ریز دو روسازی می‌باشد (برگ و همکاران، ۲۰۰۲).

جدیدترین روش ایجاد بافت، روش NGCS می‌باشد. این روش عبارت است از تراشیدن رویه در فاز اولیه (شکل-گیری بافت ریز) و سپس ایجاد شیارهایی با فاصله‌ی ۱۲/۷ تا ۱۵/۹ میلی‌متر و عمق ۳/۲ تا ۴/۸ میلی‌متر. روش

روش معیابی نظیر لب‌پریدگی بتن در لبه‌ی شیارها و غیردقیق بودن اندازه‌ها را در پی دارد. برای بتن سخت-شده نیز از روش‌هایی دشوار نظیر برش با تیغه‌ی الماسی استفاده شده است. اما در این مطالعه، به عنوان نوآوری، عملیات شیارزنی روی بتن تازه، به آسانی و با استفاده از قالب‌هایی ارزان و دقیق از جنس پی وی سی صورت پذیرفته است. علاوه بر آن، نتایج گاه متناقض در مطالعات پیشین، لزوم تحقیقات بیشتر را نشان می‌دهد.

۳. روش تحقیق

۳-۱. مواد و مصالح

۳-۱-۱. مصالح سنگی

مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش، مصالح رودخانه‌ای شکسته شده از نوع سیلیسی می‌باشد که از کارخانه‌ی ماکادام شرق واقع در پاکدشت تهیه شده است. سنگ‌دانه‌های سیلیسی سازگاری مناسبی با سیمان دارند و برای تهیه بتن مناسب می‌باشند. مصالح شکسته شده به دلیل قفل و بست بین دانه‌ای بیشتر، دارای مقاومت و قدرت باربری بیشتری بوده و لذا در تهیه بتن استفاده می‌شود. جدول ۲، مشخصات و آزمایش‌های انجام شده روی مصالح سنگی را نشان می‌دهد.

مطالعات بیشتر در این زمینه هم‌چنان ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر نیز روش شیارزنی روی بتن تازه مورد مطالعه قرار گرفته است تا روند تغییرات اصطکاک سطح رویه با تغییر مشخصات شیارها بررسی گردد.

۲. اهداف پژوهش و نوآوری

هدف کلی از انجام این پژوهش، بررسی روش شیارزنی روی رویه‌های بتنی از نظر بهبود مقاومت لغزندگی این نوع رویه‌ها و همچنین میزان بافت درشت ایجاد شده روی سطح این نوع روسازی‌ها می‌باشد. لذا، موارد زیر را می‌توان به عنوان اهداف این پژوهش ذکر کرد:

- ۱- بررسی مقادیر و روند تغییرات مقاومت لغزندگی رویه‌ی بتنی در حالات شیارزنی عرضی، طولی و مورب با استفاده از آزمایش آونگ انگلیسی
- ۲- بررسی تأثیر پهنا و فاصله مرکز تا مرکز شیارها بر میزان مقاومت لغزندگی سطح بتن با استفاده از آزمایش آونگ انگلیسی
- ۳- بررسی عمق بافت درشت در حالات مختلف شیارزنی سطح رویه با استفاده از آزمایش پخش ماسه در تحقیقات گذشته، شیارزنی سطح بتن تازه معمولاً با استفاده از چنگک‌هایی صورت پذیرفته است که این

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

مشخصه	نتایج	
	درشت‌دانه	ریزدانه
وزن مخصوص حقیقی در وضعیت اشباع با سطح خشک (SSD)	۲/۶۳	۲/۵۱۴
وزن مخصوص حقیقی در وضعیت خشک	۲/۵۹۵	۲/۴۵۹
وزن مخصوص ظاهری	۲/۶۸۹	۲/۵۹۸
جذب آب (A/%)	۱/۴۴ %	۲/۲۴ %
رطوبت موجود در سنگ‌دانه‌ها (I/%)	۰/۶	۱/۴۵
وزن مخصوص ظاهری خشک و میله کوبیده‌ی شن	۱۵۸۵	-
ارزش ماسه‌ای	-	۵۰ حداقل

آزمایش سایش لس آنجلس (%)	تعداد چرخش	۵۰۰	-	حداکثر ۳۰
	ضریب سایش	۱۵/۳	-	
شکستگی مصالح درشت‌دانه (%)	یک وجه	۱۰۰	-	حداقل ۱۰۰
	دو وجه	۹۳	-	حداقل ۹۰

۳-۱-۲. سیمان مصرفی

پژوهش در جدول ۳ آمده است. همچنین، برای طی مراحل طرح اختلاط و تعیین نسبت اجزای مختلف تشکیل‌دهنده‌ی بتن، لازم است مدول نرمی ماسه محاسبه گردد. مدول نرمی ماسه مورد استفاده در این پژوهش، با توجه به دانه‌بندی انتخاب شده، برابر با ۲/۸ اندازه‌گیری شد. جهت تعیین نسبت اجزای مخلوط بتنی، از روش آیین‌نامه‌ی ACI 211-1 استفاده گردید.

سیمان استفاده شده در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ دو می‌باشد که از کارخانه سیمان تهران تهیه شده است. سیمان تیپ دو پرتلند دارای حرارت هیدراتاسیون کمتر و مقاومت بیشتر در برابر یون کلر نسبت به نوع یک می‌باشد و مقاومت متوسطی در برابر سولفات‌ها دارد.

۳-۱-۳. آب استفاده شده

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی مورد نیاز در این پژوهش، از روش استاندارد ASTM C192 استفاده گردید که بر اساس آن، ابتدا مصالح درشت‌دانه به همراه مقداری از آب مخلوط به هم‌زن اضافه می‌شوند و هم‌زن شروع به چرخش می‌کند. سپس، مصالح ریزدانه به ترتیب درشت به ریز به هم‌زن در حال چرخش ریخته شده و به طور کامل با هم مخلوط می‌شوند. پس از حصول اطمینان از اختلاط همگن مصالح سنگی، سیمان و مواد افزودنی جایگزین سیمان به مخلوط اضافه می‌شوند. در نهایت، بتن‌ریزی در قالب‌های روغن‌کاری شده در سه مرحله صورت گرفته و پس از هر مرحله، بتن ریخته‌شده به خوبی ویبره می‌شود تا هوای آن خارج شده و سطحی صاف حاصل شود.

آب مصرفی برای ساخت بتن در این پژوهش، بر اساس آیین‌نامه‌ی بتن ایران و نشریه ۱۰۱ سازمان برنامه و بودجه، با عنوان مشخصات فنی روسازی راه، آب آشامیدنی می‌باشد. معمولاً نسبت آب به سیمان عددی بین ۰/۳۵ تا ۰/۶ انتخاب می‌شود تا ضمن حصول مقاومت مناسب، کارایی بتن نیز حفظ شود.

