



## بررسی رفتار مکانیکی بالاست در خطوط ریلی با استفاده از روش اجزاء مجزاء (DEM)

مر ترضی اسماعیلی<sup>۱</sup>، جبارعلی ذاکری<sup>۱</sup>، سید علی مسیبی<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خط وسازه های ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران

ali\_mossayebi@rail.iust.ac.ir

### خلاصه

توسعه حمل و نقل ریلی با تکیه بر افزایش سرعت و بار محوری در سالهای اخیر با پیشرفت قابل ملاحظه ای روبرو بوده است. استفاده از بالاست در راه آهن به دلایل متعددی از جمله صرفه اقتصادی، کمک به زهکشی خط ریلی، ایجاد حالت ارتجاعی، جذب صدا و ارتعاش در خط و همچنین سهولت نگهداری تا کنون توجه زیادی را از طرف دست اندرکاران صنعت ریلی به خود معطوف نموده است. بالاست به عنوان مصالحی دانه ای در شرایط عملی تحت تاثیر بار تکراری ناشی از عبور قطار قرار می گیرد و همین موضوع لزوم بررسی رفتار سیکلیک آن را بوسیله ابزارهای عددی و آزمایشگاهی بیش از پیش مشخص می سازد. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بطور عمده بر تعیین تغییر شکل پلاستیک جمع شونده بالاست و همچنین مدول ارتجاعی دینامیکی آن متمرکز بوده و در این بین تاثیر پارامتر هانی همچون آلودگی و اشباع شدگی این مصالح نیز بر رفتار تنش- کرنش سیکلیک آن مطالعه شده است. در تحقیق حاضر ضمن مروری بر ادبیات فنی موجود در زمینه رفتار مکانیکی بالاست، رفتار بالاست تحت تاثیر بارگذاری سیکلیک ناشی از عبور قطار با استفاده از روش عددی اجزاء مجزاء (DEM) و با استفاده از نرم افزار PFC<sup>2D</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا و در قالب یک مطالعه پارامتریک، تاثیر فرکانس و دامنه بارگذاری بر تغییر شکل ماندگار و مدول ارتجاعی این مصالح مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: سازه خط آهن، بارگذاری سیکلیک، رفتار مکانیکی بالاست، روش اجزاء مجزاء (DEM)

### ۱. مقدمه

شبکه ریلی بخش مهمی از سیستم حمل و نقل یک کشور را تشکیل می دهد و نقش اساسی در توسعه مناطق مختلف کشور ایفا می کند، که این امر بستگی به حمل و نقل بار و حجم کالاهای انتقالی بین شهرهای بزرگ، بنادر و مراکز صنعتی و حمل مسافر، مخصوصاً در مناطق شهری دارد. در این بین هر ساله هزینه های زیادی صرف ساخت و ساز مسیر راه آهن و تعمیر و نگهداری آن می شود. ایمنی یک مسیر راه آهن، که شامل راحتی مسافران هم می شود، بستگی به اندرکنش پیچیده اجزاء مختلف در برابر بارگذاری دوره ای (سیکلیک) چرخ ها با مقادیر و فرکانس های مختلف می باشد. در گذشته، بیشتر توجهات به قسمت روسازه مسیر (تراورس ها، پابندها و ریل) بود و ملاحظات کمتری نسبت به اجزا زیرسازه مسیر داشتند که شامل بالاست، زیربلاست و بستر می باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که قسمت اعظمی از هزینه های نگهداری به زیرسازه مسیر اختصاص می یابد، به عنوان مثال، زیرکوبی، استفاده از بالاست تازه و یا جایگزینی بالاست. خصوصیات اجزاء زیرسازه مسیر بسیار متفاوت تر و هم چنین پیچیده تر از قسمت های روسازه مسیر می باشد. رفتار بار- تغییر شکل اجزاء زیرسازه مسیر تحت بارهای دوره ای قطار کمتر مورد بحث قرار گرفته است و اغلب نمی توان عملکرد آنها را با دقت مورد نیاز پیش بینی کرد. مسیر راه آهن به دلایل متعددی بر روی بالاست اجرا می گردد، که شامل دلایل اقتصادی، مسائل زهکشی و سهولت نگهداری می شود. تا به امروز، اکثر مهندسين راه آهن بر رفتار ارتجاعی بالاست اجماع نظر داشته اند. اگرچه تغییر شکل پلاستیک جمع شونده بالاست تحت بارگذاری سیکلیک مشهود است، بیشتر محققین مطالعات خود را بر اساس مدول ارتجاعی دینامیکی بالاست معطوف کرده اند [7]. در طراحی مسیر، به صورت مرسوم تغییر اندازه ذرات بالاست و در پی آن تغییر شکل پلاستیک آن در نظر گرفته نمی شود. این مشکل ناشی از عدم وجود شناخت کامل از سازوکار شکست ذرات بالاست و همچنین نبود یک مدل واقعی از رفتار تنش- کرنش بالاست می باشد که شامل رفتار

