

ارزیابی عددی رفتار مصالح بالاست مخلوط با خرده لاستیک

با رویکرد اجزای مجزا در آزمون جعبه بالاست

مقاله علمی - پژوهشی

مسعود فتحعلی^{*}، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

سینا ارگی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

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

فریدون مقدس نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^{*} پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.fathali@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵

صفحه ۱۸۲-۱۶۱

چکیده

مصالح بالاست نقش بسیار مهمی را در روسازی خطوط ریلی ایفا کرده که از جمله مهمترین آن‌ها، توزیع تنش‌های رسیده به لایه‌های زیرین و تامین ارتجاعیت و زهکشی مناسب می‌باشد. در عین حال یکی از مشکلات اصلی این مصالح، شکستگی تحت تاثیر بارهای عبوری دینامیکی و نیز عملیات زیرکوبی است که در طول زمان و به ویژه برای سنگ‌های با جنس ضعیفتر، منجر به آلودگی بالا و نیاز به نگهداری و تعمیر فراوان می‌گردد. یکی از راه‌حل‌های اثبات شده برای افزایش دوره عمر مصالح بالاست و کاهش مشکلات نگهداری ناشی از آن، افزودن درصد بهینه‌ای از خرده لاستیک به بالاست است که به ارتقای رفتار سایشی و دوام مصالح کمک شایانی نموده و موجب شکست کمتر دانه‌ها می‌گردد. در این مقاله به بررسی عددی رفتار مصالح بالاست مخلوط با خرده لاستیک به کمک شبیه سازی دو بعدی آزمون جعبه بالاست با رویکرد اجزای مجزا پرداخته شده است. به کمک این مدلسازی عددی در نرم افزار PFC که توسط مطالعه آزمایشگاهی واقعی آزمون جعبه بالاست اعتبار سنجی شده است، ارزیابی تاثیر افزایش بار محوری (سطوح مختلف تنش) و سرعت بهره برداری (فرکانس‌های مختلف بارگذاری) با انجام مطالعه پارامتری در محدوده درصد بهینه خرده لاستیک پیگیری شده است. بر این اساس، درصد بهینه اختلاط بین مصالح بالاست و خرده لاستیک در شرایط مختلف تنش و فرکانس تعیین شده است. نتایج نشان داد که سطح تنش تاثیر بسیار بالایی را بر نتایج دارد. این در حالی است که تاثیر فرکانس به مراتب پایین تر است. مطابق نتایج حاصل شده همچنین، ۵ تا حداکثر ۱۰ درصد وزنی خرده لاستیک به عنوان بهینه ترین درصد اختلاط هم از منظر نشست مصالح و هم از منظر شکست ذرات قابل پیشنهاد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: راه آهن، بالاست، خرده لاستیک، شکست، روش اجزای مجزا

۱- مقدمه

می‌شود. اگرچه مصالح بالاست از دانه‌های سخت شکسته شده از سنگ‌های با مقاومت بالا و بدون هوازگی تشکیل شده است، به تدریج تحت بارهای

در خط آهن بالاستی به عنوان متداول ترین روسازی مورد استفاده در راه آهن، بخش عمده‌ای از بودجه نگهداری و تعمیر صرف رفع مشکلات لایه بالاست

فتحعلی، ۱۳۸۴). آلودگی و نشست‌های تجمعی لایه بالاست می‌تواند موجب کاهش راحتی سفر، محدودیت سرعت و در شرایط بحرانی افزایش پتانسیل خروج از خط قطارها شود و همچنین زوال سریع‌تر سایر اجزاء روسازی و نیز ناوگان را به همراه داشته باشد (Indraratna et al. 2011).

عبوری تکراری و دینامیکی دچار زوال می‌گردد (شکل ۱). گوشه‌های تیز مصالح در اثر تمرکز تنش‌های بالا در نقاط تماسی با سایر ذرات دچار شکست می‌شود. این موضوع کاهش زاویه اصطکاک داخلی (یا مقاومت برشی) مصالح را به دنبال دارد که در نتیجه موجب افزایش نشست پلاستیک در خط می‌گردد (نصر آزادانی و



شکل ۱. نمونه‌ای از زوال و شکستگی بالاست در خط ریلی

نام نئوبالاست، به کاهش زوال بالاست توسط چسبیدن ذرات ریز لاستیک به بالاست انجامیده است (Fontserè et al. 2016). مطالعات سول سانچز و همکاران نیز به بررسی عملکرد اختلاط مصالح بالاست و خرده لاستیک‌های با دانه بندی در محدوده زیربلاست بدون استفاده از چسب‌های پلیمری پرداخته است (Sol-Sanchez et al. 2015). به گونه‌ای که خرده لاستیک‌های ریزدانه‌تر، در فضاهای خالی بین ذرات درشت دانه بالاست قرار گرفته و الاستیسیته تامین شده می‌تواند به کاهش شکست و نشست مصالح در درصد بهینه حجمی کمک کند. این روش همچنین هزینه و دردهای پیوستگی و چسبندگی بین مصالح بالاست و خرده لاستیک را ندارد. در عین حال محدودیت‌هایی نظیر تغییر ساختار دانه بندی مصالح بالاست از حالت یکنواخت به غیر یکنواخت و کاهش ظرفیت نفوذپذیری مصالح همچنان در این روش مشاهده می‌شود. در دو مطالعه دیگر توسط فتحعلی و همکاران با دانه بندی مشابه مصالح بالاست و خرده لاستیک، ارزیابی رفتار مصالح بالاست مخلوط با خرده لاستیک با رویکرد آزمایشگاهی با تاکید بر آزمایش جعبه بالاست (Fathali et al. 2017)

با هدف ارتقای کیفیت مصالح بالاست و به تبع آن کاهش هزینه‌ها و دوره‌های زمانی نگهداری و تعمیر، در دهه‌های اخیر راه حل‌های کاربردی نوینی توسعه یافته است. برخی از محققان، تاثیر پر کردن خلل و فرج بین ذرات را با استفاده از پلی یورتان چسبنده تحلیل کرده اند. تحقیق شاخص این روش که کندهی و همکاران در سال ۲۰۱۳ منتشر کرده اند، با عنوان "شی ترک" نام گذاری شده است (Kennedy et al. 2013). نتایج این مطالعات امکان افزایش الاستیسیته و مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک را در لایه بالاست نشان داده اند. به طریق مشابه، برخی دیگر از محققین مطالعات خود را بر استفاده از خرده لاستیک به عنوان تعدیل کننده رفتار بالاست متمرکز کرده‌اند، چرا که بهره‌گیری از مصالح لاستیکی باز یافتی به عنوان اجزاء الاستیک برای خطوط راه آهن تایید شده است (Sol-Sanchez et al. 2014). یکی از این روش‌ها که توسط هو و همکاران ایشان ارایه شده است، بالاست چسبنده ارتجاعی نامیده شده که ترکیبی از مصالح استاندارد بالاست و ذرات خرده لاستیک است که توسط چسب اپوکسی انعطاف پذیری به هم چسبیده است (Ho et al. 2014). پروژه دیگر با

لاستیک نتیجه شده از مطالعات آزمایشگاهی قبلی، بررسی و ارزیابی شده است.

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱- مروری بر فرآیند انجام آزمون

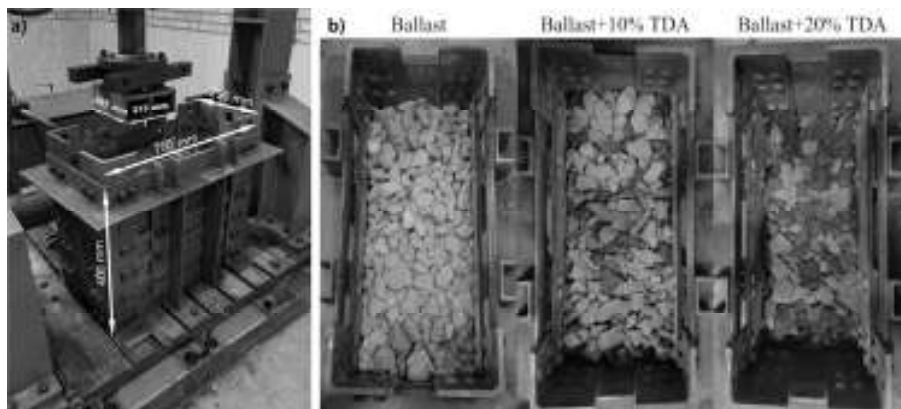
رفتار تغییر شکل مصالح بالاست مخلوط با خرده لاستیک به همراه شکست دانه‌ها تحت تاثیر ترافیک عبوری را می‌توان توسط آزمایش جعبه بالاست شبیه سازی نمود. این کار در سال ۲۰۱۷ توسط فتحعلی و همکاران و به کمک سری آزمون‌های انجام شده با دستگاه جعبه بالاست پیگیری شده است (Fathali et al. 2017). برای این منظور، از خرده لاستیک با دانه بندی شماره ۴ نشریه ۳۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور بهره گرفته شده است، ضمن آن که سه درصد وزنی ۱۰ و ۲۰ برای تاثیر این مصالح انتخاب و ارزیابی شده است. دانه بندی مینا بر این اساس انتخاب شده است که یکسانی مشخصات دانه بندی را با دانه بندی مصالح بالاست داشته باشیم، به طوری که مباحثی نظیر نفوذپذیری و قابلیت زهکشی مصالح مخلوط تحت تاثیر قرار نگرفته، ضمن آن که تهیه مصالح برای کاربرد و اجرا به صورت ساده‌تر و بهتری ممکن باشد. انتخاب درصدهای اختلاط نیز با توجه به وزن مخصوص پایین خرده لاستیک در برابر بالاست انجام پذیرفته است. لازم به ذکر است که بالاست تنها یا بالاست خالص به عنوان مرجع مقایسه در فرآیند آزمایش‌ها پیگیری شده است.

در هر مورد، مصالح در سه لایه داخل جعبه بالاست ریخته شده و بعد از ریختن هر لایه کوبیده شده تا به تراکم لازم برسد. در ادامه صفحه بارگذاری تعبیه شده و مبدل تغییر مکان LVDT بر روی صفحه بارگذاری تنظیم گردیده است. مقدار بار، فرکانس بارگذاری و تعداد سیکل‌های عملی مورد نظر تنظیم و نهایتاً دستور شروع به کار دستگاه اجرا شده است. دستگاه به طور اتوماتیک تعداد سیکل، میزان نشست و نیروی اعمالی صفحه را برداشت کرده و در هنگامی که به تعداد سیکل مورد نظر رسید، بارگذاری را متوقف نمود. در جریان مطالعات آزمایشگاهی، میزان بار وارده بر صفحه بارگذاری برابر ۳۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است که با توجه به

و نیز ارزیابی ظرفیت کاهش ارتعاشات زمینی مرتبط با ایزاربنندی میدانی (Fathali et al. 2019) ارزیابی گردید. از منظر شبیه سازی عددی نیز مطالعات بسیار گسترده‌ای در حوزه مصالح بالاست انجام شده است. اولین تحقیقات صورت گرفته توسط ایندراواتنا و همکاران ارزیابی شد که در جریان آن رفتار بالاست تحت بارگذاری چرخه ای به منظور تعیین تغییر شکل دائمی و زوال بالاست با استفاده از شبیه سازی دو بعدی اجزای مجزا بررسی گردید (Indraratna et al. 2010). ایندراواتنا و همکاران همچنین، رفتار مصالح بالاست تمیز و آلوده را تحت آزمایش برش مستقیم بررسی و شبیه سازی عددی به صورت سه بعدی با نرم افزار PFC ارزیابی نمودند (Indraratna et al. 2013). در تحقیق دیگر توسط هوانگ و تاتیوملر از دانشگاه ایلینویز، رفتار بالاست آلوده و شبیه سازی آزمایش برش مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است (Huang & Tutumluer, 2011). در این تحقیق از نرم افزار "BLOKS(3D)" استفاده شده است. پس از اثبات کارایی اختلاط مصالح بالاست با خرده لاستیک نیز برخی مطالعات عددی اخیراً ارزیابی شده است که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به تحقیق جینگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با تاکید بر نشست مصالح ترکیبی اشاره نمود (Jing et al. 2017). در عین حال اختلاط این مصالح با دانه بندی مشابه بالاست، آن هم با رویکرد عددی به ویژه از منظر شکست ذرات تاکنون مورد توجه جدی قرار نگرفته است. هدف مقاله پیش رو، ارزیابی رفتار مقاومتی مصالح بالاست مخلوط با خرده لاستیک با دانه بندی مشابه و با رویکرد عددی اجزای مجزا است. برای این منظور به شبیه سازی آزمون جعبه بالاست به صورت دوبعدی در نرم افزار PFC پرداخته شده است و پارامترهای موثر بهره برداری نظیر بار محوری (سطح تنش) و سرعت سیر (فرکانس بار) در جریان آن بررسی و ارزیابی شده است. تاکید اصلی در این تحقیق بر شکست ذرات و تغییر شکل پلاستیک مصالح بالاست به صورت همزمان است. برای این منظور از نتایج آزمایش جعبه بالاست به صورت آزمایشگاهی برای اعتبار بخشی نتایج تحلیل عددی بهره گرفته شده است. همچنین تاثیر تغییرات خرده لاستیک در محدوده درصد بهینه خرده

بسیار محدود و تدریجی گزارش شده است (Indraratna et al. 2011) و (Sol-Sanchez et al. 2015). شکل (۲) نمایی از نمونه‌های مختلف تهیه شده در آزمون جعبه بالاست را با درصد‌های مختلف خرده لاستیک نشان می‌دهد.

