بررسی کاربرد سامانه‌های لیزری در مدیریت روسازی (PMS)

مقاله پژوهشی

سید علی صحاف، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
شهریار رحیمی*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Shahriar.rahimi@mail.um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷- پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۵
صفحه ۸۶-۷۵

چکیده

لایه سطحی روسازی مسیر از اهمیت ویژه‌ای جهت برآورده نمودن نیازهای بنیادین حمل و نقل همچون ایمنی، راحتی و سازگاری با محیط زیست برخوردار است. به منظور کاهش هزینه‌های نگهداری و بهسازی جاده‌ها و بهبود سطح سرویس شبکه راه‌ها، سامانه‌های مدیریت روسازی نیازمند داده‌های جزئی و قابل اعتماد در مورد وضعیت شبکه راه‌ها است. پویش‌گر (اسکنر)های لیزری می‌توانند به گونه‌ای نوآورانه برای جمع‌آوری اطلاعات لایه سطحی یک مسیر با داده‌هایی همگن و دقیق در فقط یک بار سنجش، مورد استفاده قرار گیرند. با گسترش حس‌گرهای ۳ بعدی و فناوری اطلاعات، دستگاه‌های تصویربرداری خطی سه بعدی لیزری با سرعت و دقت بالا جهت جمع‌آوری داده‌های سطح روسازی مسیر در دسترس قرار گرفته‌اند. در این مقاله مروری بر کلیدی‌ترین پیشرفت‌های سال‌های اخیر در زمینه استفاده از سامانه‌های خودکار مبتنی بر لیزر برای اندازه‌گیری و ارزیابی خرابی‌های روسازی جاده‌ها خواهیم داشت. همچنین کاربردها و قابلیت‌های این سامانه‌ها به طور جامع مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: کاهش هزینه، نگهداری راه، جمع‌آوری داده، خرابی‌های روسازی، LCMS، ارزیابی کیفیت روسازی

۱-مقدمه

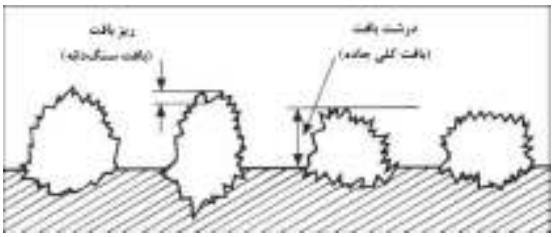
امروزه روسازی جاده‌ها نقش مهمی در رشد اقتصادی یک کشور ایفا می‌کنند. بنابراین پایش کیفیت روسازی جاده‌ها در زمان بهره‌برداری از طریق تشخیص به موقع خرابی‌ها و به کارگیری اقدامات نگهداری و بهسازی به هنگام یک عمل حیاتی است. پیاده سازی سامانه‌های مدیریت روسازی یکی از بهینه‌ترین روش‌ها جهت پاسخ‌گویی به نیاز پایش دائم و به روز کیفیت روسازی راه‌ها است (Di Mascio and Moretti, 2019). سامانه‌های مدیریت روسازی تنها زمانی می‌توانند به صورت بهینه عمل نمایند که براساس ترکیب سازمان یافته‌ای از تمام فعالیت‌های مرتبط با روسازی راه (شامل برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و نگهداری، بهسازی و بازسازی، ارزیابی، تحلیل اقتصادی و پژوهش و توسعه) و پایگاه داده‌ها پایه‌گذاری شده باشد (Inzerillo, Di Mino et al., 2018). یک سامانه مدیریت روسازی بهینه بایستی برای جمع‌آوری پارامترهای مختلف، الزاماتی را بدین شرح رعایت نماید: ۱- هزینه جمع‌آوری داده‌ها باید حداقل ممکن باشد. ۲- نکات ایمنی و امنیتی را رعایت کند. ۳- بتوان داده‌ها را در زمانی کوتاه تجزیه و تحلیل کرد. ٤- فرایند جمع‌آوری داده نباید خللی در وضعیت و سرعت عبور و مرور، به ویژه در جاده‌هایی که دارای بار ترافیکی سنگین هستند؛ وارد کند(Di Mascio and Moretti, 2019).

در همین راستا مهمترین قابلیت‌های سامانه‌های مدیریت روسازی عبارتند از: پیاده‌سازی یک شاخص سرویس‌دهی (که نمایانگر کیفیت روسازی است.) و یک پیش‌بینی از عملکرد روسازی، که به صورت رابطه‌ای بین شاخص سرویس دهی و زمان/ترافیک بیان می‌شود (Zhang, Li et al., 2017). کیفیت روسازی مسیر از ۲ پارامتر اصلی تشکیل شده است: تاب لغزشی و کیفیت رانندگی(Fukuhara, Terada et al., 1990) . عوامل مؤثر بر کیفیت رانندگی عبارتند از ناهمواری‌ها و خرابی‌های روسازی راه. سه نوع اصلی خرابی‌های روسازی مسیر عبارتند از ترک خوردگی، شیارشدگی و ناهمواری‌های طولی جاده (Lin and Ho, 2016).

یکی از مهمترین خرابی‌های سطح روسازی جاده، خرابی شیارشدگی است. این خرابی باعث فرورفتگی در ناحیه چرخ‌های وسیله نقلیه شده که ممکن است باعث تجمع آب در ناحیه خرابی و یخزدگی و در نتیجه کاهش اصطکاک لاستیک و سطح روسازی شود(Hoang, 2019) . این خرابی به خصوص در نواحی جنگلی باعث کاهش ایمنی ترافیک و افزایش احتمال وقوع سانحه می‌شود. تشخیص و محاسبه طول ناحیه خرابی شیار شدگی در روش‌های سنتی بسیار وقت‌گیر و پر هزینه است (Akgul, Yurtseven et al., 2017). ترک خوردگی سطح روسازی به دلایل مختلفی به وجود می‌آید و این ترک‌ها انواع مختلفی همچون ترک‌های پوست سوسماری یا موزاییکی، ترک‌های طولی، ترک‌های عرضی و ... را شامل می‌شوند. در صورت عدم تشخیص به موقع وقوع ترک خوردگی و نوع آن و عدم استفاده از روش‌های مناسب جهت نگهداری و بهسازی سطح روسازی، این ترک‌ها گسترش یافته و باعث وقوع سایر خرابی‌ها همانند ایجاد چاله شده و در نتیجه شاخص کیفیت روسازی به طور قابل ملاحظه ای افت می‌کند(Gong, Sun et al., 2018) .