۳-۲. دانه‌بندی و طرح اختلاط

در این پژوهش، از دانه‌بندی شماره ۷ استاندارد ASTM C33 برای تهیه مخلوط بتنی استفاده گردید. حداکثر اندازه‌ی اسمی سنگ‌دانه‌ها در این دانه‌بندی برابر با ۱۲/۵ mm می‌باشد. حدود دانه‌بندی مورد استفاده در این

جدول ۳. حدود دانه‌بندی شماره ۷ استاندارد ASTM

اندازه الک (mm)	درشت‌دانه			ریزدانه		
	حد	حد	حد	حد	حد	حد
	پایین	وسط	بالا	پایین	وسط	بالا
۱۹	۱۰۰	۱۰۰				
۱۲/۵	۹۰	۹۵	۱۰۰			
۹/۵	۴۰	۵۵	۷۰	۱۰۰		
۴/۷۵	۰	۰	۱۵	۹۵	۱۰۰	

۲/۳۶	۵	۸۰	۹۰	۱۰۰
۱/۱۸	۰	۵۰	۷۰	۸۵
۰/۶		۲۵	۴۵	۶۰
۰/۳		۵	۱۵	۳۰
۰/۱۵		۰	۰	۱۰
۰/۰۷۵				۰

آزمایش‌های آونگ انگلیسی و پخش ماسه تهیه شدند. در این پژوهش، جهت شیارزنی روی بتن، از یک روش ابداعی استفاده شد که در آن تلاش گردید روش ایجاد شیار با بافت منفی^۲ که معمولاً روی بتن سخت شده و با شیوه‌هایی دشوار، مثل برش با تیغه‌ی الماسی، اجرا می‌شود، روی بتن تازه پیاده گردد و اصطلاحاً بافت درشت در جهت منفی، روی سطح بتن تازه ایجاد شود. برای این منظور، صفحاتی از جنس ورق^۳ PVC تهیه گردید و با استفاده از دستگاه^۴ CNC، ۹ حالت مختلف شیار از نظر فاصله و پهنا، با دقت بسیار زیاد روی آن‌ها ایجاد شد و با استفاده از این قالب‌ها، نمونه‌های بتنی شیاردار تهیه شدند. شکل ۱، یکی از قالب‌های شیارزنی استفاده شده در این پژوهش را به همراه یک نمونه‌ی بتنی شیاردار نشان می‌دهد.

با توجه به آیین‌نامه استرالیا، جهت انجام تست پخش ماسه در آزمایشگاه، قطر ماسه‌ی پخش شده روی سطح بتن باید حداقل ۱۷ سانتی‌متر باشد و در نتیجه برای ساخت نمونه‌های مربوط به آزمایش پخش ماسه و آونگ انگلیسی، قالب‌هایی با سطح ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر و عمق ۱۰ سانتی‌متر تهیه شدند تا نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش‌های ذکر شده دارای سطحی به ابعاد ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر باشند. با توجه به گزارش NCHRP^۱ 634 تحت عنوان ایجاد بافت روی رویه‌های بتنی، شیارهای با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۲/۷، ۱۹ و ۲۵/۴ میلی‌متر و پهنای ۲/۵، ۳/۲ و ۳/۸ مورد بررسی‌های میدانی قرار گرفته‌اند و در این پژوهش نیز از این ۹ حالت ذکر شده جهت بررسی عملکرد شیارها در سه راستای طولی، عرضی و مورب استفاده شده است. در نتیجه، با ساخت سه نمونه برای هر حالت، مجموعاً ۲۷ نمونه‌ی شیاردار جهت انجام



شکل ۱. الف) قالب شیاردار، ب) نمونه شیاردار با پهنای شیار ۲/۵ mm و فاصله‌ی شیار ۱۲/۷ mm

^۳- Polyvinyl chloride

^۴ Computer Numerical Control

^۱- National Cooperative Highway Research Program

^۲- Groove

۳-۳. آزمایش‌های انجام شده

۳-۱-۳. آزمایش مقاومت فشاری

جهت محاسبه مدول گسیختگی بتن با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده در آیین‌نامه ACI318M-14، در این پژوهش، آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی مطابق استاندارد BS-EN 12190-3 انجام پذیرفت. لذا، جهت بررسی مقاومت فشاری طرح اختلاط داده شده، سه نمونه‌ی مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری تهیه شده و تحت تست فشار قرار گرفتند تا بدین ترتیب یک مشخصه‌ی مکانیکی بسیار مهم در بتن، یعنی مقاومت فشاری، تحت بررسی قرار گیرد و از کفایت مقاومت فشاری بتن ساخته جهت استفاده در روسازی اطمینان حاصل شود و نیز از نتایج آن برای محاسبه‌ی مدول گسیختگی بتن استفاده گردد.

۳-۳-۲. آزمایش آونگ انگلیسی

یکی از متداول‌ترین دستگاه‌های بررسی اصطکاک رویه‌های آسفالتی و بتنی، دستگاه آونگ انگلیسی می‌باشد که در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفت. این دستگاه دارای یک کفشک لاستیکی به ابعاد $7/6$ در $2/54$ سانتی-متر است که به انتهای آونگ متصل می‌شود. مطابق استاندارد ASTM E303، جهت اندازه‌گیری مقاومت لغزندگی سطح رویه با استفاده از این دستگاه، پس از رها کردن آونگ، کفشک لاستیکی باید مسافتی به طول $12/6$ سانتی‌متر را روی سطح نمونه طی کند و پس از آن عدد نشان داده شده توسط عقربه دستگاه، که به عدد BPN موسوم است، قرائت و ثبت شود. در واقع، سازوکار دستگاه آونگ انگلیسی بر مبنای انرژی از دست رفته

هنگام عبور آونگ از روی نمونه می‌باشد؛ به نحوی که هر چقدر اصطکاک سطح نمونه بیشتر باشد، انرژی از دست رفته بیشتر بوده و دستگاه عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که نمونه‌های مذکور، در حالت شیب عرضی ۲ درصد مورد آزمایش قرار گرفتند تا عملکرد شیارها در تخلیه‌ی آب، کاملاً دقیق بررسی شده باشد. شکل ۲، دستگاه آونگ انگلیسی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

۳-۳-۳. آزمایش پخش ماسه

برای اندازه‌گیری عمق بافت درشت روسازی، از آزمایش پخش ماسه استفاده می‌شود. مطابق استاندارد ASTM E965، در این آزمایش، جرم مشخصی از ماسه استاندارد با دانسیته‌ی مشخص، روی سطح روسازی ریخته می‌شود. سپس ماسه ریخته شده با دقت و به طور کاملاً یکنواخت روی سطح پخش شده و قطر دایره تشکیل یافته در چهار جهت اندازه‌گیری می‌گردد. میانگین چهار عدد اندازه‌گیری شده به عنوان قطر دایره ماسه‌ای انتخاب می‌شود و در نهایت از تقسیم حجم ماسه ریخته شده بر مساحت دایره تشکیل شده، عمق بافت درشت (MTD) به دست می‌آید. رابطه‌ی (۱)، طریقه محاسبه عمق بافت درشت را نشان می‌دهد.

$$MTD = \frac{V}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (1)$$

که در آن، MTD عمق بافت درشت، D قطر دایره تشکیل یافته توسط ماسه‌ی پخش شده و V حجم ماسه-ی پخش شده است.

