

تعیین سختی برشی قفل شدگی لایه‌های بالاست به روش آزمایشگاهی

بهنام سعدالله‌زاده^۱، مرتضی اسماعیلی^{*}، جبارعلی ذاکری^۳

پذیرش مقاله: ۹۶/۱۱/۰۸

دریافت مقاله: ۹۵/۰۴/۱۰

چکیده

پدیده قفل شدگی برشی بین لایه‌های بالاست قرار گرفته در زیر تروارس‌های مجارو هم، در اثر بارگذاری محوری و با وجود سه عامل ضخامت زیاد لایه بالاست، زاویه توزیع تنش بزرگ در توده بالاست و کم بودن فاصله بین تروارس‌ها رخ می‌دهد. تحت این شرایط و با فرض انتقال بار در داخل توده‌های بالاست به صورت یک توزیع تنش هرمی، یک همپوشانی بین هرم‌های مجاور هم ایجاد می‌شود که موجب بسیج شدن یک سختی و میرایی مضاف بر سختی و میرایی لایه بالاست در راستای قائم می‌شود. این دو پارامتر کوپل برشی نامیده می‌شوند. تاکنون در تحقیقات اندکی به مطالعه این پارامترها پرداخته شده است از اینرو در این مقاله با هدف ارزیابی سختی برشی بالاست در ناحیه قفل شدگی، با توسعه یک روش آزمایشگاهی، آزمایش‌های برش بالاست تحت سربارهای استاتیکی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۷۰ درصد صورت پذیرفته است. همچنین اثر مقادیر تراکم نسبی ۴۰، ۷۰ و ۹۵ درصد نیز بر میزان مقاومت برشی بررسی شده است. برای انجام آزمایش‌ها یک دستگاه برش بالاست بزرگ مقیاس در آزمایشگاه روسازی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده، برای تعیین پارامتر سختی برشی قفل شدگی لایه‌های بالاست، یک مدل ریاضی چهار پارامتری که در برگزیده بارمحوری، وزن مخصوص لایه بالاست، سرعت قطار و قطر چرخ قطار می‌باشد توسعه داده شده است.

کلید واژه‌ها: قفل شدگی برشی بالاست، توزیع تنش هرمی، آزمایش‌های برش بالاست، پارامتر سختی برشی قفل شدگی، مدل ریاضی

۱. دانش‌آموخته کارشناسی دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه‌آهن، تهران، ایران

۲. دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه‌آهن، تهران، ایران m_esmaeili@iust.ac.ir

۳. دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه‌آهن، تهران، ایران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

روسازی راه آهن بالاستی به طور معمول از مصالح اصلی شامل ریل، تراورس، بالاست تشکیل شده است. از اصلی ترین وظایف این اجزای خط دریافت بارهای وارده از طرف قطار و انتقال آن به لایه های زیرسازی می باشد. در زمان عبور قطار علاوه بر بارهای استاتیکی بارهای دینامیکی نیز بر روسازی اعمال می شود لذا عملکرد ارتجاعی لایه بالاست به منظور کاهش اثرات دینامیکی بار بسیار الزامی و تأثیر گذار است. در بررسی رفتار مکانیکی لایه بالاست بعنوان یک لایه باربر مطالعات آزمایشگاهی متنوعی بر روی این نوع مصالح دانه ای انجام شده است (Lackenby et al., 2007; Guoqing et al., 2014; Wang et al., 2015).

یکی از راه های بررسی رفتار مکانیکی بالاست استفاده از مدلسازی اجزای خط و تحلیل رفتار دینامیکی آن در مدل های اندرکنشی بین اجزای خط و قطار می باشد. مدل تیر نامحدود بر روی تکیه گاه پیوسته الاستیک از ابتدایی ترین و ساده ترین مدل های تحلیلی بوده است (Timoshenko, 1926). در سال های اخیر مدل های نظری متعددی به منظور بررسی و تحلیل خط بالاستی توسعه داده شده است. از جمله مدل های نظری اندرکنش بین خط و قطار می توان به مدل های شامل بالاست تک لایه (Esvels and De Man, 2003)، بالاست دو لایه (Feng, 2001; Zakeri et al., 2009) و بالاست سه لایه (Ishida and Suzuki, 2005) اشاره نمود.

از مباحثی که در سال های اخیر مورد توجه پژوهشگران در مدلسازی قرار گرفته است نظریه اندرکنش بین دو توده بالاست در زیر تراورس های مجاور هم و ایجاد پدیده قفل-شدگی برشی (Shear Interlocking) بین آنها می باشد. این پدیده در اثر بارگذاری محوری و با وجود سه عامل: (۱) ضخامت زیاد لایه بالاست، (۲) زاویه توزیع تنش بزرگ در توده بالاست و (۳) کم بودن فاصله بین تراورس ها رخ می دهد. تحت این شرایط و با فرض انتقال بار در داخل توده های بالاست به صورت یک توزیع تنش هرمی (Ahlbeck, 1975)، یک همپوشانی بین هرم های مجاور هم ایجاد می شود که

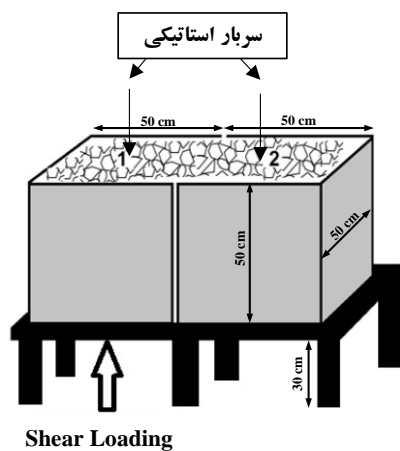
موجب ایجاد یک سختی و میرایی مضاف بر سختی و میرایی لایه بالاست در راستای قائم می شود. بر اساس این نظریه در مدل سازی های جدید برخلاف مدل های گذشته عملکرد دو توده بالاست زیر تراورس های مجاور هم از هم مستقل در نظر گرفته نشده است و توده ها به بوسیله یک کوپل برشی شامل یک فنر و کمک فنر (میراگر) به یکدیگر متصل شده اند. کوپل برشی بین دو توده بالاست های مجاور هم در مدلسازی دینامیکی اندرکنش بین خط و قطار توسط محققین مختلفی در نظر گرفته شده است (Ripke and Knoth, 1995; Oscarsson and Dahlberg, 1998; Igeland and Oscarsson, 1997).