ابعاد صفحه بارگذاری نیروی اعمال شده بر نمونه معادل ۱۶۰۰ کیلوگرم به دست می‌آید. فرکانس بارگذاری نیز ۳ هرتز و تعداد سیکل‌های بارگذاری صد هزار سیکل اعمال شده است. لازم به ذکر است که این تعداد سیکل بارگذاری توسط بسیاری از محققین به عنوان سیکل معیار در نظر گرفته شده است که بعد از آن نشست مصالح

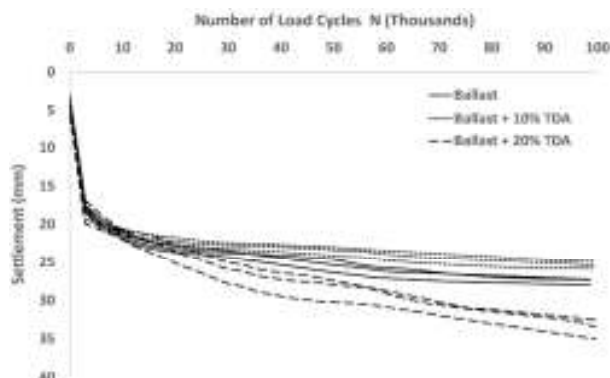


شکل ۲. نمونه‌های مختلف تهیه شده در جعبه بالاست (Fathali et al. 2017)

۲-۲- مروری بر نتایج آزمایش و تفسیر آن‌ها

بر اساس نتایج به دست آمده، برآزش تابع نمایی با دقت بالا در مورد نشست لایه بالاست و خرده لاستیک حاصل گردید. نتایج نشان داد که با اضافه کردن درصد کم خرده لاستیک تا ۱۰٪، نشست لایه بالاست تا حدود بسیار اندکی کاهش از خود نشان می‌دهد (۶،۴۴٪ در ۱۰۰۰۰۰ سیکل بارگذاری). دلیل این امر می‌تواند تامین ارتجاعیت بهینه خط باشد. برای ۲۰ درصد خرده لاستیک اما، افزایش قابل توجهی در نشست مشاهده می‌شود (۲۲،۴۳٪ در ۱۰۰۰۰۰ سیکل بارگذاری) که دلیل آن می‌تواند به واسطه جابه جایی‌های قائم دینامیکی بالاتر در اثر خرده لاستیک باشد. بر این اساس، نتیجه گرفته شد که اضافه کردن ۲۰ درصد خرده لاستیک، موجب افزایش نشست لایه بالاست بیش تر از مقدار مجاز خواهد گردید و از این رو توصیه نمی‌شود.

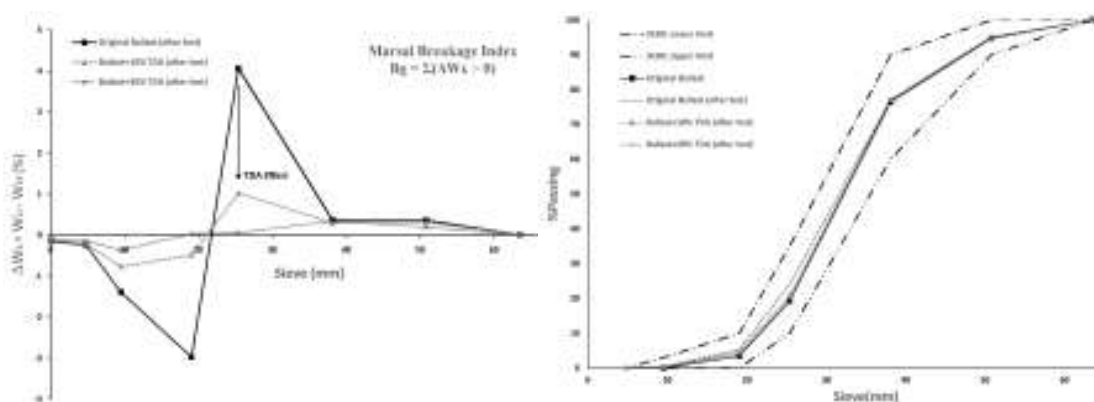
پس از اتمام آزمون جعبه بالاست، تعیین مقادیر میزان نشست بالاست و نیز شکست ذرات با توجه به تغییر در دانه بندی مصالح قابل حصول می‌باشد. پس از بررسی میزان نشست بالاست در سیکل‌های متفاوت، نمودار نشست به تعداد سیکل بارگذاری ترسیم می‌شود. شکل ۳ نتایج حاصل از نشست مصالح را نشان داده است. مشاهده می‌شود که نمودار در سیکل‌های اول بارگذاری (تا حدود ۵ هزار سیکل) دچار افزایش ناگهانی است. علت اصلی، تراکم اولیه نمونه‌ها و تغییر مکان صفحه بارگذاری به منظور رسیدن به نیروی مورد نظر است. پدیده درهم قفل شدن دانه‌ها نیز در این فرآیند موثر است. در اثر تجاوز نیروی وارده از اصطکاک تماسی دانه‌ها فضای خالی میان دانه‌ها به یکباره پر شده و باعث جابجایی دانه‌ها و قفل شدن در یکدیگر شده است.



شکل ۳. نشست به تعداد سیکل بارگذاری بر اساس نتایج آزمون جعبه بالاست (Fathali et al. 2017)

نمودار مشاهده می شود، با افزایش مقدار خرده لاستیک، میزان شکست ذرات بالاست کاهش خواهد یافت. برای مثال بر اساس شاخص شکست مارسال که در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است، بالاست خالص در برابر بالاست مخلوط با خرده لاستیک شکست بالاتری را داراست. استفاده از ۱۰٪ و ۲۰٪ خرده لاستیک زوال مصالح بالاست را تا ۶۶،۱۱٪ و ۸۷،۲۴٪ به ویژه برای ذرات عبوری از الک ۳۸ میلیمتر کاهش خواهد داد که بسیار قابل توجه است.

به منظور محاسبه درصد خرد شدگی دانه‌ها و میزان شکست ناشی از بارگذاری، دانه بندی بالاست پس از انجام آزمون جعبه بالاست تعیین شده است. سپس بر اساس روش مارسال (Bg) به عنوان یکی از بهترین شاخص های معرفی شده برای اندازه گیری شکست ذرات، اندازه گیری این شاخص در دستور کار قرار گرفته است. نمودار ۴ نتایج حاصل را نشان می دهد. لازم به ذکر است که این نمودار برای مقدار متوسط نشست دانه ها در هر آزمایش ارائه شده است. همانطور که از این



شکل ۴. مروری بر نتایج آزمون جعبه بالاست (Fathali et al. 2017)

الف- تغییرات نمودار دانه بندی مصالح ب- مقایسه شکست ذرات برای نمونه‌های مختلف (شاخص مارسال)

۳- مدل‌سازی عددی آزمون جعبه بالاست با رویکرد اجزای مجزا

آن خواهد بود که سایر درصد‌های وزنی (برای مثال ۵ درصد و ۱۵ درصد) چگونه رفتاری را از خود نشان می‌دهند. به علاوه تأثیر سطح تنش (مرتبط با بار محوری اعمال شده به لایه بالاست) و نیز سرعت ترافیک عبوری (مرتبط با فرکانس بارگذاری اعمال شده بر این لایه)

همانطور که از نتایج مطالعات آزمایشگاهی مشخص گردید، ۱۰ درصد وزنی خرده لاستیک به عنوان درصد بهینه اختلاط با مصالح بالاست جمع بندی شده است که به صورت توأمان هم نشست قابل قبول مصالح را داشته باشیم و هم شکست دانه ها بهبود یابد. اما در اینجا سوال

۳-۱-۱- مدل سازی شرایط مرزی و هندسه دانه‌های

بالاست و ذرات خرده لاستیک

دستگاه آزمایش جعبه بالاست از یک جعبه فلزی به ارتفاع پنجاه و عرض هفتاد سانتی متر تشکیل شده است. برای مدل سازی محفظه آزمایش، یک جعبه به ابعاد مذکور با استفاده از المان دیواره نرم افزار ایجاد می‌شود. دانه بندی بالاست و خرده لاستیک شبیه سازی شده بر مبنای دانه بندی نشریه ۳۰۱ از گروه چهارم در نظر گرفته شده است (نشریه ۳۰۱، ۱۳۸۴). از این رو پنج دانه به نمایندگی از پنج دسته با توجه به قطر و شکل دانه انتخاب شده است. به منظور مدل سازی هندسی هر یک از دانه های بالاست و خرده لاستیک، تصویری با کیفیت از دانه بندی هر یک از مصالح برداشت گردید. سپس تصویر مورد نظر به نرم افزار اتوکد منتقل شد و دانه‌های با اندازه و شکل مورد نظر به دست آمد. شکل ۵ نمایی از دانه‌های بالاست و خرده لاستیک مورد استفاده را نشان می‌دهد.

مشخص نیست. بر این اساس شبیه سازی عددی آزمون جعبه بالاست پیگیری شده است که در ادامه تشریح می‌شود.

۳-۱-۲- مروری بر فرآیند مدلسازی

به منظور شبیه سازی یک مدل فیزیکی در نرم افزار اجزای مجزای PFC نیاز است که مراحل زیر دنبال گردند (Itasca 2006) و (Saussine 2006):
۱- طراحی مدل مشتمل بر الف: طراحی و تولید هندسه نمونه، ب: تخصیص خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه و اعمال مدل‌های رفتاری، ج: اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه، ۲- اجرای اولیه مدل به منظور رسیدن به تعادل، ۳- بررسی حصول تعادل مدل، ۴- تغییر و تصحیح مدل به منظور ایجاد شرایط مورد نظر، ۵- تغییر شرایط مرزی، ۶- اعمال بارگذاری، ۷- اجرای مدل به منظور تعیین پاسخ مدل نسبت به تغییرات، و ۸- بررسی پاسخ مدل و نتیجه گیری. در ادامه مهمترین گام‌های اشاره شده تشریح شده است.


