

## مطالعه عددی و میدانی ارتباط میان سختی استاتیکی و دینامیکی خطوط ریلی بالاستی

مرتضی اسماعیلی، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

جبارعلی ذاکری، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حسین اسدی جرتوده، دانش آموزخته کارشناسی ارشد، واحد تحصیلات تکمیلی دانشگاه آزاد اسلامی تهران جنوب، تهران، ایران

فاطمه خطیبی (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: f\_khatibi@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۲۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۲

### چکیده

سختی قائم خط از پارامترهای مهم و کاربردی در تعیین کیفیت خطوط بالاستی است. نیروهای دینامیکی وارد بر سازه خط، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار سختی خط دارند؛ از این رو شاخص سختی خط در دو حالت استاتیکی و دینامیکی تعریف می‌گردد. سختی استاتیکی خط با آزمایش بارگذاری صفحه<sup>۱</sup> (PLT) و سختی دینامیکی با آزمایش افت و خیز سنج ضربه‌ای سبک<sup>۲</sup> (LWD) قابل اندازه‌گیری است. انجام آزمایش PLT مستلزم صرف زمان نسبتاً زیاد و احیانا مسدودی خط است؛ در حالی که آزمایش LWD با سرعت بیشتری صورت می‌پذیرد. از طرفی معیار کنترل سختی خط در آئین‌نامه‌ها و استانداردها، سختی استاتیکی است؛ بنابراین در این پژوهش با انجام آزمایش‌های PLT و LWD در محل و با کمک رگرسیون خطی میان نتایج، ارتباط میان سختی استاتیکی و دینامیکی خط کمی‌سازی شده است. به‌صورتی که با انجام آزمایش LWD می‌توان نتیجه تست PLT را استخراج کرد. به منظور بررسی تغییر سختی خط پس از عملیات اصلاح تراز، این آزمایش‌ها در شرایط قبل و بعد از زیرکوبی انجام گرفته‌اند. همچنین نتایج آزمایش‌ها به همراه یک مدل عددی اجزای محدود برای تعیین سختی لایه بالاستی مورد استفاده قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: خطوط بالاستی، سختی استاتیکی، سختی دینامیکی، زیرکوبی، آزمایش بارگذاری صفحه، آزمایش افت و خیز سنج ضربه‌ای، مدل عددی اجزای محدود.

## ۱. مقدمه

از جمله پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار خطوط بالاستی راه آهن، سختی استاتیکی این خطوط است. این پارامتر ارتباط مستقیمی با سطح عملکرد و ایمنی خط آهن و همچنین حجم عملیات تعمیر و نگهداری مورد نیاز دارد. در صورتی که سختی بستر ریل کم باشد، نشست خط زیاد خواهد شد. در صورتی که تغییرات سختی بستر در طول محدود و مشخصی از خط زیاد باشد؛ نشست های تفاضلی به وجود می آید و انجام عملیات تعمیر و نگهداری برای اصلاح تراز قائم خط ضروری خواهد بود. افزایش ناگهانی سختی خط، مانند آن چه که معمولاً در محل خاکریز دسترسی پل ها اتفاق می افتد، نیروهای دینامیکی وارد بر خط را افزایش داده و در نتیجه عمر اجزای خط و در طول دوره های تعمیر و نگهداری کاهش می یابد.

کاهش سختی خط، باعث می شود که ریل نسبت به خط، مانند یک المان صلب عمل کند و سربار وارد بر آن، روی تعداد بیشتری تراورس توزیع گردد. با افزایش سختی خط، المان ریل نسبت به خط، مانند یک المان منعطف عمل نموده و بار بر روی تعداد محدودی تراورس متمرکز می شود. در حالت اول، اجزای روسازی به دلیل وارد شدن بار کوچک تر طول عمر بیشتری دارند، اما در مجموع سازه خط نشست های بزرگ تری خواهد داشت. در حالت دوم سختی زیاد خط مانع از وقوع نشست های پیشرونده می گردد، اما المان های روسازی - به دلیل تمرکز بار زیاد روی آنها - عمر کمتر و دوره تعمیر و نگهداری کوتاه تری خواهند داشت.

یکی از روش های متداول برای اندازه گیری سختی استاتیکی خط، انجام آزمایش بارگذاری صفحه (PLT) است. انجام آزمایش PLT مستلزم صرف زمان نسبتاً زیاد و مسدود نمودن موقتی خط است. این امر، خود مستلزم صرف زمانی برای انجام هماهنگی های لازم با واحدهای مسئول، جهت انجام آزمایش است. امروزه روش های سریع تری جایگزین آزمایش بارگذاری صفحه شده اند؛ اما سختی دینامیکی لایه مورد نظر را اندازه گیری می کنند. از دیدگاه کاربرد، هزینه ها، سهولت در اجرای آزمایش و ... تفاوت های زیادی میان روش های مختلف تعیین سختی وجود دارد. از این رو بسیاری از محققین تلاش نموده اند که

ارتباط میان نتایج آزمایش های مختلف سختی سنجی با یکدیگر را استخراج نمایند. آیین نامه آلمان در سال ۱۹۸۷، رابطه ای را ارائه کرده که با استفاده از آن می توان سختی استاتیکی آزمایش PLT را بر اساس نتایج آزمایش LFW<sup>۳</sup> به دست آورد. در یک پروژه تحقیقاتی، مقایسه سختی استاتیکی و نتیجه آزمایش FWD<sup>۴</sup> نشان داده است که نسبت سختی دینامیکی به استاتیکی بیش از ۰/۱۸ و کوچک تر یا مساوی ۲/۴۴ است [Ali and Khosla, 1987]. این نسبت در تحقیقات دیگری بیش از ۰/۱۸ و کمتر یا مساوی ۱/۳۳ [Newcomb, 1987] و در تحقیق دیگری بیش از ۰/۱ و کمتر یا مساوی ۳/۵ به دست آمد [Von Quintus and Killingworth, 1998]. محققین دیگری نسبت سختی استاتیکی را تقریباً دو برابر سختی دینامیکی آزمایش FWD به دست آورده اند [Chen and Bilyeu, 1998]. در پروژه تحقیقاتی مینه سوتا، سختی لایه سابگرید به صورت آزمایشگاهی اندازه گیری شده و با نتایج تست میدانی FWD مقایسه گردید. نتایج این مقایسه بیانگر ارتباط ضعیف بین دو سختی به دست آمده بود [Van Deusan et al. 1994]. در راستای فرمولاسیون ارتباط میان سختی استاتیکی و دینامیکی، در تحقیقات دیگری رابطه میان نتایج دو تست LFW<sup>۳</sup> و PLT محاسبه شده است [Camargo et al. 2006]. در تحقیقات دیگری از یک آزمایش استاتیکی و دو آزمایش دینامیکی FWD و LWD برای سنجش سختی روسازی راه استفاده شده است. نتایج این بررسیها نشان داد که نتایج تست استاتیکی بیشترین همبستگی را با نتایج تست FWD دارند [Bertulienė, Laurinavičius, and Lapinskienė, 2010]. در تحقیقات دیگری از نتایج تست FWD برای کنترل مدل عددی توسعه یافته برای تحلیل بازگشتی، استفاده شده است [Gopalakrishnan and Papadopoulos, 2011].

با توجه به توسعه استفاده از آزمایش LWD برای کنترل کیفی مراحل اجرای زیرسازی و روسازی جاده ها، تحقیقی برای تخمین جابجایی های اندازه گیری شده در این تست و تعیین محدوده نفوذ تنش در خاک در حین انجام آزمایش، انجام شده است [Benedeto, Tosti and Di Domenico, 2012]. تعیین مدول الاستیسیته خاکریز و لایه سابگرید راه، با استفاده از تحلیل

## مطالعه عددی و میدانی ارتباط میان سختی استاتیکی و دینامیکی خطوط ریلی بالاستی

داده‌های تجربی آزمایش LFWD استفاده شده‌اند. برای کنترل نتایج مدل نیز، از نتایج تست LFWD و همچنین تست CBR استفاده شده است [Benedetto, Amico and Tosti, 2014].

مروری بر تحقیقات صورت گرفته توسط محققین نشان می‌دهد که عمده مطالعات انجام شده در راستای مطالعه لایه‌های زیرسازی و روسازی راه بوده و این آزمایش‌ها در حوزه زیرسازی راه آهن کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. آزمایش LWD به عنوان روشی سریع برای اندازه‌گیری سختی دینامیکی خط و با دارا بودن مزایایی چون وزن کم دستگاه و قابل حمل بودن آن توسط کاربر، برای تعیین سختی دینامیکی خط در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق سه هدف دنبال می‌شود: اول، تعیین رابطه‌ای میان نتایج دو تست LWD و PLT برای خط بالاستی، به صورتی که با تعیین سختی دینامیکی از آزمایش LWD بتوان سختی استاتیکی خط را استخراج نمود. دوم، ارزیابی تغییر سختی خط در شرایط قبل و بعد از عملیات زیرکوبی و سوم، تعیین سختی لایه بالاست با استفاده از نتایج تستهای میدانی و مدل عددی اجزا محدود.

