بررسی و مقایسه فناوری‌های جدید کنترل تراکم به منظور اصلاح روش‌های کنترل و تضمین کیفیت تراکم لایه‌های خاکی در پروژه‌های راهسازی کشور

امین دولت پور*، دانشجوی مقطع دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
اورنگ فرزانه، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:dolatpooramin@ut.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۴/۲۵- پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵
صفحه۲۰۶-۱۷۷

چکیده

میزان تراکم و یکنواختی آن در طول و عرض راه یک پارامتر بسیار مهم در تعیین کیفیت مکانیکی لایه‌های راه است. اجرای تراکم هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و ممکن است در صورت نامناسب یا ناکافی بودن ابزار و روش کنترل کیفیت تراکم، به نتایج مطلوب نرسیده و موجب خرابی‌های موضعی و یا خرابی‌های عمومی زوددرس شود. کنترل کیفیت تراکم همانطور که در کشور ما نیز رایج است، می‌تواند تنها با کنترل نتیجه نهایی غلتک‌زنی انجام شود و یا اینکه ترکیبی از کنترل فرایند غلتک‌زنی به اضافه تعداد اندکی آزمون از نتیجه نهایی باشد. روش‌های آزمون برجا، اندازه‌گیری‌هایی با دقت متوسط از خواص مصالح متراکم شده فراهم می‌آورند. از محدودیت‌های این روش‌ها می‌توان به کنترل کیفیت تراکم در تعداد محدودی از نقاط سطح لایه متراکم شده، نتایج غیرقابل اعتماد در بعضی از این روش‌ها به دلیل حضور ذرات بیش از اندازه درشت، وابسته بودن روش کنترل سختی به رطوبت خاک و ابعاد سطح بارگذاری، محدودیت عمق اندازه‌گیری در بعضی از آن‌ها و نداشتن کنترل بر روی ضخامت لایه‌ها اشاره کرد. با استفاده از دستگاه کنترلوگراف جهت ثبت عملکرد روزانه غلتک (کنترل سرعت، فاصله طی شده، فرکانس، روشن یا خاموش بودن ویبره دستگاه و...) و نیز جدول‌های عملکرد غلتک یا ساخت قطعه‌های آزمایشی می‌توان کنترلی اولیه بر فرایند اجرا حاکم کرد که باعث افزایش یکنواختی و کیفیت تراکم می‌شود. با معرفی سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم، بسیاری از محدودیت‌های روش‌های سنتی کنترل تراکم برطرف شد. هدف این تکنولوژی دست یابی به تراکم یکنواخت و با کیفیت است. این روش امکان کنترل حین اجرای تراکم و کنترل صددرصدی مساحت پروژه را فراهم می‌آورد. هدف تحقیق حاضر بررسی و تشریح سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم (CCC) و تراکم هوشمند (IC) و نیز ارزیابی روش‌های کنترل تراکم لایه‌های خاکی راه در کشور به منظور پیشنهاد برای اصلاح وضع موجود است.

واژه‌های کلیدی: کنترل کیفیت تراکم، تراکم هوشمند، سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم، آیین‌نامه‌های کنترل تراکم

۱- مقدمه

در حال حاضر کنترل کیفیت تراکم مصالح خاکی و سنگدانه‌ای در ایران عموما با اندازه‌گیری دانسیته خشک درجا و نیز آزمون بارگذاری استاتیکی صفحه (VSS) در حالت خاص برای سنگریزها و نیز مصالح خردشونده انجام می‌شود. روش مخروط ماسه بسیار ساده بوده و دارای خطای کمی است و نتایج آن با سایر آزمایش‌های برجا قابل‌مقایسه می‌باشد اما محدودیت‌هایی بشرح زیر دارد:

- نتایج حاصل از این روش معرف درصد حجمی کوچکی از مصالح است (معمولاً 1:100,000 تا 1:1000,000)
- در فرایند ساخت تأخیر ایجاد می‌کند.

- مخرب است و در محل آزمایش حفره ایجاد می‌کند.
- عمق اندازه‌گیری آن کم است (۱۵ سانتیمتر)
- در فاصله انجام آزمایش تا تحلیل داده‌ها و اعلام نتایج، کار متوقف می‌شود.
- نیروی انسانی مورد نیاز در طی فرایند آزمایش قابل توجه است.

به دلیل محدودیت‌های فوق، روش‌های مورداستفاده برای کنترل تراکم طی دهه‌های گذشته با نوآوری‌هایی مواجه بوده‌اند. بعضی از کشورها برای کنترل تراکم مصالح از همان اندازه‌گیری دانسیته خشک اما از طریق تراکم سنج‌های هسته‌ای (NDG)، استفاده می‌کنند. انجام آزمایش با دانسیته سنج هسته‌ای بسیار سریع است و نتایج بلافاصله بعد از آزمایش ارائه می‌شود. این ابزار به آموزش خاصی نیاز ندارد و هزینه انجام آزمایش با آن ارزان است اما برای مقابله با پرتوهای رادیواکتیو باید اقدامات ایمنی را در نظر داشت. برای اجتناب از پرتوهای رادیواکتیو، دانسیته‌سنج‌های غیرهسته‌ای نیز ساخته شدند اما نتایج ارزیابی‌های سایر کشورها نشان می‌دهد که رضایت عمومی از ابزارهای غیرهسته‌ای کم بوده است به‌طوری‌که هیچ‌کدام از آنها استفاده از این ابزارها را پیشنهاد نکردند. بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط ایالات متحده آمریکا، استفاده از همه ابزارهای غیرهسته‌ای موجود دشوار و در مقایسه با NDG به زمان بیشتری برای آزمایش نیاز دارند. به‌علاوه دانسیته سنج الکتریکی (EDG) و شاخص دانسیته رطوبت (MDI) هنگام استفاده برای آزمایش خاک‌های سخت و رس‌های با خاصیت خمیری بالا، با محدودیت‌هایی مواجه هستند. لذا دانسیته سنج هسته‌ای (NDG) هنوز مناسب‌ترین گزینه برای اندازه‌گیری دانسیته و درصد رطوبت است. اگرچه تراکم مصالح باعث افزایش دانسیته می‌شود اما هدف اصلی تراکم بهبود خواص مهندسی مصالح است نه‌فقط افزایش دانسیته. خواص عملکردی کلیدی مصالح، سختی و مقاومت مصالح هستند که مستقیماً با عملکرد سازه‌ای روسازی ارتباط دارند. البته باید توجه داشت که روش دانسیته خشک را نمی‌توان از هیچ پروژه‌ای به‌طور کامل حذف کرد. این روش برای کالیبراسیون سایر ابزارهای آزمون برجا مورداستفاده قرار می‌گیرد و باید همواره به‌عنوان مرجع اصلی در دستور کار قرار داشته باشد. امروزه بیشتر کشورها به سمت اندازه‌گیری سختی با استفاده از ابزارهای نفوذسنج مخروطی دینامیکی (DCP) و افت‌و خیزسنج سبک وزنه (LWD) پیش رفته‌اند و آیین‌نامه‌های مبتنی بر سختی تشکیل داده‌اند. انجام آزمایش با ابزارهای مبتنی بر سختی نیز سریع و راحت است اما نتایج این ابزارها حساس به رطوبت است و هر کدام از آنها در رابطه با بعضی از مصالح، محدودیت‌هایی دارند. در کل همه ابزارهای آزمون نقطه‌ای کیفیت تراکم را به صورت تصادفی کنترل کرده و ممکن است به دلیل ناهمگنی‌های ناشی از اجرا، ناهمگنی بستر و با توجه به عدم پوشش کامل مساحت پروژه توسط آزمون‌های برجا، تراکم حاصل شده غیر یکنواخت و دارای ضعف‌های موضعی باشد. در تعدادی از کشورها به منظور افزایش یکنواختی تراکم، از روش‌هایی که ترکیبی از کنترل فرایند اجرا و کنترل نتیجه نهایی است استفاده می‌شود. در گزیده‌ای از آیین‌نامه "راهنمایی‌های فنی برای ساخت خاکریزها و لایه‌های فوقانی"کشور فرانسه و نیز در آیین‌نامه عملیات خاکی بریتانیا و آیین‌نامه ایالت واشنگتون، راهنمایی‌های فنی برای استفاده بهینه از تجهیزات و کنترل اولیه تراکم ارائه شده است. در این آیین‌نامه روش‌های تراکم مورد نیاز برای تراکم خاکریزها رتبه بندی شده و نوع غلتک مناسب برای انواع خاک‌ها و نیز تعداد گذر لازم پیشنهاد می‌شود. در این حالت، عملکرد غلتک با استفاده از دستگاه کنترولوگراف قابل کنترل است. دستگاه کنترولوگراف پارامترهای عملکردی غلتک مانند سرعت، دامنه و فرکانس ارتعاش را ثبت می‌کند. بنابراین استفاده از آن خطای ناشی از عملکرد غلتک را کاهش داده و قابلیت اطمینان بیشتری حاصل خواهد شد. حالت دقیق‌تر روش ترکیبی، استفاده از قطعه آزمایشی است که نوع غلتک و پارامترهای لازم برای متراکم کردن یک نوع خاک، به صورت میدانی مشخص می‌شود. با توجه به هزینه بالای ساخت قطعه آزمایشی، این روش برای پروژه‌های دارای مصالح غیر یکنواخت مقرون به صرفه نیست. بنابراین در روش ترکیبی، با مشخص کردن یک سری پارامترهای کنترلی، تراکم به صورت پیوسته ارزیابی شده و یکنواختی تراکم حاصل شده بیشتر خواهد بود. پیشرفت‌های اخیر در پایش تراکم و کنترل فرایند

اجرا در زمان واقعی موجب بهبود تراکم لایه‌های خاکی راه شده است. سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم و تراکم هوشمند به‌منظور برطرف کردن محدودیت‌های روش‌های آزمون برجا، به صنعت راه‌سازی معرفی شدند. استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند کیفیت تراکم و عملکرد طولانی مدت راه را بهبود بخشد. استفاده موفق از تکنولوژی کنترل پیوسته تراکم نیاز به کالیبراسیون، صحت سنجی و اعتبار سنجی دقیق آن دارد تا از پایش صحیح تراکم و ارزیابی صحیح کیفیت تراکم اطمینان حاصل شود. در حال حاضر کشورهای اروپایی و بعضی از ایالت‌های آمریکا از تکنولوژی تراکم هوشمند استفاده می‌کنند و آیین‌نامه‌های تراکم هوشمند تشکیل داده‌اند. با توجه به مشکلات فراوانی که در بحث کنترل کیفیت تراکم راه‌های کشورمان داریم و نیز با توجه به این موضوع که در پروژه‌های بزرگ افزایش راندمان کار و رعایت زمان بندی‌های فشرده اجرایی اهمیت فراوانی یافته است، نقد و بررسی وضع موجود کشور و اصلاح روش‌های جاری در فرایند کنترل تراکم در کشور امری ضروری است. در ادامه توضیح مختصری از ابزارهای آزمون برجا ارائه می‌شود سپس به تشریح تکنولوژی تراکم هوشمند پرداخته خواهد شد. در پایان نیز با توجه به وضع موجود ایران، پیشنهادی برای اصلاح روش‌های جاری در کنترل تراکم لایه‌های خاکی ارائه می‌گردد.

۲- ابزارهای آزمون برجا

ارزیابی کیفیت تراکم مبتنی بر خواص مهندسی مصالح است که شامل دانسیته و سختی مصالح متراکم شده می‌باشد. رایج‌ترین روش‌های کنترل کیفیت مبتنی بر دانسیته عبارت‌اند از اندازه‌گیری میدانی دانسیته و درصد رطوبت با استفاده از آزمون مخروط ماسه یا روش بالون آب. در چند دهه اخیر روش‌های دیگری نیز برای اندازه‌گیری دانسیته به وجود آمده‌اند که عبارت‌اند از دانسیته سنج‌های هسته‌ای، دانسیته سنج الکتریکی و بازتاب‌سنج محدوده زمانی که متکی بر روابط بین خواص الکتریکی خاک و دانسیته و میزان رطوبت محلی خاک هستند (J.-L. Briaud & Seo, 2003). روش‌های مبتنی بر سختی، اندازه‌گیری‌هایی از خاک فراهم می‌آورند که بیانگر مدول و سختی میدانی خاک است. مدول الاستیک ویژگی اصلی خاک است درحالی‌که سختی متأثر از پاسخ خاک و روند مورداستفاده برای آزمایش است چون فرایند آزمایش وابسته به‌اندازه ناحیه بارگذاری است. بنابراین در مصالح الاستیک اگر مساحت ناحیه بارگذاری متفاوت باشد، سختی اندازه‌گیری شده با یک آزمایش با سختی اندازه‌گیری شده با آزمایش دیگر متفاوت خواهد بود. همچنین ابزارهای مبتنی بر مقاومت و سختی خاک نسبت به رطوبت حساس هستند. مرسوم‌ترین روش‌های آزمون میدانی مبتنی بر مقاومت و سختی که مورد استفاده قرارگرفته‌اند عبارت‌اند از: آزمون بارگذاری صفحه (PLT)، افت‌وخیز سنج‌هایFWD و LWD، نفوذسنج مخروط دینامیکی (DCP)، چکش ضربه‌ای کلگ (CIV) و ژئوگیج. اتحادیه اروپا در سال ۲۰۰۸ استانداردهایی برای استفاده از LWD در ارزیابی لایه‌های متراکم شده مصالح تدوین کرد (CEN ICS 93.020 : روش اندازه‌گیری تراکم دینامیکی و ظرفیت باربری با استفاده از افت و خیز سنج سبک سقوط وزنه با صفحه کوچک). در آیین‌نامه بریتانیا نیز در سال ۲۰۰۹ روشی مبتنی بر خواص سختی مصالح ارائه شد. مطابق تحقیقات انجام‌شده اکثریت اداره‌های حمل‌ونقلی آمریکا نیز برای کنترل تراکم مصالح خاکی علاقه‌مند به استفاده از آیین‌نامه‌های مبتنی بر سختی هستند اما تعداد اندکی از آنها این آیین‌نامه‌ها را تشکیل داده‌اند که دلایل اصلی آن عبارت‌اند از: نبود پرسنل آموزش‌دیده، نبود بودجه، نیاز به تجهیزات آزمایشی جدید و آشنا نبودن پیمانکارها با این آیین‌نامه‌ها. فقط اداره‌های حمل‌ونقلی ایندیانا و مینسوتا از آیین‌نامه‌های مبتنی بر سختی برای کنترل تراکم خاک با استفاده از ابزارهای DCP و LWD به‌صورت گسترده استفاده کرده‌اند. برای حل این مسئله اداره فدرال و آژانس‌های ایالتی استفاده از روش‌های سختی در کنترل تراکم را مورد بررسی قرار دادند که با تشکیل و استفاده از فرایند طراحی مکانیستی - تجربی این تلاش‌ها افزایش یافت. در حوزه اندازه‌گیری دانسیته و درصد رطوبت، اکثر اداره‌های حمل‌ونقلی مایل بودند که به‌جای NDG از ابزارهای دانسیته‌سنج غیرهسته‌ای (الکتریکی) استفاده کنند. اما نتایج

ارزیابی نشان داد که رضایت عمومی اداره‌ها از ابزارهای غیرهسته‌ای کم بود به‌طوری‌که هیچ‌کدام از آنها استفاده از این ابزارها را پیشنهاد نکردند. بر اساس مطالعات انجام‌شده، استفاده از همه ابزارهای غیرهسته‌ای موجود دشوار و در مقایسه با NDG به زمان بیشتری برای آزمایش نیاز دارند. به‌علاوه دانسیته سنج الکتریکی (EDG) و شاخص دانسیته رطوبت (MDI) هنگام استفاده برای آزمایش خاک‌های سخت و رس‌های با خاصیت خمیری بالا، با محدودیت‌هایی مواجه هستند. لذا دانسیته سنج هسته‌ای (NDG) هنوز مناسب‌ترین گزینه برای اندازه‌گیری دانسیته و درصد رطوبت است ولی باید در استفاده از آن اقدامات ایمنی لحاظ گردد تا اپراتور از پرتوهای رادیواکتیو در امان بماند.

