

بررسی وقوع هیدروپلنینگ بر سطح روسازی راه با ارائه یک دستگاه جدید آزمایشگاهی

سیدمحمدحسین دهناد، استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم

Email: m.dehnad@qom.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

چکیده

یکی از عوامل مهم در ایمنی راه‌ها، اصطکاک بین چرخ وسیله نقلیه و رویه راه است، به طوری که راننده بتواند در صورت لزوم در فاصله‌ای مطمئن وسیله نقلیه خود را متوقف و یا کنترل نماید تا منجر به وقوع تصادف نگردد. وجود رطوبت در سطح روسازی موجب کاهش مقاومت لغزندگی رویه راه شده و با افزایش ضخامت آب و سرعت خودرو، باعث بروز پدیده هیدروپلنینگ می‌گردد. در این مطالعه، با ارائه شیوه‌ای جدید، دستگاهی آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است که می‌تواند وقوع این پدیده را با تمرکز بر تأثیر سطوح مختلف روسازی، شبیه‌سازی نماید. عدم تناسب بین جابجایی طولی خودرو و میزان دور چرخ و تبدیل شدن بخشی از غلتش به لغزش به عنوان یک اصل مهم در طراحی این دستگاه در نظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی این پدیده، انواع مختلف مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی متفاوت ساخته شده و مقادیر متوسط عمق بافت اندازه‌گیری شده است. سپس در فرکانس‌های مختلف، با استفاده از دستگاه ساخته شده، در شرایط خشک و مرطوب بودن سطح روسازی، مورد آزمون هیدروپلنینگ قرار گرفته‌اند. با مقایسه نتایج اخذ شده از دستگاه پیشنهادی با مدل‌های تجربی رایج برای پیش‌بینی سرعت هیدروپلنینگ، مشخص گردید که این دستگاه می‌تواند به عنوان ابزار مناسبی برای بررسی اثرات عوامل مؤثر بر این پدیده به کار گرفته شود. نتایج نشان داد که افزایش دو و سه برابری بازه ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر مرتبط با میانگین عمق بافت روسازی، به ترتیب باعث افزایش ۸ و ۱۷ درصدی در سرعت آستانه هیدروپلنینگ می‌شود. همچنین، مشاهده شد که در مخلوط با دانه‌بندی متراکم، افزایش متوسط عمق بافت از ۰/۵ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر، باعث تأخیر ۲۲ درصدی در وقوع هیدروپلنینگ می‌شود.

واژه‌های کلیدی: هیدروپلنینگ، ایمنی راه، بافت روسازی، مخلوط آسفالتی، دستگاه تست هیدروپلنینگ

۱. مقدمه

زمانی که سطح راه در معرض بارندگی قرار می‌گیرد، قشر نازکی از آب به ضخامت چند میکرون تا چند میلی‌متر روی روسازی راه ایجاد می‌گردد. آب مشابه یک روان‌کننده عمل نموده و منجر به کاهش مقاومت لغزندگی سطح راه می‌شود. افت میزان مقاومت لغزندگی، شرایط خطرناکی را برای وسایل نقلیه ایجاد می‌کند. از طرفی، بافت درشت روسازی به‌عنوان مهمترین عامل مؤثر بر مقاومت لغزندگی، نمایانگر قابلیت زهکشی در مقیاس ریزسطح روسازی است؛ به‌گونه‌ای که برآمدگی‌های موجود روی سطح راه و فاصله بین سنگدانه‌های درشت، موجب کاهش ضخامت قشر نازک آب تشکیل شده بین روسازی و چرخ می‌شود. از طرف دیگر، ترافیک عبوری روی راه، بافت درشت روسازی را به تدریج کاهش داده و در سرعت‌های زیاد و بارش‌های شدید، آج لاستیک به تنهایی توانایی پراکندگی آب جمع شده بین لاستیک و روسازی را ندارد. همین امر، موجب می‌شود لایه‌ای از آب بین لاستیک و روسازی قرار گیرد و تماس بین لاستیک و روسازی را از بین ببرد و چرخ روی فیلمی از آب سُر بخورد. این پدیده را هیدروپلنینگ نام‌گذاری می‌کنند و آن را متأثر از عوامل متعددی مرتبط با چرخ خودرو، سیال و سطح روسازی می‌دانند. در هنگام وقوع این پدیده، کنترل فرمان خودرو و توانایی چرخ‌ها در ترمز کردن و یا حرکت در پیچ‌ها، به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و احتمال وقوع تصادف به‌طور قابل توجهی بالا می‌رود. سرعتی که در آن لحظه، هیدروپلنینگ رخ می‌دهد، سرعت هیدروپلنینگ نام‌گذاری می‌شود. هرچه این مقدار بزرگتر باشد، پتانسیل وقوع هیدروپلنینگ کمتر می‌گردد.

لغزش چرخ باعث می‌شود سرعت خطی خودرو با سرعت دورانی چرخ متناسب نباشد. در حقیقت، تعداد دور چرخ برای طی کردن مسافت معینی در زمان بارندگی و مرطوب بودن سطح روسازی آسفالتی با تعداد دور

چرخ در حالت خشک بودن سطح متفاوت می‌گردد. به عبارت دیگر، در شرایط سُر خوردن، تناسبی بین جابجایی طولی خودرو و دور چرخ وجود ندارد و عملاً بخشی از غلتش تبدیل به لغزش شده است. با بررسی مطالعات پیشین در این زمینه، فقدان یک روش آزمایشگاهی که بتواند به‌طور مستقیم و با لحاظ نمودن اندرکنش پارامترهای مربوط به روسازی چرخ و سیال و با کنترل شرایط گوناگون به ارزیابی پدیده هیدروپلنینگ، به‌ویژه روی سطوح مختلف روسازی، بپردازد احساس می‌شود.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

بافت سطح روسازی مهمترین عامل مرتبط با مقاومت لغزندگی روسازی است. در هر سرعتی، در شرایط خشک بودن روسازی و در سرعت‌های کم در روسازی مرطوب، بافت ریز مهمترین عامل تعیین‌کننده مقاومت لغزندگی است (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). در صورت وجود فیلمی از آب و با افزایش در سرعت، وجود یک بافت درشت زیر، برای حفظ تماس بین چرخ و روسازی اهمیت دارد (کوکالیس و پاناگولی، ۱۹۹۸). اندرکنش چرخ و روسازی (در شرایط خشک) و اندرکنش چرخ، سیال و روسازی (در شرایط مرطوب)، شدیداً بستگی به بافت سطح روسازی دارد (دینگ و وانگ، ۲۰۱۸).

مطالعات گوناگونی در خصوص اثر بافت سطح بر مقاومت لغزندگی با به‌کارگیری روش‌های اندازه‌گیری مختلف تاکنون انجام شده است (یو و همکاران، ۲۰۲۰). بلوم (۱۹۷۱) نشان داد که به‌طور متوسط عمق بافتی حدود ۰/۵ میلی‌متر مورد نیاز است تا حداقل اطمینان حاصل شود که آب از زیر چرخ تخلیه می‌شود. فورستر (۱۹۸۹) پارامتری برای تعیین بافت ریز ارائه نمود که این پارامتر ترکیبی از متوسط ارتفاع و متوسط فواصل بین زبری‌ها است.

پلولی بر مبنای تحقیقاتش روی پنج نوع سطح مختلف بیان کرد که مقدار بافت ریز، بر رابطه بین ضریب

مخلوط آسفالتی متخلخل است، با این توضیح که بافت درشت آن در طول زمان کاهش می‌یابد و نرخ کاهش بستگی به نوع سنگدانه دارد.