یکی از مطالعات انجام شده در بررسی اثر کوپل برشی در لایه بالاست توسط ژای و همکاران (Zhai et al, 2004) صورت پذیرفته است. در این مطالعه میدانی بوسیله یک لرزه نگار ارتعاشات ایجاد شده در لایه بالاست به هنگام عبور یک قطار با سرعت و بار محوری مشخص از یک روی خط بالاستی اندازه گیری شده است. از مقایسه نتایج میدانی با خروجی شتاب یک مدل تحلیلی ۵ پارامتری که اثر کوپل برشی را در نظر می گرفت مشخص شده است که به هنگام در نظرگیری کوپل برشی در مدل نظری، میزان شتاب ایجاد شده در لایه بالاست در مقایسه با نتایج میدانی اختلافی ۶+ درصدی و بدون در نظرگیری اثر کوپل برشی اختلافی ۱۲+ درصدی دارد. در این مطالعه اگرچه اهمیت در نظرگیری پدیده قفل شدگی برشی در لایه بالاست بیان شده است اما یک روش مشخصی برای اندازه گیری پارامترهای کوپل برشی در ناحیه قفل شدگی ارائه نشده است و مقادیر بیان شده برای پارامترهای کوپل برشی بر اساس قیاس شرایط واقعی خط با مدل نظری و به صورت روش سعی و خطا بدست آمده است. علاوه بر این مطالعه، در ادبیات فنی برای پارامترهای کوپل برشی مقادیر دیگری نیز که مبنای تجربی داشته اند ذکر شده است (Oscarsson, 1999).

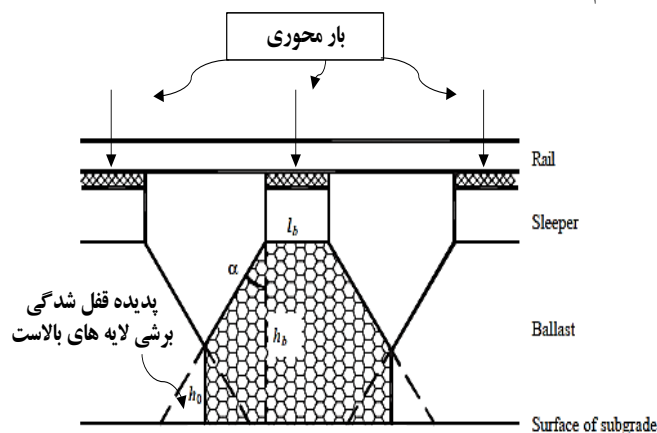
با توجه به عدم گزارش یک روش مشخص در ادبیات فنی برای اندازه گیری کوپل برشی، در این مقاله با توسعه یک روش آزمایشگاهی و ساخت یک دستگاه برش بالاست بزرگ

قائم را بدون داشتن اصطکاک جانبی با جعبه شماره ۲ و جداره‌های جانبی نشیمن داشته باشد. همچنین پایه‌های نشیمن بوسیله یکسری بست‌های مخصوص به زمین متصل شده است تا نشیمن و جعبه متصل به آن (جعبه شماره ۲) در طی فرآیند بارگذاری ثابت و بدون جابجایی در جای خود ساکن بماند.

به منظور بارگذاری برشی از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰ تن و دارای پیستونی با سطح مقطع ۲/۵ سانتی‌متری و با میزان جابجایی ۱۰ سانتی‌متری استفاده شده است. در مرکز هندسی جعبه متحرک مقطعی استوانه‌ای به ارتفاع ۵ سانتی‌متر تعبیه شده است که پیستون جک در داخل آن قرار می‌گیرد. بدین ترتیب بارگذاری برشی بدون هیچگونه خروج از مرکزیتی به جعبه اعمال می‌شود. اندازه قطر این مقطع استوانه-ای از قطر پیستون جک کمی بیشتر در نظر گرفته شده است تا با آن اصطکاک نداشته باشد. همزمان با اعمال بارگذاری برشی و ثبت آن، میزان تغییر شکل قائم رخ داده با استفاده از یک گیج تغییرمکان سنج نصب شده بر جعبه متحرک ثبت شده است. در شکل (۲) ابزاربندی دستگاه آزمایش و محل اعمال بارگذاری برشی نشان داده است.



(ب)



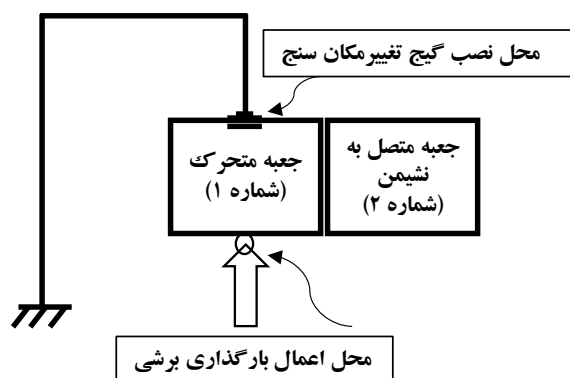
(الف)

مقیاس، پارامتر سختی برشی قفل‌شدگی لایه‌های بالاست اندازه‌گیری شده است. بدین منظور با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های برشی و با تمرکز بر ارزیابی اثر دو پارامتر تراکم نسبی توده بالاست و مقدار سربار استاتیکی اعمالی، میزان مقاومت برشی و تغییر شکل‌های برشی اندازه‌گیری شده و در نهایت با تجمیع نتایج بدست آمده، یک مدل ریاضی چهار پارامتری برای محاسبه سختی برشی قفل‌شدگی لایه‌های بالاست توسعه داده شده است.