در رابطه با ابزارهای اندازه‌گیری میدانی سختی نیز باید گفت که انجام آزمایش با همه این ابزارها سریع و راحت است. ابزارهای اندازه‌گیری سختی حساس به رطوبت می‌باشند و هیچ‌یک از آنها قادر به اندازه‌گیری درصد رطوبت نیستند. مطالعات قبلی نشان داده است که نتایج به‌دست‌آمده از ژئوگیج بسیار حساس به فرایند قرارگیری ابزار در محل آزمایش و نیز سختی دو اینچ بالایی لایه مورد آزمایش است که تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر قابلیت اطمینان آن می‌گذارد. ابزار تراکم بریو (BCD) ، DCP و LWD و تحلیلگر تراکم خاک (SCS) برای خاک‌های خیلی نرم ریزدانه مناسب نیستند. همچنین بر اساس ASTM D6951، استفاده از ابزار DCP به مصالح با حداکثر اندازه ذرات کوچک‌تر از ۵۰ میلی متر (۲ اینچ) محدود می‌شود. عمق تأثیر این ابزارها متفاوت است. بعضی از آنها مانند BCD دارای عمق تأثیر سطحی هستند که ممکن است نتایج آنها بیانگر وضعیت کل لایه تراکم نباشد. از طرف دیگر باید در تحلیل نتایج روی لایه‌های نسبتاً نازک دقت زیادی داشت زیرا عمق تأثیر بعضی ابزارها از ضخامت لایه تراکم تجاوز می‌کند که یک مقدار مرکب از خواص هر دو لایه را نتیجه می‌دهد. به‌علاوه ابزارهای اندازه‌گیری سختی، بارهای متفاوتی به سطح لایه اعمال می‌کنند که بر اندازه‌گیری‌ها تأثیرگذار خواهد بود. بنابراین برای بارهای طراحی باید اندازه‌گیری‌ها را تصحیح کرد. بیشتر ابزارها محدودیت‌هایی نسبت به نوع مصالح مورداستفاده دارند به‌طوری‌که هیچ ابزاری به‌تنهایی برای همه نوع مصالح قابل‌استفاده نیست. بر اساس یک بررسی انجام شده در اداره حمل‌ونقلی ایندیانا، استفاده از قطعه-های آزمایشی برای تشکیل مقدار هدف ابزارهای جدید کنترل تراکم میدانی، استفاده از این ابزارها را راحت می‌کند زیرا فرصتی برای شناسایی محدودیت‌های آنها به وجود می‌آورد. همچنین قطعه آزمایشی به آشنایی پیمانکارها با فرایند آزمایش و اندازه‌گیری‌ها کمک می‌کند. در ادامه ابتدا دانسیته سنج هسته‌ای معرفی شده و سپس به شرح تکنولوژی تراکم هوشمند پرداخته می‌شود.

۳- دانسیته سنج هسته‌ای (NDG)

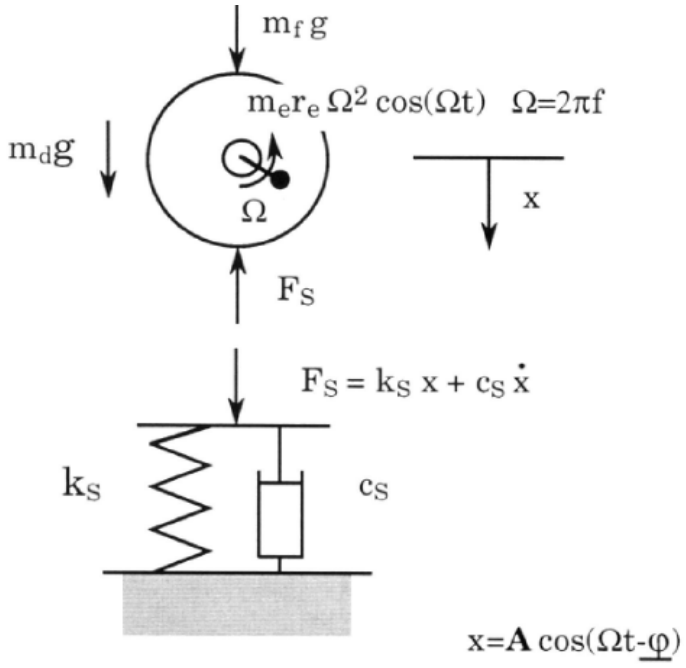
دانسیته سنج هسته‌ای نشان داده‌شده در شکل ۱ ، یک روش سریع و نسبتاً دقیق برای تعیین دانسیته و درصد رطوبت محلی خاک متراکم شده است. دانسیته سنج هسته‌ای از یک منبع ایزوتوپ رادیواکتیو استفاده می‌کند که می‌تواند امواج را از روی سطح خاک (روش انعکاس امواج) یا از نوک یک میله فرو رفته در خاک (روش مخابره مستقیم) ارسال کند. منبع، ایزوتوپ فوتون (معمولاً اشعه گاما و بتا) ساطع می‌کند که به گیرنده زیر گیج منعکس می‌شوند و با کالیبراسیون صورت گرفته، دانسیته مرطوب و درصد رطوبت خاک محاسبه می‌شود.

دانسیته سنج هسته‌ای، دانسیته و درصد رطوبت خاک را به‌راحتی اندازه‌گیری کرده و نتایج نسبتاً دقیقی دارد. این ابزار قابل‌حمل بوده و استفاده از آن آسان است. آزمایش با این دستگاه، سریع و غیر مخرب بوده و می‌توان نتایج آزمایش را ذخیره کرده و انتقال داد.

شکل ۱. دانسیته سنج هسته‌ای

٤- غلتک‌های هوشمند

همه ابزارهای آزمایش برجا فقط می توانند خواص مکانیکی بخش کوچکی از مصالح متراکم شده را نشان دهند. درنتیجه ممکن است نقاط ضعیفی وجود داشته باشند که با آزمایشهای برجا قابل تشخیص نباشند. این امر موجب تراکم غیر یکنواخت و ناکافی شده و عملکرد طولانی مدت روسازی را با مشکل روبرو می‌کند. پیشرفت‌های اخیر در پایش تراکم و کنترل فرایند اجرا در زمان واقعی موجب بهبود تراکم لایه‌های خاکی راه شده است. سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم و تراکم هوشمند به‌منظور برطرف کردن محدودیت‌های روش‌های سنتی کنترل تراکم به صنعت راه‌سازی معرفی شدند. نخستین هدف این سیستم‌ها رسیدن به تراکم یکنواخت و افزایش کیفیت نهایی تراکم با تمرکز بر روی نقاط ضعیف است. در این حالت زمان لازم برای متراکم کردن یک لایه، کاهش یافته و از تراکم بیش‌ازحد که سنگ‌دانه‌ها را می‌شکند و نیز از تراکم ضعیف که موجب نشست و خرابی می‌شود اجتناب خواهد شد. این سیستم‌ها نیز بر اساس سختی خاک که با تحلیل سیگنال‌های شتاب ثبت‌شده توسط شتاب سنج‌های نصب شده بر روی استوانه غلتک اندازه‌گیری می‌شود، کیفیت تراکم را به‌صورت پیوسته کنترل می‌کنند. (M. A. Mooney & Facas, 2013). مدل موجود در شکل ۱، استوانه یک غلتک به همراه پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل نیروهای دینامیکی غلتک را نشان می دهد. استوانه غلتک به جرم m_d شامل یک تحریک کننده به فرم یک جرم دوار است که به همراه خاک، ارتعاش استوانه را در فرکانس f فراهم می‌آورد. با یک تقریب خوب می‌توان بستر را با یک فنر با سختی k_s و یک میراگر ویسکوز با ضریب میرایی c_s به صورت موازی مدل کرد که به همراه استوانه تشکیل یک سیستم ارتعاش جرم و فنر و میراگر می‌دهند و خواص یک متراکم کننده دینامیکی را توصیف می‌کنند. با افزایش تراکم، سختی افزایش و میرایی کاهش می‌یابد لذا وقتی پارامترهای غلتک ثابت باشد، رفتار ارتعاشی سیستم تغییر می کند. این فرایند تا کنون برای اندازه گیری تراکم به منظور کنترل آن مورد استفاده قرار گرفته است.



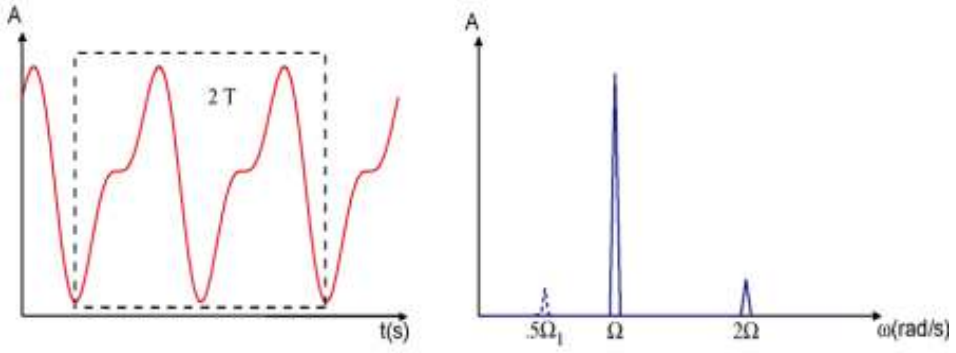
شکل ۲. مدل دو درجه آزادی ارتعاش استوانه و قاب

٤-۱- تاریخچه

مفاهیم پایه تکنولوژی‌های کنترل پیوسته تراکم (CCC) و تراکم هوشمند (IC) به سال ۱۹۳۰ بازمی‌گردد، زمانی که اولین تلاش برای اندازه‌گیری، ثبت و پایش اندازه‌گیری‌های ارتعاش در حین تراکم با استفاده از صفحات ویبراتوری انجام شد. ساخت اولین غلتک هوشمند به سال ۱۹۷٤ بازمی‌گردد، زمانی که دکتر هنز تورنر از اداره راه سوئد مطالعات میدانی، با استفاده از یک غلتک ویبراتوری کششی دیناپک به وزن ۵ تن نیرو که مجهز به شتاب سنج بود انجام داد. آزمایش‌ها نشان دادند که در فضای فرکانسی، نسبت بین دامنه اولین هارمونیک شتاب ثبت شده و دامنه شتاب ارتعاش را می‌توان به انرژی تراکم القاشده و سختی خاک اندازه‌گیری شده با آزمایش‌های بارگذاری صفحه استاتیکی ارتباط داد. دکتر تورنر با همکاری سنداستروم در سال ۱۹۷۵ شرکت ژئودینامیک را تأسیس کردند تا ساخت تراکم‌سنج نصب شده بر روی غلتک را ادامه دهند. در سال ۱۹۷۸ ژئودینامیک با همکاری فرسبلاد از شرکت دیناپک یک تیم تشکیل دادند تا تراکم‌سنج را ساخته و کمیت تراکم‌سنج (CMV) را معرفی کنند. این اختراع در اولین کنفرانس بین‌المللی تراکم در سال ۱۹۸۰ در پاریس، معرفی گردید (Cacciola, 2013) (White & Vennapusa, 2010).

CMV به صورت نسبت هارمونیک دوم از دامنه شتاب‌های قائم استوانه $A_{2\Omega}$، تقسیم بر هارمونیک اول آن A_{Ω} و ضرب در ثابت c (که عموما ۳۰۰ در نظر گرفته می شود) تعریف شد:

$$CMV = c\frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}} \quad (1)$$



شکل ۳. روش تعیین CMV شامل تحلیل طیفی (راست) دو سیکل از شتاب قائم استوانه (چپ)

پس از معرفی کمیت CMV توسط داناپک، تعدادی از کارخانه‌های غلتک سازی شروع به ساخت سیستم‌ها و مقادیر اندازه‌گیری مخصوص به خود کردند. در سال ۱۹۸۲ شرکت بومگ کمیت امگا و ترامتر متناظر با آن را معرفی کرد که انرژی تراکم را به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری می‌کند. سپس شرکت بومگ یک کمیت اندازه‌گیری جدید به نام مدول ارتعاش (E_{vib}) را معرفی نمود. مدول ارتعاش معیاری از سختی دینامیکی خاک را فراهم می‌کند که به‌عنوان جایگزین برای کمیت امگا بکار گرفته شد. در سال ۱۹۹۹ شرکت آمان پارامتر سختی خاک (k_s) را معرفی کرد که مشابه مدول ارتعاش بود و معیاری از سختی یا مدول خاک است. در سال ۲۰۰٤ شرکت ساکائی کمیت کنترل تراکم (CCV) را معرفی کرد. اصول تئوری مورداستفاده برای ارائه CCV مشابه مفاهیم مورداستفاده برای کمیت تراکم‌سنج بود (CMV). (White & Vennapusa, 2010) (Cacciola, 2013).

کاترپیلار به این موضوع پی برد که اکثر کمیت‌های اندازه‌گیری شده روی غلتک (RMV)، با تئوری ارتعاش ارتباط دارند درحالی‌که تراکم ویبراتوری برای متراکم کردن خاک‌های چسبنده مناسب نیست. درنتیجه این شرکت در اوایل دهه ۲۰۰۰ یک سیستم کنترل پیوسته تراکم ساخت که مبتنی بر نیرومحرکه ماشین (MDP) بود و به توان مصرفی ماشین بستگی داشت. اندازه‌گیری نیروی محرکه ماشین قابلیت بیان کمّی وضعیت تراکم در خاک‌های چسبنده را از طریق اندازه‌گیری توان مصرفی غلتک در حین تراکم، فراهم آورد.

سیستم‌های تراکم هوشمند (IC) نیز معرفی شدند تا کاربرد و کارآیی تکنولوژی کنترل پیوسته تراکم را افزایش دهند. ژئودینامیک اولین سازنده این نوع سیستم‌ها در سال ۱۹۸۹ بود. وقتی ژئودینامیک تراکم‌سنج و CMV را معرفی کرد، تکنولوژی استوانه مرتعش با استانداردهای امروزی ناقص بود و فقط یک نیروی ارتعاشی همه جانبه تولید می‌کرد. شرکت بومگ با کنترل جهت نیروی F(t) تولید شده توسط جرم‌های دوار درون استوانه، در سال ۱۹۹۰ تکنولوژی غلتک ویبراتوری را پیشرفته‌تر کرد. غلتک کنترل اتوماتیک شرکت بومگ که در سال ۱۹۹۰ معرفی شد، به اپراتور این امکان را می‌داد که در حین تراکم، پارامترهای عملکردی غلتک را تغییر دهد. در سال ۱۹۹۲ نیز مدل اصلی یک ماشین تراکم هوشمند توسط ژئودینامیک معرفی شد و به دنبال آن ساخت این تکنولوژی ادامه یافت اما این محصول به‌طور وسیع برای استفاده‌های عملی تولید نشد. در سال ۱۹۹۹ شرکت آمان سیستم ACE را با کنترل سروهیدرولیک جرم دو قطعه‌ای خارج از مرکز و کنترل فرکانس، معرفی کرد. در سال ۲۰۰٦ شرکت داناپک کنترل اتوماتیک لنگر جرم برون از مرکز را دنبال کرد. (White & Vennapusa, 2010) (Cacciola, 2013).

٤-۲- سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم (CCC)

سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم، سیستم‌های جمع‌آوری اطلاعات هستند که بر روی تجهیزات تراکم نصب می‌شوند تا اطلاعات مربوط به تراکم و عملکرد ماشین تراکم را به‌طور پیوسته در زمان واقعی جمع‌آوری کنند.

در غلتک‌های ویبراتوری داده‌هایی که اغلب جمع‌آوری می‌شوند شامل فرکانس ارتعاش، دامنه ارتعاش استوانه غلتک و سرعت حرکت غلتک است. در سیستم‌های مبتنی بر نیروی محرکه ماشین، معمولا توان خالص موتور غلتک، سرعت حرکت غلتک، شتاب غلتک و زاویه شیب زمین ثبت می‌شود. سیستم کنترل پیوسته تراکم اندازه‌گیری‌ها را روی کامپیوتر موجود در کابین غلتک در زمان واقعی نمایش می‌دهد تا اپراتور بتواند بر اساس آنها نقاط ضعیف را شناسایی کرده و تغییرات لازم را در الگوی غلتک زنی ایجاد کند. این سیستم‌ها وضعیت تراکم هر نقطه و موقعیت نقاط متناظر را به صورت پیوسته پایش کرده و نتایج را ذخیره می‌کنند (J. Briaud & Saez, 2012).

