

Evaluation of the liquefaction of silty fine-grained materials using the method based on strain energy (case study of Sungun copper tailings dam)

Mahmood Abdollahi¹, Jafar Bolouri Bazaz^{2*} and Ali Akhtarpour³

- 1- PhD student in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

When waste storage dams are used to store millions of tons of waste materials and a large volume of water or hazardous liquid, the sensitivity of different communities to the failure and destruction of such structures in front of earthquake vibrations is felt more strongly. USCOLD's report shows that in recent years, about 185 such incidents have occurred in tailings storage dams and have caused a lot of environmental concerns. The mechanism of dam failures caused by earthquakes in tailings ponds is mainly due to the liquefaction of tailings sands. As a case study, this article examines the effect of seismic loads on the pure silt used in the tailings dam in northwest Iran. Cyclic tests were performed under different initial static shear stresses using an automatic cyclic triaxial system. These materials are supplied from the Sungun copper mine located in the northwest of Iran. In this research, undrained compressive tests with the same relative densities with different effects of average effective stress and the effect of the primary static shear stress parameter on the mentioned materials under cyclic loading conditions have been used. In this study, cyclic tests were performed using the strain energy approach to evaluate the capacity energy and residual pore water pressure. The results of cyclic experiments were used to evaluate capacity energy and residual pore pressure based on the strain energy approach. Cyclic tests on the samples were performed considering the shear amplitude of 0.75% and frequency of 0.3 Hz. It is shown that the most energy dissipation occurs at the first cycle possessing the highest stiffness. For $\alpha = 0$, energy density increased from 474 J/m³ to approximately 1.4 times, however, when $\alpha = 0.4$, a stronger growth rate was measured from 682 J/m³ to approximately 7.5 times.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 October 2023
Revise Date: 15 December 2023
Accept Date: 08 January 2024

Keywords:

triaxial
initial static shear stress
liquefaction
strain energy
silty soil

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.417683.3226>

*Corresponding author: Jafar Bolouri Bazaz
Email address: bolouri@um.ac.ir

ارزیابی روانگرایی مصالح ریزدانه سیلتی با استفاده از روش مبتنی بر انرژی کرنشی

(مطالعه موردی سد باطله مس سونگون)

محمود عبدالمهدی^۱، جعفر بلوری بزاز^{۲*} و علی اخترپور^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

هنگامی که از سدهای ذخیره باطله برای ذخیره میلیون‌ها تن مواد باطله و حجم زیادی آب یا مایع خطرناک استفاده می‌شود، حساسیت جوامع مختلف در مقابل شکست و تخریب چنین سازه‌هایی در مقابل ارتعاشات حاصل از لرزه‌خیزی، شدیدتر احساس می‌گردد. گزارش USCOLD نشان می‌دهد که در طی سال‌های اخیر در حدود ۱۸۵ حادثه از این قبیل در سدهای ذخیره باطله اتفاق افتاده است و نگرانی‌های زیاد زیست‌محیطی را فراهم نموده است. سازوکار خرابی‌های سد ناشی از زلزله در حوضچه‌های مواد باطله عمدتاً به علت روانگرا شدن ماسه‌های مواد باطله است. این مقاله به‌عنوان مطالعه موردی به بررسی اثر بارهای سیکی بر سیلت خالص مورد استفاده در سد باطله در شمال غرب ایران می‌پردازد. آزمایش‌های سیکی تحت تنش‌های برشی استاتیکی اولیه مختلف با استفاده از یک سیستم سه محوری سیکی خودکار انجام شد. این مصالح از معدن مس سونگون واقع در شمال غرب ایران تأمین می‌شود. در این پژوهش از آزمایش‌های فشاری زهکشی نشده با تراکم‌های نسبی یکسان با اثرات مختلف فشار محصورکننده و نیز تأثیر پارامتر تنش برشی استاتیکی اولیه بر روی مصالح مذکور در شرایط بارگذاری سیکی استفاده شده است. در این مطالعه، آزمایش‌های سیکی با استفاده از رویکرد انرژی کرنشی برای ارزیابی انرژی ظرفیت و فشار آب منفذی باقیمانده انجام شد. آزمایش‌های سیکی بر روی نمونه‌ها با در نظر گرفتن دامنه برشی ۰/۷۵ درصد و فرکانس ۰/۳ هرتز انجام شد. برای $\alpha = 0$ چگالی انرژی از $474 J/m^3$ به میزان تقریباً ۱/۴ برابر افزایش یافت، با این حال زمانی که $\alpha = 0.4$ بود، نرخ رشد شدیدتری از $682 J/m^3$ به میزان تقریباً ۷/۵ برابر، اندازه‌گیری شد.

