



Semnan University



Research Article

Estimation of Strength Parameters of Saline Subgrade Stabilized by Cement and Industrial Waste Using Finite Element Method

Amin Falamkia^a, Mahmoud Reza Keymanesh^{b*}, Hadi Ghodrati^c

^a Associate Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, I. R. Iran.

^b Associate Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, I. R. Iran.

^c PhD in Civil Transportation Engineering, Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-03-02

Revised: 2024-06-11

Accepted: 2024-06-11

Keywords:

Saline subgrade,
Stabilization,
Industrial waste,
Modulus of resilience,
Finite element method.

ABSTRACT

Saline soils are one of the types of problematic soils which are very vulnerable to dissolution and swelling phenomena. This type of soil has been observed in many parts of Iran and has been used as road subgrade. To enhance the resistance properties of salt beds, various methods are usually used, including chemical stabilization, and the geotechnical properties of stabilized salt beds are evaluated with field and laboratory tests. However, estimation of some main parameters, required for road design, such as modulus of resilience, is dependent on the use of three-dimensional cyclic tests, which requires spending considerable time and cost. This article's aim is to investigate the traffic loads effect on saline soil subgrade stabilized with cement and carbonated waste, by modeling the modulus of resilience parameter via finite elements method. The natural saline soil of this research was stabilized with different percentages of type 2 Portland cement and a type of carbonated waste, without treatment or treated with two different stabilization methods. Then, several resistance tests such as direct shear test, unconfined uniaxial compressive strength and California bearing ratio (CBR) were done on the samples. The obtained shear strength parameters were used in the modeling of the modulus of resilience. Considering the inherence of traffic loading and the type of test, after examining various soil constitutive models, the small strain hardening soil constitutive model was chosen for this analysis. After performing the modeling steps, including determining the model parameters, developing and running the model, analysis of the results showed that modulus of resilience has exponential relationship with the sum of the main axial and confining stresses. The model coefficients' relationship was determined and shown using multiple regression analyses. Also, the correlation between modulus of resilience and California bearing ration (CBR) are presented.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34443.1676>

* Corresponding author.

E-mail address: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

How to cite this article: Falamaki, A., Keymanesh, M., & Ghodrati, H. (2024). Estimation of strength parameters of saline subgrade stabilized by cement and industrial waste using finite element method. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(1), 103-125. doi: [10.22075/jtie.2024.34443.1676](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34443.1676)

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

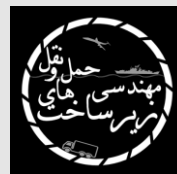


Semnan University

مجله زیر ساخت‌های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

برآورد پارامترهای مقاومتی بستر نمکی تثبیت‌شده با سیمان و پسماند صنعتی به روش

اجزای محدود

امین فلامکی^۱، محمودرضا کی‌منش^{۲*}، هادی قدرت^۳

^۱دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۲دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۳دکتری عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

خاک‌های نمکی یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار هستند که در برابر پدیده‌های انحلال و تورم بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند. این نوع خاک در بسیاری از نقاط کشور ایران مشاهده شده و به عنوان بستر راه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برای بهبود خصوصیات مقاومتی بسترهای نمکی، معمولاً از روش‌های گوناگون اعم از تثبیت شیمیایی استفاده می‌شود و خصوصیات ژئوتکنیک بسترهای نمکی تثبیت‌شده، با آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی ارزیابی می‌گردد. اما، برآورد بعضی پارامترهای اصلی مورد نیاز برای طراحی راه، مانند ضریب برجهندگی، منوط به استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی است که نیاز به صرف هزینه و زمان قابل توجه دارد. هدف این تحقیق، بررسی اثر بارهای رفت و برگشتی ترافیکی بر مصالح بستر نمکی تثبیت‌شده با سیمان و پسماند کربناته، با مدل‌سازی پارامتر ضریب برجهندگی در محیط اجزای محدود، می‌باشد. خاک نمکی پایه این تحقیق، با درصدهای مختلف سیمان پرتلند تپ ۲ و یک نوع پسماند کربناته، بدون عمل‌آوری و یا عمل‌آوری شده با دو روش مختلف تثبیت تهیه شده و آزمایش‌های مقاومتی مانند برش مستقیم، مقاومت فشاری تک‌محوری محدود نشده و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) روی نمونه‌ها انجام شده است. پارامترهای مقاومت برشی حاصل شده، در مدل‌سازی پارامتر ضریب برجهندگی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به ماهیت بارگذاری ترافیکی و نوع آزمون، پس از بررسی مدل‌های رفتاری گوناگون، مدل رفتاری خاک سخت‌شونده کرنش کوچک برای این تحلیل برگزیده شد. پس از انجام مراحل مدل‌سازی، شامل تعیین مقادیر پارامترهای مدل و توسعه (ساخت) و اجرای مدل، تحلیل نتایج نشان داد که پارامتر ضریب برجهندگی، با مجموع تنش‌های اصلی محوری و محدودکننده رابطه نمایی دارد. وابستگی ضرایب مدل نیز با استفاده از تحلیل‌های رگرسیونی چندمتغیره تعیین و ارائه گردید. همچنین، رابطه همبستگی ضریب برجهندگی و نسبت باربری کالیفرنیا ارائه شد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

واژگان کلیدی:

بستر نمکی،

تثبیت،

پسماند صنعتی،

ضریب برجهندگی،

روش اجزای محدود.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.33426.1667>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

استناد به این مقاله: فلامکی، امین، کی‌منش، محمود رضا & قدرت، هادی. (۱۴۰۳). برآورد پارامترهای مقاومتی بستر نمکی تثبیت‌شده با سیمان و پسماند صنعتی با روش اجزای محدود. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۱۰(۱)، ۱۰۳-۱۲۵. doi: 10.22075/jtie.2024.33426.1667

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، تولیدات شیمیایی همواره رو به گسترش بوده است و این فرایندها، پسماندهایی از خود به جای می‌گذارند که علاوه بر اشغال فضا، ریسک آلودگی محیط‌زیست را به دنبال دارند. از طرفی، خاک نمکی، پدیده‌ای است که در اکثر کشورها مشاهده شده و به‌ویژه در کشورهای آسیایی، از جمله ایران، به‌وفور یافت می‌شود. این خاک، جزو خاک‌های مسئله‌دار محسوب می‌شود و خصوصیات مقاومتی آن در مواجهه با آب، بسیار آسیب‌پذیر است. به همین دلیل، بسترهای نمکی، لایه‌های قابل اعتمادی برای اجرای راه نمی‌باشند و نیاز به تثبیت دارند. پسماندهای صنعتی ناشی از تولیدات شیمیایی، در صورتی که ریسک انتقال ترکیبات سمی به محیط‌زیست نداشته باشند، قابلیت استفاده به‌عنوان تثبیت‌کننده بسترهای نمکی را دارند (کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۲).

خصوصیات مقاومتی بسترهای نمکی تثبیت شده نیاز به برآورد دارد. از جمله آنها، ضریب برجهندگی^۱ (Mr) است که یکی از پارامترهای مهم طراحی روسازی محسوب می‌شود و بیانگر سختی مصالح اساس، زیراساس و بستر در اثر الگوی مشخصی از بارهای رفت و برگشتی و سطوح مختلف تنش محدودکننده با دستگاه سه‌محوری است (حاج و همکاران، ۲۰۱۸). این آزمایش تحت استاندارد AASHTO T307-99 انجام می‌شود (AASHTO، ۲۰۰۷). برآورد این پارامتر با استفاده از روش آزمایشگاهی، مشمول صرف هزینه و زمان قابل توجه است و برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد نیاز به تعداد زیادی نمونه دارد. به‌علاوه، تجهیزات آزمایش سه‌محوری سیکلیک^۲ معمولاً به راحتی در دسترس نمی‌باشد. بنابراین، با توجه به مشکلات اشاره شده و

پیچیدگی آزمون، روش‌های دیگری برای برآورد پارامتر ضریب برجهندگی مورد توجه محققین بوده است. این روش‌ها بیشتر مبتنی بر استفاده از همبستگی بین نتایج دیگر آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی با پارامتر ضریب برجهندگی می‌باشد. مهمترین آزمون‌های آزمایشگاهی مورد استفاده پژوهشگران، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا^۳ (CBR) و مقاومت فشاری محدود نشده^۴ (UCS) و مهمترین آزمون‌های صحرایی مورد استفاده، آزمایش نفوذ مخروط^۵ (CPT) و نفوذ مخروط دینامیک^۶ (DCP) بوده است. با استفاده از نتایج این آزمون‌ها و تحلیل رگرسیونی، یک مدل سازگاری^۷ به‌دست آمده است (سید و همکاران، ۱۹۶۷؛ ویدزاک و اوزان، ۱۹۸۸؛ پوپالا و همکاران، ۱۹۹۶؛ صدرالسادات و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، قربانی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک استفاده کردند و دریافتند که هر دو مدل یاد شده می‌توانند به دقت ضریب برجهندگی بسترهای خاکی چسبنده را پیش‌بینی نمایند و با تحلیل حساسیت، میزان اثرگذاری پارامترهای مدل را ارزیابی نمودند. از طرفی، روش‌های هوش مصنوعی به طور گسترده توسط پژوهشگران برای تحلیل‌های پیچیده‌تر پارامترهای خاک به‌کار رفته‌اند که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های قربانی و همکاران (۲۰۱۸)، قربانی و حسن‌زاده شوئیلی (۲۰۱۸)، چن و همکاران (۲۰۱۹) و جایاواردانا و همکاران (۲۰۱۹) اشاره نمود. همچنین، صدرالسادات و همکاران (۲۰۱۸) از یک برنامه بر پایه الگوریتم ژنتیک برای تعیین ضریب برجهندگی استفاده نمودند.