¹- Mean Texture Depth



شکل ۲. دستگاه آونگ انگلیسی

۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و محاسبه مدول گسیختگی بتن

جهت محاسبه مدول گسیختگی بتن با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ی ACI318M-14، آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های بتنی مکعبی انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

C3	C2	C1	شماره نمونه
۵۰	۴۸/۸	۴۹/۲	مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی (MPa)
۴۲/۵	۴۱/۵	۴۱/۸	مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای معادل استاندارد (MPa)
	۴۱/۹		میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای معادل استاندارد (MPa)

ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ی ACI318M-14 نیز می‌توان مدول گسیختگی بتن (MOR) را که در طراحی روسازی‌های بتنی بسیار مهم است محاسبه کرد:

$$f_r = 0.62\lambda\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

که در آن، f'_c مقاومت فشاری بتن و λ ضریب تصحیح برای بتن‌های سبک است و برای بتن‌های با سنگ‌دانه‌های معمولی برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به نتایج گزارش شده، میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی استوانه‌ای معادل استاندارد، برابر ۴۱/۹ مگاپاسکال می‌باشد که این مقدار، نشان‌دهنده مقاومت فشاری بسیار مناسب بتن ساخته شده جهت استفاده در پروژه‌های راه‌سازی می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی (۲)،

¹- Modulus of Rupture

۵. نتایج آزمایش آونگ انگلیسی و بحث

نتایج آزمایش‌های آونگ انگلیسی روی نمونه‌های شیاردار، در جدول ۵ آورده شده است که در ادامه، به تحلیل و بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

لذا، با توجه به توضیحات داده شده، با جای‌گذاری f'_c برابر با ۴۱/۹ مگاپاسکال و λ برابر با ۱، مقدار مدول گسیختگی بتن ساخته شده برابر با ۴/۰۱ به دست می‌آید که مقدار بسیار مناسبی برای پروژه‌های راه‌سازی می‌باشد.

جدول ۵. نتایج آزمایش آونگ انگلیسی روی نمونه‌های بتنی شیاردار

شمار طولی	شمار مورب	شمار عرضی	فاصله شیارها (mm)	پهنای شیارها (mm)
۷۴/۴	۷۵/۱	۷۹/۲	۱۲/۷	
۷۱/۶	۷۳/۸	۷۷/۳	۱۹	۲/۵
۶۵/۱	۶۹/۳	۶۹/۴	۲۵/۴	
۷۴	۷۵/۷	۸۴/۷	۱۲/۷	
۶۹/۹	۷۴/۸	۸۳/۸	۱۹	۳/۲
۷۱/۳	۷۱/۵	۷۸/۸	۲۵/۴	
۶۴/۲	۷۰/۷	۷۹	۱۲/۷	
۶۳/۳	۶۹/۴	۷۶/۸	۱۹	۳/۸
۶۵/۵	۶۶	۶۹/۳	۲۵/۴	
۴۴			بدون بافت	

۵-۱. تأثیر فواصل شیارها بر عدد آونگی

برای بررسی تأثیر فاصله شیارها بر میزان مقاومت لغزندگی ایجاد شده، نتایج به دست آمده که در جدول ۵ آورده شده‌اند، بر حسب فاصله‌ی مرکز تا مرکز شیار دسته‌بندی شد. پس از دسته‌بندی نتایج بر حسب فاصله‌ی شیارها، از مقادیر هر دسته میانگین‌گیری گردید تا پارامتر-های رگرسیونی محاسبه شوند. جدول ۶، نتایج دسته‌بندی شده آزمایش آونگ انگلیسی بر حسب فاصله‌ی شیارها و معادلات رگرسیونی مربوط به تغییرات BPN با تغییر فاصله شیارها را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که هر کدام از مقادیر مندرج در جدول ۴، میانگین ۱۵ عدد اندازه‌گیری شده در ۳ نمونه‌ی مشابه می‌باشد. به عبارت دیگر، برای هر حالت، ۳ نمونه ساخته شده و هر نمونه ۵ بار مورد آزمایش قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده و مقادیر مجاز توصیه‌شده توسط TRRL، واضح است که استفاده از روسازی‌های بتنی بدون بافت به هیچ وجه ایمن نمی‌باشد و بایستی با روش‌های مختلف، سطح این نوع رویه‌ها را مضرس نمود تا مقاومت لغزندگی کافی تأمین گردد.

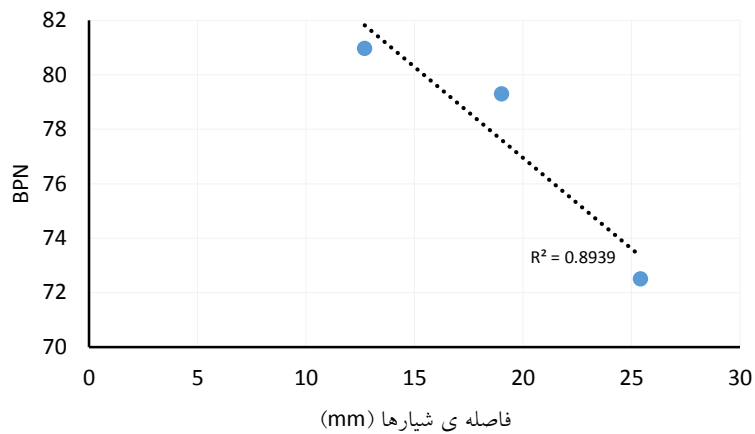
جدول ۶. مقادیر عدد آونگی نمونه‌های بتنی شیاردار بر حسب فاصله مرکز تا مرکز شیارها

مقادیر BPN در هر راستای شیار			فاصله شیارها (mm)
طولی	مورب	عرضی	
۷۰/۸۷	۷۳/۸۳	۸۰/۹۷	۱۲/۷
۶۸/۲۷	۷۲/۶۷	۷۹/۳	۱۹

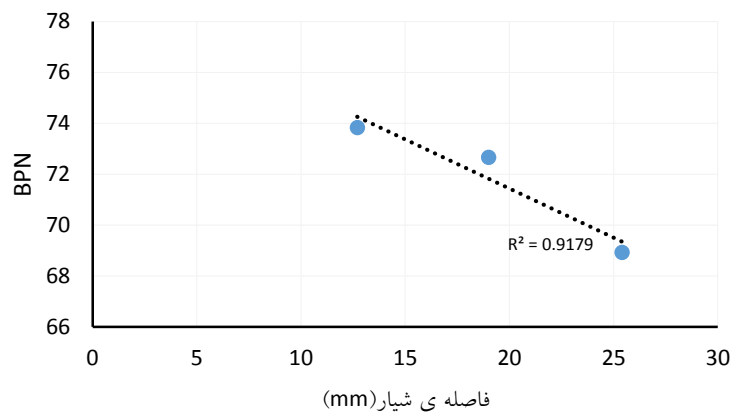
بررسی تأثیر مشخصات شیارها بر مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی شیارزنی شده

۶۷/۳	۶۸/۹۳	۷۲/۵	۲۵/۴
۶۸/۸۱	۷۱/۸۱	۷۷/۵۹	عدد آونگی میانگین
$BPN = -0.28x + 73.805;$ $R^2 = ۰/۹۳۱۷$			معادله رگرسیونی مربوط به تغییرات BPN با تغییر فاصله شیارها (X)
$BPN = -0.386x + 79.164;$ $R^2 = ۰/۹۱۷۹$		$BPN = -0.668x + 90.304;$ $R^2 = ۰/۸۹۳۹$	

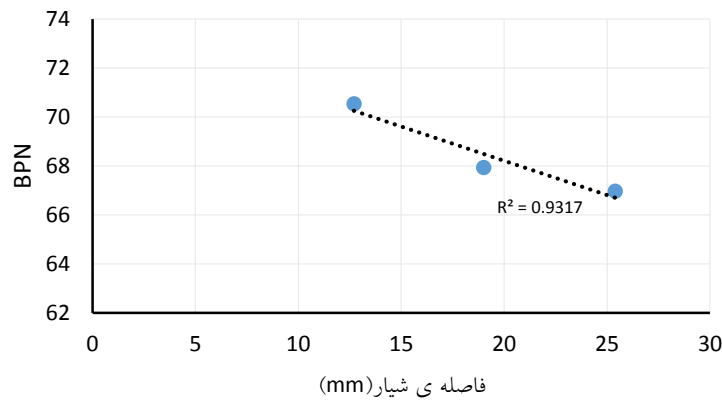
شکل‌های ۳ تا ۵ نیز روند تغییرات عدد آونگی را با تغییر فاصله‌ی شیارها در سه راستای شیارزنی عرضی، مورب و طولی نشان می‌دهند.



