

# بررسی آزمایشگاهی و تحلیل آماری اثر آلاینده‌ها بر مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی

مرتضی ذات اکرم، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خبیری (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمدحسن میرابی مقدم، استادیار، دانشکده مهندسی شهیدنیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، سیستان و بلوچستان، ایران

E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱

دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۱۵

## چکیده

یکی از خصوصیات مهم راه‌ها که مربوط به روسازی جاده می‌شود و با ایمنی آن در ارتباط است، مقاومت لغزندگی آنهاست. این خصوصیات به عوامل متعددی چون مشخصات بافت رویه و مصالح بکار رفته، شرایط آب و هوایی، تغییرات فصلی و میزان آلودگی سطح جاده وابسته است. حضور آلاینده‌ها بویژه در هنگام اولین بارندگی بعد از یک دوره خشکسالی باعث می‌شود تا سطح خیس جاده لغزنده شود و احتمال تصادف افزایش یابد. بعضی از این آلاینده‌ها طبیعی‌اند، مانند ریزگردها و عبور ماسه بادی در جاده‌های کویری و بعضی هم در اثر عوامل غیرطبیعی مانند پودر ناشی از سایش لاستیک در اثر عبور وسایل نقلیه و یا روغن، ایجاد می‌شوند. در این تحقیق آلاینده‌هایی چون ریزگردها، ماسه بادی، روغن، پودر لاستیک، دوده اکزوز و رنگ سرد ترافیکی مورد مطالعه قرار گرفتند. نمونه‌های آسفالتی با استفاده از یک نوع دانه‌بندی پیوسته با تراکم ژیراتوری در قالب‌های بزرگ مارشال ساخته شده‌اند و در درجه حرارت و رطوبت‌های مختلف تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که حضور آلاینده‌ها به طور معنی‌داری تأثیرگذار است. همچنین نشان داده شد که در حالت خشک بیشترین کاهش بدست آمده در عددپاندول هنگامی است که سطح از ماسه بادی پوشیده شده باشد و در حالت مرطوب نیز حضور رنگ سرد ترافیکی به طور متوسط بین ۴۹ تا ۵۵ درصد کاهش عدد لغزندگی را در پی داشته است. همچنین اعداد بدست آمده توسط نرم‌افزارهای آماری با استفاده از روش درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها و شبکه عصبی مصنوعی تحلیل شدند و نشان داده شد که تغییر در نوع آلاینده‌ها باعث بیشترین تغییر در مقاومت لغزندگی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلاینده روسازی، ایمنی راه، مخلوط آسفالتی، مدل‌های آماری، مقاومت لغزندگی

## ۱. مقدمه

عوامل مختلفی در بروز تصادفات نقش دارند که یکی از آنها کافی نبودن مقدار مقاومت در برابر لغزندگی سطح روسازی به ویژه شرایط مرطوب است. نرخ تصادفات در فصل‌های بارانی بویژه در اولین بارندگی افزایش می‌یابد و دلیل آن وجود آلاینده بر سطح روسازی است [Asi, 2007]. مقاومت لغزندگی در جاده‌ها پس از از بین رفتن آلاینده‌ها بهبود می‌یابد [Cao et al. 2010]. آلودگی سطح روسازی با دو جزء اصلی اصطکاک یعنی چسبندگی و نیروی پسماند، تداخل ایجاد کرده و از منابع زیر تولید می‌گردد.

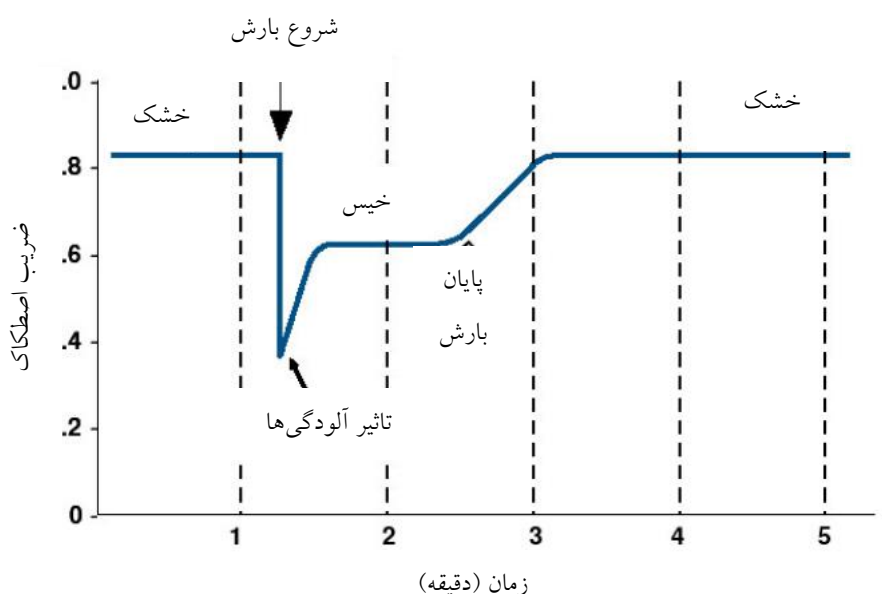
- گرد و خاک، گل، شن و ماسه
- روغن، سوخت لاستیک و دوده اثر ترمز چرخ
- روزدگی قیر و غیره

میزان تأثیر هر یک از آلودگی‌های فوق بر اصطکاک روسازی به وضوح مشخص نشده است، اما ثابت شده که آلودگی‌ها بافت روسازی را پوشانده و روند پیرشدگی روسازی را سرعت می‌بخشد. همچنین آلودگی‌های جمع شده بر روی سطح روسازی در دوره‌های خشک، شرایط بسیار خطرناکی را برای استفاده‌کنندگان از راه، در شروع اولین بارش ایجاد می‌کنند [Bennis, and De Witt, 2003]. شکل (۱)، نشان می‌دهد که چگونه اصطکاک روسازی در زمان بارش تحت تأثیر آلودگی‌ها تغییر کرده و اصطکاک به مقدار قابل توجهی پس از شروع بارش کاهش می‌یابد.

کینگ و همکاران در سال ۲۰۰۳ بر روی اثر آلاینده‌ها بر مقاومت لغزندگی تحقیقاتی انجام دادند، مواردی که آنها به عنوان آلاینده بکار بردند شامل مواردی چون: ریزدانه‌ها که ابعاد آن در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر بوده است، ماسه که قطر آن ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر بوده است و روغن سوخته ریخته شده از خودرو، است. آنها به این نتیجه رسیدند که بیشترین تأثیر در کاهش مقاومت لغزندگی را روغن و کمترین اثر را پودر خاک داشته است [Cao et al. 2010].