۲. دستگاه برش بالاست و ابزاربندی آن

در شکل (۱) بخش (الف) نحوه توزیع تنش هرمی در لایه بالاست و پدیده قفل‌شدگی برشی نشان داده شده است. در این مقاله به منظور شبیه‌سازی این پدیده در مقیاس آزمایشگاهی، مطابق بخش (ب) از شکل (۱) دو جعبه فلزی با ابعاد یکسان و متقارن استفاده شده است. این دو جعبه بر روی یک نشیمنی از پروفیل L شکل قرار داده شده است. جعبه شماره ۲ با اتصال جوشی به نشیمن متصل شده است و امکان هیچگونه جابجایی را ندارد و در مقابل موقعیت جعبه شماره ۱ به گونه‌ای روی نشیمن در نظر گرفته شده است که به هنگام اعمال بارگذاری برشی، امکان جابجایی در راستای

شکل ۱. الف) توزیع تنش هرمی و پدیده قفل‌شدگی برشی بین لایه‌های بالاست (Zhai et al., 2004)، ب) دستگاه برش قائم بالاست

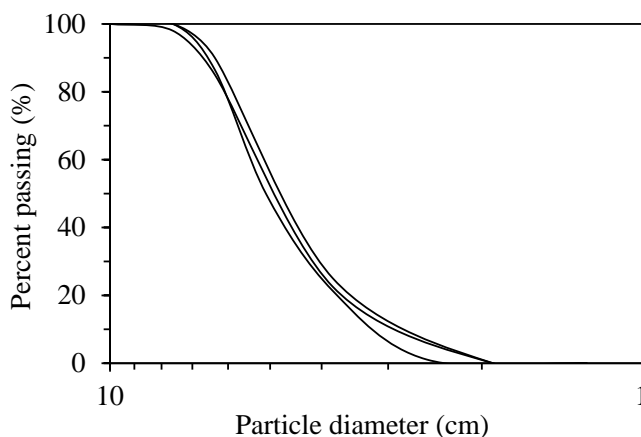


شکل ۲. نمایی از ابزاربندی دستگاه آزمایش و محل اعمال بارگذاری برشی

۳. مشخصات فیزیکی نمونه‌ها و روش آماده‌سازی آنها

عبورهای رفت و برگشتی متراکم شده‌اند. در شکل (۴) نحوه تراکم لایه‌ها با استفاده از غلتک نشان داده شده است. تعداد عبور رفت و برگشتی این غلتک متناظر با یک وزن مخصوص مشخص در توده بالاست داخل جعبه بوده است که از پیش بوسیله آزمایش‌های کالیبراسیون بدست آمده است. با انجام آزمایش‌های کالیبراسیون وزن مخصوص متناظر برای تعداد عبورهای رفت برگشتی ۵، ۱۵ و ۲۵ مرتبه در جدول (۱) ارائه شده است.

به منظور انجام آزمایش‌های برشی از یک نوع بالاست گرانیبی تمیز (بدون آلودگی) و بدون رطوبت (خشک) استفاده شده است. شکل (۳) نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی بالاست مورد آزمایش را نشان می‌دهد (ASTM C136-06). به منظور تهیه نمونه‌هایی با مقدار تراکم نسبی مورد نظر از یک غلتک بتنی ۲۵ کیلوگرمی استفاده شده است بطوریکه پس از توزین مقدار مشخصی بالاست، این مصالح دانه‌ای در لایه‌های ۱۰ سانتی متری درون جعبه آزمایش بوسیله غلتک و به صورت



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی بالاست مورد آزمایش

$$D_r = \frac{\frac{1}{\gamma_{d,min}} - \frac{1}{\gamma}}{\frac{1}{\gamma_{d,min}} - \frac{1}{\gamma_{d,max}}} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه فوق γ : وزن مخصوص ظاهری می‌باشد. همچنین $\gamma_{d,min}$: وزن مخصوص خشک حداقل و $\gamma_{d,max}$: وزن

یکی از مشخصه‌های فیزیکی مهم لایه بالاست میزان تراکم آن می‌باشد. در مصالح دانه‌ای درشتدانه همچون بالاست برای بیان میزان تراکم از مفهوم تراکم نسبی (D_r) استفاده می‌شود که مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود.

رابطه (۱)، مقادیر درصد تراکم نسبی ایجاد شده در لایه بالاست برای تعداد عبورهای مختلف غلتک در جدول (۱) ارائه شده است.

مخصوص خشک حداکثر بالاست می‌باشد که به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D4254-00 و ASTM D4253-14 برابر با ۱۳/۵۲ و ۱۶/۰۱ کیلونیوتن بر مترمکعب بدست آمده است. با توجه به مشخص بودن تمام پارامترهای



شکل ۴. نحوه‌ی غلتک‌زنی و تراکم لایه‌ها (روش تهیه نمونه‌ها)

جدول ۱. نتایج آزمایش کالیبراسیون؛ تناسب تعداد دفعات عبور غلتک با درصد تراکم نسبی بالاست

تراکم نسبی (%)	وزن مخصوص ظاهری (kN/m ³)	تعداد عبورهای رفت و برگشتی غلتک
۴۰	۱/۴۴۴	۵
۷۰	۱/۵۱۶	۱۵
۹۵	۱/۵۸۴	۲۵

۴. برنامه آزمایش‌ها و روند انجام آنها

سربار استاتیکی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر رفتار برشی لایه‌های بالاست در ناحیه قفل‌شدگی بررسی شده است. سربارهای استاتیکی روی سطح مقطعی (یک صفحه فلزی مربعی با ابعاد ۰/۲۵ متر) اعمال می‌شدند که به ترتیب تنشی معادل ۲۲، ۳۳ و ۴۴ کیلوپاسکال به لایه بالاست اعمال می‌کردند. در اینجا لازم به توضیح است که این سطح تنشی اعمال‌شده به لایه بالاست در مقیاس آزمایشگاهی می‌تواند در شرایط میدانی و بسته به میزان بار محوری قطار بر لایه

