

بررسی تأثیر دانه‌بندی و ایجاد بافت درشت به روش شیارزدن بر مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی راه

منصور فخری، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
میلاذ طاری بخش*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

E-mail: miladtaribakhsh@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۲۳ - پذیرش: ۱۳۹۱/۰۵/۲۱

چکیده

ایجاد مقاومت لغزندگی کافی یکی از الزامات مهم و اجتناب‌ناپذیر در ساخت روسازی‌های بتنی است. انتخاب روش پرداخت سطح رویه، عاملی است که اثرات عمده‌ای بر خصوصیات اصطکاکی سطح دارد. با این حال، هنوز دستورالعمل جامعی برای شناسایی و انتخاب روش ایجاد بافت روسازی‌های بتنی که مجموعه عوامل فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و ایمنی راه را در برگیرد، وجود ندارد. هدف از این پژوهش آزمایشگاهی، تعیین رابطه بین مشخصات بافت درشت ایجاد شده و مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی می‌باشد. برای این منظور با در نظر گرفتن سه تیپ دانه‌بندی مختلف براساس تفاوت در بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌های آنها، به ارایه سه طرح اختلاط مناسب اقدام شد. پس از پذیرش این سه تیپ مخلوط، برای ساخت نمونه‌های مربوط به آزمایش‌های آونگ انگلیسی و پخش ماسه، روش شیارزدن (در وضعیت بتن پلاستیک) به کار گرفته شد تا میزان تأثیر این روش بر خصوصیات بافت ریز و بافت درشت رویه‌های بتنی، ارزیابی گردد. شیارها در سه پهنا و چهار فاصله مختلف، روی سطح ایجاد شدند و نمونه‌ها در سه امتداد طولی و عرضی و مورب، تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که ایجاد بافت روی سطح بتن، مقاومت لغزندگی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش پهنا و کاهش فواصل شیارها، اصطکاک بیشتری تولید می‌شود و هرگاه بافت ایجاد شده در امتداد عمود بر جریان ترافیک باشد، بالاترین میزان اصطکاک را دارد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت لغزندگی، روسازی بتنی، شیارزدن، بافت ریز، بافت درشت، آونگ انگلیسی، پخش ماسه

۱- مقدمه

مقاومت لغزندگی یکی از مهم‌ترین مباحث ایمنی مسیر است که امروزه دارای جایگاه ویژه‌ای در مطالعات طراحی و ملاحظات فنی و اقتصادی می‌باشد. مقاومت لغزندگی با ضریب اصطکاک بین لاستیک و رویه راه بیان می‌شود که به دو صورت طولی و عرضی قابل تقسیم‌بندی است و با استفاده از دستگاه‌های مختلفی در آزمایشگاه و یا سطح جاده اندازه‌گیری می‌شود. عدم مقاومت اصطکاکی کافی در سطح روسازی نه تنها خود یکی از علل عمده

با توجه به ضعف روسازی‌های آسفالتی در محورهای سنگین، که اغلب دارای ناهمواری، موج‌های بلند و متوالی و گاهی شکستگی می‌باشند، کاربرد دال بتنی به عنوان یک رویه مقاوم و با دوام باعث رفع مشکلات مزبور و کاهش دوره تعمیرات می‌گردد. بنابراین، تمایل مهندسان و سیاست‌گزاران امر راه‌سازی، به استفاده از روسازی‌های بتنی در سرتاسر جهان رو به افزایش است (حسنی، ۱۳۸۴).

پس از سخت شدن بتن به کار می‌روند، که ضمناً یکی از کاربردهای آنها، احیای^۴ بافت درشت روسازی‌های موجود می‌باشد. انتخاب روش پرداخت سطح^۵ رویه و نحوه ایجاد بافت درشت^۶ روی سطح نهایی راه، عاملی است که اثرات عمده‌ای بر ویژگی‌های اصطکاکی سطح رویه دارد (Lee, Fwa, and Choo, 2003). با این وجود، دستورالعمل جامعی برای شناسایی و انتخاب روش ایجاد بافت روسازی‌های بتنی که مجموعه عوامل فنی، زیست‌محیطی، اقتصادی و ایمنی راه را در برگیرد، موجود در دسترس نیست (Hall, Smith, and Littleton, 2009).

مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی تحت تأثیر عواملی از قبیل نوع سنگدانه‌ها، شکل، اندازه و دانه‌بندی سنگدانه‌ها، نسبت آب به سیمان، درصد فضای خالی، روش عمل‌آوری و مهم‌تر از همه؛ روش ایجاد بافت درشت روی سطح رویه قرار دارد (Lee, Fwa, and Choo, 2003).

عمق، فاصله و جهت‌گیری بافت درشت سطحی می‌تواند اثر قابل توجهی بر خصوصیات اصطکاکی، خصوصیات مربوط به آلاینده‌گی صوتی و کیفیت سواری داشته باشد (Ardani, 2006). جهت بافت درشت با تغییر نوع کاربرد روسازی تغییر می‌کند. بافت طولی در شیب‌ها و قوس‌ها (به عنوان تکنیکی برای پایدارسازی و هدایت‌پذیری وسیله نقلیه) مؤثر است. از طرفی دیگر بافت عرضی باعث تأمین مقاومت لغزشی بیشتری نسبت به بافت طولی می‌شود و بنابراین، برای محوطه‌های با سرعت بالا مناسب‌تر است. همچنین به دلیل این‌که بافت عرضی، هم راستای شیب عرضی مسیر می‌باشد؛ با ایجاد کانال‌های زهکشی، سبب تخلیه سریع آب از سطح روسازی می‌گردد و بنابراین، پدیده هیدروپلانینگ^۷ را به نحو چشمگیری کاهش خواهد داد (Lee, Fwa, and Choo, 2003). اما مزیت اصلی بافت طولی، کاهش آلاینده‌گی صوتی و نیز بهبود کیفیت سواری می‌باشد (Reiter, Bowlby, and Herman, 2004). برای مثال، میزان آلودگی صوتی برای روسازی بتنی دارای بافت درشت به روش شیار طولی، در حدود ۷۷ دسی بل است، در حالی‌که این مقدار در وضعیت شیار عرضی، در حدود ۸۲ دسی بل خواهد بود (Hall, Smith, and Littleton, 2009).

به‌طور کلی ایجاد بافت درشت بر روی بتن، از طرق مختلف می‌تواند صورت پذیرد که در این میان، روش شیارزدن روی

تصادفات است، بلکه سایر عوامل مؤثر در تصادفات جاده‌ای را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Hosking, 1992).

در صورت فقدان مقدار مناسبی از اصطکاک در شرایط آب و هوایی بارانی، احتمال وقوع تصادف ناشی از سرخوردن وسیله نقلیه بر سطح روسازی زیاد است. آمارهای جمع‌آوری شده نشان می‌دهد که تلفات انسانی، بدترین پیامد هر تصادف است. متأسفانه آمار متوفیان ناشی از تصادفات در ایران بسیار زیاد بوده و به‌طور میانگین در سال ۱۳۸۸ روزانه بیش از ۶۳ نفر در اثر تصادفات جاده‌ای کشته شدند که بخشی از این تصادفات، ناشی از کمبود مقاومت لغزندگی سطح راه می‌باشد. این در حالی است که در کشورهای اروپای غربی مانند آلمان، انگلیس و فرانسه که حتی پارامتر وسیله نقلیه- کیلومتر طی شده در آن کشورها بیش از ۱۰ برابر ایران می‌باشد، تعداد کشته‌ها بسیار کمتر می‌باشد (سالنامه آماری حمل و نقل جاده‌ای، ۱۳۸۸). بنابراین ارایه راه‌کارهایی جهت بهبود اصطکاک سطحی و به تبع، افزایش ایمنی مسیر یکی از مسایل ضروری و مهم به نظر می‌رسد.

در این پژوهش، سعی بر آن است تا با یافتن ارتباط بین چگونگی ایجاد بافت درشت^۱ و میزان مقاومت در برابر لغزش، گامی سودمند در جهت ارتقای سطح ایمنی راه‌های بتنی برداشته شود؛ که در این راستا ارزیابی روش شیار زدن^۲ بتن تازه مد نظر قرار گرفته است. همچنین با توجه به اثر ابعاد سنگدانه‌های به‌کار رفته در مخلوط بتنی بر مقاومت لغزشی سطح راه، انواع مختلف دانه‌بندی‌ها برای دستیابی به بالاترین میزان اصطکاک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

۲- مروری بر پیشینه تحقیق

ایجاد مقاومت لغزندگی کافی یکی از الزامات اجتناب‌ناپذیر و مهم در ساخت روسازی‌های بتنی است و از رویه‌های بتنی بدون بافت درشت، فقط می‌توان در مکان‌هایی که مسئله لغزش، اهمیت خاصی ندارد، مانند پارکینگ‌ها، کف کارگاه‌ها و کارخانه‌ها و همچنین در انبارها استفاده کرد (جان محمدی، ۱۳۸۸). روش‌ها و تجهیزات متنوع و مختلفی برای ایجاد بافت در روسازی‌های بتنی توسعه یافته‌اند، که اغلب آنها بلافاصله پس از بتن‌ریزی و وقتی که سطح بتن هنوز سفت نشده است^۳، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مقابل، برخی دیگر از دستگاه‌ها، برای ایجاد بافت

شاخص بین‌المللی ناهمواری قابل قبول، برابر با ۴ متر بر کیلومتر است (Robinson, Danielson and Snaith, 1998).

۳- طرح اختلاط بتن و برنامه آزمایشگاهی

برای ساخت نمونه‌های بتنی مورد نیاز جهت انجام آزمایش‌ها، از سیمان پرتلند تپ دو محصول کارخانه سیمان تهران و آب شرب شهری و همچنین شن کوهی شکسته و ماسه رودخانه‌ای گرد گوشه، که از معادن شرق استان تهران (پاکدشت) تهیه شدند و به‌طور عمده حاوی کانی‌های سیلیسی می‌باشند، استفاده شد (طاری‌بخش، ۱۳۹۰). سنگدانه‌هایی که در مخلوط‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید در برابر وزن وسایل نقلیه سنگین، مقاومت کافی داشته باشند و نباید در اثر تنش‌های ناشی از وزن آنها شکسته و خرد شوند. سختی مصالح سنگی با انجام آزمایش سایش لس آنجلس مطابق استاندارد ASTM C131 ارزیابی می‌شود که در این پروژه از چرخش ۵۰۰ دور در دقیقه دستگاه و دانه‌بندی B استاندارد نام برده استفاده شده است. آزمایش دیگری که روی مصالح سنگی انجام گرفت، درصد شکستگی مصالح براساس استاندارد ASTM D5821 می‌باشد. این آزمایش با هدف ماکزیمم کردن مقاومت برشی به کمک افزایش اندرکنش اصطکاکی بین ذرات و همچنین با هدف تأمین استحکام لازم برای انجام به‌سازی سطحی سنگدانه‌ها و افزایش مقاومت اصطکاکی سنگدانه‌های به‌کار رفته در لایه رویه روسازی، انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایش‌های فوق در جدول ۱ آورده شده است. طبق توصیه آیین‌نامه (AASHTO M80, 2003)، درصد سایش سنگدانه‌های درشت بتن، نباید از ۵۰ درصد تجاوز کند.

