

# بررسی تاثیر مشخصات ذرات بالاست بر مقاومت جانبی خط راه آهن بروش عددی اجزا مجزا

مقاله علمی - پژوهشی

مرتضی اسماعیلی، استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
جبارعلی ذاکری، استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
مهدی شهیدی\*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
پوریا علاالدینی، دانش آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mahdishahidi1369@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

صفحه ۱۸۷-۱۹۸

## چکیده

با توجه به تقاضای افزایش بار محوری و سرعت ناوگان عبوری در خطوط ریلی در حال بهره برداری، تامین مقاومت جانبی خط بالاستی به عنوان چالشی اساسی، برای صاحبان صنایع ریلی مطرح می‌باشد و لذا در ادبیات فنی راهکارهای مختلفی برای افزایش مقاومت جانبی خط ارائه گردیده است. عوامل متعددی در پایداری جانبی خط اثر گذارند اما مهم ترین عامل را می توان اندرکنش لایه بالاست و تراورس بر شمرد. مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که در مطالعات عددی قبلی اندرکنش دانه‌های بالاست و تراورس بطور مشخص با لحاظ رفتار دانه‌های مصالح بالاست در مساله مقاومت جانبی مورد بررسی قرار نگرفته است لذا، در تحقیق حاضر به کمک نرم افزار عددی اجزا مجزا PFC 2D مدلی عددی جهت شبیه سازی رفتار تراورس منفرد تحت بارگذاری جانبی توسعه داده شده است. در ادامه نتایج مدلسازی با اندازه گیری‌های آزمایشگاهی مقاومت جانبی تراورس منفرد مقایسه گردیده است. دانه بندی بالاست مورد استفاده در تحلیل مطابق دانه بندی گروه ۲ نشریه ۳۰۱ ایران و تراورس مدلسازی شده تراورس بتنی B70 بوده است. به منظور مدلسازی هندسی ذرات ضمن عکسبرداری از آنها از تکنیک clustering استفاده شده است. در بخش انتهائی تحقیق با توجه به نتایج معتبر مدل عددی، تحلیل حساسیت برای روی پارامترهایی موثر بر مقاومت جانبی همچون مقدار بار قائم اولیه، خصوصیات مقاومتی مصالح بالاست، ضخامت لایه بالاست و عرض شانه بالاست صورت گرفته است.

## ۱-مقدمه

ساده و بستر بالاستی اساساً شامل سه مولفه می باشند که عبارت‌اند از: اصطکاک بالاست آخوری در دو طرف با تراورس، فشار مقاوم بالاست شانه در انتهای تراورس و اصطکاک کف تراورس با بالاست که در این میان مقاومت انتهائی به عنوان بخش پایدار مقاومت جانبی در محاسبات مهندسی در نظر گرفته می شود [ Nordal and Løhren 2003]، در عمل مقاومت جانبی بالاست یکی از مهمترین فاکتورها برای جلوگیری از انبساط و کماتش ریل‌های خطوط

مقاومت جانبی خط بالاستی را می توان به شکل یک منحنی مشخصه‌ی پاسخ بار-تغییر مکان فنر جانبی تعریف کرد که نشان دهنده‌ی اندر کنش تراورس- بالاست می باشد [Zakeri, 2012, Andrew, 2011]. مطابق نتایج حاصل از آزمایشات مقاومت جانی موجود در ادبیات فنی، می‌توان دریافت که بطور میانگین سهم بالاست، ریل ها و پابندها از کل مقاومت جانبی به ترتیب برابر ۶۵٪، ۳۵٪، و ۱۰٪ است. مقاومت بسیج شده بین یک تراورس تک بلوکه‌ی بتنی

CWR و ریل‌های موجود در قوسها به شمار می‌رود. تکنیک‌های مختلفی برای افزایش مقاومت جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌توان به افزایش عرض و ارتفاع شانه بالاست، تراکم و تثبیت بالاست، بکارگیری تراورس‌های دوبلوکه، افزایش ارتفاع، طول، عرض و در نتیجه وزن تراورس، نصب صفحات انتهایی، کاهش فاصله تراورس‌ها، افزایش مقاومت پیچشی پابند ها و بکارگیری تراورس اصطکاک‌ی اشاره کرد [G. Samavedam] [et al.1989, Esveld, 2001]. استانداردهای موجود راه آهن به میزان تاثیر برخی از این پارامترها اشاره کرده‌اند، در حالی که هیچ‌گونه گزارش موثقی در این باره منتشر نشده است. از جمله این استانداردها می‌توان به AREMA اشاره نمود که برای ابعاد شانه مقدار دقیقی تعیین نکرده است و تنها بر تاثیر عرض شانه بالاست بر مقاومت جانبی تاکید دارد. در سال ۱۳۹۰ ذاکری و براتی تاثیر بار قائم بر مقاومت جانبی تراورس‌های بتنی اصطکاک‌ی را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داده و نشان دادند که با افزایش بار قائم مقاومت جانبی خط با تراورس بتنی اصطکاک‌ی تا ۱۲۸ درصد افزایش می‌یابد [Zakeri and Barati, 2011]. در ادامه در سال ۱۳۹۲ مطالعات عددی و آزمایشگاهی بیشتری انجام شد که می‌توان به تحقیق صورت گرفته توسط ذاکری و بختیاری اشاره کرد که در آن محققین با بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای هندسی لایه بالاست در مقاومت جانبی تراورس بتنی اصطکاک‌ی نشان دادند افزایش عرض شانه باعث افزایش مقاومت جانبی می‌گردد و وجود ارتفاع شانه بالاست نسبت به حالت نبود آن، افزایش ۲۵ درصدی مقاومت جانبی را به دنبال خواهد داشت. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش ارتفاع لایه بالاست کاهش نسبی مقاومت جانبی رخ می‌دهد [ذاکری و بختیاری، ۱۳۹۲]، ذاکری و همکاران در سال ۱۳۹۲ با بررسی عددی و آزمایشگاهی اثر انواع تراورس بر مقاومت جانی خط نشان دادند مقاومت جانبی خط با تراورس بتنی ۱،۳ برابر مقاومت جانبی خط با تراورس چوبی می‌باشد [ذاکری و همکاران، ۱۳۹۲]. ذاکری و فخاری در سال ۱۳۹۲ با بررسی آزمایشگاهی تاثیر تراورس اصطکاک‌ی بر مقاومت جانبی نشان دادند که استفاده از تراورس اصطکاک‌ی سبب افزایش ۵۹ درصدی مقاومت جانبی خط نسبت به حالت استفاده از تراورس معمولی می‌گردد [ذاکری و فخاری، ۱۳۹۲]. از جمله مطالعات عددی در زمینه مقاومت جانبی و تاثیر هندسه خط بر