بافت سطحی روسازی تأثیر به سزایی بر اصطکاک بین چرخ وسیله نقیله و سطح روسازی دارد. جابه‌جایی‌های وسیله نقلیه همانند چرخش و ترمز به مقاومت کافی در برابر سرخوردگی نیاز دارد تا وسیله پایداری خود را حفظ نماید. علاوه بر این تاب لغزشی روسازی بر دوام لاستیک وسایل نقلیه، آلودگی صوتی ناشی از عبور و مرور (Chen, Ling et al., 2018)، عدم راحتی در تردد، مقاومت در برابر غلتش و استهلاک وسایل نقلیه اثرگذار است (Chen, Huang et al., 2019).

بافت سطحی اثرگذار بر تاب لغزشی به دو نوع بافت ریز و بافت درشت تقسیم می‌شود. به طور خاص بافت ریز به بافت سطحی اطلاق می‌شود که دامنه طول موج کمتر از ۰,۵ میلی‌متر و دامنه اوج کمتر از ۰,۲ میلی‌متر داشته باشد در صورتی که مقادیر مربوط به بافت درشت برای دامنه طول موج بین ۰,۵ تا ۵۰ میلی‌متر و برای دامنه اوج بین ۰,۲ تا ۱۰ میلی‌متر است (Wang, Yan et al., 2011).



شکل ۱. ریز بافت و درشت بافت

بافت ریز مقدار صیقلی بودن سطح جاده را مشخص می‌کند. در حالی که بافت درشت اثر مستقیم‌تری بر تاب لغزشی دارد. تأثیر بافت درشت بر تاب لغزشی با زبری سطح جاده مرتبط است که بر روی نفوذ آب در محل رد چرخ وسایل نقلیه، تغییرشکل و فرسودگی عاج‌های لاستیک وسایل نقلیه، ضریب اصطکاک در سرعت‌های بالا و همچنین شیب نمودار رابطه اصطکاک_سرعت تأثیر می‌گذارد. هرچه بافت درشت بهتر باشد شیب نمودار رابطه اصطکاک_سرعت کمتر خواهد بود (Meegoda, Gao et al., 2013). در همین راستا بافت درشت تأثیر به سزایی در ایمنی سطح روسازی خیس دارد. به همین دلیل است که در شرایط آب و هوایی با رطوبت بالا، با افزایش هرچه بیشتر سرعت، استفاده از بافت درشت زبر برای سفری ایمن در اولویت قرار دارد. بنابراین اندازه‌گیری بافت درشت یکی از اجزای ضروری در برنامه‌های مدیریت روسازی است (Chen, Huang et al., 2019). در شکل (۲) تأثیر هریک از انواع بافت سطحی روسازی راه را بر مشخصات سطح روسازی نمایش داده شده است.

