

## ارائه معادلات همبستگی بین دستگاه های افتوخیزسنج

\*حسن زیاری، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران  
\*\*احسان مستوفی افشار، کارشناس ارشد برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

امروزه در تمام نقاط دنیا و حتی کشورهای در حال توسعه روشهای بهسازی و ترمیم روسازیهای بتنی و آسفالتی دچار تحول شده و این گونه عملیات کاملاً بر پایه علمی و نتایج دقیق آزمایشگاهی استوار است. یکی از روشهای مطمئن و مناسب جهت تعیین وضعیت سازه‌های روسازی آزمایشات غیرمخرب<sup>۱</sup> می‌باشد. اینگونه از آزمایشات با سرعت برداشت و قابلیت اطمینان بالا، بدون ایجاد خرابی فیزیکی و اختلال کمتر در ترافیک راه ارزیابی مناسبی از روسازی راه به متخصصین می‌دهد.

به علت خلاء موجود در بحث مدیریت روسازی در ایران و عدم آشنایی مهندسان عمران بخصوص مهندسان راهسازی با ابزار و تجهیزات ارزیابی روسازی که در سالیان اخیر پیشرفت چشمگیری داشته‌اند، نیاز به یک بررسی و معرفی جامع از این تجهیزات احساس می‌شود. در این مقاله به معرفی دستگاههای افتوخیزسنج و نکات مثبت و منفی آنها و معادلاتی که بین افتوخیزهای آنها حاکم می‌باشد، پرداخته می‌شود.

واژگان کلیدی: روسازی، آزمایشات غیرمخرب، افتوخیز، دستگاه FWD، دستگاه Benkelman

### (۱) مقدمه

یکی از روشهای قابل اعتماد موجود، برای تعیین وضعیت سازه‌های روسازی تحت سرویس، آزمایش غیرمخرب برای تعیین افتوخیز می‌باشد. آزمایش غیرمخرب دو برتری عمده برآزمایش مخرب دارد. اولاً اینکه آزمایش مخرب با ایجاد خرابی در لایه‌های روسازی و لزوم حمل مصالح به آزمایشگاه جهت آزمایش، انجام می‌شود. درحالیکه آزمایش غیرمخرب یک آزمایش در جاست و روسازی بدون هرگونه دستخوردگی و یا تغییر مصالح، ارزیابی می‌شود. ثانیاً مزیت آزمایش غیرمخرب در آنستکه سریع و کم هزینه بوده و اغلب به خاطر آنکه در روند ترافیک اختلال کمتری ایجاد می‌کند، امکان

\* تلفن: ۰۲۱-۷۴۵۴۰۵۳، پست الکترونیکی: H.Ziari@iust.ac.ir

\*\* تلفن: ۰۲۱-۲۳۴۳۶۵۶۸، پست الکترونیکی: Emostoufi@civil.iust.ac.ir

<sup>2</sup> Non Destructive Testing

انجام آزمایش بطور کامل فراهم می‌شود. در این آزمایش، بارهایی بر روسازی وارد می‌شود و پاسخ روسازی که معمولاً "خیز است را اندازه می‌گیرد. با داشتن اطلاعات خیز، پی به ظرفیت سازه‌ای و باربری روسازی می‌بریم. اصولاً تکنیک‌های اندازه‌گیری خیز به طور گسترده برای ارزیابی راه‌ها به کار می‌روند.

## ۲) نقاط قوت و ضعف آزمایش غیر مخرب

مزایای این آزمایشات بسیار بیشتر از نقاط ضعف آن است. دو نقطه ضعف عمده به صورت زیر وجود دارد:

الف) اگر چه **NDT** یک ابزار قوی ارزیابی روسازی است، اما فقدان یک تکنیک تحلیلی برای تعیین مستقیم خصوصیات مصالح احساس می‌شود. از اینرو تکنیک‌های تکراری برای محاسبه مدول لایه‌ها به روش محاسبه معکوس ابداع گردیده‌اند. در محاسبه معکوس پاسخ روسازی به بارگذاری بار وارده را آنقدر تغییر می‌دهند تا اینکه پاسخ‌های محاسباتی و پاسخ‌های اندازه‌گیری شده یکسان شوند. منظور از پاسخ، افت‌وخیز لایه‌های روسازی تحت بار شبیه‌سازی شده ترافیکی واقعی از روسازی است.

ب) استفاده از **NDT**، به تنهایی نمی‌تواند نتایج کاملاً دقیق در اختیار بگذارد. باید به همراه آن یک سری آزمایشات مخرب نیز، انجام داد تا بتوان به درستی ظرفیت باربری روسازی و مشخصات مصالح را یافت.