در این مقاله برای بررسی تأثیر دو متغیر تراکم نسبی توده بالاست و سربار استاتیکی بر رفتار برشی لایه‌های بالاست در ناحیه قفل‌شدگی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش قائم بالاست طراحی و انجام شده است. این آزمایش‌ها به دو گروه دسته‌بندی شده است. در گروه اول از آزمایش‌ها در شرایط عدم وجود سربار (سربار استاتیکی صفر) اثر مقادیر تراکم نسبی ۴۰، ۷۰ و ۹۵ درصد نمونه‌ها و در آزمایش‌های گروه دوم، تحت شرایط تراکم نسبی ۷۰ درصد نمونه‌ها، اثر مقادیر

جدول (۲) ارائه شده است. بارگذاری برشی اعمال شده به صورت کنترل کرنش (Strain Control) بوده است و مقدار نیروی برشی در هر ۲ میلی متر جابجایی قائم ثبت شده است. این بارگذاری برشی تا رسیدن نمونه به حالت بحرانی (Critical State) ادامه داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر جابجایی قائم با استفاده از گیج‌های تغییر مکان سنج با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی متر اندازه‌گیری شده است.

بالاست اعمال شود. همچنین مقادیر تراکم نسبی در نظر گرفته در آزمایش‌ها بدلیل اینکه لایه بالاست این مقادیر را در طول تاریخچه بارگذاری خود کسب می‌کند انتخاب شده است. لازم به توضیح است که همانطور که در بخش (ب) از شکل (۱) نشان داده شده است سربار استاتیکی به صورت یک بار مرده متمرکز و همچنین متقارن در مرکز هندسی دو جعبه به بالاست اعمال شده است تا با ایجاد یک توزیع تنش هرمی در لایه بالاست پدیده قفل‌شدگی رخ دهد. برنامه آزمایش‌ها در

جدول ۲. برنامه آزمایش‌های برش بالاست

سربار استاتیکی (kg)	تراکم نسبی (%)	گروه آزمایش
۰	۴۰	گروه اول
۰	۷۰	
۰	۹۵	
۲۰۰	۷۰	گروه دوم
۳۰۰	۷۰	
۴۰۰	۷۰	

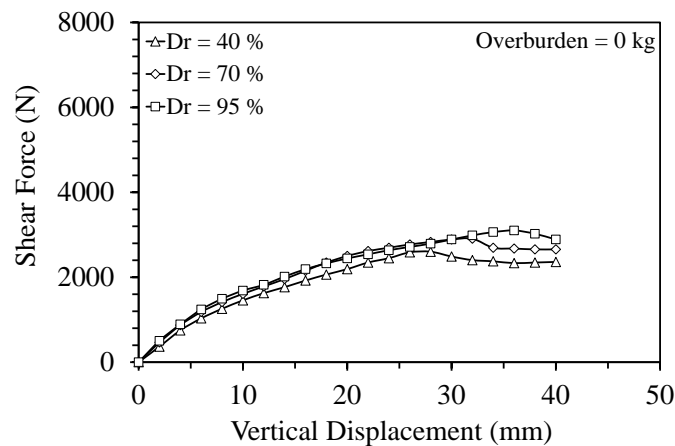
۵. نتایج آزمایش‌ها

تغییر مکان قائم برای این آزمایش‌ها ارائه شده است. با توجه به اینکه شیب اولیه این منحنی‌ها بیان‌کننده سختی برشی نمونه می‌باشد، ملاحظه می‌شود با تغییر میزان تراکم نسبی لایه بالاست از ۴۰ تا ۹۵ درصد این شیب تغییر محسوسی نداشته است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تراکم نسبی به تنهایی بر سختی برشی موثر نبوده است. اما نکته قابل توجه اثر تراکم نسبی بر بیشینه مقاومت برشی نمونه‌ها است بطوریکه با افزایش تراکم نسبی، بیشینه مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش یافته است. در جدول (۳) مقادیر بیشینه نیروی برشی بدست آمده برای هر سه آزمایش گروه اول بیان شده است.

در این بخش نتایج بدست آمده از انجام آزمایش‌های ذکر شده در جدول (۲) در سه بخش ارائه است. در بخش اول ابتدا اثر تراکم نسبی و در بخش دوم اثر سربار استاتیکی بر مقاومت و سختی برشی بیان شده است و در بخش سوم نهایتاً با جمع‌بندی نتایج و روابط حاصله از بخش‌های قبلی، روند استخراج مدل ریاضی جهت تعیین پارامتر سختی برشی ناحیه قفل‌شدگی لایه‌های بالاست بیان شده است.

۵-۱. اثر تراکم نسبی بر رفتار برشی

برای تعیین اثر تراکم نسبی بر رفتار برشی، آزمایش‌های گروه اول بر روی نمونه‌هایی با سه درصد تراکم نسبی صورت گرفته است. در شکل (۵) منحنی‌های نیروی برشی در برابر



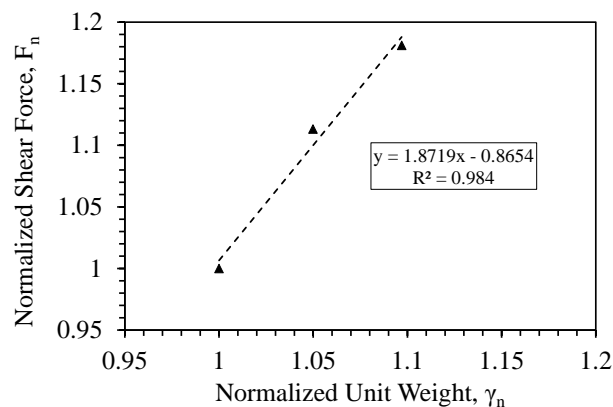
شکل ۵. منحنی‌های نیروی برشی - تغییر مکان قائم برای آزمایش‌های گروه اول

جدول ۳. مقادیر بیشینه نیروی برشی بدست‌آمده از آزمایش‌های گروه اول

وزن مخصوص عادی (kN/m ³)	تراکم نسبی (%)	بیشینه نیروی برشی (N)	بیشینه نیروی برشی (kg)
۱/۴۴۴	۴۰	۲۶۰۲/۲۲	۲۵۴/۲۴
۱/۵۱۶	۷۰	۲۸۹۴/۵۴	۲۹۵/۲۶
۱/۵۸۴	۹۵	۳۰۷۳/۲۵	۳۱۳/۲۸

نمونه دارای تراکم نسبی ۴۰ درصد نرمال شده است و نتایج بدست‌آمده در قالب نمودار بیشینه نیروی برشی نرمال شده در برابر وزن مخصوص نرمال شده در شکل (۶) ترسیم شده است.

با توجه به اثر مستقیم تراکم نسبی بر مقاومت برشی نمونه‌ها در لحظه گسیختگی و بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۳)، مقادیر وزن مخصوص و بیشینه نیروی برشی کلیه نمونه‌های گروه اول به ترتیب نسبت به وزن مخصوص و نیروی برشی



شکل ۶. تغییرات بیشینه نیروی برشی نرمال شده در برابر وزن مخصوص نرمال شده

بعد ($\gamma/1444$) بجای متغیر x ضریبی مطابق رابطه (۲) بدست آمده است که بیان‌کننده اثر دانسیته بر نیروی برشی

بر اساس رابطه بدست‌آمده از نمودار شکل (۶)، چون این رابطه ($y = 1.8719x - 0.8654$) نسبت به دانسیته ۱۴۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب نرمال شده است با قرار دادن مقدار بی

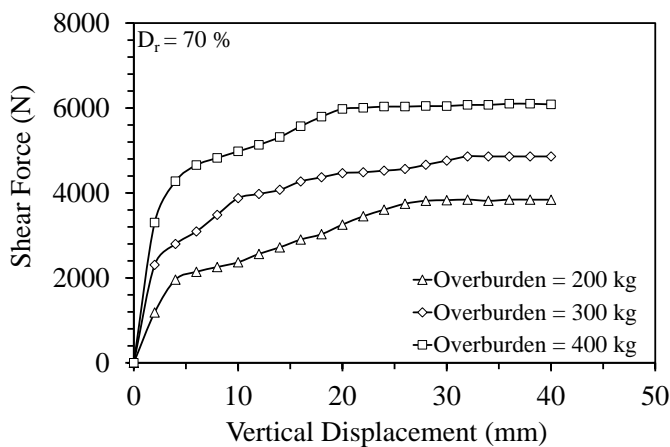
می‌باشد. در این ضریب بی‌بعد که با نماد F نشان داده است γ دانسیته نمونه بوده و واحد آن تن بر مترمکعب می‌باشد.

$$F = 1.3\gamma - 0.8654 \quad (2)$$

۲-۵. اثر سربار استاتیکی بر رفتار برشی

در گروه دوم آزمایش‌ها با هدف بررسی اثر سربار استاتیکی بر مقاومت و سختی برشی، آزمایش‌ها برش با اعمال سربارهای استاتیکی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم و در تراکم نسبی ۷۰ درصد صورت پذیرفته است. نتایج این گروه از آزمایش‌ها در قالب منحنی‌های تغییرات نیروی برشی در برابر تغییر مکان قائم در شکل (۷) ارائه شده است. با مقایسه نتایج آزمایش‌های این گروه با نتایج آزمایش‌های گروه اول (شکل ۵) می‌توان نتیجه گرفت که اثر سربار استاتیکی بر سختی برشی یا بعبارت دیگر بر شیب اولیه منحنی بار - تغییر شکل

در آزمایش‌های این گروه محسوس‌تر بوده است بطوریکه با افزایش میزان سربار استاتیکی، سختی برشی افزایش یافته است. همچنین با افزایش سربار استاتیکی مقاومت برشی نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. نکته دیگر در رابطه با نتایج آزمایش‌های این گروه این است که برخلاف آزمایش‌های گروه اول، رفتار کرنش‌های سخت‌شونده در نمونه‌های این گروه مشاهده شده است بطوریکه با اعمال بارگذاری برشی، نمونه‌ها در تغییرشکل‌های کوچک و اولیه خود بدلیل داشتن یکسری قفل‌وبست‌هایی، بیشینه سختی برشی خود را نشان داده‌اند سپس با پیشروی بارگذاری برشی و با باز شدن قفل و بست‌های بین دانه‌ای از میزان سختی برشی آنها کاسته شده است و نهایتاً به حالت بحرانی خود رسیده‌اند. در جدول (۴) مقادیر نیروی برشی در لحظه گسیختگی (بیشینه مقاومت برشی) و بیشینه سختی برشی (شیب اولیه منحنی بار - تغییر مکان) برای آزمایش‌های این گروه ارائه شده است.



شکل ۷. منحنی‌های تغییرات نیروی برشی در برابر تغییر مکان قائم برای آزمایش‌های گروه دوم

جدول ۴. مقادیر بیشینه نیروی و سختی برشی بدست‌آمده از آزمایش‌های گروه دوم

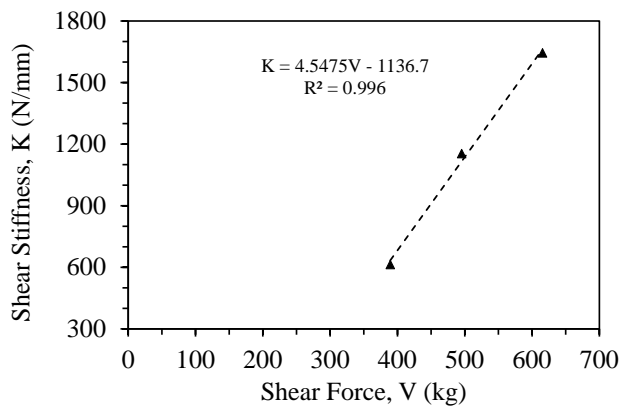
سربار استاتیکی قائم (kg)	بیشینه نیروی برشی (N)	بیشینه نیروی برشی (kg)	بیشینه سختی برشی (N/mm)
۲۰۰	۳۸۱۸/۱۵	۳۸۹/۳۳	۶۱۳/۸۱
۳۰۰	۴۸۵۹/۹۷	۴۹۵/۴۱	۱۱۵۳/۷۵
۴۰۰	۶۰۳۸/۰۳	۶۱۵/۴۹	۱۶۴۴/۶۲

$$V = 1.1458q + 155.33 \quad (۳)$$

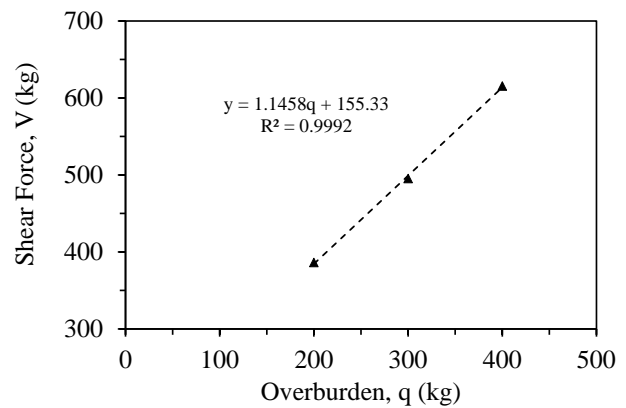
$$K = 4.5475V - 1136 \quad (۴)$$

در روابط فوق V ، q و K به ترتیب معرف نیروی برشی بیشینه (در واحد کیلوگرم)، سربار قائم (در واحد کیلوگرم) و سختی برشی بیشینه (در واحد نیوتن بر میلی‌متر) می‌باشد.

براساس نتایج ارائه شده در جدول (۴)، در شکل (۸) و در بخش (الف) و (ب) به ترتیب نمودارهای نیروی برشی - سربار استاتیکی و سختی برشی - نیروی برشی ترسیم شده است. با استفاده از این نمودارها روابط (۳) و (۴) که به ترتیب بیان‌کننده رابطه بین نیروی برشی با سربار استاتیکی و سختی برشی با نیروی برشی می‌باشد بدست آمده است.



(ب)



(الف)

شکل ۸ الف) تغییرات بیشینه نیروی برشی در برابر سربار قائم، ب) تغییرات بیشینه نیروی برشی در برابر بیشینه سختی برشی

سربار وارده بر توده بالاست است نمایش داده شده است. V نیز نیروی برشی فعال در دو طرف هرم می‌باشند.

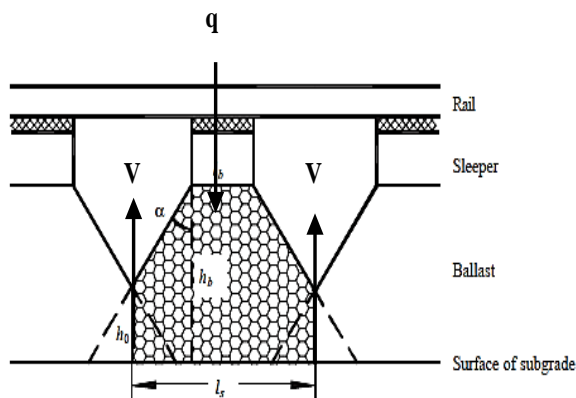
۳-۵. مدل ریاضی توسعه داده‌شده برای تعیین سختی برشی

قفل‌شدگی

مطابق مدل هرمی ارائه شده در شکل (۹) که توسط ژای و همکاران (Zhai et al. 2004)، با نوشتن تعادل نیروها در راستای قائم رابطه (۵) بدست آمده است.

$$2V = W_1 + W_2 + W_3 = q \Rightarrow q = \frac{V}{2} \quad (۵)$$

در رابطه (۵) W_1 : نیروی ناشی از بار محوری، W_2 : وزن تراورس و بخشی از ریل و اتصالات بین آنها که روی توده هرمی موثر است و W_3 : وزن بالاست ناحیه هاشورخورده شکل (۹) می‌باشد. حاصل جمع این نیروها با نماد q که بیانگر کل



شکل ۹. مدل هرمی و دیاگرام آزاد نیروها در آن

به طور میانگین ۵۰ درصد از بار محوری قطار به زیر تراورس منتقل می‌شود (AREMA, 2006). لازم به توضیح است که در

دینامیکی در نظر گرفته شده در رابطه (۸) ارائه شده است. این ضریب برگرفته از آئین نامه (AREMA 2006) بوده است و پارامترهایی از قبیل سرعت و قطر چرخ قطار را که از پارامترهای بارز در افزایش نیروی دینامیکی می باشد در نظر می گیرد.

$$\varphi = 1 + 5.21 \frac{R}{D} \quad (۸)$$

در رابطه فوق R و D به ترتیب بیان کننده سرعت قطار (در واحد کیلومتر بر ساعت) و قطر چرخ قطار (در واحد میلی متر) می باشد.

در گام آخر با توجه به نتایج آزمایش های گروه دوم و بر اساس رابطه (۴) که بیان کننده ارتباط بین سختی برشی و نیروی برشی می باشد، ابتدا نیروی برشی بدست آمده از رابطه (۷) در رابطه (۴) جایگذاری شده است. سپس ضریب دینامیکی ارائه شده در رابطه (۸) بر سربار استاتیکی موجود در رابطه (۷) اعمال شده است. در نهایت رابطه (۹) که بیان کننده سختی برشی قفل شدگی لایه های بالاست در حالت دینامیکی می باشد توسعه داده شده است.

$$K_{Sh} = \left[\left(\left(2610 + 13600 \frac{R}{D} \right) q + 353.18 \right) \times 10^{-3} \right] \times (1.3\gamma - 5456) - 1136.37 \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، K_{Sh} : سختی برشی قفل شدگی لایه های بالاست در حالت دینامیکی (در واحد مگانیوتن بر متر)، R : سرعت عبور قطار (در واحد کیلومتر بر ساعت)، D : قطر چرخ قطار (در واحد میلی متر)، q : بار محوری قطار (در واحد تن) و γ : وزن مخصوص لایه بالاست (در واحد تن بر مترمکعب) می باشند.

به منظور استفاده از پارامتر سختی برشی قفل شدگی لایه های بالاست برای مقاصد تحلیل مدل های اندرکنشی خط بالاستی با قطار و همچنین در طراحی روسازی بالاستی، در شکل (۱۰) مجموعه ای از گراف ها که بیان کننده تغییرات سختی برشی در برابر وزن مخصوص می باشد ارائه شده است. این گراف ها برای یک روسازی بالاستی متداول در شرایط واقعی

این دیاگرام نیروی عکس العمل بستر که به سمت بالا بوده است نادیده گرفته شده است زیرا برای بسیج شدن این نیرو نیاز به ایجاد تغییر شکل های بزرگ در توده بالاست می باشد در صورتیکه پدیده قفل شدگی در تغییر شکل های کوچک مقادیر قابل توجهی دارد. اگرچه در صورت وجود این نیرو بدلیل اینکه مقدار آن در مقایسه با سایر نیرو های اعمالی ناچیز است می توان از آن صرف نظر کرد.

برای توسعه یک مدل ریاضی جهت تعیین سختی برشی قفل شدگی لایه های بالاست، نتایج بدست آمده از آزمایش ها برای مدل واقعی خط توسعه داده شده است. در گام اول با توجه به نتایج آزمایش های گروه دوم و دیاگرام آزاد نیروها در شکل (۹)، با ضرب عدد ۰/۵ در رابطه (۳)، این رابطه به صورت رابطه (۶) بازنویسی شده است. علت این کار این بوده است که نتایج آزمایش ها برای برش یک طرفه بوده است. بعبارت دیگر می توان بیان کرد که در آزمایش ها فقط اثر نیروی برشی بین دو توده بالاست در نظر گرفته شده است در صورتیکه در شرایط واقعی (مطابق دیاگرام آزاد نیروها) یک برش دو طرفه بین توده های بالاست موجود است.

$$V = 0.5 \times (1.1458q + 155.33) \quad (۶)$$

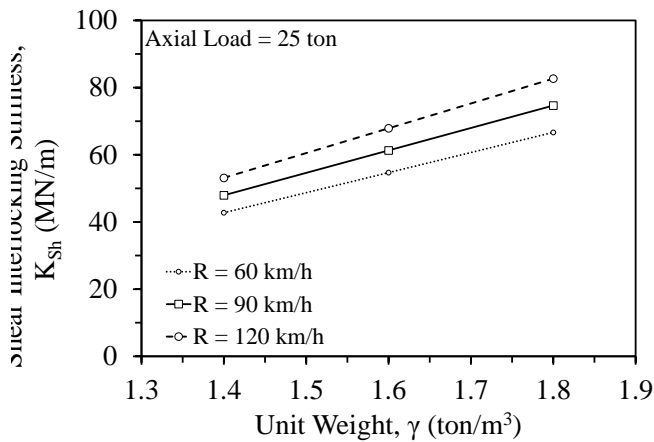
در گام بعدی بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش های گروه اول که نشان دهنده اثر دانسیته بر نیروی برشی بوده است ضریب بدست آمده از رابطه (۲) بر رابطه نیروی برشی (رابطه ۶) اعمال شده است و این رابطه به صورت رابطه (۷) در آمده است.

$$V = (1.3\gamma - 0.8654)(0.5729q + 77.655) \quad (۷)$$

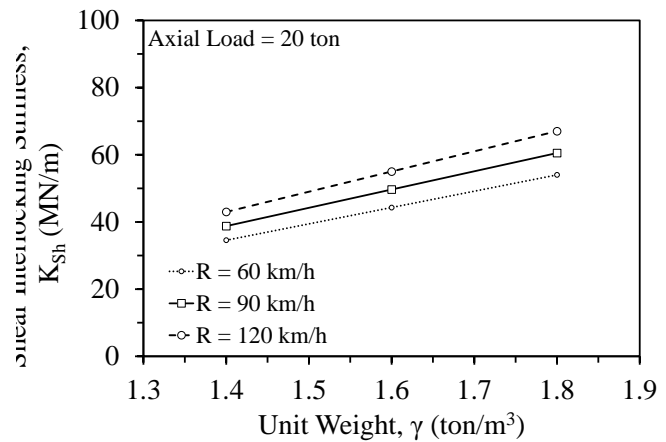
در رابطه (۷) متغیر q بیان کننده میزان سربار استاتیکی است اما چون هدف تخمین سختی برشی برای شرایط واقعی خط است و با توجه به اینکه بارگذاری در شرایط واقعی به صورت دینامیکی می باشد با اعمال یک ضریب دینامیکی، سربار استاتیکی به سربار دینامیکی تبدیل شده است. ضریب

ناوگان ۱۰۰۰ میلی‌متر و در سرعت‌های عبوری ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت ارائه شده است.