شکل ۳. روند تغییرات BPN با فاصله‌ی شیارهای عرضی



شکل ۴. روند تغییرات BPN با فاصله‌ی شیارهای مورب



شکل ۵. روند تغییرات BPN با فاصله ی شیارهای مورب

هنگام عبور آونگ از سطح نمونه کاهش یافته و آونگ تا ارتفاع بیشتری بالا می‌رود و در نتیجه عدد آونگی کمتری حاصل می‌شود. البته باید به این نکته توجه داشت که تعداد شیارهای درگیر با آونگ، به تنهایی تعیین‌کننده عدد آونگی حاصل شده نمی‌باشد و عواملی مثل فضای خالی سطح نمونه می‌تواند در مقدار BPN تأثیرگذار باشد و باعث شود که روند کاهش عدد آونگی با افزایش فاصله ی شیارها، کاملاً خطی نباشد. به عنوان مثال، مشاهده می‌شود که در حالت شیارزنی مورب، مقدار مقاومت لغزندگی در فاصله ی شیار ۱۹ میلی‌متر تفاوت اندکی با فاصله ی شیار ۱۲/۷ میلی‌متری دارد. جدول ۷، درصد های کاهش عدد آونگی را با افزایش فاصله ی شیارها، در راستاهای مختلف شیارزنی نشان می‌دهد.

با توجه به شکل های ۳ تا ۵، مشاهده می‌شود که در هر سه حالت شیارزنی عرضی، مورب و طولی، مقدار عدد آونگی حاصله با تغییر فاصله ی شیارها رابطه ی معکوس دارد. به عبارت دیگر، با افزایش فاصله ی مرکز تا مرکز شیارها، مقدار BPN کاهش پیدا می‌کند. کاهش عدد آونگی با افزایش فاصله ی شیارها، احتمالاً به این دلیل است که با بیشتر شدن فاصله ی شیارها، تعداد شیارهایی که هنگام عبور آونگ از سطح نمونه با کفشک لاستیکی درگیر می‌شوند، کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در حالت شیارزنی عرضی فاصله های شیار ۱۲/۷، ۱۹ و ۲۵/۴ میلی - متر، کفشک آونگ به ترتیب با ۱۰، ۷، ۵ شیار درگیر می - شود و لذا با افزایش فاصله ی شیارها و کاهش تعداد شیارهای درگیر شده با کفشک آونگ، انرژی تلف شده

جدول ۷. درصد تغییرات عدد آونگی با تغییر فاصله شیارها

فاصله شیارها (mm)	شیارهای عرضی	شیارهای مورب	شیارهای طولی
۱۲/۷	-	-	-
۱۹	٪-۲/۱	٪-۱/۵۷	٪-۳/۶۹
۲۵/۴	٪-۸/۶۸	٪-۵/۱۵	٪-۱/۴۱

۵-۲. تأثیر پهنا ی شیارها بر عدد آونگی

که در جدول ۵ آورده شده‌اند، بر اساس پهنا ی شیارها دسته‌بندی گردید و جهت محاسبه ی پارامترهای رگرسیونی نیز از مقادیر هر دسته میانگین‌گیری شد.

جهت بررسی تأثیر پهنا ی شیارها بر مقاومت لغزندگی ایجاد شده در رویه های بتنی شیاردار، نتایج به دست آمده

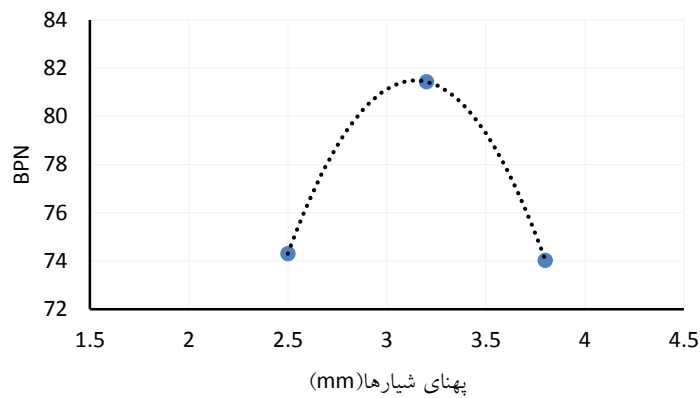
بررسی تأثیر مشخصات شیرها بر مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی شیارزنی‌شده

جدول ۸، نتایج دسته‌بندی شده‌ی آزمایش آونگ انگلیسی را بر حسب پهناى شیرها نشان می‌دهد.

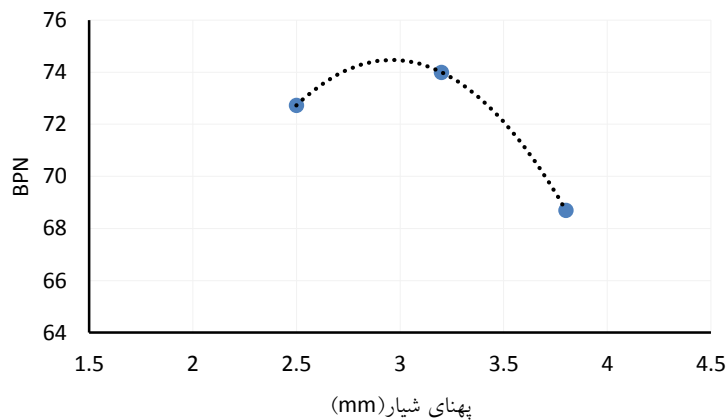
جدول ۸. مقادیر عدد آونگی نمونه‌های بتنی شیاردار بر حسب پهناى شیرها

مقادیر BPN در هر راستای شیار			پهناى شیرها (mm)
عرضی	مورب	طولى	
۷۵/۳	۷۲/۷۳	۷۰/۳۶	۲/۵
۸۲/۴۳	۷۴	۷۳/۷۱	۳/۲
۷۲/۰۳	۶۸/۷	۶۴/۳۳	۳/۸
۷۷/۵۹	۷۱/۸۱	۶۸/۸۱	عدد آونگی میانگین

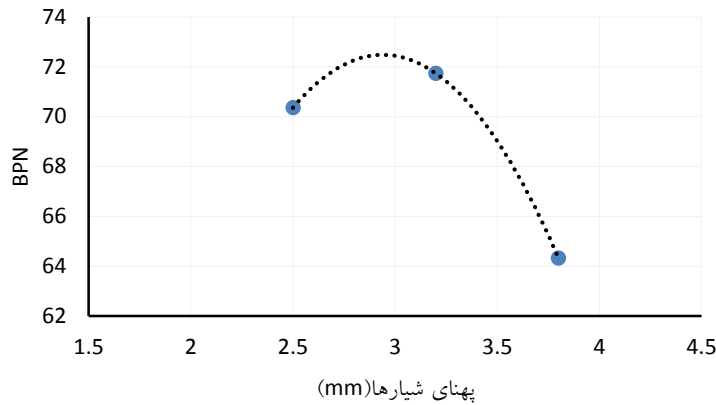
شکل‌های ۶ تا ۸ نیز روند تغییرات عدد آونگی را با تغییر پهناى شیرها در سه راستای شیارزنی عرضی، مورب و طولی نشان می‌دهند.