٤-٣- سیستم‌های تراکم هوشمند (IC)

تراکم هوشمند فرایندی است که در طی آن داده‌های سیستم کنترل پیوسته تراکم، تفسیر شده و برای تصحیح عملکرد غلتک در زمان واقعی مورداستفاده قرار می‌گیرند تا فرایند تراکم بهینه شود و تراکم یکنواخت‌تری به دست آید. تکنولوژی تراکم هوشمند از کنترل بازخورد اتوماتیک دامنه نیرو و در بعضی موارد کنترل فرکانس ارتعاش استفاده می‌کند. برای مثال در یک پروژه تراکم خاک دانه‌ای، بهینه‌سازی تراکم به این صورت انجام می‌شود که ابتدا عمل تراکم با دامنه بالا و فرکانس پایین شروع می‌شود و عمق لایه را متراکم می‌کند. سپس با افزایش میانگین تراکم لایه به‌منظور اجتناب از شکستن دانه‌ها و به‌منظور تراکم بخش سطحی لایه، سیستم تراکم هوشمند به‌صورت اتوماتیک و با استفاده از حلقه بازخورد مرتبط با سیستم کنترل پیوسته تراکم، فرکانس ارتعاش را افزایش و دامنه ارتعاش استوانه را کاهش می‌دهد (Brandl & Adam, 2004).

هدف از کنترل اتوماتیک، به دست آوردن توان بهینه انتقال یافته به زمین بسته به درجه تراکم، است. پارامترهای غلتک ویبراتوری به‌صورت اتوماتیک بر اساس متغیرهای ارتعاش اندازه‌گیری شده تصحیح می‌شوند. با معلوم بودن لنگر جرم‌های دوار و پارامترهای ثابت ماشین و اندازه‌گیری دامنه ارتعاش استوانه و زاویه فاز ϕ به همراه فرکانس ارتعاش، امکان مشاهده کامل سیستم ارتعاش فراهم می‌شود. این قابلیت مشاهده کامل، شرط لازم و کافی برای مدیریت کامل سیستم کنترل بازخورد است و تنها راه ممکن برای تصحیح همزمان دامنه و فرکانس می‌باشد (R Anderegg, von Felten, & Kaufmann, 2006). ارتعاش سیستم خاک- استوانه با استفاده از حسگرهای شتاب قائم اندازه‌گیری می‌شود. تأخیر فاز بین ارتعاش و تغییر مکان استوانه با اندازه‌گیری نقطه‌ای که واحد ارتعاش کننده از صفر می‌گذرد و نقطه‌ای که شتاب اندازه‌گیری شده پس از دو مرتبه انتگرال‌گیری (تغییر مکان قائم) از صفر می‌گذرد، به دست می‌آید. سرعت حرکت غلتک نیز اندازه‌گیری می‌شود. این داده‌ها به یک ابزار الکترونیک فرستاده می‌شوند که در آنجا متغیرهای موردنیاز (زاویه فاز، نیروی خاک و سختی خاک) محاسبه شده و دستورها برای دستگاه‌های کنترل نهایی (گیربکس دیفرانسیلی و پمپ هیدرولیکی ارتعاش) صادر می‌شوند. وقتی دستورالعمل‌ها اجرا می‌شوند حلقه کنترل بسته است و غلتک به یک سیستم کنترل بازخورد بسته تبدیل می‌شود که به‌طور کامل قابل‌مشاهده و قابل‌کنترل است. سیستم کنترل یک صفحه‌نمایش دارد که معیاری از میزان تراکم حاصل شده و نیز سرعت بهینه غلتک را به اپراتور نشان می‌دهد (Roland Anderegg & Kaufmann, 2004).

فرکانس تحریک باید همواره بزرگ‌تر از فرکانس طبیعی سیستم استوانه-زمین باشد تا یک دامنه مناسب ایجاد شود. حداکثر نیروی عکس‌العمل خاک $F_{s|max}$ در یک مقدار مشخص کنترل می‌شود تا بسته به نوع مصالح و ضخامت لایه، ورود ملایم انرژی به خاک را تضمین کند. به‌علاوه با تحلیل حالت حرکت، می‌توان از عدم رخ دادن ارتعاش‌های ساب هارمونیک اطمینان حاصل کرد. در عمل باید سرعت غلتک با فرکانس ارتعاش تطبیق داده شود به‌طوری‌که فاصله ضربه‌ها بین ٢ تا ٤ سانتیمتر باشد. این فاصله، تراکم کافی توسط غلتک را تضمین می‌کند لذا تعداد عبورهای موردنیاز غلتک را بهینه می‌کند.

با افزایش سختی خاک (k_s) و پیشرفت تراکم، فرکانس ارتعاش به‌صورت اتوماتیک افزایش خواهد یافت. به‌منظور اجتناب از تجاوز از نیروی مشخص شده خاک، لنگر جرم دوار (و درنتیجه

دامنه ارتعاش) به‌صورت پیوسته به‌موازات افزایش فرکانس کاهش می‌یابد که منجر به تراکم نهایی بسیار خوب در نزدیکی سطح می‌شود. سختی مطلوب خاک برای تراکم نهایی یا همان سختی هدف، از قبل توسط اپراتور انتخاب می‌شود و زمانی که این مقدار موردنظر حاصل می‌شود غلتک به‌صورت اتوماتیک فشار مشخص شده قابل اعمال به خاک را کاهش می‌دهد. (Roland Anderegg & Kaufmann, 2004).

٤-٤- سیستم ثبت اطلاعات

اگر اندازه‌گیری‌های صورت گرفته توسط غلتک هوشمند با مختصات نقاط متناظر با هر اندازه‌گیری و زمان اندازه‌گیری ارتباط داده شوند، فرایند تراکم را می‌توان ثبت کرده و در زمان واقعی نمایش داد. تعیین مختصات این نقاط با استفاده از سیستم GPS صورت می‌گیرد. مجموعه سیستم تعیین مختصات متشکل است از ایستگاه مرجع خارجی (معمولا پایگاه نامیده می‌شود) که دارای GPS سینماتیکی زمان واقعی (RTK-GPS) است، یک آنتن GPS و یک فرستنده مودم رادیویی. سیستم همچنین از یک ثبت‌کننده اطلاعات و ایستگاه تحلیل نصب شده بر روی غلتک نیز استفاده می‌کند که شامل RTK-GPS، یک آنتن GPS، یک فرستنده مودم رادیویی و یک کامپیوتر است. بخش سوم سیستم GPS یک ایستگاه پایش بصری است که متشکل است از یک کامپیوتر به همراه یک گیرنده مودم رادیویی (Chang, Rutledge, & Michael, 2011).

گیرنده GPS پایگاه که باید در نزدیک‌ترین موقعیت ممکن نسبت به محیط کار قرار گیرد (برای پروژه‌هایی که کنترل موقعیت‌یابی دقیق ضروری است)، اغلب به سیستم مختصات جهانی ارجاع می‌دهد. خطاهای موقعیت‌یابی بین گیرنده‌های GPS و ماهواره‌ها باید تصحیح شوند تا مختصات دقیق در زمان واقعی نمایش داده شود. تصحیح این خطاها توسط بخش سینماتیک زمان واقعی در GPS انجام می‌شود، به این صورت که پیام‌های تصحیح از طریق فرستنده مودم رادیویی به GPSهای موجود در ایستگاه‌ها فرستاده می‌شوند تا موقعیت آن را تصحیح کند. یک کامپیوتر مسیر حرکت غلتک یا تعداد عبور آن را به اپراتور نشان می‌دهد و این داده‌های ورودی را ثبت می‌کند و همزمان موقعیت آن را به ایستگاه پایش انتقال می‌دهد. آزمون‌های میدانی که برای کنترل کیفیت انجام می‌شوند نیز با موقعیت GPS ثبت می‌شوند و می‌توان ارتباط بین نتایج آزمون‌های میدانی و مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده توسط غلتک هوشمند را مشاهده کرد.

شکل ٤. ایستگاه پایش (Chang et al., 2011)

٤-٥- کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط غلتک‌های هوشمند

سیستم‌های اندازه‌گیری متنوعی به صنعت تراکم هوشمند معرفی‌شده‌اند که در دو دسته سیستم‌های مبتنی بر ارتعاش و سیستم‌های مبتنی بر نیروی محرکه ماشین قرار می‌گیرند. برای محاسبه کمیت‌های مبتنی بر ارتعاش از سیگنال‌های شتاب استوانه استفاده می‌شود. لذا سیستم‌های اندازه‌گیری این کمیت‌ها، فقط قابل‌نصب بر روی غلتک‌های ویبراتوری هستند. سیستم اندازه‌گیری نیروی محرکه ماشین (MDP) بیانگر توان مصرفی غلتک است که قابل‌نصب بر روی غلتک‌های ویبراتوری و استاتیکی است. انواع کمیت‌ها و سیستم‌های اندازه‌گیری مرتبط با آنها در جدول ١ ارائه شده است.

٤-٦-سیستم های مبتنی بر ارتعاش

همه سیستم‌های مبتنی بر ارتعاش از یک مجموعه حسگر شامل یک یا دو شتاب سنج نصب شده بر روی استوانه غلتک، یک واحد پردازشگر و یک نمایشگر برای نمایش کمیت‌های

اندازه گیری شده تشکیل شده اند. حسگر به صورت پیوسته شتاب استوانه را ثبت می‌کند. تاریخچه زمانی سیگنال شتاب در واحد پردازشگر تحلیل می‌شود تا مقادیر تراکم دینامیکی با توجه به پارامترهای خاص غلتک تعیین شود. کمیت‌های CMV, CCV, RMV, E_{vib}, k_s در این دسته قرار می‌گیرند. کمیت امگا (OMEGA) که قبل از مدول ویبراتوری (E_{vib}) توسط شرکت بومگ استفاده می‌شد نیز در دسته کمیت‌های مبتنی بر ارتعاش قرار می‌گیرد. این کمیت معیاری از انرژی منتقل‌شده به خاک است (Brandl & Adam, 2004).

٤-٥-١- سیستم‌های مبتنی بر نیروی محرکه ماشین (MDP)

برخلاف سایر سیستم های پایش تراکم هوشمند که روی پاسخ‌های غلتک ویبراتوری تکیه کرده‌اند، این نوع سیستم پایش تراکم کاترپیلار از نیروی محرکه ماشین روی مود استاتیکی یا ویبراتوری غلتک استفاده می‌کند که معیاری نیمه تجربی از انرژی تراکم انتقال یافته به خاک است. آزمایش‌های تراکم آزمایشگاهی و الگوریتم های تحلیلی برای تشکیل یک مدل تراکم مورد استفاده قرار گرفتند تا انرژی تراکم مورد نیاز، کارایی تراکم و میزان رطوبت را با حداقل مقدار تراکم، دانسیته یا مقاومت مورد نیاز ارتباط دهد (white et al. 2005).

فرض اساسی در به دست آوردن تراکم خاک از تغییرات پاسخ تجهیزات این است که راندمان حرکات مکانیکی نه تنها وابسته به سیستم مکانیکی بلکه به خواص فیزیکی مصالح متراکم شونده نیز بستگی دارد. روابط تئوری برای تعیین مقاومت چرخ به عنوان یک بردار نیروی مخالف به مطالعات کولن در سال ١٧٠٠ باز می‌گردد.

جدول ١. سیستم های کنترل پیوسته تراکم به همراه کمیت های اندازه گیری و کارخانه سازنده

نوع سیستم	سیستم کنترل پیوسته تراکم	کمیت اندازه‌گیری	تعریف کمیت اندازه‌گیری	کارخانه سازنده
مبتنی بر ارتعاش	تراکم سنج	CMV (بدون بعد)	نسبت دامنه شتاب اولین هارمونیک به دامنه فرکانس ارتعاش	ژئودینامیک
	ترامتر	OMEGA (N.m)	انرژی منتقل شده به خاک با در نظر گرفتن روابط نیرو-نشست در دو سیکل	بومگ
	کمیت کنترل پیوسته تراکم	CCV (بدون بعد)	نسبت دامنه شتاب‌ها با در نظر گرفتن ساب هارمونیک‌ها	ساکائی
	ترامتر	$E_{vib}(MPa)$	مدول الاستیک دینامیکی (شیب منحنی نیرو-نشست در حین بارگذاری)	بومگ
	ACE	$k_s(\frac{MN}{m})$	سختی خاک (رابطه نیروی تماسی با حداکثر نشست)	آمان
مبتنی بر توان مصرفی	نیرومحرکه ماشین	MDP (kW)	توان خالص برای حرکت غلتک	کترپیلار

٤-٦- شرکت‌های تولیدکننده غلتک‌های هوشمند

اولین شرکت‌های تولیدکننده غلتک‌های هوشمند عبارت‌اند از: آمان، بومگ، ساکائی، کاترپیلار، داینا‌پک، ولوو، هام. اگرچه این شرکت‌ها غلتک‌های کاملا مجهزی دارند اما تجهیزاتی نیز تعبیه کرده‌اند که قابل‌نصب بر روی غلتک‌های ویبراتوری موجود

هستند (Von Quintus, Minchin, & Nazarian, 2009). شرکت بومگ دارای دو سیستم تراکم هوشمند است که عبارت‌اند از: سیستم Vari-Control برای غلتک‌های متراکم کننده خاک و سیستم Asphalt Manager برای غلتک‌های متراکم کننده رویه آسفالتی (HMA). سیستم ارتعاش این دو غلتک مشابه یکدیگر و متشکل است از یک مجموعه دوار با قابلیت چرخش به میزان ۹۰ درجه که جهت نیروی ایجاد شده را از جهت قائم تا جهت افقی تغییر می‌دهد. کمیتی که شرکت بومگ برای گزارش مقدار سختی اندازه‌گیری شده مصالح مورداستفاده قرار می‌دهد مدول ارتعاش یا E_{vib} است که در واحد مگانیوتن بر مترمربع (MN/m^2) اندازه‌گیری می‌شود (Kloubert & GmbH, 2002).

غلتک‌های ویبراتوری هوشمند ساکائی از تکنولوژی مبتنی بر شتاب سنج برای اندازه‌گیری سختی لایه‌های خاک، مصالح شکسته و نیز آسفالت، استفاده می‌کنند. با افزایش تعداد عبور غلتک و درنتیجه افزایش تراکم، شتاب‌ها افزایش می‌یابند و بر اساس شرایط اندرکنش خاک و استوانه، فرکانس‌های متنوعی ایجاد می‌شوند. سیستم اندازه‌گیری یک مقدار نسبی را ثبت می‌کند که کمیت کنترل تراکم (CCV) نامیده می‌شود. کمیت کنترل تراکم مبتنی بر طیف دامنه تشخیص داده‌شده در فرکانس‌های مختلف است. (Von Quintus, 2010).

شرکت آمان سیستم تراکم هوشمند خود (ACE) را به‌عنوان یک سیستم اندازه‌گیری و کنترل الکترونیک معرفی کرد که دامنه و فرکانس ارتعاش را به‌صورت اتوماتیک تصحیح می‌کند. سیستم ACE مشابه کمیت مدول ارتعاش تعیین‌شده توسط سیستم بومگ، ظرفیت باربری دینامیکی خاک را با فرض عملکرد استوانه مانند آزمون بارگذاری صفحه که در آن بار مشخصی به یک صفحه دایره‌ای اعمال‌شده و نشست حاصل اندازه‌گیری می‌شود، تعیین می‌کند. سیستم آمان این مقدار اندازه‌گیری شده را به‌صورت سختی خاک k_s در واحد MN/m گزارش می‌کند. (Von Quintus, 2010).

تراکم‌سنج دایناپک از CMV به‌عنوان معیار سطح تراکم به‌دست‌آمده استفاده می‌کند. CMV توسط ژئودینامیک در دهه ۱۹۷۰ ارائه شد و در سال ۱۹۸۰ به‌صورت تجاری معرفی شد. کمیت تراکم‌سنج به عنوان یک شاخص قوی و قابل‌قبول برای وضعیت نسبی تراکم خاک شناخته شده است. یک پارامتر که کمیت تشدید سنج (RMV) نامیده می‌شود به‌صورت نسبت دامنه شتاب زیرهارمونیک 0.5Ω به هارمونیک اول تعریف می‌شود. مفهوم زیرهارمونیک وقتی اتفاق می‌افتد که استوانه شروع به پرش کند (White & Vennapusa, 2010).