تیفور در سال ۲۰۰۶ تحقیقی بر روی اثر آلاینده‌ها بر مقاومت لغزندگی سطح خیس انجام دادند و نتیجه گرفتند که گرچه باران

مقاومت لغزندگی سطح روی مسیر را کاهش می‌دهد اما وجود سایر آلاینده‌ها نقش مهمی در از دست رفتن بیشتر این مقاومت ایفا می‌کند [Tyfour, 2009]. آلودگی‌های سطحی که ایشان در تحقیق خود استفاده نمودند، شامل پودر لاستیک، روغن و پودر سیلیکا که نماینده ذرات لنت ترمز و مواد فلزی ساییده شده از داخل موتور و ذرات هیدروکربن نشتی از موتور وسیله نقلیه می‌شد که آنها را به عنوان آلاینده روی سطح جاده‌ها قرار دادند. وامبولد در سال ۱۹۹۸ بر روی مقاومت لغزشی سطوح آلوده و اثر برف بر روی آن و مدلسازی فیزیکی ارتباط لاستیک و سطح، مطالعاتی انجام داد [Wambold and Anderson, 1998]. همچنین یارون در سال ۲۰۰۵ از جت‌های آب برای شستشوی سطح روسازی از آلاینده‌ها استفاده نمود و مطالعاتی بر روی مسئله روسازی دارای آلودگی سطحی انجام داد و به این نتیجه رسید که شستشوی سطح، نقش اساسی در افزایش مقاومت لغزندگی سطح روسازی دارد [Yaron and Nesichi, 2005]. Cao et al. 2010 آلاینده‌های سطحی از دیدگاه زیست محیطی نیز مورد توجه محققین بوده است نظیر مطالعات نمت و همکاران در سال ۲۰۱۰ که در مطالعات جامعی به اثرات آلودگی‌های ناشی از سطح مسیر نظیر مواد هیدروکربنی حاصل از سایش لاستیک و سوخت، فلزات مس و روی از سایش دیسک‌های ترمز و سایر بر روی رواناب‌های جاده پرداخته و اشاره به حجم زیاد این مواد داشته‌اند [Nemeth, Ward and Woodington, 2010]. همانگونه که ملاحظه می‌شود، تاکنون مطالعات اندکی در خصوص اثر انواع آلودگی‌ها بر کاهش مقاومت لغزندگی انجام شده است و در مرور مراجع علمی این محدودیت وجود داشت. هدف اصلی این تحقیق مقایسه تأثیر انواع آلاینده‌ها شامل گرد و غبار، ماسه بادی، پودر لاستیک، دوده و روغن که در اینجا به عنوان آلاینده در نظر گرفته شده‌اند، بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی است. اثر رطوبت، دما و میزان آلودگی (تمام پوشیده شده و نیمه پوشیده شده از آلاینده) نیز در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفت. با توجه به تعداد داده‌های برداشت شده به کمک روش‌های درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها برای شناسایی حالت‌های خطرناک و خارج از استاندارد و از ساختار شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی حالت‌های مشابه استفاده گردید.



شکل ۱. تغییرات در مقاومت لغزندگی در طول بارش در حضور آلاینده‌ها [Bennis, and De Witt, 2003]

## ۲. روش تحقیق و مصالح مورد استفاده

است، برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از سنگدانه‌های آهکی کوهی شکسته با مشخصات فنی مندرج در جدول (۱) و قیر ۶۰/۷۰ با مشخصات مندرج در جدول (۲) استفاده گردید.

در این تحقیق از رویکرد آزمایشگاهی برای بررسی اثر آلاینده‌ها در درجه حرارت‌های مختلف بر مقاومت لغزندگی استفاده شده

جدول ۱. مشخصات فنی سنگدانه رویه آسفالتی استفاده شده در این تحقیق

نتایج آزمایش	روش آزمایش		استاندارد رویه	شرح
	ASTM	AASHTO		
۱۹	C131	T96	۲۵	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس، درصد
۲/۲	C127	T85	۲/۵	حداکثر جذب آب، درصد(مصالح درشت دانه)
۲/۴	C128	T84	۲/۵	حداکثر جذب آب، درصد(مصالح ریزدانه)
۶	D4791	-	۱۵	حداکثر ضریب تورق با روش BS812، درصد
۹۲	D5821	-	۹۵	درصد شکستگی در یک وجه
۹۷	D5821	-	۹۰	درصد شکستگی در دو وجه

جدول ۲. مشخصات قیر مصرفی به کار رفته در این تحقیق

نوع آزمایش	نتایج آزمایش	روش آزمایش
وزن مخصوص (۲۵°C)	۱/۰۱۲	ASTM D-70
درجه نفوذ (۲۵°C) $\frac{1}{10}$ mm	۶۷	ASTM D-5
کندروانی (۱۳۵°C) سانتی استوکس	۸۱/۲۴	ASTM D-113
نقطه اشتعال (برحسب °C)	۳۱۰	ASTM D-92
درجه نرمی (برحسب °C)	۵۰	ASTM D-36

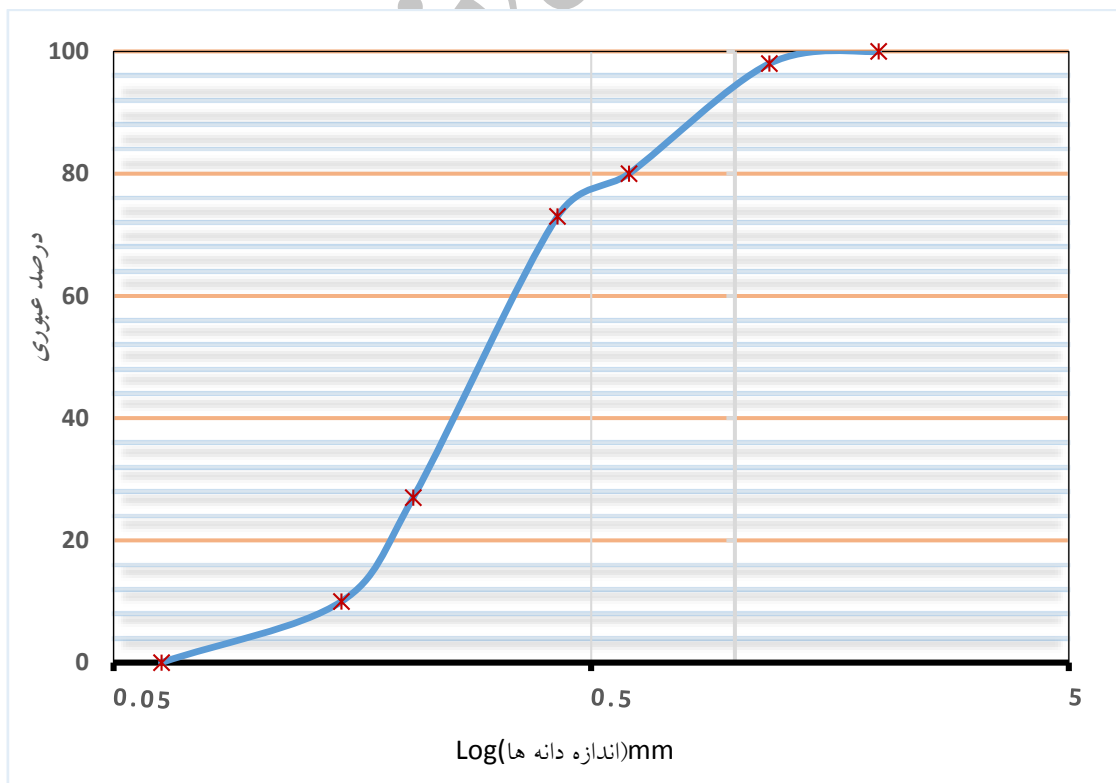
کیلوپاسکال، زاویه دوران ۱/۲۵ و سرعت دوران ۳۰ دور در دقیقه بوده است.

## ۱-۲ انتخاب آلاینده‌ها

در حال حاضر بسیاری از شهرها با مشکل ریزگردها یا همان گردوغبار مواجه هستند. ریزگردها، هم میدان دید را کاهش می‌دهند و هم جاده را لغزنده‌تر می‌کنند (مقاومت لغزندگی روسازی را کاهش می‌دهند). از آلاینده‌های دیگر طبیعی می‌توان به وجود ماسه‌بادی و روان در جاده‌های کویری نام برد. از آلاینده‌های مصنوعی می‌توان روغن سوخته ریخته شده و دوده آگزوز خودروها را نام برد. مشخصات آلاینده‌های مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از:

- گردوغبار که همان ذرات ریز خاک عبوری از الک ۲۰۰ است.
- ماسه‌بادی که دانه‌بندی آن از خاک‌های اطراف جاده عبوری از مناطق کویری تهیه شده است. این خاک در طبقه‌بندی یونیفاید، 'SP' نامیده می‌شود که منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۲) و خواص مهندسی خاک آن در جدول (۳) آمده است.