## ۲. معرفی خط تست، تجهیزات و روش آزمایش‌ها

آزمایش‌های تعیین سختی استاتیکی و دینامیکی در این پروژه، در خط فرعی شماره ۱۲ ایستگاه تشکيلاتی آپرین، واقع در جنوب غرب تهران انجام شده‌اند. موقعیت ایستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه شرح مختصری از تجهیزات و مراحل انجام هر یک از دو آزمایش ارائه می‌گردد.

### ۲-۱ آزمایش افت و خیز سنج ضربه‌ای سبک (LWD)

اولین دستگاه افت و خیز سنج ضربه‌ای با نام FWD ابداع شد. دستگاه LWD نمونه سبک و کوچکی است که از تکامل دستگاه FWD به دست آمده است. این دستگاه براحتی توسط اپراتور قابل حمل و جابجایی است و می‌تواند در مدت زمانی کوتاه، مدول الاستیسیته سطحی لایه های غیر چسبنده روسازی را اندازه‌گیری نماید. شماتیکی از دستگاه LWD در شکل ۲ نشان داده شده است.

بازگشتی، بر روی نتایج تست افت و خیز سنج ضربه‌ای قابل حمل PFWD انجام شده است. در این روش یک مدل یک درجه آزادی، برای مدلسازی صفحه بارگذاری و مدل ویسکو-الاستیک برای مدلسازی رفتار خاک بکار رفته است. نتایج تحلیل بازگشتی که مبتنی بر الگوریتم کمینه مربعات بوده، هماهنگی خوبی با نتایج تجربی داشته و بر خلاف ماهیت دینامیکی تست‌های انجام شده، مقادیر مدول الاستیسیته استاتیکی لایه‌ها با دقت خوبی به دست آمده‌اند [Asli et al. 2012]. در مطالعات دیگری از نتایج تست FWD و همچنین تحلیل بازگشتی برای سختی سنجی لایه‌های خاکریز راه آهن استفاده شده است. هدف این مطالعات بررسی پاسخ زیرسازی خط در شرایط آب و هوایی مختلف بوده است. آزمایش‌ها در مدت ۴ ماه و در طول ۲۹ کیلومتر از خط بر روی لایه زیر بالاست انجام شده است [Chiara et al. 2012]. در یک پروژه تحقیقاتی، برای بررسی تاثیر استفاده از مخلوط‌های آسفالتی در زیرسازی راه‌ها بر روی کیفیت روسازی، از آزمایش‌های FWD و LWD استفاده شده است [Montepara et al. 2012]. در اجرای لایه‌های خاکریز جاده برای اندازه‌گیری سختی لایه بستر از تست بارگذاری صفحه استفاده می‌شود. اما پس از اجرای لایه‌های بالایی مانند سابگرید، دسترسی به بستر و اندازه‌گیری تغییرات ایجاد شده در  $E_{v2}$  در نتیجه عملیات ساخت، ممکن نیست. بنابراین برای تخمین نتایج تست بارگذاری صفحه از نتایج تست FWD و یک مدل اجزا محدود استفاده شده است [Fengier, Pożarycki and Garbowski, 2013].

تست LWD برای مقایسه مدول دینامیکی انواع مختلف ماسه با درصد تراکم‌های مختلف نیز بکار رفته است. در این تحقیق پس از تعیین مشخصات اندکسی ماسه، آزمایش LWD به صورت آزمایشگاهی و در یک محفظه با حجم ۱ مترمکعب انجام شده است. در این تحقیق تفاوت نتایج تست برای دو نوع ماسه با تراکم یکسان و یک نوع ماسه با تراکم‌های مختلف مقایسه شده و همچنین عمق نفوذ تنش تست LWD بررسی شده است [Elhakim, El-baz and Amer, 2014]. برای تخمین عمق شیارهای ایجاد شونده در بانده فرودگاه‌ها نیز، یک مدل عددی توسعه داده شده که در آن از



شکل ۱. موقعیت خط تست در ایستگاه آپرین

ژئوفون‌ها اندازه‌گیری می‌شود. وزنه‌های اعمال بار این دستگاه به گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان افزایش یا کاهش آنها به راحتی میسر است. سیستم صفحه بارگذاری دوگانه (DPS) این دستگاه، امکان انجام آزمایش با دوصفحه بارگذاری به قطرهای ۱۵ و ۳۰ سانتیمتر را روی یک نقطه مشخص فراهم می‌کند. اطلاعات به دست آمده از دو آزمایش جهت انجام محاسبات معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرند. محاسبات اولیه بر روی خروجی‌ها، توسط نرم‌افزار مخصوص انجام شده و مدول الاستیسیته لایه مورد بررسی، به دست می‌آید. تصویر استقرار دستگاه LWD، برای اندازه‌گیری مدول الاستیسیته دینامیکی لایه بالاست و بستر در شکل ۳ نشان داده شده است. برای انجام آزمایش بر روی بالاست، بعد از خارج کردن تراورس از موقعیت مورد نظر، دستگاه سریعاً بر روی بالاست قرار داده شده و تراز می‌شود. وزنه ۱۵ کیلوگرمی دستگاه که بر روی یک میله تکیه دارد از ارتفاع ۴۰ سانتیمتری رها می‌شود. داده‌های خام توسط کابل رابط به رایانه منتقل شده و پس از پردازش، خروجی‌های مورد نیاز به دست می‌آیند. این آزمایش در یک مقطع عرضی از خط و در سه نقطه سمت چپ، وسط و راست مقطع انجام گردید. به منظور دستیابی به دقت قابل قبول، آزمایش در هر نقطه ۱۰ مرتبه تکرار شد. این فرآیند قبل از عملیات زیرکوبی و بعد از زیرکوبی انجام شده‌است.



شکل ۲. دستگاه افت و خیز سنج ضربه‌ای سبک (LWD)

اساس کار این دستگاه مبتنی بر اعمال بارگذاری نیمه‌سینوسی -به منظور شبیه‌سازی بارگذاری چرخ و سیله نقلیه- و سپس ثبت افت و خیز ناشی از آن در مرکز صفحه بارگذاری است. میزان تنش اعمال شده و افت و خیز اندازه‌گیری شده، از طریق بلوتوث یا کابل رابط به رایانه ارسال شده و ذخیره می‌گردد. این دستگاه با استفاده از نیروسنج، تاریخچه زمانی حداکثر نیروی اعمال شده را با دقت ۰/۳ نیوتن ثبت می‌کند. حداکثر افت و خیز ایجاد شده با دقت ۰/۱ میکرون توسط

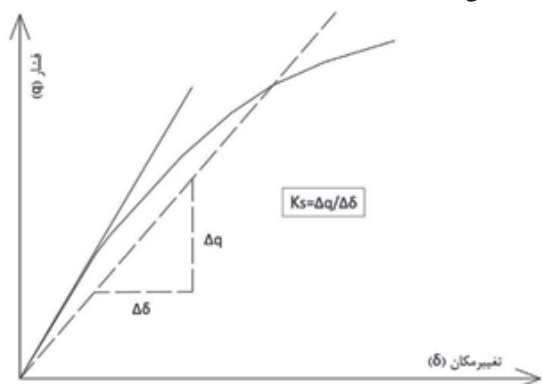


(ب)

(الف)

شکل ۳. آزمایش LWD بر روی (الف) بالاست زیرکوبی شده، (ب) بستر خط بالاستی

را نشان می دهد.



شکل ۵. منحنی شماتیک تنش- نشست آزمایش بارگذاری صفحه

با استفاده از نمودار رسم شده و به کمک رابطه ۱، ضریب واکنش بستر،  $K_{sp}$ ، تعیین می گردد. سپس با کمک رابطه ۲ مدول الاستیسیته لایه مورد بررسی قابل تعیین است.