غلتک‌های ولوو دارای فرکانس قابل‌تغییر هستند و می‌توانند در دامنه کم یا زیاد کار کنند. این غلتک‌ها می‌توانند فرکانس خود را با فرکانس طبیعی مصالح تطبیق دهند تا انرژی را به‌صورت بهینه مصرف کنند. استوانه صاف این غلتک‌ها قابل‌تبدیل به استوانه‌های پاچه‌بزی یا کفشک دار است. غلتک‌های هوشمند ولوو نیز در سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم خود از کمیت تراکم‌سنج (CMV) برای گزارش وضعیت تراکم استفاده می‌کنند. غلتک‌های هام دارای یک حسگر درون استوانه خود هستند که شتاب‌های قائم را اندازه می‌گیرد. واحد پردازشگر، مقدار اندازه‌گیری غلتک را از روی این سیگنال‌های شتاب محاسبه می‌کند. غلتک‌های هام برای تشخیص موقعیت پارامترهای مهم تراکم و پیشرفت تراکم در یک یا چند غلتک، از هدایت‌گر HCQ استفاده می‌کند که یک سیستم بایگانی ماهواره‌ای است. شرکت کاترپیلار سیستم تراکم هوشمند ماشین‌های تراکم خاک را "سیستم دامنه دائما متغیر" نامید که می‌تواند دامنه استوانه را به‌صورت اتوماتیک از صفر تا یک مقدار ماکزیمم تصحیح کند تا از ورود به مود دابل جامپ جلوگیری کند. سیستم تراکم هوشمند کاترپیلار علاوه بر تغییرات دامنه می‌تواند از سه فرکانس مختلف نیز استفاده کند که سیستم به‌صورت اتوماتیک با توجه به محدوده دامنه که در آن کار می‌کند، یکی از این سه فرکانس را انتخاب می‌کند. تصحیح نیروی استوانه از طریق تغییرات دامنه ارتعاش مزیت بزرگی است زیرا در دامنه صفر سیستم ارتعاش می‌تواند فقط به دور خود بچرخد. این به این معناست که ماشین دیگر نیازی به صرف انرژی زیاد برای شروع مجدد ارتعاش یا تغییر جهت مجموعه دوار ندارد. موتور برای شروع مجدد مکانیسم ارتعاش به توان زیادی نیاز دارد. لذا با رفع این عیب می‌توان از موتورهای کوچک‌تر که سوخت کمتری مصرف می‌کنند استفاده

کرد. (Von Quintus, 2010). شرکت غلتک سازی کاترپیلار از تجهیزات تراکم‌سنج ساخت شرکت ژئودینامیک در سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم خود استفاده می‌کند و کمیت تراکم‌سنج (CMV) را اندازه‌گیری می‌کند. علاوه بر این کاترپیلار سیستم‌های مبتنی بر نیروی محرکه ماشین (MDP) را نیز برای کنترل تراکم خاک‌های چسبنده به جامعه راه‌سازی معرفی کرد. استفاده از نیروی محرکه به‌عنوان یک معیار تراکم خاک، مفهومی است که در مطالعات برهم‌کنش وسیله نقلیه و زمین در سال ۱۹۶۹ ارائه شد. نیروی محرکه ماشین از مفاهیم فرورفتن استوانه و مقاومت در برابر غلتک زنی برای تعیین تنش‌های مؤثر بر استوانه و انرژی لازم برای غلبه بر مقاومت به وجود آمده در برابر حرکت غلتک، استفاده می‌کند (White & Vennapusa, 2010).

٤-٧- فاصله گزارش کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط غلتک

پنج مقدار اندازه گیری که در عمل توسط کارخانه‌های غلتک سازی استفاده می‌شود عبارت‌اند از:

۱- CMV که توسط ژئودینامیک تشکیل و توسط دیناپک، کاترپیلار و ولوو استفاده شد.

۲- CCV که مشتق شده CMV بوده و توسط ساکائی ارائه شد.

۳- سختی E_{vib} (مدول ویبراتوری) که توسط بومگ ارائه و استفاده شد.

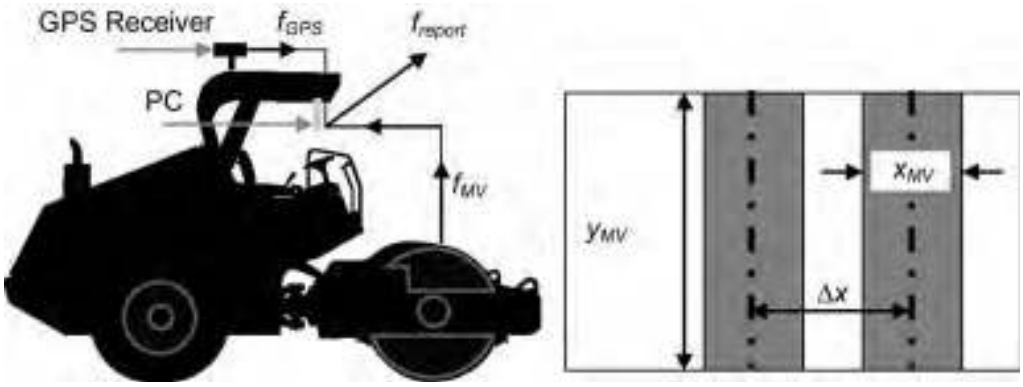
٤- سختی k_s که توسط آمان ارائه و استفاده شد.

۵- نیروی محرکه ماشین (MDP) که توسط کاترپیلار ارائه و استفاده شد.

CMV ، CCV ، k_s و E_{vib} نیاز به ارتعاش دارند و فقط قابل‌استفاده در غلتک‌های ویبراتوری هستند. MDP نیاز به ارتعاش ندارد ولی در غلتک‌های ویبراتوری نیز قابل‌استفاده است.

کمیت های اندازه‌گیری شده توسط غلتک (RMV or MV) بر اساس داده‌های حسگر استوانه محاسبه می‌شوند و به‌صورت یک فرکانس f_{MV} به کامپیوتر روی غلتک فرستاده می‌شوند. این کامپیوتر همچنین یک جریان از داده‌های موقعیتی به‌دست‌آمده از گیرنده GPS نصب شده بر روی غلتک را به‌صورت یک فرکانس f_{GPS} دریافت می‌کند. این دو جریان داده‌ها اغلب در فرکانس‌های مختلف هستند $(f_{MV} \neq f_{GPS})$ و باید توسط نرم‌افزار کارخانه مرج شوند. داده‌های موقعیتی و MV مرج شده از طریق نمایش گرافیکی یا داده‌های فرکانسی f_{report} روی کامپیوتر گزارش می‌شوند. فاصله اندازه‌گیری MV (Δx) تابعی از f_{report} و سرعت غلتک است (White & Vennapusa, 2010).

هر MV گزارش‌شده اغلب انعکاسی از داده‌های ارتعاشی میانگین‌گیری شده در یک بازه زمانی t_{MV} است. مقادیر t_{MV} با توجه به کارخانه سازنده تغییر می‌کند و گاهی قابل تنظیم است. بازه متناظر که در طول آن یک RMV بیان می‌شود (x_{MV})، تابعی از زمان t_{MV} و سرعت غلتک است $(x_{MV} = t_{MV} \times v)$. برای RMVهای اخیر میانگین طول بازه اندازه‌گیری (y_{MV}) ، برابر طول استوانه (۲.۱ m) است. فاصله اندازه‌گیری RMV (Δx) نیز با توجه به کارخانه سازنده متغیر است. مقدار Δy تابعی از همپوشانی دو عبور مجاور است. همپوشانی پیشنهادشده برابر ۰.۱ m لذا مقدار Δy برابر ۲ m است. ترکیب Δx و x_{MV} پیوستگی و پوشش نسبی کمیت های اندازه‌گیری شده توسط غلتک را فراهم می‌آورد. سختی k_s پوشش کامل $(\Delta x = x_{MV})$، CMV و CCV پوشش کامل با همپوشانی قابل‌توجه $(\Delta x < x_{MV})$ و مدول ویبراتوری E_{vib} پوشش کمتری $(\Delta x > x_{MV})$ از مساحت پروژه را فراهم می‌آورد. برای همه کمیت های اندازه‌گیری غلتک، y_{MV} برابر با عرض استوانه (حدود ۲.۱ m) است و y تابعی از همپوشانی بین عبورهای مجاور هم غلتک است که حداقل همپوشانی ۰.۱m (۰.۳ft) توصیه می‌شود. کمیت‌های اندازه‌گیری شده خواص خاک را در عرض استوانه تخمین می‌زنند و Δy و y_{MV} کمتر از عرض استوانه هستند (White & Vennapusa, 2010).



شکل ۵. نمای شماتیک متغیرهای غلتک (White & Vennapusa, 2010)

٤-٨- تأثیر پارامترهای غلتک بر کمیت های اندازه‌گیری شده

در غلتک‌های هوشمند پارامترهای عملکردی غلتک به مقدار قابل‌توجهی تغییر می‌کند. روشن است که کمیت‌های اندازه‌گیری متأثر از پارامترهای عملکردی غلتک است اما این که آیا اثر پارامترهای عملکردی روی کمیت های اندازه‌گیری قابل پیش‌بینی است و می‌تواند در آیین‌نامه‌ها وارد شود، مبهم است. وابستگی کمیت های اندازه‌گیری به دامنه، یک ارتباط ساده نیست و به خاک و وجود لایه‌بندی نیز بستگی دارد. مطابق مطالعات انجام شده، با افزایش سرعت، CCV و CMV کاهش می‌یابند چون در سرعت بیشتر، انرژی بین مقدار خاک بیشتری پخش می‌شود و درجه افت تماس کاهش می‌یابد. عملیات خاکی روسازی شامل ترکیب‌ها و ضخامت‌های مختلفی از مصالح بستر، زیراساس و اساس است لذا سختی به‌دست‌آمده از ساختارهای لایه‌ای و هموژن، به مقدار قابل‌توجهی تحت تأثیر عمق اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. عمق اندازه‌گیری با افزایش نیروی تماسی F_{ev} و تغییر مکان قائم استوانه z_d افزایش می‌یابد. به‌طور کلی $0.1mm$ افزایش z_d متناظر با 3cm افزایش عمق اندازه‌گیری است. با توجه به نتایج ارائه‌شده، مقدار سختی اندازه‌گیری شده بیانگر سختی محدوده $0.25 - 0.7m$ مقابل و پشت مرکز استوانه و تا عمق $0.8 - 1.2m$ است. هنگام برقراری ارتباط بین سختی غلتک و نتایج آزمون‌های نقطه‌ای، در نظر گرفتن این ناحیه تأثیر مهم است (Rinehart & Mooney, 2009).

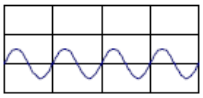
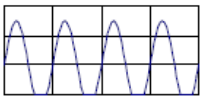
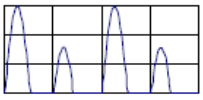
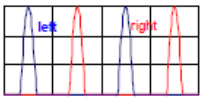
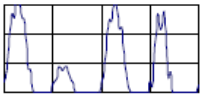
یک روش تعیین عمق اندازه‌گیری، پایش سختی اندازه‌گیری شده توسط غلتک روی لایه‌ای از مصالح سخت که روی یک سطح نرم‌تر قرار گرفته و متراکم شده است، می‌باشد. سختی اندازه‌گیری شده توسط غلتک ترکیبی از سختی خاک سطحی تا عمق اندازه‌گیری شده است بنابراین باید با افزایش ضخامت لایه سخت فوقانی افزایش یابد و پس از عمق بحرانی باید سختی غلتک ثابت بماند که بیانگر این است که لایه نرم زیرین را احساس نمی‌کند. قابل‌توجه است که سختی اندازه‌گیری شده توسط غلتک حساس به لایه‌های نازک مصالح سخت روی مصالح نرم‌تر که در ساختار روسازی مرسوم است، نمی‌باشد. مطابق مطالعات صورت گرفته، عمق اندازه‌گیری غلتک‌های معمول در راه‌سازی برای خاک‌ریزهای همگن در جهت قائم، $0.8 - 1.2m$ است. عمق کل بیشتر ساختارهای اساس-زیراساس-بستر در این محدوده قرار دارد لذا نتایج غلتک یک مقدار مرکب از این لایه‌ها خواهد بود (Rinehart & Mooney, 2009). میزان مشارکت زیراساس با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد. مقدار سختی اندازه‌گیری شده توسط غلتک نسبت به اساس سنگ شکسته روی بستر سخت‌تر، حساس‌تر است تا اساس سنگ شکسته روی بستر نرم‌تر. افزایش دامنه (F_{ev}) نیز منجر به افزایش حساسیت نسبت به لایه سخت فوقانی می‌شود (White & Vennapusa, 2010). عمومی کردن این یافته‌ها برای همه شرایط لایه‌ای،

چالش آفرین است زیرا فاکتورهای زیادی مؤثر هستند: ضخامت لایه‌ها، مغایرت سختی بین لایه‌ها، وابستگی مصالح به تنش، دامنه ارتعاش و ... . نتایج فوق‌الذکر نشان می‌دهند که تضمین کیفیت (QA) لایه‌های اساس نازک روی بستر نرم‌تر با استفاده از غلتک هوشمند، ممکن است غیرقابل‌اعتماد باشد زیرا سختی اندازه‌گیری شده توسط غلتک ممکن است کمتر حساس به این لایه‌ها باشد. با توجه به غیرقابل‌پیش‌بینی بودن وابستگی کمیت‌های اندازه‌گیری به دامنه و فرکانس ارتعاش، هنگام آزمایش تضمین کیفیت با استفاده از غلتک هوشمند باید پارامترهای عملکردی غلتک ثابت باشند (دامنه، فرکانس، سرعت، جهت). لذا تضمین کیفیت با استفاده از سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم (CCC) نباید در مود کنترل بازخورد اتوماتیک (AFC) صورت گیرد.

٤-٩- مودهای عملکردی غلتک ویبراتوری

هنگام تراکم با غلتک ویبراتوری پنج مود عملکردی ممکن است اتفاق بیافتد که می‌تواند نتایج تراکم دینامیکی را تحت تأثیر قرار دهد. مودهای عملکردی غلتک در جدول ۲ قابل مشاهده است. در کل سختی خاک است که بر شرایط عملکردی استوانه تأثیر می‌گذارد اما پارامترهای غلتک نیز مشارکت دارند (M. Mooney & Adam, 2007).