دو و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تغییرات اصطکاک بین چرخ و راه به‌همراه لایه نازکی از آب و اثر بافت ریز سطح راه پرداختند. مشاهده شد که بدون بافت ریز، به-محض مرطوب شدن سطح، اصطکاک کاهش یافت؛ در حالی که وجود بافت ریز اصطکاک را در مقدار ثابتی حفظ کرده تا به عمق بحرانی آب برسد. همچنین، نشان داده شد که با افزایش ارتفاع بافت ریز، عمق بحرانی آب افزایش می‌یابد. بافت ریز و درشت سطح روسازی نیز از عوامل مهم مرتبط با سطح راه است که بر وقوع هیدروپلنینگ مؤثر می‌باشد (کریشناسامی، ۲۰۱۹). بر اساس مطالعه آنگ و همکاران (۲۰۰۵)، بافت ریز روسازی در دامنه بین ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر، با افزایش سرعت هیدروپلنینگ به میزان ۲۰٪، در وقوع هیدروپلنینگ تأخیر ایجاد می‌کند.

بالمرو و گالاولی (۱۹۸۳) پیشنهاد کردند که روسازی با بافت سطحی درشت می‌تواند کشش رطوبت را افزایش دهد و باعث کاهش وقوع هیدروپلنینگ شود. ایشان نشان دادند که میزان لغزندگی در روسازی‌های بتنی مرطوب در بافت‌های عرضی، بیشتر از بافت‌های طولی است و برای سرعت‌های زیادتر این مسئله نمایان‌تر می‌شود.

مطالعات گسترده‌ای برای اندازه‌گیری مقاومت لغزندگی و سرعت هیدروپلنینگ مرتبط با آن، با در نظر گرفتن عوامل مربوط به چرخ و سطح روسازی طی سالیان گذشته انجام گرفته است. قابل توجه‌ترین مطالعه تجربی که نتایج مهمی را در برداشت در دهه ۶۰ میلادی صورت پذیرفت و منجر به توسعه معادله مشهور هیدروپلنینگ NASA گشت (معادله ۱)، که هنوز نیز مورد استفاده وسیع قرار می‌گیرد (هورن و درهر، ۱۹۶۳):

$$v_p = 6.36\sqrt{p} \quad (1)$$

اصطکاک و عمق آب جمع شده روی سطح اثر می‌گذارد (به نقل از مسعد و همکاران، ۲۰۰۹). هاگروست گزارش داد که تغییر مقاومت لغزندگی با سرعت خودرو بستگی به میزان بافت ریز و درشت سطح دارد. بافت ریز مقدار مقاومت لغزندگی و بافت درشت شیب کاهش مقاومت لغزندگی در برابر افزایش سرعت را کنترل می‌نمایند. علاوه بر این، بافت درشت با کاهش شیب اصطکاک در برابر سطح و تسهیل در زهکشی آب، بر مقاومت لغزندگی در سرعت‌های زیاد اثر می‌گذارد (به نقل از مسعد و همکاران، ۲۰۰۹).

دآپوتزو و همکاران (۲۰۱۲) مدلی برای پیش‌بینی بافت درشت روسازی با شاخص متوسط عمق بافت براساس مشخصات حجمی و دانه‌بندی مخلوط آسفالتی پیشنهاد دادند. وایانا و همکاران (۲۰۱۲) با طراحی و ساخت چهار مخلوط آسفالتی شامل آهکی، بازالیت و رسی به بررسی تغییرات عملکرد سطوح روسازی پرداختند. در این پژوهش، از ابزارهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد سطح روسازی چون روش پخش حجمی، تست‌کننده لغزش و پروفیل‌سنج لیزری بهره بردند.

علاوه بر بافت و پروفیل سطح، فاصله بین سنگدانه‌ها نیز اثر مهمی بر مقاومت لغزندگی و قابلیت زهکشی روسازی دارد. فوا و همکاران (۲۰۰۳) با انتخاب دو نوع سنگدانه گرانیت و سرباره فلزی و با در نظر گرفتن سه مقدار متوسط فاصله بین سنگدانه‌ها (۲، ۵ و ۱۰ میلی‌متر) که حد پایین نشان‌دهنده دانه‌بندی متراکم و حد بالا نشان‌دهنده دانه‌بندی باز است، به بررسی اثر نوع و فاصله سنگدانه‌ها بر مقاومت لغزندگی پرداختند. در پژوهشی دیگر، رضایی و همکاران (۲۰۱۱) در دانشگاه تگزاس، مدلی برای تعیین مقاومت لغزندگی براساس مشخصات و دانه‌بندی سنگدانه ارائه نمودند. آنها با ساخت نمونه‌های آسفالتی متراکم، متخلخل و حفاظتی، نتیجه گرفتند که مخلوط آسفالتی حفاظتی عدد لغزندگی بزرگتری از مخلوط متراکم دارد و بیشترین عدد لغزندگی مربوط به

صورت گرفت (مارتینز و همکاران، ۱۹۷۲). یافته اصلی این مطالعه تعریف شاخصی بود که ثابت شده است مقدار نسبت لغزش بیش از ۱۰٪ نشان دهنده کاهش قابل توجه اصطکاک و وقوع هیدروپلنینگ است. در پژوهشی، بالمر و گالوی (۱۹۸۳) نشان دادند که تغییرات در حدود ۰/۵ تا بیش از ۳ میلی متر در بافت سطح، موجب تفاوت ۱۶ کیلومتر بر ساعت (۱۰ مایل در ساعت) برای شروع هیدروپلنینگ می شود. همچنین، هورن بیان کرد که با یک بافت ریز مناسب، تأخیر در هیدروپلنینگ روسازی ممکن است.

همانطور که ذکر شد، بافت درشت روسازی از جمله فاکتورهایی است که اثر مهمی بر سرعت هیدروپلنینگ به واسطه فراهم نمودن کانال های زهکشی برای فرار آب باران مابین تایلر و روسازی دارد (سز و همکاران، ۲۰۱۰؛ چن و همکاران، ۲۰۱۳؛ سزن و فیسکو، ۲۰۱۳). MTD به عنوان یک شاخص خوب برای اصطکاک روسازی مرطوب و خشک شناخته شده است و دارای سطح همبستگی مناسبی نسبت به آزمون های تایلر لغزان است. روش پخش حجمی (ASTM E965, 2006) از گذشته به عنوان تکنیک اصلی برای اندازه گیری MTD مورد استفاده قرار گرفته است (سزن و فیسکو، ۲۰۱۳). در مطالعه ای دیگر، لو و همکاران (۲۰۱۵) یک لایه با دانه بندی باز (OGFC) را در سطح روسازی اجرا نمودند تا منجر به افزایش ایمنی رانندگی در شرایط مرطوب بودن سطح گردد و صدای اندرکنش تایلر و روسازی را کاهش دهد.