جدول ۱. نتایج آزمایش سایش لس آنجلس و درصد شکستگی

نتایج (درصد)	آزمایش‌های سنگدانه‌ها
۱۶	افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس
۹۸	درصد شکستگی در یک جبهه مصالح روی الک شماره ۴
۹۳	درصد شکستگی در دو جبهه مصالح روی الک شماره ۴

سطح بتن درحال گیرش (بتن پلاستیک)، یکی از بهترین و سودمندترین و کاربردی‌ترین روش‌ها می‌باشد. آزمایش‌های میدانی^۸ NASA نشان می‌دهند که ابعاد شیارها و فواصل آنها، اثر مهمی بر مقاومت لغزندگی روسازی بتنی دارند، به‌طوری‌که در شرایط مرطوب، استفاده از شیارهایی با پهنا و عمق زیاد و فواصل کم، باعث افزایش ۵۴ درصدی مقاومت لغزشی، نسبت به وضعیت شیارهای با پهنا و عمق کم و فواصل زیاد شده است (Chambers, 2003). مدل‌سازی کامپیوتری نیز بیانگر رابطه مشابهی بین مقاومت لغزندگی و هندسه شیارهاست. مدل‌سازی به روش اجزای محدود نشان می‌دهد که با تغییر در ابعاد شیارها، سرعت هیدروپلانینگ تغییر می‌کند. به این ترتیب که استفاده از شیارهایی با فواصل کمتر و پهنا و عمق بیشتر، میزان سرعت هیدروپلانینگ را تا ۳/۱ برابر افزایش می‌دهد (Fwa and Ong, 2006) و (Ong and Fwa, 2006). علی‌رغم تحقیقات صورت گرفته در سرتاسر جهان، در مورد نوع شیارها (طولی یا عرضی یا مورب)، ابعاد شیارها و اثرات آنها بر کیفیت سواری و آلودگی صوتی، باید گفت که هیچ یک از آنها، نظر قاطع درباره استفاده از شیار برای ایجاد بافت درشت، ارایه نکرده‌اند. بنابراین، یکی از اهداف مهم این پژوهش، تعیین بهترین فواصل بین شیارها و نیز تعیین مناسب‌ترین پهناهای شیار و همچنین یافتن زاویه بهینه برای شیارزنی می‌باشد. ذکر این مطلب ضروری است که در ضمن بهینه‌یابی پهنا و فواصل و زاویه شیارها، باید به مسایلی چون آلاینده‌گی صوتی و کیفیت سواری نیز توجه کرد. در واقع بهترین وضعیت شیارزنی هنگامی محقق می‌شود که مقاومت لغزندگی سطح رویه و آلودگی صوتی محیط پیرامون و کیفیت سواری وسیله نقلیه، به‌طور همزمان در حد قابل قبول باشند و هیچ یک از این سه مورد، دچار نقصان نباشند. قابل ذکر است که ارزیابی مقاومت لغزندگی و آلودگی صوتی و کیفیت سواری، به ترتیب با اندازه‌گیری عدد اصطکاک^۹ (FN)، حداکثر سطح صدا^{۱۰} (L_{max}) و شاخص بین‌المللی ناهمواری^{۱۱} (IRI) صورت می‌پذیرد. حداقل مقدار عدد اصطکاک لازم برای تأمین ایمنی راه، برابر با ۳۷ می‌باشد (Shaffer, Christiaen, and Rogers, 2006). همچنین حداکثر سطح صدای قابل قبول، در حدود ۸۲/۵ دسی بل (Hall, Smith and Littleton, 2009) و نیز حداکثر میزان

فخری و طاری بخش

دارد که علت آن تخلخل سنگدانه‌ها و جذب خمیر سیمان توسط آنها می‌باشد. جهت لحاظ نمودن اثر تخلخل یا خلل و فرج سنگدانه‌ها، وزن مخصوص مصالح سنگی به صورت‌های مختلف اعم از وزن مخصوص حقیقی، وزن مخصوص ظاهری و همچنین وزن مخصوص ظاهری خشک و میله خورده شن تعریف شده و محاسبه می‌گردند. در طرح اختلاط بتن همیشه فرض بر این است که دانه‌ها در وضعیت اشباع با سطح خشک^{۱۳} (SSD) قرار دارند. بنابراین، از وزن مخصوص حقیقی SSD در طراحی استفاده خواهد شد.

در جدول ۳ مقادیر مربوط به اوزان مخصوص مصالح سنگی و سیمان مورد استفاده در این پروژه به همراه استانداردهای آزمایش‌ها آورده شده است.

در این پروژه، برای تهیه مخلوط‌های بتنی مورد نیاز، از حد وسط دانه‌بندی‌های شماره ۶، ۷ و ۸۹ استاندارد ASTM C33 استفاده شد. تفاوت اصلی این سه تیپ دانه‌بندی مختلف، ناشی از حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌های^{۱۲} (NMSA) آنها می‌باشد. به این ترتیب که دانه‌بندی شماره ۶ دارای حداکثر اندازه اسمی سنگدانه برابر با ۱۹ میلی‌متر، دانه‌بندی شماره ۷ دارای حداکثر اندازه اسمی سنگدانه برابر با ۱۲/۵ میلی‌متر و سرانجام، دانه‌بندی شماره ۸۹ دارای حداکثر اندازه اسمی سنگدانه برابر با ۹/۵ میلی‌متر می‌باشند. بنابراین، یکی از اهداف این تحقیق، بررسی اثر اندازه سنگدانه‌ها بر شاخص‌های لغزندگی خواهد بود. جدول ۲ دانه‌بندی‌های انتخاب شده برای این پروژه را نشان می‌دهد. وزن مخصوص مصالح سنگی اثر قابل ملاحظه‌ای در فضای خالی مخلوط بتنی

جدول ۲. حدود دانه‌بندی شن و ماسه انتخاب شده برای این پروژه

اندازه الک (میلی متر)	دانه‌بندی تیپ A			دانه‌بندی تیپ B			دانه‌بندی تیپ C		
	شن	ماسه	ترکیبی	شن	ماسه	ترکیبی	شن	ماسه	ترکیبی
۲۵/۴	۱۰۰		۱۰۰						
۱۹	۹۵		۹۷/۱	۱۰۰		۱۰۰			
۱۲/۵	۴۰		۶۵/۴	۹۵		۹۷/۲	۱۰۰		۱۰۰
۹/۵	۱۰		۴۸/۱	۵۵		۷۵/۲	۹۵		۹۷/۴
۴/۷۵	۰	۱۰۰	۴۲/۳	۱۰	۱۰۰	۵۰/۴	۳۵	۱۰۰	۶۶/۰
۲/۳۶		۸۵	۳۵/۹	۰	۹۰	۴۰/۴	۱۵	۹۵	۵۳/۲
۱/۱۸		۶۵	۲۷/۴		۷۰	۳۱/۴	۰	۷۵	۳۶/۸
۰/۶		۴۰	۱۶/۸		۴۵	۲۰/۲		۵۰	۲۴/۹
۰/۳		۱۵	۶/۲		۱۵	۶/۷		۲۰	۱۰/۶
۰/۱۵		۰	۰		۰	۰		۵	۳/۴
۰/۰۷۵								۰	۰
مدول نرمی ماسه		۲/۹۵			۲/۸۰			۲/۵۵	

جدول ۳. وزن مخصوص مصالح سنگی و سیمان مورد استفاده در این پروژه

روش آزمایش	دانه‌بندی تیپ C	دانه‌بندی تیپ B	دانه‌بندی تیپ A	نوع مصالح
ASTM C127	۲/۶۲۲	۲/۶۳۱	۲/۶۳۶	شن
ASTM C128	۲/۵۱۰	۲/۵۱۷	۲/۵۳۰	ماسه
ASTM C127	۱/۶۱	۱/۴۵	۱/۳۹	شن
ASTM C128	۲/۳۰	۲/۲۶	۲/۱۶	ماسه
ASTM C29	۱۶۴۶	۱۵۸۵	۱۵۶۷	شن
ASTM C188	۳/۱۰۷	۳/۱۰۷	۳/۱۰۷	سیمان

جدول ۴. نسبت‌های اجزای مخلوط بتنی در وضعیت اشباع با سطح خشک (SSD)

طرح اختلاط تیپ C	طرح اختلاط تیپ B	طرح اختلاط تیپ A
۸۱۱	۸۸۵	۹۶۱
۷۴۰	۷۲۱	۷۰۴
۲۰۷	۱۹۹	۱۹۰
۴۹۳	۴۷۴	۴۵۲
۴۱۷	۴۰۱	۳۸۴

ساخته شد. اگر میانگین مقاومت فشاری حداقل سه نمونه، از مقاومت هدف بیشتر باشد، کیفیت بتن حاصل مورد تأیید خواهد بود. در نتیجه در مجموع ۹ نمونه تهیه و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در حوضچه آب، تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند که نتایج این آزمایش در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بتن حاصل دارای مقاومت فشاری قابل قبولی بوده و برای ساخت روسازی بتنی مناسب می‌باشد.

پس از طراحی مخلوط‌های بتنی، نمونه‌های مربوط به آزمایش پاندول انگلیسی^{۱۴} و پخش ماسه^{۱۵} ساخته شدند و بافت درشت لازم روی آنها ایجاد شد. برای ساخت این نمونه‌ها از قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر و عمق ۱۰/۵ سانتی‌متر استفاده شد. پرداخت اولیه این نمونه‌ها به وسیله کشیدن ماله روی سطح آنها انجام شد و به این ترتیب، سطحی کاملاً صاف (شبه آنچه که در روسازی‌های بتنی به چشم می‌خورد) پدید آمد. سپس به منظور ایجاد بافت درشت روی این سطوح، از روش شیازدن استفاده

در این تحقیق، مقاومت فشاری مشخصه برای هر سه تیپ طرح اختلاط، برابر با ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد و در نتیجه، نسبت آب به سیمان ثابت و برابر ۰/۴۲ به دست می‌آید. این کار باعث می‌شود تا تنها تفاوت سه تیپ مخلوط بتنی ذکر شده، در حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌های آنها باشد و به این ترتیب، بدون تغییر سایر پارامترهای طرح اختلاط، بتوان تأثیر اندازه سنگدانه‌ها بر شاخص‌های لغزندگی را مقایسه کرد.