جدول ۲. مودهای عملکردی استوانه یک غلتک ویبراتوری (M. Mooney & Adam, 2007)

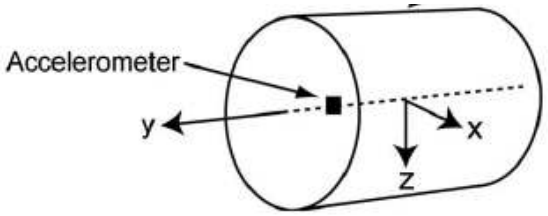
drum motion	Interaction drum-soil	operating condition	soil contact force	application of CCC	soil stiffness	roller speed
periodic	continuous contact	CONT. CONTACT		yes	low	fast
	periodic loss of contact	PARTIAL UPLIFT		yes		
		DOUBLE JUMP		yes		
		ROCKING MOTION		no		
chaotic	non-periodic loss of contact	CHAOTIC MOTION		no	high	slow

مود تماس پیوسته در مراحل اولیه که سختی خاک خیلی کم است اتفاق می‌افتد. انفصال موضعی و پرش شایع‌ترین مودهای عملکردی هستند که در حین تراکم ویبراتوری اتفاق می‌افتند. وجه تمایز بین این دو مود این است که مود پرش سیکل‌های ارتعاش بیشتری را شامل می‌شود. حرکت راکینگ (گهواره‌ای) حالتی است که با افزایش سختی خاک اتفاق می‌افتد. با ورود غلتک به این مود، حرکت محور استوانه دیگر عمودی نیست و استوانه شروع به دوران جانبی می‌کند. بانسینگ (پرش) و راکینگ مودهای مطلوبی نیستند زیرا اثر شل کنندگی روی لایه فوقانی دارند و غلتک قابلیت مانور خود را از دست می‌دهد. تفاوت بین پرش و حرکت گهواره‌ای (راکینگ) یک انتقال فاز ۱۸۰ درجه‌ای است که بین ارتعاش‌های ساب‌هارمونیک لبه

سمت چپ و راست استوانه اتفاق می‌افتد. ازلحاظ تئوری اگر فرکانس طبیعی حرکت استوانه کمتر از فرکانس طبیعی ارتعاش قائم باشد راکینگ و در غیر این صورت پرش اتفاق خواهد افتاد (Roland Anderegg & Kaufmann, 2004). حرکت نامنظم آخرین مود عملکردی است که بر روی خاک‌های خیلی سخت اتفاق می‌افتد. در این حالت غلتک قابلیت مانور بیشتر ندارد. رفتار نامنظم غلتک ویبراتوری ناشی از غیرخطی بودن و اتفاق افتادن ساب هارمونیک‌ها در حین تراکم است. در مود حرکت نامنظم در ارتعاش، رفتار دینامیکی غلتک ممکن است ناپایدار و گذرا باشد. کاهش توان ارتعاش از طریق افزایش لنگر استاتیک $m.r$ می‌تواند یک راه‌حل برای جلوگیری از این شرایط باشد. خلاصه با افزایش سختی خاک استوانه وارد مودهای ارتعاشی بعدی می‌شود (راکینگ و حرکت نامنظم) که فرایند کنترل پیوسته تراکم را غیردقیق و غیرقابل‌اعتماد می‌کند. در میان مودهای عملکردی، مود تماس کامل و انفصال موضعی را می‌توان با یک سیستم یک درجه آزادی توصیف کرد ولی راکینگ و حرکت نامنظم به سیستم‌های چند درجه آزادی پیشرفته‌تر نیاز دارند. ابتدا به شرح حرکت در مود راکینگ می‌پردازیم و در ادامه تئوری‌های مورداستفاده در تکنولوژی کنترل پیوسته تراکم که در مودهای عملکردی تماس کامل، انفصال موضعی و پرش منظم معتبر هستند می‌پردازیم (Brandl & Adam, 2004).

تجربه نشان داده است که غلتک‌های ویبراتوری اغلب هنگام تراکم خاک، علاوه بر حرکت انتقالی دارای حرکت دورانی جانبی نیز هستند. این دوران در سیستم‌های اندازه‌گیری غلتک که سختی خاک را بر اساس ارتعاش استوانه تخمین می‌زنند، در نظر گرفته نمی‌شود. شتاب سنج‌ها معمولا در یک انتهای استوانه نصب می‌شوند و حرکت دورانی باعث می‌شود نتایج تک موقعیتی سیستم اندازه‌گیری، واحد نباشد و بسته به جهت حرکت غلتک تغییر کند (شکل ٦). این امر چالش هایی برای سختی اندازه‌گیری شده توسط غلتک ایجاد می‌کند.

برای مستقل بودن کمیت های اندازه‌گیری از جهت حرکت غلتک می‌توان اندازه‌گیری سختی را بر اساس ارتعاش قائم در مرکز ثقل استوانه که دوران صفر است، انجام داد. در بیشتر غلتک‌ها قرار دادن شتاب سنج ها در مرکز ثقل گران تمام می‌شود ولی ارتعاش مرکز ثقل را می‌توان از شتاب سنج‌های قائم نصب شده در هر دو انتهای استوانه یا از حرکت سینماتیکی قائم و دورانی در یک انتهای استوانه به دست آورد (Facas, Mooney, Asce, & Furrer, 2010).



شکل ٦. شتاب سنج واحد برای تخمین سختی خاک (Facas et al., 2010)

۵- روش‌های کنترل کیفیت تراکم

در یک طبقه‌بندی کلی، روش‌های کنترل کیفیت تراکم لایه‌های خاک و مصالح سنگدانه‌ای را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم نمود:

الف) روش‌های مبتنی بر کنترل کیفیت نهایی تراکم،

ب) روش‌های ترکیبی مبتنی بر کنترل فرایند عملیات تراکم به اضافه کنترل محدود کیفیت نهایی.

روش‌های گروه (الف) خود به دو زیرگروه قابل بخش هستند:

الف-۱) کنترل کیفیت با اندازه‌گیری وزن مخصوص خشک،

الف-۲) کنترل کیفیت با اندازه‌گیری پارامترهای سختی یا مقاومتی.

اندازه‌گیری وزن مخصوص خشک به دو روش متفاوت انجام می‌گیرند: a) به روش اندازه‌گیری حجم، وزن مرطوب و

رطوبت (روش مخروط ماسه و روش غشاء مایع)، b) به روش تشعشع هسته‌ای (میزان جذب اشعه به وسیله توده مصالح در یک فاصله معین).

کنترل کیفیت از طریق بخش سختی یا مقاومت، یا استاتیکی است (آزمون بارگذاری صفحه و ...) یا دینامیکی (افت و خیزسنج سبک (LWD)، مخروط نفوذ دینامیکی (DCP)، دستگاه نوسان سنج (ژئوگیج) و سیستم کنترل سختی در غلتک‌های هوشمند). این کنترل از سوی دیگر یا به صورت نقطه‌ای است که بیشتر ابزارها به جز غلتک‌های هوشمند جزء این دسته قرار می‌گیرند، و یا اینکه بصورت پیوسته بوسیله غلتک‌های هوشمند انجام می‌شود.

روش‌های گروه (ب) را نیز می‌توان به دو زیرگروه تقسیم نمود:

ب-۱) روش‌هایی که در آنها پارامترهای کنترل فرایند عملیات تراکم به کمک اجرای قطعه‌های آزمایشی تعیین می‌شود،

ب-۲) روش‌هایی که در آنها جداول از پیش تهیه شده برای عملکرد غلتک‌ها در مصالح مختلف، مبنای تعریف معیارهای کنترل فرایند قرار می‌گیرند. اگرچه آیین‌نامه‌های کنترل کیفیت حاضر که از معیار دانسیته خشک و درصد رطوبت استفاده می‌کنند نسبتاً درست و عملی هستند، اما خواص مهندسی خاک که برای اطمینان از حصول محصولی باکیفیت بالا ضروری هستند را منعکس نمی‌کنند. علاوه بر این، طراحی روسازی‌ها و خاک‌ریزها بر اساس سختی یا پارامترهای مقاومتی صورت می‌گیرد، بنابراین ارتباط روشنی بین فرایند طراحی و کنترل کیفیت ساخت مصالح خاکی وجود ندارد. برای حل این مسئله مطالعات زیادی انجام شده است تا فرایند کنترل کیفیت تراکم را بر اساس معیارهای مرتبط با سختی و پارامترهای مقاومتی مورداستفاده در طراحی انجام دهند. آیین‌نامه‌های مبتنی بر سختی خاک در اروپا و ایالات‌متحده آمریکا تشکیل‌شده‌اند. البته در حال حاضر فقط تعداد کمی از اداره‌های حمل‌ونقلی آمریکا آیین‌نامه‌های کنترل تراکم مبتنی بر اندازه‌گیری‌های میدانی سختی و مقاومت، برای مصالح خاکی دارند. با توجه به تغییرپذیری کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم و وابستگی آنها به پارامترهای عملکردی غلتک و نیز تأثیر رطوبت بر نتایج این سیستم‌ها، نمی‌توان آیین‌نامه‌ای واحد برای غلتک‌های هوشمند ارائه کرد. اما روش‌های تضمین کیفیت با غلتک‌های هوشمند که توسط ایالات متحده آمریکا ارائه شده‌اند، در واقع روش ساخت آیین‌نامه در شرایط مختلف را شرح می‌دهند.

۵-۱- روش‌های تضمین کیفیت با سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم

ظهور سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم (CCC) و تراکم هوشمند (IC) با کنترل 100٪ مساحت پروژه در زمان واقعی، تحولی اساسی در ارزیابی تراکم مصالح به وجود آورد و بسیاری از محدودیت های روش های سنتی کنترل تراکم را برطرف نمود. با کنترل کمیت‌های اندازه‌گیری غلتک در حین اجرا، می توان لایه های روسازی را یکنواخت تر اجرا کرد.

بر اساس نیازهای مشاهده‌شده در ادارات راه ایالات‌متحده آمریکا، آنها شش گزینه یا روش برای تضمین کیفیت تراکم بستر، زیراساس و اساس دانه‌ای در شرایط محیطی گوناگون با استفاده از سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم، پیشنهاد کرده‌اند. بیشتر این روش‌های پیشنهادی در آیین‌نامه‌های اروپایی نیز مشاهده می‌شوند. این روش‌ها مبتنی بر معیارهای محصول نهایی هستند. هر گزینه می‌تواند به‌تنهایی یک روش برای تضمین کیفیت تراکم باشد ولی می‌توان برای افزایش قابلیت اطمینان دو یا چند گزینه را باهم ترکیب کرد. معیارهای یکنواختی که در ادامه شرح داده می‌شوند را نیز می‌توان به هرکدام از گزینه‌ها اضافه کرد. خلاصه‌ای از روش‌های تضمین کیفیت در جدول ۳ ارائه‌شده است. در همه روش‌ها، آزمایش‌های تضمین کیفیت بر روی قطعه‌های ارزیابی انجام می‌شوند. قطعه ارزیابی طولی از راه است که در آن، بر اساس کمیت‌های اندازه‌گیری غلتک (MV)، در جهت‌های طولی و عرضی درجه‌ای از همگنی مشاهده می‌شود (شکل ۵). عرض قطعه ارزیابی برابر عرض پروژه و طول آن با توجه به سرعت ساخت، غیریکنواختی طولی و سایر فاکتورها متغیر است. طول معمول آن بین ۱۰۰ – ۵۰۰ m (۳۳۰ – ۱۶۴۰ ft) است.

در روش شماره ۳ (جدول ۳) قبل از انجام آزمایش‌های کنترل کیفی در یک قطعه ارزیابی، لازم است که یک مقدار هدف برای کمیت های اندازه‌گیری غلتک (MV-TV) به دست آید. در

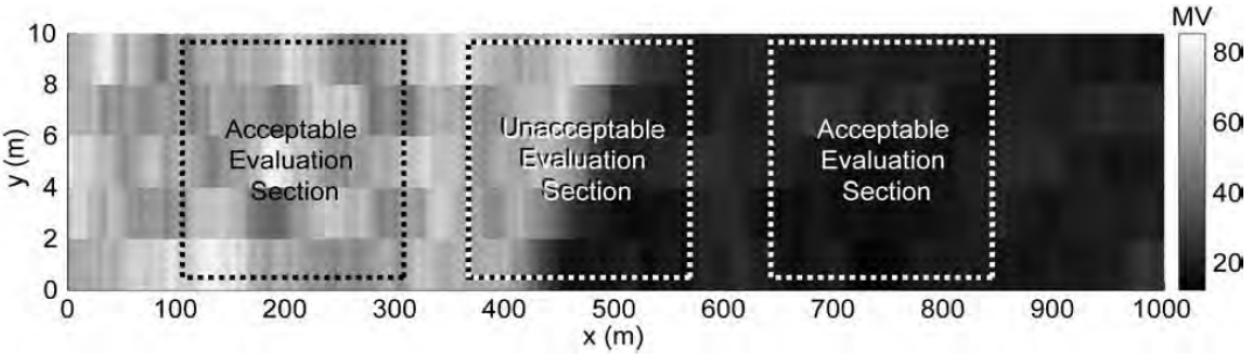
صورت امکان باید از بخشی از قطعه ارزیابی به‌عنوان ناحیه کالیبراسیون استفاده کرد. اندازه یک ناحیه کالیبراسیون می‌تواند از یک نوار به عرض استوانه غلتک و به طول ۳۰ متر تا کل عرض روسازی $(10 - 30\ \mathrm{m})$ و به طول ۱۰۰ متر تشکیل‌شده باشد (White and Vennapusa. 2010).

جدول ۳. خلاصه روش‌های تضمین کیفیت (QA) پیشنهادی توسط ادارات راه آمریکا (White and Vennapusa. 2010)

روش تضمین کیفیت	مقدار هدف کمیت اندازه گیری	معیار تایید تراکم
روش۱: انجام آزمون برجا در نقاط ضعیف مشخص شده توسط غلتک	لازم نیست	نتایج آزمون‌های برجا در نواحی ضعیف باید حداقل مقدار لازم را داشته باشند
روش 2a: پایش درصد تغییرات میانگین کمیت اندازه‌گیری $(\%\Delta\mu_{MVi})$	لازم نیست	باید تغییرات میانگین کمیت اندازه‌گیری در دو عبور متوالی از مقدار مشخصی کمتر باشد (مثلا $\%\Delta\mu_{MVi} < 5\%$)
روش 2b: پایش درصد تغییرات مکانی کمیت اندازه‌گیری $(\%\Delta MV_i)$	لازم نیست	باید مقدار هدف تغییرات مکانی کمیت اندازه‌گیری در دو عبور متوالی در مساحت مشخصی از پروژه برقرار باشد (مثلا $\%\Delta MV_i$ در ۹۰٪ مساحت پروژه از $\%\Delta - TV$ کمتر باشد)
روش 3a: ارتباط تجربی کمیت اندازه‌گیری غلتک با نتایج آزمون‌های برجا	بر اساس همبستگی ایجاد شده، مقدار هدف برابر است با کمیت اندازه‌گیری متناظر با $QA - TV^a$	باید مقدارهدف کمیت اندازه‌گیری بر روی درصد مشخصی از مساحت پروژه حاصل شده باشد
روش 3b: منحنی تراکم مبتنی بر کمیت اندازه‌گیری	مقدار هدف برابر است با میانگین کمیت اندازه‌گیری وقتی که افزایش آن در دو عبور متوالی از ۵٪ کمتر باشد	
روش 3c: ارتباط تجربی کمیت اندازه‌گیری غلتک با داده‌های آزمایشگاهی (مانند مدول برجهندگی)	بر اساس همبستگی ایجاد شده، مقدار هدف برابر است با کمیت اندازه‌گیری متناظر با $QA - TV^b$	

a: فرض بر این است که QA-TV (مقدار هدف کنترل کیفیت) مبتنی بر نتایج آزمون‌های برجا است (دانسیته، مدول و ...)

b: به عنوان مثال یک مقدار QA-TV مبتنی بر M_r .



شکل ۷. قطعه‌های ارزیابی قابل‌قبول و غیرقابل‌قبول بر اساس نگاشت داده‌های MV (White and Vennapusa. 2010)

روش۱: آزمون‌های برجا در نواحی ضعیف

روش تضمین کیفیت شماره ۱ از سیستم کنترل پیوسته تراکم برای شناسایی نواحی دارای تراکم ضعیف موجود در قطعه ارزیابی استفاده می‌کند. ناحیه دارای تراکم ضعیف با کمترین کمیت‌های اندازه‌گیری ثبت‌شده در طول یک عبور اندازه‌گیری مشخص می‌شود و ممکن است بیشتر از یک ناحیه ضعیف انتخاب شود. مطابق شکل ٦، تایید تراکم بر اساس نتایج آزمون‌های برجای انجام‌شده در این نواحی انجام می‌گیرد. اگر نتایج آزمون‌های برجا معیارهای مشخص‌شده را ارضا کنند، تراکم قطعه مورد ارزیابی قابل‌قبول در نظر گرفته می‌شود. تناوب و تعداد آزمون‌های برجا در نواحی ضعیف و نیز معیارهای پذیرش نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش‌ها باید بر اساس معیارهای موجود باشد. قطعه ارزیابی باید مطابق آنچه در بخش قبل گفته شد، انتخاب شود.