فوا و همکاران (۲۰۱۰) تلاش نمودند تا یک مدل شبیه سازی تحلیلی را برای بررسی اثر نسبی شیارهای روسازی و شیارهای تایلر در کاهش خطر هیدروپلنینگ خودرو استنتاج نمایند (فوا و همکاران، ۲۰۱۰). چو و فوا (۲۰۱۶) چارچوبی برای ترکیب مقاومت لغزندگی روسازی و ملاحظات ریسک هیدروپلنینگ در طراحی مخلوط آسفالتی ارائه کردند. چارچوب پیشنهادی ایشان

که در این رابطه، p فشار باد چرخ (kPa) و vp سرعت هیدروپلنینگ (km/h) است. در این مطالعه، آزمایش هایی روی چرخ های اتومبیل ها و هواپیماها روی روسازی بتنی مسطح با ضخامت آب ۰/۳ اینچ انجام گرفت. مدل تجربی مهمی که پس از آن توسط هورن و همکاران (۱۹۸۶) در مؤسسه حمل و نقل تگزاس ارائه شد، نشان داد که سرعت هیدروپلنینگ به نسبت سطح تماس چرخ که به صورت عرض محل تماس به طول آن تعریف گردید، مطابق معادله (۲)، بستگی دارد:

$$v_p = 83.35 - 27.59FAR + 0.1680p \quad (2)$$

که FAR نسبت سطح تماس و p فشار باد چرخ می باشد. گالوی و همکاران (۱۹۷۹)، پارامتر بافت سطحی را نیز برای پیش بینی سرعت هیدروپلنینگ مؤثر دانستند و معادله (۳) را ارائه نمودند:

$$v_p = (SD)^{0.04} (p_t)^{0.3} (TRD + 1)^{0.06} A \quad (3)$$

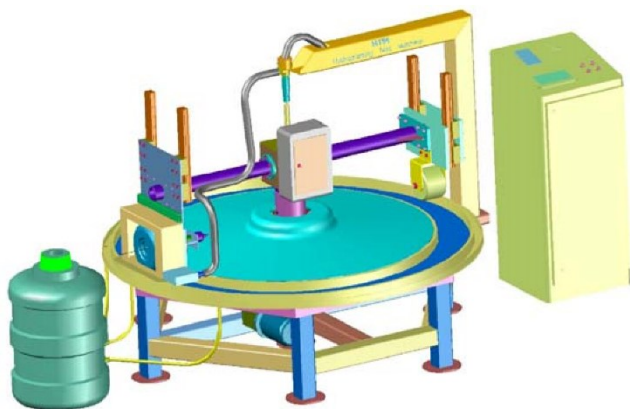
که A از معادله (۴) محاسبه می شود:

$$A = \max \left\{ \left[\frac{10.409}{t_w^{0.06}} + 3.507 \right], \left[\frac{28.952}{t_w^{0.06}} - 7.819 \right] (MTD)^{0.04} \right\} \quad (4)$$

که vp سرعت هیدروپلنینگ (مایل بر ساعت)، SD درصد چرخش (مرتبط با میزان قفل شدگی چرخ، چرخ کامل قفل شده معادل $SD=100\%$)، tw ضخامت فیلم آب (اینچ)، MTD متوسط عمق بافت سطحی (اینچ) و TRD عمق آج چرخ است. در این پژوهش، دامنه مطالعه محدود به شرایط خاصی از چرخ و سطح بود و تغییرات سطح و تأثیرگذاری آن بر هیدروپلنینگ مورد بررسی قرار نگرفت (آنوپام و فوا، ۲۰۰۸).

در تحقیق دیگری در دانشگاه TEXAS A&M مطالعه ای روی ارتباط بین نسبت لغزش چرخ و هیدروپلنینگ

تعبیه شده است، عمل پاشش آب با فشار معین به سطح بین چرخ و مخلوط آسفالتی که با استفاده از غلتک موجود روی بازوی دیگر محور مرکزی متراکم شده است انجام می‌شود. با به‌کارگیری حسگرهای سرعت‌سنج، که روی چرخ و محور مرکزی نصب شده‌اند، لغزندگی چرخ‌ها و تبدیل بخشی از غلتش به لغزش در شرایط مختلفی شناسایی و ارزیابی می‌گردد و می‌توان با کمک آن به ارزیابی پدیده هیدروپلنینگ پرداخت. در این دستگاه به منظور اعمال ضرایب اصطکاک مختلف و ایجاد گشتاور منفی، یک ترمز مغناطیسی به محور چرخ متصل شده است که قابلیت اعمال طیف پیوسته‌ای از تغییرات ترمز را دارد. همچنین، برای مشاهده خروجی‌های دستگاه، یک سامانه نرم‌افزاری تولید گشته است که با قابلیت تنظیم فرکانس چرخش و سرعت دستگاه در بازه‌های زمانی معین می‌توان مقادیر دور چرخ‌ها و محور مرکزی را به صورت لحظه‌ای روی نمایشگر دستگاه نمایش می‌دهد. نمایی از دستگاه طراحی شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



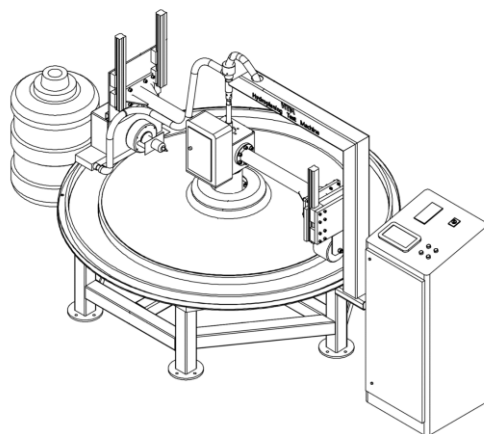
شکل ۱. نمایی از دستگاه جدید طراحی شده

به عبارت دیگر، نبود تناسب بین تعداد دور چرخ و میزان جابجایی طولی چرخ شاخصی برای شناسایی وقوع این پدیده لحاظ می‌شود. این حالت مشابه سُر خوردن خودروی در حال حرکت است که به میزان مسافتی که

شامل سه بخش اصلی است: تست آزمایشگاهی تسریع در صیقل نمودن در طراحی‌های مخلوط، تخمینی از مقاومت لغزندگی نهایی میدانی از نتایج آزمایشگاهی و یک بخش شبیه‌سازی تحلیلی که مقاومت لغزندگی و عملکرد هیدروپلنینگ مخلوط را به دست می‌آورد. ژو و همکاران (۲۰۱۵) اثر شیارهای الگوی آج تایرهای مختلف را بر عملکرد ضد هیدروپلنینگ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ساختار غیر صاف بیونیک طرح V می‌تواند به طور مؤثر سرعت هیدروپلنینگ را افزایش و عملکرد ضد هیدروپلنینگ تایر را بهبود دهد.

۳. روش تحقیق

در دستگاه جدید ارائه شده در این پژوهش، یک چرخ با سیستم تعلیق خطی و بار اعمالی معین از طریق بازویی به محور مرکزی متصل شده است و توسط الکتروموتور به حرکت درمی‌آید. از طریق نازل آبی که مقابل چرخ



تعداد دور در دقیقه (rpm) توسط دو حسگر دورسنج به صورت لحظه‌ای ثبت می‌شود. از مقایسه نمودن مقادیر این حسگرها در شرایط خشک و مرطوب بودن سطح روسازی می‌توان وقوع هیدروپلنینگ را پیش‌بینی نمود.

تغییر می‌کند و شفت را تحت تأثیر قرار می‌دهند. گشتاور منفی تولید شده باعث گرفتن ترمز می‌شود. به منظور تراکم مخلوط آسفالتی ریخته شده در قالب‌ها، در بازوی مقابل چرخ و به صورت متقارن، غلتک فولادی با وزن زیاد تعبیه شده است (شکل ۲). به منظور تسهیل در حرکت و ایجاد یک سطح متراکم یکنواخت، برای غلتک نیز سیستم تعلیقی مشابه با چرخ استفاده شده است. همچنین، ارتفاع غلتک با دو پیچ قابل تغییر است. در شکل ۳ نمایی از دستگاه در حال آزمایش مشاهده می‌شود.