برای تعیین نسبت‌های اختلاط اجزای مخلوط بتنی، با در نظر گرفتن اسلامپ ۵۰ میلی‌متر برای بتن، مراحل گام به گام بر اساس ACI 211-1 پیموده شد که نتایج طراحی در جدول ۴ قابل مشاهده است. با استفاده از نسبت‌های به دست آمده، آزمایش مقاومت فشاری به منظور کنترل کیفیت مصالح و همچنین بررسی صحت طرح اختلاط، صورت پذیرفت. برای این کار از قالب‌هایی با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد و از هر تیپ مخلوط، سه نمونه براساس استاندارد ASTM C39

انجام آزمایش، سطح نمونه‌ها باید کاملاً تمیز و همراه با کفشک لاستیکی خیس شود. هر یک از نمونه‌ها در سه جهت عرضی، مورب و طولی تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفتند. به این معنی که در شیارهای عرضی، امتداد حرکت کفشک پاندول، بر امتداد شیارها عمود است و شیارهای مورب نسبت به شیارهای عرضی، دارای زاویه ۱۴ درجه (۱:۴) می‌باشند (بنابراین، امتداد حرکت کفشک پاندول، با شیارهای مورب زاویه ۷۶ درجه می‌سازد). در ارتباط با شیارهای طولی، امتداد حرکت کفشک پاندول، با امتداد شیارها موازی و منطبق است. قابل ذکر است که تعداد شیارهایی که کفشک پاندول در حین حرکت روی سطح نمونه با آنها برخورد کرده و از روی آنها عبور می‌کند، با تغییر فواصل و زاویه شیارها تغییر می‌کند. جدول ۵ تعداد شیارهای مورد اصابت لغزنده آونگ را برای هر زاویه و هر فاصله نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی بافت درشت نمونه‌های بتنی از آزمایش پخش ماسه اصلاح شده طبق استاندارد ASTM E965 استفاده شده است. در روش پخش ماسه میدانی، جهت تعیین متوسط عمق بافت، قطر دایره تشکیل شده در سطح روسازی اندازه گرفته می‌شود، اما در روش پخش ماسه اصلاحی قطر نمونه ثابت می‌باشد و حجم ماسه اندازه‌گیری می‌شود.

جدول ۵. تعداد شیارهای مورد اصابت با کفشک پاندول

شیار طولی	شیار مورب	شیار عرضی	فواصل (میلی متر)
۶	۹/۵	۱۰	۱۳
۴	۶/۵	۷	۱۹
۳	۵	۵	۲۵
۲	۴	۴	۳۲

۴- نتایج آزمایش آونگ انگلیسی و تحلیل نتایج

نتایج آزمایش آونگ انگلیسی مربوط به نمونه‌های ساخته شده در شرایط ذکر شده در بالا، در جدول ۶ آورده شده است که در ادامه به تفسیر و تحلیل آنها پرداخته خواهد شد.

گردید. روش شیارزنی، عموماً برای دست‌یابی به بافت مناسب سطح رویه، به‌منظور بهبود خصوصیات اصطکاکی، کاهش پتانسیل هیدروپلانینگ و لغزش در شرایط مرطوب اجرا می‌شود. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد شیارها، عبارت از عمق و پهنا و زاویه و فواصل بین آنها می‌باشند. در این پروژه، پهنای شیارها برابر ۲/۵ و ۳/۲ و ۳/۸ میلی‌متر می‌باشند. برای هر یک از این مقادیر، شیارهایی با فواصل مرکز به مرکز ۱۳ و ۱۹ و ۲۵ و ۳۲ میلی‌متر ایجاد گشت. عمق تمام شیارها نیز ثابت و برابر ۳/۲ میلی‌متر می‌باشند. بنابراین، از هر تیپ مخلوط بتنی ۱۳ نمونه شامل: ۱۲ نمونه به روش شیارزنی، و یک نمونه بدون بافت درشت (سطح صاف) ساخته شد. در نتیجه جمعاً ۳۹ نمونه تهیه گردید. در شکل ۱ نمونه‌ای ساخته شده با این روش نشان داده شده است.



شکل ۱. نمونه بتنی دارای بافت درشت به روش شیارزنی

مقاومت لغزندگی در سطح تماس لاستیک و روسازی به دو پارامتر بافت ریز^{۱۶} و بافت درشت روسازی وابسته است. در این پروژه مقاومت اصطکاکی سطوح بتنی پرداخت شده، با اندازه‌گیری شاخص‌های عدد آونگی^{۱۷} (BPN) و عمق بافت درشت^{۱۸} (MTD) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی مقاومت اصطکاکی نمونه‌های بتنی ساخته شده، از دستگاه پاندول انگلیسی طبق استاندارد ASTM E303 استفاده شده است. در این آزمایش از کفشک بزرگ دستگاه که دارای ابعاد ۷۵/۷۵ × ۶/۳۵ × ۲۵/۴ میلی‌متر می‌باشد، استفاده می‌شود. طول مسیر حرکت لغزنده بر سطح، باید برابر با ۱۲۵ میلی‌متر باشد. برای

جدول ۶. نتایج آزمایش پاندول انگلیسی روی نمونه‌های بتنی

پهنای شیارها (میلی متر)	فواصل شیارها (میلی متر)	مخلوط تیپ A			مخلوط تیپ B			مخلوط تیپ C		
		عرضی	مورب	طولی	عرضی	مورب	طولی	عرضی	مورب	طولی
۲/۵	۱۳	۷۱	۷۲	۶۴	۷۲	۷۰	۶۴	۷۰	۶۸	۶۷
	۱۹	۶۳	۶۰	۶۱	۶۴	۶۴	۶۰	۶۵	۶۴	۶۰
	۲۵	۶۳	۵۸	۵۶	۶۱	۵۷	۵۸	۵۸	۵۷	۶۰
	۳۲	۶۰	۵۸	۵۵	۵۸	۵۸	۵۸	۵۸	۵۶	۵۵
۳/۲	۱۳	۷۶	۷۷	۷۱	۷۷	۷۲	۷۲	۷۴	۷۹	۷۲
	۱۹	۶۷	۶۹	۶۴	۶۴	۶۶	۶۴	۶۳	۷۰	۶۱
	۲۵	۶۳	۶۲	۵۷	۶۳	۶۰	۶۱	۶۰	۶۲	۶۰
	۳۲	۶۱	۶۱	۵۷	۵۹	۵۸	۵۹	۵۸	۶۰	۵۶
۳/۸	۱۳	۸۴	۸۲	۷۶	۸۲	۸۲	۷۵	۸۳	۸۳	۷۴
	۱۹	۷۲	۶۹	۷۲	۷۸	۷۶	۶۶	۷۵	۷۱	۶۷
	۲۵	۶۹	۶۵	۶۲	۶۷	۶۳	۶۰	۶۳	۶۱	۶۲
	۳۲	۶۷	۵۹	۶۳	۶۲	۶۱	۵۹	۶۲	۶۰	۶۰
بدون بافت	-	۴۷			۴۵			۴۲		

مخلوط‌های دارای دانه‌بندی باز، از مقاومت لغزندگی بیشتری برخوردارند و در مقابل، با چگال شدن دانه‌بندی، از مقاومت لغزشی کاسته می‌گردد. قابل ذکر است که مقادیر یاد شده، از حداقل مقادیر مجاز توصیه شده توسط ^{۱۹}TRRL برای مقاومت لغزندگی راه کمتر می‌باشند که این مسئله، بیانگر این حقیقت است که در مورد روسازی‌های بتنی، حتماً باید از روش‌های مربوط به ایجاد بافت درشت استفاده کرد تا ایمنی کافی مسیر تأمین گردد. مقادیر عدد آونگی که در جدول ۶ آورده شدند، باید برای دستیابی به اهداف مربوط به این پژوهش (یعنی در راستای مقایسه تأثیر عواملی از قبیل فواصل شیارها، پهنای شیارها و سرانجام بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها بر مقاومت لغزندگی) مرتب شده و میانگین مقادیر آنها به منظور محاسبه پارامترهای رگرسیونی به دست آیند. جداول ۷ و ۸ میانگین اعداد آونگی مربوط به هر سه تیپ مخلوط را به ترتیب برای فواصل و پهنای مختلف شیارها نشان می‌دهند. در واقع برای محاسبه معادلات رگرسیون، از مقادیر میانگین موجود در این جداول استفاده شده است.

با توجه به جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت که برای سطوح بتنی صاف و بدون بافت، میزان مقاومت لغزندگی تنها تحت تأثیر نوع دانه‌بندی مخلوط و بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌های آن می‌باشد. بنابراین، برازش خطی بین بافت ریز (BPN) و حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها (x) برای این وضعیت، طبق رابطه ۱ است.

$$BPN=0.491x+37.95, R^2=0.898 \quad (1)$$

همان‌طور که در رابطه ۱ ملاحظه می‌شود، مقاومت لغزندگی با بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها رابطه مستقیم دارد. به این ترتیب که با افزایش حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها از ۹/۵ میلی‌متر به ۱۲/۵ میلی‌متر، به میزان ۳ واحد (برابر با ۷/۱ درصد) و پس از آن از ۱۲/۵ میلی‌متر به ۱۹ میلی‌متر، به اندازه ۲ واحد (برابر با ۴/۴ درصد)، به عدد آونگی افزوده شده است. یکی از دلایل این امر، درشت‌دانه‌تر شدن مخلوط بتنی است که باعث ایجاد سطح زبرتری می‌گردد. علاوه بر آن، با مراجعه به جدول ۲، ملاحظه می‌شود که هرچه مخلوط درشت‌دانه‌تر شده است؛ دانه‌بندی آن نیز بازتر گشته است. طبق تحقیقات انجام شده،

۴-۱- تأثیر فواصل شیارها بر عدد آونگی

می‌شود که افزایش فواصل شیارها و مقاومت لغزندگی رابطه معکوس با یکدیگر دارند و با افزایش فاصله، مقادیر BPN کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر با افزایش تعداد شیارهایی که کفشک پاندول با آنها در برخورد و تماس است، مقاومت لغزندگی افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله، این است که افزایش تعداد برخوردهای کفشک لاستیکی با شیارها، موجب افزایش اتلاف انرژی جنبشی آونگ شده و بنابراین، هنگام بالا رفتن بازوی آونگ، ارتفاع کمتری پیموده می‌شود. در نتیجه مقدار BPN بیشتری قرائت خواهد شد. درصد تغییرات میانگین عدد آونگی به‌ازای افزایش فواصل شیارها برای هر زاویه شیار در جدول ۱۰ آورده شده است.

