

جمهوری اسلامی ایران  
سازمان برنامه و بودجه کشور

# راهنمای انجام آزمایش‌های غیرمخرب در روسازی راه‌ها ضابطه شماره ۷۲۲

وزارت راه و شهرسازی  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی  
پژوهشکده حمل و نقل  
[bhrc.ac.ir](http://bhrc.ac.ir)

معاونت فنی و توسعه امور زیربنایی  
امور نظام فنی و اجرایی  
[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)

۱۳۹۵



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            |                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------|
| شماره:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ۹۵/۱۰۲۶۳۹۱ | بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران |
| تاریخ:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ۱۳۹۵/۱۱/۲۰ |                                                          |
| موضوع: راهنمای انجام آزمایش‌های غیرمخرب در روسازی راه‌ها                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |            |                                                          |
| <p>             به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و مواد (۶) و (۷) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی- مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷-هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست ضابطه شماره ۷۲۲ امور نظام فنی و اجرایی، با عنوان «<b>راهنمای انجام آزمایش‌های غیرمخرب در روسازی راه‌ها</b>» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.           </p> <p>             رعایت مفاد این ضابطه در صورت نداشتن ضوابط بهتر، از تاریخ ۱۳۹۶/۰۷/۰۱ الزامی است.           </p> <p>             امور نظام فنی و اجرایی این سازمان دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد مفاد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را اعلام خواهد کرد.           </p> <div style="text-align: center; margin-top: 50px;">  <p>احمد باقر نوبخت</p> </div> |            |                                                          |



## خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هر گونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را بصورت زیر گزارش فرمایید:

۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۲- ایراد مورد نظر را بصورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این امور، نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

**نشانی برای مکاتبه:** تهران، میدان بهارستان، خیابان دانشسرا، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی و

کشور، امور نظام فنی و اجرایی - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

Email: [nezamfanni@mporg.ir](mailto:nezamfanni@mporg.ir)

web: [nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)



## باسمه تعالی

### پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل تهیه طرح، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرح‌های عمرانی به لحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرح‌ها، کیفیت طراحی و اجرا (عمرمفید) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. نظام فنی و اجرایی کشور به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری از طرح‌ها را مورد تأکید جدی قرار داده است.

بنا بر مفاد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه، سازمان برنامه و بودجه کشور موظف به تهیه و ابلاغ ضوابط، مشخصات فنی، آیین‌نامه‌ها و استانداردهای اجرایی مورد نیاز طرح‌های عمرانی کشور می‌باشد. با توجه به تنوع و گستردگی طرح‌های عمرانی، طی سالهای اخیر سعی شده است در تهیه و تدوین این گونه مدارک علمی از مراکز تحقیقاتی و توان فنی دستگاه‌های اجرایی ذیربط استفاده شود. از این رو ضوابط فنی مربوط به "راهنمای انجام آزمایش‌های غیرمخرب در روسازی راه‌ها" با شماره نشریه ۷۲۲ با همکاری پژوهشکده حمل و نقل مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و بهره‌مندی از توان علمی و تخصصی جمعی از کارشناسان باتجربه کشور تهیه شده است.

علیرغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردیده، معهذ این مجموعه مصون از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پربار شدن این آیین‌نامه از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور ارسال کنند. کارشناسان سازمان پیشنهادهای دریافت شده را بررسی کرده و در صورت نیاز به اصلاح در متن ضابطه، با همفکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق سایت اینترنتی معاونت برای بهره‌برداری عموم اعلام خواهند کرد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در سمت میانی بالای صفحات ضابطه، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ به روزرسانی آن نیز اصلاح خواهد شد. از این‌رو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

بدینوسیله از تلاش و جدیت رئیس و کارشناسان امور نظام فنی و اجرایی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ناظرین و مجری محترم پروژه و همچنین از تمام عزیزان متخصص همکار در امر تهیه و نهایی کردن این ضابطه تشکر و قدردانی می‌شود و از ایزد منان توفیق روز افزون همه این بزرگواران را آرزومند است.

**غلامرضا شافعی**

**معاون فنی و توسعه امور زیربنایی**

**زمستان ۱۳۹۵**

# تهیه و کنترل " راهنمای انجام آزمایش‌های غیرمخرب در روسازی راه‌ها "

## [ضابطه شماره ۷۲۲]

### اعضای گروه مجری:

مهندسین مشاور بهین تردد  
مهندسین مشاور بهین تردد

دکترای عمران  
کارشناس ارشد عمران

سید علی صحاف  
سید علی محمودزادگان

### اعضای گروه نظارت:

دانشگاه تهران  
سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای

دکترای عمران  
کارشناس ارشد عمران

ساسان افلاکی  
بهروز دامیار

### اعضای گروه ارزیاب:

پژوهشکده حمل و نقل مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی  
پژوهشکده حمل و نقل مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

دکترای عمران  
دکترای عمران

حامد خانی‌سانج  
احمد منصوریان

### اعضای گروه هدایت و راهبری پروژه:

سازمان برنامه و بودجه کشور  
سازمان برنامه و بودجه کشور

معاون امور نظام فنی و اجرایی  
رییس‌گروه عمران امور نظام فنی و اجرایی

علیرضا توتونچی  
طاہر فتح‌اللهی



## فهرست مطالب

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| ۱- مقدمه.....                                                         | ۳  |
| ۱-۱- اهمیت آزمایش‌های غیرمخرب روسازی.....                             | ۳  |
| ۲-۱- محدودیت‌های آزمایش‌های غیرمخرب.....                              | ۵  |
| ۳-۱- دامنه کاربرد آزمایش‌های غیرمخرب.....                             | ۶  |
| ۴-۱- نحوه محاسبه خطا در آزمایش‌ها.....                                | ۷  |
| ۲- راهنمای آزمایش‌های غیرمخرب روسازی راه‌ها.....                      | ۱۱ |
| ۱-۲- آزمایش‌های تعیین افت و خیز روسازی.....                           | ۱۱ |
| ۱-۱-۱-۱-۲- آزمایش تیر بنکلمن.....                                     | ۱۲ |
| ۱-۱-۱-۲- معرفی دستگاه.....                                            | ۱۲ |
| ۲-۱-۱-۲- تئوری آزمایش برای تعیین مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی..... | ۱۶ |
| ۳-۱-۱-۲- موارد استفاده از تیر بنکلمن.....                             | ۱۸ |
| ۴-۱-۱-۲- روش کالیبراسیون.....                                         | ۱۸ |
| ۵-۱-۱-۲- روش انجام آزمایش.....                                        | ۲۰ |
| ۶-۱-۱-۲- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده.....                              | ۲۱ |
| ۷-۱-۱-۲- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده از آزمایش تیر بنکلمن.....      | ۲۲ |
| ۲-۱-۲- آزمایش سقوط وزنه (HWD و FWD).....                              | ۳۰ |
| ۱-۲-۱-۲- معرفی دستگاه.....                                            | ۳۰ |
| ۲-۲-۱-۲- موارد استفاده از آزمایش FWD.....                             | ۴۲ |
| ۳-۲-۱-۲- روش کالیبراسیون.....                                         | ۴۳ |
| ۴-۲-۱-۲- روش انجام آزمایش.....                                        | ۴۷ |
| ۵-۲-۱-۲- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده.....                              | ۴۸ |
| ۶-۲-۱-۲- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده.....                           | ۵۰ |
| ۳-۱-۲- آزمایش RWD.....                                                | ۶۱ |
| ۱-۳-۱-۲- معرفی دستگاه.....                                            | ۶۱ |
| ۲-۳-۱-۲- تئوری آزمایش برای تعیین مدول الاستیسیته لایه‌ها.....         | ۶۴ |
| ۳-۳-۱-۲- موارد استفاده.....                                           | ۶۶ |
| ۴-۳-۱-۲- روش کالیبراسیون.....                                         | ۶۶ |
| ۵-۳-۱-۲- روش انجام آزمایش.....                                        | ۶۶ |
| ۶-۳-۱-۲- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده.....                              | ۶۷ |
| ۷-۳-۱-۲- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده.....                           | ۶۷ |
| ۴-۱-۲- تناوب مکانی انجام آزمایش‌های افت و خیز روسازی.....             | ۶۸ |
| ۵-۱-۲- بررسی مزایا و معایب هر یک از آزمایش‌های تعیین افت و خیز.....   | ۷۲ |

|     |                                                                                 |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------|
| ۷۴  | ۲-۲- آزمایش‌های تعیین دانسیته روسازی به روش هسته‌ای و غیرهسته‌ای                |
| ۷۴  | ۲-۲-۱- آزمایش‌های تعیین دانسیته به روش غیرهسته‌ای                               |
| ۷۴  | ۲-۲-۱-۱- معرفی دستگاه PQI                                                       |
| ۸۰  | ۲-۲-۱-۲- تئوری آزمایش PQI                                                       |
| ۸۲  | ۲-۲-۱-۳- موارد استفاده                                                          |
| ۸۲  | ۲-۲-۱-۴- روش کالیبراسیون                                                        |
| ۸۶  | ۲-۲-۱-۵- روش انجام آزمایش                                                       |
| ۸۶  | ۲-۲-۱-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده                                             |
| ۸۶  | ۲-۲-۲- آزمایش‌های تعیین دانسیته به روش هسته‌ای                                  |
| ۸۶  | ۲-۲-۲-۱- معرفی دانسیته‌سنج هسته‌ای                                              |
| ۹۰  | ۲-۲-۲-۲- تئوری آزمایش                                                           |
| ۹۵  | ۲-۲-۲-۳- موارد استفاده                                                          |
| ۹۵  | ۲-۲-۲-۴- روش کالیبراسیون                                                        |
| ۹۵  | ۲-۲-۲-۵- روش انجام آزمایش                                                       |
| ۹۷  | ۲-۲-۲-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده                                             |
| ۱۰۱ | ۲-۲-۲-۷- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده                                          |
| ۱۰۴ | ۲-۳- مقایسه دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای                                |
| ۱۰۴ | ۲-۴- تناوب زمانی و مکانی انجام آزمایش‌های تعیین دانسیته                         |
| ۱۰۸ | ۲-۵- بررسی چند مورد دیگر از انواع آزمایش‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تعیین دانسیته |
| ۱۰۸ | ۲-۵-۱- دستگاه غیرهسته‌ای پیوتراکر                                               |
| ۱۱۰ | ۲-۵-۲- دانسیته‌سنج الکتریکی (EDG)                                               |
| ۱۱۲ | ۲-۵-۳- دستگاه نشانگر کیفیت خاک (SQI)                                            |
| ۱۱۳ | ۲-۶- بررسی مزایا و معایب آزمایش‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تعیین دانسیته          |
| ۱۱۸ | ۳-۲- آزمایش‌های تعیین ضخامت لایه‌های روسازی                                     |
| ۱۱۸ | ۳-۲-۱- آزمایش GPR                                                               |
| ۱۱۸ | ۳-۲-۱-۱- معرفی دستگاه                                                           |
| ۱۲۰ | ۳-۲-۱-۲- تئوری آزمایش                                                           |
| ۱۲۲ | ۳-۲-۱-۳- موارد استفاده                                                          |
| ۱۲۳ | ۳-۲-۱-۴- روش کالیبراسیون                                                        |
| ۱۲۴ | ۳-۲-۱-۵- روش انجام آزمایش                                                       |
| ۱۲۴ | ۳-۲-۱-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده                                             |
| ۱۲۵ | ۳-۲-۱-۷- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده                                          |
| ۱۲۹ | ۳-۲-۱-۸- بررسی مزایا و معایب آزمایش‌های تعیین ضخامت روسازی                      |
| ۱۳۰ | ۳-۴- آزمایش‌های تعیین سختی لایه‌های روسازی                                      |
| ۱۳۰ | ۳-۴-۱- آزمایش DCP                                                               |

|     |                                                                    |
|-----|--------------------------------------------------------------------|
| ۱۳۰ | ۲-۴-۱-۱- معرفی دستگاه.....                                         |
| ۱۳۳ | ۲-۴-۱-۲- تئوری آزمایش.....                                         |
| ۱۳۵ | ۲-۴-۱-۳- موارد استفاده.....                                        |
| ۱۳۷ | ۲-۴-۱-۴- روش کالیبراسیون.....                                      |
| ۱۳۷ | ۲-۴-۱-۵- روش انجام آزمایش.....                                     |
| ۱۳۹ | ۲-۴-۱-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده.....                           |
| ۱۳۹ | ۲-۴-۱-۷- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده.....                        |
| ۱۴۶ | ۲-۴-۱-۸- بررسی مزایا و معایب آزمایش DCP.....                       |
| ۱۴۶ | ۲-۴-۲- آزمایش آلتراسونیک - DSPA و PSPA.....                        |
| ۱۴۹ | ۲-۵-۱- آزمایش‌های تعیین ناهم‌آوری روسازی.....                      |
| ۱۴۹ | ۲-۵-۱- مقدمه.....                                                  |
| ۱۵۰ | ۲-۵-۲- تعریف پروفیل راه.....                                       |
| ۱۵۰ | ۲-۵-۳- کاربردهای پروفیل راه.....                                   |
| ۱۵۱ | ۲-۵-۴- پروفیل‌سنج‌ها.....                                          |
| ۱۵۱ | ۲-۵-۵- پروفیل‌سنج‌های با سرعت بالا.....                            |
| ۱۵۲ | ۲-۵-۱-۵- پروفیل‌سنج سطح راه (RSP).....                             |
| ۱۵۲ | ۲-۵-۱-۱- معرفی دستگاه.....                                         |
| ۱۵۳ | ۲-۵-۱-۲- اساس کار دستگاه.....                                      |
| ۱۵۳ | ۲-۵-۱-۳- ویژگی‌های دستگاه.....                                     |
| ۱۵۴ | ۲-۵-۱-۴- ساختار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری.....                       |
| ۱۵۵ | ۲-۵-۱-۲- تحلیل‌گر خودکار راه (ARAN).....                           |
| ۱۵۵ | ۲-۵-۱-۲- معرفی دستگاه.....                                         |
| ۱۵۶ | ۲-۵-۲-۲- تجهیزات مختلف دستگاه آران.....                            |
| ۱۶۱ | ۲-۵-۲-۳- موارد استفاده.....                                        |
| ۱۶۱ | ۲-۵-۳-۳- کالیبراسیون پروفیل‌سنج‌های با سرعت بالا.....              |
| ۱۶۲ | ۲-۵-۳-۱- کالیبراسیون RSP.....                                      |
| ۱۶۴ | ۲-۶-۱- پروتکل تناوب زمانی انجام آزمایش‌های غیرمخرب.....            |
| ۱۶۴ | ۲-۶-۱- پروتکل ارزیابی راه در سطح شبکه.....                         |
| ۱۶۴ | ۲-۶-۱-۱- آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها.....                              |
| ۱۶۴ | ۲-۶-۱-۲- راه‌های اصلی.....                                         |
| ۱۶۵ | ۲-۶-۱-۳- راه‌های فرعی.....                                         |
| ۱۶۵ | ۲-۶-۲- پروتکل ارزیابی راه در سطح پروژه.....                        |
| ۱۶۵ | ۲-۶-۱-۲- آزمایش‌های مخرب.....                                      |
| ۱۶۶ | ۲-۶-۲-۲- آزمایش‌های غیرمخرب.....                                   |
| ۱۶۷ | ۲-۷- بررسی اعتبار نتایج آزمایش‌های غیرمخرب در پروژه‌های مختلف..... |

|          |                                                            |
|----------|------------------------------------------------------------|
| ۱۶۷..... | ۱-۷-۲-آزمایش‌های تعیین دانسیته به روش هسته‌ای و غیرهسته‌ای |
| ۱۷۵..... | ۲-۷-۲- تعیین سختی لایه‌ها با روش DCP                       |
| ۱۷۶..... | ۸-۲- جمع‌بندی                                              |
| ۱۸۵..... | مراجع                                                      |

## فهرست اشکال

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| شکل ۱- آزمایش‌های غیرمخرب مورد بحث در این راهنما.....                      | ۶  |
| شکل ۲- تیر بنکلمن در آزمایش بزرگ آشتو.....                                 | ۱۲ |
| شکل ۳- جزییات تیر بنکلمن.....                                              | ۱۳ |
| شکل ۴- جزییات بخش‌های تیر بنکلمن.....                                      | ۱۴ |
| شکل ۵- ترسیم حوضچه تغییرشکل در آزمایش تیربنکلمن.....                       | ۱۷ |
| شکل ۶- دستگاه کالیبراسیون تیر بنکلمن.....                                  | ۱۹ |
| شکل ۷- تشریح جزییات دستگاه کالیبراسیون تیر بنکلمن.....                     | ۱۹ |
| شکل ۸- نحوه قرار گرفتن نوک تیر بنکلمن بروی دستگاه کالیبراسیون.....         | ۲۰ |
| شکل ۹- تیر بنکلمن در آزمایش.....                                           | ۲۰ |
| شکل ۱۰- تیربنکلمن و جزییات محور چرخ کامیون.....                            | ۲۱ |
| شکل ۱۱- تعیین درجه حرارت متوسط لایه آسفالت روسازی در آزمایش افت و خیز..... | ۲۸ |
| شکل ۱۲- ضریب تصحیح درجه حرارت بر حسب درجه متوسط روسازی آسفالتی.....        | ۲۹ |
| شکل ۱۳- تعیین ضخامت روکش آسفالت برحسب آزمایش افت و خیز.....                | ۳۰ |
| شکل ۱۴- شکل شماتیک از افت و خیز سنج‌ها در دستگاه FWD.....                  | ۳۱ |
| شکل ۱۵- شبیه‌سازی سیستم جرم و فنر در دستگاه FWD.....                       | ۳۲ |
| شکل ۱۶- تصویر شماتیک از صفحه بارگذاری و دیگر اجزای دستگاه FWD.....         | ۳۳ |
| شکل ۱۷- سیستم‌های سنجش افت و خیز در دستگاه FWD.....                        | ۳۳ |
| شکل ۱۸- ژئوفن.....                                                         | ۳۴ |
| شکل ۱۹- تریلر.....                                                         | ۳۵ |
| شکل ۲۰- تصویری از صفحه نمایش نرم‌افزار FWDWIN.....                         | ۳۶ |
| شکل ۲۱- تصویر شماتیک از دقت کالیبراسیون‌ها.....                            | ۴۵ |
| شکل ۲۲- ساختار صفحه ایزوله.....                                            | ۴۶ |
| شکل ۲۳- صفحه ایزوله.....                                                   | ۴۶ |
| شکل ۲۴- تجهیزات کالیبراسیون دستگاه FWD.....                                | ۴۷ |
| شکل ۲۵- نمودار تعیین نسبت $Ep / MR$ .....                                  | ۵۸ |
| شکل ۲۶- نمودار تعیین $Sneff$ با استفاده از نتایج دستگاه FWD.....           | ۵۹ |
| شکل ۲۷- دستگاه RWD.....                                                    | ۶۳ |
| شکل ۲۸- تریلر ساخته شده توسط انجمن تحقیقات کاربردی آمریکا.....             | ۶۳ |
| شکل ۲۹- نحوه اندازه‌گیری خیز در دستگاه RWD.....                            | ۶۵ |
| شکل ۳۰- مسیر انجام آزمایش افت و خیز.....                                   | ۷۰ |
| شکل ۳۱- دستگاه PQI.....                                                    | ۷۵ |
| شکل ۳۲- ساختار بیرونی دستگاه PQI.....                                      | ۷۷ |
| شکل ۳۳- ظاهر خارجی دستگاه PQI.....                                         | ۷۷ |
| شکل ۳۴- صفحه کلید دستگاه PQI.....                                          | ۷۸ |

|     |                                                                           |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|
| ۷۹  | شکل ۳۵- نحوه کار دستگاه PQI                                               |
| ۸۴  | شکل ۳۶- جانمایی مکان قرائت‌ها                                             |
| ۸۴  | شکل ۳۷- الگوی اندازه‌گیری PQI                                             |
| ۸۷  | شکل ۳۸- دستگاه تعیین دانسیته به روش هسته‌ای                               |
| ۸۸  | شکل ۳۹- شکل شماتیک دانسیته‌سنج هسته‌ای (A) روش انتشار مستقیم (B) روش سطحی |
| ۸۹  | شکل ۴۰- دستگاه هسته‌ای تراکسلر                                            |
| ۹۰  | شکل ۴۱- دستگاه هسته‌ای تراکسلر بر روی لایه آسفالتی                        |
| ۹۲  | شکل ۴۲- هندسه پخش مستقیم                                                  |
| ۹۲  | شکل ۴۳- جواب پخش مستقیم                                                   |
| ۹۳  | شکل ۴۴- هندسه پخش سطحی                                                    |
| ۹۴  | شکل ۴۵- جواب پخش سطحی                                                     |
| ۹۴  | شکل ۴۶- تاثیر دانسیته سطحی در حالت پخش سطحی                               |
| ۹۵  | شکل ۴۷- دانسیته‌سنج هسته‌ای هنگام کالیبراسیون                             |
| ۱۰۰ | شکل ۴۸- شماتیک دستگاه مورد استفاده در داده‌برداری هسته‌ای                 |
| ۱۰۸ | شکل ۴۹- دستگاه PAVETRACKER                                                |
| ۱۰۸ | شکل ۵۰- بخش‌های خارجی دستگاه PAVETRACKER                                  |
| ۱۱۱ | شکل ۵۱- دستگاه EDG                                                        |
| ۱۱۲ | شکل ۵۲- دستگاه SQI                                                        |
| ۱۱۲ | شکل ۵۳- طیف دی‌الکتریک                                                    |
| ۱۱۸ | شکل ۵۴- دستگاه GPR                                                        |
| ۱۱۹ | شکل ۵۵- دستگاه GPR هوایی و زمینی                                          |
| ۱۱۹ | شکل ۵۶- نحوه کار دستگاه GPR                                               |
| ۱۲۵ | شکل ۵۷- بازتاب‌های انجام شده از فصل مشترک لایه‌های روسازی                 |
| ۱۲۶ | شکل ۵۸- نمونه‌ای از شکل موج بدست آمده در یک پروژه تحقیقاتی                |
| ۱۲۸ | شکل ۵۹- پروفیل پیوسته ضخامت روسازی                                        |
| ۱۳۰ | شکل ۶۰- دستگاه DCP                                                        |
| ۱۳۱ | شکل ۶۱- نحوه کارکردن با دستگاه DCP                                        |
| ۱۳۲ | شکل ۶۲- اجزای دستگاه DCP                                                  |
| ۱۳۵ | شکل ۶۳- نمودار مدل‌های مختلف CBR و DCP                                    |
| ۱۴۰ | شکل ۶۴- نمودار نفوذ بر حسب تعداد ضربات در آزمایش DCP                      |
| ۱۴۲ | شکل ۶۵- پنجره ورود داده‌های نفوذ و تعداد ضربات در نرم‌افزار UK DCP        |
| ۱۴۲ | شکل ۶۶- نمودار نفوذ بر حسب ضربات در نرم‌افزار UK DCP                      |
| ۱۴۴ | شکل ۶۷- پنجره‌ای از نرم‌افزار UK DCP برای محاسبه SN                       |
| ۱۴۵ | شکل ۶۸- نمودار میله‌ای بخش‌های یکنواخت در نرم‌افزار UK DCP                |
| ۱۴۷ | شکل ۶۹- دستگاه PSPA                                                       |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| شکل ۷۰- شکل شماتیک عملکرد دستگاه‌های آلتراسونیک.....                                                          | ۱۴۷ |
| شکل ۷۱- دستگاه RSP.....                                                                                       | ۱۵۳ |
| شکل ۷۲- ساختار دستگاه RSP.....                                                                                | ۱۵۴ |
| شکل ۷۳- دستگاه سنجش مسافت.....                                                                                | ۱۵۴ |
| شکل ۷۴- محل قرارگیری شتاب‌سنج‌ها در دستگاه RSP.....                                                           | ۱۵۵ |
| شکل ۷۵- دستگاه آران.....                                                                                      | ۱۵۶ |
| شکل ۷۶- نمایی از دوربین‌های نصب شده در قسمت عقب ون.....                                                       | ۱۵۶ |
| شکل ۷۷- سامانه DMI در دستگاه آران.....                                                                        | ۱۵۷ |
| شکل ۷۸- سامانه لیزری در قسمت عقب دستگاه برای تعیین پروفیل عرضی راه.....                                       | ۱۵۷ |
| شکل ۷۹- سامانه لیزری در قسمت جلوی دستگاه برای تعیین پروفیل طولی راه.....                                      | ۱۵۸ |
| شکل ۸۰- سامانه RUT BAR در قسمت جلوی دستگاه برای اندازه‌گیری شیلرشدگی.....                                     | ۱۵۸ |
| شکل ۸۱- سامانه SMART TEXTURE در دستگاه آران.....                                                              | ۱۵۸ |
| شکل ۸۲- سامانه POS LV در دستگاه آران.....                                                                     | ۱۵۹ |
| شکل ۸۳- بخش مختلف سامانه POS LV.....                                                                          | ۱۵۹ |
| شکل ۸۴- موقعیت و نحوه آزمایش‌های انجام شده در هر قطعه آزمایش ۳۳ متری (۱۰۰ فوتی) و عرض ۳/۶۵ متری (۱۲ فوت)..... | ۱۶۹ |
| شکل ۸۴- نتایج آزمایش DCP در محور قم اراک توسط مهندسین مشاور ساوالان.....                                      | ۱۷۵ |

## فهرست جداول

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول ۱- مقایسه تکنیک‌های مختلف آزمایش‌های غیرمخرب.....                                               | ۵   |
| جدول ۲- توضیحات کدهای شکل ۲-۵.....                                                                   | ۱۵  |
| جدول ۳- محدوده مدول الاستیسیته مصالح روسازی.....                                                     | ۱۸  |
| جدول ۴- معرفی بخش مختلف وسیله کالیبراسیون تیر بنکلمن.....                                            | ۱۹  |
| جدول ۵- جدول اصلاح میانگین برای دمای ۸۰° فارنهایت.....                                               | ۲۴  |
| جدول ۶- جداول ضریب تعیین شکل برای محاسبه تغییر شکل‌های ارتجاعی بحرانی.....                           | ۲۵  |
| جدول ۷- تغییر شکل‌های ارتجاعی مجاز.....                                                              | ۲۶  |
| جدول ۸- نرم‌افزارهای محاسبات معکوس با آنالیز خطی.....                                                | ۳۷  |
| جدول ۹- نرم‌افزارهای محاسبات معکوس با آنالیز غیرخطی.....                                             | ۳۸  |
| جدول ۱۰- ضرایب $K1, K2, K3$ .....                                                                    | ۵۲  |
| جدول ۱۱- ضرایب $K4, K5, K6$ .....                                                                    | ۵۳  |
| جدول ۱۲- مقادیر ضرایب اولیه و محدوده قابل قبول ضریب ارتجاعی برای مصالح اساس و زیراساس غیرچسبنده..... | ۵۴  |
| جدول ۱۳- مقادیر قابل قبول ضریب پواسن لایه‌های مختلف روسازی.....                                      | ۵۷  |
| جدول ۱۴- مزایا و معایب تیربنکلمن.....                                                                | ۷۲  |
| جدول ۱۵- مزایا و معایب HWD و FWD.....                                                                | ۷۲  |
| جدول ۱۶- مزایا و معایب RWD.....                                                                      | ۷۳  |
| جدول ۱۷- مشخصات کلیدهای دستگاه PQI.....                                                              | ۷۸  |
| جدول ۱۸- روش‌های مختلف کالیبراسیون دستگاه PQI.....                                                   | ۸۳  |
| جدول ۱۹- برگه کاری مربوط به کالیبراسیون PQI بروش معمولی.....                                         | ۸۵  |
| جدول ۲۰- آیین‌نامه ASTM پیرامون دستگاه‌های هسته‌ای تعیین دانسیته.....                                | ۸۸  |
| جدول ۲۱- درصد خطا در آزمایش هسته‌ای نسبت به آزمایش مخروط ماسه.....                                   | ۱۰۳ |
| جدول ۲۲- مقایسه آزمایش‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تعیین دانسیته.....                                   | ۱۰۴ |
| جدول ۲۳- جدول اعداد تصادفی.....                                                                      | ۱۰۶ |
| جدول ۲۴- جدول اعداد تصادفی.....                                                                      | ۱۰۷ |
| جدول ۲۵- مقایسه دو دستگاه PQI و PAVETRACKER.....                                                     | ۱۱۰ |
| جدول ۲۶- مقایسه مشخصه‌های دستگاه‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای.....                                       | ۱۱۳ |
| جدول ۲۷- مقایسه مزایا و معایب دستگاه PQI.....                                                        | ۱۱۴ |
| جدول ۲۸- مزایا و معایب دستگاه PAVETRACKER.....                                                       | ۱۱۴ |
| جدول ۲۹- بررسی مزایا و معایب دستگاه EDG.....                                                         | ۱۱۵ |
| جدول ۳۰- بررسی مزایا و معایب دستگاه SQI.....                                                         | ۱۱۵ |
| جدول ۳۱- محدودیت‌ها و معایب دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای.....                                             | ۱۱۶ |
| جدول ۳۲- ادامه جدول قبل.....                                                                         | ۱۱۶ |
| جدول ۳۳- فرکانس‌های رایج در دستگاه GPR.....                                                          | ۱۲۰ |
| جدول ۳۴- مزایا و معایب دستگاه GPR.....                                                               | ۱۲۹ |

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول ۳۵- عمق مورد نیاز انواع خاک غیر چسبنده .....                | ۱۳۶ |
| جدول ۳۶- حدود نرخ نفوذ DCP پیشنهادی اداره حمل و نقل مینسوتا..... | ۱۳۶ |
| جدول ۳۷- فرم ثبت نتایج آزمایش DCP .....                          | ۱۳۸ |
| جدول ۳۸- مثالی از داده‌های عملی در یک نقطه در آزمایش DCP.....    | ۱۴۱ |
| جدول ۳۹- روابط ضریب سازه‌ای لایه‌های روسازی.....                 | ۱۴۳ |
| جدول ۴۰- مقایسه مزایا و معایب دستگاه DCP.....                    | ۱۴۶ |
| جدول ۴۲- ساختار راهنما.....                                      | ۱۷۶ |



# فصل اول

---

## مقدمه



## ۱- مقدمه

پس از ساخت انواع راه اعم از آزادراه، بزرگراه، راه اصلی، راه فرعی و یا هر نوع راه دیگر، لازم است حین بهره‌برداری، روسازی آن‌ها تحت کنترل قرار گرفته و وضعیت روسازی‌ها به طور مستمر مورد ارزیابی قرار گیرد. ارزیابی روسازی به روشی اصولی و به صورت ثبت اطلاعات حاصل از ارزیابی در دوره‌های مختلف صورت می‌گیرد. انجام ارزیابی در زمان‌های مقرر پس از ساخت، از ارکان هر روش مدیریت روسازی بوده و در حقیقت با وجود این اطلاعات است که در یک سیستم مدیریت روسازی، برنامه‌ریزی‌های لازم برای انجام عملیات نگهداری و بهسازی صورت می‌گیرد. همانگونه که مدیریت روسازی در سطح شبکه و سطح پروژه صورت می‌گیرد، ارزیابی روسازی نیز ابتدا به صورت کلان در سطح شبکه انجام گرفته و پس از اولویت‌بندی پروژه‌ها، در سطح پروژه جزییات و اطلاعات با دقت لازم تهیه و ثبت می‌شود. روش‌های ارزیابی روسازی بسیار متنوع بوده و گستره‌ی وسیعی از پارامترها را دربر می‌گیرد. این امر باعث شده است تا موسسات تحقیقاتی مختلف نتوانند یک سیستم ارزیابی جامع را به عنوان روش واحد و استاندارد برای همه راه‌ها مورد استفاده قرار دهند.

ارزیابی روسازی‌ها لازم است بطور جامع صورت گرفته و هر روسازی از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. از جمله پارامترهای قابل ارزیابی می‌توان به ارزش سازه‌ای و میزان بارپذیری روسازی، سطح خدمت‌دهی روسازی از نظر ناهمواری، وضعیت خرابی‌ها و غیره اشاره نمود.

از آزمایشات غیرمخرب در سطوح گوناگون برای ارزیابی و متعاقباً تعمیر و نگهداری و بهسازی روسازی‌های مختلف استفاده می‌شود. در سطح شبکه از آزمایشات غیرمخرب برای قطعات روسازی به زیربخش‌هایی که دارای قابلیت سازه‌ای مشابه هستند، استفاده می‌شود. در سطح پروژه نیز از آزمایشات غیرمخرب برای تشخیص محل و علت خرابی‌ها در روسازی‌های انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. در همین راستا، به منظور آشنا نمودن خواننده با انواع آزمایش‌های غیرمخرب روسازی‌های انعطاف‌پذیر، که در اکثر موارد، کاربردی مدیریتی در سطح پروژه برای ارزیابی وضعیت سطحی و زیرسطحی روسازی دارند، راهنمای انجام این آزمایش‌ها تهیه شده است. در این راهنما سعی شده است تمامی موضوعات مربوط به تئوری و کاربرد روش‌های ارزیابی روسازی به شیوه غیرمخرب همراه با نکات اجرایی شامل؛ روش کالبراسیون، اعتبارسنجی نتایج، کنترل میزان صحت داده‌ها، روش انجام آزمایش و غیره گنجانده شود.

### ۱-۱- اهمیت آزمایش‌های غیرمخرب روسازی

یکی از قابل اعتمادترین روش‌هایی که برای تعیین وضعیت سازه‌ای<sup>۱</sup> و وظیفه‌ای<sup>۲</sup> یک روسازی وجود دارد، استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب<sup>۳</sup> (NDT) است [۱]، این آزمایش‌ها در مقایسه با آزمایش‌های مخرب دارای دو مزیت عمده می‌باشند. الف) در آزمایش‌های مخرب بنابر ماهیت آنها لایه‌های روی هم قرار گرفته روسازی دچار دستخوردگی می‌گردند و برداشتن

1 Structural

2 Functional

3 Non-Destructive Tests

و حمل مصالح روسازی به آزمایشگاه جهت انجام آزمایش ضروری می‌گردد در حالیکه در آزمایش‌های غیرمخرب که در حقیقت یک آزمایش درجاست، روسازی بدون هرگونه دست زدن یا تغییر دادن شرایط مصالح ارزیابی می‌شود.

ب) نسبتاً سریع و کم هزینه بوده و اغلب به خاطر آنکه در روند ترافیک کمتر اختلال ایجاد می‌شود، انجام آزمایش به سهولت امکان پذیر است. در ارتباط با آزمایش غیرمخرب توصیه شده است که مغزه‌هایی نیز به منظور تأیید ضخامت لایه‌ها و همچنین برای انجام محاسبات معکوس و تعیین دقیق مدول لایه‌ها برداشته شوند. با این وجود و به طور کلی تعداد آزمایش‌های مخربی که علاوه بر NDT برای ارزیابی یک روسازی ضروری هستند بسیار اندک است [۱].

آزمایش‌های غیرمخرب راه، توسط دستگاه‌ها و با اصول مختلفی انجام می‌شود. این آزمایش‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند؛ دسته اول، آزمایش‌های غیرمخربی هستند که به محاسبه افت و خیز روسازی تحت اعمال یک بار مشخص می‌پردازند<sup>۱</sup>، که این آزمایش‌ها شامل افت‌وخیزسنج‌های استاتیکی، ارتعاشی و ضربه‌ای می‌باشند. دسته دیگر از آزمایش‌های غیرمخرب بدون محاسبه افت و خیز روسازی عمل می‌کنند<sup>۲</sup>، که این دسته شامل آزمایش‌هایی مانند<sup>۳</sup> GPR،<sup>۴</sup> DCP،<sup>۵</sup> SASW، سنجش میزان اصطکاک<sup>۶</sup> و ناهمواری‌ها<sup>۷</sup> و غیره می‌شوند [۲].

تکنیک‌های غیرمخرب، هم برای بدست آوردن شرایط فعلی روسازی و هم در جهت پیش بینی عملکرد آتی سازه موجود، به کار می‌روند. استفاده از NDT امروزه به صورت گسترده حتی در صنعت ساخت فضاپیماها نیز برای شناسایی نقاط ضعف مصالح و مواد مورد استفاده، وجود دارد. مهمترین تکنیک‌های NDT عبارتند از: روش‌های بازرسی چشمی، روش‌های افت‌وخیز، روش‌های اولتراسونیک، روش‌های انتشار امواج، روش‌های الکترومغناطیسی و روش‌های رادیوگرافی. اصول این روش‌ها به همراه مزایا و معایب و کاربرد آنها در جدول ۱، به طور خلاصه آمده است [۳].

برخی از آزمایش‌های غیرمخرب روسازی به منظور شناسایی و ارزیابی وضعیت سطحی و عملکرد روسازی استفاده می‌شوند. از نتایج این آزمایش‌های می‌توان به تحلیل وضعیت خرابی‌های روسازی شامل ترک‌ها و تخلخل پرداخت و همچنین پروفیل‌های طولی و عرضی و وضعیت ناهمواری‌ها را با تکنیک‌های مختلف تصویربرداری و کاربرد لیزر و دیگر امواج بدست آورد. بنابراین واضح است که دامنه آزمایش‌های غیرمخرب روز به روز در حال گسترش بوده و از علوم فنی و نظری مختلف در ارتقای تکنیک‌های انجام این آزمایش‌های بهره جسته می‌شود.

1 Deflection NDT

2 Non-Deflection NDT

3 Ground – Penetrating Radar

4 Dynamic Cone Penetrometer

5 Spectral Analysis of Surface Waves

6 Friction Testers

7 Surface Profilers

جدول ۱- مقایسه تکنیک‌های مختلف آزمایش‌های غیرمخرب [۴]

| تکنیک ارزیابی غیرمخرب          | پارامتر اندازه‌گیری شده                      | پارامتر بدست آمده                   | مزیتها                                                      | معایب                                                          | کاربرد متداول                               |
|--------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| بازرسی چشمی                    | بافت رویه، خرابی‌ها و ترک‌ها                 | بررسی قابلیت کاربرد سازه            | سادگی، سرعت، ارزانی و قابل حمل بودن                         | عدم یکنواختی، قابل کاربرد فقط در رویه سازه                     | اغلب سازه‌ها                                |
| افت و خیز                      | افت و خیز رویه                               | استحکام سازه‌ای سختی                | سادگی، سرعت، ارزانی و قابل حمل بودن                         | شرایط پیچیده قابل شناسایی فقط در شرایط محلی اعتبار دارد        | روسازی‌ها                                   |
| اولتراسونیک                    | سرعت موج                                     | ضریب الاستیسیته، چگالی، ضریب پواسون | در مصالح مختلف کاربرد، قابل حمل بودن                        | عدم شناسایی اشکال پیچیده و ترک‌های ریز نیاز به مهارت بالا      | لوله‌ها، ریل‌ها و پل‌ها                     |
| انتشار صوت                     | انرژی صوت                                    | محل و نرخ رشد ترک‌ها                | بدست آوردن رشد، ترک‌ها در یک سیستم قابل حمل                 | تداخل نویز، عدم توانایی ارزیابی ترک‌های تثبیت شده              | ردیابی پل‌ها، ساختمان‌ها و مجراهای تحت فشار |
| آنالیز مودی (تشدید)            | فرکانس طبیعی میرایی                          | تخلخل، ترک‌ها، سختی                 | مصالح مختلف به اشکال گوناگون، حساس به ترک‌های ریز           | گران بودن، پیچیدگی برداشت داده‌ها و آنالیز                     | پل‌ها، ساختمان‌ها و سدها                    |
| روش الکترومغناطیسی (میکرو ویو) | مقاومت ظاهری استهلاک موج یا قدرت استهلاک موج | خرابی‌ها، درصد رطوبت و ضخامت        | شناسایی خرابی‌های جداشده توسط هوا، مناسب جهت ارزیابی در محل | گرانی، پیچیدگی دستگاه عدم نفوذ در فولاد                        | فولاد تحت فشار، خوردگی و رطوبت خاک          |
| راديوگرافي                     | مقدار رادیواکتیو جذب شده (مثل اشعه گاما)     | ترک‌ها، خلل و فرج و منافذ           | ارائه عکس خرابی‌های درونی، مصالح مختلف با شکل و اندازه      | دسترسی به وجه مخالف، نیاز به مخارج زیاد و به خطر افتادن سلامتی | خطوط لوله، مخازن ذخیره                      |

## ۲-۱- محدودیت‌های آزمایش‌های غیرمخرب

الف) گرچه NDT یک ابزار قوی ارزیابی روسازی است، اما فقدان یک تکنیک تحلیلی برای تعیین مستقیم خواص مصالح احساس می‌شود. به منظور بدست آوردن مدول لایه‌ها روش‌های محاسبه معکوس<sup>۱</sup> ابداع شده است که مشکلات و نواقص خاصی همچون، عدم ایجاد جواب منحصر بفرد، وقت گیر بودن برخی روش‌ها و نیاز به قضاوت مهندسی خوب برای تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده را دارند [۳].

ب) آزمایش‌های غیرمخرب به تنهایی نمی‌توانند نتایج کاملاً دقیق در اختیار بگذارند. بلکه جهت کنترل صحت محاسبات، چندین آزمایش مخرب نیز باید در مسیر انجام شود. جهت انتخاب بهترین گزینه ترمیم و نگهداری باید اطلاعات حاصل

از NDT به همراه اطلاعات بدست آمده از اندازه‌گیری خرابی‌ها توأمأً به کار برده شوند. توصیه می‌شود که آزمایش غیرمخرب پیش از انجام آزمایش مخرب انجام شود تا انتخاب بهترین محل برای مغزه‌گیری و نمونه برداری از مصالح امکان پذیر باشد [۱].

### ۳-۱- دامنه کاربرد آزمایش‌های غیرمخرب

استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب برای تعیین مشخصات روسازی دامنه وسیعی دارد. عمده‌ترین کاربرد روش‌های غیرمخرب مربوط به ارزیابی ظرفیت سازه‌ای روسازی در محل می‌شود. با این وجود، آزمایش‌های غیرمخرب در تعیین بسیاری از پارامترهای مربوط به مشخصات روسازی دخالت دارند، که این موارد به شرح زیر می‌باشند:

الف) ظرفیت باربری سازه‌ای (افت و خیز)

ب) پروفیل عرضی

پ) پروفیل طولی

ت) ناهمواری

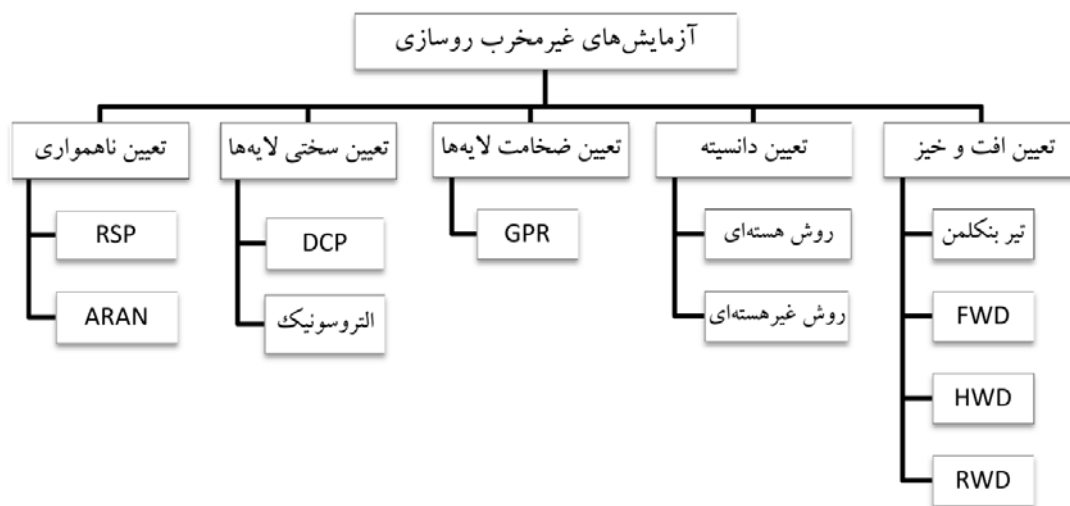
ج) مقاومت در برابر لغزندگی

چ) چگالی (دانسیته)

ح) ضخامت

خ) رطوبت و حرارت

در این راهنما سعی شده است تا به صورت کاملاً جامع پیرامون آزمایش‌های غیرمخرب تعیین افت و خیز روسازی، دانسیته و ضخامت روسازی، بحث شود. در شکل ۱، روش‌های آزمایش برای تعیین مشخصات فنی روسازی که در این راهنما به آن‌ها پرداخته شده است به همراه دستگاه‌های مورد استفاده در آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱- آزمایش‌های غیرمخرب مورد بحث در این راهنما

#### ۱-۴- نحوه محاسبه خطا در آزمایش‌ها

در هر کار آزمایشگاهی و تجربی به دلیل سرو کار گذاشتن با فرآیند اندازه‌گیری، رسیدن به اندازه واقعی یک کمیت امکان‌پذیر نیست، لذا هر کار اندازه‌گیری توأم با خطا خواهد بود. خطا در آزمایش می‌تواند از عوامل مختلفی ناشی شود که از جمله می‌توان، خطای آزمایشگر، خطای اندازه‌گیری، خطا ناشی از اثر متقابل بین دستگاه و کمیت مورد نظر را نام برد. سهم خطای شخصی با تکرار آزمایش قابل محاسبه است. در رابطه با خطای دستگاه بایستی شناخت کافی در مورد وسیله و دقت کار آن داشت. خطای دستگاه اندازه‌گیری را همواره برابر با آخرین دقت آن در نظر می‌گیرند. مثلاً اگر یک عقربه مدرج اندازه‌گیری تا دقت صدم میلیمتر را اندازه‌گیری می‌کند، خطای آنرا  $10^{-2}$  میلیمتر می‌بایست در نظر گرفت. برای محاسبه خطای کل می‌بایست سهم خطای کاربر و دستگاه آزمایش را با هم جمع کرد. خطا به دو صورت کلی محاسبه می‌شود:

- خطای مطلق؛ که عبارتست از انحراف از مقدار میانگین، و
  - خطای نسبی؛ که عبارتست از مقدار خطای مطلق به مقدار کمیت.
- آنچه از نظر ارزیابی و دقت کار ارزش دارد، خطای نسبی است.

#### روش‌های محاسبه خطا

خطا را به روش‌های مختلف می‌توان محاسبه کرد و هر روش در مورد خاص می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

از جمله روش‌های محاسبه خطا می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۳]:

- روش میانگین‌گیری
- روش دیفرانسیلی
- روش لگاریتمی

روش دیفرانسیلی و روش لگاریتمی در مواردی استفاده می‌شود که کمیت مورد نظر مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست، بلکه رابطه خاصی برای تعریف آن وجود دارد. مثلاً حالتیکه پارامتر مورد اندازه‌گیری از ترکیب پارامترهای دیگر تشکیل شده باشد. در این صورت از روش دیفرانسیل‌گیری یا لگاریتم‌گیری از معادله، محاسبه خطا صورت می‌گیرد. در راهنمای حاضر به دلیل اینکه غالباً کمیت مورد نظر مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود از تشریح روش‌های دیفرانسیلی و لگاریتمی صرف نظر شده است.

- روش میانگین‌گیری

از این روش در مواردی استفاده می‌شود که کمیت مورد نظر مستقیماً قابل اندازه‌گیری باشد و با تکرار آزمایش بتوان خطا را حساب کرد. برای این منظور کمیت مورد نظر چندین بار اندازه‌گیری شده و نتایج ثبت می‌شود:

$$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$$

سپس مقدار میانگین آنها تعیین می‌گردد.

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

و بعد با محاسبه مقدرا انحراف از میانگین، خطای مطلق ( $\delta a_i$ ) هر مورد بدست می‌آید:

$$\delta a_1 = |\bar{a} - a_1|, \quad \delta a_2 = |\bar{a} - a_2|, \quad \delta a_n = |\bar{a} - a_n|$$

خطای مطلق میانگین به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\bar{\delta}_a = \frac{\delta a_1 + \delta a_2 + \dots + \delta a_n}{n}$$

بدین ترتیب خطای نسبی هر مورد را به شکل زیر می‌توان محاسبه نمود:

$$\varepsilon a_1 = \frac{\delta a_1}{a_1} \leftarrow a_1 \text{ خطای نسبی}$$

$$\varepsilon a_2 = \frac{\delta a_2}{a_2} \leftarrow a_2 \text{ خطای نسبی}$$

$$\varepsilon a_n = \frac{\delta a_n}{a_n} \leftarrow a_n \text{ خطای نسبی}$$

اما در اکثر موارد خطای نسبی میانگین مورد نظر است، که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{\varepsilon}_a = \frac{\bar{\delta}_a}{\bar{a}} \leftarrow \text{خطای نسبی میانگین}$$

## فصل دوم

---

راهنمای آزمایش‌های غیر مخرب روسازی راه‌ها



## ۲- راهنمای آزمایش‌های غیرمخرب روسازی راه‌ها

### ۲-۱- آزمایش‌های تعیین افت و خیز روسازی

بررسی وضعیت سازه‌ای روسازی از مهمترین بخش‌های مطالعات بهسازی راه‌ها محسوب می‌شود. بدون توجه به وضعیت سازه‌ای و مقاومت لایه‌های مختلف روسازی نمی‌توان به درستی پی برد که خرابی ایجاد شده در روسازی در اثر ضعف لایه‌های زیرین (بستر، زیراساس یا اساس) ایجاد شده و یا تنها به علت ضعف لایه آسفالتی و خرابی‌های ناشی از اثر عبور ترافیک و عوامل جوی است. درحالی‌که ضعف لایه‌های زیرین منجر به بروز خرابی در روسازی شده باشند، اجرای روکش مجدد بدون برطرف نمودن ضعف زیرسازی مشکلی را حل نمی‌کند و پس از مدت زمان کوتاهی مجدداً خرابی در سطح راه ظاهر می‌گردد و به نوعی اتلاف منابع و هزینه‌ها در پی خواهد بود. لذا بررسی وضعیت سازه‌ای روسازی و تعیین مقاومت تک تک لایه‌های روسازی از اهمیت بالایی برخوردار است.

مهمترین بخش در ارزیابی روسازی، انجام آزمایش‌هایی به منظور شناسایی شرایط واقعی لایه‌های مختلف روسازی به منظور اولویت‌بندی انجام ترمیم می‌باشد. استفاده از این آزمایش‌ها، به عنوان بخشی از سیستم مدیریت روسازی امروزه در بیشتر کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آزمایش‌های غیرمخرب ارزیابی وضعیت سازه‌ای روسازی، از مکانیزم اندازه‌گیری افت و خیز استفاده می‌کنند. افت و خیز لایه‌های روسازی در اثر بارگذاری، شاخص بسیار مناسبی برای تعیین عملکرد سازه‌ای روسازی و مقاومت لایه‌های مختلف آن محسوب می‌شود. اولین دستگاهی که برای تعیین افت و خیز روسازی ابداع شد، تیر بنکلمن نام داشت که با کمک بارگذاری استاتیکی یک کامیون، میزان تغییرشکل روسازی و سپس مقاومت لایه‌ها را تعیین می‌نمود. نسل بعدی تجهیزات تعیین افت و خیز، دستگاهی به نام <sup>۱</sup>FWD بود که با کمک بارگذاری دینامیکی سقوط یک وزنه و سنسورهای بسیار دقیق تعیین تغییرشکل، مقاومت روسازی را تعیین می‌نمود. از این دستگاه با بارگذاری قوی‌تر برای ارزیابی روسازی فرودگاه استفاده می‌شود که <sup>۲</sup>HWD نام دارد. نسل دیگری از تجهیزات تعیین افت و خیز که <sup>۳</sup>RWD نام دارد به صورت ترکیبی از مکانیزم عملکردی در دو دستگاه تیر بنکلمن و <sup>۱</sup>FWD، با کمک سنسورهای لیزری بسیار دقیق و بدون نیاز به توقف، به طور پیوسته و با سرعتی معادل سرعت معمول حرکت در راه، تغییرشکل سطح روسازی را اندازه‌گیری می‌نماید. این دستگاه در حال حاضر در حال گذراندن مراحل تکمیل می‌باشد.

1. Falling Weight Deflectometer  
2. Heavy Weight Deflectometer  
3. Rolling Wheel Deflectometer

## ۲-۱-۱- آزمایش تیر بنکلمن<sup>۱</sup>

### ۲-۱-۱-۱- معرفی دستگاه

تیر بنکلمن توسط شخصی به همین نام در آمریکا در سال ۱۹۵۳ ابداع شد و برای اولین بار در آزمایش WASHO<sup>۲</sup> به منظور اندازه‌گیری افت‌وخیزها مورد استفاده قرار گرفت. تیر بنکلمن که شاید بهترین ابزار اندازه‌گیری تغییر شکل سطح روسازی در جهان می‌باشد، در سال ۱۹۶۲، همانگونه که در تصویر ۲، آمده است، در آزمایش بزرگ راه آشتو مورد استفاده قرار گرفت [۵].



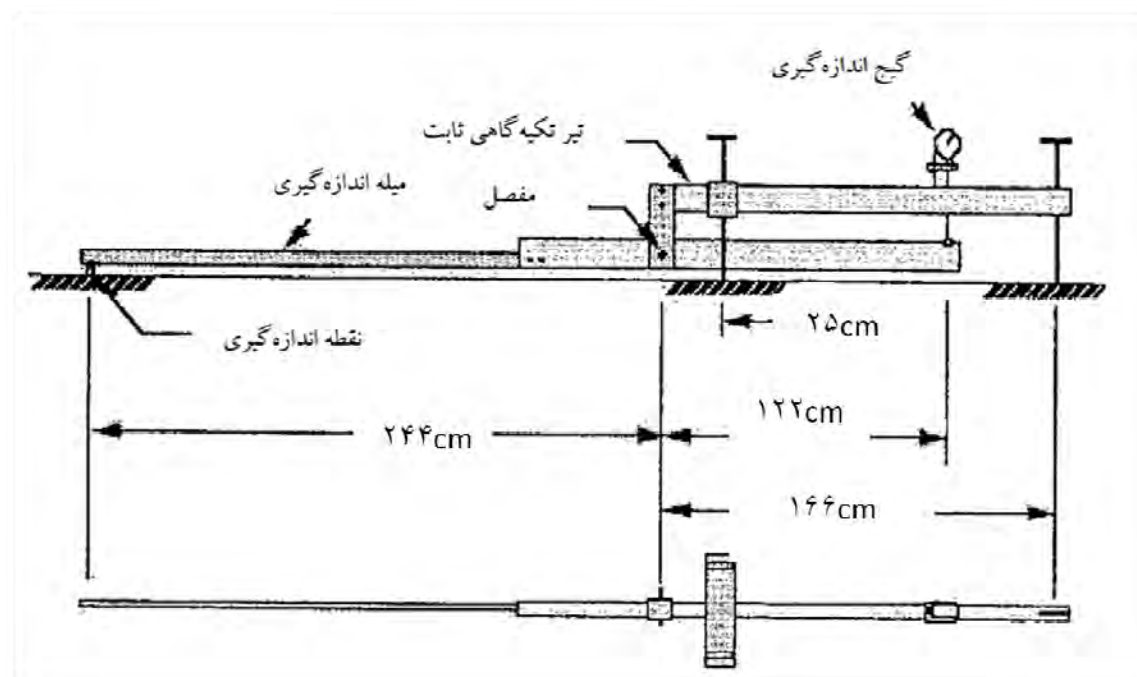
شکل ۲- تیر بنکلمن در آزمایش بزرگ آشتو

تیر بنکلمن یک دستگاه افت و خیز سنج ساده دستی است. این وسیله از یک تیر ساده و یک میله اندازه‌گیری تشکیل شده است. میله اندازه‌گیری در حدود ۳/۶ متر طول داشته و در نقطه‌ای که در حدود ۲/۴ متر از سر آن فاصله دارد به تیر ثابت که بر روی سطح روسازی تکیه می‌کند، مفصل شده است. انتهای دیگر میله اندازه‌گیری به یک وسیله افت و خیز سنج<sup>۳</sup> بسیار دقیق متصل است [۵]. ابعاد و اجزای دقیق‌تر در شکل ۳، نشان داده شده است.

1. Benkleman Beam

2. Western Association of State Highway Officials [1955]

3. Deflectometer

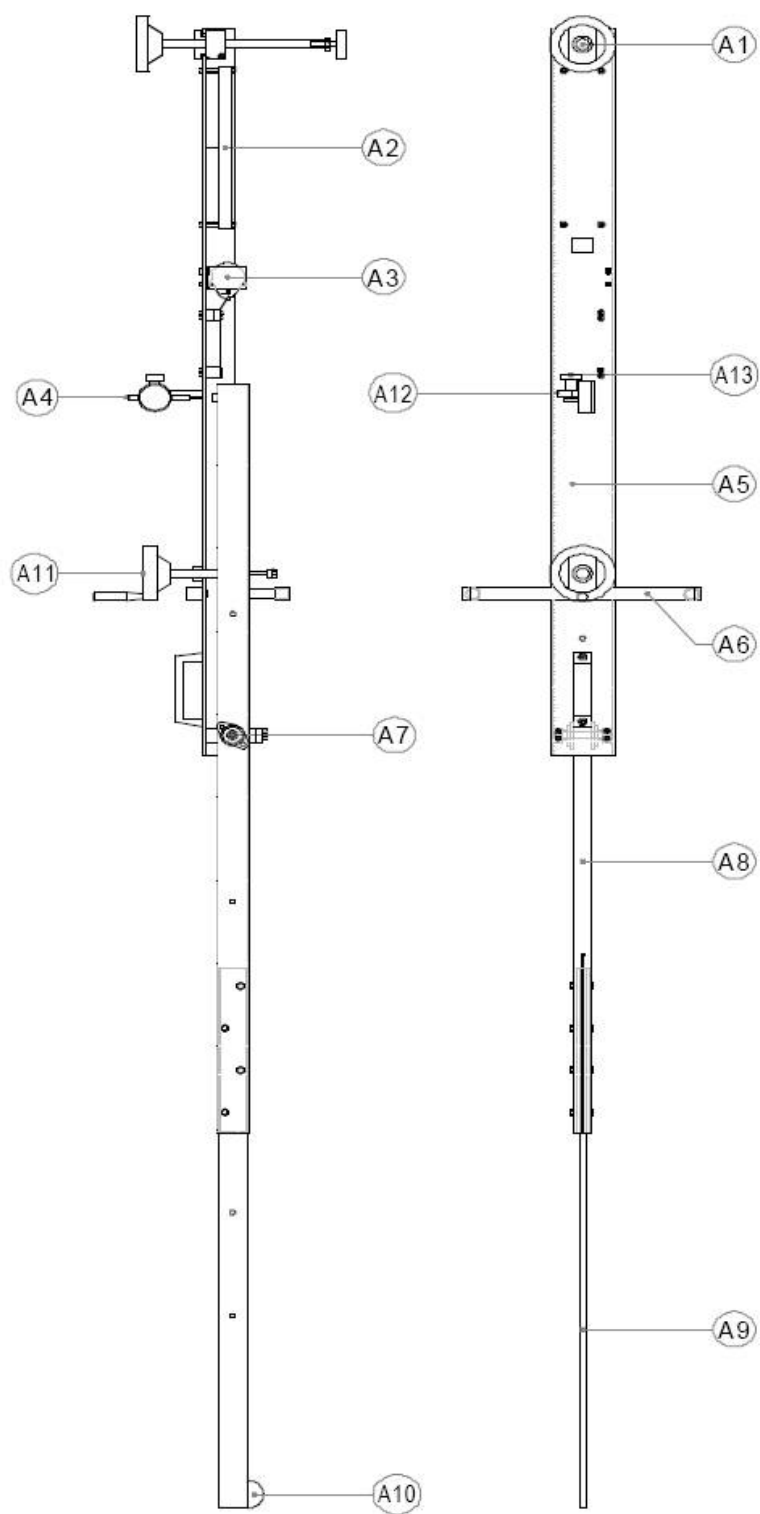


شکل ۳- جزئیات تیر بنکلمن [۵]

نحوه استفاده از این دستگاه به این ترتیب است که انتهای این تیر (نقطه اندازه‌گیری) در وسط چرخ‌های زوج یک محور ساده ۸/۲ تنی قرار داده می‌شود و درجه افت و خیز نیز روی عدد صفر تنظیم می‌گردد. سپس وسیله نقلیه (کامیون) به آهستگی به طرف جلو حرکت می‌کند و پس از آنکه بیش از ده متر از نقطه آزمایش دور شد، مقدار بالا آمدن این نقطه توسط افت و خیز سنج ثبت می‌گردد، و سپس برای چند نقطه دیگر قطعه این اندازه‌گیری تجدید می‌شود [۵].

تیرهای بنکلمن ساختار ساده‌ای و ابتدایی دارند و در مقایسه با سایر دستگاه‌های غیرمخرب فاقد پیچیدگی می‌باشند. تیرهای بنکلمن به صورت مکانیکی با کمک یک کامیون به اندازه‌گیری افت و خیز روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌پردازند. در تیرهای بنکلمن ساده انجام آزمایش و برداشت داده‌ها به صورت دستی صورت گرفته در حالیکه در تیرهای بنکلمن اتوماتیک یا دفکلتومترها این اندازه‌گیری‌ها به صورت اتوماتیک صورت می‌گیرد. در مقایسه ساختار سخت‌افزاری این دو گونه، به این نکته می‌بایست اشاره نمود که در تیرهای بنکلمن اتوماتیک به کمک چند سیستم اضافی مانند قرائت‌گر آنالوگ و نیز تبدیل کننده‌های آنالوگ به دیجیتال و دو نرم‌افزار یکی برای برداشت داده‌ها و دیگری برای پردازش داده‌ها در بخش ساختار نرم‌افزاری این فرآیند صورت می‌گیرد [۶].

در شکل ۴، در دو نمای کنار و پلان فوقانی به معرفی بخش‌های این تیرها با شماره و در جدول ۲، به تشریح این کدها پرداخته شده است.



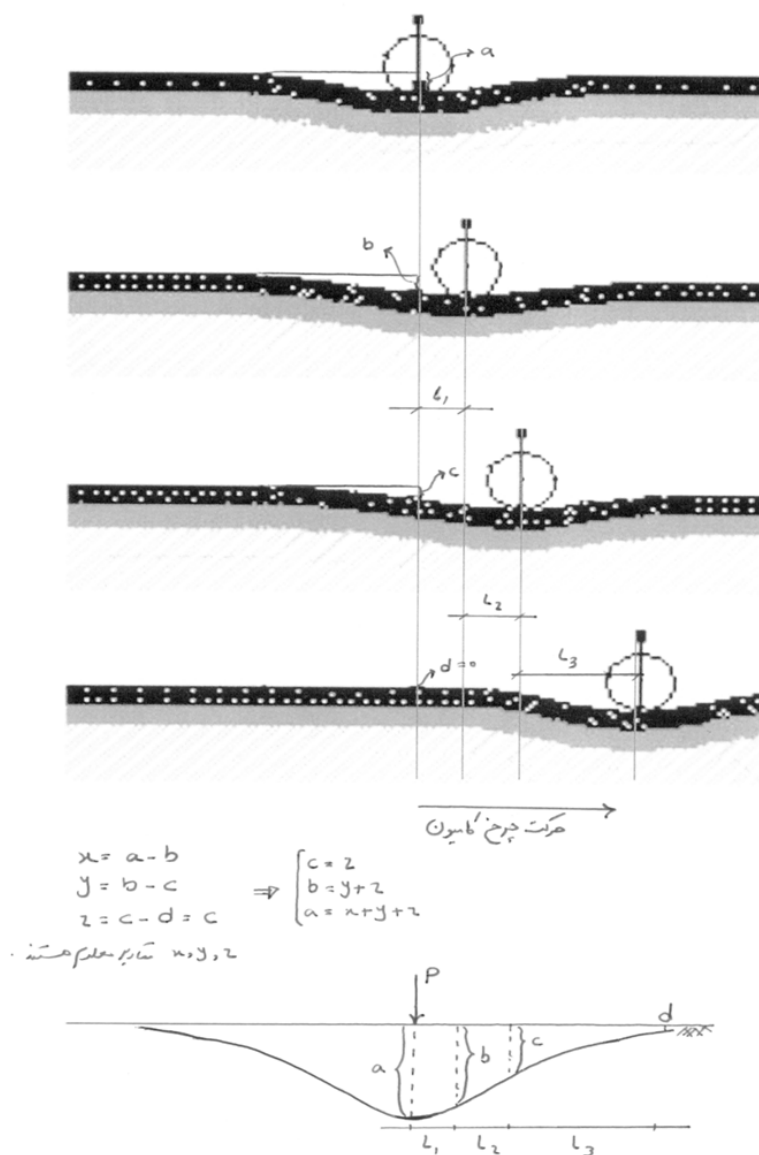
شکل ۴- جزییات بخش های تیر بنکلمن

جدول ۲- توضیحات کدهای شکل ۵-۲

| کد  | نام بخش به لاتین         | نام بخش به فارسی         | توضیح                                                                                                                       |
|-----|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A1  | Adjustable Back Supports | تکیه گاه عقبی قابل تنظیم | با کمک این قطعه می‌توان ارتفاع قسمت پشتی یا عقبی تیر بنکلمن را تنظیم نمود.                                                  |
| A2  | Batteries                | باتری‌ها                 | این باتری‌ها برای تغذیه ارتعاشگر کوچک که در زیر قسمت اصلی (A5) قرار می‌گیرند استفاده می‌شود.                                |
| A3  | Micro Vibrator           | ارتعاشگر کوچک            | از این ارتعاشگر برای خنثی کردن و تعدیل کردن اصطکاک در بخش‌های داخلی عقربه نشانگر و از بین بردن خطای این بخش استفاده می‌شود. |
| A4  | Gauge                    | عقربه نشانگر             | این عقربه برای نشان دادن تغییر مکان نقطه اندازه‌گیری استفاده می‌شود.                                                        |
| A5  | Main Structure           | بخش اصلی                 | این بخش اصلی توسط دو تکیه‌گاه عقبی و میانی ثابت شده و روی آن عقربه نشانگر و ارتعاشگر نصب می‌شود.                            |
| A6  | Adjustable Anterior Part | بخش میانی قابل تنظیم     | با کمک این قطعه می‌توان ارتفاع قسمت میانی را تنظیم کرد.                                                                     |
| A7  | Pivot                    | مفصل                     | این بخش قابل نوسان بوده و تغییر مکان‌های زاویه‌ای تیر بنکلمن حول این مفصل انجام می‌شود.                                     |
| A8  | Beam Fix                 | بخش ثابت تیر             | بخشی از تیر بنکلمن است که متحرک نمی‌باشد.                                                                                   |
| A9  | Beam Mobile              | بخش متحرک تیر            | بخشی از تیر بنکلمن است که متحرک است.                                                                                        |
| A10 | Circumferentum           | نقطه اندازه‌گیری         | نقطه انتهایی محور تیر بنکلمن که بر روی سطح زمین قرار گرفته و تغییر مکان‌ها را اندازه‌گیری می‌کند.                           |
| A11 | Block System             | سیستم قفل کننده          | این قطعه برای قفل کردن دو بخش متحرک و غیر متحرک تیر بنکلمن استفاده می‌شود.                                                  |
| A12 | Gauge Support            | تکیه‌گاه عقربه نشانگر    | این نقطه برای محکم کردن عقربه نشانگر بر روی بخش اصلی تیر بنکلمن استفاده می‌شود.                                             |
| A13 | Fixing Screw             | پیچ متصل کننده           | این قطعه برای محکم کردن گج به کار برده می‌شود.                                                                              |

## ۲-۱-۱-۲- تئوری آزمایش برای تعیین مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی

همانگونه که قبلاً اشاره شد در تیر بنکلمن اندازه‌گیری‌ها از طریق قرار گرفتن نوک تیر اندازه‌گیری بین بوژی‌های کامیون حامل بار (که معمولاً یک بار محوری برابر با ۱۸ کیلوپوند یا ۸/۲ تن است) در نقطه تعیین افت و خیز انجام می‌شود. زمانیکه وسیله نقلیه از نقطه آزمایش فاصله می‌گیرد، جهش یا حرکت رو به بالای (ارتجاعی) روسازی به وسیله عقربه نشانگر اندازه گرفته می‌شود. در این حالت امکان تعیین شکل و ابعاد گودی افت و خیز مقدور نمی‌باشد ولی با در نظر گرفتن خصوصیات همگن، هموژن، یکنواخت و ایزوتروپ برای لایه‌های روسازی و فرض یکسان بودن حوضچه‌های تغییر شکل در زیر چرخ کامیون در تمام نقاط حرکت کامیون می‌توان حوضچه تغییر شکل را ترسیم کرد. در شکل ۲-۷، تغییر شکل روسازی آسفالتی در اثر حرکت چرخ کامیون نشان داده شده است. همانگونه که قبلاً اشاره شد هنگام انجام آزمایش تیر بنکلمن، چرخ زوج کامیون در محل نوک قسمت متحرک تیر بنکلمن قرار داده می‌شود. در این حالت گیج اندازه‌گیری کننده افت و خیز روی عدد صفر تنظیم شده و سپس کامیون به آرامی شروع به حرکت می‌کند. در هر توقف کامیون، افت و خیز سنج میزان بالا آمدن روسازی را نشان می‌دهد. در شکل ۲-۷، در مرحله اول، خیز روسازی در زیر چرخ کامیون برابر  $a$  و عدد افت و خیز سنج صفر خواهد بود. در مرحله دوم، خیز در محل نوک تیر برابر  $b$  و عدد گیج برابر  $x=a-b$  (در واقع نوک تیر به اندازه  $a-b$  بالا آمده است) می‌باشد. در مرحله سوم، خیز در محل نوک تیر برابر  $c$  و عدد گیج برابر  $y=c-b$  می‌باشد. در مرحله آخر، خیز در محل نوک تیر برابر  $d=0$  و عدد گیج برابر  $z=c-d=c$  خواهد بود. بدین ترتیب با معلوم بودن عدد گیج در مراحل مختلف  $(x, y, z)$  و انجام یک محاسبه ساده، مقادیر  $a, b, c$  بدست آورده می‌شود. با داشتن این مقادیر و فواصل  $l_1, l_2, l_3$  و با فرض یکسان بودن حوضچه تغییر شکل در زیر چرخ کامیون در تمام مراحل حرکت، می‌توان حوضچه تغییر شکل را مطابق شکل ۵، ترسیم نمود.



شکل ۵- ترسیم حوضچه تغییر شکل در آزمایش تیر بنکلمن

بهترین خروجی تحلیلی از دستگاه تیر بنکلمن، مدول الاستیسیته لایه‌ها برای استفاده در طراحی روکش و ارزیابی وضعیت روسازی می‌باشد. بنابراین آنچه در این رابطه حائز اهمیت می‌باشد بالا بردن دقت آزمایش از طریق اعتبار سنجی نتایج محاسبات معکوس می‌باشد.

با فرض عملکرد الاستیک لایه‌ها، سه عامل برای محاسبه مدول الاستیسیته لازم می‌باشد. اطلاعات حوضچه خیز، ضخامت لایه‌ها و ساختار روسازی. به این منظور لازم است مقادیر اولیه مدول الاستیسیته هر لایه در محدوده مدول الاستیسیته مواد متشکله روسازی به نرم‌افزار داده شود [۷]. مدول الاستیسیته برای مواد معمول مورد مصرف در سازه روسازی در جدول ۳، نشان داده شده است.

جدول ۳- محدوده مدول الاستیسیته مصالح روسازی [۸]

| جنس لایه                    | مدول الاستیسیته (MPa) |
|-----------------------------|-----------------------|
| بتن آسفالتی در دمای ۲۰ درجه | ۳۰۰۰-۷۰۰۰             |
| مصالح دانه‌ای اساس          | ۱۰۰-۱۰۰۰              |
| بستر                        | ۳۰-۳۰۰                |

پس از اینکه حدود مدول الاستیسیته برای هر لایه مشخص شد فرآیند تکرار تا آنجا که بیشترین تطابق بین افت وخیز اندازه‌گیری شده محاسبه شده ایجاد شود، ادامه می‌یابد. سپس دو حوضچه خیز با هم مقایسه می‌شود. اگر با یکدیگر تفاوت زیادی داشتند مقادیر مدول الاستیسیته اولیه اصلاح می‌شود. این روند آنقدر تکرار می‌شود تا حوضچه خیز محاسباتی به سمت حوضچه خیز اندازه‌گیری شده تقریب پیدا کرده و اختلاف آنها در محدوده قابل قبول خطا قرار گیرد [۵].

#### ۲-۱-۱-۳- موارد استفاده از تیربنکلمن

همانگونه که اشاره شد تیر بنکلمن یک وسیله ساده و ارزان برای اندازه‌گیری افت وخیز می‌باشد. این وسیله در آزمایش راه آشتو ساخته شد و به طور گسترده‌ای توسط سازمان‌های راه برای تحقیق، ارزیابی و طراحی روکش روسازی‌ها در سراسر دنیا استفاده می‌شود [۹].

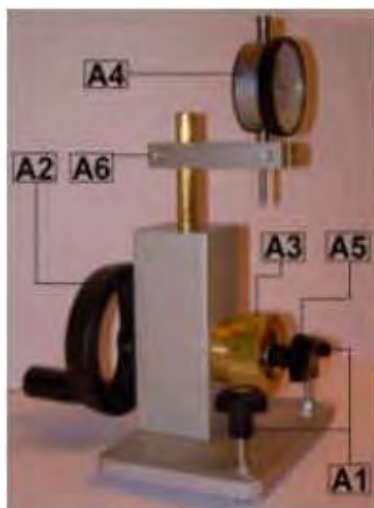
تغییر شکل‌های متوالی بدست آمده از این دستگاه ممکن است به عنوان ورودی مدل‌های تعیین کننده موارد زیر مورد استفاده قرار گیرد [۴]:

- ضخامت روکش سیستم روسازی
- مدول الاستیسیته ظاهری یا عملکردی هر یک از لایه‌ها (محاسبات معکوس)
- ضخامت معادل برای مصالح مرجع

اما آنچه در مورد این وسیله ساده و ارزان در حال حاضر وجود دارد عدم استقبال برای ارزیابی‌های سازه‌ای روسازی است. استفاده از این آزمایش در گذشته برای مطالعات تحقیقاتی و کاربردهای دیگر به صورت گسترده مرسوم بوده است، اما در حال حاضر با وجود دستگاه‌های دقیق‌تر و سریع‌تر مانند FWD، استفاده از تیر بنکلمن بسیار محدود شده است و امروزه مورد کاربرد نمی‌باشد.

#### ۲-۱-۱-۴- روش کالیبراسیون

همانگونه که در بخش ساختار سخت افزاری تیر بنکلمن بحث شد، برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های سطح روسازی از محور متحرک تیر بنکلمن که به یک عقربه نشانگر متصل است، استفاده می‌شود. برای تعیین ضریب واقعی نسبی بین دو بخش بلندتر و کوتاه‌تر محور متحرک تیر بنکلمن از وسیله‌ای که در شکل ۶، قابل مشاهده می‌باشد استفاده می‌شود [۱۰].



شکل ۷- تشریح جزییات دستگاه کالیبراسیون تیر بنکلمن



شکل ۶- دستگاه کالیبراسیون تیر بنکلمن

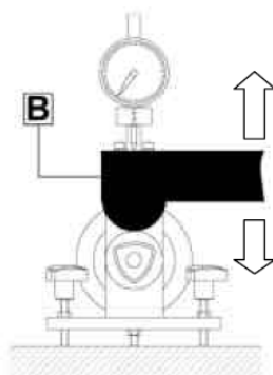
برای آشنایی بیشتر با این وسیله در تصویر ۷ و جدول ۴، به معرفی بخش‌های مختلف این دستگاه پرداخته شده است.