انتخاب دانه‌بندی بر اساس مراجعه به سایر مطالعات انجام شده در خصوص لغزندگی روسازی انجام گرفت، که از دانه‌بندی ۴ و نیز ۵ استفاده شده، و طبق بررسی‌های میدانی انجام شده، معمولاً دانه‌بندی شماره ۴ در ابتداء عمر بهره برداری آسفالت در مناطق جنوبی کشور استفاده شده و دانه‌بندی شماره ۵ برای روکش بعدی استفاده می‌شود و از آنجائیکه عمر بهره برداری اولین لایه آسفالت اجراء شده بیشتر از دوره‌های بعدی در نظر گرفته می‌شود و کاهش اصطکاک سطحی آن در اثر سایش و امکان افزایش حجم آلاینده‌ها روی آن بیشتر است، [Ahadi, Mansourkhaki and Nasirahmadi, 2010] بنابراین دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴، آیین‌نامه روسازی راههای آسفالتی ایران در این تحقیق بیشتر مورد توجه قرار گرفت [Iran pavement code No.234,2011]. برای ساخت نمونه‌ها و تعیین درصد قیر بهینه از روش طرح اختلاط مارشال بهره گرفته شده که درصد قیر ۴/۳ درصد بدست آمد. برای ساخت نمونه‌های آزمایشی برای تعیین مقاومت لغزشی از دستگاه ژیراتوری مطابق استاندارد AASHTOTP4 برای واقعی شدن شرایط آزمایشگاهی استفاده شده است. تراکم تحت فشار ۶۰۰



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه روان

## بررسی آزمایشگاهی و تحلیل آماری اثر آلاینده‌ها بر مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی

جدول ۳. خواص مهندس خاک‌های ریزدانه مورد استفاده

SP	طبقه‌بندی خاک (USCS)
۲۰/۰۶	وزن مخصوص خشک حداکثر (KN/m <sup>3</sup> )
۹/۲	درصد رطوبت بهینه (%)
۱/۱۲۵	چسبندگی (کیلو پاسکال)
۴۶/۵	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)

جدول ۴. مشخصات شیمیایی نمونه روغن موتور مورد استفاده در این تحقیق

فیزیکی- شیمیایی	گرانروی در ۱۰۰ °C	گرانروی شاخص (VI)	حداقل نقطه اشتعال	حداکثر نقطه ریزش	دانسیته در ۱۵ °C	قلیائی کل (TBN)
واحد	سانتی استوکس	-	°C	°C	Kg/m <sup>3</sup>	MGk OH/gr
روش آزمون	ASTM D-445	ASTM D-2270	ASTM D-92	ASTM D-97	ASTM D-1298	ASTM D-2896
مقادیر	۱۵	۱۶۵	۲۱۴	-۴۵	۸۸۶	۷/۵

سازنده و روشهای استاندارد بین المللی ASTM برای انجام آزمایشها در جدول (۵) ارائه شده است [ASTM, 2012].

در این تحقیق تاثیر آب (به عنوان رطوبت) و رنگ سرد ترافیکی که برای خطکشی استفاده می‌شود نیز بر مقاومت لغزندگی بررسی شده هر چند این دو، جزئی از آلاینده‌ها نیستند، ولی در این تحقیق در کنار سایر آلاینده‌ها اثرات آنها بررسی می‌گردد. مشخصات رنگ سرد ترافیکی در جدول (۶) ارائه شده است.

- دوده آگزوز خودرو از آگزوز و منبع آن از کامیون‌های عبوری تهیه گردید.
- روغن سوخته که از فروشگاه‌های مربوطه تهیه گردید که ترکیب شیمیایی-فیزیکی آن در جدول (۴) ارائه شده است.
- پودر لاستیک صنعتی که بر طبق روش-ASTM D5644 قطر ذرات آن ۲ میلیمتر و کمتر است از کارخانجات سازنده لاستیک دریافت شد که مشخصات فنی آن طبق کاتالوگ اعلامی شرکت

جدول ۵. مشخصات فیزیکی و شیمیایی پودر لاستیک

نوع مشخصه (ارائه شده شرکت تولیدکننده)	حدود نتایج	روشهای استاندارد برای انجام آزمایشها
وزن مخصوص	۱/۱۳ ± ۰/۰۲	ASTM- D471
استخراج با استون %	حداکثر ۲۵	ASTM- D1278
خاکستر حداکثر %	حداکثر ۱۲	ASTM- D1278 ASTM- D 1416
میزان هیدروکربن‌های لاستیکی %	۴۸ ± ۲	ASTM-D 2140
گرانروی (مونی ویسکوزیته) ML در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد	۵۰ ± ۱۰	ASTM-D 445 ASTM-D 1646
قدرت کششی (کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع)	۵۰ ± ۵	ASTM- D2240
کشیدگی %	۲۳۰ ± ۲۰	-
سختی %	۶۲ ± ۳	ASTM- D 1415
حالت تصفیه	خوب	-

جدول ۶. مشخصات فیزیکی و عملکردی رنگ سرد ترافیکی

ردیف	ویژگی / شرح آزمون	روش آزمون	نتیجه آزمون	حدود قابل قبول
۱	درصد جامد رنگ	بند ۱-۵-۱	۶۶/۵ درصد	حداقل ۷۵ درصد
۲	درصد رنگینه و پرکننده معمولی	بند ۲-۵-۱	۵۲/۳ درصد	حداکثر ۶۰ درصد
۳	گرانروی در درجه $25 \pm 1$ سانتی‌گراد	بند ۳-۵-۱	۸۷ واحد کریس	۱۰۵ - ۸۵ واحد کریس
۴	پایداری در برابر حرارت	بند ۳-۲-۵	مطابقت دارد	پایدار باشد
۵	مقاومت در برابر قلیا	بند ۴-۳-۵	مقاوم است	مقاوم باشد
۶	چگونگی قشر ظاهری رنگ	بند ۵-۲-۵	مطابقت دارد	مطابقت داشته باشد
۷	زمان خشک شدن سطحی	بند ۱-۶-۲-۵	قابل قبول	حداکثر ۲۰ دقیقه
۸	زمان خشک شدن کامل	بند ۲-۶-۲-۵	قابل قبول	حداکثر ۴۰ دقیقه
۹	مقاومت در برابر خراش	بند ۷-۲-۵	قابل قبول	حداقل ۱۰۰۰ گرم
۱۰	مقاومت در برابر شرایط جوی تسریع شده	بند ۱۵-۲-۵	مقاوم است	حداقل ۱۴۴ ساعت
۱۱	مقاومت در برابر سایش	بند ۱۶-۲-۵	۶ میلی‌لیتر	حداکثر ۵۰۰ میلی‌گرم
۱۲	مقاومت در برابر شستشو	بند ۱۷-۲-۵	مقاوم است	مقاوم باشد
۱۳	مقاومت در برابر رو آمدن قیر آسفالت	بند ۱۸-۲-۵	۳ واحد	حداکثر ۳ واحد
۱۴	وزن مخصوص	بند ۱۹-۲-۵	۱/۴۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب	حداقل ۱/۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب

## ۲-۲ آماده کردن نمونه‌ها

شود، پخش آلاینده‌ها در نصف سطح کاملاً مشخص و کنترل شده، انجام گرفت، و با توجه به متغییر بودن وزن حجمی آلاینده‌ها و اینکه معیار سطح در اصطکاک نسبت به وزن اهمیت داشت، توزیع سطحی به گونه‌ای انجام شد که مقدار آلودگی مورد استفاده فقط سطح مشخصی از نمونه را کاملاً پوشش دهد، آلاینده‌های پودری با کاردک و آلاینده‌های سیال با قلمو نمونه را آغشته می‌کردند (میزان پوشش، برحسب واحد سطح ۵۰٪). شکل (۳) نمونه آسفالتی را در دو حالت مختلف نمایش می‌دهد.