<sup>1</sup> Discrete element method (DEM)

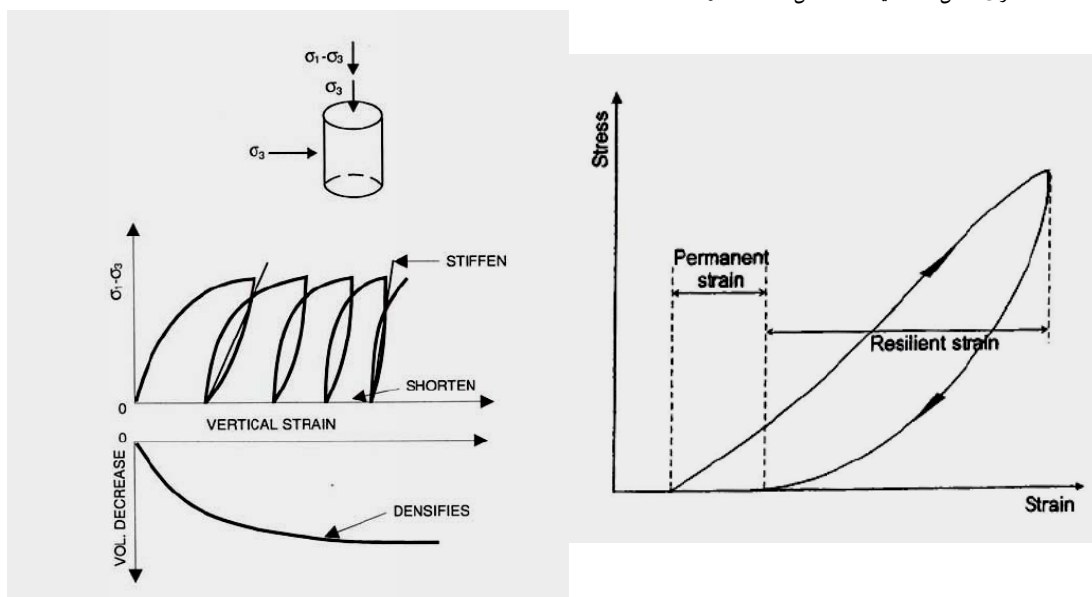
پلاستیکی بالاست و خردشدگی ذرات تحت بارهای سیکلیک می‌باشد. در سال‌های اخیر، بیشتر محققین وقت خود را به مطالعه رفتار بالاست تحت بار دوره‌ای اختصاص داده‌اند [7]. آزمایش‌های مدول بالاست معمولاً بر روی بارگذاری و شرایط محدودکننده‌ای که در مسیر واقعی اتفاق می‌افتد معطوف شده‌اند تا محققین بتوانند تحلیل دقیق‌تری از رفتار بالاست داشته باشند. در این مقاله، ابتدا عوامل موثر بر رفتار بالاست و بعد رفتار بالاست از دیدگاه روش اجزاء مجزا (DEM) مورد بررسی قرار گرفته است و در انتها تستهای آزمایشگاهی و مدل‌های شبیه‌سازی شده، مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه می‌شوند.

## ۲. عوامل موثر بر رفتار مکانیکی بالاست

خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگدانه‌ها بر روی رفتار بالاست تحت بارهای استاتیکی و سیکلی اثر قابل توجهی دارد. که مهمترین عوامل حاکم بر رفتار بالاست عبارتست از: اندازه مصالح، شکل مصالح، زبری سطح مصالح، مقاومت سنگ مادر، مقاومت گسیختگی دانه‌ها، مقاومت در برابر خردشدگی و تغییرات آب و هوایی، درجه تخلخل (چگالی)، میزان اشباع شدگی و توزیع اندازه دانه‌ها. یک لایه بالاست از سنگدانه‌هایی با دانه بندی گسترده تشکیل شده است که تراورس را در خود دفن کرده است. ذرات بالاست باید در مقابل بارهای وارده مقاومت کنند و از نشست‌های فزاینده جلوگیری کنند. هم‌چنین لایه بالاست باید مدول برجهندگی مناسب برای سایر المان‌های مسیر را فراهم کند و بارهای فشاری را به طریقی که برای لایه‌های زیرین قابل تحمل باشد انتقال دهد. که در ادامه، مدول برجهندگی بالاست و عوامل موثر بر آن و همچنین سختی و نشست بالاست مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۱.۲ مدول برجهندگی بالاست