شکل ۲. رابطه میان بافت و مشخصات سطحی روسازی

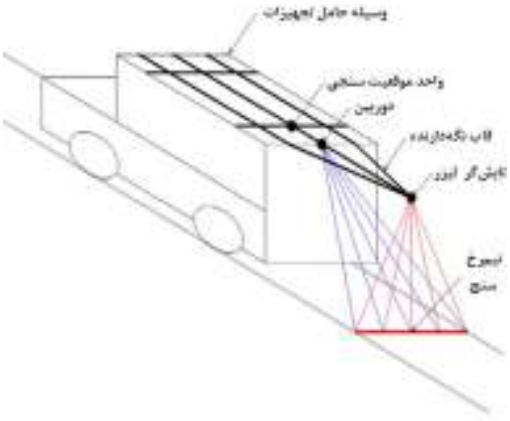
بنابراین، یکی از بخش‌های ضروری سامانه مدیریت روسازی (PMS) سنجش خرابی‌های سطح روسازی راه برای تعیین استراتژی‌های مقرون به صرفه جهت نگهداری و بهسازی شبکه راه‌ها است. اگرچه امروزه برداشت‌های چشمی توسط مهندسین در محل همچنان از رایج‌ترین روش‌های بازرسی و ارزیابی شرایط روسازی است؛ ولی این نوع ارزیابی شامل میزان بالایی از احتمال مواجه با شرایط با ریسک زیاد، سرعت و بهینگی پایین و اعمال نظرات شخصی است (Yousaf, Azhar et al., 2018). در نتیجه سامانه‌های شناسایی خودکار خرابی‌ها در حال کسب مقبولیت روز افزون در بین متولیان حمل و نقل و جاده‌ها هستند (Tsai, Jiang et al., 2012). در دو دهه گذشته سامانه‌های تصویربرداری دو بعدی به همراه الگوریتم‌های مربوطه جهت جمع آوری داده و سنجش وضعیت سطح روسازی مورد استفاده قرار گرفته است. ولی این سامانه‌های سنتی تصویربرداری ۲ بعدی تشخیص خرابی اغلب قادر به تحلیل محل‌های تاریک (غیر از محل خرابی) همچون محل‌های قرار گرفته در سایه یا نور کم نیستند(Jiang and Tsai, 2015) . همچنین روش‌های ۲ بعدی به دلیل عدم برداشت اطلاعات ارتفاعی نمی‌توانند برخی از خرابی‌ها را تشخیص دهند (Zhang, Zou et al., 2018). با پیشرفت حس‌گرهای ۳ بعدی و فناوری اطلاعات، سامانه‌های تصویربرداری لیزری ۳ بعدی با وضوح و سرعت بالا به منظور جمع‌آوری داده‌های وضعیت سطح روسازی توسعه یافته‌اند. برخلاف تصویربرداری ۲ بعدی، پویش‌گرهای لیزری ۳ بعدی قادر به جمع آوری اطلاعات ارتفاعی نیز هستند . با پیشرفت در فناوری حس‌گرها، سامانه ارزیابی داده‌های سطح روسازی مبتنی بر تصویربرداری خطی ۳بعدی لیزری در دسترس قرار گرفته است. پژوهش‌های بسیاری در خصوص تشخیص انواع خرابی‌های سطح روسازی همچون شیارشدگی، ترک خوردگی، ایجاد چاله (Chang, Chang et al., 2005) و ... در شرایط مختلف نوری و آب و هوایی با استفاده از فناوری لیزر ۳ بعدی و الگوریتم‌های مخصوص آن انجام گرفته است (Li, Huyan et al., 2017). سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی قادر است مشخصات سطح روسازی را به صورت ۳بعدی با وضوح بالا و به طور پیوسته، برای سطوح روسازی در حال ساخت و یا در حال بهره برداری جمع نماید (Laurent, Lefebvre et al., 2008). یکی دیگر از کاربردهای سامانه‌های لیزری در مدیریت، تعمیر و نگهداری جاده‌ها اسکن کردن طاق تونل‌ها است. سامانه لیزری اسکن تونل از تعدادی پویش‌گر لیزری سرعت بالا برای تهیه تصاویر ۲بعدی و پروفیل‌های ۳ بعدی با وضوح بالا از تونل، استفاده می‌نماید. این سامانه قادر است یک طاق تونل را به صورت کامل (۲۴ متر) با وضوح تصویر ۱ میلی‌متر اسکن کرده و داده‌های ۳بعدی را با سرعت تا ۲۰ کیلومتر بر ساعت جمع‌آوری نماید. هنگامی که داده‌های تونل وارد محیط دیجیتال گردید؛ می‌تواند به صورت آفلاین مشاهده و تحلیل گردد. این عمل با استفاده از نرم‌افزار تحلیل و مشاهده ۳ بعدی با دقت‌های متفاوت انجام می‌گیرد که امکان سنجش با دقت بالا را برای هریک از مشخصه‌های تونل به صورت مجازی فراهم می‌سازد. نرم‌افزار تحلیل خودکار برای شناسایی و ارزیابی شرایط نقاط اتصال، خرابی‌ها، ترک‌ها، بتن تخریب شده، نم زدگی و رطوبت در محیط تونل توسعه یافته است. این سامانه ۱۰۰ برابر سریع‌تر و ۱۰ برابر دقیق‌تر از فناوری رایج لیزری LIDAR است (Slob and Hack, 2004). لازم به ذکر است که در ادامه مقاله به سامانه لیزری اسکن تونل پرداخته نخواهد شد. هدف از این مقاله آشنایی با نحوه کار سامانه‌های مبتنی بر فناوری لیزر برای جمع‌آوری داده‌های سطح روسازی جاده‌ها به خصوص سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی است. علاوه بر معرفی کاربرد سامانه‌های لیزری در مدیریت روسازی، از سایر اهداف این مقاله می‌توان به اعتبارسنجی توانایی سامانه‌های لیزری در شناسایی و سنجش خرابی‌ها و ارزیابی آن‌ها با توجه به نوع خرابی و همچنین مقایسه خروجی‌های این سامانه با نتایج سایر روش‌های جمع‌آوری اطلاعات اشاره کرد. ساختار این مقاله به این شرح است: این بخش با مروری بر شرایط موجود و لزوم بهبود شرایط به معرفی سامانه‌های لیزری و کاربرد آن‌ها جهت جمع‌آوری هر یک از

داده‌های مورد نیاز در پیاده سازی یک سامانه مدیریت روسازی بهینه پرداخت. همچنین پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه فناوری‌های خودکار جمع‌آوری اطلاعات خرابی‌های سطح روسازی مورد بررسی قرار گرفت و هدف از این پژوهش مشخص گردید. در ادامه، بخش روش شناسی پژوهش به طور مختصر به بررسی تحوه کار سامانه‌های تصویر برداری ۳ بعدی لیزری می‌پردازد و سپس با توضیح در مورد این سامانه‌ها و ویژگی‌های آن‌ها ادامه می‌یابد. در بخش بحث و بررسی به مقایسه انواع سامانه‌ها پرداخته می‌شود و خروجی‌های آن‌ها در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و اعتبارسنجی می‌شود. در انتها نیز نتایج این پژوهش به طور مختصر در بخش نتیجه‌گیری برشمرده خواهد شد.

۲-روش شناسی پژوهش

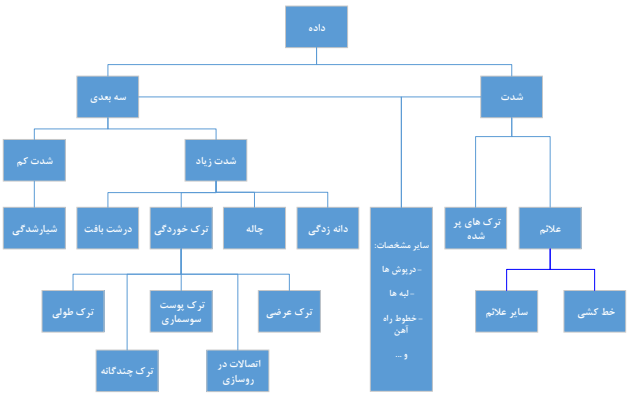
سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی از دو سامانه تصویربرداری لیزری با عملکرد بالا تشکیل شده است که قادر به سنجش کامل نیم‌رخ‌های عرضی جاده با دقت ۱ میلی‌متر در سرعت‌های بزرگراهی است. داده‌های ۲ بعدی و ۳ بعدی تهیه شده توسط سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی سپس توسط الگوریتم‌هایی پردازش می‌شوند. این الگوریتم‌ها جهت استخراج خودکار داده‌های خرابی‌ها همچون نوع ترک (عرضی، طولی، موزاییکی و ...) و شدت آن‌ها توسعه یافته‌اند. همچنین این سامانه‌های لیزری می‌توانند به طور خودکار چاله‌ها و شیارشدگی (نوع و عمق)، بافت درشت (آزمون وصله ماسه‌ای دیجیتال) و دانه‌زدگی (شن‌زدگی) را تشخیص دهد.