کلمات کلیدی: سه محوری، تنش برشی استاتیکی اولیه، روانگرایی، انرژی کرنشی، خاک سیلتی

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۲/۰۷/۰۹	۱۴۰۲/۰۹/۲۴	۱۴۰۲/۱۰/۱۸	۱۴۰۲/۱۰/۱۸	۱۴۰۳/۰۶/۳۱	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.417683.3226
*نویسنده مسئول:		جعفر بلوری بزاز			
پست الکترونیکی:		bolouri@um.ac.ir			

۱- مقدمه

یکی از سازه‌های حیاتی که تحت بارگذاری لرزه‌ای در معرض شکست‌های گسترده قرار می‌گیرد، سدهای باطله^۱ می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که مشکلات سدهای باطله به طراحی و ساخت محدود نمی‌شود. در دوران بهره‌برداری از آنجایی که حاوی مقادیر زیادی مواد آلاینده هستند، در کنار جوامع انسانی به‌عنوان منبع آلودگی شناخته می‌شوند [۱]. در نتیجه عوامل مخربی مانند نشست، ناپایداری و مهم‌تر از همه زلزله و بارهای دینامیکی می‌تواند منجر به آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی شوند. شایان‌ذکر است که بر اساس گزارش auscold، زلزله علت اصلی خرابی سدهای باطله است. این گسیختگی ممکن است با روان شدن بخش‌هایی از بدنه سدهای باطله رخ دهد [۲]. روانگرایی^۲ یکی از پدیده‌های پیچیده درزمینه مهندسی ژئوتکنیک است که بیش‌تر در ماسه‌های سست اشباع و سیلت‌های غیر پلاستیک رخ می‌دهد. این پدیده در بسیاری از زلزله‌ها مانند Niigata در سال ۱۹۶۴، Kobe در سال ۱۹۹۵ و نیز Chi-Chi در سال ۱۹۹۹، عامل شکست و گسیختگی‌های شدید بوده است [۳].

محققین پایداری دینامیکی یک سد باطله بالادست^۳ را در دو تراز ارتفاعی مختلف، از جمله وضعیت فعلی و نیز ارتفاع مورد انتظار نهایی تاج سد را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در ارتفاع نهایی، قسمت اعظم بدنه و آبگیری سد دچار روانگرایی شده و سد ناپایدار خواهد بود [۴]. برخی از راه‌حل‌ها مانند زهکشی ستون شنی عمودی می‌توانند پتانسیل روانگرایی یک زمین نرم را کاهش دهند [۵].

روش‌های مختلفی از جمله آزمایش‌های برجا و روش‌های آزمایشگاهی جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی در طیف وسیعی از خاک‌ها وجود دارد. به عنوان مثال، بر اساس تطابق طیفی با یک طیف هدف، هانیندیا و همکاران [۶] تاریخچه زمانی مصنوعی زلزله را برای مطالعه روانگرایی یک زمین طبقه بندی شده ایجاد کردند و به این نتیجه رسیدند که پتانسیل روانگرایی با افزایش سختی و عمق خاک کاهش می‌یابد. نتایج آزمون نفوذ مخروط^۴ نیز می‌تواند برای تعیین پتانسیل روانگرایی به کار گرفته شود. برای مثال لطیفی و همکاران [۷] با استفاده از داده‌های CPT، مشکل روانگرایی را برای یک منطقه در مراکش با موفقیت تجزیه و تحلیل کردند. از دیدگاه ساختاری، پتانسیل روانگرایی یک زمین را می‌توان با توجه به ویژگی‌های فیزیکی ساختار زیرسطحی که بر اساس دو رویکرد ژئوفیزیکی نوآورانه، از جمله امواج سطحی ریلی و مقاومت‌های الکتریکی تعیین می‌شود، ارزیابی کرد [۸]. روش‌های مبتنی بر تنش و روش‌های کرنش بر پایه انرژی به‌عنوان دو روش آزمایش اصلی در ادبیات فنی شناخته می‌شوند [۹-۱۳]. با این حال، روش مبتنی بر انرژی کرنش^۵ یک روش نسبتاً مدرن برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک‌های سیلتی می‌باشد [۱۳-۱۶]. در این روش مقدار انرژی کرنشی مستهلک در واحد حجم خاک، به‌عنوان شاخص مفید برای بررسی رفتار چرخه‌ای و سیکلی ماسه‌ها معرفی شده است [۱۳]. چگالی انرژی کرنشی مستهلک شده، ناحیه تجمعی حلقه‌های تنش-کرنش برشی در مواد ژئومتریال است که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دارند. در سال‌های اخیر، بسیاری از محققین در مدل‌های خود نشان داده‌اند که همبستگی تجمعی فشار آب منفذی و چگالی انرژی کرنشی مستهلک شده وابستگی نسبی به مسیر تنش دارد [۱۳، ۱۷، ۱۸].