جدول ۴- معرفی بخش مختلف وسیله کالیبراسیون تیر بنکلمن

| شماره کد | نام لاتین        | نام فارسی                | کارکرد                                                              |
|----------|------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| A1       | Aligning Knobs   | پیچ‌های تنظیم کننده تراز | این پیچ‌ها برای تراز کردن و تنظیم ارتفاع دستگاه استفاده می‌شوند.    |
| A2       | Operating Knob   | پیچ عملیاتی              | با چرخاندن این پیچ، چرخ گریز از مرکز چرخیده و عمل می‌کند.           |
| A3       | Eccentric Wheel  | چرخ گریز از مرکز         | این چرخ محل قرار گرفتن نقطه اندازه‌گیری تیر بنکلمن می‌باشد.         |
| A4       | Centesimal Gauge | عقربه نشانگر             | این عقربه نشان دهنده نوسان واقعی تیر بنکلمن می‌باشد.                |
| A5       | Knob             | پیچ                      | این پیچ برای محکم کردن چرخ گریز از مرکز در محل خود می‌باشد.         |
| A6       | Gauge Support    | تکیه گاه عقربه نشانگر    | این قطعه برای محکم کردن و تنظیم ارتفاع عقربه نشانگر استفاده می‌شود. |

نحوه کالیبره کردن تیر بنکلمن با دستگاه فوق‌الذکر به قرار زیر می‌باشد [۱۰]:

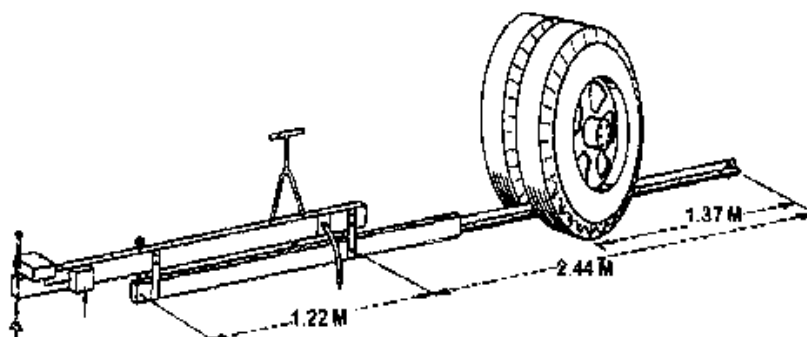
- ۱- با استفاده از یک تراز و چرخاندن پیچ‌های A1 می‌توان دستگاه را در حالت تراز قرار داد.
- ۲- قسمت نوک اندازه‌گیری کننده تیر بنکلمن که در شکل ۸، با عنوان B نشان داده شده است در روی چرخ گریز از مرکز A3 قرار داده شده و عقربه نشانگر با کمک پیچ مربوطه پایین آورده شده تا نوک پیچ بر روی قسمت B مماس شود.
- ۳- پیچ A2 چرخانده شده تا یک تغییر مکان قائم در تیر بنکلمن ایجاد شود.
- ۴- به طور همزمان مقدار تغییر مکان مشاهده شده در پیچ A4 از دستگاه کالیبراسیون و گیج تیر بنکلمن قرائت می‌شود.
- ۵- با بدست آمدن این دو مقدار و تعیین نسبت بین آن دو، می‌توان ضریب تیر بنکلمن برای کالیبراسیون را تعیین نمود.



شکل ۸- نحوه قرار گرفتن نوک تیر بنکلمن بروی دستگاه کالیبراسیون

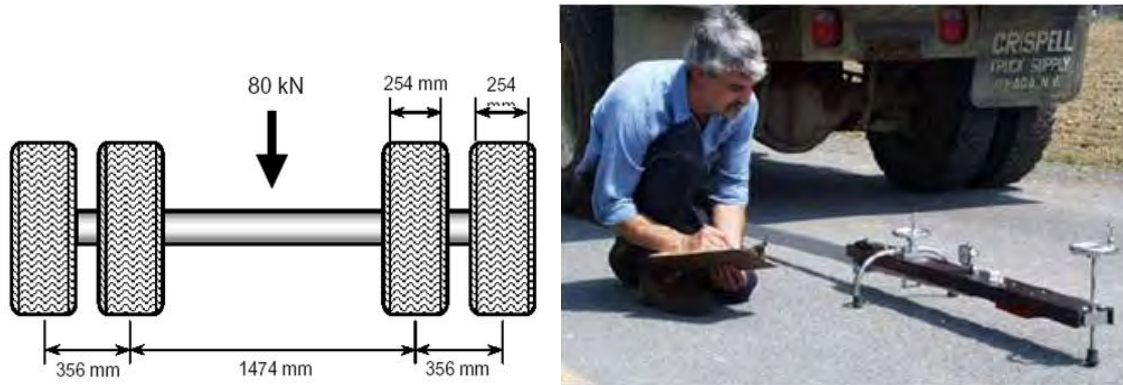
#### ۲-۱-۵- روش انجام آزمایش

این وسیله از یک تیر متحرک به طول ۴ متر که به یک تیر ثابت کوتاه‌تر متصل شده، تشکیل می‌شود. یک انتهای تیر بر روی نقطه‌ای که افت‌وخیز روسازی اندازه‌گیری می‌شود قرار می‌گیرد و انتهای دیگر تیر به یک وسیله افت‌وخیز سنج (دفکلمتر) بسیار دقیق متصل می‌باشد. ابعاد و اجزا دقیق‌تر تیر در شکل ۹، نشان داده شده است.



شکل ۹- تیر بنکلمن در آزمایش

نحوه استفاده از این دستگاه به این ترتیب است که انتهای این تیر در وسط چرخ‌های زوج یک محور ساده ۸/۲ تنی قرار داده می‌شود (مطابق شکل ۱۰) و درجه افت‌وخیز سنج روی عدد صفر تنظیم می‌گردد. سپس کامیون به آهستگی به طرف جلو حرکت کرده و پس از آنکه بیش از ۱۰ متر از نقطه آزمایش دور شد، مقدار بالا آمدن این نقطه توسط افت‌وخیز سنج ثبت می‌گردد و برای چند نقطه دیگر قطعه، این آزمایش تجدید می‌شود.



شکل ۱۰- تیربنکلمن و جزئیات محور چرخ کامیون

در انجام آزمایش تیر بنکلمن موارد زیر می‌بایست مورد توجه قرار داده شود [۱۱]:

الف- محل آزمایش در کنار آسفالت سواره روسازی قرار می‌گیرد. وقتی که عرض آسفالت در یک جهت عبور ۳/۳۵ متر باشد محل آزمایش با کنار آسفالت ۶۰ سانتی‌متر و اگر بیشتر از ۳/۳۵ متر باشد حدود ۹۰ سانتی‌متر فاصله خواهد داشت.

ب- فشار چرخ کامیون مورد استفاده در حین آزمایش هر روز کنترل می‌شود تا کمتر از ۵/۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (۸۰ psi) نباشد. بار توزیع شده توسط چرخ‌های محور عقب آن ۸/۲ تن می‌باشد.

پ- در نقطه‌ای که کمتر از ۲۵ سانتی‌متر تا کنار آسفالت فاصله نداشته باشد با حفر یک سوراخ در رویه آسفالتی به عمق ۳ سانتی‌متر و پر کردن آن با قیر و یا آب و سپس قرار دادن یک ترمومتر (دماسنج) در داخل سوراخ، درجه حرارت سطح راه در حین انجام آزمایش، اندازه‌گیری می‌شود.

ت- موقعیت‌های آزمایش شده که افت‌وخیز آنها به دلیل خرابی‌های موضعی سطح راه، بزرگتر از افت‌وخیز متوسط به اضافه دو برابر مقدار خطای پراکندگی (انحراف استاندارد) باشد، باید در صورت محدود بودن، به صورت موضعی و در صورت عمومیت داشتن، به صورت کلی ترمیم شود تا شرایط مشابه بقیه نقاط قطعه را بیابد. البته در صورت محدود بودن این نقاط بهتر است افت‌وخیز مربوط به آنها، در محاسبه افت‌وخیز نهایی منظور نشود. انجام آزمایش‌های اضافی برای تعیین محدوده نقاط ضعیف فوق لازم است.

ث- نتایج حاصل از افت‌وخیز را بر حسب موقعیت ایستگاه‌های آزمایش شده، به شکل یک نمودار ترسیم و در نهایت برای هر نقطه از راه (واحد طرح)، افت‌وخیز معرف را برای محاسبه ضخامت روکش، تعیین می‌کنند.

#### ۲-۱-۱-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده

صحت مدول الاستیسیته محاسبه معکوس شده نهایی متأثر از خطای مجاز فرآیند انطباق خیزهای محاسباتی و خیزهای اندازه‌گیری شده می‌باشد. دو روش برای محاسبه خطای انطباق مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی درصد خطای مجموع مطلق حسابی<sup>۱</sup> و دیگری درصد خطای مجذور متوسط ریشه‌ها<sup>۲</sup> می‌باشد [۱۲].

1. Arithmetic Absolute Sum Error (AASE)  
2. Root Mean Square of Error (RMSE)

$$AASE = 100 * \sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta meas_i - \delta cal_i}{\delta meas_i} \right)$$

$$RMSE = 100 * \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta cal_i - \delta meas_i}{\delta meas_i} \right)^2 \right\}^{0.5}$$

$\delta meas_i$ : خیز اندازه گیری شده در نقطه  $i$

$\delta cal_i$ : خیز محاسباتی در نقطه  $i$

$n$ : تعداد خیزهای اندازه گیری شده

موفقیت در همگرایی به سمت یک محدوده خطای قابل قبول به عوامل زیر بستگی دارد [۸]:

- تعداد لایه‌ها
- ضخامت لایه
- سطح مشترک لایه‌ها
- دمای لایه آسفالتی
- مدول الاستیسیته تخمینی اولیه
- نسبت الاستیسیته لایه‌های مجاور
- لایه سخت زیرین
- ترک‌های روسازی
- خطای دستگاه اندازه‌گیری کننده
- میزان و مدت زمان اعمال بار
- تأثیر تغییرات فصلی
- گوناگونی خصوصیات مواد روسازی

## ۷-۱-۱-۲- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده از آزمایش تیر بنکلمن

آسیب‌دیدگی سازه‌ای شامل کلیه شرایطی است که موجب کاهش قدرت باربری روسازی می‌شود. بهسازی سازه‌ای به این منظور برنامه‌ریزی می‌شود که پارامترهایی نظیر عمر روسازی، تأثیر عوامل جوی و ترافیک، توان باربری آن را کاهش می‌دهند. در این موارد مدت زمانی پس از بهره‌برداری لازم است اقدامی برای بهسازی روسازی (همچون طرح و اجرای روکش تقویتی) صورت گیرد. این امر به منظور افزایش قدرت سازه‌ای روسازی برای تحمل ترافیک پیش‌بینی شده آتی می‌باشد.

پیش از انجام هرگونه عملیات بهسازی سازه‌ای راه می‌بایست ارزیابی دقیقی از وضعیت موجود راه بدست آید. این ارزیابی به طور کلی وضعیت موجود روسازی شامل؛ مصالح لایه‌های تشکیل دهنده، کیفیت و قدرت باربری فعلی و نیز چگونگی رفتار و واکنش آنها در آینده (در دوره روکش و در شرایط ترافیک پیش‌بینی) را مورد توجه قرار می‌دهد. این امر به سه روش

زیر قابل انجام می‌باشد [۱۱]:

- الف- تعیین توان سازه‌ای مؤثر روسازی موجود به طریق مستقیم و با انجام آزمایش‌های غیرمخرب نظیر اندازه‌گیری افت‌وخیز روسازی با تیر بنکلمن و یا افت‌وخیز ضربه‌ای و نظایر آنها.
- ب- تعیین توان سازه‌ای مؤثر روسازی موجود به طریق غیر مستقیم و براساس بررسی وضعیت روسازی با توجه به شدت و گستردگی کمی و کیفی کلیه نواقص و آسیب‌دیدگی‌های سازه‌ای و سطحی راه.
- پ- نمونه‌گیری از مصالح روسازی و انجام آزمایش‌های فیزیکی روی نمونه‌ها.
- همانگونه که در بالا اشاره شد، تیر بنکلمن به عنوان یک دستگاه اندازه‌گیری کننده افت‌وخیز روسازی قادر خواهد بود در تعیین توان سازه‌ای روسازی و نیز تعیین ضخامت روکش تقویتی در روسازی‌های مختلف براساس روش مستقیم، مؤثر واقع شود. آنچه در ادامه بحث خواهد شد دو کاربرد عملی از تحلیل نتایج بدست آمده از آزمایش تیر بنکلمن در تعیین قدرت باربری روسازی و نیز ضخامت روکش تقویتی می‌باشد.

• کاربرد عملی ۱: تخمین ظرفیت باربری ارتجاعی روسازی<sup>۱</sup> و تعیین محدودیت‌های تردد بار در راه‌ها

در سال‌های دهه ۹۰ میلادی بسیاری از شهرهای آمریکا و شهرداری‌های آنها در صدد یافتن اطلاعاتی در زمینه مقاومت راه‌ها بوده تا به کمک آن بتوانند ظرفیت باربری ارتجاعی روسازی را تعیین و در پی آن نه تنها ارزیابی مناسبی از طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر به عمل آورند بلکه به وضع قوانین محدود کننده تردد وسایل نقلیه سنگین در راه‌ها همت گمارند [۱۳].

اداره راه ایالت مینسوتا<sup>۲</sup> برای ۱۶ سال متمادی از آزمایش بارگذاری صفحه برای هدف اشاره شده استفاده می‌کرد ولی این آزمایش با توجه به هزینه بسیار بالای آن، قابل کاربرد به صورت وسیع و عمومی برای تعیین مقاومت روسازی نبود. در تحقیقی که این اداره راه در سال ۱۹۶۰ آغاز نمود، سعی شد تا از تیر بنکلمن به عنوان یک ابزار کاربردی برای تعیین و ارزیابی مقاومت راه استفاده شود [۱۳].

هدف از این تحقیق گسترده که ۷ سال در تمام شهرهای ایالت مینسوتا به طول انجامید، تعیین رابطه‌ای بین آزمایش بارگذاری صفحه و تیر بنکلمن و همچنین رابطه هر دو آزمایش با ظرفیت باربری، ساختار روسازی و کارایی روسازی راه‌ها بود.

در ادامه به نتایج بدست آمده از بخشی از این تحقیق وسیع که مربوط به تخمین ظرفیت باربری ارتجاعی روسازی و نیز تعیین بار محوری مجاز با استفاده از تیر بنکلمن می‌باشد، اشاره می‌شود.

روشی که به آن اشاره می‌شود توسط اداره راه ایالت مینسوتا برای تعیین ظرفیت باربری ارتجاعی روسازی با استفاده از آزمایش‌های تعیین افت‌وخیز روسازی مانند تیر بنکلمن در فصل گرم سال (بین ماه می میلادی تا قبل از سرمای پاییز) توصیه می‌شود. این روش مبتنی بر مراحل ذیل می‌باشد [۱۳]:

۱. بدست آوردن حداقل ۱۰ افت‌وخیز روسازی توسط تیر بنکلمن (به ازای هر ۵۰۰ فوت معادل ۱۵۰ متر) در هر مایل (۱/۵ کیلومتر)

۲. میانگین‌گیری از ۱۰ افت‌وخیز بدست آمده در هر مایل

۳. تعیین انحراف معیار (S) برای هر مایل با استفاده از رابطه زیر:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (BB - \overline{BB})^2}{n-1}}$$

S: انحراف معیار بر حسب ۰/۰۰۱ اینچ

BB: افت‌خیز بر حسب ۰/۰۰۱ اینچ

$\overline{BB}$ : میانگین افت‌وخیزها بر حسب ۰/۰۰۱ اینچ

N: تعداد افت‌وخیزها در هر مایل

۴. اگر دمای روسازی کمتر از ۸۰ درجه فارنهایت (معادل ۲۶ درجه سانتی‌گراد) باشد، می‌بایست میانگین افت‌وخیزها ( $\overline{BB}$ ) براساس جدول زیر به میانگین ۸۰ درجه  $\overline{BB}_{80}$  تبدیل شود. عدد بدست آمده از جدول ۵، می‌بایست با مقدار قبلی جمع شود.

جدول ۵- جدول اصلاح میانگین برای دمای ۸۰° فارنهایت [۱۳]

| تغییر شکل<br>بر حسب اینچ | دما بر حسب درجه فارنهایت |       |       |       |       |
|--------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                          | < ۳۵                     | ۳۶-۴۵ | ۴۶-۵۵ | ۵۶-۶۵ | ۶۶-۷۵ |
| ۰.۰۰۰-۰.۰۱۰              | ۰.۰۰۵                    | ۰.۰۰۴ | ۰.۰۰۳ | ۰.۰۰۲ | ۰.۰۰۱ |
| ۰.۰۱۰-۰.۰۲۰              | ۰.۰۰۷                    | ۰.۰۰۶ | ۰.۰۰۴ | ۰.۰۰۳ | ۰.۰۰۱ |
| ۰.۰۲۰-۰.۰۳۰              | ۰.۰۱۰                    | ۰.۰۰۸ | ۰.۰۰۶ | ۰.۰۰۴ | ۰.۰۰۲ |
| ۰.۰۳۰-۰.۰۴۰              | ۰.۰۱۰                    | ۰.۰۰۸ | ۰.۰۰۶ | ۰.۰۰۴ | ۰.۰۰۲ |
| ۰.۰۴۰-۰.۰۵۰              | ۰.۰۱۲                    | ۰.۰۱۰ | ۰.۰۰۷ | ۰.۰۰۵ | ۰.۰۰۲ |
| ۰.۰۵۰-۰.۰۶۰              | ۰.۰۱۵                    | ۰.۰۱۲ | ۰.۰۰۶ | ۰.۰۰۶ | ۰.۰۰۳ |

۵. سپس "تغییر شکل طرح حاضر"<sup>۱</sup> براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$PDD = \overline{BB}_{80} + 2 * S$$

۶. مرحله بعدی تبدیل PDD به مقداری تحت عنوان، "تغییر شکل‌های ارتجاعی طرح" (SBB)<sup>۲</sup> است. این مقدار بیانگر تغییر شکل‌هایی است که بار اعمالی در طول دوره ارتجاعی بحرانی ایجاد می‌کند. جداول ۶، ضرابی را

1. Present Design Deflection  
2. Design Spring Deflections

ارائه می‌دهند که براساس فصل سال و ضخامت آسفالت سطح برای سه نوع مختلف از خواص خاک بستر، می‌توان مقدار SBB را با ضرب این مقادیر در PDD بدست آورد.

جدول ۶- جداول ضریب تعیین شکل برای محاسبه تغییر شکل‌های ارتجاعی بحرانی [۱۳]

| خاک‌های بستر پلاستیک               |                                   |      |      |      |      |      |      |      |         |
|------------------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| ضخامت آسفالت<br>سطحی               | تاریخ آزمایش برحسب ماه‌های میلادی |      |      |      |      |      |      |      |         |
|                                    | ۵/۱                               | ۵/۱۶ | ۶/۱  | ۶/۱۶ | ۷/۱  | ۷/۱۶ | ۸/۱  | ۸/۱۶ | سپتامبر |
|                                    | ۵/۱۵                              | ۵/۳۱ | ۶/۱۵ | ۶/۳۰ | ۷/۱۵ | ۷/۳۱ | ۸/۱۵ | ۸/۳۱ |         |
| $\leq 2in$                         | ۱.۱۲                              | ۱.۲۹ | ۱.۴۴ | ۱.۵۳ | ۱.۶۰ | ۱.۶۵ | ۱.۶۹ | ۱.۷۳ | ۱.۷۹    |
| $> 2 \leq 3\frac{1}{2}$            | ۱.۱۷                              | ۱.۳۴ | ۱.۵۰ | ۱.۵۹ | ۱.۶۳ | ۱.۶۷ | ۱.۷۱ | ۱.۷۳ | ۱.۷۵    |
| $> 3\frac{1}{2} \leq 5\frac{1}{2}$ | ۱.۱۴                              | ۱.۲۴ | ۱.۳۷ | ۱.۴۳ | ۱.۵۰ | ۱.۵۸ | ۱.۶۴ | ۱.۷۰ | ۱.۷۱    |
| $> 5\frac{1}{2} \leq 8in.$         | ۱.۱۷                              | ۱.۲۵ | ۱.۲۵ | ۱.۲۵ | ۱.۲۶ | ۱.۳۰ | ۱.۴۱ | ۱.۵۰ | ۱.۵۵    |

| خاک‌های بستر شبه پلاستیک |                                   |      |      |      |      |      |      |      |         |
|--------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| ضخامت آسفالت<br>سطحی     | تاریخ آزمایش برحسب ماه‌های میلادی |      |      |      |      |      |      |      |         |
|                          | ۵/۱                               | ۵/۱۶ | ۶/۱  | ۶/۱۶ | ۷/۱  | ۷/۱۶ | ۸/۱  | ۸/۱۶ | سپتامبر |
|                          | ۵/۱۵                              | ۵/۳۱ | ۶/۱۵ | ۶/۳۰ | ۷/۱۵ | ۷/۳۱ | ۸/۱۵ | ۸/۳۱ |         |
| $\leq 5in$               | ۱.۱۶                              | ۱.۳۰ | ۱.۴۰ | ۱.۵۰ | ۱.۵۲ | ۱.۵۱ | ۱.۴۸ | ۱.۴۶ | ۱.۴۵    |
| $>$                      | ۱.۲۹                              | ۱.۴۰ | ۱.۴۶ | ۱.۵۰ | ۱.۵۴ | ۱.۵۸ | ۱.۶۴ | ۱.۶۹ | ۱.۷۱    |

| خاک‌های بستر الاستیک      |                                   |      |      |      |      |      |      |      |         |
|---------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| ضخامت آسفالت<br>سطحی      | تاریخ آزمایش برحسب ماه‌های میلادی |      |      |      |      |      |      |      |         |
|                           | ۵/۱                               | ۵/۱۶ | ۶/۱  | ۶/۱۶ | ۷/۱  | ۷/۱۶ | ۸/۱  | ۸/۱۶ | سپتامبر |
|                           | ۵/۱۵                              | ۵/۳۱ | ۶/۱۵ | ۶/۳۰ | ۷/۱۵ | ۷/۳۱ | ۸/۱۵ | ۸/۳۱ |         |
| $\leq 2in$                | ۱.۳۰                              | ۱.۴۱ | ۱.۷۲ | ۱.۷۹ | ۱.۸۳ | ۱.۸۳ | ۱.۸۸ | ۱.۸۸ | ۱.۸۸    |
| $> 2 \leq 5\frac{1}{2}$   | ۱.۲۱                              | ۱.۳۶ | ۱.۴۷ | ۱.۵۳ | ۱.۵۸ | ۱.۵۶ | ۱.۵۲ | ۱.۴۹ | ۱.۴۴    |
| $> 5\frac{1}{2} \leq 8in$ | ۱.۰۰                              | ۱.۰۲ | ۱.۹۸ | ۱.۰۰ | ۱.۰۵ | ۱.۰۵ | ۱.۰۷ | ۱.۱۱ | ۱.۱۱    |

۷. از طریق جدول ۷، مقدار تغییر شکل ارتجاعی مجاز<sup>۱</sup> (ABB) براساس ترافیک عبوری از راه و نیز ضخامت میانگین قشر آسفالتی روسازی بدست آورده می‌شود.

1. Allowable Spring Deflection

جدول ۷- تغییر شکل‌های ارتجاعی مجاز [۱۳]

| ترافیک عبوری<br>ضخامت<br>قشر آسفالتی | HCADT* | < ۵۰  | ۵۰-۱۰۰   | ۱۰۰-۱۵۰   | > ۱۵۰  |
|--------------------------------------|--------|-------|----------|-----------|--------|
|                                      | ADT**  | < ۵۰۰ | ۵۰۰-۱۰۰۰ | ۱۰۰۰-۳۰۰۰ | > ۳۰۰۰ |
| کمتر از ۳ اینچ                       |        | ۰.۰۷۵ | ۰.۰۷۰    | ۰.۰۶۰     | ۰.۰۴۵  |
| بین ۳ تا ۶ اینچ                      |        | ۰.۰۶۵ | ۰.۰۶۰    | ۰.۰۵۰     | ۰.۰۴۰  |
| بزرگتر از ۶ اینچ                     |        | ۰.۰۵۵ | ۰.۰۵۰    | ۰.۰۴۰     | ۰.۰۳۵  |

\*HCADT<sup>۱</sup> = حجم ترافیک روزانه متوسط وسایل نقلیه سنگین تجاری

\*\*ADT<sup>۲</sup> = حجم ترافیک روزانه متوسط

نکته: فقط زمانی که HCADT موجود نمی‌باشد از ADT برای تعیین تغییر شکل‌های ارتجاعی مجاز استفاده شود.

۸. با استفاده از رابطه زیر می‌توان بار محوری مجاز برای هر مایل را محاسبه نمود:

$$L_A = L_D \frac{(ABB)}{(SBB)}$$

$L_A$ : بار محوری مجاز ارتجاعی (تن)

$L_D$ : بار محوری استفاده شده در آزمایش (تن)

ABB: تغییر شکل‌های ارتجاعی مجاز (بر حسب ۰/۰۰۱ اینچ)

SBB: تغییر شکل ارتجاعی طرح (بر حسب ۰/۰۰۱ اینچ)

۹. تکرار محاسبات فوق برای قطعات دیگر راه انتخاب شده

۱۰. استفاده از بارهای مجاز برای قطعات مختلف با هدف وضع محدودیت‌های بار در راه‌ها.

آنچه از این کاربرد عملی تیر بنکلمن بدست می‌آید در واقع بار محوری مجاز قابل تردد در راه هاست که از روی آن می‌توان محدودیت‌های تردد وسایل نقلیه سنگین تجاری را وضع نمود. نکته‌ای که امروز در راه‌های ایران مورد غفلت و کم توجهی مسئولین ذیربط واقع شده است، عدم کنترل وسایل نقلیه عبوری در راه‌ها از لحاظ وزن می‌باشد که این امر باعث خستگی زود هنگام روسازی و نیز ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک (شیار شدگی) شده و عمر مفید روسازی را به شدت کاهش می‌دهد.

#### • کاربرد عملی ۲؛ تعیین ضخامت روکش تقویتی در روسازی انعطاف‌پذیر

در بسیاری از شرایط، ارزیابی وضعیت روسازی راه برای طرح روکش تقویتی به دلیل وجود ناهمواری‌های بیش از حد در سطح راه انجام می‌پذیرد. اما غالباً افزایش حجم ترافیک و افزایش وزن محورها موجب کاهش قدرت باربری روسازی شده و

بهسازی با روکش تقویتی مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۱].

با روش مستقیم که قبلاً تشریح گردید، ضخامت روکش آسفالتی براساس میزان ترافیک در دوره روکش و قدرت باربری ساختار روسازی موجود که افت‌وخیز اندازه‌گیری شده معرف آن است، تعیین می‌گردد. در روشی که در ادامه بدان اشاره می‌شود، از آئین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴)، بر اساس روش انیستیتو آسفالت، با استفاده از تیر بنکلمن و نتایج بدست آمده از آن برای طرح بهسازی روسازی و ضخامت روکش تقویتی استفاده خواهد شد [۱۱].

در این روش، در طول مسیر، راه به قطعاتی که از نظر ضخامت، نوع لایه‌های روسازی، مقاومت خاک بستر، شرایط جوی و میزان رفت و آمد شرایط یکسان داشته باشد تقسیم می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های آماری، تعداد نقاط مشخص برای آزمایش (که حداقل ۱۰ نقطه در هر کیلومتر می‌باشد) در طول هر قطعه تعیین می‌شود. آزمایش غیرمخرب تیر بنکلمن روی این نقاط انجام و نتایج برای هر قطعه بصورت جداگانه گزارش می‌شود [۱۱]. از اندازه‌گیری‌های انجام شده، افت‌وخیز طرح معرف<sup>۱</sup> (RRD)، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RRD = (\bar{x} + 2S)C$$

در این رابطه؛

$\bar{x}$  - میانگین افت‌وخیزهای اندازه‌گیری شده که هر یک برای انطباق با دمای محیط استاندارد که معادل ۲۱ درجه سانتی‌گراد است، با توجه به دمای محیط شرایط آزمایش بصورت زیر اصلاح شده است:

$$\frac{\sum x_i f_i}{n}$$

که در آن:

$x_i$  - افت‌وخیزهای اندازه‌گیری شده

$f_i$  - ضرایب تصحیح درجه حرارت برای هر یک از افت‌وخیزها

N - تعداد آزمایش

C - ضریب تصحیح مقاومت روسازی برای شرایط بحرانی

S - انحراف استاندارد افت‌وخیزهای اندازه‌گیری شده (برای هر واحد طرح) از رابطه زیر؛

$$S = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \bar{x} \sum x}{n-1}}$$

تغییر دمای محیط و رطوبت در لایه‌های روسازی و خاک بستر، در افت‌وخیز اندازه‌گیری شده روسازی تأثیر می‌گذارد. مثلاً افزایش درجه حرارت رویه آسفالتی و یا افزایش میزان رطوبت خاک بستر و لایه‌های غیر آسفالتی روسازی، موجب افزایش افت‌وخیز می‌شود. لذا لازم است که اندازه‌گیری‌های انجام شده در شرایط متفاوت آب و هوایی آزمایش، با ضرایب

معینی به دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد که شرایط استاندارد تعریف شده است، تبدیل شود. برای تعیین ضرایب  $f_i$ ،  $C$ ، به طریق زیر عمل می‌شود:

الف- ضریب اصلاح دمای محیط

این ضریب به دمای محیط و دمای رویه آسفالتی بستگی دارد و برای تعیین آن به شرح زیر و با استفاده از شکل‌های ۲-۱۳ و ۱۴-۲ عمل می‌شود.

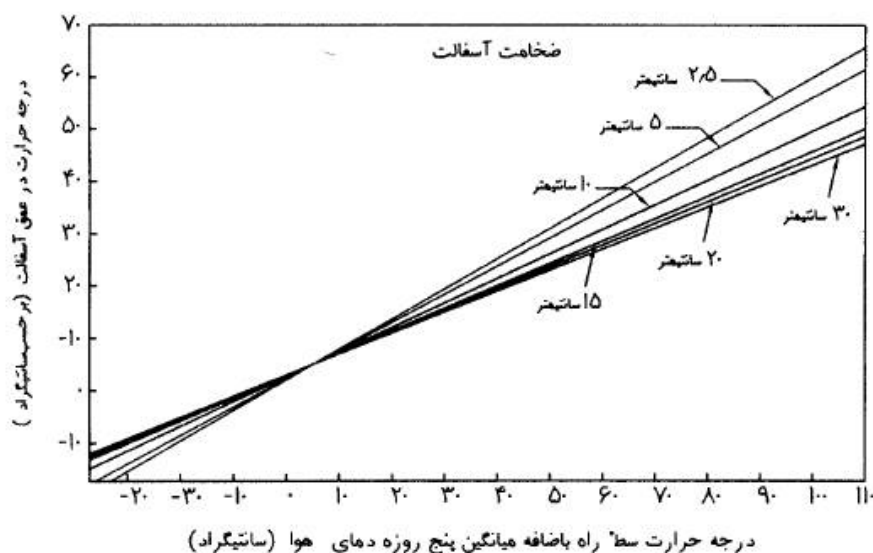
۱- حداقل و حداکثر درجه حرارت محیط مسیر برای هر روز و یک دوره پنج روزه قبل از آزمایش، از آمار هواشناسی منطقه اخذ می‌گردد. سپس میانگین ۱۰ دمای حداقل و حداکثر برای پنج روز تعیین می‌شود.

۲- درجه حرارت رویه آسفالتی اندازه‌گیری می‌شود (همانگونه که قبلاً اشاره شد)

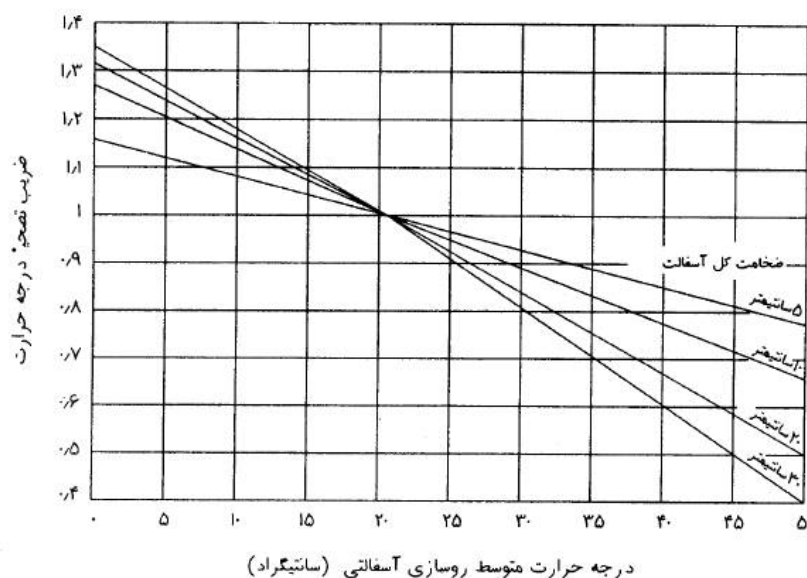
۳- با حاصل جمع اعداد بدست آمده از بندهای ۱ و ۲ به شکل ۲-۱۳ مراجعه و درجه حرارت لایه آسفالتی رویه مورد آزمایش برای دو حالت، شامل درجه حرارت ضخامت رویه و درجه حرارت بستر زیرین یعنی کل ضخامت لایه بدست می‌آید. برای مثال اگر ضخامت رویه آسفالتی مورد آزمایش ۱۰ سانتی‌متر باشد، یکبار درجه حرارت ضخامت ۵ سانتی‌متری و یکبار درجه حرارت ضخامت ۱۰ سانتی‌متری را که در شکل ۱۱، با خط‌های مایل نشان داده شده است تعیین می‌گردد.

۴- میانگین درجه حرارت سطح راه و درجه حرارت‌های ردیف ۳ به عنوان میانگین درجه حرارت روسازی تعیین می‌شود.

۵- با عدد میانگین درجه حرارت روسازی و مراجعه به شکل ۱۲، ضریب اصلاح بدست می‌آید.



شکل ۱۱- تعیین درجه حرارت متوسط لایه آسفالت روسازی در آزمایش افت و خیز

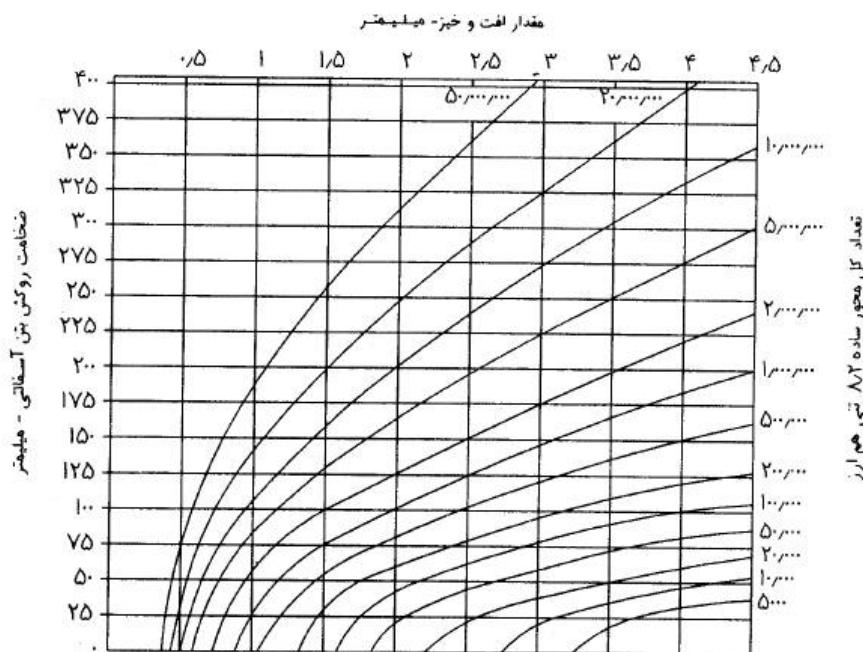


شکل ۱۲- ضریب تصحیح درجه حرارت بر حسب درجه متوسط روسازی آسفالتی

#### ب- ضریب اصلاح بحرانی (C)

این ضریب مربوط به شرایط مسیر در زمان انجام آزمایش است. در بحرانی‌ترین زمان سال (در شرایط بیشترین رطوبت در بستر) ضریب اصلاح معادل یک فرض می‌شود. در شرایط بحرانی مقاومت خاک بستر و لایه‌های روسازی تحت تأثیر رطوبت زیاد ناشی از بارندگی مداوم و یا دوره ذوب-یخبندان، کاهش می‌یابد و در نتیجه افت‌وخیز اندازه‌گیری شده در این شرایط حداکثر است. بطور کلی چون تعیین مقدار دقیق این ضریب دشوار است می‌توان افت‌وخیز را بعد از یک دوره بارندگی که رطوبت لایه‌های روسازی تقریباً اشباع و یا حداکثر است، انجام داد. در غیر اینصورت می‌توان افت‌وخیز را یکبار در دوره بحرانی و یکبار در شرایط عادی بدست آورد و پس از تقسیم افت‌وخیز بحرانی به افت‌وخیز غیر بحرانی، ضریب C را تعیین نمود.

بدین ترتیب با تعیین مقادیر ضرایب  $f_i$ , C, پارامتر RRD تعیین می‌گردد. پارامتر دیگری که برای تعیین ضخامت روکش در این روش مورد نیاز می‌باشد. ترافیک طرح است. ترافیک طرح بر حسب تعداد کل محور ساده ۸/۲ تنی هم ارز از متون مهندسی ترافیک براساس محاسبات مربوط به آن قابل استخراج می‌باشد. با محاسبه افت‌وخیز معرف طرح (RRD) و تعداد کل محور هم ارزیابی ۸/۲ تنی که برای دوره روکش محاسبه شده است و با استفاده از شکل ۱۳، ضخامت روکش تعیین می‌شود.



شکل ۱۳- تعیین ضخامت روکش آسفالت برحسب آزمایش افت و خیز

## ۲-۱-۲- آزمایش سقوط وزنه (FWD و HWD)

### ۲-۱-۲-۱- معرفی دستگاه

طی سال‌های متمادی، ظرفیت باربری روسازی‌ها توسط تیر بن‌کلن اندازه‌گیری می‌شد که روشی وقت گیر و با دقت پایین بود. سرانجام در اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی اولین دستگاه FWD به بازار عرضه شد. این دستگاه توسط یک مخترع فرانسوی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۳ اختراع شد و استفاده از آن به منظور تعیین ظرفیت سازه‌ای روسازی‌ها، توسط دانشمندان دانمارکی و سوئدی در دهه ۶۰ میلادی گسترش یافت. مهندسین مشاور کارل برو<sup>۲</sup> در دانمارک، اولین مدل تجاری دستگاه FWD را در سال ۱۹۶۹ میلادی روانه بازار کردند. امروزه با بهره‌گیری از انواع مدل‌های FWD، به بارگذاری‌های مختلف و طول موج ضربه متغییر، می‌توان دست یافت. این دستگاه‌ها اخیراً در ایالت متحده آمریکا و کانادا به دلیل نقش مؤثری که در تحقیقات عملکرد بلند مدت روسازی‌ها<sup>۳</sup> (LTPP) در برنامه تحقیقاتی استراتژیک راه‌ها (شارپ) داشتند مورد استفاده قرار گرفتند[۶].

از میان انواع مختلف مدل‌های دستگاه FWD، مدل ۸۰۰۰ شرکت دایناتست که مورد کاربرد بیشتری در دنیا قرار گرفته است، انتخاب گردیده تا در این بخش در ارتباط با موضوعات مرتبط شامل؛ ساختار نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، موارد کاربرد و استفاده، روش انجام و تحلیل نتایج، بررسی مزایا و معایب، بررسی میزان صحت داده‌ها، اعتبار سنجی و کالیبراسیون و...

1. S.Bretonniere

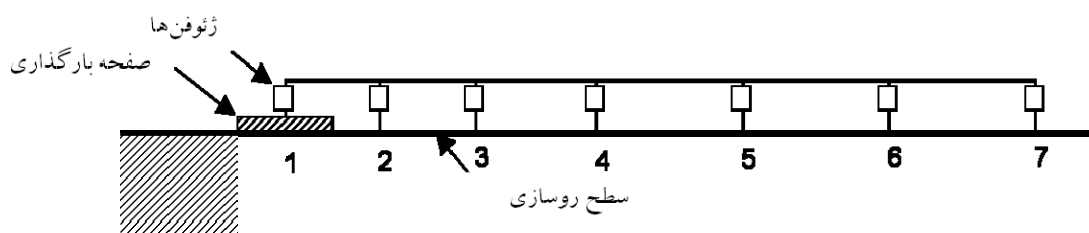
2. Carl Bro

3. Long Term Pavement Performance

مفصلاً بحث شود.

در همین راستا، ابتدا معرفی کلی از دستگاه FWD دایناتست صورت گرفته و سپس به بیان ساختار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری آن پرداخته خواهد شد.

دستگاه FWD دایناتست سیستمی است که بروی یک تریلر (یدک) که به وسیله اتومبیلی به ابعاد استاندارد کشیده می‌شود، سوار می‌شود. با تغییر ارتفاع سقوط وزنه و اندازه آن، می‌توان مقدار نیروی وارده از دستگاه‌های FWD به روسازی را از ۷ تا ۱۲۰ کیلونیوتن (۱۵۰۰ تا ۲۷۰۰۰ پوند) و در دستگاه‌های HWD از ۳۲ تا ۲۴۰ کیلونیوتن (۶۵۰۰ تا ۵۴۰۰۰ پوند) تغییر داد. این سیستم دقیق بوده و سرعت آن تا حدی است که در ساعت می‌توان ۶۰ نقطه را مورد آزمایش قرار داد. این سیستم برای ارتفاع‌های مختلف وزنه، قابل تنظیم است. سیستم ضربه‌گیری که وزنه با آن برخورد می‌کند، براساس اندازه وزنه تغییر می‌کند، تا یک ضربه بار با موج سینوسی یا نیمه سینوسی تولید شود. این ضربه با یک صفحه بارگذاری با قطر ۳۰ سانتی‌متر منتقل می‌شود و یک تبدیل‌کننده کرنشی<sup>۱</sup> مقدار بار وارده را اندازه می‌گیرد. یک صفحه بارگذاری دیگر نیز به قطر ۴۵ سانتی‌متر در اختیار قرار دارد. افت و خیزها با استفاده از تعدادی تبدیل‌کننده سرعت<sup>۲</sup> (معمولاً ۷ عدد) اندازه‌گیری می‌شوند که همگی بروی میله‌ای که به طور خودکار همراه با صفحه بارگذاری تا سطح روسازی پایین آورده می‌شوند، قرار دارند. یکی از تبدیل‌کننده‌ها مطابق شکل ۱۴، در مرکز صفحه بارگذاری قرار داده می‌شود و بقیه آنها معمولاً به فواصل مختلف از یکدیگر قرار داده می‌شوند. یک کامپیوتر که در درون خودروی کشنده مستقر شده است، کل عملیات را تحت کنترل دارد و اطلاعات رسیده از حسگرها را ثبت می‌نماید. دایناتست نرم‌افزار کامپیوتری ELMOD را که بر اساس آنالیز محاسبه معکوس عمل می‌کند برای مقاصد آنالیز و طراحی به کار می‌برد. توسط این نرم‌افزار می‌توان اندازه‌گیری‌های دستگاه FWD و HWD را در زمان کمی مورد بررسی قرار داد. از جمله می‌توان مدول الاستیسیته لایه‌ها را در کمتر از یک ثانیه بدست آورد و همچنین عمر باقیمانده و مقدار روکش مورد نیاز نیز توسط این نرم‌افزار محاسبه می‌شود [۶].



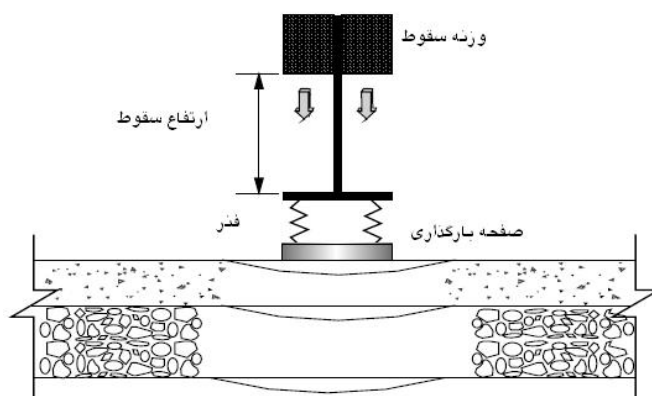
شکل ۱۴- شکل شماتیک از افت و خیز سنج‌ها در دستگاه FWD [۱۴]

طبق استاندارد ASTM D4694، آزمایش FWD شامل اجزای اصلی زیر می‌باشد [۱۶]:

- وسیله تولید کننده نیرو<sup>۳</sup>

1. Load Transducer  
2. Velocity Transducer (Geophone)  
3. Force Generating

دستگاه تولید کننده نیرو باید قابلیت آنرا داشته باشد تا وزنه را تا ارتفاع‌های از پیش تعیین شده بالا برده و سپس رها سازد. نیروی لحظه‌ای<sup>۱</sup> حاصل از این نوع بارگذاری باید تقریباً به شکل یک موج نیمه سینوسی<sup>۲</sup> بوده و بتواند اعمال بار حداقلی به میزان ۵۰ کیلونیوتن را ایجاد کند. نحوه بارگذاری این دستگاه که بیشتر یک سیستم جرم و فنر است در شکل ۱۵، نمایش داده شده است.



شکل ۱۵- شبیه‌سازی سیستم جرم و فنر در دستگاه FWD

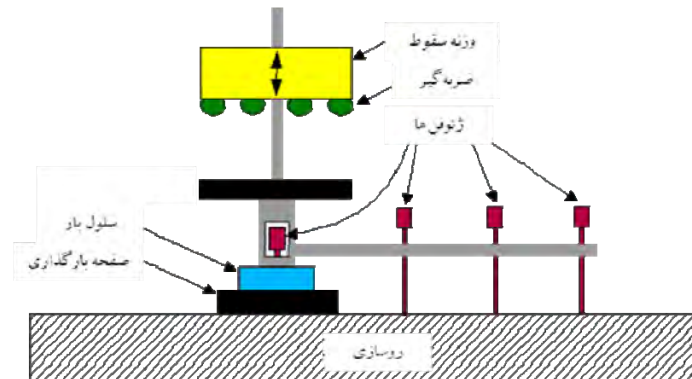
#### • سیستم هدایت کننده برای سقوط وزنه<sup>۳</sup>

طراحی این سیستم باید به نحوی صورت گرفته باشد که حداقل اصطکاک برای حرکت وزنه به سمت روسازی فراهم گردد. همچنین طرح این سیستم باید به گونه‌ای باشد که وزنه به طور عمودی بر سطح روسازی سقوط نماید.

#### • صفحه بارگذاری<sup>۴</sup>

استفاده از این صفحه بارگذاری امکان آنرا فراهم می‌نماید تا یک توزیع تقریباً یکنواخت از بار بر سطح روسازی حاصل شود. قطرهای استاندارد برای صفحات بارگذاری ۳۰۰ و ۴۵۰ میلیمتر می‌باشند (قطر ۳۰۰ میلیمتر برای ارزیابی روسازی جاده و قطر ۴۵۰ میلیمتر برای ارزیابی روسازی فرودگاه‌ها و روسازی‌های بتنی کاربرد دارد). در مرکز صفحات بارگذاری یک سنسور حساس برای اندازه‌گیری افت و خیز روسازی (در این نقطه) تعبیه شده است. صفحات بارگذاری باید قابلیت آنرا داشته باشند تا در هر جهتی به میزان حداقل ۵ درجه (نسبت به سطح افق) کج شوند. در شکل ۱۶، به صورت شماتیک صفحه بارگذاری و دیگر اجزای دستگاه FWD به صورت ساده نمایش داده شده است.

1. Pulse Force  
2. Half- Sin Wave  
3. Guide System  
4. Loading Plate



شکل ۱۶- تصویر شماتیک از صفحه بارگذاری و دیگر اجزای دستگاه FWD

#### • افت وخیز سنج‌ها

این افت وخیز سنج‌ها باید قابلیت اندازه‌گیری حرکت ماکزیمم عمودی روسازی را داشته باشند. تعداد و نحوه استقرار این افت وخیزها اختیاری است و بسته به منظور آزمایش تغییر خواهد نمود. یک فاصله استقرار حدود ۳۰۰ میلیمتر از یکدیگر معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. دقت اندازه‌گیری افت وخیز توسط این وسایل تا حد ۲ میکرون می‌باشد. در شکل ۱۷، افت وخیز سنج‌های یک دستگاه FWD نمایش داده شده است.



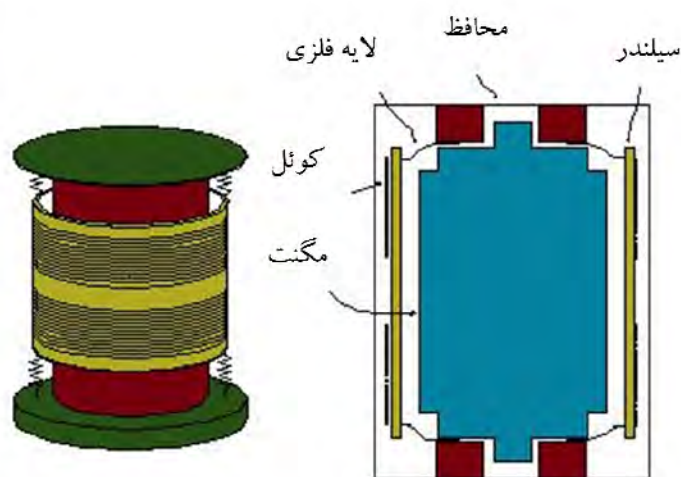
شکل ۱۷- سیستم‌های سنجش افت وخیز در دستگاه FWD

ساختار افت وخیز سنج‌ها براساس حسگرهایی به نام ژئوفن استوار می‌باشد. در ادامه به معرفی سخت‌افزاری ژئوفن‌ها پرداخته می‌شود.

#### • ژئوفن‌ها

این حسگرها متناسب با سرعت افت وخیز، ولتاژ را اندازه گرفته و سپس خیزها را محاسبه می‌کنند. خیزها باید تحت سرعت بالای ارتعاش ثبت شوند بنابراین در تجهیزات غیرمخرب از نوع استاتیکی و شبه استاتیکی نمی‌توان از این حسگرها استفاده کرد. برای بدست آوردن تاریخچه زمانی خیز، پاسخ زمانی سرعت، توسط یک تبدیل فوریه به دامنه فرکانس تبدیل

می‌شود و در نهایت با تبدیل معکوس فوریه، تاریخچه زمانی بدست می‌آید. ژئوفن‌ها تنها برای فرکانس‌های بالا (۴ تا ۴۰۰ هرتز) کاربرد دارند چرا که وضوح خروجی آنها در فرکانس‌های پایین کاهش می‌یابد. این حسگرها از یک کوئل الکتریکی و یک سیم پیچ و یک سیلندر تشکیل شده‌اند. یک جرم لرزان در میدان مغناطیسی سیم پیچ حرکت می‌کند. ژئوفن‌ها دارای نقاط قوتی از جمله کوچکی و سبکی، مقاوم در برابر ضربات و شوک‌های فیزیکی و عوامل آب و هوایی و همچنین پایداری کالیبراسیون می‌باشند. در شکل ۱۸، تصویری از این ژئوفن‌ها قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۸- ژئوفن

#### • سیستم ذخیره و پردازش اطلاعات<sup>۱</sup>

یک وسیله مغناطیسی ذخیره (دیسک کامپیوتری یا نوارهای مغناطیسی) برای جمع‌آوری و ثبت اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری بار اعمال شده، افت و خیز سطح روسازی، درجه حرارت هوا، درجه حرارت روسازی، فاصله پیموده شده و همچنین اطلاعات مربوط به موقعیت محل آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. کامپیوتر مورد استفاده برای این آزمایش باید یک صفحه نمایش (مانیتور) داشته باشد تا امکان مشاهده مستقیم اطلاعات در محل وجود داشته باشد.

#### • سلول اندازه‌گیری بار<sup>۲</sup>

این سلول باید قابلیت لازم برای اندازه‌گیری مقدار بار اعمال شده و همچنین افت و خیز روسازی در مرکز صفحه بارگذاری را داشته باشد. همچنین باید در مقابل رطوبت و آب مقاوم بوده و در مقابل شوک‌های مکانیکی ناشی از ضربات حاصل از اعمال بار مقاومت کافی را داشته باشد.

#### • تریلر

با توجه به وزن نسبتاً بالای دستگاه‌های FWD و HWD که بر روی تریلر اعمال می‌شود، طراحی ویژه‌ای برای سیستم

1. Data Processing and Storage System  
2. Load Cell

فنری کشنده جلوی تریلر بایستی درنظر گرفته شود تا امکان حمل تریلر توسط وسیله نقلیه کشنده مسیر گردد. FWD، یک ضربه به شکل نیمه سینوسی در زمان ۲۵ تا ۳۰ میلی ثانیه - برای نزدیکی به اثر حرکت چرخ روی سطح جاده- با بار حداکثر ۱۲۰ KN (۲۷۰۰۰Ibf) یا ۲۴۰ کیلونیوتن (۵۹۰۰۰Ibf) روی سطح جاده اعمال می‌کند. تصویر تریلر دایناتست در شکل ۱۹، آمده است.



شکل ۱۹- تریلر

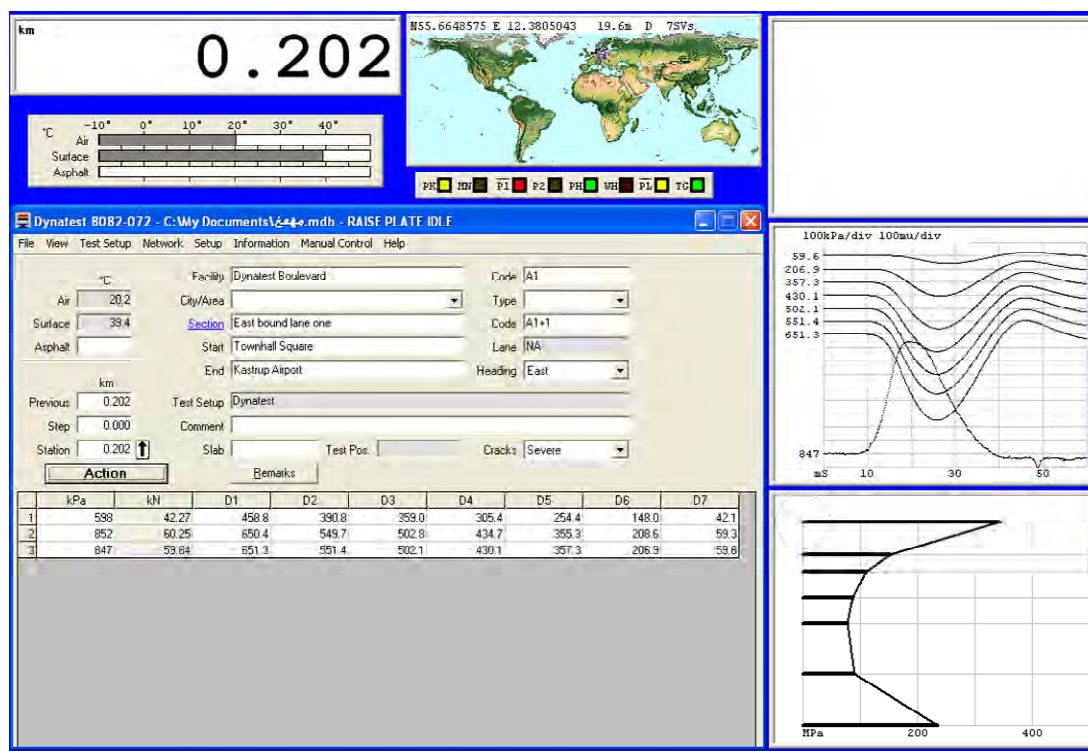
در دستگاه آزمایش FWD از دو نرم‌افزار استفاده می‌شود. نرم‌افزار اول برای جمع‌آوری داده‌های بدست آمده در هر محل پس از اجرای آزمایش، و نرم‌افزار دوم برای پردازش اطلاعات و تحلیل نتایج برای بدست آوردن پارامترهای مهمی مانند ضریب الاستیسیته لایه‌ها، عمر باقیمانده روکش، ضخامت مورد نیاز و غیره. این بخش مختصراً به معرفی و بیان مشخصات هر دو نرم‌افزار می‌پردازد.

#### • نرم‌افزار جمع‌آوری داده‌های FWDwin

این نرم‌افزار برای جمع‌آوری داده‌ها تحت ویندوز ۹۸، ME، ۲۰۰۰ یا XP طراحی شده است، به علاوه یک پروسسور و یک نسخه نرم‌افزار MS ACCESS جهت تغییرات و ویرایش داده‌ها مورد نیاز است. مزایای این نرم‌افزار که تصویری از آن در شکل ۲۰، قابل مشاهده می‌باشد، عبارتند از [۱۶]:

- نمایش پیغام خطا و اخطار متنی و شفاهی،
- قابلیت دریافت داده از ۱۵ سنسور (ژئوفن)،
- قابلیت نصب و برداشت داده‌های موقعیت جهانی محل انجام آزمایش با استفاده از GPS،
- قابلیت نصب و الحاق GPR جهت برداشت داده‌های ضخامت روسازی در هر مقطع،
- قابلیت تعریف شماره شناسایی دال بتنی و شماره خط عبور در راه‌های چند خطه،
- نمایش گرافیکی دما شامل؛ دمای هوا، دمای سطحی و داخلی لایه‌های آسفالتی بروی صفحه کامپیوتر،
- نمایش بزرگ مسافت از ابتدای مسیر روی صفحه کامپیوتر،

- ارائه داده‌های گرافیکی شامل؛ مدول سطحی<sup>۱</sup> و محاسبه معکوس تقریبی ضریب الاستیسیته لایه‌ها.



شکل ۲۰- تصویری از صفحه نمایش نرم‌افزار FWDwin

#### • نرم‌افزارهای محاسبات معکوس

برنامه‌های کامپیوتری مورد استفاده در فرآیند محاسبه معکوس به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. یک دسته از این نرم‌افزارها جهت آنالیز روسازی و محاسبه پاسخ آن (تنش، کرنش و تغییر شکل) تحت بار وارده توسط ترافیک عبوری به کار می‌روند. دسته دیگر نرم‌افزارهایی هستند که با مشخص بودن پاسخ روسازی تحت بار وارده، به تعیین ضریب الاستیسیته لایه‌های مختلف آن از روش‌های گوناگون محاسبه معکوس می‌پردازند. ELMOD و MODULUS معروفترین نرم‌افزارهای محاسبه معکوس، و همچنین BISAR و ELSYM5 معروفترین نرم‌افزارهای محاسبه پاسخ روسازی به شمار می‌روند. برنامه‌های کامپیوتری متفاوتی بر مبنای تئوری لایه ای برمیستر<sup>۲</sup> نوشته شده است. اولین و معروفترین آنها CHEV می‌باشد که برای کمپانی تحقیقاتی CHEVRON در سال ۱۹۶۳ توسط Warren و Dieckmann نوشته شد. این برنامه فقط مصالح الاستیک خطی را مدل می‌کرد. اما انستیتو آسفالت در برنامه کامپیوتری DAMA مصالح دانه‌ای الاستیک غیرخطی را نیز توانست مدلسازی کند [۱۷].

برنامه معروف دیگر BISAR نام دارد که توسط کمپانی Shell تهیه گردید که می‌توانست علاوه بر بارهای قائم، پاسخ روسازی را تحت بارگذاری افقی نیز محاسبه کند. برنامه دیگری که ابتدا در دانشگاه برکلی کالیفرنیا نوشته شد، ELSYM5

#### 1. Surface Modulus

۲. برمیستر در سال ۱۹۴۳ آنالیز سیستم دو لایه‌ای نامحدود در افق را برای روسازی انجام داد و خود وی در سال ۱۹۴۵، سیستم سه لایه را تحلیل نمود.

نام داشت که سیستم های ۵ لایه الاستیک را تحت بار چرخهای مرکب آنالیز می‌کند [۱۷].

بر مبنای تئوری لایه ای و مصالح حساس به تنش، Finn در سال ۱۹۸۶ برنامه کامپیوتری <sup>۱</sup> PDMAP را ابداع نمود تا ترک خستگی و شیار شدگی را در روسازیهای آسفالتی پیش بینی و محاسبه نماید. آنها دریافتند که پاسخهای بحرانی بدست آمده از PDMAP در مقایسه با نرم افزار SAPIV که یک برنامه آنالیز تنش بر مبنای روش اجزاء محدود بوده و در دانشگاه برکلی نوشته شده است، تطابق مطلوبی دارد. مهمترین عیب تئوری لایه ای، فرض این است که هر لایه همگن بوده و خصوصیات مشابه در کل لایه وجود دارد. این فرضیه، آنالیز را برای مصالح غیرخطی اساس و زیراساس دانه‌ای غیرچسبنده و غیرتثبیتی مشکل می‌کند. ضریب الاستیسیته این مصالح به تنش وارده بستگی داشته و در سراسر لایه متفاوت است و ممکن است نقطه ای که آزمایش انجام می‌شود، ضعیف ترین نباشد. بنابر این برای آنالیز مصالح غیرخطی، مدل‌های اجزاء محدود ابداع گردید. Duncal در سال ۱۹۶۸ اولین روش اجزاء محدود را برای آنالیز روسازیهای آسفالتی به کار برد. این روش توسط Raad و Figueroa در برنامه ILLI - PAVE استفاده شد. روش اجزاء محدود غیرخطی در برنامه MICH - PAVE استفاده شد که توسط دانشگاه میشیگان ارائه گردید. بر مبنای آنکه برنامه‌های محاسبه معکوس قادر به آنالیز غیرخطی باشند، یا نباشند، این برنامه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند، که انواع معروف آنها در جداول ۸ و ۹، نمایش داده شده است.

جدول ۸- نرم‌افزارهای محاسبات معکوس با آنالیز خطی [۸]

| نام برنامه | مؤسسه سازنده                                              | اساس محاسبات         | قابلیت تحلیل<br>بستر سخت | ماکزیمم تعداد لایه                 | طریقه همگرایی                |
|------------|-----------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| BAKFEE     | FAA                                                       | LEAF                 | بله                      | ۱۰                                 | مجذور متوسط<br>ریشه‌ها (RMS) |
| BISDEF     | U.S. Army Corps<br>of Engineers-<br>WES                   | BISAR<br>Proprietary | بله                      | بهترین نتایج برای ۳<br>لایه        | مجموع مربعات<br>خطای مطلق    |
| CHEVDEF    | U.S. Army Corps<br>of Engineers-<br>WES                   | CHEVRON              | بله                      | بهترین نتایج برای ۳<br>لایه        | مجموع مربعات<br>خطای مطلق    |
| ELSDEF     | Texas A&M<br>Army Univ. U.S.<br>Corps of<br>Engineers-WES | ELSYM5               | بله                      | بهترین نتایج برای ۳<br>لایه        | مجموع مربعات<br>خطای مطلق    |
| MODULUS    | Texas Trans<br>Institute                                  | WESLEA               | بله متغیر                | بیشتر از ۴ لایه باضافه<br>بستر سخت | مجموع مربعات<br>خطای مطلق    |
| WESDEF     | U.S. Army Corps<br>of Engineers-<br>WES                   | WESLEA               | بله                      | بیشتر از ۵ لایه                    | مجموع مربعات<br>خطای مطلق    |
| MICHBK     | Michigan State                                            | CHEVRON              | بله                      | بیشتر از ۴ لایه<br>باضافه بستر سخت | مجموع مربعات<br>خطای نسبی    |

- تمام برنامه‌های فوق در طی فرآیند محاسبه معکوس از تئوری الاستیک چند لایه استفاده می‌کنند.

- تمامی برنامه‌های جدول فوق به غیر از MODOLUS از روش محاسبات معکوس تکراری استفاده می‌کنند و MODOLUS از روش پایگاه اطلاعاتی استفاده می‌کند.
- برای تمامی برنامه‌های فوق معین ساختن و تخمین مدول الاستیسیته اولیه لازم می‌باشد.
- برای تمام برنامه‌های فوق غیر از MICHBAK معین ساختن محدوده قابل قبول مدول الاستیسیته ضروری می‌باشد و همه برنامه‌ها دارای یک تابع همگرایی خطا<sup>۱</sup> می‌باشند.

جدول ۹- نرم‌افزارهای محاسبات معکوس با آنالیز غیر خطی [۸]

| نام برنامه  | مؤسسه سازنده                        | اساس محاسبات           | قابلیت تحلیل<br>بستر سخت | ماکزیمم تعداد لایه                    | طریقه همگرایی               |
|-------------|-------------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| BOUSDEF     | Zhou و همکاران<br>Oregon State Univ | Odemark-<br>Boussinesq | بله                      | ۵ با ۳ لایه بهتر<br>کار می‌کند        | مجموع درصد خطا              |
| ELMOD       | p. Ullidtz Dynatest                 | Odemark-<br>Boussinesq | بله متغیر                | بالاتر از ۴ به<br>استثنای بستر<br>سخت | خطای نسبی برای<br>۵ سنسور   |
| EMOD        | PCS/LAW                             | CHEVRON                | خیر                      | ۳                                     | مجموع مربعات<br>خطای نسبی   |
| EVERCALC    | J. Mahoney و<br>همکاران             | CHEVRON                | بله                      | ۳ به استثنای بستر<br>سخت              | مجموع خطای<br>مطلق          |
| FREDDI      | W. Uddin                            | BASINPT                | بله متغیر                | نامشخص                                | نامشخص                      |
| ISSEM4      | R. Stubstad                         | ELSYM5                 | خیر                      | ۴                                     | خطای خیز نسبی               |
| MOD-COM P 3 | L. Irwin, Szebenyi                  | CHEVRON                | بله                      | ۲ تا ۱۵ ماکزیمم<br>لایه نامشخص        | خطای خیز نسبی<br>در سنسورها |
| PADAL       | S.F. Brown و همکاران                | Unknown                | غیر مشخص                 | نامشخص                                | مجموع مربعات<br>خطای نسبی   |
| ROSY DESIGN | Carl Bro Group                      | Odemark-<br>Boussinesq | بله                      | بیشتر از ۴ لایه                       | خطای نسبی در ۶<br>سنسور     |

- تمام برنامه‌های فوق به غیر از BOUSDEF و ELMOD در طی فرآیند محاسبه معکوس از تئوری الاستیک چند لایه استفاده می‌کنند.
- تمامی برنامه‌های جدول فوق از روش محاسبات معکوس تکراری استفاده می‌کنند.
- برای تمامی برنامه‌های فوق معین ساختن مدول الاستیسیته اولیه لازم می‌باشد به غیر از ELMOD و FREDDI.
- برای تمام برنامه‌های فوق غیر از ELMOD معین ساختن محدوده قابل قبول مدول الاستیسیته ضروری می‌باشد.

- از برنامه‌های فوق فقط BOUSDEF دارای یک تابع همگرایی خطا می‌باشد.

به علت آنکه محاسبات معکوس الاستیک خطی نتایج منحصر به فردی ندارد و همچنین تجربیات و قضاوت مهندسی افراد مرتبط تأثیر زیادی بر نتایج بدست آمده دارد، نمی‌توان ضوابط ارزیابی خاصی را برای سنجش کیفیت این نرم‌افزارها بیان نمود. با این وجود برخی از نرم افزارهای این دو جدول بیشتر از بقیه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال برنامه‌های WESDEF و MODULUS در آزمایش‌های FHWA در بخش تحقیقات عملکرد بلندمدت روسازی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین نرم افزار WESDEF در بیشتر مطالعات ارزیابی روسازی‌های فرودگاهی ارتش آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. در همین راستا پیش از پرداختن به معرفی نرم افزار ELMOD5 که در شرکت دایناتست به کار گرفته شده است مختصری به بیان نتایج مطالعات انجام شده برای انتخاب نرم افزار مناسب محاسبات معکوس اشاره می‌شود.

#### انتخاب روش محاسبه معکوس

رفتار مصالح روسازی شامل مصالح دانه‌ای سخت و رسی نرم، غیرخطی می‌باشد. به عنوان مثال ضریب ارتجاعی بستر شنی با افزایش عمق که سربار افزایش می‌یابد، زیاد می‌شود. همچنین ضریب بستر رسی با افزایش عمق که فاصله از مرکز بار افزایش می‌یابد و تنش انحرافی حاصله کم می‌شود افزایش پیدا می‌کند. مدول مرکب<sup>۱</sup> یا مختلط روسازی به عنوان شاخص رفتار غیرخطی روسازی شناخته می‌شود و معادل مدول سیستم چند لایه ای است که به وسیله یک نیم فضای هموزن نشان داده می‌شود.

$$\text{مدول مرکب} = \frac{\text{مقدار بار}}{\text{خیز} \times \text{فاصله از مرکز بار}}$$

در مصالح الاستیک خطی، ضریب ارتجاعی با افزایش فاصله از بار کاهش یافته و سپس به مقدار ضریب بستر متمایل می‌شود. پس در مواقعی که افزایش مدول با افزایش فاصله مشاهده شود، محاسبه معکوس غیرخطی نسبت به خطی ترجیح داده می‌شود [۱۸].

در صورت وجود لایه سخت نزدیک لایه‌های روسازی و در عمق کم، اثر تشدید دینامیکی حاصله را نمی‌توان نادیده گرفت. در این حالت حتماً بایستی آنالیز دینامیکی انجام داد و تطابق تاریخچه های زمانی افت وخیز را بررسی نمود. در این حالت تطابق دامنه زمان نسبت به تطابق دامنه فرکانس ترجیح داده می‌شود.

محققین پیشنهاد کردند که عمق بستر سخت توسط آنالیز تاریخچه زمانی خیز<sup>۲</sup> بدست آید. وقتی که یک لایه سخت زیر بستر موجود باشد، شکل تاریخچه خیز به صورت یک پالس اصلی و چندین نوسان با مقادیر کاهش یابنده، رویت می‌شود. عمق بستر سخت توسط پریود این نوسانات و فشردگی موج بدست می‌آید [۱۹].

در صورت آگاهی از عدم وجود لایه سخت تا عمق ۶ متری زیر روسازی، پیشنهاد می‌شود که از روش محاسبه معکوس استاتیکی غیرخطی استفاده شود [۱۸]. علائم رفتار غیرخطی عبارتند از: افزایش مدول با افزایش شدت بار وارده و افزایش عمق، تغییر مدول در دو جهت قائم و افق در صورت وجود بستر شنی. همچنین عدم رسیدن به مقوله صفر در تاریخچه

1. Composite Modulus

۲ تاریخچه زمانی خیز از ترسیم مقادیر خیز روسازی در طول زمان بارگذاری بدست می‌آید.

زمانی افت و خیز، نشان دهنده رفتار ویسکوالاستیک و تغییر شکلهای برگشت ناپذیر در زمان کوتاه بارگذاری (حدود ۶۰ میلی ثانیه) می‌باشد.

در صورت عدم وجود لایه سخت تا عمق ۶ متری و وجود لایه بتن آسفالتی ضخیم در رویه و بستر رسی (و نه شنی) می‌توان از محاسبه معکوس الاستیک خطی استفاده نمود. در صورت استفاده از محاسبه معکوس دینامیکی بایستی شکل نیمه سمت راست تاریخچه زمانی خیز را تا رسیدن به مقدار صفر حدس زد.

در ادامه با توجه به اینکه شرکت دایناتست از نرم‌افزار ELMOD5 استفاده نموده است به تشریح مختصر این نرم‌افزار پرداخته می‌شود.

#### • معرفی نرم‌افزار ELMOD5

ELMOD5 یک برنامه کامپیوتری است که توسط شرکت دایناتست تهیه شده تا وظیفه آنالیز روسازی را برعهده داشته باشد.<sup>۱</sup> ELMOD5 مخفف کلمات ارزیابی مدول لایه‌ها و طرح روکش می‌باشد.

این برنامه برای استفاده مهندسی است که وظیفه نگهداری یا بهسازی راه‌ها و یا شبکه روسازی سایت‌های پروازی فرودگاه‌ها را برعهده دارند. با استفاده از افت و خیز ضربه‌ای FWD یا افت و خیز سنج ضربه‌ای سنگین HWD که براساس اندازه‌گیری میزان افت و خیز کار می‌کند، این برنامه قادر به آنالیز کل سیستم سازه‌ای روسازی و طرح روکش براساس پارامترهای طراحی تعریف شده توسط کاربر می‌باشد. همچنین این نرم افزار قادر است عمر باقیمانده روسازی را تعیین نماید [۲۰].

نرم‌افزار ELMOD انجام سه وظیفه مهم زیر را برعهده دارد [۲۰]:

ELMOD توانایی محاسبه معکوس مدول لایه‌های روسازی در سیستم روسازی‌های دو لایه، چهار لایه یا پنج لایه را بصورت معکوس داراست. این برنامه با استفاده از روش "انطباق حوضچه افت و خیز"<sup>۲</sup> که مبتنی بر روش‌های؛ "اجزاء محدود"<sup>۳</sup>، "تئوری الاستیسیته خطی"<sup>۴</sup> و "ضخامت معادل"<sup>۵</sup> می‌باشد، می‌تواند مدول لایه‌های روسازی را محاسبه نماید. همچنین براساس روش "شعاع انحناء"<sup>۶</sup> که بطور معمول بر پایه تکنیک‌های یافتن تابع اولیه عددی استوار می‌باشد، مدول لایه‌های روسازی را محاسبه نماید.

روش‌های "شعاع انحناء" و "انطباق حوضچه افت و خیز" با استفاده از روابط بوسینسک<sup>۷</sup> و تغییر شکل ادمارک<sup>۸</sup>، از سیستم‌های لایه‌ای نیمه بینهایت برای محاسبه معکوس لایه‌ها بهره می‌جویند. این دو روش به دو مدول مختلف برای افت و خیزهای مربوط به هر یک از نقاط آزمایش FWD یا HWD منجر می‌شود و هر دوی آنها خاک بستر را بصورت غیرخطی

1. Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design
2. Deflection Basin Fit
3. Finite Element Method (FEM)
4. Linear Elastic Theory (LET)
5. Method of Equivalent Thicknesses (MET)
6. Radius of Curvature
7. Boussinesq
8. ODemark

در نظر می‌گیرند [۲۰].

در روش " انطباق حوضچه افت وخیز "، ابتدا یک سری از مدول‌های تخمینی برای لایه‌های روسازی در نظر گرفته می‌شود. سپس حوضچه تغییرشکل تئوری بر اساس یکی از روش‌های LET، MET یا FEM مورد محاسبه قرار داده شده و اختلاف بین تغییرشکل‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده توسط آزمایش FWD بدست آورده می‌شود. سپس مدول‌های در نظر گرفته شده به مقدار ۱۰ درصد کاهش و افزایش داده شده و تغییرشکل‌های تئوری آنها با تغییرشکل‌های واقعی مقایسه می‌شود. هر کدام که به واقعیت نزدیکتر بود به عنوان جواب بهتر برای ادامه روند انتخاب می‌شود. این روند آنقدر ادامه می‌یابد تا اختلاف بین دو تغییرشکل به حداقل برسد. بدین ترتیب طی یک محاسبه معکوس، تغییرشکل لایه‌ها شبیه‌سازی شده و مدول الاستیسیته مربوط به روسازی مورد نظر بدست می‌آید.

این روش دارای مشکل است، زیرا روسازی‌های مختلف (ترکیب‌های مختلف از سختی لایه‌ها) ممکن است دارای حوضچه‌های تغییرشکل یکسان باشند و در نتیجه چندین جواب برای تغییرشکل اندازه‌گیری شده بدست آید. لذا برای بدست آوردن مدول‌های صحیح می‌بایست با تعریف مدوده‌های مناسب، روند تکرار را به سمت جواب‌های درست‌تر هدایت نمود. در روش " شعاع انحنا "، بر اساس روش ضخامت معادل بوسینسک - ادمارک (MET) و با استفاده از قرائت‌های بدست آمده از ژئوفن‌های بیرونی‌تر، مشخصات غیرخطی لایه بستر تعیین می‌شود. همچنین با استفاده از قرائت‌های ژئوفن‌های درونی‌تر، مدول لایه رویه تعیین می‌گردد. سختی لایه‌های دیگر روسازی بر اساس نتایج بدست آمده از تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده در اثر اعمال بار، مورد محاسبه قرار داده می‌شوند.

تفاوت این دو روش در این است که در روش انطباق حوضچه تغییرشکل، از یک معیار همگرایی بر اساس درجه تطابق حوضچه‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده استفاده می‌شود. در روش انطباق حوضچه تغییرشکل از تمامی افت وخیزهای بدست آمده موجود در حوضچه‌های افت وخیز استفاده و ریشه میانگین مربعات خطاها (RMS)، در بین افت وخیز اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را حداقل می‌نماید. در حالیکه در روش "شعاع انحنا" تنها نتایج بدست آمده از قرائت‌های ژئوفن‌ها را مدنظر قرار می‌دهد که مشابه روش بکار رفته در ELMOD 3 است.

در روش LET، تمام لایه‌ها الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شوند. این در حالیست که در روش MET، فقط لایه بستر غیرخطی و در روش FEM، تمام لایه‌ها، غیرخطی در نظر گرفته می‌شوند.