ابتدا سطح نمونه‌ها کاملاً شسته و تمیز شده و سپس برای خشک شدن کامل نمونه‌ها و هم‌دما شدن سطح، داخل گرم‌کن با درجه حرارت  $20^{\circ}$  قرار گرفتند. نمونه‌ها در سه حالت بدون آلودگی، نیمه آلوده و تمام آلوده مورد آزمایش قرار گرفت، برای اینکه شرایط نمونه‌های نیمه آلوده یکسان باشد و با توجه به اینکه آلاینده‌های سیال مانند روغن و رنگ امکان توزیع یکنواخت آنها (به دلیل روان شدن) در سطح فراهم نبود، و اینکه امکان مقایسه بین تمام آلودگی‌ها فراهم



شکل ۳. نمونه سطوح نیمه آلوده (الف) نیمه آلوده (ب) و تمام آلوده

۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ درجه مورد آزمایش قرار گرفتند. در دماهای ۳۰ درجه و بیشتر، نمونه‌ها تنها در حالت خشک بررسی می‌شوند، چرا که در دمای ۳۰ درجه و بیشتر احتمال بارندگی تقریباً وجود

علاوه بر شرایط آلودگی مختلف، در این تحقیق به تأثیر ترکیب دما و آلاینده نیز پرداخته شده است، برای این امر از دستگاه گرم‌کن درجه‌بندی شده استفاده شد و نمونه‌ها در دماهای ۲۰،

ندارد، دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، نیز از جمله دماهای ثبت شده در شهرهای ایران در سال ۱۳۹۴ است.

### ۳. آزمایش آونگ انگلیسی

برای تعیین عددپاندول (آونگ) ۲، آزمایش آونگ انگلیسی مطابق استاندارد ASTM E-303 انجام گرفت، مقاومت لغزندگی در حالت‌های زیر بدست آمد [ASTM,2011]:

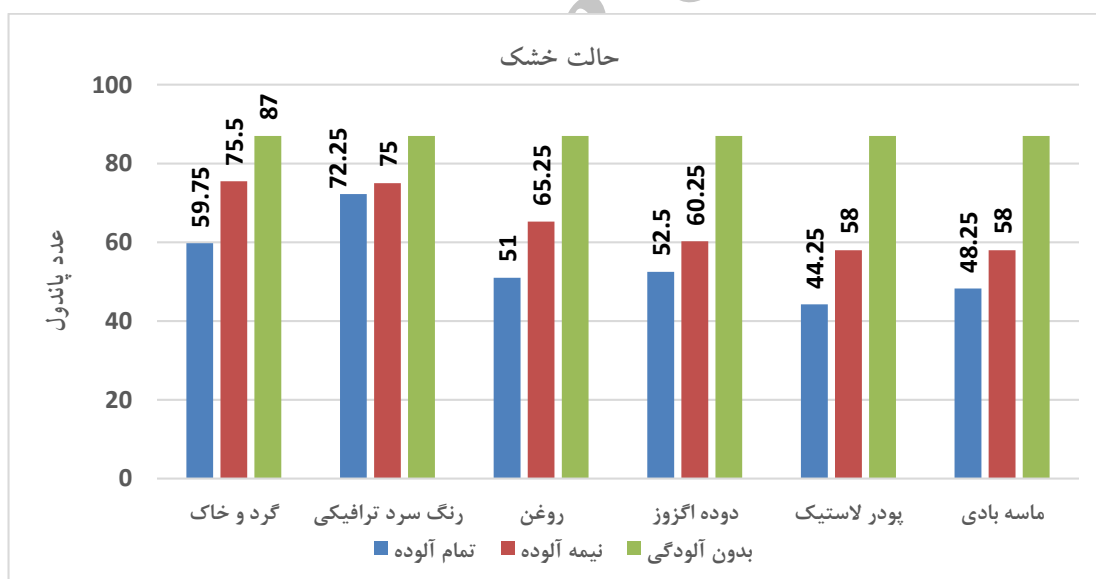
۱. بدست آوردن عدد پاندول در حالت خشک و مرطوب برای هر نمونه
۲. بدست آوردن عدد لغزندگی برای هر نمونه در دمای محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) در شرایط خشک و مرطوب و در صورت حذف آلاینده به دو صورت نیمه‌آلوده و تمام‌آلوده
۳. بدست آوردن عددپاندول در حالت خشک و در حضور آلاینده در دو حالت نیمه‌آلوده و تمام‌آلوده در دماهای مختلف

### ۴. نتایج مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی

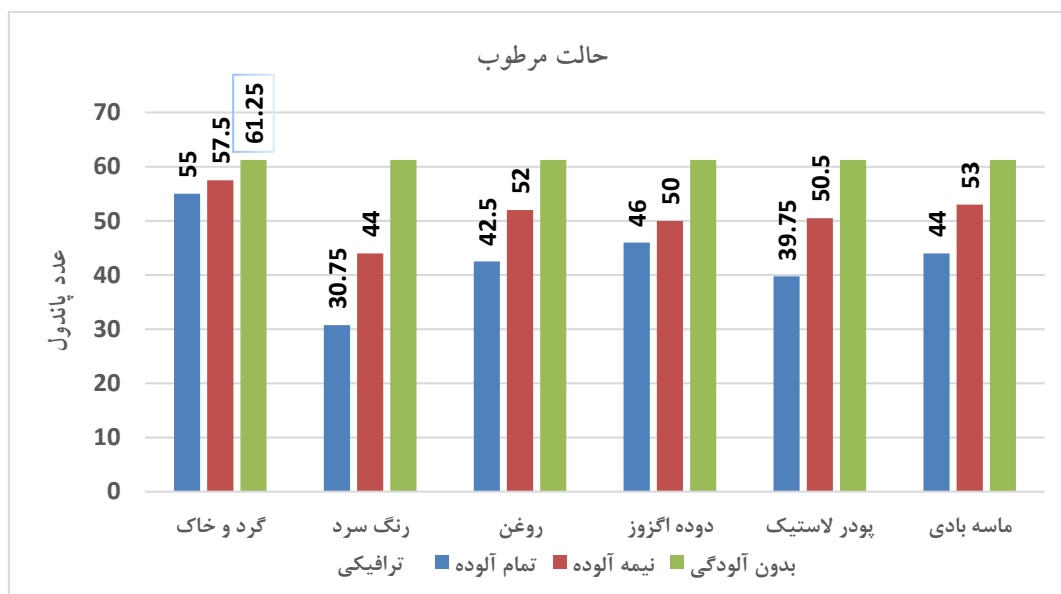
#### ۴-۱ بررسی اثر تغییرات نوع آلودگی و رطوبت بر مقاومت لغزندگی مخلوط آسفالتی

با توجه به اعداد بدست آمده از آزمایش پاندول انگلیسی، نمودار تغییرات عدد پاندول در حضور آلاینده در دو حالت خشک و مرطوب در شکل (۴) و (۵)، مشاهده می‌شود. هم در حالت خشک و هم در حالت تر تمام آلاینده‌ها باعث کاهش عدد پاندول و با افزایش میزان آلاینده‌ها مقدار عدد پاندول کمتر می‌شود.