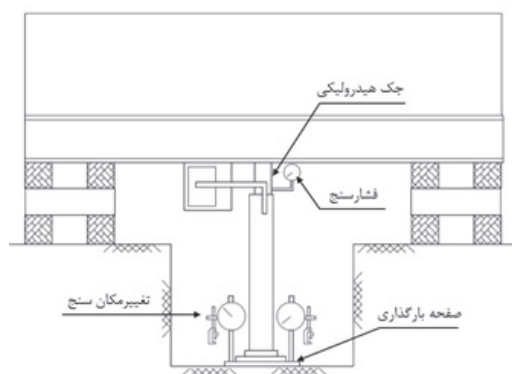
$$k_{sp} = \frac{\Delta q}{\Delta \delta} \quad (1)$$

$$E_{sp} = k_{sp} D(1-\theta^2)I_p \quad (2)$$

در روابط فوق،  $\Delta \delta$  نشست صفحه،  $\Delta q$  فشار وارده به صفحه،  $D$  قطر صفحه،  $E_{sp}$  مدول الاستیسیته نیم فضای الاستیک،  $\theta$  ضریب پواسون و  $I_p$  ضریب اصلاحی است که تابع شکل و میزان صلبیت صفحه بارگذاری است. در اینجا بر اساس مقادیر پیشنهاد شده برای این ضریب در مراجع [NAVFAC DM-7.1, 1986] و با توجه به لزوم اصلاح ضریب به دلیل انعطاف پذیری نسبی و عدم صلبیت کامل صفحه بارگذاری،  $I_p$  برابر ۰/۹۷ در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲ آزمایش بارگذاری صفحه PLT

آزمایش بارگذاری صفحه با هدف اندازه گیری ویژگی های مقاومتی و تغییر شکل پذیری لایه های خاک و یا روسازی با دو روش کنترل بار و یا کنترل نشست انجام می شود. برای انجام آزمایش، صفحه بارگذاری در کف گودالی به عمق  $D_f$  و عرض حداقل ۴ برابر صفحه ی بارگذاری مستقر می شود. شماتیک دستگاه آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. برای انجام آزمایش، پس از یک بارگذاری اولیه و اطمینان از تماس کامل صفحه با لایه مورد نظر، بار در چند مرحله اعمال می شود؛ به طوری که در پایان هر مرحله زمان کافی برای وقوع نشست به لایه مورد نظر داده شده باشد.



شکل ۴. شماتیک آزمایش بارگذاری صفحه

خروجی آزمایش بارگذاری صفحه، نمودار تنش - نشست است. شکل ۵ شماتیک منحنی تنش - نشست آزمایش بارگذاری صفحه



مرتضی اسماعیلی، جبارعلی ذاکری، حسین اسدی جرتوده، فاطمه خطیبی

عرضی خط انجام گرفتند. شماتیکی از محل انجام تست روی مقطع عرضی خط در شکل ۷ نشان داده شده است. دسته‌بندی آزمایش‌های انجام شده در این نقاط، قبل و بعد از زیرکوبی، در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۳-۱ نتایج آزمایش بارگذاری صفحه PLT

نتایج آزمایش بارگذاری صفحه روی سطح بالاست، قبل و بعد از عملیات زیرکوبی، به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. بر اساس داده‌های جداول نمودارهای تنش - نشست این آزمایش‌ها به دست آمده‌اند. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودارهای تغییرات تنش بر حسب نشست را در محدوده خطی (تا ۰.۵٪ تنش نهایی) و برای آزمایش‌های قبل و بعد از زیرکوبی نشان می‌دهند.

برای انجام آزمایش بر روی خط تست مورد نظر، پس از خارج نمودن تراورس از محل خود، صفحه فلزی دستگاه آزمایش زیر ریل قرار گرفته و تراز می‌شود. سپس جک بارگذاری و تغییرمکان سنج بر روی صفحه مستقر شده و بارگذاری و ثبت خروجی‌ها آغاز می‌گردد. تصاویری از انجام آزمایش PLT بر روی بالاست و بستر خط در شکل ۶ نشان داده شده است. آزمایش PLT در شرایط قبل و بعد از عملیات زیرکوبی صورت گرفته است.

### ۳. نتایج آزمایش‌ها

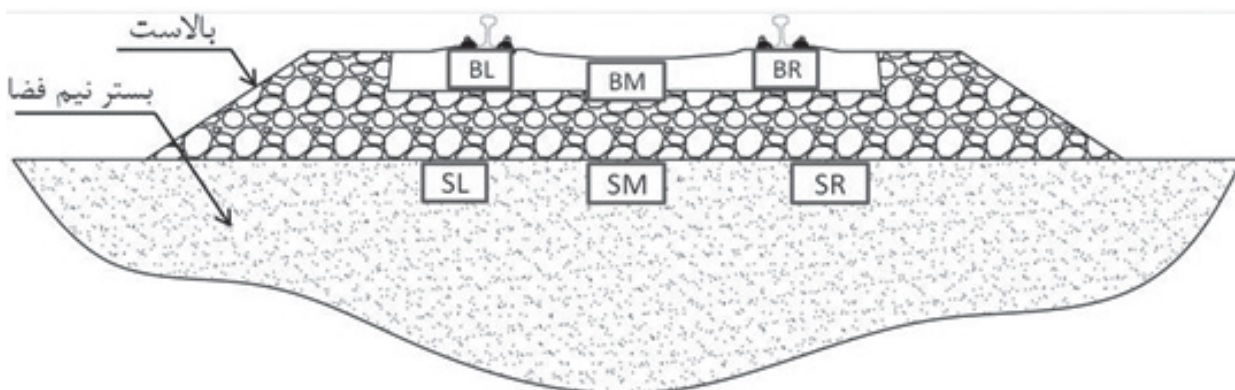
آزمایش‌های PLT و LWD با هدف محاسبه سختی استاتیکی و دینامیکی خط بالاستی و بستر آن، بر روی سه نقطه از مقطع



(ب)

(الف)

شکل ۶. آزمایش PLT بر روی (الف) بالاست قبل از زیرکوبی، (ب) بستر خط بالاستی



شکل ۷. نمایش محل انجام آزمایش‌های PLT و LWD بر روی مقطع خط

مطالعه عددی و میدانی ارتباط میان سختی استاتیکی و دینامیکی خطوط ریلی بالاستی

جدول ۱. دسته‌بندی آزمایش‌های PLT و LWD

آزمایش بارگذاری صفحه (PLT)						
نقطه SL	نقطه SM	نقطه SR	نقطه BL	نقطه BM	نقطه BR	محل آزمایش
-	-	-	Test 1	-	-	قبل از زیرکوبی
-	-	-	Test 2	-	-	بعد از زیرکوبی
-	-	Test 3	-	-	-	روی سطح بستر
آزمایش افت و خیز سنج ضربه‌ای سبک (LWD)						
نقطه SL	نقطه SM	نقطه SR	نقطه BL	نقطه BM	نقطه BR	محل آزمایش
-	-	-	Test 6	Test 5	Test 4	قبل از زیرکوبی
-	-	-	Test 9	Test 8	Test 7	بعد از زیرکوبی
Test 12	Test 11	Test 10	-	-	-	روی سطح بستر

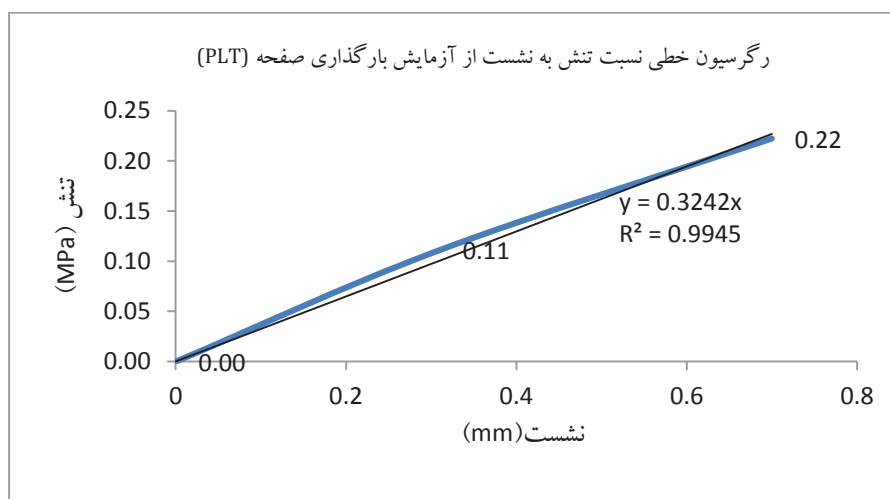
جدول ۲. نتایج تنش و نشست Test 1

نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف	نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف	نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف	نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف
۱۱/۳۰	۲/۳۳	۲۲	۶/۴۱	۱/۵۶	۱۵	۲/۲۰	۰/۷۸	۸	۰	۰	۱
۱۲/۳۵	۲/۴۴	۲۳	۷	۱/۶۷	۱۶	۲/۷۰	۰/۸۹	۹	۰/۳۱	۰/۱۱	۲
۱۳/۵۰	۲/۵۶	۲۴	۷/۷۵	۱/۷۸	۱۷	۳/۳۵	۱	۱۰	۰/۷۰	۰/۲۲	۳
۱۴/۵۰	۲/۶۷	۲۵	۸/۳۰	۱/۸۹	۱۸	۴/۱۵	۱/۱۱	۱۱	۰/۸۲	۰/۳۳	۴
۱۵/۵۰	۲/۷۸	۲۶	۹/۱۵	۲	۱۹	۴/۵۰	۱/۲۲	۱۲	۰/۹۵	۰/۴۴	۵
۱۶/۱۵	۲/۸۳	۲۷	۹/۷۰	۲/۱۱	۲۰	۵/۱۵	۱/۳۳	۱۳	۱/۱۵	۰/۵۶	۶
			۱۰/۵۰	۲/۲۲	۲۱	۵/۷۰	۱/۴۴	۱۴	۱/۴۷	۰/۶۷	۷