ELMOD5 به عنوان بخشی با اهمیت در سیستم پیشرفته مدیریت روسازی دایناتست<sup>۱</sup> (DPMS) است که توانایی بررسی وضعیت سازه‌ای روسازی را در سطوح مختلف شبکه داراست. این گزینه بگونه‌ای کار آمد، کاهش دهنده مباحث مورد نظر در تخمین عملکرد روسازی است که بطور کلی بر اصل مشاهده وضعیت سطح بیرونی روسازی استوار می‌باشد.

این نرم‌افزار از قانون ماینر برای محاسبه تنشها و کرنش‌های بحرانی استفاده می‌کند. قانون ماینر برای اندرکنش تأثیر خرابی‌ها که در طول هر فصل و توسط هر یک از بارها به وجود می‌آید استفاده می‌شود (برپایه خرابی‌های تعریف شده توسط کاربر مثل خستگی و شیارشدگی تا حداکثر ۱۲ گونه بارگذاری قابل مشخص کردن است). سپس برنامه شروع به محاسبه عمر باقیمانده روسازی می‌نماید و ضخامت روکش مورد نیاز برای عمر طراحی مورد نظر را بدست می‌آورد [۲۰].

مزایای نرم‌افزار ELMOD عبارتند از:

- توانایی خواندن خروجی نرم‌افزار FWDwin با فرمت .mdb.
- قابلیت تعریف تا ۱۵ ژئوفن،
- قابلیت آنالیز سریع فایل‌های بزرگ،
- نمایش گرافیکی مطلوب و نمایش نتایج به طرز ساده و گویا [۲۰].

## ۲-۲-۱-۲- موارد استفاده از آزمایش FWD

براساس آنچه در استاندارد ASTM برای روش انجام آزمایش FWD آمده است، موارد باید انجام گیرد [۱۶]:

الف- دستگاه را به محل انجام آزمایش منتقل کرده و صفحه آزمایش را بروی نقطه مطلوب جهت انجام آزمایش قرار دهید. محل آزمایش باید کاملاً از سنگ و مصالح تمیز باشد، تا صفحه بارگذاری به طور صحیح بروی سطح روسازی بنشیند (در مورد سطوح غیر روسازی شده، این سطوح باید تا حد ممکن صاف باشند و تمام مواد سست قابل کنده شدن از روی آن تمیز شوند).

ب- صفحه بارگذاری و افت وخیز سنج‌ها پایین آورده شده و بر روی سطح روسازی مستقر می‌شوند.

ج- وزنه دستگاه تولید کننده نیرو تا ارتفاع مطلوب بالا برده شده و سپس رها گردد. توجه شود تا اگر تغییر شکل دائمی و مشخص در زیر صفحه بارگذاری ایجاد شد، دستگاه را به جای دیگری منتقل نموده و نیروی اعمال شده را کاهش دهید تا آنکه دیگر تغییر شکل دائمی در روی سطح روسازی ایجاد نگردد.

د- حداقل دو بارگذاری متوالی را به اجرا درآورید و نتایج را مقایسه نمایید. اگر اختلاف بزرگتر از ۵ درصد (برای هر افت وخیز) بود، تعداد آزمایش بیشتری را به اجرا درآورید تا آنکه افت وخیزهای دو آزمایش متوالی اختلافی کمتر از ۵ درصد داشته باشد. اگر بعد از ۵ بارگذاری متوالی اختلاف‌ها همچنان در حد بزرگتر از ۵ درصد باقی ماند، در این حالت متوسط نتایج افت وخیز اندازه‌گیری شده را محاسبه نمایید و تغییرپذیری نتایج را در گزارش تهیه شده متذکر شوید.

در ارتباط با موارد کاربرد دستگاه FWD و HWD می‌توان فهرست وار به موارد زیر اشاره نمود:

- ارزیابی سازه‌ای روسازی،
- تعیین عمر باقیمانده روسازی،
- تعیین ضخامت روکش لازم برای روسازی،
- تعیین مدول الاستیسیته لایه‌ها،
- قابلیت و کارایی روسازی بتنی در انتقال نیرو در محل اتصالات،
- تعیین وجود حباب هوا در روسازی‌های بتنی،
- مدیریت روسازی در سطح شبکه،
- بازرسی روسازی در سطح پروژه،
- و کاربردهای تحقیقاتی دیگر.

## ۲-۱-۳- روش کالیبراسیون

در این بخش به بررسی و مطالعه روش کالیبراسیون دستگاه FWD پرداخته خواهد شد. اگر دستگاه FWD در حین و قبل از انجام آزمایش کالیبره نشود، تبعات حاصل آمده، از لحاظ اقتصادی قابل ملاحظه و مهم خواهند بود. بر اساس مطالعات انجام شده توسط اداره حمل‌ونقل ایالت ایندینا آمریکا (Indiana DOT)<sup>۱</sup> در صورتیکه افت وخیز اندازه‌گیری شده توسط FWD به میزان ۰/۰۲۵۴ میلیمتر (۱ میل) خطا داشته باشد و از مقدار واقعی بیشتر شده باشد، این موضوع باعث افزایش ۱۲ هزار دلاری در مصرف مصالح آسفالتی اضافی برای هر کیلومتر-خط عبور خواهد شد. حال اگر این خطا دو برابر شود، مقدار هزینه مصالح اضافی به ۲۴ هزار دلار برای هر کیلومتر-خط عبور خواهد رسید. اگر خطا باعث کاهش در مقدار واقعی تغییر شکل روسازی تحت بارگذاری دستگاه FWD یا HWD شود، این موضوع به صورت قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش عمر طراحی روسازی می‌گردد. بنابراین واضح است که کالیبراسیون دقیق دستگاه FWD و HWD در راستای هرچه دقیق‌تر شدن افت وخیز قرائت شده از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد [۲۱].

## انواع روش‌های کالیبراسیون دستگاه FWD

## الف - کالیبراسیون نسبی

در کالیبراسیون نسبی، عملکرد سنسورها و افت وخیز نسبی دستگاه، مورد نظر قرار گرفته می‌شود. همه سنسورها می‌بایست زمانیکه در موقعیت مشابه و در مکان مشابه قرار داده می‌شوند، برداشت مشابهی انجام دهند. برای بدست آوردن این مهم، می‌بایست هر ماه یکبار، کالیبراسیون نسبی برای سنسورها صورت گیرد. کالیبراسیون نسبی در هر شرایطی و در هر محلی قابل انجام می‌باشد.

## ب- کالیبراسیون مرجع

این کالیبراسیون‌ها در مراکز کالیبراسیون که با این هدف، به شکل خاص طراحی و در نظر گرفته شده‌اند، انجام می‌پذیرد. در کالیبراسیون مرجع، پاسخ تجهیزات و ابزارهای موجود در دستگاه FWD، در شرایط آزمایش، با خروجی‌های ابزارها و تجهیزات مرجع مقایسه و تطبیق می‌شود. این ابزارهای اندازه‌گیری کننده مرجع در واقع بخشی از دستگاه FWD نیستند. برای مثال مقایسه و تطابق قرائت‌های بدست آمده از ژئوفن‌های FWD با قرائت‌های بدست آمده از پلت فرم<sup>۲</sup> تغییر شکل مرجع، به عنوان کالیبراسیون مرجع این قطعات تلقی می‌شود. در صورتیکه نتایج بدست آمده از این دو، اختلاف زیادی داشته باشند، اقدامات اصلاحی فنی و سخت‌افزاری برای قطعات دستگاه FWD می‌بایست صورت پذیرد [۲۱].

کالیبراسیون مرجع با هدف تضمین و تأیید دقت سنسورها براساس نقاط مرجع تعریف شده (Benchmarks) انجام می‌گیرد، پیش از این، کالیبراسیون مرجع برای سنسورها به صورت جداگانه صورت می‌گیرد ولی در حال حاضر براساس دستورالعمل جدید سنسورهای چندگانه به صورت همزمان کالیبره می‌شوند. این کالیبراسیون به صورت یک بار در سال صورت می‌گیرد.

1. Yigong and Nantung 2006  
2. Platform

## روش انجام کالیبراسیون

### الف- کالیبراسیون نسبی

تفاوت بین مدل‌های مختلف FWD و HWD، سازنده سنسورها و تکنولوژی در دسترس باعث پیدایش روش‌های مختلف کالیبراسیون نسبی شده است.

براساس مطالعه صورت گرفته ۵۵ درصد از کاربران، کالیبراسیون نسبی را براساس روش SHRP/LTPP انجام می‌دهند. ۳۵٪ از کاربران اذعان دارند که روش ارائه شده توسط شرکت سازنده دستگاه را اجرا می‌کنند. برای مثال شرکت دایناتست و JILS روش LTPP را به کاربران پیشنهاد می‌دهند. اما اداره راه سوئد (SRA) برای تولیدکنندگان این کشور دستورالعمل مستقلاً دارد که برای کالیبراسیون نسبی اعمال می‌شود. در این روش تمام سنسورهای دستگاه FWD در داخل یک نگهدارنده قرار گرفته و همگی در معرض ۵ تغییر شکل متوالی قرار داده می‌شوند. کالیبراسیون در این روش زمانی تأیید است که اختلاف بزرگترین و کوچکترین تغییر شکل ثبت شده بزرگتر از ۲ میکرون بعلاوه ۱٪ مقدار اندازه‌گیری شده نباشد.

در استاندارد ASTM 4694-96 در تشریح روش کالیبراسیون نسبی، مشابه با روش SRA، با استفاده از یک مرجع نگهدارنده عمودی سنسورها، ۵ تغییر شکل برای هر سنسور ثبت می‌شود. در صورتیکه اختلاف هیچ یک از آنها بیش از ۳٪ تغییر شکل میانگین نباشد کالیبراسیون تأیید است و نیاز به اصلاح نمی‌باشد. همچنین این استاندارد بیان می‌کند که اگر هر اختلافی بزرگتر از ۲ میکرون در مقدار تغییر شکل میانگین حاصل شد، دستگاه باید مورد تعمیر قرار گرفته و کالیبراسیون دستگاهی آن توسط کارخانه تولید کننده مورد بازبینی قرار گرفته شود.

### ب- کالیبراسیون مرجع [۲۲]

چندین روش مختلف توسط نهادهای مختلف تحقیقاتی و اجرایی برای کالیبراسیون مرجع تجهیزات دستگاه FWD، شامل سنسورهای افت‌وخیز و سلول‌های بارگذاری، به صورت جداگانه، تحت عنوان کالیبراسیون مرجع ارائه شده است. یکی از این روش‌ها توسط برنامه تحقیقاتی SHRP و در راستای اهداف LTPP در اداره کل حمل‌ونقل ایالتی آمریکا FHWA، انجام پذیرفته است. براساس این روش، کالیبراسیون مرجع در ۴ مرکز مجاز احداث شده برای این منظور، صورت می‌پذیرد. این مراکز در ایالات پنسیلوانیا، منیسوتا، تگزاس و نوادا تحت نظارت اداره حمل‌ونقل تابعه خود اداره می‌شوند. در این روش، مشابه روش‌های دیگر، برنامه کالیبراسیون در ۳ سطح تعریف می‌شود؛

- کالیبراسیون توسط کاربر دستگاه
- کالیبراسیون در ایستگاه‌های مجهز
- کالیبراسیون کارخانه‌ای

اقداماتی که می‌بایست توسط کاربر دستگاه، عموماً هر ماه یا هر ۶ ماه، انجام گیرد جزو کالیبراسیون نسبی قرار می‌گیرد. این در حالیست که اقدامات انجام شده در کارخانه قبل از تحویل دستگاه و همچنین اقداماتی که در ایستگاه‌های کالیبراسیون ارائه می‌شود، جزو کالیبراسیون مرجع محسوب می‌شوند. در برنامه کالیبراسیون مرجع، با تعریف پروتکل‌های مختلف آزمایشگاهی و تهیه فلوجارت‌های پیچیده، برای سنسورهای افت‌وخیز و همچنین سلول‌های بارگذاری، اقدامات

کالیبراسیون برای دوره‌های یکساله یا دو ساله انجام می‌گیرد. با توجه به تخصصی بودن این پروتکل‌ها و روند انجام کالیبراسیون مرجع در مراکز مجاز و همچنین گستردگی جزییات در هر یک از پروتکل‌ها، بحث‌های کامل‌تر و جامع‌تر در زمینه کالیبراسیون مرجع، در صورت لزوم، در قالب ضمیمه دستورالعمل ارایه خواهد شد.

در یک مطالعه مشترک که در سال ۲۰۰۴ توسط FHWA برای بهبود پروسه کالیبراسیون مرجع موجود در برنامه SHRP سال ۱۹۹۴ صورت پذیرفت، به دلایل زیر اصلاح روش کالیبراسیون ضروری دانسته شد.

- در روش کالیبراسیون مرجع سال ۱۹۹۴ برای دو دستگاه FWD دایناتست و کوآب که دستگاه‌های موجود در آن زمان در آمریکا به شمار می‌رفتند، طراحی صورت گرفته بود. با توجه به اختلافات و تفاوت‌هایی که بین سازندگان مختلف این دستگاه‌ها وجود دارد، امروزه این روش برای دستگاه‌های مختلف قابل استفاده نیست.
- روش کالیبراسیون سال ۱۹۹۴ برپایه کالیبراسیون منفرد و جداگانه برای هر سنسور استوار بود و زمانی برابر ۶ ساعت وقت برای تکمیل پروسه کالیبراسیون نیاز داشت.
- روش کالیبراسیون سال ۱۹۹۴ نیازمند تبدیل کننده‌های متغییر خطی<sup>۱</sup> (LVDT) برای تغییر شکل‌های مرجع بود که دقت این ابزارها گاهی اوقات تحت حرکت‌های جرم و تیر در حالت ایستاده تغییر می‌کرد.
- روش کالیبراسیون سال ۱۹۹۴ براساس برنامه‌ای که تحت DOS اجرا می‌شد عمل می‌کرد که امروزه منسوخ شده است.

بدین ترتیب روش جدید کالیبراسیون مرجع نقاط ضعف فوق را مرتفع کرده است. برای مثال تمام سنسورها به صورت همزمان تحت یک برنامه تحت ویندوز به نام FWDcal در مدت زمان ۲ ساعت کالیبره می‌شوند.

#### مقایسه کالیبراسیون نسبی و مرجع

در تصویری شماتیک در شکل ۲۱، اینگونه بیان می‌کند که کالیبراسیون نسبی پس از کالیبراسیون مرجع باعث افزایش دقت برداشتها در حد قابل قبول خواهد شد.



شکل ۲۱- تصویر شماتیک از دقت کالیبراسیون‌ها

1. Linear Variable Displacement Transducer

کالیبراسیون نسبی و مرجع می‌بایست در یک زمان صورت گیرد. کالیبراسیون نسبی هر ماه یکبار و کالیبراسیون مرجع هر سال یکبار مورد نیاز می‌باشد. لازم به ذکر است درباره تفاوت زمانی کالیبراسیون نسبی زمان‌های زیر مورد نظر می‌باشد.

- دقیقاً بعد از انجام کالیبراسیون مرجع،
- هر ماه یکبار،
- بعد از یک دوره زمانی که از دستگاه استفاده نشده است،
- قبل از انجام پروژه‌های مهم،
- هر وقت که داده‌ها مشکوک به نظر می‌رسند.

تجهیزات مورد نیاز برای کالیبراسیون مرجع

۱- ساختمان مجهز برای انجام عملیات کالیبراسیون

۲- صفحه ایزوله<sup>۱</sup> (تصویر ۲۲ و ۲۳)



شکل ۲۲- ساختار صفحه ایزوله



شکل ۲۳- صفحه ایزوله

۳- سلول بارگذاری مرجع

۴- LVDT

۵- تیر I شکل آلومینیومی

۶- صفحه کالیبراسیون میکرومتری

۷- سیستم جمع‌آوری سیگنال‌های داده

۸- کامپیوتر سازگار با تجهیزات

۹- نرم افزار کالیبراسیون

در شکل‌های ۲۴، تجهیزات فوق برای کالیبراسیون دستگاه FWD نشان داده شده است.



شکل ۲۴- تجهیزات کالیبراسیون دستگاه FWD

## ۲-۱-۲-۴- روش انجام آزمایش

دستگاه را به محل آزمایش برده و صفحه بارگذاری را روی نقطه مورد نظر قرار می دهند. موقعیت نقطه آزمایش باید تا آنجا که ممکن است تمیز و عاری از سنگریزه و آشغال باشد تا صفحه دقیقاً در موقعیت مورد نظر فرود بیاید. شن و ماسه رویه باید حتی‌المقدور از نوع صاف و صیقلی باشد و مصالح شل و لق قبلاً دور شده باشند. حال صفحه بارگذاری را به همراه مبدل‌ها پایین آورده تا مطمئن شویم که بر رویه سخت و محکم جای گرفته است. ابزار تولید نیرو را تا ارتفاع مورد نظر بالا آورده و رها می‌شود. ماکزیمم خیز رویه و بار وارده را یادداشت می‌کنیم. در صورتیکه تغییر شکلهای دائمی زیادی زیر صفحه بارگذاری به وجود بیاید، دستگاه را به محل دیگری برده و بار وارده آنقدر کم می‌شود تا تغییر شکل دائمی کمتر از حالت قبل شده و از بین برود. حداقل ۲ سری بارگذاری انجام داده و در صورتی که نتایج خیز و بار کمتر از ۵ درصد اختلاف داشتند، نقطه بعدی آزمایش می‌رویم. در صورتیکه بعد از ۵ مرتبه بارگذاری همچنان اختلاف بیش از ۵ درصد بود، نتایج

برحسب میانگین این ۵ بارگذاری بدست می‌آید. سپس فرآیند محاسبه معکوس انجام می‌پذیرد. بنابراین اهداف کلی آزمایش به صورت زیر مشخص می‌شوند:

۱. تعیین مقدار و شدت خرابی در هر مقطع روسازی
  ۲. عوامل احتمالی این خرابی‌ها، ظرفیت باربری سازه هر مقطع روسازی تحت بهره برداری
  ۳. ویژگی‌های عملکردی روسازی تحت بهره برداری
  ۴. تعیین عمر باقی مانده روسازی (عمر سازه ای و عمر عملکردی)
  ۵. انواع روش‌های امکان پذیر ترمیم روسازی
  ۶. انتخاب بهترین گزینه بهسازی
- افت و خیزهای حاصله از FWD شامل دو جز هستند؛ یکی افت و خیز قائم بر اثر اعمال بار در محدوده حوضچه خیز و دیگری امواجی هستند که در سطح روسازی به طور جانبی منتشر می‌شوند. رفتار سطحی روسازی درون حوضچه افت و خیز و اطراف بار اعمال شده که توسط سنسورها اندازه‌گیری می‌شود، میدان نزدیک نام دارد. خارج از محدوده حوضچه افت و خیز و ناحیه ای که روسازی در اثر انتشار امواج حرکت می‌کند، میدان دور نام دارد.

## ۲-۱-۲-۵- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده

با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته به عنوان مهمترین پارامتر بدست آمده از آزمایش FWD، در این بخش با معرفی عوامل مؤثر بر مدول الاستیسیته و عواملی که باعث ایجاد خطا در این پارامتر می‌شوند، نحوه تصحیح و تدقیق مدول الاستیسیته و اعتبار سنجی این نتیجه بدست آمده از FWD مورد بحث قرار داده می‌شود.

عواملی که در تعیین مقدار مدول الاستیسیته بدست آمده از آزمایش FWD، مؤثر می‌باشند، عبارتند از<sup>۱</sup>:

الف- ضخامت لایه‌ها

ب- درجه حرارت روسازی

ج- فصل انجام آزمایش

د- مدت زمان بارگذاری

ه- مقدار بار

ی- نحوه توزیع بار

پ - عمق بستر سخت<sup>۲</sup>

ت - غیریکنواختی لایه‌ها و وجود ترک‌های عرضی

<sup>۱</sup> توضیحات تکمیلی در ارتباط با هر یک از پارامترهای فهرست شده به همراه نحوه تاثیر آن‌ها، در گزارش فاز دوم پروژه بحث شده است.

• منابع تولید خطا در آزمایش FWD

در هنگام کار با دستگاه FWD، پارامترهای بسیاری مؤثر بوده که باعث تغییر در نتایج بدست آمده می‌شوند. هر کدام از این عوامل به طور جداگانه بررسی می‌شود و نحوه ایجاد خطا در نتایج بدست آمده، ارزیابی می‌گردد [۲۰].

۱- مهمترین عامل در عملکرد روسازیهای آسفالتی دماست. با توجه به گرمسیری بودن اغلب نقاط ایران و اختلاف زیاد دمای متوسط این مناطق با دمای استاندارد، بایستی تصحیحات دمایی انجام داد. دمای استاندارد که توسط آیین نامه راههای ایران ( که عمدتاً از استاندارد آشتو اقتباس شده است) پیشنهاد شده است، ۲۰ درجه سانتیگراد بوده که بدین منظور، آشتو نمودارهای متفاوتی برحسب ضخامت های گوناگون لایه آسفالت و جنس مصالح اساس، ارائه کرده است و بایستی برای هر مورد، از نمودار خاص خود استفاده نمود و خیز در اولین سنسور را تصحیح کرد. ولی روش اعمال اثر دما توسط دستگاه FWD، استفاده از آیین نامه دانمارک، با دمای استاندارد ۲۵ درجه سانتی گراد و تصحیح ضریب الاستیسیته لایه آسفالت (به جای اصلاح خیز در اولین سنسور) با این ضریب اصلاحی می‌باشد. بنابراین اختلاف در روش اعمال ضریب اصلاحی دما و همچنین مقدار دمای استاندارد، مهمترین عامل اختلاف نتایج بدست آمده از دستگاه FWD و آیین نامه آشتو می‌باشد.

۲- عامل دیگری که در نتایج بدست آمده مؤثر است، نحوه مدلسازی روسازی و بار ضربه ای وارده می‌باشد. با توجه به عدم وجود اطلاعات و داده های لازم از خصوصیات غیرخطی و ویسکوالاستیک مصالح غیرچسبنده و چسبنده به کار رفته در روسازی و با توجه به اینکه واقعاً مصالح کاربردی الاستیک خطی نمی باشند، خطاهایی به وجود می‌آید که با استفاده از تجهیزات آزمایشگاه مکانیک خاک، می توان اطلاعات لازم را در هنگام مدلسازی و کار با نرم افزارهای شبیه سازی و آنالیز روسازی، اخذ نمود و خطا را به طرز چشمگیری کاهش داد.

۳- وجود یک لایه بستر سخت در عمق کمتر از ۳ متر، شدیداً بر مقادیر افت و خیز در سنسورهای بیرونی تاثیر می‌گذارد. همچنین وجود سفره های آب زیر زمینی با سطح ایستایی بالا نیز باعث برگشت موجهای برشی منتقل شده، به سطح رویه روسازی و در نتیجه کاهش شدید مقادیر افت و خیز می‌گردد. نتیجه وجود این لایه‌ها، محاسبه ضریب الاستیسیته بسیار بالای بستر و نهایتاً طراحی ضخامت روکش کمتر از حد نیاز می‌باشد که دست پایین است. توصیه می‌شود مغزه‌هایی تا عمق ۳ متر (در صورت امکان تا عمق ۶ متر) در مقاطعی از روسازی اخذ شود تا بتوان تاثیر این عامل را نیز لحاظ نمود. در صورتیکه مقدار خیز در آخرین ژئوفون حدود ۲۵ میکرون ( یک میلی اینچ) بود، می توان از آن چشم پوشی نمود و آنرا وارد محاسبات نکرد؛ زیرا احتمالاً بستر سخت در عمق کم وجود داشته و یا اینکه سخت‌شدگی موضعی نظیر قلوه سنگ یا شن درشت، در موقعیت ژئوفون وجود دارد.

۴- وجود ترک خوردگیهای شدید رویه روسازی و انجام آزمایش نزدیک این درز و ترکها، همچنین آزمایش نزدیک شانه‌های خاکی کنار روسازی (به علت نقض فرضیه پیوستگی لایه‌های روسازی تا بینهایت در افق، در مدلسازی الاستیک خطی) باعث ایجاد خطا می‌شود. حداقل فاصله سنسورهای دستگاه FWD از نواحی ترک خورده رویه، ۱/۵ متر پیشنهاد می‌شود.

۵- در تئوری الاستیسیته، فرض می‌شود که حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی اتفاق می‌افتد، ولی در عمل ممکن

است این کرنشها در رویه و یا میان لایه آسفالت ایجاد شده باشند که با واقعیت تطابق نداشته و منجر به بروز خطا و غیر واقعی بودن نحوه مدلسازی شود.

۶- در فرایند محاسبه معکوس و استفاده از تکنیک حداقل سازی، با توجه به اینکه معادله اساسی حداقل سازی دارای چندین مینیمم محلی است، ممکن است ضریب الاستیسیته اولیه کاربردی اشتباه وارد شده باشد و مینیمم محلی بدست آمده، درست نباشد و نهایتاً ضرایب الاستیسیته اشتباه محاسبه شوند. با لحاظ نمودن مقادیر مدول اولیه صحیح و محدوده قابل قبول ضرایب و همچنین منظور نمودن حداقل نسبت ضرایب الاستیسیته لایه‌های روسازی، می توان از بسیاری خطاها، دوری جست.

۷- عامل دیگر، تیپ سازی در ضخامت روکش بدست آمده توسط نرم افزار می‌باشد. وجود یک مقطع ضعیف در مسیر طولانی راه باعث می‌شود کل روکش میانگین در آن مسیر، به مقدار قابل توجهی افزایش یابد و در نتیجه سرمایه گذاری بسیار بیشتری مورد نیاز باشد. در عمل نیز نمی‌توان برای فواصل بین نقاط آزمایش دستگاه FWD (حدود ۱۰۰ متر) ضخامت‌های متفاوت روکش اجرا نمود.

۸- تاثیر چرخهای کامیونهای عبوری از روسازی، انعطاف پذیر است ولی صفحه بارگذاری دستگاه FWD، یک صفحه فلزی صلب می‌باشد که یک صفحه لاستیکی زیر آن نصب شده است تا شرایط تاثیر کامیون شبیه سازی شود. با توجه به اختلاف توزیع تنش زیر صفحه صلب و زیر صفحه انعطاف پذیر، ممکن است مقادیر افت و خیز بدست آمده از FWD و کامیون مشابه یکدیگر نباشند که خود منشا خطاهای بسیاری است. طبق تحقیقات انجام شده خیز سطحی زیر صفحه صلب، ۷۹ درصد خیز سطحی زیر صفحه انعطاف پذیر، در شرایط مشابه بارگذاری است. بنابر این ضرایب الاستیسیته بیشتر از حد واقعی بدست می‌آیند و ضخامت روکش محاسباتی کاهش می یابد.

۹- خطاهای ناشی از عملیات اجرایی حین آزمایش افت و خیز ناشی از عدم منظور کردن دقیق ضخامت لایه‌ها، ترافیک عبوری وسایر پارامترها.

## ۲-۱-۲-۶- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده

دستگاه FWD برحسب نوع روسازی مورد ارزیابی، کاربردهای متفاوتی دارد. در روسازیهای آسفالتی، از این دستگاه برای تعیین موارد مختلفی شامل؛ تعیین ضریب الاستیسیته لایه‌های مختلف سیستم روسازی، بررسی کفایت سازه‌ای روسازی، تعیین حدود بارگذاری مجاز، تعیین عمر باقیمانده و طرح ضخامت روکش، استفاده می‌شود. در این بخش به بیان کاربردهای عملی از نتایج بدست آمده از دستگاه FWD پرداخته می‌شود.

### کاربرد عملی ۱؛ تعیین عدد سازه‌ای روسازی $(SN)^1$

برای تعمیر و نگهداری و بازسازی شبکه‌های قدیمی راه، بایستی شرایط موجود روسازی تعیین و مشخص شود. داده‌های جمع آوری شده، علاوه بر تعیین شرایط فعلی، باید برای ارزیابی تغییرات آتی سازه روسازی تحت عوامل محیطی و بارگذاری،

استفاده گردند. در فرایند جمع آوری داده‌ها، آزمایش‌های غیرمخرب به آزمایش‌های مخرب به علت عدم تخریب فیزیکی جسم راه و سرعت زیاد، ترجیح داده می‌شود. تفسیر داده‌های خیز سطحی به دست آمده از آزمایش دستگاه FWD، به عنوان هدفی برای تخمین سختی سازه‌ای روسازی به کار می‌رود. این دستگاه قابل اعتماد بوده و تقریباً بارگذاری واقعی وسایل نقلیه را شبیه سازی می‌کند.

در سطح پروژه، محاسبه معکوس ضریب الاستیسیته مصالح روسازی و ارائه اطلاعاتی از مشخصات مصالح، هدف می‌باشد. در سطح شبکه علاوه بر فرایند فوق بایستی ضخامت صحیح لایه‌های روسازی و روکش نیز تعیین گردد. هدف ایجاد یک رابطه مستقیم بین خیزهای اندازه‌گیری شده توسط FWD و مقاومت سازه‌ای روسازی می‌باشد. پارامتر SN، ظرفیت باربری روسازی را برای شرایط خاک بستر، ترافیک عبوری، قابلیت سرویس دهی نهایی و شرایط آب و هوایی خاک منطقه، تعیین می‌کند. ضرایب قشر، سهم هر لایه را در عملکرد سازه روسازی نشان می‌دهند که توابعی از ضریب الاستیسیته آزمایشگاهی مصالح (و نه ضریب الاستیسیته محاسبه معکوس شده)، هستند. راهنمای آشتو روش‌هایی را جهت محاسبه SN مؤثر روسازی موجود ارائه داده است که ضرایب قشر رویه و اساس با توجه به شدت خرابی رویه روسازی، تعیین می‌شود. چندین روش جهت تعیین SN روسازی موجود از داده‌های خیز روسازی به طور مستقیم پیشنهاد شده‌اند. ابتدا یک روش مکانیستیک پیشنهاد شده که در آن از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۳]:

$$SN = 13.47 - 6.47 \log(D_0) + 3.697(\log D_{900})$$

SN : عدد سازه‌ای کل روسازی

$D_0$  : خیز در زیر صفحه بارگذاری برحسب میکرون که برای دما اصلاح شده باشد.

$D_{900}$  : خیز در فاصله ۹۰۰ میلی متر از مرکز صفحه بارگذاری برحسب میکرون که برای بار استاندارد، تصحیح شده باشد.

یک روش تجربی بعد از روش مکانیستیکی فوق ابداع گردید و برای داده‌های جمع آوری شده در سه منطقه هنگ‌کنگ استفاده شد و رابطه زیر بدست آمد [۲۳]:

$$SN = 1.69 + \left( \frac{842.8}{D_0 - D_{1500}} \right) - \left( \frac{42.94}{D_{900}} \right)$$

روش دیگری برای تعیین SN که مناسب شرایط آب و هوایی آفریقای جنوبی است، ارائه شد. بدین منظور چندین روسازی با استفاده از تئوری الاستیک لایه‌ای و روش محاسبه معکوس تحلیل گردیدند. روش کاملاً تئوری و بدون انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام گردید. برای اعمال تغییرات مقاومت بستر و تأثیر آن بر  $SN_{sg}$  بدین گونه وارد محاسبه شد [۲۴]:

$$SN_{sg} = 3.51(\log CBR) - 0.85(\log CBR)^2 - 1.43$$

$$SN_c = \sum m_i a_i h_i + SN_{sg}$$

$SN_c$  : عدد سازه‌ای اصلاح یافته

$CBR$  : ضریب باربری کالیفرنای بستر برحسب درصد

$h_i$  : ضخامت لایه نام برحسب اینچ

نتیجه این گونه مدلسازی، کاهش SN مورد نیاز روسازی همراه با افزایش مقاومت بستر است. در این تحقیق از یک قانون تقریبی به نام قاعده  $\frac{2}{3}$  ایروین که در سال ۱۹۸۳ توسط وی پیشنهاد شده است، استفاده گردید [۲۴]. بدین صورت که تقریباً ۹۵ درصد خیزهای اندازه گیری شده رویه روسازی، تحت یک خط ۳۴ درجه زیر افق، توزیع می‌شوند. با این ساده سازی می‌توان فرض نمود که خیزهای سطحی اندازه‌گیری شده در فاصله ۱/۵ برابر ضخامت روسازی، برابر خیزهای بستر می‌باشند. با مقایسه خیز در فاصله ۱/۵ برابر ضخامت کل روسازی ( $D_{1.5HP}$ ) و خیز در مرکز صفحه بارگذاری، شاخص SIP تعریف شد.

$$SIP = D_0 - D_{1.5HP}$$

که در آن؛

SIP : شاخص سازه روسازی<sup>۱</sup>،

$D_0$  و  $D_{1.5HP}$  : خیزها تحت بار استاندارد ۴۰ کیلو نیوتن برحسب میکرومتر،

HP : کل ضخامت روسازی برحسب میلی متر.

$$SN = k_1 * SIP^{k_2} * H_p^{k_3}$$

که در آن؛

SN : عدد سازه‌ای برحسب اینچ

SIP : برحسب میلی‌متر

$K_3, K_2, K_1$  : ضرایب ثابت از جدول ۱۰، برحسب نوع رویه.

جدول ۱۰- ضرایب  $K_3, K_2, K_1$

| نوع رویه    | $k_1$  | $k_2$   | $k_3$  |
|-------------|--------|---------|--------|
| آب بند سطحی | ۰/۱۱۶۵ | -۰/۳۲۴۸ | ۰/۸۲۴۱ |
| بتن آسفالتی | ۰/۴۷۲۸ | ۰/۴۸۱۰  | ۰/۷۵۸۱ |

همچنین روابط مشابهی جهت تعیین مدول بستر بدین صورت پیشنهاد شده است [۲۴]:

$$SIS = D_{1.5Hp} - D_s$$

SIS : شاخص سازه‌ای بستر<sup>۲</sup>

$D_s$  : خیز در فاصله (mm) ۴۵۰ + ۱/۵ HP

$$E_{sg} = 10^{k_4} * SIS^{k_5} * HP^{k_6}$$

$E_{sg}$  : ضریب الاستیسیته بستر برحسب MPa

1. Structural Index of Pavement
2. Structural Index of Subgrade

$K_6, K_5, K_4$  : ضرایب ثابت از جدول ۱۱، برحسب ضخامت کل روسازی

جدول ۱۱- ضرایب  $K_6, K_5, K_4$

| $k_6$  | $k_5$  | $k_4$  | کل ضخامت روسازی              |
|--------|--------|--------|------------------------------|
| -۱/۹۰۳ | -۱/۲۳۶ | ۹/۱۳۸  | $HP \leq 380\text{mm}$       |
| -۱/۷۸۰ | -۱/۲۱۳ | ۸/۷۵۶  | $380 < HP \leq 525\text{mm}$ |
| -۲/۴۵۳ | -۱/۲۵۴ | ۱۰/۶۵۵ | $HP > 525\text{mm}$          |

همچنین راهنمای آشتو رابطه زیر را برای محاسبه SN از داده‌های خیز FWD پیشنهاد نموده است [۲۵]:

$$SN = 0.0045 * D * (E_p)^{\frac{1}{3}}$$

D : ضخامت روسازی روی بستر برحسب اینچ

$E_p$  : مدول مؤثر لایه‌های روسازی برحسب psi

برای روسازیهای با لایه تثبیت شده سیمانی (نیمه صلب)، رابطه پیشنهاد شده است [۲۳]:

$$SN = 6.45 - 3.676 * \log(D_0) + 3.727 * \log(D_{1500})$$

همچنین برای روسازیهای با اساس دانه‌ای:

$$SN = 6.96 - 0.196 * \sqrt{AREA - (450 * D_{1200})}$$

$$AREA = 25.4 [4D_0 + 6D_{200} + 5D_{300} + 3D_{450}]$$

قابل ذکر است که روابط فوق برای رویه‌های نازک با ضخامت کمتر از ۵۰ میلی متر، با خطای زیاد همراه است.

#### کاربرد عملی ۲؛ روش شارپ برای محاسبه معکوس ضرایب ارتجاعی لایه‌های روسازی

از بهار سال ۱۹۸۸، شارپ آزمایش‌های افت و خیز را برای ۸۰۰ روسازی مختلف تحت سرویس خود شروع نمود. در این روش، به کمک داده‌های خیز، ضریب الاستیسیته مصالح در محل، تخمین زده می‌شود. مراحل روش محاسبه معکوس در این کاربرد، عبارتند از [۲۶]:

- ۱- داده‌های اصلی؛ شامل مقاطع روسازی، داده‌های افت و خیز و دما،
  - ۲- قوانین محاسبه معکوس؛ شامل محدوده مدول لایه‌ها و مدلسازی سازه روسازی،
  - ۳- تهیه فایل ورودی محاسبه معکوس و آنالیز توسط برنامه MODULUS،
  - ۴- بدست آوردن نتایج محاسبه معکوس شامل مدول لایه‌ها و خطاها،
  - ۵- ارزیابی نتایج و بررسی خطاها.
- در کل با نرم افزار MODULUS بایستی تخمینی از ضرایب لایه‌ها، برای هر لایه غیر از بستر معرفی نمود. برای بستر فقط یک ضریب الاستیسیته اولیه لازم است. مراحل زیر در معرفی محدوده سختی لایه‌ها توسط شارپ به کار می‌روند:
- ۱- محدوده ضریب ارتجاعی لایه بتن آسفالتی بر پایه خصوصیات مصالح و دمای محل آزمایش

ضخامت تمام لایه‌های بتن آسفالتی با عمر یکسان و هر رویه تثبیت شده دیگر با هم جمع می‌شوند و مرکب  $h$  بدست می‌آید. مدول مرکب این لایه ترکیبی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{\text{مرکب}} = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{h_i}{h_{\text{مرکب}}} \right) E_i^{\frac{1}{3}} \right]^3$$

محدوده ضریب الاستیسیته بتن آسفالتی بین ۲۵ درصد مدول اولیه تا سه برابر آن تعیین شده است، به شرطی که بیشتر از سه میلیون psi نشود. حداکثر ضریب قشر بتن آسفالتی نیز، ۰/۴۵ تعیین شده است.

۲- ضریب ارتجاعی لایه‌های اساس و زیراساس:

برای مصالح اساس و زیراساس دانه‌ای غیر چسبنده، ضرایب و محدوده آن براساس جدول ۱۲، تعیین می‌شود:

جدول ۱۲- مقادیر ضرایب اولیه و محدوده قابل قبول ضریب ارتجاعی برای مصالح اساس و زیراساس غیرچسبنده [۲۶]

| نوع مصالح                                     | مدول اولیه، ksi (MPa) | محدوده مدول، ksi (MPa)               |
|-----------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| سنگ شکسته، شن و سرباره<br>} اساس<br>} زیراساس | ۵۰ (۳۴۵)<br>۳۰ (۲۰۵)  | ۱۵۰-۱۰۳۵ (۷۰-۷۰)<br>۱۰۰-۱۰۰ (۷۰-۶۹۰) |
| شن و خاک درشت دانه<br>} اساس<br>} زیراساس     | ۳۰ (۲۰۵)<br>۲۰ (۱۴۰)  | ۱۰۰-۱۰۰ (۷۰-۶۹۰)<br>۸۰-۵۰ (۳۵-۵۵۰)   |
| ماسه<br>} اساس<br>} زیراساس                   | ۲۰ (۱۴۰)<br>۱۵ (۱۰۵)  | ۸۰-۵۰ (۳۵-۵۵۰)<br>۶۰-۵۰ (۳۵-۴۱۵)     |
| شن و خاک ریز دانه<br>} اساس<br>} زیراساس      | ۲۰ (۱۴۰)<br>۱۵ (۱۰۵)  | ۸۰-۵۰ (۳۵-۵۵۰)<br>۶۰-۵۰ (۳۵-۴۱۵)     |

۳- ضریب ارتجاعی لایه بستر:

ضریب اولیه بستر از مدول مرکب<sup>۱</sup> تخمین زده شده برای فواصل شعاعی بزرگتر از شعاع مؤثر، حد فاصل روسازی و بستر در حباب تنش، بدست می‌آید. مدول مرکب، یک مقدار عددی است که نشاندهنده سختی کلی روسازی در یک فاصله شعاعی خاص می‌باشد و طی مراحل زیر محاسبه می‌گردد:

الف - محاسبه مدول مرکب روسازی برای تمام فواصل خارج از ۱۵۰ میلی متر صفحه بارگذاری، با استفاده از خیزهای اندازه گیری شده، به عنوان ورودی معادله خیز سیستم تک لایه‌ای بوسینسک:

$$E_{\text{مرکب}} = \frac{P_c * a_c^2 * (1 - \nu^2) * C}{\text{def} * r}$$

$P_c$ : تنش تماسی صفحه بارگذاری

$a_c$ : شعاع صفحه بارگذاری

$\nu$ : ضریب پواسن بستر (که ۰/۴ فرض می‌شود)

def: خیز اندازه‌گیری شده در فاصله شعاعی  $r$

$r$ : فاصله سنسور اندازه‌گیری خیز از مرکز بار

$C$ : ثابت خیز که از معادله زیر بدست می‌آید:

$$C = 1.1 * \log\left(\frac{r}{a_c}\right) + 1.15$$

ب- مقدار ضریب الاستیسیته اولیه بستر که برابر حداقل مقادیر مدول مرکب روسازی در سنسورهای مختلف دستگاه می‌باشد:

$$E = (E_{\text{مرکب}})_{\text{حداقل}}$$

پس از بدست آوردن ضخامت لایه‌ها و ضرایب ارتجاعی آنها از برنامه‌های محاسبه معکوس و یا سایر روش‌ها، بایستی سازه روسازی را مدل نمود. چون حداکثر تعداد لایه‌ها در ورودی برنامه‌هایی نظیر MODULUS محدود است (مثلاً چهار لایه)، بایستی دو یا چند لایه را با هم ترکیب نمود و در نهایت مقداری را برای ضریب پواسن لایه مرکب فرض کرد.

• قوانین مدلسازی لایه‌های مختلف

الف- بستر

بستر تثبیت شده با آهک، قیر یا سیمان به عنوان لایه اساس در نظر گرفته می‌شود. محدوده قابل قبول برای اعمال بسترهای سخت، حداکثر تا عمق ۶ متری سطح روسازی است.

ب- لایه‌های نازک

اگر ضخامت لایه بتن آسفالتی کمتر از ۳ اینچ (۷/۵ سانتیمتر) بود، مقدار ضریب ارتجاعی این لایه را می‌توان براساس مقادیر پیش فرض  $ksi$  ۱۵۰، ثابت در نظر گرفت. در صورتیکه یک لایه با ضخامت کمتر از ۲ اینچ (۵ سانتیمتر) زیر دال بتنی موجود باشد، ضریب این لایه حذف شده و این لایه با لایه زیرین، ترکیب می‌شود. در صورتیکه تعداد لایه بیش از چهار بود، بایستی قوانین زیر را در ترکیب لایه‌ها به کار برد.

۱- لایه‌های با مصالح دانه‌ای اساس و زیراساس مجاور، در صورتی که مصالح مشابه داشته باشند، با هم ترکیب می‌شوند. ضخامت کل لایه مرکب برابر مجموع ضخامت لایه‌های مجاور است.

۲- لایه‌های مجاور بتن آسفالتی با عمرهای متفاوت با هم ترکیب می‌شوند. ضخامت (روکش و آسفالت قدیمی)، ضریب

ارتجاعی و محدوده قابل قبول از فرمولهای  $h_{\text{مرکب}}$  و  $E_{\text{مرکب}}$  بدست می‌آید. در صورتیکه ضخامت مجموع لایه‌ها،

- کمتر از ۳ اینچ باشد، مقدار ضریب الاستیسیته برابر  $E_{\text{مرکب}}$  و ثابت فرض می‌شود.
- ۳- لایه‌های مجاور اساس و زیراساس تثبیتی با مصالح مشابه، ترکیب می‌شوند (مشابه لایه‌های بتن آسفالتی).
- ۴- لایه‌های مجاور اساس و زیراساس دانه‌ای، بدون داشتن مشابهت با هم ترکیب می‌شوند. مدول و ضخامت و محدوده قابل قبول ضریب، از فرمول مدولهای مرکب محاسبه می‌گردد.
- ۵- لایه‌های مجاور بستر و زیراساس با مصالح مشابه ترکیب می‌گردند. مثل زیراساس شنی و بستر شنی. مدول اولیه بستر در محاسبه معکوس به کار می‌رود.
- ۶- لایه‌های مجاور بتن آسفالتی و تثبیتی با قیر، با هم ترکیب می‌شوند. (رویه + اساس تثبیتی با قیر) استفاده از فرمولهای مدول مرکب توصیه می‌گردد.
- ۷- لایه‌های مجاور اساس و زیراساس تثبیتی با سیمان و همچنین تثبیتی با قیر با هم ترکیب می‌شوند. مثل اساس تثبیتی با سیمان و بستر تثبیتی با آهک که مشابه مورد (۱) با هم ترکیب می‌شوند.
- ۸- لایه‌های اساس و زیراساس غیر چسبنده در روسازیهای بتن سیمانی با هم ترکیب می‌شوند. ضخامت لایه مرکب، مجموع ضخامت لایه‌هاست.

در روش شارپ، فواصل زیر جهت آرایش سنسورها پیشنهاد شده است [۲۳]:

- سنسور شماره یک زیر صفحه بارگذاری،
  - سنسور شماره دو در فاصله ۲۰ سانتیمتر از مرکز بارگذاری،
  - سنسور شماره سه در فاصله ۳۰ سانتیمتر،
  - سنسور شماره چهار در فاصله ۴۵ سانتیمتر،
  - سنسور شماره پنج در فاصله ۶۰ سانتیمتر،
  - سنسور شماره شش در فاصله ۹۰ سانتیمتر،
  - سنسور شماره هفت در فاصله ۱۵۰ سانتیمتر.
- همانطور که ملاحظه می‌شود آرایش نامنظم سنسورها و تراکم بیشتر در ناحیه نزدیک بار جهت شناسایی بهتر حوضچه افت و خیز و لحاظ تغییرات آن، پیشنهاد شده است.

ضریب پواسن:

مقادیر ضریب پواسن تابع نوع مصالح مختلف، از جدول ۱۳، تعیین می‌شود:

جدول ۱۳- مقادیر قابل قبول ضریب پواسن لایه‌های مختلف روسازی [۲۶]

| نوع مصالح                                | ضریب پواسن | نوع مصالح                        | ضریب پواسن |
|------------------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| بتن آسفالتی                              | ۰/۳        | اساس و زیراساس تثبیت شده         | ۰/۲        |
| $E > 500 \text{ ksi} (3450 \text{ MPa})$ | ۰/۳۵       | آهک                              | ۰/۲        |
| $E < 500 \text{ ksi} (3450 \text{ MPa})$ | ۰/۳۵       | سیمان                            | ۰/۳۵       |
| اساس و زیراساس دانه‌ای                   | ۰/۱۵       | قیر                              | ۰/۳۵       |
| دال بتن سیمانی                           | ۰/۴۵       | سایر موارد (بستر تثبیت شده)      | ۰/۳۵       |
| بستر چسبیده                              |            | سایر موارد (دال بتنی گسیخته شده) | ۰/۳        |
|                                          |            | بستر غیر چسبیده                  | ۰/۳۵       |

ارزیابی نتایج آنالیز:

تمامی نتایج محاسبه معکوس، بایستی به دقت توسط یک مهندس آشنا به فرایند محاسبه معکوس، کنترل شود.

#### کاربرد عملی ۳؛ تعیین کفایت سازه‌ای بستر، عمر باقیمانده و طراحی ضخامت روکش به روش آشتو

یکی از جامع‌ترین روش‌های طرح روسازی راه، روش آیین نامه آشتو است. این روش حاصل آزمایش‌هایی است که بین سالهای ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۰ با هزینه بسیار گزاف در ایالات متحده آمریکا انجام شد. در این روش برای تبدیل مقادیر واقعی ضخامت لایه‌ها به عدد سازه‌ای  $(SN)^1$  به هر یک از لایه‌های روسازی ضریبی تخصیص می‌دهند که این ضریب رابطه تجربی بین عدد سازه‌های  $(SN)$  و ضخامت را بیان می‌کند. برای بدست آوردن ضخامت لایه‌های مختلف روسازی در این روش ابتدا  $SN$  محاسبه شده و سپس با استفاده از ضرایب لایه‌ها، ضخامت لایه‌های روسازی تعیین می‌گردند [۲۵].

اما در زمینه تعیین کفایت سازه‌ای روسازی موجود، عمر باقیمانده و طراحی ضخامت روکش به صورت معکوس نیز می‌توان از روش آشتو استفاده نمود. برای این امر مراحل زیر بایستی طی شود [۲۵]:

۱- محاسبه مدول برجهندگی بستر ( $M_R$ ) با استفاده از تغییر شکل روسازی زیر بار FWD

همانگونه که در بخش‌های قبلی در بخش محاسبات معکوس خطی - استاتیکی ذکر شد، آشتو از رابطه زیر برای محاسبه  $M_R$  استفاده می‌کند.

$$M_R = C \left( \frac{0.24p}{d_r r} \right)$$

که در آن:

$M_R$ : مدول برجهندگی بستر (بر حسب psi)

$C$ : ضریب تعدیل (مقدار این ضریب نباید بیشتر از ۰/۳۳ باشد)

$P$ : بار وارده در آزمایش غیرمخرب (بر حسب پوند)

$d_r$ : میزان تغییر شکل ایجاد شده در فاصله  $r$  از محل اعمال نیرو (بر حسب اینچ)

$r$ : فاصله شعاعی محل اعمال بار تا نقطه‌ای که تغییر شکل آن اندازه گرفته شده است (برحسب اینچ) و بایستی  $r \leq 0.7a_e$  باشد. در این رابطه مقدار  $a_e$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$a_e = \sqrt{\left[ a^2 + \left( D^2 \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2 \right]}$$

که در آن:

$a_e$ : شعاع حباب تنش در سطح مشترک روسازی و بستر (برحسب اینچ)

$a$ : شعاع صفحه اعمال بار FWD (برحسب اینچ)

$D$ : ضخامت کل لایه‌های روسازی بالای بستر (برحسب اینچ)

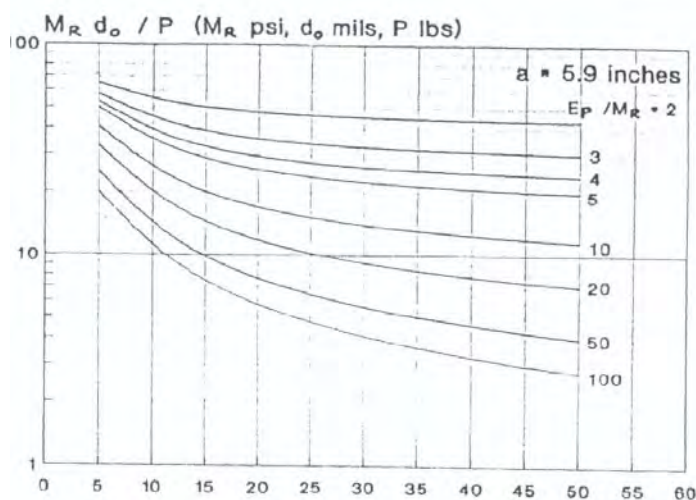
$E_p$ : مدول مفید همه لایه‌های روسازی بالای بستر (برحسب psi)

$M_R$ : مدول برجهندگی بستر (برحسب psi) می‌باشد.

با محاسبه  $M_R$ ، مدول مفید همه لایه‌های روسازی بالای بستر ( $E_p$ ) از رابطه زیر و با سعی و خطا در تک تک نقاط محاسبه می‌شود:

$$d_0 = 1.5pa \left\{ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\}$$

در این رابطه  $p$  فشار صفحه اعمال بار FWD (برحسب psi) و  $d_0$  خیز در سنسور مرکزی می‌باشد. نسبت  $E_p / M_R$  را می‌توان با استفاده از شکل ۲۵، بدست آورد.

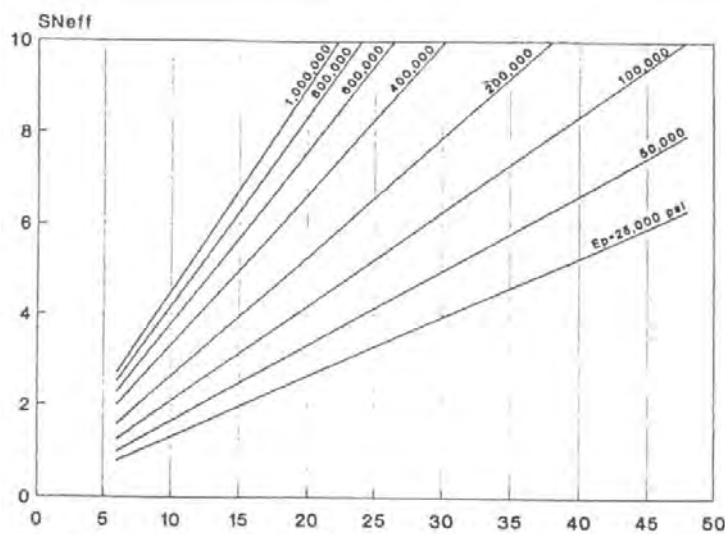


شکل ۲۵- نمودار تعیین نسبت  $E_p / M_R$

۲- محاسبه  $SN_{eff}$  موجود روسازی

در آیین نامه آشتو ۹۳ سه روش برای محاسبه عدد سازه‌ای مؤثر روسازی آسفالتی بیان شده است. روش اول استفاده از نتایج آزمایشات غیرمخرب، روش دوم محاسبه ضرایب لایه‌های روسازی با استفاده از برداشت وضعیت موجود آن و روش سوم استفاده از عمر خستگی باقیمانده روسازی می‌باشد. در اینجا فقط به روش اول اشاره خواهد شد. در این روش فرض بر اینست که ظرفیت باربری روسازی تابعی است از ضخامت و مقاومت لایه‌های بالای بستر، بر این اساس  $SN_{eff}$  از رابطه زیر، یا با استفاده از نمودار شکل ۲۶، محاسبه می‌شود:

$$SN_{eff} = 0.0045D^3\sqrt{E_p}$$



شکل ۲۶- نمودار تعیین  $SN_{eff}$  با استفاده از نتایج دستگاه FWD

۳- محاسبه  $SN$  مورد نیاز روسازی ( $SN_f$ )

با توجه به رابطه زیر؛

$$\log_{10} W_{8.2} = Z_R S_0 + 9.36 \log_{10} (SN + 1) - 0.2 + \left( \frac{\log \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} \right) + 2.32 \log(M_R) - 8.07$$

که در آن:

- $W_{8.2}$ : تعداد هم ارزیابی محور ساده ۸/۲ تنی کل عمر طرح
- $P_i$ : نشانه خدمت اولیه روسازی (معمولاً ۴/۲ انتخاب می‌گردد).
- $P_t$ : نشانه خدمت نهایی (برای راه‌های اصلی ۲/۵ در نظر گرفته می‌شود).
- $M_R$ : ضریب برجهندگی بستر
- $Z_T$ : انحراف معیار نرمال

- S : انحراف معیار کل (مطابق توصیه آیین نامه ۳۵/۰ در نظر گرفته می‌شود) می‌باشد، مقدار عدد سازه‌ای مورد نیاز روسازی با سعی و خطا مشخص می‌شود.

برای محاسبه SN مورد نیاز روسازی، باید محور استاندارد ۸/۲ تنی در طول دوره عمر بهره‌برداری و ضریب ارتجاعی بستر ( $M_R$ ) مشخص باشد. نکته مهم در اینجا این است که بر اساس توصیه آشتو بایستی ۳۳٪ از  $M_R$  بدست آمده از محاسبات قسمت اول در این فرمول وارد شود.

#### ۴- محاسبه عمر باقیمانده روسازی

با مشخص شدن SN موجود روسازی، میزان محور معادل استاندارد ( $W_{8.2}$ ) که روسازی قبل از اضمحلال قادر به تحمل آن است به کمک رابطه قسمت قبل تعیین می‌شود. سپس با کمک گیری از رابطه زیر عمر باقیمانده روسازی تعیین می‌شود:

$$EAL_n = EAL_1 \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

در این رابطه  $i$  ضریب رشد ترافیک،  $EAL_1$  مجموع محور هم ارزیابی سال اول بهره‌برداری و  $EAL_n$  مجموع محور هم ارز  $n$  سال اول بهره‌برداری از طرح می‌باشد. به این صورت که در رابطه فوق با مشخص بودن مجموع تردد محور هم ارز سال اول طرح و مجموع محور هم ارزی که روسازی قادر به تحمل آن می‌باشد،  $n$  که همان عمر روسازی است، محاسبه می‌گردد.

#### ۵- محاسبه ضخامت مورد نیاز روکش

با محاسبه SN مورد نیاز روسازی و SN موجود روسازی با استفاده از مفاهیم حاکم بر محاسبه SN و رابطه زیر، ضخامت روکش مورد نیاز قابل محاسبه می‌باشد.

$$SN_f - SN_{eff} = \frac{1}{2.5} (a_1 D_1)$$

که در آن  $a_1$  ضریب لایه روکش (معمولاً برابر ۴/۰) و  $D_1$  ضخامت روکش می‌باشد.

#### کاربرد عملی ۴؛ کاربرد FWD در بسترهای حین ساخت

ضریب الاستیسیته بستر یا ضریب عکس العمل بستر ( $k$ )، نقش بسیار مهمی در عملکرد روسازی دارد. این مدول بایستی حین ساخت روسازی مرتباً کنترل شود. بنابر این نیاز به روشی جهت کنترل این پارامترها وجود دارد. با استفاده از دستگاه FWD، خیزهای بستر را بعد از تراکم نهایی بدست می‌آورند. یکنواختی خیزها، معیار مناسبی برای یکنواختی بستر و درستی اجرای عملیات تراکم بوده و مقاطع ضعیف تشخیص داده می‌شوند. رابطه زیر بین ضریب الاستیسیته بستر و خیز در اولین سنسور بدست آمده است [۲۷]:

$$E_{sg} = 30670 * d_0^{-1.00234}$$

که  $E_{sg}$  برحسب MPa و  $d_0$  برحسب میکرون می‌باشد.

## ۲-۱-۳- آزمایش RWD

## ۲-۱-۳-۱- معرفی دستگاه

دستگاه RWD (چرخ غلتان افت و خیز سنج) یک ابزار نوآورانه برای اندازه‌گیری پیوسته تغییر شکل‌های روسازی محسوب می‌شود. اولین نمونه از این دستگاه در سال ۱۹۹۸ توسط اداره فدرال راه‌های آمریکا (FHWA) ساخته و آزمایش شد ولی تا به امروز تحقیقات سازمان یافته‌ای مانند برنامه‌های SHRP, NCHRP یا غیره برای بررسی جزئیات و تکمیل آن صورت نپذیرفته است. در همین راستا در ادامه، پیرامون دستگاه RWD از متون معتبر تحقیقاتی، بخش‌هایی استخراج شده است که این موضوع را تأیید می‌نماید.

- گزارش اداره کل حمل و نقل آمریکا در سال ۲۰۰۴ با موضوع "کاربرد آزمایش‌های غیرمخرب در ارزیابی روسازی فرودگاه"

... در ارتباط با دیگر ابزارهای اندازه‌گیری کننده تغییر شکل یا غیر تغییر شکل<sup>۱</sup> روسازی به شکل غیرمخرب، یک سری تحقیقات برای گسترش دستگاه RWD که قادر است پروفیل تغییر شکل روسازی را به صورت پیوسته در سرعتی معادل ۵۰ مایل در ساعت (۸۰ کیلومتر در ساعت) جمع‌آوری و ثبت کند، در حال انجام می‌باشد [۸].

- گزارش سال ۲۰۰۶ FHWA در ارتباط با مدیریت محافظت روسازی

امروزه تکنیک‌های جدید غیرمخرب با سرعت بالا برای کمک به بررسی و ارزیابی سازه‌ای و وظیفه‌ای<sup>۲</sup> روسازی به خدمت گرفته شده‌اند. دستگاه RWD که در حال گسترش می‌باشد، امکان ارزیابی سازه‌ای در روسازی آسفالتی را به صورت پیوسته و با سرعت بالا با استفاده از برداشت تغییر شکل‌های روسازی فراهم می‌آورد. این ابزار علاوه بر این کمک خواهد کرد تا ترک‌های محیطی از بالا به پایین و ترک‌های خستگی از پایین به بالا شناسایی شوند. سابق بر این از دستگاه GPR برای شناسایی مشکلات سازه‌ای روسازی استفاده می‌شده است [۲۸].

- گزارش سنتر 381 NCHRP با موضوع "کاربرد FWD" انتشار سال ۲۰۰۸

در مطالعات انجام گرفته توسط محققین مختلف، یک جایگزین مناسب برای دستگاه FWD مورد بررسی و کنکاش واقع شده است، زیرا دستگاه FWD می‌بایست هنگام عملیات ثابت بوده و پیامدهای عدم ایمنی آن قابل ملاحظه می‌باشد. در همین راستا اداره کل حمل و نقل و راه آمریکا به دنبال دستگاه‌های پیشرفته‌تر برای این منظور می‌باشند که یا تحت مطالعه هستند و یا در حال آماده سازی. برخی از این دستگاه‌ها شامل:

Rolling Dynamic Deflectometer (RDD) در دانشگاه آستین ایالت تگزاس آمریکا

Airfield Rolling Weight Deflectometer (ARWD) مربوط به شرکت دایناتست

Rolling Wheel Deflectometer (RWD) در انجمن تحقیقات کاربردی آمریکا FHWA

Rolling Deflection Tester (RDT) در اداره راه سوئد

High Speed Deflectograph (HSD) در شرکت مهندسی گرین وود و اداره راه دانمارک [۲۱]

- گزارش سنتر NCHRP 626 با موضوع "تکنولوژی غیرمخرب برای تعیین کیفیت ساخت روسازی آسفالتی" سال انتشار ۲۰۰۹

دستگاه Rolling Wheel Deflectometer که در حال حاضر تحت تحقیقات و گسترش می‌باشد، در دستگاه‌های ارزیابی در این گزارش در نظر گرفته نشده است. این گونه دستگاه‌ها در مقاطع تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته و آماده کاربرد سریع در برنامه‌های تضمین کیفیت<sup>۱</sup> (QA) نمی‌باشند [۲۹].

- گزارش تحقیقاتی SHRP2 با موضوع "برنامه‌ای برای انجام آزمایشات غیرمخرب با سرعت بالا برای ارزیابی طراحی و با زمان ساخت روسازی راه" سال انتشار ۲۰۰۹

بسیاری از کاربران، از دستگاه FWD برای ارزیابی سازه‌های روسازی استفاده می‌کنند ولی خواسته آنها این است که با کمک یک روش با سرعت بالاتر به برداشت پیوسته روسازی اقدام کنند. بعلاوه بسیاری از کاربران خواستار یک آزمایش غیرمخرب سریع هستند که نحوه انتقال نیرو بین اتصالات و ترک‌ها در روسازی‌های صلب را برای انجام طراحی مجدد روسازی در اختیار آنها قرار دهد. دستگاه FWD قادر است نحوه انتقال بار را ارزیابی کند ولی پروسه جمع‌آوری داده‌ها وقت‌گیر است. در همین راستا تیم‌های تحقیقاتی مختلف به دنبال دستگاه‌ها و روش‌های جایگزین برای این منظور می‌باشند. برای مثال دستگاه RDD<sup>۲</sup> در دانشگاه تگزاس یا دستگاه ARWD<sup>۳</sup> در شرکت دایناتست و یا دستگاه RWD<sup>۴</sup> در اداره حمل و نقل آمریکا و نیز دستگاه‌های دیگر در اروپا در حال مطالعه می‌باشند. لازم به ذکر است دستگاه‌های نام برده تحت تحقیقات بوده و هنوز مراحل نهایی و تکمیلی را طی ننموده‌اند [۳۰].

همانگونه که در بریده‌های متون معتبر علمی ملاحظه شد، دستگاه و آزمایش RWD نه تنها به صورت عملیاتی و تأیید شده برای ارزیابی روسازی آسفالتی و بتنی مورد استفاده قرار نگرفته است بلکه این دستگاه در مرحله مطالعاتی بوده و حتی در برنامه‌های تحقیقاتی بزرگی مانند SHRP2 و NCHRP نیز هنوز دستورالعملی برای آن ارائه شده است. لذا آنچه مسلم است کمبود اطلاعات در زمینه این دستگاه می‌باشد. ناگزیر در این بخش به بررسی نتایج و مطالعات انجمن تحقیقات کاربردی آمریکا<sup>۵</sup> (ARA) که بر روی نمونه پیش‌الگو<sup>۶</sup> از دستگاه RWD که در سال ۲۰۰۲ با حمایت مالی SBIR<sup>۷</sup> و FHWA انجام شده است، پرداخته می‌شود.

- معرفی دستگاه پیش‌الگو RWD متعلق به ARA

دستگاه RWD مطابق شکل ۲۷، از یک شبه تریلر تک محوره با محور دابل به همراه یک تیر آلومینیومی که بروی آن ۴ سنسور لیزری قرار گرفته‌اند، تشکیل یافته است. سه لیزر برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های بارگذاری نشده سطح روسازی و

---

1. Quality Assurance  
 2. Rolling Dynamic Deflectometer  
 3. Airfield Rolling Weight Deflectometer  
 4. Rolling Wheel Deflectometer  
 5. Applied Research Associates  
 6. Prototype  
 7. Small Business Innovation Research Program

چهارمین لیزر با اندکی فاصله از چرخ‌های دویل برای اندازه‌گیری حوضچه تغییر مکان در زیر محور تک ۱۸ kips به خدمت گمارده شده‌اند [۳۱].



شکل ۲۷- دستگاه RWD

این دستگاه به منظور اندازه‌گیری پیوسته خیز ساخته شده است. روسازی بوسیله یک تایر بادی به قطر ۷۶ سانتی‌متر که در عقب تریلر حمل می‌شود بارگذاری می‌شود. بار استاتیکی در این آزمایش از ۷۶/۳ کیلونیوتن تا ۸۹ کیلونیوتن متغیر است. سرعت کامیون حین آزمایش ۱۰ کیلومتر بر ساعت است و خیز میانگین در فواصل ۰/۳ متری اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه بر مبنای اصولی مشابه تیر بنکلمن کار می‌کند. این دستگاه از یک تیر تکیه‌گاهی به طول ۱۰ متر و چرخ بارگذاری در انتهای آن به همراه ۴ حسگر نوری که فاصله را تا سطح روسازی اندازه می‌گیرند، تشکیل یافته است [۳۱].

#### ساختار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری

انجمن تحقیقات کاربردی آمریکا مطابق شکل ۲۸، یک شبه تریلر به همراه لیزرها و تیر که بر روی آن تعبیه شده است را طراحی و ساخته است. اجزای این نمونه پیش‌الگو به شرح زیر می‌باشد:



شکل ۲۸- تریلر ساخته شده توسط انجمن تحقیقات کاربردی آمریکا

## الف- تریلر

این تریلر به صورت تک محوره با چرخ‌های دوبل به طول ۵۳ فوت بوده و بار محور تک آن براساس بار استاتیکی مقدار آبی که در آن قابل حمل است از ۱۸۰۰۰ تا ۲۴۰۰۰ پوند متغیر می‌باشد. این تریلر به گونه‌ای ساخته شده است که پایداری ایستایی آن بالا بوده و کمترین نوسان و تکان جانبی را دارد (تکان‌های موجود در این تریلر دارای فرکانس بسیار پایین ۱/۴۵ تا ۱/۸ هرتز می‌باشند).

## ب- تیر و چرخ‌ها

مقطع عرضی تیر ۲ اینچ در ۸/۵ اینچ می‌باشد. فاصله لیزرهای D و A، ۲۷ فوت بوده و ابعاد آنها به گونه‌ای انتخاب شده است که بیشترین صلبیت و پایداری را در مقابل لرزش‌های تریلر RWD فراهم آورد. این تیر در محل‌های مناسب دارای تکیه‌گاه است تا دچار خمیدگی و نوسانات قائم نشود. همچنین این تیر توسط عایق‌های حرارتی کاملاً پوشیده شده تا تغییر شکل تحت تغییرات دما نداشته باشد.

## پ - لیزرها

در دستگاه RWD، ۴ لیزر از نوع ۱۶ کیلوهرتز با حداکثر خروجی آنالوگ ۲۰۰۰ نمونه در ثانیه از نوع LMI-Selcom استفاده شده است. با این سیستم از لیزرها می‌توان با سرعت ۵۵ مایل در ساعت به ازای هر ۰/۴۸ اینچ، یک نمونه برداشت کرد. لیزرهای LMI-Selcom دارای چشمه ۱/۵ میلیمتری با قابلیت تخمین فاصله تا ۳۰۰ میلیمتر می‌باشند. وضوح این لیزرها تقریباً ۱۸ میکرون (۱ میکرون معادل ۰/۰۰۱ میلیمتر) با دقت ۰/۲ درصد می‌باشد.

## ت - سیستم جمع‌آوری داده‌ها، نرم‌افزار عملکردی و نرم‌افزار تحلیل داده‌ها

سیگنال‌های لیزر توسط برد جمع‌آوری داده‌ها که بروی یک کامپیوتر پنتیوم ۲ در داخل تریلر نصب است جمع‌آوری و ثبت می‌شوند. ARA نرم‌افزاری را طراحی کرده است که قادر است لیزرها را فعال کرده و فایل خروجی آنها را ساخته و در داخل حافظه کامپیوتر ذخیره نماید. برداشت‌های لیزر در تطابق با طول سنجی است که به سیستم ترمز ABS کامیون متصل می‌باشد. علاوه بر لیزرها و سیستم طول سنج، دستگاه RWD با استفاده از یک دماسنج مادون قرمز دمای سطح روسازی را حین برداشت‌های پیوسته این دستگاه، اندازه‌گیری می‌نماید. در نهایت، سیستم جمع‌آوری داده قادر است خروجی‌ها را از شتاب سنج نصب شده در بالای تیر آلومینیومی دریافت کند. شتاب سنج‌ها برای کنترل حرکت‌های تیر در حین آزمایش به کار گرفته می‌شود.

ARA همچنین نرم‌افزاری را برای پردازش داده‌های بدست آمده از لیزرها با استفاده از متدولوژی برخوردی فضایی<sup>۱</sup> (که در ادامه تشریح شده است) طراحی نموده است. بنابراین داده‌ها در همان سیستم کامپیوتری که جمع‌آوری شده‌اند مورد پردازش و تحلیل قرار گرفته و تغییر مکان‌های روسازی ارائه داده می‌شود.

## ۲-۳-۱-۲- تئوری آزمایش برای تعیین مدول الاستیسیته لایه‌ها

همانگونه که اشاره شده برای محاسبه تغییر مکان‌ها از مدل برخوردی فضایی استفاده می‌شود. که در این بخش به

تشریح آن پرداخته می‌شود.

اندازه‌گیری خیز یک نقطه مانند  $P_3$  در شکل ۲۹، با این دستگاه شامل دو مرحله است که در شکل تحت عنوان حالت‌های  $T_1, T_2$  مشخص شده است.

اولین گام در مشخص کردن این خیز اندازه‌گیری فاصله  $h$  یعنی فاصله بین سطح تغییر شکل نیافته روسازی در نقطه  $P_3$  و خطی است که با امتداد نقاط  $P_1$  و  $P_2$  مشخص می‌شود. این آنالیزها در زمان  $T_1$ ، یعنی زمانی که بار در نقطه  $P_4$  در  $۲/۷۴$  متری نقطه  $P_3$  قرار گرفته انجام می‌شود. با استفاده از تشابه مثلث‌ها،  $h$  محاسبه می‌شود. بنابراین در زمان  $T_1$  داریم:

$$h = A - 2B = C$$

که در آن  $C, B, A$  به ترتیب عبارتند از فواصل حسگرهای لیزر  $C, B, A$  تا سطح روسازی

گام بعدی مشخص کردن فاصله  $h'$  یعنی فاصله بین سطح روسازی تغییر شکل یافته در نقطه  $P_3$  و خطی است که با امتداد نقاط  $P_1$  و  $P_2$  مشخص می‌شود. در زمان  $T_2$  یعنی زمانی که بار در نقطه  $P_3$  است  $h'$  با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

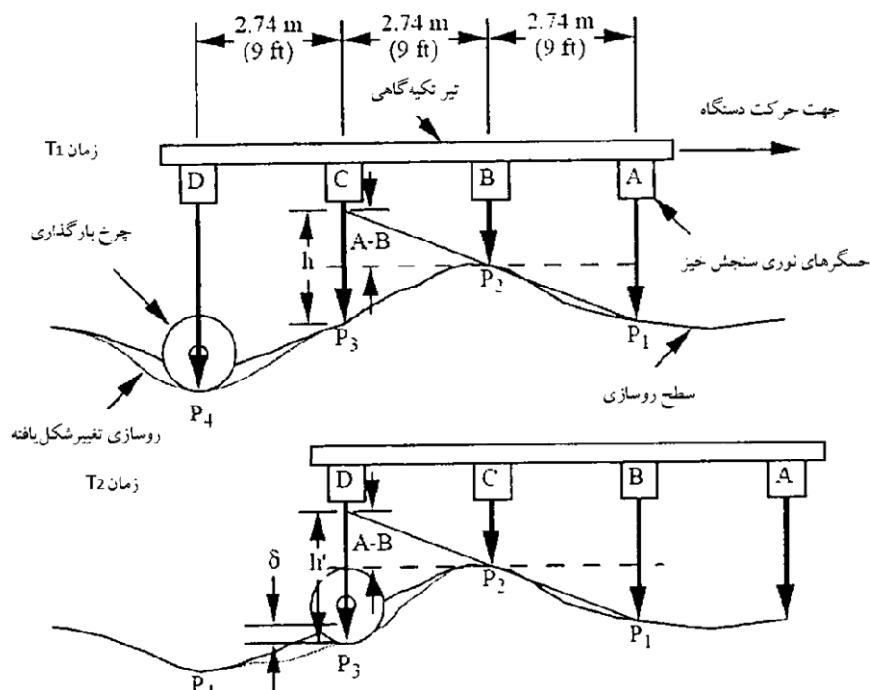
$$h' = B - 2C = D$$

در نهایت جابجایی قائم نقطه یعنی  $\delta$  با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\delta = h - h'$$

حسگرهای نوری با انتشار نور لیزر و محاسبه زمان رفت و برگشت، فاصله تا سطح روسازی را اندازه می‌گیرند. دقت آزمایش بستگی به قطر منفذ صادر کننده نور لیزر دارد.

طبق تحقیقات انجام شده نتایج بدست آمده از RWD با نتایج سایر تجهیزات غیرمخرب نظیر FWD مطابقت قابل قبولی دارند.



شکل ۲۹- نحوه اندازه‌گیری خیز در دستگاه RWD [۳۲]

## ۲-۱-۳-۳- موارد استفاده

با توجه به اینکه دستگاه RWD هنوز در مقیاس وسیع مورد آزمایش قرار نگرفته است و صرفاً در حال حاضر در حال تکمیل تحقیقات و بررسی بروی نمونه پیش‌الگوی آن می‌باشند، در ارتباط با موارد کاربرد و میزان صحت نتایج آن می‌بایست زمان بیشتری در اختیار داشت. در این بخش به اختصار پیرامون این موضوع پرداخته خواهد شد. آنچه به عنوان وظیفه و کاربرد اصلی دستگاه RWD مورد انتظار می‌باشد، در ۴ مورد زیر منعکس شده است:

- اندازه‌گیری تغییر مکان‌های روسازی از طریق یک کامیون در حال حرکت
- جمع‌آوری داده‌ها در حداقل سرعت ۵۰ مایل بر ساعت (۸۰ کیلومتر در ساعت)
- انجام اندازه‌گیری پیوسته خیز روسازی
- تولید نتایج مناسب برای کاربردهای مدیریت روسازی در سطح شبکه

## ۲-۱-۳-۴- روش کالیبراسیون

لیزرهای LMI- Selcom هر یک به صورت جداگانه در کارخانه مورد کالیبراسیون قرار گرفته می‌شوند. اما انجمن تحقیقات کاربردی (ARA) با کمک روش کالیبراسیون آب اقدام به کالیبره کردن این لیزرها با دو هدف نموده است:

- ۱- شناسایی و تعیین اختلاف نسبی در ارتفاع لیزرها از سطح
  - ۲- شناسایی و تعیین ضریب مقیاس نسبی هر یک از لیزرها برای دقت بالا
- در روش کالیبراسیون آب می‌بایست چهار ظرف متصل به یکدیگر پر از آب شده و در زیر هر یک از لیزرها قرار داده شود. (در شرایطی که کامیون و تریلر ساکن است) به علت این که ظرف به یکدیگر مرتبط هستند سطح آب در همه آنها در یک تراز قرار دارد.
- در روش برخوردی فضایی (Spatially Coincident) فرض می‌شود که تمام لیزرها در یک خط مستقیم قرار گرفته‌اند. بنابراین در روش کالیبراسیون آب با قرائت هر یک از لیزرها می‌توان اختلاف دقیق هر یک را از لحاظ ارتفاع تا سطح آب بدست آورد. علاوه بر این با تغییر سطح آب با بالابردن و پایین آوردن آن می‌توان میزان تغییر در قرائت‌های لیزرها را مشاهده نمود و با مقایسه تغییرات در چهار سنسور لیزر ضریب مقیاس نسبی را نیز تعیین نمود. بدین ترتیب می‌توان با روش کالیبراسیون آب، لیزرها را جداگانه و با یکدیگر کالیبره نمود.