اکثر پژوهشگران، روش‌های یاد شده را برای تخمین ضریب برجهندگی خاک پایه به‌کار برده‌اند. اما در جدیدترین پژوهش‌ها، لو و همکاران (۲۰۲۱) مدل‌سازی

⁵- Cone penetration test

⁶- Dynamic cone penetrometer

⁷- Constitutive model

¹- Resilient modulus

²- Repeated load triaxial tests

³- California bearing ratio

⁴- Unconfined compressive strength

۲. خاک پایه

خاک نمکی مورد مطالعه در این پژوهش، از بستر آزادراه جدید فیروزآباد- فراشبند در گنبد نمکی فیروزآباد، که بخشی از رشته گنبدهای نمکی کنارسیاه و منغارک است، نمونه برداری شده است (طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۴۷ دقیقه و ۱۱ ثانیه شمالی). رشته گنبدهای نمکی کنارسیاه و منغارک در کوه‌های زاگرس در جنوب غربی ایران واقع شده و دارای حدود ۲۰۰ گنبد نمکی آشکار است (قنبریان، ۲۰۱۶). این منطقه جزو مناطق نیمه خشک محسوب می‌شود و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۴۰۰ میلی‌متر است. بر اساس شرایط آب‌وهوایی منطقه، وقوع یخبندان چندان مورد انتظار نبوده یا ناچیز است؛ اما انحلال نمک ناشی از بارندگی و نوسانات سطح تراز آب‌های زیرسطحی در این منطقه کاملاً محتمل است. نمونه برداری از نقاطی انجام شد که بیشترین برونزد لایه‌های نمکی وجود دارد و در مجاورت بستر راه در حال اجرا قرار داشته باشد (شکل ۱).

بر پایه روش اجزای مجزا^۱ (DEM) را برای ارزیابی ضریب برجهندگی بسترهای تثبیت شده با سیمان و نخاله‌های ساختمانی^۲ (C&D) به کار بردند. در این تحقیق، حداقل درصد سیمان مورد نیاز برای تثبیت بستر راه تعیین شد و مشخص شد که ضریب برجهندگی با مقاومت فشاری تک‌محوری، دانسیته خشک خاک و مدول الاستیسیته در کرنش ۵۰ درصد (E_{50}) رابطه دارد. در این نوشتار، با استفاده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده (کی منش و همکاران، ۲۰۲۱) شامل آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، و با استفاده از روش‌های اجزای محدود^۳ (FEM)، مقادیر ضریب برجهندگی، برای خاک نمکی تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان و پسماند کربناته تعیین و در نهایت بر پایه روش‌های تحلیل رگرسیونی، مدل سازگاری و روابط ضریب برجهندگی با پارامترهای مؤثر بر آن استخراج گردید.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

و کل جامدات محلول (TDS) (دانک و ویتن، ۱۹۸۸)، مقدار یون سولفات (SO_4^{2-}) (ASTM C 1580)، پارامترهای مقاومت فشاری بر اساس آزمون‌های برش مستقیم (ASTM D3080) و مقاومت فشاری تک‌محوری (ASTM D2166) قرار گرفتند. بر اساس

نمونه‌های اخذ شده خاک، مورد آزمایش‌های گوناگون اعم از دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود اتربرگ (ASTM D421، ASTM D7928 و ASTM D4318)، تعیین درصد رطوبت (ASTM D2216)، pH (ASTM D4972)، میزان هدایت الکتریکی (EC)

³- Finite Element Method

¹- Discrete element method

²- Construction and demolished (C&D) waste

طبقه بندی خاک، مقدار درصد تراکم اولیه، سیمانناسیون اولیه موجود در خاک پایه ناشی از وجود قفل و بست های ناشی از نمک در خاک می باشد.

۳. رفتار مقاومتی خاک تثبیت شده

همانگونه که نشان داده شد، خاک نمکی پایه این تحقیق به شدت در برابر پدیده انحلال آسیب پذیر است. در صورت وقوع پدیده انحلال در اثر قرارگیری در معرض نوسانات تراز آب زیرزمینی و یا زیرسطحی و یا وقوع سیل و رواناب های سطحی، بسترهای خاکی نمکی دچار اضمحلال می گردند. بنابراین، با درصدهای مختلف سیمان پرتلند تیپ ۲ و یک نوع پسماند کربناته (W) که پسماند واحد Soda ash مجتمع پتروشیمی شیراز (شکل ۲) می باشد تثبیت شیمیایی شد (کی منش و همکاران، ۲۰۲۲). بررسی های اولیه این ماده با اشعه X فلورسانس نشان داد که این پسماند حاوی درصد قابل توجهی آهک زنده (حدود ۶ درصد) می باشد.

نتایج این آزمایش ها (کی منش و همکاران، ۲۰۲۲)، خاک نمکی پایه در طبقه بندی خاک های ماسه ای بد دانه بندی شده حاوی سیلت (SP-SM) قرار گرفت. شاخص روانی (LI) خاک کمتر از صفر به دست آمد و در محدوده خاک های "نیمه جامد با مقاومت زیاد، شکننده با شکست ناگهانی قابل انتظار" قرار گرفت (بادو، ۲۰۰۸). به علاوه، عدد فعالیت اسکمپتون نشان داد که این خاک از لحاظ ذرات رسی "غیرفعال" است و پدیده تورم محتمل نمی باشد. مقدار pH خاک به طور متوسط در محدوده خشی تا حدودی قلیایی (اسلسارف و همکاران، ۲۰۱۶) به دست آمد. همچنین، نشان داده شد که خاک پایه در طبقه بندی "سولفات زیاد" قرار می گیرد (پوپالا و همکاران، ۲۰۰۴) و بسیار شور با قابلیت انحلال بسیار زیاد است و نتایج آزمون های هدایت الکتریکی (EC)، کل جامدات محلول (TDS) و درصد شوری نیز آن را تأیید کرد (دانک و ویتن، ۱۹۸۸). نتایج آزمون های برش مستقیم و مقاومت فشاری تک محوری نشان داد که مقاومت نمونه های خاک نمکی پایه، نسبتاً زیاد است که به دلیل نوع دانه بندی و



شکل ۲. نمونه پسماند کربناته

آزمایش ها، دو روش عمل آوری متفاوت مانند CT_1^1 و CT_2^2 در نظر گرفته شده بود. در CT_1 ، نمونه ها در یک مخزن هوا بند به مدت حداقل ۷ تا ۲۸ روز، در رطوبت ثابت ۹۰ درصد و دمای 20 ± 2 درجه سلسیوس قرار

۳-۱. آزمایش های برش مستقیم و مقاومت فشاری تک محوری

خلاصه نتایج آزمایش های مقاومتی انجام شده (کی منش و همکاران، ۲۰۲۲)، در جدول ۱ ارائه شده است. در این

²- Curing Type2

¹- Curing Type1

است. در مطالعات کی منش و همکاران (۲۰۲۲) نشان داده شد که اصلاح خاک شور با ۲ درصد سیمان و ۵ درصد W به روش عمل‌آوری CT2 به مدت ۲۸ روز باعث بیشترین مقدار افزایش در مقدار پارامتر مقاومت برشی (حدود ۱۲۷ درصد) می‌شود. بنابراین، ترکیب 28D-C2W5-CT2 به عنوان فرمول اصلاح بهینه در نظر گرفته و معرفی شد.

داده شدند. در روش CT2، نمونه‌ها در رطوبت محیطی آزمایشگاه (حدود ۱۵٪) و دمای متوسط 20 ± 2 درجه سلسیوس به مدت حداقل ۷ تا ۲۸ روز نگهداری و عمل‌آوری شدند.

نتایج نشان داد که هم W و هم سیمان پرتلند، به‌عنوان اصلاح‌کننده، می‌توانند مقاومت برشی خاک نمکی پایه را در نمونه‌های یک روزه تا حدود ۵۰ درصد افزایش دهند؛ اما تأثیر W کمی ضعیف‌تر از سیمان پرتلند

جدول ۱. خصوصیات مقاومتی خاک پایه و تثبیت‌شده

مصالح	شرح نمونه		پارامترهای مقاومت برشی				
	سیمان (%)	W (%)	عمل‌آوری		زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kPa)	چسبندگی زهکشی نشده (kPa)
			مدت	روش			
Saline Soil	0	0	-	-	22.7	23.5	49.21
1D-W3	0	3	-	-	14.45	41.06	73.0
1D-W5	0	5	-	-	18.6	43.21	70.9
1D-W7	0	7	-	-	28.56	36.6	54.6
1D-C3	3	0	-	-	17.11	45.93	94.9
1D-C5	5	0	-	-	28.87	33.42	80.1
1D-C7	7	0	-	-	30.12	37.96	60.9
28D-W3-CT2	0	3	2	28	21.43	33.99	85.74
28D-W5-CT2	0	5	2	28	28.99	36.54	123.3
28D-W7-CT2	0	7	2	28	30.12	44.42	163.4
28D-C3-CT1	3	0	1	28	44.33	24.87	775.4
28D-C5-CT1	5	0	1	28	49.28	41.58	1175
28D-C7-CT1	7	0	1	28	51.76	61.4	1126
1D-C2W5	2	5	-	-	21.14	69.92	77.6
28D-C2W5-CT1	2	5	1	28	44.37	9.74	382.8
28D-C2W5-CT2	2	5	2	28	33.95	78.06	419.8
1D-C2W7	2	7	-	-	26.75	37.57	63.9
28D-C2W7-CT1	2	7	1	28	38.73	5.73	357.5
28D-C2W7-CT2	2	7	2	28	39.03	41.54	346.0

استفاده شده بود بیشتر است. اما به هیچ عنوان مشابه وضعیت استفاده خالص از سیمان نیست و نتیجه معقول-تر و کاربردی‌تری به دست آمد. از طرفی، روش عمل‌آوری CT1 پس از ۲۸ روز، میزان مقاومت برشی زهکشی نشده را در مقایسه با خاک نمکی پایه، به بیش از ۳/۸ برابر افزایش داد. در حالی که

نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری (جدول ۱) نشان می‌دهد که افزودن ۲ درصد سیمان و ۵ و ۷ درصد W به خاک نمکی، مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه‌ها را به طور متوسط تا حدود ۵۰ درصد افزایش می‌دهد (کی منش و همکاران، ۲۰۲۲). مشاهده شد که مقدار افزایش مقاومت، از حالتی که تنها از W

نتایج آزمایش‌های CBR نشان داد که عملیات تثبیت با ۳، ۵ و ۷ درصد پسماند W مقدار پارامتر نسبت باربری کالیفرنیا را به طور متوسط حدود ۵۳ درصد نسبت به خاک نمکی پایه افزایش می‌دهد که ناشی از خاصیت پرکنندگی پسماند W و افزایش قفل‌وبست‌های داخلی ذرات خاک نمکی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. در نهایت، CBR نمونه‌های تثبیت شده بدین شیوه نیز رشد می‌کند. بیشترین افزایش CBR در ۵ درصد پسماند W رخ داد و مقادیر بیشتر W موجب کاهش آن شد. عمل‌آوری نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف پسماند W به روش CT2 به مدت ۲۸ روز نیز باعث افزایش ۱۴ درصد به طور متوسط نسبت به نمونه‌های یک روزه گردید. این تغییر ناشی از واکنش پوزولانی بین ذرات خاک نمکی و ذرات پسماند W ارزیابی می‌گردد.