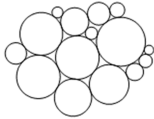



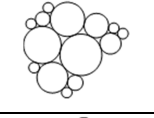

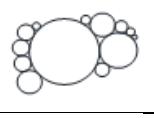
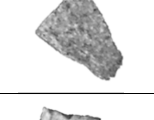
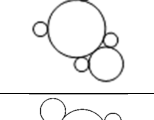

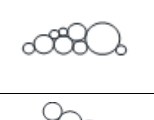
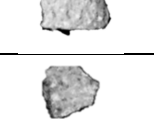
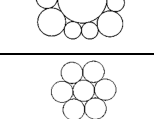

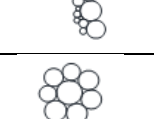
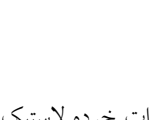
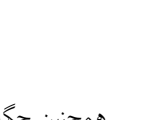
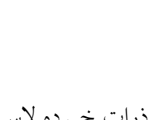
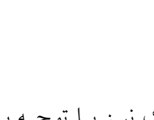


شکل ۵. نمونه دانه‌های بالاست و خرده لاستیک

هر کلاستر یا دانه، می‌تواند متفاوت باشد که تاثیر مستقیم در میزان خردشدگی نمونه بعد از بارگذاری خواهد داشت، از این رو برای مدل سازی دانه‌ها و نحوه انتخاب تعداد و قطر ذرات هر کلاستر از نمودار دانه‌بندی نمونه در آزمایش واقعی انجام شده استفاده شد. به عبارت بهتر، پتانسیل شکست نتیجه شده در آزمایش جعبه بالاست به مدلسازی کلاسترها در دانه‌های مختلف وارد شده است. در نتیجه برای مدل سازی کلاستر دانه‌ها از ذرات با قطر ۴,۷۵ تا ۲۵,۴ میلی متر مطابق با قطر چشمه الک شمار چهار تا یک اینچ استفاده شد. جدول ۱ تصویر اصلی و شکل نهایی هر دانه بر اساس مجموع دایر ترسیمی را نمایش می‌دهد.

از آنجا که دانه‌های مصالح بالاست و همچنین ذرات خرده لاستیک عمدتاً از نوع تیز گوشه با شکل هندسی نامنظم هستند و تنها ابزار شبیه سازی در نرم افزار PFC المان های دایروی شکل است، برای مدل سازی از روش کلاستر بندی استفاده شده است. در روش کلاستر بندی، اشکال هندسی نامتقارن مانند یک دانه بالاست به وسیله مجموعه ای از ذرات دایروی به هم پیوسته با پیوندی که می‌تواند صلب یا قابل شکست باشد، مدل می‌شوند. در این حالت ذرات دایروی با اندازه های متفاوت و در زوایای مختلف کنار هم قرار می‌گیرند تا دقیق‌ترین و نزدیک‌ترین مدل به شکل موردنظر را مدل سازی کنند. با توجه به این که قطر و تعداد المان های دایروی مورد استفاده برای مدل سازی

جدول ۱. نماینده دانه‌های بالاست و خرده لاستیک از هر گروه دانه‌بندی

ردیف	قطر (mm)	گروه دانه بندی	تصویر دانه بالاست	مدل با اجزاء دایروی	تصویر خرده لاستیک	مدل با اجزاء دایروی
۱	۵۷,۱۵	2 - 2 ½				
۲	۴۴,۴۵	1 1/2 - 2				
۳	۳۱,۷۵	1 - 1 ½				
۴	۲۲,۲۳	3/4 - 1				
۵	۱۱,۱۲	3/8 - 3/4				

۳-۱-۲- تخصیص خواص مکانیکی

پس از ترسیم هندسی دانه‌ها، ذرات خرده لاستیک و جعبه آزمایش، خواص مکانیکی به المان‌های هندسی مدل اختصاص داده می‌شوند. بدین منظور مقدار چگالی دانه‌های بالاست با توجه به آزمایش دانسیته انجام شده بر روی نمونه بالاست ۲۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب و مقدار ضریب اصطکاک سطحی ۰,۲۵ در نظر گرفته شد.

(۱)

که در رابطه ۱، E مدول الاستیسیته و t مقدار قطر میانگین ذرات تشکیل دهنده کلاسترهای تشکیل دهنده دانه‌های بالاست و خرده لاستیک است. بر اساس آزمایش تک محوری انجام شده بر روی نمونه سنگ استوانه‌ای از جنس دانه‌های بالاست، مدول الاستیسیته بالاست برابر ۲۱,۳ گیگا پاسکال و مقدار قطر میانگین دانه‌های بالاست

همچنین چگالی ذرات خرده لاستیک نیز با توجه با آزمایش انجام شده بر روی نمونه ۱۰۸۰ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب و مقدار ضریب اصطکاک سطحی ۰,۲۵ در نظر گرفته شد. با توجه به رابطه ۱، مقدار سختی نرمال و برشی دانه‌های بالاست و ذرات خرده لاستیک محاسبه و به نمونه اختصاص داده می‌شوند (Itasca 2006):

$$k_n = k_s = 2tE$$

مقدار ۸ میلی متر است. مدول الاستیسیته مصالح خرده لاستیک و قطر میانگین نیز به ترتیب برابر ۰,۰۷۵ گیگا پاسکال و ۸ میلی‌متر می‌باشد. بر مبنای رابطه ۱، مقادیر پارامترهای مکانیکی دانه‌های بالاست و ذرات خرده لاستیک، مطابق جدول ۲ اختصاص داده شده است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای مکانیکی دانه‌های بالاست و ذرات خرده لاستیک

ردیف	پارامتر	مقدار (بالاست)	مقدار (خرده لاستیک)	واحد
۱	سختی نرمال تماسی (kn)	$۳,۲۷ \times ۱۰^۸$	$۱,۲۴ \times ۱۰^۶$	نیوتن بر متر
۲	سختی برشی تماسی (ks)	$۳,۲۷ \times ۱۰^۸$	$۱,۲۴ \times ۱۰^۶$	نیوتن بر متر
۳	ضریب اصطکاک سطحی دانه‌ها	۰,۲۵	۰,۲۵	—
۴	چگالی دانه‌ها	۲۷۰۰	۱۰۸۰	کیلوگرم بر متر مکعب

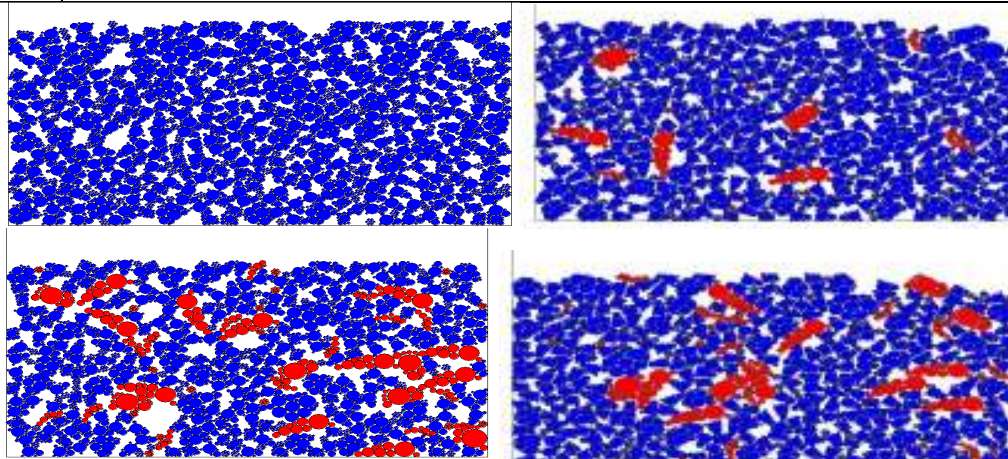
۳-۱-۳- اجرای اولیه مدل به منظور رسیدن به تعادل

جعبه تولید می‌شوند. سپس دانه‌ها تحت اثر وزن خود رها و متراکم می‌شوند. مشابه با حالت مدل سازی بالاست تک، نمونه مخلوط بالاست به همراه ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده لاستیک تک با داشتن شعاع المان‌های دایروی، مساحت هر دانه محاسبه شده و با توجه به درصد وزنی هردانه مطابق گروه چهار دانه بندی نشریه ۳۰۱ از جدول ۱، با محاسبه مساحت کل محفظه و با در نظر گرفتن درصد فضای خالی ۳۰ درصد (Sol-Sanchez et al. 2015)، تعداد هر دانه محاسبه می‌شود. در ادامه دانه‌ها بر اساس تعداد به دست آمده به صورت تصادفی درون

مدل سازی در ابتدا بر روی نمونه بالاست تنها و سپس مخلوط بالاست به همراه ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده لاستیک انجام شده است. برای مثال برای مدل‌سازی نمونه بالاست تک با داشتن شعاع المان‌های دایروی، مساحت هر دانه محاسبه شده و با توجه به درصد وزنی هردانه مطابق گروه چهار دانه بندی نشریه ۳۰۱ از جدول ۱، با محاسبه مساحت کل محفظه و با در نظر گرفتن درصد فضای خالی ۳۰ درصد (Sol-Sanchez et al. 2015)، تعداد هر دانه محاسبه می‌شود. در ادامه دانه‌ها بر اساس تعداد به دست آمده به صورت تصادفی درون

جدول ۳. تعداد ذرات گروه‌های دانه بندی (بالاست و ۱۰ درصد خرده لاستیک)

ردیف	قطر دانه (m)	مساحت دانه (m ²)	مساحت محفظه (m ²)	مساحت محفظه با در نظر گرفتن درصد فضای خالی ۳۰٪ (m ²)	درصد وزنی (سطحی) گروه دانه بندی	تعداد دانه ها
۱	۰٫۶۳۵	۰٫۰۰۲۸	۰٫۲۸	۰٫۱۹۶	۰٫۰۵	۳
۲	۰٫۵۰۸	۰٫۰۰۱۳			۲۴	
۳	۰٫۳۸۱	۰٫۰۰۰۵			۱۶۴	
۴	۰٫۲۵۴	۰٫۰۰۰۴			۶۶	
۵	۰٫۱۲۷	۰٫۰۰۰۱			۶۱	
مجموع دانه های بالاست						
۳۱۸						
مجموع دواير تشكيل دهنده دانه های بالاست						
۲۳۸۶						
ردیف	قطر دانه (m)	مساحت دانه (m ²)	مساحت محفظه (m ²)	مساحت محفظه با در نظر گرفتن درصد فضای خالی ۳۰٪ (m ²)	درصد وزنی (سطحی) گروه دانه بندی	تعداد دانه ها
۱	۰٫۶۳۵	۰٫۰۰۱۹	۰٫۲۸	۰٫۱۹۶	۰٫۰۵	۱
۲	۰٫۵۰۸	۰٫۰۰۱۷			۵	
۳	۰٫۳۸۱	۰٫۰۰۱۸			۱۲	
۴	۰٫۲۵۴	۰٫۰۰۰۵			۱۵	
۵	۰٫۱۲۷	۰٫۰۰۰۱			۱۷	
مجموع ذرات خرده لاستیک						
۵۰						
مجموع دواير تشكيل دهنده ذرات خرده لاستیک						
۴۹۹						



شکل ۶. نمونه بالاست به همراه الف: ۰٪ خرده لاستیک ب: ۵٪ خرده لاستیک ج: ۱۰٪ خرده لاستیک د: ۱۵٪ خرده لاستیک

۳-۱-۴- تعادل اولیه و تصحیح مدل به منظور ایجاد شرایط مورد نظر

سیکل توسط نرم افزار ارایه می‌گردد. پس از تولید دانه‌ها، متراکم نمودن و حصول تعادل اولیه مجموعه، به منظور مدل سازی شکست دانه‌ها در اثر بارگذاری، اتصال صلب میان ذرات تشکیل دهنده دانه‌ها از بین رفته و میان دوایر یک دانه پیوستگی یا چسبندگی (Bond) ایجاد می‌کنیم. مقادیر پارامترهای اختصاص داده شده به عنوان پیوستگی بر اساس روابط ۲ و ۳ محاسبه و به دانه‌ها اختصاص داده می‌شوند (Itasca 2006).

$$Bond_{normal} = 2Rt\sigma \quad (۲)$$

$$Bond_{shear} = 2Rt\tau \quad (۳)$$

مقاومت شکست مصالح بالاست ۱۷۵ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. بنابراین مقادیر چسبندگی نرمال و برشی مطابق جدول ۴ می‌باشد.