طبق تعریف مدول برجهندگی یک ماده در واقع خارج قسمت تنش انحرافی تکراری بر میزان کرنش محوری برگشت پذیر در هنگام باربرداری در آزمایش سه محوری می‌باشد (شکل ۱). مدول برجهندگی بستری یکی از عوامل تعیین کننده بر نشست و تغییر اندازه دانه‌های بالاست می‌باشد. هم‌چنین مدول برجهندگی بالاست نیز بر تغییر شکل‌های برگشت پذیر بستر موثر است. مدول برجهندگی با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری به صورت تدریجی افزایش می‌یابد، تا اینکه ماده به یک سخت شدگی می‌رسد. سرانجام مدول برجهندگی به یک حد ثابتی می‌رسد و ماده در این نقطه از خود یک حالت فزنی کامل نشان می‌دهد (شکل ۲). [1] و [2]



شکل ۲ - رفتار بالاست تحت تست سه محوری سیکلیک

شکل ۱ - کرنش‌ها در مصالح دانه‌ای در طی یک سیکل بارگذاری



عوامل زیادی بر مدول برجهندگی موثر است که عبارتند از: سطح تنش - تعداد سیکل های بارگذاری - چگالی - جنس سنگدانه - بزرگترین اندازه دانه بندی - شکل ذرات - دانه بندی - مدت بارگذاری - درصد ریزدانه - فرکانس بارگذاری - درصد رطوبت - تاریخچه تنش که در جدول (۱) توضیحات مربوط به هر قسمت مشاهده می شود .

جدول ۱ - عوامل موثر بر مدول برجهندگی

عوامل موثر بر مدول برجهندگی	توضیحات
سطح تنش	افزایش تنش محفظه ای نسبت به تنش انحرافی تاثیر بیشتری بر مدول برجهندگی دارد .
چگالی	با افزایش چگالی ، مدول برجهندگی افزایش یافته ، که علت آن افزایش سطح تماس و در نتیجه سطوح تماس تنش کمتری را دریافت و تغییر شکل های کمتری بدست می آورند و مدول برجهندگی افزایش یافته .
بزرگترین اندازه دانه بندی ، دانه بندی و درصد ریزدانه	افزایش اندازه بزرگترین سنگدانه موجود می تواند باعث افزایش مدول برجهندگی شود . زیرا در این حالت بارهای وارده بین تعداد کمتری از ذرات درشت دانه موجود پخش می شود و لذا تغییر شکل کمتری بین ذرات به وجود می آید و در نهایت مدول برجهندگی افزایش می یابد .
درصد رطوبت	مدول برجهندگی برای دانه بندی با ذرات خشک و ذرات نیمه اشباع یکسان است . ولی هنگامی که به اشباع شدگی کامل نزدیک می شویم ، تاثیر گذار می شود . و این بدین علت است که فشار آب محفظه ای زیادی ، تنش های موثر در بین ذرات ماده را کاهش می دهد و در نتیجه مقاومت ، سختی و در نهایت مدول برجهندگی کاهش می یابد .
تنش و تعداد سیکل های بارگذاری	با افزایش میزان بارگذاری طبیعتا نمونه سخت تر می شود و در پی آن مدول برجهندگی افزایش می یابد .
جنس ذرات و شکل ذرات	هرچه سختی سطح سنگدانه و یا گوشه دار بودن سنگدانه بالاتر رود مدول برجهندگی افزایش می یابد . و این خود به دلیل توزیع مناسب بار و قفل شدن ذرات در داخل یکدیگر می باشد .
مدت بارگذاری ، فرکانس بارگذاری و ترتیب آن	تحقیقات زیاد نشان می دهد که مدت ، فرکانس و همچنین ترتیب بارگذاری تاثیر ناچیزی بر روی مدول برجهندگی دارند .

## ۲.۲ سختی و نشست بالاست

عوامل زیادی از جمله شکل سنگدانه ، توزیع اندازه سنگدانه ها ، رطوبت و ... بر سختی بالاست اثر گذار می باشند به عنوان مثال سنگدانه های ورقه ای باعث افزایش میزان سایش ، خردشدگی ، کرنش های تجمعی دائم و کاهش سختی خط می شود و در نهایت اکثر محققین استفاده از سنگدانه های مکعبی شکل را به عنوان بالاست توصیه کرده اند . همچنین در مورد سختی میتوان گفت که در حالت بالاست خشک میزان سختی کمتر از حالت مرطوب می باشد یا در فشار آب محفظه ای زیاد ، تنش های موثر در بین ذرات ماده کاهش می یابد و در نتیجه مقاومت ، سختی و در نهایت مدول برجهندگی کاهش می یابد .