جابجا شده چرخ آن نمی‌گلتد و بخشی از غلتش تبدیل به لغزش شده است. به منظور شبیه‌سازی حرکت واقعی خودرو و اعمال طیف پیوسته‌ای از تغییرات ترمز به صورت خطی در یک بازه مشخص، از ترمز مغناطیسی استفاده شده است. ویژگی مهم این قطعه، قابلیت تنظیم گشتاور می‌باشد. بدین نحو که با اعمال ولتاژ از صفر تا ۵ ولت، مقدار ترمز بین صفر تا ۱۰۰ درصد تغییر می‌نماید. در این قطعه، مواد فرومغناطیسی در بدنه خارجی ترمز قرار دارند که با اعمال میدان مغناطیسی حجم آنها



شکل ۲: قالب نمونه آسفالتی و غلتک تراکم



شکل ۳: دستگاه ساخته شده در حال آزمایش

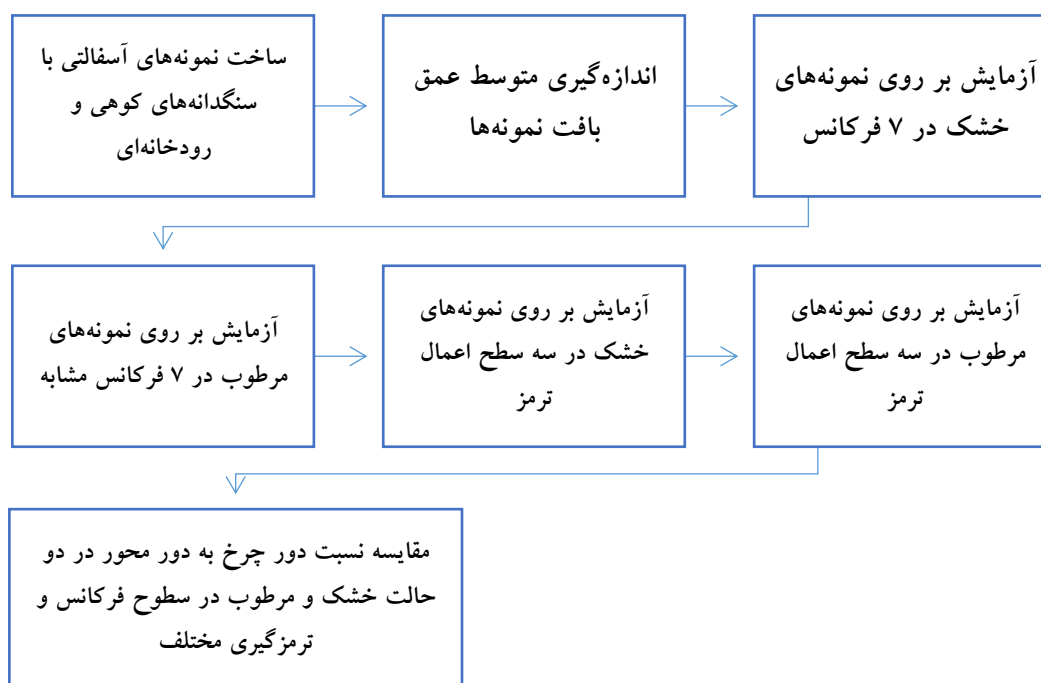
بیسیم به تابلو تعبیه شده روی محور مرکزی دستگاه ارسال شده و از طریق تغییر در ولتاژ و گشتاور وارد شده، درصدهای مختلف ترمز به چرخ اعمال می شود. در پژوهش حاضر، آزمایش ها در سه حالت صفر درصد (بدون اعمال ترمز)، ۱۵٪ و ۳۰٪ صورت می پذیرد. شایان ذکر است که صفر درصد معادل با چرخش کاملاً آزادانه چرخ و ۱۰۰٪ معرف چرخ کاملاً قفل شده است.

یکی از پارامترهای خروجی مهم، سرعت دورانی چرخ است که از دور چرخ محاسبه می شود. پارامتر دیگر، سرعت طولی و جابجایی چرخ در حین حرکت است. برای اندازه گیری این مقدار سرعت خطی، حرکت بازوی متصل به چرخ مبنای محاسبه قرار گرفته است. برای اندازه گیری آن یک حسگر نوری دیگر در قسمت تحتانی دستگاه و در انتهای محور مرکزی جانمایی شده است. بدین گونه سرعت طولی حرکت چرخ براساس حرکت محور مرکزی دستگاه محاسبه می شود. در نتیجه پارامتر خروجی دیگر سرعت طولی چرخ است که از حرکت محور مرکزی به تبع آن بازوی چرخ سنجیده می شود. از آنجا که در زمان وقوع هیدروپلنینگ، تناسبی که در زمان چرخش آزادانه چرخ وجود دارد، تغییر می نماید، نسبت دور چرخ به دور محور که معرف سرعت دورانی به سرعت طولی است، به عنوان شاخص تعیین کننده آستانه هیدروپلنینگ معرفی می گردد. زمانی که این نسبت تغییر قابل توجهی می نماید، آن لحظه به عنوان مبنای شروع هیدروپلنینگ در نظر گرفته می شود. الگوریتم روش تحقیق در شکل ۴ آورده شده است.

پارامترهای عمق متوسط بافت روسازی (MTD)، فرکانس (مرتبط با سرعت و دور موتور)، شرایط سطح روسازی و همچنین ضریب اصطکاک ترمز به عنوان متغیرهای ورودی این آزمایش لحاظ شده است. با ساخت ۱۲ نوع مخلوط آسفالتی، هر مخلوط روی ۱۰ قالب، در حقیقت ۱۲ مقدار مختلف متوسط عمق بافت برای انجام آزمایش وجود دارد. هر یک از مقادیر MTD معرف میانگین بافت در ۱۰ قالب دستگاه که یک نوع دانه بندی اجرا شده است، می باشد. با هدف بررسی تأثیر افزایش سرعت بر دور چرخ، فرکانس های مختلف متناسب با یک سرعت حداقلی و در ادامه با یک روند افزایشی تا رسیدن به حداکثر سرعت ممکن، بر الکتروموتور اعمال می شود.

آزمایش ها با کمک دستگاه تست هیدروپلنینگ در دو حالت خشک بودن و مرطوب بودن سطح روسازی انجام می پذیرد. در شرایط مرطوب بودن سطح، با عنایت به ایجاد سیستم انتقال آب در دستگاه، آب از منبع توسط شیلنگی به قسمت فوقانی محور مرکزی که روتاری جوینت در آن قرار گرفته است، منتقل می شود. سپس، روتاری جوینت، انتقال آب را از حالت ثابت به حالت دورانی تغییر داده و از طریق شیلنگی آب به یک نازل که بین چرخ و سطح روسازی آسفالتی تعبیه شده است، وارد می شود.