فرض منطقی مهم در گزینه شماره ۱ این است که بین کمیت های اندازه‌گیری غلتک و تراکم خاک (یعنی کمترین کمیت های اندازه‌گیری غلتک متناظر با ضعیف‌ترین تراکم) یک تناسب وجود دارد. اگر قطعه مورد ارزیابی تغییرات موضعی داشته باشد (وجود توده‌های رسی در مصالح دانه‌ای) یا تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در لایه‌های زیرین رخ دهد (وجود قلوه سنگ‌های درشت در عمق نسبتاً کم)، ممکن است این تناسب وجود نداشته باشد. در حالت وجود این تغییرپذیری‌ها باید روابط بین کمیت های اندازه‌گیری غلتک و نتایج آزمون‌های برجا بازبینی شوند. این کار را می‌توان با مقایسه نتایج آزمون‌های برجا با کمیت های اندازه‌گیری کم، متوسط و زیاد در قطعه ارزیابی انجام داد. علاوه بر این، کمیت‌های اندازه‌گیری کم می‌تواند نتیجه تغییر در پارامترهای عملکردی ماشین و ناهمواری سطح خاک باشد. با توجه به این دلایل نواحی ضعیف انتخاب‌شده برای انجام آزمون‌های برجا نباید مبتنی بر

(۲)

مقدار هدف پیشنهادشده برای $\%\Delta\mu_{MV_i}$(یعنی $\%\ \Delta\text{-TV}$) برابر 5٪ است. مطابق شکل ٦ اگر $\%\Delta\mu_{MV_i}$ بین دو عبور متوالی کمتر از $\%\ \Delta\text{-TV}$ باشد تراکم پذیرفته می‌شود.

آن دسته از کمیت های اندازه‌گیری غلتک که در طولی کمتر از ۳ متر یا ۱۰ فوت در جهت حرکت قرار دارند باشد. گزینه شماره ۱ به تغییرات کمی در آیین‌نامه‌های تضمین کیفیت موجود مبتنی بر نتایج آزمون‌های برجا نیاز دارد و استفاده از آن راحت است. می‌توان به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان این گزینه را به همراه گزینه‌ای دیگر به‌صورت ترکیبی استفاده کرد.

روش ۲: محدود کردن درصد تغییرات کمیت های اندازه‌گیری (MV)

در این روش از درصد تغییرات کمیت های اندازه‌گیری هر عبور نسبت به عبور دیگر برای تعیین پذیرفته شدن کیفیت تراکم قطعه مورد ارزیابی استفاده می‌شود. پذیرش مبتنی بر رسیدن به یک آستانه یا مقدار هدف $\%\Delta MV$ (یعنی $\%\Delta - TV$) بین دو عبور متوالی بر روی نوارها و نواحی ارزیابی یکسان، است. گزینه شماره ۲ به دو روش قابل‌استفاده است. پذیرش می‌تواند مبتنی بر درصد تغییرات میانگین کمیت‌های اندازه‌گیری ($\%\Delta\mu_{MV_i}$) باشد. در روش دیگر پذیرش می‌تواند مبتنی بر تحلیل فاصله‌ای داده‌های $\%\Delta MV_i$ باشد. وابستگی کمیت‌های اندازه‌گیری به جهت حرکت و اثر غیریکنواختی خاک در طول استوانه ایجاب می‌کند که به‌ویژه در گزینه شماره 2b الگوی غلتک زنی در عبورهای اندازه‌گیری متوالی کاملاً یکسان باشد. انتخاب قطعه مورد ارزیابی باید مطابق آنچه در بخش قبل گفته شد، صورت پذیرد.

الف) گزینه شماره 2a : پایش درصد تغییرات میانگین کمیت‌های اندازه‌گیری در این روش تضمین کیفیت، درصد تغییرات میانگین کمیت های اندازه‌گیری ($\%\Delta\mu_{MV_i}$) در دو عبور اندازه‌گیری متوالی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\%\Delta\mu_{MV_i} = \left(\frac{\mu_{MV_i} - \mu_{MV_{i-1}}}{\mu_{MV_{i-1}}}\right) \times 100$$

ب) گزینه شماره 2b: پایش درصد تغییرات مکانی در کمیت های اندازه‌گیری

روش تضمین کیفیت شماره 2b شامل ارزیابی درصد تغییرات مکانی در $\%\Delta MV_i$ به‌دست‌آمده از دو عبور اندازه‌گیری

متوالی بر روی قطعه ارزیابی است که با استفاده از معادله ۵-۳

(۳)

در این تحلیل مکانی، داده‌های اندازه‌گیری شده توسط غلتک به یک شبکه ثابت تبدیل می‌شوند تا به‌صورت مستقیم مقایسه شوند. سپس درصد تغییرات کمیت های اندازه‌گیری شده برای هر نقطه از شبکه محاسبه می‌شود. مقدار هدف پیشنهادشده برای گزینه شماره 2b (Δ-TV %) دو برابر عدم قطعیت $\sigma_{\%\Delta MV}$ است که از آزمایش قابلیت تکرار تعیین می‌شود. تایید تراکم بر اساس رسیدن به Δ-TV % بر روی بخش مشخصی از قطعه ارزیابی یا درصد مساحت آستانه انجام می‌شود که در شکل ٦ به‌صورت شماتیک نشان داده‌شده است. بازه پیشنهادشده برای درصد مساحت آستانه 95-80٪ است، برای مثال تراکم زمانی قابل‌قبول است که در 90٪ مساحت قطعه ارزیابی یا بیشتر، میزان افزایش کمیت های اندازه‌گیری غلتک (MV) کوچک‌تر یا مساوی Δ-TV % باشد. فرایند تبدیل داده‌های اندازه‌گیری مکانی به شبکه ثابت راحت نیست و کاملاً قابل‌اعتماد نمی‌باشد. تا زمانی که ماهیت زمین‌آماری داده‌های MV بهتر فهمیده شود، روش‌های ساده‌تر مانند شبکه‌بندی نزدیک‌ترین همسایگی یا درون‌یابی خطی ممکن است مقبول‌تر از روش‌های پیچیده مانند درون‌یابی غیرخطی یا روش همبستگی کریجینگ باشند. در روش تضمین کیفیت شماره ۲ لازم است که تغییرات ملایم در عملیات ساخت وجود داشته باشد که دو عبور اندازه‌گیری با الگوهای غلتک زنی مشابه انجام شوند. اگر روش شماره ۲ به‌درستی مورداستفاده قرار گیرد، تضمین می‌شود که به تناسب قابلیت سیستم کنترل پیوسته تراکم و پارامترهای عملکردی انتخاب‌شده، تراکم کافی به‌دست‌آمده است، اما لزوماً تضمین نمی‌شود که در عمل میزان تراکم کافی حاصل‌شده باشد. قبل از شروع عملیات تراکم، قابلیت غلتک در ایجاد تراکم کافی باید ارزیابی و در صورت نیاز تصحیح شود. برای تقویت قابلیت اطمینان تضمین کیفیت تراکم می‌توان از روش شماره ۲ به همراه یکی دیگر از روش‌های تضمین کیفیت استفاده کرد.

محاسبه می‌شود:

$$\%\Delta MV_i = \frac{MV_i - MV_{i-1}}{MV_{i-1}} \times 100$$

روش ۳ : مقایسه کمیت های اندازه‌گیری (MV) با مقدار هدف کمیت های اندازه‌گیری (MV-TV)

در گزینه‌های شماره 3a و 3b و 3c باید درصد مشخصی از کمیت های اندازه‌گیری شده غلتک در قطعه ارزیابی بیشتر از مقدار هدف کمیت های اندازه‌گیری (MV-TV) باشند. مقدار هدف باید قبل از آزمون تضمین کیفیت، در ناحیه کالیبراسیون تعیین شود. در آینده ممکن است مقادیر هدف از پایگاه داده اطلاعات پروژه، سوابق بایگانی‌شده و ادبیات موجود انتخاب شوند. درهرصورت باید طیف وسیعی از متغیرهایی که کمیت های اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار می‌دهند مورد توجه قرار گیرند. روش برقراری یک مقدار هدف برای کمیت های اندازه‌گیری (MV-TV)، در هرکدام از سه گزینه موجود درروش شماره ۳ متفاوت است و در ادامه شرح داده می‌شود. تایید تراکم برای هر سه گزینه مشابه است و بر اساس رسیدن به مقدار هدف در نسبت مشخصی از قطعه ارزیابی یا درصد مساحت آستانه انجام می‌شود. یعنی باید درصد مشخصی از مساحت قطعه ارزیابی دارای کمیت های اندازه‌گیری برابر یا بیشتر از مقدار هدف باشد. حدود درصد مساحت آستانه پیشنهادشده، 90-80٪ است و باید قبل از آزمایش تعیین شود. شکل ٦ فرایند تضمین کیفیت را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. انتخاب قطعه‌های ارزیابی باید مطابق آنچه در بخش قبل گفته شد انجام شود.

الف) تعیین مقدار هدف (MV-TV) برای گزینه شماره 3a : ارتباط کمیت های اندازه‌گیری غلتک با نتایج آزمون‌های برجا

در گزینه 3a بین کمیت های اندازه‌گیری غلتک با نتایج آزمون‌های برجا با استفاده از تحلیل همبستگی آماری رابطه برقرار می‌شود. شکل ٦ متدولوژی این روش را نشان می‌دهد. ناحیه کالیبراسیون باید مطابق قوانین شرح داده‌شده در بخش مربوطه انتخاب شود. ناحیه کالیبراسیون با درصد تراکم کم، متوسط و زیاد متراکم می‌شود. وضعیت تراکم کامل باید برابر یا بیشتر از مقدار هدف تضمین کیفیت باشد (MV>QA-TV).

در هرکدام از سه وضعیت تراکم مذکور یک عبور اندازه‌گیری انجام می‌شود و بلافاصله در چندین نقطه از ناحیه کالیبراسیون آزمون‌های برجا انجام می‌شود. پیشنهاد می‌شود برای هرکدام از سطح تراکم‌های کم، متوسط و زیاد پنج آزمون برجا انجام شود. برای شناسایی محل انجام آزمون‌های برجا می‌توان از داده‌های عبور اندازه‌گیری استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود برای بهبود قابلیت اطمینان، محل‌هایی برای انجام آزمون‌های برجا انتخاب شوند که کمیت های اندازه‌گیری غلتک ثابت هستند و از انتخاب محل‌هایی که کمیت های اندازه‌گیری تغییرات زیادی دارند جدا خودداری شود. مجموعه محل‌های انتخاب‌شده باید بیانگر بازه تغییرات مشاهده‌شده در داده‌های عبور اندازه‌گیری باشد. در هر یک از محل‌های انتخاب‌شده باید سه تا پنج آزمون برجا در طول نوار انجام‌شده و میانگین‌گیری شود تا یک نقطه رگرسیون به دست آید. داده‌های اندازه‌گیری غلتک نیز در هر محل و در فاصله ۱ متر در جهت حرکت غلتک میانگین‌گیری می‌شوند تا یک نقطه رگرسیون ایجاد شود.

تحلیل رگرسیونی روی داده‌های اندازه‌گیری غلتک به‌عنوان متغیر وابسته و نتایج آزمون‌های برجا به‌عنوان متغیر مستقل انجام می‌شود. در کل برای قضاوت درباره روابط از مجذور ضریب هبستگی R^2 استفاده می‌شود. رابطه‌ای قابل‌قبول خواهد بود که $R^2>0.5$ باشد؛ به‌عنوان‌مثال رابطه نشان داده‌شده در شکل ٦ قابل‌قبول است. این سطح قابل‌قبول برای R^2 معمولاً زمانی استفاده می‌شود که خواصی از خاک که رابطه بر اساس آن‌ها تشکیل می‌شود توسط ابزارهای مختلف اندازه‌گیری شده باشند زیرا شرایط بارگذاری، وضعیت محل استقرار و حجم خاک معرف این خواص، تغییر می‌کند. پینگ (Ping et al. 2002) وقتی مدول تحلیل برگشتی به‌دست‌آمده از آزمون FWD را با داده‌های آزمایشگاهی ارتباط می‌داد، مقدار $R^2 = 0.2$ را قابل‌قبول دانست. وناپوس و وایت (Vennapusa & White 2009) وقتی بین داده‌های جمع‌آوری‌شده از ابزارهای مختلف LWD ارتباط برقرار می‌کردند اظهار داشتند که مقدار $R^2 = 0.5 - 0.9$ قابل‌قبول است و برای ارتباط بین نتایج آزمون LWD و آزمون بارگذاری صفحه (PLT) مقدار $R^2 = 0.4 - 0.66$ را قابل‌قبول دانستند. وقتی داده‌های اندازه‌گیری غلتک با نتایج آزمون‌های برجای مبتنی بر سختی (PLT , LWD) ارتباط داده می‌شوند، معمولاً استفاده از همبستگی تک متغیره کفایت می‌کند. اما زمانی که داده‌های غلتک با دانسیته ارتباط داده می‌شوند، ممکن است استفاده از همبستگی تک متغیره کافی نباشد. اگر رفتار مصالح وابسته به رطوبت باشد باید از همبستگی چند متغیره استفاده شود. همچنین بهتر است به‌منظور در نظر گرفتن شرایط لایه‌های زیرین در محاسبات، از همبستگی چند متغیره استفاده شود زیرا اختلاف قابل‌توجهی بین عمق اندازه‌گیری غلتک و عمق اندازه‌گیری آزمون‌های برجا وجود دارد. تجربه قبلی و شناخت پایه‌ای دقیق کمیت های اندازه‌گیری غلتک و نتایج آزمون‌های برجا، احتمال دست‌یابی به روابط قابل‌قبول را افزایش می‌دهد. درصورتی‌که یک رابطه مناسب تعیین‌شده باشد ($R^2>0.5$)، از رابطه همبستگی و بر اساس مقدار هدف موجود مبتنی بر نتایج آزمون‌های برجا (QA-TV: برای مثال 95٪ دانسیته خشک ماکزیمم که در شکل ٦ قابل‌مشاهده است)، یک مقدار هدف کمیت های اندازه‌گیری غلتک (MV-TV) انتخاب می‌شود. برای افزایش قابلیت اطمینان می‌توان مقدار QA-TV مورداستفاده برای تعیین MV-TV را افزایش داد. هنگام استفاده از روابط برای انتخاب MV-TV می‌توان از حدود پیش‌بینی‌شده استفاده کرد. می‌توان با استفاده از حد پیش‌بینی دست بالا که در شکل نشان داده‌شده است، یک مقدار هدف تعیین کرد. هرچه بازه پیش‌بینی بزرگ‌تر باشد، مقدار هدف (MV-TV) بزرگ‌تر می‌شود.

ب) تعیین مقدار هدف (MV-TV) برای گزینه شماره 3b : منحنی تراکم در گزینه 3b با مانیتور کردن تغییرات کمیت های اندازه‌گیری غلتک می‌توان تعیین کرد که چه زمانی تراکم کامل می‌شود. در حین تراکم ناحیه کالیبراسیون، کمیت های اندازه‌گیری و تعداد عبور غلتک به‌صورت پیوسته ثبت می‌شوند. همان‌طور که در شکل ٦ نشان داده‌شده است، وقتی در 90٪ از مساحت ناحیه کالیبراسیون درصد تغییرات کمیت های اندازه‌گیری در عبور i نسبت به عبور i-1 از 5٪ کمتر شود ($\%\Delta MV_i<\%5$) ، میانگین کمیت های اندازه‌گیری در عبور i برابر مقدار هدف کمیت‌های اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود

$(MV - TV = \mu_{MVi})$. فرایند کالیبراسیون درروش 3b مشابه آزمایش تضمین کیفیت درروش 2b است.