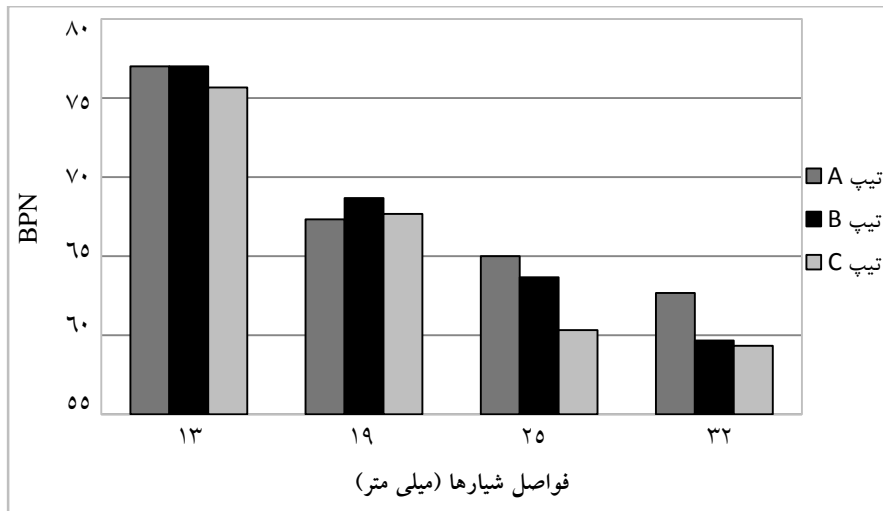
برای بررسی تأثیر فواصل شیارها بر مقاومت اصطکاکی سطوح بتنی، به ارزیابی رابطه بین مقادیر میانگین BPN (میانگین مقادیر BPN سه پهنای مختلف در هر فاصله که از جدول ۷ استخراج می‌گردند) و فواصل شیارها پرداخته شد. نحوه تغییرات بافت ریز و فواصل مختلف شیارهای عرضی و مورب و طولی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ و ۴ برای هر سه تیپ مخلوط آورده شده است. همچنین معادلات رگرسیون هر یک از سه تیپ، در جدول ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۹ دیده می‌شود با توجه به ضرایب همبستگی به‌دست آمده، روابط خطی مربوط به فواصل شیارها و مقادیر BPN قابل استناد می‌باشند. مشاهده

جدول ۷. میانگین مقادیر BPN در فواصل مختلف شیار برای هر سه زاویه و هر سه تیپ مخلوط

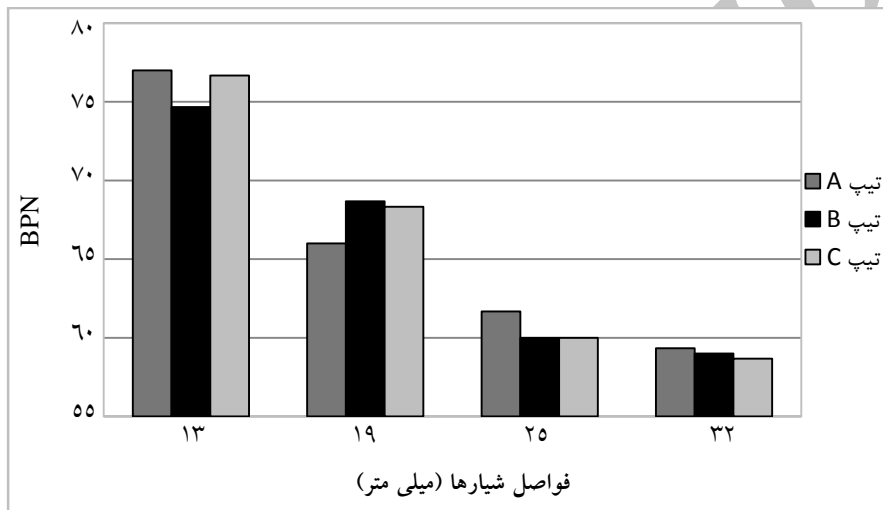
فواصل شیارها (میلی متر)	مقادیر BPN								
	مخلوط تیپ A			مخلوط تیپ B			مخلوط تیپ C		
	عرضی	مورب	طولی	عرضی	مورب	طولی	عرضی	مورب	طولی
۱۳	۷۷	۷۷	۷۰/۳۳	۷۷	۷۴/۶۷	۷۰/۳۳	۷۵/۶۷	۷۶/۶۷	۷۱
۱۹	۶۷/۳۳	۶۶	۶۵/۶۷	۶۸/۶۷	۶۸/۶۷	۶۳/۳۳	۶۷/۶۷	۶۸/۳۳	۶۲/۶۷
۲۵	۶۵	۶۱/۶۷	۵۸/۳۳	۶۳/۶۷	۶۰	۵۹/۶۷	۶۰/۳۳	۶۰	۷۰/۶۷
۳۲	۶۲/۶۷	۵۹/۳۳	۵۸/۳۳	۵۹/۶۷	۵۹	۵۸/۶۷	۵۹/۳۳	۵۸/۶۷	۵۷
میانگین BPN	۶۸	۶۶	۶۳/۱۷	۶۷/۲۵	۶۵/۵۸	۶۳	۶۵/۷۵	۶۵/۹۲	۶۲/۸۳

جدول ۸. میانگین مقادیر BPN در پهنای مختلف شیار برای هر سه زاویه و هر سه تیپ مخلوط

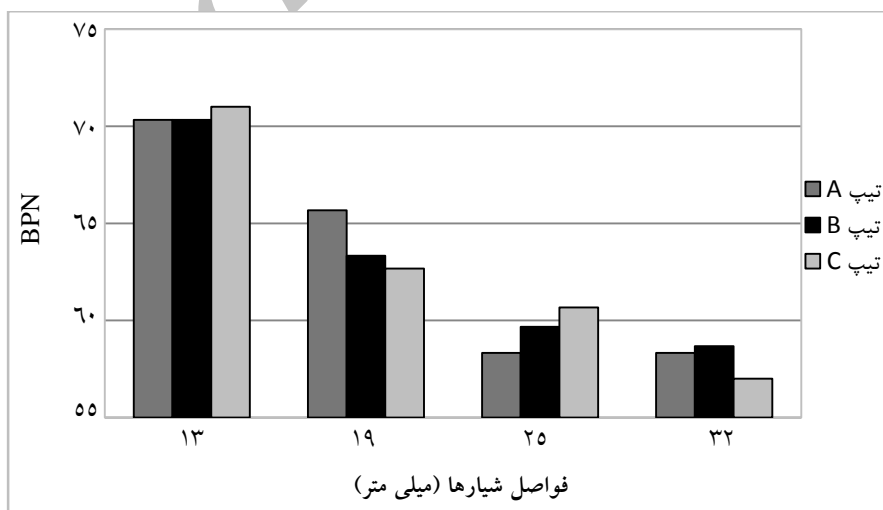
پهنای شیارها (میلی متر)	مقادیر BPN								
	مخلوط تیپ A			مخلوط تیپ B			مخلوط تیپ C		
	عرضی	مورب	طولی	عرضی	مورب	طولی	عرضی	مورب	طولی
۲/۵	۶۴/۲۵	۶۲	۵۹	۶۳/۷۵	۶۲/۲۵	۶۰	۶۲/۷۵	۶۱/۲۵	۶۰/۵۰
۳/۲	۶۶/۷۵	۶۷/۲۵	۶۲/۲۵	۶۵/۷۵	۶۴	۶۴	۶۳/۷۵	۶۷/۷۵	۶۲/۲۵
۳/۸	۷۳	۶۸/۷۵	۶۸/۲۵	۷۲/۲۵	۷۰/۵۰	۶۵	۷۰/۷۵	۶۸/۷۵	۶۵/۷۵
میانگین BPN	۶۸	۶۶	۶۳/۱۷	۶۷/۲۵	۶۵/۵۸	۶۳	۶۵/۷۵	۶۵/۹۲	۶۲/۸۳



شکل ۲. نحوه تغییرات بافت ریز و فواصل مختلف شیارهای عرضی برای هر سه تیپ مخلوط



شکل ۳. نحوه تغییرات بافت ریز و فواصل مختلف شیارهای مورب برای هر سه تیپ مخلوط



شکل ۴. نحوه تغییرات بافت ریز و فواصل مختلف شیارهای طولی برای هر سه تیپ مخلوط

جدول ۹. پارامترهای رگرسیونی رابطه بین فواصل شیارها (x) و BPN

	تیپ مخلوط	معادله رگرسیون	R ²
شیارهای عرضی	A	$BPN = -0.711x + 83.82$	0.845
	B	$BPN = -0.898x + 87.24$	0.958
	C	$BPN = -0.882x + 85.38$	0.897
شیارهای مورب	A	$BPN = -0.899x + 86.00$	0.871
	B	$BPN = -0.873x + 85.01$	0.910
	C	$BPN = -0.977x + 87.66$	0.908
شیارهای طولی	A	$BPN = -0.678x + 78.26$	0.876
	B	$BPN = -0.605x + 76.47$	0.869
	C	$BPN = -0.693x + 78.26$	0.906

جدول ۱۰. درصد تغییرات میانگین عدد آونگی به ازای افزایش فواصل شیارها

شیار طولی	شیار مورب	شیار عرضی	فواصل (میلی متر)
-	-	-	۱۳
٪ -۹/۴	٪ -۱۱/۱	٪ -۱۱/۳	۱۹
٪ -۶/۸	٪ -۱۰/۵	٪ -۷/۲	۲۵
٪ -۲/۶	٪ -۲/۶	٪ -۳/۹	۳۲