به منظور اعمال گشتاور منفی به چرخ و بررسی اثر ترمزگیری بر پدیده هیدروپلنینگ، از یک قطعه ترمز مغناطیسی که از طریق یک شفت به چرخ دستگاه متصل شده، استفاده شده است. امکان ورود مقدار درصد ترمز از طریق نرم افزار دستگاه که روی کامپیوتر صنعتی بارگذاری شده است وجود دارد. این فرمان به صورت



شکل ۴. الگوریتم روش تحقیق

۴. نتایج

در طرح آزمایش‌ها، شش دانه‌بندی گوناگون از دو نوع سنگدانه کوهی و رودخانه‌ای برای ساخت ۱۲ مخلوط آسفالتی با عمق متوسط بافت‌های متفاوت استفاده شده است. از آنجا که روی مخلوط‌های آسفالتی پس از مدتی در اثر عبور بار ترافیک بافت سطحی تغییر پیدا می‌کند، با ساخت نمونه‌های مختلف آسفالتی صیقلی (با ریزدانه بیشتر) که در طراحی اختلاط چندان رایج نیست، می‌توان پتانسیل وقوع هیدروپلینینگ روی سطح صاف (پس از عبور بار ترافیک) را مورد سنجش قرار داد.

روی کلیه نمونه‌های آسفالتی، آزمایش‌ها در سه حالت صفر، ۱۵ و ۳۰ درصد اعمال ترمز و در هفت فرکانس مختلف انجام می‌پذیرند. با توجه به اینکه برای تشخیص آستانه سرعت وقوع هیدروپلینینگ، فرکانس

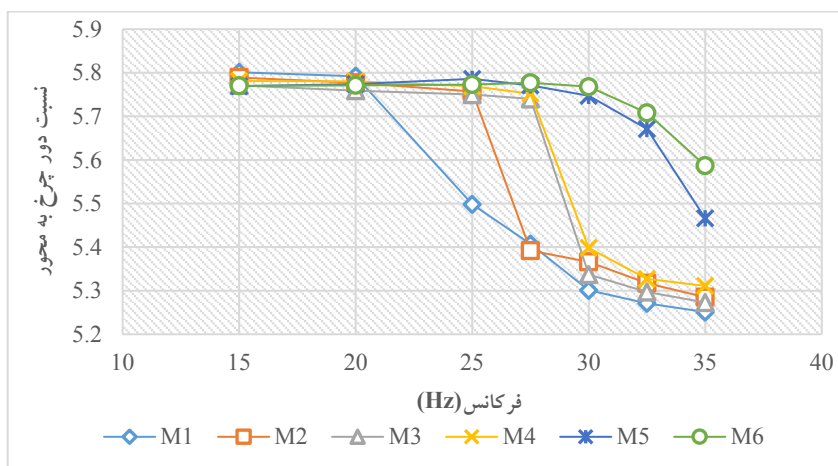
حرکت چرخ روی سطح آسفالتی می‌بایست به‌طور تدریجی افزایش پیدا کند، به ترتیب از کمترین تا بیشترین فرکانس، آزمایش‌ها به‌طور پیوسته انجام می‌شوند. مقدار متوسط عمق بافت تک تک نمونه‌ها با استفاده از روش پخش حجمی مطابق استاندارد ASTM E965 اندازه‌گیری می‌شود. میانگین این مقادیر به عنوان MTD کل سطح فرض می‌شود. در جدول ۱، مقدار میانگین MTD نمونه‌های مختلف ساخته شده مشاهده می‌شود. پس از اندازه‌گیری متوسط عمق بافت، آزمایش ابتدا در شرایط خشک بودن سطح روسازی انجام می‌شود. بدین صورت که با وارد کردن مقدار فرکانس و دور موتور از کمترین مقدار (۱۵ هرتز) به بیشترین مقدار (۳۵ هرتز) و درصد ترمز و تنظیم فشار آب خروجی، چرخ شروع به حرکت می‌کند.

جدول ۱. مقادیر متوسط عمق بافت نمونه‌ها

متوسط عمق بافت (mm)	نوع دانه بندی	نوع سنگدانه	مخلوط آسفالتی
0.49	1	کوهی	M1
0.63	2	کوهی	M2
0.87	3	کوهی	M3
1.38	4	کوهی	M4
3.07	5	کوهی	M5
3.6	6	کوهی	M6
0.41	1	رودخانه‌ای	M7
0.58	2	رودخانه‌ای	M8
0.72	3	رودخانه‌ای	M9
1.16	4	رودخانه‌ای	M10
2.64	5	رودخانه‌ای	M11
3.19	6	رودخانه‌ای	M12

برای شش دانه‌بندی با به‌کارگیری سنگدانه‌های کوهی در شرایط مرطوب بودن سطح روسازی مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش در MTD فرکانس آستانه وقوع هیدروپلینینگ افزایش پیدا می‌کند. در M1 تا M4 وقوع هیدروپلینینگ در نمونه‌ها نمایان است. ولی در M5 و M6 در فرکانس‌های بالاتر از بیشترین فرکانس اعمال شده در آزمایش‌ها، هیدروپلینینگ رخ می‌دهد.

آزمایش، با وارد کردن کمترین مقدار فرکانس شروع می‌شود. در مرحله اول آزمایش‌ها، ترمز دستگاه فعال نبوده و پس از اتمام آزمایش در همه فرکانس‌ها، درصد ترمز اعمال می‌گردد. در هر آزمایش، اطلاعات مربوط به دور چرخ و دور محور معادل با سرعت دورانی و سرعت خطی حرکت چرخ هستند، به صورت لحظه‌ای ذخیره شده و در صفحه نمایش کامپیوتر صنعتی دستگاه رؤیت می‌شود. علاوه بر این، به صورت لحظه‌ای امکان مشاهده نسبت دور چرخ به دور محور فراهم است. در شکل ۵، نسبت دور چرخ به دور محور در فرکانس‌های مختلف

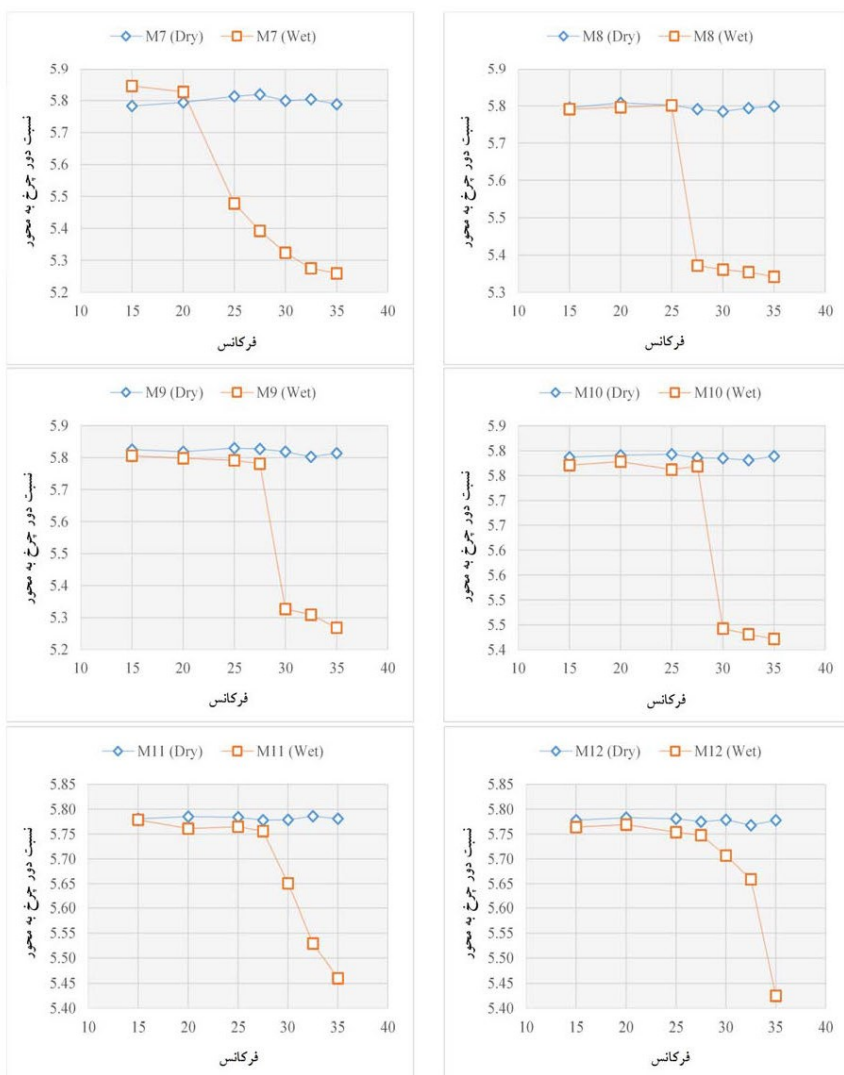


شکل ۵. تغییرات نسبت دور چرخ/محور با فرکانس برای نمونه‌های مرطوب مخلوط‌های شماره یک تا شش