حس‌گرهای مورد استفاده در سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی پروفیلرهای ۳ بعدی لیزری هستند که از پرتوافکن (پروژکتور)های خطی لیزری با توان بالا، صافی (فیلتر)های سفارشی و یک دوربین به عنوان شناساگر استفاده می‌کند. یک پرتوی نوری بر روی سطح روسازی تابانده شده و تصویر آن توسط دوربین ثبت می‌گردد. شکل روسازی هنگام حرکت وسیله نقلیه حامی تجهیزات شناسایی در طول مسیر با استفاده از سیگنال یک کیلومترشمار یا دستگاه موقعیت سنج (GPS)، برای هماهنگ‌سازی برداشت‌های حس‌گر، به دست می‌آید. تمام تصاویر ثبت شده توسط دوربین به دستگاه ثبت تصاویر ارسال شده تا به صورت دیجیتالی ذخیره شده و توسط واحد پردازنده مرکزی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. ذخیره‌سازی تصاویر به صورت فایل خام به معنی ذخیره کردن ۳۰ گیگابایت داده به ازای هر کیلومتر در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت است ولی با استفاده از یک الگوریتم فشرده‌سازی بدون آسیب به داده‌ها بر روی داده‌های ۳ بعدی و فشرده‌سازی سریع Jpeg برای داده‌های شدت می‌توان نرخ ذخیره‌سازی داده را به مقدار معقول ۲۰ مگابایت بر ثانیه و یا ۷۲۰ مگابیت در هر کیلومتر کاهش داد. شکل شماره ۳ تصویر مفهومی از اجزای یک سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی را نمایش می‌دهد (Kertész, Lovas et al., 2008).



شکل ۳. طرح مفهومی اجزای یک سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی

حس‌گرهای سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی به طور هم‌زمان مشخصات طیفی و شدت را برداشت می‌کنند. شکل ٤ نحوه استفاده از هریک از انواع داده‌های برداشت شده توسط سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی برای شناسایی انواع مختلف ویژگی‌های روسازی جاده‌ها را نمایش می‌دهد. نمودار شکل ٤ نشان می‌دهد که هریک از داده‌های ۳ بعدی و داده‌های شدت اهداف متفاوتی را برآورده می‌سازند. داده‌های شدت جهت شناسایی خط‌کشی‌ها و سایر علامت گذاری‌های خطوط و ترک‌های پر شده مورد نیاز است؛ در حالی که داده‌های ۳ بعدی برای تشخیص سایر ویژگی‌ها به خصوص خرابی‌ها کاربرد دارد (Laurent, Hébert et al., 2012).

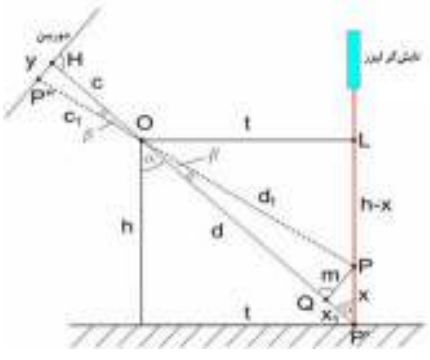


شکل ٤. نمودار تحلیل داده‌ها

ایده اصلی سامانه‌های سنجش لیزری سطح روسازی، اندازه‌گیری ارتفاع در یک تصویر با شناسایی نیمرخ است. اگر یک خط مستقیم بر روی یک سطح صاف تابانده شود و یک تصویر توسط دوربین با زاویه اریب ثبت شود، در تصویر خط به صورت مستقیم خواهد بود (رجوع به شکل ٥). در صورت تغییر ارتفاع (وجود یک شئ، چاله یا ...) تصویر خط فقط در حالت دید از بالا مستقیم خواهد بود ولی از هر زاویه دید اریب به صورت شکسته در خواهد آمد. براساس تشابه مثلث‌ها، همبستگی بین دو پارامتر y و r به دست می‌آید که به صورت تابع درجه دوم است. برای مقدار x رابطه به صورت زیر است:

$$x = f(h.t.c.y) \qquad (۱)$$

در هنگام کالیبراسیون فاصله کانونی دوربین ثابت در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه فقط مقادیر h و t وروردی‌های کالیبراسیون هستند (Kertész, Lovas et al., 2008).

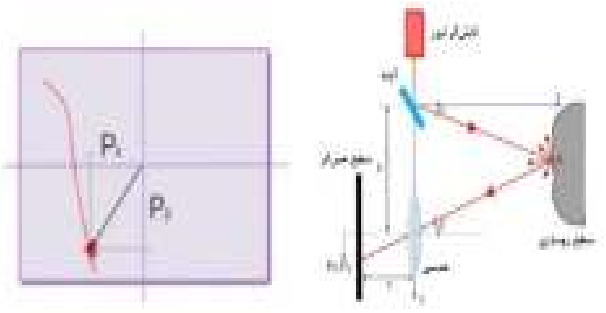


شکل ٥. طرح کلی نحوه اندازه‌گیری ارتفاع با یک تصویر با زاویه اریب

مثلث‌سازی لیزری یک روش برجسته‌بینی کنش‌گر است که براساس اصل مکان‌یابی پیشران نقاط تلاقی قادر است مکان یک نقطه در فضا را، که در یک سیستم مبنا قابل استفاده تعریف می‌شود؛ مشخص نماید. براساس طرح کلی نمایش داده شده در شکل ٦ دستگاه ساتع کننده لیزر یک پرتو، انرژی تولید می‌کند که از آینه دستگاه با زاویه α خارج می‌شود. مقدار α به دلیل کالیبراسیون آینه دوار از قبل مشخص است. پرتو در نقطه A با سطح شئ (در این پژوهش سطح روسازی) که قرار است مورد سنجش قرار گیرد، برخورد می‌کند. پرتو لیزر بازتاب می‌شود و مقدار این بازتاب به نوع سطح روسازی مورد نظر بستگی دارد. قسمتی از پرتو بازتاب یافته با سطح حس‌گر دریافت کننده (به طور رایج از نوع CMOS یا CCD) که در فاصله معینی (با عنوان خط مبنا که با b نشان داده می‌شود) از دستگاه تولید لیزر قرار دارد؛ برخورد می‌کند زاویه β اشعه ورودی به حس‌گر نامعلوم است اما با استفاده از رابطه مثلثاتی شماره ۲ و با معلوم بودن مقدار فاصله کانونی c و محل برخورد پرتو لیزر بر روی حس‌گر (P_x, P_y) که به وسیله حس‌گر ثبت می‌شود؛ می‌توان زاویه β را محاسبه کرد. با تکرار این عمل برای تمام نقاط (که گسسته نمودن سطح شئ را ممکن می‌کند.) می‌توان با استفاده از روابط شماره ۳ مختصات هریک از نقاط را به دست آورد و سپس سطح روسازی توسط ابر نقاط ۳ بعدی مجزا گردد (Bitelli, Simone et al., 2012).

$$\tan\beta = \frac{Px}{c} \qquad \tan\gamma = \frac{Py}{c} \qquad (۲)$$

$$x_A = \frac{b}{1+\frac{\tan\beta}{\tan\alpha}} \qquad y_A = \frac{b}{\frac{\tan\alpha}{\tan\gamma}+\frac{\tan\beta}{\tan\gamma}} \qquad z_A = \frac{b}{\tan\alpha+\tan\beta} \qquad (۳)$$



شکل ٦. نمای کلی نحوه مثلث‌سازی پویش‌گر لیزری

پس از فرایند مثلث‌سازی ابر نقاط می‌تواند به یک شبکه از مثلث‌ها تبدیل شوند که سطح ۳ بعدی روسازی را شکل می‌دهد. براساس فناوری به کار رفته در ابزارهای مورد استفاده و نوع اثر تصویر شده بر روی سطح روسازی، لیزرها می‌توانند به انواع نقطه‌ای، خطی و چندخطی تقسیم شوند. به طور معمول یک دستگاه لیزری جمع‌آوری اطلاعات برای پوشش تمام سطح اشیاء با سطوح پر انحنا کافی نیست؛ به همین دلیل برای توصیف بهتر سطح روسازی اسکنرهای لیزری دیگری در مکان‌هایی با زاویه دید متفاوت به کار گرفته می شود.

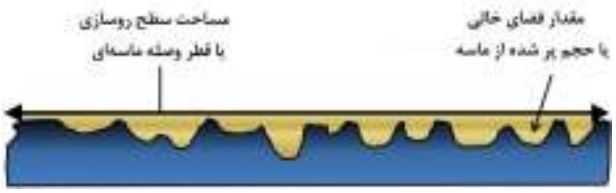
۳-نتایج، بحث و بررسی

سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی شناسایی خودکار ترک‌ها و ارزیابی شیارشدگی، بافت درشت و سایر مشخصه‌های سطح روسازی راه (از قبیل شاخص ناهمواری، شیب، چاله‌ها، دانه‌زدگی، ترک‌های پر شده، اتصالات در بتن و ...) را ممکن می‌سازد. خروجی‌های تحلیل خرابی‌ها با سامانه مدیریت روسازی ترکیب شده تا بتواند برای اولویت بندی عملیات نگهداری و بهسازی جهت بهینه نمودن تخصیص منابع و نظارت بر فرایند شرایط شبکه راه‌ها در طول زمان مورد استفاده قرار گیرد. سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی دارای نرخ نمونه برداری قابل تنظیم بین ۵۶۰۰ تا ۱۱۲۰۰ نیم رخ در ثانیه است. همچنین سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی دارای سرعت عملکردی تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت است که جمع آوری داده همزمان با جریان ترافیک در حال حرکت را ممکن می‌سازد. در همین راستا، نیاز به بستن محور عبوری در حین انجام عملیات بازرسی نیست و این قابلیت باعث کاهش چشمگیر زمان و هزینه عملیات و ارتقا ایمنی مسیر می‌شود. داده‌های شدت برداشت شده توسط سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی برای تهیه یک تصویر پیوسته از سطح روسازی جاده مورد استفاده قرار می‌گیرد. وظیفه اصلی داده‌های شدت، شناسایی محدوده‌های جاده است. این الگوریتم بر تشخیص خطوط رنگ آمیزی شده به عنوان خطوط محور عبوری جهت شناسایی عرض و محل محورهای عبوری، برای از بین بردن اثر انحراف وسیله نقلیه حامل تجهیزات، استوار است. سپس اطلاعات محورهای عبوری توسط سایر الگوریتم‌های شناسایی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا تحلیل را به منطقه مورد نیاز محدود کند تا از برداشت خرابی‌های خارج از محورهای عبوری و کناره‌های جاده جلوگیری شود. علائم رنگی با قابلیت بازتاب بالا برای شناسایی ۲ بعدی آسان‌تر هستند زیرا به طور کلی در تصاویر داده‌های شدت با تضاد (کنتراست) بالا مشاهده می‌شوند. با الگوریتم‌های تشخیص الگوی مناسب علائم مختلفی را می‌توان شناسایی و برداشت نمود (Zhang, Wang et al., 2017) . داده‌های ۳ بعدی جمع‌آوری شده توسط سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی، فاصله از حس‌گر تا سطح روسازی را برای هر نقطه بر روی سطح روسازی اندازه‌گیری می‌کند که این ارتفاع می‌تواند به درجه‌های خاکستری تبدیل شود. به این صورت که هرچه نقطه تاریک تر باشد سطح پایین‌تر است و ارتفاع می‌تواند در طول نیم‌رخ عرضی جاده تغییر کند. محل عبور چرخ‌ها می‌تواند از کناره‌های محورهای عبوری پایین‌تر باشد، بنابراین تاریک‌تر دیده شود؛ که به علت خرابی شیارشدگی خواهد بود. همچنین اختلاف ارتفاع در جهت طولی نیز ممکن است ملاحظه شود که به علت تغییرات پروفیل طولی جاده است. تغییرات پروفیل طولی باعث حرکت در سیستم تعلیق وسیله حامل حس‌گرها می‌شود. این اختلاف ارتفاع‌ها در مقیاس بزرگ وابسته به فرکانس مکانی با بسامد کم محدوده داده‌ها در جهت طولی است. بیشتر مشخصه‌های خرابی که نیاز به بررسی دارند در قسمت‌های فرکانس‌های مکانی با بسامد زیاد محدوده اطلاعات قرار دارند. شکل ۷ نتایج برداشت انواع خرابی‌های مختلف که می‌تواند از داده‌های سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی نتیجه گیری شود را نمایش می‌دهد.