در کنار این نقاط ضعف، نقاط قوت فراوانی نیز وجود دارد که شامل سرعت عمل در انجام آزمایشات، کم هزینه بودن به نسبت تعداد آزمایشی که انجام می‌شود (بر روی **fwd** در هر ساعت حدود ۶۰ آزمایش انجام می‌شود، در حالیکه هر آزمایش **CBR** بین نیم تا یک ساعت زمان می‌برد) و اختلال کمتر در جریان ترافیکی راه، به همراه اطلاعات فراوانی که از روسازی ارائه می‌کند، باعث شده که این آزمایشات بیشترین کاربرد را در عملیات مهندسی روسازی و سیستم‌های مدیریت روسازی<sup>۱</sup> داشته باشند.

## ۳) انواع تجهیزات غیرمخرب سنجش خیز

بر اساس نوع و روش بارگذاری اعمالی، انواع مختلف دستگاهها ابداع شده‌اند که عبارتند از:

۱-۳) استاتیکی

<sup>1</sup> Pavement Management System

۳-۲) ارتعاشي ( دینامیکی حالت پایدار )

۳-۳) ضربه ای

### (۳-۱) تجهیزات افت و خیز سنج استاتیکی<sup>۱</sup>

این دستگاهها میتوانند بارهای استاتیکی و دینامیکی بر رویه روسازی وارد کرده و خیزها را اندازه‌گیری کنند. انواع مختلف این دستگاهها شامل تیربنکلمن، صفحه باربر، تیربنکلمن اتوماتیک، متر خمیده و انخنا سنج هستند.

#### (۳-۱-۱) تیربنکلمن

این وسیله ساده که توسط شخصی به همین نام برای اندازه‌گیری افت و خیز روسازیها ابداع شده برای اولین بار در آزمایشات WASHO2 مورد استفاده قرار گرفت، وسیله‌ای ساده و در عین حال بسیار سودمند برای اندازه‌گیری افت و خیز روسازیها است. در شکل (۳-۱-۱-۱) نمونه‌ای از دستگاه تیربنکلمن که در حال استفاده می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل (۳-۱-۱-۱) تیر بنکلمن - دستگاه افت و خیز سنج استاتیکی [۴]

### (۳-۲) تجهیزات افت و خیز سنج ارتعاشی<sup>۳</sup> : ( دینامیکی حالت پایدار )

تمامی این دستگاهها به روش مشابه کار می‌کنند. یک پیش بارگذاری استاتیکی نسبتاً زیاد بر روی روسازی وارد شده و یک ارتعاش سینوسی توسط یک مولد نیروی دینامیکی ایجاد می‌شود. مولدهای نیروی دینامیکی میتوانند الکترومکانیکی یا الکتروهیدرولیکی باشند. سیستم الکترومکانیکی برای تولید بار ارتعاشی، جرمهای دوار مخالف جهت یکدیگر را به کار می‌برد. [1]

<sup>1</sup> Static device

<sup>2</sup> Western Association of State Highway officials

<sup>3</sup> Vibratory device (steady - state dynamic)

### ۳-۲-۱) داینا فلکت<sup>۱</sup>

این دستگاه یکی از ابتدایی‌ترین وسایل تجاری سنجش افت‌وخیز به صورت دینامیکی حالت پایدار می‌باشد این وسیله به یک تریلر نصب شده و می‌تواند توسط یک اتومبیل با وزن و ابعاد استاندارد یدک کشیده شود. شکل (۳-۲-۱-۱) نمونه‌ای از دستگاه داینافلکت را در حال برداشت، نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲-۱-۱) داینافلکت در موقعیت آزمایش<sup>[۲]</sup>

طبق مطالعات سازمان حمل و نقل واشینگتن آمریکا ۲ همبستگی بین افت‌وخیز ناشی از تیر بنکلمن و افت‌وخیز زیر مرکز صفحه بارگذاری دستگاه داینافلکت مطابق رابطه (۳-۲-۱-۱) بدست آمده است.