## ۲-۱-۳-۵- روش انجام آزمایش

این دستگاه به منظور اندازه‌گیری پیوسته خیز ساخته شده است. روسازی بوسیله یک تایلر بادی به قطر ۷۶ سانتی‌متر که در عقب تریلر حمل می‌شود بارگذاری می‌شود. بار استاتیکی در این آزمایش از ۷۶/۳ کیلو نیوتن تا ۸۹ کیلو نیوتن متغیر است. سرعت کامیون حین آزمایش ۱۰ کیلومتر بر ساعت است و خیز میانگین در فواصل ۰/۳ متری اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه بر مبنای اصولی مشابه تیر بنکلمن کار می‌کند. این دستگاه از یک تیر تکیه‌گاهی به طول ۱۰ متر و چرخ بارگذاری در انتهای آن به همراه ۴ حسگر نوری که فاصله را تا سطح روسازی اندازه می‌گیرند، تشکیل یافته است.

## ۲-۱-۳-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده

انجمن تحقیقات کاربردی آمریکا (ARA) در راستای اعتبار سنجی نتایج بدست آمده از دستگاه پیش الگوی ساخت این انجمن، اقدام به برداشت نتایج از راه استالی (Staley Road) در دو بخش روسازی ضخیم و روسازی نازک نموده است. براساس این تحقیق میدانی، نتایج و جمع‌بندی ذیل قابل بیان می‌باشد [۳۱].

۱. عبورهای چندگانه دستگاه RWD در روزهای مختلف از مقاطع یکسان روسازی، نتایجی را بدست آورد که از لحاظ بزرگی معقول بوده و نشان دهنده قابلیت تکرارپذیری نسبتاً خوب برای این دستگاه می‌باشد. RWD قادر است تغییرات سختی روسازی را براساس تغییرات دمایی در روزهای مختلف و زمان‌های مختلف در یک روز تشخیص دهد.

۲. نتایج RWD به خوبی با تغییر شکل‌های بدست آمده از دستگاه شتاب‌سنج که در داخل لایه بتن آسفالتی کار گذاشته شده بود، مقایسه شد. این در حالی بود که نتایج RWD در سطح پایین‌تری از مطابقت و مقایسه با نتایج FWD قرار گرفت. دلیل این امر می‌تواند تفاوت در دمای روسازی در روزهای آزمایش FWD و RWD و نیز تفاوت حوضچه تغییر شکل ایجاد شده در دو حالت ضربه‌ای و بار چرخ متحرک باشد.

۳. نمونه پیش الگو RWD از لحاظ ساختاری دارای محدودیت برای اندازه‌گیری مستقیم تغییر شکل‌های مرکزی بار چرخ‌ها می‌باشد (بین چرخ‌های دوبل). در این نمونه، لیزر قرار گرفته ۱۰/۹ اینچ جلوتر از خط مرکز محور بار می‌باشد. در ترکیب با تأخیر تغییر شکل حداکثر (Peak)، این دستگاه بین ۱۶ تا ۱۸ اینچ جلوتر از تغییر شکل حداکثر را توسط سنسور لیزر خود اندازه‌گیری می‌کند. این مسئله در تغییر شکل‌های کوچک‌تر تأثیرگذار بوده و اختلاف کمتری بین روسازی‌های با سختی متفاوت حاصل می‌شود. بنابراین در همین جا می‌بایست اشاره نمود که این مسئله به عنوان یک ضعف و محدودیت دستگاه پیش الگو RWD بوده و می‌بایست در تحقیقات بعدی در تکمیل این دستگاه مدنظر واقع شود.

۴. نتایج RWD نسبت به عواملی حساس است که این عوامل در تغییر شکل‌های بدست آمده از FWD تأثیری ندارند. این عوامل شامل عادات رانندگی (سرعت یکنواخت و حداقل نمودن اصلاحات تغییر مسیر ناگهانی)، بافت روسازی و همواری راه می‌باشد.

۵. طرح‌های تکمیلی بعدی این دستگاه می‌بایست شامل سیستمی برای اندازه‌گیری مستقیم تغییر شکل زیر بار چرخ با دقت معقول باشد. همچنین دستگاه می‌بایست قابلیت استفاده تجاری و عمومی برای بهره‌برداری مستقیم در ارزیابی سازه‌ای روسازی را کسب نماید.

## ۲-۱-۳-۷- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده

FWD در تحلیل‌های سطح پروژه به عنوان یک آزمایش و روش استاندارد برای ارزیابی پاسخ‌های سازه‌ای روسازی تأیید شده است. در دستگاه FWD، در حالت استاتیکی، یک باردینامیکی به روسازی داده شده و تغییر شکل‌های حادث شده در روسازی با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری می‌شوند. در مقابل در دستگاه RWD، حوضچه تغییر شکل بدست آمده در اثر حرکت یک بار محوری بر روی روسازی بدست می‌آید. در نمونه پیش الگو حال حاضر از دستگاه RWD، اندازه‌گیری فقط محدود به

یک تغییر مکان منفرد (قدری جلوتر از بار چرخ) و نه حوضچه کامل تغییر شکل می‌شود. نتایج بدست آمده با دقتی که در دستگاه FWD وجود دارد، نیستند، اما با توجه به قابلیت تکرار پذیری و دقت کافی و نیز مزیت‌های دیگری مانند اندازه‌گیری پیوسته، این دستگاه برای استفاده در سطح شبکه نیز مناسب به نظر می‌رسد.

برخی از تفاوت‌های بین تغییر شکل‌های بدست آمده از FWD و RWD و نیز تجهیزات آنها در زیر آمده است:

۱. ضربه در مقایسه با بار متحرک: براساس خواص ویسکوالاستیک و ماند<sup>۱</sup> مصالح روسازی، بارهای یکسان در FWD و RWD ممکن است حوضچه‌های تغییر شکل متفاوتی را از لحاظ شکل و بزرگی تولید کند. در دستگاه FWD، یک بار قائم با فرکانس ثابت در عمق، بر روسازی ضربه زده در حالیکه در دستگاه RWD، یک بار افقی و عمودی مرکب که فرکانس آن در عمق کاهش می‌یابد بر روسازی اعمال می‌شود.

۲. در دستگاه RWD، با استفاده از تایرهای لاستیکی زوج که در فاصله چند اینچ از یکدیگر قرار گرفته‌اند، بار مورد نظر به روسازی وارد می‌گردد. تصویر چرخ‌های زوج کاملاً بیضوی هستند. در دستگاه FWD، از یک صفحه دایره‌ای منفرد برای انتقال بار به روسازی استفاده می‌شود. این امر باعث تأثیر در شکل حوضچه تغییر مکان شده ولی این تأثیر چندان زیاد نیست.

۳. در FWD، نوعاً فقط تغییر مکان‌های حداکثر در هر سنسور ذخیره می‌شود، حتی زمانی که در سنسورهای بیرونی‌تر حداکثر مقدار در آنها همزمان حاصل نشود (به دلیل انتشار پالس تغییر مکان) تغییر مکان‌های حداکثر برای تشکیل یک حوضچه تغییر مکان منفرد که هرگز وجود خارجی ندارد، در نظر گرفته می‌شود. این در حالیست که در دستگاه RWD حوضچه تغییر مکان واقعی در لحظه هنگام عبور وسیله نقلیه از روسازی بدست آورده می‌شود.

۴. محل حداکثر تغییر شکل و تقارن: در دستگاه FWD حداکثر تغییر شکل درست در زیر صفحه بارگذاری رخ می‌دهد و حوضچه تقریباً متقارن است. در دستگاه RWD حداکثر تغییر مکان نوعاً چند اینچ عقب‌تر از محل بار چرخ واقع شده و حوضچه تغییر شکل پهن‌تر خواهد بود.

۵. برنامه‌های آزمایش FWD، نیازمند سقوط یک وزن مشخص و معین از فاصله معین برای یک یا چند مرتبه بر روی روسازی می‌باشند. زمانی که یک جرم مورد نظر از یک ارتفاع معین در مکان‌های متعدد در طول راه سقوط می‌کند، تنها تغییری که به تنهایی بر روی بار اندازه‌گیری شده تأثیر می‌گذارد، سختی روسازی است. در دستگاه RWD، بار بر روی سطح روسازی هنگامیکه تریلر در اثر ناهمواری‌های راه بالا و پایین می‌رود در طول بار تغییر می‌کند. بنابراین بار واقعی اعمال شده به روسازی با استفاده از RWD در مقایسه با بار نسبتاً ثابت FWD تغییر بیشتری می‌کند و این موضوع باعث امکان تغییر تغییر شکل، به مقداری بزرگتر در یک مقطع مورد نظر می‌شود.

## ۲-۱-۴- تناوب مکانی انجام آزمایش‌های افت و خیز روسازی

هر چند از آزمایش‌های غیرمخرب روسازی هم در سطح شبکه و هم در سطح پروژه استفاده می‌شود ولی فرکانس و تواتر آزمایش‌ها در سطح شبکه بسیار کمتر از فرکانس آزمایش‌ها در سطح پروژه است. در راستای همین موضوع، استاندارد

1. Inertial

ASTM-D4695 سه نوع سطح را معرفی می‌کند که در هر یک برحسب هدف و خواسته مد نظر، مکان‌های آزمایش و فرکانس آنها را ارائه می‌گردد. پیش از پرداختن به سطوح اشاره شده لازم است مقدمه‌ای پیرامون شبکه روسازی‌ها ارائه شود. اولین گام در بحث سیستم مدیریت روسازی، شناسایی و تعریف شبکه است. برخی از عوامل که برای تعیین شبکه‌های گوناگون باید در نظر گرفته شوند عبارتند از؛ کاربری، منابع تأمین مالی و حداقل استانداردهای بهره‌برداری. پس از آنکه شبکه‌ها مشخص گردید، آنها را به شاخه‌ها و قطعه‌ها تقسیم می‌کنند. یک شاخه به قسمتی از یک شبکه اطلاق می‌شود که به سهولت قابل شناسایی باشد؛ نظیر یک خیابان یا باند پرواز. یک شاخه را به یک یا چند قطعه یکنواخت‌تر تقسیم می‌کنند تا مدیریت قادر باشد وظایف خود را در سطوح شبکه و پروژه بانجام رساند. قطعات را می‌توان براساس موقعیت جغرافیایی آنها در داخل شبکه یا براساس هر عامل دیگری که مناسب تشخیص داده شود طبقه‌بندی نمود.

از آنجایی که یک شاخه نوعاً به یک واحد بزرگ در شبکه روسازی اطلاق می‌شود، در سرتاسر طول یا سطح خود الزاماً دارای ویژگی‌های یکسانی نخواهد بود. به همین علت برای مقاصد مدیریت شاخه‌ها را به اجزاء کوچکتری تحت عنوان قطعه تقسیم می‌کنند. یک قطعه کوچکترین واحد مدیریتی از لحاظ انتخاب و کاربرد عملیات ترمیم و نگهداری است. هر شاخه حداقل از یک قطعه و در صورتیکه ویژگی‌های روسازی در طول شاخه تغییر کند از چندین قطعه تشکیل می‌شود. عواملی که باید بهنگام تقسیم یک شاخه به قطعات در نظر قرار گیرد عبارتند از: سازه روسازی، ترافیک، تاریخچه ساخت، رتبه (یا طبقه‌بندی عملکردی) روسازی، تأسیسات زهکشی و شانه‌بندی و وضعیت روسازی [۳۳]. بدین ترتیب با آشنایی با مفهوم قطعه روسازی می‌توان به تشریح سطوح تناوبی استاندارد ASTM پرداخت.

#### • سطح I

این سطح برای تعیین یک بررسی کلی از وضعیت روسازی (که معمولاً در سطح شبکه خواهد بود) و ایجاد درکی از وضعیت عمومی آن براساس تعداد محدودی آزمایش تعریف می‌شود. در این سطح می‌بایست به ازای هر ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر (۵۰۰ تا ۱۵۰۰ فوت) آزمایش‌ها صورت گیرد که البته این مقدار به شرایط ویژه روسازی بستگی دارد. ولی حداقل می‌بایست بین ۵ تا ۱۰ آزمایش در هر قطعه روسازی که دارای ویژگی یکسان است برای تعیین آماری یک نمونه انجام پذیرد. برای روسازی‌های آسفالتی، در شرایط حداقلی، می‌بایست بارگذاری‌ها در بخش بیرونی مسیر عبور چرخ‌ها<sup>۱</sup> انجام گیرد [۳۴].

#### • سطح II

این سطح برای تحلیل‌های جزئی‌تر روسازی، برای مثال، برای طراحی روکش یا ضخامت آسفالت بازیافتی تعریف می‌شود. در این سطح می‌بایست به ازای هر ۲۵ تا ۲۰۰ متر (۱۰۰ تا ۵۰۰ فوت) آزمایش‌ها صورت گیرد، که البته این متر از به شرایط ویژه روسازی بستگی دارد. ولی حداقل می‌بایست بین ۱۰ تا ۲۰ آزمایش در هر قطعه روسازی که دارای ویژگی یکسان است برای تخمین آماری یک نمونه انجام پذیرد. برای روسازی‌های آسفالتی، در شرایط حداقلی می‌بایست بارگذاری‌ها در خط بیرونی مطابق شکل قبل انجام گیرد [۳۴].

#### • سطح III

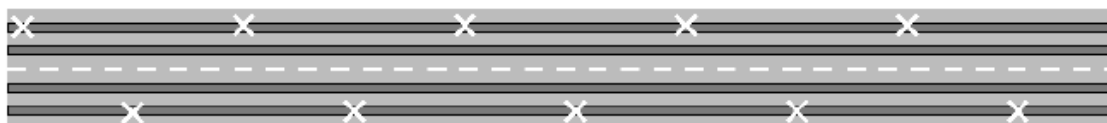
این سطح برای تحلیل‌های خاص و بسیار دقیق روسازی برای مثال مانند شناسایی محل‌هایی در روسازی که دارای

تغییر شکل‌های زیاد هستند، تعریف می‌شود. در این سطح می‌بایست به ازای هر ۳ تا ۲۵ متر (۱۰ تا ۱۰۰ فوت) آزمایش‌ها صورت گیرد که این مقدار البته به شرایط ویژه روسازی بستگی دارد. برای روسازی‌های آسفالتی می‌بایست بارگذاری‌ها در هر دو خط صورت پذیرد [۳۴].

در ادامه به ذکر برخی جزییات در ارتباط با تناوب‌های زمانی و مکانی تجهیزات اندازه‌گیری کننده افت و خیز مانند؛ FWD، RWD و تیر بنکلمن اشاره خواهد شد.

#### انتخاب مسیر جهت انجام آزمایش افت و خیز

۱- برای جاده‌های دو بانده منفرد ماشین رو، آزمایش افت و خیز می‌تواند در یک باند و بنابراین در یک جهت انجام شود، یا در هر دو باند و موقعیت‌های بکار برده شده در هر دو جهت بصورت تناوبی باشد. این نوع پوشش هنگامیکه حجم ترافیک در هر باند تقریباً یکسان است، مفید می‌باشد. شکل ۳۰، یک مثال از حالت تناوبی موقعیت‌ها را نشان می‌دهد ولی این روش ممکن است در هنگام اجرا ایمن نباشند [۲۰].



شکل ۳۰- مسیر انجام آزمایش افت و خیز

۲- برای جاده‌های چند بانده دو تایی ماشین رو، می‌بایست حداقل در باند بارگذاری سنگین تر (باند کندرو) آزمایش افت و خیز انجام گردد. دیگر باندها می‌تواند در موقعیت‌های خاصی جهت تشریح نیازمندیهای ویژه، مثل مقایسه باند با بارگذاری سنگین تر با دیگر باندهای با بارگذاری کمتر، اندازه‌گیری شوند [۲۰].

۳- هنگامی که تفاوت عمده‌ای در ساختار یا حجم ترافیک بین باندها وجود داشته باشد، همه باندهای سایت آزمایش، باید در موقعیت‌های طولی یکسان جهت استفاده مناسب و مقایسه معنی‌دار اندازه‌گیری شده باشد [۲۰].

#### انتخاب خط طولی جهت اندازه‌گیری‌های افت و خیز

اندازه‌گیری‌های افت و خیز ممکن است بین مسیر چرخ‌ها، در نزدیکی مسیر چرخ یا در هر دو مسیر چرخ‌ها انجام شود. از مزایای اندازه‌گیری بین مسیر چرخ‌ها این است که [۳۵]:

- روسازی اولیه بدون ترافیک می‌تواند اندازه‌گیری شود، چنانکه حالت اولیه عمر روسازی می‌تواند از آن استنتاج گردد. هر چند که ممکن است گذشت زمان تغییراتی را در خصوصیات روسازی بوجود آورده باشد.
- این قسمت از روسازی در معرض "گودافتادگی مسیر چرخ‌ها"<sup>۱</sup> نمی‌باشد، و بدلیل اینکه شکل تماس با صفحه بارگذاری FWD می‌بایست یکسان باشد، مناسب است.

از معایب روش اندازه‌گیری بین مسیر چرخ‌ها این است که این اندازه‌گیری‌ها تأثیر کمی از بار چرخ می‌پذیرد یا میزان تأثیری که ترافیک بر روی خصوصیات روسازی می‌گذارد را به حساب نمی‌آورد.

از مزایای اندازه‌گیری در نزدیکی مسیر چرخ این است که:

- اگر مسیر عبور چرخ خیلی به لبه روسازی نزدیک باشد، تصحیحات تأثیر لبه‌ای برای محاسبات کرنش لازم می‌باشد. هنگامیکه افت‌وخیزها در چنین شرایطی اندازه‌گیری شده باشند، مقادیر آنها بزرگتر از حالت "بین مسیر چرخ‌ها" بدست می‌آید، زیرا تأثیر لبه روسازی در نظر گرفته شده است. اگر برنامه کامپیوتری چند لایه‌ای جهت محاسبات معکوس سختی لایه‌ها استفاده شده باشد، اثر لبه، بوسیله برنامه در نظر گرفته نخواهد شد و سختی‌های محاسبه شده سختی‌های مؤثر خواهند بود نه سختی‌های واقعی.
  - اندازه‌گیری‌های سطحی در ناحیه بارگذاری شده روسازی برداشت شده است.
- از معایب آزمایش افت‌وخیز در نزدیکی مسیر چرخ‌ها این است که [۳۵]:
- اگر مسیر چرخ خیلی به لبه روسازی نزدیک باشد، ممکن است مشکلاتی از لحاظ انجام آزمایش رخ دهد. مثلاً ممکن است، یک لاستیک تریلر دستگاه FWD در قسمت شانه راه قرار گیرد.
  - اگر روسازی در نزدیکی مسیر عبور چرخ، در زمان انجام آزمایش، ترک خورده باشد، FWD و عمر باقیمانده روسازی براساس سختی اولیه لایه روسازی محاسبه می‌شود که دارای خطاست.
- مزایای آزمایش در امتداد هر دو باند عبارتند از:
- افت‌وخیزهای اندازه‌گیری شده و مدول سختی‌های محاسبه شده هر دو باند می‌تواند با هم مقایسه گردد.
  - نتایج این مقایسه می‌تواند در نشان دادن اطلاعاتی درباره عمر باقیمانده روسازی مؤثر باشد.
- معایب آزمایش در امتداد هر دو باند این است که:
- هزینه و زمان (تأخیر ترافیک) آزمایش زیاد خواهد شد.

#### تعداد نقاط آزمایش در هر قطعه روسازی

در دستورالعمل تشخیص تغییرات کاسه‌های افت‌وخیز اندازه‌گیری شده در یک مقطع معین از جاده، ویژگی‌های زیر می‌بایست برآورد گردد [۳۵]:

- ۱- معمولاً کمترین نقاط آزمایش در هر مقطع فرعی ۱۲ نقطه می‌باشد. یک مقطع فرعی، یک قطعه از جاده است که همان شکل ساختار روسازی و همچنین همان ظرفیت تحمل بار در جهت طولی را دارد. معمولاً یک طرح تعمیر و نوسازی یکسان برای تمام یک مقطع فرعی تعیین می‌شود. زمانیکه آزمایش در سطح پروژه انجام گرفته است، اندازه‌گیری‌های کافی لازم است در طول جاده، انجام گرفته باشد تا تقسیم بندی مقطع‌های فرعی هموزن (هم جنس) امکان پذیر باشد.

نقاط آزمایشگاهی در هر مقطع فرعی در فراهم ساختن مبانی آماری برای تصمیم‌گیری‌ها لازم هستند.

۲- جهت بررسی در سطح پروژه فاصله‌های طول نقاط آزمایش نبایست بیشتر از ۱۰۰ متر باشند. اگر تغییرات در امتداد جاده بزرگ باشد، فاصله بین نقاط آزمایش می‌تواند کوتاه‌تر از فاصله بین مقطع‌های فرعی یکسان جدا شده در نظر گرفته شود.

## ۵-۱-۲- بررسی مزایا و معایب هر یک از آزمایش‌های تعیین افت و خیز

### تیر بنکلمن

جدول ۱۴- مزایا و معایب تیر بنکلمن

| تیر بنکلمن                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مزایا                                                                                                                                                                                                | معایب                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>سادگی در ساخت دستگاه</li> <li>ارزان بودن</li> <li>کالیبراسیون ساده و ارزان</li> <li>آسانی در حمل و نقل و جابجایی</li> <li>عدم نیاز به تخریب روسازی</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>ناتوانی در تعیین شکل و ابعاد گودی افت و خیز</li> <li>سرعت پایین دستگاه در هنگام انجام آزمایش</li> <li>لازم است اطمینان حاصل شود که تکیه‌گاه‌های جلو در گودی افت و خیز قرار گرفته باشند.</li> <li>دشواری انجام آزمایش</li> </ul> |

### دستگاه FWD و HWD

جدول ۱۵- مزایا و معایب FWD و HWD

| HWD و FWD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مزایا                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>سرعت بالای انجام آزمایش ( ۶۰ آزمایش در روز)</li> <li>عدم نیاز به تخریب روسازی</li> <li>توانایی شبیه‌سازی دقیق بار چرخ وسایل نقلیه عبوری</li> <li>توانایی وارد نمودن بارهای سنگین بر روسازی‌ها مطابق با طرح</li> <li>FWD ها نسبت به سایر تجهیزات غیرمخرب بهتر می‌توانند بار ناشی از حرکت چرخ وسایل نقلیه را شبیه‌سازی کنند (مخصوصاً در مدل‌های دو جرمی)</li> <li>توانایی اندازه‌گیری خیز در نقاط مختلف و رسم حوضچه خیز</li> <li>توانایی تغییر در میزان بار، تغییر در چیدمان سنسورها و همچنین پیش بارگذاری استاتیکی نسبتاً کم</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>باتوجه به اینکه رابطه بار-تغییر شکل در روسازی‌های آسفالتی غیرخطی می‌باشد، مقدار بار وارده بر نتایج آزمایش تأثیر دارد. یعنی به ازای بارهای متفاوت ضرایب برجهندگی مختلفی بدست می‌آید، که معمولاً از ضرایب تصحیح بار استفاده می‌کنند.</li> <li>پالس خیز ایجاد شده توسط این دستگاه تندتر از پالس خیز ناشی از عبور وسایل نقلیه است، یعنی زمان بارگذاری کوتاه‌تر بوده و فرکانس بارگذاری FWD بیشتر است. با استفاده از سیستم دو جرمی بارگذاری که در مدول کوآب مورد استفاده قرار می‌گیرد، تا حدودی این مشکل برطرف شده است.</li> <li>شتاب‌های ایجاد شده در روسازی توسط FWD حدوداً ۱۰ برابر شتاب‌های واقعی وسایل نقلیه است.</li> <li>هیچ راه حل تحلیلی مستقیمی برای تفسیر داده‌های خروجی FWD وجود ندارد و باعث شده که روش‌ها و تکنیک‌های تکراری به وجود بیایند که خود ممکن است شبیه‌سازی غلط یا خطاهای عملیات ریاضی را در برداشته باشد.</li> <li>نیاز به توقف در فواصل معین</li> </ul> |

## دستگاه RWD

جدول ۱۶- مزایا و معایب RWD

| RWD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مزایا                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• امکان برداشت داده در سرعتی معادل سرعت حرکت دستگاه در بزرگراه‌ها (حدود ۷۰ کیلومتر در ساعت)</li> <li>• افزایش ایمنی در هنگام انجام آزمایش به شکل کاملاً چشمگیر در مقایسه با روش‌های دیگر مانند FWD.</li> <li>• امکان انجام برداشت‌های مربوطه به ناهمواری حین آزمایش</li> <li>• سرعت و سهولت در برداشت</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• به دلیل اینکه دستگاه RWD در حال حاضر فقط به صورت یک نمونه پیش الگو (Prototype) ساخته شده و برای انجام پروژه‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته است و تا استفاده به صورت تجاری فاصله زیادی دارد، معایب و محدودیت‌های عدیده‌ای در مورد آن در حال حاضر وجود دارد.</li> <li>• عدم وجود سیستم‌های کارآمد برای جمع‌آوری داده‌ها و پردازش آن‌ها</li> <li>• عدم وجود خط تولید ساخت تجاری این دستگاه</li> <li>• عدم وجود مطالعات کافی برای اثبات صحت داده‌های بدست آمده از آن در مقایسه با FWD</li> </ul> |

## ۲-۲- آزمایش‌های تعیین دانسیته روسازی به روش هسته‌ای و غیرهسته‌ای

### ۲-۲-۱- آزمایش‌های تعیین دانسیته به روش غیرهسته‌ای

در گذشته تنها دو روش برای تعیین دانسیته آسفالت تازه اجرا شده وجود داشته است. روش اول براساس مغزه‌گیری بوده که روشی است مخرب و روش دوم با استفاده از یک دستگاه اندازه‌گیر غیرمخرب هسته‌ای قابل حمل و نقل، صورت می‌گرفته است. اگر چه روش اول (مغزه‌گیری) دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری است اما مغزه‌گیری از مسیر بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است. اندازه‌گیر هسته‌ای ارزان‌تر و سریع‌تر از روش مغزه‌گیری است، اما با این حال، معایب زیادی نیز دارد. اولین و بارزترین عیب آن استفاده از یک منبع رادیواکتیو است که مسلماً نیاز به تنظیمات زیاد و تعلیم تخصصی نیروی کارآموده دارد. عیب دیگر آن شامل کسب مجوز و نوسازی تجهیزات، آموزش تکنیسین‌ها، نحوه کار نه چندان ساده و جاسازی تجهیزات آن می‌باشد.

تاکنون بسیاری از پیمانکاران از خرید دستگاه هسته‌ای و یا استفاده از آن به دلیل مسائل تعهدات، تعلیمات خاص و تنظیمات دشوار مرتبط با دستگاه، خودداری کرده‌اند، اما آنها مجبورند تا مسائل مربوط به اندازه‌گیری دانسیته را به عنوان هزینه اضافی در قرارداد بیاورند. بر اساس ادعای شرکت‌های سازنده دستگاه‌های غیرهسته‌ای مانند PQI و PaveTracker، پیمانکاران راه‌قادر به خرید تجهیزاتی برای تعیین دانسیته مخلوط آسفالتی خواهند بود، که سریع‌تر، ایمن‌تر، فراگیرتر و قابل اطمینان‌تر از اندازه‌گیر هسته‌ای باشد، و این امر در دستگاه‌های غیرهسته‌ای برآورده شده است.

مزیت بزرگ دیگر این دستگاه‌ها در این است که پیمانکار قادر به تعلیم هر فرد عادی در محیط کار برای کارکردن با آنهاست، درحالی که در گذشته بدلیل نیازمندی‌های آموزشی، از کار با دستگاه‌های هسته‌ای صرف نظر می‌شده است. در ادامه به تشریح دستگاه‌های مختلف غیرهسته‌ای تعیین دانسیته پرداخته می‌شود.

### ۲-۲-۱- معرفی دستگاه PQI<sup>۱</sup>

در سال ۱۹۹۸، شرکت ترانس‌تک<sup>۲</sup> برای نخستین بار دستگاه تعیین دانسیته غیرهسته‌ای با عنوان PQI یا نشانگر کیفیت روسازی را به صنعت روسازی معرفی نمود. اساس کار این دستگاه برپایه میزان تغییرات در یک میدان مغناطیسی در اثر تغییر در میزان دانسیته، می‌باشد. نتایج ارزیابی‌های اولیه در مورد نسل اول این دستگاه که PQI100 نام داشت، بیانگر مشکلات جدی در تعیین دانسیته توسط این دستگاه بود. بخصوص تأثیر میزان رطوبت و عدم صحت جواب‌های حاصله مشهود بود. مدل بعدی اصلاح شده این دستگاه PQI300 نام داشت که در سال ۱۹۹۹ معرفی گردید و شامل اصلاحات در الگوریتم آن مبتنی بر داده‌های سازندگان دستگاه بود که منجر به پیشرفت‌هایی نسبت به مدل قبلی شد [۳۶].

دستگاه نشانگر کیفیت روسازی به عنوان یک گزینه ایمن‌تر، سبک‌تر، ارزان‌تر و با قابلیت اعتماد بیشتر در مقابل دستگاه اندازه‌گیر هسته‌ای توسعه پیدا کرده است. دستگاه مدل ۳۰۱، نسل پنجم از مدل‌های PQI است که در هر نسل نسبت به

1. Pavement Quality Indicator

2. TransTech Co.

نسل قبلی پیشرفته‌تر شده است. نسل اول این دستگاه‌ها، سیستم‌های اندازه‌گیری مبتنی بر ظرفیت خازن<sup>۱</sup> می‌باشند. در حالیکه نسل ۳۰۱ برپایه مقاومت ظاهری در برابر جریان متناوب<sup>۲</sup> می‌باشد. مدل ۳۰۱ این دستگاه که تصویری از آن در شکل ۳۱، آمده است، شامل یک حسگر با هندسه چند وجهی است که یک میدان الکتریکی با عمق نفوذ قابل کنترل را ایجاد می‌کند که این ویژگی در مدل‌های قبلی نبوده است.



شکل ۳۱- دستگاه PQI

این سیستم، یک مدار الکتریکی فراهم می‌کند که این مدار یک ولتاژ فرکانسی رادیویی را به یک الکتروود حسی اعمال می‌کند و الکتروود حسی یک میدان الکتریکی در مصالح روسازی ایجاد می‌کند. الکتروود حسی دوم پاسخ‌های دی‌الکتریک از مصالح روسازی را اندازه‌گیری می‌کند. یک تحلیل‌گر داده، دانسیته مصالح روسازی را براساس مقاومت جریان آن تعیین می‌نماید. تحلیل‌گر داده‌ها، دانسیته نسبی مصالح روسازی را به درستی و در شرایطی که تأثیر رطوبت موجود در روسازی اصلاح شده است، محاسبه می‌کند. اصلاحات برای عوامل تأثیرگذار خارجی بر روی مقدار دانسیته به سیستم اعمال می‌شوند. این اصلاحات شامل موارد رطوبت سطحی، تغییرات دما و تغییرات مقاومتی حسگر می‌شوند. این عملیات اصلاحی به صورت خودکار، مقادیر واقعی دانسیته را در شرایط متغیر بدون اینکه مجبور به اعمال تعدیلات دستی به سیستم باشد، فراهم می‌کند. سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که سازگار با شرایط کارگاهی باشد. خصوصیات دیگر، توانایی تغییر در وضعیت حسگرها به منظور انتخاب عمق انجام آزمایش می‌باشد.

همچنین مزیت‌های دیگر این دستگاه، قابلیت تنظیم وضعیت حسگر، تنظیم عمق نفوذ، حوزه تأثیر میدان الکتریکی و وسعت میدان مورد آزمایش می‌باشد. برای نمونه، عملکرد یک سنسور با ابعاد کوچکتر اجازه می‌دهد که عمق نفوذ کاهش پیدا کند. امکان کنترل عمق نفوذ به صورت صحیح، این مزیت را داراست که سیگنال فرستاده شده صرفاً به لایه مدنظر برسد و به لایه‌های دیگر با جنس‌ها و دانسیته‌های مختلف نفوذ نکند. دستگاه نشانگر کیفیت روسازی یک مدار با منبع ولتاژ ثابت را که قادر است دانسیته مصالح را با دقت بالا و قابلیت اطمینان بیشتر نسبت به دیگر طرح‌ها تعیین کند، فراهم می‌سازد.

1. Capacitance  
2. Impedance

نشانگر کیفیت روسازی ایزاری است به منظور تعیین سریع درجه تراکم روسازی، که به کمک آن می‌توان مشخص کرد آیا آسفالت اجرا شده به میزان تراکم مناسب رسیده است یا خیر. این وسیله به دفعات زیاد در آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. منابع زیادی تصدیق کرده‌اند که این دستگاه در کنترل کیفیت مخلوط‌های آسفالتی بسیار مؤثر بوده است. براساس اطلاعات موجود این سیستم در ۱۲ کشور و ۱۴۵ ایالت مورد بهره‌برداری قرار گرفته است [۳۶].

تجربیات حاصله راجع به این سیستم حاکی از مطالب زیر است:

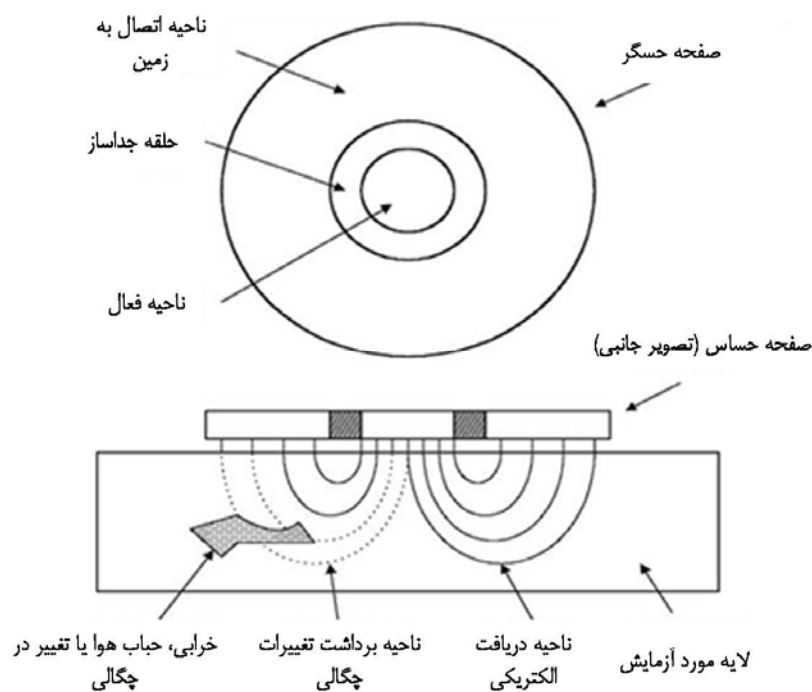
- کارکردن و استفاده از دستگاه ساده است،
- محدودیت حمل و نقل برای دستگاه وجود ندارد،
- کار با دستگاه نیاز به آموزش محدود و ساده‌ای دارد،
- سبک است،
- در مدت زمان کوتاهی چندین آزمایش صورت می‌گیرد،
- به سرعت، اطلاعات حاوی میزان و کیفیت تراکم حاصل می‌شود،
- در مورد اینکه آیا سطح به صورت یکنواخت متراکم شده است، تشخیص حاصل می‌شود و امکان اصلاحات سریع فراهم می‌شود.

نسل سوم نشانگر کیفیت روسازی آسفالتی (PQI)، از جدیدترین تکنولوژی به منظور رسیدن به مقادیر درست و صحیح دانسیته روسازی آسفالتی بهره می‌گیرد.

خصوصیات اولیه این محصول عبارتند از:

- عدم نیاز به مجوز خاص استفاده از موارد رادیواکتیو در مقایسه با دستگاه‌های هسته‌ای،
- سبکی و راحتی استفاده،
- عملکرد دستی ۱۲ ساعته بدون نیاز به شارژ مجدد،
- اندازه‌گیری دانسیته در واحدهای متداول  $\left(\frac{kg}{m^3}, \frac{lb}{ft^3}\right)$ ،
- اندازه‌گیری و اصلاح برای تغییرات دمای آسفالت و رطوبت سطحی،
- ذخیره ۹۹ قرائت روی داده نگار داخلی، و
- انتقال داده‌ها به کامپیوتر.

وزن دستگاه تقریباً ۷ کیلوگرم می‌باشد. این دستگاه از لحاظ ساختار سخت‌افزاری، ساختار بسته‌ای داشته و از دو قسمت ظاهری تشکیل یافته است. قسمت تحتانی آن شامل یک هندسه چند وجهی است که مطابق شکل ۳۲، بر روی روسازی قرار داده می‌شود. قسمت فوقانی آن مجموعه‌ای از قطعات سخت‌افزاری است که وظیفه پردازش را بر عهده داشته و ظاهر خارجی آن توسط یک نمایشگر برای اپراتور به همراه دکمه‌های مربوطه برای کنترل عملکرد، فراهم آمده است (مطابق شکل ۳۳). این دستگاه به دلیل ساختار الکترومغناطیس آن که بیشتر در حیطه دانش مهندسی الکترونیک قرار می‌گیرد، چندان موضوعیت و مجال بحث در این مطالعه را ندارد.



شکل ۳۲- ساختار بیرونی دستگاه PQI [۳۷]



شکل ۳۳- ظاهر خارجی دستگاه PQI [۳۸]

صفحه کلید دستگاه PQI، مطابق شکل ۳۴، از کلیدهای مختلفی تشکیل یافته است [۳۸]. این کلیدها برای؛

- تنظیم تاریخ و ساعت دستگاه،
- وارد کردن داده‌ها،
- تغییر حالت اندازه‌گیری دستگاه، و

- وارد کردن چگالی تئوری حداکثر ( $MTD^1$ )،  
به کار می‌رود. عملکرد هر یک از این کلیدها در جدول ۱۷، تشریح شده است.



شکل ۳۴- صفحه کلید دستگاه PQI [۳۸]

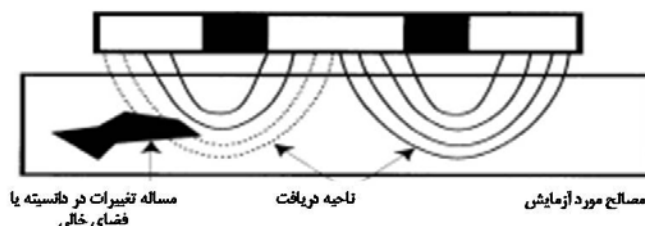
جدول ۱۷- مشخصات کلیدهای دستگاه PQI [۳۸]

| نام کلید           | عملکرد                                                                                                          |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1-9                | کلیدهای شماره، عملکردهای متفاوتی بسته به صفحه نمایش دارند.                                                      |
| Mode/ $\uparrow$   | این کلید برای تغییر حالت اندازه‌گیری دستگاه بین ۴ حالت مختلف و همچنین جابجایی نشانگر صفحه نمایش به کار می‌رود.  |
| Diag/ $\downarrow$ | این کلید برای نمایش پنجره عیب شناسی <sup>۲</sup> و همچنین جابجایی نشانگر صفحه نمایش به کار می‌رود.              |
| Menu/ $\leftarrow$ | این کلید برای بازگشت به حالت اولیه صفحه نمایش و همچنین پاک کردن یک حرف و بازگشت به یک مرحله قبل استفاده می‌شود. |
| Enter              | این کلید برای تایید و رفتن به مرحله بعد و همچنین شروع عملیات تعیین دانسیته به کار می‌رود.                       |
| CAL                | این کلید برای فعال کردن مد کالیبراسیون در یکی از حالات چهارگانه اندازه‌گیری دستگاه به کار می‌رود.               |
| “.”                | این کلید برای وارد کردن علامت اعشار هنگام ورود اعداد به کار می‌رود.                                             |

این دستگاه با استفاده از یک حسگر، دما و میزان رطوبت را اندازه‌گیری می‌کند. تجهیزات با باتری کار می‌کنند. باتری برای یک روز معمول کاری بازدهی دارد و سپس قابل شارژ می‌باشد. تجهیزات تعیین دانسیته واقعی از روشی که در ادامه توصیف شده است، استفاده می‌کنند.

دانسیته مخلوط آسفالتی به طور مستقیم متناسب با ثابت دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده مصالح است. PQI از امواج الکترومغناطیس به منظور اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک مصالح، با استفاده از میدان حسگر الکتریکی دایره‌ای در کنار صفحه حسگر که در شکل ۳۵، قابل مشاهده می‌باشد، استفاده می‌کند. تجهیزات الکترونیکی در دستگاه PQI، سیگنال‌های میدانی را به قرائت‌های دانسیته مصالح تبدیل می‌کنند و نمایش می‌دهند.

1. Maximum Theoretical Density  
2. Diagnostic



شکل ۳۵- نحوه کار دستگاه PQI

دستگاه با فشار دکمه On، روشن می‌شود. دامنه اندازه‌گیری و دانسیته واقعی مبنا وارد می‌شوند. دستگاه روی آسفالت قرار می‌گیرد و مقدار دانسیته سریعاً بر روی نمایشگر دستگاه مشخص می‌شود. در این فرآیند، تأخیری مانند آنچه در مورد دستگاه هسته‌ای که به منظور کالیبره کردن شرایط محیطی می‌باشد، وجود ندارد. این بدان معناست که تعداد برداشت‌های صورت گرفته با این دستگاه، صرفاً به سرعت عمل اپراتور بستگی دارد. همچنین امکان برداشت از مرکز، راست و چپ مسیر، قبل از برگشت غلتک برای مسیر بعدی وجود دارد. همچنین زمان برای یادداشت دانسیته و درجه تراکم وجود دارد. دستگاه قابلیت اتصال به کامپیوتر برای دریافت خروجی را دارد. دستگاه در حین برداشت اندازه‌ها نباید جابجا شود چون بر روی مقدار خوانده شده، تأثیرگذار است. مقادیر اندازه‌گیری شده بر حسب  $\text{kg/m}^3$  است [۳۸].

#### حالت‌های چهارگانه اندازه‌گیری در دستگاه PQI

همانگونه که قبلاً اشاره شد، دستگاه PQI قادر است در ۴ حالت مختلف، دانسیته روسازی را اندازه‌گیری نماید. این حالت‌ها شامل؛

- حالت قرائت پیوسته<sup>۱</sup>،
- حالت قرائت متوسط<sup>۲</sup>،
- حالت قرائت منفرد<sup>۳</sup>، و
- حالت تفکیکی یا جدا شده<sup>۴</sup>،

می‌باشد. در ادامه هر یک از حالت‌های مختلف تشریح می‌شود [۳۸].

الف- حالت قرائت پیوسته:

این حالت برای اندازه‌گیری‌های آنی<sup>۵</sup> چگالی روسازی برای مقاصد کنترل کیفیت<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. در این حالت صفحه نمایش دستگاه مطابق شکل زیر بوده و به طور تقریبی هر ثانیه به‌روز می‌شود. در شکل زیر، مقدار ولتاژ دستگاه که بیانگر میزان شارژ باتری، میزان رطوبت و دمای روسازی و همچنین مقدار چگالی بر حسب پوند بر

---

1. Continuous  
2. Average  
3. Single  
4. Segregation  
5. Instantaneous  
6. Quality Control

فوت مکعب و کیلوگرم بر مترمکعب و نیز درصد تراکم نشان داده شده است.

|                 |         |
|-----------------|---------|
| Continuous Mode | [B]     |
| Batt: 12.7V     |         |
| H2O: 3.2        | 187.6 F |
| D: 156.5 Lb     | (87.8%) |

در این حالت، این امکان به کاربر داده می‌شود تا در طول یک مسیر به طور پیوسته و بدون فشردن کلیدی، چگالی را در نقاط مختلف اندازه‌گیری کند.

ب- حالت قرائت متوسط:

در این حالت، این امکان فراهم شده تا دستگاه PQI، در یک نقطه معین ۵ قرائت انجام داده و میانگین آن را نمایش دهد. مقادیر چگالی متوسط تا ۹۹ عدد به همراه اطلاعات زمان و مکان آزمایش در حافظه دستگاه ذخیره شده و قابل انتقال به کامپیوتر می‌باشد.

پ- حالت قرائت منفرد:

در این حالت، مقدار چگالی در هر نقطه، ظرف مدت ۵ ثانیه نمایش داده می‌شود. برای هر بار تعیین مقدار دانسیته می‌بایست دکمه Enter وارد شود.

ت- حالت تفکیکی یا جداشده:

جداشدگی به معنای تفکیک مصالح ریز و درشت در مخلوط آسفالتی تلقی می‌شود. یک مخلوط آسفالتی جداشده منجر به رخداد نوسانات در مقدار چگالی در رویه متراکم شده، می‌گردد. در حالت جداشدگی دستگاه PQI، این امکان فراهم می‌شود تا به شکل مناسب، تغییرات چگالی ناشی از جداشدگی مخلوط آسفالتی در طول مسیر شناسایی شود.

## ۲-۱-۲-۲- تئوری آزمایش PQI

مدل‌های رفتاری و ریاضی بکار رفته در دستگاه‌های غیرهسته‌ای مانند PQI مبتنی بر اصول امواج الکترومغناطیس و پارامتر بسیار مهمی به نام ثابت دی‌الکتریک می‌باشد. این دستگاه‌ها با اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک لایه‌های روسازی، دانسیته لایه‌ها را تعیین می‌کنند. در ادامه پیرامون اصول اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک بر پایه کاربرد امواج الکترومغناطیس توضیحاتی ارائه شده است.

اندرکنش‌های ماکروسکوپی بین میدان الکترومغناطیسی و مواد مختلف توسط معادلات ماکسول بیان می‌گردد. برای حل معادله ماکسول می‌بایست سه شاخصه ساختاری مواد در اختیار باشد که عبارتند از: هدایت مغناطیسی، ثابت دی‌الکتریک و رسانایی. این پارامترها عموماً تابع خصوصیات مواد، دمای ماده و فرکانس میدان الکترومغناطیسی می‌باشند [۳۹].

برای آسفالت، هدایت الکترومغناطیسی تقریباً برابر هدایت مغناطیسی هوای آزاد است و رسانندگی آن تقریباً برابر صفر می‌باشد. در نتیجه رفتار الکترومغناطیسی آسفالت عمدتاً با ثابت دی‌الکتریک شناخته می‌شود. رابطه‌ای که توصیف کننده

رفتار الکترومغناطیسی مواد دی‌الکتریک است در زیر آمده است [۳۹]:

$$D = \varepsilon_0 E + P$$

$D$ : بردار جابجایی الکتریکی

$E$ : میدان الکتریکی اعمالی

$P$ : قطبش القائی

$\varepsilon_0$ : ضریب گذردهی خلاء

برای مصالح ایزوتروپیک خطی مانند آسفالت، پلاریزاسیون (قطبش) با میدان الکتریکی رابطه خطی دارد [۳۹].

$$P = \chi \varepsilon_0 E$$

$\chi$ : حساسیت الکتریکی

بنابراین خواهیم داشت:

$$D = \varepsilon_0(1 + \chi)E = \varepsilon_r \varepsilon_0 E$$

$\varepsilon_r$ : ثابت دی‌الکتریک

پارامتری که در رابطه بالا تعریف شد همان ثابت دی‌الکتریک مواد می‌باشد. این ثابت با بردار جابجایی الکتریکی رابطه مستقیم دارد. این بدان معناست که در یک میدان الکتریکی معین، هر ماده‌ای که قطب‌های بزرگتر مغناطیسی داشته باشد یا به عبارت دیگر پلاریزاسیون قوی‌تری داشته باشد، ثابت دی‌الکتریک آن ماده عدد بزرگتری خواهد بود.

پلاریزاسیون مواد دی‌الکتریک در اثر میدان الکتریکی خارجی ممکن است در سه سطح باشد؛ پلاریزاسیون الکتریکی، یونی و جهتی. هر سه نوع پلاریزاسیون، تابعی از میدان اعمال شده و دمای ماده می‌باشند. ثابت دی‌الکتریک هوا تقریباً برابر ۱ می‌باشد. زیرا هیچ‌گونه پلاریزاسیونی در هوای آزاد رخ نمی‌دهد. علاوه بر این رسانندگی هوا نیز برابر صفر می‌باشد. ذرات جامد در مصالح سنگی جزو مواد غیر قطبی محسوب شده و پلاریزاسیون دی‌الکتریک در آنها فقط مربوط به مکانیزم یونی و الکتریکی می‌باشد. بنابراین مصالح سنگی ثابت دی‌الکتریک کمی خواهند داشت (حدود ۵) که تقریباً در فرکانس‌های نه چندان بزرگ بدون تغییر بوده و مستقل از فرکانس و دما می‌باشند. رسانندگی قیر نیز تقریباً صفر است و ثابت دی‌الکتریک آن حدود ۲/۸ می‌باشد. برای مواد قطبی مانند آب، علاوه بر پلاریزاسیون یونی و الکتریکی، پلاریزاسیون جهتی (دو قطبی) نیز اضافه می‌شود که حاصل آن ثابت دی‌الکتریک بسیار بزرگتری خواهد بود (حدود ۸۰). به این ترتیب در میان مواد تشکیل دهنده لایه‌های مختلف روسازی، آب به طور فاحش از ثابت دی‌الکتریک بزرگتری برخوردار می‌باشد. بنابراین می‌توان از این ویژگی جهت تشخیص وجود رطوبت در لایه‌های روسازی بهره برد [۳۹].

بسیاری از محققین به صورت تجربی به این نتیجه رسیده‌اند که ثابت دی‌الکتریک مواد مرکب (مانند آسفالت) به نسبت حجمی و ثابت دی‌الکتریک هر یک از مصالح تشکیل دهنده با توجه به رابطه زیر وابسته می‌باشد [۳۹].

$$\varepsilon_{comp} = \left( \sum_{n=1}^n v_n \varepsilon_{rn}^a \right)^a$$

$\epsilon_{rn}$  : ثابت دی‌الکتریک هر یک از مواد تشکیل دهنده

$v_n$  : نسبت حجمی مواد

$a$  : ثابت منحصر به هر ماده مرکب که به صورت تجربی بدست می‌آید.

زمانیکه یک جریان الکتریکی در داخل یک جسم رسانا واقع می‌شود، یک میدان الکتریکی در اطراف این جسم رسانا پدید می‌آید. اگر یک جسم نارسانا که به نام دی‌الکتریک نامیده می‌شود در معرض این میدان الکتریکی قرار گیرد، قدرت میدان کاهش می‌یابد. میزان کاهش در بزرگی میدان با ثابت دی‌الکتریک ماده نارسانا در ارتباط می‌باشد. در راستای استفاده از ثابت دی‌الکتریک به عنوان یک پارامتر برای اندازه‌گیری چگالی بتن آسفالتی روسازی انعطاف‌پذیر، می‌بایست شدت میدان الکتریکی اندازه‌گیری شود. همانگونه که اشاره شد آسفالت متشکل از مصالح سنگی، قیر، هوا و درصدی رطوبت بوده که هر یک دارای ثابت دی‌الکتریک متفاوت می‌باشد. هرچه مخلوط آسفالتی متراکم شود، درصد فضای خالی (درصد هوا) به نسبت دیگر اجزای آسفالت کاهش می‌یابد که این مطلب باعث تغییر در ثابت دی‌الکتریک سیستم می‌شود. به همین ترتیب تغییر در ثابت دی‌الکتریک سیستم باعث تغییر در سیگنال‌های الکتریکی در داخل سیستم می‌گردد. مادامیکه مقدار و نوع مصالح تشکیل دهنده آسفالت ثابت است (به جز هوا)، این تغییر در سیگنال‌های الکتریکی مربوط به تغییر در چگالی خواهد بود. این در واقع اساس و مدل عملکرد دستگاه PQI در تعیین چگالی مخلوط آسفالتی متراکم شده می‌باشد [۳۹].

## ۲-۱-۳- موارد استفاده

در بیان موارد کاربرد دستگاه‌های تعیین دانسیته به روش غیرهسته‌ای مانند؛ PQI و PaveTracker، از استاندارد ASTM-D7113 که به این مقوله پرداخته است، استفاده گردید. در این استاندارد در ارتباط با ابزارهای سنجش چگالی در محل با کمک امواج الکترومغناطیسی اینگونه آمده است که؛ این روش آزمایش، یک رویه تعیین دانسیته در محل مخلوط آسفالتی با اندازه‌گیری تغییرات در نتایج قرائت‌های الکترومغناطیسی دستگاه می‌باشد. ابزار مورد استفاده در این روش دستگاهی است که با سطح روسازی در تماس است و تقریباً تغییرات رطوبت و دما بر عملکرد آن اثری ندارد. البته در صورت نیاز، اقدامات اصلاحی جهت کنترل تأثیرگذاری رطوبت و دما بایستی صورت گیرد. در واقع کارکرد اصلی دستگاه PQI تعیین چگالی و درصد تراکم مخلوط آسفالتی گرم کوبیده شده برای کنترل کیفیت<sup>۱</sup> (QC) در اجرا و ساخت راه می‌باشد. علاوه براین، این روش آزمایش، برای تایید تعداد دفعات عبور غلتک و الگو دادن جهت رسیدن به دانسیته مورد نظر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲-۱-۴- روش کالیبراسیون

انجام کالیبراسیون برای داشتن قرائت‌های نامتناقض و صحیح ضروری است. PQI باید برای هر سطح آسفالتی و در هر سایت کاری کالیبره شود. دستگاه PQI، دانسیته مخلوط آسفالتی را با اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک مخلوط آسفالتی و مقایسه آن با مقدار ثابت دی‌الکتریک مخلوط در یک دانسیته مشخص، تعیین می‌کند.

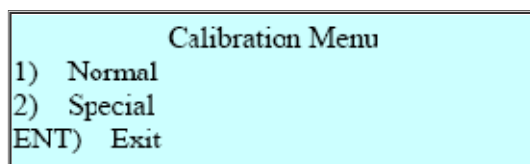
دستگاه PQI خصوصیتی از مخلوط‌ها را اندازه‌گیری می‌کند (ثابت دی‌الکتریک) که این خصوصیت برای مخلوط‌های مختلف آسفالتی، متغیر است. دستگاه PQI، دانسیته مخلوط آسفالتی را با اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک مخلوط آسفالتی و مقایسه آن با مقادیر ثابت دی‌الکتریک مخلوط در یک دانسیته مشخص، تعیین می‌کند. بنابراین می‌بایست دستگاه را برای حصول یک قرائت درست، برای نوع مخلوط آسفالتی موردنظر کالیبره کرد. بعد از مرتبه اول کالیبراسیون دستگاه برای یک مخلوط مشخص، عدد کالیبراسیون (مقدار اصلاحی که باید به دستگاه داده شود) برای دفعات بعدی استفاده از دستگاه برای همان مخلوط‌ها در تاریخ‌های دیگر بطور ثابت، معتبر باقی می‌ماند [۳۸].

دستگاه PQI روش‌های مختلفی را برای کالیبراسیون فراهم آورده است که در مقتضیات مختلف قابل استفاده‌اند. جدول ۱۸، به طور مختصر روش‌های مختلف را شرح می‌دهد.

جدول ۱۸- روش‌های مختلف کالیبراسیون دستگاه PQI [۳۸]

| روش            | شرح                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| معمولی         | روشی است مناسب برای تصحیح میزان خطای قرائت دستگاه، بعد از اینکه قرائت‌های دستگاه و مغزه‌گیری میدانی از مناطق مورد مطالعه انجام گردید. به سادگی مقداری را که PQI از مقدار مغزه‌گیری بیشتر یا کمتر اندازه‌گیری می‌کند، بعنوان عدد کالیبراسیون وارد کنید. |
| روش یک‌نقطه‌ای | تخمین کالیبراسیون سریع که با برداشت یک قرائت از سطح غلتک‌نخورده و وارد کردن درصد تراکم تخمینی در آن نقطه قابل استفاده است.                                                                                                                             |
| روش دو نقطه‌ای | تخمین کالیبراسیون سریع که با برداشت چندین قرائت از سطح غلتک‌نخورده و وارد کردن درصد تراکم تخمینی در آن نقطه قابل استفاده است.                                                                                                                          |
| شیب دستی       | به شما اجازه می‌دهد تا مقدار عددی را برای ثابت کالیبراسیون شیب وارد کنید. این روش به ویژه زمانی مفید خواهد بود که در حال استفاده مجدد از دستگاه برای مخلوطی هستیم که برای آن یک بار عمل کالیبراسیون صورت گرفته است.                                    |

برای دستیابی به روش‌های کالیبراسیون، دکمه "CAL" را هنگامی که دستگاه PQI در یکی از حالت‌های اجرایی خود عمل می‌کند، فشار دهید که منجر به پدیدار شدن صفحه زیر می‌شود.

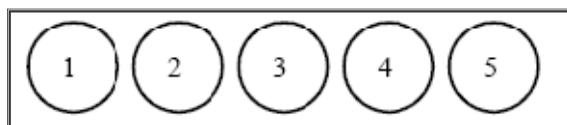


منطقه‌ای از سطح آسفالت که خشک است، انتخاب شده و ابعاد سطح انتخابی حدوداً ۳ متر طولی و ۱/۵ متر عرضی می‌باشد. سطح به پنج قسمت داده‌ای مطابق آنچه در شکل ۳۶، آمده، تقسیم می‌شود.

#### • کالیبراسیون قرائت‌ها

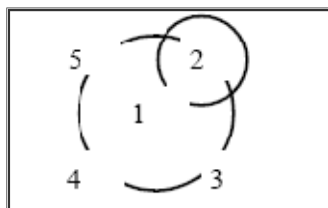
از PQI در وضعیت قرائت منفرد استفاده کنید.

دستگاه را در اولین مکان روی سطح آسفالتی قرار دهید. از یک مداد شمعی جهت کشیدن دایره، دور دستگاه استفاده کنید. صفحه حسگر دایره می‌تواند به عنوان راهنمای کشیدن دایره مورد استفاده قرار گیرد. دکمه ENT را فشار دهید، (به دستگاه PQI دست زنید) و منتظر قرائت دستگاه باشید. مقدار قرائت خوانده‌شده را یادداشت کنید. تذکر: بهترین برداشت‌ها در صورت عدم تماس دست یا اشیاء با دستگاه صورت می‌گیرند.



شکل ۳۶- جانمایی مکان قرائت‌ها

دستگاه PQI را به اندازه تقریباً ۵ سانتی‌متر از سطح زمین بلند کنید و به سمت بیرون دایره حرکت دهید. این موقعیت را مانند محل ساعت ۲ فرض کنید. دکمه ENT را فشار دهید تا قرائت دیگری انجام گیرد.



شکل ۳۷- الگوی اندازه‌گیری PQI

دستگاه را در جهت حرکت عقربه‌های ساعت و به دور دایره کشیده شده در موقعیت تقریبی ساعت ۴ حرکت دهید. دکمه ENT را فشار دهید تا قرائت دیگری برداشت شود و آن را در جدول ثبت کنید. حرکت دادن دستگاه دور دایره کشیده شده را در دو موقعیت تقریبی ساعت ۸ و ساعت ۱۰ ادامه دهید و قرائت‌های دانسیته مربوط به هر موقعیت را ثبت کنید. با تبعیت از الگوی شکل ۳-۲۵، دستگاه PQI را به موقعیت دایره بعدی انتقال دهید و مقادیر دانسیته را در وسط دایره و در موقعیت‌های هر ساعت، به ترتیب یادداشت نمایید تا جدول ۱۹، کامل شود.

#### • سنجش کالیبراسیون

(الف) از وسط هر یک از دواير انتخابی علامت‌گذاری شده، در نوار مستطیلی ۳ متری، یک نمونه به روش مغزه‌گیری تهیه نمایید.

(ب) مقدار دانسیته هر یک از این مغزه‌ها را در جدول داده‌ها وارد کنید.

(ج) تفاوت عددی بین مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده توسط دستگاه PQI و مقادیر گزارش شده دانسیته از آزمایشگاه را محاسبه کنید. اختلاف عددی بین مقادیر برداشت‌شده از دستگاه و نتایج آزمایشگاه، به منظور تعدیل مقدار انحراف

کالیبراسیون، ذخیره شده در دستگاه PQI استفاده می‌شوند تا دستگاه قرائت‌هایی را که نزدیک‌تر به مقادیر واقعی عدد دانسیته هستند، مشخص نماید.

از منوی کالیبراسیون دکمه ۱ را به منظور دسترسی به دستورالعمل کالیبراسیون معمولی، که به صورت صفحه نمایش زیر است، فشار دهید.

```
Offset [D] = 0.0
1) PQI reads to hi
2) PQI reads to lo
ENT) Exit
```

این دستورالعمل زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که تعدادی از قرائت‌های دستگاه و تعدادی از قرائت‌های مغزه‌گیری صورت گرفته است و دستگاه مقدار میانگینی که PQI بیشتر یا کمتر می‌خواند را محاسبه می‌کند. گام اول فشار دکمه‌ای است که مشخص کند PQI در حال قرائت مقادیر بیشتر است یا کمتر. بعد از فشار دکمه صفحه نمایش زیر آشکار می‌شود.

#### Offset Adjustment

Adjustment:

در این وضعیت، باید مقدار اختلاف بین مقادیر PQI و مغزه‌گیری را وارد شود. توجه شود که کالیبراسیون باید در واحد جاری دانسیته صورت گیرد. اگر دستگاه بر روی  $\text{kg/m}^3$  تنظیم شده‌است، تعدیل باید به  $\text{kg/m}^3$  وارد شود. بعد از وارد کردن مقدار تعدیل، صفحه نمایش زیر جهت تصدیق ورودی‌ها ظاهر می‌شود. مقدار تعدیل وارد شده (اگر PQI مقدار بزرگ‌تری را قرائت کرده باشد، عدد منفی می‌باشد)، در کنار مقدار انحراف جدید نمایش داده می‌شود.

```
Adjustment = -1.0
New Offset = -1.0
1) Use this value
2) Keep old value
```

با انتخاب گزینه #۱ انحراف جدید در دستگاه PQI ذخیره می‌شود. اکنون PQI با استفاده از این روش کالیبره است. جدول ۱۹، راهنمایی برای کالیبراسیون دستگاه بروش معمولی است [۳۸].

جدول ۱۹- برگه کاری مربوط به کالیبراسیون PQI بروش معمولی

| موقعیت         | مکان ۱ | مکان ۲ | مکان ۳ | مکان ۴ | مکان ۵ |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| مرکز           |        |        |        |        |        |
| موقعیت ساعت ۲  |        |        |        |        |        |
| موقعیت ساعت ۴  |        |        |        |        |        |
| موقعیت ساعت ۸  |        |        |        |        |        |
| موقعیت ساعت ۱۰ |        |        |        |        |        |
| مجموع          |        |        |        |        |        |
| میانگین        |        |        |        |        |        |

## ۲-۱-۵- روش انجام آزمایش

دستگاه با فشار دکمه On، روشن می‌شوند. دامنه اندازه‌گیری و دانسیته واقعی مبنا وارد می‌شوند. دستگاه روی آسفالت قرار می‌گیرد و مقدار دانسیته سریعاً بر روی نمایشگر دستگاه مشخص می‌شود. در این فرآیند، تأخیری مانند آنچه در مورد دستگاه هسته‌ای که به منظور کالیبره کردن شرایط محیطی می‌باشد، وجود ندارد. این بدان معنا است که تعداد برداشت‌های صورت گرفته با دستگاه، صرفاً به سرعت عمل اپراتور بستگی دارد. همچنین امکان برداشت از مرکز، راست و چپ مسیر قبل از برگشت غلتک برای مسیر بعدی وجود دارد. همچنین زمان برای یادداشت دانسیته و درجه تراکم (به اضافه میزان رطوبت و درجه حرارت اگر مایل به برداشت باشید) وجود دارد. دستگاه قابلیت اتصال به کامپیوتر برای دریافت خروجی را دارد. دستگاه در حین برداشت اندازه‌ها نباید جابجا شود چون بر روی مقدار خوانده شده، تأثیرگذار است. مقادیر اندازه‌گیری شده، برحسب  $\text{kg/m}^3$  است [۳۸].

## ۲-۱-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده

همانگونه که قبلاً اشاره شد، بهترین و دقیق‌ترین روش برای تعیین چگالی مخلوط آسفالتی گرم، مغزه‌گیری و تعیین چگالی آن در آزمایشگاه می‌باشد. برای سنجش دقت نتایج بدست آمده، از PQI مطالعات و ارزیابی‌های مختلفی انجام شده است، که در آنها سعی گردیده، در یک تحلیل آماری با انتخاب یک محل برای آزمایش، مقایسه مناسبی بین نتایج بدست آمده از دانسیته‌سنج غیرهسته‌ای و مغزه‌گیری صورت پذیرد. در بخش‌های بعدی این گزارش با معرفی دستگاه‌های دیگر غیرمخرب هسته‌ای و غیرهسته‌ای به برخی از نتایج این مطالعات اشاره خواهد شد.

## ۲-۲-۲- آزمایش‌های تعیین دانسیته به روش هسته‌ای

## ۲-۲-۲-۱- معرفی دانسیته‌سنج هسته‌ای

از دهه ۱۹۷۰ میلادی، برای بهینه نمودن کنترل کیفیت در کلیه زمینه‌های علمی از جمله آسفالت، کشورهای صنعتی برآن شدند که در مورد آزمایش غیرمخرب تحقیقاتی را صورت دهند و تحقیقات زیادی از آن زمان تا کنون در این مورد انجام گرفته است. در زمینه راهسازی و آسفالت نیز به دلیل مزیت‌های زیادی که آزمایش‌های غیرمخرب دارند از جمله عدم خرابی، هزینه کمتر، تکرار پذیری، توانایی ثبت تغییرات متغیرهای مورد نظر در یک نقطه خاص و صرف زمان کمتر، استفاده از این نوع آزمایش‌ها مورد توجه بسیاری از کشورهای صنعتی قرار گرفته است. این روش‌ها در آسفالت شامل وسایل دقیق تغییر مکان سنج روسازی، آزمایش‌های اولتراسونیک، آزمایش‌های هسته‌ای و ... می‌باشند.

یکی از انواع آزمایش‌هایی که در روسازی کاربرد فراوان دارند، آزمایش‌های هسته‌ای است که از آنها می‌توان در اندازه‌گیری دانسیته و درصد قیر مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد. برای هر کدام از مواد مورد استفاده در روسازی یعنی اندازه‌گیری دانسیته و درصد قیر به روش هسته‌ای، روش‌های خاصی وجود دارد که در چند دهه اخیر مورد تحقیق بوده‌اند و دستگاه‌هایی که ثمره این تحقیقات می‌باشند از فناوری ویژه‌ای سود می‌برند. نکته مهم در این دستگاه‌ها آن است که دقت مورد نیاز آزمایش‌های روسازی، بستگی به نوع چشم رادیواکتیو داشته و در ضمن متغیرهای هندسی دستگاه باید تطبیق

کافی با آزمایش‌های روسازی و شرایط انجام آنها داشته باشند. نمونه‌ای از یک دستگاه اندازه‌گیری دانسیته به روش هسته‌ای در شکل ۳۸، قابل مشاهده می‌باشد.



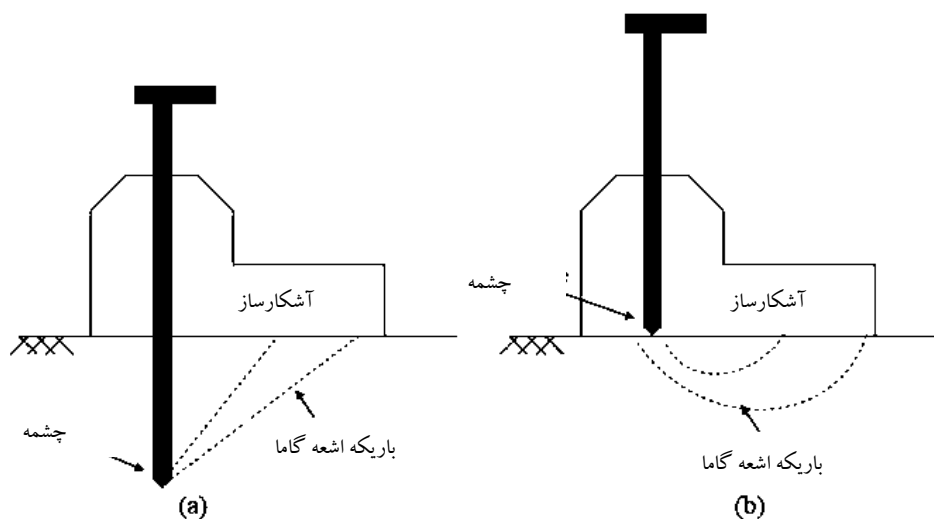
شکل ۳۸- دستگاه تعیین دانسیته به روش هسته‌ای

دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای<sup>۱</sup> در حال حاضر به صورت گسترده به عنوان روشی برای تعیین وزن مخصوص (دانسیته) و محتوای رطوبتی روسازی در محل مورد استفاده قرار می‌گیرند. سادگی در استفاده، سرعت اندازه‌گیری و دقت قابل ملاحظه آن‌ها از برتری‌های دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای محسوب می‌گردد. نگرانی در بحث امواج رادیواکتیو در این دستگاه‌ها و نیز قوانین و مقررات دست و پا گیر، باعث شده تا روز به روز روش‌های جایگزین برای این دستگاه‌ها براساس کاربرد امواج الکترومغناطیس گسترش یابد.

دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای شامل یک منبع رادیواکتیو، معمولاً از عناصر سزیم یا رادیوم، و یک آشکارساز برای اندازه‌گیری اشعه گاما در داخل خاک می‌باشد. گیج‌های هسته‌ای دارای دو روش آزمایش، یکی روش سطحی<sup>۲</sup>، و دیگری روش انتشار مستقیم<sup>۳</sup>، مطابق شکل ۳۹، می‌باشند. در روش سطحی منبع و آشکارساز هر دو روی سطح زمین قرار می‌گیرند، درحالی‌که در روش انتشار مستقیم، منبع رادیواکتیو در عمق زمین وارد شده و آشکارساز همچنان روی سطح باقی گذاشته می‌شود [۴۰].

برای اندازه‌گیری دانسیته خاک، منبع رادیواکتیو دستگاه، فوتون‌های اشعه گاما را در داخل خاک گسیل می‌دارد. هنگامیکه اشعه گاما در داخل قشر خاک روسازی حرکت می‌کند، با از دست دادن بخشی از انرژی خود که ناشی از برخورد با الکترون‌های خاک است، بازتاب می‌کنند. بدین ترتیب آشکارساز دستگاه، فوتون‌های ساطع شده از منبع را دریافت و ثبت می‌کند. زمانیکه دانسیته خاک افزایش یابد، تعداد فوتون‌هایی که به آشکارساز می‌رسند به علت افزایش

1. Nuclear Density Gauge  
2. Backscatter  
3. Direct transmission



شکل ۳۹- شکل شماتیک دانسیته‌سنج هسته‌ای (a) روش انتشار مستقیم (b) روش سطحی [۴۰]

برخوردهای رخ داده حین حرکت اشعه گاما در داخل قشر خاک کاهش می‌یابد. در هر دو روش سطحی و انتشار مستقیم، آشکارساز تعداد فوتون‌های بازتاب شده را شمارش می‌کند. تعداد فوتون‌ها با نسبت معکوس با دانسیته خاک رابطه دارد [۴۰]. برای اندازه‌گیری محتوای رطوبتی خاک، گنج هسته‌ای از پرتوهای نوترون استفاده می‌کند. هنگامیکه نوترون‌های ساطع شده از منبع دستگاه در داخل قشر خاک حرکت می‌کنند، در اثر برخورد با اتم‌های هیدروژن ذرات آب موجود، تضعیف شده و گرمایش نوترونی<sup>۱</sup> رخ می‌دهد. گرمایش نوترون زمانی رخ می‌دهد که سرعت نوترون‌ها به حد ثابتی کاهش یافته و برخوردهای مجدد باعث کاهش سرعت نمی‌شود. تعداد نوترون‌های گرمایش‌شده‌ای که توسط آشکارساز شناسایی می‌شوند دارای رابطه‌ای با تعداد اتم‌های هیدروژن موجود در خاک می‌باشند [۴۰].

کالیبراسیون اولیه یک گنج هسته‌ای بوسیله یک قطعه مرجع که متشکل از منیزیم، آلومینیوم، گرانیات یا سنگ آهک است، انجام می‌شود. کالیبره کردن دستگاه براساس نوع خاک لازم نمی‌باشد ولی کنترل استانداردسازی دستگاه در بخش‌های بعد تشریح می‌شود.

برای معرفی بیشتر دستگاه دانسیته‌سنج هسته‌ای، از آیین‌نامه ASTM در این بخش استفاده می‌شود. در جدول ۲۰، این استانداردها از معرفی شده‌اند.

جدول ۲۰- آیین‌نامه ASTM پیرامون دستگاه‌های هسته‌ای تعیین دانسیته

| نوع لایه                     | لایه سنگدانه‌ای                            | لایه آسفالتی                 |
|------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|
| نوع آزمایش                   | غیر مخرب                                   | غیر مخرب                     |
| شماره استاندارد و نام آزمایش | آزمایش هسته‌ای<br>ASTM D2992<br>ASTM D3017 | آزمایش هسته‌ای<br>ASTM D2950 |

یکی از روش‌های تعیین دانسیته لایه‌های سنگدانه‌ای مانند اساس، زیراساس و بستر، روش هسته‌ای می‌باشد، که استاندارد مربوط به آن ASTM D2922 است. دستگاه‌های دانسیته‌سنج هسته‌ای از نوع تراکسلر<sup>۱</sup> مدل B3411 با هدف اولیه کاربرد در رطوبت سنجی و دانسیته‌سنجی خاک ساخته شده‌اند. به همین دلیل کارکرد این دستگاه‌ها در خاک بسیار دقیق‌تر از آسفالت می‌باشد و همچنین با دقت بالایی رطوبت موجود در خاک را اندازه می‌گیرند. تصویری از دستگاه هسته‌ای تراکسلر که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود، در شکل ۴۰، آمده است.



شکل ۴۰- دستگاه هسته‌ای تراکسلر

در ارتباط با روش هسته‌ای برای تعیین دانسیته در لایه‌های آسفالتی از آیین‌نامه ASTM D2950 استفاده شده که در تشریح هدف از این آزمایش اینگونه بیان می‌کند [۴۱].

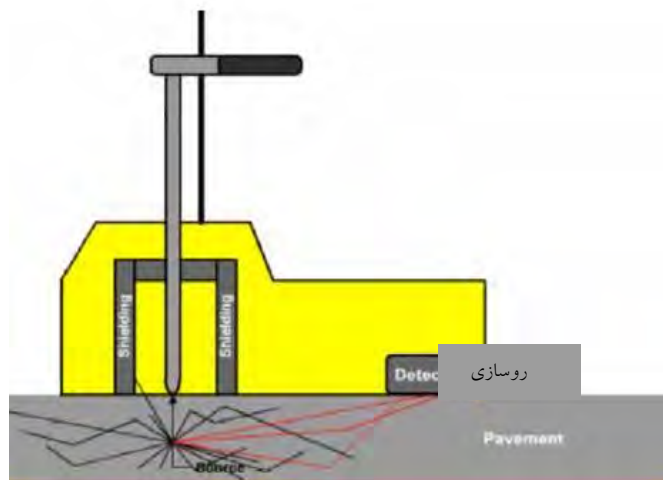
- این آزمایش، یک رویه استاندارد برای تعیین دانسیته مخلوط آسفالتی با استفاده از میرایی تشعشعات اشعه گاما، در جایی که منبع و ردیاب<sup>۲</sup> در روی سطح قرار بگیرند (روش سطحی) یا اینکه منبع یا ردیاب در یک عمق مشخص، تا ۳۰۰ میلیمتر (۱۲ اینچ)، قرار گرفته و دیگری روی سطح قرار گیرد (روش انتشار مستقیم)، می‌باشد.
- دانسیته، جرم واحد حجم ماده مورد آزمایش، با مقایسه میزان انتشار اشعه گاما با داده کالیبراسیون ثبت شده قبلی تعیین می‌شود.