آن می‌توان به مطالعه انجام شده توسط Kabo اشاره نمود. در مطالعه مذکور بر روی عرض شانه بالاست، بار قائم اولیه، اصطکاک بین تراورس و بالاست و وجود شانه بالاست با گرده ماهی آنالیز حساسیت صورت گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش عرض شانه بالاست از ۲۵ به ۴۰ سانتیمتر افزایش ۱۴ درصدی مقاومت جانبی را به همراه دارد و همچنین وجود گرده ماهی تاثیری بر مقاومت جانبی خط ندارد [Kaboo, 2006]. مروری بر کارهای انجام شده نشان دهنده آن است که در زمینه کارهای عددی در حوزه مقاومت جانبی خطوط بالاستی عمده کارهای صورت گرفته مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته بوده و در آن اندرکنش دانه‌های بالاست با یکدیگر و دانه‌های بالاست با تراورس در بسیج مقاومت جانبی دیده نشده است و لذا در مقاله حاضر با استفاده از روش عددی اجزاء مجزاء و به کمک نرم افزار PFC<sup>2D</sup> به مدلسازی عددی مقاومت جانبی تراورس در آزمایش مقاومت جانبی تراورس منفرد STPT پرداخته شده و نتایج تحلیل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و دقت این روش عددی در برآورد مقاومت جانبی به اثبات رسیده است. در ادامه با استفاده از مدل عددی معتبر سازی شده تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای موثری همچون بار قائم، عرض شانه بالاستی، ارتفاع لایه بالاستی، خواص دانه‌های بالاستی بر مقاومت جانبی خط صورت گرفته است.

## ۲- توسعه مدل عددی اجزاء مجزاً جهت بررسی

### مقاومت جانبی تراورس تک

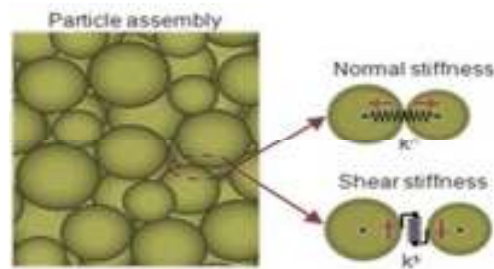
روش اجزاء مجزا (DEM)، یک روش عددی برای محاسبه تنش‌ها و جابجایی‌ها در محیط‌های ناپیوسته دانه‌ای مانند شن و ماسه می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است در این روش ذرات دانه‌ای به عنوان مجموعه‌ای از ذرات صلب مدل گردیده و تعامل بین هر ذره با سایر ذرات بصورت جداگانه در نظر گرفته می‌شود. این روش اولین بار توسط Cundall و Strack در سال ۱۹۷۹ معرفی گردید [Cundall and Strack, 1971]. با پیشرفت روش در سال‌های بعد McDowell, Bolton با در نظر گرفتن هر ذره به صورت دسته‌ای از ذرات متصل بهم و مشاهده تسلیم همزمان با شروع شکسته شدن اتصال بین ذرات، شکست ذره را مدل سازی

تحت بارگذاری جانبی بروش اجزا مجزا انجام نشده است. با توجه به مطالب ذکر شده لزوم بررسی مقاومت جانبی خط بروش المان مجزا به منظور فهم بهتر تاثیر اندرکنش ذرات بالاست با یکدیگر و با تراورس مشاهده می‌گردد [حکمت، ۱۳۹۰]. لذا، در ادامه روند مدل‌سازی مساله به روش اجزاء مجزا بررسی می‌گردد.