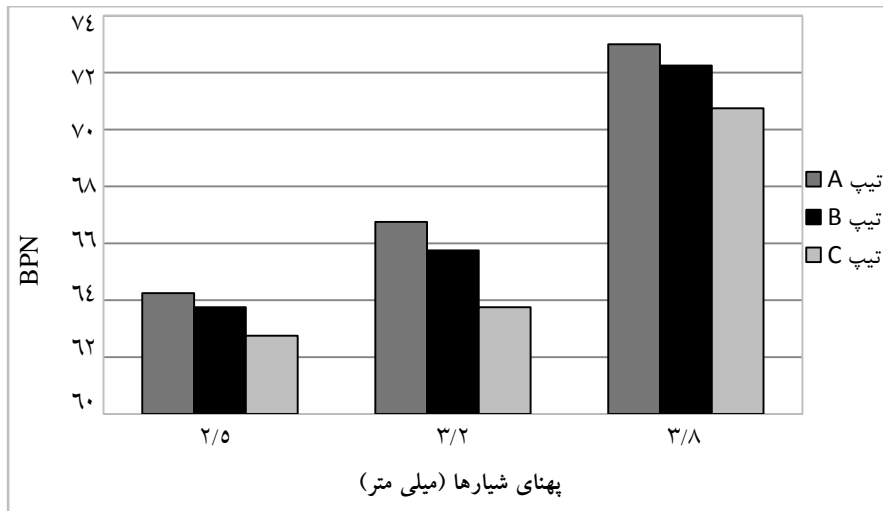
۴-۲- تأثیر پهنای شیارها بر عدد آونگی

جهت بررسی تأثیر پهنای شیارها بر مقاومت اصطکاکی سطح رویه بتنی، رابطه بین مقادیر میانگین BPN (میانگین مقادیر BPN چهار فاصله مختلف در هر پهنای شیار، که از جدول ۸ استخراج می‌شوند) و پهنای شیارها ارزیابی می‌گردد. روند تغییرات BPN و پهنای شیارها در مورب و طولی به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ و ۷ برای هر سه تیپ مخلوط آورده شده است. همچنین روابط رگرسیونی هر یک از سه تیپ، در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

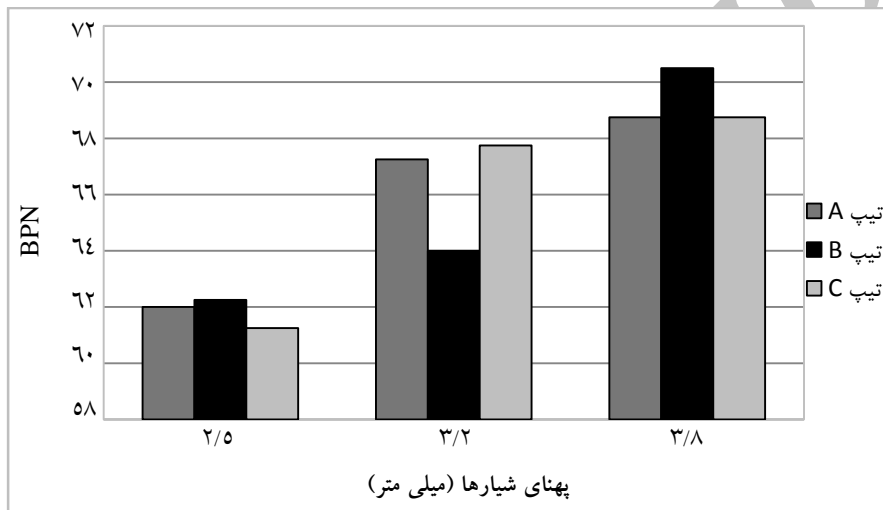
با توجه به جدول ۱۱ این مطلب قابل برداشت است که مقاومت اصطکاکی و افزایش پهنای شیارها، رابطه مستقیم با یکدیگر دارند و این به آن معنی است که به‌طور کلی با افزایش میزان پهنای

شیارها، مقاومت لغزندگی افزایش می‌یابد. از دلایل این امر می‌توان به موضوع تبدیل انرژی آونگ در حال حرکت اشاره کرد. هنگامی که آونگ در پایین‌ترین ارتفاع قرار دارد (یعنی زمان برخورد با سطح نمونه) انرژی جنبشی آن بیشینه می‌باشد و پس از عبور از روی سطح، تمایل دارد که انرژی جنبشی خود را به انرژی پتانسیل تبدیل کند، بنابراین، به سمت بالا ادامه حرکت می‌دهد. حال با ایجاد شیارها، بخشی از انرژی جنبشی، صرف مقابله با اثرات زبری حادث شده روی سطح خواهد شد که با پهن‌تر شدن این شیارها میزان افت انرژی بیشتر نیز می‌شود و در نتیجه اصطکاک بیشتری حاصل خواهد شد. درصد تغییرات میانگین عدد آونگی به‌ازای افزایش پهنای شیارها برای هر زاویه شیار در جدول ۱۲ آورده شده است.

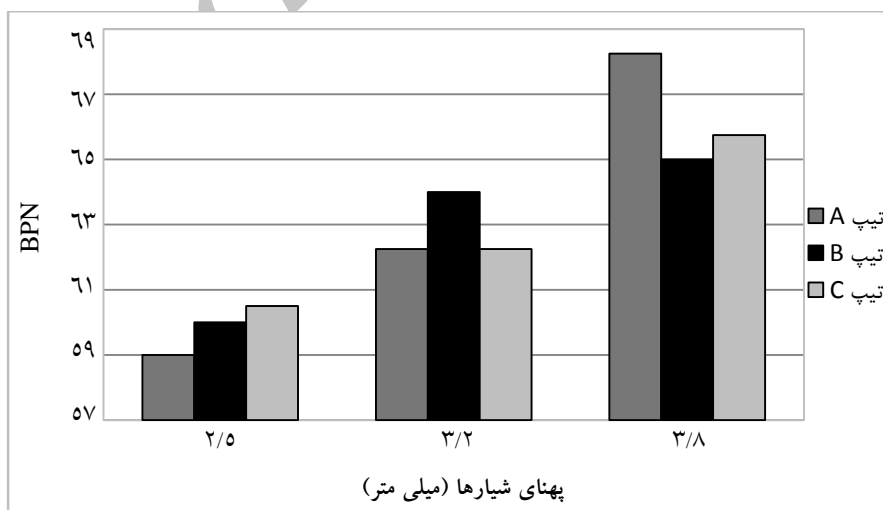
بررسی تأثیر دانه‌بندی و ایجاد بافت درشت به روش شیازدن ...



شکل ۵. نحوه تغییرات بافت ریز و پهنای مختلف شیارهای عرضی برای هر سه تیپ مخلوط



شکل ۶. نحوه تغییرات بافت ریز و پهنای مختلف شیارهای مورب برای هر سه تیپ مخلوط



شکل ۷. نحوه تغییرات بافت ریز و پهنای مختلف شیارهای طولی برای هر سه تیپ مخلوط

جدول ۱۱. پارامترهای رگرسیونی رابطه بین پهنای شیارها (x) و BPN

	تیپ مخلوط	معادله رگرسیون	R ²
شیارهای عرضی	A	$BPN = ۶/۶۴۳ x + ۴۶/۹۶$	۰/۹۱۹
	B	$BPN = ۶/۴۳۷ x + ۴۶/۸۶$	۰/۸۸۸
	C	$BPN = ۶/۰۲۳ x + ۴۶/۶۷$	۰/۸۰۸
شیارهای مورب	A	$BPN = ۵/۲۵۵ x + ۴۹/۳۵$	۰/۹۳۰
	B	$BPN = ۶/۲۴۰ x + ۴۵/۵۲$	۰/۸۷۲
	C	$BPN = ۵/۸۶۶ x + ۴۷/۳۴$	۰/۸۷۸
شیارهای طولی	A	$BPN = ۷/۰۴۷ x + ۴۰/۸۵$	۰/۹۵۴
	B	$BPN = ۳/۸۹۷ x + ۵۰/۶۵$	۰/۹۱۸
	C	$BPN = ۳/۹۹۶ x + ۵۰/۱۷$	۰/۹۴۶

جدول ۱۲. درصد تغییرات میانگین عدد آونگی به ازای افزایش پهنای شیارها

پهنای (میلی متر)	شیار عرضی	شیار مورب	شیار طولی
۲/۵	-	-	-
۳/۲	٪ ۲/۹	٪ ۷/۳	٪ ۵/۰
۳/۸	٪ ۱۰/۱	٪ ۴/۵	٪ ۵/۶

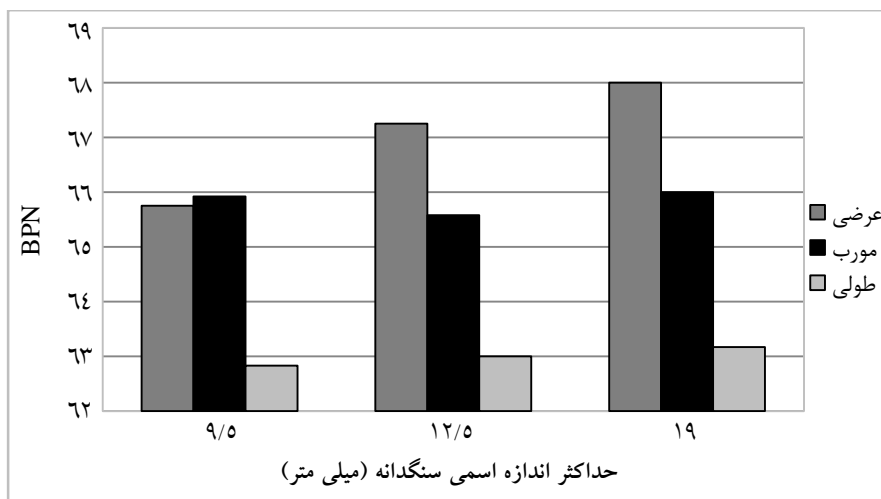
سنگدانه‌ها رابطه مستقیم دارد و با درشت شدن سنگدانه‌های بتن، مقادیر BPN افزایش یافته‌اند، اما این رابطه اثر زیادی بر تغییر مقاومت اصطکاکی سطح ندارد. چراکه میزان تغییرات، اندک بوده و بنابراین، مقدار BPN با تغییر اندازه سنگدانه‌ها، تغییر چشمگیری نخواهد کرد.

این امر به این دلیل است که با ایجاد شیار روی سطح بتن، بافت درشت مناسبی به وجود می‌آید و در نتیجه تغییر اصطکاک ناشی از تغییر در نوع دانه‌بندی، در مقایسه با اصطکاک ایجاد شده توسط شیارها به قدری ناچیز است که قابل چشم‌پوشی است. یعنی با مؤثر واقع شدن شیارها، اثر درشت‌دانه یا ریزدانه بودن سنگدانه‌های مخلوط بتنی کم اثر شده است و مقاومت لغزندگی تولید شده، به طور عمده تحت تأثیر شیارها قرار گرفته است.