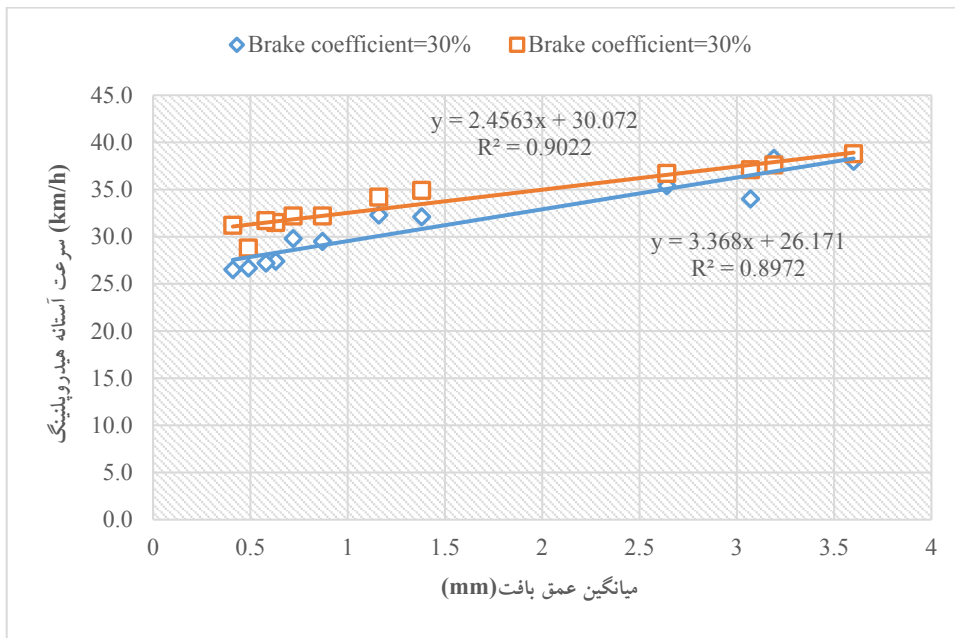
میزان نسبت افت در فرکانس های مذکور متفاوت است، در هر یک از نمودارها، نسبت تنزل ۵ درصد را درون یابی نموده و به عنوان فرکانس آستانه وقوع هیدروپلینینگ لحاظ می شود.

در شکل ۷، ارتباط بین متوسط عمق بافت و فرکانس آستانه وقوع هیدروپلینینگ در شرایط اعمال ضریب ترمزگیری ۱۵ و ۳۰ درصد مشاهده می شود. از آنجا که مخلوط های ساخته شده شامل دانه بندی های متراکم، باز و متخلخل بوده است، باعث شده مقادیر MTD محاسبه شده در قسمتی از بازه ۰/۴ تا ۳/۶ میلی متر، کمبودی در داده های MTD مشاهده شود.

در شکل ۶، نسبت دور چرخ به دور محور در فرکانس های مختلف برای شش دانه بندی، با به کارگیری سنگدانه های رودخانه ای در شرایط مرطوب بودن سطح روسازی، مشاهده می شود. در تمامی نمونه ها، مقدار نسبت ۵ درصدی معادل آستانه وقوع هیدروپلینینگ در نظر گرفته می شود. در مخلوط M7 فرکانس ۲۵ هرتز، در M8 فرکانس ۲۷,۵ هرتز، در M9 و M10 فرکانس ۳۰ هرتز، در مخلوط M11 فرکانس ۳۲,۵ هرتز و در مخلوط M12 فرکانس ۳۵ هرتز، به عنوان فرکانس هایی که افت قابل توجهی در مقدار نسبت دور چرخ به دور محور در آنها مشاهده شده است ثبت می گردند. با عنایت به اینکه



شکل ۶. تغییرات نسبت دور چرخ/محور با فرکانس برای نمونه های خشک و مرطوب مخلوط های شماره یک تا شش سنگدانه رودخانه ای



شکل ۷. تغییرات عمق بافت مخلوط های آسفالتی در برابر سرعت آستانه هیدروپلینینگ، با اعمال ضرایب ترمزگیری ۱۵ و ۳۰ درصد

۵. ارائه مدل پیشنهادی

در این بخش، بر اساس نتایج به دست آمده در بخش های پیشین، یک مدل رگرسیون خطی برای برازش داده ها استخراج می شود. برای کنترل همگن بودن واریانس خطا از آزمون همگنی واریانس لون استفاده گردید که با محاسبه مقدار P برابر با ۰/۹۹۲ حاصل از آزمون لون همگن بودن واریانس خطا اثبات می گردد. به منظور بررسی نرمال بودن داده های متغیر وابسته از آزمون اندرسون-دارلینگ استفاده می شود. فرض صفر در این آزمون، نرمال بودن داده ها است که اگر مقدار P از سطح آزمون کمتر باشد فرض صفر رد می شود. به عبارت دیگر، اگر مقدار P کمتر از سطح آزمون باشد، توزیع داده ها نرمال نیست و اگر بیشتر باشد نرمال بودن داده ها نشان

داده می شود. با فرض سطح اطمینان ۰/۹۵، مقدار P برابر با ۰/۴۳۴ محاسبه شده که بیانگر نرمال بودن داده ها است. همچنین، به منظور کنترل همبستگی بین خطاهای مدل، از آزمون دوربین-واتسون استفاده شد. در جدول ۲، آزمون های آماری به کار گرفته شده به همراه مقادیر به دست آمده ذکر شده اند.

معادله رگرسیون این مطالعه، مطابق با معادله (۵) استخراج می گردد. این معادله، ارتباط بین سرعت هیدروپلینینگ (V_h) به عنوان متغیر وابسته را با متوسط عمق بافت (MTD) و ضریب ترمزگیری (B) به عنوان متغیرهای مستقل برقرار می نماید.

$$V_h = 24.98 + 3.02 MTD + 0.135 B \quad (5)$$

جدول ۲. ارزیابی فرضیات معادله رگرسیون خطی

مقدار به دست آمده	آزمون به کار گرفته شده	فرضیات معادله رگرسیون
0.0011	میانگین حسابی	میانگین خطاها
P-Value=0.992	آزمون لون	ثابت بودن واریانس خطا
P-Value=0.434	آزمون اندرسون-دارلینگ	توزیع نرمال متغیر وابسته
عدم همبستگی	دو متغیر مربوط به دو عامل مجزا از هم	عدم همبستگی بین متغیرهای مستقل
D=1.75	آزمون دورین-واتسون	عدم همبستگی بین خطاها
P-Value=0.434	آزمون اندرسون-دارلینگ	توزیع نرمال مقادیر خطا

متغیر مستقل مربوطه بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل می باشد. همچنین، خطای استاندارد در این معادله برابر با $1/3$ انحراف معیار نمونه‌ها را نشان می دهد. سایر پارامترهای آماری مربوط به این معادله رگرسیون در جدول ۳ درج شده است.