در حالت نیمه‌آلوده ماسه روان، کاهش در حدود ۳۳ درصد و در حالت تمام‌آلوده مقدار عددپاندول ۴۴ درصد کاهش یافت، پودر لاستیک کاهش لغزندگی بیشتری در مقایسه با ماسه روان دارد، چون پودر لاستیک نرم و لغزنده‌تر از ماسه روان است.



شکل ۴. تغییرات لغزندگی در حضور آلاینده‌ها در حالت خشک



شکل ۵. تغییرات لغزندگی در حضور آلاینده‌ها در حالت مرطوب

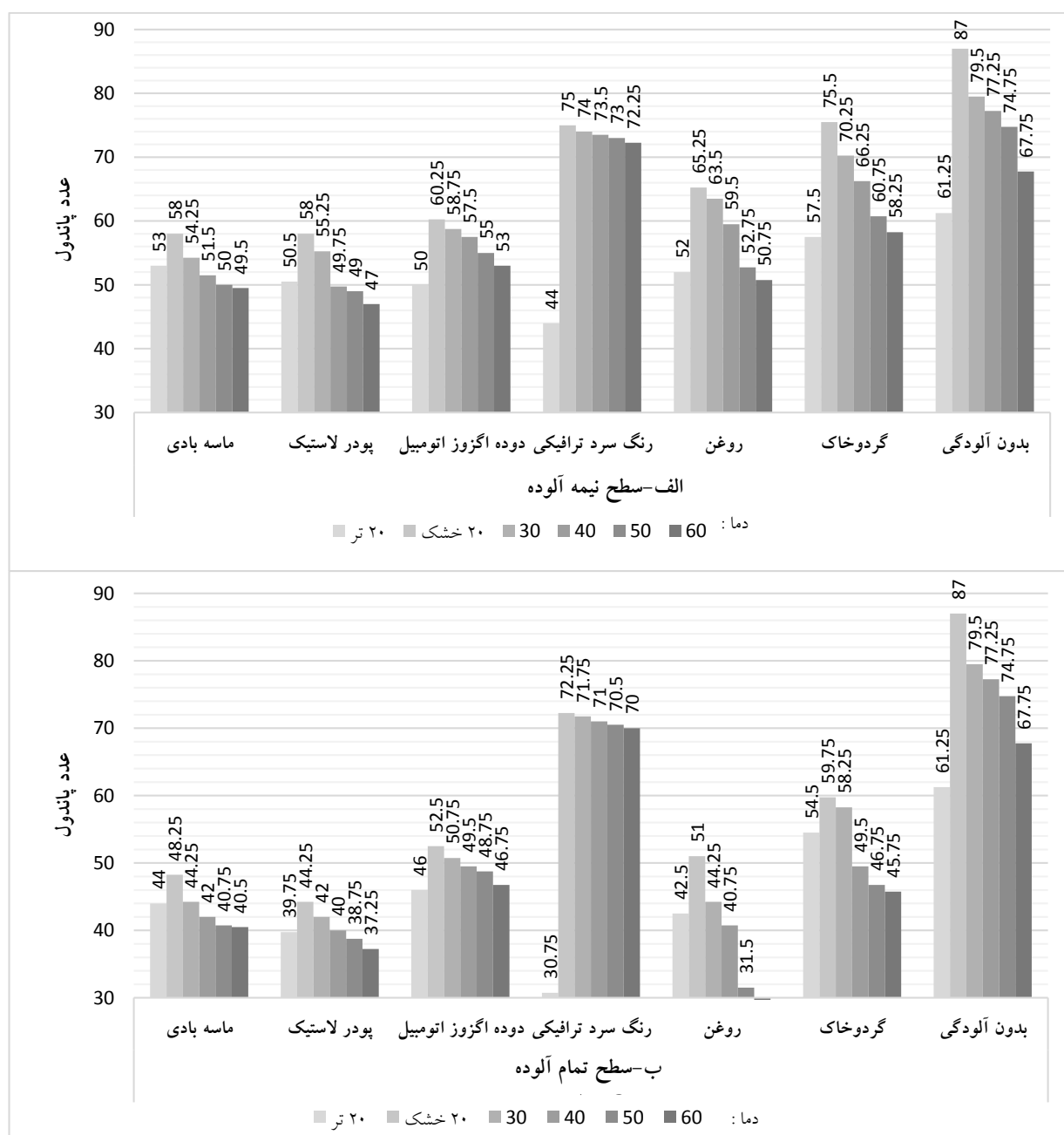
#### ۴-۲ بررسی اثر تغییرات دما بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی

در بسیاری از جاده‌های مناطق کویری که بارندگی اندک است و عموماً دمای هوا نیز بالاست، تغییرات دما باعث تغییر در مقاومت لغزندگی سطح جاده‌ها می‌شود، به ویژه اگر حجم عبور وسایل نقلیه در این جاده‌ها زیاد باشد بالطبع آلاینده‌های ایجاد شده توسط عبور وسایل نقلیه از قبیل دوده آگزوز، پودر سایش یافته لاستیک و غیره بیشتر خواهد بود که در ادامه به بررسی اثر همزمان دما و وجود آلاینده‌ها در سطح جاده بر مقاومت لغزندگی پرداخته می‌شود. شکل (۶) نمودار تغییرات دما و نوع مواد آلاینده بر مقاومت لغزندگی را نمایش می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود، حضور آلاینده‌ها در سطح روسازی همراه با افزایش دما، باعث کاهش بیشتری در عدد پاندول می‌شود. در مورد ریزگردها مشاهده می‌شود که کاهش عدد پاندول در دماهای مختلف تقریباً مشابه حالت بدون آلودگی است، چرا که رفتار ریزگردها تحت تاثیر دما نیست ولی برای آلودگی روغنی هرچه دما بالاتر رود چون روغن روان‌تر می‌شود، سطح لغزنده‌تر می‌شود.

دوده آگزوز دارای ذرات بسیار ریزی است که به راحتی داخل حفره‌های سطح روسازی قرار می‌گیرند و باعث می‌شوند تا میزان تماس لاستیک با سطح نمونه کاهش یابد ولی ذرات آن خیلی ریز هستند و کمتر زیر سطح لاستیک می‌لغزند و در نتیجه کاهشی که در عدد پاندول ایجاد می‌کنند، کمتر از ماسه بادی و پودر لاستیک است. هنگامی که روغن بر روی سطح ریخته شد، کاهش بسیار شدیدی در مقاومت لغزندگی مشاهده شد، اعداد به دست آمده به طور قابل توجه از حد استاندارد مجاز مقاومت لغزندگی برای جاده‌ها و بر اساس استاندارد مؤسسه راه انگلستان پایین‌تر بوده است. در خصوص رنگ سرد ترافیکی که بر روی آسفالت به منظور علائم افقی استفاده می‌شود، نتایج نشان داد که این سطح بسیار لغزنده است، به طوری که میزان کاهش لغزندگی در حالت نیمه‌آلوده ۲۸ درصد و در سطح تمام‌آلوده، ۴۹ درصد را نشان داد. ریزگردها که به عنوان یکی از مشکلات زیست‌محیطی نیز مطرح است، مانند دوده بر روی سطح روسازی قرار می‌گیرند و کاهش لغزندگی را در پی دارند. مشاهدات نشان داد که هنگامی که سطح در حضور ریزگردها مرطوب شود، ماده‌ای تقریباً شبیه به گل و چسبنده‌ای ایجاد می‌شود که این ماده نرخ کاهش لغزندگی را می‌کاهد.