۴-۳- تأثیر حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها بر عدد آونگی

جهت بررسی تأثیر بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها و نوع دانه‌بندی (تیپ مخلوط بتنی) بر مقاومت لغزشی نمونه‌های بتنی شیاردار، به ارزیابی رابطه بین مقادیر میانگین کل BPN (میانگین کل مقادیر مربوط به هر تیپ مخلوط که در چهار فاصله و سه پهنای مختلف به دست آمده و از ردیف آخر جداول ۷ و ۸ استخراج می‌گردند) و NMSA اقدام شد. چگونگی تغییرات بافت ریز و NMSA برای هر سه زاویه شیار در شکل ۸ و روابط رگرسیونی آنها، در جدول ۱۳ آورده شده است.

درصد تغییرات میانگین عدد آونگی به ازای افزایش NMSA برای هر زاویه شیار در جدول ۱۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگرچه مقاومت لغزندگی با حداکثر اندازه اسمی



شکل ۸. روند تغییرات BPN و بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها برای هر سه زاویه شیاردن

جدول ۱۳. پارامترهای رگرسیونی رابطه بین بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها (x) و BPN

	معادله رگرسیون	R ²
شیاردن عرضی	$BPN = 0.217x + 64.03$	0.848
شیاردن مورب	$BPN = 0.017x + 65.59$	0.151
شیاردن طولی	$BPN = 0.034x + 62.53$	0.956

جدول ۱۴. درصد تغییرات میانگین عدد آونگی به‌ازای افزایش بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها

NMSA(mm)	شیاردن عرضی	شیاردن مورب	شیاردن طولی
۹/۵	-	-	-
۱۲/۵	٪ ۲/۳	٪ -۰/۵	٪ ۰/۳
۱۹	٪ ۱/۱	٪ ۰/۶	٪ ۰/۳

مشاهده می‌شود که زوایای شیارها با مقاومت لغزندگی رابطه معناداری دارند. به این ترتیب که با تغییر زاویه شیارها از عرضی به مورب و سپس از مورب به طولی و در ادامه از عرضی به طولی، میانگین اعداد آونگی، به ترتیب به میزان ۱/۲ واحد (برابر با ۱/۷۵ درصد) و ۲/۸ واحد (برابر با ۴/۳ درصد) و ۴/۰ واحد (برابر با ۶/۰ درصد) کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر با افزایش زاویه مابین راستای شیارها و امتداد حرکت بازوی آونگ، مقادیر BPN افزایش یافته‌اند. دلیل این مسئله، این است که در مورد شیارهای عرضی، کفشک لاستیکی پس از عبور از روی هر شیار، به لبه شیار بعدی برخورد می‌کند. برخورد با لبه شیار باعث از دست رفتن انرژی بیشتری نسبت به حالت شیاردن طولی می‌گردد، بنابراین، مقدار BPN بیشتری خوانده می‌شود.

۴-۴- بررسی تأثیر زاویه شیاردن بر مقاومت لغزندگی

در این پژوهش، شیارها در سه راستای عرضی، مورب و طولی مورد آزمایش پاندول انگلیسی قرار گرفتند. جهت بررسی تأثیر زاویه شیارها بر مقاومت اصطکاکی سطح رویه، به ارزیابی رابطه بین مقادیر میانگین BPN (میانگین مقادیر BPN سه مخلوط مختلف در هر زاویه شیاردن) و زاویه شیارها پرداخته شد. به همین منظور طبق جدول ۱۵ داده‌های لازم میانگین‌گیری شده‌اند و رگرسیون خطی بین بافت ریز (BPN) و زاویه شیارها (x)، در رابطه ۲ نشان داده شده است.

$$BPN = -0.042x + 66.73, R^2 = 0.979 \quad (2)$$

۵- نتایج آزمایش پخش ماسه و تحلیل نتایج

به منظور بررسی تأثیر فواصل بین شیارها، پهناهای شیارها و نوع دانه بندی سنگدانه‌ها بر عمق بافت درشت (MTD)، آزمایش پخش ماسه روی نمونه‌های ساخته شده صورت پذیرفت که نتایج حاصل از آن در جدول ۱۶ آورده شده است و در ادامه به تحلیل و تفسیر این نتایج پرداخته شده است. گفتنی است که انجام آزمایش پخش ماسه، روی نمونه‌های بتنی بدون بافت درشت (سطح صاف) به دلیل ناچیز بودن عمق بافت، مقدور نمی‌باشد، بنابراین، می‌توان مقدار MTD مربوط به این نمونه‌ها را برابر با

صفر در نظر گرفت. مقادیر MTD موجود در جدول ۱۶ باید به منظور مقایسه تأثیر عواملی مانند فواصل و پهناهای شیارها و NMSA بر عمق بافت درشت، طوری میانگین‌گیری شوند که بتوان مقادیر لازم برای محاسبه پارامترهای رگرسیونی را به دست آورد.

بنابراین، در جداول ۱۷ و ۱۸ میانگین MTD های مربوط به هر سه تیپ مخلوط، به ترتیب برای فواصل و پهناهای مختلف شیارها آورده شده‌اند و برای محاسبه معادلات رگرسیون، از این مقادیر میانگین استفاده شده است.

جدول ۱۵. نحوه تغییرات بافت ریز و زوایای مختلف شیارها

درصد	BPN	زاویه (درجه)	
-	۶۷	۰	شیار عرضی
۱/۷٪	۶۵/۸۳	۱۴	شیار مورب
۴/۳٪	۶۳	۹۰	شیار طولی

جدول ۱۶. نتایج آزمایش پخش ماسه بر روی نمونه‌های بتنی

پهنای شیارها (میلی‌متر)	فواصل شیارها (میلی‌متر)	مقادیر عمق بافت درشت (میلی‌متر)		
		تیپ A	تیپ B	تیپ C
۲/۵	۱۳	۰/۸۶	۰/۹۳	۰/۸۲
	۱۹	۰/۸۰	۰/۶۷	۰/۷۶
	۲۵	۰/۴۷	۰/۵۱	۰/۵۹
	۳۲	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۴۷
۳/۲	۱۳	۱/۱۷	۱/۱۲	۰/۹۹
	۱۹	۰/۹۰	۰/۷۲	۰/۸۸
	۲۵	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۶۰
	۳۲	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۴
۳/۸	۱۳	۱/۲۶	۱/۴۰	۱/۲۳
	۱۹	۱/۰۸	۰/۹۶	۱/۰۳
	۲۵	۰/۷۱	۰/۸۳	۰/۸۰
	۳۲	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۷۰

جدول ۱۷. میانگین مقادیر MTD در فواصل مختلف شیار برای هر سه تیپ مخلوط

فواصل شیارها (میلی متر)	مقادیر MTD (میلی متر)		
	تیپ A	تیپ B	تیپ C
۱۳	۱/۰۹۷	۱/۱۵۰	۱/۰۱۳
۱۹	۰/۹۲۷	۰/۷۸۳	۰/۸۹۰
۲۵	۰/۶۲۳	۰/۶۵۰	۰/۶۶۳
۳۲	۰/۵۵۰	۰/۵۷۰	۰/۵۷۰
میانگین MTD	۰/۷۹۹	۰/۷۸۸	۰/۷۸۴

جدول ۱۸. میانگین مقادیر MTD در پهناهای مختلف شیار برای هر سه تیپ مخلوط

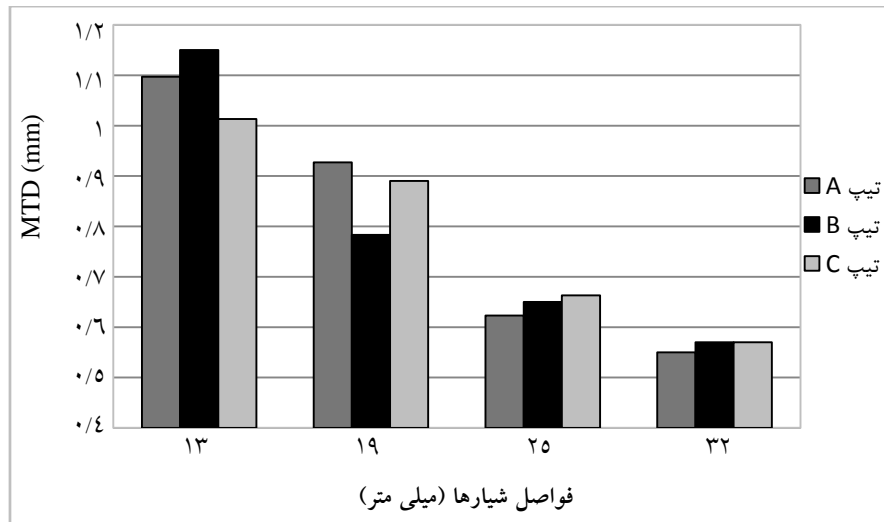
پهنای شیارها (میلی متر)	مقادیر MTD (میلی متر)		
	تیپ A	تیپ B	تیپ C
۲/۵	۰/۶۴۵	۰/۶۵۰	۰/۶۶۰
۳/۲	۰/۸۳۲	۰/۷۵۷	۰/۷۵۲
۳/۸	۰/۹۲۰	۰/۹۵۷	۰/۹۴۰
میانگین MTD	۰/۷۹۹	۰/۷۸۸	۰/۷۸۴

۵-۱- تأثیر فواصل شیارها بر عمق بافت درشت

جهت بررسی تأثیر فواصل شیارها بر عمق بافت درشت، رابطه بین مقادیر میانگین MTD (میانگین مقادیر MTD سه پهناهای مختلف در هر فاصله، که از جدول ۱۷ استخراج می‌گردند) و فواصل شیارها ارزیابی شد. نحوه تغییرات عمق بافت درشت و فواصل مختلف شیارها در شکل ۹ و روابط رگرسیون برای هر سه تیپ، در جدول ۱۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش فواصل شیارها با عمق بافت درشت رابطه معکوس دارد. به این ترتیب که با افزایش فاصله شیارها از ۱۳ به ۱۹ میلی‌متر و سپس از ۱۹ به ۲۵ میلی‌متر و در ادامه از ۲۵ به ۳۲ میلی‌متر، میانگین عمق بافت درشت به ترتیب به میزان ۰/۲۲۰ میلی‌متر (برابر با ۲۰/۲ درصد) و ۰/۲۲۱ میلی‌متر (برابر با ۲۵/۵ درصد) و ۰/۰۸۲ میلی‌متر (برابر با ۱۲/۷ درصد) کاهش

می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش تعداد شیارهایی که توسط ماسه پر می‌شوند، عمق بافت درشت افزایش می‌یابد. آشکار است که دلیل این امر، افزایش حجم ماسه مورد استفاده در سطح ثابت نمونه می‌باشد.