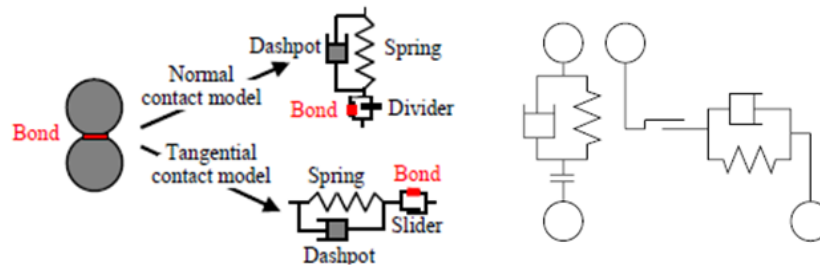
هنگامی که مسیر تحت بار عبوری قطار قرار می گیرد و بارهایی با اندازه متفاوت و فرکانس های بالا از روی خط عبور می کند بالاست و بستر زیر آن دچار تغییرشکلهای غیرالاستیک می شود . بعد از عبور بار انتظار می رود که مسیر به محل قبلی خود برگردد ولی چنین اتفاقی نمی افتد و تغییر شکل ناچیزی در مسیر اتفاق می افتد . با عبور هزاران قطار از روی مسیر تمام این تغییرشکلهای ناچیز با هم جمع می شود و در نهایت مسیر در موقعیت جدیدی قرار می گیرد . این پدیده نشست متغیر مسیر نام دارد . اگر نشست مسیر به صورت یکنواخت در سراسر مسیر اتفاق نیافتد مشکلی پیش نمی آید . بیش از ۵۰٪ نشست در یک مسیر (چه یکنواخت و چه متغیر) ناشی از نشست لایه بالاست می باشد . علت تغییر شکل دائمی مسیر را می توان در موارد زیر بررسی کرد :

(الف) کاهش حجم بالاست و متراکم شدن بالاست به علت بهم خوردگی ذرات بالاست تحت کرنش برشی ناشی از عبور قطار (ب) بازگشت غیرالاستیک در هنگام باربرداری (ج) کاهش حجم بالاست به علت شکست ذرات بالاست ناشی از عبور قطار و یا عوامل محیطی (د) نفوذ ذرات بستر به داخل منافذ بالاست ، این امر باعث فرورفتن ذرات بالاست به داخل بستر می شود .

۲ مورد اول (الف و ب) هم به بالاست اشاره میکند و هم به بستر، مورد سوم (ج) به بالاست و مورد چهارم (د) به بستر اشاره می کند. [3] و [4]

### ۳. روند مدلسازی رفتار مصالح دانه ای با استفاده از روش اجزاء مجزا (DEM)

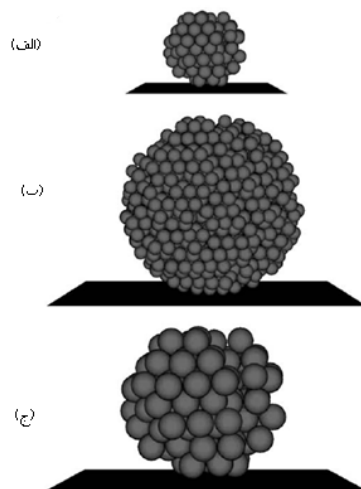
در این روش که نیروهای تماسی به دو مولفه برشی و نرمال تجزیه می شوند که مولفه نرمال در جهت بردار نرمال عمل می کند و مولفه برشی در جهت صفحه تماسی که در شکل های زیر نمونه هایی از مدل های ارائه شده، نشان داده شده است.



شکل ۴ - نمونه تماس چسبنده که بوسیله Jiang مدل شده است

شکل ۳ - مولفه نرمال و مولفه برشی

بخاطر اینکه بالاست دارای ذرات با قطر تقریباً 40 mm می باشد با استفاده از روش اجزاء گسسته رفتار بالاست تحت شرایط مختلف، شبیه سازی می شود. برای این هدف از برنامه PFC استفاده می شود. برنامه شامل دو قسمت می باشد: گلوله و دیوار. نیروهای تماسی با استفاده از شتابهای هر گلوله با استفاده از قانون دوم نیوتن محاسبه می شود و از شتابها انتگرال گرفته می شود تا سرعتها و جابجایی ها بدست آید. McDowell و Harireche [6] از این تجمع دانه ها برای شبیه سازی تستهای یک بعدی روی ماسه های سیلیس دار استفاده کردند. مقاومت بوسیله  $F/d^2$  تخمین زده می شود که در اینجا  $F$  نیروی ماکزیمم و  $d$  اندازه ذره در شکست می باشد. نمونه هایی از این دانه های انباشته شده در شکل (د) نشان داده می شود که هر توده ای با اتصالات تماسی به یکدیگر چسبانده شده اند. یک اتصال تماسی می تواند به عنوان یک نقطه چسبنده با سختی قائم و برشی در نقطه تماسی در نظر گرفته شود. اگر هر دو مقدار نیروی تماسی برشی و قائم کششی از مقاومت اتصال بیشتر شود، اتصال شکسته می شود. یک مجموعه شش گوشه بسته (HCP) به عنوان هندسه در نظر گرفته می شود. [5 ~ 10]