همچنین، ضریب باربری کالیفرنیا در نمونه‌های تثبیت شده با ۲ درصد سیمان و ۵ تا ۷ درصد پسماند W بدون عمل‌آوری به طور متوسط به مقدار تقریباً ۹۰ درصد رشد داشت. عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز به روش CT2 به طور متوسط باعث افزایش حدود ۳۲ درصد در مقدار CBR نسبت به نمونه‌های مشابه عمل‌آوری نشده گردید. در نهایت، مطالعه تجمعی آزمایش‌های برش مستقیم و آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده تک‌محوری و CBR نشان می‌دهد که خاک شور اصلاح شده با ۲ درصد سیمان و ۵ درصد W که پس از ۲۸ روز به روش CT2 عمل‌آوری می‌شود، بهترین نتایج را از نظر مقاومت برشی به دست می‌دهد.

پارامترهای مقاومت برشی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، به طور مستقیم در ارزیابی وضعیت مقاومتی بستر راه‌سازی و همچنین فرایند طراحی روسازی راه مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. هرچند نتایج آزمون‌های تعیین نسبت باربری کالیفرنیا انجام شده ارزیابی کلی از میزان افزایش مقاومت بستر خاک‌های

روش عمل‌آوری ۲۸ روزه CT2 این پارامتر را به طور متوسط تا حدود ۴/۱ افزایش داد (کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۲).

۳-۲. آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا

آزمون تعیین نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) به منظور بررسی وضعیت مقاومتی خاک‌های نمکی پایه و نمونه‌های خاک نمکی با درصد‌های مختلف تثبیت‌کننده، اعم از سیمان و W، انجام شد. این آزمون‌ها برای نمونه‌های در شرایط رطوبت طبیعی و نه در شرایط اشباع انجام شد. چرا که با توجه به شرایط آب‌وهوایی منطقه مورد مطالعه، امکان اشباع شدن خاک‌های این محدوده تا تراز مؤثر بارگذاری ناشی از بارهای ترافیکی آزادراه دور از انتظار ارزیابی شد. آزمایش‌ها روی خاک نمکی پایه و خاک‌های نمکی تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد پسماند W بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری به روش CT2 به مدت ۲۸ روز انجام شد. همچنین، آزمون CBR روی نمونه‌های خاک نمکی تثبیت شده با ۲ درصد سیمان و ۵ یا ۷ درصد پسماند W بدون عمل‌آوری و با عمل‌آوری CT2 به مدت ۲۸ روز انجام شد.

نتیجه آزمون CBR برای خاک نمکی پایه نشان داد که این خاک از لحاظ باربری و از نقطه نظر راه‌سازی فقط کیفیت استفاده به عنوان مصالح بستر را دارد (مقدار CBR خاک نمکی پایه، برابر ۱۵ درصد). مطابق آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴)، در محل‌هایی که خاک مناسب برای بستر راه‌سازی موجود نباشد، می‌توان از تثبیت خاک با آهک و یا مواد و ترکیبات شیمیایی دیگر استفاده نمود. در این آیین‌نامه، کلیه خاک‌های گچی، نمکی، نباتی و مصالح حاوی مواد آلی و نیز خاک‌هایی که حداکثر وزن مخصوص آنها با روش T80 طبقه D آشتو کمتر از ۱/۵۵ تن در متر مکعب باشد، در شمار مصالح نامناسب قرار می‌گیرند.

به منظور تعریف خصوصیات مصالح، لازم است در ابتدا مدل رفتاری خاک تعیین گردد. بدیهی است هر مدل رفتاری خاک، پارامترهای متفاوتی دارند و برحسب شرایط گوناگون حاکم بر مدل‌سازی اعم از هندسه، نحوه بارگذاری و باربرداری و نوع مصالح مصرفی و ... مدل‌های رفتاری متفاوتی ممکن است مورد استفاده قرار بگیرد.

مدل‌های رفتاری شناخته شده گوناگونی در تحلیل‌های ژئوتکنیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما مهمترین آنها عبارتند از:

- مدل موهر کولمب^۱
- مدل خاک سخت‌شونده^۲
- مدل خاک سخت‌شونده با کرنش‌های کوچک^۳

با توجه به برتری‌های مدل خاک سخت‌شونده بر مدل موهر کولمب و تشابه مدل خاک‌های سخت‌شونده به عملکرد سیکلی و همچنین محدوده عملکرد تست سه‌محوری سیکلی در محدوده کرنش‌های کوچک، به نحوی که این تست را در رده آزمون‌های غیرمخرب خاک قرار می‌دهد و می‌توان از نمونه‌های سه‌محوری سیکلی بارها در بارگذاری‌های مختلف استفاده نمود، از مدل خاک سخت‌شونده با کرنش‌های کوچک، برای مدل‌سازی آزمون سه‌محوری سیکلی و برآورد ضریب برجهنگی خاک بستر در این تحقیق استفاده گردیده است.

۴-۲. تعیین مقادیر اولیه پارامترهای مدل رفتاری

خاک

پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده با کرنش‌های کوچک در جدول ۲ ارائه شده است.

نمکی اصلاح‌شده ارائه نمود، اما برای تحلیل جامع‌تر و فراهم شدن امکان تخمین، درونیایی، برونایی و پیش‌بینی روند پارامترهای اصلی رفتار مقاومتی بستر نمکی تثبیت-شده مانند مدول برجهنگی (M_r)، لازم است مدل‌سازی انجام شود.

۴. مدل‌سازی رفتار مقاومتی

۴-۱. مراحل مدل‌سازی

آزمایش سه‌محوری سیکلی اصلی‌ترین روش برآورد پارامتر مدول برجهنگی بستر با اندازه‌گیری کرنش برگشت‌پذیر یا ϵ_r در اثر تنش (بار) محوری یا σ_d می‌باشد. آزمایش در چندین سیکل پی در پی انجام می‌شود و هدف از تکرار سیکل‌ها، به حداقل یا صفر رسیدن کرنش پلاستیک می‌باشد به طوری که کل کرنش برگشت‌پذیر شود.

نحوه محاسبه ضریب برجهنگی در رابطه (۱) ارائه شده است (هوانگ، ۱۹۹۳):

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

در ابتدای بارگذاری، کرنش پلاستیک مقدار قابل توجهی است. اما با تکرار بارگذاری، کرنش به تدریج کاهش می‌یابد تا اینکه تمامی کرنش برگشت داده می‌شود. معمولاً کرنش برگشت‌پذیر یا ϵ_r از سیکل ۵۰ بارگذاری تا ۲۰۰ قابل دست‌یابی است.

مراحل مدل‌سازی این پارامتر مقاومتی خاک بستر در این تحقیق به شرح زیر است:

- تعیین مقادیر اولیه پارامترهای مدل رفتاری خاک
- بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای مدل رفتاری خاک
- اجرای مدل
- تجزیه و تحلیل نتایج

جدول ۲. پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده با کرنش‌های کوچک

³ - Hardening Soil Small Strain

¹ - Mohr-Coulomb

² - Hardening Soil

پارامتر	نام	واحد
m	توان وابستگی سختی به تراز تنش	KN/m^2
E_{50}^{ref}	سختی سکانتی در آزمون سه محوری زهکشی شده استاندارد	KN/m^2
E_{oed}^{ref}	سختی تانژانتی برای بارگذاری اولیه ادومتر	KN/m^2
E_{ur}^{ref}	سختی بارگذاری/باربرداری برای آزمایش سه محوری زهکشی شده	KN/m^2
$\nu_{0.7}$	ضریب پواسون برای بارگذاری- باربرداری	-
G_0^{ref}	مدول برشی مرجع در کرنش های خیلی کوچک ($\epsilon < 10^{-6}$)	KN/m^2
$\gamma_{0.7}$	کرنش برشی آستانه در $G_s = 0.722G_0$	-

در این مقاله، برای برآورد پارامترهای اولیه مدل، مقدار E_{oed} با استفاده از آزمون ادومتر از بخش Soil test نرم افزار PLAXIS برآورد شده است. برای هر نمونه، این آزمون برای یک سیکل بارگذاری و باربرداری تا حداکثر تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال انجام می شود و منحنی آن به دست می آید. در این منحنی، خط مماس بر منحنی بارگذاری و باربرداری در نقطه متناظر با بار ۴۰۰ کیلوپاسکال ترسیم می گردد. سپس از تقسیم این بار بر اختلاف کرنش متناظر با بار یاد شده و محل تلاقی خطوط مماس بر منحنی های بارگذاری و باربرداری با محور کرنش، مقدار E_{oed} به دست می آید (شکل ۳). در ادامه، با استفاده از رابطه (۶)، مقدار E_{oed}^{ref} به دست می آید و به عنوان فرض اولیه برای نمونه در نظر گرفته می شود.

برای مصالحی مانند ماسه، مقادیر پارامترهای E_{ur}^{ref} و G_0^{ref} و $\gamma_{0.7}$ به شرح زیر توصیه شده است:

$$E_{ur}^{ref} = (3to5)E_{50}^{ref} \quad (2)$$

$$G_0^{ref} = (2.5to10)G_{ur}^{ref} \quad (3)$$

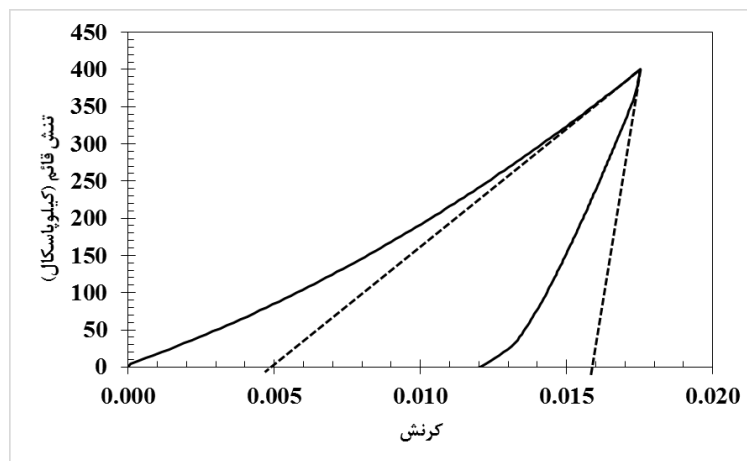
$$G_{ur}^{ref} = \frac{E_{ur}^{ref}}{2(1+\nu_{ur})} \quad (4)$$

$$\gamma_{0.7} = (1to2).10^{-4} \quad (5)$$

بر اساس جانبو (۱۹۶۳) رابطه E_{oed}^{ref} و E_{oed} به شرح رابطه (۶) می باشد:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma'}{P_{ref}} \right)^m \quad (6)$$

که در آن فشار مرجع و برابر با ۱۰۰ کیلوپاسکال می باشد.