شکل ۶. روند تغییرات BPN با پهناى شیرهای عرضی



شکل ۷. روند تغییرات BPN با پهناى شیرهای مورب



شکل ۸. روند تغییرات BPN با پهنای شیارهای طولی

فضای خالی موجود در سطح نمونه را افزایش می‌دهد و از آنجا که ضریب اصطکاک هوا برابر صفر است، می‌تواند منجر به کاهش مقدار BPN گردد. بدین معنا که با افزایش بیشتر پهنای شیارها، تأثیر فضای خالی موجود در سطح نمونه و ضریب اصطکاک هوا (که برابر صفر است)، نمایان شده و موجب کاهش عدد آونگی می‌شود. لذا، وجود یک مقدار بهینه از نظر مقاومت لغزندگی برای پهنای شیار، قابل پیش‌بینی می‌باشد که این مقدار برابر $3/2$ میلی‌متر به دست آمده است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۱). جدول ۹، درصد تغییرات عدد آونگی را با افزایش پهنای شیارها، در راستاهای مختلف شیارزنی، نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸، مشاهده می‌شود که با افزایش پهنای شیارها، مقدار عدد آونگی ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. به طوری که در هر سه راستای شیارزنی، با افزایش پهنای شیارها از $2/5$ به $3/2$ میلی‌متر، مقدار BPN افزایش نسبتاً قابل توجهی داشته و در ادامه با افزایش پهنای شیارها تا $3/8$ میلی‌متر، عدد آونگی افت کرده و به کمترین مقدار در بین نمونه‌های شیاردار می‌رسد. پارامتر مؤثر در مقدار عدد آونگی به دست آمده، انرژی جنبشی تلف شده، هنگام عبور آونگ از سطح نمونه، می‌باشد. با وجود آنکه افزایش پهنای شیار، ممکن است موجب برخورد کامل تر کفشک لاستیکی به لبه‌های شیار گردد و عدد آونگی را افزایش دهد، از طرف دیگر،

جدول ۹. درصد تغییرات عدد آونگی با تغییر پهنای شیارها

پهنای شیارها (mm)	شیارهای عرضی	شیارهای مورب	شیارهای طولی
$2/5$	-	-	-
$3/2$	$+10/14\%$	$+1/75\%$	$+1/95\%$
$3/8$	$-8/8\%$	$-7/16\%$	$-10/32\%$

راستای حرکت آونگ در امتداد راستای شیارها است (صفر درجه)؛ در حالت مورب، دارای زاویه‌ی 45 درجه با راستای شیارها و در حالت عرضی، عمود بر راستای شیارها (90 درجه) می‌باشد. جدول ۱۰، نتایج دسته‌بندی

۵-۳. تأثیر راستای شیارها بر عدد آونگی

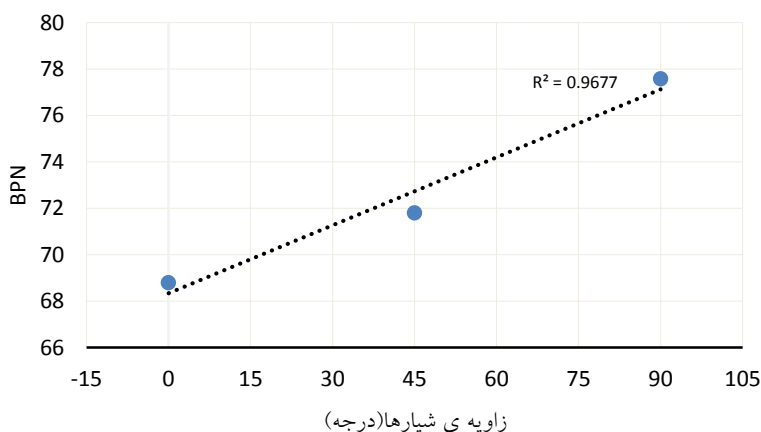
در این پژوهش، نمونه‌های بتنی با سطح شیاردار در سه راستای طولی، مورب و عرضی، تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفتند. بدین معنا که در حالت طولی،

شده‌ی آزمایش آونگ انگلیسی را بر اساس راستای شیارها نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. مقادیر عدد آونگی در هر راستای شیار

راستای شیارها	میانگین عدد آونگی (BPN)	درصد تغییر
طولی	۶۸/۸۱	-
مورب	۷۱/۸۱	+۴/۳۶
عرضی	۷۷/۵۹	+۸/۰۵

شکل ۹ نیز روند تغییرات مقدار عدد آونگی با تغییر راستای شیارها را نشان می‌دهد.



شکل ۹. روند تغییرات BPN با تغییر راستای شیارها

آونگ از سطح نمونه می‌شود. به عبارت دیگر، در حالت شیارزنی عرضی، کفشک لاستیکی آونگ هنگام عبور از سطح نمونه به طور کامل و متوالی با لبه‌ی شیارها برخورد می‌کند. برخورد کفشک لاستیکی با لبه‌ی شیارها به صورت متوالی، موجب از دست رفتن انرژی بیشتری در حالت شیار عرضی نسبت به شیار طولی می‌شود و در نتیجه در حالت شیار عرضی، مقدار BPN بیشتری حاصل می‌گردد.

۶. نتایج آزمایش پخش ماسه

برای اندازه‌گیری عمق بافت درشت در نمونه‌های بتنی شیاردار، آزمایش پخش ماسه انجام شد که نتایج آن در جدول ۱۱ آورده شده است.

با توجه به نمودار شکل ۹، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش زاویه‌ی بین امتداد حرکت آونگ و راستای شیارها، مقدار مقاومت لغزندگی سطح بتن افزایش می‌یابد. به طوری که شیارزنی عرضی، بیشترین مقاومت لغزندگی را به دنبال دارد و شیارهای طولی، کمترین مقدار عدد آونگی را حاصل می‌کنند. با این حال، باید یادآور شد که بنا به مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ی TRRL، حتی شیارزنی طولی نیز مقاومت لغزندگی مناسبی را ایجاد می‌کند.