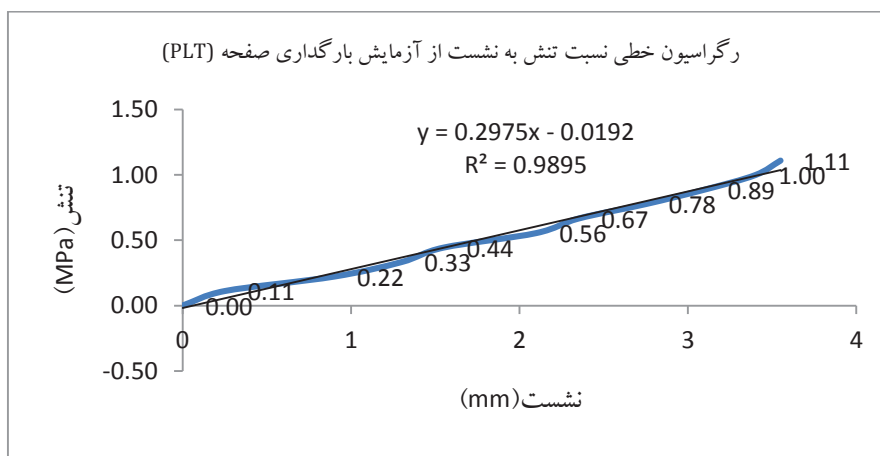
جدول ۳. نتایج تنش و نشست Test 2

نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف	نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف	نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف	نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف
۱۱/۸۰	۲/۳۳	۲۲	۵/۹۰	۱/۵۶	۱۵	۲/۷۵	۰/۷۸	۸	۰	۰	۱
۱۲/۵۰	۲/۴۴	۲۳	۶/۵۰	۱/۶۷	۱۶	۳/۱۰	۰/۸۹	۹	۰/۲۵	۰/۱۱	۲
۱۳/۳۰	۲/۵۶	۲۴	۷/۱۰	۱/۷۸	۱۷	۳/۴۰	۱	۱۰	۰/۹۰	۰/۲۲	۳
۱۴	۲/۶۷	۲۵	۸/۸۰	۱/۸۹	۱۸	۳/۵۵	۱/۱۱	۱۱	۱/۳۰	۰/۳۳	۴
۱۴/۲۰	۲/۷۸	۲۶	۹/۳۵	۲	۱۹	۳/۹۰	۱/۲۲	۱۲	۱/۵۵	۰/۴۴	۵
			۱۰/۵۰	۲/۱۱	۲۰	۴/۴۵	۱/۳۳	۱۳	۲/۱۰	۰/۵۶	۶
			۱۱/۱	۲/۲۲	۲۱	۵	۱/۴۴	۱۴	۲/۳۵	۰/۶۷	۷

مرتضی اسماعیلی، جبارعلی ذاکری، حسین اسدی جرتوده، فاطمه خطیبی



شکل ۸. محاسبه ضریب عکس‌العمل خط، از آزمایش PLT، قبل از زیرکوبی بالاست



شکل ۹. محاسبه ضریب عکس‌العمل خط، از آزمایش PLT، بعد از زیرکوبی بالاست

مقطع مورد مطالعه به دست آمده‌است. نتایج تنش و کرنش به دست آمده از این تست در جدول ۴ و نمودار تنش-کرنش مربوط به آن در شکل ۱۰ ارائه شده‌است. با استفاده از رگرسیون خطی نسبت تنش به نشست، ضریب عکس‌العمل بستر در محل مورد مطالعه ۰/۲۹۲ به دست آمده است. بنابراین با در نظر گرفتن ثوابت رابطه ۱ مانند قبل، مدول استاتیکی بستر در سمت راست مقطع ۷۴/۱۰ مگاپاسکال به دست می‌آید. این عدد به مدول استاتیکی خط پس از زیرکوبی بسیار نزدیک است. بنابراین می‌توان گفت که مدول استاتیک خط بعد از زیرکوبی تقریباً همان مدول استاتیکی بستر خط است و لایه بالاست سهم قابل توجهی در سختی قائم ندارد.

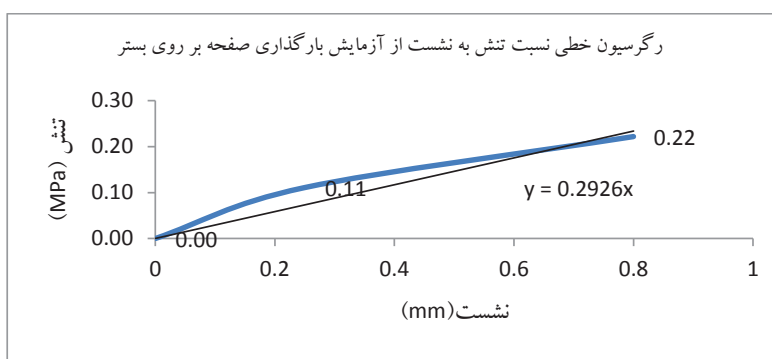
بر اساس رگرسیون خطی انجام شده، مقدار ضریب عکس‌العمل خط قبل از عملیات زیرکوبی، ۰/۳۲۴ به دست آمده است. با استفاده از رابطه ۱ و با در نظر گرفتن ضریب  $I_p$  برابر ۰/۹۷ و ضریب پواسون ۰/۳۵ مقدار مدول استاتیکی خط ۷۶/۶ مگاپاسکال به دست می‌آید. در این آزمایش، بعد صفحه بارگذاری مربعی ۳۰۰ میلی‌متر است. برای آزمایش بعد از زیرکوبی، ضریب عکس‌العمل خط ۰/۲۹۷ به دست آمده‌است. با در نظر گرفتن ثوابت رابطه ۱ مانند قبل، مدول استاتیکی خط ۷۴ مگاپاسکال به دست می‌آید. بنابراین همانطور که انتظار می‌رفت انجام عملیات زیرکوبی موجب کاهش مدول الاستیسیته استاتیکی گردید. میزان این کاهش حدود ۳٪ است. مدول استاتیکی بستر با انجام آزمایش PLT در نقطه سمت راست



## مطالعه عددی و میدانی ارتباط میان سختی استاتیکی و دینامیکی خطوط ریلی بالاستی

جدول ۴. نتایج تنش و نشست Test 3

نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف	نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف	نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف	نشست (mm)	تنش (MPa)	ردیف
۱۱/۹۰	۲/۶۷	۲۵	۷/۴۰	۱/۷۸	۱۷	۱/۸۵	۰/۸۹	۹	۰	۰	۱
۱۲/۱۰	۲/۷۸	۲۶	۸/۱۰	۱/۸۹	۱۸	۲/۵۰	۱	۱۰	۰/۲۵	۰/۱۱	۲
۱۲/۲۵	۲/۸۹	۲۷	۹	۲	۱۹	۳/۲۰	۱/۱۱	۱۱	۰/۸۰	۰/۲۲	۳
۱۲/۳۰	۳/۰۰	۲۸	۹/۷۰	۲/۱۱	۲۰	۳/۸۵	۱/۲۲	۱۲	۰/۹۵	۰/۳۳	۴
۱۲/۴۰	۳/۱۱	۲۹	۱۰/۴۰	۲/۲۲	۲۱	۴/۵۵	۱/۳۳	۱۳	۱	۰/۴۴	۵
۱۲/۵۰	۳/۲۲	۳۰	۱۰/۸۰	۲/۳۳	۲۲	۵/۲۵	۱/۴۴	۱۴	۱/۲۰	۰/۵۶	۶
۱۲/۶۵	۳/۳۳	۳۱	۱۱/۴۰	۲/۴۴	۲۳	۶/۲۰	۱/۵۶	۱۵	۱/۲۵	۰/۶۷	۷
			۱۱/۶۵	۲/۵۶	۲۴	۶/۷۰	۱/۶۷	۱۶	۱/۵۵	۰/۷۸	۸



شکل ۱۰. محاسبه ضریب عکس‌العمل بستر، از آزمایش PLT

و بعد از زیرکوبی مشاهده می‌شود که عملیات زیرکوبی، باعث کاهش حدوداً ۱۴٪ در سختی دینامیکی خط شده‌است. با مقایسه این میزان کاهش، با کاهش ۳ درصدی سختی استاتیکی پس از زیرکوبی خط، می‌توان دریافت که سختی دینامیکی خط نسبت به سختی استاتیکی وابستگی بیشتری به مشخصات لایه بالاست دارد. البته این بار بر خلاف آزمایش PLT، سختی بستر به سختی خط قبل از زیرکوبی نزدیک‌تر است. برای پیدا کردن دلیل این امر می‌توان سختی بستر را در دو آزمایش PLT و LWD مقایسه نمود. طبق Test3، مدول استاتیکی بستر در سمت راست مقطع ۷۴/۱۰ مگاپاسکال به دست آمده‌است. مدول دینامیکی در این نقطه طبق Test10، ۷۷/۶۰ مگاپاسکال است. پس بطور کلی بارگذاری ضربه‌ای تست LWD موجب افزایش مدول بستر و مشاهدات فوق‌گرفته است.

۲-۳ نتایج آزمایش افت و خیز سنج ضربه‌ای سبک LWD آزمایش افت و خیزسنج ضربه‌ای سبک (LWD) بدلیل سهولت و سرعت بالای اجرا در هر سه نقطه از مقطع عرضی مورد مطالعه، انجام شده‌است. به منظور دستیابی به دقت بالاتر هر آزمایش LWD در هر نقطه، ۱۰ مرتبه تکرار شده‌است. این آزمایش در شرایط قبل و بعد از زیرکوبی انجام شده‌است. نتایج آزمایش‌های LWD قبل از زیرکوبی و بعد از زیرکوبی، به ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. برای اندازه‌گیری مدول دینامیکی اعدادی که واریانس زیادی نسبت به مقدار متوسط دارند کنار گذاشته شده و بین سایر مقادیر میانگین‌گیری شده‌است. ردیف‌های مربوط به این مقادیر در جداول هاشور زده شده‌است. آزمایش LWD بر روی بستر نیز انجام شده و نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده‌است. با مقایسه نتایج به دست آمده برای سختی دینامیکی خط، قبل

مرتضی اسماعیلی، جبارعلی ذاکری، حسین اسدی جرتوده، فاطمه خطیبی

جدول ۵. نتایج به دست آمده از آزمایش LWD قبل از عملیات زیرکوبی

Test 6					Test 5					Test 4				
E (MPa)	K (MN/m <sup>3</sup> )	d (mm)	P (N)	ت.ع.ت	E (MPa)	K (MN/m <sup>3</sup> )	d (mm)	P (N)	ت.ع.ت	E (MPa)	K (MN/m <sup>3</sup> )	d (mm)	P (N)	ت.ع.ت
۲۲	۸۵	۱/۳۴۵	۸۱۱۲	۱	۱۹	۷۴	۱/۵۵۷	۸۱۲۰	۱	۴۳	۱۶۳	۰/۷۱۵	۸۲۷۱	۱
۲۷	۱۰۳	۱/۱۱۴	۸۱۲۰	۲	۳۷	۱۴۱	۰/۶۳۸	۸۳۷۶	۲	۶۵	۲۴۷	۰/۴۸۴	۸۴۴۸	۲
۴۱	۱۵۵	۰/۷۴۴	۸۱۳۴	۳	۵۲	۱۹۷	۰/۶۱۴	۸۵۲۹	۳	۷۲	۲۷۲	۰/۴۴۲	۸۴۹۸	۳
۴۳	۱۶۴	۰/۷۰۴	۸۱۷۸	۴	۵۳	۲۰۰	۰/۶۰۴	۸۵۶۰	۴	۷۷	۲۹۴	۰/۴۰۸	۸۴۷۹	۴
۵۱	۱۹۳	۰/۶۰۳	۸۲۴۲	۵	۶۲	۲۳۷	۰/۵۱۴	۸۶۰۲	۵	۵۹	۲۲۵	۰/۳۲۹	۸۳۹۹	۵
۴۸	۱۸۲	۰/۶۳۴	۸۱۷۷	۶	۶۳	۲۴۰	۰/۵۱۶	۸۷۳۹	۶	۸۰	۳۰۶	۰/۳۹۳	۸۴۹۳	۶
۶۱	۲۳۳	۰/۵۰۷	۸۳۴۷	۷	۶۷	۲۵۵	۰/۴۸۳	۸۷۰۶	۷	۸۳	۳۱۵	۰/۳۸۲	۸۴۹۵	۷
۴۶	۱۷۴	۰/۶۶۴	۸۱۴۴	۸	۶۶	۲۵۲	۰/۴۹۰	۸۷۱۴	۸	۷۸	۲۹۸	۰/۴۰۴	۸۵۱۴	۸
۶۵	۲۴۶	۰/۴۸۳	۸۳۸۹	۹	۶۶	۲۵۰	۰/۴۹۵	۸۷۳۵	۹	۷۸	۲۹۶	۰/۴۰۴	۸۴۴۸	۹
۶۲	۲۳۷	۰/۴۹۷	۸۳۳۹	۱۰	۵۶	۲۱۳	۰/۵۷۳	۸۶۱۴	۱۰	۷۶	۲۹۰	۰/۴۱۵	۸۵۰۵	۱۰
۵۲		میانگین مدول			۶۴/۸		میانگین مدول			۷۷/۷		میانگین مدول		

جدول ۶. نتایج به دست آمده از آزمایش LWD بعد از عملیات زیرکوبی

Test 9					Test 8					Test 7				
E (MPa)	K (MN/m <sup>3</sup> )	d (mm)	P (N)	ت.ع.ت	E (MPa)	K (MN/m <sup>3</sup> )	d (mm)	P (N)	ت.ع.ت	E (MPa)	K (MN/m <sup>3</sup> )	d (mm)	P (N)	ت.ع.ت
۱۵	۵۶	۲/۰۰۷	۷۹۲۳	۱	۹	۳۵	۲/۸۶۵	۷۱۲۲	۱	۱۰	۳۹	۲/۷۲۴	۷۴۴۰	۱
۴۲	۱۵۹	۰/۷۴۰	۸۳۳۱	۲	۲۳	۸۸	۱/۳۰۸	۸۱۸۵	۲	۳۱	۱۱۷	۰/۹۸۵	۸۱۶۵	۲
۴۸	۱۸۱	۰/۶۴۸	۸۳۰۰	۳	۳۲	۱۲۲	۰/۹۸۱	۸۴۰۴	۳	۳۸	۱۴۵	۰/۷۹۸	۸۱۷۲	۳
۵۶	۲۱۲	۰/۵۵۷	۸۳۴۳	۴	۳۵	۱۳۳	۰/۸۹۳	۸۴۱۵	۴	۴۵	۱۷۰	۰/۶۸۸	۸۲۶۸	۴
۵۹	۲۲۶	۰/۵۲۵	۸۳۷۳	۵	۳۷	۱۴۱	۰/۸۴۳	۸۳۷۶	۵	۵۱	۱۹۵	۰/۶۰۶	۸۳۵۰	۵
۵۹	۲۲۵	۰/۵۲۹	۸۳۰۸	۶	۴۶	۱۷۳	۰/۶۹۲	۸۴۶۵	۶	۵۵	۲۰۹	۰/۵۶۷	۸۳۸۸	۶
۶۲	۲۳۶	۰/۴۹۹	۸۴۲۵	۷	۳۹	۱۴۶	۰/۸۰۸	۸۳۶۲	۷	۵۶	۲۱۲	۰/۵۶۲	۸۴۱۳	۷
۶۳	۲۳۸	۰/۴۹۹	۸۳۹۹	۸	۴۷	۱۷۸	۰/۶۸۸	۸۴۲۱	۸	۵۸	۲۲۹	۰/۵۳۵	۸۳۸۶	۸
۶۳	۲۳۸	۰/۵۰۰	۸۳۹۷	۹	۵۱	۱۹۳	۰/۶۱۱	۸۳۲۱	۹	۶۱	۲۴۱	۰/۵۱۷	۸۴۵۶	۹
۶۶	۲۵۰	۰/۴۷۸	۸۴۳۷	۱۰	۳۵	۱۳۲	۰/۱۳۰	۲۱۰۹	۱۰	۶۳	۲۳۸	۰/۴۹۷	۸۳۶۱	۱۰
۶۱		میانگین مدول			۴۵/۷۵		میانگین مدول			۵۷/۳		میانگین مدول		

دست آمد. با تناسب گیری میان سختی های به دست آمده، می توان رابطه میان نتایج دو آزمایش را به دست آورد. با مطالعه نتایج Test 1 و Test 6 که بر روی لایه بالاست و قبل از زیرکوبی انجام شده بودند؛ رابطه بین دو آزمایش به صورت زیر به دست آمد:

$$LWD = 0.68 PLT \quad (۳)$$

۴. استخراج رابطه ریاضی میان مدول استاتیکی و دینامیکی خط

همان طور که اشاره شد آزمایش های PLT و LWD بر روی خط بالاستی و بستر آن در شرایط قبل و بعد از زیرکوبی انجام شدند و با تحلیل نتایج آنها، مقادیر سختی استاتیکی و دینامیکی خط به

## مطالعه عددی و میدانی ارتباط میان سختی استاتیکی و دینامیکی خطوط ریلی بالاستی

جدول ۷. نتایج به دست آمده از آزمایش LWD بر روی بستر

Test 12					Test 11					Test 10				
E (MPa)	K (MN/m <sup>3</sup> )	d (mm)	P (N)	ε <sub>0</sub> (%)	E (MPa)	K (MN/m <sup>3</sup> )	d (mm)	P (N)	ε <sub>0</sub> (%)	E (MPa)	K (MN/m <sup>3</sup> )	d (mm)	P (N)	ε <sub>0</sub> (%)
۱۵	۵۵	۲/۰۴۷	۸۰۰۵	۱	۲۰	۷۴	۱/۵۴۷	۸۱۱۵	۱	۵۶	۲۱۲	۰/۵۶۶	۸۴۷۶	۱
۳۸	۱۴۲	۰/۸۴۴	۸۵۰۰	۲	۵۰	۱۹۲	۰/۵۹۱	۸۰۰۶	۲	۶۸	۲۵۹	۰/۴۷۱	۸۶۳۴	۲
۴۶	۱۷۴	۰/۶۹۰	۸۵۰۱	۳	۵۳	۲۰۱	۰/۵۷۲	۸۱۲۶	۳	۷۵	۲۸۶	۰/۴۲۸	۸۶۵۷	۳
۴۹	۱۸۵	۰/۶۵۴	۸۵۵۶	۴	۶۵	۲۴۸	۰/۴۷۷	۸۳۷۴	۴	۷۷	۲۹۲	۰/۴۱۹	۸۶۶۳	۴
۵۳	۲۰۱	۰/۶۰۳	۸۵۷۶	۵	۶۷	۲۵۴	۰/۴۷۱	۸۴۴۷	۵	۷۷	۲۹۱	۰/۴۲۷	۸۷۷۳	۵
۵۷	۲۱۶	۰/۵۶۵	۸۶۱۷	۶	۶۶	۲۵۱	۰/۴۸۱	۸۵۴۸	۶	۷۰	۲۶۷	۰/۴۶۰	۸۶۸۲	۶
۵۰	۱۸۹	۰/۶۴۲	۸۵۸۱	۷	۵۰	۱۹۲	۰/۶۲۱	۸۴۰۷	۷	۷۶	۲۸۸	۰/۴۲۷	۸۶۹۳	۷
۴۷	۱۷۸	۰/۶۹۵	۸۷۴۵	۸	۶۸	۲۶۰	۰/۴۶۷	۸۵۷۰	۸	۷۷	۲۹۱	۰/۴۲۷	۸۷۸۴	۸
۴۸	۱۸۱	۰/۶۹۵	۸۸۸۴	۹	۷۲	۲۷۳	۰/۴۵۰	۸۶۸۱	۹	۷۹	۳۰۰	۰/۴۱۲	۸۷۲۵	۹
۵۰	۱۹۰	۰/۶۶۴	۸۹۱۹	۱۰	۷۴	۲۸۰	۰/۴۴۱	۸۷۲۷	۱۰	۸۲	۳۱۰	۰/۳۹۷	۸۷۱۱	۱۰
۵۰/۶۰					۶۸/۷۰					۷۷/۶۰				
میانگین مدول					میانگین مدول					میانگین مدول				

مستقیماً با آزمایش قابل تعیین است، اما مدول لایه بالاستی به تنهایی توسط آزمایش قابل تعیین نیست. برای تعیین مدول استاتیکی و دینامیکی لایه بالاستی، از نرم افزار اجزا محدود ABAQUS استفاده شده است. مراحل مدل سازی به شرح زیر است:

#### ۱-۵ هندسه و مشخصات مکانیکی مدل

هندسه مدل بر اساس برداشت های میدانی مدل سازی شده است. لایه بالاستی و بستر خط با استفاده از المان solid مدل سازی شده اند. مشخصات مکانیکی و هندسی مدل بر اساس اطلاعات موجود سایت آزمایش، انتخاب و به هر کدام از لایه ها اختصاص داده شده است. این مشخصات در جدول ۸ ارائه شده است.

برای تعیین عمق لایه بستر، ابتدا مدل با در نظر گرفتن عمق قابل توجه برای لایه بستر، مدل سازی شد و سپس بارگذاری بر روی لایه بستر اعمال گردید. مشاهده شد که در عمق ۵ متری از سطح بستر نشست قائم تقریباً به مقدار صفر رسیده و افزایش یا کاهش در بار تاثیری در آن ندارد، بنابراین عمق لایه بستر ۵ متر در نظر گرفته شد. هندسه لایه بالاستی و بستر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که رفتار مصالح در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است.

با مطالعه نتایج Test2 و Test9 که در همان نقطه و بعد از عملیات زیرکوبی انجام گرفته بودند، رابطه بین دو آزمایش به صورت زیر به دست آمد:

$$LWD = 0.82 PLT \quad (۴)$$

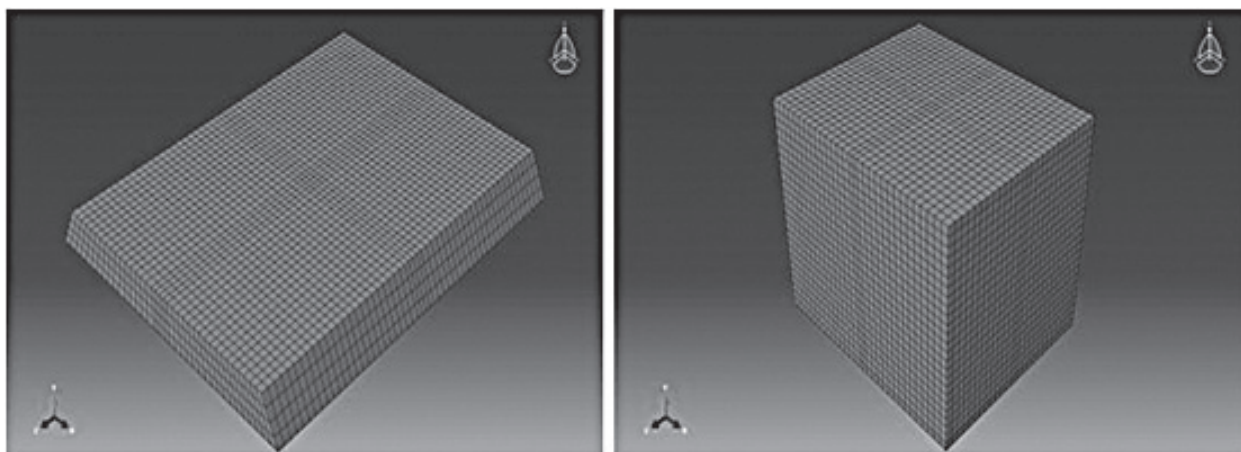
همانطور که مشاهده می شود؛ با انجام عملیات زیرکوبی ضریب ارتباط نتایج دو آزمایش به عدد ۱ نزدیک تر می شود. با توجه به اینکه در عملیات زیرکوبی لایه بالاستی دستخوش تغییر می گردد، می توان نتیجه گرفت که سختی دینامیکی خط بیشتر متاثر از شرایط بالاستی است. این نتیجه در بخش های قبل نیز به دست آمده بود. مطالعه ارتباط بین نتایج Test3 و Test10 نیز که بر روی بستر خط انجام شده اند؛ به رابطه ۳ منجر می شود.