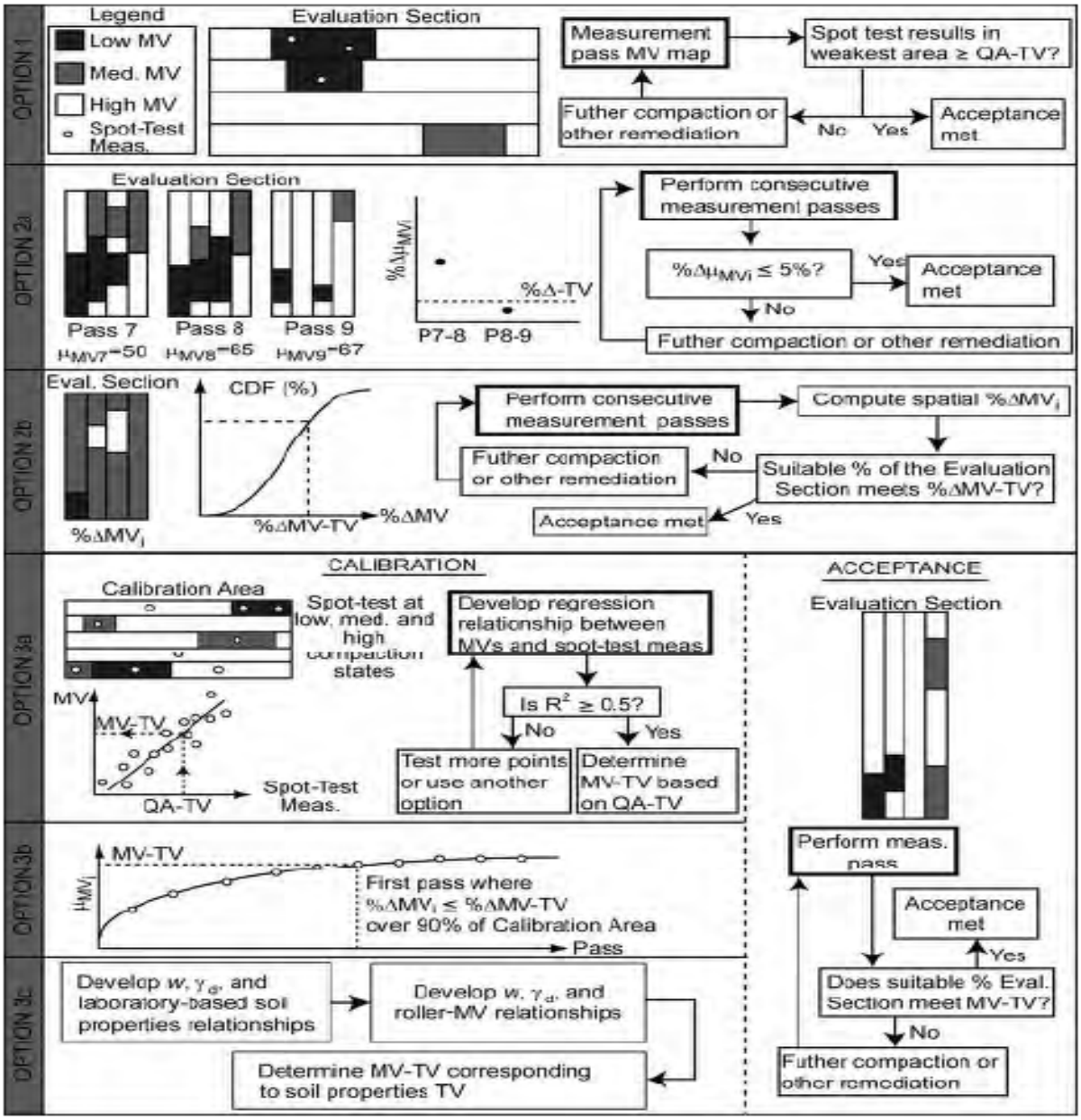
ج) تعیین مقدار هدف (MV-TV) برای گزینه شماره 3c : برقراری ارتباط بین کمیت های اندازه‌گیری (MV) و داده‌های آزمایشگاهی

در این روش مقدار هدف از طریق ارتباط تجربی با خواص مهندسی تعیین‌شده در آزمایشگاه (مانند Mr) بر اساس ترکیبی از درصد رطوبت‌ها و وزن مخصوص‌های خشک، تعیین می‌شود. در این روش زمان قابل‌توجهی برای تعیین مقدار MV-TV صرف می‌شود. باید توجه داشت که انجام آزمایش‌های مدول برجهندگی آزمایشگاهی زمان‌بر است. لذا اگر مصالح غیریکنواخت در پروژه وجود داشته باشد، این موضوع می‌تواند مانع استفاده از این روش تضمین کیفیت شود. آزمایش‌های آزمایشگاهی باید روی نمونه‌های آماده‌شده در ترکیبات از قبل انتخاب‌شده دانسیته–رطوبت مطابق استانداردهای مورد استفاده، انجام شود. برای مثال درصد رطوبت‌ها می‌توانند بین w_{opt} −۱٪ و w_{opt} +۱٪ و وزن مخصوص خشک می‌تواند در بازه γ_{dmax} 110%-90% متغیر باشد. وزن مخصوص خشک حداکثر از آزمایش پرکتور استاندارد یا اصلاح‌شده که توسط اداره راه برای تضمین کیفیت مشخص‌شده است، به دست می‌آید. مطابق شکل ٦ با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، یک مدل همبستگی چندمتغیره به‌عنوان تابعی از درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک تشکیل می‌شود تا مقادیر پارامترهای آزمایشگاهی خاک پیش‌بینی شود. ازآنجاکه مقادیر مدول برجهندگی وابسته به تنش هستند، رابطه همبستگی چند متغیره باید در یک شرایط تنش انتخابی انجام شود.

تراکم ناحیه کالیبراسیون در درصد رطوبت‌های مختلف انجام می‌شود (برای نمونه w_{opt} −۱٪ تا w_{opt} +۱٪) و کمیت های اندازه‌گیری غلتک موازی با اندازه‌گیری‌های میدانی رطوبت و وزن مخصوص خشک، در چند عبور (مثلاً عبورهای ۱ ، ۲ ، ٤ ، ۸ و ۱۲) به دست می‌آیند. با استفاده از داده‌های آزمایش‌های برجا و داده‌های اندازه‌گیری غلتک متناظر، یک رابطه همبستگی چند متغیره تشکیل می‌شود تا با استفاده از آن کمیت های اندازه‌گیری غلتک (MV) به‌عنوان تابعی از رطوبت و وزن مخصوص خشک، مطابق شکل ٦ با استفاده از حدود پیش‌بینی، تخمین زده شوند.

با استفاده از روابط همبستگی چند متغیره به‌دست‌آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی، خواص آزمایشگاهی خاک به کمیت های اندازه‌گیری غلتک ارتباط داده می‌شوند. می‌توان بر اساس مقدار هدف خواص آزمایشگاهی خاک (QA-TV) که از رابطه همبستگی خطی به دست می‌آید، یک مقدار هدف برای کمیت های اندازه‌گیری غلتک (MV-TV) تعیین کرد. روش تراکم مورداستفاده برای نمونه‌های آماده‌شده در آزمایشگاه به‌ویژه در مورد خاک‌های ریزدانه، می‌تواند بر مقادیر تعیین‌شده در آزمایشگاه تأثیرگذار باشد. پیشنهاد می‌شود برای خاک‌های دانه‌ای متراکم شده با غلتک چرخ فولادی صاف، از تراکم آزمایشگاهی ویبراتوری و برای خاک‌های ریزدانه متراکم شده با غلتک‌های پاچه‌بزی، روش تراکم آزمایشگاهی ضربه‌ای استفاده شود.

الگوریتم روش‌های تضمین کیفیت تراکم به صورت خلاصه در شکل ٦ ارائه‌شده است.



شکل ۸. خلاصه روش‌های تضمین کیفیت با سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم (White and Vennapusa. 2010)

۵-۲- روش‌های ترکیبی

در روش‌های ترکیبی، عملیات اجرایی در حین ساخت، کنترل شده و در نهایت با تعداد اندکی آزمون برجا مورد تایید واقع می‌شوند. این روش‌ها عبارتند از: ۱) اجرای قطعه های آزمایشی در کارگاه‌های بزرگ و کنترل عملکرد غلتک‌ها با استفاده از دستگاه‌های کنترولوگراف و ۲) استفاده از جدول‌های عملکردی غلتک و کنترل اولیه با نظارت بر تعداد عبور غلتک. روش اول در آیین‌نامه‌های کنترل پیوسته تراکم نیز مشابه این حالت است که ابتدا در حین تراکم کنترل اولیه انجام شده سپس در نقاط ضعیف آزمون‌های برجا انجام می‌گیرد.

روش قطعه آزمایشی یا "نوار آزمایشی"

ابزارهای اندازه‌گیری سختی حساس به رطوبت می‌باشند و هیچ یک از آنها قادر به اندازه‌گیری درصد رطوبت نیستند. همچنین ابزارهای اندازه‌گیری مبتنی بر سختی محدودیت‌هایی نسبت به نوع مصالح مورد استفاده دارند به طوری که هیچ ابزاری به تنهایی برای همه نوع مصالح قابل استفاده نیست. بر اساس یک مصاحبه با کارمندان اداره حمل ونقل ایندیانا، استفاده از قطعه‌های آزمایشی برای تشکیل مقدار هدف ابزارهای جدید کنترل تراکم میدانی، استفاده از این ابزارها را راحت می کند زیرا فرصتی برای شناسایی محدودیت های آنها به وجود می آورد. همچنین قطعه آزمایشی به آشنایی پیمانکارها با فرایند آزمایش و اندازه گیری ها کمک می‌کند.

قطعه آزمایشی یا نوار آزمایشی قطعه‌ای است که قبلا و در حین عملیات خاکریزی متراکم می شود تا با استفاده از آن حداکثر مقدار دانسیته هدف و نیز نوع غلتک، الگوی غلتک زنی و تعداد عبور مورد نیاز برای رسیدن به این دانسیته برای یک نوع مصالح خاص تعیین شود. این نوار با درصد رطوبت نزدیک به رطوبت بهینه متراکم می شود تا توسط پیمانکار مورد استفاده قرار بگیرد. پس از هر عبور غلتک، دانسیته و درصد رطوبت محلی در سه نقطه تصادفی یا بیشتر اندازه گیری می شوند تا جایی که افزایش قابل توجهی در دانسیته مشاهده نشود. از متوسط دانسیته‌های به دست آمده پس از عبور نهایی، به عنوان دانسیته هدف ماکزیمم برای یک نوع مصالح خاص استفاده می شود. معمولا آژانس ها تعیین می کنند که لایه های تراکم باید تا رسیدن به درصد مشخصی از این دانسیته حداکثر متراکم شوند. قطعه های آزمایشی نیز در هر $۱۰۰۰ - ۳۰۰۰m^۲$ یا در هر ناحیه‌ای که مصالح تغییرات قابل ملاحظه‌ای داشته باشند، ساخته می‌شوند. در جدول ٤ خلاصه‌ای از آیین نامه‌های اداره‌های حمل و نقلی برای مصالح خاکی ارائه شده است.

جدول‌های عملکرد غلتک

در گزیده‌ای از آیین‌نامه راهنمایی‌های فنی برای ساخت خاکریزها و لایه‌های فوقانی کشور فرانسه، تحت عنوان "آیین‌نامه عملی برای استفاده از خاک و مصالح سنگی در ساخت خاکریز "راهنمایی‌های فنی برای استفاده بهینه از تجهیزات و کنترل اولیه تراکم ارائه شده است. این آیین‌نامه شامل:

۱- طبقه‌بندی خاکهای طبیعی براساس آزمایش‌های طبقه‌بندی آزمایشگاهی (با توجه به پتانسیل استفاده از آنها بعنوان مصالح خاکریز)،

۲- تعیین گروه‌های خاک مناسب برای استفاده در خاکریزها و شرایط مناسب خاک در هنگام استفاده،

۳- طبقه‌بندی غلتک‌ها و ارائه تعداد عبور مورد نیاز برای متراکم کردن ضخامت‌های مختلف انواع خاک‌ها با انواع غلتک‌ها.

در این آیین‌نامه روش‌های تراکم مورد نیاز برای تراکم خاکریزها رتبه بندی شده و برای غلتک‌های مورد استفاده برای انواع خاک، تعدا عبور لازم پیشنهاد می‌شود. جدول‌های فراهم آمده توسط کشور فرانسه با استفاده از پایگاه داده‌های حاصل شده طی چندین سال آزمایش با غلتک‌های مختلف و در پارامترهای عملکردی متفاوت روی انواع مصالح بدست آمده‌اند. با استفاده از این جدول‌ها کنترل پیوسته تراکم بدون استفاده از غلتکهای هوشمند، با مشخص کردن یک سری پارامترها انجام می‌شود که عبارتند از: ۱) حداکثر ضخامت لایه متراکم شده که توسط غلتک با مشخصات معلوم قابل کوبیدن باشد، ۲) شدت تراکم که با نسبت Q/S بیان می‌شود (Q حجم خاک متراکم شده و S سطح پوشش داده شده توسط استوانه غلتک برای کوبیدن حجم Q)، ۳) شرایط عملکردی غلتک شامل حداکثر سرعت پیشروی غلتک‌های لرزنده، حداقل سرعت ماشین‌های پخش کننده، فرکانس ارتعاش و لنگر خروج از مرکزی غلتک‌های لرزنده و فشار تایر غلتک‌های پنیوماتیک. مسافت طی شده، دامنه و فرکانس ارتعاش و سرعت حرکت غلتک با استفاده از تاچوگراف اندازه‌گیری می‌شود.

با کنترل این پارامترها، پس از انجام تعداد عبورهای مشخص شده می‌توان انتظار داشت که خاک متراکم شده تا حد زیادی معیارهای مورد نیاز را ارضا کرده باشد. استفاده از این معیارهای اولیه، ساخت قطعه‌های آزمایشی را کاهش می‌دهد و در کارگاه‌ها کمک می‌کند تا راحت‌تر پروژه را کنترل کرده و در نهایت با چند آزمون برجا تایید کنند. در آیین‌نامه عملیات

خاکی بریتانیا و آیین‌نامه ایالت واشنگتون نیز جدول‌هایی ارائه شده است که تعداد گذر کافی برای رسیدن به تراکم مورد نیاز را پیش‌بینی کرده‌اند.