پس از طراحی و تولید مدل ابتدا مدل را اجرا نموده تا شرایط اولیه مدل سازی برقرار گردد. اجرای مدل تا زمانی که نمونه به تعادل برسد ادامه خواهد یافت. به منظور کنترل حصول تعادل، میانگین نیروهای نامتعادل کننده در نمونه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در صورتی که مقادیر میانگین نیروهای نامتعادل کننده به مقداری کمتر از یک صدم برسد، تعادل نمونه برای ادامه مدل سازی قابل قبول خواهد بود. لازم به ذکر است مقدار پارامتر میانگین نیروهای نامتعادل کننده در هر

در این روابط، R مقدار میانگین شعاع دوایر تشکیل دهنده دانه‌های بالاست، σ مقاومت نرمال و τ مقاومت برشی مصالح بالاست است. بنابراین بر اساس آزمایش تک محوری انجام شده بر روی نمونه سنگ استوانه‌ای،

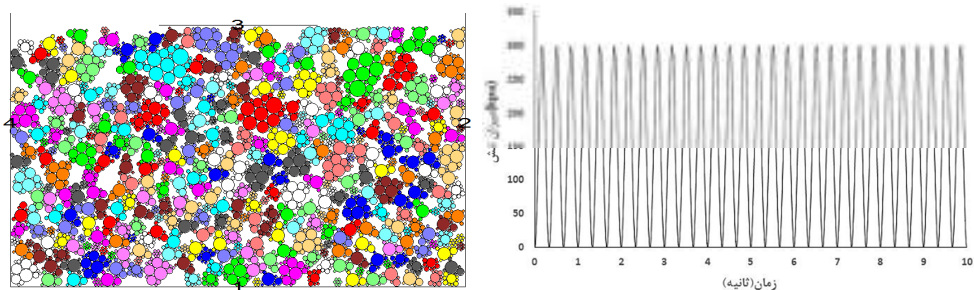
جدول ۴. مقادیر پارامترهای مکانیکی پیوستگی ذرات تشکیل دهنده دانه‌ها

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	مقاومت نرمال پیوستگی	175×10^6	N
۲	مقاومت برشی پیوستگی	175×10^6	N

۳-۱-۵- اعمال بارگذاری

نظر که سیصد کیلو پاسکال است، حساب می‌شود. سپس اختلاف تنش بدست آمده به سرعت تبدیل شده و به صفحه بارگذاری اعمال می‌گردد تا تنش مورد نظر به نمونه وارد شود. در نهایت صفحه بارگذاری با سرعت مورد نظر تحت فرکانس سه هرتز حرکت کرده و تنش را به صورت بار تکراری به توده بالاست و خرده لاستیک منتقل می‌نماید. اعمال فرکانس بارگذاری به نمونه از طریق کنترل سرعت صفحه بارگذاری توسط یک تابع سینوسی انجام می‌شود که در هر ثانیه سرعت صفحه را سه مرتبه به مقدار مورد نظر می‌رساند. شکل ۷ (ب) تنش صفحه بر اساس زمان برای ده ثانیه را نشان می‌دهد.

میزان تنش اعمال شده به نمونه مطابق با آزمایش واقعی جعبه بالاست برابر با ۳۰۰ کیلو پاسکال در فرکانس بارگذاری ۳ هرتز می‌باشد. برای مدل سازی هندسی وضعیت بارگذاری مطابق با آزمایش جعبه بالاست، یک صفحه به عرض ۲۴۵ میلی متر بر روی نمونه در مرکز جعبه قرار می‌گیرد. تصویر صفحه بارگذاری بر روی نمونه مطابق شکل ۷ (الف) مشاهده می‌شود. در ادامه به منظور مدل سازی شرایط بارگذاری، از روش کنترل سطح تنش استفاده شده است. بدین منظور در هر سیکل بارگذاری مقدار تنش موجود بر روی صفحه بارگذاری محاسبه شده و اختلاف آن تا تنش مورد



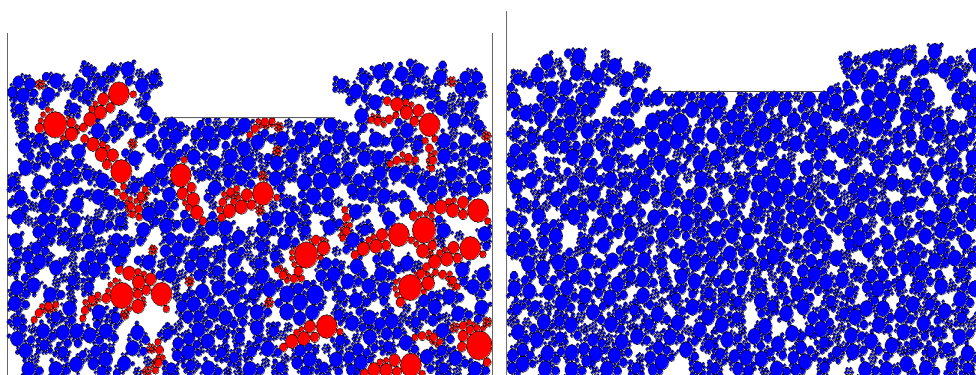
شکل ۷. الف-صفحه بارگذاری بر روی نمونه، ب-نمودار تنش صفحه بر اساس زمان

۳-۱-۶- اجرای مدل و اعتبارسنجی آن

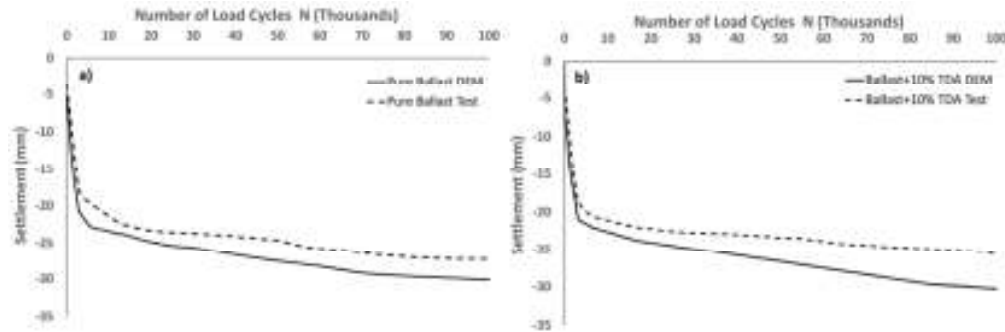
در این گام، مدل برای رسیدن به تعداد سیکل بارگذاری مورد نظر که طبق آزمایش انجام شده یکصد هزار سیکل می باشد، اجرا می شود. از آنجا که فرکانس بارگذاری سه هرتز است، برای اعمال یکصد هزار سیکل بارگذاری باید ۳۳۳۳۴ گام، تحلیل مدل انجام شود. با توجه به دقت در نظر گرفته شده ۰،۰۱ ثانیه (Itasca) برای رسیدن به تعداد بارگذاری مورد نظر (2006) سیکل محاسباتی نیاز است که بدین منظور نیاز به حدود زمانی تحلیل دوازده ساعت می باشد. همزمان با اجرای مدل جابجایی، نیروی عملی و تعداد سیکل بارگذاری برداشت می شود. بعد از انجام تحلیل های اولیه عددی و قبل از ورود به بخش مطالعه پارامتری و تفسیر نتایج تحلیل، ضروری است که اعتبار مدل توسعه یافته مورد ارزیابی و سنجش قرار گیرد. از این رو در این بخش نتایج شبیه سازی های عددی با ورودی ها و فرضیات یکسان، با آزمایش جعبه بالاست به انجام رسیده

در آزمایشگاه ارایه و مقایسه شده است. این نتایج در ادامه و در دو بخش رفتار نشست در برابر سیکل بارگذاری و رفتار شکست دانه های بالاست مطابق شاخص مارسال و برای دو نمونه بالاست خالص و بالاست با ۱۰ درصد خرده لاستیک وزنی ارایه می گردد. لازم به ذکر است که با توجه به تنش اعمالی ۳۰۰ کیلوپاسکال و فرکانس بارگذاری ۳ هرتز، مدلسازی های انجام گرفته به منظور اعتبارسنجی مدل نیز با در نظر گرفتن شرایط مشابه انجام گرفته است.

شکل ۸ نتایج نهایی تحلیل صورت گرفته و میزان نشست نهایی بعد از صد هزار سیکل بارگذاری را برای بالاست خالص و بالاست به همراه ۱۰ درصد خرده لاستیک نشان می دهد. به علاوه نتایج نشست در برابر سیکل بارگذاری در شکل ۹ ارایه شده است.



شکل ۸. وضعیت نشست جعبه در انتهای بارگذاری الف: بالاست خالص ب: بالاست و ۱۰ درصد خرده لاستیک



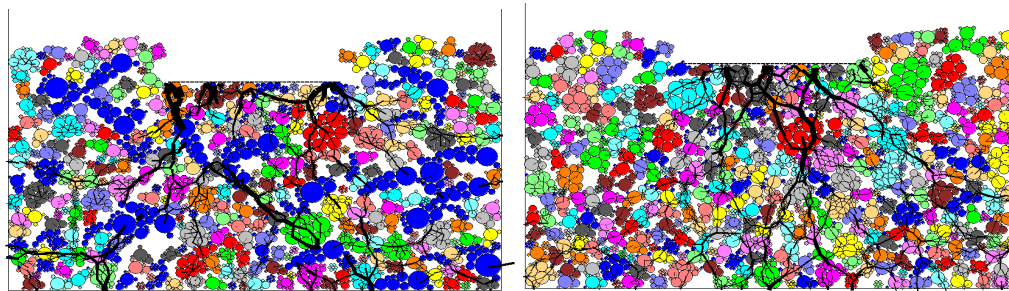
شکل ۹. نمودار نشست در برابر سیکل بارگذاری الف: بالاست خالص ب: بالاست و ۱۰ درصد خرده لاستیک

و کاهش حجم محاسبات و همچنین زمان تحلیل نرم افزار بوده است. اما در آزمایش واقعی دانه‌های یک گروه دانه بندی، شکل و اندازه مختلفی دارند.

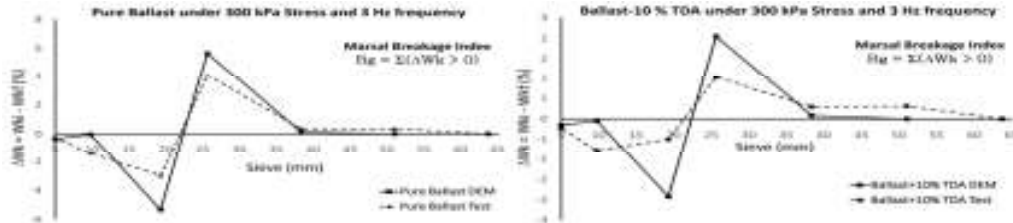
شکل ۱۰ نیز نتایج میزان شکست دانه‌ها و نیروهای تماسی بعد از صد هزار سیکل بارگذاری را برای بالاست خالص و بالاست به همراه ۱۰ درصد خرده لاستیک نشان می‌دهد. به علاوه نتایج شکست بر اساس شاخص مارسال در شکل ۱۱ ارائه شده است. در این نمودار، نتایج واقعی شکست ذرات بالاست در آزمایش واقعی نیز به منظور مقایسه با مدل‌سازی‌های عددی ارائه شده است. بر اساس نتایج شکست ذرات نیز مشخص می‌شود که تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج مدل‌سازی عددی و خروجی‌های آزمایشگاهی وجود دارد. برای بالاست خالص و بالاست به همراه ۱۰ درصد خرده لاستیک، میزان شکست ذرات در شبیه‌سازی عددی مشابه آزمایش در اندازه ۲۵،۴ میلیمتر بیشینه شده است. البته افزایش حدود ۲۰ درصدی شاخص مارسال را در هر دو نمونه شاهد هستیم. همانطور که در بند قبل تشریح گردید، این اختلاف‌ها با توجه به فرضیات حاکم بر مدل‌سازی عددی قابل توجیه است.