شکل ۳. منحنی آزمون ادومتر نمونه خاک نمکی پایه

توصیه شده است، مقدار این پارامتر هم حاصل می‌شود. همچنین، برای پارامتر $\gamma_{0.7}$ مقادیر بین $0/0001$ تا $0/0002$ توصیه شده است که در این مقاله کمترین مقدار لحاظ گردید. بر همین اساس، مقادیر اولیه برای پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده کرنش کوچک مورد استفاده برای مصالح خاکی نمکی و همچنین خاک نمکی تثبیت‌شده محاسبه شد (جدول ۳).

از طرفی، بر اساس توصیه شانز (۱۹۹۸) مقدار پارامتر E_{oed}^{ref} در مصالح ماسه‌ای تقریباً برابر با E_{50}^{ref} و E_{ur}^{ref} بین ۳ تا ۵ برابر E_{oed}^{ref} در نظر گرفته می‌شود (در این مقاله، حداقل در نظر گرفته شد). با استفاده از مقادیر E_{ur}^{ref} که از قبل به دست آمد و v_{ur} که برابر با $0/3$ برای خاک ماسه‌ای توصیه شده است، مقدار G_{ur}^{ref} از روابط فوق‌الذکر محاسبه گردید. با توجه به اینکه مقدار G_0^{ref} بین $2/5$ تا 10 برابر G_{ur}^{ref}

جدول ۳. پارامترهای مدل خاک سخت‌شونده کرنش کوچک (برآورد اولیه)

مصالح	پارامترهای مقاومت برشی		پارامترهای مدل خاک سخت‌شونده کرنش کوچک (برآورد اولیه)							
	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kPa)	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	G_0^{ref}	$\gamma_{0.7}$	m	v_{ur}	k_0^{nc}
Saline Soil	22.7	23.5	18000	18000	54000	51923.08	0.0001	0.5	0.3	0.614094
1D-W3	14.45	41.06	24390	24390	73170	70355.77	0.0001	0.5	0.3	0.750465
1D-W5	18.6	43.21	46750	46750	140250	134855.8	0.0001	0.5	0.3	0.681041
1D-W7	28.56	36.6	81300	81300	243900	234519.2	0.0001	0.5	0.3	0.521921
1D-C3	17.11	45.93	27820	27820	83460	80250	0.0001	0.5	0.3	0.705793
1D-C5	28.87	33.42	48630	48630	145890	140278.8	0.0001	0.5	0.3	0.517176
1D-C7	30.12	37.96	84990	84990	254970	245163.5	0.0001	0.5	0.3	0.498187
28D-W3-CT2	21.43	33.99	40810	40810	122430	117721.2	0.0001	0.5	0.3	0.634636
28D-W5-CT2	28.99	36.54	81490	81490	244470	235067.3	0.0001	0.5	0.3	0.515343
28D-W7-CT2	30.12	44.42	140200	140200	420600	404423.1	0.0001	0.5	0.3	0.498187
28D-C3-CT1	44.33	24.87	51730	51730	155190	149221.2	0.0001	0.5	0.3	0.317
28D-C5-CT1	49.28	41.58	90900	90900	272700	262211.5	0.0001	0.5	0.3	0.29
28D-C7-CT1	51.76	61.4	159000	159000	477000	458653.8	0.0001	0.5	0.3	0.277
1D-C2W5	21.14	69.92	125600	125600	376800	362307.7	0.0001	0.5	0.3	0.639352
28D-C2W5-CT1	44.37	9.74	238900	238900	716700	689134.6	0.0001	0.5	0.3	0.317
28D-C2W5-CT2	33.95	78.06	256800	256800	770400	740769.2	0.0001	0.5	0.3	0.441531
1D-C2W7	26.75	37.57	98130	98130	294390	283067.3	0.0001	0.5	0.3	0.549902
28D-C2W7-CT1	38.73	5.73	205043	205043	615129	591470.2	0.0001	0.5	0.3	0.374349
28D-C2W7-CT2	39.03	41.54	243400	243400	730200	702115.4	0.0001	0.5	0.3	0.370273

در این مرحله، لازم است تا مقادیری که برای پارامترهای مدل رفتاری خاک به دست آمده است بهینه شوند تا مشخص گردد چقدر با واقعیت و ماهیت خصوصیات

۴-۳. بهینه‌سازی مقادیر اولیه پارامترهای مدل رفتاری خاک

وارد و سپس برای هر کدام یک محدوده قابل قبول تعریف گردید و بهینه‌سازی آغاز می‌گردد. محاسبات تا جایی ادامه می‌یابد که منحنی‌های حاصله اعم از هدف^۱، مینا^۲ و نتیجه^۳ بر هم منطبق شوند و درصد تطبیق پارامترها به حداکثر برسد. پس از تکمیل فرایند بهینه‌سازی برای کلیه نمونه‌ها، کلیه مقادیر پارامترهای بهینه‌سازی شده مدل خاک سخت‌شونده کرنش کوچک برای تمامی نمونه‌های خاک نمکی و نمونه‌های تثبیت-شده استخراج و در جدول ۴ ارائه گردیده است.

ذاتی نمونه تفاوت دارند. در ابتدا برای هر نمونه خاک یک منحنی مینا حاصل از یک سیکل بارگذاری و باربرداری تا حداکثر تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال به مدل معرفی گردید و دیگر پارامترها اعم از E_{oed}^{ref} ، E_{50}^{ref} ، E_{ur}^{ref} ، G_0^{ref} و $\gamma_{0.7}$ نیز که در بخش قبل برای هر نمونه ارزیابی گردید (جدول ۳) در نظر گرفته می‌شود. مقادیر یاد شده به همراه فایل متنی منحنی مینا از بخش Parameter Optimization قسمت Soil test نرم‌افزار

جدول ۴. پارامترهای مدل خاک سخت‌شونده کرنش کوچک (مقادیر بهینه‌سازی شده)

مصالح	پارامترهای مقاومت برشی		پارامترهای مدل خاک سخت‌شونده کرنش کوچک							
	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kPa)	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	G_0^{ref}	$\gamma_{0.7}$	Power	v_{ur}	k_0^{nc}
	Saline Soil-opt	22.7	23.5	16830	16020	67850	38480	0.000101	0.5	0.3
1D-W3-opt	14.45	41.06	32990	21870	85990	58110	0.000105	0.5	0.3	0.750465
1D-W5-opt	18.6	43.21	66920	39733	198000	100800	0.0001	0.5	0.3	0.681041
1D-W7-opt	28.56	36.6	74480	60180	329000	171000	0.000101	0.5	0.3	0.521921
1D-C3-opt	17.11	45.93	31280	20100	109200	71060	0.000101	0.5	0.3	0.705793
1D-C5-opt	28.87	33.42	47500	35070	199400	100600	0.000101	0.5	0.3	0.517176
1D-C7-opt	30.12	37.96	120200	80370	290000	202400	0.000105	0.5	0.3	0.498187
28D-W3-CT2-opt	21.43	33.99	25770	25360	179300	70100	0.000101	0.5	0.3	0.634636
28D-W5-CT2-opt	28.99	36.54	81430	60180	329000	161100	0.000101	0.5	0.3	0.515343
28D-W7-CT2-opt	30.12	44.42	199300	121000	459600	331200	0.0001	0.5	0.3	0.498187
28D-C3-CT1-opt	44.33	24.87	48760	40300	217100	91460	0.0001	0.5	0.3	0.317
28D-C5-CT1-opt	49.28	41.58	85560	70610	347600	202200	0.000101	0.5	0.3	0.29
28D-C7-CT1-opt	51.76	61.4	152400	120500	589600	370800	0.0001	0.5	0.3	0.277
1D-C2W5-opt	21.14	69.92	169900	111500	419500	303100	0.000109	0.5	0.3	0.639352
28D-C2W5-CT1-opt	44.37	9.74	290000	210100	779700	651100	0.000105	0.5	0.3	0.317
28D-C2W5-CT2-opt	33.95	78.06	350000	231700	849300	690400	0.000109	0.5	0.3	0.441531
1D-C2W7-opt	26.75	37.57	132400	96150	340000	241500	0.000111	0.5	0.3	0.549902
28D-C2W7-CT1-opt	38.73	5.73	187300	180400	558400	510600	0.000101	0.5	0.3	0.374349
28D-C2W7-CT2-opt	39.03	41.54	203900	200000	604800	571500	0.000109	0.5	0.3	0.370273

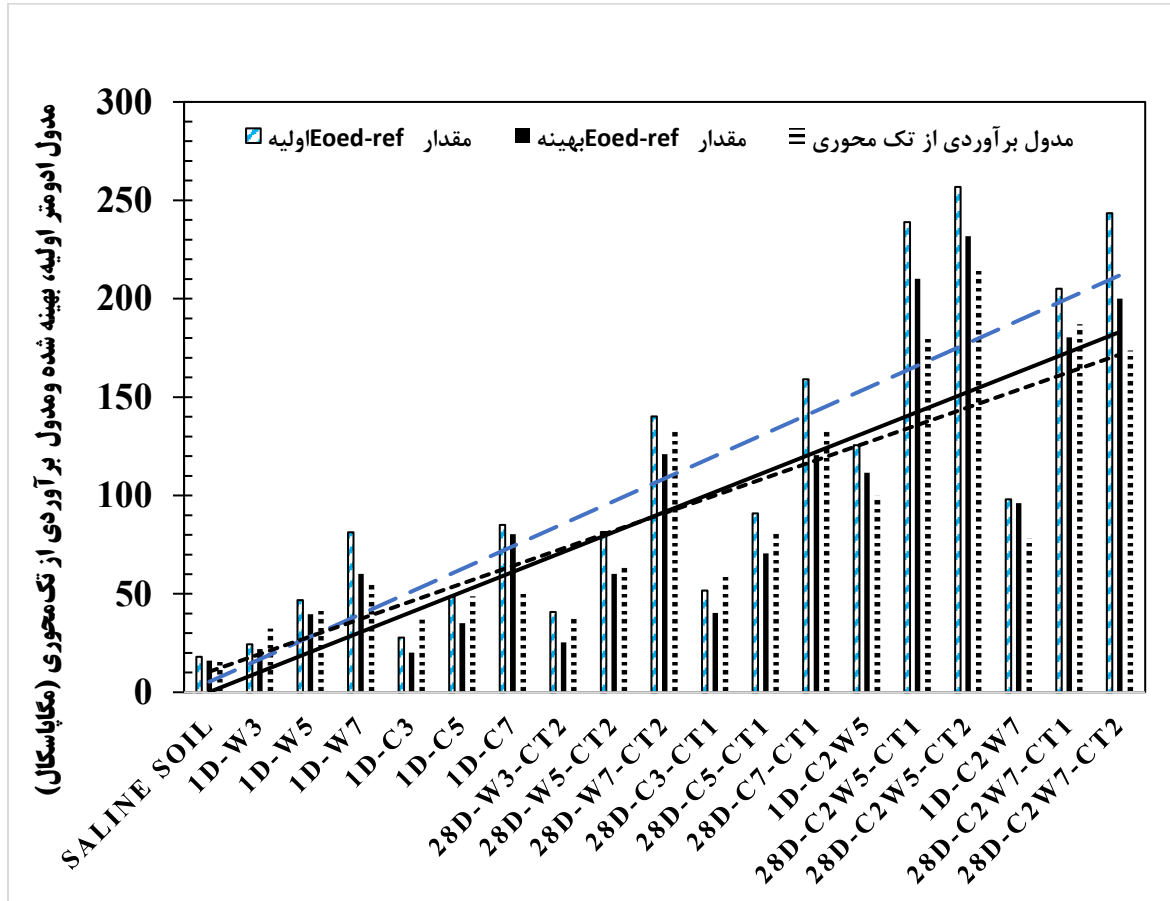
۳- Result

۱- Target

۲- Reference

تک محوری استفاده گردید. نتایج به شرح شکل ۴ ارائه گردیده است که نشان دهنده همخوانی قابل قبول داده‌های بهینه شده با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

از طرفی، به دلیل اینکه برای تعیین پارامترهای اولیه مدل از نتایج تست ادومتر استفاده شد، برای ارزیابی اولیه و صحت‌سنجی نتایج پارامترهای حاصله برای مدل خاک سخت‌شونده کرنش کوچک (بهینه‌سازی شده) از کنترل آن با مدول الاستیسیته حاصل از منحنی‌های آزمون

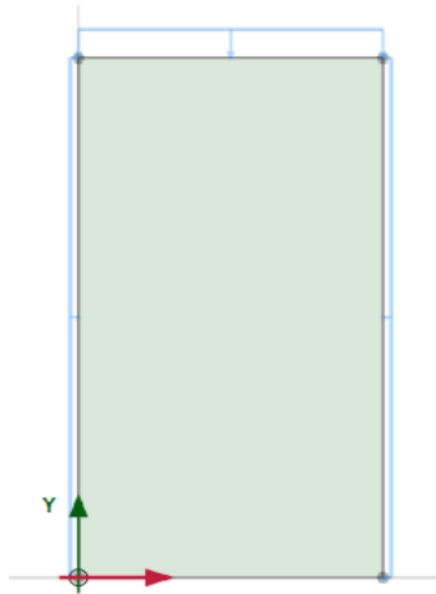


شکل ۴. صحت‌سنجی پارامتر E_{oed}^{ref}

صورت دوبعدی مدل گردید. لازم به ذکر است که با توجه به نوع مدل و ابعاد کوچک نمونه، استفاده از مدل سه‌بعدی برای این کار مد نظر قرار نگرفت و مدل دوبعدی کفایت لازم را دارد. هندسه مدل در شکل ۵ ارائه شده است. مشخصات مصالح، بر حسب مقادیر بهینه‌شده حاصله برای پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده کرنش کوچک که در جدول ۴ ارائه شده است، برای هر کدام از مصالح، اعم از خاک نمکی پایه و نمونه‌های تثبیت‌شده، به نرم‌افزار معرفی شد.

بر اساس توصیه هوانگ (۱۹۹۲) و AASHTO (۱۹۸۹) در T274-82، بارگذاری مطابق ترکیب بارهای مورد نیاز برای آزمون آزمایشگاهی سه‌محوری سیکلی انجام شده است (جدول ۵).

به منظور انجام محاسبات مربوط به پارامتر مدول برجهندگی، توسعه (ساخت) مدل مورد نیاز است که برای آن از بستر نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS استفاده شده است. به همین منظور، هندسه مدل بر اساس ابعاد نمونه مورد استفاده در آزمون آزمایشگاهی سه‌محوری سیکلی، برابر با $25 \times 12/5$ سانتی متر و به



شکل ۵. هندسه مدل در نرم افزار اجزای محدود PLAXIS

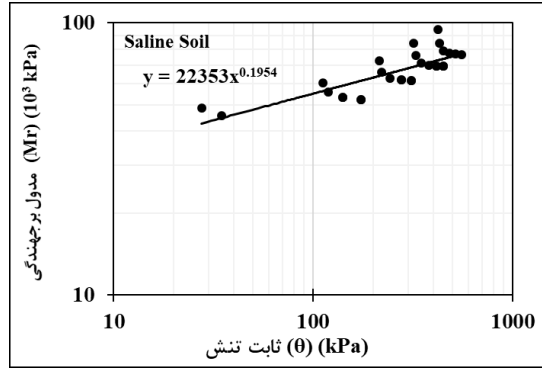
جدول ۵. پارگذاری مدل

تعداد سیکل	تنش انحرافی (kPa)	فشار محدود کننده (kPa)
200	69	35
200	69, 104	69
200	104, 138	104
200	6.9, 14, 35, 69, 104, 138	138
200	6.9, 14, 35, 69, 104, 138	104
200	6.9, 14, 35, 69, 104	69
200	6.9, 14, 35, 69, 104	35
200	6.9, 14, 35, 52, 69	6.9

۵. تجزیه و تحلیل نتایج

همانگونه که در بخش ۴-۱ اشاره گردید، مقدار پارامتر مدول برجهندگی از حاصل تقسیم تنش (بار) محوری یا σ_d بر کرنش برگشت پذیر یا ϵ_p حاصل می گردد. به همین منظور، در مقاله حاضر با توجه به مقادیر بهینه سازی شده حاصله برای پارامترهای مدل خاک سخت شونده کرنش کوچک که در جدول شماره ۴ ارائه گردید، با استفاده از بخش Soil Test نرم افزار PLAXIS آزمون سه محوری سیکلی برای هر ترکیب بار

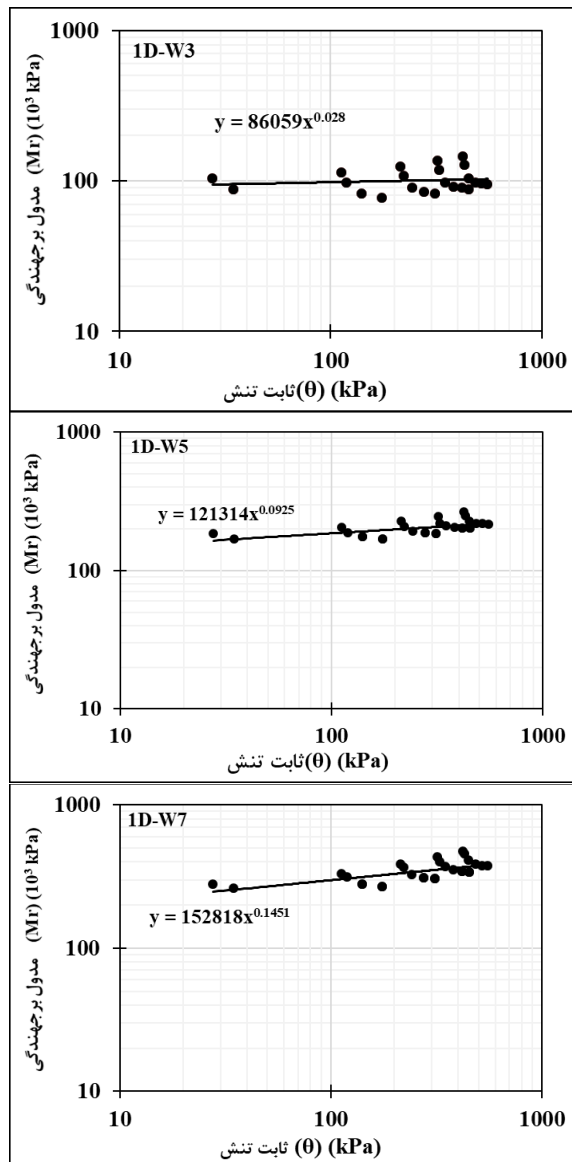
ارائه شده در جدول ۵ و هر آزمون به تعداد ۲۰۰ سیکل رفت و برگشتی انجام و نتایج استخراج شد. سپس، برای هر ترکیب بار، از حاصل تقسیم تنش (بار) محوری یا σ_d بر کرنش برگشت پذیر یا ϵ_p مقدار مدول برجهندگی محاسبه گردید. در نهایت، برای هر نمونه، نتایج نسبت مدول برجهندگی به پارامتر θ یا ثابت تنش که مجموع تنش های اصلی و محدود کننده است ترسیم گردید. نتایج محاسبات پارامتر مدول برجهندگی برای خاک نمکی پایه مطابق شکل ۶ می باشد.