ارزیابی مقاومت روانگرایی و فشار آب منفذی^۶ ناشی از زلزله در خاک‌های غیر چسبنده موضوعی است که در میان مهندسان ژئوتکنیک از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. محققان متعددی پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها را از طریق روش‌های تجربی [۱۹، ۲۰]، عددی [۲۱، ۲۲] و تجربی [۱۹، ۲۳] بررسی کرده‌اند. تحقیقات تجربی متعددی در مورد مقاومت روانگرایی انجام و بینش قابل توجهی را در مورد این رفتار مشکل‌ساز زهکشی نشده خاک ارائه کرده‌اند. مقدار انرژی کرنش مستهلک در واحد حجم خاک که به‌عنوان چگالی انرژی یا واحد انرژی نیز شناخته می‌شود، به‌عنوان یک شاخص مفید برای بررسی رفتار سیکلی خاک‌ها معرفی شده است. چگالی انرژی کرنش

¹ Tailing Dams

² Liquefaction

³ upstream

⁴ Cone Penetration Test (CPT)

⁵ strain energy approach

⁶ Pore Water Pressure (PWP)

مستهلک شده، ناحیه محصور تجمعی حلقه‌های تنش- کرنش برشی است که معمولاً در مواد زمین‌شناسی تحت بارگذاری سیکلی تشکیل می‌شوند. مفهوم انرژی کرنش و کاربرد آن در مسائل مهندسی زلزله ژئوتکنیکی در چندین مرجع توضیح داده شده است [۱۵، ۱۷، ۱۸].

دوبری و همکاران [۲۴، ۲۵] مفهوم کرنش برشی آستانه حجمی (γ_{tv}) در ماسه‌ها را معرفی کردند و نشان دادند که وقتی دامنه کرنش برشی چرخه‌ای کمتر از γ_{tv} باشد، فشار آب منفذی اضافی ایجاد نمی‌شود. پاسخ چرخه‌ای خاک‌ها را با توجه به دامنه کرنش برشی به سه گروه طبقه‌بندی کرد. بر این اساس، خاک‌ها تحت دامنه‌های کرنش برشی (γ_c) زیر کرنش برشی آستانه خطی (γ_{tl}) به‌عنوان یک ماده الاستیک خطی رفتار می‌کنند [۲۶]. در این محدوده دامنه کرنش، اتلاف انرژی باید اساساً صفر باشد زیرا انرژی کرنش الاستیک پس از پایان بارگذاری چرخه‌ای به‌طور کامل بازیابی می‌شود. هنگامی که دامنه کرنش برشی بین کرنش‌های آستانه خطی و حجمی باشد، $\gamma_{tl} < \gamma_c \leq \gamma_{tv}$ سختی برشی خاک عملاً تجزیه‌ناپذیر است زیرا دامنه کرنش برشی هنوز برای تغییر دائمی ریزساختار خاک کافی نیست. برای خاک‌های دانه‌ای، مکانیسم غالب اتلاف انرژی، لغزش اصطکاکی در سطوح تماس دانه به دانه است. روانگرایی یک پدیده کرنش بزرگ است و بازآرایی قابل توجه ذرات و لغزش دانه‌ها در خاک روانگرا شده رخ می‌دهد. بر این اساس، اتلاف انرژی کرنش برای خاک‌های دانه‌ای تحت دامنه کرنش برشی کوچک‌تر از γ_{tv} ناچیز است. بنابراین، باید یک همبستگی معقول بین انرژی کرنش تلف شده و فشار آب منفذی تولید شده وجود داشته باشد زیرا هردوی آن‌ها عمدتاً زمانی که دامنه کرنش برشی بزرگ‌تر از γ_{tv} باشد، بسیج می‌شوند.

لیانگ Liang [۱۷] چندین آزمایش برشی پیچشی توخالی^۷ کنترل شده با دامنه‌های کرنش برشی بزرگ‌تر از γ_{tv} انجام داد و نشان داد که دامنه کرنش به‌سختی بر رابطه بین فشار منفذ اضافی و چگالی انرژی کرنش تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، محققان [۱۷، ۱۸] نشان دادند که همبستگی بین فشار آب منفذی اضافی و چگالی انرژی کرنش مستهلک شده، وابستگی ناچیزی به مسیر و الگوی بارگذاری (به‌عنوان مثال، تصادفی یا هارمونیک) نشان می‌دهد. بازاریار و جعفریان [۱۵] از یک پایگاه داده گسترده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی استفاده کردند و یک چارچوب شبکه عصبی قوی برای پیش‌بینی مقدار کل انرژی کرنش مستهلک شده مورد نیاز برای راه‌اندازی مایع‌گرایی، به نام انرژی ظرفیت (W_{liq}) ایجاد کردند. آن‌ها دریافتند که بین انرژی‌های ظرفیت به‌دست‌آمده از داده‌های آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی سازگاری معقولی وجود دارد.

مزایای بالقوه رویکرد انرژی کرنش، محققان را تشویق کرده است تا کاربرد آن را برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی بیشتر مطالعه کنند. رابطه منطقی بین انرژی کرنش تلف شده، تغییر شکل پلاستیک غیرقابل بازگشت و فشار منفذ باقیمانده، مبنایی را برای توسعه مدل‌های فشار منفذی مبتنی بر انرژی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی فراهم کرده است [۲۷-۳۰]. نعمت ناصر و شکوه [۱۲] اولین محققینی بودند که رابطه عملکردی بین چگالی انرژی کرنش انباشته شده خاک دانه‌ای و فشار منفذی ایجاد شده را ارائه کردند. پس از آن، چندین مدل فشار منفذی مبتنی بر انرژی بر اساس نتایج آزمایش‌های سیکلی توسعه یافتند. با این حال، اکثر این مدل‌های فشار منفذی فاقد تغییرات کافی در پارامترهای کلیدی مانند تراکم نسبی اولیه و فشار مؤثر محدودکننده^۸ هستند. گرین [۲۸] خلاصه‌ای از مدل‌های فشار آب منفذی مبتنی بر انرژی که قبلاً منتشر شده بود را ارائه کرد. چندین مدل در ارتباط با انرژی ظرفیت خاک بر اساس دامنه کرنش‌های برشی، و برخی از پارامترهای اولیه خاک بر اساس تعدادی از آزمایش‌های سیکلی و سانتریفیوژ آزمایشگاهی ارائه شده‌اند [۳۱-۳۳]. بسیاری از این روابط و مدل‌ها با انجام یک تحلیل رگرسیون خطی چندگانه حاصل شدند. برخی از معروف‌ترین مدل‌های انرژی ظرفیت خاک به همراه ضریب همبستگی مربوطه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

برای ارزیابی تأثیرات تنش برشی استاتیک اولیه (σ_3) و فشار محصور کننده، بسیاری از محققین طیف وسیعی از آزمایش‌ها را بر روی ماسه‌ها و ماسه‌های سیلتی [۳۴-۳۷] و مدل‌سازی به روش اجزا محدود^۹ برای ماسه اشباع انجام داده‌اند [۳۸]. علاوه بر این، ایرجی [۳۹] مدل فین-بایرن^{۱۰} را برای روانگرایی دیوارهای حائل اسکله و کنسولی تحلیل کرد. بارهای یکنواخت و سیکلی دو نوع بارگذاری مرسوم در مسائل مختلف ژئوتکنیکی هستند [۴۰]. مطالعات قبلی نشان داده است که تنش برش استاتیکی اولیه بر مقاومت برشی تحت بارگذاری

⁷ Hollow Cylindrical Torsional Shear

⁸ Effective Confining Pressure (σ'_{3c})

⁹ The finite element method (FEM)

¹⁰ Finn-Byrne Model

سیکلی کاملاً مؤثر است. لی و سید [۴۱] در سال ۱۹۶۷ توضیح دادند که هرچه نسبت تنش برشی استاتیکی اولیه^{۱۱} بیش‌تر اعمال شود، تنش برشی سیکلی بیش‌تری برای شروع روانگرایی موردنیاز است [۴۲]. علاوه بر این ویید و چرن [۴۳] نشان دادند که افزایش یا کاهش مقاومت سیکلی تحت اعمال تنش برشی استاتیکی اولیه کاملاً به دانسیته اولیه خاک و بزرگی تنش برشی اولیه بستگی دارد.