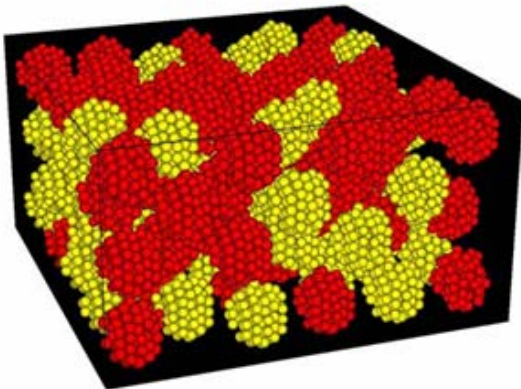


شکل ۵ - (الف) توده 24mm شامل ۱۳۵ گلوله با قطر 3.55 mm (ب) توده 48 mm شامل 1477 گلوله با قطر 3.55 mm (ج) توده 48 mm شامل ۱۳۵ گلوله با قطر 7.1 mm.

یکی از کاربردها جهت مطالعه رفتار مکانیکی بالاست تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیک ، استفاده از این روش می باشد . از آنجا که آزمایشات مهمی اعم از ادمتری و جعبه بالاست برای تعیین پارامترهای مقاومتی - شکل پذیری بالاست مورد استفاده قرار می گیرند ، امکان شبیه سازی شرایط این آزمایشات به روش DEM وجود دارد لذا در ادامه روند مدلسازی آزمایشات فوق شرح می گردد .

### ۱.۳. شبیه سازی تست ادمتری

در آزمایش ادمتری ذرات بالاست به صورت تک محوری در یک قالب استوانه ای فولادی ( ادمتر ) تحت فشار قرار می گیرند . بعد از انجام آزمایش بایستی نتایج حاصل از آنرا محاسبه کرد . نتایج را می توان با کنترل کردن تغییرات ایجاد شده در منحنی دانه بندی ذرات بالاست به دست آورد . بدین منظور می توان از ضریب شکست Hardin's (۱۹۸۵) بهره گرفت . این ضریب در واقع سطح زیر منحنی توزیع دانه بندی بالاست را اندازه گیری می کند . یک تست ادمتری با استفاده از توده های شکست پذیر با توزیع مقاومتی بالاست با تست آزمایشگاهی قابل مقایسه است . بعد از ادمتری شبیه سازی شده ، نمونه شبیه سازی شده باربرداری می شود تا تغییر در تنش باقیمانده افقی آشکار شود . ابعاد ادمتر 270mm طول در 270mm عرض در 150mm ارتفاع می باشد ( نمونه آزمایشگاهی 300mm قطر و تقریباً 150mm ارتفاع دارد ) . گلوله ها با قطر 48 mm توزیع می شوند . گلوله های توزیع شده مورد ارتعاش قرار می گیرند تا به تعادل برسند . توده ها در این تست دارای قطر 48mm می باشند و شامل ۱۳۵ گلوله با قطر 7.1mm می باشد . سختی نرمال و برشی هر دو  $2.0 \times 10^9 \text{ NM}^{-1}$  می باشد و مقاومتی چسبندگی نرمال و برشی هر دو  $2.1 \times 10^3 \text{ N}$  می باشد . ضرایب اصطکاک برای گلوله ها و دیوارها به ترتیب ۰.۵ و ۰ می باشد . سختی دیوارها مشابه گلوله ها می باشند . بعد از اینکه توده ها توزیع شدند نمونه برای 30,000 مراحل زمانی به ارتعاش در می آیند تا از تمرکز بالای نیروی تماسی جلوگیری شود . در طی این مدت مقاومتی چسبندگی برای مقدار بالای  $10^{16} \text{ N}$  تنظیم می شود تا از شکست و ضریب اصطکاک که منجر به صفر می شود ، جلوگیری شود . نرخ نیروی نامتعادل میانگین به نیروی تماسی میانگین یا نرخ نیروی نامتعادل ماکزیمم به نیروی تماسی ماکزیمم برای مقدار پیش فرض 0.01 می باشد . اشکال زیر نمونه ادمتری را نشان می دهد .