شکل ۶. مدول برجهندگی حاصل از مدل برای خاک نمکی پایه

نتایج محاسبات پارامتر مدول برجهندگی برای خاک نمکی تثبیت شده با درصد های مختلف پسماند کربناته، مطابق شکل

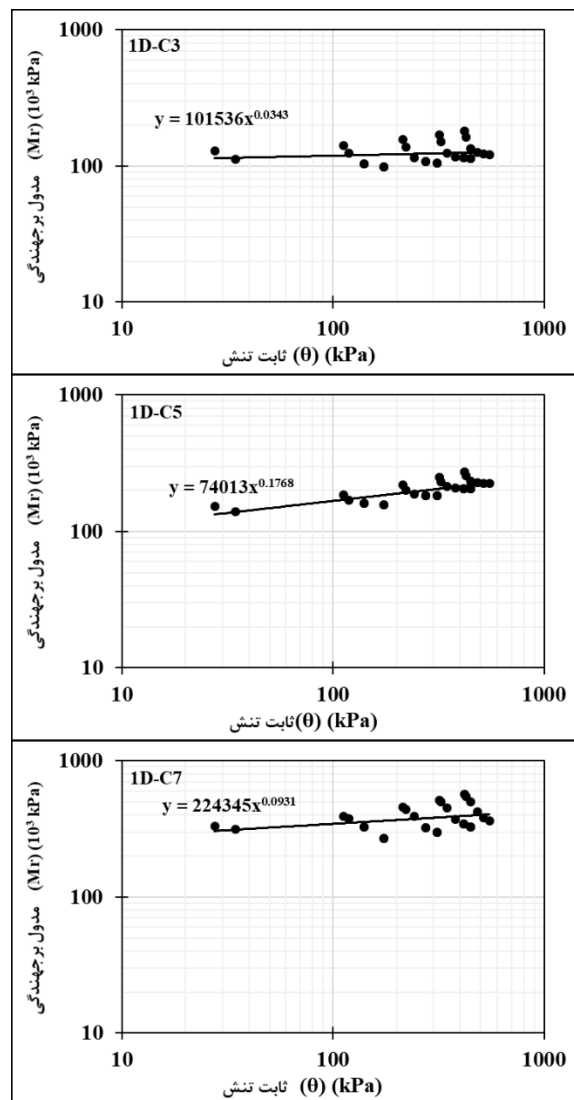
۷ می باشد.



شکل ۷. مدول برجهندگی حاصل از مدل برای خاک نمکی

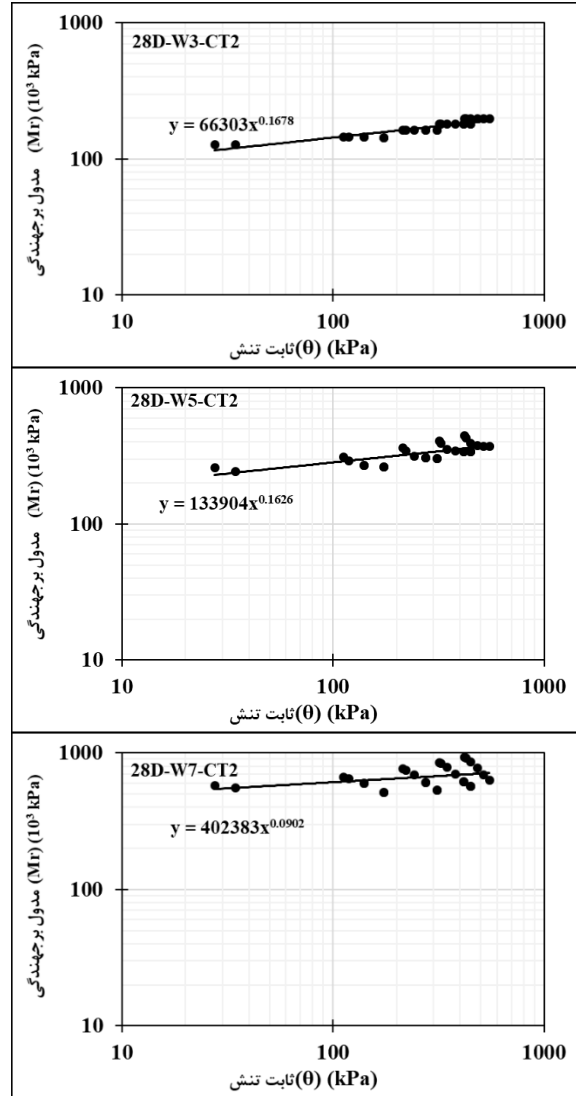
تثبیت شده با پسماند کربناته (W)

نتایج محاسبات پارامتر مدول برجهندگی برای خاک نمکی تثبیت شده با درصد های مختلف سیمان مطابق شکل ۸ می باشد.



شکل ۸. مدول برجهندگی حاصل از مدل برای خاک نمکی تثبیت شده با سیمان

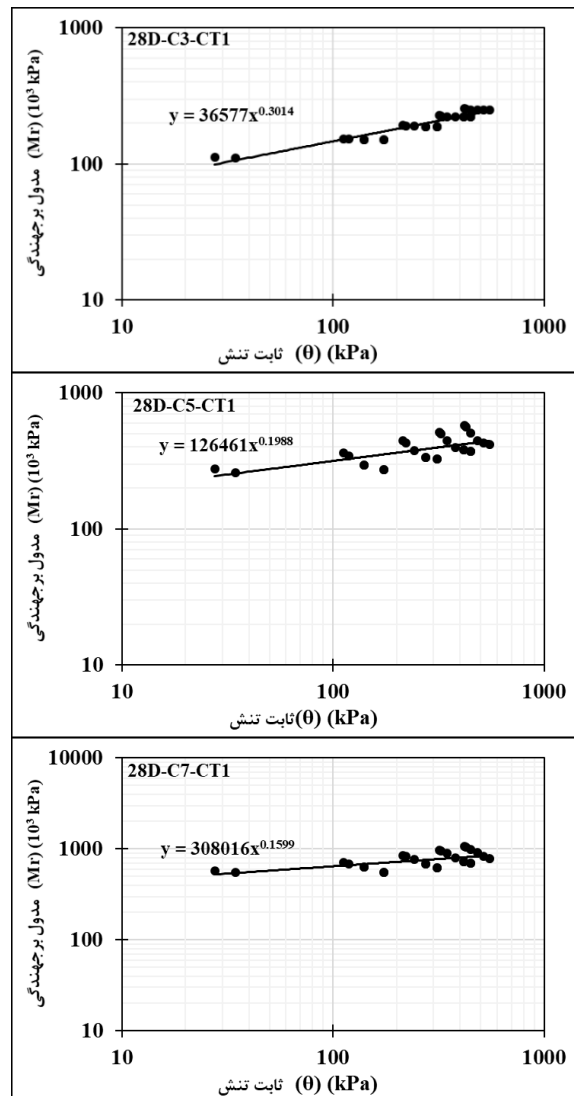
نتایج محاسبات پارامتر مدول برجهندگی برای خاک نمکی تثبیت شده با درصد های مختلف پسماند کربناته، به همراه عمل آوری شده به روش CT2 مطابق شکل ۹ می باشد.



شکل ۹. مدول برجهندگی حاصل از مدل برای خاک نمکی تثبیت شده با درصدهای مختلف پسماند کربناته عمل آوری شده به روش CT2

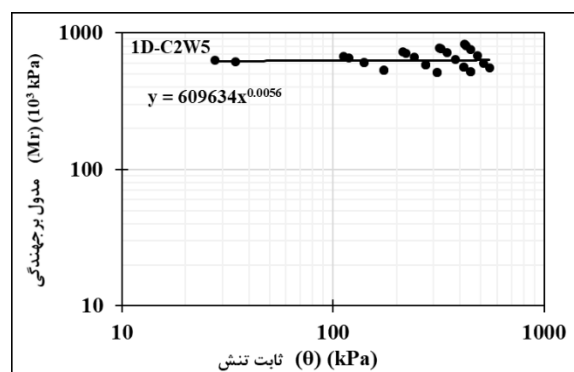
نتایج محاسبات پارامتر مدول برجهندگی برای خاک نمکی تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان، به همراه عمل آوری به روش CT1 مطابق شکل ۱۰ می باشد.

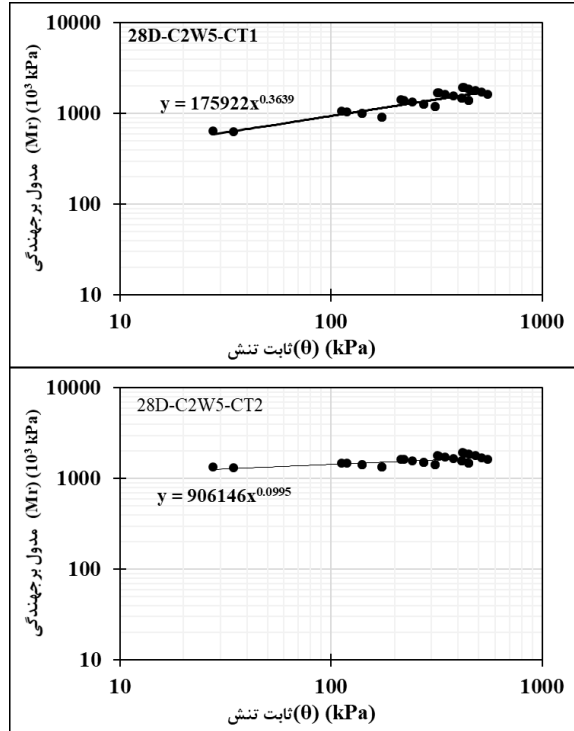
برآورد پارامترهای مقاومتی بستر نمکی تثبیت شده با سیمان و پسماند صنعتی به روش اجزای محدود



شکل ۱۰. مدول برجهنگی حاصل از مدل برای خاک نمکی تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان عمل‌آوری شده به روش CT1

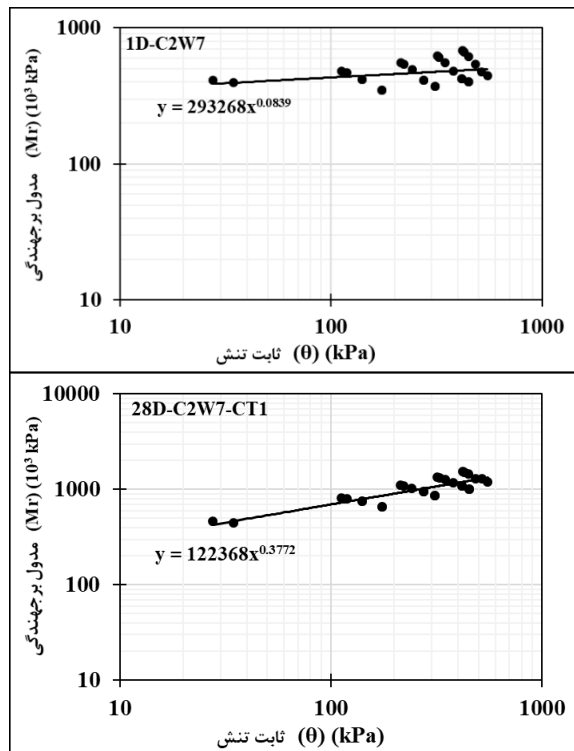
نتایج محاسبات پارامتر مدول برجهنگی برای خاک نمکی تثبیت شده با ۲ درصد سیمان و ۵ درصد پسماند، به همراه عمل‌آوری به روش‌های CT1 و CT2 مطابق شکل ۱۱ می‌باشد.



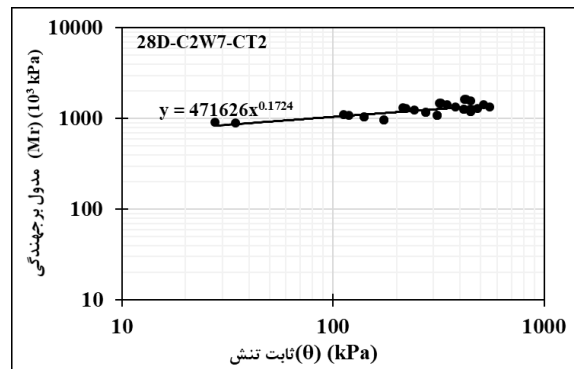


شکل ۱۱. مدول برجهندگی حاصل از مدل برای خاک نمکی تثبیت شده با ۲ درصد سیمان و ۵ درصد پسماند و عمل آوری شده به روش های CT1 و CT2

نتایج محاسبات پارامتر مدول برجهندگی برای خاک نمکی تثبیت شده با ۲ درصد سیمان و ۷ درصد پسماند، به همراه عمل آوری به روش های CT1 و CT2 مطابق شکل ۱۲ می باشد.



برآورد پارامترهای مقاومتی بستر نمکی تثبیت شده با سیمان و پسماند صنعتی به روش اجزای محدود



شکل ۱۲. مدول برجهندگی حاصل از مدل برای خاک نمکی تثبیت شده

با ۲ درصد سیمان و ۷ درصد پسماند و عمل آوری شده به روش های CT1 و CT2

نتایج تجمیعی مدل سازی مدول برجهندگی نمونه های خاک نمکی پایه و تثبیت شده به روش های مورد بحث، در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج تجمیعی مدل سازی مدول برجهندگی نمونه های خاک نمکی پایه و تثبیت شده

نام نمونه	برازش			Mr (kPa)
	k_1	k_2	R^2	
Saline Soil	22353	0.1954	65.56	54971.28
1D-W3	86059	0.028	1.72	97903.07
1D-W5	121314	0.0925	33.78	185742.3
1D-W7	152818	0.1451	43.44	298108.6
1D-C3	101536	0.0343	2.34	118910.5
1D-C5	74013	0.1768	59.96	167073.7
1D-C7	224345	0.0931	10.99	344442.2
1D-C2W5	609634	0.0056	0.8	625560.3
1D-C2W7	293268	0.0839	10.39	431583.3
28D-W3-CT2	66303	0.1678	86.25	143593
28D-W5-CT2	133904	0.1626	56.36	283135
28D-W7-CT2	402383	0.0902	14.1	609592.5
28D-C3-CT1	36577	0.3014	90.67	146557.5
28D-C5-CT1	126461	0.1988	43.67	315905.1
28D-C7-CT1	308016	0.1599	37	643240.3
28D-C2W5-CT1	175922	0.3639	81.17	939983.3
28D-C2W5-CT2	906146	0.0995	43.22	1432842
28D-C2W7-CT1	122368	0.3772	76.33	695132.9
28D-C2W7-CT2	471626	0.1724	56.05	1043272

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad (7)$$

که در آن θ مجموع تنش های اصلی محوری و محدودکننده است:

نتایج مدل سازی نشان داد که پارامتر مدول

برجهندگی از یک تابع نمایی تبعیت می کند (مطابق رابطه

۱) که متغیر مستقل آن θ و متغیر وابسته، مدول

برجهندگی (M_r) می باشد:

Error محاسبه شده (جدول ۷)، ضریب k_1 از رابطه (۹) قابل محاسبه است:

$$\ln(k_1) = a \ln(E_{50}^{ref}) + b\gamma + c \quad (9)$$

که در آن $\gamma = 10^5 \cdot \gamma_{0.7}$ می باشد و ضریب k_2 رابطه معنی داری با پارامترهای سختی سکانتی مرجع (E_{50}^{ref}) و مدول برشی مرجع در کرنش های خیلی کوچک ($\epsilon < 10^{-6}$) (G_0^{ref}) دارد و از رابطه (۱۰) به دست می آید:

$$k_2 = dE_{50}^{ref} + eG_0^{ref} + f \quad (10)$$

مقادیر پارامترهای a, b, c, d, e, f در جدول ۷ ارائه شده است.

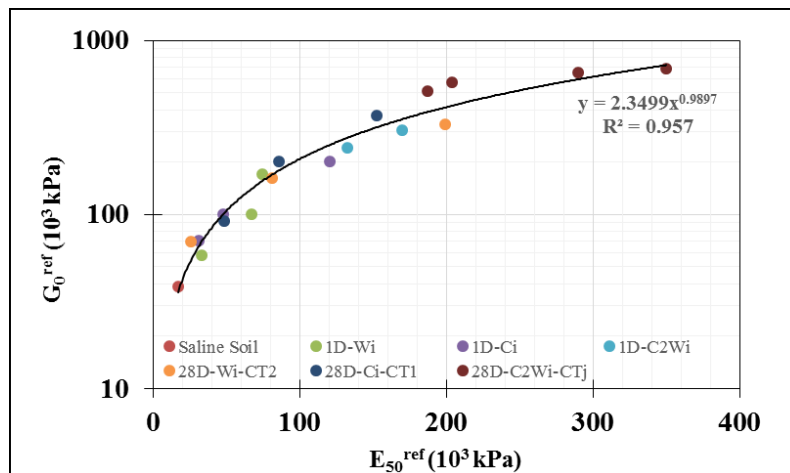
$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3 \quad (8)$$

که σ_1 تنش اصلی محوری، σ_3 تنش اصلی محدودکننده و σ_d تنش انحرافی ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) است. ضرایب k_1 و k_2 به پارامترهای مدل وابسته اند. مطابق تحلیل های آماری این مقاله، ضریب k_1 وابستگی معنی داری با پارامترهای سختی سکانتی مرجع (E_{50}^{ref}) و کرنش برشی آستانه ($\gamma_{0.7}$) دارد. با استفاده از تحلیل رگرسیونی چندمتغیره و با توجه به مقادیر پارامترهای Standard, P-Value, t stat و Significance F

جدول ۷. نتایج تحلیل رگرسیونی چندمتغیره

t Stat	P-Value	Specific Error	مقادیر محاسبه شده برای متغیر	متغیرها	ضریب k
5.31	10^{-5}	0.146	0.775507	a	k_1
2.12	0.0497	0.33	0.698997	b	
-1.38	0.185	2.96	-4.09644	c	
-2.49	0.024	10^{-7}	10^{-6}	d	k_2
2.88	0.011	10^{-7}	10^{-6}	e	
27.9	10^{-15}	0.0409	1.144	f	

همچنین، رابطه پارامترهای سختی سکانتی مرجع (E_{50}^{ref}) و مدول برشی مرجع در کرنش های خیلی کوچک ($\epsilon < 10^{-6}$) (G_0^{ref}) برای استفاده در مدل، در منحنی شکل ۱۳ ارائه شده است.

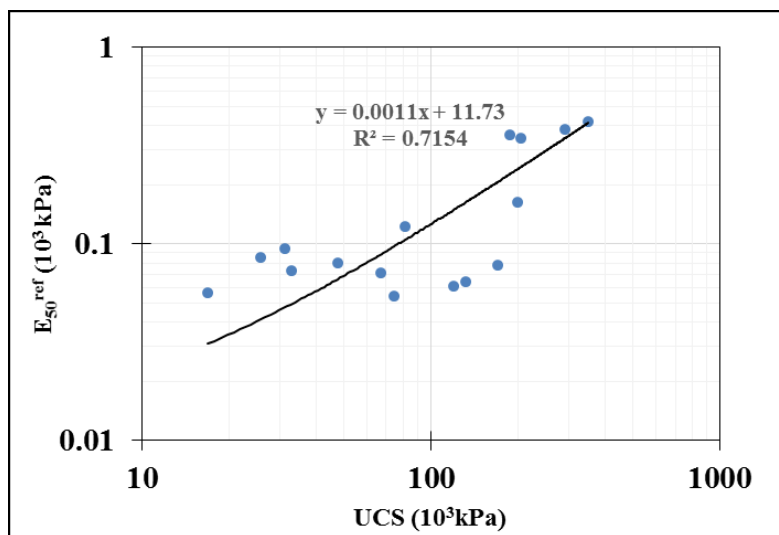


شکل ۱۳. رابطه پارامترهای E_{50}^{ref} و G_0^{ref}

به ضریب برجهندگی در آیین نامه روسازی اسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) را با رابطه (۱۱) ارائه نموده است که نتایج بسیار محافظه کارانه تری نسبت به دیگر محققین به دست می‌دهد. رابطه حاصل از این تحقیق، مقدار ضریب برجهندگی برحسب نسبت باربری کالیفرنیا را به طور میانگین، ۱/۶۲ برابر بیشتر از این نشریه به دست می‌دهد (رابطه ۱۲).

برای محاسبه E_{50}^{ref} از رابطه آن با نتایج آزمون مقاومت فشاری محدود نشده تک محوری (UCS) استفاده شد (شکل ۱۴).