شکل ۷. ۲ متر از نیم‌رخ عرضی (نیمی از محور عبوری) که شیارشدگی، ترک و بافت را نشان می‌دهد.

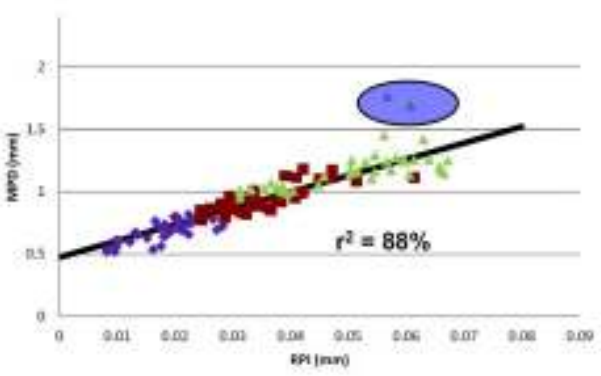
شکل ۷ دو متر (نصف محور عبوری) از نیم‌رخ عرضی را نشان می‌دهد که مقدار افت عمومی ارتفاع در نیم‌رخ به دلیل وجود خرابی شیارشدگی است. فرورفتگی تیز و عمیق در میانه نیم رخ نشان‌دهنده وجود ترک در آن محل است و تغییرات ارتفاع (با رنگ آبی) پیرامون خط قرمز نمایش‌گر بافت درشت سطح روسازی راه است. بافت روسازی براساس شاخص تخلخل جاده پیشنهادی محاسبه می‌شود. شاخص تخلخل جاده از تقسیم حجم فرورفتگی‌ها در سطح جاده، که به وسیله ماسه در روش وصله ماسه‌ای پر می‌شود، بر سطح روسازی مشخص می‌گردد که رابطه آن همانند رابطه ٤ است و نمای کلی آن در شکل ۸ نشان داده شده است.

$$RPI = \frac{Vol_{Air\ void} + Vol_{Ravelling} + Vol_{Cracks}}{Surface\ Area} \qquad (٤)$$



شکل شماره ۸ نمای کل نحوه محاسبه تخلخل جاده

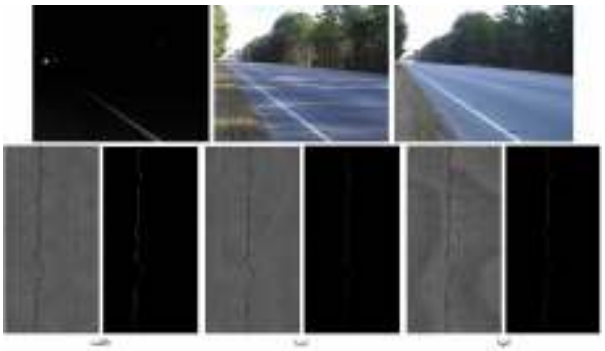
روش پیاده سازی شده در سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی این امکان را فراهم می‌سازد تا بافت (شاخص تخلخل جاده) به طور پیوسته در تمام سطح روسازی مورد ارزیابی قرار گیرد؛ در حالی که در سایر روش‌های قدیمی فقط برای نقاط محدودی در محل عبور چرخ‌ها انجام می‌گرفت. برای مقایسه دقت الگوی شاخص تخلخل جاده (RPI) آزمایش‌های مختلفی در محل‌های متفاوت بر روی انواع مختلف روسازی‌ها انجام گرفته است و با نتایج میانگین عمق نیم‌رخ اندازه‌گیری شده با استفاده از سامانه لیزری ٦٤ کیلوهرتز معمول (LIDAR) مقایسه شد. شکل ۹ نشان دهنده میزان بالایی از همبستگی (۸۸ درصد) بین روش RPI – LCMS و اندازه‌گیری‌های MPD بر این محدوده از بافت آسفالت‌ها است.



شکل ۹. میزان همبستگی سنجش بافت سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی با روش‌های لیزری معمول (Laurent, Hébert et al., 2012)

علاوه بر این سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی قادر است خرابی دانه‌زدگی را در روسازی جاده مورد ارزیابی قرار دهد. دانه‌زدگی یا شن‌زدگی، فرسایش و از بین رفتن سطح روسازی ناشی از رانش ذرات سنگدانه‌ای و از بین رفتن ماده چسباننده روسازی (به طور معمول قیر یا سیمان) است؛ که در نهایت به سطح روسازی پر از حفره، خشن و ناهموار با کمبود قابل ملاحظه سنگدانه منجر می‌شود. شاخص دانه‌زدگی با اندازه‌گیری حجم سنگدانه‌های از دست رفته (چاله‌های ایجاد شده به دلیل دانه‌زدگی) در هر واحد سطح (مترمربع) برآورد می‌شود. یکی از مهمترین مشکلات روش‌های سنتی در جمع‌آوری اطلاعات سطح روسازی (انسانی و یا خودکار) قابلیت اجرای عملیات در شرایط مختلف نوری همچون تاریکی و به ویژه حالت سایه–روشن است. شکل شماره ۱۰ تصویر یک جاده را با شدت تضاد (کنتراست) کم بین ترکی به پهنای حدود ۱ تا ٦ میلی‌متر و پس زمینه روسازی نشان می‌دهد. تضاد نوری کم با پس زمینه روسازی تشخیص ترک خوردگی را حتی برای چشم انسان بسیار سخت می‌کند. در همین حال داده‌های جمع‌آوری شده از همان ناحیه توسط فناوری لیزرهای ۳ بعدی، تضاد بیشتری را بین پس زمینه روسازی و ترک نمایش می‌دهد. شکل شماره ۱۰ توانایی سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی را برای شناسایی انواع خرابی‌ها در شرایط با تضاد نوری کم نشان می‌دهد و همچنین

اعتبار و یکسان بودن نتایج به دست آمده توسط این فناوری جهت تشخیص خرابی‌ها در سه شرایط روشنایی مختلف: الف- شب ب- روز همراه با سایه پ- روز بدون سایه را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Li, Huyan et al., 2017).