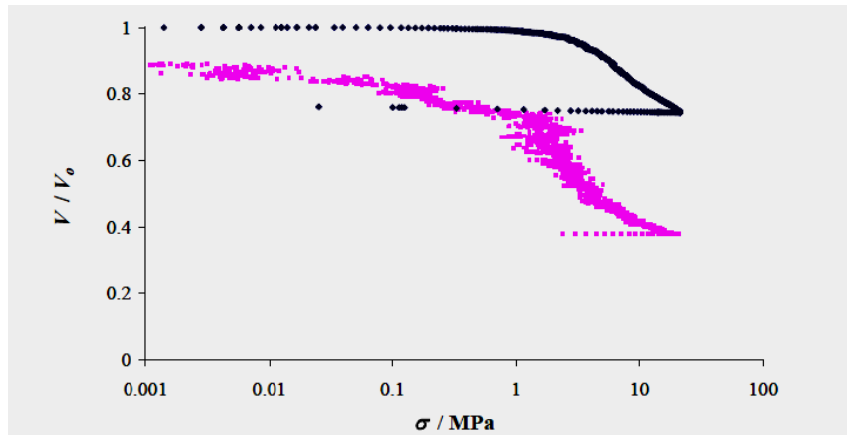
شکل ۷- نمونه ادمتری با توده های 48 mm شامل ۱۳۵ گلوله قبل از بارگذاری



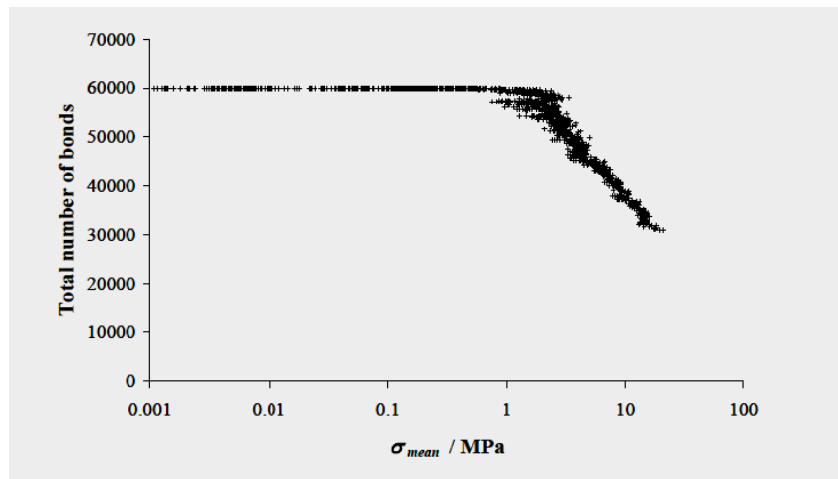
شکل ۶- تنظیمات تست ادمتری

شکل (۸) نمودار حجم V نرمال شده بر حجم اولیه  $V_0$  در برابر لگاریتم تنش قائم میانگین  $\sigma$  برای تست ادمتری شبیه سازی شده روی توده ۱۳۵ گلوله با قطر 48mm و تست ادمتری آزمایشگاهی روی بالاست با قطر 37.5-50mm را نشان می دهد . تست ادمتری شبیه سازی شده روی توده با ۱۳۵ گلوله کرنش اولیه زیادی دارد زیرا نمونه فشرده نشده است ، در حالی که تست ادمتری آزمایشگاهی روی بالاست با قطر 37.5-50mm با ماکزیمم

تراکم فشرده شده است. تسلیم (به عنوان مثال نقطه ماکزیم منحنی روی نمودار حجم در برابر لگاریتم تنش اعمال شده) برای توده ها حدود 30% کرنش ظاهر می شود و تنش تسلیم کمتر از تست ادمتری آزمایشگاهی روی بالاست با قطر 37.5-50mm می باشد. [5 ~ 10]



● تست ادمتری شبیه سازی شده روی توده ۱۳۵ گلوله • تست ادمتری آزمایشگاهی روی بالاست با قطر ۳۷.۵ - ۵۰ mm (الف)



(ب)

شکل ۸ - (الف)  $V/V_0$  در برابر لگاریتم تنش قائم برای شبیه سازی تست ادمتری با استفاده از توده ۱۳۵ گلوله با قطر 48mm و تست آزمایشگاهی ادمتری روی بالاست 37.5-50mm (ب) تعداد کل چسبندگی در برابر لگاریتم تنش قائم میانگین  $\sigma_{mean}$  برای شبیه سازی تست ادمتری روی توده ۱۳۵ گلوله با قطر 48mm

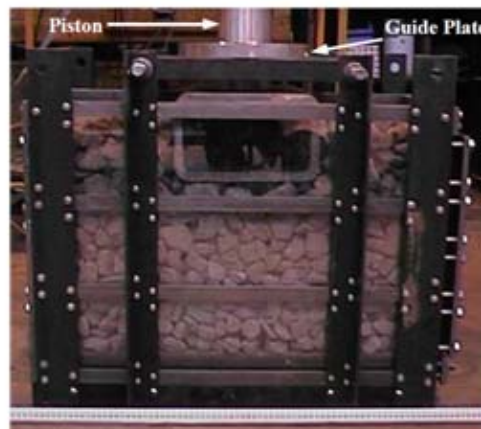
### ۲.۳. شبیه سازی تست جعبه بالاست

به وضوح روشن است که رفتار بالاست در شرایط متفاوت بستگی به شرایط میدانی بالاست دارد. با توجه به شرایط گوناگون میدانی، نمی توان آزمایش های متفاوت میدانی بر روی بالاست انجام داد. لذا یک سری تست های آزمایشگاهی کنترل شده بر روی بالاست به منظور مقایسه عملکرد بالاست صورت می گیرد که یک جعبه به منظور شبیه سازی بالاست تحت بارگذاری سیکلیک طراحی می شود. در این جعبه می توان بارگذاری و هم چنین زیرکوبی مسیر را شبیه سازی کرد. که اشکال زیر تست جعبه بالاست آزمایشگاهی و شبیه سازی شده را نشان می دهد. بارگذاری ترافیکی شبیه سازی شده به طور متناوب به تراورس مدل شده در بالای بالاست وارد می شود و خصوصیات مثل سختی، نشست دائمی می تواند مطالعه شود. ابعاد جعبه و تراورس در این شبیه سازی معادل ابعاد جعبه و تراورس در آزمایشگاه می باشند که به ترتیب عبارتند از:  $700 \times 300 \times 450 \text{ mm}$  و  $250 \times 300 \times 150 \text{ mm}$ . قطر گلوله ها 36.25 mm می باشد که اندازه میانگین بالاست استفاده شده در تست جعبه آزمایشگاهی می باشد. این منجر به سختی نرمال و برشی  $5.08 \times 10^9 \text{ NM}^{-1}$  می شود. سختی دیوارها و تراورس مشابه گلوله ها انتخاب می شوند.

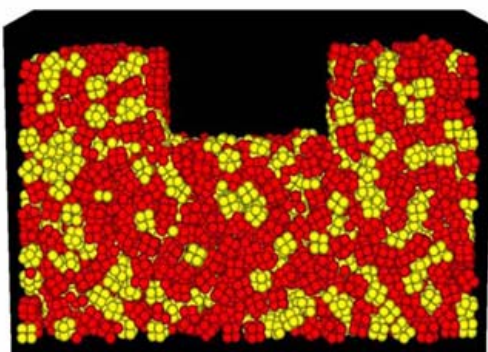




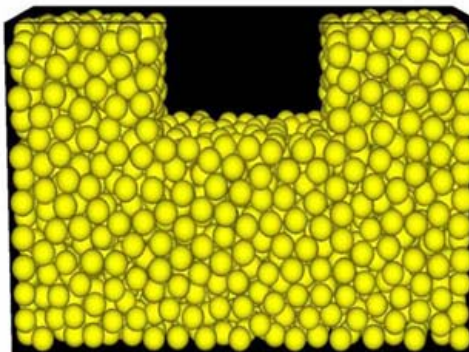
شکل ۱۰ - تنظیمات تست جعبه بالاست (از بالای جعبه)



شکل ۹ - تنظیمات تست جعبه بالاست (نما)

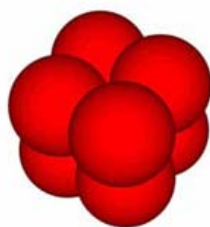


(ب)

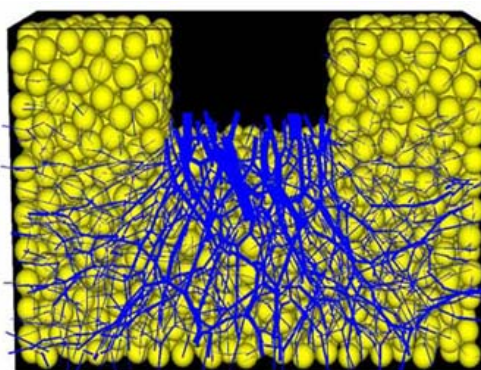


(الف)

شکل ۱۱ - نمونه های تست جعبه بالاست (الف) گلوله های کروی و (ب) خوشه های مکعبی ۸ گلوله ای قبل از بارگذاری