بر اساس نتایج نشست در برابر تعداد سیکل بارگذاری مشخص می‌شود که تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج مدل‌سازی عددی و خروجی‌های آزمایشگاهی وجود دارد. به طوری که برای بالاست خالص، رفتار نمودار تقریباً مشابه بوده و میزان نشست‌ها حدود ۱۱ درصد اختلاف بیشتر را در سیکل‌های نهایی آزمایش نشان می‌دهند. این تطابق تا حدود زیادی برای نمونه بالاست همراه با ۱۰ درصد خرده لاستیک نیز مشاهده می‌گردد. البته اختلاف نتایج نشست در سیکل‌های انتهایی بارگذاری حدود ۲۰ درصد بیشتر می‌باشد. این اختلاف‌ها با توجه به موارد زیر قابل توجیه است:

مدل ارائه شده یک مدل دوبعدی بوده و تأثیر بعد سوم در میزان نشست را در نظر نمی‌گیرد. در مدل بیان شده مقادیر توزیع تنش، اندرکنش میان دانه‌ها، اصطکاک داخلی و نیروهای تماسی بین دانه‌ها تنها در دو بعد در نظر گرفته شده که با نمونه واقعی که متأثر از تمامی پارامترهای مذکور در سه بعد می‌باشد، متفاوت است. در مدل ارائه شده از هر گروه دانه‌بندی، تنها یک دانه با شکل و اندازه ثابت به عنوان نماینده آن گروه استفاده شده است. این مسئله به دلیل ساده‌سازی در مدل‌سازی



۱۰. وضعیت شکست جعبه در انتهای بارگذاری الف: بالاست خالص ب: بالاست و ۱۰ درصد خرده لاستیک



شکل ۱۱. نمودار شکست ذرات بالاست بر اساس شاخص مارسال الف: بالاست خالص ب: بالاست و ۱۰ درصد خرده لاستیک

۳-۲- مطالعه پارامتری

بالاست پیگیری شده است. به طوری که محدوده تنش‌های وارد شده از ۱۵۰ کیلوپاسکال تا ۷۵۰ کیلوپاسکال در فرکانس مبنای ۳ هرتز تغییر کرده است. سپس، نتایج نشست لایه و شکست ذرات برای هر یک از نمونه‌های بالاست خالص و بالاست همراه با ۱۰ درصد خرده لاستیک تعیین شده است. شکل ۱۲ نتایج شکست دانه‌ها و نیروهای تماسی بعد از ۱۰۰ هزار سیکل بارگذاری را برای نمونه‌های مختلف در سطوح تنش اعمالی متفاوت نشان می‌دهد. همچنین جمع بندی مقادیر نشست رخ داده و شکست دانه‌های بالاست به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارایه شده است.

در این بخش، مطالعه پارامتری گسترده‌ای به منظور شناسایی تاثیر سطح تنش اعمال شده در آزمایش جعبه بالاست و نیز فرکانس اعمال بار بر نمونه‌ها انجام گرفته است. مبنای انتخاب حدود هر یک از پارامترهای تنش اعمالی و فرکانس بارگذاری با استناد به ادبیات تحقیق و بر اساس جداول ۵ و ۶ پیشنهاد شده است. ارزیابی تاثیر درصد خرده لاستیک به منظور تعیین درصد بهینه اختلاط (مشتمل بر دو درصد و ۱۵ درصد) بررسی شده است.

۳-۲-۱- بررسی تاثیر تنش اعمالی بر نتایج عددی

در این بخش بر اساس محدوده تنش‌های اعمالی پیشنهادی مطابق جدول ۵، شبیه سازی عددی جعبه

جدول ۵. محدوده تنش‌های اعمالی بر اساس شرایط بهره برداری

تنش منتخب (کیلو بر پاسکال)	تنش بالاست (کیلو بر پاسکال)	مساحت موثر تراورس (مترمربع)	بار تراورس (تن)	ضربه ضربه	بار محوری (تن)	فرکانس پایه
۱۵۰	۲۰۰	۰,۲۵	۵	۱	۱۰	۳
۳۰۰	۳۰۰	۰,۲۵	۷,۵	۱,۵	۱۰	
	۳۰۰	۰,۲۵	۷,۵	۱	۱۵	
۴۵۰	۴۵۰	۰,۲۵	۱۱,۲۵	۱,۵	۱۵	
	۴۰۰	۰,۲۵	۱۰	۱	۲۰	
۶۰۰	۶۰۰	۰,۲۵	۱۵	۱,۵	۲۰	
	۵۰۰	۰,۲۵	۱۲,۵	۱	۲۵	
۷۵۰	۷۵۰	۰,۲۵	۱۸,۷۵	۱,۵	۲۵	

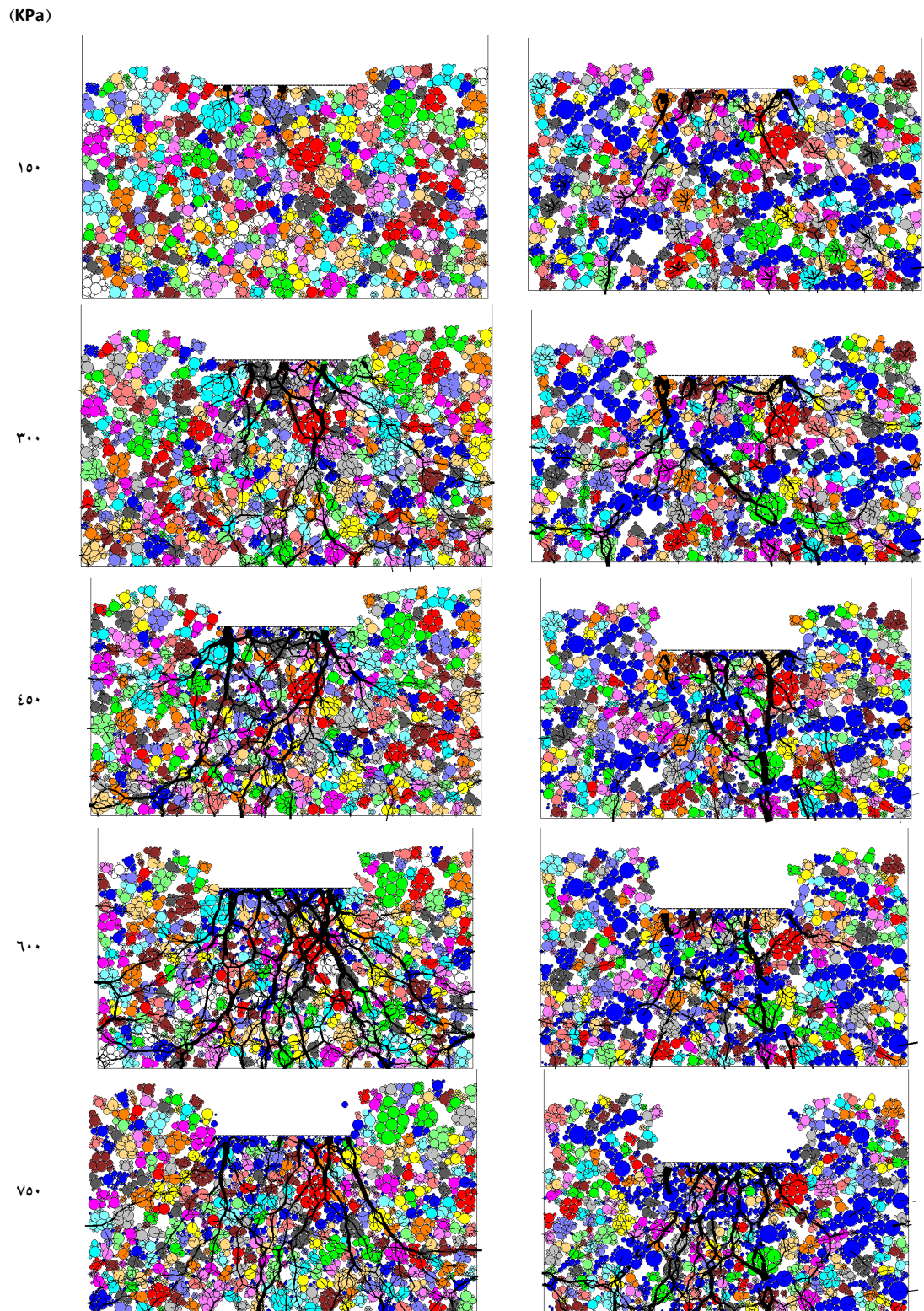
جدول ۶. محدوده فرکانس‌های بارگذاری بر اساس شرایط بهره برداری

تنش پایه (کیلو بر پاسکال)	نوع قطار	فاصله محوری (متر)	فاصله یوزی (متر)	سرعت (کیلومتر بر ساعت)	فرکانس حداکثر (هرتز)	فرکانس حداقل (هرتز)	فرکانس منتخب (هرتز)
۳۰۰	باری	۱,۸	۱۲,۵	۴۰	۶,۱۷	۰,۸۹	۳
		۱,۸	۱۲,۵	۸۰	۱۲,۳۵	۱,۷۸	۱۰
		۱,۸	۱۲,۵	۱۲۰	۱۸,۵۲	۲,۶۷	۲۰
	مسافری	۱,۸	۱۲,۵	۱۶۰	۲۴,۶۹	۳,۵۶	۳۰
		۲,۹	۱۹	۸۰	۷,۶۶	۱,۱۷	۳
		۲,۹	۱۹	۱۶۰	۱۵,۳۳	۲,۳۴	۱۰
		۲,۹	۱۹	۲۵۰	۲۳,۹۵	۳,۶۵	۲۰
		۲,۹	۱۹	۳۰۰	۲۸,۷۴	۴,۳۹	۳۰

تنش

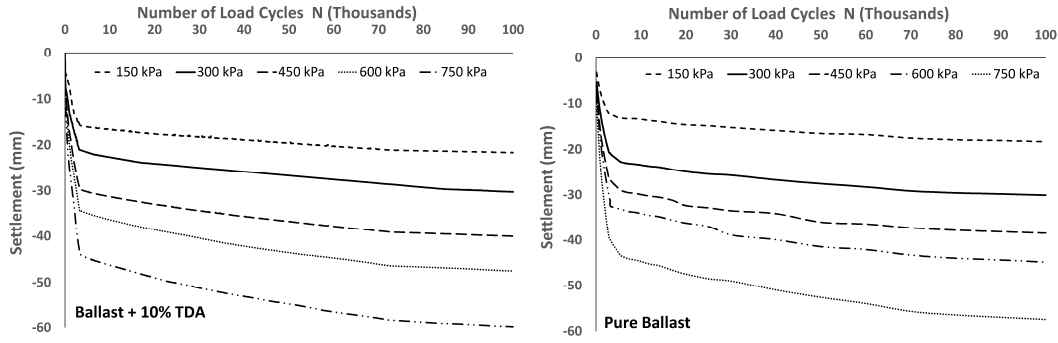
الف

ب

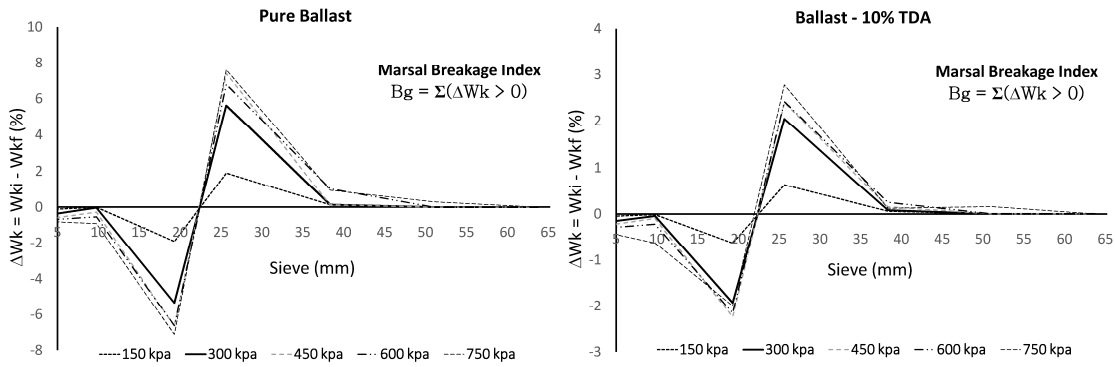


شکل ۱۲. نیروهای ذرات در انتهای بارگذاری در تنش‌های مختلف (فرکانس ۳ هرتز)

الف: بالاست خالص ب: بالاست و ۱۰٪ خرده لاستیک



شکل ۱۳. نشست در برابر بارگذاری در تنش های مختلف (فرکانس ۳ هرتز) الف: بالاست خالص ب: بالاست و ۱۰٪ خرده لاستیک



شکل ۱۴. شکست مارسال در تنش های مختلف (فرکانس ۳ هرتز) الف: بالاست خالص ب: بالاست و ۱۰٪ خرده لاستیک

۳-۲-۲- بررسی تاثیر فرکانس بارگذاری بر نتایج عددی

در این بخش بر اساس محدوده فرکانس های بارگذاری پیشنهادی مطابق جدول ۶، شبیه سازی عددی جعبه بالاست پیگیری شده است. به طوری که محدوده فرکانس های وارد شده از ۳ هرتز تا ۳۰ هرتز در تنش مبنای ۳۰۰ کیلوپاسکال تغییر کرده است.