شکل ۶. اثر تغییرات دما بر مقاومت لغزندگی در دماهای مختلف (الف-نیمه آلوده و ب-تمام آلوده)

### ۳-۴ تفسیر آماری داده‌های بدست آمده

به علت گستردگی تعداد داده‌های بدست آمده، تحلیل آماری در دو وجه، درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها (CRT) و شبکه عصبی انجام شد. در این پژوهش جهت تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS، درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها رسم شده است. درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها را با استفاده از الگوریتم‌های متفاوت می‌توان رسم نمود. با توجه به مجموعه داده‌ای تحت بررسی، انتخاب الگوریتم مناسب برای اعمال روی داده‌ها ضروری به نظر

می‌رسد. در این مطالعه از الگوریتم کارت جهت ترسیم درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها استفاده شده است، زیرا این الگوریتم برای متغیرهای وابسته از نوع کمی گسسته مناسب است و چون در این الگوریتم هر شاخه درخت به تنها دو زیرشاخه تقسیم می‌گردد سهولت بیشتری را در تحلیل نتایج ایجاد می‌کند.

همچنین یک مدل ناپارامتری و بدون هرگونه پیش فرض در خصوص رابطه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته است و از روش‌های مهم داده‌کاوی است و ابزاری قدرتمند برای تعیین مهم‌ترین متغیرهای مستقل تاثیرگذار بر متغیر وابسته است

BPN برابر ۶۳/۸ می‌شود و در صورتی که روسازی تر باشد، میانگین عدد BPN، ۴۵/۳ است، که این دو گره نشان می‌دهند در صورتی که روسازی بدون آلودگی باشد یا دارای آلودگی از نوع رنگ سرد ترافیکی و گرد و خاک باشد با افزایش رطوبت روسازی، عدد BPN کاهش می‌یابد.

در سمت راست نمودار گروه سایر آلودگی‌ها بر اساس پارامتر میزان آلودگی به دو زیر شاخه ۵ و ۶ تقسیم شده‌اند. گره ۵ نشان می‌دهد در صورتی که روسازی نیمه‌آلوده باشد، میانگین BPN در حدود ۵۱/۴ است و گره ۶ نشان می‌دهد در صورتی که روسازی تمام‌آلوده باشد میانگین BPN در حدود ۴۱ است. این دو گره نشان می‌دهد برای سایر آلودگی‌ها با افزایش میزان آلودگی میانگین عدد BPN کاهش می‌یابد. گره‌های پایانی ۹ و ۱۰ گره ۵ را بر اساس درجه حرارت به دو زیر گره کوچکتر تقسیم‌بندی می‌کند. گره ۹ نشان می‌دهد در درجه حرارت ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد میانگین عدد BPN در حدود ۴۸ است در صورتی که گره ۱۰ نشان می‌دهد در درجه حرارت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میانگین عدد BPN در حدود ۵۳ است. این دو گره نشان می‌دهند در صورتی که آلودگی از نوع سایر آلودگی‌ها باشد و روسازی نیمه‌آلوده باشد، در درجه حرارت‌های بالاتر (۶۰ و ۵۰) میانگین عدد BPN کاهش می‌یابد. گره پایانی ۱۱ و گره ۱۲، زیر گروه گره ۶ می‌باشند. این دو گره نوع آلودگی‌ها را به دو دسته کوچکتر تقسیم نموده‌اند. گره پایانی ۱۱ نشان می‌دهد در صورتی که روسازی تمام‌آلوده و از نوع آلودگی دوده باشد ۶/۷ درصد داده‌های آموزشی را در برخواهد گرفت و میانگین عدد BPN در حدود ۴۵/۵ است و گره ۱۲ نشان می‌دهد در صورتی که آلودگی از نوع روغن، پودر لاستیک و ماسه‌بادی باشد، میانگین عدد BPN ۳۹/۷ است. گره ۱۲ نشان می‌دهد آلودگی‌های روغن، پودر لاستیک و ماسه‌بادی از اهمیت بیشتری نسبت به سایر آلودگی‌ها برخوردارند. دو گره پایانی ۱۵ و ۱۶ گره ۱۲ را بر اساس درجه حرارت به دو زیرگروه تقسیم می‌کند. گره‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهند در صورت وجود آلودگی از نوع روغن، پودر لاستیک و ماسه بادی در درجه حرارت ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد میانگین عدد BPN در حدود ۳۵ است و در درجه حرارت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد، میانگین عدد BPN، به حدود ۴۲ افزایش می‌یابد. گره ۷ و گره پایانی ۸ دو زیر گروه گره ۳ هستند که بر اساس نوع آلودگی روسازی‌های خشک را

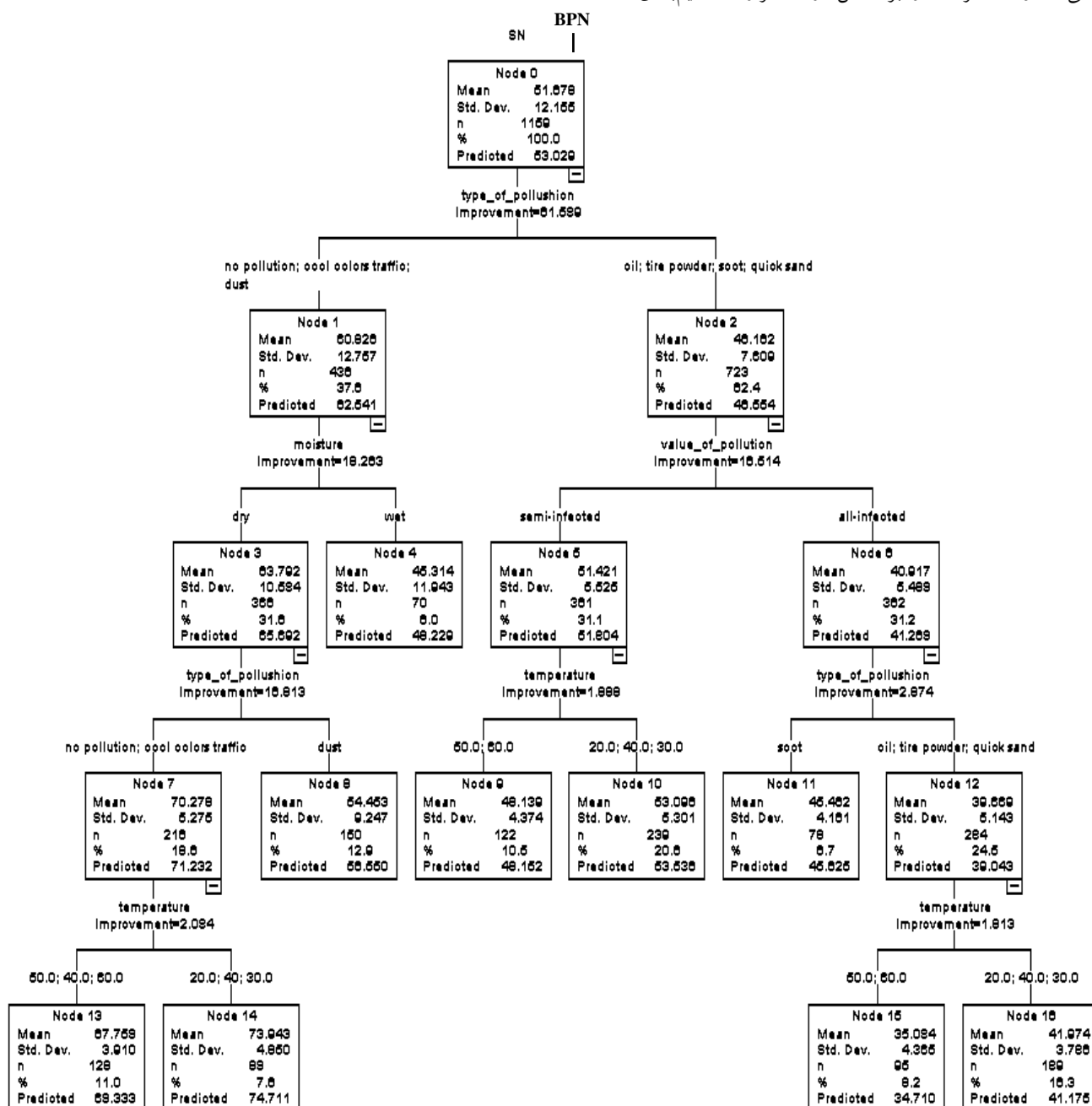
[Chang and Chien, 2013] و همچنین قادر به شناسایی روابط پیچیده بین متغیرها است و احتیاجی به تعیین وابستگی بین متغیرهای غیروابسته ناست [Tavakoli Kashani, Rabieyan, and Besharati, 2014]. در مدل کارت معمولاً ۷۰٪ داده‌ها به صورت تصادفی انتخاب و به مدل آموزش اختصاص یافته و ۳۰٪ دیگر برای مدل آزمایش انتخاب می‌شوند. مدل بر اساس داده‌های آموزش ساخته شده و سپس داده‌های آزمایش به آن اعمال می‌گردد تا دقت پیش‌بینی مدل ارزیابی گردد [Chang and Wang, 2006]. ریسک برآورد شده به میزان ۳۵٪ برای داده‌های آزمایشی و ۳۷٪ برای داده‌های آموزشی است. خطای برآورد شده ۲ نشان می‌دهد در صورت استفاده از این درخت جهت طبقه‌بندی داده‌های جدید، احتمال ۳۷٪ وجود دارد که داده‌ها اشتباه طبقه‌بندی شوند، که این عدد در تحلیل‌های آماری قابل قبول است و با کاهش این عدد پیچیدگی غیرضروری در مدل ایجاد خواهد شد.