همچنین مطالعات میدانی (Hall, Smith, and Littleton, 2009) نشان می‌دهند که با تغییر فاصله شیارها از ۱۳ تا ۳۲ میلی‌متر، میانگین عمق بافت درشت از ۱/۲۲۶ تا ۰/۶۶۳ میلی‌متر تغییر می‌نماید. به طوری که با زیاد شدن فواصل بین شیارها در سه گام افزایشی یاد شده در بالا، میانگین عمق بافت درشت، به ترتیب به میزان ۲۳/۷، ۱۹/۳ و ۱۴/۲ درصد کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از مطالعات میدانی، هماهنگی قابل توجهی با نتایج حاصل از آزمایشات مربوط به نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق دارد.



شکل ۹. نحوه تغییرات عمق بافت درشت و فواصل مختلف شیارها برای هر سه تیپ مخلوط

جدول ۱۹. پارامترهای رگرسیونی رابطه بین فواصل شیارها (x) و MTD

تیپ مخلوط	معادله رگرسیون	R ²
A	$MTD = -0.030x + 1.479$	0.940
B	$MTD = -0.029x + 1.441$	0.867
C	$MTD = -0.024x + 1.330$	0.966

درشت به ترتیب به میزان ۰/۱۲۹ میلی متر (برابر با ۱۹/۷ درصد) و ۰/۱۵۹ میلی متر (برابر با ۲۰/۳ درصد) افزایش می یابد. یعنی با افزایش پهناهای شیارهایی که توسط ماسه پر می شوند، عمق بافت درشت افزایش می یابد.

همچنین مطالعات میدانی (Hall, Smith, and Littleton, 2009) نشان می دهند که با تغییر پهناهای شیارها از ۲/۵ تا ۳/۸ میلی متر، میانگین عمق بافت درشت از ۰/۶۵۶ تا ۱/۰۲۳ میلی متر تغییر می کند.

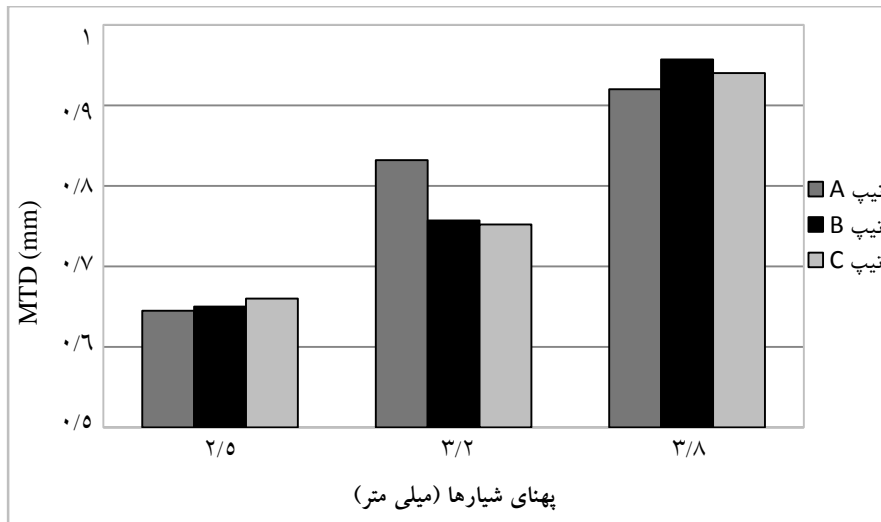
به این ترتیب که با زیاد شدن پهناهای شیارها در دو گام افزایشی نام برده، میانگین عمق بافت درشت، به ترتیب به میزان ۲۲/۶ و ۱۷/۲ درصد افزایش می یابد. مشاهده می شود که نتایج به دست آمده از مطالعات میدانی، هماهنگی قابل ملاحظه ای با نتایج حاصل از آزمایشات مربوط به نمونه های ساخته شده در این پژوهش دارد.

۵-۲- تأثیر پهناهای شیارها بر عمق بافت درشت

جهت بررسی تأثیر پهناهای شیارها بر عمق بافت درشت، رابطه بین مقادیر میانگین MTD (میانگین مقادیر MTD چهار فاصله مختلف در هر پهنا، که از جدول ۱۸ استخراج می گردند) و پهناهای شیارها مورد ارزیابی قرار گرفت. چگونگی تغییرات عمق بافت درشت و پهناهای مختلف شیارها در شکل ۱۰ و نمودار رگرسیون سه تیپ نیز، در جدول ۲۰ آورده شده است.

همان طور که در جدول ۲۰ دیده می شود با توجه به ضرایب همبستگی به دست آمده، روابط خطی مربوط به پهناهای شیارها و مقادیر MTD روند قابل قبولی داشته و مناسب می باشند. ضمناً مشاهده می شود که پهناهای شیارها با عمق بافت درشت رابطه مستقیم دارد.

به این صورت که با افزایش پهناهای این شیارها از ۲/۵ به ۳/۲ میلی متر و سپس از ۳/۲ به ۳/۸ میلی متر، میانگین عمق بافت



شکل ۱۰. نحوه تغییرات عمق بافت درشت و پهنای مختلف شیارها برای هر سه تیپ مخلوط

جدول ۲۰. پارامترهای رگرسیونی رابطه بین پهنای شیارها (x) و MTD

تیپ مخلوط	معادله رگرسیون	R ²
A	$MTD = 0.213x + 0.124$	0.973
B	$MTD = 0.234x + 0.046$	0.953
C	$MTD = 0.213x + 0.109$	0.944

عمق بافت سطحی ندارد. این امر به این دلیل است که با شیاردن روی سطح بتن، بافت درشت نسبتاً عمیقی حادث می‌شود و در نتیجه اثرات ناچیز ناشی از تغییر اندازه سنگدانه‌ها بر MTD را محو می‌نماید. در واقع تغییر عمق بافت درشت ناشی از تغییر در دانه‌بندی، در مقایسه با عمق بافت ایجاد شده توسط شیارها به قدری اندک می‌باشند که قابل چشم پوشی هستند.

همچنین مطالعات میدانی (Hall, Smith, and Littleton, 2009) نشان می‌دهند که با تغییر حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها از ۹/۵ تا ۱۹ میلی‌متر، میانگین عمق بافت درشت از ۰/۸۳۷ تا ۰/۸۵۶ میلی‌متر تغییر می‌نماید. به این صورت که با زیاد شدن حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها در دو گام افزایشی فوق‌الذکر، میانگین عمق بافت درشت، به ترتیب به میزان ۲/۳ و ۰/۹- درصد تغییر می‌کند. ملاحظه می‌شود که نتایج به دست آمده از مطالعات میدانی، بیانگر رابطه یکنواختی در ارتباط با اثر NMSA بر عمق بافت درشت نمی‌باشد. اما می‌توان بر این امر صحه گذاشت که وابستگی قابل توجهی بین MTD و اندازه سنگدانه‌های مخلوط بتنی وجود ندارد.

۳-۵- تأثیر بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها بر عمق

بافت درشت

جهت بررسی تأثیر NMSA و نوع دانه‌بندی بر عمق بافت درشت بتن شیاردار، به ارزیابی رابطه بین مقادیر میانگین کل MTD (میانگین کل مقادیر مربوط به هر تیپ مخلوط که در چهار فاصله و سه پهنای مختلف به دست آمده و از ردیف آخر جداول ۱۷ و ۱۸ استخراج می‌گردند) و NMSA پرداخته شد. معادله رگرسیونی بافت درشت (MTD) و حداکثر اندازه اسمی سنگدانه (x) طبق رابطه ۳ به دست آمده است.

$$MTD = 0.002x + 0.769, R^2 = 0.997 \quad (3)$$

با افزایش حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها از ۹/۵ به ۱۲/۵ میلی‌متر و سپس از ۱۲/۵ به ۱۹ میلی‌متر، میانگین عمق بافت درشت به ترتیب به میزان ۰/۰۰۴ میلی‌متر (برابر با ۰/۵ درصد) و ۰/۰۱۱ میلی‌متر (برابر با ۱/۴ درصد) افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگرچه MTD با بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها رابطه مستقیم دارد و با درشت شدن دانه‌بندی مخلوط بتنی، مقادیر آن افزایش یافته‌اند، اما این رابطه اثر زیادی بر تغییر

۶- نتیجه گیری

پس از آن از ۱۲/۵ میلی متر به ۱۹ میلی متر، به ترتیب به اندازه ۷/۱ و ۴/۴ درصد به عدد آونگی افزوده شده است.

۵. مشاهده می شود که زوایای شیارها با مقاومت لغزندگی رابطه معناداری دارند. به این ترتیب که با افزایش زاویه مابین راستای شیارها و امتداد حرکت بازوی آونگ، مقادیر BPN افزایش می یابند. در حقیقت بیشترین میزان اصطکاک زمانی حاصل خواهد شد که راستای شیارها بر امتداد حرکت جریان ترافیک عمود باشد.

۶. با مقایسه شدت اثر تغییر فواصل و پهنا و زاویه شیارها و اندازه سنگدانه ها بر عدد آونگی، باید گفت که تغییر در فواصل شیارها بیشترین اثر بر تغییر میزان اصطکاک را دارد و پس از آن تغییر در پهنای شیارها و سپس تغییر زاویه شیار و سرانجام تغییر اندازه دانه های مخلوط بر مقاومت لغزندگی مؤثر خواهند بود. با توجه به تأثیر ناچیز اندازه سنگدانه ها و نوع دانه بندی بر مقاومت اصطکاک و با توجه به این که برای پروژه های روسازی بتنی، مقاومت فشاری بتن از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است، می توان نتیجه گرفت که استفاده از مخلوط بتنی تیپ دو و سه با توجه به استحکام بالاتر، گزینه های مناسبی می باشند.