۶- ارائه راهکار برای ایران

طی دو دهه گذشته چندین کشور اروپایی آیین‌نامه‌های تراکم هوشمند تدوین کرده‌اند. اخیراً نیز تعداد اندکی از اداره‌های حمل‌ونقلی آمریکا شامل ایندیانا، مینسوتا و تگزاس برای تسهیل استفاده از تکنولوژی تراکم هوشمند در پروژه‌های خاکی، آیین‌نامه‌های تراکم هوشمند تدوین کرده‌اند. FHWA نیز در سال ۲۰۱۱ آیین‌نامه عمومی تراکم مصالح خاکی با استفاده از تکنولوژی تراکم هوشمند را منتشر کرد که مفاد آن باید توسط آژانس‌ها با توجه به نوع منطقه مورداستفاده، برای ارضا کردن معیارهای خاص تصحیح شوند. در هر صورت باید توجه داشت که تکنولوژی تراکم هوشمند سال‌هاست در اروپا و ژاپن مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی به‌تازگی در ایالات‌متحده آمریکا معرفی‌شده است و فقط تعداد کمی از آنها از این تکنولوژی در عمل استفاده می‌کنند. با این وجود آژانس‌های ایالات آمریکا اعلام کرده‌اند که هنوز تجربه اندک، دانش ناکافی و دسترسی محدود به تجهیزات تراکم هوشمند دارند و بر این باورند که این محدودیت‌ها به‌کارگیری تکنولوژی تراکم هوشمند توسط اداره‌های حمل‌ونقلی و پیمانکارها را دشوار می‌کند. بنابراین در ایران که حتی تکنولوژی تراکم هوشمند معرفی هم نشده، نمی‌توان انتظار داشت که سیستم‌های هوشمند را به‌صورت مستقیم وارد فرایند کنترل تراکم در پروژه‌های اجرایی نمود. استفاده از این ابزار نیاز به جمع‌آوری اطلاعات وسیعی در حوزه عملکرد، نحوه پردازش داده‌های جمع‌آوری‌شده، گزارش داده‌ها، تفسیر وضعیت تراکم از روی کمیت های اندازه‌گیری شده و ... دارد که خود مستلزم داشتن پرسنل آموزش‌دیده و ماهر است. به‌علاوه، اطلاع از نحوه تأثیر پارامترهای عملکردی غلتک مانند دامنه و فرکانس ارتعاش، سرعت و نیز جهت حرکت و همچنین اطلاع از نحوه تأثیر شرایط محیطی مختلف مانند درصد رطوبت، نوع و دانه‌بندی خاک و میزان غیریکنواختی مصالح بر روی کمیت های اندازه‌گیری شده غلتک الزامی است که نیاز به انجام تحقیقات میدانی با استفاده از غلتک‌های هوشمند دارد. مهم‌تر از آن یکی از دلایل اصلی استفاده از غلتک‌های هوشمند افزایش سرعت اجرا است لذا برای کالیبراسیون غلتک نمی‌توان صرفا بر روش سنتی مخروط ماسه که در ایران مرسوم است تکیه کرد و باید از ابزارهای سریع‌تر استفاده نمود. استفاده از ابزارهای کنترل تراکم مبتنی بر سختی برای کالیبراسیون غلتک‌های هوشمند مناسب‌تر است زیرا علاوه بر سرعت بالا، خواص سختی و مقاومت خاک را اندازه می‌گیرند که متناسب با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته توسط غلتک هستند. با این تفاسیر وضع موجود کشور در زمینه راه‌سازی بسیار نامناسب به نظر می‌رسد و حداقل کاری که باید انجام داد رفع مشکل زمان و در پی آن حذف هزینه‌های جانبی ناشی از توقف عملیات اجرایی در پروژه‌های دارای اهمیت زمانی است. حال قدم اول برای حرکت عمومی به سمت تکنولوژی تراکم هوشمند، گذر از روش سنتی اندازه‌گیری دانسیته با روش‌های آزمایشگاهی است. ابتدا باید ابزارهای جدید کنترل تراکم میدانی را وارد عمل کرد که با توجه به اطلاعات ارائه‌شده و تجربه موجود سایر کشورها در استفاده از این ابزارها و ارزیابی‌ها و مطالعات انجام‌شده بر روی این ابزارها و همچنین آیین‌نامه‌های موجود برای استفاده از این ابزارها در فرایند کنترل تراکم، به نظر می‌رسد استفاده از دانسیته سنج‌های هسته‌ای (NDG)، ژئوگیج، نفوذسنج مخروطی دینامیکی (DCP) و افت و خیز سنج سبک سقوط وزنه (LWD) مناسب باشد که خود نیازمند انجام پروژه‌های تحقیقاتی عملی، آموزش اپراتورها و آشنا کردن پیمانکارها با این ابزارها است. ابزارهای سختی مانند LWD ، DCP و BCD در خاکهای خیلی نرم ریزدانه با محدودیت‌هایی روبرو هستند. دستگاه ژئوگیج نسبت به سختی سطح لایه (دو اینچ فوقانی) حساس است و همچنین استفاده از ابزار DCP به مصالح با حداکثر اندازه ذرات کوچک‌تر از ۵۰ میلی متر محدود می‌شود. البته ابزار DCP می‌تواند روش مناسبی برای کنترل کیفیت بستر و تعیین مدول برجهندگی آن باشد. ابزارهای سختی نسبت به رطوبت حساس هستند و استفاده از آنها مستلزم داشتن اطلاعات و تجربه کافی است.

با توجه به دستیابی کشور به تکنولوژی هسته‌ای و قابل‌رفع بودن مشکلات جانبی در استفاده از دانسیته سنج هسته‌ای، می‌توان آن را بهترین گزینه برای جایگزینی با روش سنتی کنترل دانسیته آزمایشگاهی معرفی نموده و در آیین‌نامه کشور لحاظ کرد. اما لزومی ندارد که روش سنتی و ارزان مخروط ماسه را حذف کرد و می‌توان در راه‌های روستایی و با اهمیت کم که زمان اهمیت کمتری دارد و هزینه‌ها تعیین‌کننده هستند، از این روش استفاده کرد یا در پروژه‌های با اهمیت زمانی بالاتر می‌توان از ابزار مخروط ماسه به همراه آزمایشگر سریع رطوبت بهره گرفت.

استفاده از غلتک‌های هوشمند نیز فقط برای انجام پروژه‌های آزمایشی و تحقیقات عملی بر روی این تکنولوژی به‌منظور به دست آوردن تجربه عملی و آشنایی بیشتر با آن پیشنهاد می‌شود. البته برای آشنایی و کسب تجربه در زمینه استفاده از تکنولوژی تراکم هوشمند می‌توان در پروژه‌های با اهمیت بالا، با ساخت قطعه‌های آزمایشی برای ارزیابی و کالیبراسیون غلتک و کاهش تعداد آزمون‌های برجا و نه صرفاً تکیه بر کنترل پیوسته تراکم با غلتک هوشمند، از این تکنولوژی بهره گرفت. به این مفهوم که بهتر است از روش کنترل تراکم با انجام آزمون‌های برجا در نواحی ضعیف شناسایی‌شده توسط غلتک، که در بخش «روش‌های تدوین آیین‌نامه تراکم هوشمند» اشاره شد، استفاده کرد. ابزارهایی که برای کنترل سختی خاک و همچنین برای کالیبراسیون غلتک هوشمند پیشنهاد می‌شوند، افت‌وخیزسنج سبک (LWD) و بارگذاری صفحه (PLT) مانند VSS هستند. این ابزارها مدول خاک را به‌صورت مستقیم به دست می‌آورند. همچنین با توجه به این موضوع که غلتک‌های هوشمند مانند یک آزمون بارگذاری صفحه دینامیکی به‌صورت پیوسته عمل می‌کنند، تشابه نسبی در روش محاسبه بین ابزار LWD و PLT با غلتک هوشمند باعث می‌شود که روابطی منطقی و مناسب بین نتایج آنها برقرار شود. اما از آنجا که سختی متأثر از رطوبت است، باید در ارزیابی نتایج دقت شود. مطابق محاسبات انجام شده در این پژوهش، استفاده از دانسیته سنج هسته‌ای در مقایسه با روش مخروط ماسه علاوه بر صرفه‌جویی در زمان، باعث کاهش ۵۰ درصدی هزینه‌های آزمایش در ضخامت یکسان می‌شود که با افزایش ضخامت لایه‌های تراکم علاوه بر صرفه‌جویی بیشتر در هزینه آزمایش، هزینه‌های پخش و تراکم مصالح نیز به نسبت کاهش خواهد یافت. پروژه‌های آزادراهی از اهمیت بالایی برخوردار هستند و زمان‌بندی در این پروژه‌ها حساس است. در قراردادهای سه عاملی پیشنهاد می‌شود برای کنترل تراکم خاک‌های سنگی و شنی با اندازه بزرگ‌تر از ۱ اینچ تا ٤ اینچ، از آزمون بارگذاری صفحه و در مصالح ریزدانه‌تر از روش هسته‌ای استفاده شود. بدیهی است که حضور ابزار مخروط ماسه نیز برای کالیبراسیون الزامی است. در پروژه‌های آزادراهی که در آنها قرارداد EPC منعقد شده است، پیمانکار آزادی عمل بیشتری در زمینه انتخاب تجهیزات و تکنیک‌های اجرایی دارد و ارتقاء قابلیت‌های ساخت و نوآوری در داخل کشور امکان‌پذیر می‌گردد. از آنجا که زمان در این نوع قراردادها از اهمیت خاصی برخوردار است، پیمانکار می‌تواند با استفاده از کادر مجرب و آموزش دیده، از تکنولوژی کنترل پیوسته تراکم به همراه ابزارهای کنترل تراکم مذکور استفاده نماید. در پروژه راه‌های اصلی درجه ۱ اهمیت زمانی نسبت به آزادراه‌ها کمتر است. در قراردادهای سه عاملی منعقد شده در این پروژه‌ها می‌توان از همان روش پیشنهادشده برای آزادراه‌ها و همچنین از ابزار مخروط ماسه به همراه آزمایشگر سریع رطوبت برای خاک‌های درشت‌دانه و اون میدانی برای خاک‌های ریزدانه استفاده کرد. در قراردادهای EPC می‌توان از روش کنترل حین اجرای عملیات تراکم با استفاده از دستگاه تاکوگراف که مسافت طی شده، سرعت غلتک و ارتعاش استوانه را ثبت می‌کند، نیز استفاده کرده و تعداد آزمون‌های برجا را کاهش داد. در پروژه راه‌های اصلی درجه ۲ و راه‌های فرعی که زمان اهمیت بالایی ندارد، استفاده از روش دانسیته خشک در خاک‌های ریزدانه و آزمون بارگذاری صفحه برای مصالح سنگی و شنی، کفایت می‌کند. در پروژه راه‌های اصلی درجه ۱ و ۲ و راه‌های فرعی، از روش کنترل فرایند تراکم با نیروی انسانی نیز می‌توان استفاده نمود. به این صورت که مسئولیت کنترل عملکرد غلتک و تعداد عبور آن را بر عهده یک دیپلمه فنی قرار داده و تعداد آزمون‌های برجای موردنیاز را کاهش داد.

۷- نتیجه‌گیری

به طور کلی در این تحقیق روش‌های کنترل تراکم مرسوم در راهسازی، در دو گروه کنترل نتیجه نهایی و کنترل ترکیبی قرار می‌گیرند. کنترل نتیجه خود به دو صورت کنترل دانسیته خشک یا کنترل سختی خاک است و با انجام آزمون‌های برجا انجام می‌شود و روش ترکیبی شامل کنترل فرایند اجرا به همراه تعداد اندکی آزمون برجا به منظور کنترل نتیجه نهایی است.

کنترل وزن مخصوص خشک همواره اصلی ترین بخش کنترل تراکم چه به صورت مستقل و چه برای کالیبره کردن ابزارهای مورد استفاده در سایر روش‌ها را تشکیل می‌دهد. روش‌های سختی شامل ابزارهای اندازه‌گیری مدول و سختی مانند بارگذاری صفحه (PLT)، DCP، LWD، ژئوگیج و نیز سیستم‌های کنترل پیوسته تراکم و تراکم هوشمند می‌شود. در این میان، DCP، ژئوگیج و LWD بیشتر از سایر ابزارها مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته اند و آیین نامه‌های کنترل تراکم مبتنی بر سختی، بیشتر برای ابزارهای LWD و DCP وضع شده‌اند. روش‌های ترکیبی دو دسته هستند: ۱) اجرای قطعه‌های آزمایشی و ۲) تشکیل جدول‌های کنترل عملکرد غلتک. قطعه‌های آزمایشی به‌عنوان بخش موقت آیین‌نامه ساخته می‌شوند تا الگوهای صحیح غلتک زنی و ضخامت‌های مناسب لایه‌های تراکم تعیین شوند. دانسیته، درصد رطوبت، میانگین کل و میانگین تغییرات نتایج آزمون‌های برجا به‌عنوان تابعی از تعداد عبور غلتک ثبت می‌شوند و تعداد عبور غلتک و ضخامت لایه تراکم تصحیح می‌شوند تا حداقل معیارهای لازم ارضا شوند. در این روش هزینه و زمان اولیه برای احداث قطعه آزمایشی زیاد است و برای کارگاه‌های کوچک مناسب نیست. روش قطعه آزمایشی برای کارگاه‌های بزرگ و زمانی که قرار است حجم عظیمی از مصالح همگن و همسان پخش و متراکم شود، مناسب است. برای کارگاه‌های کوچک پیشنهاد می‌شود از جدول‌های کنترل عملکرد غلتک که قبلا با انجام آزمایش‌های متعدد بر روی انواع مصالح در شرایط متفاوت و با ضخامت-های مختلف تهیه شده‌اند استفاده شود. در این جدول‌ها تعداد گذر مورد نیاز برای رسیدن به دانسیته یا سختی مورد نظر مشخص می‌شوند و به این ترتیب یک کنترل اولیه از اجرای صحیح لایه‌ها صورت می‌گیرد. با این روش می‌توان در بخش‌های همگن تعداد آزمون‌های برجا را کاهش داد.

با توجه به ابزارها و روش‌های کنترل تراکم بحث شده، برای ایران نیز می‌توان کنترل حین اجرا را در دستور کار قرار داد تا پله‌ای برای صعود به سمت تراکم هوشمند باشد. برای این منظور پیشنهادهای زیر ارائه می شود:

۱- به منظور افزایش سرعت اجرا و حذف زمان انتظار مورد نیاز برای حصول نتایج آزمون دانسیته خشک بروش مخروط ماسه و نیز کاهش هزینه‌ها با افزایش ضخامت لایه‌ها، روش هسته‌ای در پروژه‌های اصلی جایگزین این روش سنتی شود.

۲- کنترل حین اجرا با کنترل پارامترهای عملکردی غلتک و تعداد گذر آن با نصب کنترولوگراف روی غلتک‌ها و یا توسط کارگر فنی انجام شود تا تراکم یکنواخت تر شده و تعداد آزمونهای برجا کاهش یابد.

۳-توجه به نوع مصالح و غلتکهای موجود، برای ایران نیز دستورالعملی پیشنهاد شود تا برای مصالح و تجهیزات مشخص، تخمینی از تعداد گذر لازم برای رسیدن به دانسیته هدف ارائه شود و در کارگاه ها برای پیش بینی اولیه استفاده شود.

٤- در کارگاه های مهم و بزرگ برای بهینه کردن اجرا، به تدریج استفاده از تکنولوژی کنترل پیوسته تراکم شروع شده و این تکنولوژی مورد ارزیابی قرار گیرد تا با مسائل و مشکلات پیش روی این تکنولوژی آشنا شده و از تجربه به دست آمده برای ارتقاء صنعت راهسازی کشور استفاده شود.

۸-مراجع

-Anderegg, R., & Kaufmann, K. (2004), "Intelligent compaction with vibratory rollers: Feedback control systems in automatic compaction and compaction control". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1868, 124–134.

-Anderegg, R., von Felten, D. A., & Kaufmann, K. (2006), "Compaction

Field Measurements in Geomechanics. ASCE. pp.1-12.

-Rinehart, & Mooney. (2009), "Measurement depth of vibratory roller-measured soil stiffness", Geotechnique 59.7. pp.609–619.

-Von Quintus, H. L., et al. (2010), "Evaluation of intelligent compaction technology for densification of roadway subgrades and structural layers". Submitted to the Wisconsin Highway Research Program (WHRP), Draft Final Report.

-Von Quintus, H. L., Minchin, R. E., & Nazarian, S. (2009), "NDT Technology for Quality Assurance of HMA Pavement Construction (Vol. 626). Transportation Research Board.

-White, D. J., & Vennapusa, P. K. (2010), "A review of roller integrated compaction monitoring technologies for earthworks". Final Report ER10-04, Earthworks Engineering Research Center (EERC), Department of Civil Construction and Environmental Engineering, Iowa State University.

- White, D. J., et al., (2010), "Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base , and Asphalt Pavement Materials. Final Report ER10-08 US12, FHWA-IF-12-002. pp.1-275.

-Technical Guidelines on embankment and Capping Layers construction (GTR), Practical manual for the use of soils and rocky materials in embankment construction.

-MANUAL Manual of contract documents for highway works, Volume 1, Specification for Highway Works (SERIES 600, EARTHWORKS).

-Field Manual Headquarters, No. 5-434 (Earthmoving Operations), Department of the Army Washington, DC, 15 June 2000.

monitoring using intelligent soil compactors". In Proc. Geo-Congress.

-Brandl, H., & Adam, D. (2014), "Continuous compaction control (CCC) for fill dams and roller compacted concrete dams". New developments in dam engineering: proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering, 18-20 October 2004, Nanjing China. CRC Press.

-Briaud, J., & Saez, D. (2012), "Soil compaction : recent developments. Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control, Zachry Department of Civil Engineering, Texas A&M University, pp.1-28.

-Briaud, J.-L., & Seo, J. (2003), "Intelligent compaction: overview and research needs. Report to the Federal Highway Administration.

-Cacciola, D. V. (2013), "Using continuous compaction control systems within an earthwork compaction specification framework. Diss. University of Delaware.

-Facas, N. W., Mooney, M. A., Asce, M., & Furrer, R. (2010), "Anisotropy in the Spatial Distribution of Roller-Measured Soil Stiffness. International Journal of Geomechanics, 10(4), pp.129–135.

-Kloubert, H. J. (2002). Asphalt manager with high efficient compaction system for better roads. proceedings of the 3RD international conference on bituminous mixtures and pavements, HELD THESSALONIKI, Greece, November (Vol. 1).

-Mooney, M. A., & Facas, N. W. (2013), "Extraction of Layer Properties from Intelligent Compaction Data. Final Report for Highway IDEA Project 145, (February).

-Mooney, M., & Adam, D. (2007), "Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction: An overview". FMGM 2007: