

## بررسی عددی رفتار استاتیکی و دینامیکی خاکریز های راه آهن ساخته شده با ژئوفوم

مرتضی اسماعیلی<sup>۱</sup> و ولی اله خلیلیان<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> بستر های رسی سست، ژئوفوم، خاکریز راه آهن، ظرفیت باربری، نشست، بارگذاری استاتیکی، بارگذاری دینامیکی.</p>	<p>یکی از مسائل مهم مرتبط با اجرای خطوط ریلی بر بستر های سست، مساله تامین ظرفیت باربری و کنترل نشست خاکریز متکی بر این بستر ها می باشد. عمده راهکار های ارائه شده برای حل این مشکل بر روشهای بهسازی خاک بستر از قبیل تراکم، تزریق، پیش بارگذاری، اجرای ستون های سنگی و سیمانی و ... متمرکز می باشند. از روشهای نوینی که در بخش ساخت خاکریز راه متکی بر بستر های سست بطور موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است می توان به بکارگیری مصالح سبک پلی استایرن یا ژئوفوم به جای خاک در خاکریز اشاره نمود. مرور ادبیات فنی نشان دهنده آنست که تا کنون تحقیق جامعی در خصوص امکان پذیری کاربرد این مصالح جهت ساخت خاکریز راه آهن متکی بر بستر های سست رسی صورت نگرفته است. لذا تحقیق حاضر با تمرکز بر دو شاخصه تاثیر گذار بر بهره برداری خط ریلی بالاستی اعم از باربری و نشست خاکریز صورت گرفته است. برای این منظور با توسعه مدل رفتاری سخت شونده خاص مصالح ژئوفوم در نرم افزار تفاضل محدود FLAC 2D به بررسی رفتار این مصالح در خاکریز راه آهن بالاستی تحت تاثیر مدل بارگذاری استاتیکی LM71 راه آهن و همچنین بارگذاری دینامیکی هارمونیک پرداخته شده و به عنوان خروجی های شاخص، پایداری خاکریز ها با ارتفاعات مختلف و همچنین میزان نشست آنها مورد بررسی قرار داده شده است. در عین حال با توجه به خروجی های بدست آمده از مدل عددی، با استفاده از رگرسیون چند متغیره، رابطه ای تحلیلی میان نشست استاتیکی و دینامیکی با پارامتر های شکل پذیری، چسبندگی بستر، پارامتر های شکل پذیری ژئوفوم، ارتفاع خاکریز و بار محور قطار برقرار شده است. در بخش پایانی با توجه به محدودیت موجود در نشست کلی خاکریز راه آهن، دامنه مجاز بکار گیری این مصالح در خاکریز استخراج شده است.</p>

### ۱- مقدمه

چالش ها بطور ویژه در ساخت خاکریزها بصورت عدم تامین باربری کافی و یا نشست قابل ملاحظه بروز و ظهور می یابد. راه حل های مختلفی جهت حل این مساله در ادبیات مهندسی ارائه گردیده است که عمده آنها مبتنی بر بهسازی و اصلاح شرایط خاک بستر بمنظور تامین باربری و کاهش نشست است. در این رابطه می توان به روشهایی همچون تراکم، تزریق، پیش بارگذاری، اجرای ستون های

یکی از چالش های مهم در ساخت خطوط ریلی جدید احداث این خطوط بر بسترهای سست می باشد. این

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: v.kh.iust@gmail.com

۱. استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران  
۲. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

باشد و لذا در این راستا پارامترهای متعددی مانند تنش، کرنش و رفتار خزشی این مصالح توسط بسیاری از محققین مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

تجربیات کشو رهای مختلف در خصوص به کارگیری این مصالح موید این موضوع است که هم از نظر کاهش جذب آب و هم به لحاظ مسائل مربوط به خوردگی در برابر تابش نور خورشید اجرای یک لایه پوشش خاکی قابل رفع است.



شکل ۱- لایه پوششی جهت محافظت از بلوکهای ژئوفوم

از نتایج آزمایشات انجام شده بر روی مصالح ژئوفومی چنین یافت می شود که رفتار تنش - کرنش این مصالح به عواملی همچون نحوه توزیع تنش، نرخ بارگذاری، درصد رطوبت و دمای محیط، از همه مهمتر اندازه نمونه ها و چگالی آن بستگی دارد. طبق تحقیقات انجام شده توسط Eriksson و Trank در سال ۱۹۹۱ برای نمونه های ژئوفومی با متوسط چگالی  $18 \text{ kg/m}^3$ ، مقاومت فشاری برای کرنشهای بزرگتر از ۰.۴٪ تأثیری در اندازه نمونه ها نداشته است [۲]. طی تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده در سال ۱۹۹۳ در ژاپن مشخص گردید که ضریب پواسون این مصالح تابعی از چگالی بوده و با افزایش چگالی افزایش می یابد [۳]. در سال ۱۹۹۵ میلادی Horvath بر اساس نتایج آزمایشات آزمایشگاهی رفتار تنش-کرنش مصالح ژئوفوم را به چهار بخش خطی و الاستیک، بخش پلاستیک با مقاومت فشاری تسلیم مشخص، بخش خطی و سخت شونده، بخش غیر خطی و سخت شونده تقسیم بندی نمود [۴]. نتایج آزمایش خزشی Sun در سال ۱۹۹۷ بر روی نمونه های مکعبی ۵۰ میلیمتری اثر تغییر شکل خزشی را برای سطح تنشی برابر با ۰.۳٪ مقاومت

سنگی و سیمانی و اجرای ریز شمع و ... اشاره نمود [۱]. از دیگر راه کارهایی که در دهه اخیر در بحث احداث خاکریز های راه توجه شایانی به آن شده است بکارگیری مصالح سبک و مقاوم بجای مصالح خاکی در بدنه باربر خاکریز می باشد که اصطلاحاً به آنها ژئوفوم<sup>۱</sup> گفته می شود. این مصالح پلیمرهایی با وزن بسیار سبک و در حدود یک درصد وزن مصالح خاکی هستند که دارای مقاومت کوتاه و درازمدت قابل توجهی بوده و در عین حال خود دارای میزان جمع شدگی یا نشست کوتاه و درازمدت ناچیزی می باشند. از عمده ترین انواع این مصالح میتوان به بلوک های قالبی شکل EPS<sup>۲</sup> اشاره کرد. آغاز استفاده از این مصالح به اوایل سال ۱۹۶۰ و بعنوان عایق حرارتی برمی گردد. اولین تاریخ و محل استفاده ژئوفوم بصورت خاکریز سبک مشخص نیست اما استفاده عمومی این مصالح از سال ۱۹۷۲ در یک پروژه جاده سازی در نروژ آغاز شده است. در عین حال استفاده از آن در ایالات متحده به سال ۱۹۸۰ برمی گردد. اولین استفاده از ژئوفوم بعنوان خاکریز سبک در ژاپن به سال ۱۹۸۵ مربوط می شود و این کشور در این زمینه تقریباً ۵۰ درصد از کل مصرف جهان را به خود اختصاص داده است. استفاده از مصالح خاکریز سبک ژئوفومی بمنظور ساخت خاکریز های جاده ای بعنوان یک گزینه برای اصلاح خاک بستر از سال ۱۹۹۰ میلادی به دلائل زیر مورد توجه بوده است:

الف- زمان کوتاه ساخت خاکریز های سبک نسبت به روشهای تثبیت بستر .

ب- کاهش نشست بستر و افزایش ظرفیت باربری آن در مقایسه با استفاده از مصالح دیگر برای ساخت خاکریزها.

کاهش هزینه های نگهداری روسازی بدلیل نشست کمتر از مهم ترین اهداف کاربرد مصالح ژئوفومی در ساخت خاکریز های راه یا راه آهن، کنترل نشست و افزایش ظرفیت باربری بستر با توجه به کاهش وزن ایجاد شده می

<sup>1</sup> Geofoam

<sup>2</sup> Expanded PolyStyrene

جدید بشمار می رود. از آنجا که تاکنون کاربرد مصالح سبک ژئوفومی در ساخت خاکریزهای راه آهن بطور جامع مطالعه نشده است لذا مقاله حاضر به امکان سنجی استفاده از این مصالح در خاکریزهای راه آهن متکی بر بسترهای رسی نرم تا متوسط از دیدگاه باربری و نشست با در نظر گرفتن معیارهای بهره برداری اختصاص داده شده است. در این تحقیق خاکریز ژئوفومی در ارتفاع های مختلفی برابر ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ متر مدلسازی و رفتار آنها تحت اثر بارگذاری استاتیکی و دینامیکی ریلی مطالعه شده است. بدین منظور بار محوری قطار در محدوده ۱۲۵ تا ۲۵۰ kN بر خاکریز یادشده اعمال و توزیع تنش - کرنش مجموعه خاکریز و بستر به روش عددی تفاضل محدود تحلیل گردیده است. هدف اساسی از این تحلیل ها بررسی پایداری خاکریزها با رویکرد ظرفیت باربری و در عین حال کنترل نشست آنها از دیده بهره برداری بوده است.

## ۲- مشخصات فنی - مهندسی ژئوفوم

ژئوفوم اصطلاحی است که در سالهای اخیر برای توصیف نوعی از مصالح مورد استفاده در حوزه مهندسی ژئوتکنیک وارد لغات مهندسی عمران گردیده است. مطابق شکل (۲) فرآیند ساخت این مصالح بدین صورت است که مواد خام پلی استایرن پس از اختلاط با یک عامل دمنده به دانه های منبسط شده تبدیل گردیده و این دانه های منبسط شده طی فرآیندی با توجه به نوع کاربردشان در صنعت با چگالی های و شکلهای مختلف تولید می شوند. چگالی ژئوفوم می تواند بعنوان یک شاخص اصلی در مسائل مربوطه به طراحی مطرح شود. مقاومت فشاری، برشی، پیچشی، خمشی، سختی، رفتار خزشی و دیگر خواص مکانیکی ژئوفوم وابسته به چگالی می باشد. چگالی ژئوفوم به مدت زمان باقی ماندن دانه ها در منبسط کننده تحت فشار بخار بستگی دارد.

فشاری ناچیز نشان داد [۵]. Duskov در سال ۱۹۹۷ مدول دینامیکی الاستیک  $E_{dyn}$ ، را برای نمونه های ژئوفومی با چگالی ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب محدوده ۴/۷ تا ۶/۱ MPa و برای چگالی ۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب محدوده ۸/۳ تا ۹/۳ MPa مشخص نمود [۶].

مطالعات آزمایشگاهی Athanasopoulos و همکاران در سال ۱۹۹۹ برای بررسی خواص دینامیکی ژئوفوم نشان داد که با افزایش چگالی ژئوفوم، مقدار مدول دینامیکی افزایش می یابد. همچنین در این آزمایشات مقدار ضریب میرایی این مصالح بین ۰/۵ تا ۲ درصد تعیین گردید. در عین حال نتایج بارگذاری دینامیکی نشان داد که فرکانس بارگذاری تاثیر زیادی بر مقادیر مدول دینامیکی ندارد [۷]. آزمایشات Elragi در سال ۲۰۰۰ نشان دهنده آن است که با افزایش چگالی، مدول یانگ افزایش یافته و رفتار نمونه های بزرگتر مقاومتر از نمونه های کوچکتر می باشد [۸].

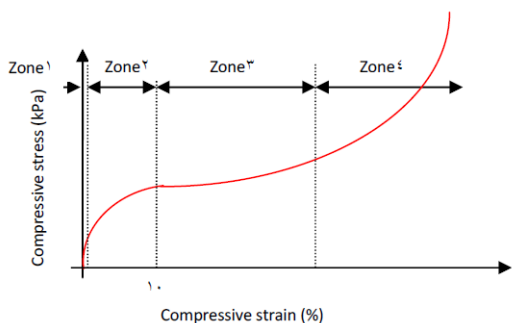
بخشی از مطالعات آزمایشگاهی به تعیین مقادیر مدول برای تیپ های مختلف ژئوفوم اختصاص یافته است. بطور مثال، محققین مقادیر مدول را برای ژئوفوم تیپ VIII مطابق استاندارد ASTM از نتایج آزمایشگاهی بر روی نمونه های کوچک در حدود ۵ MPa اندازه گیری کرده اند [۹] در حالیکه مدول برای همان نمونه ها اما در مقیاس بزرگتر مقداری بیشتر از ۱۴ MPa را نشان داده است [۸]. تعیین مدول ژئوفوم های دارای انحناء ناشی از ساخت، کار بسیار مشکلی است و لذا برای تعیین این مقدار باید از مطالعات آزمایشگاهی و نتایج آزمایشات میدانی بهره جست. در سال ۲۰۰۱ Negussey و همکاران، مدول ۲/۳ تا ۲/۷ MPa را برای منظور نمودن خیز اولیه ژئوفوم های دارای درز بین لایه ای<sup>۱</sup> در خاکریز پیشنهاد دادند [۱۰].

با توجه به امکان احداث خاکریزهای راه آهن بر بسترهای سست عدم باربری کافی اینگونه بسترها به همراه نشست زیاد آنها از مشکلات بالقوه ساخت و توسعه راه آهن های

<sup>1</sup> Gap Closure

۲-۱- رفتار آزمایشگاهی بلوک های ژئوفوم تحت بارگذاری استاتیکی

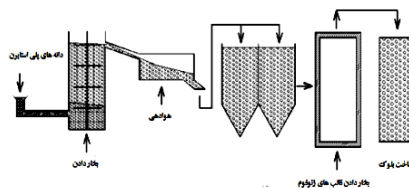
تنش های فشاری ناشی از وزن قطار تحت اثر بار محوری و سیستم روسازی راه آهن از مهمترین نیروهای وارد بر بلوک های ژئوفومی در خاکریزهای راه آهن است. تعیین فشاری را تحمل نماید مستلزم شناخت دقیق از مقاومت این مصالح تحت اثر بارهای اعمالی است. شکل (۳) نتایج آزمایشات بارگذاری سریع بر روی نمونه های مکعبی ۵۰mm از ژئوفوم به چگالی ۲۱ kg/m<sup>3</sup> را نشان می دهد.



شکل ۳- منحنی تنش- کرنش ژئوفوم با چگالی ۲۱ kg/m<sup>3</sup>

در این آزمایش رفتار تنش-کرنش این مصالح به چهار قسمت تقسیم می گردد: قسمت اول: بخش خطی و الاستیک بوده و قسمت دوم: بخشی است که مقاومت فشاری یا تنش جاری (تسلیم) نامیده می شود، قسمت سوم: بخش خطی و سخت شونده و قسمت چهارم که بخش غیر خطی و سخت شونده می باشد. بطور معمول در آزمایش مقاومت فشاری محدوده کرنش ۱۰٪ بعنوان مقاومت فشاری و مجاز این مصالح تعیین می شود [۴].

از اصلی ترین پارامترهایی که رابطه ای مستقیم با مقاومت فشاری این مصالح دارد مدول رفتاری بلوک های ژئوفوم می باشد از طرف دیگر تعیین مدول صحیح برای این مصالح تابع ابعاد و اندازه نمونه ها می باشد. شکل (۴) نتایج آزمایشگاهی Elragi را در سال ۲۰۰۰ برای مقادیر مدول اولیه دو سری از نمونه های ژئوفومی به ابعاد مکعبی ۵ و ۶۰ سانتیمتر با چگالی های مختلف را در شرایط یکسان بارگذاری نشان میدهد. نتایج بیانگر این مطلب



شکل ۲- پروسه ساخت ژئوفوم

بسته به تکنولوژی ساخت این مصالح در کشورهای مختلف و همچنین کاربرد آن در پروژه ها، چگالی، ابعاد و رنگ ژئوفوم می تواند متغیر باشد. چگالی قابل استفاده در کارهای عمرانی بین ۱۱ تا ۳۰ kg/m<sup>3</sup> متغیر می باشد. کشورهای مختلفی از جمله ایالات متحده، ژاپن و انگلستان از جمله پیشگامان استفاده از این محصول بوده و تحقیقات فراوانی را جهت استاندارد سازی آن انجام داده اند. جدول ۱ خواص مهندسی ژئوفوم را در کشورهای انگلستان [۱۲]، ژاپن [۱۳] و استانداردهای ASTM [۱۴] و AASHTO [۱۵] در ایالات متحده را نشان می دهد.

جدول ۱- خواص مهندسی ژئوفوم

Material Properties	Type	Density(Kg/m <sup>3</sup> )	Compressive resistance at yield or 10% deformation,(kPa)	C [۱°]	φ [۲°]	ν [۳°]
ASTM	XI	12	35	0.5*σ <sub>normal</sub>	27°-35°	0.0056 p + 0.0024
	I	15	69			
	VIII	18	90			
	II	22	104			
	IX	29	173			
AASHTO	EPS 40	16	40			
	EPS 50	20	50			
	EPS 70	24	70			
	EPS 100	32	100			
England	SD <sup>1</sup>	12	70			
	HD <sup>2</sup>	16	110			
	EHD <sup>3</sup>	20	150			
	UHD <sup>4</sup>	25	190			
Japan	D-12	12	39.2			
	D-16	16	68.6			
	D-20	20	98			
	D-25	25	137.2			
	D-30	30	172.8			

<sup>1</sup> Standard Duty

<sup>2</sup> Heavy Duty

<sup>3</sup> Extra Heavy Duty

<sup>4</sup> Ultra Heavy Duty

ژئوفوم تحت آزمایش های ستون تشدید و سه محوری بر روی دو نمونه از بلوکهای ژئوفومی با چگالی  $12/4$  و  $17/1 \text{ kg/m}^3$  حاکي از آنست که چگالی ژئوفوم نقش بسزایی در تعیین مقدار مدول دینامیکی دارد بطوریکه با افزایش چگالی ژئوفوم، مقدار مدول دینامیکی افزایش می یابد. مقدار مدول دینامیکی اولیه در این آزمایشات برای ژئوفوم به چگالی  $12/4 \text{ kg/m}^3$  برابر با  $1/2 \text{ MPa}$  و  $E_{dy} = 4/88 \text{ MPa}$  برای ژئوفوم به چگالی  $17/1 \text{ kg/m}^3$  برابر با  $1/2 \text{ MPa}$  و  $E_{dy} =$  اندازه گیری شده است. همچنین مقدار ضریب میرایی از آزمایشات ستون تشدید بین  $0/5$  تا  $2$  درصد تعیین گردید. نتایج آزمایشات نشان داد که فرکانس بارگذاری تاثیر زیادی در مقادیر مدول دینامیکی ندارد [۷].

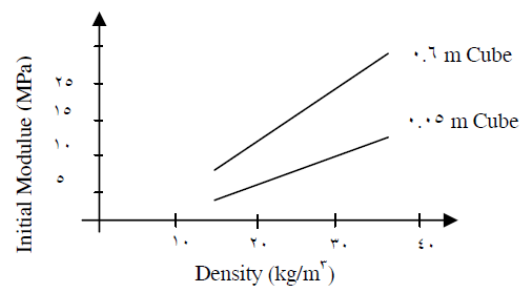
### ۳- امکان سنجی کاربرد ژئوفوم در خاکریز راه آهن

اصلی ترین امتیاز کاربرد ژئوفوم، سبکی وزن آن می باشد در عین حال بکارگیری این مصالح در خاکریزهای راه یا راه آهن می تواند ظرفیت باربری قابل توجهی ایجاد نموده و در عین حال نشست بستر را کاهش دهد. برای تعیین نوع ژئوفوم و طراحی صحیح در مرحله نخست باید شناخت و درک واقعی از اجزای خطوط ریلی وجود داشته باشد. با توجه به شکل (۵) خاکریز راه آهن ساخته شده با ژئوفوم از سه جزء اصلی، شامل سیستم روسازی (ریل، تراورس، بالاست و دال بتنی)، توده خاکریز (بلوکهای ژئوفوم) و سیستم پوشش خاکی تشکیل می گردد.



شکل ۵- خاکریز راه آهن ساخته شده با بلوک های ژئوفوم

است که نمونه های بزرگتر مقاوم تر از نمونه های کوچکتر می باشد.



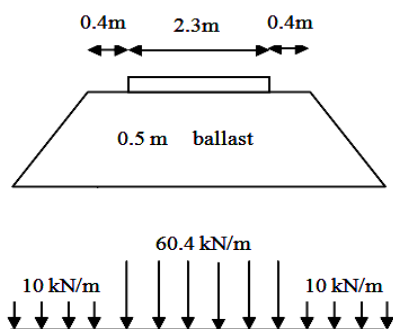
شکل ۴- آزمایشات Elragi بر روی دو نمونه مکعبی ژئوفوم [۴]

تعیین مدول بلوک های ژئوفومی در خاکریز می تواند از دو جنبه مورد بررسی قرار گیرد: یکی از جنبه ساخت این مصالح و دیگری رفتار واقعی ژئوفوم حاصل از نتایج آزمایشگاهی و میدانی. در فرآیند ساخت ژئوفوم پس از سیکل های سرما و گرما فوم ها در سطوح خود دچار کمی انحناء خواهند شد که با توجه با بکارگیری این بلوک ها در خاکریز باید تغییرات ناشی از این رواداری را در رفتار خاکریزها مورد بررسی قرار داد بنابراین هنگامیکه بلوک های انحناء دار در خاکریز قرار می گیرند یک خیز اولیه در خاکریز ناشی از بسته شدن درز بین بلوک ها بوجود می آید که پس از اعمال بارگذاری این درزهای بین دو بلوک به هم نزدیک و سپس بسته می شوند لذا باید اثر آن را در طراحی خاکریزهای ساخته شده با این مصالح مد نظر قرار داد.

### ۲-۲- رفتار آزمایشگاهی بلوک های ژئوفوم تحت بارگذاری دینامیکی

با بررسی نتایج حاصل از آزمایشات مختلف بر روی مصالح ژئوفومی چنین نتیجه می شود که رفتار تنش - کرنش این مصالح به عواملی همچون نحوه توزیع تنش، نرخ بارگذاری، درصد رطوبت و دمای محیط، از همه مهمتر اندازه نمونه ها و چگالی ژئوفوم وابسته است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی خواص دینامیکی

یکنواخت (q) بر روی بستر برای بارمحوری ۲۵۰ kN در شکل (۷) نشان داده شده است:



شکل ۷- هندسه خاکریز راه آهن یک خطه و بار گسترده یکنواخت

در مجموع بار گسترده ای q که بر روی خاکریز قرار می گیرد به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$q = \frac{250}{3.1 * 1.6} = 50.4 + 10 = 60.4 \text{ kN/m} \quad (1)$$

که در آن بار مرده ناشی از وزن بالاست برابر با  $10 \text{ kN/m}^2$  است که در عرض تقریبی ۵ متر روی خاکریز توزیع شده است و بارزنده ناشی از وزن قطار برابر با  $50/4 \text{ kN/m}^2$  که نظیر بار یکنواخت با عرض تقریبی ۳ متر در زیر ریل ها گردیده است.

در عین حال مقدار تنش در بالای خاکریز ژئوفومی از اعمال یک ضریب اطمینان ۲۰ درصدی برای بارگذاری های موقتی برآورد می گردد [۱۵]. پس از تعیین تنش، بلوک مورد نیاز در بدنه باربر خاکریز راه آهن مطابق با استاندارد ASTM C 578 بصورت ارائه شده در جدول (۱) قابل تعیین خواهد بود.

### ۳-۲- روند تعیین نوع ژئوفوم در عمق خاکریز

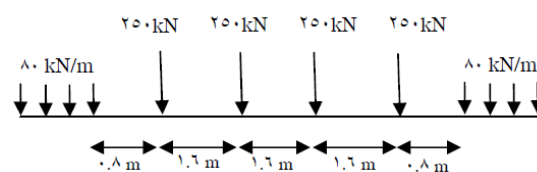
تنش کلی در هر عمق خاکریز از مجموع سه تنش ناشی از سربار ترافیکی، وزن روسازی و همچنین وزن بلوک های ژئوفومی بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$\sigma_z = \sigma_{z, \text{traffic}} + \Delta\sigma_{z, \text{DL}} + (Z^* \gamma_{\text{EPS}}) \quad (2)$$

از آنجائیکه در خاکریزهای راه آهن اصلی ترین نیروی تعیین کننده در قالب تنش های فشاری ظهور پیدا می کنند ژئوفوم باید طوری طراحی گردد که جوابگوی فشارهای وارده ناشی از سربار در بالای خاکریز و بارهای عبوری قطار را ضمن تامین معیار های بهره برداری داشته باشند. با توجه به آن که تنش سطحی اعمالی مطابق رابطه بوسینسک با عمق کاهش می یابد در روند تحقیق حاضر با تبعیت از همین موضوع کیفیت و نوع بلوک های ژئوفومی در عمق خاکریز بسته به میزان بار اعمالی از طرف محور قطار انتخاب گردیده است. جزئیات این موضوع در ادامه تشریح می گردد.

### ۳-۱- روند تعیین نوع ژئوفوم در بالای خاکریز

برای تعیین میزان تنش اعمالی بر بلوک ژئوفوم که تابع شرایط بارگذاری است در ابتداء الگوی بارگذاری طولی استاندارد خط ریلی LM71<sup>۱</sup> [۱۶] بصورت نشان داده شده در شکل (۶) معرفی گردیده است. به منظور اعمال بار های محور مختلف بر خاکریز خط ریلی، مقادیر الگوی بار گذاری متناسباً برای مقادیر بار محور ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۲۵ و ۲۵۰ کیلو نیوتن تعبیر داده شده است.



شکل ۶- مشخصات مدل بارگذاری LM 71

از آنجا که کنترل پایداری خاکریز و تحلیل های عددی مورد نظر در حالت کرنش صفحه ای صورت خواهد گرفت لذا در ادامه توزیع بار قطار در جهت عرضی تعیین شده است. با توجه به هندسه خاکریز راه آهن یک خطه و توزیع تنش در بالاست به نسبت ۲:۱ [۱۶]، بار گسترده

<sup>1</sup> Load Model 71

$$\Delta\sigma_{Z,DL}=(q/\pi)(\alpha+\sin\alpha); \alpha = 2 \text{ arc tg } (b/z) \quad (۴)$$

که در آن:

$q$  = شدت بار گسترده یکنواخت روسازی؛  $\Delta\sigma_{Z,DL}$  = تنش ناشی از روسازی در عمق مورد نظر؛  $b$  = نصف عرض سیستم روسازی؛  $Z$  = عمق مورد نظر می باشد. با توجه به مقادیر تنش کلی ناشی از وزن روسازی و بار ترافیکی نوع ژئوفوم قابل استفاده در اعماق خاکریز مورد بررسی قرار گرفته و مطابق جدول (۲) استخراج گردیده است. لازم بذکر است که در این انتخاب استاندارد ASTM ملاک عمل بوده است.

برای برآورد تنش ترافیکی در عمق خاکریز رابطه توزیع تنش  $2V : 1H$  بصورت زیر استفاده می گردد:

$$\sigma_{Z,traffic} = \frac{Q}{(B+Z)(L+Z)} \quad (۳)$$

در این رابطه :

$\sigma_{Z,traffic}$  = تنش ترافیکی قطار؛  $Q$  = بار محوری قطار؛  $B, L$  = عرض و طول بارگذاری؛  $Z$  = عمق خاکریز  
در ادامه برای محاسبه تنش ناشی از وزن روسازی در عمق خاکریز از رابطه بوسینسک بصورت ارائه شده در زیر استفاده می گردد:

جدول ۲- نوع انتخاب ژئوفوم تیپ استاندارد ASTM بر اساس مقادیر تنش کل اعمالی روی لایه های مختلف خاکریز

۲۵۰	۲۲۵	۲۰۰	۱۷۵	۱۵۰	۱۲۵	P(kN)	
تنش های ناشی از بارهای محوری راه آهن و سیستم روسازی در عمق خاکریز (kPa)						Z(m)	H(m)
۷۲/۴۸	۶۶/۴۳	۶۰/۳۸	۵۴/۳۳	۴۸/۲۹	۴۲/۲۴	۲/۵-۰	بالای خاکریز
VIII	I	I	I	I	I		
۶۳/۵۷	۵۸/۳۰	۵۳/۰۳	۴۷/۷۶	۴۲/۵۰	۳۷/۲۳	۵-۲/۵	عمق خاکریز
I	I	I	I	I	XI		
۴۶/۲۰	۴۲/۴۱	۳۸/۶۳	۳۴/۸۵	۳۱/۰۷	۲۷/۲۹	۷/۵-۵	
I	I	XI	XI	XI	XI		
۳۴/۸۲	۳۲/۰۲	۲۹/۲۳	۲۶/۴۴	۲۳/۶۴	۲۰/۸۵	۱۰-۷/۵	
XI	XI	XI	XI	XI	XI		
۲۷/۹۵	۲۵/۷۶	۲۳/۵۸	۲۱/۴۰	۱۹/۲۲	۱۷/۰۴	۱۲/۵-۱۰	
XI	XI	XI	XI	XI	XI		

متشکل از مصالح چسبیده در محدوده ۱:۱/۵ تا ۱:۲ توصیه شده است [۱۸]. لذا در بخش حاضر همین اعداد ملاک اولیه بررسی پایداری شیروانی قرار گرفته است. در روند تحلیل پایداری در گام نخست هندسه خاکریز با شیب ۱:۱/۵ برای خاکریز هایی به ارتفاع ۲/۵ تا ۱۲/۵ متر و با استفاده از تیپ بندی صورت گرفته برای ژئوفوم در جدول (۲) در ارتفاع خاکریز در نظر گرفته شد و پایداری خاکریزها بر روی بسترهای رسی با مقاومت زهکشی نشده در محدوده ۲۰ تا ۶۰ کیلو نیوتن در نرم افزار مدلسازی شده و ضرائب اطمینان های مورد نظر کنترل گردید.

۳-۳- تعیین شیب پایدار خاکریز راه آهن ساخته شده با بلوک های ژئوفوم

با توجه به لزوم تعیین هندسه خاکریز جهت انجام تحلیل های عددی باربری و نشست در بخش های بعد، در این بخش با استفاده از نرم افزار FLAC/SLOPE [۱۷] تحلیل پایداری خاکریز های راه آهن تحت اثر الگوی بارگذاری عرضی ارائه شده در بخش قبل صورت گرفته است. مطابق نشریه ۳۹۴ دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن سریع السیر، شیب خاکریزهای راه آهن متشکل از مصالح دانه ای برابر ۱:۱/۵ و برای خاکریزهای

انتخاب گردیده است [۳]. زاویه اصطکاک داخلی برای بستر رسی با مقاومت زهکشی نشده ۲۰ تا ۶۰ kPa بصورت حداقل ( $\phi=1$ ) منظور گردیده است. رفتار مصالح خاکریز و بستر رسی با استفاده از مدل رفتاری موهر کلمب معرفی گردیده است.

جدول ۳ پارامترهای ورودی در نرم افزار FLAC/SLOPE را برای خاکریز و بستر رسی نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود محدوده زاویه اصطکاک داخلی برای مصالح ژئوفومی بین ۲۷ تا ۳۵ درجه متغیر می باشد که در این تحقیق مقدار ۳۰ درجه

جدول ۳- پارامترهای ورودی در نرم افزار FLAC/SLOPE

رفتار مصالح	چسبندگی C (kN/m <sup>2</sup> )	زاویه اصطکاک ( $\phi$ ) (درجه)	وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )	مشخصات مصالح	
موهر کلمب	۲۵	۳۰	۰/۱۲	XI	خاکریز
			۰/۱۵	I	
			۰/۱۸	VIII	
موهر کلمب	۶۰-۲۰	۱	۱۷	بستر	

#### ۴- تحلیل عددی باربری و نشست خاکریز ژئوفومی تحت بارگذاری استاتیکی راه آهن

در این بخش با توجه به شیب و نوع بلوک ژئوفومی تعیین شده برای بکارگیری در خاکریزهای راه آهن با ارتفاع ۲/۵ تا ۱۲/۵ متر، رفتار باربری نشست این خاکریزها برای بارهای محوری راه آهن از ۱۲۵ ، ۱۵۰ ، ۱۷۵ ، ۲۰۰ ، ۲۲۵ و ۲۵۰ کیلو نیوتن در شرایط بستر رسی با مقاومت زهکشی نشده ۲۰ ، ۲۵ ، ۳۰ ، ۳۵ ، ۴۰ ، ۴۵ ، ۵۰ ، ۵۵ و ۶۰ کیلو پاسکال توسط نرم افزار تفاضل محدود FLAC2D مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه جزئیات تحلیل عددی در شرایط بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار داده می شود.

##### ۴-۱- هندسه مدل، المان بندی و شرایط مرزی

با عنایت به نتایج بدست آمده در بخش سه، در روند مدلسازی عددی هندسه خاکریزهای ژئوفومی به ارتفاع ۲/۵ تا ۱۲/۵ متر با شیب ۱/۵: ۱ به همراه بستر مورد

در این تحلیل سه کنترل پایداری متناظر با وزن خاکریز، وزن با بار بهره برداری و همچنین شرایط اعمال زلزله مد نظر قرار داده شده است. ضرائب اطمینان مجاز متناظر با هر یک از حالات یاد شده بترتیب برابر ۱/۵ ، ۱/۳ و ۱/۱ می باشد [۱۸]. نتایج حاصل از تحلیل پایداری در دو حالت اول مناسبترین شیب خاکریز ۱:۱/۵ را نشان میدهد.

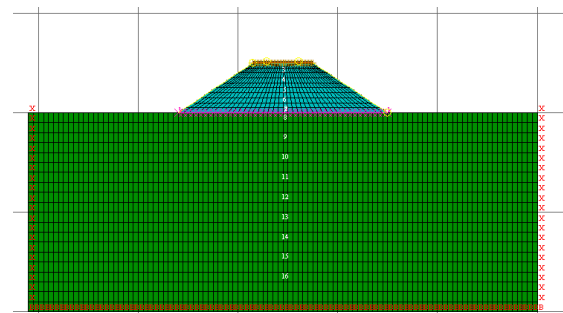
در ادامه شیب خاکریز حاصل از پایداری تحت اثر بار وزن و با بهره برداری برای شرایط لرزه ای تحت ضرائب زلزله افقی در محدوده ۰/۵ تا ۰/۵ در شرایط مختلف بستر متغیری از ۲۰ تا ۶۰ kPa مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج میتوان گفت که پایداری نهایی برای خاکریزهایی با ارتفاع ۲/۵ تا ۱۲/۵ متر، شیب ۱:۱/۵ بعنوان شیب پایدار خاکریزهای ژئوفومی در محدوده ضریب زلزله افقی ۰/۲ نشان داده شده است و برای ضریب زلزله بزرگتر پایداری شیب ۱: ۱/۵ شدیداً تابع شرایط مقاومت زهکشی نشده بستر می باشد.



## ۴-۲- خواص مصالح و مدل های رفتاری

در روند مدلسازی، مشخصات مکانیکی مصالح مختلف اعم از روسازی بتنی، خاکریز ژئوفومی و همچنین بستر به نواحی مختلف اختصاص داده می شود. پارامترهای ژئومکانیکی خاکریز و دال بتنی شامل چگالی مصالح، مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به همراه مدل رفتاری آنها در FLAC به نواحی ساخته شده اعمال گردیده است. پارامترهای مکانیکی انواع مختلف ژئوفوم در جدول (۱) ارائه گردیده است. همچنین مقادیر مدول از کارهای آزمایشگاهی Elragi برای نمونه ها به ابعاد مکعبی ۶۰ Cm بصورت ارائه شده در شکل (۳) استفاده گردیده است [۸]. مشخصات دال بتنی و بستر و همچنین مدل های رفتاری آنها در جدول (۴) ارائه گردیده است.

تحلیل قرار گرفته اند. ابعاد عرضی و ارتفاعی مدل به نوعی انتخاب شده اند که اضافه تنش ناشی از بارگذاری و وزن خاکریز در حد قابل قبول باشد. شکل (۸) ابعاد مدل و بستر را برای خاکریزی به ارتفاع ۵ متری نشان می دهد. ابعاد المان مورد استفاده در تحلیل برابر ۰/۵ در ۱ متر برای بستر و خاکریز انتخاب شده است. شرایط مرزی اعمال شده بر مرزهای مدل در جهات X و Y شرایط مرزی استاندارد ژئواستاتیکی است.



شکل ۸- شبکه تفاضل محدود برای خاکریز ارتفاع ۵ متر

جدول ۴- پارامترهای ژئومکانیکی روسازی خط و بستر خاکریز مورد استفاده در تحلیل عددی

مشخصات مصالح	چسبندگی C (kPa)	زاویه اصطکاک $\phi$	وزن مخصوص $\gamma$ (Kg/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون $\nu$	مدول حجمی K (MPa)	مدول برشی G (MPa)	مدول یانگ E (MPa)	مدل رفتاری مصالح
دال بتنی	۲۵۰۰۰	۲۵	۲۴۰۰	۰/۱۸	۱۵۶۲۵	۱۲۷۱۲	۳۰۰۰۰	موهر کولمب
خاکریز	۲۵	۳۰	۱۸	۰/۱۰۳	۳/۷۸۰	۴/۰۷۹	۹	الاستیک سخت شونده
					۱/۱۳۴	۱/۲۲۴	۲/۷	
					۲/۶۱۹	۲/۹۹۱	۶/۵	
					۱/۰۸۸	۱/۲۴۲	۲/۷	
					۱/۵۴۸	۱/۸۶۹	۴	
XI			۱۲	۰/۰۶۹	۱/۰۴۵	۱/۲۶۲	۲/۷	
بستر	۲۰	۱	۱۷۰۰	۰/۴	۱۶/۶۷	۳/۵۷	500 * C <sub>U</sub>	موهر کولمب
	۲۵				۲۰/۸۴			
	۳۰				۲۵			
	۳۵				۲۹/۱۷			
	۴۰				۳۳/۳۴			
	۴۵				۳۷/۵			
	۵۰				۴۱/۶۷			
	۵۵				۴۵/۸۴			
	۶۰				۵۰			

I، VIII، و ۶/۵ MPa و ۴ MPa متناظر با ژئوفوم های تیپ I، VIII، و XI در نظر گرفته شده است [۱۱].

#### ۴-۴- مدل بارگذاری

همانگونه که در رابطه (۱) بخش ۳-۱ مطرح گردید مدل بارگذاری LM71 برای قطار با بار محوری ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلو نیوتن با توزیع بصورت عرضی ملاک استفاده قرار گرفته است.

#### ۴-۵- اعتبار سنجی تحلیل عددی

از آنجائیکه کار مشابهی در حوزه مهندسی راه آهن با استفاده از بلوک های ژئوفومی صورت نگرفته است از نتایج تحلیل عددی پروژه راه Salt Lake City [۱۱] که در آن از بلوک های ژئوفومی EPS برای ساخت خاکریز استفاده گردیده بهره گرفته شده است. پس از ایجاد مدل خاکریز و اختصاص مواد مصالح بهمراه مدل رفتاری و همچنین اعمال شرایط مرزی در نهایت همخوانی کامل خروجی های تحلیل عددی با مقادیر ارائه شده در مقاله، صحت استفاده از اجرای نرم افزار مورد تایید قرار گرفت.

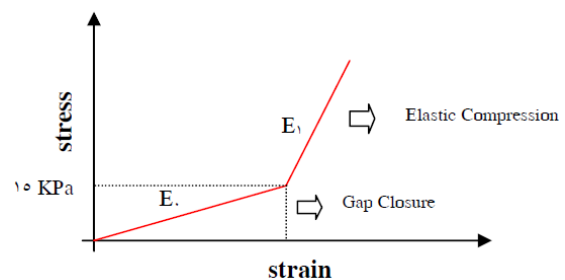
#### ۴-۶- بررسی نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی

در روند تحلیل ابتدا وزن سیستم روسازی و خاکریز فعال و در ادامه بار گسترده ناشی از سربار راه آهن بر آن اعمال شده است. در این بخش با توجه به تنوع پارامترهای بستر و ژئوفوم و بارگذاری ۲۷۰ مدل عددی تهیه و تحلیل گردیده است. نتایج تحلیل عددی بصورت نشست تاج خاکریز در برابر مدول میانگین خاکریز ژئوفومی برای بارگذاری های مختلف ترسیم گردیده است. با توجه به اینکه در عمده خاکریز های مورد بررسی از چند تیپ بلوک استفاده شده است مدول متوسط ( $E_{ave \text{ geofoam}}$ ) هر خاکریز از رابطه (۶) تعیین گردیده است.

مدل رفتاری برای مصالح بستر بصورت مدل رفتاری موهر کولمب در نظر گرفته شده است. برای تعیین مدول یانگ این مصالح از رابطه پیشنهادی اسکمپتون [۱۹] بصورت  $E_{st}=500 \cdot C_U$  برای یک بستر رسی با وزن مخصوص  $1700 \text{ Kg/m}^3$  و مقاومت برشی زهکشی نشده ۲۰ تا  $60 \text{ kPa}$  به بستر اختصاص داده شده است. محدوده مقاومت زهکشی نشده مورد مطالعه در تحقیق حاضر در برگیرنده رس های بسیار نرم تا نسبتا سخت می باشد.

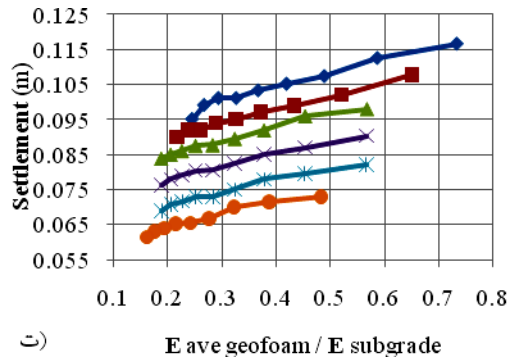
#### ۴-۳- تعریف مدل رفتاری بلوک های ژئوفومی در خاکریزها

یکی از نکات اساسی در مدلسازی عددی ژئوفوم انتخاب مدل رفتاری مناسب برای این مصالح است. مطابق مطالب ارائه شده در بخش (۲-۱) و همچنین تحقیقات صورت گرفته توسط Newman و همکاران [۱۱] مدول اولیه ژئوفوم  $E_0$  بین  $1/7$  تا  $2/7$  مگاپاسکال و در بخش دوم مدول بدست آمده از رفتار واقعی  $E_1$  در مدلسازی لحاظ گردیده است. بطور معمول بلوک های ژئوفومی در دو مرحله تحت تاثیر بار خواهند بود. در مرحله اول درز بین بلوک ها بسته شده و در مرحله دوم تنش توسط بلوک ها تحمل می گردد. از اینرو در نرم افزار FLAC مدل رفتاری بصورت دو خطی و مطابق شکل (۹) تعریف گردیده است.



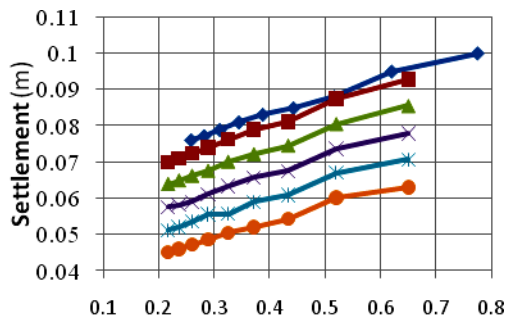
شکل ۹- مدول الاستیک بصورت دو خطی برای بیان رفتار بلوک های ژئوفومی در خاکریز راه آهن

برای این منظور از برنامه نویسی به زبان FISH استفاده شده است بصورتی که تا تنش عمودی  $15 \text{ kPa}$  مدول برابر  $2/7 \text{ MPa}$  و برای بیش از آن مقدار مدول  $9 \text{ MPa}$ ،



ت)

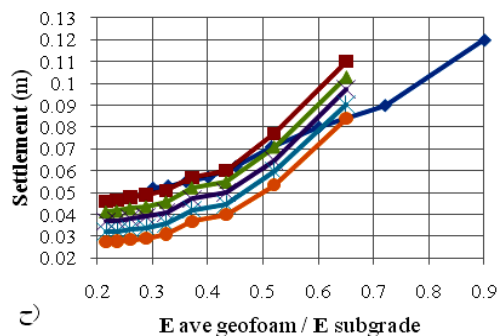
H=5 m



ج)

E ave geofoam / E subgrade

H=2.5 m



ح)

E ave geofoam / E subgrade



شکل ۱۰- نشست خاکریز ژئوفومی تحت اثر بارهای استاتیکی راه آهن

این نتایج نشان دهنده آن است که مقدار نشست استاتیکی خاکریز ژئوفومی با افزایش مقاومت زهکشی نشده بستر کاهش می یابد بطوریکه بیشترین مقدار نشست برای خاکریزها با مقاومت زهکشی نشده ۲۰ کیلو پاسکال و کمترین مقدار نشست استاتیکی برای خاکریز با مقاومت ۶۰ کیلو پاسکال خواهد بود که این مقدار بعنوان مثال برای خاکریز ارتفاع ۱۲/۵ متر (شکل ۹-الف) با بار

$$E_{ave} = \frac{\sum E_{geofoam,i} * h_i}{\sum h_i} \quad (5)$$

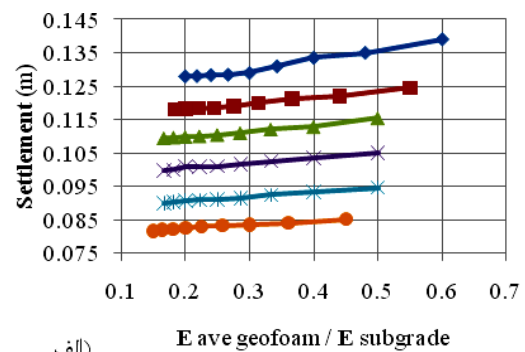
که در آن:

$E_{Geofoam,i}$  = مدول تیپ های مختلف ژئوفوم

$h_i$  = ارتفاع لایه های ژئوفوم می باشد.

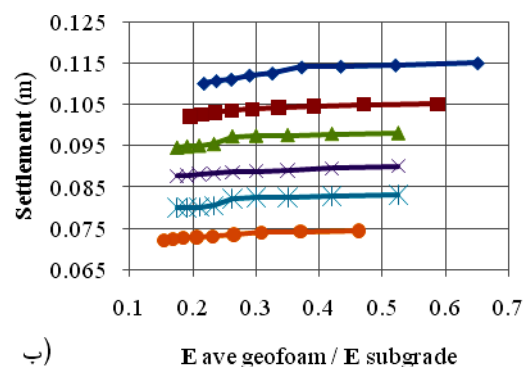
در ادامه برای تبیین نتایج از مقدار نسبی  $E_{ave} / E_{sub}$  استفاده شده است. از آنجائیکه مقدار  $E_{ave}$  بسته به نوع بار اعمالی راه آهن و همچنین ارتفاع خاکریز و در عین حال مقاومت زهکشی نشده بستر متفاوت است در نتایج بدست آمده دامنه تغییرات  $E_{ave} / E_{sub}$  بین ۰/۱ تا ۰/۹ متغیر می باشد. در این شرایط نتایج تغییرات نشست بر حسب مدول بی بعد شده در شکل (۱۰) برای ارتفاع های مختلف خاکریز و بارگذاری های مختلف ملاحظه می گردد.

H=12.5 m



الف)

H=10 m



ب)

E ave geofoam / E subgrade

H=7.5 m

#### ۴-۸- استخراج روابط تحلیلی جهت تعیین نشست

##### خاکریز ژئوفومی تحت تاثیر استاتیکی راه آهن

با توجه به مقادیر بدست آمده برای نشست خاکریز راه آهن تحت تاثیر بارگذاری استاتیکی و وابستگی آن به مقدار بار محوری، چسبندگی و مدول الاستیسیته بستر و همچنین مدول الاستیسیته ژئوفوم در این بخش با استفاده از رگرسیون چند متغیره اقدام به استخراج رابطه ای تحلیلی میان این پارامترها گردیده است. برای این منظور از روش حداقل مجموع مربعات استفاده شده است. در استخراج رابطه تحلیلی جهت محاسبه مقدار نشست با توجه به روش حل حداقل مربعات رابطه بین پارامترهای مختلف به شکل زیر تعریف می گردد:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3) \quad (6)$$

$$Y = \alpha \cdot X_1^\beta \cdot X_2^\gamma \cdot X_3^\eta \quad (7)$$

با توجه به توضیحات فوق،  $X_1 = (P/250)$ ،  $X_2 = H$ ،  $X_3 = E_{ave} / E_{sub}$  می باشد در این رابطه  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$  و  $\eta$  مجهولات و  $X_1$ ،  $X_2$ ،  $X_3$ ،  $Y$  پارامترهای مسئله هستند. پس از انجام مراحل مربوط به روش حداقل مربعات رابطه مقدار نشست خاکریز ژئوفومی در حالت استاتیکی ناشی از وزن قطار و روسازی و همچنین وزن خاکریز بدست آمده است:

$$S_{st} = \alpha \cdot (P/250)^\beta \cdot H^\gamma \cdot (E_G/E_{sub})^\eta \quad (8)$$

$$\alpha = 0.046, \beta = 0.582, \gamma = 0.52, \eta = 0.25$$

$S_{st}$  = نشست خاکریز ژئوفومی در حالت استاتیکی  
بر حسب متر؛  $P$  = بار محوری قطار بر حسب کیلونیوتن؛  
 $H$  = ارتفاع خاکریز ژئوفومی بر حسب متر؛  $E_{geofoam}$   
= مدول الاستیک ژئوفوم بر حسب پاسکال؛  $E_{sub}$  = مدول الاستیک بستر بر حسب پاسکال.

با محاسبه میزان دقت نتایج بدست آمده، مقدار این دقت در روش حداقل مربعات برابر ۰/۹۹ بدست آمده است که از دیدگاه تحلیلی رابطه ای مناسب و کاربردی به شمار می رود.

محوری ۲۵۰ کیلو نیوتن و مقاومت زهکشی نشده از ۲۰ به ۶۰ کیلو پاسکال بترتیب از ۱۳/۹ سانتی متر به ۱۲/۷ سانتی متر کاهش پیدا می کند. از سوی دیگر علاوه بر کاهش مقدار نشست با افزایش مقاومت بستر، این مقدار با کاهش بار محوری قطار از ۲۵۰ به ۱۲۵ کیلو نیوتن نیز روند نزولی را طی می نماید بطوریکه با توجه به شکل (۹-الف) مقدار نشست استاتیکی برای خاکریز راه آهن ژئوفومی ارتفاع ۱۲/۵ متر تحت بار محوری ۲۵۰ کیلو نیوتن و در یک بستر با مقاومت زهکشی نشده ۳۰ کیلو پاسکال برابر ۱۲/۹ سانتی متر و این مقدار برای همان بستر با بار محوری ۱۲۵ کیلو نیوتن برابر با ۸/۳ سانتی متر خواهد بود. همچنین از گرافهای شکل ۹-الف تا ۹-ح ملاحظه می شود که مقدار نشست استاتیکی خاکریزهای راه آهن ژئوفومی علاوه بر افزایش مقاومت بستر و کاهش بار محوری نیز با کاهش ارتفاع روندی نزولی را طی می نماید.

#### ۴-۷- دامنه کاربرد ژئوفوم در خاکریز از دیدگاه

##### نشست مجاز

مطابق نشریه ۳۹۴ دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن سریع السیر، مقدار نشست کل در سیستم روسازی بالاستی در سرعت های طرح ۱۶۰ و ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت به ترتیب به مقادیر ۲۰ و ۱۵ سانتی متر محدود می گردد [۱۸]. بیشترین مقدار نشست خاکریز ژئوفومی در حالت بارگذاری استاتیکی برابر مقدار ۱۳/۹ سانتی متر برای خاکریزی به ارتفاع ۱۲/۵ متر، تحت بار محوری ۲۵۰ کیلو نیوتن و واقع بر بستری با مقاومت زهکشی نشده ۲۰ کیلو پاسکال می باشد بنابراین مقدار نشست ماکزیمم تحت اثر بار محوری و وزن خاکریز در بدترین حالت نشان دهنده آن است که نشست خاکریز راه آهن ژئوفومی برای حالت بارگذاری استاتیکی در محدوده مجاز می باشد.

میرایی محلی<sup>۲</sup> در مدل منظور شده است. از آنجائیکه مدول بستر برای حالت استاتیکی طبق رابطه اسکمپتون برابر با  $C_U = 500$ ،  $E_{st}$  انتخاب شده است و مدول خاک در شرایط دینامیکی  $1/5$  تا  $2$  برابر شرایط استاتیکی است لذا در روند تحلیل حاضر مدول دینامیکی بستر  $E_{dy} = 1.5 E_{st}$  در محاسبات منظور گردیده است [۲۰].

جدول ۶ - پارامترهای دینامیکی بستر در FLAC

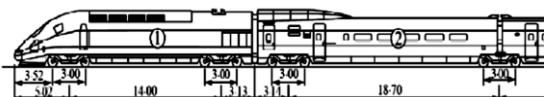
مدل رفتاری مصالح	$E_{dy}$ (MPa)	پواسون $\nu$	وزن مخصوص $\gamma$ ( $Kg/m^3$ )	زاویه اصطکاک $\phi$	چسبندگی C (kPa)
موهر کلمب	$1.5 * E_{st}$	۰/۴	۱۷۰۰	۱	۶۰-۲۰

### ۵-۳- مدل بارگذاری

بارگذاری دینامیکی در این حالت متناظر با قطار Thalys نشان داده شده در شکل (۱۱) در نظر گرفته شده است. با توجه به سرعت بالای قطار سریع السیر می توان به جای اعمال بار محور های قطار بر سرعت بر خط از یک بار هارمونیک معادل برای این منظور استفاده نمود. لگوی بارگذاری برای این قطار بصورت هارمونیک بوده و مطابق رابطه (۹) ارائه گردیده است [۲۰]:

$$F = P (1 - \cos 2 \pi f t) \quad (9)$$

در این رابطه  $P$  بار چرخ و  $f$  فرکانس اعمال بار چرخ و  $t$  نیز زمان اعمال بار می باشد. به طول معمول فرکانس بارگذاری توسط هر چرخ برابر حاصل تقسیم سرعت بر طول محور تا محور بوژی ها در نظر گرفته می شود.



شکل ۱۱ - شماتیکی از قطار Thalys

### ۵- تحلیل عددی بارگذاری دینامیکی ناشی از عبور قطار

در این بخش، رفتار باربری نشست خاکریزهای ارتفاع  $2/5$  تا  $12/5$  متر برای بارهای محوری راه آهن  $150$ ،  $200$  و  $250$  kN بصورت واقع شده در یک بستری با مقاومت برشی زهکشی نشده ای از  $20$ ،  $30$ ،  $40$ ،  $50$  و  $60$  توسط نرم افزار عددی تفاضل محدود FLAC مورد بررسی قرار گرفته و در پایان رابطه تحلیل عددی با استفاده از روش حداقل مربعات جهت تعیین مقدار نشست تحت اثر بارهای دینامیکی استخراج گردیده است. همانند قبل پس از ایجاد ساخت نواحی و اختصاص مصالح بهمراه مدل های رفتاری آنان خاکریزها تحت بارگذاری متمرکز بصورت تابعی از بار هارمونیک قرار گرفته و مقدار نشست خاکریز ژئوفومی تحت بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار داده شده است.

### ۵-۱- هندسه مدل، المان بندی و شرایط مرزی

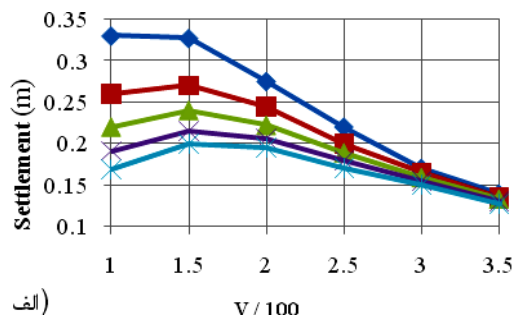
در روند مدلسازی عددی هندسه خاکریزهای ژئوفومی با ارتفاع  $2/5$  تا  $12/5$  متر و شیب  $1/5$ : $1$  به همراه بستر در نرم افزار با ساخت نواحی ایجاد گردید. ابعاد عرضی و ارتفاع مدل به نوعی انتخاب شده اند که اضافه تنش ناشی از بارگذاری و وزن خاکریز در حد قابل قبول باشد. شرایط مرزی، اعمال شده بر مرزهای مدل در جهات  $X$  و  $Y$  شرایط مرزی آزاد<sup>۱</sup> قرار داده شده است.

### ۵-۲- خواص مصالح و مدل های رفتاری

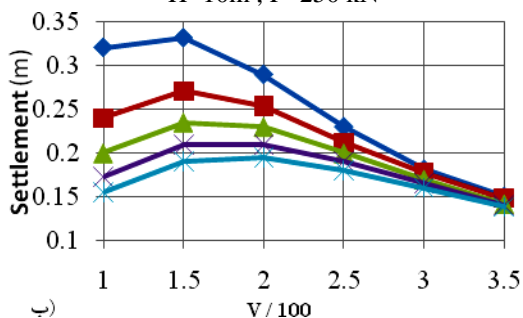
خواص مصالح همانند جدول ۵ برای خاکریز ژئوفومی و جدول ۶ برای بستر ریلی به نواحی ایجاد شده اختصاص داده شده است. در این بخش ضریب میرایی مطابق آنچه که در بخش ۲-۲ اشاره گردید برابر  $0/5$  درصد به خاکریز ژئوفومی و معادل  $5$  درصد برای بسترهای رسی بصورت

<sup>2</sup> Local Damping

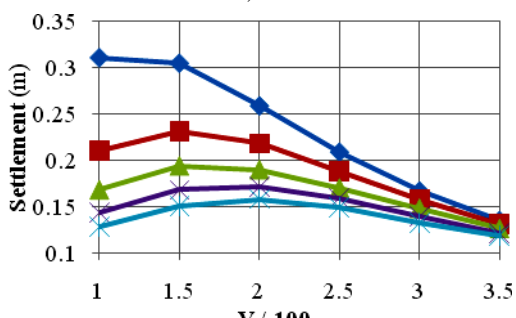
<sup>1</sup> Free field



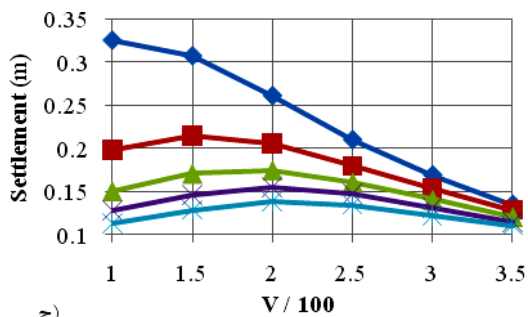
H=10m , P=250 kN



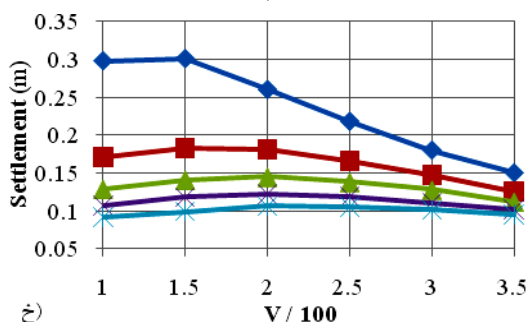
H=7.5m , P=250 kN



H=5m , P=250 kN



H=25m , P=250 kN



H=12.5m , P=250 kN

با توجه به ابعاد ارائه شده برای قطار یاد شده میزان فرکانس عبور بار از رابطه زیر قابل تعیین است :

$$f = \frac{V}{L} \quad (10)$$

که در این رابطه  $V$  سرعت حرکت قطار،  $L$  فاصله محور تا محور بوژی ها و برابر  $18/7$  متر می باشد. مقادیر فرکانس و سرعت های عبور در جدول ۷ نشان داده شده است.

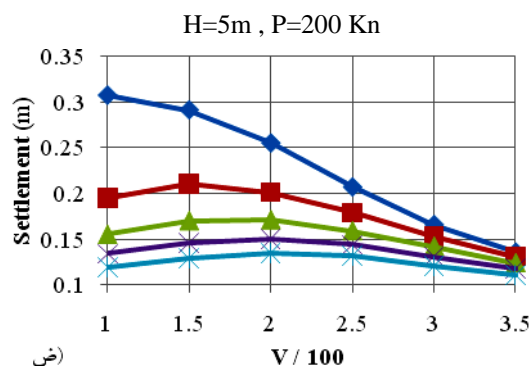
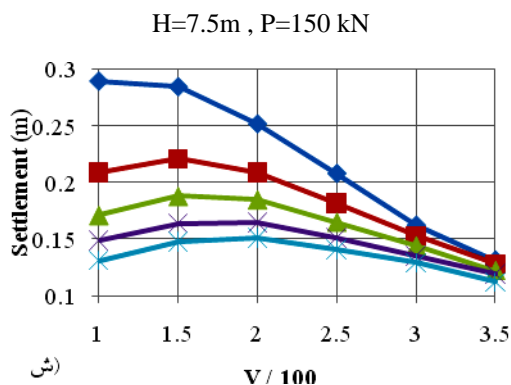
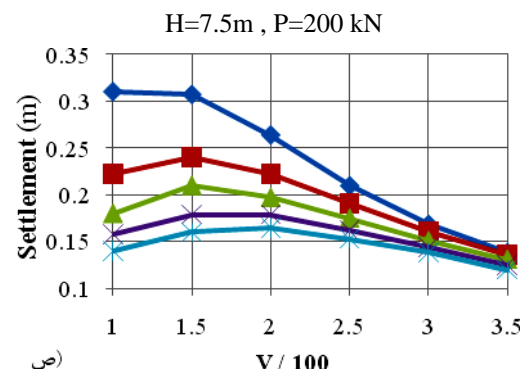
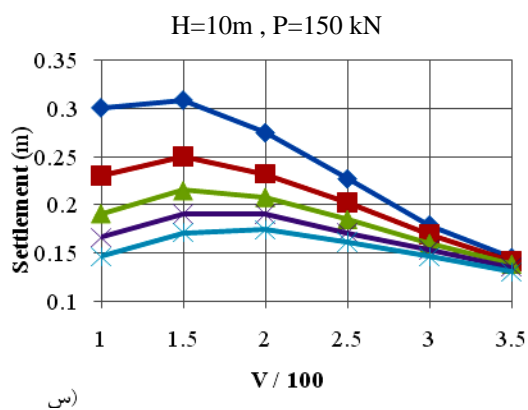
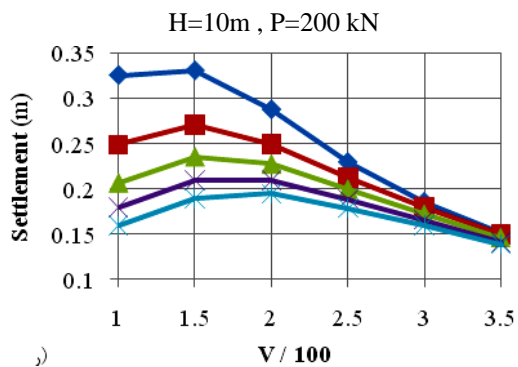
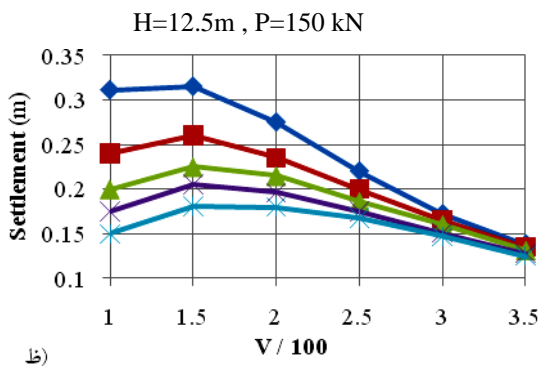
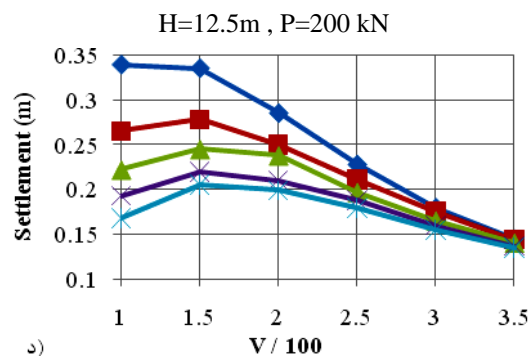
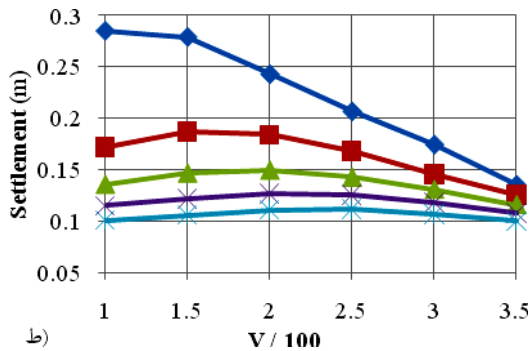
جدول ۷- فرکانس عبوری برای قطارهای Thalys

V(Km/h)	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
$f$	۱/۴۸	۲/۲۳	۲/۹۷	۳/۷۱	۴/۴۵	۵/۲

در مجموع مطابق پارامترهای متغیر در تحلیل اعم از بارگذاری، شرایط بستر، ارتفاع خاکریز، سرعت عبوری قطار ۴۵۰ مدل ساخته و تحلیل گردیده است که نتایج آن در بخش بعد مورد بررسی قرار می گیرد.

#### ۴-۵- بررسی نتایج بدست آمده از تحلیل عددی

نتایج حاصل از تحلیل های دینامیکی خاکریزهای ژئوفومی برای مدل از خاکریز راه آهن ژئوفومی تحت اثر بار محوری قطار ۱۵۰ ، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلو نیوتن برای سرعت عبور ۱۰۰ تا ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت و در بستر با مقاومت زهکشی نشده ۲۰ تا ۶۰ کیلو پاسکال ( با گامهای ۱۰ کیلو پاسکال ) در اشکال (۱۲) ارائه گردیده است. همانند بخش قبل نتایج تحلیل در قالب حداکثر نشست ایجاد شده در خاکریز در محدوده زمانی عبور کل طول قطار برابر ۱۰۰ متر مورد بررسی قرار داده شده است.



$H=5m, P=150 kN$

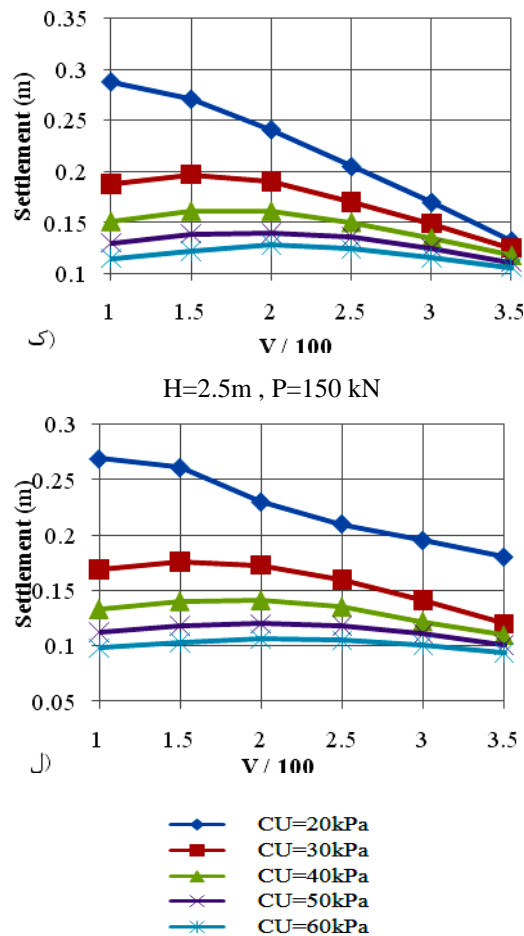
$H=2.5m, P=200 kN$

توجه به شکل (۱۱-الف) برای خاکریز ارتفاع ۱۲/۵ متر تحت بار محوری ۲۵۰ کیلو نیوتن و در یک بستر با مقاومت ۳۰ کیلو پاسکال برابر ۲۶ سانتی متر و این مقدار برای همان بستر با بار محوری ۲۰۰ کیلو نیوتن و ۱۵۰ کیلو نیوتن بترتیب برابر با ۲۵/۵ و ۲۴/۵ سانتی متر خواهد بود. از دیدگاهی دیگر با نگاهی به گرافهای شکل (۱۱-الف) تا (۱۱-ل) می توان گفت که مقدار نشست دینامیکی خاکریزهای راه آهن ژئوفومی علاوه بر افزایش مقاومت بستر و کاهش بار محوری نیز با کاهش ارتفاع روند نزولی را طی می نماید بعنوان مثال مقدار نشست دینامیکی خاکریز راه آهن ژئوفومی برای خاکریز ارتفاع ۱۲/۵، ۱۰، ۷/۵، ۵ و ۲/۵ متر با بار محوری ۲۵۰ کیلو نیوتن و سرعت عبوری قطار ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و در شرایط بستر با مقاومت ۶۰ کیلو پاسکال بترتیب برابر ۱۷، ۱۵، ۱۳، ۱۱ و ۹ سانتی متر خواهد بود.

نکته حائز اهمیت دیگر آنست که مقدار نشست دینامیکی خاکریزهای راه آهن ژئوفومی با افزایش سرعت تا محدوده ای روند صعودی و از آن حد به بعد روند نزولی را طی می نماید که این امر می تواند بیانگر نوع پدیده تشدید در سیستم باشد. با توجه به به این نکته می توان گفت که برای عبور قطار از روی خاکریزهای ساخته شده با بلوک های ژئوفوم بلحاظ سرعت عبور محدودیت وجود دارد. همانگونه که ملاحظه می شود مقدار نشست دینامیکی پس از سرعت حدوداً ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت روندی نزولی را طی می کند که این سرعت می تواند مطمئن ترین مقدار سرعت عبور بر روی خاکریزهای ساخته شده از ژئوفوم باشد.

#### ۵-۵- دامنه کاربرد خاکریز راه آهن ژئوفومی از دیدگاه نشست مجاز

با توجه به مقادیر مجاز نشست کلی خاکریز راه آهن که در بخش ۴-۷ مورد بررسی قرار گرفت می توان در خصوص دامنه کاربرد خاکریزهای ژئوفومی راه آهن اظهار



شکل ۱۲- نشست دینامیکی خاکریز راه آهن ژئوفومی برای ارتفاع ۱۲/۵، ۱۰، ۷/۵، ۵، ۲/۵ متر

نتایج بدست آمده از این تحلیل ها حاکی از آن است که مقدار حداکثر نشست دینامیکی خاکریز ژئوفومی با افزایش مقاومت زهکشی نشده بستر کاهش می یابد بطوریکه بیشترین مقدار نشست برای خاکریزها متکی بر بستر با مقاومت ۲۰ کیلو پاسکال و کمترین مقدار نشست استاتیکی برای خاکریز متکی بر بستر با مقاومت ۶۰ کیلو پاسکال رخ می دهد بطور مثال این مقدار برای خاکریز ارتفاع ۱۲/۵ متر (شکل ۱۱-الف) با بار محوری ۲۵۰ kN و مقاومت زهکشی نشده بین ۲۰ تا ۶۰ کیلو پاسکال مقدار نشست بترتیب از ۳۳ سانتی متر به ۱۶ سانتی متر کاهش پیدا می کند. در عین حال ملاحظه می شود که مقدار نشست با کاهش بار محوری قطار از ۲۵۰ به ۱۵۰ کیلو نیوتن تاثیر چندانی در نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی را ندارد بطوریکه مقدار نشست دینامیکی با



به روش نمایی رابطه مقدار نشست در حالت دینامیکی برای خاکریزهای ژئوفومی ناشی از عبور قطار استخراج گردید:

$$S_{dyn} = \alpha \cdot (P/250)^\beta \cdot H^\gamma \cdot (E_G/E_{sub})^\eta \cdot [A(V/100)^3 + B(V/100)^2 + C(V/100) + D]^\zeta \quad (13)$$

$$\alpha=0.892, \beta=-0.116, \gamma=0.293, \eta=0.431, \zeta=0.911, A=0.013, B=-0.104, C=0.226, D=0.0617$$

$S_{dyn}$  = نشست خاکریز ژئوفومی در حالت دینامیکی بر حسب متر؛  $P$  = بار محوری قطار بر حسب کیلو نیوتن؛  $H$  = ارتفاع خاکریز ژئوفومی بر حسب متر؛  $E_G$  = مدول الاستیک ژئوفوم بر حسب نیوتن بر متر مربع؛  $E_{sub}$  = مدول الاستیک بستر بر حسب نیوتن بر متر مربع؛  $V$  = سرعت عبوری قطار بر حسب کیلومتر بر ساعت می باشد و در این رابطه میزان دقت بدست آمده از روش حداقل مربعات برابر ۰/۹۸ است که بمنظور کاربردهای عملی بسیار دقیق و مفید بنظر می رسد.

#### ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

با توجه به کاربرد موفقیت آمیز مصالح سبک به عنوان جایگزینی برای مصالح خاکی در خاکریزهای راه در مقاله حاضر امکان سنجی استفاده از این مصالح در خاکریز راه آهن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اهمیت تامین شیب پایدار و همچنین محدودیت نشست از نظر بهره برداری تمرکز مقاله بر تحلیل عددی رفتار خاکریز ژئوفومی راه آهن متکی بر بستر رسی بسیار نرم تا نسبتاً سخت تحت تاثیر بار استاتیکی و دینامیکی راه آهن قرار گرفته است و در هر دو مورد دامنه کاربرد این مصالح تعیین گردیده است. از دیدگاه عملی عمده نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر به شرح زیر می باشد:

نظر نمود. با توجه به گرافهای ارائه شده چنین یافت می شود که محدوده مجاز نشست خاکریزهای راه آهن ساخته شده با ژئوفوم در تحلیل های دینامیکی به شرایط بستر بستگی دارد بطوریکه میتوان گفت کاربرد این مصالح برای خاکریزهایی تا ارتفاع ۵ متر در شرایط بستر با مقاومت زهکشی نشده ۳۰ کیلو پاسکال به بالا مجاز بوده و برای خاکریزهای بزرگتر از ارتفاع ۵ متر به شرایط بستر بستگی دارد. همچنین حداکثر و مطمئن ترین سرعت قطار برای خاکریزهای ساخته شده از ژئوفوم برابر با ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت می باشد زیرا پس از این سرعت، فرکانس ناشی از بار از فرکانس سیستم بیشتر خواهد بود و سیستم دچار پدیده تشدید خواهد گردید.

#### ۵-۶- استخراج روابط تحلیلی جهت تعیین نشست خاکریز ژئوفومی تحت تاثیر بار دینامیکی راه آهن

مشابه بخش ۴-۸ استخراج رابطه ای تحلیلی برای محاسبه مقدار نشست حاصل از بارگذاری دینامیکی با استفاده از روش حل حداقل مربعات، فرم کلی میان پارامترها به شکل زیر تعیین گردیده است:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (11)$$

$$Y = \alpha \cdot X_1^\beta \cdot X_2^\gamma \cdot X_3^\eta \cdot X_4^\zeta \quad (12)$$

در این روابط،  $X_1=(P/250)$ ،  $Y=S_{dyn}$ ،  $X_4=(V/100)$ ،  $X_2=H$ ،  $X_3=(E_{geofoam}/E_{sub})$  تعریف گردیده اند و در عین حال پارامترهای  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$ ،  $\eta$  و  $\zeta$  مجهولات و  $X_1$ ،  $X_2$ ،  $X_3$ ،  $X_4$ ،  $Y$  پارامترهای مسئله در نظر گرفته شده اند. با توجه به شکل بدست آمده از نشست دینامیکی خاکریز راه آهن بر حسب مدول نسبی مشاهده می شود که این پارامتر بصورت یک تابع چند جمله ای درجه سوم بر حسب سایر پارامترها قابل بیان است لذا در ادامه با حل رابطه چند جمله ای درجه سوم به روش حداقل مربعات برای تابع سرعت و تعیین ضرایب  $A, B, C, D$  و سپس با جاگذاری در رابطه (۱۲) توسط حل تقریب حداقل مربعات

حداکثر و مطمئن ترین سرعت برای عبور قطار از خاکریزهای ژئوفومی برابر با ۱۵۰ km/h تعیین گردید. روابط تحلیلی استخراج شده برای تعیین نشست کلی خاکریز تحت بار استاتیکی و دینامیکی راه آهن بصورت تابعی از ارتفاع خاکریز، بار محور راه آهن، مدول الاستیسیته مصالح خاکریز ژئوفومی و مدول الاستیسیته بستر و همچنین سرعت سیر قطار دارای دقت قابل قبول بوده است.

محدوده مجاز نشست خاکریزهای راه آهن ساخته شده با ژئوفوم در تحلیل های دینامیکی به شرایط بستر بستگی دارد بطوریکه این محدوده برای خاکریزهایی تا ارتفاع ۵ متر مجاز و برای خاکریزهای بزرگتر از ارتفاع ۵ متر به شرایط بستر بستگی دارد. از نتایج تحلیل عددی در شرایط بارگذاری دینامیکی یافت گردید که خاکریزهای ژئوفومی برای سرعت های عبوری قطار بیشتر از ۲۰۰ km/h دچار پدیده تشدید خواهند شد.

## ۷- مراجع

- [1] Raja V.R. (2004) "Ground Improvement Technical for Railway Embankments" Keller (M) sdn. Bhd. Malaysia. Technical paper 10-59E.
- [2] Eriksson, L., and Trank, R.. (1991) "Properties of Expanded Polystyrene, Laborator Experiments", Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden.
- [3] "EPS. (1993)" Expanded Polystyrene Construction Method Development Organization, Tokyo, Japan 310 pp.
- [4] Horvath, J. S. (1995) "Geofoam Geosynthetic", Horvath Engineering, P.C., Scarsdale, NY 229 pp
- [5] Sun, M.C. (1997) "Engineering Behavior of Geofoam (Expanded Polystyrene) and Lateral Pressure Reduction in Substructures", Master's Thesis, Syracuse University, New York.
- [6] Duskov, M. (1997) "Material Research on EPS-20 and EPS-15 under Representative conditions in Pavement Structure", Geotextiles and Geomembranes, vol. 15, NOS.1, 2, and 3, pp. 147-181,
- [7] G.A. Athanasopoulos, P.C. Pelekis and V.C. Xenaki. (1999) "Dynamic Properties of EPS Geofoam", Graduate Student, Department of Civil Engineering, University of Patras, Greece,
- [8] Elragi, A. (2000) "Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam", Ph.D. Thesis, State University of New York, Syracuse, N.Y
- [9] Bartlett, S., Negusse, D., Kimble, M., and Sheeley, M. (2000) "Use of geofoam as super-lightweight fill for I-15 reconstruction." Proc., Transportation Research Board 79th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C,
- [10] Negusse, D., Stuedlin, A. W., Bartlett, S. F., and Farnsworth, C. (2001) "Performance of geofoam embankment at 100 South, I-15 reconstruction project, Salt Lake City, Utah." Proc., EPS Geofoam, 3rd Int. Conf., Salt Lake City, Utah, 22.
- [11] Newman, Bartlett, Lawton. (2010) "Numerical Modeling of Geofoam Embankments", JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING,
- [12] Gan, Tan. (2003) "SOME CONSTRUCTION EXPERIENCES ON SOFT SOIL USING LIGHT WEIGHT MATERIALS", 2nd International Conference on Advances in Soft Soil Engineering and Technology, Putrajaya, Malaysia.
- [13] Miki, G. (1996) "EPS construction method in Japan." Proc., Int. Symp. on EPS Construction Method, Tokyo, 1-7.
- [14] ASTM c 578. (2000) "Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation." Vol. 04.06, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA
- [15] Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S. and Leshchinsky, D. (2004) "Geofoam Application in the Design and Construction of Highway Embankments.", NCHRP Web Document 65. - Natl. Coop. Hwy. Res. Prog. Proj. No. 24-11.

- [۱۶] نشریه شماره ۳۰۱ " مشخصات فنی عمومی روسازی راه آهن ". سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
- [17] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC: Fast Lagrangian analysis of continua: user's guide, (2005a) Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minn.
- [۱۸] نشریه شماره ۳۹۴ " دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن سریع السیر ". سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
- [۱۹] سید مجد الدین حسینی. (۱۳۷۲). " دینامیک خاک " موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، زمستان
- [20] G.Degrad. (2001) "Free-Field vibrations during the passage of a high-speed train: experimental results and numerical predictions, in noise and vibration from high-speed trains", edited by v.v.krylov, Thomas Telford, London, PP.285-314.