#### ۵. تعیین مدول الاستیسیته بالاستی با مدل عددی

##### اجزای محدود

با انجام آزمایش بر روی سطح بالاستی و تحلیل نتایج آن، مدول استاتیکی و یا دینامیکی خط قابل تعیین است. این مدول ناشی از عملکرد ارتجاعی لایه بالاستی و بستر است و نمی توان آن را به عملکرد تنها یکی از این دو لایه نسبت داد. مدول بستر، با کنار زدن لایه بالاستی و استقرار دستگاه آزمایش روی سطح بستر،

مرتضی اسماعیلی، جبارعلی ذاکری، حسین اسدی جرتوده، فاطمه خطیبی



شکل ۱۰. مدل‌سازی سایت مورد مطالعه در نرم افزار ABAQUS (الف) بستر (ب) بالاست

شکل ۱۰. مدل‌سازی سایت مورد مطالعه در نرم افزار ABAQUS (الف) بستر (ب) بالاست

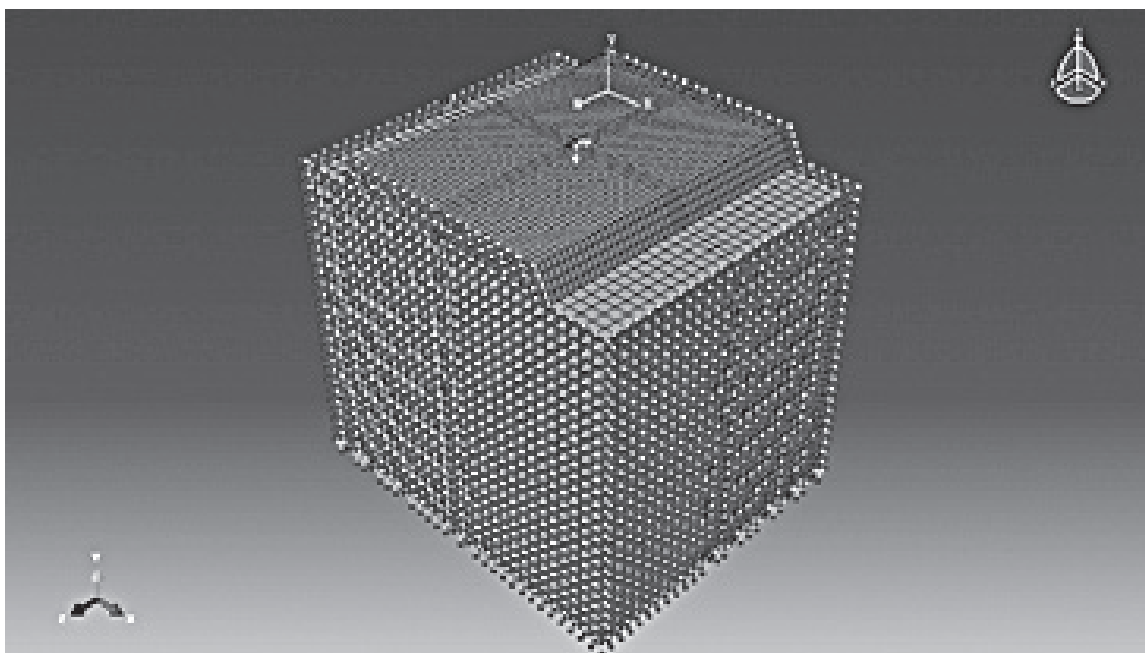
صورتی در نظر گرفته شده که تمامی المان‌های بالاست و بستر نسبت به یکدیگر مقید هستند و لغزشی میان سطوح اتفاق نمی‌افتد. کلیه درجات آزادی بر روی سطوح جانبی و زیرین لایه بستر مقید شده‌است. برای اعمال بار استاتیکی، بار به صورت تنش یکنواخت بر روی سطحی به اندازه صفحه بارگذاری دستگاه PLT وارد شده‌است. اما برای اعمال بار دینامیکی - با توجه به کوچک بودن سطح ناحیه بارگذاری دستگاه نسبت به ابعاد مدل - بارگذاری به صورت نقطه‌ای اعمال شده‌است. هندسه مدل و شرایط مرزی و بار نقطه‌ای وارد بر سطح بالاست در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است.

## ۲-۵ المان بندی، شرایط مرزی و بارگذاری

پس از ساخت هندسه مدل و اختصاص مشخصات مکانیکی، لازم است که لایه‌های بالاست و بستر المان بندی شوند. ابعاد المان‌ها با توجه به سرعت انتشار موج برشی و فرکانس بارگذاری دینامیکی تعیین می‌گردد. با توجه به زمان اعمال بار در آزمایش LWD که در حدود ۱۵ الی ۲۰ میلی ثانیه می‌باشد فرکانس بارگذاری تعیین شده و حداقل بعد مورد نیاز المان‌ها تعیین گردیده است. با توجه به حداقل بعد تعیین شده و همچنین در راستای تامین دقت کافی در نتایج، ابعاد المان‌ها در لایه بالاست  $10 \times 10$  سانتیمتر و در لایه بستر  $20 \times 20$  سانتیمتر در نظر گرفته شده‌اند. مرز میان بالاست و بستر به

جدول ۸. مشخصات هندسی و مکانیکی لایه بالاست و بستر در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی

تحلیل دینامیکی		تحلیل استاتیکی		مشخصات هندسی	مشخصات مکانیکی
بستر	بالاست	بستر	بالاست		
۵	۵	۵	۵	طول (m)	
۶	۳/۵	۶	۳/۵	عرض (m)	
۵	۰/۴۵	۵	۰/۴۵	ارتفاع (m)	
۹۰	۶۱	۹۰	۶۱	زاویه مرز کناری نسبت به افق (°)	
۲۰۰۰	۱۶۰۰	۲۰۰۰	۱۶۰۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	ضریب پواسون	
$72/7 \times 10^8$	-	$74/1 \times 10^6$	-	مدول الاستیسیته (Pa)	



شکل ۱۲. نمایش مدل المان بندی شده با اعمال شرایط مرزی و بار متمرکز

۱ الی ۲۵ تن بر روی سطح مورد نظر از بالاست وارد می شود. با تحلیل مدل، تاریخچه زمانی تنش و نشست به دست می آید. بنابراین می توان منحنی تنش-نشست مدل عددی را رسم نمود. با مقایسه شیب منحنی تنش-نشست مدل عددی و تجربی، مدول استاتیکی لایه بالاست به دست می آید.

#### ۵-۵ شرایط دینامیکی

برای تعیین مدول دینامیکی لایه بالاست از روش سعی و خطا استفاده شده است. در این روش، بار آزمایش به صورت بار ضربه به مدل وارد می شود. مقادیر مختلفی به عنوان مدول الاستیسیته، به لایه بالاست اختصاص داده شده و پس از تحلیل، نشست سطح بالاست با نشست مدل پایه مقایسه می گردد. این کار آنقدر تکرار می گردد تا این دو مقدار با دقت مناسبی برابر شوند. در این صورت مدول اختصاص داده شده به بالاست به عنوان مدول الاستیسیته واقعی لایه بالاست پذیرفته می شود.

روند فوق برای شرایط بالاست قبل و بعد از زیرکوبی تکرار شده است. تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی بالاست قبل و بعد از زیرکوبی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

#### ۳-۵ تعیین سختی لایه بالاست

برای تعیین مدول استاتیکی و دینامیکی لایه بالاست، مدول استاتیکی یا دینامیکی به دست آمده از آزمایش های LWD و یا PLT، به کل مدل اختصاص داده می شود. این مدل به عنوان "مدل پایه" نامگذاری می شود. پس از تحلیل مدل پایه، حداکثر جابجایی روی سطح بالاست و بستر به دست می آید. قدم بعدی برای رسیدن به مدول الاستیسیته بالاست این است که، به لایه بستر، مدولی را اختصاص دهیم که از آزمایش بر روی بستر به دست آمده و سپس با روش سعی و خطا، به عددی برای مدول الاستیسیته بالاست برسیم که نهایتاً حداکثر نشست سطح بالاست مثل نشست به دست آمده از مدل پایه باشد. جزئیات بیشتر در خصوص تعیین مدول لایه بالاست در هر یک از دو حالت استاتیکی و دینامیکی در ادامه ذکر شده است.

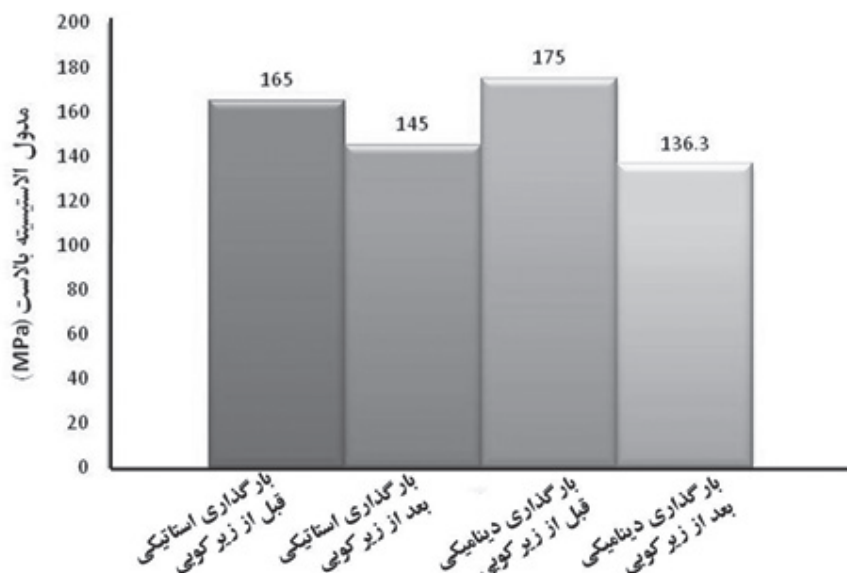
#### ۴-۵ شرایط استاتیکی

برای تعیین مدول استاتیکی بالاست، عددی به عنوان مدول الاستیسیته به لایه بالاست اختصاص داده می شود. سپس بارهای



مرتضی اسماعیلی، جبارعلی ذاکری، حسین اسدی جرتوده، فاطمه خطیبی

مقایسه مدول الاستیسیته لایه بالاست در شرایط مختلف



شکل ۱۳. مقایسه مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی بالاست در شرایط قبل و بعد از زیرکوبی

آمده از تحلیل‌ها به صورت زیر است:

- انجام عملیات زیرکوبی موجب کاهش مدول استاتیک خط می‌شود. در سایت مورد بررسی در این پروژه مدول استاتیک خط قبل از زیرکوبی برابر با  $76/6$  MPa و بعد از زیرکوبی برابر با  $74$  MPa به دست آمد.

- انجام عملیات زیرکوبی موجب کاهش مدول دینامیکی خط می‌شود. در سایت مورد بررسی در این پروژه متوسط مدول دینامیک خط در سه نقطه مورد بررسی در مقطع، قبل از زیرکوبی برابر با  $63/83$  MPa و بعد از زیرکوبی برابر با  $54/68$  MPa به دست آمد.

- میزان افت مدول خط پس از عملیات زیرکوبی، در شرایط استاتیکی حدوداً ۳٪ و در شرایط دینامیکی حدوداً ۱۴٪ است. با توجه به اینکه در عملیات زیرکوبی لایه بالاست دستخوش تغییر می‌گردد، این نتایج نشان می‌دهند که مدول دینامیکی خط بیشتر به وضعیت لایه بالاست و مدول استاتیکی بیشتر به وضعیت لایه بستر بستگی دارد.

- استخراج رابطه میان نتایج آزمایش‌های PLT و LWD بر اساس داده‌های تجربی، نشان داد انجام عملیات زیرکوبی موجب

## ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به منظور برقراری ارتباط میان سختی استاتیکی و دینامیکی خطوط بالاستی، آزمایش‌های PLT و LWD بر روی خط فرعی شماره ۱۲ ایستگاه آپرین، واقع در جنوب غرب تهران انجام شد. برای استخراج رابطه میان نتایج آزمایش‌ها روش رگرسیون خطی مورد استفاده قرار گرفت. در راستای ارزیابی تغییر مدول خط بعد از انجام عملیات زیرکوبی، آزمایش‌ها در دو حالت قبل و بعد از زیرکوبی انجام گرفتند. در کلیه آزمایش‌های صورت گرفته، ضخامت بالاست و مشخصات خاک بستر بدون تغییر بوده‌است. بنابراین روابط به دست آمده در برگزیده تاثیر احتمالی این پارامترها نبوده و دستیابی به روابط دقیق‌تر و با جامعیت بیشتر مستلزم انجام تعداد بیشتری آزمایش بر روی دامنه وسیع‌تری از انواع بسترهای خاکی، لایه‌های بالاست با ضخامت‌های مختلف و دفعات زیرکوبی متنوع است. همچنین سختی لایه بالاستی، با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS تعیین شد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها به عنوان ورودی مدل عددی مورد استفاده قرار گرفتند. مهم‌ترین نتایج به دست

## مطالعه عددی و میدانی ارتباط میان سختی استاتیکی و دینامیکی خطوط ریلی بالاستی

eter measurements”, Engineering Structures, An International Journal, Vol. 34, pp. 1-7.

- Benedeto, A., Tosti, F. and Di Domenico, L. (2012) “Elliptic model for prediction of deflections induced by a light falling weight deflectometer”, Terramechanics, An International Journal, Vol. 49, pp. 1-12.

- Benedetto, A., D’Amico, F. and Tosti, F. (2014) “Improving safety of runway over run through the correct numerical evaluation of rutting in cleared and graded areas”, Safety Science, An International Journal, Vol. 62, pp. 326-338.

- Bertulienė, L., Laurinavičius, A. and Lapinskienė, O. (2010) “Research of strength measurement methods on subgrade of experimental road pavement”, Modern Building Materials, Structures And Technics, An International Conference, 10th, May 19-21.

- Camargo, F., Larsen, B., Chadbourn, B., Roberson, R. and Siekmeier, J., (2006) “Intelligent compaction: a minnesota case history”, 54th Annual University of Minnesota Geotechnical Conference, February 17th.

- Chen, Bilyeu (1998) “Comparison of resilient moduli between field and laboratory testing: a case study”, 76th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

- De Chiara, F., Pereira, D., Fontul, S. and Fortunato, E. (2012) “Track substructure assessment using non-destructive load tests. a Portuguese case study”, Procedia-Social and Behavioral Sciences, An International Journal, Vol. 53, pp. 1131 – 1140.

- Elhakim, A. F., Elbaz, K. and Amer, M. (2014) “The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction”, Housing and Building National Research Center-HBRC, An International Journal.

- Fengier, J., Pożarycki, A. and Garbowski, T. (2013) “Stiff-plate bearing test simulation based on FWD results”, Procedia Engineering, An International Journal, Vol. 57, pp. 270 – 277

- Gopalakrishnan, K. and Papadopoulos, H. (2011) “Reliable pavement back calculation with confidence

نزدیکتر شدن نتایج دو آزمایش به یکدیگر می‌شود.

- نتایج تحلیل عددی اجزای محدود نشان داد که انجام عملیات زیرکوبی موجب کاهش مدول استاتیک بالاست می‌شود. در مدل مورد بررسی در این پروژه مدول استاتیک بالاست قبل از زیرکوبی برابر با ۱۶۵ MPa و بعد از زیرکوبی برابر با ۱۴۵ MPa به دست آمد.

- نتایج تحلیل عددی اجزا محدود نشان داد که انجام عملیات زیرکوبی موجب کاهش مدول دینامیک بالاست می‌شود. در مدل مورد بررسی در این پروژه مدول دینامیک بالاست قبل از زیرکوبی برابر با ۱۷۵ MPa و بعد از زیرکوبی برابر با ۱۳۶/۳ MPa به دست آمد.

- بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در این پروژه، رابطه میان مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی خطوط بالاستی در شرایط قبل از زیرکوبی به صورت (LWD=0.68 PLT) و برای شرایط پس از زیرکوبی به صورت (LWD=0.82 PLT) به دست آمد. با توجه به محدودیت تعداد آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش، روابط مورد اشاره به عنوان تخمین اولیه قابل طرح هستند و دستیابی به روابط دقیق‌تر و جامع‌تر مستلزم انجام تعداد بیشتری آزمایش میدانی است.

## ۷. پی‌نوشتها

- 1- Plate Load Test
- 2- Light Weight Deflectometer
- 3- Light Falling Weight Deflectometer
- 4- Falling Weight Deflectometer
- 5- Portable Falling Weight Deflectometer

## ۸. مراجع

- Ali, N.A. and Khosla, N. P. (1987) “Determination of layer moduli using a falling weight deflectometer”, Transportation Research Record-TRB, An International Journal, Vol. 1117, pp. 1-10.

- Asli, C., Feng, Z-Q., Porcher, G. and Rincet, J. (2012) “Back-calculation of elastic modulus of soil and subgrade from portable falling weight deflectom-

مرتضی اسماعیلی، جبارعلی ذاکری، حسین اسدی جرتوده، فاطمه خطیبی

- Naval Facilities Engineering Command, Publications transmittal, NAVFAQ DM7 01" Soil Mechanics", SN 0525-LP-300-7071, September 1986.

- Van Deusan, D.A., Lenngren, C.A. and Newcomb, D.E. (1994) "A comparison of laboratory and field subgrade moduli at the Minnesota road research project", Nondestructive Testing of Pavements and Back calculation of Moduli, Vol. 2, ASTM STP 1198.

- Von-Quintus, H.L. and Killingsworth, B.M. (1998) "Comparison of laboratory and in-situ determined elastic moduli", 76th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

estimation", Scientia Iranica, An International Journal, Vol.18, No. 6, pp. 1214-1221.

- Newcomb, D.E. (1987) "Comparison of field and laboratory estimated resilient moduli of pavement materials", Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 56, pp. 91-106.

- Montepara, A., Tebaldi, G., Marradi, A. and Betti, G. (2012) "Effect on pavement performance of a sub-base layer composed by natural aggregate and RAP", An International Journal of Procedia-Social and Behavioral Sciences, Vol. 53, pp. 981-990