در همین استاندارد در ارتباط با اهمیت و کاربرد آزمایش هسته‌ای تعیین دانسیته در لایه‌های آسفالتی اینگونه آمده است [۴۱]:

- روش آزمایش توصیف شده، به عنوان یک شیوه غیرمخرب و سریع جهت تعیین دانسیته در جای (In-place) مخلوط آسفالتی متراکم شده، مفید است.

1. Troxler 3411 B  
2. Source and Detector

- با یک کالیبراسیون صحیح، این روش آزمایش، جهت کنترل کیفیت و قبول کیفیت آسفالت متراکم شده مناسب و مفید می‌باشد.
  - این روش آزمایش، برای تایید تعداد دفعات عبور غلتک و الگو دادن جهت رسیدن به دانسیته مورد نظر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
  - طبیعت غیرمخرب این آزمایش، اجازه دفعات متعدد اندازه‌گیری در یک مکان بین عبورهای متوالی غلتک به منظور مشاهده تغییرات مقدار دانسیته را می‌دهد.
- در ادامه همین استاندارد در ارتباط با مخاطرات کار با دستگاه اینگونه بیان می‌کند [۴۱].
- این دستگاه از مواد رادیواکتیو استفاده می‌کند که می‌تواند برای سلامتی کاربر خطرناک باشد مگر اینکه اقدامات حفاظتی و ایمنی در مورد کار با دستگاه رعایت شود. کاربران این دستگاه باید با روش‌های کاربردی ایمنی و قواعد کار با دستگاه آشنا باشند.
  - دستورالعمل‌های کاربردی به همراه روش‌های ایمنی کار روزمره مانند آزمایش‌های تراوش منبع، ثبت و ارزیابی داده، علامت لایه و...، بخشی از راهنمای عملکردی برای استفاده از این دستگاه می‌باشند.
  - بهتر است این تجهیزات تحت حمایت یک گواهی‌نامه مواد رادیواکتیو باشند.
- تصویری شماتیک از دستگاه چگالی‌سنج هسته‌ای در لایه‌های آسفالتی در شکل ۴۱، آمده است.



شکل ۴۱- دستگاه هسته‌ای تراکسلر بر روی لایه آسفالتی

#### ۲-۲-۲-۲- تئوری آزمایش

در این قسمت به توضیح تئوری چگونگی عملکرد آزمایش‌های هسته‌ای و اساس علمی آنها پرداخته می‌شود. در دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای از اشعه گاما استفاده می‌شود. اشعه گاما از نوع پرتوهای الکترومغناطیس و هم‌خانواده نور مرئی می‌باشد. در این خانواده از امواج که انرژی بوسیله فوتون منتقل می‌شود هر چه طول موج پرتوها کوچکتر باشد انرژی بیشتری دارند. امواج الکترومغناطیس به ترتیب طول موج از کوتاه به بزرگ عبارتند از اشعه گاما، اشعه ایکس، نور مرئی و

امواج رادیویی. همان‌طور که مشخص است اشعه گاما دارای کوتاه‌ترین طول موج و بالطبع بیشترین میزان انرژی می‌باشد. این مقدار بالای انرژی باعث شده است که اشعه گاما دارای نفوذپذیری زیادی در مواد باشد و از طرف دیگر انرژی زیاد آن می‌تواند سبب تخریب بافت بدن موجودات زنده شود. اشعه گاما از طریق کاملاً مصنوعی مانند اشعه ایکس یا نور تولید نمی‌شود و راه اصلی تولید آن از طریق هسته اتم‌های رادیواکتیو می‌باشد که تمایل به آزاد کردن میزان بالایی انرژی دارند. برای استفاده صنعتی از این پرتو باید خصوصیت‌های ویژه‌ای را از اشعه بدست آورد که چند مورد آن به شرح زیر است:

۱- برای هر نوع کاربردی محدوده ویژه‌ای از انرژی اشعه گاما مورد نیاز است. لازم به ذکر است که انرژی اشعه گاما از محدوده یک دهم تا صدها مگا الکترون ولت تغییر می‌کند.

۲- عنصر تولید کننده اشعه گاما باید دارای مناسب‌ترین طول عمر باشد تا برای مصرف‌کننده و تولیدکننده دستگاه توجیه اقتصادی لازم را فراهم کند به همین علت از چشمه  $^{192}\text{Ir}$  که دارای طول عمر ۷۵ روز است در رادیوگرافی استفاده می‌شود. در مواردی که احتیاج به ساخت دستگاه است از چشمه‌هایی با طول عمر بیشتر استفاده می‌شود زیرا طول عمر دستگاه ضریبی از نیمه عمر چشمه رادیواکتیو آن است.

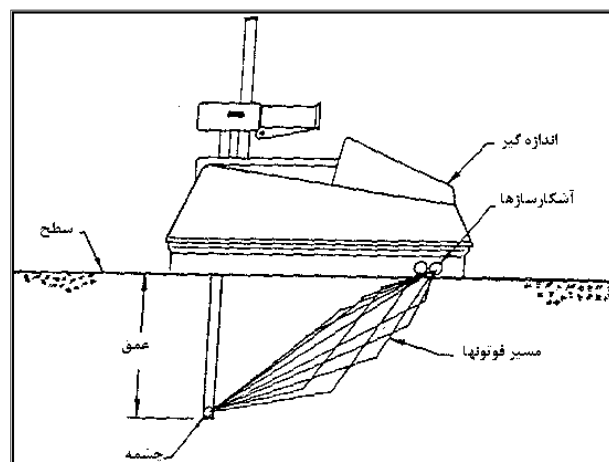
به دلایل فوق معمولاً دستگاه‌های صنعتی، بالاجهت دستگاه‌های مورد استفاده در مهندسی عمران دارای چشمه  $^{137}\text{Cs}$  هستند. چون علاوه بر داشتن انرژی مناسب برای کارهای عمرانی دارای نیمه عمر مناسبی هم می‌باشند. نیمه عمر  $^{137}\text{Cs}$ ، ۳۰ سال می‌باشد که برای استفاده در دستگاه‌های رادیواکتیو عددی مناسب می‌باشد و طول عمر بهینه دستگاه را باعث می‌شود. این خصوصیات از  $^{137}\text{Cs}$  عنصر ایده‌آلی برای استفاده در این مورد ساخته است [۴۲].

#### روش‌های مختلف استفاده از اشعه گاما در سنجش دانسیته

عموماً از اندازه‌گیرهای هسته‌ای به دو روش سطحی و پخش مستقیم در سنجش دانسیته استفاده می‌شود. ولی بعضی از اندازه‌گیری‌های خاص که با وزن کم ساخته می‌شوند نیز وجود دارند که برای سنجش دانسیته لایه‌های نازک سطحی روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

##### الف- حالت پخش مستقیم

شکل ۴۲، هندسه اندازه‌گیری در حالت پخش مستقیم را نشان می‌دهد. بسته به مقدار چشمه هسته‌ای موجود، هر وسیله حداکثر عمق خاصی را برای اندازه‌گیری دارد. در مورد دستگاه‌های معمول، این عمق می‌تواند تا ۳۰ سانتی‌متر برسد. برای اندازه‌گیری دقیق دانسیته، آشکارساز باید به خوبی و با فاصله افقی مناسبی بر روی سطح قرار گیرد. اگر کلیه فوتون‌هایی که در این حالت به آشکارساز می‌رسد از فاصله مشخص موجود در عمق عبور کند و از مسیر دیگری فوتون به آشکارساز نرسد، دانسیته بدست آمده مقداری صحیحی است و میانگینی از دانسیته مواد بین چشمه و آشکارساز می‌باشد. برای دستگاه تراکسلر B۳۴۱۱ فاصله افقی ۲۵ سانتی‌متر است و در حالت پخش مستقیم فاصله چشمه تا آشکارساز از ۲۶ سانتی‌متر تا ۴۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند.

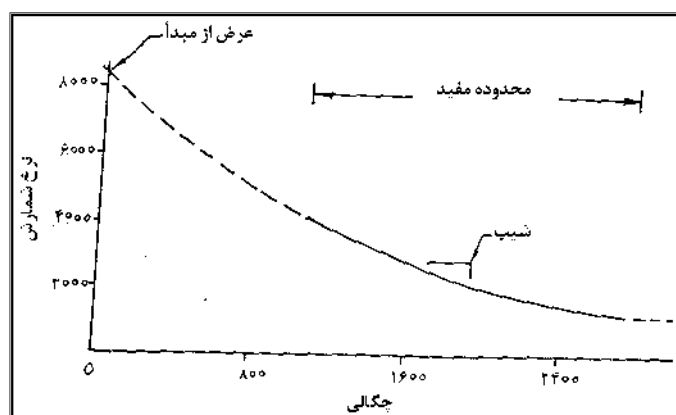


[۴۳] شکل ۴۲- هندسه پخش مستقیم

با کاربرد رابطه ۳-۱، ارتباط بین دانسیته و نرخ شمارش بصورت رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$R = Ae^{-B \times D} - C \quad (۲-۳)$$

در این رابطه،  $D$  پارامتر مستقل می‌باشد و  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و ثابت‌هایی هستند که از روند کالیبراسیون با سه و بیش از سه نقطه به دست می‌آیند. ثابت  $B$  مشتمل بر  $\frac{\mu}{\rho}$  و  $t$  می‌شود و  $A$  و  $C$  به اندازه چشمه و تاثیرات آشکارساز بستگی دارند.  $C$  درجه انحراف از تابع نمایی را نشان می‌دهد. شکل ۴۳، منحنی این معادله را نشان می‌دهد. در این معادله  $B$  مشتمل بر پارامتر  $\frac{\mu}{\rho}$  است. به همین دلیل  $B$  پارامتری از معادله است که خصوصیات شیمیایی مواد و ترکیبات را در خود دارد.

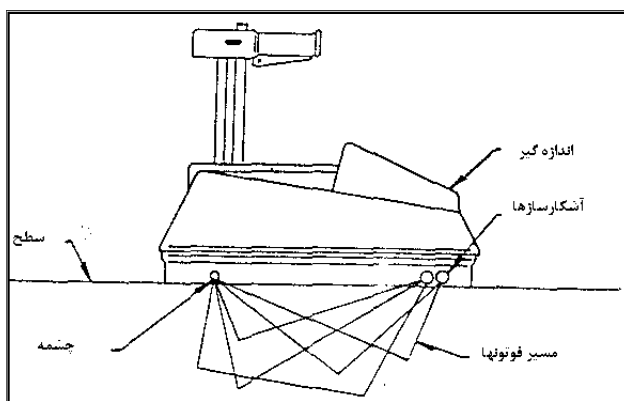


[۴۳] شکل ۴۳- جواب پخش مستقیم

همانطور که از رابطه (۲-۳) مشخص است اگر  $D$  (دانسیته) را برابر صفر قرار دهیم نرخ شمارش برابر با  $A-C$  می‌شود. این شمارشی است که دستگاه در حالت پخش مستقیم در خلاء انجام می‌دهد. شیب این منحنی را می‌توان با مشتق اول رابطه (۲-۳) بدست آورد که برابر با  $BAe^{-B \times D}$  می‌شود و مشخص است که در دانسیته صفر شیب برابر با  $BA$  است [۴۲].

## ب- حالت پخش سطحی

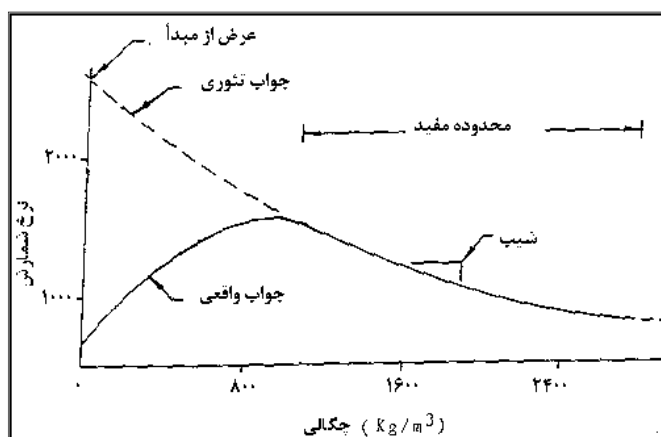
در شکل ۴۴، حالت هندسی اندازه‌گیری سطحی نشان داده شده است. از نظر تئوری در این حالت فوتون بصورت مستقیم به آشکارساز نمی‌رسد و تمام فوتون‌های اندازه‌گیری شده در این حالت مربوط به پخش اشعه گاما در ماده است، ولی عملاً چنین چیزی ممکن نیست و معمولاً ۱۰ یا کمتر از ۱۰ درصد فوتونها بصورت مستقیم به آشکارساز می‌رسند.



شکل ۴۴- هندسه پخش سطحی [۴۲]

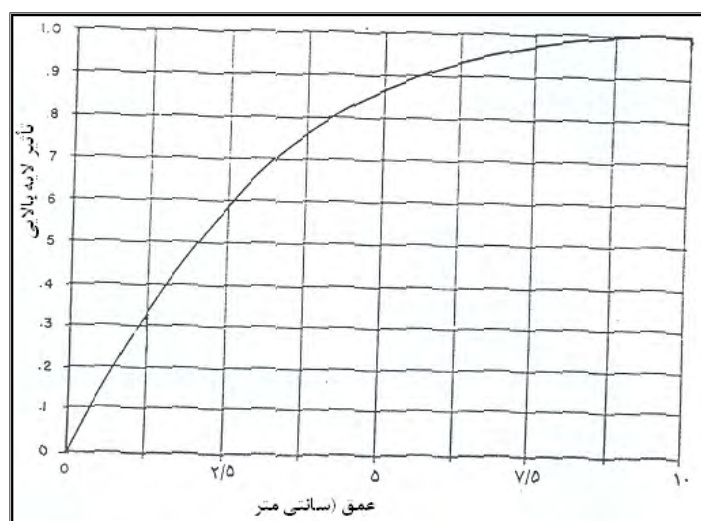
چون در حالت پخش سطحی، کلیه فوتون‌هایی که به آشکارساز می‌رسند، حداقل برای یکبار به ماده برخورد کرده و پخش شده‌اند و انرژی کلی که به آشکارساز می‌رسد کمتر از حالت پخش مستقیم است در نتیجه در این وضعیت، خطا به علت ترکیب شیمیایی عناصر ماده برخوردکننده به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد.

در شکل ۴۵، رابطه بین نرخ شمارش اشعه گاما و دانسیته نشان داده شده است. از نظر تئوری در حالت دانسیته برابر با صفر نرخ شمارش بر خلاف حالت پخش مستقیم برابر صفر است ولی در عمل نرخ شمارش به علت دریافت مستقیم اشعه و موادی که بر سر راه اشعه وجود دارند مقداری را شامل می‌شود. با افزایش دانسیته از صفر نرخ شمارش اشعه گاما افزایش می‌یابد و این موضوع به علت پخش فوتون‌های بیشتر در اطراف آشکارساز است و وقتی دانسیته ماده مورد نظر افزایش یابد در عدد ۱۱۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این مقدار کاملاً وابسته به فاصله چشمه و آشکارساز است. از این مرحله به بعد با افزایش دانسیته نرخ شمارش اشعه گاما کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع جذب بیشتر فوتون‌های پخش شده به وسیله مواد چگال موجود است. پس از آن، نرخ شمارش اشعه گاما از معادله استاندارد مربوط به آن پیروی می‌کند [۴۲].



[۴۴] شکل ۴۵- جواب پخش سطحی

برای هر کدام از روش‌های مذکور محدوده مناسبی برای اندازه‌گیری دانسیته بوسیله دستگاه تعریف می‌شود که این محدوده در حالت پخش سطحی بین ۹۶۰ تا ۲۷۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. این محدوده را محدوده کارکرد مفید گویند. در حالت پخش مستقیم، دستگاه میانگین دانسیته مواد از چشمه تا آشکارساز را نشان می‌دهد. ولی در حالت پخش سطحی طبیعی است که بیشتر، فوتون‌های لایه‌های سطحی به آشکارساز می‌رسند. در شکل ۴۶، منحنی‌ای که مشخص می‌کند چند درصد فوتونها مربوط به کدام لایه هستند رسم شده است. این منحنی را می‌توان برای محاسبه دانسیته لایه‌ها نیز به کار برد.



[۴۶] شکل ۴۶- تاثیر دانسیته سطحی در حالت پخش سطحی

به عنوان مثال اگر ماده‌ای با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر و دانسیته ۲۰۸۲ کیلوگرم بر متر مکعب بر روی ماده دیگری با دانسیته ۲۱۶۲ کیلوگرم بر متر مکعب قرار گرفته باشد، با توجه به نمودار شکل ۴۶، برای ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر ضریب تاثیر لایه بالایی برابر ۰/۵۸ خواهد بود. همچنین بر این اساس ضریب تصحیح برای لایه‌های دیگر نیز بدست می‌آید. در این مثال، صفحه مدرج عدد ۲۱۱۶ کیلوگرم بر متر مکعب را نشان خواهد داد.

$$\text{کیلوگرم بر متر مکعب} = 2116 = (0/58 \times 2082 + 0/42 \times 2162)$$

می‌توان با داشتن دانسیته یک یا چند لایه، دانسیته لایه دیگر را با استفاده از این روش بدست آورد [۴۲].

#### ۲-۲-۳-۲- موارد استفاده

آزمایش تعیین دانسیته به روش هسته‌ای، همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، به عنوان یک شیوه غیرمخرب و سریع جهت تعیین دانسیته درجای مخلوط آسفالتی متراکم شده و همچنین لایه‌های سنگدانه‌ای متراکم شده، مفید می‌باشد. در این آزمایش، با کالیبراسیون درست و آزمون تاییدکننده نتایج<sup>۱</sup>، این روش جهت کنترل کیفیت و قبول تراکم آسفالت و لایه‌های دیگر روسازی، مفید و کارآمد می‌باشد. علاوه بر این، از این روش آزمایش برای تعیین تعداد دفعات عبور غلتک و الگو دادن جهت رسیدن به دانسیته مورد نظر می‌توان بهره جست. طبیعت غیرمخرب این آزمایش، اجازه دفعات متعدد اندازه‌گیری در یک مکان بین عبورهای متوالی غلتک به منظور مشاهده تغییرات در مقدار دانسیته را فراهم می‌آورد [۴۱].

#### ۲-۲-۴- روش کالیبراسیون

دستگاه هسته‌ای مورد مطالعه در این گزارش از نوع HS-5001EZ ساخت شرکت تراکسلر می‌باشد. کالیبراسیون این دستگاه در پی برداشت‌های متوالی میدانی از یک نقطه و توسط خود دستگاه صورت می‌گیرد و در صورتی که در چند برداشت متوالی اختلاف قابل توجهی در نتایج مشاهده نشود، دستگاه آماده به کار می‌باشد (شکل ۴۷). این روند ممکن است نزدیک به ۲ ساعت برای رویه آسفالتی بطول انجامد که زمان بسیار زیادی است. البته در محلی دیگر ممکن است این زمان در حدود ۱۰ دقیقه بطول انجامد که این بازه زمانی وسیع کالیبراسیون، یکی از نقاط ضعف این دستگاه می‌باشد [۴۱].



شکل ۴۷- دانسیته‌سنج هسته‌ای هنگام کالیبراسیون

#### ۲-۲-۵- روش انجام آزمایش

برای اندازه‌گیری دانسیته خاک، منبع رادیواکتیو دستگاه فوتون‌های اشعه گاما را در داخل خاک گسیل می‌دارد. هنگامیکه اشعه گاما در داخل قشر خاک روسازی حرکت می‌کند، با از دست دادن بخشی از انرژی خود که ناشی از برخورد با الکترون‌های خاک است، بازتاب می‌کند. بدین ترتیب آشکارساز دستگاه، فوتون‌های ساطع شده از منبع را دریافت و ثبت

می‌کند. زمانیکه دانسیته خاک افزایش یابد، تعداد فوتون‌هایی که به آشکارساز می‌رسند به علت افزایش برخوردهای رخ داده حین حرکت اشعه گاما در داخل قشر خاک کاهش می‌یابد. در هر دو روش سطحی و انتشار مستقیم، آشکارساز تعداد فوتون‌های بازتاب شده را شمارش می‌کند. تعداد فوتون‌ها با نسبت معکوس با دانسیته خاک رابطه دارد. در ادامه به چند مورد نکته اجرایی برای انجام آزمایش دانسیته‌سنج هسته‌ای اشاره خواهد شد [۴۵].

- ۱- برای داشتن مقادیر آزمایش هرچه دقیق‌تر و سازگارتر می‌بایست؛  
اولاً دستگاه برای مدتی پیش از انجام آزمایش روشن شده تا به حالت پایدار نزدیک شود و  
ثانیاً در طول روز آزمایش، دستگاه روشن نگاه داشته شود.
- ۲- ابزارهای هسته‌ای مطابق آنچه گفته شد استاندارد سازی شوند.
- ۳- محل‌های انجام آزمایش براساس مشخصات پروژه تعیین گردد.
- ۴- حداکثر تماس بین کف دستگاه و سطح رویه بسیار حائز اهمیت است. حداکثر فضای خالی نباید از ۶ میلیمتر تجاوز کند؛ می‌توان از ماسه نرم یا مصالح دیگر برای تراز نمودن و فراهم کردن سطح صاف استفاده نمود.
- ۵- برای روش انتشار مستقیم، می‌بایست میله فولادی دستگاه را در عمق حداقل ۲۵ میلیمتری (پائین‌تر از عمق مورد اندازه‌گیری) فرو برد.
- ۶- چشم رادیواکتیو می‌بایست در محل مناسب آن قرار داده شود. در روش انتشار مستقیم دستگاه باید در وجه مخالف سوراخ که میله در آن قرار داده شده قرار گیرد.
- ۷- نرخ شمارش اشعه گاما برای یک بازه اندازه‌گیری نرمال برداشت می‌شود.
- ۸- با بدست آوردن نرخ شمارش و ضریب اصلاحی و با کالیبراسیون صحیح، دستگاه قادر است چگالی حجمی را محاسبه نماید.
- ۹- استفاده از روش دانسیته‌سنجی هسته‌ای از پروژه‌ای به پروژه دیگر برای یک نوع دستگاه خاص دارای تفاوت جزئی می‌باشد و نتایج دو نوع دستگاه در یک پروژه کاملاً متناظر با هم نیستند.
- ۱۰- تسطیح دقیق محل انجام آزمایش در انجام آزمایش و در نتایج به‌دست آمده از آن بسیار موثر است. برای این کار، مصالح ماسه‌ای عبوری از الک ۳۰ و مانده روی الک ۱۰۰ دانه‌بندی مناسبی است. باید حتی‌الامکان سعی شود ماسه ریخته‌شده روی سطح آسفالت تشکیل لایه مجزا ندهند چون باعث تغییر نتایج آزمایش می‌شود.
- ۱۱- در محل‌هایی که بر اثر عریان‌شدگی و یا هر مشکل دیگری سطح آسفالت به صورت زبر و ناصاف در آمده است استفاده از آزمایش‌های هسته‌ای توصیه نمی‌شود.
- ۱۲- قرار گرفتن مناسب دستگاه هسته‌ای روی سطح روسازی یا خاک در نتایج دستگاه تأثیری تعیین‌کننده‌ای دارد. روش استفاده از پرتوهای نوترون روش مناسبی برای تعیین رطوبت خاک می‌باشد. برای این کار باید خاک عاری از مواد آلی و هیدروژن‌دار باشد.
- ۱۳- بهتر است هنگامی که از روش هسته‌ای در تعیین دانسیته خاک استفاده می‌شود از حالت پخش مستقیم با عمق‌های ۷/۶۲cm (۳ اینچ) و بیشتر از ۷/۶۲cm (۳ اینچ) استفاده شود و دستگاه به خوبی روی سطح خاک قرار

گیرد. برای مقایسه با روش دانسیته‌سنجی مخروط ماسه، بهترین عمق، عمق ۱۰ cm (۴ اینچ) می‌باشد.

۱۴- وجود هیدروژن در ماده سبب نمایش عدد دانسیته هسته‌ای بزرگتر از مقدار دانسیته واقعی و وجود عناصر سنگین نظیر باریوم، سرب و جیوه و ... که به صورت کمیاب در خاک وجود دارند، سبب نمایش عدد دانسیته هسته‌ای کوچکتر از مقدار دانسیته واقعی می‌شود که اصطلاحاً خطای ترکیب نامیده می‌شود. برای حذف یا کمتر کردن اثر این خطا در دستگاه‌های هسته‌ای می‌توان از داده‌های مستقل دیگر نظیر نرخ شمارش نوترون و فاکتور تصحیح K خاک استفاده کرد.

#### ۲-۲-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده

جهت کنترل کلی دستگاه، همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، برای تأمین صحت داده‌های برداشت شده، از دو آزمایش ثبات و شناوری برای دستگاه استفاده می‌شود. همچنین در هر روز آزمایش، قبل از شروع می‌بایست کنترل استانداردسازی دستگاه انجام گیرد. پیش از پرداختن به آزمایش‌های ثبات و شناوری، روش کنترل استانداردسازی دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای تشریح می‌شود.

##### استانداردسازی و کنترل مرجع<sup>۱</sup>

بخش‌های مختلف دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای مانند چشمه، آشکارساز و سیستم‌های الکترونیکی، به دلیل مواجهه با تشعشعات رادیواکتیو، در طولانی مدت دچار فرسودگی شده و ممکن است این فرسودگی باعث تغییر در رابطه بین نرخ شمارش و چگالی مصالح مورد آزمایش گردد. از این رو برای خنثی سازی این پیرشدگی و فرسودگی می‌بایست ابزارهای هسته‌ای را با استفاده از یک ضریب اصلاحی استاندارد نمود. این عمل با کمک استاندارد مرجع که یک قطعه از مصالح متراکم با چگالی معلوم است و در ابتدای هر روز آزمایش انجام می‌گیرد، صورت می‌پذیرد. ضریب اصلاحی در واقع نسبت بین نرخ شمارش استاندارد به نرخ شمارش اندازه‌گیری شده می‌باشد.

برای تعیین این ضریب در ابتدای هر روز، می‌بایست نخست هر گونه وسیله رادیواکتیو یا جسمی که در نتایج آزمایش تأثیرگذار باشد را حداقل در فاصله ۸ متری از دستگاه قرار داده و دستگاه را برای مدتی روشن کرده تا قسمت‌های مختلف آن گرم شده و شرایط پایدار آن ایجاد شود.

پس از آماده شدن دستگاه، با کمک استاندارد مرجع، در شرایط آزمایش، ۴ قرائت پی در پی انجام شده و میانگین‌گیری می‌شود. سپس قرائت پنجم ( $N_s$ ) برداشت شده و رابطه زیر برای آن کنترل می‌شود. در صورتیکه مقدار  $N_s$  در محدوده زیر قرار داشت، ابزارهای هسته‌ای دستگاه در وضعیت عملکردی رضایت بخشی قرار داشته و می‌توان از  $N_s$  برای محاسبه ضریب اصلاحی استفاده نمود، در غیر اینصورت باید آزمایش مجدداً تکرار شود. اگر کنترل استاندارد سازی ثانویه هم در محدوده قرار نگرفت، می‌بایست ابزارهای دستگاه برای بازبینی و تعمیر فرستاده شوند [۴۰].

$$|N_s - N_0| \leq 2.0 \sqrt{\frac{N_0}{f}}$$

$N_s$ : قرائت پنجم دستگاه

$N_0$ : میانگین قرائت‌های چهارگانه قبلی

F: مقداری که کارخانه می‌دهد

آزمایش ثبات

روند دریافت اشعه از چشمه توسط آشکارساز، دارای توزیع تصادفی است، که از نظر آماری مطابق با توزیع پواسن می‌باشد. در آزمایش ثبات، کاربر داده‌ها را از نظر مطابقت تئوری با توزیع پواسن کنترل می‌کند. خواص ذاتی توزیع پواسن از نظر امید ریاضی و واریانس در زیر بیان شده است. آزمایش ثبات باید بیان‌کننده تطبیق داده‌ها با این خواص باشد. تابع جرم احتمال توزیع پواسن طبق رابطه زیر می‌باشد:

$$P(x) = \frac{M^x e^{-M}}{x!}$$

در این رابطه؛

M: میانگین حقیقی جمعیت

x: مقدار صحیح متغیر تصادفی گسسته

e: پایه لگاریتم طبیعی

P(x): تابع جرم احتمال توزیع پواسن

امید ریاضی و واریانس برای توزیع پواسن به ترتیب زیر بدست می‌آید:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$$

$$\text{امید ریاضی توزیع پواسن} = \sum_{x=0}^{+\infty} \frac{xM^x e^{-M}}{x!} = e^{-M} \sum_{x=1}^{+\infty} \frac{M^x}{(x-1)!} = Me^{-M} \sum_{x=0}^{+\infty} \frac{M^x}{x!}$$

$$e^M = \sum_{x=0}^{+\infty} \frac{M^x}{x!}$$

$$\text{امید ریاضی توزیع پواسن} = Me^{-M} e^M = M$$

به طور کلی؛

$$\sigma^2 = \text{Var}[x] = E[(x-M)^2] = E[x^2] - M^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x)dx - M^2$$

$$\sigma^2 = \sum_{x=1}^{+\infty} \frac{x^2 M^x e^{-M}}{x!} - M^2 = Me^{-M} \left[ \sum_{x=0}^{+\infty} \frac{xM^x}{x!} + \sum_{x=0}^{+\infty} \frac{M^x}{x!} \right] - M^2$$

$$= Me^{-M}(Me^M + e^M) - M^2 = M^2 + M - M^2 = M$$

پس از روابط فوق این نتیجه حاصل می‌شود که، در توزیع پواسن، انحراف معیار با جذر میانگین برابر است.

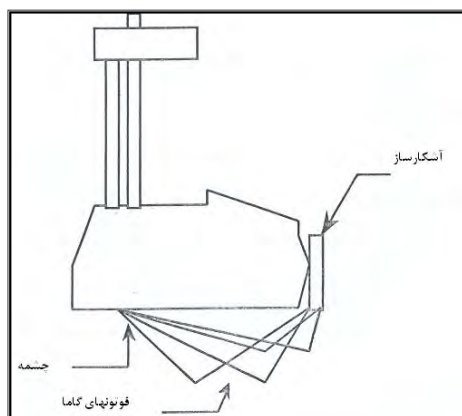
با در نظر داشتن این فرض که اگر از داده‌های نرخ شمارش گاما، میانگین و انحراف معیار گرفته شود و سپس تقسیم بر جذر میانگین برابر با  $0.25$  باشد، از مرجع استاندارد دستگاه  $20$  داده در حالت متوسط (Norm) اخذ شده و با روند فوق‌الذکر تطبیق داده می‌شود، اگر خارج قسمت انحراف معیار بر جذر میانگین  $20$  داده، در محدوده  $0.18$  تا  $0.35$  قرار گرفت، کارکرد درست دستگاه مورد تایید است [۴۰].

### آزمایش شناوری

در آزمایش شناوری، پس از پایان کار روزانه، این آزمایش روی دستگاه انجام می‌گیرد. به این ترتیب که در حالت کند دستگاه،  $5$  داده برای تعیین رطوبت و  $5$  داده برای تعیین دانسیته اخذ می‌شود. میانگین مقادیر برداشت شده در هر مورد تعیین می‌گردد. تفاضل میانگین بدست آمده با میانگین داده‌های آزمایش ثبات که بوسیله همان دستگاه و در همان روز گرفته شده است بر میانگین  $5$  داده تقسیم شده و در  $100$  ضرب می‌گردد. عدد بدست آمده می‌بایست از مقدار  $5$  درصد برای رطوبت و  $1$  درصد برای دانسیته بزرگتر باشد.

بمنظور بررسی همخوانی روش غیرمخرب هسته‌ای با مغزه‌گیری از دستگاه ساده‌ای استفاده می‌گردد که شرایط اولیه مورد نیاز آزمایش توسط آن برآورده می‌شود. برای این کار از چشمه رادیواکتیو سزیم ( $^{137}\text{Cs}$ ) به میزان  $5\text{mCi}$  استفاده می‌شود که در فاصله  $30\text{cm}$  از آن یک آشکارساز مولر- گایگر برای اندازه‌گیری میزان اشعه قرار می‌گیرد. نمای دستگاه در شکل ۴۸، نشان داده شده است. با این وسیله  $5$  سری داده با اسامی  $a, b, c, e$  و  $f$  برداشت می‌شود که هر سری نمونه از جای مشخص‌شده‌ای هستند. نمونه‌های نوع  $a$  از آسفالت نکوبیده و نزدیک جدول خیابان با دانسیته پایین که ترافیک کمی از روی آن عبور می‌کند، برداشت می‌شود. نمونه‌های نوع  $b$  از آسفالت روی کانال و نمونه  $c$  از آسفالت مسیر اصلی برداشت می‌شود. نمونه‌های نوع  $e$  از جنس آسفالت با قیر بالا بوده و بالاخره نمونه‌های  $f$  از مخلوط آسفالتی در مسیری غیرقابل عبور توسط اتومبیل که خوب هم کوبیده نشده بود، برداشت می‌شود.

نوع آشکارساز برای نقاط  $a, b$  و  $c$  یکی و برای نقاط  $e$  و  $f$  نوعی دیگر می‌باشد. به همین دلیل سعی نمی‌شود نمونه با اسامی مختلف با هم مقایسه شوند. برای هر نمونه در چهار جهت شمال، غرب، جنوب و شرق برداشت داده صورت می‌گیرد. نهایتاً،  $92$  داده هسته‌ای برداشت شده که تعداد نمونه‌های  $d$ ، سه عدد و بقیه نمونه‌ها  $5$  عدد هستند. داده هسته‌ای در اینجا به مفهوم نرخ شمارش یک دقیقه‌ای آشکارساز مولر- گایگر است [۴۲].



[شکل ۴۸- شماتیک دستگاه مورد استفاده در داده‌برداری هسته‌ای]

پس از داده‌برداری به روش فوق برای به دست آوردن دانسیته واقعی نمونه آسفالتی، به وسیله دستگاه مغزه‌گیر، مغزه‌هایی به قطر ۱۰ cm درست در وسط جایی که آزمایش هسته‌ای انجام شده است گرفته می‌شود. پس از برش سر و ته کل نمونه‌های به دست آمده که تا حد ممکن به شکل نمونه‌های مارشال هستند از هر نمونه دانسیته واقعی گرفته می‌شود. ملاک اصلی در اینجا مقایسه دانسیته واقعی با داده‌های هسته‌ای مربوط به هر نمونه است که بالطبع باید هر چه نمونه چگالتر باشد اشعه کمتری به آشکارساز برسد. پس نمونه‌های با دانسیته بالا دارای نرخ شمارش پایین‌تری هستند. البته در اینجا چند متغیر وجود دارند که در داده‌های هسته‌ای خطا ایجاد می‌کنند و لذا دو خطای اصلی در این زمینه عبارتند از: خطای سطح و خطای ترکیب.

#### خطای ناشی از بافت سطح

بدلیل اینکه این روش آزمایش نوعی اندازه‌گیری دانسیته به روش سطحی می‌باشد، خطای ناشی از بافت سطح به میزان زیادی بروز می‌کند. این خطا به حفره‌های موجود در سطح روسازی مربوط می‌شود وجود این حفره‌ها باعث می‌شوند که اشعه، مسیر گریزی برای رسیدن به آشکارساز بیابد و نتایج آزمایش را تحت تاثیر قرار دهد. استاندارد ASTM D2950-94 حداکثر میزان این حفره‌ها را از نظر اندازه تعیین کرده است. با این وجود درصد خطای خاصی که مربوط به نوع دستگاه می‌باشد در راهنمای مربوطه دستگاه در اختیار استفاده‌کننده قرار می‌گیرد. لازم به تذکر است که خطای ناشی از بافت سطح همیشه باعث کمتر شدن میزان دانسیته بدست آمده می‌شود [۴۶].

#### خطای ترکیب

این خطا یک نوع خطای شیمیایی است که به ترکیب موادی که دانسیته آنها اندازه‌گیری می‌شود بستگی دارد. اگر  $Z$  بعنوان عدد اتمی عنصر تعریف شود و  $A$  سطح مقطعی از اتم عنصر باشد که در آن اشعه گاما جذب می‌شود، متغیر  $\frac{Z}{A}$  نشان‌دهنده میزان تاثیر این خطاست. عناصر معمول موجود در خاک که شامل اکسیژن، سیلیسیم، آلومینیوم، آهن، کلسیم، سدیم، پتاسیم و منیزیم می‌باشند دارای  $\frac{Z}{A}$  بین ۰/۴۶۶ تا ۰/۵ هستند که همگی نزدیک ۰/۵ می‌باشند. با فاصله گرفتن ضریب  $\frac{Z}{A}$  از عدد ۰/۵، خطای ترکیب بروز می‌کند. عنصر هیدروژن دارای ضریب  $\frac{Z}{A}$  برابر با ۰/۹۹۲ است که ایجاد خطای ترکیب می‌کند. این خطا به این شکل است که اشعه گاما دانسیته مصالح هیدروژن‌دار را بیشتر از آنچه هست نشان می‌دهد.

در آسفالت عمده خطای ترکیب موجود به دلیل وجود قیر می‌باشد که دارای اتم‌های هیدروژن است [۴۶]. برای مطمئن شدن از نتایج دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای باید آنها را با روشی که نتایج دقیقی می‌دهد، یعنی مغزه‌گیری، مقایسه نمود و میزان همبستگی این نتایج با یکدیگر و با نتایج حاصله از مغزه‌گیری را محاسبه کرد. مقایسه نتایج دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای و مغزه‌گیری در مطالعات مختلفی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. برای مثال در یک تحقیق وسیع در منطقه موریتاون<sup>۱</sup> و رچستر<sup>۲</sup> برای سه نوع گیج هسته‌ای مختلف<sup>۳</sup>، دانسیته روسازی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت [۲۰]. در این بخش از ذکر جزئیات مرتبط با تحقیق انجام گرفته و نمودارها و جداول آن صرف نظر شده و فقط به نتایج بدست آمده از آن که در اکثر تحقیقات دیگر نیز نتایج مشابهی با قرابت قابل ملاحظه‌ای حاصل شده است، اکتفا می‌شود. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که:

الف- بین کاربرد گیج‌های هسته‌ای در پروژه تفاوت خاصی وجود داشت، درضمن پیوستگی خوبی برای یک نوع گیج هسته‌ای، از پروژه‌ای به پروژه دیگر مشاهده گردیده است.

ب- کاربرد گسترده این نوع گیج‌ها با دقت بالا در پروژه‌های مختلف توصیه نشده است و جانشینی آنها به جای مغزه‌گیری با دقت بالا مناسب نیست.

ج- کاربرد این نوع گیج‌ها دارای مزیت‌های زیادی است که نمی‌توان به سادگی از کنار آنها گذشت. این مزیت‌ها شامل تعداد زیادی برداشت بدون خرابی و امکان برداشت‌های تصادفی زیاد است و همچنین وقت زیادی برای مغزه‌گیری و انتظار جواب آن صرف نمی‌شود.

د- با توجه به اینکه روش مغزه‌گیری مطمئن‌ترین روش تعیین دانسیته می‌باشد، به منظور کنترل و اطمینان صحت نتایج آزمایش‌های صورت گرفته با دانسیته‌سنج هسته‌ای، انجام تعداد محدودی آزمایش مغزه‌گیری در هر پروژه توصیه می‌شود.

## ۲-۲-۲- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده

یک نمونه کاربرد عملی از تحلیل نتایج بدست آمده از گیج‌های هسته‌ای تعیین دانسیته در ادامه آورده شده است:

### کاربرد عملی ۱

دستگاه‌های دانسیته‌سنج هسته‌ای از نوع تراکسلر 3411B به اهداف اولیه کاربرد در رطوبت‌سنجی و دانسیته‌سنجی خاک ساخته شده‌اند. به همین دلیل کارکرد این دستگاه‌ها در خاک بسیار دقیق‌تر از آسفالت می‌باشد و همچنین با دقت بالایی رطوبت موجود در خاک را اندازه می‌گیرند. برای بررسی این موضوع یک سری داده‌برداری در خاک بستر فرودگاه امام خمینی(ره) در این زمینه صورت گرفت که نتایج آن در این قسمت بیان خواهد شد. روند کاری در این آزمایش‌ها به این صورت بود که از ۶ نقطه خاک بستر فرودگاه که تازه کوبیده شده بود داده‌برداری شد و بعد از انجام آزمایش‌های هسته‌ای، دانسیته و درصد رطوبت خاک با دقت خوبی به دست آمده و داده‌های متناظر در پایان با هم مقایسه شدند [۴۳].

1. Morristown  
2. Rochester  
3. Troxler, CPN, Simon

داده‌های هسته‌ای در این آزمایش به این ترتیب به دست آمدند که برای هر نقطه در ۶ عمق متفاوت (سطح زمین، ۵cm، ۷/۵cm، ۱۰cm، ۱۲/۵cm و ۱۵cm) و برای هر عمق سه داده در حالت متوسط دستگاه گرفته شد که مجموعاً برای دانسیته کلیه نقاط ۱۰۸ داده و برای درصد رطوبت نیز ۱۰۸ داده به دست آمد. هدف نهایی از انجام آزمایش فوق موارد زیر بوده‌است.

۱- به دست آوردن بهترین عمق برای تطبیق دانسیته هسته‌ای با دانسیته آزمایشگاهی که به صورت آزمایش مخروط ماسه<sup>۱</sup> انجام می‌شود.

۲- به دست آوردن ضریب تصحیح دانسیته هسته‌ای برای عمق بهینه و به دست آوردن این که آیا تصحیح داده‌ها لازم است یا نه.

۳- بررسی روند تغییر دانسیته هسته‌ای به دست آمده برحسب عمق اندازه‌گیری.

۴- محاسبه فاکتور تصحیح رطوبت برای خاک مورد نظر.

با استفاده از داده‌های به دست آمده عمق بهینه برای محاسبه دانسیته هسته‌ای خاک محاسبه شد. در محاسبه دانسیته آزمایشگاهی، معمولاً گودالی برای آزمایش مخروط ماسه حفر می‌شود که دارای ۱۲ تا ۱۴ سانتی‌متر عمق می‌باشد. دانسیته هسته‌ای در حالت ۱۰cm (۴ اینچ) برابر با دانسیته آزمایشگاهی به روش مخروط ماسه می‌باشد به این مفهوم که حجم اندازه‌گیری شده توسط این دو روش بیشترین نزدیکی را به هم دارند [۴۳].

برای بررسی موضوع فوق درصد خطای دانسیته، M، برای هر عمق در هر نقطه حساب شد.

۱. وسیله انجام آزمایش مخروط ماسه، یک تنگ شیشه‌ای یا پلاستیکی می‌باشد که به سر آن یک قیف مخروطی فلزی نصب شده است. تنگ به وسیله قیف، توسط هرگونه ماسه تمیز، خشک و روان که ذراتش به هم نجسبیده باشند و مقدار ناچیز دانه‌های رده‌شده از الک ۰/۷۵ میلی‌متر یا مانده روی الک ۲ میلی‌متر داشته باشد، پر شده است. وزن تنگ، قیف و ماسه درون آن اندازه‌گیری شده و با W<sub>۱</sub> نشان داده می‌شود. در کارگاه در نقطه دلخواه از ناحیه متراکم شده، حفره کوچکی حفر می‌شود، اگر وزن خاک مرطوبی که از داخل این حفره حفاری شده (W<sub>۲</sub>)، تعیین گردد و میزان رطوبت خاک حفاری شده معلوم باشد، وزن خشک خاک (W<sub>۳</sub>) بدست می‌آید:

$$W_r = \frac{W_2}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

بعد از حفاری حفره، مخروط با تنگ پر از ماسه متصل به آن در روی حفره قرار داده شده و به ماسه اجازه داده می‌شود که به سمت خارج از تنگ جریان یابد و حفره و قیف را پر کند. سپس، وزن تنگ، قیف و ماسه باقیمانده در تنگ اندازه‌گیری شده و با W<sub>۴</sub> نشان داده می‌شود. بنابراین:

$$W_5 = W_1 - W_4$$

که در آن W<sub>۵</sub> وزن ماسه درون قیف و حفره می‌باشد.

حال می‌توان حجم حفره حفاری شده را به صورت زیر تعیین کرد:

$$V = \frac{W_5 - W_C}{\gamma_d(\text{sand})}$$

که در آن :

W<sub>C</sub> : وزن ماسه لازم برای پر کردن قیف

$\gamma_d(\text{sand})$  = دانسیته خشک ماسه مورد استفاده

مقادیر W<sub>C</sub> و دانسیته خشک ماسه در آزمایشگاه تعیین می‌گردند. حال دانسیته خشک خاک متراکم شده را می‌توان با استفاده از رابطه زیر تعیین کرد:

$$\gamma_d = \frac{W_3}{V}$$

$$M = \frac{\text{دانسیتة گيچ هسته‌ای} - \text{دانسیتة آزمایشگاهی}}{\text{دانسیتة}} \times 100$$

سپس از درصد خطای نقاط مختلف در اعماق مشابه میانگین گرفته شد. کوچک‌ترین درصد خطایی که با این ترتیب به دست می‌آید نشان‌دهنده بهترین عمقی است که با دانسیته آزمایشگاهی هم‌خوانی دارد. میانگین درصد خطاهای ذکر شده در فوق در جدول ۲۱، آورده شده است.

جدول ۲۱- درصد خطا در آزمایش هسته‌ای نسبت به آزمایش مخروط ماسه [۴۳]

| عمق | میانگین درصد خطا |
|-----|------------------|
| سطح | ۴/۴۸             |
| ۲   | ۱/۷۶             |
| ۳   | ۱/۰۵             |
| ۴   | ۰/۳۲             |
| ۵   | ۰/۴۴             |
| ۶   | ۰/۲۹             |

همچنان که از جدول ۲۱، مشاهده می‌شود. عمق‌های ۴ و ۵ و ۶ اینچ، خطای کمی را نشان می‌دهند و از نظر آزمایشگاهی می‌توان دانسیته آنها را با دانسیته آزمایشگاهی یکی دانست و از روند اعداد مشخص است که بهترین عمق همان عمق ۱۰ cm (۴ اینچ) است.

طبق تئوری ذکر شده در دستگاه هر چه اندازه‌گیری در عمق بیشتری انجام شود چون حجم مورد محاسبه بیشتر است دانسیته به دست آمده دقیق‌تر خواهد بود، ولی چون در عمق‌های بالا دانسیته خاک نسبت به سطح تغییر می‌کند برای جایگزینی آزمایش مخروط ماسه بهتر است از حالت ۱۰ cm (۴ اینچ) دستگاه استفاده شود.

اختلاف موجود بین دانسیته واقعی حاصل از آزمایش هسته‌ای در حالت‌های سطح زمین و ۵ cm (۲ اینچ) به خاطر خطای سطح است که در اعماق پایین دستگاه، بروز می‌کنند. این خطا در حالت سطحی به بیشترین مقدار خودش می‌رسد و سبب کمتر شدن داده‌ها نسبت به میزان واقعی آن می‌شود. برای کمتر شدن خطای سطح باید حتی الامکان سطح مورد آزمایش صاف و عاری از حفرات ریز باشد [۴۳].

## ۲-۲-۳- مقایسه دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای

در جدول ۲۲، دو روش آزمایش هسته‌ای و غیرهسته‌ای با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

جدول ۲۲- مقایسه آزمایش‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تعیین دانسیته [۴۷]

| پارامترهای مقایسه         | وضعیت دستگاه‌ها                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سهولت در حمل              | دستگاه دانسیته‌سنج تراکسلر در حدود ۳۰/۵ پوند (۱۴ کیلوگرم) و دستگاه PQI در حدود ۱۵/۴ پوند (۷ کیلوگرم) وزن دارند. این موضوع با توجه به دفعات چند صد بار اندازه‌گیری در روز اهمیت می‌یابد.                                                                                                                                   |
| زمان گرم شدن (Warm-Up)    | دستگاه هسته‌ای نیازمند حدود ۱۵ دقیقه بازه زمانی برای گرم شدن و شمارش استاندارد می‌باشد درحالیکه دستگاه PQI به محض روشن شدن آماده برداشت می‌باشد.                                                                                                                                                                          |
| زمان آزمایش               | به طور کلی یک برداشت کامل در یک نقطه توسط دانسیته‌سنج تراکسلر ۲ دقیقه زمان لازم دارد در حالیکه این زمان توسط PQI فقط ۲۰ ثانیه خواهد برد.                                                                                                                                                                                  |
| سهولت در قرائت صفحه نمایش | صفحه نمایش دستگاه PQI اولاً در نور مستقیم خورشید به سادگی قابل رؤیت است و ثانیاً نیاز به محاسبات و متوسط گیری ندارد در حالیکه در دستگاه دانسیته‌سنج تراکسلر، انجام محاسبات نیازمند یک تکنیسین می‌باشد.                                                                                                                    |
| صفحه کلید و عملکردها      | دو دستگاه دارای صفحه کلیدهایی برای ورود آسان داده‌ها می‌باشند. اما در دستگاه PQI صفحه کلید دارای عملکردهای اضافی بوده و کاربر پسندتر است.                                                                                                                                                                                 |
| تجدید آزمایش              | برای ارزیابی تکرارپذیری نتایج دستگاه‌ها، در یک محل معین، آزمایش تکرار می‌گردد. دستگاه PQI با دقت بسیار بالایی، نتایج را تکرار می‌کند این در حالیست که دستگاه دانسیته‌سنج تراکسلر با نوسانات فاحش و بزرگ در تکرارپذیری مواجه است.                                                                                          |
| محدوده دقت گیج‌ها         | محدوده دقت در دو گیج هسته‌ای و غیرهسته‌ای با یکدیگر اختلاف فاحش دارند. در دستگاه دانسیته‌سنج تراکسلر این محدوده بین ۲ تا ۴ پوند بر فوت مکعب بوده در حالیکه در دستگاه PQI این محدوده بین ۱۰ تا ۱۲ پوند بر فوت مکعب می‌باشد. در هر دو گیج، چگالی‌های اندازه‌گیری شده خارج از این محدوده از مقدار واقعی چگالی مغزه کمتر است. |
| تأثیر بافت سطحی           | بافت سطحی در نتایج بدست آمده از دستگاه هسته‌ای تراکسلر بسیار مؤثر بوده و باعث تغییرات تا ۵ پوند بر فوت مکعب می‌شود. این در حالیست که در دستگاه PQI هیچ‌گونه تغییر قابل ملاحظه‌ای مشهود نبوده است.                                                                                                                         |

## ۲-۲-۴- تناوب زمانی و مکانی انجام آزمایش‌های تعیین دانسیته

طبق آیین‌نامه ASTM، تناوب‌های مکانی، زمانی و یا هر دو برای کاربرد آزمایش‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تعیین دانسیته، می‌بایست براساس دستورالعمل‌های اجرایی که در هر پروژه حسب اهداف تعریف شده آن ابلاغ می‌شود، انجام گیرد. درغیراینصورت روشی که این آیین‌نامه برای تناوب‌های نمونه‌گیری معرفی می‌کند، روش تصادفی<sup>۱</sup> است.

در این روش، تعیین مکان یا زمان هر نمونه‌گیری براساس یک روش آماری تصادفی استوار می‌باشد. در واقع با انتخاب تصادفی اعداد اعشاری از جدول ۲۳ و ۲۴، و ضرب آن در مقادیر طول، مسافت، زمان و غیره می‌توان به تهیه نمونه‌ها مبادرت کرد [۴۸].

#### نمونه‌گیری در محل (In-Situ) روسازی

ابتدا می‌بایست طول و عرض قطعه موردنظر را تعیین نمود، سپس براساس تعداد نمونه‌هایی که باید از هر قطعه برداشت شود، از جدول ۳-۱۱ به صورت تصادفی عدد استخراج گردد. برای روشن‌تر شدن موضوع، مثالی در همین رابطه ارائه می‌شود.

#### ■ مثال

یک قطعه روسازی به طول ۱/۶ کیلومتر و عرض ۳/۶ متر تعریف شده است. لازم است ۲ نمونه برای تعیین دانسیته به روش هسته‌ای یا غیرهسته‌ای از این قطعه برداشت شود. بدین ترتیب از جدول ۲۳ و ۲۴، عدد به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد:

۰/۳۷۶

۰/۵۲۹

با ضرب این دو عدد در طول ۱۶۰۰ متر قطعه، معلوم خواهد شد که یک نمونه در طول ۶۰۲ متری و نمونه دیگر در طول ۸۴۶ متری می‌بایست برداشت شود. حال می‌بایست فاصله از لبه راه برای نمونه‌ها تعیین شود. بنابراین مجدداً دو عدد دیگر از جدول استخراج می‌شود:

۰/۵۱۲

۰/۷۰۸

بدین ترتیب می‌بایست نمونه اول در فاصله ۶۰۲ متری از ابتدای قطعه و ۱/۸ متری از لبه راست یا چپ راه و نمونه دوم در فاصله ۸۴۶ متری از ابتدای قطعه و ۲/۵ متری از لبه راست یا چپ راه انتخاب شود.

جدول ۲۳- جدول اعداد تصادفی [۴۸]

|    | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 0.272 | 0.519 | 0.098 | 0.459 | 1.000 | 0.554 | 0.250 | 0.246 | 0.736 | 0.432 |
| 2  | 0.994 | 0.978 | 0.693 | 0.593 | 0.690 | 0.028 | 0.831 | 0.319 | 0.073 | 0.268 |
| 3  | 0.039 | 0.449 | 0.737 | 0.501 | 0.960 | 0.254 | 0.239 | 0.474 | 0.031 | 0.720 |
| 4  | 0.144 | 0.695 | 0.339 | 0.621 | 0.128 | 0.032 | 0.413 | 0.617 | 0.764 | 0.257 |
| 5  | 0.312 | 0.138 | 0.670 | 0.894 | 0.682 | 0.061 | 0.832 | 0.765 | 0.226 | 0.745 |
| 6  | 0.871 | 0.838 | 0.595 | 0.576 | 0.096 | 0.581 | 0.245 | 0.786 | 0.412 | 0.867 |
| 7  | 0.783 | 0.874 | 0.795 | 0.430 | 0.265 | 0.059 | 0.260 | 0.563 | 0.632 | 0.394 |
| 8  | 0.358 | 0.424 | 0.684 | 0.074 | 0.109 | 0.345 | 0.618 | 0.176 | 0.352 | 0.748 |
| 9  | 0.494 | 0.839 | 0.337 | 0.325 | 0.699 | 0.083 | 0.043 | 0.809 | 0.981 | 0.499 |
| 10 | 0.642 | 0.514 | 0.297 | 0.869 | 0.744 | 0.824 | 0.524 | 0.656 | 0.608 | 0.408 |
| 11 | 0.485 | 0.240 | 0.292 | 0.335 | 0.088 | 0.589 | 0.127 | 0.396 | 0.401 | 0.407 |
| 12 | 0.728 | 0.819 | 0.557 | 0.050 | 0.152 | 0.816 | 0.404 | 0.079 | 0.703 | 0.493 |
| 13 | 0.029 | 0.262 | 0.558 | 0.159 | 0.767 | 0.175 | 0.979 | 0.521 | 0.781 | 0.843 |
| 14 | 0.918 | 0.348 | 0.311 | 0.232 | 0.797 | 0.921 | 0.995 | 0.225 | 0.397 | 0.356 |
| 15 | 0.641 | 0.013 | 0.780 | 0.478 | 0.529 | 0.520 | 0.093 | 0.426 | 0.323 | 0.504 |
| 16 | 0.208 | 0.468 | 0.045 | 0.798 | 0.065 | 0.315 | 0.318 | 0.742 | 0.597 | 0.080 |
| 17 | 0.346 | 0.429 | 0.537 | 0.469 | 0.697 | 0.124 | 0.541 | 0.525 | 0.281 | 0.962 |
| 18 | 0.900 | 0.206 | 0.539 | 0.308 | 0.480 | 0.293 | 0.448 | 0.010 | 0.836 | 0.233 |
| 19 | 0.228 | 0.369 | 0.513 | 0.762 | 0.952 | 0.856 | 0.574 | 0.158 | 0.689 | 0.579 |
| 20 | 0.746 | 0.170 | 0.974 | 0.306 | 0.145 | 0.139 | 0.417 | 0.195 | 0.338 | 0.901 |
| 21 | 0.363 | 0.103 | 0.931 | 0.389 | 0.199 | 0.488 | 0.915 | 0.067 | 0.878 | 0.640 |
| 22 | 0.663 | 0.942 | 0.278 | 0.785 | 0.638 | 0.002 | 0.989 | 0.462 | 0.927 | 0.186 |
| 23 | 0.545 | 0.185 | 0.054 | 0.198 | 0.717 | 0.247 | 0.913 | 0.975 | 0.555 | 0.559 |
| 24 | 0.360 | 0.349 | 0.569 | 0.910 | 0.420 | 0.492 | 0.947 | 0.115 | 0.884 | 0.452 |
| 25 | 0.789 | 0.815 | 0.464 | 0.484 | 0.020 | 0.007 | 0.547 | 0.941 | 0.365 | 0.261 |
| 26 | 0.279 | 0.609 | 0.086 | 0.852 | 0.890 | 0.108 | 0.076 | 0.089 | 0.662 | 0.607 |
| 27 | 0.680 | 0.235 | 0.706 | 0.827 | 0.572 | 0.769 | 0.310 | 0.036 | 0.329 | 0.477 |
| 28 | 0.078 | 0.444 | 0.178 | 0.651 | 0.423 | 0.672 | 0.517 | 0.660 | 0.657 | 0.972 |
| 29 | 0.676 | 0.830 | 0.531 | 0.888 | 0.305 | 0.421 | 0.307 | 0.502 | 0.112 | 0.808 |
| 30 | 0.861 | 0.899 | 0.643 | 0.771 | 0.037 | 0.241 | 0.582 | 0.578 | 0.634 | 0.077 |
| 31 | 0.111 | 0.364 | 0.970 | 0.669 | 0.548 | 0.687 | 0.639 | 0.510 | 0.105 | 0.549 |
| 32 | 0.289 | 0.857 | 0.948 | 0.980 | 0.132 | 0.094 | 0.298 | 0.870 | 0.309 | 0.441 |
| 33 | 0.961 | 0.893 | 0.392 | 0.377 | 0.864 | 0.472 | 0.009 | 0.946 | 0.766 | 0.287 |
| 34 | 0.637 | 0.986 | 0.753 | 0.566 | 0.213 | 0.807 | 0.017 | 0.460 | 0.515 | 0.630 |
| 35 | 0.834 | 0.121 | 0.255 | 0.453 | 0.376 | 0.583 | 0.422 | 0.371 | 0.399 | 0.366 |
| 36 | 0.284 | 0.490 | 0.402 | 0.151 | 0.044 | 0.436 | 0.747 | 0.694 | 0.136 | 0.585 |
| 37 | 0.038 | 0.814 | 0.594 | 0.911 | 0.324 | 0.322 | 0.895 | 0.411 | 0.160 | 0.367 |
| 38 | 0.351 | 0.283 | 0.027 | 0.220 | 0.685 | 0.527 | 0.943 | 0.556 | 0.853 | 0.612 |
| 39 | 0.143 | 0.384 | 0.645 | 0.479 | 0.489 | 0.052 | 0.187 | 0.990 | 0.912 | 0.750 |
| 40 | 0.512 | 0.056 | 0.018 | 0.122 | 0.303 | 0.803 | 0.553 | 0.729 | 0.205 | 0.925 |
| 41 | 0.296 | 0.705 | 0.156 | 0.616 | 0.534 | 0.168 | 0.564 | 0.866 | 0.739 | 0.850 |
| 42 | 0.451 | 0.536 | 0.768 | 0.518 | 0.481 | 0.880 | 0.835 | 0.734 | 0.427 | 0.847 |
| 43 | 0.837 | 0.405 | 0.591 | 0.370 | 0.104 | 0.848 | 0.004 | 0.414 | 0.354 | 0.707 |
| 44 | 0.724 | 0.153 | 0.841 | 0.829 | 0.470 | 0.391 | 0.388 | 0.163 | 0.817 | 0.790 |
| 45 | 0.665 | 0.825 | 0.671 | 0.623 | 0.770 | 0.400 | 0.068 | 0.440 | 0.019 | 0.944 |
| 46 | 0.573 | 0.716 | 0.266 | 0.456 | 0.434 | 0.467 | 0.603 | 0.169 | 0.721 | 0.779 |
| 47 | 0.332 | 0.702 | 0.300 | 0.570 | 0.945 | 0.968 | 0.649 | 0.097 | 0.118 | 0.242 |
| 48 | 0.755 | 0.951 | 0.937 | 0.550 | 0.879 | 0.162 | 0.791 | 0.810 | 0.625 | 0.674 |
| 49 | 0.439 | 0.491 | 0.855 | 0.446 | 0.773 | 0.542 | 0.416 | 0.350 | 0.957 | 0.419 |
| 50 | 0.700 | 0.877 | 0.442 | 0.286 | 0.526 | 0.071 | 0.154 | 0.988 | 0.333 | 0.626 |

جدول ۲۴- جدول اعداد تصادفی [۴۸]

|     | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 51  | 0.523 | 0.613 | 0.752 | 0.733 | 0.528 | 0.072 | 0.820 | 0.929 | 0.777 | 0.461 |
| 52  | 0.905 | 0.182 | 0.567 | 0.249 | 0.227 | 0.229 | 0.604 | 0.304 | 0.217 | 0.142 |
| 53  | 0.373 | 0.120 | 0.602 | 0.793 | 0.692 | 0.863 | 0.954 | 0.873 | 0.107 | 0.675 |
| 54  | 0.057 | 0.953 | 0.041 | 0.090 | 0.223 | 0.508 | 0.806 | 0.438 | 0.203 | 0.586 |
| 55  | 0.967 | 0.040 | 0.708 | 0.271 | 0.189 | 0.342 | 0.740 | 0.801 | 0.985 | 0.263 |
| 56  | 0.917 | 0.715 | 0.758 | 0.005 | 0.666 | 0.599 | 0.934 | 0.100 | 0.987 | 0.085 |
| 57  | 0.131 | 0.646 | 0.659 | 0.047 | 0.051 | 0.562 | 0.435 | 0.731 | 0.362 | 0.317 |
| 58  | 0.326 | 0.605 | 0.443 | 0.601 | 0.386 | 0.560 | 0.378 | 0.172 | 0.445 | 0.636 |
| 59  | 0.299 | 0.106 | 0.237 | 0.732 | 0.796 | 0.476 | 0.099 | 0.804 | 0.735 | 0.950 |
| 60  | 0.101 | 0.055 | 0.776 | 0.686 | 0.171 | 0.533 | 0.936 | 0.095 | 0.982 | 0.211 |
| 61  | 0.267 | 0.598 | 0.754 | 0.658 | 0.274 | 0.215 | 0.177 | 0.218 | 0.330 | 0.628 |
| 62  | 0.471 | 0.102 | 0.454 | 0.568 | 0.963 | 0.357 | 0.882 | 0.507 | 0.157 | 0.580 |
| 63  | 0.535 | 0.881 | 0.014 | 0.966 | 0.958 | 0.190 | 0.180 | 0.759 | 0.433 | 0.355 |
| 64  | 0.277 | 0.458 | 0.295 | 0.196 | 0.772 | 0.148 | 0.466 | 0.291 | 0.688 | 0.046 |
| 65  | 0.719 | 0.167 | 0.181 | 0.653 | 0.328 | 0.070 | 0.015 | 0.155 | 0.631 | 0.063 |
| 66  | 0.385 | 0.858 | 0.713 | 0.883 | 0.916 | 0.084 | 0.561 | 0.999 | 0.379 | 0.668 |
| 67  | 0.862 | 0.928 | 0.822 | 0.812 | 0.977 | 0.395 | 0.788 | 0.920 | 0.673 | 0.698 |
| 68  | 0.486 | 0.938 | 0.757 | 0.749 | 0.991 | 0.219 | 0.264 | 0.932 | 0.898 | 0.006 |
| 69  | 0.091 | 0.872 | 0.959 | 0.922 | 0.727 | 0.811 | 0.075 | 0.374 | 0.133 | 0.730 |
| 70  | 0.146 | 0.482 | 0.930 | 0.611 | 0.179 | 0.011 | 0.248 | 0.886 | 0.344 | 0.926 |
| 71  | 0.709 | 0.184 | 0.390 | 0.409 | 0.191 | 0.117 | 0.860 | 0.135 | 0.406 | 0.134 |
| 72  | 0.996 | 0.896 | 0.760 | 0.347 | 0.053 | 0.372 | 0.193 | 0.756 | 0.565 | 0.914 |
| 73  | 0.971 | 0.859 | 0.147 | 0.114 | 0.418 | 0.889 | 0.792 | 0.064 | 0.652 | 0.288 |
| 74  | 0.202 | 0.538 | 0.026 | 0.949 | 0.696 | 0.008 | 0.846 | 0.259 | 0.415 | 0.425 |
| 75  | 0.212 | 0.321 | 0.778 | 0.940 | 0.496 | 0.231 | 0.664 | 0.903 | 0.473 | 0.909 |
| 76  | 0.207 | 0.799 | 0.487 | 0.022 | 0.813 | 0.891 | 0.500 | 0.368 | 0.725 | 0.437 |
| 77  | 0.818 | 0.503 | 0.906 | 0.224 | 0.904 | 0.892 | 0.455 | 0.343 | 0.924 | 0.197 |
| 78  | 0.701 | 0.984 | 0.174 | 0.141 | 0.704 | 0.908 | 0.048 | 0.828 | 0.997 | 0.058 |
| 79  | 0.035 | 0.380 | 0.001 | 0.381 | 0.251 | 0.497 | 0.214 | 0.794 | 0.552 | 0.588 |
| 80  | 0.221 | 0.200 | 0.587 | 0.353 | 0.584 | 0.270 | 0.885 | 0.110 | 0.956 | 0.711 |
| 81  | 0.647 | 0.403 | 0.530 | 0.738 | 0.280 | 0.457 | 0.650 | 0.276 | 0.661 | 0.973 |
| 82  | 0.667 | 0.722 | 0.327 | 0.723 | 0.410 | 0.635 | 0.012 | 0.907 | 0.316 | 0.677 |
| 83  | 0.644 | 0.590 | 0.021 | 0.269 | 0.042 | 0.062 | 0.387 | 0.183 | 0.964 | 0.544 |
| 84  | 0.302 | 0.123 | 0.116 | 0.282 | 0.851 | 0.256 | 0.648 | 0.845 | 0.782 | 0.993 |
| 85  | 0.633 | 0.933 | 0.331 | 0.546 | 0.842 | 0.016 | 0.236 | 0.164 | 0.923 | 0.976 |
| 86  | 0.060 | 0.681 | 0.683 | 0.775 | 0.624 | 0.955 | 0.126 | 0.655 | 0.919 | 0.113 |
| 87  | 0.165 | 0.532 | 0.431 | 0.341 | 0.092 | 0.244 | 0.222 | 0.336 | 0.034 | 0.216 |
| 88  | 0.875 | 0.691 | 0.383 | 0.382 | 0.596 | 0.301 | 0.275 | 0.188 | 0.868 | 0.805 |
| 89  | 0.726 | 0.902 | 0.252 | 0.130 | 0.238 | 0.398 | 0.763 | 0.463 | 0.615 | 0.140 |
| 90  | 0.273 | 0.393 | 0.285 | 0.161 | 0.619 | 0.865 | 0.551 | 0.030 | 0.571 | 0.258 |
| 91  | 0.253 | 0.821 | 0.600 | 0.023 | 0.606 | 0.849 | 0.610 | 0.577 | 0.082 | 0.774 |
| 92  | 0.340 | 0.654 | 0.173 | 0.495 | 0.498 | 0.992 | 0.192 | 0.506 | 0.751 | 0.129 |
| 93  | 0.194 | 0.290 | 0.592 | 0.983 | 0.509 | 0.998 | 0.522 | 0.627 | 0.741 | 0.540 |
| 94  | 0.166 | 0.450 | 0.210 | 0.204 | 0.840 | 0.826 | 0.833 | 0.516 | 0.965 | 0.375 |
| 95  | 0.712 | 0.314 | 0.033 | 0.823 | 0.629 | 0.939 | 0.887 | 0.066 | 0.743 | 0.081 |
| 96  | 0.622 | 0.800 | 0.710 | 0.575 | 0.678 | 0.465 | 0.802 | 0.969 | 0.150 | 0.784 |
| 97  | 0.313 | 0.294 | 0.897 | 0.718 | 0.614 | 0.876 | 0.025 | 0.049 | 0.620 | 0.125 |
| 98  | 0.137 | 0.087 | 0.003 | 0.483 | 0.201 | 0.209 | 0.320 | 0.935 | 0.447 | 0.787 |
| 99  | 0.243 | 0.679 | 0.844 | 0.069 | 0.024 | 0.543 | 0.714 | 0.234 | 0.505 | 0.428 |
| 100 | 0.361 | 0.359 | 0.230 | 0.761 | 0.334 | 0.149 | 0.511 | 0.475 | 0.854 | 0.119 |

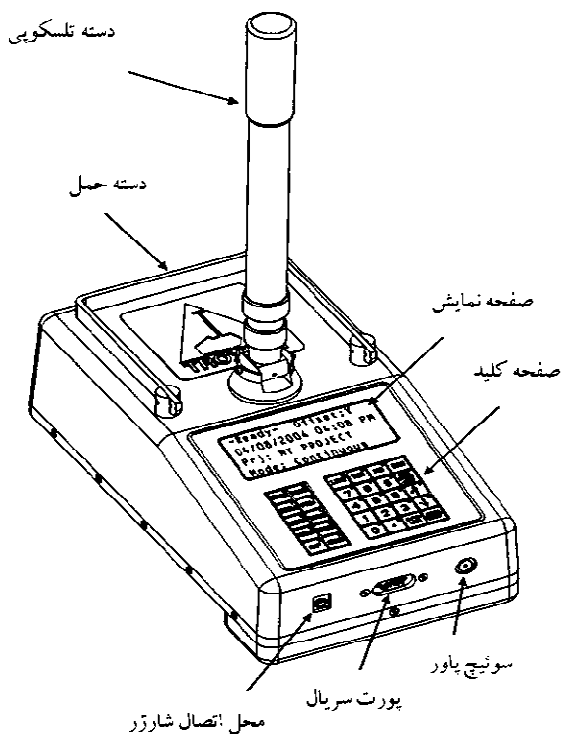
## ۲-۵- بررسی چند مورد دیگر از انواع آزمایش‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تعیین دانسیته

### ۲-۵-۱- دستگاه غیرهسته‌ای پیوتراکر<sup>۱</sup>

همانگونه که بحث شد، اولین نسل از دستگاه‌های غیرمخرب غیرهسته‌ای که بر پایه امواج الکترومغناطیس برای تعیین دانسیته به خدمت گمارده شدند، دستگاه نشانگر کیفیت روسازی PQI بود که برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ به صورت تجاری توسط شرکت ترانس‌تک وارد بازار گردید.

دومین نسل از این دسته تجهیزات الکترومغناطیسی، گیج غیرهسته‌ای PaveTracker بود که در تابستان سال ۲۰۰۰ به صورت تجاری توسط شرکت تراکسلر به عنوان رقیب مستقیم دستگاه PQI وارد بازار رقابت گردید. این دستگاه که تصویری از آن در شکل ۴۹، و بخش‌های خارجی آن در شکل ۵۰، تشریح شده است، شبیه به دستگاه PQI بر پایه سیگنال‌های الکترومغناطیسی و اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک کار می‌کند.

خصوصیات دی‌الکتریک مخلوط آسفالتی شامل ترکیب خصوصیات شیمیایی قیر، مصالح سنگی و حفره‌های هوای موجود در مخلوط است. با تراکم مخلوط آسفالتی فضای خالی شامل هوا کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه هوا دارای ثابت دی‌الکتریک کمتری نسبت به مؤلفه‌های دیگر مخلوط آسفالتی است. این تغییر به صورت افزایش در تعداد دانسیته خود را نمایان می‌سازد.



شکل ۵۰- بخش‌های خارجی دستگاه PaveTracker



شکل ۴۹- دستگاه PaveTracker

1. PaveTracker

دستگاه PaveTracker قابلیت اندازه‌گیری سریع دانسیته روسازی آسفالتی را داراست. از مزایای آن مانند آنچه برای دستگاه الکترومغناطیسی غیرهسته‌ای PQI برشمرده شد، اندازه‌گیری سریع دانسیته برای تشخیص مناطق با دانسیته کم می‌باشد. این دستگاه یک وسیله حسگر الکترومغناطیسی سبک برای تعیین یکنواختی و دانسیته نسبی روسازی‌های آسفالتی است. قابلیت اندازه‌گیری‌های آنی برای این دستگاه هنگامی که بر روی سطح روسازی آسفالتی قرار می‌گیرد مانند دستگاه PQI وجود دارد. مناطقی که دارای غیر یکنواختی در مخلوط آسفالتی‌اند یا دانسیته در آن مناطق کم است براحتی با این دستگاه قابل شناسایی‌اند. این توانایی به کاربر امکان اقدامات اصلاحی را قبل از اتمام عملیات ساخت می‌دهد.

در ادامه به برخی خصوصیات این دستگاه پرداخته می‌شود [۴۹].

#### • تکنولوژی اندازه‌گیری

تکنولوژی اندازه‌گیری که توسط این دستگاه برای گزارش تغییرات در روسازی بکار گرفته می‌شود، مرتبط با ترکیب شیمیایی در واحد حجم مخلوط آسفالتی است. برای مصالح آسفالتی که تقریباً همگن هستند، تغییر در خصوصیات الکتریکی با انجام تراکم مصالح، افزایش می‌یابد. خصوصیات دی‌الکتریک مصالح آسفالتی شامل ترکیب خصوصیات شیمیایی قیر، مصالح سنگی و میزان فضای خالی مخلوط است. هنگامی که آسفالت متراکم می‌شود، میزان فضای خالی کاهش می‌یابد. نظر به اینکه هوا ثابت دی‌الکتریک کمتری نسبت به سایر مؤلفه‌های سازنده آسفالت دارد، این تغییر در تراکم با افزایش در دانسیته مخلوط آسفالتی خود را مشابه آنچه در مورد دستگاه PQI اشاره شد، نمایان می‌سازد.

اندازه و طراحی دستگاه پیوتراکر، همچنین این امکان را فراهم می‌سازد تا آزمایش‌های مربوط به آن بر روی نمونه‌های ژیراتوری با قطر ۶ اینچ نیز صورت پذیرند.

این دستگاه شبیه دستگاه PQI دارای سه وضعیت اندازه‌گیری است که عبارتند از:

#### الف- حالت قرائت پیوسته

حالت پیوسته جهت فراهم کردن اندازه‌گیری آنی دانسیته با هدف کنترل کیفیت روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمانیکه دستگاه در حالت پیوسته قرار داشته باشد، تقریباً در هر ثانیه مقادیر را به روز می‌کند.

#### ب- حالت قرائت متوسط

حالت قرائت متوسط به دستگاه این امکان را می‌دهد که محاسبات را به منظور تعیین میانگین دانسیته از ۵ قرائت صورت گرفته از روی محل سطح آسفالتی انجام دهد. این حالت به کاربر این امکان را می‌دهد که ثبت داده‌ها را از میانگین مقادیر ثبت شده انتخاب کند. این قسمت قادر است ۹۹ مقدار میانگین به همراه موقعیت ایستگاه‌ها را در طول یک روز کاری، در خود نگه دارد. این اطلاعات قابل مشاهده در خود دستگاه یا بر روی کامپیوتر می‌باشند.

#### پ- حالت قرائت مجزا

جدا شدگی<sup>۱</sup>، تفکیک ذرات سنگی درشت و ریز در مخلوط آسفالتی است. مخلوطی که چیدمان ذرات ریز و درشت آن حالت مجزا پیدا کرده باشد، باعث بروز نوسان در دانسیته سطح آسفالتی می‌شود. حالت مجزای دستگاه می‌تواند به منظور اندازه‌گیری تغییرات دانسیته که در اثر تفکیک ذرات مخلوط ایجاد می‌شود، به کار رود.

در مجموع دو دستگاه PQI و Pavetracker از لحاظ عملکردی مشابه یکدیگرند و از شرایط کارکرد، کالیبراسیون و نگهداری مشابهی برخوردار می‌باشد. در همین راستا به دلیل قرابت بسیار نزدیک این دو دستگاه، از تفکیک مرسوم مطالب در این گزارش برای دستگاه Pavetracker صرف نظر شده است.

برای مشخص کردن مشابهت زیاد این دو دستگاه و نیز بیان تفاوت‌های جزئی آنها جدول ۲۵، به بررسی ویژگی‌های این دستگاه پرداخته است.