## ۲-۱- مشخصات هندسی دانه‌های بالاست

برای مدل‌سازی بالاست استفاده از پیش فرض نرم افزار PFC 2D یعنی دایره‌ای بودن ذرات با ماهیت شکسته‌ای دانه‌های بالاست مغایر است و لذا باید دانه‌های بالاست را با مجموعه‌ای از دایره‌ها محیطی متصل بهم مدل کرد تا بتوان شکستگی دانه‌های بالاست را مدل‌سازی نمود. به همین منظور در آزمایشگاه با انجام آزمایش دانه بندی بر روی بالاست و محاسبه میزان دانه‌های باقی مانده بر روی هر الک، یک شکل دانه با بیشترین میزان تکرار از نظر شکستگی انتخاب شده سپس ابعاد و زوایای آن توسط کولیس اندازه‌گیری گردید. سپس با استفاده از نرم افزار ترسیمی AUTOCAD مناسب‌ترین دوایر محیطی ذره نیز تعیین گردیدند. سپس مجموعه ذرات به دست آمده به صورت هم بسته و به عنوان یک دانه مدل‌سازی گردید و این روند برای سایر ذرات نیز انجام شد. در مجموع با تولید دانه بندی مورد نظر که منطبق بر گروه دانه بندی ۲ نشریه ۳۰۱ نیز می‌باشد تولید دانه‌ها صورت گرفته و محل دانه‌ها نیز به صورت تصادفی انتخاب شده است. شکل ۲ مجموعه دانه‌های تولید شده و شکل هندسی هریک را نشان می‌دهد.

کردند [McDowell and Bolton, 1966]. McDowell, Lu نیز با در نظر گرفتن هر ذره به صورت دسته‌ای از ذرات متصل بهم و مدل‌سازی گسیختگی از طریق شکست اتصالات، شکست ذرات خاک را مدل کردند. از آنجا که بالاست دارای ذرات دانه‌ای با قطر تقریباً ۴۰ (میلی‌متر) می‌باشد با استفاده از روش اجزاء مجزا رفتار بالاست تحت شرایط مختلف امکان شبیه‌سازی خواهد داشت. McDowell و Lim با کاهش تنش تسلیم برای توده‌ها نسبت به تنش تسلیم در بالاست واقعی به دلیل کروی بودن ذرات شبیه‌سازی شده، مدل‌سازی بالاست به روش المان مجزا را انجام دادند همین محققان در همان سال مدل‌سازی بالاست را با نمایش هر ذره بالاست به صورت کره‌ها و دسته‌های هشت تایی توپ برای تامین قفل شدگی کافی ذرات با در نظر گرفتن دسته‌های هشت تایی توپ صورت دادند. Lu و McDowell بالاست را تحت بارگذاری سیکلیک و استاتیک با استفاده از دسته‌هایی با ده توپ به شکل چهار وجهی مورد مطالعه قرار دادند [McDowell, 2005, Lu and McDowell, 2006]. Lim و همکاران با ارایه دست‌آوردی جدید در زمینه مدل‌سازی دو بعدی ذرات بالاست، با گرفتن عکس از هر ذره و تعیین هندسه آن به مطالعه عددی و آزمایشگاهی بالاست تحت بارگذاری سیکلیک پرداخته‌اند [Lim et al, 2011]. Mingfei Lu [Indraratna] نیز در قالب تز دکترای خود در دانشگاه ناتینگهام با مدل‌سازی دانه‌های بالاست با استفاده از clustering به بررسی میزان چرخش دانه‌های بالاست پس از بارگذاری و میزان خردشدگی دانه‌ها پرداخته است [Lu, 2008]. رفتار بالاست تحت بار قائم به روش اجزا محدود توسط محققان زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است این در حالی است که هیچ تحقیقی در زمینه بررسی رفتار بالاست



شکل ۱. اندرکنش مجموعه ذرات در روش اجزاء مجزاء و نرم افزار PFC<sup>2D</sup>

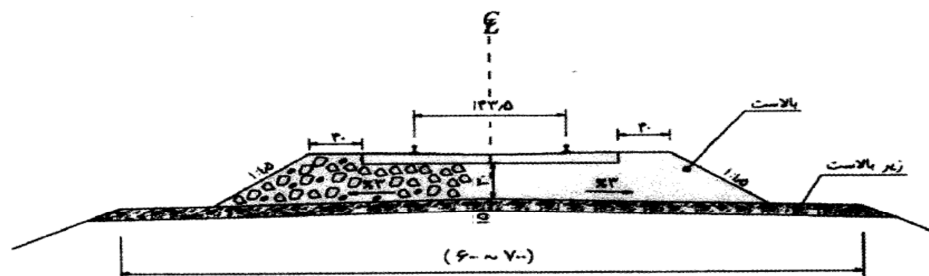
اندازه دانه	۰,۵ (in)	۰,۷۵ (in)	۱ (in)
ذرات بالاست			
ذرات PFC <sup>2D</sup>			
اندازه دانه	۱,۵ (in)	۲ (in)	۲,۵ (in)
ذرات بالاست			
ذرات PFC <sup>2D</sup>			

شکل ۲. دانه‌های بالاست مدل سازی شده در نرم افزار PFC<sup>2D</sup>

### ۳-هندسه و شرایط مرزی مدل

مجموعه ای از دانه ها به یکدیگر ساخته شده و در مدل قرار گرفته است. مرز پائینی مدل مطابق شرایط آزمایشگاه صلب در نظر گرفته شده و سایر وجوه آزاد می باشند. شکل ۴ نمونه مدل عددی تولید شده در محیط نرم افزار را نشان می دهد.

هندسه خط مورد استفاده در مدلسازی منطبق بر خط بالاستی یک خطه ایران مندرج در نشریه ۳۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور و مطابق (شکل ۳) می باشد. در روند مدلسازی در نرم افزار PFC<sup>2D</sup> تراورس با طول ۲۶۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده و از اتصال



شکل ۳. مقطع خط استاندارد بالاستی مطابق نشریه ۳۰۱ ایران

### ۳-۱- مدل رفتاری و مشخصات مکانیکی مصالح

در روند مدلسازی برای تراورس وزن مخصوص (۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، مقاومت فشاری (۶۰۰ کیلوگرم بر متر مربع) و برای بالاست وزن مخصوص (۲۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، در نظر گرفته شد. ضریب اصطکاک بین تراورس و بالاست برابر ۰٫۸ در نظر گرفته شد [Kabo, 2006].

مدل تماس بین دانه ای در ذرات بالاست مدل هرتز با سختی تماسی و برشی نشان داده شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در روند ساخت هر دانه بالاست با استفاده از مجموعه ای از ذرات دایره ای، مدل تماسی بین دانه‌های بالاست به صورت هرتزین در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات رفتاری و مکانیکی مصالح

پارامتر	واحد	مقدار
وزن مخصوص تراورس	کیلوگرم بر متر مکعب	۲۷۰۰
مقاومت فشاری بتن	کیلوگرم بر متر مربع	۶۰۰
وزن مخصوص بالاست	کیلوگرم بر متر مربع	۲۱۰۰
ضریب اصطکاک بین تراورس و بالاست	-	۰٫۸
سختی برشی ذرات بالاست	نیوتن بر متر	$۴٫۹۷ \times ۱۰^۸$
سختی قائم ذرات بالاست	نیوتن بر متر	$۴٫۹۷ \times ۱۰^۸$

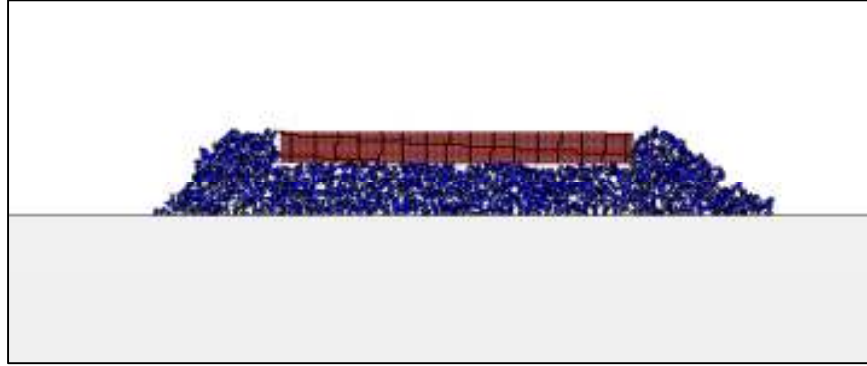
### ۳-۲- بارگذاری و روش تحلیل

جابجایی تا ۲ میلیمتر ثبت می‌شود [Lichtberger, 2007] به منظور اجرای این آزمایش، ابتدا پابندهای یک تراورس باز شده و سپس یک جک هیدرولیکی در شولدر پابندها نصب می‌گردد. در نتیجه، به کمک یک ابزار هیدرولیکی بوسیله‌ی اعمال نیرو به شولدر پابند، تراورس نسبت به ریل هل داده می‌شود. در طرف دیگر، برای اندازه‌گیری میزان جابجایی تراورس، یک LVDT بر روی آن نصب شده و میزان جابجایی جانبی یک تراورس بوسیله‌ی پردازشگر ثبت می‌گردد. برای انجام آزمایش STPT در این تحقیق به منظور ایجاد شرایط متناسب با دو بعدی بودن نرم افزار، بالاست ناحیه آخری تخلیه شده و سپس تست STPT بر روی خط صورت گرفته است که نتایج آن در شکل نشان ملاحظه می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج آزمایش جهت کنترل تکرار پذیری سه بار انجام شده است. شکل ۵ تصویر مجموعه مورد استفاده در آزمایش تراورس منفرد را نشان می‌دهد.

پس از آماده شدن مدل در نرم افزار PFC 2D و اعمال خواص مصالح، بارگذاری مدل انجام شد. در مرحله اول پس از اعمال وزن، تعادل اولیه مدل بررسی گردیده است و در ادامه بارگذاری جانبی با گام یک نیوتن به کمک دستور TIME و با FISH نویسی در محیط نرم افزار به تراورس اعمال گردیده است [Itasca, 2003].

### ۳-۳- اعتبارسنجی مدل عددی اجزا مجزا

در این بخش با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت جانبی تراورس منفرد نسبت به اعتبارسنجی مدل عددی توسعه داده شده اقدام گردیده است. آزمایش Single Tie Push Test (STPT) یک روش آزمایشگاهی استاندارد برای تعیین مقاومت جانبی تراورس تک می‌باشد که در طی سالهای ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۴ توسط محققان متعدد مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، با اعمال نیرو به تراورس، جابجایی تراورس نسبت به نیروی اعمالی اندازه‌گیری می‌گردد. اغلب، این