جدول ۱: مدل‌های مبتنی بر انرژی جهت ارزیابی روانگرایی

محققین	مدل انرژی ظرفیت	R	توصیف آزمایش‌ها
Figueroa et al., [32]	$\text{Log}(W) = 2.002 + 0.00477 \sigma'_0 + 0.0116 \text{Dr}$	0.968	27 torsional shear-controlled strain liquefaction tests on Reid Bedford sand
Liang [44]	$\text{Log}(W) = 2.062 + 0.0039 \sigma'_0 + 0.0124 \text{Dr}$	0.962	9 strain-controlled torsional triaxial experiments on Reid Bedford sand
Liang [44]	$\text{Log}(W) = 2.484 + 0.00471 \sigma'_0 + 0.00052 \text{Dr}$	0.997	13 strain-controlled torsional triaxial experiments on LSFD sand
Dief and Figueroa [45]	$\text{Log}(W) = 1.164 + 0.0124 \sigma'_0 + 0.0209 \text{Dr}$	0.971	30 centrifuge liquefaction tests on Nevada sand
Dief and Figueroa [45]	$\text{Log}(W) = 2.4597 + 0.00448 \sigma'_0 + 0.00115 \text{Dr}$	0.986	30 centrifuge liquefaction tests conducted at a scale of 60g's on Reid Bedford sand
Jafarian et al., [46]	$W_{\text{liq}} = 0.1363 \sigma'_0 (\text{Dr} / 100)^{4.925} + 5.375 \times 10^{-3} \sigma'_0$	0.8	37 strain-controlled triaxial and torsional shear stresses experiments on Toyoura sand

هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر بارهای لرزه‌ای بر روی سیلت خالص مورد استفاده در سد باطله مس سونگون واقع در شمال غرب ایران به‌عنوان مطالعه موردی می‌باشد. ایران از یک‌سو در منطقه لرزه‌خیز قرار دارد و از سوی دیگر سد باطله سونگون به روش بالادستی احداث شده است. در نتیجه مطالعه پتانسیل روانگرایی سیلت غیر پلاستیک اشباع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌منظور انجام این کار، آزمایش‌های سیکلی تحت تنش‌های برشی استاتیکی اولیه مختلف با استفاده از یک سیستم سه محوری سیکلی اتوماتیک انجام شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، مواد تأمین‌شده از معدن مس سونگون واقع در شمال غرب ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.

مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه سه محوری سیکلی تمام اتوماتیک انجام گرفت. برای شرایط سیکلی، آزمایش‌هایی بر روی سیلت‌ها با استفاده از روش انرژی کرنشی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها تغییرات چشمگیری را در مقدار انرژی کرنشی مستهلک‌شده موردنیاز برای روانگرایی با تغییرات تنش برشی استاتیکی اولیه نشان می‌دهد.

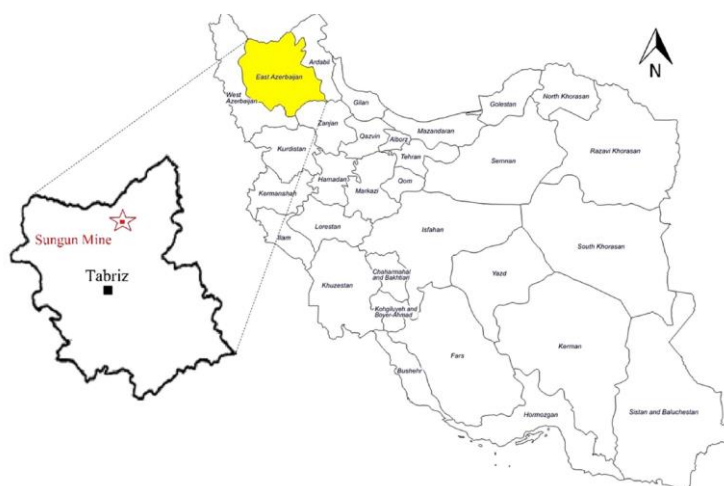
¹¹ initial static shear stress ratio (□□)