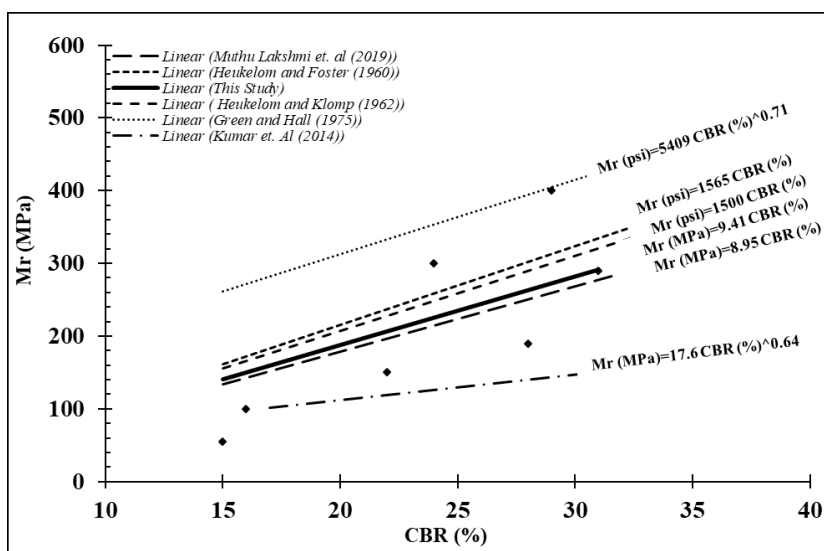
در انتها، با استفاده از نتایج مدول برجهندگی حاصل از مدل سازی و آزمون‌های CBR انجام شده در آزمایشگاه، رابطه این دو پارامتر مطابق شکل ۱۵ ارائه می‌گردد. همچنین، تبدیل پارامتر نسبت باربری کالیفرنیا



شکل ۱۴. رابطه پارامترهای UCS و E_{50}^{ref}

$$Mr(MPa) = 29.556 CBR(\%)^{0.366} \quad (11)$$

$$Mr(MPa) = 9.41 CBR(\%) \quad (12)$$



شکل ۱۵. رابطه پارامترهای نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و مدول برجهندگی (Mr) حاصل از مدل و مقایسه با نتایج دیگر پژوهشگران

۶. جمع بندی و نتیجه گیری

برآورد مقادیر پارامتر ضریب برجهندگی، به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای مقاومتی طراحی بستر راه، منوط به استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی است که نیاز به صرف هزینه و زمان قابل توجه دارد. در این مقاله، اثر بارهای رفت و برگشتی ترافیکی روی مصالح بستر نمکی و نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و یک نوع پسماند کربناته، با مدل‌سازی پارامتر ضریب برجهندگی در محیط اجزای محدود، مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که با توجه به ماهیت بارگذاری ترافیکی و نوع آزمون، مدل رفتاری خاک سخت‌شونده کرنش کوچک بهترین نتایج را به دست می‌دهد.

نتایج آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) نشان داد که عملیات تثبیت با ۳، ۵ و ۷ درصد پسماند W مقدار پارامتر نسبت باربری کالیفرنیا را به طور متوسط حدود ۵۳ درصد نسبت به خاک نمکی پایه افزایش می‌دهد که ناشی از خاصیت پرکنندگی پسماند W و افزایش قفل‌وبست‌های داخلی ذرات خاک نمکی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌شود و در نهایت، CBR نمونه‌های تثبیت‌شده بدین شیوه نیز رشد می‌کند. بیشترین افزایش CBR در ۵ درصد پسماند W رخ داد و مقادیر بیشتر پسماند موجب کاهش CBR شد. عمل‌آوری نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای مختلف پسماند W به روش CT2 به مدت ۲۸ روز نیز باعث

افزایش ۱۴ درصد به طور متوسط نسبت به نمونه‌های یک روزه شد. این تغییر ناشی از واکنش پوزولانی بین ذرات خاک نمکی و ذرات پسماند W ارزیابی می‌گردد. پس از انجام مراحل مدل‌سازی شامل تعیین مقادیر پارامترهای مدل، توسعه (ساخت) و اجرای مدل، از تحلیل نتایج مشخص گردید که پارامتر ضریب برجهندگی با مجموع تنش‌های اصلی محوری و محدودکننده رابطه‌ی نمایی دارد. همچنین، نشان داده شد که ضرایب مدل، رابطه معنی‌داری با پارامترهای سختی سکانتی مرجع (E_{50}^{ref}) و مدول برشی مرجع در کرنش‌های خیلی کوچک ($\epsilon < 10^{-6}$) (G_0^{ref}) دارد. از طرفی، رابطه پارامترهای سختی سکانتی مرجع (E_{50}^{ref}) و مدول برشی مرجع در کرنش‌های خیلی کوچک ($\epsilon < 10^{-6}$) (G_0^{ref}) برای استفاده در مدل ارائه گردید. همچنین، رابطه پارامترهای سختی سکانتی مرجع (E_{50}^{ref}) با نتایج آزمون مقاومت فشاری محدودنشده تک‌محوری (UCS) ارائه شد. در نهایت، رابطه مدول برجهندگی حاصل از مدل‌سازی و آزمون‌های CBR آزمایشگاهی نیز به دست آمد. مقایسه نتایج این تحقیق با دیگر پژوهشگران نشان داد که همبستگی ارائه شده برای CBR و ضریب برجهندگی، در محدوده متوسط قرار دارد و این پارامتر را به طور میانگین، ۱/۶۲ برابر بیشتر از رابطه ارائه شده در نشریه ۲۳۴ به دست می‌دهد.

۷. مراجع

- Iran Highway Asphalt Paving Code, No. 234. 2013. Asphalt Institute of Iran. (In Persian).
- AASHTO T307-99. 2007. "Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials". Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing, Washington, D. C.
- ASTM D422-63(2007)e2. 2016. "Standard test method for particle-size analysis of soils (withdrawn 2016)".
- ASTM D2166/D2166M-16. 2016. "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil".
- Budhu, M. 2020. "Soil mechanics and foundations". 3rd edition, New York: Wiley, 761 p.
- Chen, R. P., Zhang, P. K., Xin, Z., Z. Q., Liu, Y. and Wu, H. N. 2019. "Prediction of maximum surface settlement caused by earth pressure balance (EPB) shield tunneling with ANN methods". Soils Found., 59(2), 284-295.
- Dahnke, W. C. and Whitney, D. A. 1988. "Measurement of soil salinity". Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region, 499: 32-34.
- Ghanbarian, M. A. 2016. "Structural analysis of the Konarsiah and the Mangerak salt domes and its influence in ground water contamination, Zagros foreland folded belt, SW Iran". Int. J. Environ. Sci., 7(1): 70-82. <https://doi.org/10.6088/ijes.7007>

- Ghorbani, A. and Hasanzadehshooiili, H. 2018. "Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; Application to the deep soil mixing". *Soils Found.*, 58(1): 34-49.
- Ghorbani, B., Sadrossadat, E., Bazaz, J. B. and Oskooei, P. R. 2018. "Numerical ANFIS-based formulation for prediction of the ultimate axial load bearing capacity of piles through CPT data". *Geotech. Geol. Eng.*, 36: 2057-2076.
- Ghorbani, B., Arulrajah, A., Narsilio, G., Horpibulsuk, S. and Bo, M. W. 2020. "Development of genetic-based models for predicting the resilient modulus of cohesive pavement subgrade soils". *Soils Found.*, 60(2): 398-412. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.010>
- Green, J. L. and Hall, J. W. 1975. "Non-destructive vibratory testing of airport pavement: Experimental tests results and development of evaluation methodology and procedure". FAA-RD-73-205, Federal Aviation Administration, Washington D.C.
- Hajj, E. Y., Thavathurairaja, J., Stolte, S., Sebaaly, P. E., Piratheepan, M. and Motamed, R. 2018. "Resilient modulus prediction models of unbound materials for Nevada". Technical Report, Nevada Department of Transportation.
- Heukelom, W. and Foster, C. R. 1960. "Dynamics Testing of Pavements". ASCE, J. Struct. Div., 86(1).
- Heukelom, W. and Klomp, A. J. G. 1962. "Dynamic testing as a means of controlling pavement during and after construction". Proceedings of the 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, Ann Arbor, Michigan, 20-24 August 1962, pp. 667-685.
- Janbu, N. 1963. "Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests". Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ECSMFE), Wiesbaden, 1: 19-25.
- Jayawardana, P., Thambiratnam, D. P., Perera, N., Chan, T. and De Silva, G. S. 2019. "Use of artificial neural network to evaluate the vibration mitigation performance of geofoam-filled trenches". *Soils Found.*, 59: 874-887.
- Keymanesh, M. R., Falamaki, A. and Ghodrati, H. 2022. "Feasibility study of petrochemical waste and cement usage for saline road subgrade stabilization". *Baltic J. Road Bridge Eng.*, 17(2): 185-212. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2022-17.565>
- Kumar, P., Dilip, D. and Babu, G. L. S. 2014. "Critical appraisal of correlations between CBR and subgrade modulus". *J. India Roads Congress*, pp. 15-23.
- Muthu Lakshmi, S., Ragapriya, M., Sindhoora, K. and Udhayatharini, N. 2019. "Establishment of correlation between CBR and resilient modulus of subgrade". *SSRG Int. J. Civ. Eng.*, 6(5): 44-49. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V6I5P107>
- Puppala, A. J., Mohammad, L. N. and Allen, A. 1996. "Engineering behavior of lime-treated Louisiana subgrade soil". *Transport. Res. Record*, 1546: 24-31.
- Puppala, A. J., Griffin, J. A., Hoyos, L. R. and Chomtid, S. 2004. "Studies on sulphate-resistant cement stabilisation methods to address sulphate-induced soil heave". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(4): 391-402. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(391\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(391))
- Sadrossadat, E., Heidariapanah, A. and Ghorbani, B. 2018. "Towards application of linear genetic programming for indirect estimation of the resilient modulus of pavements subgrade soils". *Road Mater. Pavement Design*, 19: 139-153.
- Schanz, T. 1998. "On the modeling of the mechanical behavior of friction materials". Communication 45 of the Institute of Geotechnics, University of Stuttgart.
- Seed, H., Mitry, F., Monismith, C. and Chan, C. 1967. "Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated-load tests". NCHRP Report.
- Slessarev, E. W., Lin, Y., Bingham, N. L., Johnson, J. E., Dai, Y., Schimel, J. P. and Chadwick, O. A. 2016. "Water balance creates a threshold in soil pH at the global scale". *Nature*, 540(7634): 567-569. <https://doi.org/10.1038/nature20139>
- Talbot, C. J. 1990. "Allochthonous salt spreading". In Symposium on Diapirism with Special Reference to Iran, pp. 507-510.
- Witczak, M. and Uzan, J., 1988. "The universal airport pavement design system". Report I of V: Granular Material Characterization, Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, MD.
- Xue, L., Liu, G., Zhang, Y., Meng, T. and Zhan, L. 2021. "Estimation of resilient modulus of cement-treated construction and demolition waste with performance-related properties". *Constr. Build. Mater.*, 283: 122107. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122107>