۷. در ارتباط با تأثیر چهار عامل فاصله و پهنا و اندازه سنگدانه ها و زاویه شیارها بر عدد آونگی، باید خاطر نشان کرد که تغییرات خطی هیچ یک از این عوامل موجب تغییرات خطی عدد آونگی نخواهد شد. یعنی در صورتی که هر یک از این عوامل، در گام های ثابت و مشخصی افزایش یا کاهش یابند؛ عدد آونگی در گام های ثابت تغییر نخواهد کرد. بنابراین، لازم است تا با دقت نظر در امر بهینه یابی، بتوان بافت درشت سطح روسازی را به گونه ای طراحی کرد که الزامات مربوط به آلاینده گی صوتی و کیفیت سواری خودروها نیز مد نظر قرار گیرد. به طور مثال اگر با افزایش پهنای شیارها از ۲/۵ به ۳/۲ میلی متر، میزان اصطکاک افزایش قابل توجهی دارد، اما با افزایش پهنا از ۳/۲ به ۳/۸ میلی متر، این میزان چندان بیشتر نمی شود؛ می توان با استفاده از پهنای ۳/۲ میلی متر، موجبات کاهش آلودگی صوتی را فراهم آورد.

۸. برای نمونه های شیاردار، روند تغییرات عمق بافت نسبت به فواصل شیارها، بیانگر رابطه معکوس بین این دو است. با

با نگاه کلی به آنچه که در شرایط مفروض در این تحقیق مورد کنکاش قرار گرفت، می توان نتایج زیر را استنتاج نمود:

۱. با دقت در مقادیر عدد آونگی مربوط به نمونه های بتنی بدون بافت درشت و دارای سطح کاملاً صاف، مشاهده می شود که این مقادیر از حداقل مقادیر لازم ذکر شده توسط آیین نامه TRRL، کمتر بوده و به هیچ عنوان نمی توانند ایمنی کافی مسیر را تأمین کنند. این مسئله، بیانگر این حقیقت است که در مورد روسازی های بتنی، حتماً باید از روش های مربوط به ایجاد بافت درشت استفاده کرد.

۲. با بررسی روند تغییر عدد آونگی نسبت به فواصل شیارها، این مطلب قابل برداشت است که فواصل شیارها با مقاومت لغزندگی رابطه معکوس دارند. یعنی با افزایش فواصل، از مقدار عدد آونگی کاسته می شود. با میانگین گیری از درصد تغییرات، می توان گفت که با افزایش فواصل در مورد شیارهای عرضی و مورب و طولی به ترتیب، به میزان ۷/۵ و ۸/۱ و ۶/۳ درصد از عدد آونگی کم می شود.

۳. چگونگی تغییرات عدد آونگی نسبت به تغییرات پهنای شیارها، مؤید این موضوع است که به طور کلی، مقاومت اصطکاک و افزایش پهنای شیارها، رابطه مستقیم با یکدیگر دارند و با افزایش پهنا، مقدار عدد آونگی بیشتر می گردد. با میانگین گیری از درصد تغییرات، مشاهده می شود که افزایش پهنای شیارها موجب افزایش عدد آونگی به میزان ۶/۵ و ۵/۹ و ۵/۳ درصد، به ترتیب برای شیارهای عرضی و مورب و طولی خواهد شد.

۴. با دقت در روند تغییرات عدد آونگی نسبت به تغییرات حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ها در نمونه های شیاردار، می توان ادعا کرد که رابطه مستقیم بین این دو وجود دارد. محاسبه میانگین درصد تغییرات، نشانگر افزایش عدد آونگی به میزان ۱/۷ و ۰/۱۰۵ و ۰/۳ درصد، به ترتیب برای شیارهای عرضی و مورب و طولی می باشد. قابل ذکر است که برای نمونه های بدون بافت (سطح صاف)، اندازه سنگدانه ها، تنها عامل اثرگذار بر عدد آونگی می باشد که با افزایش حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ها از ۹/۵ میلی متر به ۱۲/۵ میلی متر و

13. Saturated Surface Dry Aggregate
14. British Pendulum Tester
15. Sand Patch Method
16. Microtexture
17. British Pendulum Number
18. Mean Texture Depth
19. Transport and Road Research Laboratory

۸- مراجع

- جان محمدی، الف. (۱۳۸۸) "بررسی تأثیر شیارهای با عمق متغیر بر مقاومت لغزشی سطح رویه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- حسنی، الف. (۱۳۸۴) "بررسی و مقایسه فنی و اقتصادی رویه‌های بتنی و آسفالتی"، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و شهرسازی، چاپ دوم، زمستان ۱۳۸۴.
- سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور (۱۳۸۸) "سالنامه آماری حمل و نقل جاده‌ای"، دفتر فناوری اطلاعات.
- طاری بخش، م. (۱۳۹۰) "بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت لغزندگی روسازی‌های بتنی راه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
- AASHTO: M80 (2003) "Standard specification for coarse aggregate for Portland cement concrete", American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, D.C., United States.
- ACI: 211.1 (1997) "Standard practice for selecting proportions for normal heavyweight, and mass concrete", Reported by ACI Committee 211.
- Ardani, A. (2006) "Implementation of proven PCCP practices in Colorado", Colorado Department of Transportation, Report No. CDOT-DTD-R-2006-9.
- ASTM: C29 (2007) "Test method for bulk density (unit weight) and void in aggregate", Book of ASTM Standards, Vol. 04.02: Concrete and

- میانگین‌گیری از درصد تغییرات، باید گفت که با افزایش فواصل به میزان ۱۹/۵ درصد از عمق بافت کم می‌شود.
۹. چگونگی تغییرات عمق بافت درشت نسبت به تغییرات پهنای شیارها، بیانگر رابطه مستقیم بین این دو است. با میانگین‌گیری از درصد تغییرات، مشاهده می‌شود که افزایش پهنای شیارها موجب افزایش عمق بافت به میزان ۲۰/۰ درصد، خواهد شد.
۱۰. با دقت در روند تغییر عمق بافت درشت نسبت به تغییرات حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها در نمونه‌های بتنی شیاردار، باید گفت که رابطه مستقیم بین این دو وجود دارد. محاسبه میانگین درصد تغییرات، نشانگر افزایش عمق بافت درشت به میزان ۱/۰ درصد می‌باشد. در ضمن انجام آزمایش پخش ماسه، روی نمونه‌های بتنی بدون بافت درشت (سطح صاف) به دلیل ناچیز بودن عمق بافت، مقذور نیست، بنابراین، می‌توان مقدار MTD مربوط به این نمونه‌ها را برابر با صفر در نظر گرفت.
۱۱. با مقایسه شدت اثر تغییر فواصل و پهنای شیارها و اندازه سنگدانه‌ها بر عمق بافت، باید گفت که تغییر در فواصل و پهنای شیارها تأثیر یکسانی بر تغییر عمق بافت درشت دارند و تغییر اندازه دانه‌های مخلوط بر عمق بافت درشت اثر چندانی ندارد.
۱۲. با مقایسه میانگین مقادیر عدد آونگی مربوط به روش شیارزنی و حداقل مقادیر BPN ذکر شده توسط آیین‌نامه TRRL، باید ادعا کرد که استفاده از شیارها گزینه مناسبی برای تأمین ایمنی مسیرهای بتنی می‌باشند.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Macrotexture
2. Tinning
3. Forming the Fresh Concrete
4. Retexturing
5. Surface Finishing Method
6. Surface Texturing Method
7. Hydroplaning
8. National Aeronautics and Space Administration
9. Friction Number
10. Maximum Sound Level
11. International Roughness Index
12. Nominal Maximum Size of Aggregate

- technique", Book of ASTM Standards, Vol. 04.03: Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, ASTM International, West Conshohocken, United States.
- Chambers, J. R. (2003) "Concept to reality: Contributions of the NASA Langley research center to U.S. civil aircraft of the 1990s", NASA sp-2003-4529.
 - Fwa, T. F. and Ong, G. P. (2006) "Transverse pavement grooving against hydroplaning. II: Design", Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 6, pp. 449-457.
 - Hall, J. W., Smith, K. L. and Littleton, P. (2009) "Texturing of concrete pavements", NCHRP Project 10-67, Report 634.
 - Hosking, J. R. (1992) "Road aggregate and skidding", Transport Research Laboratory, Department of Transport, State-of-Art, Review 4, HMSO, London.
 - Lee, Y. P. K., Fwa, T. F. and Choo, Y. S. (2003) "Skid resistance evaluation of concrete pavement surfaces", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, pp. 972-984.
 - Ong, G. P. and Fwa, T. F. (2006) "Transverse pavement grooving against hydroplaning. I: Simulation model", Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 6, pp. 441-448.
 - Reiter, D., Bowlby, W. and Herman, L. (2004) "Traffic noise in Montana: Community awareness and recommendations for a rural state", Montana Department of Transportation, Report No. FHWA/MT-04-007/8172.
 - Robinson, R., Danielson, N. and Snaith, M. (1998) "Road maintenance management: Concepts and systems", First Published by Macmillan, U.K.
 - Shaffer, S. J., Christiaen, A. C. and Rogers, M. J. (2006) "Assessment of friction-based pavement methods and regulations", National Transportation Research Center, Heavy Vehicle Research Center, TASK2003E1.
 - TRRL (1969) "Instructions for using the portable skid resistance tester", Road Note 27, Transport and Road Research Laboratory HMSO.
- Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, United States.
- ASTM: C33 (2007) "Specification for concrete aggregates", Book of ASTM Standards, Vol. 04.02: Concrete and Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, United States.
 - ASTM: C39 (2007) "Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", Book of ASTM Standards, Vol. 04.02: Concrete and Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, United States.
 - ASTM: C127 (2007) "Test method for density, relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate", Book of ASTM Standards, Vol. 04.02: Concrete and Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, United States.
 - ASTM: C128 (2007) "Test method for density, relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate", Book of ASTM Standards, Vol. 04.02: Concrete and Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, United States.
 - ASTM: C131 (2007) "Test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine", Book of ASTM Standards, Vol. 04.02: Concrete and Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, United States.
 - ASTM: C188 (2007) "Test method for density of hydraulic cement", Book of ASTM Standards, Vol. 04.01: Cement; Lime; Gypsum, ASTM International, West Conshohocken, United States.
 - ASTM: D5821 (2007) "Test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate", Book of ASTM Standards, Vol. 04.03: Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, ASTM International, West Conshohocken, United States.
 - ASTM: E303 (2007) "Test method for measuring surface frictional properties using the British Pendulum Tester", Book of ASTM Standards, Vol. 04.03: Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, ASTM International, West Conshohocken, United States.
 - ASTM: E965 (2007) "Test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric