نقش آزمون‌های غیرمخرب در ارزیابی و کنترل کیفیت تراکم و یکنواختی اجرای آسفالت

مقاله علمی-پژوهشی

علی فرخی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

***پویان ایار (نویسنده مسئول)**، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

***پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ayar@iust.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۱۳- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۴

صفحه ۵۲-۳۵

چکیده

گسترش فناوری‌های آزمون غیرمخرب و ساخت هوشمند، ارزیابی سریع‌تر و گسترده‌تر کیفیت اجرای روسازی‌های آسفالتی را امکان‌پذیر کرده است؛ با این حال، قابلیت اندازه‌گیری یک فناوری لزوماً به معنای آمادگی آن برای استفاده در تضمین کیفیت و پذیرش نیست. مقاله با تمرکز بر چگالی، یکنواختی تراکم و شرایط حرارتی مؤثر بر پخش و تراکم، نقش فناوری‌های منتخب را از کنترل فرایند تا پذیرش بررسی می‌کند. در این مرور تحلیلی، مقالات علمی، گزارش‌های فنی، استانداردها و ضوابط اجرایی و قراردادی بررسی شده‌اند و سه فناوری پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک مبتنی بر رادار نفوذی زمین، تراکم هوشمند و پروفیل‌برداری حرارتی نصب‌شده بر فینیشر از نظر پاسخ اندازه‌گیری‌شده، ارتباط با مشخصه کیفی، اعتبارسنجی، قابلیت اطمینان و آمادگی برای پذیرش ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که سامانه پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک مسیر مستقیم‌تری برای کاربرد در پذیرش مرتبط با چگالی نشان می‌دهد، اما استفاده از آن به کالیبراسیون و اعتبارسنجی متناسب با شرایط پروژه وابسته است. تراکم هوشمند بیشتر برای کنترل پوشش غلتک و یکنواختی عملیات تراکم کاربرد دارد، درحالی‌که پروفیل‌برداری حرارتی برای پایش یکنواختی دمایی و شناسایی احتمال جدایش حرارتی مناسب‌تر است. ضوابط ایران نشان می‌دهند که ساختار قطعه و زیرقطعه و سازوکار محاسبه ضرایب پرداخت فراهم شده است، اما رویه‌ای اعتبارسنجی‌شده برای ورود داده‌های پیوسته حاصل از این فناوری‌ها به تصمیم پذیرش وجود ندارد. چارچوبی شش‌مرحله‌ای شامل تعریف مشخصه کیفی و هدف تصمیم‌گیری، اعتبارسنجی اندازه‌گیری، اجرای آزمایشی موازی، راستی‌آزمایی، ورود داده‌ها به تصمیم‌های پذیرش و تدوین الزامات قراردادی برای استقرار تدریجی این فناوری‌ها پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: آزمون غیرمخرب، پذیرش، تراکم روسازی آسفالتی، تضمین کیفیت، کنترل کیفیت

۱- مقدمه

کیفیت اجرا یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده دوام روسازی‌های آسفالتی است. این کیفیت در مرحله اجرا تنها با یک مشخصه ارزیابی نمی‌شود و مجموعه‌ای از ویژگی‌های مربوط به مصالح، مخلوط و محصول نهایی، از جمله دانه‌بندی مصالح سنگی، مقدار قیر، درصد فضای خالی، فضای خالی مصالح سنگی[1]، تراکم لایه آسفالتی، ضخامت لایه، همواری و یکنواختی اجرا را در بر می‌گیرد. در میان مشخصه‌های کیفی ارزیابی‌شده هنگام اجرا، چگالی درجا[2] اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا بیانگر میزان تراکم حاصل‌شده است و با مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر آسیب رطوبتی، پیرشدگی، ترک‌خوردگی و تغییرشکل ارتباط دارد. تراکم کمتر یا بیشتر از محدوده مطلوب می‌تواند عملکرد روسازی را در دوره بهره‌برداری تضعیف کند. ازاین‌رو، اندازه‌گیری چگالی یکی از اجزای مهم کنترل کیفیت[3] و تضمین کیفیت[4] عملیات آسفالتی است (Wang et al., 2022a).

در نظام متداول تضمین کیفیت، پذیرش روسازی عمدتاً بر نمونه‌برداری از قطعه‌ها و زیرقطعه‌ها، انجام آزمایش‌های تعیین‌شده و مقایسه نتایج با الزامات مشخصات فنی استوار است و نتیجه این ارزیابی می‌تواند به پذیرش، رد یا تعدیل مبلغ پرداخت منجر شود (Saleh et al., 2023). در مورد تراکم، این فرایند عمدتاً بر نتایج تعداد محدودی مغزه استوار است؛ ازاین‌رو، ممکن است نواحی موضعی با تراکم ناکافی یا دچار جدایش از دید نظام پذیرش پنهان بمانند. افزون بر این، نتایج مغزه‌گیری معمولاً زمانی در دسترس قرار می‌گیرند که عملیات تراکم پایان یافته و امکان اصلاح نواحی نامطلوب محدود شده است (Wang et al., 2022a; Xu and Chang, 2016). این محدودیت به تراکم منحصر نیست؛ به‌طور کلی، آزمون‌های نقطه‌ای با وجود فراهم‌کردن اطلاعات در محل نمونه‌برداری، توان محدودی در توصیف تغییرات و ناهمگنی‌های مکانی در سراسر سطح اجرا شده دارند.

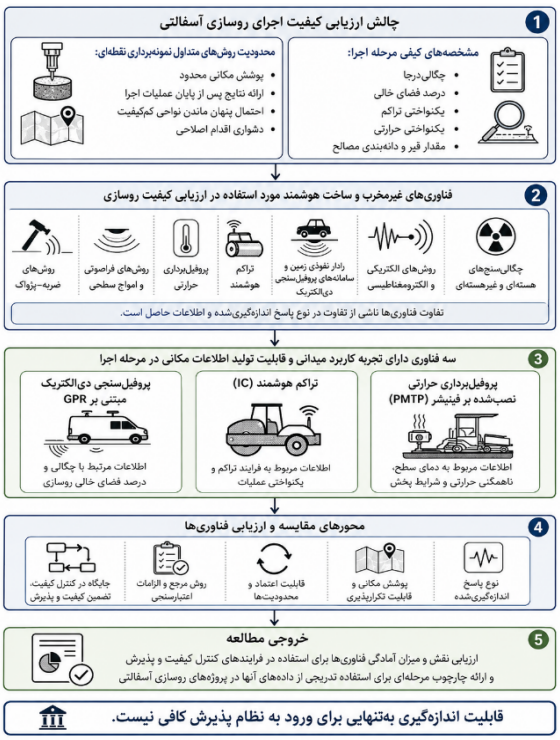
در پاسخ به محدودیت‌های روش‌های متداول، طیف متنوعی از روش‌های غیرمخرب[۵] و فناوری‌های ساخت هوشمند برای ارزیابی ویژگی‌های روسازی توسعه یافته‌اند که از جمله آنها می‌توان به روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی مانند چگالی‌سنج‌های غیرهسته‌ای، رادار نفوذی زمین[۶] و سامانه‌های پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک[۷]، روش‌های حرارتی، تراکم هوشمند[۸]، روش‌های فراصوتی و امواج سطحی، ضربه-پژواک و القای پالس مغناطیسی اشاره کرد (Wang et al., 2022a; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023a). در سطحی گسترده‌تر، ابزارهای دیجیتال مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) نیز می‌توانند ارزیابی چرخه عمر مصالح و شاخص‌های پایداری پروژه‌های ساخت‌وساز را پشتیبانی کنند (Baghchesaraei et al., 2026). این روش‌ها از نظر کمیت اندازه‌گیری‌شده، عمق بررسی، سرعت برداشت، پوشش مکانی، زمان استفاده در فرایند اجرا و میزان بلوغ کاربرد با یکدیگر تفاوت دارند؛ ازاین‌رو، خروجی آنها از نظر فنی قابل جایگزینی با یکدیگر نیست و نقش یکسانی نیز در کنترل کیفیت یا پذیرش ندارند (Von Quintus et al., 2023; Federal Highway Administration, 2024). برای نمونه، چگالی‌سنج‌های غیرهسته‌ای امکان برآورد سریع ولی نقطه‌ای تراکم را فراهم می‌کنند؛ پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک با اندازه‌گیری پاسخ الکترومغناطیسی روسازی و پس از کالیبراسیون با مقادیر مرجع چگالی، برای برآورد چگالی یا درصد فضای خالی به کار می‌رود؛ پروفیل‌برداری حرارتی تغییرات دمای سطح را ثبت می‌کند و برای شناسایی ناهمگنی حرارتی و خطر جدایش هنگام پخش کاربرد دارد؛ و مقدار اندازه‌گیری‌شده در سامانه تراکم هوشمند، پاسخ حاصل از اندرکنش غلتک و روسازی را توصیف می‌کند و از دمای لایه آسفالتی، پارامترهای عملکرد غلتک، ضخامت لایه و شرایط لایه‌های زیرین تأثیر می‌پذیرد؛ بنابراین، ارتباط آن با چگالی می‌تواند به شرایط پروژه وابسته باشد (Wang et al., 2022a; Federal Highway Administration, 2024; Sivagnanasuntharam et al., 2023).

با وجود تنوع مشخصه‌های کیفی روسازی آسفالتی، تمرکز این مطالعه بر فناوری‌هایی است که در مرحله اجرا برای ارزیابی چگالی، یکنواختی تراکم و شرایط حرارتی مؤثر بر کیفیت پخش و تراکم به کار می‌روند. از میان فناوری‌های موجود، پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک مبتنی بر رادار نفوذی زمین، تراکم هوشمند و پروفیل‌برداری حرارتی نصب‌شده بر فینیشر برای بررسی تفصیلی انتخاب شده‌اند؛ زیرا تجربه کاربرد میدانی دارند و امکان ثبت اطلاعات در بخش وسیعی از سطح اجرا، همراه با مختصات مکانی، را فراهم می‌کنند. FHWA نیز این سه فناوری را برای ارزیابی یکنواختی و تراکم مخلوط آسفالتی در زمان اجرا یا نزدیک به آن بررسی کرده و بر فراهم کردن اطلاعات مکانی بیشتر نسبت به روش‌های نقطه‌ای تأکید کرده است؛ با این حال، سطح توسعه و نحوه استفاده آنها در تضمین کیفیت و فرایند پذیرش یکسان نیست (Von Quintus et al., 2023; Federal Highway Administration, ۲۰۲٤). انتخاب این سه فناوری به معنای برتری بر سایر روش‌های غیرمخرب نیست، بلکه به دلیل تناسب با دامنه مطالعه و امکان مقایسه سه نوع اطلاعات اجرایی شامل تغییرات مرتبط با چگالی، فرایند تراکم و یکنواختی حرارتی هنگام پخش انجام شده است.

ازاین‌رو، چالش اصلی صرفاً گردآوری داده‌های بیشتر نیست، بلکه ایجاد مسیری قابل دفاع از پاسخ اندازه‌گیری‌شده به مشخصه کیفی مبنای پذیرش و سپس تصمیم قراردادی است. استفاده از داده‌های یک فناوری در پذیرش مستلزم آن است که ارتباط خروجی اندازه‌گیری با مشخصه کیفی موردنظر مستند شود، دقت و عدم قطعیت اندازه‌گیری مشخص باشد، شرایط و حدود اعتبار اندازه‌گیری شناخته شوند و داده‌ها بر اساس رویه‌ای مشخص قابل راستی‌آزمایی باشند (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023b;

Von Quintus et al., 2023). بنابراین، قابلیت یک فناوری در اندازه‌گیری یا شناسایی یک ویژگی را نباید به‌تنهایی معادل آمادگی آن برای استفاده در پذیرش دانست.

این مسئله در ایران نیز اهمیت دارد. نشریه شماره ۸۰۰-۱۰۱ الزامات مربوط به کنترل عملیات اجرا و ارزیابی تراکم را ارائه می‌کند و نشریه شماره ۷۷۳ نیز ساختار قطعه، زیرقطعه و ضرایب پرداخت را در نظام ارزیابی کیفیت فراهم کرده است. با این حال، در ضوابط موجود سازوکاری اعتبارسنجی‌شده برای راستی‌آزمایی داده‌های حاصل از فناوری‌های غیرمخرب و تبدیل آنها به مبنایی برای تصمیم پذیرش تعریف نشده است. در نتیجه، ورود این فناوری‌ها به نظام فنی کشور مستلزم تعیین رابطه خروجی هر فناوری با مشخصه کیفی مورد ارزیابی، روش راستی‌آزمایی، نحوه استفاده از داده‌های حاصل و قواعد تبدیل آنها به تصمیم قراردادی است. در این مقاله، منابع علمی، گزارش‌های فنی و اسناد قراردادی با هدف تفکیک قابلیت اندازه‌گیری هر فناوری از میزان آمادگی آن برای به‌کارگیری در کنترل کیفیت، تضمین کیفیت و پذیرش، به‌صورت تحلیلی بررسی می‌شوند. دامنه مطالعه به مرحله اجرای روسازی‌های آسفالتی محدود است و سه فناوری منتخب از نظر نوع پاسخ اندازه‌گیری‌شده، توانایی توصیف مشخصه‌های کیفی، قابلیت اطمینان، پوشش مکانی، روش مرجع متداول و قابلیت استفاده در تصمیم‌گیری‌های پذیرش ارزیابی می‌شوند. هدف اصلی، تبیین الزامات گذار از اندازه‌گیری غیرمخرب به پذیرش مبتنی بر شواهد و ارائه مبنایی برای تدوین چارچوبی مرحله‌ای و راستی‌آزمایی‌پذیر ضمن در نظر گرفتن شرایط فنی، اجرایی و قراردادی ایران است. برای تبیین این گذار، مسیر مفهومی تبدیل پاسخ اندازه‌گیری‌شده به شواهد قابل استفاده در تصمیم پذیرش در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. نقشه مفهومی مطالعه و دامنه بررسی فناوری‌های غیرمخرب و ساخت هوشمند در ارزیابی کیفیت اجرای روسازی آسفالتی

۲- تضمین کیفیت و کنترل کیفیت روسازی آسفالتی: از پذیرش متداول تا ارزیابی داده‌محور

تضمین کیفیت در اجرای روسازی آسفالتی، نظامی یکپارچه است و به یک آزمایش یا بازرسی منفرد محدود نمی‌شود. در این نظام، کنترل کیفیت مجموعه روش‌های اجرایی است که پیمانکار برای پایش و اصلاح فرایند تولید و اجرای مخلوط آسفالتی به کار می‌گیرد؛ درحالی‌که پذیرش، ارزیابی دستگاه اجرایی از میزان انطباق کار اجرا شده با الزامات کیفی قرارداد را در بر می‌گیرد. راستی‌آزمایی نیز توسط دستگاه اجرایی یا نماینده تعیین‌شده آن، با هدف ارزیابی قابلیت پذیرش محصول یا اعتبارسنجی داده‌های

تولید شده توسط پیمانکار انجام می‌شود. تضمین مستقل، قابلیت اطمینان نظام نمونه‌برداری و آزمایش را ارزیابی می‌کند، اما نتایج آن مستقیماً مبنای تصمیم‌گیری درباره پذیرش یا پرداخت قرار نمی‌گیرند (Federal Highway Administration, 2026). حفظ تمایز میان این اجزا هنگامی اهمیت ویژه‌ای دارد که اندازه‌گیری‌های حاصل از کنترل کیفیت پیمانکار، در مرحله بعد برای استفاده در فرایند پذیرش دستگاه اجرایی مدنظر قرار گیرند (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023b).

در برنامه‌های متداول تضمین کیفیت روسازی‌های آسفالتی، مشخصه‌های کیفی مبنای پذیرش اندازه‌گیری می‌شوند که بیانگر ترکیب مخلوط، ویژگی‌های حجمی و کیفیت اجرا هستند. دانه‌بندی سنگدانه‌ها، مقدار قیر، فضای خالی مصالح سنگی، چگالی ظاهری[۹] و حداکثر چگالی نظری مخلوط[۱۰]، چگالی درجا، و ضخامت لایه از جمله مشخصه‌های پرکاربرد در این برنامه‌ها هستند (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023a).

فرایند پذیرش معمولاً بر مبنای قطعه‌ها و زیرقطعه‌ها سازمان‌دهی می‌شود. نمونه‌های تصادفی برداشت‌شده از هر زیرقطعه آزمایش می‌شوند و نتایج آنها با استفاده از سنجه‌هایی مانند میانگین، تغییرپذیری، درصد واقع در حدود مشخصات یا ضرایب پرداخت مربوط به هر مشخصه، در برابر حدود تعیین‌شده در مشخصات فنی ارزیابی می‌شوند. سنجه کیفیت حاصل، مبنای تصمیم‌گیری درباره پذیرش یا رد کار اجراشده، انجام اقدامات اصلاحی یا تعدیل مبلغ پرداخت قرار می‌گیرد (Saleh et al., 2023). نشریه ۷۷۳ نیز از منطقی مشابه استفاده می‌کند و ضریب پرداخت ترکیبی را بر پایه وزن و ضریب پرداخت مشخصه‌های کیفی مختلف در سطح زیرقطعه تعیین می‌کند.

نشریه شماره ۱۰۱-۸۰۰، الزامات مکمل مربوط به کنترل عملیات ساخت روسازی آسفالتی در ایران را ارائه می‌کند. در این نشریه، تناوب نمونه‌برداری و آزمایش‌های لازم برای کنترل مخلوط آسفالتی تولیدشده در کارخانه مشخص شده است. این آزمایش‌ها مواردی مانند دانه‌بندی، درصد قیر، ویژگی‌های حجمی، حداکثر چگالی نظری، تراکم درجا و مقاومت مخلوط در برابر رطوبت را در بر می‌گیرند. همچنین استفاده از نمودارهای کنترل آماری برای پایش تغییرات فرایند تولید، شناسایی روندها و تغییرپذیری نامتعارف، تشخیص شرایط هشدار و انجام اقدامات اصلاحی الزامی شده است. نکته مهم آن است که این نشریه استفاده از روش‌های غیرمخرب را برای کنترل عملیات اجرا و برآورد تراکم نسبی مجاز می‌داند، اما مغزه‌گیری را روش مبنای پذیرش تراکم آسفالت درجا معرفی می‌کند. این تمایز، مرز موجود میان استفاده از آزمون‌های غیرمخرب به‌عنوان ابزار کنترل کیفیت و استفاده از نتایج آنها به‌عنوان مبنای پذیرش را نشان می‌دهد. از دیدگاه آماری و مکانی، شمار محدودی اندازه‌گیری تصادفی ممکن است میانگین و تغییرپذیری کلی یک قطعه را برآورد کند، اما همچنان نواحی موضعی دچار جدایش یا کمبود تراکم را شناسایی نکند. ازاین‌رو، آزمون‌های نقطه‌ای متداول همواره قادر به نشان‌دادن یکنواختی تراکم در سراسر سطح آسفالت اجراشده نیستند (Sivagnanasuntharam et al., 2023).

محدودیت دوم به ارتباط میان مشخصه‌های کیفی متداول مبنای پذیرش و عملکرد بلندمدت روسازی مربوط می‌شود. مقدار قیر، دانه‌بندی و چگالی برای حفظ یکنواختی تولید اهمیت دارند، اما مقاومت مخلوط را در برابر ترک‌خوردگی یا شیارشدگی به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌کنند (Zhou, Hu and Newcomb, 2020). این محدودیت با افزایش استفاده از تراشه آسفالتی[۱۱]، مواد اصلاح‌کننده، فناوری آسفالت نیمه‌داغ، سنگدانه‌های جایگزین و دیگر اجزای غیرمتداول اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا رفتار این مخلوط‌ها ممکن است از محدوده تجربی معیارهای حجمی متداول فراتر رود (Zaumanis, Poulikakos and Partl, 2018).

رویکردهایی مانند مشخصات فنی مبتنی بر شاخص‌های عملکردی[۱۲]، مشخصات فنی مرتبط با عملکرد[۱۳] و مشخصات فنی مبتنی بر عملکرد[۱۴] توسعه یافته‌اند تا ارتباط صریح‌تری میان ویژگی‌های مخلوط، عملکرد پیش‌بینی‌شده، پذیرش و پرداخت برقرار شود (Wang, Liu and Liu, 2023). در یک نمونه اجرایی، اداره حمل‌ونقل ایالت مِین، مشخصات فنی مرتبط با عملکرد را به‌صورت آزمایشی و موازی با نظام پذیرش موجود به کار گرفت. در این مطالعه، رابطه میان مشخصه‌های حجمی متداول و عملکرد پیش‌بینی‌شده روسازی برای بررسی تغییرپذیری ناشی از اجرا و الزامات پیاده‌سازی در سطح دستگاه اجرایی ارزیابی شد (Jeong et al., 2020). چنین اجرای آزمایشی این امکان را فراهم می‌کند که روش جدید، پیش از ایجاد پیامدهای مستقیم قراردادی و مالی، با داده‌های واقعی پروژه ارزیابی شود. ارزیابی داده‌محور با افزایش پوشش مکانی و زمانی اطلاعات اجرا، امکان عبور از ارزیابی نقطه‌ای به پایش گسترده‌تر و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را فراهم می‌کند. در سامانه تراکم

هوشمند، اطلاعات مربوط به فرایند تراکم به‌صورت لحظه‌ای و با پوشش گسترده محدوده اجرا ثبت و نمایش داده می‌شوند و می‌توانند برای کنترل تطبیقی عملیات تراکم مورد استفاده قرار گیرند (Xu and Chang, 2016). این اندازه‌گیری‌ها ممکن است به سنجه‌های پذیرشی متفاوتی از روش متداول درصد واقع در حدود مجاز مبتنی بر نمونه‌برداری نیاز داشته باشند؛ زیرا پوشش تقریباً کامل، به‌جای یک نمونه آماری کوچک، بخش بسیار بزرگی از سطح قطعه را مستقیماً در ارزیابی وارد می‌کند. ازاین‌رو، NCHRP معیار درصد انطباق را برای اندازه‌گیری‌های پیوسته از استنباط متداول مبتنی بر نقاط انتخاب‌شده به‌صورت تصادفی متمایز می‌کند (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023b).

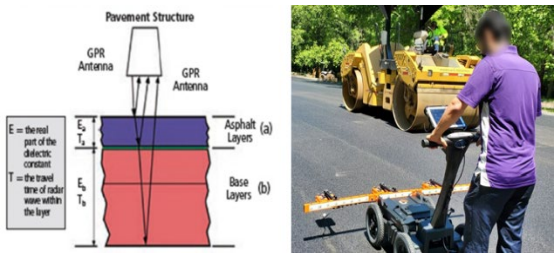
با این حال، پوشش گسترده‌تر داده‌ها به‌تنهایی برای استفاده در پذیرش کافی نیست و ارتباط خروجی فناوری با مشخصه کیفی مبنای پذیرش، عدم قطعیت اندازه‌گیری، راستی‌آزمایی داده‌ها و قواعد تصمیم‌گیری نیز باید مشخص شوند (Von Quintus et al., 2023).

۳- فناوری‌های غیرمخرب و ساخت هوشمند برای تضمین کیفیت روسازی آسفالتی

فناوری‌های غیرمخرب و ساخت هوشمند مورد استفاده در اجرای روسازی‌های آسفالتی از نظر نوع پاسخ اندازه‌گیری‌شده، پوشش مکانی و نقش آنها در کنترل کیفیت و پذیرش با یکدیگر تفاوت دارند. در این مقاله، سه فناوری پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک مبتنی بر رادار نفوذی زمین، تراکم هوشمند و پروفیل‌برداری حرارتی نصب‌شده بر فینیشر به‌صورت تفصیلی بررسی می‌شوند. چگالی‌سنج‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای نیز برای ارزیابی سریع و نقطه‌ای تراکم به کار می‌روند، اما پوشش مکانی آنها به محل فرایند اندازه‌گیری محدود است (Wang et al., 2022a). از آنجا که این فناوری‌ها اطلاعات متفاوتی از وضعیت روسازی و فرایند اجرا فراهم می‌کنند، نمی‌توان همه آنها را روش‌های مستقیم اندازه‌گیری چگالی دانست؛ بلکه کاربرد هر فناوری باید متناسب با نوع اطلاعات حاصل و نقش آن در ارزیابی کیفیت اجرا تعیین شود (Federal Highway Administration, 2024).

۳-۱-رادار نفوذی زمین و سامانه پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک

سامانه پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک، یک سامانه اندازه‌گیری مبتنی بر رادار نفوذی زمین است که برای برداشت سریع و دارای مختصات مکانی پاسخ الکترومغناطیسی روسازی و برآورد تغییرات ثابت دی‌الکتریک به کار می‌رود. در این سامانه، آنتن‌های غیرتماسی با کوپل هوایی امواج الکترومغناطیسی را به سطح روسازی ارسال می‌کنند و پاسخ بازتابی برای برآورد ثابت دی‌الکتریک پردازش می‌شود. از آنجا که افزایش تراکم معمولاً با کاهش درصد فضای خالی و افزایش ثابت دی‌الکتریک مؤثر مخلوط همراه است، با کالیبراسیون رابطه میان ثابت دی‌الکتریک و مقادیر مرجع چگالی می‌توان از داده‌های DPS برای برآورد چگالی یا درصد فضای خالی استفاده کرد (Diamanti et al., 2021). بنابراین، DPS چگالی را مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌کند، بلکه آن را از طریق رابطه میان پاسخ الکترومغناطیسی، ثابت دی‌الکتریک و چگالی مرجع برآورد می‌کند. سازوکار کلی برداشت داده در سامانه DPS در شکل ۲ نشان داده شده است.



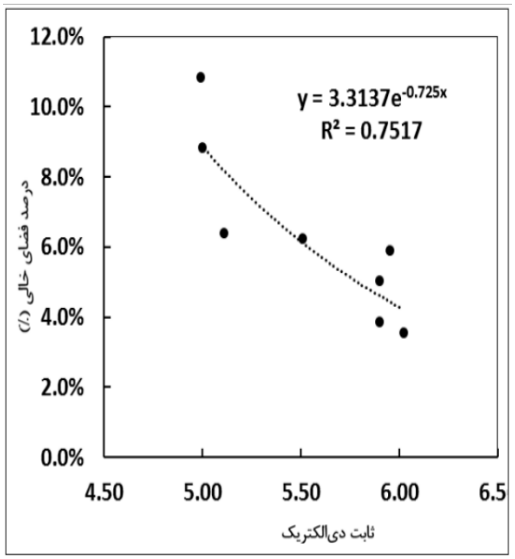
شکل ۲. سامانه پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک مبتنی بر GPR (FHWA)

سامانه DPS می‌تواند در مقایسه با مغزه‌گیری یا چگالی‌سنج‌های نقطه‌ای، بخش بسیار بیشتری از سطح آسفالت اجراشده را پوشش دهد. داده‌های حاصل از آن امکان تهیه نقشه تغییرات ثابت دی‌الکتریک و چگالی برآوردی، شناسایی نواحی ناهمگن و، در صورت تعریف حدود مشخصات، محاسبه درصد انطباق را فراهم می‌کنند. این اطلاعات می‌توانند برای کنترل کیفیت پس از تراکم، انتخاب هدفمند محل‌های نمونه‌برداری و پس از اعتبارسنجی و راستی‌آزمایی مناسب، در فرایند پذیرش مورد استفاده قرار گیرند (Von Quintus et al., 2023).

رادار نفوذی زمین را می‌توان برای شناسایی فصل مشترک لایه‌ها و تعیین ضخامت لایه آسفالتی بر اساس زمان انتشار موج الکترومغناطیسی پیکربندی کرد؛ با این حال، ارزیابی ضخامت

مستلزم برآورد مناسب سرعت موج و استفاده از روش‌های پردازش سیگنال است (Wang et al., 2022b). اندازه‌گیری‌های پیوسته DPS برای ارزیابی کیفیت درز طولی نیز به کار رفته‌اند؛ زیرا نواحی کم‌تراکم مجاور درز معمولاً باریک و دارای تغییرات مکانی زیاد هستند و ممکن است با چند مغزه تصادفی به‌درستی توصیف نشوند (Muslim, Haider and Khazanovich, 2024).

دقت برآورد چگالی از داده‌های GPR به رابطه کالیبراسیون و شرایط اندازه‌گیری وابسته است. رابطه میان ثابت دی‌الکتریک و چگالی می‌تواند با ترکیب مخلوط، ویژگی‌های دی‌الکتریک مصالح سنگی، درجه تراکم و نوع نمونه‌های مرجع تغییر کند؛ بنابراین، کالیبراسیون باید متناسب با مخلوط و شرایط پروژه انجام شود (Kaseer et al., 2026). همچنین، ناهمگنی مخلوط و نحوه توزیع فضای خالی می‌توانند پاسخ الکترومغناطیسی را تغییر دهند و استفاده از یک رابطه واحد برای مخلوط‌های آسفالتی با ساختارهای متفاوت را محدود کنند (Sui et al., 2025). ازاین‌رو، اعتبار رابطه کالیبراسیون نباید تنها بر اساس میزان انطباق مدل با داده‌های کالیبراسیون سنجیده شود، بلکه دقت پیش‌بینی، پایداری مدل و تطابق نتایج با مقادیر مرجع نیز باید بررسی شوند (Steiner et al., 2020). نمونه‌ای از رابطه میان ثابت دی‌الکتریک و درصد فضای خالی حاصل از مغزه‌های میدانی در یک پروژه آزمایشی در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. نمونه رابطه میان ثابت دی‌الکتریک و درصد فضای خالی حاصل از مغزه‌های میدانی در پروژه آزمایشی اداره حمل‌ونقل نبراسکا (Khazanovich et al., 2017)

رطوبت سطحی از عوامل مهم ایجاد خطا در برداشت‌های GPR است. وجود آب در سطح روسازی می‌تواند دامنه موج بازتابی را افزایش دهد و موجب برآورد نادرست ثابت دی‌الکتریک و در نتیجه چگالی شود. روش‌های پردازش سیگنال می‌توانند این اثر را کاهش دهند، اما رطوبت سطحی همچنان یکی از متغیرهای مهم میدانی است که باید هنگام برداشت داده کنترل شود (Abufares, Chen and Al-Qadi, 2025b; Wang, Al-Qadi and Cao, 2020; Wang et al., 2026). ارتعاش آنتن و تغییر فاصله آن از سطح روسازی نیز در برداشت‌های پیوسته یا هنگام نصب سامانه بر غلتک، باعث ناپایداری سیگنال می‌شوند. کاهش این ناپایداری‌ها مستلزم فیلتر کردن سیگنال و اصلاح تغییرات ارتفاع آنتن است (Wang and Al-Qadi, 2022; Cao and Al-Qadi, 2021). بنابراین، پوشش مکانی گسترده به‌تنهایی تضمین‌کننده برآورد قابل اعتماد چگالی نیست.

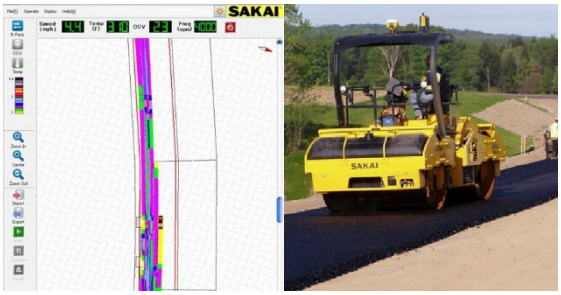
مطالعات اجرایی نشان می‌دهند که استفاده از نمونه‌های متراکم‌شده آزمایشگاهی می‌تواند وابستگی کالیبراسیون به مغزه‌های میدانی را کاهش دهد؛ با این حال، اعتبارسنجی میدانی، بررسی تکرارپذیری، اثر رطوبت و صحت رابطه کالیبراسیون همچنان ضروری است (Hoegh et al., 2020; Kaseer et al., 2025).

نمونه‌های اولیه GPR نصب‌شده بر غلتک، امکان برآورد چگالی هنگام عملیات تراکم را بررسی کرده‌اند (Abufares, Chen and Al-Qadi, 2025a). با این حال، استفاده از نتایج DPS در فرایند پذیرش چگالی همچنان به کالیبراسیون معتبر، کنترل شرایط اندازه‌گیری و راستی‌آزمایی مستقل نتایج وابسته است (Chen, Abufares and Al-Qadi, 2026; Federal Highway Administration, 2024).

۳-۲-تراکم هوشمند

تراکم هوشمند، شتاب‌سنج‌ها، سامانه موقعیت‌یابی، حسگرهای مرتبط با عملکرد غلتک و سامانه ثبت و نمایش داده را یکپارچه می‌کند. یکی از خروجی‌های این سامانه، مقدار اندازه‌گیری تراکم هوشمند[۱۵] است؛ عنوانی عمومی برای شاخص‌هایی که از پاسخ ارتعاشی غلتک و اندرکنش آن با روسازی در حین تراکم به دست می‌آیند. نوع و نحوه محاسبه این شاخص‌ها بسته به سازنده و سامانه اندازه‌گیری متفاوت است و ICMV نباید معادل

اندازه‌گیری مستقیم چگالی در نظر گرفته شود (Yoon, Hastak and Lee, 2018; Yao and Song, 2023). افزون بر ICMV، سامانه می‌تواند تعداد عبور غلتک، سرعت حرکت، فرکانس و دامنه ارتعاش، دمای آسفالت در صورت وجود حسگر و موقعیت مکانی را ثبت کند. ترکیب این داده‌ها امکان تهیه نقشه پوشش غلتک و تغییرات مکانی عملیات تراکم را فراهم می‌کند و به اپراتور اجازه می‌دهد نواحی دارای پوشش ناکافی، تعداد عبور بیش‌ازحد یا الگوهای نامنظم غلتک‌زنی را شناسایی کند (Zhan et al., 2023). نمونه‌ای از تجهیزات و نحوه نمایش اطلاعات در سامانه تراکم هوشمند در شکل ٤ ارائه شده است.



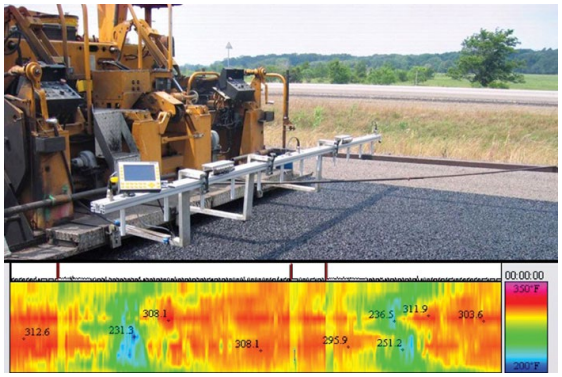
شکل ٤. سامانه تراکم هوشمند (FHWA)

ارزش اصلی تراکم هوشمند در کنترل فرایند است؛ زیرا داده‌ها زمانی در اختیار اپراتور قرار می‌گیرند که ممکن است هنوز امکان اصلاح الگوی غلتک‌زنی وجود داشته باشد. تلفیق داده‌های تراکم هوشمند و پروفیل حرارتی برای هماهنگ‌کردن الگوی غلتک‌زنی با بازه دمایی موجود برای تراکم و ثبت پوشش عملیات به کار رفته است (Chang et al., 2018). به‌کارگیری حسگرهای هوشمند و مدل‌های یادگیری ماشین نیز می‌تواند پیش‌بینی وضعیت تراکم را بهبود بخشد؛ با این حال، مسائل مربوط به انتقال‌پذیری این مدل‌ها و اعتبارسنجی آنها در شرایط میدانی همچنان نیازمند بررسی بیشتر است (Wang et al., 2024).

محدودیت اصلی این فناوری آن است که ICMV چگالی مخلوط آسفالتی را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌کند. این مقدار از دمای لایه آسفالتی، پارامترهای عملکرد غلتک، رفتار ویسکوالاستیک آسفالت، ضخامت لایه و شرایط تکیه‌گاهی زیرین تأثیر می‌پذیرد. در مطالعات مختلف، ارتباط ICMV با چگالی نقطه‌ای ضعیف یا وابسته به شرایط پروژه گزارش شده است؛ درحالی‌که رابطه آن با سختی در برخی شرایط معنادارتر است. برای نمونه، یون و همکاران در تحلیل داده‌های یک پروژه، برای پیش‌بینی چگالی غیرهسته‌ای با استفاده هم‌زمان از ICMV، تعداد عبور و دما، ضریب تعیین ۰/٦۷ را گزارش کردند؛ با این حال، در بررسی نه پروژه نمایشی، ارتباط ICMV نهایی با چگالی مغزه ضعیف بود و ضریب تعیین در همه پروژه‌ها کمتر از ۰/۳ گزارش شد. ازاین‌رو، شواهد موجود از جایگزینی چگالی مغزه با ICMV در تضمین کیفیت پشتیبانی نمی‌کنند (Yoon, Hastak and Lee, 2018). بر این اساس، ICMV را نمی‌توان در شرایط کنونی جایگزین مستقیم اندازه‌گیری چگالی برای پذیرش دانست و نقش اصلی تراکم هوشمند همچنان در کنترل عملیات تراکم است.

۳-۳-پروفیل‌برداری حرارتی نصب‌شده بر فینیشر

سامانه‌های پروفیل‌برداری حرارتی نصب‌شده بر فینیشر[16] از حسگر خطی فروسرخ یا دوربین حرارتی نصب‌شده در پشت فینیشر برای اندازه‌گیری پیوسته دمای سطح و ثبت آن همراه با مختصات مکانی استفاده می‌کنند. خروجی این سامانه‌ها که نمونه‌ای از آن در شکل ۵ نشان داده شده است، توزیع مکانی دمای سطح است که امکان شناسایی نقاط سرد، اختلاف‌های دمایی و نواحی دارای احتمال جدایش حرارتی را فراهم می‌کند. این نقشه می‌تواند برای شناسایی اختلال‌های تولید، حمل و پخش، بررسی توقف‌های فینیشر و هماهنگی بهتر عملیات بعدی به کار رود (Federal Highway Administration, 2024).



شکل ۵. سامانه پروفیل‌برداری حرارتی نصب‌شده بر فینیشر(TxDOT. Pavement Manual: Thermal Profilin)

مطالعات میدانی نیز نشان داده‌اند که تصویربرداری حرارتی می‌تواند همگنی لایه آسفالتی را توصیف و نواحی نیازمند بررسی

بیشتر یا مغزه‌گیری هدفمند را شناسایی کند (Nevalainen and Pellinen, 2016).

دمای سطح، اندازه‌گیری مستقیم چگالی یا عملکرد بلندمدت روسازی نیست؛ بنابراین، کاربرد مستقیم‌تر پروفیل‌برداری حرارتی در پایش فرایند پخش و کنترل کیفیت است. استفاده از داده‌های حرارتی در فرایند پذیرش مستلزم تعریف حدود دمایی، کنترل تجهیزات، روش پردازش داده و رویه راستی‌آزمایی است و اختلاف دما نباید به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم چگالی تفسیر شود (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023b; Federal Highway Administration, 2024).

۳-٤-چگالی‌سنج‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای

چگالی‌سنج‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای از روش‌های سریع و نقطه‌ای ارزیابی چگالی درجا هستند. چگالی‌سنج هسته‌ای بر برهم‌کنش پرتو گاما با مصالح متکی است و استفاده از آن با الزامات مربوط به ایمنی، حمل و نگهداری منبع پرتوزا همراه است. در مقابل، چگالی‌سنج‌های غیرهسته‌ای با استفاده از پاسخ الکتریکی یا الکترومغناطیسی، چگالی را برآورد می‌کنند و نتایج آنها به کالیبراسیون و عواملی مانند ویژگی‌های مخلوط، رطوبت و شرایط سطح وابسته است. هر دو روش ماهیت نقطه‌ای دارند و برخلاف فناوری‌های منتخب این مطالعه، اطلاعات پیوسته یا گسترده‌ای از تغییرات مکانی سطح اجرا فراهم نمی‌کنند؛ ازاین‌رو، در این مقاله به‌صورت مختصر و برای مقایسه با فناوری‌های دارای پوشش مکانی گسترده‌تر بررسی می‌شوند (Wang et al., 2022a).

۳-۵-سایر روش‌های غیرمخرب

روش‌های فراصوتی نیز ظرفیت بالقوه‌ای برای ارزیابی درصد فضای خالی، چگالی، مدول، مقاومت و آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی دارند. با این حال، بخش زیادی از کاربردهای گزارش‌شده این روش‌ها هنوز به مطالعات آزمایشگاهی یا پژوهشی محدود است (Ayar, Ashnavar and Ruhi, 2023).

٤- قابلیت، میزان آمادگی و چارچوب تصمیم‌گیری برای پذیرش روسازی آسفالتی مبتنی بر آزمون‌های غیرمخرب

آمادگی یک فناوری برای استفاده در فرایند پذیرش، فراتر از قابلیت اندازه‌گیری آن است و مستلزم مشخص‌بودن ارتباط خروجی اندازه‌گیری با مشخصه کیفی مبنای پذیرش[۱۷]، دقت و عدم قطعیت اندازه‌گیری، رویه اجرایی، نحوه راستی‌آزمایی و قواعد تصمیم‌گیری است (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023b; Von Quintus et al., 2023).

این آمادگی طی فرایندی مرحله‌ای شامل ارزیابی میدانی، سنجش دقت و اریبی، استانداردسازی و اجرای آزمایشی موازی بررسی می‌شود و در صورت احراز الزامات لازم می‌تواند به استفاده در فرایند پذیرش منتهی شود (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023b).

بر همین اساس، نوع داده، خروجی اصلی و پوشش زمانی و مکانی فناوری‌های بررسی‌شده در جدول ۱ مقایسه می‌شوند.

آمادگی فناوری‌های غیرمخرب برای پذیرش، به ارتباط معتبر پاسخ اندازه‌گیری‌شده با مشخصه کیفی، اعتبارسنجی، عدم قطعیت، راستی‌آزمایی و جایگاه آن در نظام تضمین کیفیت وابسته است؛ بر این اساس، فناوری‌های منتخب از نظر ارتباط با مشخصه کیفی، روش اعتبارسنجی، عوامل مؤثر بر نتایج و سطح آمادگی برای پذیرش در جدول ۲ مقایسه می‌شوند.

DPS به دلیل امکان ارتباط خروجی کالیبراسیون‌شده با چگالی یا درصد فضای خالی، مسیر روشن‌تری برای پذیرش مبتنی بر چگالی دارد، اما اعتبار آن به شرایط پروژه و نمونه‌های مرجع وابسته است (Kaseer et al., 2026; Steiner et al., 2020). در مقابل، IC عمدتاً برای کنترل فرایند و یکنواختی تراکم و PMTP برای شناسایی ناهمگنی حرارتی و کنترل پخش کاربرد دارند.

٤-١-مقایسه قابلیت و آمادگی فناوری‌ها برای پذیرش

جدول ۱. مقایسه ویژگی‌های فنی فناوری‌های غیرمخرب مورد بررسی و ساخت هوشمند

فناوری	داده ثبت شده	خروجی اصلی	پوشش و زمان اندازه‌گیری
پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک مبتنی بر GPR	ثابت دی‌الکتریک همراه با مختصات مکانی اندازه‌گیری می‌شود.	چگالی یا درصد فضای خالی برآورد می‌شود.	پوشش پیوسته عمدتاً پس از تراکم فراهم می‌شود؛ نوع نصب‌شده بر غلتک هنگام تراکم داده تولید می‌کند.
تراکم هوشمند	عبور، سرعت، ارتعاش، دما و مقدار اندازه‌گیری تراکم هوشمند ثبت می‌شوند.	پوشش غلتک، یکنواختی و پاسخ مکانیکی روسازی توصیف می‌شوند.	حین تراکم، پوشش نزدیک به پیوسته و بازخورد آنی فراهم می‌کند.
پروفیل‌برداری حرارتی نصب‌شده بر فینیشر	دمای سطح آسفالت همراه با مختصات مکانی اندازه‌گیری می‌شود.	ناهمگنی‌های حرارتی و نواحی دارای احتمال جدایش حرارتی شناسایی می‌شوند.	پشت فینیشر، پوشش پیوسته و بازخورد نزدیک به زمان واقعی فراهم می‌شود.
چگالی‌سنج غیرهسته‌ای	پاسخ الکتریکی یا الکترومغناطیسی در یک نقطه اندازه‌گیری می‌شود.	چگالی یا تراکم نسبی برآورد می‌شود.	نتیجه را به‌سرعت، اما فقط در نقاط انتخابی فراهم می‌کند.
چگالی‌سنج هسته‌ای	پاسخ ناشی از برهم‌کنش پرتو گاما با مصالح اندازه‌گیری می‌شود.	چگالی درجا برآورد می‌شود.	اندازه‌گیری به‌صورت سریع، اما نقطه‌ای، انجام می‌شود.

جدول ۲. مقایسه آمادگی فناوری‌های منتخب غیرمخرب برای کاربرد در پذیرش روسازی آسفالتی

معیار مقایسه	پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک مبتنی بر GPR	تراکم هوشمند	پروفیل‌برداری حرارتی نصب‌شده بر فینیشر
ارتباط با مشخصه کیفی مبنای پذیرش	چگالی یا درصد فضای خالی با استفاده از رابطه کالیبراسیون‌شده برآورد می‌شود.	ارتباط آن با تراکم غیرمستقیم و وابسته به شرایط پروژه است.	اختلاف دما نشانگر خطر ناهمگنی حرارتی است و چگالی را مستقیماً نشان نمی‌دهد.
روش اعتبارسنجی	نتایج با مغزه‌ها یا مقادیر مرجع چگالی مقایسه می‌شوند.	نتایج با مغزه، چگالی‌سنج نقطه‌ای و اطلاعات فرایند تراکم مقایسه می‌شوند.	نواحی مشکوک با بازدید میدانی، آزمون تکمیلی یا مغزه‌گیری هدفمند بررسی می‌شوند.
عوامل مؤثر بر نتایج	نوع مخلوط، رطوبت سطح، رابطه کالیبراسیون و پایداری آنتن بر نتایج اثر می‌گذارند.	دمای لایه، ضخامت، مشخصات غلتک و شرایط تکیه‌گاهی لایه‌های زیرین بر نتایج اثر می‌گذارند.	شرایط محیطی، سرعت پخش، توقف فینیشر و وضعیت سطح بر نتایج اثر می‌گذارند.
سطح آمادگی برای پذیرش	برای کنترل کیفیت کاربرد دارد و پس از اعتبارسنجی می‌تواند به‌صورت تکمیلی در پذیرش مبتنی بر چگالی به کار رود.	برای کنترل فرایند، پوشش غلتک و ارزیابی یکنواختی مناسب است، اما جایگزین مستقیم پذیرش مبتنی بر مغزه نیست.	برای کنترل فرایند پخش و شناسایی ناهمگنی حرارتی مناسب است، اما مبنای مستقیم پذیرش چگالی نیست.

٤-٢-موانع اجرایی و نهادی

عدم قطعیت فنی تنها یکی از موانع گسترش فناوری‌های آزمون غیرمخرب است. حجم زیاد داده‌های حاصل از سامانه‌های پیوسته، استفاده از قالب‌های استاندارد و رویه‌های مشخص برای پردازش، نگهداری و دسترسی به داده‌ها را ضروری می‌کند.

راستی‌آزمایی زمانی دشوارتر می‌شود که تجهیزات اندازه‌گیری روی ماشین‌آلات تحت کنترل پیمانکار نصب شده باشند؛ زیرا بازتولید کامل داده‌های تراکم هوشمند یا پروفیل‌برداری حرارتی ممکن است برای دستگاه اجرایی عملی نباشد. ازاین‌رو، باید رویه‌هایی برای کنترل صحت عملکرد تجهیزات، کالیبراسیون در صورت نیاز، موقعیت مکانی، کامل‌بودن داده‌ها، الگوریتم‌های پردازش و بررسی‌های منتخب میدانی تعریف شوند (Federal Highway Administration, 2024). همچنین، اگر داده‌های پیمانکار بر پرداخت اثر بگذارند، طرح پذیرش باید صلاحیت عوامل، نحوه رسیدگی به مغایرت‌ها، بازآزمایی و سازوکار حل اختلاف را نیز مشخص کند.

ابعاد اقتصادی و سازمانی نیز بر پذیرش این فناوری‌ها اثر می‌گذارند. اگرچه برخی تحلیل‌های فایده-هزینه، صرفه‌جویی بالقوه ناشی از کاربرد تراکم هوشمند را گزارش کرده‌اند، هزینه تجهیزات و میزان پذیرش سازمانی همچنان از موانع پیاده‌سازی به شمار می‌روند؛ ضمن آنکه نتایج حاصل از کاربرد این فناوری در عملیات خاکی را نباید مستقیماً به روسازی آسفالتی تعمیم داد (Savan, Ng and Ksaibati, 2016). همچنین، صرف تولید داده‌های بیشتر برای ورود یک فناوری به نظام تضمین کیفیت کافی نیست و باید مسئولیت طرف‌ها، نحوه راستی‌آزمایی، اقدامات اصلاحی و معیارهای ارزیابی در رویه‌های اجرایی و قراردادی مشخص شوند (Dehbandi, Shirpourasl and Asnaashari, 2026). بنابراین، پذیرش نهادی این فناوری‌ها مستلزم سازگاری آنها با رویه‌های اجرایی و الزامات سازمانی است.

٤-٣-تجربه‌های اجرایی ایالات متحده و وضعیت ایران

اداره حمل‌ونقل مینه‌سوتا از سال ۲۰۱٦ DPS را در بیش از ۲۰ پروژه به کار گرفت و با ترکیب داده‌های آن با مغزه‌گیری، نواحی کم‌چگالی را شناسایی کرد که در نمونه‌برداری تصادفی پذیرش آشکار نشده بودند (Federal Highway Administration, 2021). استفاده از نمونه‌های متراکم‌شده آزمایشگاهی نیز برای کاهش وابستگی به مغزه‌های میدانی بررسی شده است، هرچند اعتبارسنجی میدانی همچنان ضروری است (Hoegh et al., 2020). در میشیگان نیز کاربرد DPS در ۲۵ پروژه، امکان استفاده از این فناوری در مقیاس وسیع را نشان داد و اهمیت کنترل تکرارپذیری، رطوبت و کالیبراسیون را تأیید کرد (Kaseer et al., 2025). در مجموع، این تجربه‌ها از استقرار مرحله‌ای DPS در کنار آزمون‌های متداول پشتیبانی می‌کنند و حذف فوری مغزه‌گیری را تأیید نمی‌کنند.

در ایران، نشریه ۲۳٤ چارچوب فنی پایه برای کنترل کیفیت و آزمون‌های متداول روسازی آسفالتی را فراهم می‌کند. نشریه ۸۰۰-۱۰۱ الزامات کنترل اجرا و ارزیابی تراکم را مشخص کرده و استفاده از روش‌های غیرمخرب را در کنترل عملیات مجاز می‌داند، درحالی‌که مغزه‌گیری همچنان مبنای پذیرش تراکم است. نشریه ۷۷۳ نیز ساختار قطعه، زیرقطعه و ضرایب پرداخت را تعریف می‌کند. از مقایسه این اسناد می‌توان نتیجه گرفت که خلأ اصلی، نبود ساختار پذیرش نیست، بلکه نبود رویه مشخص و اعتبارسنجی‌شده برای ورود داده‌های پیوسته NDT به این ساختار است. برای جمع‌بندی شواهد اجرایی و نهادی و در عین حال مشخص‌کردن حدود قابلیت تعمیم آنها، نمونه‌های منتخب در جدول ۳ مقایسه شده‌اند.

جدول ۳. شواهد منتخب اجرایی و نهادی درباره مسیر ورود داده‌های غیرمخرب به فرایند پذیرش روسازی آسفالتی

نمونه و منبع	دامنه شواهد	یافته اصلی	برداشت برای چارچوب پیشنهادی
ایالت مینه‌سوتا؛ FHWA (2021)، Hoegh et al. (۲۰۲۰)	DPSدر پروژه‌های اجرایی همراه با مغزه‌گیری و کالیبراسیون آزمایشگاهی ارزیابی شده است.	DPSپوشش مکانی ارزیابی تراکم را افزایش می‌دهد و نواحی پنهان‌مانده از نمونه‌برداری محدود را شناسایی می‌کند.	این تجربه کاهش وابستگی به مغزه و استفاده هدفمند از آن را پشتیبانی می‌کند، اما حذف آزمون مرجع یا تعمیم رابطه کالیبراسیون را توجیه نمی‌کند.

ایالت میشیگان؛ Kaseer et al. (۲۰۲۵, ۲۰۲۶)	DPSبا استفاده از مغزه‌های میدانی و نمونه‌های آزمایشگاهی کالیبره و اعتبارسنجی شده است.	نتایج، تکرارپذیری سامانه و امکان برآورد قابل قبول چگالی را نشان می‌دهند و از پایداری بیشتر کالیبراسیون آزمایشگاهی حکایت می‌کنند.	شواهد، اعتبار اندازه‌گیری را تقویت می‌کنند، اما رطوبت، نوع مخلوط و اعتبار مدل همچنان باید کنترل شوند.
ایالت آلاسکا؛ Von Quintus et al. (۲۰۲۳)	استفاده از اندازه‌گیری پیوسته چگالی در برخی طرح‌های اجرایی و به‌کارگیری معیار درصد انطباق به‌جای درصد واقع در حدود مشخصات[۱۸] در برخی برنامه‌های پذیرش	تبدیل داده‌های پیوسته به سنجه پذیرش و ضریب پرداخت از نظر اجرایی امکان‌پذیر است.	حدود پذیرش و ضرایب پرداخت به مشخصات همان دستگاه اجرایی وابسته‌اند و نباید مستقیماً به سایر نظام‌ها تعمیم داده شوند.
راهنماهای FHWA و NCHRP؛ Von Quintus et al. (2023)، NASEM (۲۰۲۳)	چارچوب‌هایی برای ورود فناوری‌های ساخت هوشمند و NDTبه نظام تضمین کیفیت ارائه شده‌اند.	بر اعتبارسنجی، راستی‌آزمایی مستقل، صلاحیت عوامل، مدیریت داده و حل اختلاف تأکید شده است.	این راهنماها آمادگی یک فناوری مشخص را اثبات نمی‌کنند و سطح بلوغ هر فناوری باید جداگانه ارزیابی شود.
کشور ایران؛ نشریات ۲۳٤، ۸۰۰-۱۰۱ و ۷۷۳	وجود سازوکار کنترل اجرا و ارزیابی تراکم از یک‌سو و ساختار قطعه، زیرقطعه و ضرایب پرداخت از سوی دیگر	بخشی از زیرساخت فنی و قراردادی لازم برای تصمیم‌گیری پذیرش فراهم شده است.	خلأ اصلی، نبود رویه‌ای اعتبارسنجی‌شده برای ورود داده‌های پیوسته NDT به تصمیم‌های پذیرش و پرداخت است؛ بنابراین، توسعه مرحله‌ای مناسب‌تر است.

٤-٤-چارچوب پیشنهادی برای پذیرش مبتنی بر آزمون‌های غیرمخرب

چارچوب پیشنهادی این مطالعه بر پایه الزامات مشترکی تدوین شده است که در منابع بررسی شده برای استفاده از داده‌های غیرمخرب در تصمیم‌گیری‌های کیفی مورد تأکید قرار گرفته‌اند. مطالعات مرتبط با پذیرش روسازی بر ضرورت تعریف مشخصه کیفی مبنا، برقراری ارتباط معتبر میان پاسخ اندازه‌گیری و ویژگی موردنظر، ارزیابی دقت و عدم قطعیت، مقایسه با روش‌های مرجع، راستی‌آزمایی مستقل و تعیین قواعد تصمیم‌گیری تأکید کرده‌اند (NCHRP, 2023a,b; Von Quintus et al., 2023; Federal Highway Administration, 2024).

بر این اساس، مراحل شش‌گانه پیشنهادی به‌عنوان یک مسیر تحلیلی برای ارزیابی آمادگی فناوری‌ها و بررسی امکان ورود تدریجی آنها به نظام پذیرش تدوین شده‌اند و به‌عنوان یک دستورالعمل ثابت و یکسان برای همه فناوری‌ها در نظر گرفته نمی‌شوند. مرحله نخست، تعریف مشخصه کیفی و هدف تصمیم‌گیری است. دستگاه اجرایی باید پیش از انتخاب فناوری مشخص کند که هدف، کنترل فرایند، شناسایی نواحی غیرعادی، راستی‌آزمایی، پذیرش یک مشخصه کیفی یا تعیین ضریب پرداخت است. انتخاب فناوری بدون تعریف تصمیم مورد انتظار ممکن است به تولید داده‌هایی منجر شود که کاربرد قراردادی مشخصی ندارند.

مرحله دوم، برقراری رابطه معتبر میان پاسخ اندازه‌گیری‌شده و مشخصه کیفی است. روش مرجع، محدوده کالیبراسیون، دقت، تکرارپذیری، اریبی و عدم قطعیت باید مستند شوند. همچنین باید مشخص شود که رابطه یا معیار تفسیر خروجی برای چه نوع مخلوط، ضخامت، دما و شرایط محیطی معتبر است.

مرحله سوم، اجرای موازی و آزمایشی است. فناوری NDT باید در پروژه‌های آزمایشی، هم‌زمان با روش متداول پذیرش به کار رود، بدون آنکه در مراحل ابتدایی بر پرداخت پیمانکار اثر مستقیم داشته باشد. این مرحله امکان مقایسه نتایج، شناسایی منابع اختلاف، آموزش عوامل و ارزیابی پیامدهای اجرایی را فراهم می‌کند (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023b; Jeong et al., 2020).

مرحله چهارم، تدوین برنامه راستی‌آزمایی است. این برنامه باید کنترل تجهیزات، اندازه‌گیری مستقل، کامل‌بودن داده‌ها، نسخه نرم‌افزار و الگوریتم پردازش، بازدید نواحی غیرعادی و نحوه رسیدگی به داده‌های مفقود یا نامعتبر را پوشش دهد.

مرحله پنجم، ورود خروجی اعتبارسنجی‌شده به تصمیم قطعه و زیرقطعه است. برای داده‌های پیوسته می‌توان از درصد انطباق[19] و قواعد مشخص مربوط به نواحی غیرعادی استفاده کرد. در کاربردهایی مانند DPS، تعداد محدودی مغزه می‌تواند برای کالیبراسیون یا راستی‌آزمایی هدفمند حفظ شود؛ نحوه رسیدگی به اختلاف نتایج نیز باید در برنامه پذیرش به‌طور جداگانه تعریف شود (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023b).

مرحله ششم، تثبیت الزامات قراردادی است. حدود پذیرش، ضریب پرداخت، اقدام اصلاحی، مالکیت و نگهداری داده‌ها، صلاحیت عوامل، نحوه بازآزمایی، حل اختلاف و تناوب کالیبراسیون مجدد باید در اسناد قرارداد تعریف شوند.

این رویکرد مرحله‌ای، مسیری برای ارزیابی امکان استفاده از داده‌های غیرمخرب در پذیرش فراهم می‌کند، بدون آنکه جایگزینی آنها با آزمون‌های متداول از پیش فرض شود. نتیجه این فرایند ممکن است برای هر فناوری متفاوت باشد و نقش نهایی آن، از کنترل فرایند تا استفاده در پذیرش، بر اساس اعتبار اندازه‌گیری، قابلیت راستی‌آزمایی و قواعد قراردادی تعیین شود؛ توالی این گذار و ارتباط میان الزامات فنی، راستی‌آزمایی و تصمیم‌گیری در شکل ٦ نشان داده شده است.



شکل ٦. چارچوب پیشنهادی شش‌مرحله‌ای برای ورود تدریجی آزمون‌های غیرمخرب به نظام پذیرش روسازی آسفالتی

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این مقاله نشان می‌دهد که چالش اصلی به‌کارگیری آزمون‌های غیرمخرب در فرایند پذیرش روسازی‌های آسفالتی، صرفاً دسترسی به فناوری نیست، بلکه ایجاد ارتباطی علمی و قراردادی میان پاسخ اندازه‌گیری‌شده، توصیف کیفیت، راستی‌آزمایی دستگاه اجرایی، تصمیم پذیرش و پیامدهای پرداخت است. یک فناوری زمانی برای پذیرش آمادگی دارد که خروجی آن به‌طور مستند با مشخصه کیفی مبنای پذیرش مرتبط باشد، عدم قطعیت و حدود کاربرد آن شناخته شوند و استفاده از آن بر رویه‌های تکرارپذیر، کارکنان واجد صلاحیت، داده‌های ردیابی‌پذیر و قواعد تصمیم‌گیری مشخص استوار باشد. بنابراین، قابلیت اندازه‌گیری را نباید معادل قابلیت استفاده در پذیرش دانست. فناوری‌های بررسی‌شده از نظر آمادگی برای پذیرش در مراحل متفاوتی قرار دارند. پروفیل‌سنجی دی‌الکتریک مبتنی بر رادار نفوذی زمین، در میان فناوری‌های منتخب شواهد مشخص‌تری را برای پذیرش مرتبط با چگالی دارد؛ زیرا خروجی کالیبراسیون‌شده آن را می‌توان برحسب چگالی یا درصد فضای خالی بیان کرد. با این حال، قابلیت اطمینان آن به کالیبراسیون اختصاصی مخلوط، کیفیت نمونه‌های مرجع، شرایط رطوبتی، پایداری آنتن، پردازش سیگنال و اعتبار مدل تبدیل وابسته است.

تراکم هوشمند در مقایسه با پذیرش مستقیم چگالی، مبنای قابل دفاع‌تری برای کنترل عملیات فراهم می‌کند. ارزش اصلی این فناوری در ثبت پوشش غلتک، الگوهای تراکم، وضعیت دما در صورت وجود حسگر مناسب و تغییرات مکانی، در زمانی است که هنوز امکان انجام اقدام اصلاحی وجود دارد. پروفیل‌برداری حرارتی نصب‌شده بر فینیشر نیز با شناسایی اختلاف‌های دمایی و جدایش حرارتی هنگام اجرای مخلوط، به کنترل کیفیت عملیات کمک می‌کند؛ اما خروجی آن نشانگر خطرهای اجرایی است و سنجه مستقیم چگالی یا عملکرد روسازی محسوب نمی‌شود. ازاین‌رو، در مراحل آغازین، تراکم هوشمند و پروفیل‌برداری حرارتی باید به‌عنوان مکمل آزمون‌های پذیرش مبتنی بر چگالی به کار گرفته شوند و نباید جایگزین مستقیم آنها تلقی شوند. رویکرد مرحله‌ای و ترکیبی برای استقرار این فناوری‌ها مناسب‌تر از جایگزینی فوری آزمون‌های متداول است. در مراحل نخست، اندازه‌گیری‌های پیوسته غیرمخرب باید به‌موازات مغزه‌گیری و آزمایش‌های آزمایشگاهی متداول انجام شوند. این رویکرد به دستگاه اجرایی امکان می‌دهد پایداری کالیبراسیون، تکرارپذیری، عدم قطعیت اندازه‌گیری، قابلیت شناسایی نواحی غیرعادی و سازگاری نتایج میان پروژه‌ها را بدون انتقال زودهنگام خطر پذیرش ارزیابی کند. فناوری‌های غیرمخرب پیوسته می‌توانند با فراهم‌کردن اطلاعات سریع‌تر و با پوشش مکانی گسترده‌تر، ارزیابی کیفیت اجرا را تکمیل کنند.

در کاربردهایی مانند DPS، پس از اعتبارسنجی مناسب، امکان کاهش وابستگی به مغزه‌گیری گسترده وجود دارد و می‌توان از تعداد محدودتری مغزه به‌صورت هدفمند برای کنترل رابطه کالیبراسیون، راستی‌آزمایی نتایج و بررسی نواحی مشکوک استفاده کرد.

دستاورد اصلی این مطالعه، ارائه یک چارچوب شش‌مرحله‌ای برای ورود تدریجی فناوری‌های غیرمخرب به نظام پذیرش روسازی آسفالتی است. در این چارچوب، ابتدا هدف استفاده از فناوری و مشخصه کیفی موردنظر مشخص می‌شود، سپس دقت و قابلیت اطمینان نتایج آن بررسی و فناوری در کنار روش متداول به‌صورت آزمایشی ارزیابی می‌شود. در مراحل بعد، نحوه راستی‌آزمایی نتایج، استفاده از داده‌ها در تصمیم‌گیری، الزامات مربوط به پرداخت، مسئولیت نگهداری داده‌ها، صلاحیت عوامل اجرایی و شیوه حل اختلاف تعیین می‌شود تا در صورت احراز شرایط لازم، نتایج فناوری به‌تدریج وارد فرایند پذیرش و اسناد قراردادی شوند. در ایران، اولویت باید به اجرای پروژه‌های آزمایشی اختصاص یابد که در آنها یک یا چند فناوری غیرمخرب در کنار رویه‌های متداول به کار گرفته شوند. این پروژه‌ها باید با هدف تولید شواهد ملی درباره قابلیت اطمینان، حدود کاربرد و پیامدهای قراردادی فناوری‌ها طراحی شوند تا ورود تدریجی داده‌های پیوسته به ساختار موجود پذیرش امکان‌پذیر شود.

پژوهش‌های آینده باید کارایی، استقلال و قابلیت اجرای راهبردهای راستی‌آزمایی داده‌های پیوسته تولیدشده با تجهیزات تحت کنترل پیمانکار را در مقیاس پروژه ارزیابی کنند.

تدوین ساختارهای استاندارد داده و فرایندهای پردازش قابل ممیزی نیز باید در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد تا اندازه‌گیری‌های پیوسته به قطعه‌ها، زیرقطعه‌ها، سوابق اجرا و عملکرد بعدی روسازی مرتبط شوند. پایش بلندمدت پروژه‌ها ضروری است تا مشخص شود آیا شاخص‌های مکانی استخراج‌شده از آزمون‌های غیرمخرب، در مقایسه با نمونه‌های متداول پذیرش، قابلیت بیشتری برای پیش‌بینی عملکرد دارند و آیا استقرار این فناوری‌ها ارزش اقتصادی قابل اندازه‌گیری ایجاد می‌کند. هم‌زمان، برای گسترش کاربرد این فناوری‌ها باید موضوعاتی مانند آموزش و تأیید صلاحیت نیروی انسانی، نحوه تأمین تجهیزات و خدمات، تنظیم الزامات قراردادی، فراهم‌کردن نیروی متخصص در دستگاه اجرایی و جلب اعتماد عوامل درگیر نیز بررسی شود. توسعه هماهنگ این مؤلفه‌های فنی و نهادی می‌تواند آزمون‌های غیرمخرب را از ابزارهای اطلاعاتی پایش عملیات اجرا به بخشی قابل اعتماد از نظام پذیرش مبتنی بر شواهد روسازی‌های آسفالتی تبدیل کند.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Voids in Mineral Aggregate (VMA)
2. In-Place Density
3. Quality Control (QC)
4. Quality Assurance (QA)
5. Nondestructive Testing (NDT)
6. Ground-Penetrating Radar (GPR)
7. Dielectric Profiling System (DPS)
8. Intelligent Compaction (IC)
9. Bulk Specific Gravity (Gmb)
10. Maximum Theoretical Specific Gravity (Gmm)
11. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
12. Acceptance Quality Characteristic (AQC)
13. Performance-Related Specifications (PRS)
14. Performance-Based Specifications (PBS)
15. Intelligent Compaction Measurement Value (ICMV)
16. Paver-Mounted Thermal Profiling (PMTP)
17. Index-Based Performance Specifications (IPS)
18. Percent Within Limits (PWL)
19. Percent Conformance

۷- مراجع

- Abufares, L., Chen, Y. and Al-Qadi, I. L. (2025a). Asphalt concrete density monitoring during compaction using roller-mounted GPR . *Automation in Construction,* Vol. 174, Article 106158.
doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106158

- Abufares, L., Chen, Y. and Al-Qadi, I. L. (2025b). Isolating surface moisture in ground-penetrating radar signals for accurate asphalt concrete density prediction. Transportation Research Record, Vol. 2679, No. 8, 493–508.
doi.org/10.1177/03611981251334631

- Ayar, P., Ashnavar, A. and Ruhi, A. (2023). A review on using ultrasonic waves to evaluate the characteristics of asphalt pavement. *Journal of Nondestructive Testing Technology,* Vol. 3, No. 2, 62–70.
doi.org/10.30494/JNDT.2023.400881.1120

- Baghchesaraei, O. R., Ayar, P., Khademi, A., Taherkhani, B., & Hosseini Lavassani, S. (2026). Core Concepts for a Circular Future: Modularity, Repairability, and Recyclability. In Designing for a Circular Future. Springer Nature.
doi.org/10.1007/978-3-032-24891-6_2

- Cao, Q. and Al-Qadi, I. L. (2021). Signal stability and the height-correction method for ground-penetrating radar in situ asphalt concrete density prediction. *Transportation Research Record,* Vol. 2675, No. 9, 835–847.
doi.org/10.1177/03611981211004585

- Chang, G. K., Mohanraj, K., Stone, W. A., Oesch, D. J. and Gallivan, V. L. (2018). Leveraging intelligent compaction and thermal profiling technologies to improve asphalt pavement construction quality: A case study . *Transportation Research Record,* Vol. 2672, No. 26, 48–56.
doi.org/10.1177/0361198118758285

- Chen, Y., Abufares, L. and Al-Qadi, I. L. (2026). Reliability of in-situ asphalt concrete density prediction by roller-mounted GPR. *NDT & E International,* Vol. 161, Article 103708.
doi.org/10.1016/j.ndteint.2026.103708

- Dehbandi, R., Shirpourasl, Z. and Asnaashari, E. (2026). Digital transformation of construction quality management: Systematic review of adoption and governance. *Automation in Construction,* Vol. 191, Article 107166.
doi.org/10.1016/j.autcon.2026.107166

- Diamanti, N., Annan, A. P., Jackson, S. R. and Klazinga, D. (2021). A GPR-based pavement density profiler: Operating principles and applications", Remote Sensing, Vol. 13, No. 13, Article 2613.
doi.org/10.3390/rs13132613

- Federal Highway Administration. (2021). Spotlight on pavement density: Minnesota Department of Transportation working with dielectric profiling systems. *Publication No. FHWA-HIF-21-040, Washington,* DC: U.S. Department of Transportation.

- Federal Highway Administration. (2024). NDT and ICT for asphalt pavement construction: Tech brief. Publication No. FHWA-HIF-24-031, *Washington, DC: U.S. Department of Transportation*.

- Federal Highway Administration. (2026). Quality assurance procedures for construction. 23 CFR Part 637, Subpart B, current as of August 20, Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

- Hoegh, K., Steiner, T., Teshale, E. Z. and Dai, S. (2020). Minnesota Department of Transportation case studies for coreless asphalt pavement compaction assessment Transportation Research Record, Vol. 2674, No. 2, 291–301.
doi.org/10.1177/0361198120907582

- Jeong, J., Wang, Y. D., Ghanbari, A., Nash, C., Nener-Plante, D., Underwood, B. S. and Kim, Y. R. (2020). Pavement performance predictions using performance-volumetric relationship and evaluation of construction variability: Example of MaineDOT shadow project for the development of performance-related specifications *Construction and Building Materials,* Vol. 263, Article 120150.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120150

- Kaseer, F., Muslim, H. B., Haider, S. W. and Akerly, E. (2025). Use of dielectric profiling system for rapid continuous measurement of asphalt mix density: Case studies in Michigan. *Transportation Research Record,* Vol. 2679, No. 7, 773–790. **doi.org/10.1177/03611981251328973**

- Kaseer, F., Roberts, R., Akerly, E. and Cist, D. (2026). Development and validation of a new dielectric profiling system dielectric–density calibration model using laboratory and field data. *Transportation Research Record,* 1–19. **doi.org/10.1177/03611981261429869**

- Khazanovich, L., Hoegh, K., Conway, R. and Dai, S. (2017). Nondestructive evaluation of bituminous compaction uniformity using rolling density. *SHRP2 Report R06C,* Technologies to Enhance Quality Control on Asphalt Pavements, Washington, DC: Second Strategic Highway Research Program.

- Muslim, H. B., Haider, S. W. and Khazanovich, L. (2024). Flexible pavement longitudinal joint quality evaluation using non-destructive testing. *Journal of Road Engineering,* Vol. 4, No. 2, 189–202. **doi.org/10.1016/j.jreng.2024.03.001**

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2023a). Incorporating nondestructive testing in quality assurance of highway pavement construction: Conduct of research report. NCHRP Web-Only Document 375, Washington, DC: *The National Academies Press.* **doi.org/10.17226/27442**

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2023b). Incorporating nondestructive testing in quality assurance of highway pavement construction: Manual. *NCHRP Research Report 1082,* Washington, DC: The National Academies Press. **doi.org/10.17226/27443**

- Nevalainen, N. and Pellinen, T. (2016). The use of a thermal camera for quality assurance of asphalt pavement construction. *International Journal of Pavement Engineering,* Vol. 17, No. 7, 626–636. **doi.org/10.1080/10298436.2015.1007240**

- Plan and Budget Organization of Iran. (2011). Regulations for asphalt pavements of Iran. Publication No. 234, *1st revision, Tehran: Office of the Technical and Executive System.*

- Plan and Budget Organization of Iran. (2019). Instruction for evaluation of quality and technical specifications of executed works. *Publication No. 773, Tehran: Office of the Technical and Executive System. (in Persian)*

- Plan and Budget Organization of Iran. (2026). General technical specifications for roads . Publication No. 800-101, 3rd revision, Tehran: Office of the Technical and Executive System.

- Saleh, N. F., DeCarlo, K., Underwood, B. S., Pine, W. J., Huber, G., Tran, N., West, R. C. and Kim, Y. R. (2023). Case studies of asphalt pavement quality assurance specifications, performance-related specifications, and performance-based specifications. *Transportation Research Record,* Vol. 2677, No. 11, 682–696. **doi.org/10.1177/03611981231166685**

- Savan, C. M., Ng, K. W. and Ksaibati, K. (2016). Benefit-cost analysis and application of intelligent compaction for transportation . *Transportation Geotechnics,* Vol. 9, 57–68. **doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.07.001**

- Sivagnanasuntharam, S., Sounthararajah, A., Ghorbani, J., Bodin, D. and Kodikara, J. (2023). A state-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design,* Vol. 24, No. 1, 1–30. **doi.org/10.1080/14680629.2021.2015423**

- Steiner, T., Hoegh, K., Teshale, E. Z. and Dai, S. (2020). Method for assessment of modeling quality for asphalt dielectric constant to density calibration. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements,* Vol. 146, No. 3, Article 04020054. **doi.org/10.1061/JPEODX.0000210**

- Sui, X., Wang, S., Leng, Z. and Gong, M. (2025). In-situ density measurement using GPR considering random pore distribution of asphalt pavement, *Measurement,* Vol. 243, Article 116479. **doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116479**

- Von Quintus, H. L., Nabizadeh, H., Hand, A. and Hajj, E. (2023). A practice for including intelligent construction equipment in quality assurance programs. Publication No. FHWA-HIF-23-007, Washington, DC: *Federal Highway Administration*.

- Wang, S. and Al-Qadi, I. L. (2022). Impact and removal of ground-penetrating radar vibration on continuous asphalt concrete pavement density prediction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* Vol. 60, Article 5106414.
doi.org/10.1109/TGRS.2021.3106041

- Wang, Y. D., Liu, J. and Liu, J. (2023). Integrating quality assurance in balance mix designs for durable asphalt mixtures: State-of-the-art literature review. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements,* Vol. 149, No. 1, Article 03122004.
doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-957

- Wang, S., Al-Qadi, I. L. and Cao, Q. (2020). Factors impacting monitoring asphalt pavement density by ground penetrating radar. *NDT & E International,* Vol. 115, Article 102296.
doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102296

- Wang, S., Sui, X., Leng, Z., Jiang, J. and Lu, G. (2022a). Asphalt pavement density measurement using non-destructive testing methods: Current practices, challenges, and future vision. *Construction and Building Materials,* Vol. 344, Article 128154.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128154

- Wang, S., Leng, Z., Zhang, Z. and Sui, X. (2022b). Automatic asphalt layer interface detection and thickness determination from ground-penetrating radar data. *Construction and Building Materials,* Vol. 357, Article 129434.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129434

- Wang, Y., Li, J., Zhang, X., Yao, Y., & Peng, Y. (2024). Recent development in intelligent compaction for asphalt pavement construction: Leveraging smart sensors and machine learning. Sensors, 24(9), Article 2777.
doi.org/10.3390/s24092777

- Wang, S., Yang, M., Zhang, Y., Huang, X., Ma, T. and Wang, D. (2026). A comprehensive evaluation of non-destructive density and moisture content measurement of asphalt pavement during construction using ground-penetrating radar. *Journal of Road Engineering,* Vol. 6, 51–73.
doi.org/10.1016/j.jreng.2025.12.001

- Xu, Q. and Chang, G. K. (2016). Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction. *Automation in Construction,* Vol. 62, 78–88.
doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.004

- Yao, Y. and Song, E. (2023). Intelligent compaction methods and quality control. Smart Construction and Sustainable Cities, Vol. 1, No. 1, Article 2.
doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4

- Yoon, S., Hastak, M. and Lee, J. (2018). Suitability of intelligent compaction for asphalt pavement quality control and quality assurance. *Journal of Construction Engineering and Management,* Vol. 144, No. 4, Article 04018006.
doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001401

- Zaumanis, M., Poulikakos, L. D. and Partl, M. N. (2018). Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters. *Materials & Design,* Vol. 141, 185–201.
doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.035

- Zhan, Y., Zhang, Y., Nie, Z., Luo, Z., Qiu, S., Wang, J., Zhang, A. A., Ai, C., Tang, X. and Tan, C. (2023). Intelligent paving and compaction technologies for asphalt pavement. *Automation in Construction,* Vol. 156, Article 105081.
doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105081

- Zhou, F., Hu, S. and Newcomb, D. (2020). "Development of a performance-related framework for production quality control with ideal cracking and rutting tests. *Construction and Building Materials,* Vol. 261, Article 120549.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120549

The Role of Nondestructive Testing in the Assessment and Quality Control of Asphalt Pavement Compaction and Construction Uniformity

Ali Farrokhi, Civil Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

***Pooyan Ayar**, Assistant Professor, School of Civil Engineering,*
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

E-mail: ayar@iust.ac.ir

Received: September 2026- Accepted: October 2026

ABSTRACT

Advances in nondestructive testing and intelligent construction technologies have enabled faster and more spatially extensive assessment of asphalt pavement quality. However, measurement capability does not necessarily indicate a technology's readiness for quality assurance and acceptance. This analytical review examines selected technologies from process control to acceptance, focusing on density, compaction uniformity, and thermal conditions affecting asphalt placement and compaction. Scientific literature, technical reports, standards, technical specifications, and contractual documents were reviewed. Three technologies were evaluated in terms of measured response, relationship to an acceptance quality characteristic, validation, reliability, and acceptance readiness: the dielectric profiling system (DPS) based on ground penetrating radar (GPR), intelligent compaction, and thermal profiling systems mounted on pavers. The findings indicate that DPS offers a more direct pathway toward density-related acceptance because its calibrated output can be expressed as density or air void content. Nevertheless, its application requires calibration and validation tailored to project conditions. Intelligent compaction is more applicable to controlling roller coverage and compaction uniformity, whereas thermal profiling is better suited to monitoring thermal uniformity and identifying areas susceptible to thermal segregation. Iranian specifications establish a lot and sublot structure and a mechanism for calculating pay factors, but no validated procedure exists for incorporating continuous data from these technologies into acceptance decisions. Accordingly, a framework comprising six stages is proposed: defining the quality characteristic and decision objective, validating the measurement, conducting pilot and shadow implementation, establishing verification procedures, incorporating data into acceptance decisions, and developing contractual provisions for phased implementation.

Keywords: Acceptance, Asphalt Pavement Compaction, Nondestructive Testing, Quality Assurance, Quality Control