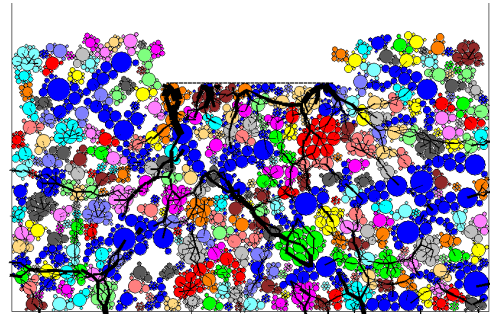
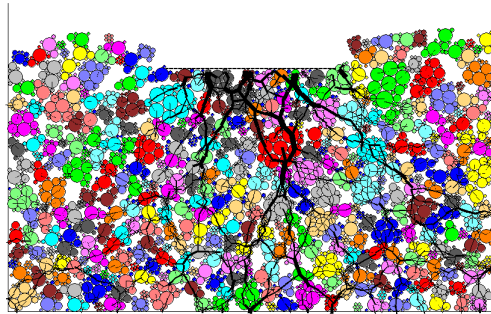
سپس، نتایج نشست لایه و شکست ذرات برای هر یک از نمونه های بالاست خالص و بالاست با ۱۰ درصد خرده لاستیک تعیین شده است. شکل ۱۵ نتایج شکست دانه ها و نیروهای تماسی بعد از صدهزار سیکل بارگذاری را برای نمونه های مختلف در فرکانس های اعمالی نشان می دهد. جمع بندی مقادیر نشست رخ داده و شکست دانه های بالاست به ترتیب در شکل های ۱۶ و ۱۷ ارائه شده است.

فرکانس
(Hz)

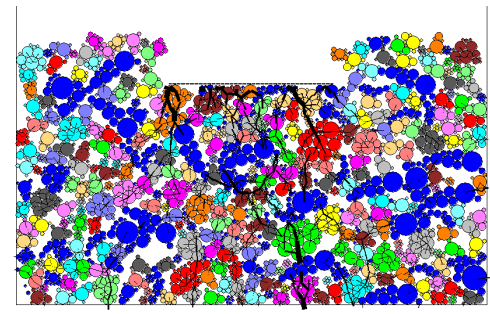
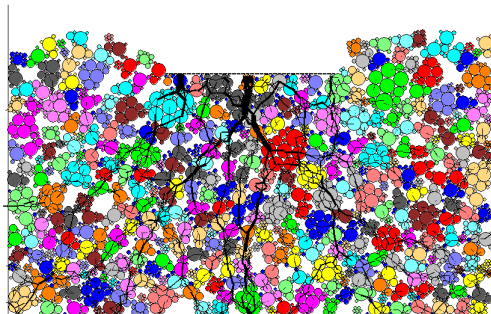
الف

ب

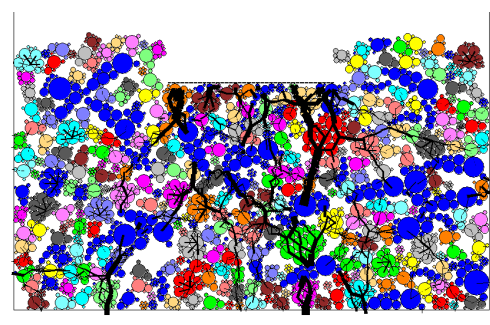
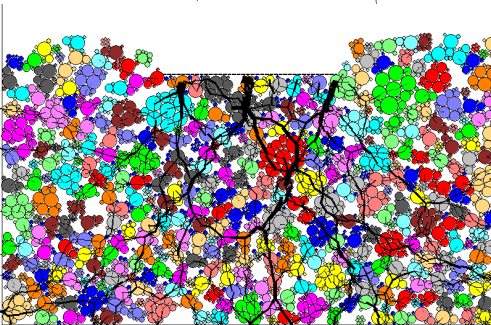
۳



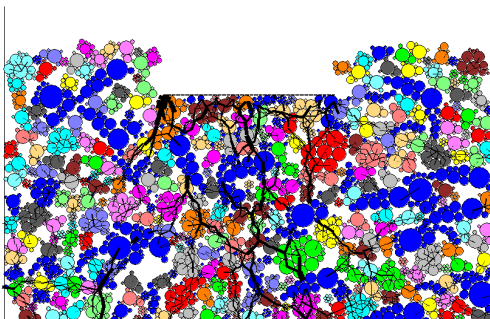
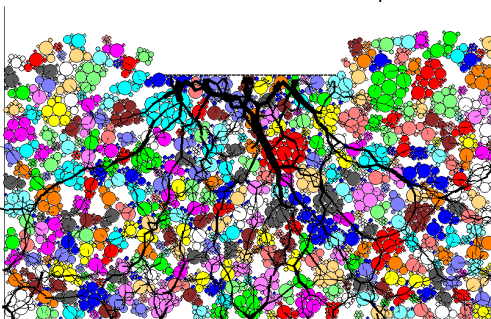
۱۰



۲۰

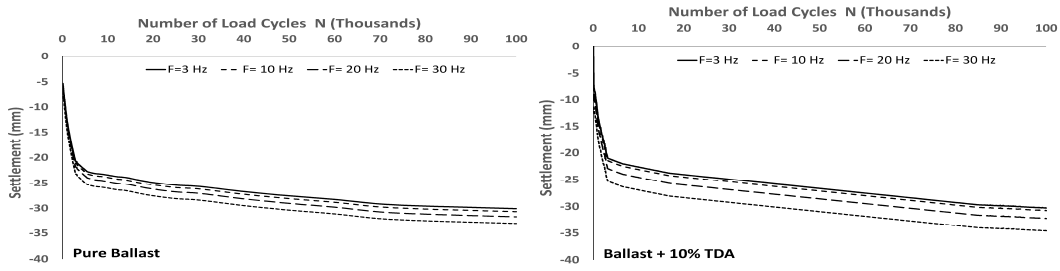


۳۰

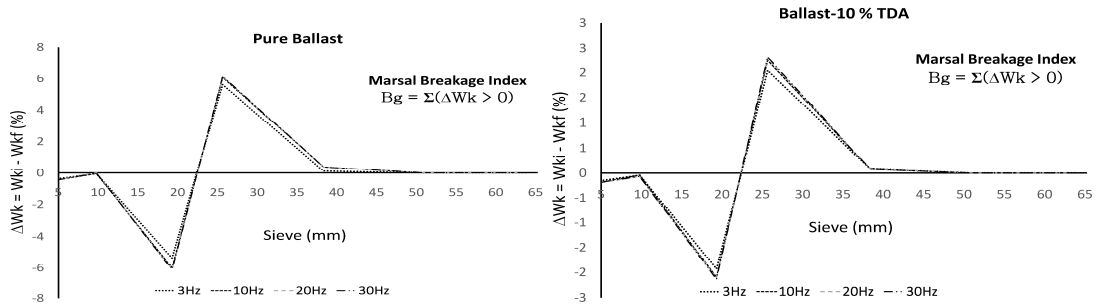


شکل ۱۵. نیروهای ذرات در انتهای بارگذاری در فرکانس های مختلف (تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال)

الف: بالاست خالص ب: بالاست و ۱۰٪ خرده لاستیک



شکل ۱۶. نشست در برابر بارگذاری در فرکانس های مختلف (تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال) الف: بالاست ب: بالاست و ۱۰٪ خرده لاستیک

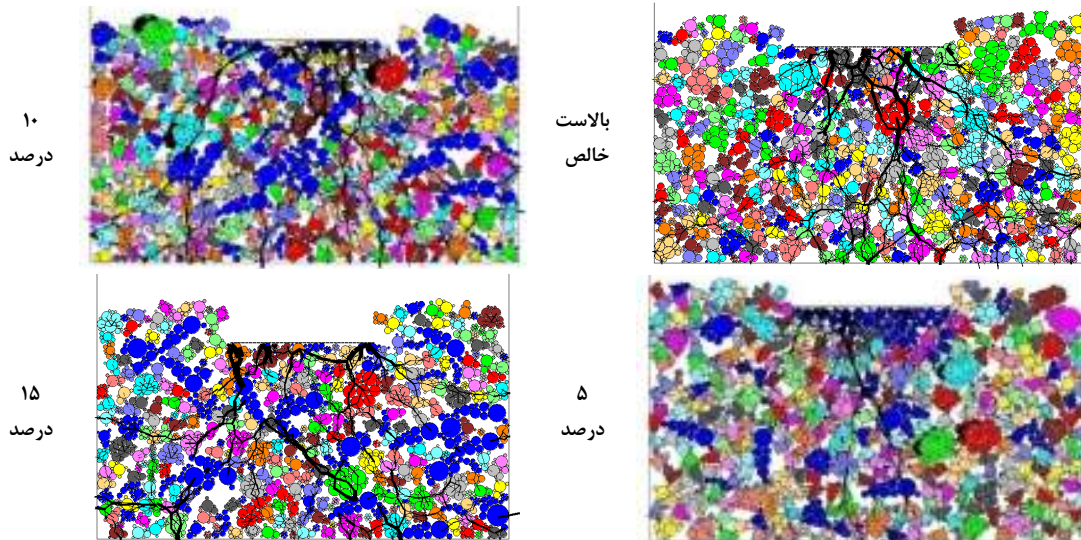


شکل ۱۷. شکست مارسال در فرکانس های مختلف (تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال) الف: بالاست خالص ب: بالاست و ۱۰٪ خرده لاستیک

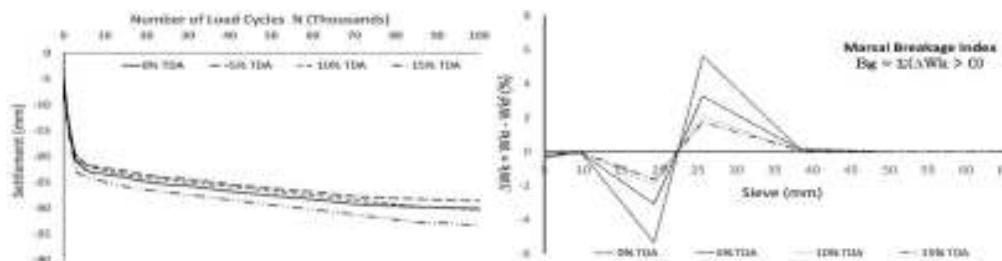
۳-۲-۳- بررسی تاثیر درصد خرده لاستیک بر نتایج عددی

درصدهای مختلف خرده لاستیک شامل ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ تعیین شده است. شکل ۱۸ نتایج شکست دانه‌ها و نیروهای تماسی بعد از صد هزار سیکل بارگذاری را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. جمع بندی مقادیر نشست رخ داده و شکست دانه‌های بالاست به ترتیب در شکل های ۱۹ (الف) و (ب) ارائه شده است.

در این بخش بر اساس ۵ و ۱۵ درصد خرده لاستیک، شبیه سازی عددی جعبه بالاست پیگیری شده است. در این تحلیل‌ها، فرکانس مبنای بارگذاری ۳ هرتز و تنش مینا ۳۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. سپس، نتایج نشست لایه و شکست ذرات برای هر یک از نمونه های بالاست خالص و بالاست همراه با



شکل ۱۸. نیروهای ذرات در انتهای بارگذاری (تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال و فرکانس ۳ هرتز) الف: بالاست خالص ب: ۵٪ خرده لاستیک ج: ۱۰٪ خرده لاستیک د: ۱۵٪ خرده لاستیک



شکل ۱۹. نتایج درصد‌های مختلف خرده لاستیک الف- نشست در برابر سیکل بارگذاری ب- شکست ذرات (شاخص مارسال)

۴- تفسیر نتایج مطالعات عددی

۴-۱- تاثیر پارامتر تنش در نتایج تحلیل عددی

درصدی تنش موجب افزایش بیش از ۵۰ درصدی نشست لایه می‌گردد.