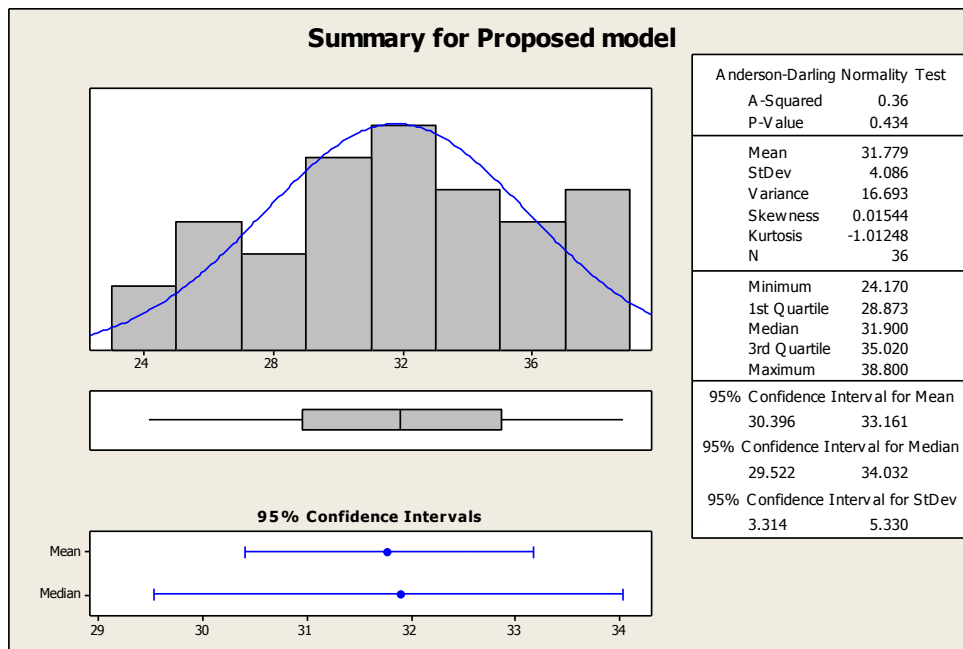
مقدار R^2 نشان می دهد که بیش از ۹۰٪ تغییرات سرعت هیدروپلنینگ تحت تأثیر دو متغیر مستقل مندرج در رابطه است و درصد قابل قبولی از تغییرپذیری داده های پاسخ در اطراف میانگین آن تبیین می گردد. به عبارت دیگر، حدود ۹۰٪ از تغییرات متغیر وابسته تحت تأثیر دو

جدول ۳. پارامترهای آماری مدل رگرسیون پیشنهادی

آمار رگرسیون					
R چندگانه	0.952				
R مربع	0.906				
R مربع تعدیل شده	0.900				
خطای استاندارد	1.291				
مشاهدات	36				
ANOVA					
	Df	SS	MS	F	Significance F
رگرسیون	2	529.25	264.63	158.80	1.164E-17
باقیمانده	33	54.99	1.67		
مجموع	35	584.24			

از این آزمون استفاده می شود. مطابق شکل ۸، در داده های موجود، مقدار چولگی برابر $0/01544$ و مقدار کشیدگی برابر $0/012-$ است. در حالت کلی، اگر مقدار چولگی و کشیدگی داده ها در دامنه $(+2$ تا $-2)$ قرار داشته باشد داده ها از توزیع نرمال برخوردارند. در نتیجه، داده های موجود از توزیع نرمال برخوردار هستند.

آزمون تی- استیودنت برای ارزیابی میزان هم قوارگی یا یکسان بودن و نبودن میانگین نمونه ای با میانگین جامعه در حالتی به کار می رود که انحراف معیار جامعه مجهول باشد. به عبارت دیگر، از این آزمون برای ارزیابی اختلاف معنی دار بین میانگین متغیر آزمون در یک گروه با میانگین متغیر آزمون در گروه دوم استفاده می شود. در این مطالعه، برای اعتبارسنجی دو گروه نتایج به دست آمده



شکل ۸. نتیجه آزمون آماری اندرسون- دارلینگ و بررسی چولگی و کشیدگی

و ۱۷ درصدی در سرعت آستانه هیدروپلنینگ می شود. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی با بخشی از داده های موجود در مطالعه حاضر، اعتبار مدل با روش n-Fold مورد ارزیابی قرار می گیرد. با به کارگیری این روش نتیجه گرفته می شود که مدل رگرسیونی سرعت آستانه هیدروپلنینگ با درصد ضریب ترمزگیری و متوسط عمق بافت به خوبی پیش بینی و برازش می شود و دو عامل رگرسیونی تأثیر به سزایی در سرعت آستانه هیدروپلنینگ دارند. همچنین، نتایج نشان می دهد که مدل نسبت به داده های مشاهده نشده حساس نیست و مسئله بیش-برازش در مدل وجود ندارد. لذا مدل برازش داده شده برای داده های از اعتبار زیادی برخوردار است.

۶. نتیجه گیری

در این مطالعه، یک دستگاه آزمایشگاهی در محیط داخلی ارائه گردید تا شرایط لغزش چرخ خودرو روی سطوح گوناگون روسازی آسفالتی در مواقع بارندگی و لغزنده بودن سطح راه را ارزیابی نماید. هدف از ساخت این دستگاه، ارائه راهکارها و توصیه هایی برای تأخیر در

با توجه به اینکه مقدار t Stat از t بحرانی دو دنباله کمتر است ($1.78 < 2.00$) و از مقدار منفی t بحرانی دو دنباله بیشتر است ($1.78 > -2.00$)، تفاوت قابل ملاحظه ای بین دو نمونه بررسی شده مشاهده نمی شود و فرض صفر تأیید می شود. این آزمون با نرم افزار مینی تب نیز انجام پذیرفت. مقدار P برابر با ۰/۰۵۵ و از آنجا که بازه $۳/۴۲۲$ و $-۰/۰۳۷$ فاصله اطمینان مقدار صفر را دربر می گیرد، برای اختلاف بین مقادیر میانگین با سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان دهنده تأیید اعتبار نتایج مدل پیشنهادی با مدل گالوی است و فرض صفر پذیرفته می شود.

با یک برازش خطی روی داده های به دست آمده، یک مدل ساده بین سرعت آستانه وقوع هیدروپلنینگ وابسته به بافت سطح و مقدار ضریب اعمال ترمز پیشنهاد شد. همچنین، نتایج به دست آمده از آزمایش ها به کمک آزمون آماری t با یکی از مدل های معتبر پیش بینی سرعت هیدروپلنینگ مقایسه گردید که نشان دهنده اعتبار قابل قبول نتایج اخذ شده در این مطالعه بود. نتایج نشان داد که افزایش دو و سه برابری بازه ۰/۵ تا ۱ میلی متر مرتبط با میانگین عمق بافت روسازی، به ترتیب باعث افزایش ۸

و متغیرهای مستقل متوسط عمق بافت و ضریب ترمزگیری در این مقاله پیشنهاد شد. مدل پیشنهادی توانایی پیش‌بینی سرعت هیدروپلنینگ تابعی از مشخصات بافت سطح روسازی و ضریب ترمزگیری را در شرایط آزمایشگاهی در نظر گرفته شده دارد. مقایسه نتایج شده با یکی از مدل‌های تجربی رایج برای پیش‌بینی سرعت هیدروپلنینگ، نشان داد که ارتباط خوبی از لحاظ آماری با مدل ارائه شده در این تحقیق وجود دارد و اختلاف غیرقابل قبولی در نتایج مشاهده نگردید.