شکل ۱: محل قرارگیری معدن و سد باطله مس سونگون

۲- معرفی سد باطله و نمونه سازی

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش که بدان اشاره گردید، از مواد باطله سد مس سونگون به منظور انجام آزمایش‌های این مقاله مورداستفاده قرار گرفت. سد سونگون در آذربایجان شرقی و در شمال تبریز واقع شده است. از سال ۱۳۵۱ به بهره‌برداری از سنگ‌های با ارزش مس متناوباً انجام گرفته است. مجتمع مس سونگون به‌عنوان دومین معدن بزرگ ایران شناخته می‌شود. مواد باطله تولیدی در زمان حدود ۳۰ سال در حدود ۳۸۰ میلیون تن خواهد بود، از یک سد باطله که به روش بالادست احداث شده است به‌منظور ذخیره این مواد حاصل از فرآوری کارخانه مورداستفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که این سد در نزدیکی حوضه آبریز رودخانه زرنکاب قرار گرفته است. شکل ۲ موقعیت سد باطله مس سونگون را نشان می‌دهد. خاک مورداستفاده در این تحقیق، سیلت غیر پلاستیکی تأمین شده از معدن مس سونگون واقع در شمال غرب ایران است.



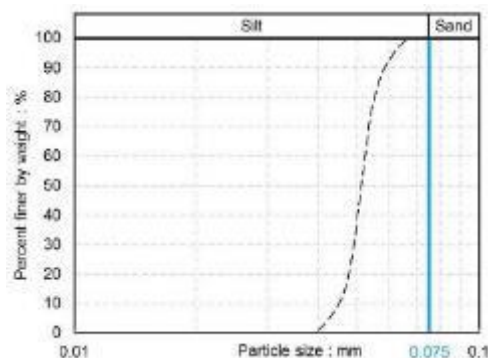
شکل ۲: موقعیت جغرافیایی سد مس سونگون

با انجام آزمایشات اولیه از قبیل، دانه‌بندی، حدود اتربرگ و نیز چگالی جامد دانه‌های خاک مطابق براساس استانداردهای ASTM در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه فردوسی انجام و خلاصه‌ای از پارامترهای ژئوتکنیکی مربوط به مواد باطله سد سونگون که در انجام

آزمایش‌های پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، در جدول ۲ آورده شده است. همچنین منحنی توزیع اندازه دانه‌ها نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس طبقه‌بندی متحد، نام این مواد باطله ML بوده که خاک سیلتی با خاصیت خمیری کم است.

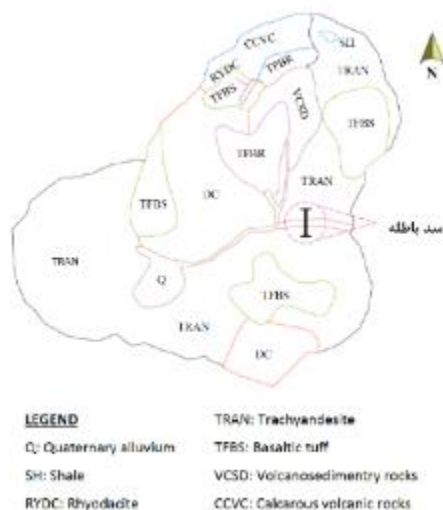
جدول ۲: پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح مصرفی سد باطله

USCS	ML	LL (%)	25	Gs	2.70 – 2.73
Gs	2.71	PI (%)	3	γ_{dmin}	12.36
SL (%)	18	% < 0.075 mm	100	γ_{dmax}	15.46
PL (%)	22	D50 (mm)	0.051	ϕ'	11.2 – 36.7



شکل ۳: منحنی توزیع دانه‌بندی مواد باطله (ML)