جدول ۲۵- مقایسه دو دستگاه PQI و Pavetracker [۵۰]

| ویژگی‌ها                      | Pavetracker                                                                   | PQI                                                              |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| منبع                          | الکترومغناطیس                                                                 | الکترومغناطیس                                                    |
| مقدار چگالی                   | مقدار چگالی نسبی براساس عدد مینا                                              | مقدار چگالی نسبی براساس عدد مینا                                 |
| کالیبراسیون                   | کالیبراسیون توسط مغزه برای هر پروژه                                           | کالیبراسیون توسط مغزه برای هر پروژه                              |
| عمق اندازه‌گیری               | ۱۱/۷۵ اینچ                                                                    | ۱ تا ۴ اینچ                                                      |
| حساسیت رطوبتی                 | از رطوبت تأثیر نمی‌پذیرد                                                      | قادر به قرائت شاخص رطوبت و تصحیح داخلی                           |
| حساسیت حرارتی                 | از حرارت تأثیر نمی‌پذیرد                                                      | قادر به قرائت شاخص حرارت و تصحیح داخلی                           |
| حساسیت منابع سنگدانه‌ای       | حساس به منابع سنگدانه‌ای و قابلیت اصلاح داخلی                                 | حساس به منابع سنگدانه‌ای و قابلیت اصلاح داخلی                    |
| اندازه حداکثر اسمی سنگدانه‌ها | حساس به اندازه حداکثر مصالح سنگی و نیاز به کالیبراسیون توسط مغزه              | حساس به اندازه حداکثر مصالح سنگی و نیاز به کالیبراسیون توسط مغزه |
| دانه‌بندی مصالح سنگی          | برای مصالح ریزدانه بسیار خوب بوده و برای مصالح درشت و دانه‌بندی باز ضعیف است. | حساس به دانه‌بندی و قابلیت تصحیح داخلی                           |
| کنترل کیفیت                   | بله، قرائت تغییر چگالی                                                        | بله، قرائت تغییر چگالی                                           |
| تضمین کیفیت                   | نیازمند کالیبراسیون با مغزه برای هر مخلوط                                     | نیازمند کالیبراسیون با مغزه برای هر مخلوط                        |
| اندازه‌گیری چگالی مغزه        | قابلیت اندازه‌گیری چگالی مغزه با قطر ۶ اینچ                                   | قابلیت اندازه‌گیری دانسیته مغزه با قطر ۶ اینچ                    |
| تکرار پذیری                   |                                                                               | تکرار پذیری بسیار عالی                                           |
| قیمت                          | حدود ۲۸۰۰۰ دلار                                                               | حدود ۸۰۰۰ دلار                                                   |
| وزن                           | 2 lbs                                                                         | 16 lbs                                                           |
| حالت قرائت مجزا               | بله                                                                           | بله                                                              |
| اندازه‌گیری آبی               | حداکثر ۱ ثانیه                                                                | حداکثر ۳ ثانیه                                                   |
| آموزش و تعلیم خاص             | نه                                                                            | نه                                                               |

## ۲-۵-۲-۲- دانسیته‌سنج الکتریکی<sup>۱</sup> (EDG)

دانسیته‌سنج الکتریکی (EDG) با استفاده از امواج رادیویی با فرکانس بالا، خصوصیات دی‌الکتریک خاک را اندازه‌گیری می‌کند. خصوصیات اندازه‌گیری شده در قالب یک الگوریتم و مدل کالیبراسیون ویژه هر خاک، مبنای محاسبه وزن مخصوص خشک<sup>۲</sup> خاک قرار می‌گیرد [۵۱].

کالیبره کردن دستگاه برای هر نوع خاک در دستگاه EDG، براساس اندازه‌گیری الکتریکی دانسیته نمونه متراکم شده

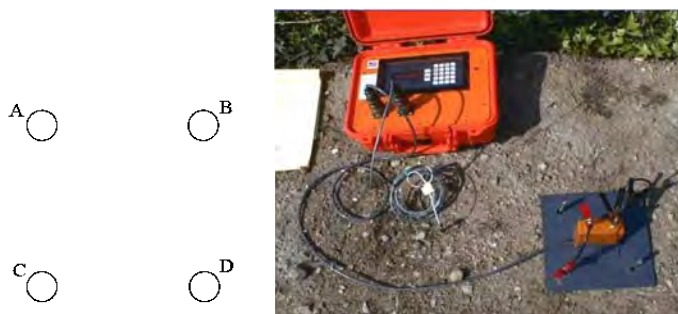
1. Electrical Density Gauge  
2 Dry Unit Weight

خاک با چگالی معلوم انجام می‌گیرد. برای این منظور چگالی خشک نمونه متراکم تهیه شده به کمک روش‌های دیگر اندازه‌گیری چگالی مانند آزمایش بالن لاستیکی<sup>۱</sup> بدست می‌آید. بدین ترتیب دستگاه EDG با استفاده از اندازه‌گیری‌های الکتریکی و نیز چگالی تعیین شده، یک مدل خاک<sup>۲</sup> تعریف کرده و مبنای محاسبه دانسیته خشک خاک در محل‌های مختلف قرار می‌گیرد [۵۱].

برای بکار انداختن دستگاه EDG، ۴ میله فلزی (الکتروود) دستگاه در ۴ گوشه یک مربع در داخل خاک فرو برده می‌شود و به دستگاه متصل می‌گردد (مطابق شکل ۵۱). پس از وارد کردن میله‌ها در داخل زمین ۴ اندازه‌گیری الکتریکی انجام می‌شود. دو رابط الکتریکی به دو سر میله‌هایی که در دو طرف یک قطر مربع قرار دارند، متصل می‌شود (مانند D و A) و سپس اندازه‌گیری اول انجام می‌شود. برای اندازه‌گیری دوم اتصال D و A عوض شده و اندازه‌گیری تکرار می‌شود. همین مراحل برای دو سر میله‌های C و B تا تکمیل شدن ۴ اندازه‌گیری ادامه می‌یابد. در پایان دستگاه براساس مدل کالیبره شده و اندازه‌گیری‌های چهارگانه، دانسیته خشک خاک را محاسبه می‌کند.

تئوری دستگاه بر پایه اندازه‌گیری مستقیم فرکانس امواج رادیویی نقطه به نقطه بین الکتروودهای دستگاه استوار می‌باشد. جزئیات تئوری عملکردی دستگاه و مدل‌های رفتاری ریاضی آن توسط شرکت سازنده<sup>۳</sup> آن ارائه نشده است. مزایای این دستگاه عبارتند از [۵۱]؛

- جایگزین مناسب برای دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای و روش‌های مخرب آزمایشگاهی
- بدون نیاز به تکنیسین مورد تأیید
- ساده و کاربر پسند
- به کار بستن تکنولوژی قابل اعتماد RF<sup>۴</sup> نقطه به نقطه
- دقیق، مقاوم و سبک
- سریع ( نتایج اندازه‌گیری در کمتر از ۳ دقیقه به نمایش در می‌آید).



شکل ۵۱- دستگاه EDG [۵۱]

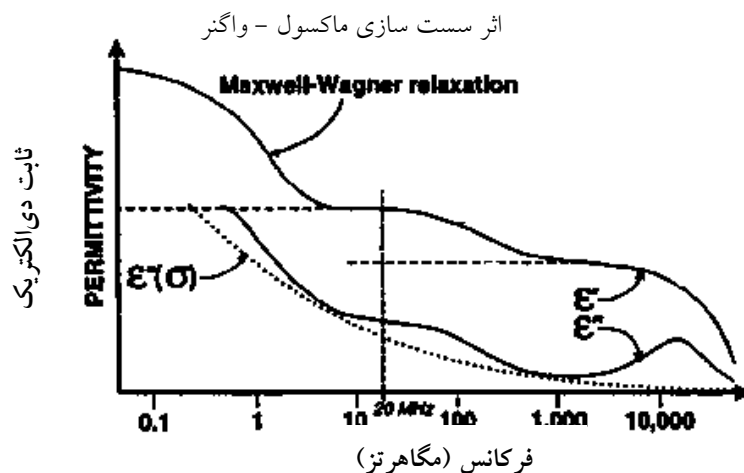
۱. در این روش، مشابه روش مخروط ماسه، حفره‌ای در خاک متراکم شده حفر گردیده و وزن مرطوب و میزان رطوبت خاک حفاری شده از آن اندازه‌گیری می‌شود. لیکن در این روش، حجم گودال توسط آب ریخته شده از یک ظرف مدرج به درون یک بالون (بادکنک) لاستیکی که درون حفره قرار داده شده، اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به آب خارج شده از ظرف مدرج، حجم حفره به دست می‌آید. با داشتن وزن و حجم حفره، از رابطه (۱-۲) می‌توان دانسیته خشک را به دست آورد. شکل (۱-۲)، یک ظرف مدرج را با یک بالون لاستیکی نشان می‌دهد.

### ۳-۵-۲-۲- دستگاه نشانگر کیفیت خاک (SQI)

دستگاه SQI مشابه دستگاه PQI متعلق به شرکت ترانس‌تک بوده و در حال حاضر برای اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک نسبی ( $\epsilon_R$ ) مخلوط‌های سنگدانه‌ای متراکم در محدوده فرکانس ۱ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز با استفاده از یک صفحه دایره‌ای اندازه‌گیری و سایر بخش‌های الکترونیکی مطابق شکل ۵۲، کاربرد دارد. ثابت دی‌الکتریک نسبی، در واقع، نسبت ثابت دی‌الکتریک مصالح به ثابت دی‌الکتریک هواست. در خاک،  $\epsilon_R$  وابسته به فرکانس بوده و نمودار  $\epsilon_R$  برحسب فرکانس مطابق شکل ۵۳، طیف دی‌الکتریک نامیده می‌شود [۵۱].



شکل ۵۲- دستگاه SQI [۵۱]



شکل ۵۳- طیف دی‌الکتریک [۵۱]

در محدوده فرکانسی که در دستگاه SQI استفاده می‌شود،  $\epsilon_R$  بیشترین تاثیر را از اثر ماکسول - واگنر می‌پذیرد [۴۳]. اثر ماکسول - واگنر، یک کاهش در  $\epsilon_R$  در محدوده فرکانس معروف به فرکانس سست سازی<sup>۲</sup> است که علت آن وجود ترکیبات مختلف (خاک، آب، هوا) با ثابت‌های دی‌الکتریک مختلف در خاک می‌باشد [۵۲]. مقدار  $\epsilon_R$  در بالا و پایین فرکانس سست

1. Soil Quality Indicator  
2. Relaxation Frequency

سازی و همچنین مکان این فرکانس تابعی از خصوصیات فیزیکی خاک محسوب می‌شود. در سال ۲۰۰۱ گروهی از محققین<sup>۱</sup> سعی کردند یک مدل تحلیلی جامع ارائه دهند تا با کمک آن از خصوصیات فیزیکی و الکتریکی خاک برای پیش بینی طیف دی‌الکتریک استفاده شود. این مدل برای ارزیابی خصوصیات فیزیکی خاک از روی طیف دی‌الکتریک استفاده شد، ولی این روش به دلیل نداشتن راه حل منحصر به فرد چندان موفق نبود [۵۲]. از همین رو، در دستگاه SQI از یک روش تجربی برای مرتبط ساختن مشخصه‌های طیف دی‌الکتریک (مانند  $\epsilon_R$  به ازای بیشترین فرکانس،  $\epsilon_R$  در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز، فرکانس سست سازی ماکسول- واگنر) با خصوصیات فیزیکی خاک استفاده شد. یک شبکه عصبی مصنوعی با کمک داده‌های کالیبراسیون برای محاسبه وزن مخصوص خشک خاک از روی مشخصه‌های طیف دی‌الکتریک در دستگاه SQI به کار گرفته شد [۵۱].

معایب دستگاه EDG عبارتند از؛

- وصل و جابجایی اتصالات در الکترودها زمان‌بر است.
- وارد کردن الکترودها در داخل خاک گاهی سخت خواهد بود.

مزایای دستگاه EDG عبارتند از؛

- سبک
- ساده و کاربرپسند
- آسان در جابجایی و منایب برای کنترل‌های نقطه به نقطه

## ۲-۶- بررسی مزایا و معایب آزمایش‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تعیین دانسیته

قبل از پرداختن به مزایا و معایب هر یک از آزمایش‌ها، لازم است، در قالب جدول ۲۶، مروری گذرا بر مشخصه‌های دستگاه‌های مورد بحث در این گزارش شود.

جدول ۲۶- مقایسه مشخصه‌های دستگاه‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای

| SQI                                              | EDG                                                 | PaveTracker                           | PQI                                      | دانشیته‌سنج هسته‌ای     |                      |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| الکترونیکی                                       | الکترونیکی                                          | الکترونیکی                            | الکترومغناطیس                            | هسته‌ای                 | روش آزمایش           |
|                                                  |                                                     |                                       |                                          |                         | پارامترهای تعیین شده |
| -                                                | -                                                   | -                                     | AASHTO<br>TP 68-04<br>ASTM<br>D7113 - 09 | ASTM D2922<br>and D2950 | استانداردها          |
| نیاز است ولی هیچ روش خاصی تاکنون ارایه نشده است. | کالیبراسیون میدانی با استفاده از اندازه‌گیری مستقیم | کالیبراسیون برای هر نوع مخلوط آسفالتی | کالیبراسیون برای هر نوع مخلوط آسفالتی    | -                       | کالیبراسیون          |
| تا حدودی                                         | تا حدودی                                            | حداقل                                 | حداقل                                    | به شدت لازم             | آموزش اپراتور        |
| آسان                                             | سخت                                                 | تأخوردی                               | آسان                                     | تا حدودی                | سهولت کاربری         |

دستگاه PQI

در ارتباط با دستگاه PQI، مزایا و معایب آن در قالب جدول ۲۷، ارائه شده است:

جدول ۲۷- مقایسه مزایا و معایب دستگاه PQI

| PQI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مزایا                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• سهولت در استفاده</li> <li>• عدم وجود محدودیت در جابجایی و دارای ۱۲ ساعت مشاهده دائم</li> <li>• حداقل نیروی متخصص</li> <li>• سبک و ارزان</li> <li>• قابلیت اندازه‌گیری در کمترین زمان (کمتر از ۳ ثانیه)</li> <li>• امکان آگاهی از تراکم ناکافی روسازی در سریعترین حالت</li> <li>• عدم نیاز به تأییدیه هسته‌ای</li> <li>• قابلیت اندازه‌گیری دما و رطوبت در محل</li> <li>• قابلیت تکرارپذیری بالا و عالی</li> <li>• دارای ایمنی بالا</li> <li>• دارای دقت بسیار قابل قبول</li> <li>• کالیبراسیون آسان</li> <li>• قابلیت کالیبراسیون داخلی براساس ۱۰ قرائت انجام شده و مقدار چگالی مغزه گرفته شده از راه</li> <li>• قابلیت ذخیره کالیبراسیون برای ۴ طرح اختلاط مختلف</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• تحقیقات نشان داده است که در ۷۵ درصد مواقع همبستگی قابل قبولی بین نتایج چگالی بدست آمده از PQI با مغزه‌های گرفته شده از رویه وجود داشته است</li> <li>• این دستگاه می‌بایست براساس طرح اختلاط آسفالت کالیبره شود.</li> <li>• به دلیل جدید بودن این دستگاه و کاربرد کم آن تجربه اجرایی و عملکردی از آن در دست نمی‌باشد.</li> </ul> |

دستگاه PaveTracker

در ارتباط با دستگاه PaveTracker، مزایا و معایب آن مشابه دستگاه PQI بوده که در جدول ۲۷، ارائه شده است، می‌باشد. لذا در جدول ۲۸، فقط موارد مزایا و معایبی که اختصاصاً در دستگاه PaveTracker وجود دارد ولی در دستگاه PQI وجود ندارد، آورده شده است.

جدول ۲۸- مزایا و معایب دستگاه PaveTracker

| PaveTracker                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مزایا                                                                                                                                                                                                  | معایب                                                                                                                                         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• قابلیت کالیبراسیون داخلی براساس ۱۰ قرائت انجام شده و مقدار چگالی مغزه گرفته شده از راه</li> <li>• قابلیت ذخیره کالیبراسیون برای ۴ طرح اختلاط مختلف</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• به دلیل جدید بودن این دستگاه و کاربرد کم آن تجزیه اجرایی و عملکردی از آن در دست نمی‌باشد.</li> </ul> |

## دستگاه‌های EDG و SQI

در بررسی دستگاه‌های غیرهسته‌ای تعیین دانسیته خاک و مصالح غیرچسبنده، دو دستگاه EDG و SQI در جدول ۲۹ و ۳۰، با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

جدول ۲۹- بررسی مزایا و معایب دستگاه EDG

| EDG                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مزایا                                                                                                                                                                                                 | معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• ساده و کاربرپسند</li> <li>• بدون نیاز به تکنسین مورد تایید و مجرب</li> <li>• جایگزین مناسب برای دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای و روش‌های مخرب آزمایشگاهی</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• برای کالیبراسیون نیاز به یک نمونه خاک متراکم با چگالی معلوم می‌باشد</li> <li>• وارد کردن الکترودها در داخل خاک قدری مشکل است</li> <li>• جابجا کردن و تعویض اتصال الکترودها قدری زمان‌بر است</li> <li>• تا حدودی کار با دستگاه دشوار است</li> <li>• کالیبراسیون دشوار</li> </ul> |

جدول ۳۰- بررسی مزایا و معایب دستگاه SQI

| SQI                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مزایا                                                                                                                                                                                                  | معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• سبک و آسان در حمل و نقل</li> <li>• نحوه استفاده ساده</li> <li>• ایده‌آل برای کنترل تراکم در نقاط متعدد در مسیر</li> <li>• آموزش حداقل برای اپراتور</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• به همراه داشتن یک کامپیوتر نوت بوک متصل به دستگاه قدری حمل و نقل سریع دستگاه را با مشکل مواجه می‌سازد</li> <li>• این دستگاه در حال حاضر فقط به صورت یک نمونه پیش الگو وجود دارد و امکان بهره‌برداری تجاری از آن میسر نیست</li> <li>• فقدان یک روش مناسب برای کالیبراسیون</li> </ul> |

## دستگاه دانسیته‌سنج هسته‌ای

در ارتباط با دستگاه دانسیته‌سنج هسته‌ای، به دلیل ساختار هسته‌ای آن، در مقایسه به دستگاه‌های غیرهسته‌ای مزیت قابل توجهی نداشته و محدودیت‌های آن نمود بیشتری دارد. لذا در این بخش فقط به ذکر معایب و محدودیت‌های دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای در قالب جدول ۳۱، اشاره می‌شود.

جدول ۳۱- محدودیت‌ها و معایب دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای

| دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• خرابی ایجاد شده در سطح روسازی</li> <li>• هزینه نسبتاً بالا</li> <li>• عدم تکرار پذیری برای یک نقطه خاص</li> <li>• عدم توانایی ثبت تغییرات متغیرهایی نظیر دانسیته واقعی برای یک نقطه خاص</li> <li>• صرف زمان زیاد</li> <li>• این دستگاه از مواد رادیواکتیو استفاده می‌کند که می‌تواند برای سلامتی کاربر مضر و خطرناک باشد مگر این‌که اقدامات حفاظتی و ایمنی در مورد کار با دستگاه رعایت شود. کاربران این دستگاه باید با روش‌های کاربردی ایمنی و قواعد کار با دستگاه آشنا باشند.</li> <li>• ترکیبات شیمیایی مصالح مورد آزمایش ممکن است به صورت قابل ملاحظه‌ای بر اندازه‌گیری چگالی تأثیر گذاشته و نیاز به ضرایب اصلاحی وجود داشته باشد. برخی عناصر شیمیایی با عدد اتمی بزرگتر از ۲۰ باعث ایجاد تغییرات فاحش در مقادیر آزمایش خواهند شد.</li> <li>• این روش آزمایش دارای محدوده دقتی است که در آن محدوده نتایج در نزدیکترین حالت به واقعیت قرار دارند بدیهی است مقادیر بدست آمده در خارج از محدوده دقت دستگاه، چندان قابل اعتماد نیستند.</li> <li>• هنگام اندازه‌گیری چگالی یک رویه آسفالتی، لازم است در صورتیکه لایه‌های زیرین در نقاط مختلف آزمایش از لحاظ ضخامت، ترکیب مصالح سنگدانه‌ای و یا درجه تحکیم تغییر می‌یابند، ضریب اصلاحی در نظر گرفته شود در غیر اینصورت خطا در نتایج فاحش خواهد بود.</li> <li>• ناهموازی در سطح راه باعث کاهش چگالی اندازه‌گیری شده از مقدار واقعی می‌گردد.</li> </ul> |

جدول ۳۲- ادامه جدول قبل

| دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• وجود مصالح سنگی درشت و خارج از اندازه (قلوه سنگ و قطعه سنگ) باعث افزایش چگالی اندازه‌گیری شده از مقدار واقعی می‌گردد.</li> <li>• استفاده از روش دانسیته‌سنجی هسته‌ای از پروژه‌ای به پروژه دیگر برای یک نوع دستگاه خاص دارای تفاوت جزئی می‌باشد و نتایج دو نوع دستگاه در یک پروژه کاملاً متناظر باهم نیستند.</li> <li>• تسطیح دقیق محل انجام آزمایش، در نتایج به‌دست آمده از آن بسیار موثر است. برای این کار، مصالح ماسه‌ای عبوری از الک ۳۰ و مانده روی الک ۱۰۰ دانه‌بندی مناسبی است. باید حتی‌الامکان سعی شود ماسه ریخته‌شده روی سطح آسفالت تشکیل لایه مجزا ندهند چون باعث تغییر نتایج آزمایش می‌شود.</li> <li>• در محل‌هایی که بر اثر عریان‌شدگی و یا هر مشکل دیگری سطح آسفالت به صورت زبر و ناصاف در آمده است استفاده از آزمایش‌های هسته‌ای توصیه نمی‌شود.</li> <li>• قرار گرفتن مناسب دستگاه هسته‌ای روی سطح روسازی یا خاک در نتایج دستگاه تأثیری تعیین‌کننده‌ای دارد.</li> <li>• روش استفاده از پرتوهای نوترون روش مناسبی برای تعیین رطوبت خاک می‌باشد. برای این کار باید خاک عاری از مواد آلی و هیدروژن‌دار باشد.</li> </ul> |

- بهتر است هنگامی که از روش هسته‌ای در تعیین دانسیته خاک استفاده می‌شود از حالت پخش مستقیم با عمق‌های ۷/۶۲cm (۳) اینچ) و بیشتر از ۷/۶۲cm (۳) اینچ) استفاده شود و دستگاه به خوبی روی سطح خاک قرار گیرد. برای مقایسه با روش دانسیته‌سنجی مخروط ماسه، بهترین عمق، عمق ۱۰cm (۴) اینچ) می‌باشد.
- وجود هیدروژن در ماده سبب نمایش عدد دانسیته هسته‌ای بزرگتر از مقدار دانسیته واقعی و وجود عناصر سنگین نظیر باریم، سرب و جیوه و ... که به صورت کمیاب در خاک وجود دارند، سبب نمایش عدد دانسیته هسته‌ای کوچکتر از مقدار دانسیته واقعی می‌شود که اصطلاحاً خطای ترکیب نامیده می‌شود. برای حذف یا کمتر کردن اثر این خطا در دستگاه‌های هسته‌ای می‌توان از داده‌های مستقل دیگر نظیر نرخ شمارش نوترون و فاکتور تصحیح K خاک استفاده کرد.

## ۳-۲- آزمایش‌های تعیین ضخامت لایه‌های روسازی

### ۳-۲-۱- آزمایش GPR<sup>۱</sup>

#### ۳-۲-۱-۱- معرفی دستگاه

دستگاه رادار نفوذی زمین<sup>۲</sup> (GPR) برای تشخیص وضعیت زیر سطحی روسازی با تکنولوژی راداری عمل می‌کند. فرستنده رادار، یک موج الکترومغناطیسی را به سازه می‌فرستد و در هر تغییر، قسمتی از انرژی منعکس می‌شود و تولید یک اکو می‌کند که بوسیله آنتن دریافت می‌شود و به علائم الکترونیکی تبدیل می‌شود. پردازش این سیگنال‌های الکترونیکی امکان محاسبه ضخامت لایه‌ها را فراهم می‌کند. این دستگاه که تصویری از آن در شکل ۵۴، آمده است؛ شامل تجهیزات آنتن و آنتن منواستاتیکی با یک سیستم جمع‌آوری و پردازش داده با بکارگیری یک میکرو کامپیوتر می‌باشد. نرم‌افزار مورد استفاده در محیط ویندوز امکان توصیف سیگنال‌های بدست آمده به صورت همزمان و تصویری را فراهم می‌سازد. وقایع معمولی یا خیز معمولی مؤثر در مراحل مختلف، اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. این دستگاه قادر است تا اعماق ۶۰ سانتی متر را با سرعتی تا حدود ۸۰ کیلومتر در ساعت اندازه‌گیری نماید. فواصل اندازه‌گیری حداقل ۵/۰ متر می‌باشد. دقت اندازه‌گیری ۵٪ ضخامت اندازه‌گیری می‌باشد. این دستگاه می‌تواند بسته به نوع ارزیابی تا ۶۰ کیلومتر راه را در روز ارزیابی کند[۶].



شکل ۵۴- دستگاه GPR

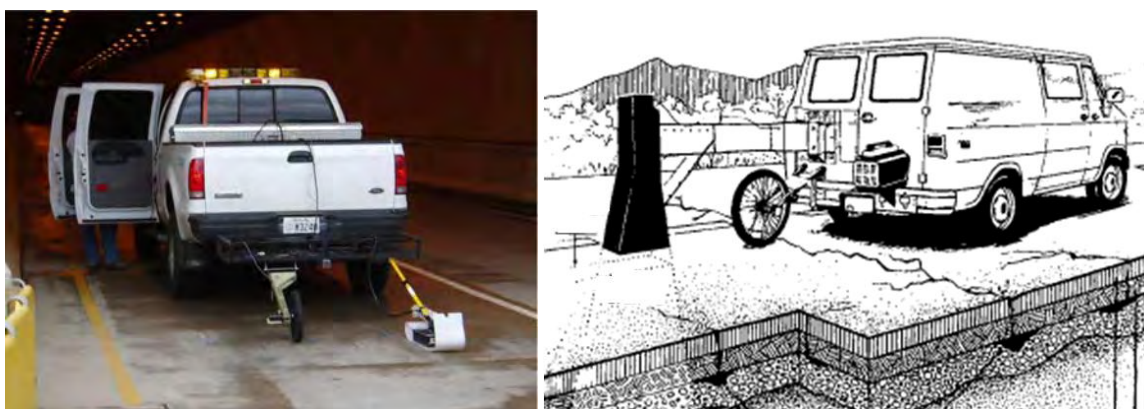
این دستگاه با استفاده از امواج با فرکانس بالا (بین ۱۰ تا ۳۰۰۰ مگاهرتز) به بررسی و کسب اطلاعات از وضعیت زیر سطحی روسازی می‌پردازد[۵۲].

دستگاه GPR قادر است تغییر در مشخصات الکترو مغناطیسی مصالح روسازی را که شامل؛ ثابت دی‌الکتریک، رسانایی و ضریب گذردهی مغناطیسی می‌باشد را تشخیص دهد که این موضوع در تشخیص جنس مواد خاکی و سنگی، محتوای رطوبتی و وزن مخصوص حجمی مصالح حائز اهمیت می‌باشد.

بر اساس اینکه دستگاه GPR به چه نحوی استفاده شود، به دو دسته هوایی و زمینی تقسیم بندی می‌شود. در سیستم

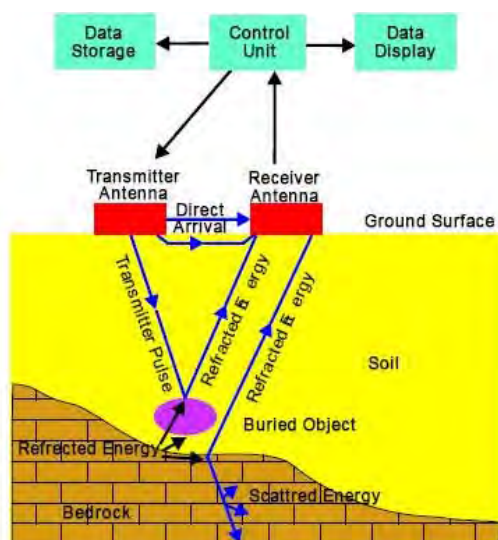
1. Ground Penetrating Radar  
2. Ground Penetrating Radar

هوایی، نوک (راس) دستگاه در فاصله ۵۰۰-۱۵۰ میلیمتر بالاتر از سطح زمین قرار می‌گیرد. این سیستم‌ها اجازه حرکت با سرعت بالا و همچنین ارائه دادن یک سیگنال واضح را فراهم می‌آورد. در این حالت با توجه به اینکه بخشی از انرژی موج توسط سطح روسازی منعکس می‌شود، عمق نفوذ موج کم است. در مقابل در روش زمینی، نوک (راس) آنتن در تماس مستقیم و کامل با زمین است و امکان نفوذ بیشتر موج در زمین فراهم می‌آید (با فرکانس یکسان و انرژی موج یکسان). ولی در این حالت، سرعت جمع‌آوری اطلاعات پایین است (شکل ۵۵). در سیستم هوایی GPR آنتن هوایی دستگاه از یک جفت آنتن جدا از هم که یکی وظیفه ارسال موج و دیگری وظیفه دریافت موج بازتاب شده را برعهده دارد، تشکیل یافته است. برای افزایش دقت مکانی اطلاعات جمع‌آوری شده در طول مسیر، از یک طول سنج که به چرخ ماشین متصل شده است استفاده می‌شود. در این حالت اطلاعات بدست آمده تابعی از مکان خواهند بود تا تابعی از زمان [۵۲].



شکل ۵۵- دستگاه GPR هوایی و زمینی

نتیجه کاربردی استفاده از امواج الکترومغناطیس در ارزیابی و تشخیص وضعیت لایه‌های زیر سطحی روسازی توسط دستگاه GPR به صورت شماتیک براساس اجزاء مختلف و نحوه کار در شکل ۵۶، نشان داده شده است.



شکل ۵۶- نحوه کار دستگاه GPR

موج الکترومغناطیس از طریق آنتن دستگاه ساطع شده و در داخل مصالح روسازی با سرعت معین که این سرعت براساس میزان نفوذپذیری الکترونیکی یا گذردهی الکتریکی<sup>۱</sup> تعیین می‌شود، حرکت می‌کند. این موج در داخل روسازی حرکت کرده تا با لایه‌ای برخورد کند که مشخصات الکتریکی متفاوت با محیط قبل داشته باشد. در این حالت موج بازتاب نموده و توسط آنتن دریافت کننده شناسایی می‌شود. شایان ذکر است زمانیکه موج الکترومغناطیسی با محیط متفاوت برخورد می‌کند بخشی از آن موج به سطح روسازی بازتاب نموده و بخش دیگر در محیط جدید به حرکت ادامه خواهند داد. موج بازتابی توسط آنتن شناسایی شده و در سیستم ذخیره دیجیتالی، برای پردازش‌های بعدی ذخیره می‌شود [۵۳].

آنتن دستگاه GPR در واقع یک مبدل جریان الکتریکی به امواج الکترومغناطیسی که به سمت روسازی ساطع می‌شوند، می‌باشد. آنتن زمانیکه در جریان الکتریکی تغییری در شتاب یا امپراژ ایجاد می‌شود، موج مغناطیسی تولید می‌کند. کنترل و جهت دهی نحوه انتشار امواج الکترومغناطیسی از آنتن موضوعی است که در طراحی آنتن دستگاه GPR مورد بررسی قرار داده می‌شود [۵۳].

فرکانس آنتن دستگاه GPR، به عنوان یک پارامتر مهم در عملکرد این دستگاه تلقی می‌شود. به طور کلی، فرکانس‌های پایین‌تر، قدرت نفوذ بیشتری در لایه‌های روسازی دارند ولی با وضوح سیگنال پایین‌تر. در مقابل، فرکانس‌های بالاتر، وضوح سیگنال بهتری را فراهم نموده ولی عمق نفوذ آنها کمتر است. جدول ۳۳، برخی فرکانس‌های رایج در دستگاه GPR برای مقاصد مختلف را نشان می‌دهد [۵۴].

جدول ۳۳- فرکانس‌های رایج در دستگاه GPR

| فرکانس آنتن    | عمق نفوذ (متر) | موارد استفاده                |
|----------------|----------------|------------------------------|
| ۲/۲ گیگا هرتز  | ۰/۱۵           | ارزیابی بتن آسفالتی          |
| ۱/۶ گیگا هرتز  | ۰/۴۵           | ارزیابی بتن آسفالتی          |
| ۹۰۰ مگا هرتز   | ۰/۹            | ضخامت روسازی- تشخیص حباب هوا |
| ۴۰۰ مگا هرتز   | ۴              | چند منظوره                   |
| ۲۷۰ مگا هرتز   | ۶              | چند منظوره                   |
| ۲۰۰ مگا هرتز   | ۷              | زمین شناسی                   |
| ۱۰۰ مگا هرتز   | ۲۰             | زمین شناسی - معدن            |
| ۱۶-۸۰ مگا هرتز | ۵۰             | زمین شناسی                   |

برای ارزیابی قشر رویه با ضخامت کمتر از ۴ سانتی متر، فرکانس ۲/۲ گیگا هرتز کارایی بالاتری دارد [۵۴].

## ۲-۱-۳-۲- تئوری آزمایش

اندراکنش‌های ماکروسکوپی بین میدان الکترومغناطیسی و مواد مختلف توسط معادلات ماکسول بیان می‌گردد. برای حل معادله ماکسول می‌بایست سه شاخص ساختاری مواد در اختیار باشد که عبارتند از: هدایت مغناطیسی، ثابت دی‌الکتریک و رسانایی. این پارامترها عموماً تابع خصوصیات مواد، دمای ماده و فرکانس میدان الکترومغناطیسی می‌باشند.

برای آسفالت، هدایت الکترومغناطیسی تقریباً برابر هدایت مغناطیسی هوای آزاد است و رسانندگی آن تقریباً برابر صفر می‌باشد [۵۵]. در نتیجه رفتار الکترومغناطیسی آسفالت عمدتاً با ثابت دی‌الکتریک شناخته می‌شود [۵۵]. رابطه‌ای که توصیف کننده رفتار الکترومغناطیسی مواد دی‌الکتریک باشد، در رابطه ۱ آمده است:

$$E = \varepsilon_0 E + P \quad (1)$$

D: بردار جابجایی الکتریکی

E: میدان الکتریکی اعمالی

P: پلاریزاسیون القایی

$\varepsilon_0$ : ضریب گذردهی خلاء

برای مصالح ایزوتروپیک خطی مانند آسفالت، پلاریزاسیون (قطبش) با میدان الکتریکی رابطه خطی خواهد داشت [۳۶]؛ رابطه ۲:

$$P = x \varepsilon_0 E \quad (2)$$

x: حساسیت الکتریکی

بنابر این خواهیم داشت:

$$D = \varepsilon_0 (1 + x) E = \varepsilon_r \varepsilon_0 E \quad (3)$$

$\varepsilon_r$ : ثابت دی‌الکتریک

پارامتری که در رابطه بالا تعریف شد، همان ثابت دی‌الکتریک مواد می‌باشد. این ثابت با بردار جابجایی الکتریکی رابطه مستقیم دارد. این بدان معناست که در یک میدان الکتریکی معین، هر ماده‌ای که قطب‌های بزرگتر مغناطیسی داشته باشد یا به عبارت دیگر پلاریزاسیون قوی‌تری داشته باشد، ثابت دی‌الکتریک آن ماده عدد بزرگتری خواهد بود [۵۵].

پلاریزاسیون مواد دی‌الکتریک در اثر میدان الکتریکی خارجی ممکن است در سه سطح زیر باشد: پلاریزاسیون الکتریکی، یونی و جهتی. هر سه نوع پلاریزاسیون، تابعی از میدان اعمال شده و دمای ماده می‌باشند.

ثابت دی‌الکتریک هوا تقریباً برابر با ۱ می‌باشد. زیرا هیچ گونه پلاریزاسیونی در هوای آزاد رخ نمی‌دهد، علاوه بر این رسانندگی هوا نیز برابر صفر می‌باشد. ذرات جامد در مصالح سنگی جرو مواد غیر قطبی محسوب شده و پلاریزاسیون دی‌الکتریک در آنها فقط مربوط به مکانیزم یونی و الکتریکی می‌باشد. بنابراین مصالح سنگی ثابت دی‌الکتریک کمی خواهند داشت (حدود ۵) که تقریباً در فرکانس‌های نه چندان بزرگ بدون تغییر بوده و مستقل از فرکانس و دما می‌باشند. رسانندگی قیر نیز تقریباً صفر است و ثابت دی‌الکتریک آن حدود ۲/۸ می‌باشد [۵۵].

برای مواد قطبی مانند آب، علاوه بر پلاریزاسیون یونی و الکتریکی، پلاریزاسیون جهتی (دوقطبی) نیز اضافه می‌شود که حاصل آن ثابت دی‌الکتریک بسیار بزرگتری خواهد بود (حدود ۸۰). به این ترتیب در میان مواد تشکیل دهنده لایه‌های مختلف روسازی، آب به طور فاحش از ثابت دی‌الکتریک بزرگتری برخوردار می‌باشد. بنابراین می‌توان از این ویژگی جهت تشخیص وجود رطوبت در لایه‌های روسازی بهره جویی نمود.

بسیاری از محققین به صورت تجربی به این نتیجه رسیده‌اند که ثابت دی‌الکتریک مواد مرکب، به نسبت حجمی و ثابت

دی‌الکتریک هر یک از مصالح با توجه به رابطه ۴، وابسته می‌باشد [۵۵]:

$$\varepsilon_{comp} = (\sum_1^n v_n \varepsilon_{rn}^a)^a \quad (۴)$$

$\varepsilon_{rn}$ : ثابت دی‌الکتریک هر یک از مواد

$v_n$ : نسبت حجمی مواد

آنچه در بالا بدان اشاره گردید، تئوری ثابت دی‌الکتریک در دستگاه GPR بود. اساس عملکرد دستگاه GPR بر پایه این پارامتر استوار می‌باشد. برای توضیح بیشتر در ارتباط با مدل‌های رفتاری این دستگاه، در بخش کاربردهای عملی، مطالب سودمندی ارائه شده است.

دستگاه GPR برای مصارف زمین‌شناسی، مهندسی و کاربردهای زیست محیطی مورد استفاده قرار داده می‌شود. دستگاه GPR برای به تصویر کشیدن شرایط زمین‌شناسی و ژئولوژیک زیر سطحی تا عمق بالای لایه بستر سخت و همچنین تا عمق بالای سطح آب‌های زیرزمینی به کار گرفته می‌شود.

آنچه از دستگاه GPR در ارزیابی وضعیت روسازی بدست می‌آید، بیشتر در تکمیل دستگاه‌های دیگر مانند FWD برای داشتن عدد ضخامت لایه‌های روسازی و کنترل نتایج است. لذا در بسیاری از حالات، دستگاه GPR به همراه دستگاه FWD بر روی یک خودرو نصب می‌شوند و GPR در بالا بردن صحت داده‌های دستگاه FWD کمک می‌نماید. نکته دیگر در ارتباط با دستگاه GPR، نوع خروجی آن است که به صورت تصاویر گرافیکی ۲ بعدی و ۳ بعدی است و تا حدودی می‌توان آنها را نقشه‌های زیر سطحی لایه‌های روسازی قلمداد نمود.

سطح کاری که در بحث تفسیر داده‌ها در دستگاه GPR مورد نظر قرار می‌گیرد، بستگی به هدف، منظور برداشت و جزئیات خواسته شده دارد. مشکلی که در تمام آزمایش‌ها و مطالعات بررسی زمین‌شناسی وجود دارد عدم وجود رابطه منحصر به فرد بین مدل‌های ژئولوژیک ممکن و یک سری از داده‌های میدانی می‌باشد. این ابهام تنها زمانی قابل حل است که از روش‌ها و متدهای دیگر زمین‌شناسی که در استاندارد<sup>۱</sup> ASTM مفصلاً تشریح گردیده است، برای کمک به مفسر استفاده شود.

تفسیر اولیه داده‌های میدانی می‌بایست به عنوان تفسیر مقدماتی (Draft) در نظر گرفته شود زیرا بسیار محتمل است، در اولین سری تفسیر میدانی داده‌ها خطا بروز کند و تفسیر اولیه کامل و متقن نخواهد بود. تحلیل میدانی اولیه بر روی داده‌ها اغلب اوقات به عنوان ابزاری برای کنترل کیفیت<sup>۲</sup> (QC) تلقی می‌شود [۵۲].

### ۲-۳-۱-۳- موارد استفاده

موارد کاربرد در دستگاه GPR به قرار زیر می‌باشد [۵۳]:

- تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و ژئولوژیک تا سطح بستر سخت یا سطح آب‌های زیرزمینی از روسازی راه،
- تعیین عمق و ضخامت لایه‌های خاکی و زیر سطح‌های آبرفتی،

1. ASTM D6429

2. Quality Control

- شناسایی محل‌های حفره‌های زیر سطحی و ترک‌های زیر سطحی تا سطح بستر سخت،
- شناسایی محل‌های لوله‌ها، تانک‌ها، سیم‌های برق و سایر اجسام در داخل زمین زیر سطح روسازی،
- شناسایی و به تصویر کشیدن مواد آلوده در زیر سطح زمین مانند مواد را رادیواکتیویته و شیمیایی،
- جستجوهای باستان شناسی،
- بازرسی آجر، مصالح بنایی، سازه‌های بتنی، راه و ریل راه آهن و همچنین بازرسی پایه‌های پل،
- تهیه نقشه‌های گسیختگی در زیر سطح زمین،
- شناسایی معادن زیرزمینی،
- شناسایی حباب هوا در دال‌های بتنی،
- شناسایی و بازرسی سازه‌ها و ابنیه‌های زیر سطحی مانند تونل‌ها،
- انجام مطالعات چینه شناسی،
- تهیه نقشه‌های وجود سنگ‌های گرانیته و الماسی در زیر زمین،
- شناسایی وجود قیردر زیر زمین،
- بررسی مخاطرات زیر زمین مانند؛ امکان نشت روسازی یا وقوع انفجار ناشی از گازهای محبوس شده زیر زمین،
- مطالعات یخبندان شناسی،
- ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی و مدیریت تعمیر و نگهداری راه، روسازی و راه آهن،
- تهیه نقشه‌های آب‌های زیرزمینی و چشمه‌ها و مسیرهای آبروی زیرسطحی،
- مطالعات عمق سنجی.

#### ۲-۳-۱-۴- روش کالیبراسیون

با توجه به اینکه تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رطوبت و مشخصات خاک یا سنگ در لایه‌های روسازی از نقطه‌ای به نقطه دیگر اجتناب ناپذیر است، لذا تعیین سرعت موج زمانی معتبر است که در همان نقطه محاسبه شده باشد. به عبارت دیگر برون‌یابی نقطه‌های اندازه‌گیری شده و یا درون‌یابی بین دو یا چند نقطه برای یافتن سرعت در یک نقطه مورد نظر می‌بایست بسیار با احتیاط انجام شود و بهتر است این کار صورت نگیرد. زمان‌های سفر موج (TRAVEL TIMES) می‌بایست در نقاط مورد نیاز بسیار با دقت برداشت شوند. زیرا یک خطای ۱۰ نانوثانیه‌ای در تخمین زمان سفر دو طرفه، باعث ایجاد یک خطای ۰/۶ متری در بسیاری سنگ‌های دیگر خواهد شد.

دقت برداشت‌های دستگاه GPR عموماً براساس چگونگی همخوانی عمق‌های بازتابی با داده‌های مغزه‌گیری می‌باشد. به طور کلی زمانیکه یک تغییر محسوس و قابل ملاحظه در خواص فیزیکی لایه‌ها رخ می‌دهد. مثلاً زمانیکه یک لایه ماسه به رس یا یک لایه سنگ به خاک می‌رسد، انتظار چنین است که داده‌های رادار و نتایج مغزه‌گیری در همخوانی بالاتری نسبت به هم باشند. در برخی موارد، یک اختلاف قابل ملاحظه بین نتایج مغزه و داده‌های بدست آمده از دستگاه GPR حاکم می‌باشد. در حالیکه نتایج بدست آمده از GPR ممکن است در نوع خود دقیق باشد ولی نتایج ممکن است با ضخامت‌های

بدست آمده از مغزه به دلایل ذیل متفاوت باشد:

- اختلافات اساسی و بنیادی بین GPR و نمونه‌گیری با دریل: اندازه‌گیری‌های دستگاه GPR براساس روش محاسبه زمان سفر موج‌های الکترومغناطیسی می‌باشد. در زمان اندازه‌گیری عمق بین دو لایه مثلاً بین دو لایه سنگ و خاک، می‌بایست یک اختلاف قابل ملاحظه بین سرعت در این دو لایه وجود داشته باشد.
  - در مقابل، زمانیکه بالای یک لایه سنگی با استفاده از روش مغزه‌گیری کار انجام می‌شود، زمانی لایه سنگی شناسایی می‌شود که برای مثال سختی در حرکت یا خرده‌های سنگ مشاهده شود. تفاوت بین اندازه‌گیری‌های GPR و روش مغزه‌گیری در تشخیص فوقانی لایه سنگی ممکن است باعث تفاوت‌هایی در نتایج آنها شود. بعلاوه، نتایج مغزه‌گیری فقط برای شرایطی معتبر است که نمونه‌گیری چندین سانتی‌متر مربع باشد.
  - برداشت‌های GPR و سوراخ‌های مغزه ممکن است در یک محل یکسان انجام نشود. در مواردی که برداشت‌های مغزی به راحتی نمی‌تواند در طول خط حرکت GPR انجام شود، تصویر جانبی ضخامت ممکن است تا چندین متر هم اختلاف داشته باشند، (مخصوصاً زمانیکه سطح فوقانی لایه سنگی تغییرات زیادی داشته باشد).
- بنابراین جهت کالیبراسیون دستگاه GPR که نقش مهمی در دقت نتایج برداشت شده دارد، می‌بایست مغزه‌هایی تهیه شده و با تعیین مشخصات آزمایشگاهی این مغزه‌ها مانند ثابت دی‌الکتریک و مقایسه و ارتباط دادن آن با ثابت دی‌الکتریک بدست آمده از دستگاه، قبل و در حین برداشت، دستگاه کالیبره شود. در همین راستا لازم است نوارهای کنترل در سطح راه برداشت شده در ابتدای پروژه با بدست آوردن مشخصات آنها و رابطه آنها به صورت دوره‌ای در حین ساخت دستگاه کالیبره شود.
- با توجه به تخصصی بودن روند انجام کالیبراسیون در دستگاه GPR و نیز با توجه به تفاوت کالیبراسیون در دو حالت آنتن زمینی و هوایی و همچنین گستردگی جزییات، بحث‌های کامل‌تر و جامع‌تر در زمینه کالیبراسیون این دستگاه، در صورت لزوم، در قالب ضمیمه دستورالعمل ارائه خواهد شد.

## ۲-۳-۱-۵- روش انجام آمایش

براساس اینکه دستگاه GPR به چه نحوی استفاده می‌شود، به دو دسته سیستم هوایی و زمینی تقسیم بندی می‌شود: در سیستم هوایی، نوک (راس) دستگاه GPR در فاصله ۵۰۰-۱۵۰ میلیمتر بالاتر از سطح زمین قرار می‌گیرد. این سیستم‌ها اجازه حرکت با سرعت بالا و همچنین ارائه دادن یک سیگنال واضح را می‌دهند. در این حالت با توجه به این که بخشی از انرژی موج توسط سطح روسازی منعکس می‌شود، عمق نفوذ موج در این روش کم است. در مقابل در روش زمینی، نوک (راس) آنتن در تماس مستقیم و کامل با زمین است و امکان نفوذ بیشتر موج در زمین فراهم می‌آید (با فرکانس یکسان و انرژی موج مساوی)، ولی در این حالت سرعت جمع‌آوری اطلاعات پایین است.

## ۲-۳-۱-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده

نتایج بدست آمده از دستگاه GPR که در واقع به نوعی برداشت از شرایط زمین‌شناسی زیرسطحی روسازی می‌باشد، می‌بایست توسط دیگر روش‌های مکمل ژئولوژیک و ژئوفیزیکی و نیز برخی روش‌های غیر ژئوفیزیکی که ساده‌ترین و

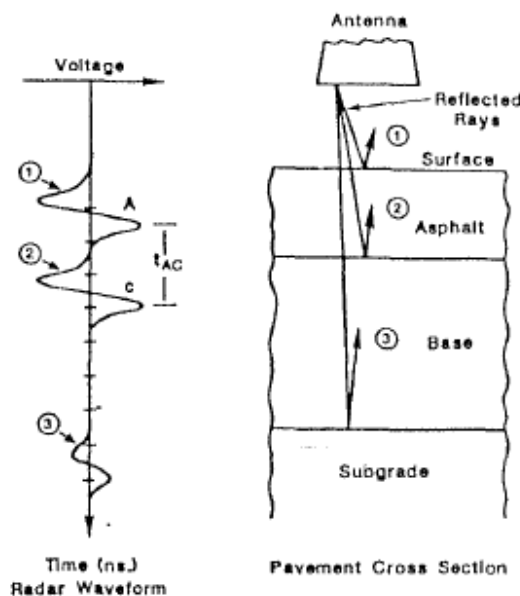
ارزان‌ترین آن‌ها مغزه‌گیری از مسیر برداشت است، برای تفسیر هرچه دقیق‌تر، مورد اعتبار سنجی قرار گیرد [۵۶].  
مهمترین داده مکمل در جریان برداشت و تفسیر نتایج دستگاه GPR، محل آنتن دستگاه و جهت آن می‌باشد. بزرگترین خطا در انواع آزمایشات زمین‌شناسی، به خصوص رادارها، ندانستن محل آنتن موقع برداشت می‌باشد (برای مثال محل برداشت داده‌ها) [۵۶].

### ۲-۳-۱-۷- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده

در ادامه برای هر چه بیشتر مشخص شدن روش‌های انجام و تحلیل داده‌ها، به بررسی چند کاربرد عملی از دستگاه GPR اشاره شده است.

#### کاربرد عملی ۱؛ تعیین ضخامت لایه‌های روسازی بر اساس نتایج دستگاه GPR

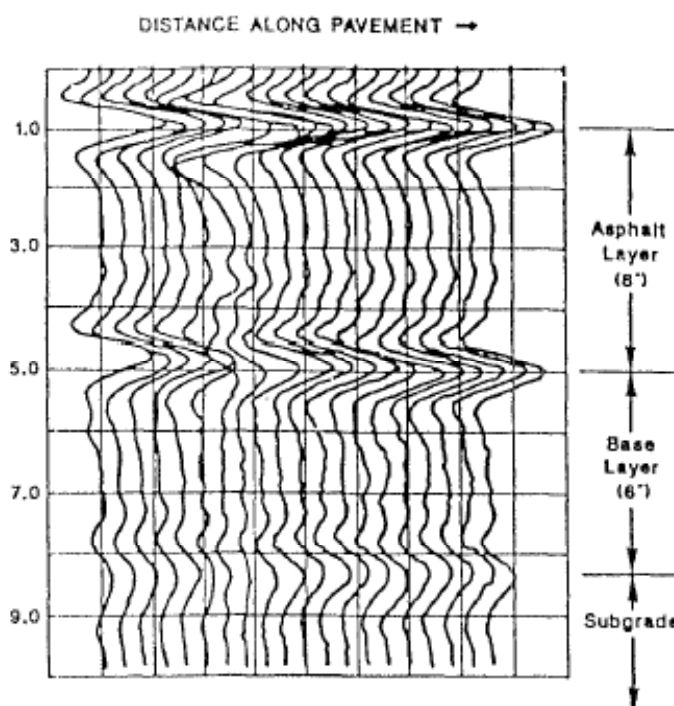
رادار نفوذی زمین با استفاده از آنتنی که به وسیله نقلیه متصل می‌شود، پالس‌های موج کوتاه الکترومغناطیس را به داخل سطح روسازی گسیل می‌دارد. این پالس‌ها به آنتن بازتاب شده و حاوی اطلاعاتی شامل؛ زمان سفر و دامنه موج که حاکی از خواص دی‌الکتریک مصالح تشکیل دهنده روسازی و محل قرارگیری آنهاست، می‌باشد. انرژی بازتاب شده از سطح روسازی ذخیره شده و ممکن است در یک نوسان‌سنج<sup>۱</sup> برای بررسی رفتار موج، نشان داده شود. شکل موج در نوسان‌سنج بیانگر ضخامت لایه‌های روسازی و خواص مصالح می‌باشد. شکل ۵۷، نشان دهنده رابطه ضخامت لایه‌های روسازی با شکل موج دستگاه رادار نفوذی زمین می‌باشد. شکل ۵۷، نشان دهنده یک نمونه از شکل‌های موج بدست آمده در یک پروژه تحقیقاتی می‌باشد [۵۷].



شکل ۵۷- بازتاب‌های انجام شده از فصل مشترک لایه‌های روسازی

1. Oscilloscope

ضخامت لایه‌های روسازی و خواص آنها با انجام محاسباتی بر روی دامنه موج‌ها و زمان سفر آنها که از فصل مشترک لایه‌ها مطابق شکل ۵۸، بازتاب می‌نمایند، قابل دریافت می‌باشد. ثابت دی‌الکتریک یک لایه روسازی، بسته به لایه قبل آن، قابل محاسبه از طریق اندازه‌گیری دامنه پیک‌های شکل موج براساس بازتاب‌های صورت گرفته از فصل مشترک لایه‌ها می‌باشد [۵۷].



شکل ۵۸- نمونه‌ای از شکل موج بدست آمده در یک پروژه تحقیقاتی

زمان سفر یک پالس الکترومغناطیس در مسیر حرکت خود در یک لایه با در نظر گرفتن ثابت دی‌الکتریک آن لایه، امکان محاسبه ضخامت لایه را براساس محاسبات پیش‌رو فراهم می‌سازد:

می‌دانیم؛

$$\text{زمان سفر یک پالس} = \left( \frac{\text{زمان سفر}}{2} \right) \times \text{سرعت موج} = \text{ضخامت} \quad (۱)$$

بدلیل اینکه زمان سفر به صورت رفت و برگشت می‌باشد، لذا برای محاسبه ضخامت، زمان می‌بایست بر ۲ تقسیم شود. سرعت موج براساس ثابت دی‌الکتریک طبق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد؛

$$\text{سرعت موج} = \frac{11.8}{\sqrt{\epsilon}} \quad (۲)$$

در این رابطه برای هوای آزاد که ثابت دی‌الکتریک آن ۱ می‌باشد، سرعت موج برابر ۱۱/۸ اینچ بر نانوثانیه می‌باشد. از ترکیب ۲ رابطه بالا رابطه زیر بدست می‌آید:

$$(۳) \quad (\text{اینچ}) / \sqrt{\varepsilon} = (\text{زمان سفر} \times 5.9) = \text{ضخامت}$$

در این رابطه زمان برحسب نانوثانیه می‌باشد.

محاسبه ثابت دی‌الکتریک لایه رویه از طریق اندازه‌گیری نسبت موج‌های بازتاب شده از سطح آسفالت به دامنه موج برخوردی با روسازی، امکان پذیر می‌باشد. این نسبت، ضریب بازتابش<sup>۱</sup> نامیده شده و اینگونه بدست می‌آید:

$$(۴) \quad (۱-۲) = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad \text{ضریب بازتابش}$$

(۱-۲) نشان دهنده دو لایه متوالی می‌باشد.

دامنه موج برخوردی با روسازی از طریق اندازه‌گیری بازتاب‌های صورت گرفته از یک صفحه فلزی بر روی سطح روسازی به دلیل بازتاب ۱۰۰ درصدی از صفحه فلزی قابل انجام می‌باشد. با در نظر گرفتن این روابط و نیز با دانستن ثابت دی‌الکتریک هوا برابر ۱ خواهیم داشت:

$$(۵) \quad \frac{A}{-A_{PL}} = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_a}}{1 + \sqrt{\varepsilon_a}} \quad (\text{آسفالت} \rightarrow \text{هوا}) \quad \text{ضریب بازتابش}$$

A : دامنه موج بازتابی از آسفالت

$A_{PL}$  : دامنه موج بازتابی از صفحه فلزی

$\varepsilon_a$  : ثابت دی‌الکتریک آسفالت

با تغییر در ترتیب رابطه بالا برای ثابت دی‌الکتریک آسفالت خواهیم داشت؛

$$(۶) \quad \varepsilon_a = \left[ \frac{1 + \frac{A}{A_{PL}}}{1 - \frac{A}{A_{PL}}} \right]^2$$

به همین ترتیب می‌توان ثابت دی‌الکتریک لایه اساس را نیز محاسبه نمود؛

$$(۷) \quad \varepsilon_b = \varepsilon_a \left[ \frac{F - R2}{F + R2} \right]^2$$

$$F = \frac{4\sqrt{\varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a}$$

R2 : نسبت دامنه موج بازتابی از سطح فوقانی لایه اساس به دامنه موج بازتابی از سطح فوقانی لایه آسفالت

$\varepsilon_b$  : ثابت دی‌الکتریک لایه اساس

بدین ترتیب با استفاده از روابط فوق به عنوان اساس و اصل تحلیل و تفسیر داده‌های جمع‌آوری شده توسط دستگاه GPR می‌توان ضخامت لایه‌های روسازی و ثابت دی‌الکتریک لایه‌ها را تعیین نمود.

به عنوان یک کاربرد عملی برای استفاده از داده‌های بدست آمده از دستگاه رادار نفوذی زمین، براساس تئوری فوق به

یک تحقیق که در سال ۱۹۹۱ توسط اداره حمل و نقل ایالت کانزاس آمریکا (K-DOT) انجام پذیرفت اشاره می‌شود. در این تحقیق با هدف بررسی کارایی تکنولوژی تعیین پروفیل ضخامت لایه‌های روسازی براساس رادار الکترومغناطیس در سطح شبکه و پروژه، ۱۱ سایت تحقیقاتی انتخاب شده و در قطعات ۱۰۰۰ فوتی برداشت داده‌ها توسط GPR و نمونه‌گیری مستقیم به صورت مغزه‌گیری انجام پذیرفته است.

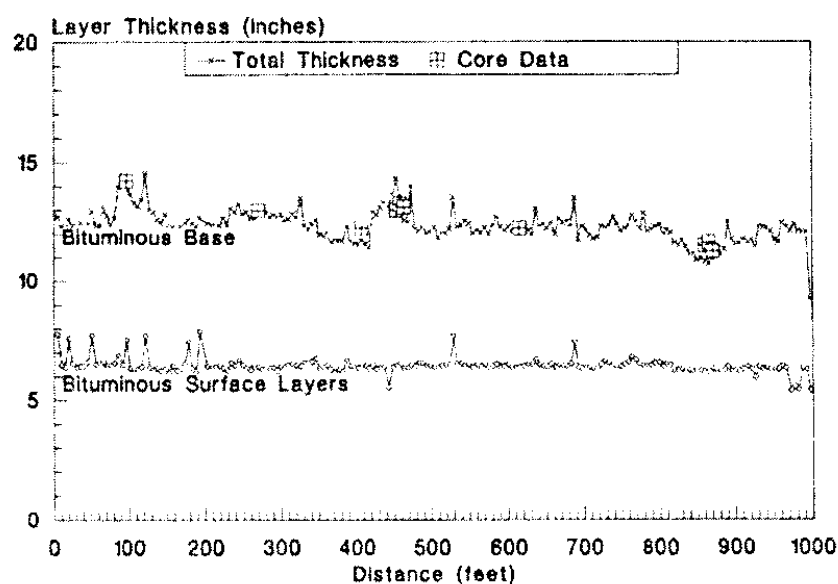
در این تحقیق برداشت و تغییر داده‌ها تحت تکنولوژی نرم‌افزاری INFRASENSE متعلق به دانشگاه MIT و با استفاده از یک ون مجهز به دستگاه GPR متعلق به شرکت Pulse Radar و تحت سرپرستی اداره حمل و نقل ایالت کانزاس صورت پذیرفته است.

تحلیل داده‌ها براساس روابط ۱ تا ۷ که پیش‌تر به آنها اشاره شد انجام می‌گیرد. در همین راستا ضخامت لایه آسفالت به ترتیب زیر محاسبه می‌شود؛

الف - تعیین سرعت موج در لایه آسفالت با استفاده از ثابت دی‌الکتریک آسفالت بدست آمده از بازتاب‌های سطح این لایه توسط رابطه ۶،

ب - محاسبه ضخامت با استفاده از سرعت موج و زمان سفر بازتاب صورت گرفته از سطح تحتانی لایه آسفالت با استفاده از رابطه ۳ [۵۷].

ضخامت لایه اساس نیز طی همین مراحل قابل محاسبه می‌باشد. سرعت موج در لایه اساس از روی ثابت دی‌الکتریک آن با توجه به دامنه موج بازتابی از فصل مشترک لایه‌های آسفالت و اساس با کمک رابطه ۷ بدست می‌آید. تمام این محاسبات به صورت خودکار در مجموعه نرم‌افزاری INFRASENSE PAVELAYER به گونه‌ای انجام می‌گیرد که ظرف چند دقیقه، هزاران شکل موج تحلیل شده و یک پروفیل پیوسته از ضخامت‌های لایه‌های زیرین روسازی براساس برداشت‌های دستگاه GPR حاصل می‌شود. (مطابق شکل‌های ۵۹)



[۵۷] شکل ۵۹- پروفیل پیوسته ضخامت روسازی

## ۲-۳-۱-۸- بررسی مزایا و معایب آزمایش‌های تعیین ضخامت روسازی

در جدول ۳۴، مزایا و معایب آزمایش GPR به صورت جداگانه آورده شده است.

جدول ۳۴- مزایا و معایب دستگاه GPR

| GPR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مزایا                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>دستگاه GPR قادر است با پوشش کامل روسازی تنها با بخشی از هزینه لازم برای نمونه‌گیری به روش مغزه‌گیری به ارزیابی روسازی بپردازد.</li> <li>دستگاه GPR قادر است به صورت اتوماتیک داده‌های برداشت شده مربوط به ضخامت روسازی را به سیستم‌های مدیریت روسازی (PMS) منتقل کرده تا در محاسبه عمر باقیمانده روسازی به کار آید.</li> <li>دستگاه GPR دارای سرعت برداشت نسبتاً بالا، بخصوص در نوع هوایی است. دستگاه‌های مجهز به سیستم‌های راداری قادرند ۳۲۲ کیلومتر را در روز برداشت کنند. این برداشت‌ها با سرعت معمول (۸۰ کیلومتر در ساعت) در راه انجام می‌شود و به صورت کاملاً فاحش زمان را کاهش می‌دهند.</li> <li>در دستگاه GPR هیچ نیازی به کارگر در محل آزمایش و در مسیر راه نیست. بدین ترتیب ایمنی این دستگاه بسیار بالاست.</li> <li>دستگاه GPR دارای دقت بسیار قابل قبولی است.</li> <li>امکان هماهنگ شدن با سیستم‌های غیرمخرب دیگر مانند دستگاه FWD</li> <li>کالیبراسیون ساده</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>دستگاه GPR همیشه قادر نیست ضخامت روسازی‌های بتنی و یا ضخامت لایه اساس را در صورتیکه اختلاف مشخصات آنها فاحش نباشد تشخیص دهد.</li> <li>کارایی دستگاه GPR به شدت به شرایط و ویژگی‌های محل آزمایش بستگی دارد. مثلاً میزان نفوذ رادار در ماسه‌های اشباع شده بیشتر از ۳۰ متر خواهد بود، در حالیکه نفوذ در سنگ‌های گرانیب نزدیک به ۳۰۰ متر می‌باشد. در حالت‌های معمولی نفوذ بین ۱ تا ۱۰ متر خواهد بود (البته از لحاظ فنی میزان نفوذ امواج ساطع شده، بستگی به فرکانس سیگنال‌ها دارد)</li> <li>در دستگاه GPR به برخی دلایل مانند تأثیر سست‌سازی گذردهی الکتریکی، دی‌الکتریک و مغناطیسی و نیز پراکندگی امواج، پدیده میرایی (Attenuation) رخ می‌دهد که باعث اختلال در نتایج دستگاه می‌نماید. در پدیده میرایی ممکن است موج الکترومغناطیس تبدیل به انرژی گرمایی شده و یا در اثر برخورد با ذرات درشت دانه غیرهموزن به مسیرهای مختلف پراکنده شود.</li> <li>امکان دریافت برخی سیگنال‌ها توسط آنتن دریافت کننده دستگاه GPR که مربوط به این دستگاه نمی‌باشد (Noises).</li> </ul> |

## ۲-۴- آزمایش‌های تعیین سختی لایه‌های روسازی

### ۲-۴-۱- آزمایش DCP<sup>۱</sup>

#### ۲-۴-۱-۱- معرفی دستگاه

DCP وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری سریع مقاومت و مدول الاستیسیته لایه‌های مختلف روسازی و بستر طراحی شده است. اسکالا<sup>۲</sup> استفاده از DCP را در سال ۱۹۵۶ برای تخمین CBR<sup>۳</sup> در محل خاک‌های چسبنده در محل بنیان نهاد. دامنه استفاده از DCP با طراحی کلین<sup>۴</sup> در سال ۱۹۷۵ افزایش یافت. از آن زمان تحقیقات بسیاری برای بهینه‌سازی آن انجام شده است [۵۸]. امروزه DCP وسیله‌ای مؤثر برای ارزیابی مقاومت در محل لایه‌های روسازی و بستر محسوب می‌گردد. آزمایش مذکور بسیار ساده، اقتصادی و سریع بوده که از این لحاظ بر بسیاری از آزمایش‌های رایج در این زمینه، ارجحیت پیدا می‌یابد. تصویری از این دستگاه در شکل ۶۰، آمده است.



شکل ۶۰- دستگاه DCP

DCP مانند CBR مقاومت را برحسب میزان نفوذ اندازه‌گیری می‌کند، اما سرعت انجام آن بیشتر از CBR می‌باشد. DCP یا نفوذسنج دینامیکی مخروطی، از یک چکش تشکیل یافته که از فاصله ۵۷۵ میلیمتری بر یک کفشک متصل به میله فرورونده سقوط می‌کند، یک مخروط فولادی فشرده با زاویه ۶۰ درجه در انتهای این میله فولادی قرار دارد. قطر هسته ۲۰ میلیمتر و قطر میله ۱۶ میلیمتر است. تعداد دفعات افتادن چکش در برابر نفوذ هسته برای هر آزمایش ثبت می‌شود تا

1. Dynamic Cone Penetrometer
2. Scala
3. California Bearing Ratio
4. Kley

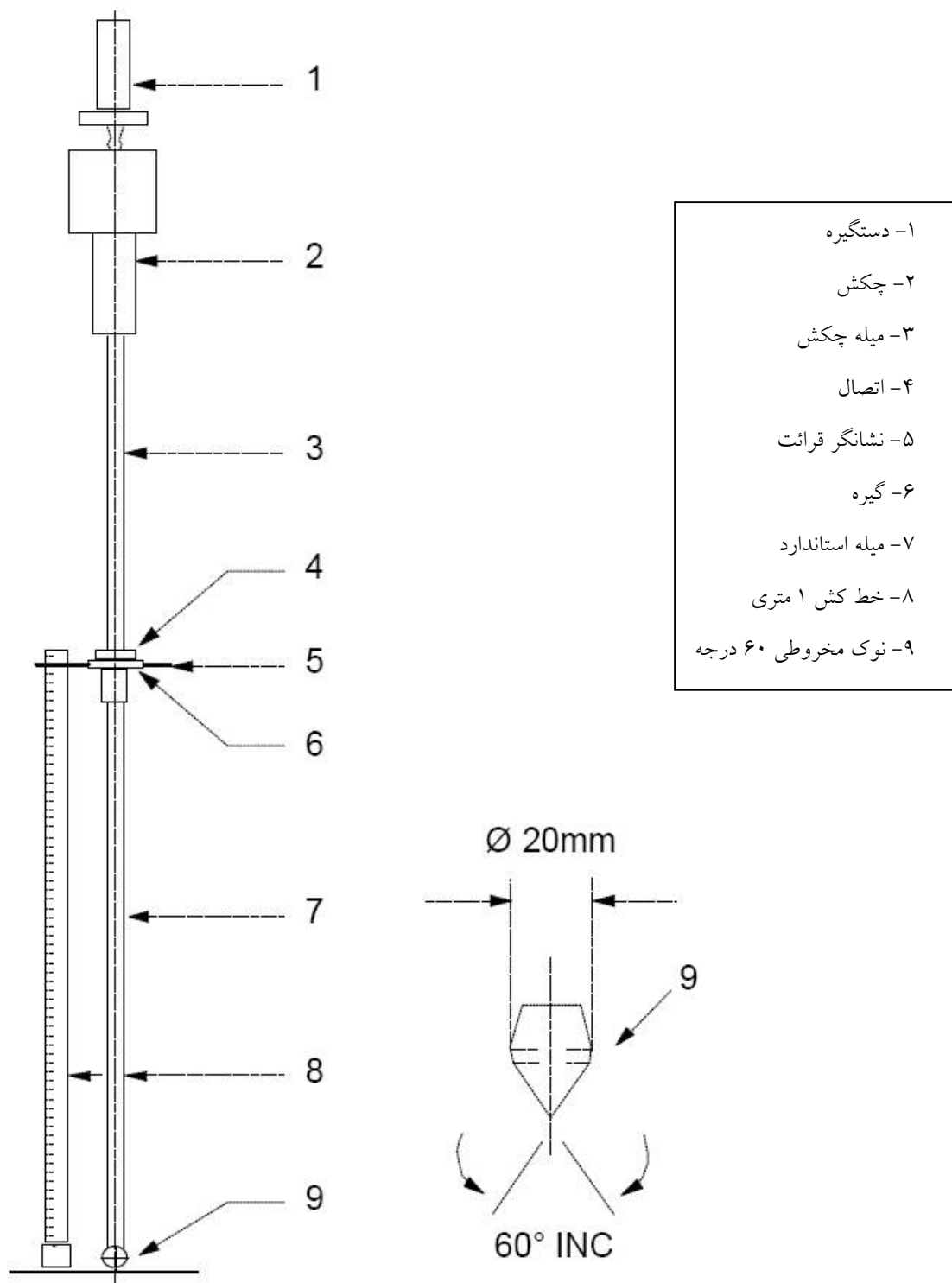
نرخ نفوذ<sup>۱</sup> (mm/blow) یا  $PR^2$  محاسبه گردد. انجام این آزمایش نیاز به سه نفر دارد، یکی برای نگه داشتن میله، یکی برای بلند کردن و انداختن چکش DCP و دیگری برای اندازه‌گیری و ثبت عمق نفوذ (مطابق شکل ۶۱). اندازه‌گیری‌ها در دستگاه DCP تا ۸۰۰ میلیمتر و در حالت اضافه شدن قطعات بلندتر تا حداکثر عمق ۱۵۰۰ میلیمتر قابل انجام می‌باشد [۵۹].



شکل ۶۱- نحوه کارکردن با دستگاه DCP

نفوذسنج دینامیکی مخروطی (DCP) از یک میله فولادی به قطر حداکثر ۲۰ میلیمتر که در انتهای آن یک مخروط فولادی با زاویه نفوذ ۶۰ درجه قرار دارد، تشکیل می‌شود. این مخروط با رها کردن یک چکش به وزن ۸ یا ۴/۶ کیلوگرم از ارتفاع ۵۷۵ میلیمتری، به درون لایه‌های روسازی مورد آزمایش فرو می‌رود. اجزای مختلف دستگاه در شکل ۶۲، مشخص گردیده است [۵۹].

۱. نرخ نفوذ عبارتست از میزان نفوذ تجمعی نوک مخروط برحسب میلیمتر تقسیم بر تعداد ضربات وارده.



شکل ۶۲- اجزای دستگاه DCP [۵۹]

هنگام استفاده از دستگاه DCP، زمانیکه لایه‌های مختلف روسازی دارای مقاومت‌های متفاوت هستند، مرز بین لایه‌ها و نیز ضخامت هر یک با کمک نرم‌افزارهای پشتیبانی کننده مانند UK DCP که در اداره حمل و نقل بریتانیا طراحی شده است، قابل محاسبه می‌باشد. همچنین نرم‌افزارهای دیگری مانند TRL DCP نیز برای انجام تحلیل‌های مورد نیاز موجود می‌باشد.

در این آزمایش به دلیل سادگی، نرم‌افزاری برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده نمی‌شود و این کار توسط یک نفر با قرائت میزان نفوذ از روی خط‌کش برای هر ضربه و یا توسط خط‌کش اتوماتیک به صورت خودکار، انجام می‌گیرد. همانگونه که اشاره شد برای تفسیر و تحلیل نتایج برداشت، نرم‌افزاری طراحی شده‌اند. نحوه استفاده از نرم‌افزارها به طور کامل در دستورالعمل آنها که هنگام فروش نرم‌افزار ارائه می‌شود؛ از جمله نحوه نصب و راه‌اندازی، ورود اطلاعات، تحلیل داده‌ها، خروجی‌های مختلف نرم‌افزار و... ارائه شده است.

#### ۲-۱-۴-۲- تئوری آزمایش

به علت انجام سال‌ها آزمایش و وجود پایگاه داده‌های فراوان برای آزمایش CBR خاک‌های مختلف با تراکم‌های متفاوت و نیز روابط حاصله بین ضخامت لایه‌های مختلف روسازی براساس مقاومت لایه‌های آن، ارتباط بین آزمایش CBR و DCP، لازم و ضروری به نظر می‌رسد [۵۵]. DCP، یک آزمایش معمول برای تخمین CBR درمحل به شمار می‌رود. این آزمایش به دلیل سادگی، ارزانی و قابلیت اندازه‌گیری سریع مقاومت لایه‌های روسازی و بستر درمحل، مورد توجه می‌باشد. تحقیقات وسیعی برای یافتن رابطه CBR و DCP، انجام شده است. مدل‌های لگاریتمی زیر مورد قبول‌ترین رابطه بین CBR و PR (mm/blow) محسوب می‌شوند [۶۰]:

|                        |                                          |
|------------------------|------------------------------------------|
| Kleyn (1975)           | $\log CBR = 2/62 - 1/27 \log PR$         |
| Smith and Pratt (1983) | $\log CBR = 2/56 - 1/15 \log PR$         |
| Harison (1984-1986)    | $\log CBR = 2/55 - 1/14 \log PR$         |
| Livneh (1987-1991)     | $\log CBR = 2/20 - 0/71 (\log PR)^{1/5}$ |

همان طور که مشاهده می‌شود رابطه هریسون مشابه رابطه اسمیت و پرات است که سطح اطمینان بیشتری را برای روابط پیشنهاد می‌کند. گونه دیگر روابط DCP در برابر CBR که در ادامه آمده است، روابطی هستند که توسط مهندسان ارتش آمریکا پیشنهاد شده است، که در آن PR بر حسب mm/blow است.

$$CBR = \frac{2/92}{(PR)^{1/12}}$$

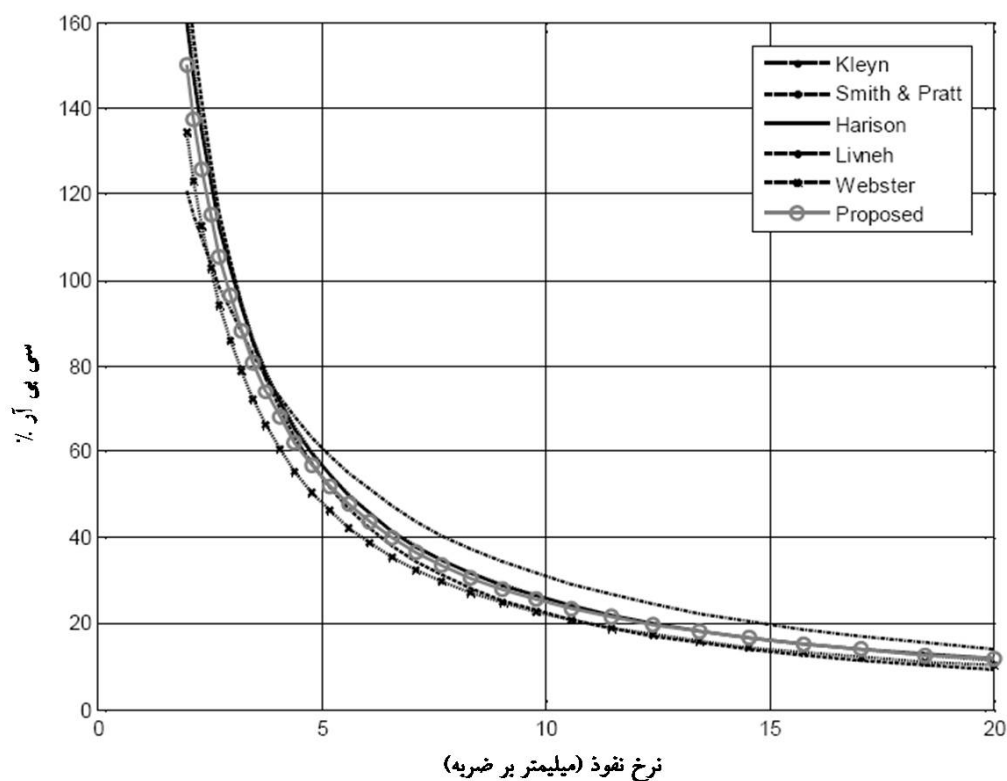
پس از آزمایش‌های بیشتر در WES<sup>۱</sup>، مشخص شد که مقادیر CBR کمتر از ۱۰٪ و اطلاعات خاک‌های با رس زیاد (CH) با معادله ارتش آمریکا همخوانی ندارد. در نتیجه روابط زیر برای خاک‌های با مقادیر CBR زیر ۱۰٪ و CH تدوین گردید:

|                                          |                 |
|------------------------------------------|-----------------|
| $CBR = \frac{1}{(0/017019 \times PR)^2}$ | CBR < 10%       |
| $CBR = \frac{1}{0/00287 PR}$             | برای خاک‌های CH |

در نهایت به منظور ایجاد سطح اطمینان بیشتر در دامنه تغییرات CBR براساس DCP و ارائه یک فرمول جامع برای برقراری ارتباط بین CBR و DCP، خط حداقل مربعات و مدل مربوطه برای برازش آنها پیشنهاد گردید:

$$\text{Log CBR} = 2/51 - 1/11 \log(PR)$$

CBR بدست آمده از این رابطه با تقریب  $\pm 7\%$  درصد تمام روابط گفته شده را پوشش می‌دهد. برای مقایسه بین روابط بیان شده و هماهنگی آنها با هم، نمودار شکل ۶۳، تهیه شده، که در ازای نرخ‌های نفوذ برحسب mm/blow، درصد‌های CBR رانشان داده است. این نمودار تطابق این روابط گوناگون را با هم نشان می‌دهد.