شکل ۱۰. داده‌های خروجی لیزرهای ۳ بعدی و نتایج شناسایی ترک مورد نظر در سه شرایط نوری متفاوت

همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی در هر ۳ حالت روز همراه با سایه، روز بدون سایه و شب توانایی شناسایی ترک مربوطه را دارد. این سامانه می‌تواند تصاویر با کنتراست بالا از محل خرابی مورد نظر را تهیه کند که همان گونه که ملاحظه می‌شود نتایج حاصله از برداشت در هر ۳ شرایط نوری مختلف یکسان است. لازم به ذکر است که علاوه بر این فناوری به کار گرفته شده در سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی توانایی حذف تأثیرات آلاینده‌های روی سطح روسازی و سایر اشکالات همچون لکه‌های روغن، رد چرخ وسایل نقلیه، بی‌رنگی ناشی از لنز دوربین، خط‌کشی‌های ناتمام یا از بین رفته و ... را بر داده‌های خروجی دارد (Tsai and Li, 2012).

٤- بحث

کاربرد سامانه‌های مدیریت روسازی مبتنی بر جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از فناوری لیزر همچنان رو به توسعه است و پژوهش‌های بیشتری از قبیل بومی سازی و اعتبارسنجی در این زمینه مورد نیاز است. یکی از مهمترین زمینه‌ها برای پژوهش‌های آینده، تحلیل‌های اقتصادی سود-هزینه جهت مشخص نمودن بهینه بودن سرمایه‌گذاری و استفاده از این سامانه‌ها و مدت و نحوه بازگشت سرمایه با بررسی و مقایسه اقتصادی بین استفاده از سامانه‌های لیزری و سایر روش‌های جمع‌آوری اطلاعات است. همچنین با توجه به پیشرفت روز افزون علم، این سامانه‌ها در هر دو بخش سخت افزاری و نرم افزاری قابلیت بومی‌سازی و تولید در شرکت‌های دانش بنیان داخل کشور را دارند. به عنوان مثال، می‌توان از فناوری سامانه‌های لیزری بر روی پهپادها جهت افزایش هرچه بیشتر سرعت و دقت برداشت اطلاعات خرابی‌های روسازی استفاده نمود. با بومی سازی و تولید در داخل کشور می‌توان این سامانه‌ها را در اختیار دستگاه‌های ذیربط قرار داد، تا با استفاده از این فناوری جهت جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای سامانه‌های مدیریت روسازی، باعث کاهش هزینه و زمان عملیات جمع‌آوری اطلاعات و در نتیجه با کمک به تصمیم‌گیری دقیق‌تر، موجب تخصیص بهینه منابع در پروژه‌های نگهداری و بهسازی جاده‌ها شود.

٥-نتیجه‌گیری

تحلیل خودکار خرابی‌های روسازی به فرایند پردازش تصویر و روش‌های تشخیص الگو نیازمند است. فناوری‌های نوین پویش‌گرهای لیزری بر برخی از ضعف‌های بازرسی‌های رایج چشمی و سامانه‌های اولیه جمع‌آوری اطلاعات از لحاظ وضوح و وسعت دینامیکی غلبه می‌کند. روش جمع‌آوری داده با استفاده از فناوری لیزر در مقابل اختلالات گوناگون مصون است. این پژوهش یک سامانه جمع‌آوری اطلاعات سطح روسازی جاده را که بر پایه دو نیم‌رخ سنج لیزری ۳ بعدی با عملکرد بالا همراه با هم‌پوشانی است، ارائه نمود. این دو نیم‌رخ سنج لیزری ۳ بعدی در عقب یک وسیله نقلیه و رو به پایین نصب می‌شوند که به این ترتیب می‌توانند تمام ٤ متر عرض سطح روسازی یک محور عبوری را با دقت ۱ میلی‌متر برداشت نمایند. این پیکربندی، سامانه لیزری سنجش ترک‌خوردگی را قادر می‌سازد تا انواع مختلفی از خرابی‌های سطح جاده را با جمع‌آوری هم زمان داده‌های شدت و ۳ بعدی با دقت بالا مورد ارزیابی قرار دهد. سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی می‌تواند همراه با جریان ترافیک (تا سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت) کار کند، که باعث

کاهش قابل توجه زمان جمع‌آوری داده و کاهش تصادفات جاده‌ای (به دلیل عدم نیاز به بستن محور عبوری در هنگام انجام عملیات بازرسی) می‌شود. سامانه لیزری سنجش ترک خوردگی جهت جمع‌آوری داده‌ها از سطح روسازی راه برای سامانه‌های مدیریت روسازی این توانایی‌ها را دارد: تشخیص خرابی شیارشدگی (نوع و عمق شیارشدگی)، سنجش بافت درشت در تمام پهنای محور عبوری، جمع‌آوری داده‌های شدت و سه بعدی برای شناسایی ترک‌ها، چاله‌ها، دانه‌زدگی (شن‌زدگی یا عریان شدگی)، ترک‌های پر شده، اتصالات در روسازی‌های بتنی و ...، اجرای عملیات در شرایط نوری مختلف همچون شب، روز بدون سایه یا همراه با سایه، سنجش پروفیل طولی و شاخص ناهمواری IRI، شیب و افتادگی‌ها. علاوه بر این می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های خروجی از سامانه‌های مبتنی بر فناوری لیزر دقیق و معتبر بوده و قابلیت تکرار نتایج دارند. بنابراین سامانه‌های لیزری به مرور توسط دستگاه‌های ذیربط مورد استفاده قرار خواهند گرفت و جایگزین روش‌های رایج سنجش وضعیت روسازی خواهند شد.

٦-مراجع

-Akgul, M., H. Yurtseven, S. Akburak, M. Demir, H. K. Cigizoglu, T. Ozturk, M. Eksi and A. O. Akay (۲۰۱۷). "Short term monitoring of forest road pavement degradation using terrestrial laser scanning." Measurement 103, pp.283-293.