با توجه به مطالب توضیح داده شده، واضح است که رابطه‌ای معناداری بین راستای شیارها و مقدار عدد آونگی حاصله وجود دارد. عمود بودن امتداد حرکت آونگ بر راستای شیارها باعث اتلاف انرژی بیشتری هنگام عبور

جدول ۱۱. نتایج آزمایش پخش ماسه روی نمونه‌های شیاردار

MTD	قطر میانگین (mm)	حجم ماسه (mm ³)	وزن ماسه (gr)	فاصله شیارها (mm)	پهنای شیارها (mm)
۰/۸۷	۱۸۲	۲۲۶۴۱/۵	۶۰	۱۲/۷	
۰/۵۹	۱۸۰	۱۵۰۹۴/۳	۴۰	۱۹	۲/۵
۰/۴۴	۱۸۱	۱۱۳۲۰/۸	۳۰	۲۵/۴	
۱/۰۳	۱۸۱	۲۶۴۱۵/۱	۷۰	۱۲/۷	
۰/۶۲	۱۷۶	۱۵۰۹۴/۳	۴۰	۱۹	۳/۲
۰/۴۹	۱۸۵	۱۳۲۰۷/۵	۳۵	۲۵/۴	
۱/۲۶	۱۸۵	۳۳۹۶۲/۳	۹۰	۱۲/۷	
۰/۸۹	۱۸۰	۲۲۶۴۱/۵	۶۰	۱۹	۳/۸
۰/۷۵	۱۷۹	۱۸۸۶۷/۹	۵۰	۲۵/۴	

۱-۶. تأثیر فاصله‌ی شیارها بر عمق بافت درشت جهت ارزیابی تأثیر فاصله‌ی مرکز تا مرکز شیارها بر عمق بافت درشت ایجاد شده، نتایج آزمایش پخش ماسه که در جدول ۱۱ آورده شده، بر حسب فاصله‌ی شیارها میانگین‌گیری و طبقه‌بندی شد. جدول ۱۲، نتایج دسته-بندی شده‌ی آزمایش پخش ماسه بر حسب فاصله‌ی شیارها و معادله‌ی رگرسیونی مربوطه را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که وزن مخصوص ماسه‌ی استاندارد مورد استفاده برابر با $2/65 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد. همچنین، جهت اندازه‌گیری عمق بافت درشت، قطر دایره‌ی ماسه-ای تشکیل یافته در چهار جهت اندازه‌گیری شد و از مقدار میانگین آن‌ها جهت انجام محاسبات استفاده گردید.

جدول ۱۲. عمق بافت درشت نمونه‌های بتنی شیاردار بر حسب فاصله شیارها

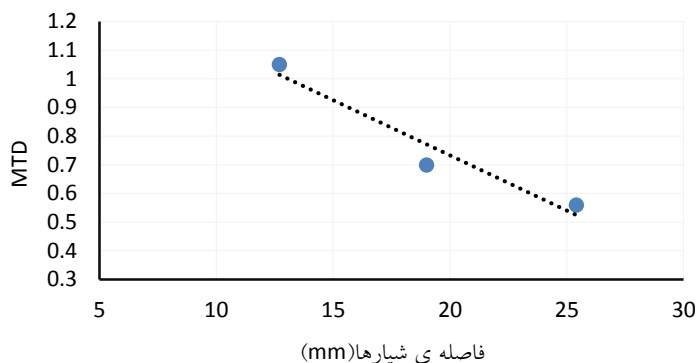
MTD	فاصله شیارها (mm)
۱/۰۵	۱۲/۷
۰/۷۰	۱۹
۰/۵۶	۲۵/۴

معادله رگرسیونی مربوط به تغییرات MTD با تغییر فاصله شیارها (X)

$$\text{MTD} = -0.0385x + 1.5035;$$

$$R^2 = 0/94$$

شکل ۱۰، روند تغییرات عمق بافت درشت با تغییر فاصله‌ی شیارها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. تغییرات MTD با تغییر فاصله‌ی شیارها

و در نتیجه حجم ماسه‌ی بیشتری برای پر کردن این فضا مورد نیاز می‌باشد و در نتیجه، عمق بافت بیشتری حاصل می‌گردد.

۲-۶. تأثیر پهنا‌ی شیارها بر عمق بافت درشت

جهت ارزیابی تأثیر پهنا‌ی شیارها بر عمق بافت درشت ایجاد شده، نتایج آزمایش پخش ماسه که در جدول ۱۱ آورده شده، بر حسب پهنا‌ی شیارها دسته‌بندی گردید. جدول ۱۳، نتایج دسته‌بندی شده‌ی آزمایش پخش ماسه بر حسب پهنا‌ی شیارها و معادله‌ی رگرسیونی مربوط به آن را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۰، واضح است که رابطه‌ی معناداری میان عمق بافت درشت و فاصله‌ی شیارها وجود دارد. بدین ترتیب که مقدار MTD با فاصله‌ی شیارها رابطه‌ی عکس دارد. به طوری که با افزایش فاصله‌ی شیارها از ۱۲/۷ میلی‌متر به ۱۹ و ۲۵/۴ میلی‌متر، عمق بافت درشت اندازه‌گیری شده به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۴۹ میلی‌متر کاهش داشته و از ۱/۰۵ میلی‌متر به ۰/۷ و ۰/۵۶ میلی‌متر می‌رسد. در واقع، افزایش فاصله‌ی شیارها از ۱۲/۷ به ۲۵/۴ میلی‌متر، موجب کاهش ۴۶/۷ درصدی عمق بافت درشت می‌گردد. بدیهی است که با کاهش فاصله‌ی شیارها نسبت به هم، فضای خالی موجود در سطح نمونه افزایش یافته

جدول ۱۳. عمق بافت درشت نمونه‌های بتنی شیاردار بر حسب پهنا‌ی شیارها

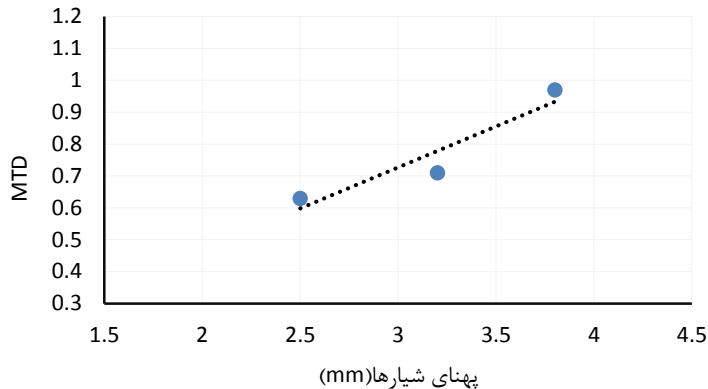
MTD	پهنا‌ی شیارها (mm)
۰/۶۳	۲/۵
۰/۷۱	۳/۲
۰/۹۷	۳/۸

معادله رگرسیونی مربوط به تغییرات MTD با تغییر پهنا‌ی شیارها (x)

$$MTD = 0.2575x - 0/0454;$$

$$R^2 = 0/89$$

شکل ۱۱، روند تغییرات عمق بافت درشت با تغییر پهناي شيارها را نشان مي‌دهد.



شکل ۱۱. روند تغییرات MTD با تغییر پهناي شيارها

سطح وسیع‌تری پخش می‌شود و لذا، مقدار MTD کمتری حاصل می‌گردد. اما افزایش پهناي شيارها، موجب افزایش فضای خالی در سطح نمونه می‌شود و موجب می‌گردد که حجم معینی از ماسه، در مساحت کوچک‌تری پخش گردد و در نتیجه مقدار MTD اندازه‌گیری شده افزایش یابد.