شکل (۷) درخت تقسیم بندی گروه‌های دمایی، نوع آلودگی، میزان آلودگی و میزان رطوبت را نمایش می‌دهد. در این شکل درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها حاصل از اطلاعات موجود آورده شده است، تفسیر درخت به دست آمده در ذیل ارائه می‌شود: گره صفر که همان ریشه و اولین گره است، مشخصات متغیر وابسته BPN را نشان می‌دهد، این گره نشان می‌دهد ۷۰٪ داده‌ها به تعداد ۱۱۵۹ عدد است که میانگین BPN این داده‌ها ۵۱/۷ است. گره صفر توسط متغیر نوع آلودگی به دو شاخه تقسیم شده است. این نشان می‌دهد که مهمترین متغیر تاثیرگذار بر عدد BPN روسازی، نوع آلودگی روسازی است. گره ۱ نشان می‌دهد در صورتی که روسازی بدون آلودگی باشد یا آلودگی از نوع رنگ سرد ترافیکی و گرد و خاک داشته باشد، میانگین BPN در حدود ۶۱ است و گره ۲ نشان می‌دهد در صورتی که آلودگی از نوع روغن، پودر لاستیک، دوده و ماسه بادی باشد میانگین عدد BPN در حدود ۴۶ است و ۶۲/۴ درصد داده‌های آموزشی در این گره قرار گرفته‌اند. این دو گره (۱ و ۲) اهمیت نوع آلودگی روغن، پودر لاستیک، دوده و ماسه بر کاهش عدد BPN را نشان می‌دهد. در سمت چپ نمودار گروه آلودگی‌های از نوع رنگ سرد ترافیکی، گردوخاک و روسازی بدون آلودگی بر اساس پارامتر رطوبت به دو زیر شاخه ۳ و ۴ تقسیم شده‌اند. گره ۳ نشان می‌دهد در صورتی که روسازی خشک باشد، میانگین

## بررسی آزمایشگاهی و تحلیل آماری اثر آلاینده‌ها بر مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی

می‌کند و نشان می‌دهد در صورتی که روسازی خشک و آلودگی آن از نوع رنگ سرد ترافیکی و یا بدون آلودگی باشد. در درجه حرارت‌های ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میانگین عدد BPN ۶۷/۷ خواهد شد و در درجه حرارت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میانگین عدد BPN به حدود ۷۴ خواهد رسید. مشاهده جدول ۷ بیانگر مقایسه میزان اهمیت متغیرهای مستقل در روش تقسیم‌بندی گروه‌ها است.

تقسیم‌بندی می‌کند. گره ۷ نشان می‌دهد در صورتی که روسازی خشک و یا بدون آلودگی باشد و یا آلودگی از نوع رنگ سرد ترافیکی باشد، میانگین عدد BPN به ۷۰ خواهد رسید در صورتی که گره پایانی ۸ نشان می‌دهد در صورتی که روسازی خشک باشد و آلودگی از نوع گردو خاک باشد، میانگین عدد BPN به حدود ۵۴/۵ خواهد رسید. این گره نشان دهنده اهمیت آلودگی گردو خاک در روسازی‌های خشک را نشان می‌دهد. دو گره پایانی ۱۳ و ۱۴، گره ۱۱ را بر اساس درجه حرارت تقسیم‌بندی



شکل ۷. درخت تقسیم بندی متغیرها در روش CART

جدول ۷. میزان اهمیت متغیرهای مستقل بدست آمده به روش درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها

متغیر مستقل	اهمیت نسبی (درصد)
نوع آلودگی	۱۰۰
رطوبت	۲۲/۶
میزان آلودگی	۱۹/۹
دما	۱۸/۵
فیلر	۰/۸

ادامه تأثیر تغییرات ترکیب دما و حضور آلاینده‌ها بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌ها بررسی شد، خلاصه‌ای از این نتایج در ادامه شرح داده می‌شود.

- تمام آلاینده‌ها سبب کاهش مقاومت لغزندگی شدند، همچنین هر چه مقدار آلاینده‌ها بیشتر شود کاهش بیشتری را به همراه دارند.
- در حالت خشک بیشترین کاهش بدست آمده هنگامی اتفاق افتاد که سطح پوشیده از ماسه‌بادی بود. هنگامی که سطح کاملاً پوشیده از ماسه بادی بود حدود ۴۲ تا ۴۵ درصد کاهش در عدد پاندول برای دانه‌بندی‌های مختلف نسبت به حالت بدون آلاینده ایجاد شد. البته میزان کاهش عدد پاندول هنگامی که سطح پوشیده از پودر لاستیک است نیز تقریباً به اندازه ماسه‌بادی است. در حالت تر نیز در حضور رنگ سرد ترافیکی بیشترین کاهش بدست آمد. که این میزان کاهش بین ۴۹ تا ۵۵ درصد است.