-Bitelli, G., A. Simone, F. Girardi and C. Lantieri (2012), "Laser scanning on road pavements: a new approach for characterizing surface texture." Sensors NO.12(7), pp.9110-9128.

-Chang, K.-T., J. Chang and J.-K. Liu (2005), "Detection of Pavement Distresses Using 3D Laser Scanning Technology".

-Chen, D., C. Ling, T. Wang, Q. Su and A. Ye., (2018), "Prediction of tire-pavement noise of porous asphalt mixture based on mixture surface texture level and distributions." Construction and Building Materials, No.173, pp.801-810.

-Chen, J., X. Huang, B. Zheng, R .Zhao, X. Liu, Q. Cao and S. Zhu., (2019), "Real-time identification system of asphalt pavement texture based on the close-range photogrammetry, "Construction and Building Materials, 226, pp.910-919.

-Di Mascio, P. and L. Moretti, (2019), "Implementation of a pavement management system for maintenance and rehabilitation of airport surfaces." Case Studies in Construction Materials, e.20015.

-Fukuhara, T., K. Terada, M. Nagao, A. Kasahara and S. Ichihashi, (1990), "Automatic pavement-distress-survey system." Journal of Transportation Engineering, pp.280-286.

-Gong, H., Y. Sun, Z. Mei and B. Huang, (2018), "Improving accuracy of rutting prediction for mechanistic-empirical pavement design guide with deep neural networks." Construction and Building Materials, 190, pp.710-718.

-Hoang, N.-D., (2019), "Automatic detection of asphalt pavement raveling using image texture based feature extraction and stochastic gradient descent logistic regression." Automation in Construction,
105,102843.

-Inzerillo, L., G. Di Mino and R. Roberts, (2018), "Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress." Automation in Construction, pp.457-469.

-Jiang, C. and Y. Tsai (2015), "Enhanced Crack Segmentation Algorithm Using 3D Pavement Data." Journal of Computing in Civil Engineering 30, 04015050.

-Kertész, I., T. Lovas and A. Barsi (2008), "Photogrammetric pavement detection system", ISPRS, Citeseer.

-Laurent, J., J. F. Hébert, D. Lefebvre and Y. Savard (2012), "High-speed network level road texture evaluation using 1mm resolution transverse 3D profiling sensors using a digital sand patch model. International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, ۷th, (2012), Auckland, New Zealand.

-Laurent, J., D. Lefebvre and E. Samson (2008), "Development of a New ۳D Transverse Laser

-Wang, W., X. Yan, H. Huang, X. Chu and M. Abdel-Aty, (2011), "Design and verification of a laser based device for pavement macrotexture measurement." Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 19, pp.682-694.

-Yousaf, M. H., K. Azhar, F. Murtaza and F. Hussain (2018), "Visual analysis of asphalt pavement for detection and localization of potholes", Advanced Engineering Informatics 38, pp.527-537.

-Zhang ,A., K. C. P. Wang, B. Li, E. Yang, X. Dai, Y. Peng, Y. Fei, Y. Liu, J. Q. Li and C. Chen, (2017), "Automated Pixel-Level Pavement Crack Detection on 3D Asphalt Surfaces Using a Deep-Learning Network", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 10(32), pp.805-819.

-Zhang, D., Q. Li, Y. Chen, M. Cao, L. He and B. Zhang (2017), "An efficient and reliable coarse-to-fine approach for asphalt pavement crack detection." Image and Vision Computing, 57, pp.130-147.

-Zhang, D., Q. Zou, H. Lin, X. Xu, L. He, R. Gui and Q. Li, (2018), "Automatic pavement defect detection using 3D laser profiling technology." Automation in Construction, 96, pp.350-365.

Profiling System for the Automatic Measurement of Road Cracks".

-Li, W., J. Huyan, S. Tighe, Q.-q. Ren and Z.-y. Sun (2017), "Three-Dimensional Pavement Crack Detection Algorithm Based on Two-Dimensional Empirical Mode Decomposition." Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements 143004017005.

–Lin, J.-D. and M.-C. Ho, (2016), "A comprehensive analysis on the pavement condition indices of freeways and the establishment of a pavement management system." Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) 3(5), pp.456-466.

-Meegoda, J. N., S. Gao, S. Liu and N. C. Gephart (2013), "Pavement texture from high-speed laser for pavement management system." International Journal of Pavement Engineering, 14(7), pp.697-705.

-Slob, S. and H. Hack (2004), 3D Terrestrial Laser Scanning as a New Field Measurement and Monitoring Technique, 104, 179-189.

-Tsai, Y.-C. J. and F. Li, (2012), "Critical assessment of detecting asphalt pavement cracks under different lighting and low intensity contrast conditions using emerging 3D laser technology." Journal of Transportation Engineering 138, pp.649-656.

-Tsai, Y. J., C. Jiang and Z. Wang, (2012), "Pavement Crack Detection Using High-Resolution 3D Line Laser Imaging Technology, 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Springer.

Application of Laser-based Measurement Systems in Pavement Management

Seyed Ali Sahaf, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Shahriar Rahimi, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

E-mail:Shahriar.rahimi@mail.um.ac.ir

Received: June 2021-Accepted: August 2021

ABSTRACT

The road pavement surface has an important role in relation to address the primary demands of vehicle movement, such as safety and eco-compatibility. In order to reduce road maintenance and rehabilitation costs and optimize the service condition of road networks, pavement management systems (PMS) need detailed and reliable data of the highway network characteristics. Laser imaging devices can be employed to collect information on an in-service pavement surface layer through a single measurement with data homogeneity and representativeness in an innovative method. With the recent developments in 3D laser sensors and information technology, high-speed 3D line laser imaging systems with high-resolution has been introduced for measuring key features of pavement surface condition. This research presents some of the key developments in recent years for laser-based distress measurement systems and explains the technology used in laser-based crack measurement system. Laser-based systems key features are introduced and compared with former data collection methods. These new systems are evaluated and described in terms of their applicability and potential for future developments.

Keywords: PMS, Road Maintenance, Data Collection, High Speed 3D Laser, LCMS