۳-افزودن ۱۰ درصد خرده لاستیک، شکست مارسال مصالح دانه‌ای را در تمامی سطوح تنش اعمالی حدود ۶۵ درصد تحت تاثیر قرار داده و به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. در اینجا تطابق خوبی بین کاهش حدود ۶۷ درصدی شکست دانه‌ها تحت تاثیر ۱۰ درصد خرده لاستیک در آزمایش واقعی برای فشار ۳۰۰ کیلوپاسکال و مدلسازی عددی (۶۳ درصد کاهش) مشاهده می‌شود.

۳-سطح تنش در میزان شکست مصالح دانه‌ای بالاست نیز بسیار موثر است. با افزایش تنش از ۳۰۰ به ۶۰۰ و ۷۵۰ کیلو پاسکال، میزان شکست دانه‌های بالاست خالص به ترتیب تا ۳۶ و ۵۴ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که با اضافه شدن ۱۰ درصد خرده لاستیک به مصالح بالاست، سطح شکست دانه‌ها به ترتیب تا ۲۵ و ۴۴ درصد افزایش خواهد یافت. به عبارتی خرده لاستیک می‌تواند تا ۱۱ درصد در تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال و تا ۱۰ درصد در تنش ۷۵۰ کیلو پاسکال به کاهش میزان شکست مصالح بر اساس شاخص مارسال کمک کند.

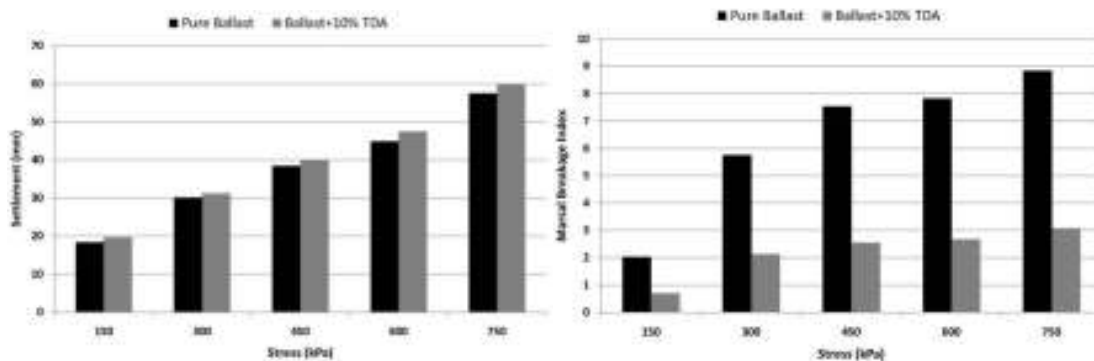
نتایج مطالعه پارامتری صورت گرفته به منظور شناسایی تاثیر سطح تنش اعمال شده در آزمایش جعبه بالاست به قرار جدول ۷ می‌باشد. نمودار ۲۰ نیز تاثیر سطح تنش در نشست حداکثری و شکست ذرات را برای بالاست خالص و بالاست مخلوط با ۱۰٪ خرده لاستیک به تصویر کشیده است. بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته، موارد زیر را می‌توان بیان داشت:

۳-افزودن ۱۰ درصد خرده لاستیک، نشست مصالح دانه‌ای را در تمامی سطوح تنش اعمالی حدود ۵ درصد تحت تاثیر قرار داده و اضافه می‌کند. در اینجا برخلاف کاهش ۶ درصدی نشست تحت تاثیر ۱۰ درصد خرده لاستیک در آزمایش واقعی برای فشار ۳۰۰ کیلوپاسکال، نشست لایه ۳،۶ درصد افزایش نشان می‌دهد.

۳-سطح تنش در میزان نشست مصالح دانه‌ای بالاست بسیار موثر است. برای مثال با افزایش تنش از ۳۰۰ به ۶۰۰ کیلو پاسکال (دو برابر شدن تنش)، میزان نشست لایه بالاست خالص تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. این موضوع برای مصالح بالاست مخلوط با ۱۰ درصد خرده لاستیک نیز به چشم می‌خورد. به عبارتی افزایش ۱۰۰

جدول ۷. تاثیر پارامتر تنش در نتایج تحلیل عددی

بالاست مخلوط با ۱۰٪ خرده لاستیک		بالاست خالص		تنش (kPa)
شکست حداکثر (% مارسال)	نشست حداکثر (میلی‌متر)	شکست حداکثر (% مارسال)	نشست حداکثر (میلی‌متر)	
۰,۶۹	۱۹,۵۸	۲,۰۳	۱۸,۳۶	۱۵۰
۲,۱۳	۳۱,۱۹	۵,۷۵	۳۰,۱۰	۳۰۰
۲,۵۵	۴۰,۰۱	۷,۵۴	۳۸,۴۶	۴۵۰
۲,۶۷	۴۷,۴۵	۷,۸۳	۴۴,۸۴	۶۰۰
۳,۰۷	۵۹,۷۷	۸,۸۴	۵۷,۴۷	۷۵۰



شکل ۲۰. تاثیر سطح تنش در نتایج عددی آزمایش جعبه بالاست الف: نشست حداکثر (میلیمتر) ب: شاخص شکست ماسال

۴-۲- تاثیر پارامتر فرکانس در نتایج تحلیل عددی

نتایج مطالعه پارامتری به منظور شناسایی تاثیر میزان فرکانس بارگذاری اعمال شده در آزمایش جعبه بالاست به قرار جدول ۸ می‌باشد. نمودار ۲۱ نیز تاثیر فرکانس بارگذاری در نشست حداکثری و شکست ذرات را برای بالاست خالص و بالاست مخلوط با ۱۰٪ خرده لاستیک به تصویر کشیده است. موارد زیر را می‌توان بیان داشت: -افزودن ۱۰ درصد خرده لاستیک، نشست مصالح را در تمامی فرکانس‌ها حدود ۳ تا ۶ درصد کاهش می‌دهد. در اینجا تطابق کاملی بین کاهش ۶۷ درصدی شکست دانه‌ها تحت تاثیر ۱۰ درصد خرده لاستیک در آزمایش واقعی برای فشار فرکانس ۳ هرتز و مدلسازی عددی (۶۳ درصد کاهش) مشاهده می‌شود.

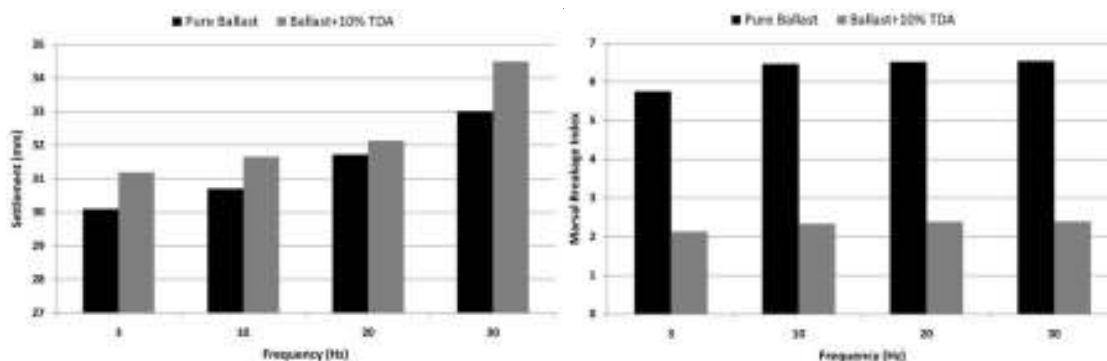
نتایج مطالعه پارامتری به منظور شناسایی تاثیر میزان فرکانس بارگذاری اعمال شده در آزمایش جعبه بالاست به قرار جدول ۸ می‌باشد. نمودار ۲۱ نیز تاثیر فرکانس بارگذاری در نشست حداکثری و شکست ذرات را برای بالاست خالص و بالاست مخلوط با ۱۰٪ خرده لاستیک به تصویر کشیده است. موارد زیر را می‌توان بیان داشت: -افزودن ۱۰ درصد خرده لاستیک، نشست مصالح را در تمامی فرکانس‌ها حدود ۳ درصد تحت تاثیر قرار داده و اضافه می‌کند. در اینجا برخلاف کاهش ۶ درصدی نشست تحت تاثیر ۱۰ درصد خرده لاستیک در آزمایش واقعی برای فرکانس ۳ هرتز، میزان نشست لایه ۳،۶ درصد افزایش از خود نشان می‌دهد.

فرکانس بارگذاری در میزان شکست مصالح دانه ای بالاست نیز تا حدی موثر است. با افزایش فرکانس از ۳ به ۱۰ و ۳۰ هرتز، میزان شکست دانه‌های بالاست خالص به ترتیب تا ۱۲ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که با اضافه شدن ۱۰ درصد خرده لاستیک به مصالح بالاست، سطح شکست دانه‌ها به ترتیب تا ۹ و ۱۲ درصد افزایش خواهد یافت. به عبارتی خرده لاستیک می‌تواند تا ۳ درصد در فرکانس ۱۰ هرتز و تا ۲ درصد در فرکانس ۳۰ هرتز به کاهش میزان شکست مصالح بر اساس شاخص ماسال کمک کند.

فرکانس بارگذاری در میزان نشست مصالح دانه‌ای تاثیر زیادی ندارد. برای مثال با افزایش فرکانس از ۳ به ۱۰ و سپس ۳۰ هرتز، میزان نشست لایه بالاست خالص تا ۲ درصد و ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. این موضوع برای مصالح بالاست مخلوط با ۱۰ درصد خرده لاستیک نیز به چشم می‌خورد. به عبارتی افزایش ۲،۳۳ برابری (از ۳ به

جدول ۸. تاثیر پارامتر فرکانس در نتایج تحلیل عددی

فرکانس (هرتز)	بلاست خالص		بلاست مخلوط با ۱۰٪ خرده لاستیک	
	نشست حداکثر (میلی‌متر)	شکست حداکثر (% ماسال)	نشست حداکثر (میلی‌متر)	شکست حداکثر (% ماسال)
۳	۳۰،۱۰	۵،۷۵	۳۱،۱۹	۲،۱۳
۱۰	۳۰،۷۰	۶،۴۶	۳۱،۶۵	۲،۳۳
۲۰	۳۱،۷۲	۶،۵۱	۳۲،۱۳	۲،۳۸
۳۰	۳۳،۰۱	۶،۵۳	۳۴،۴۹	۲،۳۹



شکل ۲۱. تاثیر فرکانس بارگذاری در نتایج عددی الف: نشست حداکثر (میلی متر) ب: شاخص شکست ماسال

۳-۴- ارزیابی درصد خرده لاستیک مطلوب در نتایج تحلیل عددی

برای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده لاستیک به ترتیب ۴۱٪، ۶۳٪ و ۶۸٪ می باشد.

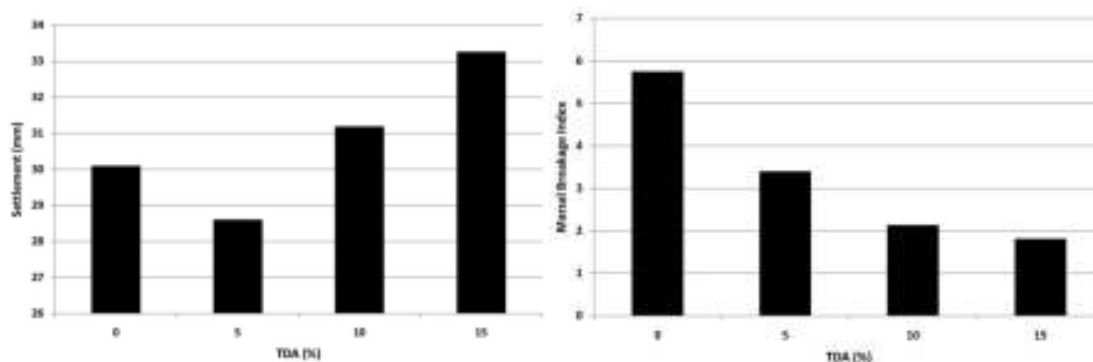
بر اساس بندهای یک و دو، مشاهده می شود ۱۰ درصد وزنی خرده لاستیک ضمن کمترین تاثیر در افزایش نشست لایه بالاست، کاهش قابل ملاحظه شکست ذرات را نتیجه خواهد داد و از این رو به عنوان درصد بهینه قابل معرفی می باشد. لازم به ذکر است که در صورت نیاز به گذراندن معیارهای سخت گیرانه نشست لایه بالاست می توان از مقادیر ۵ درصد خرده لاستیک به جای ۱۰ درصد استفاده نمود که البته کاهش شکست ذرات (۲۲٪ کمتر) را نیز نتیجه خواهد داد.