$$BB = ۳۰/۶۳ (D)$$

رابطه (۱)-

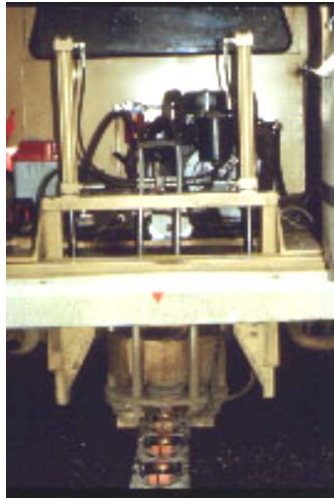
$BB =$  افت و خیز تیر بنکلمن (۰/۰۰۱ اینچ)  $=D$  افت و خیز زیر صفحه بارگذاری دستگاه داینافلکت (۰/۰۰۱ اینچ)

### ۳-۲-۲) Road Rater

این دستگاه یک نوع لرزاننده الکترو هیدرولیکی می‌باشد که با هدایت یک وزنه به سمت بالا و پایین ایجاد ارتعاشی می‌نماید (شکل (۳-۲-۲-۱)). این وسیله قادر است بارهایی با مقادیر و فرکانس متفاوت بر روسازی وارد نماید. مقدار بار استاتیکی با تغییر وزن تریلر، تغییر می‌کند. برای تولید نیروی دینامیکی، یک جرم به صورت هیدرولیکی بالا و پایین برده می‌شود.

<sup>1</sup> Dynaflect

<sup>2</sup> Department Of Transportation of Washington



شکل (۱-۲-۳) نمایی از دستگاه ROAD RATER [۴]

در تحقیقاتی که در سال ۱۹۸۱ توسط **Hoffman** و **Thompson** انجام گرفته است، بین نتایج افتوخیز دستگاه بنکلمن که تحت نیروی ۹۰۰۰ پوند ناشی از کامیون با محور مرکب و فشار چرخ **psi** ۷۰-۸۰ است و افتوخیز دستگاه **road rater** که تحت نیروی دینامیکی با دامنه ۸۰۰۰ پوند و فرکانس ۱۵ هرتز در زیر صفحه بارگذاری با شعاع ۱۲ اینچ، وابستگی مطابق رابطه (۱-۲-۳) وجود دارد.

رابطه (۱)

$$BB = 2/75 + 1/27 (RR)$$

در این رابطه:

**BB** = افتوخیز تیر بنکلمن (۰/۰۰۱ اینچ)، **RR** = افتوخیز زیر صفحه بارگذاری دستگاه **road rater** (۰/۰۰۱ اینچ)

در میان ابزارهای ارتعاشی، **Road Rater** به سبب امکان تغییر در فرکانس بارگذاری و نیروهای دینامیکی و استاتیکی وارده، مناسبتر است. چون با تغییر در نرخ بارگذاری و اعمال بارهای نزدیک به بار طرح، از خطاهای حاصل از درونیایی و برونایی مقادیر خیز در مصالح روسازی که اغلب غیرخطی هستند، جلوگیری میشود. همچنین با تغییر در نرخ فرکانس بارگذاری و اعمال چندین فرکانس بار در یک نقطه، میتوان به وجود بستر سخت زیر لایه‌های روسازی با مشاهده اغتشاش به وجود آمده در پاسخ خروجی پی‌برد.

### ۳-۳) تجهیزات افت و خیز سنج ضربه‌ای<sup>۱</sup>

این وسایل معمولاً "یک جرم را که برصفحه بارگذاری سقوط میکند، برای اندازه‌گیری افت و خیز لایه‌های روسازی به

<sup>۱</sup> - Impulse Devices

کارمی‌برند [1]. تجهیزات ضربه ای عمدتاً " از تکنیک سقوط وزنه ای سود برده و به نام **FWD** مشهور هستند. تغییر در ماکزیم بار وارده توسط تغییر در مقدار جرم و ارتفاع سقوط حاصل می‌شود. خیزهای ماکزیم در مرکز صفحه بارگذاری و چند نقطه به فواصل معین از صفحه اندازه‌گیری شده و به صورت حوضچه خیز نشان داده می‌شوند که برای ارزیابی روسازی و تعیین ظرفیت باربری و تغییر عملکرد روسازی تحت بارهای وارده استفاده می‌شوند. نمونه ای از مدل **FWD Dynatest** در شکل (۳-۳-۱) نشان داده شده است.