در این تحقیق جهت دسته‌بندی اطلاعات و مقایسه آن‌ها با روش درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها و همچنین پیش‌بینی عدد پاندول در شرایط مشابه از روش شبکه عصبی استفاده شده است. شبکه عصبی مورد تحلیل شامل ۷ ورودی که از داده‌های بدست آمده می‌باشند، ۱۰ گره در لایه پنهان و یک لایه خروجی که همان عدد پاندول است، است. آنالیز حساسیت، برای تعیین اهمیت نسبی متغیرهای ورودی انجام شد. همانطور که از جدول (۸) مشاهده می‌شود، نوع و میزان آلودگی، بیشترین اهمیت را دارند. از روش درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها (جدول (۷)) نیز مشخص گردید که نوع آلاینده بیشترین تأثیر را در کاهش عدد لغزندگی دارد، که نتایج این دو تحلیل آماری همسو هستند.

## ۵. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق، بررسی و تحلیل تأثیر حضور آلاینده‌های مختلف بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی است که در

جدول ۸. آنالیز حساسیت ورودی‌های مختلف شبکه عصبی

شماره	پارامتر ورودی	الگوریتم گارسون		روش وزن‌های اتصالات	
		میزان اهمیت	رتبه	میزان اهمیت	رتبه
۱	دما	۰/۲۱۹۰	۴	-۰/۵۲۴۵	۴
۲	فیلر	۰/۰۲۶۸	۶	-۰/۱۸۵۰	۶
۳	میزان آلودگی	۲/۲۶۹۷	۲	-۵/۵۰۹۸	۲
۴	نمونه	۰/۰۳۶۵	۵	۰/۳۷۹۹	۵
۵	نوع آلودگی	۳/۳۶۸۸	۱	۱۷/۰۴۶۳	۱
۶	رطوبت	۰/۹۹۹۶	۳	-۳/۹۲۳۹	۳

- 2- British Pendulum Number (BPN)
- 3- Classification and Regression Trees
- 4- Discrete Quantitative Variable
- 5- Train Data
- 6- Test Data
- 7- Estimated Risk
- 8- Artificial Neural Network
- 9- Contaminant

## ۸. منابع

- Ahadi, M. R., Mansourkhaki, A. and Nasirahmadi, K. (2010) "Effects of coarse texture on Skid Resistance control and decrease accident", *Rahvar Journal*, Vol.1, No.4. pp. 1-11 [In Persian].
- Asi, I. M. (2007) "Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes", *Building and Environment*, Vol. 42, No. 1, p.p. 325-329.
- ASTM, (2011) "Annual Book of ASTM Standards: Volume 04.03, Section 4-Construction, Road and Paving Materials", *Vehicle-Pavement Systems*, USA.
- ASTM (2012) "Annual Book of ASTM Standards, Vol. 09.01. Standard Test Methods for Rubber from Natural Sources", *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Bennis, T. A. and De Witt, L. B. (2003) "PIARC State-of-the-Art on friction and IFI", In *1st Annual Australian Runway and Roads Friction Testing Workshop*.
- Cao, P., Yan, X., Bai, X. and Yuan, C. (2010) "Effects of Contaminants on Skid Resistance of Asphalt Pavements", In *Traffic and Transportation Studies 2010*, pp. 1341-1351. ASCE, Doi: 10.1061/41123(383)128
- Chang, L.Y. and Chien, J. T. (2013) "Analysis of driver injury severity in truck involved accidents using a non-parametric classification tree model", *Safety Science*, Vol. 51, p.17-22. doi:10.1016/j.ssci.2012.06.017
- Chang, L. Y. and Wang, H. W. (2006) "Analysis of traffic injury severity: An application of nonparametric classification tree techniques", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 38, No.5, pp. 1019-1027.
- Nemeth, Andrew F., Ward, D. A. and Woodington, W. G. (2010) "The effect of asphalt pavement on storm water

- تأثیر تغییرات دما بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی قابل توجه است. به طور کلی تمام مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی و فیلرهای مختلف افزایش درجه حرارت موجب کاهش مقاومت لغزندگی می‌شود. در دانه‌بندی‌های مختلف در بیشترین دما که ۶۰ درجه بود کاهشی در حدود ۲۱ تا ۲۶ درصد نسبت به دمای ۲۰ درجه مشاهده شد.
- تغییرات دما در حضور آلاینده‌ها باعث کاهش بیشتر مقاومت لغزندگی شد. در حضور برخی از آلاینده‌ها مانند روغن نرخ کاهش مقاومت لغزندگی افزایش یافت و در حضور برخی دیگر از آلاینده‌ها مانند ماسه‌بادی نرخ کاهش مقاومت لغزندگی کاهش یافت.
- اعداد بدست آمده با استفاده از روش درخت تقسیم‌بندی گروه‌ها توسط نرم‌افزار SPSS تحلیل شدند و مشخص شد که از بین متغیرهای موجود نوع آلاینده‌ها بیشترین اثر را بر مقاومت لغزندگی سطح جاده دارد. همچنین بعد از تحلیل داده‌ها به روش شبکه عصبی مصنوعی نیز مشاهده شد که نوع آلاینده‌ها بیشترین تأثیر را در تغییر مقاومت لغزندگی نمونه‌ها دارند که از هر دو روش نتیجه مشابهی بدست آمد.
- در نتایج تحقیق به تفصیل تبیین شد، با شستشو نقاط حادثه‌خیز با آلودگی سطحی زیاد و حذف آلاینده‌ها، بعد از پایان فصل خشک و قبل از اولین بارندگی، بخشی از خطرات ناشی از لغزندگی جاده‌ها را می‌توان کاست.

## ۶. سپاسگزاری

لازم است از همکاری مدیریت راهداری اداره کل راه و شهرسازی استان یزد بویژه آقایان ذاکر و دهقان و کارخانه صنایع لاستیک یزد در تامین مواد اولیه آزمایشها سپاسگزاری گردد. همچنین از راهنمایی خانم الهی‌زاده و آقای اسدی در تحلیل آماری داده‌ها نیز قدردانی می‌شود.

## ۷. پی‌نوشتها

- 1- Sand Poorly Graded

- Tyfour, W. R. (2009) "Tire skid resistance on contaminated wet pavements", Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Vol.3, No. 2, p.p. 119-124.

- Wambold, J. C. and Andresen, A. (1998) "The measurement and theory of tire friction on contaminated surfaces", Transportation Conference Proceedings, 94-98.

- Yaron, R. and Nesichi, S. (2005) "Alleviating the skid resistance problem- The Israeli experience." The First International Conference on Surface Friction for Roads and Runways, Christchurch Zealand, pp.135-145.

contamination", Project Number: IQP-PPM-0906, Faculty of Worcester Polytechnic Institute, pp.1-79.

- Iran. Ministry of Roads and Urban Development. Deputy for Strategic Supervision. Bureau of Technical Execution System (2011) "Iran highway asphalt paving Code No. 234", 1st Edition, Asphalt Institute of Iran, PPI-279 [In Persian].

- Tavakoli Kashani, A., Rabieyan, R. and Besharati, M. M. (2014) "A data mining approach to investigate the factors influencing the crash severity of motorcycle pillion passengers", Journal of Safety Research, Vol. 51, p.p. 93-98

دکتر محمدمهدی خبیری، درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران راه و ترابری را در سال ۱۳۷۸ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به دریافت درجه دکتری در همان رشته و دانشگاه گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان راه و ترابری و حمل و نقل بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیاری در دانشگاه یزد است.



دکتر محمدحسن میرابی مقدم، درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران راه و ترابری را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود. در سال ۱۳۸۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان عمران راه و ترابری و حمل و نقل بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه سیستان و بلوچستان است.



مرتضی ذات اکرم، درجه کارشناسی را در سال ۱۳۹۱ در رشته مهندسی عمران از دانشگاه سیستان و بلوچستان اخذ کرده و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران، راه و ترابری را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه یزد دریافت نمود.