شکل ۶۳- نمودار مدل‌های مختلف CBR و DCP

هنگامیکه CBR خاک با استفاده از آزمایش DCP بدست آمد، عده‌ای تصمیم گرفتند که مدول برجهندگی بستر را نیز از روابط موجود بدست آورند [۶۱]، رابطه‌ای که در راهنمای AASHTO در سال ۱۹۹۳ برای طرح سازه روسازی آمده است، مطابق زیر می‌باشد:

$$M_R = 10 \text{ CBR}$$

که در آن مدول برجهندگی ( $M_R$ ) برحسب MPa می‌باشد. با این وجود، تخمین مدول برجهندگی از CBR که خود از DCP بدست آمده است، موجب خطای انباشته از دو معادله رگرسیون می‌شود. در کانزاس، در سال ۱۹۹۹ تحقیقی آغاز شد تا یک رابطه مستقیم برای یافتن مدول برجهندگی از DCP با استفاده از دستگاه FWD و محاسبات معکوس بدست آورند [۶۲].

مقادیر CBR با رابطه لیونه<sup>۱</sup> از DCP بدست آمد. اطلاعات FWD و DCP از ۵ قطعه راه برای بدست آوردن رابطه مستقیم بین مدول برجهندگی و DCP استفاده شد و با استفاده از آن رابطه، قطعه ششم را مشخص نمودند. برای تمام ۶ قطعه  $M_R$  از روی CBR بدست آمده از DCP تعیین گردید. نتایج آزمایش‌های میدانی ۵ قطعه نشان داد که یک رابطه قوی بین مقادیر DCP و مدول بستر محاسبه شده از FWD، وجود دارد که در زیر آمده است:

$$M_R = 338(PR) - 0/39$$

که در آن مدول برجهندگی برحسب MPa و نرخ نفوذ برحسب mm/blow می‌باشد. رابطه فوق برای نرخ نفوذهای DCP بین ۱۰ تا ۶۰ mm/blow بدست آمده است.

در مقایسه بین مقادیر مدول برجهندگی که بصورت غیر مستقیم از معادلات بدست آمده بودند و مدول‌های برجهندگی که بصورت مستقیم از DCP به کمک رابطه فوق بدست آمده بودند، برای قطعه ۶، مشخص گردید که گروه دوم بسیار سازگارتر و با تطابق بیشتری با مدول‌های محاسبه شده با FWD هستند. روابط دیگر بین نرخ نفوذ DCP و مدول الاستیک لایه‌ها (E) نیز در زیر آمده است [۶۳]:

$$\text{Pen-1(1990):} \quad \log E = 3/250 - 0/89 \log PR$$

$$\text{Pen-2(1990):} \quad \log E = 3/653 - 0/17 \log PR$$

$$\text{De Beer (1991):} \quad \log E = 3/048 - 1/062 \log PR$$

#### ۲-۴-۱-۳- موارد استفاده

موارد کاربرد آزمایش DCP در بندهای زیر خلاصه شده است،

- تشخیص نقاط ضعیف لایه‌های متراکم شده
- بسیاری مطالعات با هدف یافتن روابط مستدل بین نرخ نفوذ DCP و چگالی تراکم<sup>۱</sup> درمحل با شکست روبه‌رو شده‌اند. بیشتر نتایج مربوط به مصالح چسبنده و سنگدانه تغییرات زیادی را نشان داده‌اند که امکان برقراری یک رابطه تجربی را ناممکن می‌ساخت، با این وجود مقاطع خوب متراکم شده، مقادیر PR بسیار یکنواختی را از خود نشان می‌دهند، بنابراین استفاده از DCP برای معین نمودن نقاط ضعف در مصالح فرض شده با تراکم یکنواخت پیشنهاد می‌شود [۶۴].
- تشخیص لایه‌ها در سازه‌های روسازی
- DCP یک وسیله مؤثر برای ارزیابی لایه‌های اساس، زیراساس و بستر روسازی است. تشخیص نرخ نفوذ در برابر عمق به مهندسان این امکان را می‌دهد تا لایه‌های متفاوت روسازی را با عمق آنالیز کنند.
- وبستر<sup>۲</sup> (۱۹۹۲) میانگین عمق‌های مورد نیاز را برای انواع مختلف خاک براساس آزمایشات محلی WES گزارش کرده است. در جدول ۳۵، این مقادیر برای انواع خاک‌های مختلف آمده است. برای اینکه بتوان از DCP به صورت مؤثرتر در مطالعات و ارزیابی تراکم استفاده نمود، اداره حمل و نقل مینسوتا<sup>۳</sup> پیشنهاد کرده است، برای مقدار نرخ نفوذ هر نوع اساس و بستر حد تعریف شود. بعد از انجام بیش از ۷۰۰ آزمایش DCP، آنها توانستند لیست مقادیر PR را برای استفاده در آنالیز نتایج DCP پیشنهاد دهند. این مقادیر پیشنهادی در محدوده سطح، آزمایش شده‌اند. این مقادیر تمام انواع خاک را پوشش نمی‌دهند و تحقیقات مشابهی بایستی برای سایر انواع لایه‌های اساس انجام پذیرد [۶۲].
- مقادیر حدود نرخ نفوذ DCP در جدول ۳۶، آمده است.

جدول ۳۵- عمق مورد نیاز انواع خاک غیر چسبنده [۶۲]

| نوع خاک | میانگین عمق نفوذ مورد نیاز (in) |
|---------|---------------------------------|
| CH      | ۱                               |
| CL      | ۳                               |
| SC      | ۴                               |
| SN-SM   | ۴                               |
| SM      | ۵                               |
| GP      | ۵                               |
| SP      | ۱                               |

جدول ۳۶- حدود نرخ نفوذ DCP پیشنهادی اداره حمل و نقل مینسوتا [۶۲]

| نوع مصالح                     | حدود PR (mm/blow) |
|-------------------------------|-------------------|
| بستر رسی / لای                | < 25              |
| زیر اساس دانه‌ای              | < 7               |
| مصالح اساس با دانه بندی نوع ۳ | < 5               |

1. Compaction Density  
2. Webster  
3. MnDOT

- تعیین میزان تأثیر تثبیت کردن مصالح اندازه‌گیری چگالی، روش مؤثر برای یافتن مقاومت بدست آمده با تثبیت بوسیله افزودنی نیست. چگالی‌های این مواد همراه با افزایش مقاومت، افزایش نمی‌یابند. چون اصل استفاده از DCP برپایه میزان مقاومت مصالح در برابر نفوذ هسته می‌باشد، با افزایش مقاومت مقادیر PR کاهش می‌یابد و می‌توان از آن برای نشان دادن تأثیر تثبیت در برابر زمان استفاده نمود [۶۲].
- استفاده به عنوان ابزار آزمایش قابل قبول کردن کیفیت<sup>۱</sup> (QA) DCP یک وسیله کارا برای آزمایش کیفیت بر پایه خصوصیات اجرایی است. این وسیله هم اکنون جای خود را در اکثر ادارات حمل و نقل دنیا یافته است. به طور مثال نرخ نفوذ DCP مساوی یا کمتر از ۳ اینچ در هر ضربه تراکم قابل قبولی را براساس استاندارد زهکشی زیرسطحی در ایالت مینسوتا آمریکا ارایه می‌نماید [۶۵].
- استفاده از نتایج DCP در تعیین قطعات مدیریتی در مدیریت روسازی راه‌ها  
با استفاده از نتایج DCP می‌توان مقطع راه را به قطعات یکنواخت قابل مدیریت تقسیم‌بندی نمود. حداقل طول یک مقطع بایستی ۱۰۰ متر باشد و طول ۱۰۰۰ متر مطلوب است. برای راه‌های طولانی با شرایط یکنواخت، طول ۱۰۰۰۰ متر نیز قابل قبول می‌باشد. ساخت مقاطع یکنواخت با طول کمتر از ۵۰۰ متر غیرحرفه‌ای می‌باشد. در برخی نقاط جدا کننده، ممکن است، مقدار DCP کمی مشاهده شود که بایستی این نقاط بهبود یابد [۵۸].

#### ۴-۱-۴-۲- روش کالیبراسیون

دستگاه نفوذ دینامیکی مخروطی (DCP) به دلیل مکانیزم ساده و کار به صورت دستی نیاز به کالیبراسیون ندارد. آنچه می‌بایست به آن توجه شود نحوه صحیح مونتاژ دستگاه و محکم کردن قسمت‌های مختلف آن توسط اتصالات خاص آن می‌باشد. زیرا هر گونه عدم اتصال درست قطعات علاوه بر کاستن از عمر دستگاه باعث پایین آمدن دقت در قرائت‌ها و ضربات ایجاد شده می‌شود. در واقع آنچه تضمین کننده صحت نتایج در دستگاه DCP است، نحوه صحیح انجام آزمایش است که جزئیات نصب و راه‌اندازی دستگاه و نحوه انجام آزمایش در دستورالعمل‌های همراه هر دستگاه آمده است.

#### ۴-۱-۴-۲-۵- روش انجام آزمایش

دستگاه DCP مونتاژ شده را روی سطح راه قرار دهید. چکش را تا جای ممکن بالا آورده و سپس رها کنید، دقت شود که آن را به سمت پایین شتاب نداده و فقط آن را رها کنید. عمق نفوذ را برای هر ۵ ضربه بدست آورید. این روند را برای نفوذ ۸۰۰ میلیمتر زیر سطح ادامه دهید. برخورد با لایه سنگی برای ۵ تا ۲۵ ضربه ممکن است به صورت خط افقی نشان داده شود. با ادامه ضربات، نفوذ ادامه می‌یابد.

پس از مونتاژ دستگاه اولین وظیفه ثبت خطای صفر دستگاه می‌باشد. برای این منظور دستگاه بر روی یک سطح سخت مانند بتن قرار داده شده و در حالت عمودی، قرائت انجام شده به عنوان خطای صفر دستگاه ثبت می‌شود.

قرائنها در حین انجام آزمایش DCP می‌بایست در افزایش‌های ۱۰ میلیمتری در نفوذ مخروط ثبت شود، این در حالیکه معمولاً پس از تعدادی ضربه معین، آسان‌تر می‌باشد. در این حالت لازم است تعداد ضربات بین قرائنها بسته به مقاومت لایه‌ها تغییر داده شود. مثلاً برای لایه‌های اساس با دانه‌بندی خوب، به ازای هر ۵ یا ۱۰ ضربه کافی بوده اما برای لایه‌های زیر اساس و بستر ضعیف‌تر به ازای هر یک یا ۲ ضربه باید قرائت صورت گیرد. ثبت قرائت‌های متعدد و زیاد آن چنان مفید به نظر نمی‌رسد اما اگر تغییرات مقاومتی در لایه‌ها زیاد است و احتمال از دست دادن نقاط ضعف روسازی وجود دارد و یا اینکه تشخیص مرز بین لایه‌ها سخت است، قرائت‌های متعدد توصیه می‌گردد.

دستگاه DCP قادر نیست در لایه‌های سخت، مانند مصالح سنگی درشت دانه و متراکم و یا لایه‌های متشکل از تکه سنگ‌های سخت نفوذ کند. نرخ نفوذ کمتر از  $0.5 \left( \frac{mm}{blow} \right)$  برای این دستگاه قابل قبول است اما اگر هیچ نفوذی در بیست ضربه متوالی ثبت نشد، این بدان معناست که DCP قادر به نفوذ در این لایه نیست. در این حالت برای آزمایش لایه‌های زیرین می‌بایست توسط مته‌های پنوماتیک یا الکتریکی لایه سخت را از میان برداشت [۶۶]. اگرچنین انجام آزمایش DCP، دستگاه قدری از حالت عمودی خود متمایل شده بود، لازم به تصحیح آن نیست، زیرا هر گونه تماس اضافی بین میله دستگاه و دیواره سوراخ باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در نتایج می‌گردد. ولی اگر این انحراف از خط قائم خیلی زیاد شود به طوریکه چکش به جای سقوط آزادانه برروی میله بلغزد و به پایین بیاید، می‌بایست آزمایش متوقف شده و در نقطه دیگری آزمایش تکرار شود. نوک مخروطی دستگاه قابل تعویض است و توصیه می‌شود اگر قطر آن به میزان ۱۰ درصد کاهش یافت حتماً تعویض شود [۶۶]. هنگام انجام آزمایش DCP، یک نفر مسئول ثبت نتایج و تکمیل فرم مخصوص (مطابق جدول ۳۷) می‌باشد.

جدول ۳۷- فرم ثبت نتایج آزمایش DCP [۶۶]

[illegible]

## ۲-۴-۱-۶- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده

آزمایش DCP بایستی مطابق استاندارد که ذکر می‌گردد، صورت پذیرد تا میزان صحت داده‌های بدست آمده از آن اعتبار کافی داشته باشد. اگر راه بسیار یکنواخت باشد، تناوب‌ها می‌تواند کاهش یابد [۶۷].

- تکرار ۲ تا ۴ عدد تست در هر کیلومتر، به طوریکه برداشت‌ها در خارج و داخل مسیر چرخ در دو طرف و بر روی محور راه و سایر قسمت‌ها انجام شود. حداقل ۸ آزمایش DCP برای یک مقطع یکنواخت لازم است تا اطلاعات کافی برای آنالیز بدست آید.
- برای نقاطی که در آنها خرابی مشاهده شده است، ۲ تا ۴ آزمایش برای خود ناحیه خرابی و همین مقدار برای مقطع بدون خرابی نزدیک آن ناحیه انجام شود.
- اطمینان حاصل گردد که در هر ناحیه یکنواخت، حداقل ۸ تست DCP انجام شده تا اطلاعات کافی برای تحلیل وجود داشته باشد.
- برای جاده‌های جدید الحداث، برداشت حداقل ۲ نمونه در هر کیلومتر و یا ۲ نمونه در هر مقطع برای جستجوی خرابی، کنترل تست آزمایشگاهی CBR اشباع، حدود اتربرگ و رطوبت هر لایه در محل لازم و ضروری است.
- برای باند فرودگاه‌ها ضخامت روسازی بسیار بیشتر است. در این موارد مقاومت بستر نیز مقادیر متفاوتی خواهد بود. در یک عرض مشخص مقاومت نواحی محور با ۱۵ متر خارج از محور با وجود ضخامت لایه آسفالتی برابر، بسیار متفاوت است که دلیل آن تراکمی است که بر اثر ترافیک ایجاد می‌شود. در این موارد DCP فقط می‌تواند نقاط ضعیف را شناسایی کند

یکی از عواملی که باعث ایجاد خطا در نتایج بدست آمده از آزمایش DCP می‌شود، وجود مصالح درشت دانه در اساس است. در این حالت مقدار نفوذ DCP به صورت ثابت و یکنواخت بالا خواهد رفت. به عبارت دیگر درشتی و تراکم ذرات دانه‌ای اساس بر میزان نفوذ تأثیرگذار می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود که هنگام استفاده از DCP در لایه آسفالتی و اساس درشت دانه نتایج با دقت و احتیاط بیشتر تحلیل شود [۶۸].

## ۲-۴-۱-۷- تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده

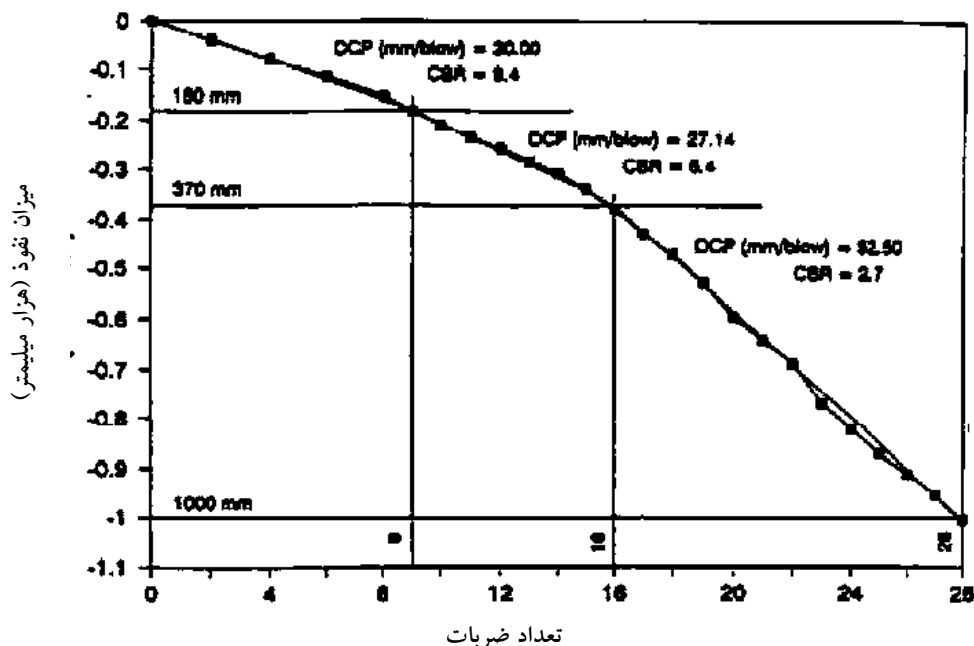
برای روسازی یک راه اغلب نیاز است، تا حد امکان در مورد ضخامت لایه‌ها و شرایط سازه‌ای آنها اطلاعات کسب شود. زمانیکه یک راه شروع به اضمحلال سازه‌ای زودرس می‌کند، در واقع مشکلات ذاتی سازه‌ای در ساختار آن وجود داشته که دانستن این موضوع حیاتی به نظر می‌رسد. سریع‌ترین و آسان‌ترین راه برای تشخیص ضخامت و وضعیت روسازی، بررسی نحوه طراحی، که راه براساس آن ساخته شده از روی نقشه‌های آزیبیل<sup>۱</sup> می‌باشد. اما طراحی‌ها فقط نشانگر وضعیت اصلی ساخت در قبل و حین ساخت راه هستند و هیچ اطلاعاتی در مورد اتفاقاتی که از زمان ساخت تاکنون برای لایه‌های روسازی رخ داده و همچنین وضعیت فعلی، نمی‌دهند. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد تا با کمک ابزارها و روش‌هایی، وضعیت حال حاضر روسازی مورد بازرسی و کنکاش قرار گیرد. این مهم ممکن است با روش‌های مخرب مانند مغزه‌گیری و روش‌های

آزمایشگاهی صورت گیرد و یا به کمک روش‌های غیرمخرب در محل انجام شود. حفر سوراخ و مغزه‌گیری نه تنها به راه صدمه می‌زد و وقت‌گیر و پرهزینه است بلکه به دلیل دست خورده شدن نمونه‌ها ممکن است چندان دقیق نباشند. یک نوع از روش‌های آزمایش غیرمخرب که مفصلاً به معرفی آن پرداخته شده است، به نام نفوذسنج مخروطی دینامیکی (DCP) عملکرد موافقی در ارزیابی سازه‌ای روسازی از خود نشان داده است. در ادامه پیرامون تحلیل و آنالیز نتایج بدست آمده از این دستگاه در کاربردهای عملی در کشورهای مختلف بحث خواهد شد.

#### کاربرد عملی ۱: استفاده از DCP در تعیین مقاومت لایه‌های غیر چسبنده<sup>۱</sup> روسازی

همانگونه که قبلاً اشاره گردید، دستگاه DCP وسیله‌ای ساده، ارزان، سریع و کارآمد برای بررسی وضعیت سازه‌ای لایه‌های غیر چسبنده سنگدانه‌ای مانند بستر، زیراساس و اساس در روسازی محسوب می‌شود. ضخامت لایه‌ها و مقاومت آنها (CBR)، دو پارامتر مهم بدست آمده از آزمایش DCP به شمار می‌رود.

در این کاربرد که در واقع اصلی‌ترین استفاده از داده‌های بدست آمده از DCP است، پس از انجام آزمایش و تکمیل فرم‌های مخصوص که در بخش‌های قبل معرفی گردید، دو سری از اعداد شامل؛ تعداد ضربات وارده و عمق‌های نفوذ تجمعی، بدست می‌آید. در این مرحله به سادگی می‌توان به روش دستی و یا در محیط نرم‌افزار ساده‌ای مانند اکسل نمودار نفوذ (mm) بر حسب تعداد ضربات را مطابق شکل ۶۴، ترسیم نمود [۶۸].



شکل ۶۴- نمودار نفوذ بر حسب تعداد ضربات در آزمایش DCP

1. Unbound

همانگونه که در شکل مشخص است می‌توان به صورت تقریبی شکستگی‌های ایجاد شده در روند نمودار را به عنوان فصل مشترک لایه‌های مختلف در نظر گرفت. همچنین با برازش خطوط راست در هر قطعه جدا شده و تعیین شیب خط، پارامتر شاخص نفوذ (PR) برحسب میلیمتر بر ضربه به دست خواهد آمد. در نمودار شکل ۵۷، تفکیک لایه‌ها و شیب هر قطعه محاسبه شده است.

برای بدست آوردن CBR لایه‌ها می‌توان از رابطه تجربی کلین و داده‌های میدانی جدول ۳۸، استفاده نمود.

$$\text{Log CBR} = 2.628 - 1.273 \text{ Log (PR)}$$

جدول ۳۸- مثالی از داده‌های عملی در یک نقطه در آزمایش DCP

| نام محل<br>آزمایش | km   | لایه‌ها | (mm)<br>از عمق | (mm)<br>تا عمق | عمق<br>لایه | ضربات<br>شمارش<br>شده | تعداد<br>ضربات | PR<br>(mm/bolw) | لگاریتم<br>CBR<br>لایه‌ها | CBR<br>لایه‌ها |
|-------------------|------|---------|----------------|----------------|-------------|-----------------------|----------------|-----------------|---------------------------|----------------|
| -                 | ۴۲/۱ | ۱       | ۰              | ۱۸۰            | ۱۸۰         | ۹                     | ۹              | ۲۰              | ۰/۹۷                      | ۹/۴            |
|                   |      | ۲       | ۱۸۰            | ۳۷۰            | ۱۹۰         | ۱۶                    | ۷              | ۲۷/۱۴           | ۰/۸۰                      | ۶/۴            |
|                   |      | ۳       | ۳۷۰            | ۱۰۰۰           | ۶۳۰         | ۲۸                    | ۱۲             | ۵۲/۵۰           | ۰/۴۴                      | ۲/۷            |

بدین ترتیب CBR لایه‌ها و ضخامت آنها با محاسبات ساده بدست خواهد آمد [۶۸].

#### کاربرد عملی ۲: تحلیل و طراحی راه‌های با حجم تردد کم با استفاده از نرم‌افزار تحلیلی UK DCP در انگلستان

راه‌های با حجم تردد کم در کشورهای در حال توسعه، اغلب به دلیل مصالح نامناسب، اجرای ضعیف یا در بیشتر اوقات ترکیبی از این دلایل، به سرعت رو به زوال می‌گذارند. مؤثرترین راه برای حل این قبیل مشکلات، تعمیر روسازی در فواصل از راه یا حتی اقدامات اصلاحی و تعمیری در چند نقطه از راه می‌باشد [۶۸].

طراحی این تعمیرات و اصلاحات، می‌تواند براساس داده‌های بدست آمده از روسازی راه توسط تکنیک‌های ساده و ارزان و کارآمدی مانند DCP استوار باشد. در کاربرد پیش‌رو براساس داده‌های بدست آمده از دستگاه DCP و به کمک نرم‌افزار ابداعی آزمایشگاه تحقیقاتی حمل و نقل انگلستان (TRL<sup>۱</sup>)، کاربردی عملی از این دستگاه تشریح می‌گردد [۶۸].

در سال ۲۰۰۵ میلادی، اداره تحقیقات بین‌المللی انگلستان (DFID<sup>۲</sup>)، آزمایشگاه TRL را موظف نمود تا روش طراحی ساده‌ای براساس داده‌های دستگاه DCP با کمک یک نسخه نرم‌افزاری کارآمد ارائه دهد [۶۸].

در ارتباط با معرفی این نرم‌افزار و ویژگی‌های کلی آن در بخش ساختار نرم‌افزاری دستگاه DCP، مختصری بحث شده است. در این قسمت از ذکر جزئیات این نرم‌افزار و بخش‌های مختلف آن صرف نظر شده و صرفاً مرور گذرایی بر نحوه تحلیل داده‌ها و روش آن و همچنین خروجی‌های آن انجام می‌شود.

پس از آنکه فرم برداشت اطلاعات در محل انجام آزمایش تکمیل گردید، تحلیل داده‌ها به کمک نرم‌افزار فوق‌الذکر آغاز

1. UK Transport Research Laboratory

2. Department for International Development

می‌شود. در پنجره ورود داده‌های نرم‌افزار مطابق شکل ۶۵، برای یک محل مشخص، نتایج ضربات و عمق نفوذ وارد می‌گردد.

**Penetration data: Test 1**

Site details summary:

Test number: 1 Chainage (km): 0.200

Location: Carriageway Lane number:

Zero error (mm): 33 Surface removed (mm): 40

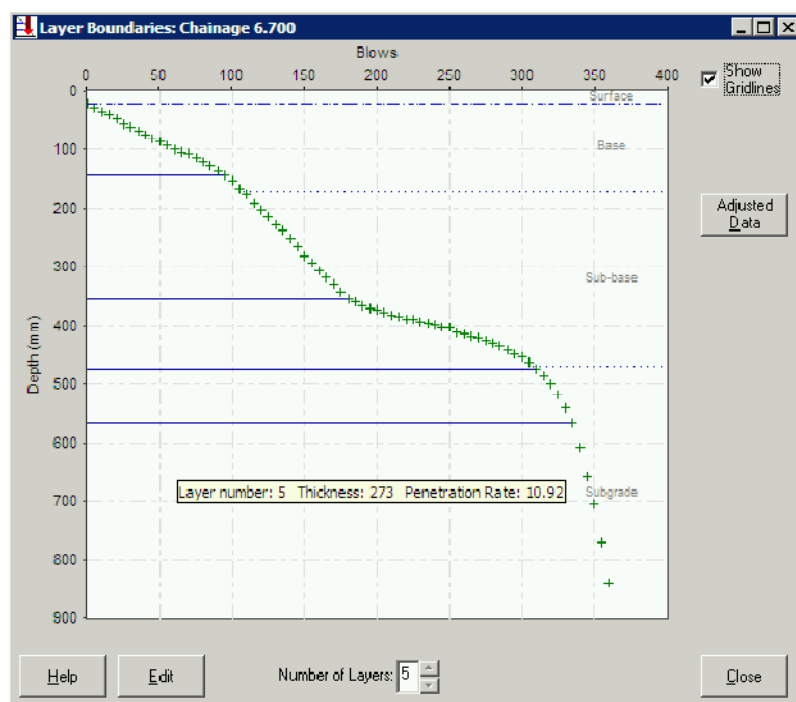
Penetration data:

| Point number | Blows | Penetration depth (mm) | Comments            |
|--------------|-------|------------------------|---------------------|
| 19           | 5     | 407                    |                     |
| 20           | 5     | 450                    |                     |
| 21           | 0     | 549                    | Layer Drilled       |
| 22           | 5     | 591                    |                     |
| 23           | 5     | 632                    |                     |
| 24           | 5     | 680                    |                     |
| 25           | 0     | 280                    | Extension Rod Added |
| 26           | 5     | 336                    |                     |

Buttons: Insert, Delete, Paste, Help, Test Details, OK, Cancel

شکل ۶۵- پنجره ورود داده‌های نفوذ و تعداد ضربات در نرم‌افزار UK DCP

در شکل ۶۶، پس از تحلیل داده‌ها توسط نرم‌افزار، نمودار عمق نفوذ بر حسب ضربات اعمالی ترسیم می‌گردد. در این حالت تعداد لایه‌ها، ضخامت آنها و شاخص نفوذ (PR) ارائه می‌شود.



شکل ۶۶- نمودار نفوذ بر حسب ضربات در نرم‌افزار UK DCP

• محاسبه CBR

مقاومت هر یک از لایه‌ها، به صورت خودکار، با تبدیل شاخص نفوذ  $\left(\frac{mm}{blow}\right)$  به CBR، محاسبه می‌شود. روابط مختلفی بین PR و CBR برای دو نوع مختلف مخروط ۳۰ درجه و ۶۰ درجه توسط محققین مختلف (که قبلاً هم به آنها اشاره گردید) ارائه شده است.

• محاسبه SN (عدد سازه‌ای روسازی)

مفهوم عدد سازه‌ای (SN) برای اولین بار توسط آشتو در تحقیقات آنها به عنوان عددی که بیانگر مقاومت و دوام یک روسازی کامل انعطاف‌پذیر است، معرفی گردید. یک ضریب مقاومت (a) با کمک روابط جدول ۳۹، از روی CBR خاک برای هر لایه قابل محاسبه می‌باشد. عدد سازه‌ای با ضرب ضریب a در ضخامت لایه و سپس جمع این حاصل‌ضرب‌ها بدست می‌آید.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \dots$$

جدول ۳۹- روابط ضریب سازه‌ای لایه‌های روسازی

| روابط                                                      |         | لایه روسازی |
|------------------------------------------------------------|---------|-------------|
| $a = 0.0001[29.14(CBR) - 0.1977(CBR)^2 + 0.00045(CBR)^3]$  |         | اساس        |
| $a = 0.00016[29.14(CBR) - 0.1977(CBR)^2 + 0.00045(CBR)^3]$ | CBR>70% | اساس سیمانی |
| $a = 0$                                                    | CBR<70% |             |
| $a = 0.184 \log_{10} CBR - 0.0444(\log_{10} CBR)^2 - 0.75$ |         | زیراساس     |

به مرور زمان مفهوم SN قدری گسترش یافت. SN اصلی براساس لایه‌های زیراساس، اساس و رویه محاسبه می‌گردد. عدد سازه‌ای اصلاح شده ( $SNC^1$ )، پس از این، برای دربرداشتن اثر بستر راه معرفی شد. اما از آن جهت که سهم بستر در SNC مستقل از ضخامت آن است، با تعریف مصالح بستر به عنوان زیراساس باعث افزایش SNC می‌گردد. لذا عدد سازه‌ای تعدیل شده ( $SNP^2$ ) برای تعدیل سهم زیراساس و بستر معرفی شد. در شکل ۶۷، صفحه‌ای از نرم‌افزار UKDCP مشاهده می‌شود که مقادیر SN و SNC و SNP در آن محاسبه شده است [۶۸].

**SN Calculation: Chainage 6.700**

Upper layers

| No. | Position | Type                 | Thickness (mm) | Depth (mm) | Strength coefficient |
|-----|----------|----------------------|----------------|------------|----------------------|
| 1   | Surface  | Thin bituminous seal | 20             | 20         | 0.15                 |

Test layers

| No. | CBR (%)   | Thickness (mm) | Depth (mm) | Position | Strength coeff. |
|-----|-----------|----------------|------------|----------|-----------------|
| 1   | 199 (150) | 125            | 145        | Base     | 0.14            |
| 2   | 66        | 189            | 334        | Sub-Base | 0.11            |
| 3   | 309 (150) | 132            | 466        | Sub-Base | 0.12            |
| 4   | 69 (50)   | 81             | 547        | Subgrade |                 |
| 5   | 24        | 273            | 820        | Subgrade |                 |

Pavement Strength

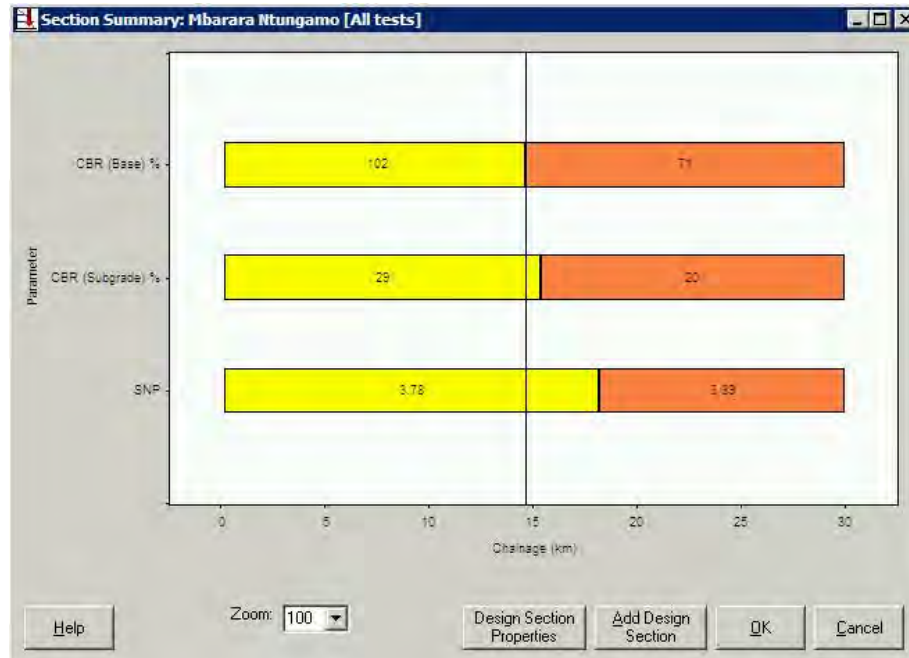
| Layer    | Layer contributions |      |      |
|----------|---------------------|------|------|
|          | SN                  | SNC  | SNP  |
| Surface  | 0.12                | 0.12 | 0.12 |
| Base     | 0.71                | 0.71 | 0.71 |
| Sub-Base | 1.44                | 1.44 | 1.42 |
| Subgrade |                     | 1.80 | 1.44 |
| Pavement | 2.27                | 4.07 | 3.69 |

Help Edit Layer Boundaries CBR Chart Close

شکل ۶۷- پنجره‌ای از نرم‌افزار UK DCP برای محاسبه SN

• تعیین بخش‌های یکنواخت راه

این نرم‌افزار قادر است براساس نتایج بدست آمده از پارامترهای ضخامت لایه‌ها، مقاومت آنها و عدد سازه‌ای، بخش‌هایی که دارای مشابهت هستند به عنوان بخش‌های یکنواخت معرفی نماید. سپس از بخش بندی براساس هر یک از این پارامترها، نرم‌افزار قادر است یک نمودار میله‌ای برای هر کدام ترسیم نماید (مطابق شکل ۶۸)، بدین ترتیب کاربر می‌تواند به صورت دستی مرزهای بخش‌های مختلف را تعیین نموده و آنها را از یکدیگر تفکیک نماید. این دسته‌بندی بخش‌های یکنواخت، در طراحی روکش و نیز تشخیص عملکرد روسازی به کار خواهد آمد [۶۸].



شکل ۶۸- نمودار میله‌ای بخش‌های یکنواخت در نرم‌افزار UK DCP

کاربرد عملی ۳: استفاده از DCP به عنوان ابزار کنترل کیفیت<sup>۱</sup> (QC)

دستگاه DCP دستی<sup>۲</sup> به عنوان ابزاری مفید برای کنترل کیفیت اجرایی لایه‌های بستر، زیراساس و اساس در پروژه‌های راهسازی می‌تواند تلقی شود.

این دستگاه با توجه به سادگی، عدم نیاز به کاربر آموزش دیده و تعمیر و نگهداری آسان، کارایی بالایی در بین پیمانکاران و ناظرین راهسازی برای این منظور خواهد داشت.

در این کار لازم است الگویی برای میزان نفوذ در ضربات معین برای پذیرش تراکم و دانه‌بندی لایه‌های غیرچسبنده خاکی، تدوین و در پروژه ابلاغ گردد[۶۸].

1. Quality Control  
2. Manual DCP

## ۸-۱-۴-۲- بررسی مزایا و معایب آزمایش DCP

در جدول ۴۰، مزایا و معایب آزمایش DCP به صورت جداگانه آورده شده است.

جدول ۴۰- مقایسه مزایا و معایب دستگاه DCP

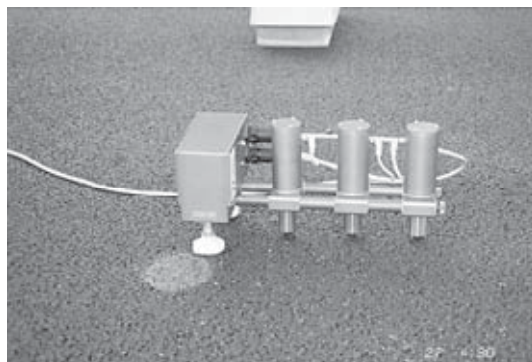
| DCP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مزایا                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• سرعت بالا در استفاده از این ابزار</li> <li>• انعطاف‌پذیری و سهولت استفاده از این ابزار در مناطق با دسترسی دشوار</li> <li>• اقتصادی بودن این ابزار از نظر ساخت اولیه و همچنین کاربرد آن</li> <li>• پیوسته بودن نتایج آن و امکان شناسایی لایه‌های ضعیف با ضخامت کم</li> <li>• عدم نیاز به حفر گمانه جهت انجام آزمایش در حالت کلی</li> <li>• کاهش نیروی انسانی و عدم نیاز به افراد با تخصص بالا</li> <li>• عدم نیاز به تجهیزات وابسته و کمکی</li> <li>• عدم نیاز به نرم‌افزارهای تحلیل گر پشتیبان</li> <li>• قابلیت تکرارپذیری بالا</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• مخرب بودن آزمایش</li> <li>• عدم توانایی در نفوذ در مصالح سنگدانه‌ای درشت دانه</li> <li>• عدم توانایی در نفوذ در مصالح تثبیت شده با درصد بالایی از سیمان</li> <li>• عدم توانایی در نفوذ در مصالح در لایه‌های بسیار متراکم شده</li> <li>• عدم توانایی در نفوذ در مصالح لایه‌های ضخیم</li> <li>• با وجود اینکه دستگاه DCP قادر است در لایه‌های آسفالتی نازک مانند پوشش سطحی رویه نفوذ کند، ولی داده‌های نفوذ بدست آمده نمی‌توانند در محاسبه مقاومت این لایه‌ها استفاده شده و ضریب مقاومت می‌بایست تخمین زده شده و به صورت دستی در محاسبات وارد گردد.</li> <li>• در صورت وجود مصالح و یا اجسام سخت در لایه‌های روسازی، نوک مخروطی دستگاه هنگام برخورد با آنها به شدت آسیب‌پذیر خواهد بود.</li> <li>• دستگاه DCP قابلیت نفوذ در لایه‌های ضخیم آسفالتی رویه را نداشته و این لایه‌ها می‌بایست با کمک گمانه‌زنی و حفر سوراخ برداشته شوند.</li> </ul> |

۲-۴-۲- آزمایش آلتراسونیک - PSPA<sup>۱</sup> و DSPA<sup>۲</sup>

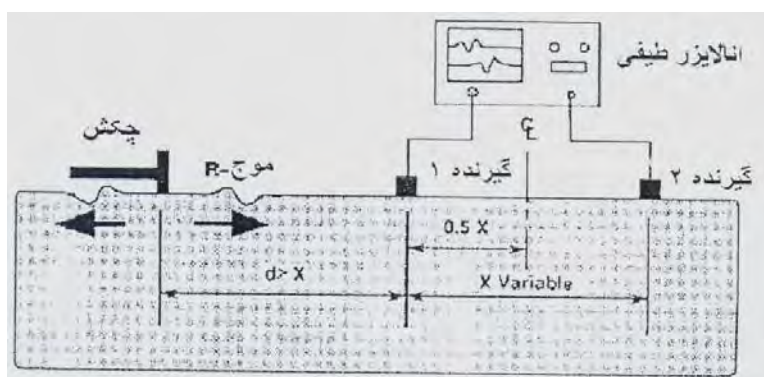
دستگاه PSPA برای لایه مخلوط آسفالتی گرم و دستگاه DSPA برای لایه‌های سنگدانه‌ای غیرچسبنده و خاک‌ها کاربرد دارد. هر دو دستگاه مطابق شکل ۶۹، از یک بازوی ثابت که بر روی آن منبع تولید موج آلتراسونیک و دریافت کننده‌ها قرار گرفته‌اند، تشکیل می‌یابد. منبع تولید موج از یک چکش که در فواصل زمانی مشخص و معین بر روی روسازی ضربه می‌زند، تشکیل می‌گردد. موج تولید شده توسط این چکش تحت عنوان امواج رایلی<sup>۳</sup> شناخته شده و در مسیر انتشار خود توسط

1. Portable Seismic Pavement Analyzer  
2. Dirt Seismic Pavement Analyzer  
3. Rayleigh

شتاب‌سنج‌هایی از جنس کوارتز- کریستال<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده و مقدار شارژ الکتریکی ایجاد شده در اثر این نوسان در سیستم جمع‌آوری داده‌ها ثبت می‌گردد. یک آنالیزور طیفی مطابق شکل شماتیک ۷۰، شارژ الکتریکی را به دامنه فرکانسی تبدیل می‌نماید. در این حالت یک سنسور اندازه‌گیری دما نیز همراه یک لپ‌تاپ برای تحلیل نتایج، به کار گرفته می‌شود [۲۹].



شکل ۶۹- دستگاه PSPA



شکل ۷۰- شکل شماتیک عملکرد دستگاه‌های آلتراسونیک

دستگاه PSPA قادر است برای بدست آوردن ضریب الاستیسیته در محل و تعیین ضخامت لایه‌ها در سیستم‌های چندلایه روسازی انعطاف‌پذیر، در لحظه انجام تراکم و یا پس از چند روز (هنگام سرد بودن روسازی) به کار گرفته شود. دستگاه می‌تواند در دماهای مختلف عمل اندازه‌گیری را انجام دهد. سرعت برداشت داده در این دستگاه‌ها، امکان استفاده از آنها برای کنترل کیفیت اجرای روسازی را فراهم می‌آورد. سیستم تفسیر داده‌ها که همراه PSPA و DSPA می‌باشد، مدول میانگین یانگ را براساس داده‌های دریافت کننده تعیین می‌نماید.

نکته اجرایی بسیار مهم هنگام استفاده از این دستگاه‌ها این است که دریافت کننده‌ها می‌بایست در حین انجام آزمایش در تماس کامل با سطح روسازی باشند.

در هر نقطه می‌بایست آزمایش بین ۳ تا ۵ بار تکرار شود که هر تکرار بین ۱۰ تا ۲۰ ثانیه زمان نیاز خواهد داشت، که در کل حدود ۱ دقیقه برای هر نقطه آزمایش نیاز به زمان خواهد بود. یکی از مزایای این دستگاه‌ها روند کالیبراسیون آسان آنها است که برای این منظور از مصالح معین به عنوان مرجع استفاده می‌شود [۲۹].

1. Quratz-Crystal

## ۲-۵- آزمایش‌های تعیین ناهمواری روسازی

### ۲-۵-۱- مقدمه

ناهمواری یک شاخص با اهمیت در رابطه با راحتی سواری و ایمنی راه است. برای راننده اتومبیل، رانندگی در راه‌های ناهموار به معنی فقدان راحتی و کاهش سرعت، خرابی احتمالی وسیله نقلیه و افزایش هزینه‌های عملیات تعمیر و نگهداری است. بنابراین ناهمواری یک نوع شاخص وضعیت است که باید به هنگام ارزیابی روسازی راه‌های اصلی به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد. در عصر حاضر، در بسیاری از کشورها از ناهمواری‌های اندازه‌گیری شده در راه‌ها برای تعمیر و نگهداری روسازی‌ها، چه در سطح شبکه و چه در سطح پروژه، استفاده فراوان می‌شود. استفاده از این شاخص در سطح شبکه به منظور تقسیم شبکه به زیر بخش‌های یکنواخت، تعیین حدود رواداری وضعیت قابل قبول و تعیین اولویت‌های ترمیم و نگهداری صورت می‌گیرد. برخی از سازمان‌های متولی اداره راه‌ها نشانه وضعیت ناهمواری (IRI) را با سایر نشانه‌های وضعیت، نظیر وضعیت خرابی (PCI)، ترکیب می‌کنند تا نشانه مرکبی بدست آید. در عین حال، تشخیص این نکته اهمیت دارد که اگر چه ناهمواری معیاری برای راحتی استفاده کنندگان و نشانه‌ای برای ایمنی در رانندگی است لیکن، پارامتر بخودی خود برای تعیین میزان ترمیم و نگهداری‌ها کافی نمی‌باشد. علاوه بر این، ممکن است شاخص ناهمواری مناسب‌ترین زمانبندی را از نظر اقتصادی برای اجرای ترمیم اساسی بدست ندهد. برای مثال یک روسازی آسفالتی ممکن است که از لحاظ سازه‌ای دارای نقص بوده و دچار ترک‌های پوست سوسماری با شدت کم شده باشد ولی، از نظر راحتی سفر و کیفیت سواری هنوز در سطح قابل قبولی باشد. با این وجود، این روسازی باید قبل از اینکه زمان بهینه ترمیم آن سپری شود، در فهرست ارزیابی فوری و تفصیلی در سطح پروژه و ترمیم سازه‌ای قرار گیرد.

اندازه‌گیری ناهمواری‌ها در سطح پروژه، به منظور تعیین سطوح با ناهمواری بیش از حد مجاز و همچنین کنترل کیفیت روسازی در مرحله ساخت است. سطوح با ناهمواری بیش از حد مجاز را می‌توان با بررسی منحنی تغییرات نشانه ناهمواری نسبت به مسافت شناسایی نمود. کنترل کیفیت در مرحله ساخت را نیز می‌توان با تعیین حدود رواداری قابل قبول برای ناهمواری‌ها اعمال نمود. این حدود باید در رابطه با روش‌های خاص تحلیلی بکار برده شوند که در بخش ارزیابی روسازی‌ها به آنها اشاره شده است.

در حال حاضر، سازمان‌های مسئول حفظ و نگهداری روسازی راه‌ها از نشانه‌های ناهمواری متعددی برای ارزیابی روسازی‌ها استفاده می‌کنند. این نشانه‌ها یا براساس تحلیل نیمرخ طولی روسازی و یا براساس اندازه‌گیری‌های راه‌سنج استوار می‌باشند. این روش اندازه‌گیری به "سیستم اندازه‌گیری ناهمواری براساس پاسخ روسازی" موسوم است. نشانه‌های به دست آمده از سیستم نوع پاسخ، به نوع وسیله نقلیه وابسته هستند و به دلیل آنکه، ویژگی‌های وسیله نقلیه در طول زمان تغییر می‌کند، بنابراین حتی اگر مجدداً از همان وسیله نقلیه برای آزمایش استفاده شود، معمولاً همان نتایج اولیه حاصل نمی‌شود. به عبارت دیگر نتایج غیر قابل تکرار خواهند بود در حالی که، نشانه‌های حاصل از تحلیل نیمرخ طولی سطح روسازی قابل تکرار هستند.

در گذشته، نشانه‌های ناهمواری به دست آمده از نیمرخ طولی به دلیل هزینه زیاد وسایل اندازه‌گیری نیمرخ کاربرد چندانی نداشتند. امروزه، این موضوع دیگر مصداق ندارد و تعداد بیشتری از سازمانهای مسئول اداره راه‌ها در جهان به سیستم‌های اندازه‌گیری نیمرخ طولی روی آورده‌اند.

## ۲-۵-۲- تعریف پروفیل راه

پروفیل برش دوبعدی در طول یک خط فرضی از سطح راه می‌باشد. پروفیل‌های گرفته شده در امتداد خط جانبی نشان‌دهنده شیب جانبی و همچنین خرابی شیار جای چرخ<sup>۱</sup> و دیگر خرابی‌ها می‌باشد. پروفیل طولی، شیب طولی راه، ناهمواری و بافت راه نشان می‌دهد. هر پروفیلی می‌تواند در طول خط‌های فرضی زیادی بدست آید. اما عمدتاً پروفیل‌های طولی در امتداد دو خط در مسیر حرکت اندازه‌گیری می‌شوند، که آن مسیر عبور چرخ‌ها می‌باشد. برای بدست آوردن جزییات بیشتر می‌توان در امتداد خطوط بیشتری پروفیل را اندازه‌گیری نمود [۷۱].

عرض خط فرضی اخذ شده پروفیل استاندارد نیست. این عرض معمولاً توسط نوع دستگاه اندازه‌گیری استفاده شده، تعیین می‌شود. به عنوان مثال، اندازه‌گیری انجام شده توسط سیستم‌های لیزر برشی از سطح روسازی با عرض در حدود چند میلیمتر را می‌پوشاند، اما اندازه‌گیری انجام شده توسط سیستم ماورای صوت ممکن است عرضی در حدود چند سانتیمتر را دربرگیرد. تاثیر عرض پروفیل تاکنون ناشناخته مانده است. به هر حال تکرار اندازه‌گیری دقیق پروفیل اگر عرض خط فرضی بسیار نازک باشد، بسیار مشکل‌تر است [۷۱].

## ۲-۵-۳- کاربردهای پروفیل راه

معمولاً کاربردهای پروفیل را می‌توان به چهار گروه عمده زیر تفکیک نمود [۷۱]:

- ۱- برای کنترل شبکه راه‌ها برای سامانه مدیریت روسازی،
  - ۲- برای ارزیابی کیفیت مقاطع تازه ساخته شده و یا تعمیر شده،
  - ۳- برای تشخیص دادن شرایط یک مقطع بخصوص و ارایه راهکارهای مناسب، و
  - ۴- برای مطالعه شرایط یک مقطع مشخص برای کارهای تحقیقاتی.
- اکثر روش‌های تفسیر اطلاعات پروفیل به صورت کاهش دادن آن اطلاعات به شاخص‌های ناهمواری می‌باشد. برای بدست آوردن هر نوع اطلاعاتی از یک پروفیل اندازه‌گیری شده، دو مورد ضروری می‌باشد:
- ۱- پروفیل‌سنج‌ها بایستی قادر به جمع‌آوری اطلاعات مناسب ارایه شده در پروفیل واقعی باشند.
  - ۲- نرم‌افزار کامپیوتری بایستی برای پردازش مقادیر اندازه‌گیری شده جهت استخراج اطلاعات موردنظر از قبیل شاخص‌های خلاصه شده، وجود داشته باشد.

آنالیزهای انجام شده بروی اطلاعات پروفیل بایستی با توجه به استفاده آن جهت‌دهی شود. در حقیقت اگر اعداد استخراجی دقیق و تکرارپذیر باشد، آنرا کارآمد نمی‌کند؛ بلکه یک آنالیز مفید آن است که از طریق مطالعه، عددی را

استخراج نماید که وابسته به مشخصات خاصی از خصوصیات راه است.

## ۲-۵-۴- پروفیل‌سنج‌ها

پروفیل‌سنج‌ها ابزاری‌هایی هستند که برای خط فرضی روی زمین یک سری اعداد نسبت به پروفیل واقعی ایجاد می‌نمایند. اعداد بدست آمده از بعضی از پروفیل‌سنج‌ها الزاماً برابر با تراز واقعی نیست. یک پروفیل‌سنج همیشه پروفیل واقعی را دقیقاً اندازه‌گیری نمی‌کند [۷۰]. اما به هر حال نسبت بین اعداد بدست آمده از پروفیل‌سنج و پروفیل واقعی بایستی یک سری مشخصات را تامین نمایند. پروفیل‌سنج‌ها عموماً یا ترکیب سه جزء ذیل کار می‌کنند:

۱- یک تراز مبنا، ۲- یک ارتفاع وابسته به تراز مبنا، ۳- مسافت طولی

این سه جزء به طرق مختلف براساس طراحی پروفیل‌سنج با یکدیگر ترکیب می‌شوند. پروفیل‌سنج تنها تکنولوژی اثبات شده است که به مهندسین اجازه می‌دهد بطور مستقیم پارامترهای ناهمواری یکسانی با استفاده از تجهیزات با طراحی‌های متفاوت و ساخته شده توسط شرکت‌های گوناگون، بدست آورند [۷۱].

در گذشته معمول‌ترین روش جهت بدست آوردن اندازه پروفیل مبنا اجرای میر و دوربین بود که این روش بسیار وقت‌گیر و دشوار بود و به همین علت در فاصله نمونه‌گیری‌های خیلی کوتاه اجرا نمی‌گردید. پس از آن دستگاه‌هایی موسوم به Walk Speed Device از قبیل DipStick به جای میر و دوربین با سرعت تولید سریعتر پروفیل مبنا، ساخته شدند [۷۱].

بطور کلی انواع پروفیل‌سنج را می‌توان به چهار گروه زیر تقسیم نمود:

- استاتیک،
- بر مبناى شیب‌سنجی (سرعت کم)،
- سبک وزن، و
- با سرعت بالا.

کلیه روش‌های پروفیل‌سنج بر تولید یک رشته از اعداد وابسته به پروفیل واقعی برای یک خط فرضی روی سطح راه استوار بوده و رابطه بین پروفیل واقعی و اعداد تولید شده بوسیله پروفیل‌سنج بایستی یک سری مشخصات خاص را بر آورده کند [۷۱].

## ۲-۵-۵- پروفیل‌سنج‌های با سرعت بالا

پروفیل‌سنج‌های با سرعت بالا، بهترین، مناسب‌ترین و دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری ناهمواری در سطح شبکه می‌باشند [۷۰]. این نوع دستگاه‌ها می‌توانند انواع مختلفی از شاخص‌های ناهمواری را از روی پروفیل اندازه‌گیری شده محاسبه و ارایه نمایند. دقت این دستگاه‌ها از پروفیل‌سنج‌های استاتیک (میر و دوربین) و پروفیل‌سنج‌های مبتنی بر شیب‌سنجی (مانند DipStick) پایین‌تر می‌باشد. لذا برای اندازه‌گیری میزان دقت یک دستگاه پروفیل‌سنج با سرعت بالا از مقایسه آن با دیگر دستگاه‌ها استفاده می‌شود. به علت قیمت بالا و نداشتن دقت کافی، این دستگاه در سطح پروژه نه مناسب

بوده و نه مقرون به صرفه می‌باشد. از جمله این دستگاه می‌توان به پروفیل‌سنج سطح راه (RSP)<sup>۱</sup> و دستگاه تحلیلگر خودکار راه (ARAN)<sup>۲</sup> اشاره نمود. در ادامه به تشریح این دو دستگاه پرداخته می‌شود.

## ۲-۵-۵-۱- پروفیل‌سنج سطح راه (RSP)

دستگاه‌های محدودی در جهان برای برداشت اطلاعات ناهمواری سطح راه‌ها با سرعت بالا وجود دارند که الگوریتم مورد استفاده در این دستگاه‌ها برای تفسیر نتایج ناهمواری برداشت شده و تعیین IRI تقریباً مشابه می‌باشد اما به لحاظ سخت‌افزاری و فرایندهای برداشت ناهمواری سطح راه اختلافات مشخصی با هم دارند. نحوه برداشت اطلاعات و کالیبراسیون این دستگاه‌ها تابع مشخصات سخت‌افزاری آن‌ها می‌باشد [۷۱].

یکی از شرکت‌های معتبر در سطح جهان در زمینه ساخت دستگاه‌های ارزیابی غیرمخرب روسازی از جمله دستگاه‌های برداشت ناهمواری سطح راه، شرکت دایناتست دانمارک می‌باشد و یکی از مدل‌های این شرکت به نام RSP در سطح جهان شناخته شده بود و عملکرد قابل قبولی داشته است. در کشور ایران ۴ دستگاه RSP وجود دارد که با توجه به سرعت برداشت داده‌ها توسط این دستگاه‌ها، وسعت شبکه راه‌های کشور، ظرفیت این دستگاه‌ها در سال‌های آینده جوابگو خواهد بود. برداشت با دستگاه RSP ممکن است در سطح شبکه یا در سطح پروژه انجام گیرد و همچنین ممکن است این برداشت به همراه برداشت‌های دیگر مانند دستگاه FWD برداشت شرایط ظاهری یا تست‌های مخرب دیگر باشد. مسئله مهم در برداشت‌های سطح شبکه، مدیریت اطلاعات فراوان برداشت شده و کاهش زمان برداشت و حضور دستگاه در محور است. اما در سطح پروژه علاوه بر اهمیت کاهش زمان، تلاش در جهت انطباق هر چه بهتر داده‌های مختلف بر روی هم با دقت مناسب ضرورت پیدا می‌کند [۷۱].

## ۲-۵-۵-۱- معرفی دستگاه

دستگاه RSP جزو آزمایش‌های غیر مخرب روسازی راه است که قادر است اندازه‌گیری‌های مربوط به پروفیل طولی (شامل IRI<sup>۳</sup> و RN<sup>۴</sup>)، پروفیل عرضی، عمق شیار شدگی چرخ‌ها، افت شانه، بافت درشت رویه و مشخصات هندسی (شیب عرضی، انحناء و شیب طولی) را در آن واحد، به صورت پیوسته و در زمان حرکت وسیله نقلیه، تعیین کند. داخل باکس آلومینیومی که در جلوی دستگاه نصب است، می‌توان تا ۲۱ سنسور لیزری نصب نمود. هدف اصلی این سنسورها، اندازه‌گیری فاصله ارتفاعی باکس از روی رویه روسازی در نقاط مختلف، در طول باکس است. با اندازه‌گیری این فاصله، اطلاعاتی همچون ناهمواری روسازی، عمق شیارشدگی و میزان زبری سطح رویه قابل محاسبه می‌باشد. در شکل ۷۱ ماشین RSP و باکس حاوی سنسورهای آن دیده می‌شود. سنسورهای لیزری که قادر به تولید حداقل ۱۶۰۰۰ اندازه‌گیری در ثانیه می‌باشند، دامنه تغییرات تا ۲۰۰ میلی متر را با دقت ۰/۰۵ میلیمتر اندازه‌گیری می‌کنند [۶].

1. Road Surface Profiler
2. Automatic Road Analyzer
3. International Roughness Index
4. Ride Number



شکل ۷۱- دستگاه RSP

#### ۲-۵-۱-۲- اساس کار دستگاه

اندازه‌گیری پروفیل طولی براساس روش تاکوتای جنوبی انجام می‌گیرد. برای بدست آوردن جابجایی بدنه خودرو از یک شتاب‌سنج و برای اندازه‌گیری فاصله بین بدنه خودرو و روسازی از یک حسگر لیزری استفاده می‌شود. IRI براساس مشخصات بانک جهانی محاسبه می‌شود. پروفیل طولی اندازه‌گیری شده مشخصات گروه ۱ ASTM-E950 را برآورده می‌سازد [۷۱].

#### ۲-۵-۱-۳- ویژگی‌های دستگاه

- به دلیل ویژگی "توقف و حرکت"، اندازه‌گیری IRI در هر سرعتی امکان‌پذیر می‌باشد. امکان آزمایش در چهارراه‌ها، میدان‌ها و همچنین در قطعات کوتاه که رسیدن به سرعت کافی مشکل است و یا هنگامی که آزمایش در قطعه مقدماتی امکان‌پذیر نیست، میسر می‌شود.
- تراز پروفیل می‌تواند در سرعت بین ۲۲ تا ۱۱۰ کیلومتر در ساعت جمع‌آوری شود.
- نمایش گرافیکی اطلاعات پروفیل، بررسی خروجی‌ها را تسهیل می‌کند.
- نرم‌افزار پیشرفته آنالیز موقعیت می‌تواند برجستگی‌ها، فرورفتگی‌ها و یا نقاط ساییده را نشان داده و RN، PI و IRI را محاسبه نماید. از این رو برای بیان جزئیات و آنالیز گزارش ایده‌آل می‌باشد.
- به طور سریع و آسان می‌تواند به خودرو نصب و از آن جدا شود.
- دستگاه می‌تواند از طریق یا کابل اتصال استاندارد ۱۲ ولتی تغذیه شود.
- دقت بالای آن تضمین شده است (برآورده نمودن مشخصات پروفیل‌سنج گروه ۱ ASTM-E950 و خصوصیات Tex-1001-S و نیازهای گواهینامه ایالتی DOT) [۷۱].

## ۲-۵-۵-۱-۴- ساختار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری

دستگاه RSP به طور کلی از یک تیر که در جلوی خودروی مخصوص نصب می‌شود، تشکیل یافته است. این تیر مطابق شکل ۷۲، از یک ناحیه اصلی و دو بازوی کناری متشکل می‌باشد.



شکل ۷۲- ساختار دستگاه RSP

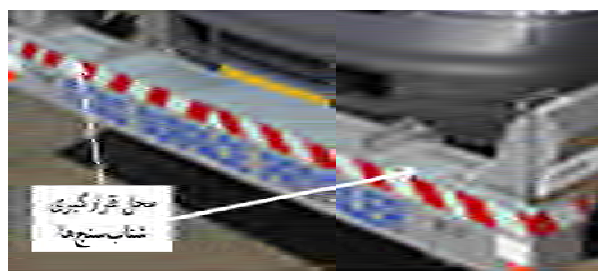
ابزاری که برای اندازه‌گیری و ثبت مسافت طی شده در دستگاه RSP از آن استفاده می‌شود،<sup>۱</sup> DMI نام دارد. این ابزار با اتصال به چرخ خودرو (مطابق شکل ۷۳) مسافت طی شده را اندازه‌گیری می‌نماید.



شکل ۷۳- دستگاه سنجش مسافت

در داخل تیر دستگاه (مطابق شکل ۷۴)، دو عدد شتاب‌سنج نصب شده که وظیفه اندازه‌گیری فاصله تیر تا سطح زمین را بر عهده دارند. سیگنال شتاب‌سنج به فواصل زمانی ثابت (که بوسیله ساعت کامپیوتر کنترل می‌شود) ارسال و نمونه‌های برداشت شده به روش انتگرال‌گیری عددی مضاعف، ارتفاع مطلق وسیله نقلیه را در هر فاصله زمانی محاسبه و به هنگام می‌کند. در این روش برای محاسبه ارتفاع مطلق وسیله نقلیه، اندازه‌گیری سرعت حرکت ضرورتی ندارد [۷۰].

1. Distance Measuring Instrument



شکل ۷۴- محل قرارگیری شتاب‌سنج‌ها در دستگاه RSP

دستگاه RSP بسته به مدل آن ممکن است ۲ تا ۲۱ عدد لیزر داشته باشد که در تمامی این مدل‌ها امکان تعیین IRI وجود دارد. این لیزرها در داخل باکس تیر اصلی قرار داشته و وظیفه تعیین فاصله دقیق تا سطح روسازی برای محاسبه شیارشدگی، تهیه پروفیل ناهمواری و همچنین بافت سطحی روسازی را برعهده می‌باشد. در دستگاه RSP از ابزار دیگری تحت عنوان حسگر حرکات اینرسی (IMS<sup>۱</sup>) استفاده می‌شود که وظیفه محاسبه شیب طولی و عرضی را برعهده دارد. فرایند کالیبراسیون تمام این ابزارها در بخش‌های بعدی آورده شده است.

## ۲-۵-۵-۲- تحلیل‌گر خودکار راه (ARAN)

### ۲-۵-۵-۱- معرفی دستگاه

یکی از فعالیت‌های اساسی هر اداره راه، بررسی دوره‌ای شبکه راه خود در حالتی ایمن و بدون مزاحمت ترافیک می‌باشد. در این راستا دستگاه تحلیل‌گر خودکار راه (ARAN) به عنوان یک ابزار فوق العاده جمع آوری داده، توسط شرکت کانادایی RoadWare معرفی شده است. این شرکت در سال ۱۹۶۹ میلادی تاسیس گردید و با ابداع دستگاه ARAN در اواسط دهه ۸۰ میلادی، نقش مهمی را در سامانه مدیریت روسازی (PMS<sup>۲</sup>) ایفا نمود (شکل ۷۵). این دستگاه با برداشت مشخصات مختلف روسازی در سرعت‌های ۴۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، شناسایی و کمی کردن و در نهایت پردازش آن‌ها، ورودی مورد نیاز سامانه‌های مدیریت روسازی را تامین می‌کند. سیستم ARAN از یک ون مجهز به وسایل مختلف اندازه‌گیری اطلاعات و واحد دفتری پردازش داده‌ها و تصاویر ویدئویی تشکیل شده است. با استفاده از دستگاه آران می‌توان پروفیل راه را برای اندازه‌گیری ناهمواری بدست آورد.

1. Inertial Motion Sensor  
2. Pavement Management System



شکل ۷۵- دستگاه آران

#### ۲-۵-۵-۲- تجهیزات مختلف دستگاه آران

برخی از مهمترین تجهیزات سیستم ARAN عبارتند از:

- WiseCrax: این سامانه قابلیت برداشت و تحلیل ترک‌های بسیار کوچک (تا حد ۱ میلیمتر) را دارد. این سیستم به وسیله دوربین‌هایی که در قسمت عقب ARAN نصب شده است (شکل ۷۶)، اقدام به گرفتن عکس‌هایی با کیفیت بسیار بالا از ترک‌های سطح راه کرده و نوع، شدت، گستردگی و مکان ترک‌ها را ارایه می‌دهد. این سیستم همچنین قادر است روسازی را از لحاظ ناهمواری، بافت سطحی و شیارشدگی مورد ارزیابی قرار دهد.



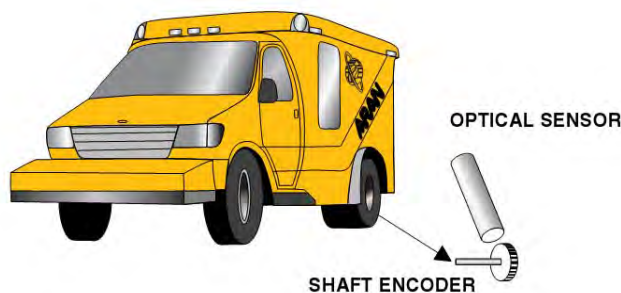
شکل ۷۶- نمایی از دوربین‌های نصب شده در قسمت عقب ون

- Video Pavement: این سامانه برای گرفتن عکس‌هایی با کیفیت مناسب از وضعیت روسازی طراحی شده است. این عکس‌ها در دفتر بوسیله فن‌آوری پردازش تصویر ( $IP^1$ ) تحلیل شده و داده‌های مورد نظر از آن استخراج می‌شود. تصاویر تحلیل شده برای تعیین شاخص وضعیت روسازی ( $PCR^2$ )، پیش‌بینی روند اضمحلال روسازی و همچنین پیشنهاد برای تعمیر و نگهداری بخش‌های مختلف روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- DMI: این وسیله با نصب شدن بر روی یکی از چرخ‌های عقب وسیله، مسافت طی شده را با دقت بالایی بدست

1. Image Processing

2. Pavement Condition Rating

می‌دهد (شکل ۷۷). DMI همچنین تغییرات سرعت وسیله را اندازه می‌گیرد. این تغییرات به همراه داده‌های زیرسامانه‌های ژيروسکوپ و GPS، در تعیین موقعیت دقیق وسیله در فضای گرافیکی استفاده می‌شود.



شکل ۷۷- سامانه DMI در دستگاه آران

- Laser XVP: یکی از توانایی‌های دستگاه آران، قابلیت اندازه‌گیری پروفیل عرضی راه است. این قابلیت بوسیله دو سری لیزر که در عقب دستگاه نصب شده است، حاصل می‌شود (شکل ۷۸). با داشتن تغییرات پروفیل عرضی در کل طول راه، می‌توان میزان شیارشدگی راه، به عنوان مهمترین خرابی سازه‌ای روسازی، بدست آورد.



شکل ۷۸- سامانه لیزری در قسمت عقب دستگاه برای تعیین پروفیل عرضی راه

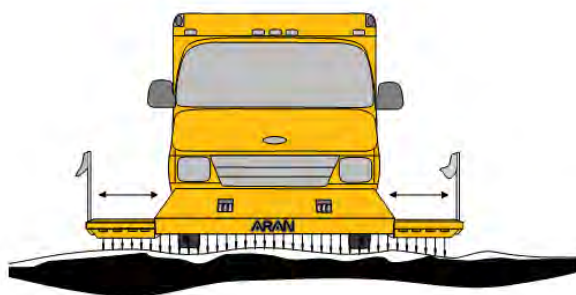
- Laser SDP: به کمک این لیزرها، که در قسمت جلویی دستگاه نصب می‌شود (شکل ۷۹)، پروفیل طولی مسیر و میزان شاخص ناهمواری بین‌المللی<sup>۱</sup> راه قابل حصول می‌باشد.

1. International Roughness Index



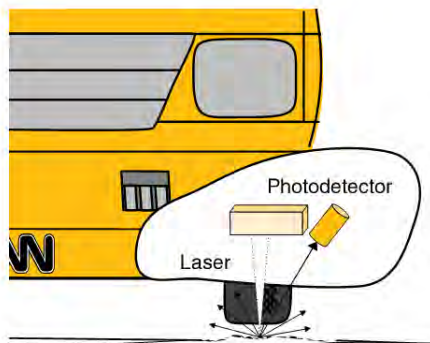
شکل ۷۹- سامانه لیرزی در قسمت جلوی دستگاه برای تعیین پروفیل طولی راه

- Smart Rut Bar: علاوه بر سامانه Laser XVP که در تعیین پروفیل عرضی مسیر و میزان شیارشدگی بکار می‌رود، دستگاه Smart Rut Bar نیز، که در قسمت جلویی دستگاه نصب شده است (شکل ۸۰)، به کمک حسگرهای فرستنده امواج مافوق صوت می‌تواند پروفیل عرضی مسیر را اندازه‌گیری نماید.



شکل ۸۰- سامانه Rut Bar در قسمت جلوی دستگاه برای اندازه‌گیری شیارشدگی

- Smart Texture: داده‌های بافت روسازی از جمله مهمترین داده‌ها در اندازه‌گیری پتانسیل زهکشی و مقاومت در برابر لغزندگی روسازی است. زیرسامانه Smart Texture به وسیله لیزرهای مخصوص عمق متوسط پروفیل<sup>۱</sup> را محاسبه و درشت بافت<sup>۲</sup> روسازی را اندازه‌گیری می‌کند (مطابق شکل ۸۱).



شکل ۸۱- سامانه Smart Texture در دستگاه آران

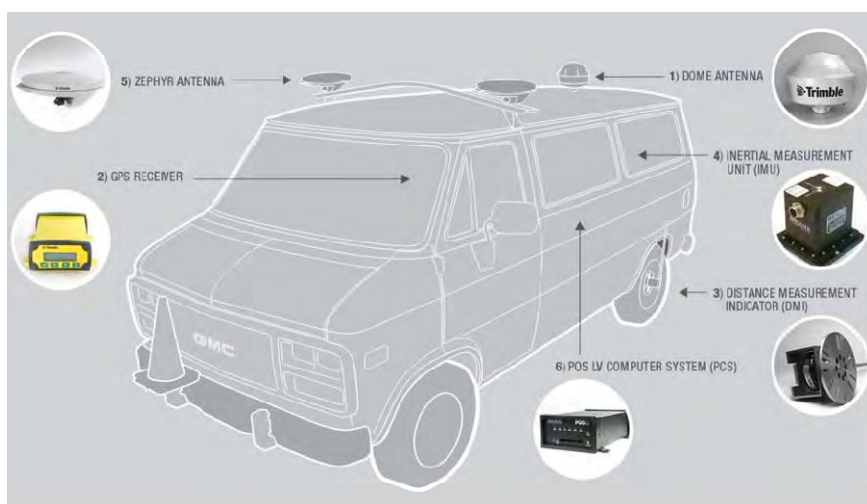
1. Mean Profile Depth  
2. Macrotexture

- $POS LV^1$ : سامانه‌ای است که بوسیله حرکات چرخشی وسیله نقلیه حول سه محور خود، موقعیت آن را به طور دقیق حاصل می‌کند (شکل ۸۲). این سامانه در صورت عدم وجود داده های  $GPS^2$  با دقت بالایی عمل می‌نماید.



شکل ۸۲- سامانه POS LV در دستگاه آران

سامانه POS LV یک سیستم کمک ناوبری مدرن بوده که میزان دقیق چرخش های دستگاه را حول محورهای خود، سرعت و اطلاعات مکانی را اندازه‌گیری کرده و موقعیت مکانی دستگاه را گزارش می‌کند. از این رو این سیستم به عنوان پیشرفته‌ترین سامانه هندسی دستگاه ARAN به حساب می‌آید. سامانه POS LV به منظور فعالیت در سختی شرایط GPS، که در مناطق شهری بروز می‌کند، طراحی شده است. در شکل ۸۳ و جدول ۴۱ ساختار عملکرد و قسمت‌های مختلف این سامانه نشان داده شده است.



شکل ۸۳- بخش مختلف سامانه POS LV

1. Position and Orientation for Land Vehicle  
2. Global Positioning System

با این خروجی‌ها و همراهی با سایر وسایل سنجش مذکور می‌توان از دقت مکان‌یابی، حتی در صورت عدم وجود داده‌های GPS، نیز مطمئن بود.

جدول ۴۱- بخش‌های مختلف سامانه POS LV

| بخش‌های مختلف سامانه POS LV                 | توضیح                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | تصویر                                                                               |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| IMU<br>Inertial Measurement<br>(Unit)       | این واحد با اندازه‌گیری واقعی حرکت دستگاه آران در هر سه جهت، خروجی پیوسته‌ای از اطلاعات مکانی و جهتی دستگاه حاصل می‌کند. این دستگاه با استفاده از سه شتاب‌سنج و سه ژيروسکوپ، شتاب‌ها و سرعت‌های زاویه‌ای دستگاه را اندازه‌گیری می‌کند. این متغیرها در محاسبه تمامی پارامترهای حرکتی دستگاه شامل مکان، سرعت، شتاب، جهت‌گیری و نرخ‌های چرخش بکار می‌رود.                                                |    |
| PCS<br>(POS Computer System)                | سامانه PCS یک واحد پردازشگر قوی است که داده‌های خام GPS را پردازش و مستقیماً وارد سیستم POS LV می‌نماید تا بوسیله آن اطلاعات مکانی دقیق محاسبه شود. این روند در حضور امواج ضعیف دریافتی توسط GPS و یا عدم حضور آن‌ها نیز انجام می‌گیرد.                                                                                                                                                               |    |
| DMI                                         | این وسیله با نصب بر روی چرخ عقب دستگاه آران، مسافت دقیق پیموده شده خطی و سرعت را اندازه‌گیری کرده و به کمک سایر وسایل فوق‌الذکر کمبود و یا عدم داده‌های GPS را جبران می‌کند.                                                                                                                                                                                                                          |  |
| GPS اولیه                                   | این دستگاه نیز با دریافت امواج فرستاده شده از حداقل ۴ ماهواره، می‌تواند مکان‌یابی دستگاه را انجام دهد.                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
| GPS ثانویه                                  | GPS ثانویه نیز با دریافت امواج از ماهواره‌های قابل رویت آن، اطلاعات خام مورد نیاز را برای دستگاه GAMS مهیا می‌نماید.                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| GAMS<br>(GPS Azimuth Measurement<br>System) | این دستگاه خروجی‌های IMU و اطلاعات حاصل از دو آنتن GPS، که به فاصله ۲ متر از هم نصب شده‌اند، را ترکیب نموده و تعیین دقیق heading دستگاه را مستقل از سرعت ممکن می‌سازد. این امکان به بهترین دقت heading ممکن و بهترین عملکرد، در هر محیط، منجر می‌شود. در واقع GAMS با داشتن داده‌های دو GPS، مقادیر تفاضلی آن‌ها را محاسبه کرده و بوسیله آن مقدار تغییرات کوچک (drift) و میزان آزیموت را بدست می‌دهد. |  |

همان طور که در بالا اشاره شد، با استفاده از قابلیت‌های بالای دستگاه ARAN می‌توان وضعیت روسازی را با دقت و سرعت بسیار خوبی برآورد کرده و ورودی‌های سامانه مدیریت روسازی را حاصل کرد. از این رو امروزه در بسیاری از کشورهایی که در حال پیاده‌سازی سامانه مدیریت روسازی می‌باشند، استفاده از این روش بسیار چشمگیر است؛ به نحوی که بیش از ۸۰ دستگاه ARAN در سراسر دنیا ساخته و مشغول فعالیت می‌باشد.