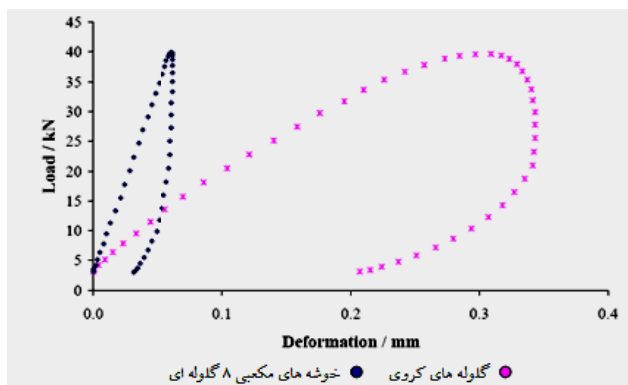


شکل ۱۳ - خوشه مکعبی ۸ گلوله ای



شکل ۱۲ - توزیع غیر یکنواخت نیروهای تماسی در مجموعه جعبه (نیروهای تماسی با خطوط ضخیم متناسب با بزرگی نیروی تماسی)

شکل (۱۴) نمودار بارگذاری در برابر تغییر شکل قائم برای سیکل اول بارگذاری در تست جعبه شبیه سازی شده با استفاده از هر دو گلوله های کروی و خوشه های مکعبی ۸ گلوله ای (شکل ۱۱) را نشان می دهد. به نظر می رسد که مجموعه خوشه های مکعبی ۸ گلوله ای (شکل ۱۳) سخت تر از حالت بارگذاری با گلوله های کروی می باشد. خوشه ها سختی الاستیک بالاتری می دهند و تغییر شکل دائمی کمتر تولید می کنند. این اختلاف باید به دلیل مقاومت اضافی تولید شده بوسیله درهم قفل شدگی خوشه های غیر کروی باشد. [5 ~ 10]



شکل ۱۴- نمودار بارگذاری در برابر تغییر شکل برای سیکل اول در تست جعبه روی گلوله های کروی و خوشه های مکعبی ۸ گلوله ای

#### ۴. نتیجه گیری

به علت اینکه بالاست دارای محیط دانه ای و ذرات با قطر تقریباً 40 mm می باشد، با استفاده از روش اجزاء مجزاء (DEM) می توان مدل دقیقتری از رفتار بالاست تحت شرایط مختلف را شبیه سازی کرد. برای این هدف از برنامه PFC استفاده می شود. برنامه شامل دو قسمت، گلوله و دیوار می باشد. عموماً، هر چه سنگدانه تیز گوشه تر باشد، اتصال بین سنگدانه ها افزایش می یابد و باعث بیشتر شدن مقاومت برشی می شود. هم چنین نباید از سنگدانه های ورقه ای شکل به عنوان بالاست استفاده کرد زیرا که باعث ضعف مسیر در جهات قائم و افق، افزایش میزان سایش، خردشدگی، کرنش-های تجمعی دائم و کاهش سختی خط می شود. در نهایت اکثر محققین استفاده از سنگدانه های مکعبی شکل را به عنوان بالاست توصیه کرده اند. در این مقاله تستهای آزمایشگاهی بالاست مثل آزمایش ادومتری و جعبه بالاست با مدل های شبیه سازی شده آنها، مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه شده اند. و همانطور که در تحلیل عددی مشخص شد مجموعه خوشه های مکعبی ۸ گلوله ای سخت تر از گلوله های کروی تحت بارگذاری می باشند که این اختلاف باید به دلیل مقاومت اضافی تولید شده بوسیله درهم قفل شدگی خوشه های غیر کروی باشد.

#### ۵. مراجع

1. Lim W. L. , (2004) " Mechanics of Railway Ballast Behaviour ", University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy .
2. Kaya M. , (2004) " a study on the stress-strain behavior of railroad ballast materials by use of parallel gradation technique", for the degree of doctor of philosophy in the department of civil engineering.
3. Indraratna B. & Ionescu D. & Christie D. & Chowdhury R. , ( 1997 ) "Compression and Degradation of Railway Ballast Under One-Dimensional Loading", Australian Geomechanics Journal , pp 48-61 .
4. Dahlberg T. , (2002) "Railway track settlements", Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden, Report for the EU project supertrack .
5. Lim W. L. & McDowell G. R. , (2005) "Discrete element modelling of railway ballast", Granular Matter 7 , pp 19-29 .
6. Harireche O. , McDowell G.R. , (2003) "Discrete element modelling of cyclic loading of crushable aggregates", Granular Matter , Volume 5 , Number 3 , pp147-151.
7. Indraratna B. & Salim W. , (2005) "Mechanics of Ballasted Rail Tracks", University of Wollongong , ISBN 0-415-38329-3 .
8. Indraratna B. , Aljorany A. , and Rujikiatkamjorn C. , ( 2008 ) "Analytical and Numerical Modelling of Consolidation by Sand Drains beneath a Circular Embankment", International Journal of Geomechanics, 8(3) , pp 199-206 .
9. Indraratna B. , Lackenby J. , (2005) "Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading", Institution of Civil Engineers , 55(4) , pp 325 - 328 .
10. Indraratna B. & Salim W. , (2006) "Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilization", Journal of Ground Improvement , 10(3) , pp 91-102.