۷. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، با هدف بررسی مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی شیاردار انجام پذیرفت تا تأثیر تغییر فاصله‌ی مرکز تا مرکز و پهناي شيارها بر میزان اصطکاک تولید شده و نیز عمق بافت درشت ایجاد شده مورد ارزیابی قرار گیرد. برای فاصله‌ی مرکز تا مرکز شيارها، سه مقدار ۱۲/۷، ۱۹ و ۲۵/۴ میلی‌متر و برای پهناي شيارها سه مقدار ۲/۵، ۳/۲ و ۳/۸ میلی‌متر انتخاب گردید و عمق شيارها نیز در تمامی حالات ثابت و برابر با ۳ میلی‌متر انتخاب شد. نمونه‌های شیاردار در سه راستای عرضی، مورب و طولی مورد آزمایش‌های آونگ انگلیسی و پخش ماسه قرار گرفتند. با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، می‌توان نتایج زیر را استنتاج نمود:

۱- نتایج آزمایش آونگ انگلیسی برای نمونه‌های با سطح صاف و بدون بافت درشت، نشان می‌دهد که مقدار عدد آونگی حاصله در این نمونه‌ها، از مقادیر مجاز ارائه شده

با توجه به شکل ۱۱، می‌توان مشاهده کرد که افزایش پهناي شيارها، موجب افزایش عمق بافت درشت می‌گردد. به طوری که با افزایش پهناي شيارها از ۲/۵ میلی‌متر به ۳/۲ و ۳/۸ میلی‌متر، مقدار MTD به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۳۴ میلی‌متر افزایش یافته و از ۰/۶۳ میلی‌متر به ۰/۷۱ و ۰/۹۷ میلی‌متر می‌رسد. در واقع افزایش پهناي شيار از ۲/۵ به ۳/۸ میلی‌متر، موجب افزایش ۵۴ درصدی عمق بافت درشت می‌گردد. واضح است که افزایش پهناي شيارها، فضای خالی موجود در سطح نمونه‌ی بتنی را افزایش می‌دهد و در نتیجه، مقدار ماسه‌ی بیشتری جهت پر کردن این فضای خالی مورد نیاز می‌باشد و مقدار عمق بافت درشت افزایش می‌یابد.

به عنوان جمع‌بندی، باید گفت که روند تغییرات مقدار MTD اندازه‌گیری شده با تغییر فاصله و پهناي شيارها، نشان می‌دهد که میزان عمق بافت درشت سطح بتن، با فاصله‌ی شيارها رابطه‌ی عکس داشته و با پهناي شيارها رابطه‌ی مستقیم دارد. به عبارت دیگر، مقدار MTD به دست آمده، با دورتر شدن شيارها کاهش یافته و با بیشتر شدن پهناي شيارها، افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله، آن است که اگر مقدار معین و ثابتی از ماسه در نظر گرفته شود، با دورتر شدن شيارها، تعداد شيارهایی که توسط ماسه پر می‌شوند، کاهش می‌یابد و ماسه‌ی ریخته شده در

توسط فخری و طاری‌بخش (۱۳۹۱) که شیارزنی توسط چنگک‌های فلزی صورت گرفته است، بیشترین مقدار عدد آونگی در پهنای شیار $3/8$ میلی‌متر حاصل شده - است.

۴- نتایج این مطالعه، نشان می‌دهد که شیارزنی عرضی موجب ایجاد بیشترین مقاومت لغزندگی در سطح بتن می‌گردد و ایجاد شیارهای طولی، کمترین عدد آونگی را به دنبال دارد. به طوری که مقدار عدد آونگی حاصله در نمونه‌های دارای شیارهای عرضی، نسبت به نمونه‌های دارای شیارهای طولی و مورب به ترتیب $12/76$ و $8/05$ درصد بیشتر می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که مشابه با مطالعات پیشین، بیشترین مقاومت لغزندگی زمانی ایجاد می‌شود که راستای شیارها عمود بر امتداد حرکت جریان ترافیک باشد.

۵- نتایج آزمایش آونگ انگلیسی نشان می‌دهد که تغییر راستای شیارها از حالت مورب یا طولی به حالت عرضی، بیشترین تأثیر مثبت را در مقاومت لغزندگی حاصله دارد. پس از آن، بیشترین اثر مثبت در افزایش عدد آونگی مربوط به کاهش فاصله‌ی شیارها می‌باشد. در مورد تأثیر تغییر پهنای شیارها نیز باید گفت که افزایش پهنای $3/2$ میلی‌متر موجب ایجاد بیشترین مقاومت لغزندگی می‌گردد؛ ولی در صورت افزایش بیشتر پهنای، عدد آونگی کاهش پیدا می‌کند.

۶- با توجه به نتایج آزمایش آونگ انگلیسی در نمونه‌های با فاصله‌های شیارها مختلف، می‌توان دید که میزان افزایش عدد آونگی هنگام کاهش فاصله‌ی شیارها از $25/4$ به 19 میلی‌متر قابل توجه است. در حالی که کاهش بیشتر فاصله‌ی شیارها تا $12/7$ میلی‌متر، عدد آونگی افزایش چشم‌گیری ندارد. در مورد پهنای شیارها هم به وضوح مشخص است که استفاده از شیارهایی به پهنای $3/2$ میلی‌متر بیشترین مقاومت لغزندگی را به دنبال دارد و افزایش بیشتر شیارها، بر میزان اصطکاک سطح روسازی تأثیر منفی می‌گذارد. در نتیجه لازم است که با

توسط آیین‌نامه TRRL کمتر می‌باشد و در نتیجه، استفاده از روسازی‌های بتنی بدون بافت درشت، به هیچ وجه ایمن نبوده و روی سطح این نوع رویه‌ها حتماً باید با استفاده از روش‌های مختلف، بافت درشت ایجاد گردد.

۲- در هر سه حالت شیارهای عرضی، مورب و طولی، افزایش فاصله‌ی شیارها، موجب کاهش مقدار عدد آونگی حاصله می‌شود. به طوری که افزایش فاصله‌ی شیارها از $12/7$ به $25/4$ میلی‌متر، در سه حالت شیارزنی عرضی، مورب و طولی، به ترتیب موجب کاهش $10/5$ ، $6/64$ و $5/05$ درصدی عدد آونگی می‌گردد. روند تغییرات عدد آونگی با افزایش فاصله‌ی شیارها، نتایج حاصل از تحقیقات فخری و طاری‌بخش (۱۳۹۱) را تأیید می‌کند، چرا که در آن مطالعه نیز مقدار عدد آونگی با افزایش فاصله‌ی مرکز تا مرکز شیارها کاهش پیدا کرده است.

۳- نتایج آزمایش آونگ انگلیسی نشان می‌دهد که در هر سه راستای شیارزنی عرضی، مورب و طولی، مقدار عدد آونگی با افزایش پهنای شیارها، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش پهنای شیارها از $2/5$ به $3/2$ میلی‌متر، عدد آونگی در شیارهای عرضی، مورب و طولی به ترتیب $10/14$ ، $1/75$ و $1/95$ درصد افزایش می‌یابد. در ادامه، با افزایش پهنای شیارها تا $3/8$ ، مقاومت لغزندگی سطح بتن کاهش پیدا می‌کند و مقدار عدد آونگی در سه راستای شیارزنی عرضی، مورب و طولی به ترتیب $8/8$ ، $7/16$ و $10/32$ درصد کاهش پیدا می‌کند. در حالی که در تحقیقات انجام شده توسط فخری و طاری‌بخش (۱۳۹۱) روی نمونه‌های بتنی شیارزنی شده با چنگک، افزایش پهنای شیارها از $2/5$ به $3/8$ میلی‌متر، موجب افزایش عدد آونگی شده است. به عبارت دیگر، در مطالعه‌ی حاضر که شیارزنی با استفاده از قالب‌گذاری و به صورت دقیق‌تر و بدون لب‌پریدگی انجام شده است، اندازه‌ی $3/2$ میلی‌متر به عنوان مقدار بهینه برای پهنای شیارها معرفی می‌گردد. در صورتی که در تحقیق مشابه

در زمینه‌ی عمق بافت درشت ایجاد شده به وسیله‌ی شیارزنی را تأیید می‌کند.