## ۲-۵-۳- موارد استفاده

دستگاه آران، همانگونه که اشاره شد، دارای قابلیت‌های فراوانی برای اندازه‌گیری شاخص‌های عملکردی روسازی می‌باشد. این دستگاه همراه با ترافیک عبوری حرکت کرده و بدون اختلال در رفت و آمد، اقدام به برداشت داده‌ها می‌نماید. از پارامترهایی که توسط این دستگاه بدست آورده می‌شود، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- شیارشدگی (Rutting)
- ناهمواری یا تغییرات طولی مسیر
- پروفیل عرضی
- بافت درشت روسازی (Macrotexture)
- خرابی‌های سطحی (Distress)

دستگاه ARAN در اکثر منابع مطالعاتی و تحقیقاتی به عنوان وسیله‌ای برای ارزیابی روسازی‌ها در سطح شبکه شناخته شده است. از آنجایی که هدف در سطح شبکه بررسی اجمالی وضعیت روسازی‌ها، و نه دقیق، اولویت‌بندی پروژه‌ها و برنامه‌ریزی مالی آن‌ها می‌باشد، لذا دستگاه ARAN پارامترهای روسازی را در کل محور مورد مطالعه برداشت نموده و تحلیل می‌نماید. لازم به ذکر است که در مقالات و گزارش‌های مورد بررسی نیز هیچ مطلبی دال بر برداشت پارامترهای روسازی توسط ARAN در واحدهای نمونه، مشاهده نگردید.

## ۲-۵-۳- کالیبراسیون پروفیل‌سنج‌های با سرعت بالا

کالیبراسیون، پروسه اصلاح مقیاس یک وسیله اندازه‌گیری است. به عنوان مثال، ممکن است کالیبراسیون یک حسگر ارتفاعی لیزری در یک پروفیل‌سنج با تنظیم یک مقدار مشخص فاصله بین لیزر و هدف آن انجام گرفته و سپس خروجی حسگر قرائت شود. اگر خطایی در قرائت حسگر باشد، با یک تنظیم‌گر الکترونیکی کالیبره کردن حسگر انجام می‌شود. معمولاً آزمایش برای چند فاصله مختلف انجام می‌گیرد تا از خطی بودن حسگر و فاصله، اطمینان حاصل شود [۷۰].

کالیبراسیون پروفیل‌سنج‌ها در آزمایشگاه انجام می‌گیرد. یک پروفیل‌سنج معمولی شامل اجزایی از قبیل؛ شتاب‌سنج، حسگر ارتفاعی بدون تماس، حسگر فاصله طولی، کامپیوتر، مدارهای الکترونیکی جهت تغذیه حسگرها و اتصال آن‌ها به کامپیوتر، می‌باشد. هر حسگر به طور مستقل کالیبره می‌شود. اگر هر بخش به طور مناسب کار نکند، پروفیل‌سنج نمی‌تواند پروفیل معتبری ایجاد نماید [۷۰].

بسته به طراحی سیستم، ممکن است امکان کالیبره کردن اجزا بطور مجزا وجود نداشته باشد و تجهیزات خاصی مورد نیاز باشد. در بیشتر سیستم‌ها که مانند پروفیل‌سنج پیچده باشند، حسگرها در آزمایشگاه کالیبره می‌شوند و در طول

عمرشان کالیبره می‌مانند.

همانگونه که گفته شد می‌توان یک حسگر ارتفاعی را با دادن یک ارتفاع ورودی مشخص و قرائت خروجی آن کالیبره کرد. شاید تصور شود که می‌توان یک پروفیل‌سنج را نیز با اندازه‌گیری یک پروفیل با مقدار مشخص IRI کالیبره نمود، اما این اشتباه است.

## ۲-۵-۳-۱- کالیبراسیون RSP

کالیبراسیون صحیح دستگاه RSP یک امر مهم و حیاتی می‌باشد. دستگاه RSP ای که بطور مناسب کالیبره شده باشد می‌تواند داده‌هایی با دقت بیشتر از استانداردهای محدودکننده و سخت‌گیرانه صنعتی حال حاضر دنیا را که شامل آیین‌نامه‌های ASTM-E950 و AASHTO PP-52 می‌گردد، جمع‌آوری نماید. این استانداردها بسیار سخت‌گیر و نیازمند یک سطح دقت بالا با انحراف معیار مشخص در هر دو اندازه‌گیری ارتفاعی پروفیل و IRI می‌باشند [۷۱].

بخش‌های مختلف دستگاه RSP به دلایل مختلف، از جمله گذشت زمان، استفاده طولانی و مداوم یا اثر شرایط محیطی بر روی آن‌ها نیازمند کالیبراسیون مجدد و برطرف نمودن خطاهای احتمالی می‌باشند. به همین منظور بر روی هر یک از دستگاه‌های RSP، ادوات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری مرتبط با کالیبراسیون دوره‌ای آن‌ها که مربوط به اجزای مختلف آن می‌باشند از سوی کارخانه سازنده تحویل خریدار می‌گردد. لذا ضروری است در بازه‌های زمانی یا کاری خاص، این بخش‌ها مطابق با دستورالعمل مربوطه کالیبره شوند. فرایند کالیبراسیون در دستگاه‌های مختلف برداشت پروفیل سطح راه تابع ساختار نرم‌افزاری و سخت‌افزاری دستگاه می‌باشد [۷۱].

اجزای ذیل در دستگاه RSP نیازمند کالیبراسیون دوره‌ای می‌باشند:

- اندازه‌گیری مسافت (DMI)
- شتاب‌سنج‌ها
- حسگرهای اندازه‌گیری قرائت ارتفاع لیزر
- حسگرهای حرکات اینرسی (IMS)

اندازه‌گیری فاصله طولی به طور مستقیم به شعاع چرخ‌های وسیله نقلیه و شعاع چرخ به نوبه خود به میزان فشار لاستیک، درجه حرارت و بار وسیله نقلیه بستگی دارد که مجموعه این عوامل باعث ایجاد خطا می‌گردند. این خطاها با استفاده از کالیبراسیون اعمال شده بر روی DMI در شرایط کارگاهی قابل برطرف شدن است.

دستگاه DMI، می‌بایست در پروژه و یا در پروژه‌های بزرگ در فواصل ۵۰۰ تا ۶۰۰ کیلومتری کالیبره شود. این کار نیازمند یک قطعه روسازی است که طول آن با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری شده باشد. کالیبراسیون DMI توسط راندن وسیله نقلیه بر روی یک مقطع روسازی با طولی مشخص و مقایسه بین طول اندازه‌گیری شده و طول واقعی صورت گرفته و شاخص کالیبراسیون در این شیوه هرگونه عدم دقت را اصلاح می‌کند. صفحه نرم‌افزاری کالیبراسیون RSP یک محیط مناسب و آسان برای پروسه کالیبراسیون این قطعه می‌باشد. جزئیات این پروسه در دستورالعمل دستگاه آمده است.

شتاب‌سنج‌ها و حسگرهای لیزری به طور معمول بسیار صلب بوده و مکرراً به کالیبراسیون مجدد نیاز خواهند داشت.

کالیبراسیون این ادوات بطور معمول در بازه‌های یکماهه صورت می‌پذیرفت. همچنین هنگامیکه ادوات اصلی دستگاه جابجا شوند و یا در هنگام انجام یک پروژه اصلی می‌بایست کالیبراسیون این ادوات تکرار شود. بعد از جابجایی‌های طولانی دستگاه، کالیبره این بخش‌ها ضروری می‌باشد.

کالیبراسیون شتاب‌سنج بطور ثابت و توسط شتاب جاذبه زمین انجام می‌گیرد که بطور تقریبی برابر با  $9/8$  متر بر مجذور ثانیه (اندکی به عرض جغرافیایی محل آزمایش بستگی دارد) انجام می‌پذیرد. دو قرائت انجام می‌گیرد، یک قرائت برای حالتی که شتاب‌سنج بطور معکوس و بر قسمت پشت خود قرار گرفته و یک قرائت برای حالت قرارگیری عادی شتاب‌سنج. شاخص کالیبراسیون بطور اتوماتیک اندازه‌گیری شده و در پایگاه داده ادوات RSP ذخیره می‌شود.

دستگاه RSP بسته به مدل آن ممکن است ۲ تا ۲۱ عدد لیزر داشته باشد که در تمامی این مدل‌ها امکان تعیین IRI وجود دارد و فرایند کالیبراسیون لیزرها کاملاً یکسان می‌باشد.

حسگرهای قرائت ارتفاع لیزرها، بطور استاتیکی توسط یک شمشه که به موازات تیر حاوی لیزرها و در دو ارتفاع مختلف که دقیقاً به فاصله ۱۰۰ میلیمتری از یکدیگر و یا بطور دقیقتر ۵۰ میلیمتر بالا و پایین موقعیت میانگین ارتفاعی لیزرها مستقر خواهند شد، کالیبره می‌گردند. قرائت این لیزرها در این دو ارتفاع ثبت می‌شود. قرائت‌های مربوط به این دو سطح بطور اتوماتیک ذخیره شده و از طریق نرم‌افزار برداشت میدانی برای استخراج میزان حساسیت حسگرهای لیزری بکار رفته و میزان جابجایی آن را مشخص می‌کند. جزئیات این پروسه در دستورالعمل دستگاه آمده است.

فرایند کالیبراسیون حسگرهای IMS شامل کالیبراسیون شیب عرضی و شیب طولی می‌باشد. برای کالیبراسیون هر بخش فرایند خاصی طراحی شده که دستورالعمل نرم‌افزار دستگاه به آسانی قابل رهگیری می‌باشد [۷۱].

## ۲-۶- پروتکل تناوب زمانی انجام آزمایش‌های غیرمخرب

### ۲-۶-۱- پروتکل ارزیابی راه در سطح شبکه

با توجه به گستردگی شبکه راه‌های کشور و تجهیزات پیشرفته ارزیابی موجود در کشور، پروتکل ارزیابی و برداشت اطلاعات شبکه روسازی راه‌های کشور به تفکیک نوع راه به شرح زیر پیشنهاد می‌شود. ذکر این مطلب ضروری است که تقسیم بندی زیر به لحاظ اولویت زمانی با توجه به امکانات و ضرورت‌ها در سطح شبکه صورت گرفته است [۷۰].

#### ۲-۶-۱-۱- آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها

برای این دو نوع از راه‌های کشور که حدود ۶ درصد از طول کل شبکه کشور را شامل می‌شود، این گروه پروتکل زیر پیشنهاد می‌شود [۷۰]:

- برداشت سالانه ناهمواری با استفاده از RSP یا سیستم‌های مشابه از تمام خطوط حرکت.
- برداشت سالانه خرابی‌های بصورت چشمی یا تصویری برداری مربوط به خط سنگین (با توجه به مشکلات ایمنی، فقط برداشت در خط سمت راست از هر جهت حرکت انجام شود) در قطعه‌های نمایندگی مربوط به برداشت خرابی.
- برداشت دوسالانه با استفاده از دستگاه FWD در قطعه‌های نمایندگی منطبق با مورد ۲ جهت تعیین ظرفیت باربری و عمر باقیمانده روسازی.
- برداشت دوسالانه مشخصات لایه‌ها با استفاده از دستگاه GPR، جهت تعیین ضخامت لایه‌ها فقط در قطعه‌های نمایندگی در خط سمت راست.
- برداشت دوسالانه لغزندگی سطح راه با استفاده از آزمایش بخش ماسه<sup>۱</sup> برای تعیین میانگین عمق بافت روسازی (MTD)<sup>۲</sup> جهت تعیین عدد لغزندگی سطح راه

#### ۲-۶-۱-۲- راه‌های اصلی

- برای این نوع از راه‌ها که حدود ۳۲ درصد طول شبکه، راه‌ها را تشکیل می‌دهد، پروتکل زیر پیشنهاد می‌شود [۷۰]:
- برداشت سالانه ناهمواری با دستگاه RSP از تمام خطوط حرکت.
  - برداشت دوسالانه خرابی‌ها بصورت چشمی یا تصویربرداری از قطعه‌های نمایندگی.
  - برداشت چهارسالانه با استفاده از دستگاه FWD در قطعه‌های نمایندگی منطبق با مورد دو جهت تعیین ظرفیت باربری و عمر باقیمانده روسازی.
  - برداشت چهارسالانه لغزندگی سطح راه با استفاده از آزمایش پخش ماسه برای تعیین میانگین عمق بافت روسازی جهت تعیین عدد لغزندگی سطح راه.

1. Sand Patch Test  
2. Mean Texture Depth

## ۲-۶-۱-۳- راه‌های فرعی

برای این نوع راه‌ها که حدود ۵۷ درصد طول شبکه راه‌های کشور را تشکیل می‌دهد، پروتکل زیر پیشنهاد می‌شود [۷۰]:

- برداشت دوسالانه ناهمواری با استفاده از دستگاه RSP یا سیستم مشابه ارزان قیمت آن از تمام خطوط حرکت.
- برداشت دوسالانه خرابی‌ها بصورت چشمی یا تصویربرداری از قطعه‌های نمایندگی.

## ۲-۶-۲- پروتکل ارزیابی راه در سطح پروژه

با توجه به گستردگی شبکه راه‌ها و موقعیت پروژه مورد نظر ممکن است گسیل تجهیزات پیشرفته برای انجام برداشت‌ها در یک مکان خاص از نظر زمانی و اقتصادی مقرون به صرفه نباشد. از سوی دیگر، ارزیابی در سطح پروژه معمولاً با توجه به شرایط حاکم بر پروژه از سوی مشاور تعریف می‌شود. لذا فقط به ذکر این نکته اکتفا می‌شود که در سطح پروژه برای آزادراه‌ها، بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی باید حتی‌الامکان اطلاعات زیر در دسترس باشد [۷۰]:

## ۲-۶-۱-۲- آزمایش‌های مخرب

الف- آزمایش‌های مکانیک خاک برای لایه‌های مختلف

- دانه بندی،
- درصد رطوبت،
- رده بندی خاک،
- درصد رطوبت بهینه،
- حدود آتبرگ،
- $CBR^1$ ،
- ارزش ماسه‌ای (برای اساس و زیر اساس)،
- DCP - برای تعیین مقاومت در محل و تعیین ضخامت لایه‌ها با توجه به تخریب بسیار محدود و سرعت عمل آزمایش.

ب- آزمایش تعیین خصوصیات لایه‌های آسفالتی

- ضخامت لایه‌های آسفالتی،
- دانه بندی،
- درصد قیر،
- تراکم.

1. California Bearing Ratio

## ۲-۲-۶-۲- آزمایش‌های غیرمخرب

- برداشت ناهمواری با استفاده از تجهیزات RSP در تمام خطوط حرکت،
- برداشت FWD در فواصل ۱۰۰ متری در تمام خطوط حرکت،
- برداشت آزمایش با استفاده از GPR در تمام مسیر در تمام خطوط حرکت [۷۰].

پروتکل‌های ذکر شده در این قسمت با توجه به تقسیمات انواع راه صورت گرفته است. به علت اینکه برخی محورهای اصلی شبکه راه از انواع مختلف مثلاً آزادراه، بزرگراه و راه اصلی تشکیل شده‌اند، در عمل با توجه به نقش عملکردی کل مسیر، باید همه بخش‌ها را به صورت یک نوع مورد ارزیابی قرار داد و به عبارت دیگر همه برداشت‌ها باید متناسب با بالاترین رده عملکردی موجود در مسیر باشد.

## ۷-۲- بررسی اعتبار نتایج آزمایش‌های غیرمخرب در پروژه‌های مختلف

با ورود یک تکنولوژی جدید در عرصه صنعت، از طرف کاربران جهت بکارگیری این تکنولوژی تمایل بوجود می‌آید. اما نکته مهم و اساسی این است که آیا محصول جدید ارائه شده از صحت، دقت عمل کافی و قابل اطمینان بعنوان جایگزینی برای روش‌های مورد استفاده قبلی و متداول برخوردار می‌باشد. آزمایشات غیرمخربی که در این راهنما به آن‌ها پرداخته شد غالباً جرو تکنولوژی‌های جدید محسوب شده و اعتبار آن‌ها می‌بایست در پروژه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته شود. در فصل‌های قبلی در ارتباط با هر آزمایش بخشی تحت عنوان اعتبارسنجی نتایج بدست آمده به مقوله صحت نتایج هر آزمایش اختصاص داده شده بود. در این فصل سعی شده است تا با نگاهی دقیق‌تر و در قالب نتایج عددی در پروژه‌های داخلی و خارجی، اعتبار نتایج بدست آمده در برخی از آزمایشات غیرمخرب با آزمایشات مخرب مقایسه و بررسی شود.

### ۷-۲-۱- آزمایش‌های تعیین دانسیته به روش هسته‌ای و غیرهسته‌ای

دانسیته روسازی از مهمترین متغیرها در کنترل کیفیت عملیات راهسازی می‌باشد. معتبرترین روش موجود در تعیین تراکم لایه آسفالتی، مغزه‌گیری و تعیین دانسیته مغزه‌ها در آزمایشگاه می‌باشد. این روش دارای معایبی از قبیل آسیب رساندن به بافت روسازی، هزینه زیاد، عدم تکرارپذیری در یک نقطه خاص و ناتوانی در جداسازی دانسیته در یک محل ثابت و زمان‌بری زیاد می‌باشد. همین امر سبب شده است که در دو دهه اخیر مراکز تحقیقاتی به فکر تولید تجهیزات جدید تعیین دانسیته بعنوان جایگزینی مناسب برای این روش باشند. در این راستا دستگاه‌های غیرمخرب هسته‌ای و غیرهسته‌ای بعنوان تجهیزات غیرمخرب تعیین دانسیته در حال ارزیابی می‌باشند.

این بخش از گزارش به مطالعه و بررسی اطلاعات آماری موجود در ارتباط با دستگاه‌های غیرمخرب تعیین دانسیته تخصیص یافته است. در این بخش با ارائه تحقیقات مختلف صورت گرفته توسط موسسات و مراکز مختلف علمی و ارائه جمع‌بندی و نتیجه‌گیری راجع به عملکرد هریک از دستگاه‌های غیرمخرب، اقدام به بررسی نحوه عملکرد آنها شده است. در هریک از گزارش‌های ارائه شده، مقایسه‌ها در آزمایشگاه و نیز به‌صورت میدانی برای ارزیابی میزان درستی کارکرد هریک از روش‌های غیرمخرب تعیین دانسیته صورت گرفته است. در پایان هر گزارش نتایج ارائه شده قابل استناد بر اساس آن گزارش آمده است و در نهایت بر اساس نتایج کل گزارش‌ها و با درنظر گرفتن پیشرفت‌های کیفی در طول زمان، نتیجه نهایی در مورد این ارزیابی ارائه می‌گردد.

در ادامه به چند مورد تحلیل آماری بین نتایج بدست آمده از آزمایش‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تعیین دانسیته توسط مراجع پژوهشی مختلف برای روشن شدن کاربرد دقیق این آزمایش‌ها، اشاره می‌شود.

#### تحلیل آماری ۱: مشاهدات میدانی: ارزیابی دستگاه‌های غیرمخرب تعیین دانسیته در مخلوط آسفالتی گرم<sup>۱</sup>

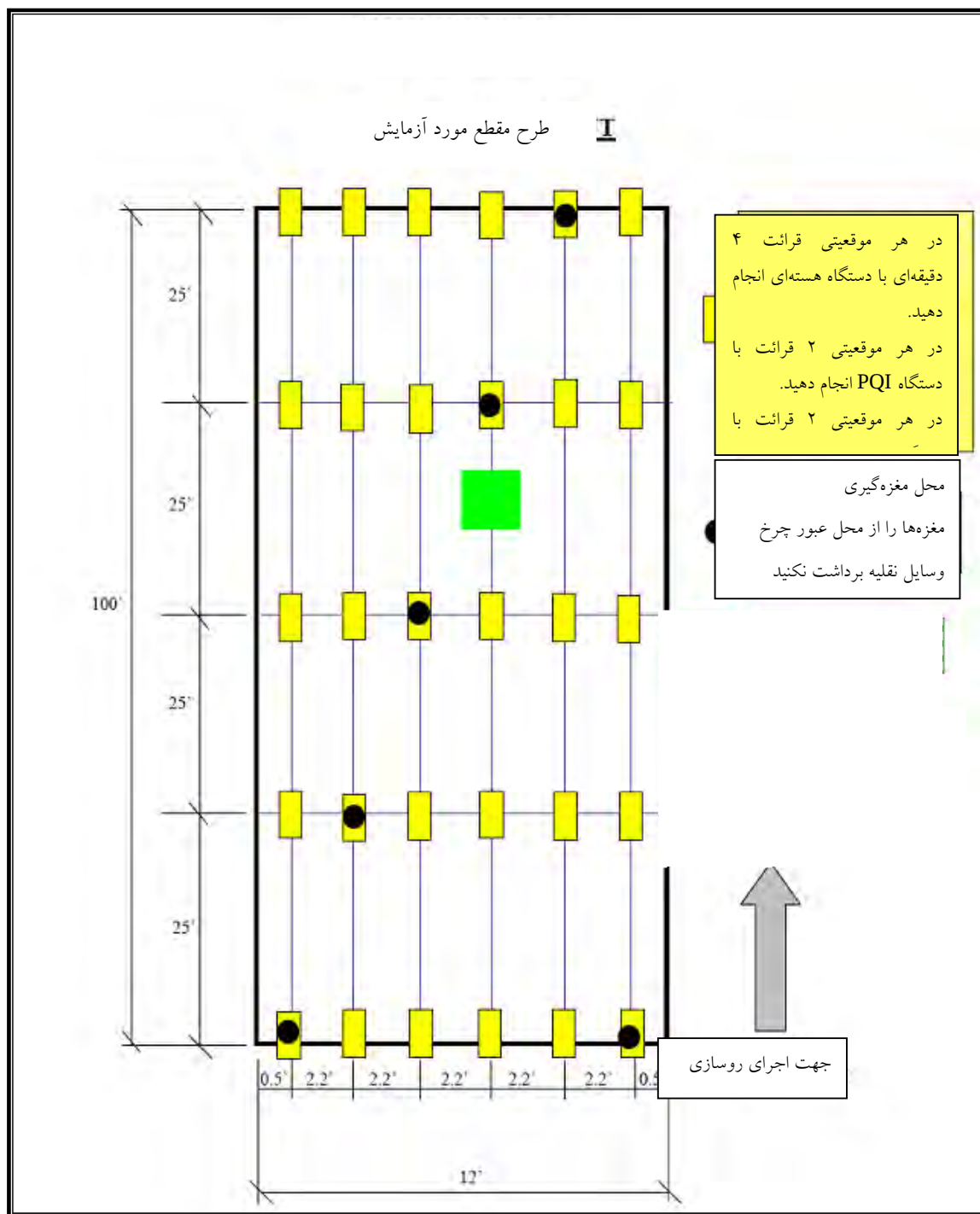
بطور متداول، سازمانهای ذیربط از هر دو نتیجه حاصل از قرائت‌های اندازه‌گیری به‌روش هسته‌ای و مغزه‌گیری برای پذیرش مقدار دانسیته درجا استفاده می‌کنند. اگرچه مغزه‌گیری بیشترین دقت در اندازه‌گیری دانسیته را داراست، ولی بردن مغزه‌ها از یک لایه جدید آسفالتی چندان خوشایند نمی‌باشد. اما این مسئله نیز وجود دارد که دستگاه‌های آزمایش

غیرمخرب بدلیل تاثیر احتمالی که لایه‌های زیرین بر نتایج حاصله ممکن است وارد نمایند، جواب دقیقی را ارایه نمایند. بر اساس نتایج بدست‌آمده از برخی گزارش‌ها، عمده‌ی تاثیر بر روی قرائت دانسیته از ۲/۵ سانتی‌متر (۱ اینچ) ضخامت بالایی مصالح نشأت می‌گیرد. بر اساس مشاهدات و تجربیات این گروه (سازمان کارلینای شمالی اتحادیه حمل و نقل بزرگراه‌ها)، آزمایش‌های غیرمخرب عموماً مقادیر قرائت کمتری را نسبت به نتایج مغزه‌گیری نمایش می‌دهند. یک عامل اصلی کمتر نشان دادن مقدار دانسیته توسط دستگاه‌های غیرمخرب این است که مخلوط‌های آسفالتی طرح شده به روش سوپرپیو<sup>۱</sup> درشت‌دانه‌تر از مخلوط‌های آسفالتی تهیه‌شده بروش مارشال هستند که نتیجه آن فضای خالی سطحی بیشتر است [۶۹]. برای هر قطعه آزمایش میانگین ۶ مقدار حاصله از مغزه‌گیری بمنظور مقایسه با نتایج حاصل از دستگاه‌های آزمایش برداشت شد. از ذکر نتایج عددی آزمایش‌ها در این قسمت صرف نظر شده است.

#### • نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، جریان ارزیابی دستگاه‌های PQI و پیوتراکر در آینده نیز لزوماً ادامه خواهد داشت. این مشاهده مشخص می‌کند که وقتی یک نتیجه حاصل از مغزه‌گیری با یک نتیجه از دستگاه غیرمخرب در یک موقعیت یکسان مقایسه می‌شود، نتایج نوسان می‌کنند. اما وقتی میانگین نتایج قطعات آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرند، نتایج به‌هم بسیار نزدیک‌تر می‌شوند. به‌همین دلیل این‌گونه استنباط می‌شود که هنگام کار با دستگاه‌های غیرمخرب، تعداد برداشت‌ها باید بیشتر از تعداد معمول برداشت حاصل از مغزه‌گیری باشد. برای مثال، اگر یک قطعه آزمایش ۶۵° متری با یک مرتبه مغزه‌گیری ارزیابی می‌شود، حداقل ۵ مرتبه برداشت با یک دستگاه غیرمخرب برای همان قطعه باید صورت گیرد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که طبق معمول، دستگاه‌ها مقدار دانسیته کمتری را در لبه‌ها و محل درزهای اجرایی نشان می‌دهند [۶۹].

1. Super pave



شکل ۸۴- موقعیت و نحوه آزمایش‌های انجام‌شده در هر قطعه آزمایش ۳۳ متری (۱۰۰ فوتی) و عرض ۳/۶۵ متری (۱۲ فوتی) [۶۹]

تحلیل آماری ۲: سیستم‌های آزمایش تعیین دانسیته غیرمخرب غیرهسته‌ای در تعیین دانسیته روسازیهای آسفالتی<sup>۱</sup>

- دستگاههای مورد استفاده در آزمایش

دستگاه PQI مدل ۳۰۱ ساخت ترانس تک و دستگاه پیوتراکر مدل B2701 ساخت شرکت تراکسلر، دو دستگاه غیرمخرب غیرهسته‌ای بودند که در این مطالعه میدانی مورد استفاده قرار گرفتند. در طرح آزمایش تصمیم گرفته شد که از دانسیته آزمایشگاهی مغزه‌های ۶ اینچی و همچنین از دانسیته‌سنج غیرمخرب هسته‌ای مدل CPN MC-3 برای ارزیابی دانسیته دستگاههای غیرمخرب غیرهسته‌ای استفاده گردد [۶۶].

- طرح آزمایش

نتایج تحقیقاتی در دانشگاه یوتا<sup>۲</sup> نشان داده است که جنس مصالح سنگی بر روی نتایج یک دانسیته‌سنج غیرمخرب غیرهسته‌ای تاثیرگذار است. به همین دلیل سه نوع مصالح سنگی و سه نوع اساس پیشنهاد گردیدند. انواع مصالح سنگی عبارت بودند از گراول، گرانیت و سنگ آهکی. انواع اساس عبارتند از اساس تثبیت شده سیمانی، مخلوط آسفالتی گرم و اساس با مصالح سنگی شکسته<sup>۳</sup>.

- آزمایش‌های میدانی

در هر پروژه برای مقایسه نتایج داده‌های حاصل از مغزه‌ها، دانسیته‌سنج غیرمخرب هسته‌ای، نشانگر کیفیت روسازی و پیوتراکر، تعداد ۳۰ داده بصورت تصادفی بعد از پایان غلتک‌زنی برداشت شدند. همچنین ۵ آزمایش کنترل کیفیت برای مقایسه نتایج دانسیته‌سنج هسته‌ای با نشانگر کیفیت روسازی و پیوتراکر در حین عملیات تراکم، صورت پذیرفت. قرائت‌های تراکم و درجه حرارت بعد از پخش آسفالت توسط فینیشر و پس از هر دور غلتک‌زنی صورت پذیرفت. این داده‌ها اجازه می‌داد تا برآوردی از دستگاه‌ها با تغییرات درجه حرارت و تراکم صورت گیرد [۶۶].

- مقایسه میان نتایج حاصل از مغزه‌گیری و دانسیته‌سنج هسته‌ای

در مقایسه با مغزه‌ها، دانسیته‌سنج غیرمخرب هسته‌ای در ۱۲ پروژه قرائت‌هایی بالاتر و در ۶ پروژه قرائت‌های پایین‌تری نشان داد. اندازه‌گیری‌های همزمان در پروژه‌هایی که دارای ترافیک بالا و مصالح سنگی آهکی بوده‌اند، نشان می‌دهد که در یکی از پروژه‌ها مقادیر بالاتر و در پروژه دیگر مقادیر پایین‌تری نسبت به دانسیته مغزه‌ها، قرائت شده است. احتمالاً این مسئله به لایه زیر آسفالت بر می‌گردد. در پروژه‌های با مصالح سنگی گرانیت درشت‌دانه، نتایج قرائت‌ها نسبت به نتایج مغزه‌ها کمتر بودند. این مسئله احتمالاً به دانه‌بندی درشت مخلوط برمی‌گردد که شبیه به مخلوط‌های با دانه‌بندی استخوانی<sup>۴</sup> می‌باشد و دارای درصد فضای خالی بالایی می‌باشند. در سه پروژه با دانه‌بندی پیوسته، دانسیته‌سنج هسته‌ای مقادیر بالاتری نسبت به مغزه‌ها قرائت کرده است (۴۰ تا ۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب) [۶۶].

1. Non-Nuclear Density Testing Devices and Systems to Evaluate In-Place Asphalt Pavement Density

2. Utah

3. Crushed Aggregate Base Course (CABC)

4. SMA

- اثر دما بر قرائت دستگاهها
- اثر دمای روسازی بر روی قرائت‌های دانسیته دستگاه‌های PQI300 و PQI301 مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه روند واضحی در نمودارهای مربوطه دیده نمی‌شود، اما می‌توان گفت که برای درجه حرارت‌های کمتر از ۲۷ درجه سانتیگراد و بیشتر از ۶۶ درجه سانتیگراد قرائت‌ها مقادیر پایین‌تری را نشان می‌دهند.
- تأثیر حداکثر اندازه مصالح سنگی
- اثر حداکثر اندازه اسمی مصالح سنگی<sup>۱</sup> بر روی تفاوت قرائت‌های دستگاه‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای بررسی گردید. قرائت‌های پیوتراکر در مصالح سنگی ۱۹ میلیمتر، نزدیک به قرائت‌های دانسیته‌سنج هسته‌ای می‌باشد در حالیکه قرائت‌های هر دو مدل PQI کمی افزایش داشتند.
- اثر بار محور ساده معادل<sup>۲</sup>
- برای همه مدل‌ها با افزایش بار محور ساده معادل، تفاوت قرائت‌های دستگاه‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای کاهش پیدا نموده است.
- اثر درصد عبوری از الک شماره ۴
- با کاهش درصد مصالح عبوری از الک ۴ به کمتر از ۴۰ درصد، یعنی درشت‌دانه‌تر شدن مصالح سنگی، تفاوت بین مقادیر قرائت‌شده افزایش یافته است. ممکن است دلیل این امر به اثر متقابل اشعه گامای هسته یا ثابت الکتریکی مصالح و درصد فضای خالی موجود در روسازی مرتبط باشد.
- اثر میزان قیر
- میزان قیر کمتر سبب می‌شود که قرائت‌های دانسیته‌سنج‌های غیرهسته‌ای و قرائت‌های دانسیته‌سنج هسته‌ای از یکدیگر دور گردند.
- اثر دانسیته واقعی مصالح سنگی
- به‌نظر می‌رسد که با افزایش دانسیته واقعی تفاوت میان قرائت‌ها کاهش می‌یابد.
- اثر ضخامت روسازی
- با افزایش ضخامت روسازیه‌ها تفاوت بین قرائت‌ها افزایش می‌یابد. احتمالاً دستگاه‌های غیرهسته‌ای در لایه‌های نازک‌تر متمایل به اندازه‌گیری دانسیته مصالح اساس می‌شوند.
- اثر درجه حرارت
- برای PQI300 با افزایش درجه حرارت از ۵۰ به ۸۲ سانتیگراد تفاوت بین قرائت‌ها افزایش پیدا می‌کند. با این حال در درجه حرارت کمتر از ۵۰ درجه سانتیگراد هیچ روند خاصی مشاهده نشده است. این مسئله بیان می‌کند قرائت آزمایش اندازه‌گیری دانسیته با PQI300 پس از عبور غلتک به درجه حرارت روسازی ارتباط پیدا می‌کند و در حالیکه درجه حرارت روسازی بالاتر است نتیجه این آزمایش، اختلاف بزرگتری با دستگاه

1. NMAS  
2. ESALS

دانسیته‌سنج هسته‌ای دارد.

- اثر رطوبت

مشخص گردید که وقتی درجه رطوبت به کمتر از ۱۰ درصد می‌رسد اختلاف قرائت‌ها بسیار کاهش پیدا می‌نماید. سازندگان مدل‌های PQI تصریح می‌کنند که درصد رطوبت نباید بیشتر از ۱۰ درصد باشد تا نتایج معتبری بدست آید.

- نتایج و توصیه‌ها

مرور بر تحقیقات و مطالعات گذشته حاکی از وجود اختلاف میان نتایج تعیین دانسیته با روش مغزه‌گیری و روش‌های غیرمخرب هسته‌ای و غیرهسته‌ای می‌باشد.

مشخص شده است که دستگاه‌های غیرمخرب هسته‌ای می‌توانند برای کنترل کیفیت بکار گرفته شوند اما برای یک آزمون پذیرش با درجه اطمینان بالا نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین توصیه می‌شود که از یک تعداد فاکتورهای تصحیح‌کننده اختلاف برای هر یک از متغیرها استفاده گردد.

از سه دستگاه غیرمخرب غیرهسته‌ای در این مطالعه استفاده شد که عبارتند از PQI300، PQI301 و پیوتراکر مدل B2701. نتایج این دستگاه‌ها با یک دستگاه هسته‌ای مدل ACPN MC-3 مقایسه گردید. کالیبراسیون دستگاه هسته‌ای با استفاده از مغزه‌هایی با قطر ۱۷ سانتی‌متری صورت پذیرفت. یافته‌ها حاکی از وجود اختلاف میان نتایج دستگاه‌های غیرمخرب هسته‌ای و غیرهسته‌ای می‌باشد که خود این اختلاف در هر پروژه مبنی بر اینکه آزمایش‌ها در چه زمانی انجام می‌شد و یا اینکه خصوصیات مخلوط آسفالتی چگونه بوده است، متغیر می‌باشد.

چندین فاکتور بر روی اختلاف قرائت دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تاثیرگذار می‌باشند که عبارتند از: مصالح سنگی، بار محور ساده معادل طرح، درصد عبوری مصالح از الک نمره ۴، درصد فضای خالی آزمایشگاهی، حجم قیر، دانسیته سنگدانه‌ها و ضخامت‌های لایه روسازی.

این تحلیل همچنین نشان می‌دهد که درصد رطوبت درحین استفاده از مدل‌های PQI، همچنان که سازندگان آن توصیه می‌کنند باید کمتر از ۱۰ درصد باشد [۶۶].

### تحلیل آماری ۳: مطالعه میدانی ارزیابی دانسیته‌سنگ‌های غیرهسته‌ای در تعیین دانسیته بتن آسفالتی<sup>۱</sup>

براساس نتایج بدست‌آمده از آزمایش سال ۲۰۰۰، چندین توصیه به سازندگان دستگاه PQI ارائه گردید. پس از اعمال تغییرات در تجهیزات، شامل بهبود الگوریتم، یک مطالعه میدانی نظیر سال ۲۰۰۰ در سال ۲۰۰۱ با مشارکت پنج ایالت مریلند، پنسیلوانیا، نیویورک، ارگون و منیسوتا انجام شد [۴۰].

- نتایج تحلیل‌ها براساس تفاوت بین دانسیته بدست آمده از دستگاه‌ها و روش مغزه‌گیری
- نتایج دلالت داشتند بر اینکه هر دو دستگاه پیوتراک و PQI دارای پتانسیل اجرایی خوبی می‌باشند. نتایج در یک مورد برای هر دو دستگاه، ضریب همبستگی ( $R^2$ )، ۰/۹۹ را نشان دادند.
- به هر جهت، بهبود قابل توجهی نسبت به نتایج مطالعات میدانی اولیه در این سری از مطالعات جدید مشاهده شد. در ایالت مریلند، برای دستگاه PQI، انجام عملیات با ضریب همبستگی کمتر از ۰/۶ در ۲ پروژه از ۲ پروژه (۱۰۰٪) بدست آمد. در مقابل پیوتراک ضریب همبستگی بزرگتر از ۰/۸۵ در ۲ پروژه از ۳ پروژه (۶۷٪) را نشان داده است. در مینسوتا، PQI ضریب همبستگی پایین در ۲ پروژه از ۵ پروژه (۴۰٪) و ضریب همبستگی بالای ۱ از ۵ (۲۰٪) را نشان داد. پیوتراک ضریب همبستگی بالایی در ۴ پروژه از ۷ پروژه و ضریب همبستگی پایین در بقیه پروژه‌ها را نشان داد.
- در ایالت پنسیلوانیا، PQI ضریب همبستگی بزرگتر از ۰/۸۵ در ۷ از ۹ پروژه (۷۸٪) را نشان داد و هیچ پروژه‌ای ضریب همبستگی کمتر از ۰/۶ نداشت.
- پیوتراک ضریب همبستگی پایینی در ۲ پروژه از ۵ پروژه (۴۰٪) و ضریب همبستگی بالایی در همین تعداد پروژه (۴۰٪) داشت. در نیویورک PQI ضریب همبستگی بالا در ۱ پروژه از ۶ پروژه (۱۷٪) و پیوتراک ضریب همبستگی بالا در ۴ پروژه از ۶ پروژه (۶۷٪) و ضریب همبستگی پایین تنها در ۱ پروژه از ۶ پروژه (۱۷٪) را نشان داد.
- از ترکیب پروژه‌ها از همه ایالتها با هم، PQI دارای ضریب همبستگی کمتر از ۰/۶ در ۶ پروژه از ۲۳ پروژه (۲۶٪) و پیوتراک نیز در ۳ پروژه از ۲۲ پروژه (۱۴٪) می‌باشند.
- PQI در ۹ پروژه از ۲۳ پروژه (۳۹٪) دارای ضریب همبستگی بزرگتر از ۰/۸۵ و پیوتراک در ۱۲ پروژه از ۲۲ پروژه (۵۵٪) می‌باشند.
- هر دو اندازه‌گیر دارای ضریب همبستگی بزرگتری در پروژه‌ها نسبت به ضریب همبستگی حاصل از آزمایش‌های سال‌های قبل می‌باشند. این مسئله، بیانگر پیشرفت قابل توجهی نسبت به مطالعات میدانی سال ۲۰۰۰ که عکس این مطلب در آن سال صادق بود می‌باشد.

- خلاصه نتایج

براساس تحلیل اطلاعات مربوط به ۵ ایالت مختلف و ۳۴ پروژه میدانی، نتایج زیر بدست آمدند.

- ۱- نتایج بدست آمده با استفاده از PQI بطور آماری در ۶۸٪ از پروژه‌ها با دانسیته مغزه‌گیری متفاوت بودند.
- ۲- نتایج بدست آمده با استفاده از پیوتراکر بطور آماری در ۸۲٪ از پروژه‌ها با دانسیته مغزه‌گیری متفاوت بودند.
- ۳- دانسیته‌های بدست آمده از PQI در ۳۹٪ از پروژه‌ها، همبستگی بالایی با مقادیر دانسیته حاصل از مغزه‌گیری داشتند.
- ۴- دانسیته‌های بدست آمده از پیوتراکر در ۵۵٪ از پروژه‌ها، همبستگی بالایی با مقادیر دانسیته حاصل از مغزه‌گیری داشتند.
- ۵- دانسیته‌های بدست آمده از PQI در ۲۶٪ پروژه‌ها، همبستگی کمی با مقادیر دانسیته حاصل از مغزه‌گیری داشتند.
- ۶- دانسیته‌های بدست آمده از پیوتراکر در ۱۴٪ پروژه‌ها، همبستگی کمی با مقادیر دانسیته حاصل از مغزه‌گیری داشتند.
- ۷- اندازه‌گیر دانسیته هسته‌ای نتایج بهتری را در مقایسه با دو دستگاه PQI و پیوتراکر فراهم نموده است. به لحاظ آماری، دانسیته حاصل از دستگاه هسته‌ای در ۷۵٪ از پروژه‌ها متفاوت از دانسیته حاصل از مغزه‌گیری بود. اما در اکثر پروژه‌ها، این نتایج همبستگی بهتری با نتایج حاصل از مغزه‌گیری در مقایسه با نتایج حاصل از دو دستگاه PQI و پیوتراکر داشتند.

- توصیه‌ها

توصیه می‌شود که دستگاه‌های اندازه‌گیری غیرهسته‌ای جهت تعیین دانسیته نسبی و تعیین مکان‌های با دانسیته پایین در روسازی HMA بکار رود. این اعتقاد وجود دارد که مکانهای با دانسیته پایین، محل‌هایی هستند که خرابی‌ها در آینده در این نقاط پدیدار می‌شوند.

- نتیجه‌گیری

دانسیته مخلوط آسفالتی یکی از مهمترین پارامترهای کنترل کیفیت روسازی اجرا شده می‌باشد. هیچ‌یک از دستگاه‌های ارزیابی‌شده گزینه مستحکم و کاملاً پایداری برای جایگزینی روش تعیین دانسیته با مغزه‌گیری را ارائه ندادند. اما همه دستگاه‌ها پتانسیل مناسب جهت تکمیل اندازه‌گیری‌های میدانی را دارند.

بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، نتیجه‌گیری‌های زیر بدست آمدند.

- ۱- هر دو دستگاه PQI و پیوتراکر، تجهیزات مناسبی برای تشخیص مناطق با تراکم پایین و همچنین انجام اقدامات اصلاحی در طول دوره اجرا می‌باشند.
- ۲- اگرچه هر دو دستگاه PQI و پیوتراکر دقت دستگاه دانسیته‌سنج هسته‌ای مورد استفاده را نداشتند اما از طرف دیگر مزایایی نظیر؛ مرتبط نبودن با قواعد مربوط به منابع رادیواکتیو دستگاه هسته‌ای و نیز توانایی چند برداشت متوالی در مدت زمان کوتاه، آنها را برای کنترل کیفیت دانسیته روسازی در طول دوره ساخت مورد توجه بیشتر قرار می‌دهد.

۳- کالیبراسیون این دستگاهها برای مصالح محلی در رسیدن به نتایج صحیح بسیار مهم می‌باشد. در هر جای ممکن، کالیبراسیون با استفاده از یک مقطع آزمایش باید صورت گیرد. اما فرضیات موجود براساس اطلاعات و تجربیات در دسترس در مورد مصالح محلی و مصرفی می‌تواند به میزان قابل توجهی در افزایش دقت و صحت نتایج تاثیرگذار باشد.

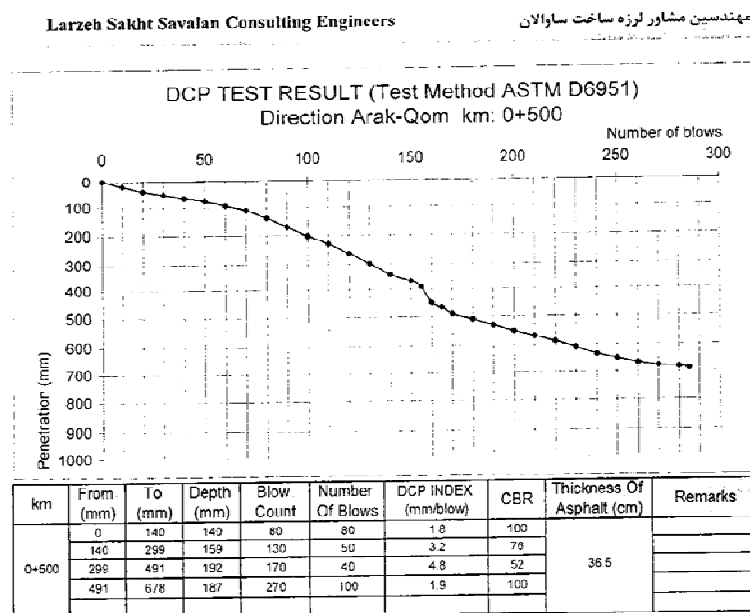
۴- تنها روش کاملاً صحیح و مطمئن برای تعیین دانسیته قطعی روسازی، مغزه‌گیری و تعیین دانسیته مغزه‌ها در آزمایشگاه می‌باشد.

## ۲-۷-۲- تعیین سختی لایه‌ها با روش DCP

تعیین سختی لایه‌های غیرچسبنده روسازی، همانگونه در فصول قبل بدان اشاره شد، توسط آزمایش نفوذ مخروط قابل انجام می‌باشد. در آزمایش DCP، با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف می‌توان شاخص نفوذ (PR) بدست آمده را به CBR تبدیل نمود و از آن برای ارزیابی مقاومت لایه‌های اساس و زیراساس استفاده نمود.

در یک بررسی موردی از اعتبار نتایج بدست آمده از آزمایش DCP در داخل کشور، از گزارش پروژه‌ای که توسط مهندسین مشاور لرزه ساخت ساوالان در محور اراک- قم انجام گرفته بود، استفاده شد. در این پروژه در فواصل مختلف از مسیر آزمایش DCP انجام شده و ضمن ترسیم گراف میزان نفوذ برحسب ضربات، شاخص نفوذ و همچنین CBR محاسبه شده است (مطابق شکل ۸۴).

آنچه در نتایج بدست آمده از این پروژه مشهود است، مقادیر CBR بالا است. مقادیر بدست آمده برای CBR با واقعیت منطبق نبوده و این موضوع عدم دقت آزمایش DCP برای تعیین سختی لایه‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین توصیه می‌شود به استناد نتایج بدست آمده در این پروژه داخلی، جهت استفاده از آزمایش DCP برای تعیین مقاومت لایه‌های غیرچسبنده روسازی با احتیاط بیشتری عمل شود.



شکل ۸۴- نتایج آزمایش DCP در محور قم اراک توسط مهندسین مشاور ساوالان

## ۲-۸- جمع‌بندی

در این راهنما سعی شد پیرامون تعدادی از آزمایش‌های غیرمخرب که جهت تعیین افت‌وخیز، دانسیته، ضخامت، سختی و مقاومت لایه‌ها و ناهمواری روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در قالب ساختاری معین که در جدول ۴۲ تشریح شده است، نحوه انجام و تحلیل نتایج هریک به همراه تئوری آزمایش و شرح مزایا و معایب آن‌ها بحث شود.

جدول ۳۳- ساختار راهنما

| مشخصات روسازی          | انواع آزمایش‌های غیرمخرب | ساختار راهنما                 |
|------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| افت و خیز روسازی       | تیر بنکلمن               | معرفی دستگاه                  |
|                        | FWD                      | تئوری انجام آزمایش            |
|                        | HWD                      | موارد استفاده                 |
|                        | RWD                      | روش کالیبراسیون               |
| دانسیته روسازی         | دانسیته‌سنج‌های هسته‌ای  | روش انجام آزمایش              |
|                        | PaveT, SQI, EDG, PQI     | اعتبارسنجی نتایج بدست آمده    |
| مقاومت لایه‌های روسازی | DCP                      | تحلیل و تفسیر نتایج بدست آمده |
|                        | آلتروسونیک               | تناوب مکانی انجام آزمایش      |
| ناهمواری راه           | RSP                      | تناوب زمانی انجام آزمایش      |
|                        | ARAN                     | مقایسه دستگاه‌ها              |
| ضخامت لایه‌های روسازی  | GPR                      | مزایا و معایب آزمایش          |

این راهنما دربرگیرنده مطالب نسبتاً کاملی برای آشنایی با تجهیزات غیرمخرب روسازی انعطاف‌پذیر بوده و دستورالعمل جامعی در اختیار کاربران این تجهیزات قرار می‌دهد. برای انتخاب بهترین گزینه‌ها برای امور اجرایی می‌بایست با درنظرگرفتن جزییات ارایه شده در هر بخش و نقاط ضعف و قوت آزمایش‌ها و همچنین مقایسه‌های صورت گرفته بین دستگاه‌ها براساس هدف موردنظر، گزینه مناسب انتخاب گردد.

در میان آزمایش‌های سنجش افت و خیز، آزمایش RWD را به دلیل جدید بودن آن و کاربردی نشدن آن در طیف گسترده، چندان نمی‌توان مورد استفاده قرار داد. همانگونه که قبلاً هم اشاره شد تنها یک نمونه پیش الگو (Prototype) از این دستگاه ساخته شده و طی مطالعات حال حاضر و مطالعات برنامه‌ریزی شده در افق آینده، این دستگاه راه زیادی برای تکمیل شدن و اثبات صحت نتایج به دست آمده از آن تا تولید انبوه آن پیش رو خواهد داشت. لذا آنچه مسلم است با توجه به کاربردی و عملیاتی نشدن این آزمایش غیرمخرب مدرن در کشورهای توسعه یافته جهان مانند ایالات متحده آمریکا، انتظار بحث و بررسی این دستگاه و سنجش آن با معیارهای اقلیمی، اقتصادی، دانش فنی و عملیاتی موجود در ایران کمی دور از ذهن می‌نماید لذا به دلیل فقر اطلاعاتی در مورد این دستگاه، در حال حاضر نمی‌توان برآوردی در مورد کاربرد آن با توجه به معیارهای ذکر شده، در ایران ارائه نمود.

تیر بنکلمن که در واقع اولین دستگاه برای ارزیابی سازه‌ای وضعیت روسازی محسوب می‌شود امروزه تقریباً منسوخ شده تلقی می‌شود و هیچ کاربرد تجاری در کشورهای توسعه یافته ندارد. البته نمونه‌های مدرن شده این دستگاه که مجهز به سیستم‌های الکترونیکی بی‌سیم (Wireless) و تجهیزات GPS است در پروژه‌های مطالعاتی و برخی پروژه‌های تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ایران نیز از تیر بنکلمن در پروژه‌های تحقیقاتی و دانشگاهی استفاده می‌شود. ولی به دلیل سرعت عملکردی پایین این دستگاه و معایب دیگر، این دستگاه در مقایسه با دستگاه FWD اقبال کمتری دارد.

از جمله معایب تیر بنکلمن که قبلاً هم به آنها پرداخته شده، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود. لازم به ذکر است که این معایب در داخل ایران نیز صادق می‌باشند:

- ناتوانی در تعیین شکل و ابعاد گودی افت وخیز
- سرعت پایین دستگاه در انجام آزمایش
- عدم امکان استفاده در روسازی‌های صلب
- دشواری انجام آزمایش

لذا با توجه به معایب مهم و عدیده فوق، استفاده از این دستگاه جز در پروژه‌های تحقیقاتی با توجه به دستگاه‌های دیگری مانند FWD کمی دور از ذهن به نظر می‌رسد.

در ارتباط با دستگاه FWD، در بخش‌های قبل به تفصیل در ارتباط با خطاهای موجود در این دستگاه و همچنین محدودیت‌ها و معایب آن بحث گردید. همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، مهمترین عامل در عملکرد روسازی‌های آسفالتی دماست. با توجه به گرمسیری بودن اغلب نقاط ایران و اختلاف زیاد دمای متوسط این مناطق با دمای استاندارد، بایستی تصحیحات دمایی انجام داد. دمای استاندارد که توسط آیین‌نامه راه‌های ایران پیشنهاد شده است، ۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده که بدین منظور، در آیین‌نامه آشتو نمودارهای متفاوتی برحسب ضخامت‌های گوناگون لایه آسفالت و جنس مصالح اساس، ارائه شده است و بایستی برای هر مورد، از نمودار خاص خود استفاده نمود و خیز در اولین سنسور را تصحیح کرد. ولی روش اعمال اثر دما توسط دستگاه FWD، استفاده از آیین‌نامه دانمارک، با دمای استاندارد ۲۵ درجه سانتی‌گراد و تصحیح ضریب الاستیسیته لایه آسفالت (به جای اصلاح خیز در اولین سنسور) با این ضریب اصلاحی می‌باشد. بنابراین اختلاف در روش اعمال ضریب اصلاحی دما همچنین و مقدار دمای استاندارد، مهمترین عامل اختلاف نتایج بدست آمده از دستگاه FWD و آیین‌نامه آشتو می‌باشد.

بدین ترتیب با در نظر گرفتن نقاط ضعف و قوت دستگاه‌های سنجش افت و خیز روسازی و عملکرد آن‌ها در شرایط کشور، آزمایش سقوط وزنه (FWD) گزینه مناسب معرفی می‌گردد.

در میان آزمایش‌های تعیین ضخامت روسازی، دستگاه GPR با بهره‌گیری از تکنولوژی امواج الکترومغناطیسی اقدام به اسکن لایه‌های زمین‌شناسی نموده و با پردازش داده‌های بدست آمده از سیگنال‌های ارسالی و دریافتی، قادر است ضخامت و وضعیت زمین‌شناسی لایه‌های روسازی را تشخیص دهد. امروزه از دستگاه GPR به عنوان یک سنجش مکمل در آزمایش‌های FWD برای دریافت داده‌های مربوط به ضخامت زمین استفاده می‌شود. این دستگاه با داشتن دقت بالا و کاربردی آسان، جایگاه ویژه‌ای در داخل و خارج کشور دارد.

دستگاه DCP، با داشتن ماهیتی مخرب، برای تعیین مقاومت لایه‌های غیرچسبنده بسیار مفید و کارآمد عمل می‌کند. کاربرد اینگونه دستگاه‌ها، بیشتر در حیطه مکانیک خاک و مطالعات ژئوتکنیک بوده و نمونه تشریح شده در این گزارش دارای قابلیت استفاده به عنوان ابزاری برای ارزیابی روسازی می‌باشد. لذا در ارتباط با آزمایش‌های تعیین ضخامت روسازی، استفاده از GPR با توجه به مزایای قابل ملاحظه آن، انتخاب مناسب و صحیح بنظر می‌رسد.

در میان آزمایش‌های تعیین دانسیته روسازی، دستگاه‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در ادامه به صورت فهرست‌وار مقایسه‌ای بین این دستگاه‌ها برای انتخاب گزینه مناسب ارایه شده‌است.

- بر اساس مقایسه‌های صورت‌گرفته توسط مراکز و موسسات، دقت دستگاه هسته‌ای از دستگاه‌های غیرهسته‌ای بیشتر است.
- شرایط تغییرات دما و تغییرات رطوبت بر روی عملکرد دستگاه تأثیری نمی‌گذارد.
- کار با این دستگاه‌ها نیاز به آموزش ویژه کاربران دارد.
- خطر تشعشعات مضر به دلیل وجود منبع رادیواکتیو همیشه وجود دارد و هیچگاه حتی سازنده در مورد بی‌خطر بودن دستگاه در این زمینه تأکیدی نداشته است و نیز ذکر این مطلب ضروری است که کاربر این دستگاه بعد از مدت زمان مشخصی کار با دستگاه باید تعویض شود.
- برای کار با این دستگاه‌ها نیاز به مجوز کار با دستگاه می‌باشد.
- وزن دستگاه هسته‌ای در مقایسه با دستگاه‌های دیگر غیرهسته‌ای بالاتر است (لااقل ۲ برابر) و بدیهی است که این اختلاف وزنی هنگامی که روزانه صدها برداشت صورت می‌گیرد قابل توجه است.
- دستگاه‌های هسته‌ای نیاز به یک زمان گرم‌شدن اولیه برای شروع به کار دارند در حالیکه این زمان برای دیگر دستگاه‌های غیرهسته‌ای به اندازه زمان روشن‌شدن دستگاه است.
- زمان برداشت برای تکمیل یک آزمایش در محوطه کار برای این دستگاه بیشتر از زمان برداشت برای دستگاه‌های غیرهسته‌ای می‌باشد.
- عدم توانایی در سنجش دانسیته مخلوط‌های بصورت مغزه (آزمایشگاهی یا برداشت از محل) از دیگر نکات منفی کار با این دستگاه است.
- از نتیجه آزمون‌های صورت‌گرفته برای اعتبارسنجی دستگاه هسته‌ای در تعیین دانسیته لایه‌های خاکی این موضوع حاصل می‌شود که دستگاه هسته‌ای از قابلیت اعتماد قابل قبولی برای تعیین دانسیته مخلوط لایه‌های خاکی برخوردار است.
- صاحب‌نظران صنعت روسازی و کاربران دستگاه‌های تعیین دانسیته مخلوط‌های آسفالتی، به دلایل فوق‌الذکر و مخصوصاً خطر منبع رادیواکتیو دستگاه علاقه‌مند به استفاده از تجهیزات جایگزین برای این دستگاه می‌باشند.
- تنها روش کاملاً صحیح و مطمئن برای تعیین دانسیته قطعی روسازی، مغزه‌گیری و تعیین دانسیته مغزه‌ها در آزمایشگاه می‌باشد.

- همچنین در ارتباط با دستگاه‌های غیرهسته‌ای تعیین دانسیته، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
- در مورد دستگاه‌های الکترومغناطیسی استفاده از سیگنال‌های الکترومغناطیسی این مزیت را نسبت به دستگاه‌های هسته‌ای دارد که نیاز به آموزش‌های ویژه کاربر، مدرک یا مجوز کار با دستگاه و خطر تشعشعات رادیواکتیو را منتفی می‌سازد. اما با این حال قبل از پذیرفتن هر تکنولوژی جدیدی برای تعیین دانسیته مخلوط آسفالتی، نیاز مبرم به ارزیابی آن در دو وضعیت آزمایشگاهی و میدانی تحت شرایط کنترل شده وجود دارد.
- گرچه هر دو دستگاه PQI و پیوتراکر دقت دستگاه دانسیته‌سنج هسته‌ای مورد استفاده را نداشتند اما از طرف دیگر مزایای مرتبط نبودن با قواعد مربوط به منابع رادیواکتیو دستگاه هسته‌ای و نیز توانایی برداشت چندتایی در مدت زمان کوتاهی، آنها را برای کنترل کیفیت دانسیته روسازی در طول دوره ساخت مورد توجه بیشتر قرار می‌دهد.
- کالیبراسیون این دستگاه‌ها برای مصالح شرایط محلی در رسیدن به نتایج صحیح بسیار مهم می‌باشد. در هر جای ممکن، کالیبراسیون با استفاده از یک مقطع آزمایش باید صورت گیرد. اما فرضیات موجود براساس اطلاعات و تجربیات در دسترس در مورد مصالح محلی و مصرفی می‌تواند به میزان قابل توجهی در افزایش دقت و صحت نتایج تاثیرگذار باشد.
- هر دو دستگاه PQI و پیوتراکر، تجهیزات مناسبی برای کنترل دانسیته مخلوط آسفالتی در طول دوره اجرا می‌باشند. هر دو دستگاه قابلیت برداشت نتایج سریع به منظور تعیین نقاط با دانسیته کم و داده های پرت و همچنین انجام اقدامات اصلاحی را دارند.
- تغییرات در میزان رطوبت، دانه‌بندی، منبع تأمین مصالح و اختلاف دمای بین مصالح شاهد و روسازی که مدنظر اندازه‌گیری است، بر روی درستی قرائت‌ها تاثیر می‌گذارند.
- سازندگان دستگاه PQI توصیه کرده‌اند در صورت بالا بودن درصد آب موجود در مخلوط، برداشت و قرائت صورت نگیرد. این در حالی است که عدد خاصی را برای میزان آب بالا توصیه نکرده‌اند ولی بنابر نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی این عدد بالاتر از ۵ درصد بنظر می‌رسد.
- عدد آب نشان داده شده در نمایشگر دستگاه شاخص خوبی برای تعیین حد رطوبت بنظر می‌رسد.
- در بیشتر موارد کاهش دما باعث افزایش در مقدار دانسیته محاسبه شده توسط دستگاه PQI .
- ضروری است که دستگاه با یک مقطع روسازی (یا دال) که دانسیته آن مشخص است و از همان مصالحی که برای روسازی هدف، مدنظر ساخته شده، کالیبره شود. براساس نتایج مطالعات میدانی ۲۰۰۱، نتیجه گرفته شد که به منظور استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری غیرهسته‌ای برای بدست آوردن دانسیته روسازی، ضروری است تا کالیبراسیون تجهیزات بر مبنای مقادیر دانسیته شناخته‌شده و مصالح مشابه بکاررفته در روسازی انجام شود.
- بازخورد فوری بدست آمده توسط هر دو این تجهیزات، کمک به تشخیص مکانهای با دانسیته پایین در روسازی می‌باشد و سپس عملیات اصلاح به منظور روسازی یکنواخت انجام شود.
- کالیبراسیون دستگاه PQI برای شروع هر کار جدیدی می‌بایست صورت گیرد و از اهمیت بالایی برخوردار است و برای هر نوع آسفالت کالیبراسیون مربوط به همان نوع آسفالت می‌بایست صورت گیرد.

- در حین برداشت با دستگاه تماس حاصل نکنید چون باعث بروز خطا در قرائت‌های دستگاه می‌شود.
- توصیه می‌شود برای تعیین مقادیر دانسیته یک سطح آسفالتی، از داده‌برداری در محل‌هایی که در لبه اجرایی کار توسط فینیشر قرار می‌گیرند خودداری بعمل آورید زیرا مقادیر دانسیته در این محل‌ها کمتر از مقادیر دانسیته در دیگر نقاط است و لذا باعث ایجاد خطا و تردید در مورد کل سطح می‌شود.
- هوای بارانی و درصد رطوبت زیاد روسازی باعث بروز خطا در مقادیر قرائت‌شده توسط PQI می‌شوند.
- باید در نظر گرفت که PQI از کارایی مناسب برای تعیین نقاط با تراکم نامناسب از جمله لبه‌های کار برخوردار است و بعنوان ابزاری مناسب برای پیمانکاران بمنظور کنترل عملیات تراکم پیشنهاد می‌شود.
- تنها روش کاملاً صحیح و مطمئن برای تعیین دانسیته قطعی روسازی، مغزه‌گیری و تعیین دانسیته مغزه‌ها در آزمایشگاه می‌باشد.

با توجه به موارد جمع‌بندی شده برای دستگاه‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای تعیین دانسیته، توصیه می‌شود برای ارتقای اجرای راه‌های آسفالتی در داخل کشور، پیمانکاران این حوزه به تکنولوژی‌های ارزان و کارآمد غیرهسته‌ای مانند دستگاه PQI، مجهز گردند. این دستگاه‌ها به عنوان ابزار کنترل کیفیت اجرا، این امکان را به پیمانکاران و ناظران می‌دهند تا به صورت سریع و ایمن، دانسیته روسازی را اندازه‌گیری تعیین و کنترل نمایند.

همچنین توصیه می‌گردد در استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب معرفی شده در این راهنما برای ارزیابی، کنترل کیفیت و یا تضمین کیفیت مشخصات روسازی، اهمیت پروژه در نظر گرفته شده و صحت نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی کنترل شود. لذا لزوم اعتبارسنجی نتایج آزمایش‌های غیرمخرب براساس اهمیت پروژه‌ها قطعی است. بکارگیری آزمایش‌های غیرمخرب برای کنترل کیفیت دارای اعتبار قابل قبولی است، اما برای تضمین کیفیت می‌بایست با احتیاط عمل شود.





---

مراجع



## مراجع

- ۱- عامری - محمود و افتخارزاده - سید فرهاد ، " مدیریت روسازی برای راه ها ، فرودگاه ها ، پارکینگ ها " ، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ، ۱۳۷۸ ،
- 2- U.S Department of transportation , " Use of Non-Destructive Testing in the Evaluation of Airport Pavement " , AC NO: 150/5370-11A, 2007
- ۳- زمانی مرتضوی - شهروز ، " تعیین ضرایب الاستیسیته لایه های مختلف روسازی با استفاده از آزمایش FWD " ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه تربیت مدرس ، استاد راهنما دکتر کاوسی ، ۱۳۸۱
- 4- Huang H. , " Pavement Analysis and Design " ,University of Kentucky, Prentice Hall Inc., 199
- 5- Christopher R.Bennett, "Comparison of Loadman and Benkelman Beam Deflection Measurements " , India, 1994
- ۶- پژوهشکده حمل و نقل، " روش های نوین تعیین مشخصات و ارزیابی روسازی راه "، دکتر منصور فخری، ۱۳۸۵
- 7- MAIN ROADS Western Australia, "Pavement Deflection and Curvature: Benkelman Beam Test", Test Method WA326.1, Australia, 2001
- 8- U.S. Department of Transportation, "Use of Nondestructive 2004 Testing in the Evaluation of Airport Pavement", AC No.150/5370.
- ۹- عامری ، محمود، "مدیریت نوین روسازی" ، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری ، بهار ۱۳۸۸
- 10- MATEST S.r.l., "Instruction Manual Calibration Device", Italy, 2001
- ۱۱- آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (نشریه ۲۳۴)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، معاونت امور فنی، وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۲
- 12- AASHTO , "Guide for Design of Pavement Structures , Volume 1", Washington D.C. , 1986
- 13- U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE BUREAU OF PUBLIC ROADS and MINNESOTA LOCAL ROAD RESEARCH BOARD, STATE OF MINNESOTA DEPARTMENT OF HIGHWAYS, "FLEXIBLE PAVEMENT EVALUATION WITH THE BENKELMAN BEAM", 1983
- 14 -Weidleplan Consulting GmbH, Gerd-Dieter Schmidt, "Pavement Evaluation Runway, Intersection and Apron", Utrecht, 20 October 1998
- 15- ASTM D4694, "Standard Test Method for Deflections with a Falling Weight Type Impulse Load Device" , 1987.
- ۱۶- " معرفی دستگاه های کاربردی در سیستم مدیریت روسازی راه، فرودگاه، HWD، RSP، FWD " ، سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۸۱
- 17- Yang H. H. , Pavement Analysis & Design , University of Kentucky , Prentice – Hall Inc. , 1993
- 18- Uzan, J., "Advanced Back Calculation Techniques", "Nondestructive Testing of Pavement and Back Calculation of Moduli, Second Volume", Philadelphia, USA, 1994
- ۱۹ - طباطبائی، امیر محمد، روسازی راه، مرکز نشر دانشگاهی ، ۱۳۷۶
- ۲۰- دامیار، بهروز، "تعیین عمر باقیمانده و طرح روکش روسازی راه با استفاده از دستگاه FWD و نرم افزار ELMOD " ، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران حمل و نقل، استاد راهنما دکتر حسن زیاری، ۱۳۸۳
- 21- U.S. Transportation Research Board, NCHRP 381, "Falling Weight Deflectometer Usage", 2008
- 22- European Commission, COST Action 336 "Calibration of Falling Weight Deflectometer", Task Group 3, Netherlands, 2006
- 23- Romanoschi . S. , Simple Approach to Estimation of Pavement Structural Capacity , TRR, No 1652, PP 198- 205, 1999
- 24- Rodhe. G. T. , Determining Pavement Structural Number from FWD Testing , Transportation Research Record, No 1448 , PP 61- 68 , 1996
- 25- AASHTO, "Guide for Design of Pavement Structure", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1993
- 26- Rada .G. , SHRP'S Layer Moduli Backcalculation Procedure, Nondestructive Testing of Pavements and Back Calculation of Moduli , Second Volume , Philadelphia, 1994

- 27- Chai .G. and Faisal,H. A. , Determination of the Stiffness Modulus and Density of a Pavement Foundation Using Falling Weight Deflectometer During Pavement Construction, 10th REAAA Conference ,Tokyo, Japan , 2000.
- 28- U.S. Federal Highway Administration (FHWA), "Pavement Preservation Compendium 2", 2006
- 29- NCHRP Synthesis No.626, "NDT Technology for Quality Assurance of HMA Pavement Constructions", TRB Synthesis Studies, 2009
- 30- SHRP 2, "A Plan for Developing High-speed, Nondestructive Testing Procedures for Both Design, Evaluation and Construction Inspection pavement Needs", reports2-R06-rw, 2009
- 31- Douglas Steele, Development of High – Speed Rolling Wheel Deflectometer ", Applied Research Associates, U.S.A, 2006
- ۳۲- کاظمی، حامد، "مقایسه نتایج آزمایش غیرمخرب FWD و نتایج آزمایش‌های مخرب آسفالت در طراحی روکش‌های آسفالتی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما دکتر حسن زیاری، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۶
- 33- Shahin, M.Y., "Pavement Management for Airport Roads and Parking Lots", Great Britain, Champon and Hall Publishing, 1992
- 34- ASTM D4695,"Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements", 2001
- 35- FWD Project Level Guides, Dynatest Company, 2003
- 36- Evaluation of The PQI (Pavement Quality Indicator)- Thomas Karlsson Skanska Asphalt and Concrete Technology Region.
- 37- TransTech Systems' Pavement Quality Indicator (PQI), Application Brief, Jan 2003
- 38- Pavement Quality Indicator Model 301, Operator's Handbook, TransTech Systems, Inc.1594 State Street, Schenectady, NY 12304 USA
- 39- TransTech Systems (2003), "Effect of Water and Temperature on Hot Mix Asphalt Density Measurement using Electromagnetic Sensing," Technical Note 0301, January 15.
- 40- FHWA, "Evaluation of Non-Nuclear Methods for Compaction Control," FHWA/TX-06/0-4835-1, July 2006
- 41- ASTM D2950- ASTM D2950-05 Standard Test Method for Density of Bituminous Concrete in Place by Nuclear Methods.
- 42- Burati, J. L., and Elzoghbi, G. B. ,1987, "Correlation of Nuclear Density Results with Core Densities", Transportation Research Record, 1126, Transportation Research Board, PP. 53-67.
- ۴۳- حامد خانی سانیچ، ۲۰۰۴، ارزیابی روش‌های غیرمخرب هسته‌ای در تعیین دانسیته روسازی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران
- 44- Livneh, M., "The Relationship Between In Situ CBR Test and Various Penetration Test", Proceedings of the First Symposium on Penetration Testing, Orlando, Florida, A.A. Balkenma Publishers, Rotterdam, Netherland, 1988.
- 45- ASTM D2922- ASTM D2950-96, "Standard Test Method for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods.
- 46- "Annual Book of ASTM Standard", 1999, Road and Paving Materials Traveled Surface Characteristics Volume 04.03
- 47- Sully-Miller Contracting Company Quality Control Department, "A SUMMARY OF OPERATIONAL DIFFERENCES BETWEEN NUCLEAR AND NON-NUCLEAR DENSITY MEASURING INSTRUMENTS", OCTOBER 2000
- 48- ASTM D 3665 – 99-" Standard Practice for Random Sampling of Construction Materials"
- 49- Manual of Operation and Instruction, Model 2701 PaveTracker, Troxler Electronic Laboratories, Inc.
- 50- Thomas Karlsson Skanska Asphalt and Concrete Technology Region, 2003, EVALUATION of The PQI (Pavement Quality Indicator)
- 51- FHWA," Evaluation of Non-Nuclear Methods for Compaction Control", FHWA/TX-06/0-4835-1, Federal Highway Administration, July 2006
- 52- ASTM D4632, "Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation", 1999
- 53- A.P. Annan, "Ground Penetrating Radar; Workshop Notes", Canada, 1998
- 54- Kentucky Transportation Center, "Investigation of the Extended Use of Ground Penetrating Radar (GPR) for

- Measuring In-situ Material Quality Characteristics, Research Report KTC-08-31/SPR 307-05-IF, 2008
- 55- "Effect of Water and Temperature on Hot Mix Asphalt Density Measurement Using Electromagnetic Sensing", by TransTech Systems Inc, 2003
- 56- NCHRP Synthesis No.255, "Ground Penetrating Radar for Evaluating Sub-Surface Conditions for Transportation Facilities", TRB Synthesis Studies, 1998
- 57- W.M. KIM Roddis, Kenneth Maser, and Andrew J. Gist, "Radar Pavement Thickness Evaluations for Varying Base Conditions", Transportation Research Record, 2000
- 58- Kleyn, E. G., Van Van Zyl, G. D., "Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) to Light Pavement Design", Proceedings of the First Symposium on Penetration Testing, Orlando, Florida, A.A.Balkema Publishers, Rotterdam, Netherland, 1988, pp. 435-444.
- 59- Jones C R and J Rolt (1991). Operating instructions for the TRL dynamic cone penetrometer (2nd edition). Information Note. Crowthorne: Transport Research Laboratory.
- 60- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1993). AASHTO guide for design of pavement structures. Washington DC: AASHTO
- 61- Kleyn, E. G. "The Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)", Report 2/74, Transvaal Roads Department, Pretoria, South Africa, July 1975, p. 35.
- 62- KHEDR, S.A., KRAFT, D.C., and JENKINS, J.L., Automated Cone Penetrometer: A Nondestructive Field Test for Subgrade Evaluation. Transportation Research Record 1022.
- 63- KHEDR, S.A., KRAFT, D.C., and JENKINS, J.L., Automated Cone Penetrometer: A Nondestructive Field Test for Subgrade Evaluation. Transportation Research Record 1022.
- 64- Ayers, M. E., "Rapid Shear Strength of in Situ Granular Materials Utilizing the Dynamic Cone Penetrometer", Ph.D. Theses, University of Illinois, Urbana, IL, 1990
- 65- Colin Jones, "Improved Measurement of Pavement Strength by Dynamic Cone Penetrometer", PROJECT REPORT PR/INT/277/04, TRL, UK, 2004.
- 66- Robert Schmitt, May 2006, Non-Nuclear Density Testing Devices and Systems to Evaluate In-Place Asphalt Pavement Density, University of Wisconsin-Platteville.
- 67- Standard Test Procedures Manual, "DYNAMIC CONE PENETROMETER", FOUNDATION INVESTIGATION Section, Saskatchewan Highway and Transportation, STP 240-20, 1992
- 68- Piouslin Samuel and Simon Done, TRL, "DCP analysis and design of low volume roads by new TRL software UK DCP", November 2005
- 69- Sawyer - Doug Ledford - Johnny Gilliam - David Dunn - Scotty Jarman, 2004, Field Investigation: Evaluation of Non-Destructive Density Testing Devices on Hot Mix Asphalt, North Carolina Department of Transportation Division of Highways – Materials and Tests Unit.

۷۰- پژوهشکده حمل و نقل، "چارچوب سیستم مدیریت روسازی راه‌ها در ایران"، ۱۳۸۷

۷۱- پژوهشکده حمل و نقل، "تعیین حدود شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) برای راه‌های ایران"، دکتر منصور فخری، ۱۳۸۷

**Islamic Republic of Iran  
Plan and Budget Organization**

# **Guideline for Nondestructive Testing of Highway Pavements**

**No. 722**

Office of Deputy for Technical and  
Infrastructure Development Affairs

Department of Technical and  
Executive Affairs

**Nezamfanni.ir**

The Ministry of Road & Urban Development

Road, Housing & Urban Development  
Research Center

**bhrc.ac.ir**

**2017**