تفسیر نتایج مطالعه پارامتری صورت گرفته به منظور شناسایی درصد بهینه خرده لاستیک در آزمایش جعبه بالاست در این بخش صورت گرفته است که نتایج آن به قرار جدول ۹ می باشد. نمودار ۲۲ نیز تاثیر درصدهای مختلف خرده لاستیک در نشست حداکثری و شکست ذرات را به تصویر کشیده است. موارد زیر را می توان بیان داشت:

۵-، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده لاستیک به ترتیب ۵ درصد کاهش، ۳۶٪، ۱۰ درصد افزایش نشست را در مقایسه با بالاست خالص نتیجه می دهند. -شکست ماسال مصالح دانه ای نیز در مقایسه با بالاست خالص به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. این کاهش

جدول ۹. تاثیر درصد خرده لاستیک در نتایج تحلیل عددی

بالاست خالص		درصد خرده لاستیک
شکست حداکثر (% ماسال)	نشست حداکثر (میلی متر)	
۵,۷۵	۳۰,۱۰	۰
۳,۴۰	۲۸,۶۰	۵
۲,۱۳	۳۱,۱۹	۱۰
۱,۸۱	۳۳,۲۶	۱۵



شکل ۲۲. تاثیر خرده لاستیک در نتایج عددی آزمایش جعبه بالاست الف: نشست حداکثر (میلی متر) ب: شاخص شکست ماسال

۴-۴- پیشنهاد درصد مطلوب خرده لاستیک

اختلاط بر مبنای جمیع معیارهای فنی و مهندسی مرتبط در نظر گرفته شود. چه آن که برای درصد بالاتر خرده لاستیک، اگرچه کاهش شکست را خواهیم داشت، اما افزایش قابل توجه نشست بالاست نتیجه می‌گردد که مطلوب نمی‌باشد.

در پایان این بخش، جمع بندی تاثیر اضافه کردن خرده لاستیک بر روی رفتار مصالح بالاست به صورت تطبیقی در جدول ۱۰ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که انتخاب حداکثر ۱۰ درصد وزنی خرده لاستیک مخلوط با مصالح بالاست می‌تواند به عنوان درصد مطلوب

جدول ۱۰. تاثیر اضافه کردن خرده استیک بر رفتار مصالح بالاست (نتایج عددی)

توضیحات (مطلوب یا نامطلوب)	تاثیر نسبت به بالاست خالص (افزایشی یا کاهش)			پارامتر
	۱۵	۱۰	۵	
در ۵ درصد مطلوب و در سایر درصدها نامطلوب	↑↑	↑	↓	نشست لایه بالاست (بر اساس آزمایش جعبه بالاست)
مطلوب	↓↓↓	↓↓	↓	شکست لایه بالاست (بر اساس آزمایش جعبه بالاست)

۵- نتیجه گیری

کاهش داد. تطابق خوبی بین کاهش حدود ۶۷ درصدی شکست دانه‌ها تحت تاثیر ۱۰ درصد خرده لاستیک در آزمایش واقعی برای فشار ۳۰۰ کیلوپاسکال و مدلسازی عددی (۶۳ درصد کاهش) مشاهده گردید.

فرکانس بارگذاری در میزان نشست مصالح دانه ای تاثیر زیادی ندارد. با افزایش فرکانس از ۳ به ۱۰ و سپس ۳۰ هرتز، میزان نشست لایه بالاست خالص تا ۲ درصد و ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. این موضوع برای مصالح بالاست مخلوط با ۱۰ درصد خرده لاستیک نیز به چشم می‌خورد. به عبارتی افزایش ۲،۳۳ برابری (از ۳ به ۱۰ هرتز) و سپس ۹ برابری فرکانس (از ۳ به ۳۰ هرتز) موجب افزایش ۱،۵ درصدی و ۱۱ درصدی نشست لایه می‌گردد.

فرکانس بارگذاری در میزان شکست مصالح دانه‌ای بالاست نیز تا حدی موثر است. با افزایش فرکانس از ۳ به ۱۰ و ۳۰ هرتز، میزان شکست دانه‌های بالاست خالص به ترتیب تا ۱۲ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که با اضافه شدن ۱۰ درصد خرده لاستیک به مصالح بالاست، سطح شکست دانه‌ها به ترتیب تا ۹ و ۱۲ درصد افزایش خواهد یافت. به عبارتی خرده لاستیک می‌تواند تا ۳ درصد در فرکانس ۱۰ هرتز و تا ۲ درصد

در تحقیق حاضر، امکان بهره گیری از خرده لاستیک های بازیافتی به صورت مخلوط با مصالح دانه ای بالاست در خطوط ریلی با رویکرد عددی به کمک شبیه سازی آزمون جعبه بالاست در نرم افزار PFC بررسی گردید. اعتبارسنجی مدل توسعه یافته با نتایج آزمون آزمایشگاهی جعبه بالاست نیز انجام پذیرفت. مقصود از اختلاط بالاست و خرده لاستیک، کاهش شکست و زوال دانه‌ها در کنار حفظ وضعیت نشست پلاستیک مصالح و به تبع آن کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیر خطوط ریلی و افزایش بهره وری و دوره عمر بهره‌برداری این خطوط بود. تایید افزایش کیفیت مصالح بالاست با اضافه کردن خرده لاستیک، به کمک سری مطالعات پارامتری عددی صورت پذیرفت. مهمترین یافته های این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

- سطح تنش در میزان نشست مصالح دانه‌ای بالاست بسیار موثر است. برای مثال افزایش تنش از ۳۰۰ به ۶۰۰ کیلو پاسکال (دو برابر شدن تنش)، میزان نشست لایه بالاست خالص را تا ۵۰ درصد افزایش داد.

- افزودن ۱۰ درصد خرده لاستیک، شکست مارسال مصالح دانه ای را در تمامی سطوح تنش اعمالی حدود ۶۵ درصد تحت تاثیر قرار داده و به طور قابل ملاحظه‌ای

اساس شاخص مارسال کمک کند.
 -بر اساس بندهای قبل مشاهده می‌شود ۱۰ درصد وزنی خرده لاستیک ضمن کمترین تاثیر در افزایش نشست لایه بالاست، کاهش قابل ملاحظه شکست ذرات را نتیجه خواهد داد و از این رو به عنوان درصد بهینه قابل معرفی می‌باشد. لازم به ذکر است که در صورت نیاز به گذراندن معیارهای سخت گیرانه نشست لایه بالاست می‌توان از مقادیر ۵ درصد خرده لاستیک به جای ۱۰ درصد استفاده نمود که البته کاهش شکست ذرات (۲۲٪ کمتر) را نیز نتیجه خواهد داد.

در فرکانس ۳۰ هرتز به کاهش میزان شکست مصالح بر ۵-، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده لاستیک به ترتیب ۵ درصد کاهش، ۳،۶ درصد افزایش و ۱۰ درصد افزایش نشست را در مقایسه با بالاست خالص نتیجه می‌دهند. شکست مارسال مصالح دانه‌ای نیز در مقایسه با بالاست خالص به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این کاهش برای ۵-، ۱۰ و ۱۵ درصد خرده لاستیک به ترتیب ۴۱٪، ۶۳٪ و ۶۸٪ می‌باشد.

۶- مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۱۳۸۴)، "مشخصات فنی عمومی روسازی راه‌آهن"، نشریه شماره ۳۰۱، ایران.
- نصر آزادانی، م.، فتحعلی، م.، (۱۳۸۴)، "مصالح بالاست و تاثیر آن در فرآیند تعمیر و نگهداری خطوط ریلی"، سومین کنفرانس بین‌المللی نگهداری و تعمیرات، تهران، ایران.
- Fathali, M., MoghadasNejad, F., Esmaeili, M., (2017), "Influence of tire-derived aggregates on the properties of railway ballast material", Journal of materials in civil engineering, Vol. 29.
- Fathali, M., MoghadasNejad, F., Esmaeili, M., (2019), "Influence of tire-derived aggregates mixed with ballast on ground-borne vibrations", Journal of Modern Transportation, Vol. 27.
- Fontserè, V., López Pita, A., Manzo, N., Ausilio, A., (2016), "NEOBALLAST: New High-performance and Long-lasting Ballast for Sustainable Railway Infrastructures", Transportation Research Procedia, Vol. 14.
- Ho, CL., Humphrey, D., Hyslip, J., Moorhead, W., (2013), "Use of recycled tire rubber to modify track substructure interaction", Transportation research board, annual meeting. Washington (DC), USA.
- Huang, H., Tutumluer, E., (2011), "Discrete Element Modeling for fouled railroad ballast", Construction and Building Materials 25 (8), pp.3306-3312.
- Indraratna, B., Salim, W., Rujikiatkamjorn, C., (2011), "Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track", CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK.
- Indraratna, B., Tennakoon, N., Nimbalkar, S., Rujikiatkamjorn, C., (2013), "Behaviour of Clay-fouled Ballast under Drained Triaxial Testing", Géotechnique, 63(5), pp.410-419.
- Indraratna, B., Thakur, P. K., Vinod, J. S., (2010), "Experimental and Numerical Study of Railway Ballast Behavior under Cyclic Loading", International Journal of Geomechanics, ASCE, 10(4), pp.136-144.
- Itasca Consulting Group Inc., (2006), "Particle Flow Code in 2 Dimensions User's Guide", Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota.
- Jing, G.Q., Aela, P., Fu, H., (2017), "Numerical Analysis of Ballast-TDA Mixture under Cyclic Loading", Proceedings of the inaugural World Transport Convention Beijing, China, June 4-6.
- Kennedy, J., Woodward, P.K., Medero, G., Banimahd, M., (2013), "Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast", Construction and Building Materials, Vol. 44.
- Saussine, G., Cholet, C., Gautier, P.E., Dubois, F., Bohatier, C., Moreau, J.J., (2006), "Modelling ballast behavior under dynamic loading", Part 1, Elsevier, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 195, pp.2841-2859.
- Sol-Sanchez, M., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gomez, MC, (2014), "Viability of using end-of life tire pads as under sleeper pads in railway, Construction and Building Materials, Vol. 64.
- Sol-Sánchez, M., Thom, N.H., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gámez, M.C., Airey, G.D., (2015), "A study into the use of crumb rubber in railway ballast", Construction and Building Materials, Vol. 75.

Numerical Evaluation of the Behavior of Ballast-TDA Mixture in the Box Test Using Discrete Element Method

Masoud Fathali, Assistant Professor, Road Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Sina Argi, M.Sc., Grad., Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Morteza Esmaeili, Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

Fereidoon MoghadasNejad, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

E-mail: m.fathali@bhrc.ac.ir

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

Ballast materials play a very important role in rail tracks, the most important of which is the distribution of stresses to the bottom layers and the provision of proper elasticity and drainage. At the same time, one of the main problems of these materials is particles breakage due to dynamic transit loads as well as tamping operations, which over time, especially for weaker rocks, lead to high fouling and the need for frequent maintenance and repair. One of the proven solutions to increase the service life of ballast materials and reduce the maintenance problems caused by it, is to add an optimal percentage of TDA to the ballast, which helps to improve the abrasion behavior and durability of the material and causes less particles breakage. In this paper, the behavior of ballast materials mixed with TDA is numerically investigated using two-dimensional simulation of ballast box test with discrete element approach. Using this numerical modeling in PFC software, which has been validated by actual laboratory study of ballast box test, the effects of increasing axial load (different stress levels) and operating speed (different loading frequencies) are evaluated by performing a parametric study within the optimal percentage range. Based on this, the optimal mixing percentage between ballast and TDA materials in different stress and frequency conditions has been determined. The results showed that the stress level has a very high effect on the results, while the effect of frequency is much lower. According to the results, also 5 to a maximum of 10% by weight of TDA can be proposed as the optimal mixing percentage both in terms of settlement and particles breakage.

Keywords: Railway, Ballast, TDA, Breakage, Discrete Element Method