۸- با توجه به نتایج آزمایش پخش ماسه، واضح است که مشابه با نتایج حاصل از تحقیقات پیشین، عمق بافت درشت ایجاد شده با پهنا‌ی شیارها رابطه‌ی مستقیم دارد و با افزایش پهنا از ۲/۵ میلی‌متر به ۳/۸ میلی‌متر، عمق بافت به میزان ۵۳/۹۷ درصد افزایش پیدا می‌کند.

۹- با دقت در مقادیر مجاز ذکر شده در آیین‌نامه TRRL و مقادیر عدد آونگی به دست آمده در نمونه‌های شیاردار، می‌توان نتیجه گرفت که شیاردار کردن سطح رویه‌های بتنی، روشی مناسب جهت افزایش مقاومت لغزندگی و ایمنی این نوع روسازی می‌باشد.

دقت در امر بهینه‌یابی، بهترین مشخصات بافت را از نظر مقاومت لغزندگی و آلاینده‌ی صوتی معین کرد. بنا به نتایج به دست آمده در این پژوهش، برای فاصله‌ی مرکز تا مرکز شیارها مقدار ۱۹ میلی‌متر و برای پهنا‌ی شیارها مقدار ۳/۲ میلی‌متر پیشنهاد می‌گردد.

۷- نتایج آزمایش پخش ماسه نشان می‌دهد که میان عمق بافت درشت ایجاد شده و فاصله‌ی شیارها رابطه‌ی معکوس وجود دارد. به طوری که با افزایش فاصله‌ی شیارها از ۱۲/۷ به ۲۵/۴ میلی‌متر، عمق بافت درشت با کاهش ۴۶/۷ درصدی مواجه می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت نتایج حاصل از این پژوهش، نتایج مطالعات پیشین

۸. مراجع

- جان‌محمدی، ا. ۱۳۸۸. "بررسی تأثیر شیارهای با عمق متغیر بر مقاومت لغزشی سطح رویه". پایان‌نامه، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس.
- حسنی، ا.، عامری، م. و نریمانی، گ. ۱۳۸۵. "بررسی و مقایسه‌ی فنی و اقتصادی رویه‌های بتنی و آسفالتی". وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل.
- طاری‌بخش، م. ۱۳۹۰. "بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی راه". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- فخری، م. و طاری‌بخش، م. ۱۳۹۱. "بررسی تأثیر دانه‌بندی و ایجاد بافت درشت به روش شیارزدن بر مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی راه". پژوهشنامه حمل و نقل، ۹(۳): ۲۹۳-۳۱۲.
- Ahammed, M. A. and Tighe, S. L. 2008. "Concrete pavement surface textures and multivariables frictional performance analysis: A North American case study". *Can. J. Civ. Eng.*, 35(7): 727-738.
- Alaskar, A., Alabduljabbar, H., Mohamed, A. M., Alrshoudi, F. and Alyousef, R. 2021. "Abrasion and skid resistance of concrete containing waste polypropylene fibers and palm oil fuel ash as pavement material". *Constr. Build. Mater.*, 282: 122681.
- Buddhavarapu, P., de Fortier Smit, A., Banerjee, A., Trevino, M. and Prozzi, J. A. 2013. "Evaluation of the benefits of diamond grinding of a continuously reinforced concrete pavement". *Transport. Res. Record*, 2369(1): 59-67.
- Burge, P. L., Travis, K. and Rado, Z. 2002. "Transverse-tined and longitudinal diamond-ground texturing for newly constructed concrete pavement: A comparison". *Transport. Res. Record*, 1792(1): 75-82.
- Gardziejczyk, W. and Gierasimiuk, P. 2018. "Influence of texturing method on tyre/road noise of cement concrete pavement". *Int. J. Pavement Eng.*, 19(12): 1061-1076.
- Gardziejczyk, W., Gierasimiuk, P., Motylewicz, M. and Wasilewska, M. 2021. "Evaluation of noisiness of exposed aggregate cement concrete pavement". *Road Mater. Pavement Design*, 22(10): 2352-2368.
- Gierasimiuk, P., Wasilewska, M. and Gardziejczyk, W. 2021. "A comparative study on skid resistance of concrete pavements differing in texturing technique". *Mater.*, 14(1): 178.
- Guada, I. M., Rezaei, A., Harvey, J. T. and Spinner, D. 2012. "Evaluation of grind and groove (next generation concrete surface) pilot projects in California". California Department of Transportation, Research Report: UCPRC-RR-2013-01.

- Hablovicova, B., Krivanek, V. and Markova, P. 2021. "Comparison of exposed aggregate cement concrete surface and stone mastic asphalt surface noise emissions by close-proximity method". *Appl. Sci.*, 11(21): 10359.
- Hall, J. W., Smith, K. L. and Littleton, P. C. 2009. "Texturing of concrete pavements". *Transport. Res. Board, NCHRP 634*.
- Hosking, R. 1992. "Road aggregates and skidding". *TRID*, 235 p.
- Jalalkamali, R., Dibae, M. M., Jalal Kamali, M. H. and Hassani, A. 2021. "An investigation of the relationship among skid resistance, mean texture depth and abrasion resistance for different macrotextures of concrete pavements". *Civ. Eng. Infrastruct. J.*, 54(2): 301-317.
- Lee, Y. P. K., Fwa, T. F. and Choo, Y. S. 2003. "Skid resistance evaluation of concrete pavement surfaces". *J. East. Asia Soc. Transport. Stud.*, 5: 972-984.
- Lee, M. H., Chou, C. P. and Li, K. H. 2009. "Automatic measurement of runway grooving construction for pavement skid evaluation". *Autom. Constr.*, 18(6): 856-863.
- Reiter, D., Bowlby, W., Herman, L. and Boyer, J. 2004. "Traffic noise in Montana: Community awareness and recommendations for a rural state". *Montana Department of Transportation*.
- Rith, M., Kim, Y. K. and Lee, S. W. 2020. "Characterization of long-term skid resistance in exposed aggregate concrete pavement". *Constr. Build. Mater.*, 256: 119423.
- Ryu, S., Kim, J., Sohn, D. and Bae, S. 2022. "Optimal longitudinal texture on concrete pavement to reduce lateral vibration of vehicles". *Appl. Sci.*, 12(19): 9661.
- Snyder, M. B. 2006. "Pavement surface characteristics: A synthesis and guide". *TRID, EB235P*.
- Yang, Y. S., Yi, X., Hu, P. and Dong, Q. 2011. "The optimized design for groove parameters based on cement pavement materials performance". *Adv. Mater. Res.*, 213: 613-617.