- در این پژوهش، پتانسیل وقوع هیدروپلنینگ در مخلوط‌های مختلف در فرکانس‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش متوسط عمق بافت سطح روسازی، سرعت آستانه هیدروپلنینگ افزایش یافته و ریسک وقوع آن کمتر می‌گردد. نتایج نشان داد که افزایش دو و سه برابری بازه ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر مرتبط با میانگین عمق بافت روسازی، به ترتیب باعث افزایش ۸ و ۱۷ درصدی در سرعت آستانه هیدروپلنینگ می‌شود.

وقوع این پدیده و کاهش ریسک وقوع تصادف ناشی از لغزندگی خودرو است. نتایج زیر به‌طور خلاصه حاصل شد:

- در دستگاه طراحی شده، نسبت دور چرخ به دور محور متصل به چرخ، به عنوان شاخص مناسب و قابل قبول برای تشخیص آستانه وقوع هیدروپلنینگ تبیین گردید. بدین شکل که در شرایط خشک بودن سطح روسازی، این نسبت ثابت باقی مانده و زمانی که چرخ بر اثر حائل شدن آب بین آن و سطح روسازی می‌لغزد، این نسبت تغییر می‌نماید.

- نرخ افت در نسبت دور چرخ به دور محور متصل به آن، مبنایی برای معین نمودن آستانه وقوع هیدروپلنینگ فرض گردید. با توجه به شرایط حاکم بر آزمایش‌ها و ابعاد و بارهای اعمالی بر چرخ و بررسی روند تغییرات نرخ افت، مقدار کاهش ۵ درصد در نسبت دور چرخ به دور محور به عنوان لحظه آستانه رخ دادن هیدروپلنینگ مدنظر قرار گرفت.

- با بهره‌گیری از داده‌های گردآوری شده، یک مدل خطی ساده با متغیر وابسته ثبت سرعت هیدروپلنینگ،

۷. مراجع

- Anupam, K. and Fwa, T. 2008. "Study of hydroplaning speed with variation of tire inflation pressure for smooth tire using analytical modeling". The First International Conference on Transport Infrastructure.
- Balmer, G. and Gallaway, B. 1983. "Pavement design and controls for minimizing automotive hydroplaning and increasing traction frictional interaction of tire and pavement". ASTM International.
- Bloem, D. L. 1971. "Skid-resistance--the role of aggregates and other factors". National Sand and Gravel Association Circulars.
- Cerezo, V., Gothié, M., Menissier, M. and Gibrat, T. 2010. "Hydroplaning speed and infrastructure characteristics". Proc Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol., 224(9): 891-898.
- Chen, Y., Wang, K. J. and Zhou, W. F. 2013. "Evaluation of surface textures and skid resistance of pervious concrete pavement". J. Central South University, 20(2): 520-527.
- Chu, L. and Fwa, T. 2016. "Incorporating pavement skid resistance and hydroplaning risk considerations in asphalt mix design". J. Transport. Eng., 142(10): 04016039.
- D'Apuzzo, M., Evangelisti, A. and Nicolosi, V. 2012. "Preliminary findings for a prediction model of road surface macrotexture". Proc.-Soc. Behav. Sci., 53: 1109-1118.
- Ding, Y. and Wang, H. 2018. "Evaluation of hydroplaning risk on permeable friction course using tire-water-pavement interaction model". Transport. Res. Record, 2672(40): 408-417.
- Do, M. T., Cerezo, V., Beautru, Y. and Kane, M. 2013. "Modeling of the connection road surface microtexture/water depth/friction". Wear, 302(2): 1426-1435.
- Forster, S. W. 1989. "Pavement microtexture and its relation to skid resistance". Transport. Res. Record, 1215: 151-164.
- Fwa, T., Choo, Y. and Liu, Y. 2003. "Effect of aggregate spacing on skid resistance of asphalt pavement". J. Transport. Eng., 129(4): 420-426.
- Fwa, T., Anupam, K. and Ong, G. 2010. "Relative effectiveness of grooves in tire and pavement for reducing vehicle hydroplaning risk". Transport. Res. Record, 2155: 73-81.
- Gallaway, B. M., Hayes, G., Ivey, D., Ledbetter, W., Olson, R., Ross Jr, H., . . . Woods, D. 1979. "Pavement and geometric design criteria for minimizing hydroplaning: A technical summary". Final Report, Texas A&M University, College Station.
- Home, W. B., Yager, T. J. and Ivey, D. L. 1986. "Recent studies to investigate effects of tire footprint aspect ratio on dynamic hydroplaning speed". The Tire Pavement Interface: A Symposium.
- Horne, W. B. and Dreher, R. C. 1963. "Phenomena of pneumatic tire hydroplaning". NASA TN, D-2056.
- Kokkalis, A. G. and Panagouli, O. K. 1998. "Fractal evaluation of pavement skid resistance variations. I: Surface wetting". Chaos, Solitons & Fractals, 9(11): 1875-1890.
- Krishnasamy, S. 2019. "Investigation on hydroplaning of vehicle tire on a wet road". Kauno Technologijos Universitetas.
- Luo, S., Qian, Z. D. and Xue, Y. C. 2015. "Performance evaluation of open-graded epoxy asphalt concrete with two nominal maximum aggregate sizes". J. Central South University, 22(11): 4483-4489.
- Martinez, J. E., Lewis, J. M. and Stocker, A. 1972. "A study of variables associated with wheel spin-down and hydroplaning".
- Masad, E., Rezaei, A., Chowdhury, A. and Harris, P. 2009. "Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics". Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, Texas.
- Ong, G. P., Fwa, T. and Guo, J. 2005. "Modeling hydroplaning and effects of pavement microtexture". Transport. Res. Record, 1905(1): 166-176.
- Rezaei, A., Masad, E. and Chowdhury, A. 2011. "Development of a model for asphalt pavement skid resistance based on aggregate characteristics and gradation". J. Transport. Eng., 137(12): 863-873.
- Sezen, H. and Fisco, N. 2013. "Evaluation and comparison of surface macrotexture and friction measurement methods". J. Civ. Eng. Manag., 19(3): 387-399.
- Vaiana, R., Capiluppi, G., Gallelli, V., Iuele, T. and Minani, V. 2012. "Pavement surface performances evolution: An experimental application". Proc.-Soc. Behav. Sci., 53: 1149-1160.
- Wang, D., Zhang, Z., Kollmann, J. and Oeser, M. 2020. "Development of aggregate micro-texture during polishing and correlation with skid resistance". Int. J. Pavement Eng., 21(5): 629-641.
- Yu, M., You, Z., Wu, G., Kong, L., Liu, C. and Gao, J. 2020. "Measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavement: A review". Constr. Build. Mater., 260: 119878.
- Zhou, H. C., Wang, G. L., Yang, J. and Xue, K. X. 2015. "Numerical simulation of effect of bionic V-riblet non-smooth surface on tire anti-hydroplaning". J. Central South University, 22(10): 3900-3908.