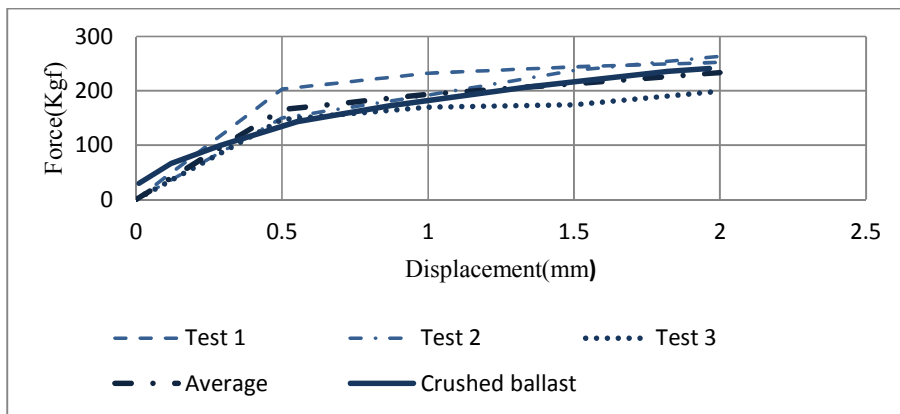


شکل ۴. مدل عددی توسعه داده شده در نرم افزار  $PFC^{2D}$



شکل ۵. روند آماده سازی خط (تخلیه بالاست آخوری) برای انجام تست STPT

با توجه به عرض تراورس ۲۵ سانتیمتری تراورس در شرایط آزمایشگاهی، نتایج تحلیل عددی در ۰٫۲۵ ضرب و با نتایج آزمایش STPT در شکل ۶ مقایسه گردیده است.



شکل ۶. نمودار نیرو-تغییر مکان در آزمایش STPT بدون بالاست آخوری مقایسه آن با مدل عددی در  $PFC^{2D}$

تراکم لایه بالاست و نیروی مقاوم ناشی از وزن بالاست شانه بر مقاومت جانبی خط موثرند و از سوی دیگر بارگذاری قائم بر تراکم لایه بالاست، تغییر ضخامت و عرض شانه بر وزن بالاست شانه و خواص دانه‌های بالاست بر اصطکاک دانه‌ای بالاست موثر می‌باشند. به همین سبب آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای زیر در مدل عددی صورت گرفته است:

- بارگذاری قائم [ذاکری و بختیاری، ۱۳۹۲؛ ذاکری و براتی، ۱۳۹۰]

- خواص دانه‌های بالاست (سختی برشی و سختی قائم) (Lu And McDowell, 2006)

- ضخامت لایه بالاست [ذاکری و بختیاری، ۱۳۹۲، Kabo, 2006]

- عرض شانه خط [ذاکری و بختیاری، ۱۳۹۲، Kabo, 2006]

همانطور از شکل ۶ پیداست میزان نیرو متناظر با جابجایی ۲ میلی‌متر در آزمایش STPT بین ۲۱۱ تا ۲۳۶ به دست آمده است، در حالیکه این مقدار در مدل عددی با احتساب یک چهارم شدن مقادیر در حدود ۲۲۵ محاسبه شده که این موضوع موید صحت کارکرد مدل عددی می‌باشد. از سوی دیگر روند تغییرات نیرو و جابجایی در هر دو دسته نتایج همخوانی مناسبی را با هم نشان می‌دهند.

### ۳-۳- بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت جانبی خط بالاستی

پس از اطمینان از صحت مدل سازی صورت گرفته در نرم افزار PFC<sup>2D</sup> پارامترهای موثر بر مقاومت جانبی شناسایی شده و آنالیز حساسیت بر روی آنها صورت گرفته است. با توجه به مطالعات صورت گرفته، اصطکاک دانه‌های بالاست با تراورس،

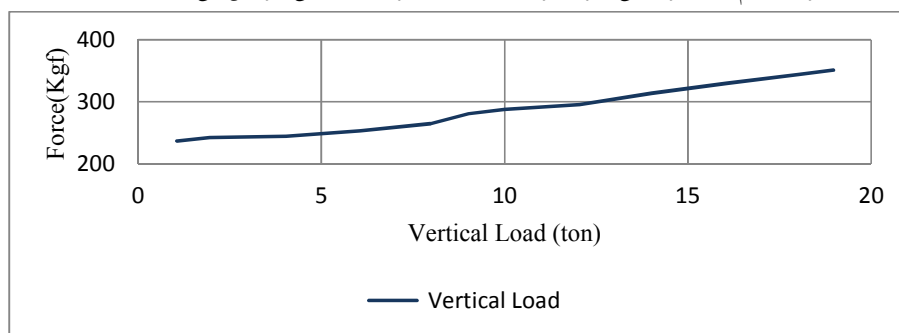
جدول ۲. مقادیر پارامترهای انتخابی برای آنالیز حساسیت

بار اعمالی (کیلوبر نیوتن)											بارگذاری قائم	
۱,۵	۲,۵	۴	۵	۶	۷	۱۰	۱۲	۱۵	۱۸	۲۰	۲۲,۵	۲۵
سختی برشی و سختی قائم (Ks,Kn)											خواص دانه های بالاست	
Ks=0.5 Kn				Ks=0.75 Kn				Ks=Kn				
ضخامت لایه بالاست (سانتی‌متر)											ضخامت لایه بالاست	
۵۰			۳۵				۲۵					
عرض شانه بالاست (سانتی‌متر)											عرض شانه بالاست	
۵۰			۴۰				۳۰					

### تاثیر بارگذاری قائم بر مقاومت جانبی تراورس تک

است همانطور که از شکل ۷ پیداست با افزایش بار قائم اولیه وارد بر لایه بالاست میزان مقاومت لایه بالاست در برابر نیروهای جانبی افزایش می‌یابد.

تراکم لایه بالاست با میزان مقدار بار وارد به لایه بالاست متناسب می‌باشد، به همین سبب با تغییر نیروی قائم اولیه اعمالی به لایه بالاست تاثیر بار قائم مورد بررسی قرار گرفته

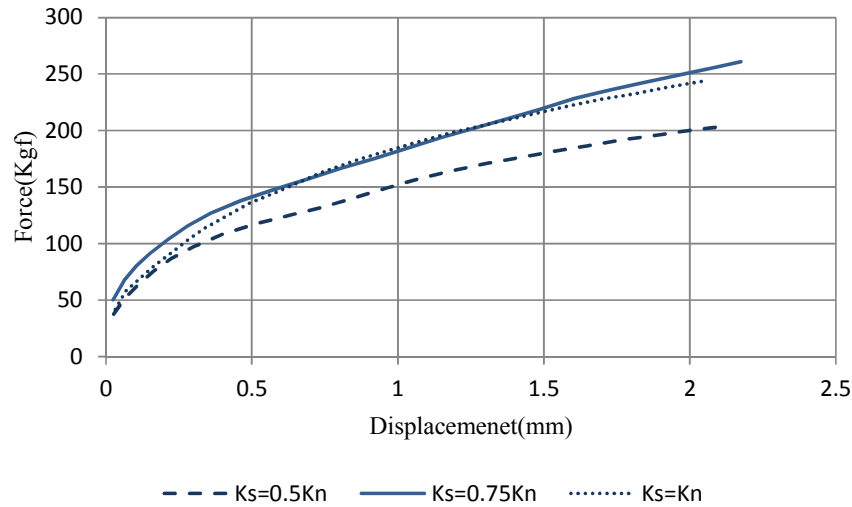


شکل ۷. تاثیر تغییر بار قائم اولیه بر مقاومت جانبی تراورس تک

### تغییر خواص دانه‌های بالاست (سختی برشی و سختی قائم)

به این مقدار، مدل سازی در سه حالت  $K_s=0.5k_n$ ،  $K_s=K_n$ ،  $K_s=0.75K_n$  صورت گرفت و مقادیر مقاومت جانبی خط به ترتیب برابر  $(Kgf)$  ۲۴۳،۵،  $(Kgf)$  ۲۵۴،۵،  $(Kgf)$  ۲۰۰ بدست آمد. این تغییرات مبین اهمیت پارامترهای مقاومت برشی بالاست بر مقاومت جانبی می‌باشد. نتایج تحلیل عددی مقاومت جانبی در شکل ۸ نشان داده شده است.

تغییر سختی برشی و قائم مصالح بالاست، با تغییر در میزان مقاومت مصالح بالاست در برابر نیروهای قائم و برشی بر مقاومت جانبی خط اثر گذار می‌باشد. مقادیر سختی قائم و برشی،  $k_s$  و  $k_n \times 10^4$  در نظر گرفته شد که این مقدار با توجه به راهنما نرم‌افزار محاسبه شده است (Lu And 2005, [ Lim And McDowell McDowell, 2006]. با توجه

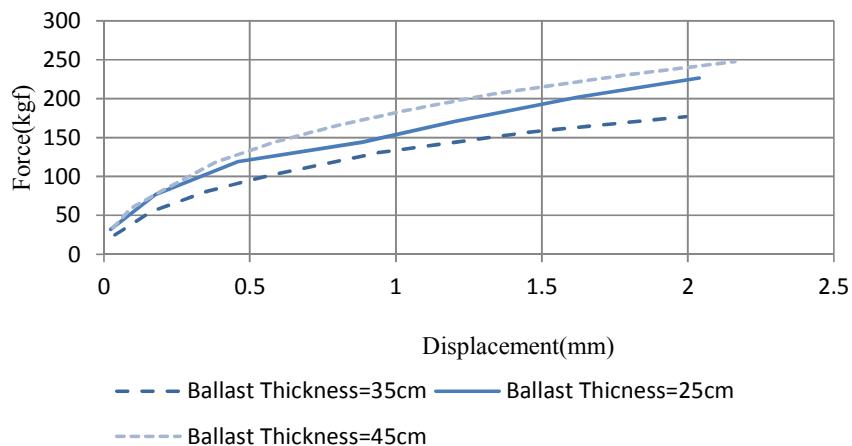


شکل ۸. تاثیر پارامترهای سختی برشی و تماسی بین دانه‌ها بر مقاومت جانبی تراورس منفرد

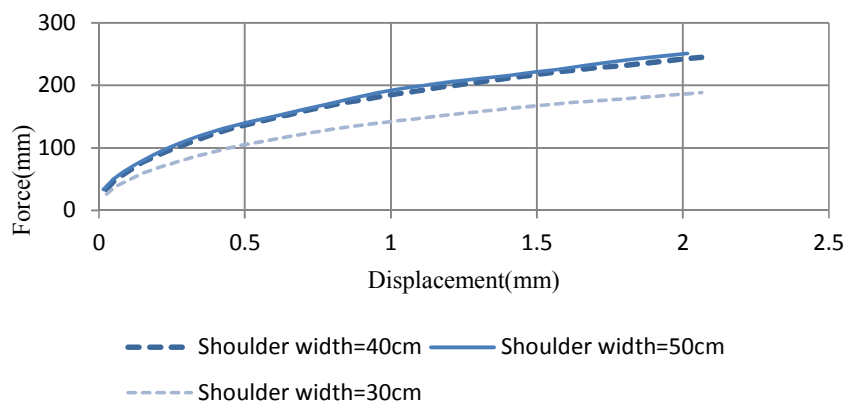
در زیر تراورس باید ۳۵ سانتی‌متر منظور گردد و برای خطوط فرعی نیز حداقل ضخامت بالاست را می‌توان تا ۲۵ سانتی‌متر انتخاب نمود. به همین سبب در تحلیل عددی سه ضخامت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ سانتی برای بالاست در نظر گرفته شده و مقادیر مقاومت جانبی به ازای (میلی‌متر) ۲ جابجایی به ترتیب ۲۲۶،۱۷۶ و ۲۴۷ محاسبه گردید. نتایج مقاومت جانبی برای سه ضخامت یاد شده در شکل ۹ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در تمامی تحلیل‌های صورت گرفته در این بخش عرض خط ۴۰ سانتی‌متر، شیب شیروانی ها ۱:۲ و طول تراورس ۲۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

تاثیر ضخامت لایه بالاست بر مقاومت جانبی تراورس تک ضخامت لایه بالاست در زیر تراورس باید به اندازه‌ای انتخاب شود که بتواند تنش موجود در زیر تراورس را به میزانی که قابل تحمل توسط بستر روسازی باشد کاهش دهد. توزیع تنش توسط بالاست را میتوان با روشهای تحلیل خطی، بوسینسک یا مدل‌سازی آن به کمک اجزا محدود و یا هر روش دقیق دیگر محاسبه کرد [نشریه ۳۰۱]. مطابق با نشریه ۳۰۱، ضخامت بالاست زیر تراورس در خطوط اصلی نباید کمتر از ۳۰ سانتی‌متر باشد و لیکن در صورت استفاده از تراورس‌های بتنی، برای بالا بردن خاصیت ارتجاعی خط، حداقل ضخامت بالاست





شکل ۹. تاثیر ضخامت بالاست زیر تراورس بر مقاومت جانبی تراورس منفرد



شکل ۱۰. تاثیر عرض شانه بالاست بر مقاومت جانبی تراورس منفرد

### تاثیر عرض شانه خط بر مقاومت تراورس تک

گرفته شده و میزان مقاومت جانبی به ازای (میلی متر) ۲ محاسبه گردید. همانگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده مقاومت جانبی خط برای عرض شانه‌ی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ به ترتیب برابر با ۱۸۸، ۲۴۰ و ۲۵۱ به دست آمده است. این موضوع نشان دهنده آن است که با افزایش عرض شانه مقاومت جانبی افزایش می‌یابد که این افزایش از عرض ۳۰ به ۴۰ بصورت قابل ملاحظه‌ای می‌باشد در حالی که با افزایش عرض شانه از ۴۰ به ۵۰ این افزایش مقاومت جانبی ناچیز می‌باشد.

عرض شانه بالاست باید به اندازه ای باشد که بتواند پایداری عرضی خط در برابر نیروهای ناشی از نوسانات جانبی و نیروهای گریز از مرکز در قوس‌ها را حفظ کند. حداقل عرض شانه بالاست مطابق با نشریه ۳۰۱ نباید کمتر از ۴۰ سانتی‌متر انتخاب شود [نشریه ۳۰۱]. به همین منظور در روند تحلیل عددی سه عرض شانه بالاست ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در تمام آنالیزها ارتفاع لایه بالاست ۳۵ سانتی‌متر، شیب شیروانی‌ها ۱:۲ و طول تراورس ۲۶۰ سانتی‌متر در نظر

## ۵- نتیجه گیری

- ذاکری، ج.ع. و فخاری، م.، (۱۳۹۲)، "بررسی آزمایشگاهی تاثیر تراورس اصطکاکی بر مقاومت جانبی"، پژوهشکده حمل و نقل، سال دهم، شماره چهارم، زمستان، ص. ۴۰۹-۴۰۱.

- ذاکری، ج.ع. و بختیاری، ا.، (۱۳۹۲)، "بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای هندسی لایه بالاست در مقاومت جانبی تراورس بتنی اصطکاکی"، پژوهشکده حمل و نقل، سال دهم، شماره دوم، تابستان، ص. ۱۵۹-۱۶۹.

- ذاکری، ج.ع. و براتی، م.، (۱۳۹۰)، "تاثیر بار قائم بر مقاومت جانبی تراورسهای بتنی اصطکاکی"، ششمین کنگره مهندسی عمران، ایران، سمنان، دانشگاه سمنان.

- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۸۴)، نشریه ی ۳۰۱، "مشخصات فنی عمومی روسازی بالاستی راه آهن"، ایران.

- کسرائی، ا.، (۱۳۹۲)، "مطالعه عددی مقاومت جانبی لایه بالاست در خط راه آهن بالاستی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- بختیاری، الف.، (۱۳۹۲)، "بررسی عوامل موثر در مقاومت به جابجایی جانبی خط در خطوط بالاستی"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- حکمت، الف.، (۱۳۹۱)، "بررسی فشار زیر تراورس با در نظر گرفتن مشخصات تصادفی بالاست"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-Kabo, E., (2006), "A numerical study of the lateral ballast resistance in railway tracks".

-Lim, W. L., and McDowell, G. R., (2005), "Discrete element modelling of railway ballast".

-Lu, M., and McDowell, G.R., (2006), "Discrete Element Modelling of Ballast Abrasion", Geotechnique, Vol. 56, No. 9. pp. 651-655.

-Hossain, Z., Indraratna, B., Darve, F., and Thakur, P.K., (2007), "DEM Analysis of Angular Ballast Breakage under Cyclic Loading", Geomechanics and Geoengeering, Vol. 2, No. 3. pp. 175-181.

هدف از انجام این پروژه دست یابی به مدلی مناسب برای توصیف رفتار جانبی خط راه آهن در آزمایش STPT می باشد که این امر با بررسی رفتار جانبی خط، اثر شکستگی دانه های بالاست با مدل سازی دانه های بالاست بصورت Cluster، ثبت همزمان بار و جابجایی در مدل سازی و مقایسه نتایج حاصل از PFC2D با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت.

با توجه به نحوه مدل سازی دانه ها در نرم افزار PFC2D که بصورت دایره ای صورت می گیرد و ماهیت شکسته دانه های بالاست، دانه های بالاست بصورت دایره های متصل بهم (Cluster) مدل سازی گردد تا شکستگی های دانه های بالاست نیز مد نظر قرار بگیرد.

نتایج بدست آمده در نرم افزار PFC 2D، مقادیر مقاومت جانبی خط را بین ۲۲۵ تا ۲۳۵ کیلوگرم نشان می دهند، این در حالی است که مقادیر بدست آمده در تست های STPT با خالی کردن بالاست آخوری، مقاومت جانبی را بین ۲۱۱ تا ۲۳۶ کیلوگرم نشان می دهد که این امر نشان دهنده ی صحت مدل عددی توسعه داده شده می باشد.

افزایش بار قائم اولیه سبب افزایش مقاومت جانبی خط می گردد که این روند افزایشی غیر خطی می باشد.

افزایش عرض شانه بالاست باعث افزایش مقاومت جانبی خط بین ۵٪ تا ۱۰٪ می گردد.

بهبود مصالح از دید سختی برشی و قائم می تواند سبب افزایش مقاومت گردد. که این افزایش از  $K_s = 0.5 \text{ Kn}$  به  $K_s = 0.75 \text{ Kn}$  کاملاً مشهود و در حدود ۲۷٪ می باشد.

افزایش ضخامت لایه بالاست بطور نامظمی افزایش می باشد و برای نتیجه گیری صحیح در این بخش احتیاج به مدل سازی و آنالیز بیشتر می باشد.

## ۶- مراجع

- ذاکری، ج.ع. و همکاران، (۱۳۹۲)، "بررسی عددی و آزمایشگاهی اثر انواع تراورس بر مقاومت جانی خط"، سومین کنفرانس بین المللی راه آهن، ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت.

- Zakeri J. A., (2012), "Lateral resistance of Railway track", Chapter 13 from "Reliability and Safety in Railway" Book; Edited by Xavier Perpinya, InTech - Open Access Publisher.
- Nordal S. R. and Løhren, A. H., (2003), "Concrete friction sleeper for increased lateral track resistance", International Conferences on railway engineering, London, UK.
- Lichtberger, B., (2007), "The lateral resistance of the track", European Railway Review, Issue 3&4.
- Le Pen, L. M. and Powrie, W., (2010), "Contribution of base, crib, and shoulder ballast to the lateral sliding resistance of railway track: a geotechnical perspective", Journal of Rail and Rapid Transit, pp. 113-128.
- Kish. A, Ph.D., (2011), "On the Fundamentals of Track Lateral Resistance".
- Samavedam. G, Kanaan, A, Pietrak. J., Kish, A., Sluz. A., (2015), "Wood Tie Track Resistance Characterization and Correlation Study", US Department of Transportation.
- Itasca., (2003), "Particle Flow Code in Two Dimensions", Itasca Consulting Group, Inc, Minnesota.
- Indraratna. B, Salim. W, Rujiakiatkamjorn. C., (2011), "Advanced Rail Geotechnology - Ballasted Track", ISBN: 978-0-415-66957-3 (Hbk).
- Esveld, C., (2001), "Modern railway track", Second edition, TU-Delft.
- Lu. M., (2008), "Discrete Element Modelling of Railway Ballast", University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy.

# Study of Effect of Ballast Particles on Lateral Resistance of Railway Track Using Discrete Element Method

*Morteza Esmaeili, Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Jabbar Ali Zakeri, Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Mehdi Shahidi, M.Sc., Grad., School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Pooria Alaedini, B.Sc., Grad., School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*E-mail: Mahdishahidi1369@gmail.com*

Received: October 2021- Accepted: May 2022

## ABSTRACT

Regarding to increasing demand for axle-load and fleet operation speed in the ballasted railway lines, provision of lateral-resistance is raised among the owners of railway industries. So, different solutions are presented to increase lateral resistance of the track in technical literature. Several factors affect the track lateral resistance but the most important one is the interaction between ballast layer and sleeper. Literature review shows that the interaction between ballast particles and sleepers has not widely been definitely studied by consideration of particle behavior of ballast material in lateral resistance problem. Therefore in this paper a numerical model has been developed to simulate single sleeper push test by discrete element numerical software PFC 2D. The results was compared with laboratory measurement results. Ballast grading used in this paper was according to the Group 2 of Iran Code No. 301 and the modeled sleeper was B70 concrete sleeper. To perform geometric modeling of the particles, clustering method was used as well as photography. Finally, regarding the results of the valid numerical model, sensitivity analysis were performed on the parameters affecting the lateral resistance including initial upright load, ballast material properties, ballast layer thickness and ballast shoulder width.

**Keywords:** Lateral Resistance, Ballast, Discrete Element, PFC 2D, Sensitivity Analysis