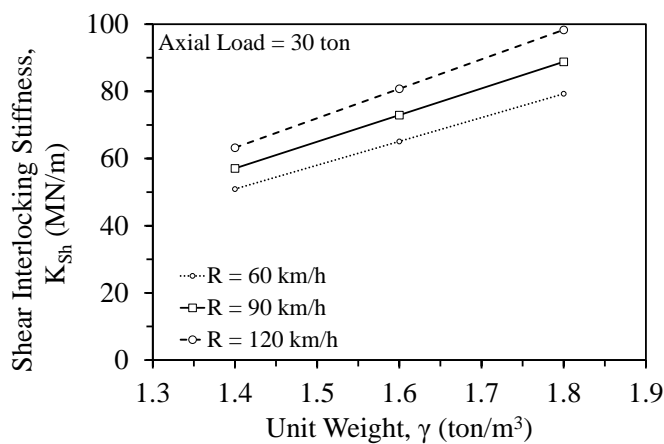
با فاصله مرکز به مرکز تراورس‌ها و ضخامت لایه بالاست به ترتیب ۶۰ و ۴۵ سانتی‌متر و همچنین برای شرایطی از خط با بار محوری ناوگان عبوری ۲۰، ۲۵ و ۳۰ تن با قطر چرخ



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۰. تغییرات سختی برشی قفل‌شدگی در برابر وزن مخصوص برای روسازی بالاستی؛ الف) بار محوری ۲۰ تن، ب) بار

محوری ۲۵ تن، ج) بار محوری ۳۰ تن

ارزیابی قرار گرفته است و در گروه دوم اثر سربار استاتیکی بر مقاومت و سختی برشی بررسی شده است.

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در قالب منحنی‌های نیروی برشی - تغییر مکان قائم، نیروی برشی - سربار استاتیکی و سختی برشی - نیروی برشی ترسیم شده است. به طور کلی نتایج آزمایش‌های گروه اول نشان دادند که اثر تراکم نسبی بر

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری پارامتر سختی برشی بالاست در ناحیه قفل‌شدگی توسعه داده شده است. برای این منظور با طراحی یک دستگاه برش قائم بالاست بزرگ مقیاس، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برشی بر یک نوع بالاست گرانیتمی تمیز و خشک صورت پذیرفته است. آزمایش‌های برشی در دو گروه انجام شده است. در گروه اول آزمایش‌ها اثر تراکم نسبی بر رفتار برشی بالاست مورد

مقاومت برشی مشهود می‌باشد ولی تأثیر آن بر سختی برشی ناچیز بوده است. با استفاده از نتایج آزمایش‌های گروه اول، ضریبی که اثر تراکم نسبی را به مقاومت برشی مرتبط می‌کند تعیین شد. همچنین در آزمایش‌های گروه دوم مشاهده شد که تغییرات سربار استاتیکی باعث تغییر سختی و مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌ها شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده در این آزمایش‌ها، مجموعه‌ای از روابط ریاضی بین سه پارامتر سختی برشی و نیروی برشی و سربار استاتیکی برقرار شد. سپس با استفاده از

منابع

- Timoshenko, S., 1926. Method of analysis of statical and dynamical stresses in rail. In Proc. Second Int. Congress of Appl. Mech., Zurich (pp. 12-17).
- Lackenby, J., Indraratna, B., McDowell, G., & Christie, D., 2007. Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading. *Géotechnique*, 57 (6) (2007) 527–536.
- Guoqing, J., Guixian, L., Yang, X., & Jiong, Z., 2014. Micro-analysis of sub-ballast direct shearing under normal stress. *Computer Model & New Technologies*, 18(2) 70-75.
- Wang, Z., Jing, G., Yu, Q. and Yin, H., 2015. Analysis of ballast direct shear tests by discrete element method under different normal stress. *Measurement*, 63, pp.17-24.
- Esveld, C., De Man, A., 2003. Use of railway track vibration behavior for design and maintenance. In IABSE Symposium Report (Vol. 87, No. 5, pp. 39-45). International Association for Bridge and Structural Engineering.
- Huan Feng, H., 2011. 3D-models of Railway Track for Dynamic Analysis. Stockholm.
- Zakeri, J. A., Xia, H., Fan, J. J., 2009. Dynamic responses of train-track system to single rail irregularity. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 6(2), 89-104.
- Ishida, M., Suzuki, T., 2005. Effect on track settlement of interaction excited by leading and trailing axles. *Quarterly Report of RTRI*, 46(1), pp.1-6.
- Ahlbeck, D. R., Meacham, H. C., & Prause, R. H., 1975. The development of analytical models for railroad track dynamics. In This article is extracted from Symposium on Railroad Track Mechanics, RRIS 01 130826, Publication 7602. The complete volume is \$3.75, Microfiche \$2.25. (No. 76-TR-1).
- Ripke, B., Knothe, K., 1995. Simulation of high frequency vehicle-track interactions. *Vehicle System Dynamics*, 24(sup1), 72-85.
- Oscarsson, J., Dahlberg, T., 1998. Dynamic train/track/ballast interaction-computer models and full-scale experiments. *Vehicle System Dynamics*, 29(S1), pp.73-84.
- Igeland, A., J. Oscarsson, J., 1997. Modelling of railway track for computer simulation of dynamic train/track interaction, in: Proceedings of 15th International Model Analysis Conference, pp. 464–470.
- Zhai, W. M., Wang, K. Y., Lin, J. H., 2004. Modelling and experiment of railway ballast vibrations. *Journal of sound and vibration*, 270(4), 673-683.
- Oscarsson, J., 1999. Dynamic Train/Track/Ballast Interaction—Linear and State-Dependent Track Models, Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg.
- ASTM C136-06, 2006. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, “Roadway and Ballast”.
- ASTM D4254-00, 2000. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4253-14, 2000. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, ASTM International, West Conshohocken, PA.

تجمع روابط ریاضی بدست آمده رابطه ریاضی دیگری بین سختی برشی و سربار استاتیکی بدست آمد. در گام بعدی با استفاده از مدل یک هرمی این روابط برای شرایط واقعی خط بالاستی توسعه داده شدند و در گام آخر یک مدل ریاضی چهار پارامتری که دربرگیرنده پارامترهایی نظیر وزن مخصوص لایه بالاست، بار محوری، سرعت و قطر چرخ ناوگان عبوری می‌باشد برای محاسبه سختی برشی قفل‌شدگی لایه‌های بالاست در شرایط دینامیکی توسعه داده شد.

American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA), 2006. Manual for Railway Engineering, Volume 1, Chapter 1.