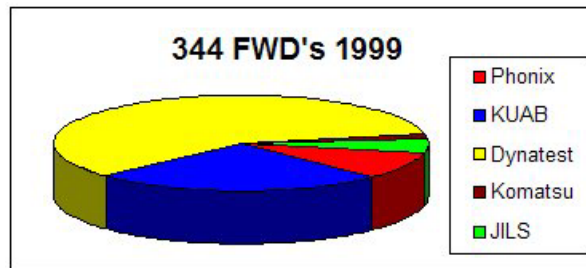
شکل (۳-۳-۱) یک مدل **Dynatest FWD** دستگاه افت و خیز سنج ضربه ای [۳]

این دستگاه در دانمارک ابداع شد و امروزه به صورت گسترده تر در آمریکا و کانادا و سراسر جهان به کار گرفته می‌شود و برای تحقیقات **LTPP**<sup>۱</sup> توسط **SHRP**<sup>۲</sup> برگزیده شده است. جرم سقوطی یک پالس نیرو در روسازی ایجاد می‌کند که به شکل یک موج نیم سینوس است. شکل پالس بار و تداوم آن تاثیر مهمی در خیزهای اندازه‌گیری شده توسط این دستگاه دارد. می‌توان شکل و تداوم بارگذاری را توسط صفحات بارگذاری چند تکه و یا استفاده از پدال لاستیکی آجدار زیر صفحه بارگذاری و سیستم بارگذاری دو جرمی در برخی مدلها، به شکل دخواه درآورد [۲]. پنج مدل مختلف این دستگاه عبارتند از: **Phonix, KUAB, Dynatest, Komatsu** و **JILS** که در شکل (۳-۳-۲) نشان داده شده‌اند.

<sup>2</sup> - Falling Weight Deflectometer

<sup>1</sup> - Long Term Pavement Performance

<sup>2</sup> - Strategic Highway Research Program



شکل (۲-۳-۳) انواع مدل‌های دستگاه FWD [۵]

همانطور که در شکل (۲-۳-۳) مشخص می‌باشد بیشترین دستگاه افتوخیز سنج که در دنیا رایج است از نوع دایناتست می‌باشد. بطوریکه در سال ۱۹۹۹ بیش از نیمی از دستگاه‌های بکار رفته از این نوع محصول شرکت دایناتست بوده است. این مطلب خود نشان دهنده دقت بالا و مقبولیت این دستگاه می‌باشد.

در سال ۱۹۸۳-۱۹۸۲ تحقیقاتی در زمینه ارتباط و وابستگی بین نتایج دستگاه FWD و تیربنکلمن توسط موسسه حمل‌ونقل واشینگتن آمریکا انجام گرفت. در این بررسیها افتوخیز ناشی از تیربنکلمن تابعی از افتوخیزهای زیرصفحه بارگذاری دستگاه FWD بدست آمد. افتوخیز در دستگاه FWD در زیر صفحه‌ای به شعاع ۱۱/۸ اینچ و نیروی ۹۰۰۰ پوند بدست می‌آید. رابطه (۲-۴-۱-۳) این ارتباط را نشان می‌دهد. [۲]

$$BB = 1/33269 + 0/93748 (FWD) \quad \text{رابطه (۲-۴-۳) (۱)}$$

در این رابطه:

$BB =$  افت و خیز تیر بنکلمن (۰/۰۰۱ اینچ)،  $FWD =$  افت و خیز زیر صفحه بارگذاری دستگاه FWD (۰/۰۰۱ اینچ) در این تحقیقات ۷۱۳ مقطع مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است.

#### (۴) نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی تجهیزات افتوخیز سنج موجود و مطالعه همبستگی داده‌های این دستگاهها، نتایج زیر بدست آمد: استفاده از آزمایشات غیر مخرب و بخصوص دستگاههای افتوخیزسنج راهکار موثری جهت ارزیابی و انتخاب روش ترمیم و نگهداری مناسب روسازیهای آسفالتی و بتنی می‌باشد. دیگر آنکه با توجه به اینکه در آئین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران از دستگاه تیر

بنکلمن جهت طراحی روکش تقویتی استفاده شده است، لذا می‌توان با استفاده از نتایج دستگاه‌های دیگر و تبدیل افت‌وخیزها به افت‌وخیز معادل تیر بنکلمن از روابط آیین‌نامه استفاده نمود.

## ۵) مراجع

[۱] عامری، محمود و افتخارزاده، سیدفرهاد، مدیریت روسازس برای راهها، فرودگاهها و پارکینگها، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۷۸

[۲] مستوفی افشار، احسان، کالیبراسیون نتایج دستگاه FWD با مطالعه موردی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۳

[۳] دامیار، بهروز، معرفی نرم‌افزار ارزیابی روسازی ELMOD، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۳

[4] Jansson, H., A Simple Structural Index Based on FWD Measurement. Proceedings from the 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Minneapolis, Minnesota, USA, pp 457-466, 1994

[5] Pavement Evaluation by FWD, Kars, Drenth, 2000