معدن مس سونگون یک معدن روباز واقع در ناحیه شمال غربی ایران (۴۶° ۴۲' N and ۳۸° E) و در نزدیکی رودخانه ارس است (شکل ۴). کانی‌های فلزی به طور گسترده در سازندهای زمین شناسی حوضه آبریز ارس در ایران وجود دارند. معدن مس سونگون از نظر صنعتی و ویژگی‌های زمین شناسی اهمیت بالایی در منطقه مذکور دارد. این معدن از سال ۱۳۶۹ فعال است و دارای ذخایری تقریباً معادل ۸۰۰ میلیون تن سنگ مس با عیار متوسط ۰/۶۷٪ می باشد، به طوری که تولید حداقل ۳۸۰ میلیون تن باطله مس طی ۲۵ سال آینده برآورد می شود. از نظر زمین شناسی، منطقه مورد مطالعه در پهنه آتشفشانی آلیگوسن قرار دارد. این منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی کالک آلکالین، عمدتاً تراکی اندزیت، داسیت و آندزیت با گدازه بازالتی است. نهشته‌های مس پورفیری سونگون در سنگ‌های تراکی اندزیت که حاوی لاتیت پورفیری خاکستری کم رنگ با هوازگی متوسط تا شدید و دارای مقاومت متوسط تا بالا است، یافت می شود. رنگ مناطق تحت تأثیر نفوذ آب زیرزمینی به قهوه‌ای تغییر می کند و با افزایش عمق، آثاری از کانی‌های سولفیدی (از جمله پیریت و کالکوپیریت) در مصالح یافت می شود.



شکل ۴: نقشه ساده شده سنگ شناسی معدن مس سونگون

به منظور بررسی بهتر کانی‌های تشکیل دهنده نمونه‌های این پژوهش، بر روی سیلت‌های سد باطله مس سونگون آزمایش اشعه ایکس^{۱۲} انجام و نتایج آن در شکل ۵ و نیز جدول ۳ که شامل نام ترکیب، درصد هر ماده معدنی و فرمول شیمیایی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل و جدول مذکور مشاهده می‌شود یلیکا) و به دنبال آن آلومینیوم و آهن به ترتیب بیش‌ترین درصد وزنی را در بین عناصر تشکیل دهنده مواد سد باطله وجود دارد. کانی کوارتز با درصد وزنی تقریباً ۴۴ درصد، بیش‌ترین درصد حضور را در بین کانی‌های تشکیل دهنده خاک سیلتی مورد مطالعه قرار دارد.



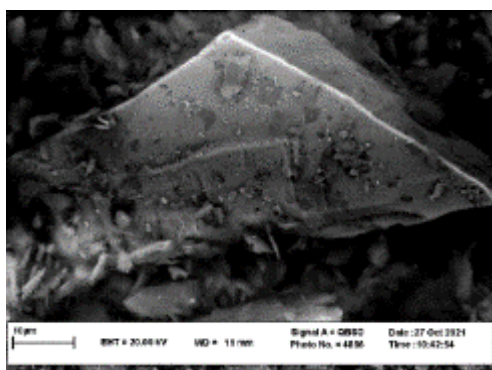
شکل ۵: الگوی آزمایشی اجزای سیلت سونگون

جدول ۳: نتایج آزمایش کمی X-RD

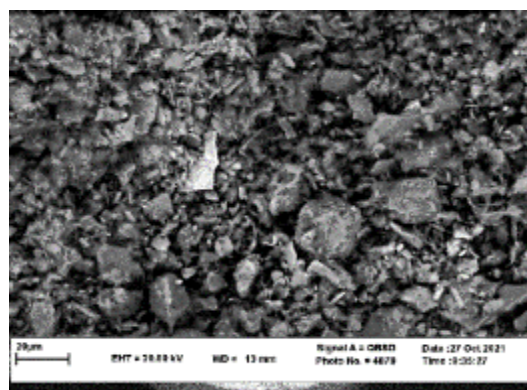
Compound	Percent (%) (By atomic weight)	Formula
Si O2	43.9	O2 Si
Illite	34.3	Al2 H2 K O12 Si4
Kaolinite	8.7	Al2 H4 O9 Si2
Iron (II) duo-disulfide Marcasite	6.1	Fe S2
Unidentified peak area	5.4	

¹² X-ray powder diffraction (X-RD)

عکس‌های بزرگ‌نمایی شده^{۱۳} نمونه سیلت سد باطله مس سونگون در شکل ۶ با دو بزرگ‌نمایی مختلف (۲۰ میکرومتر و ۱۰ میکرومتر) نشان داده شده است. عکس‌های بزرگ‌نمایی شده، شکل ذرات زاویه‌ای را نشان می‌دهند و سطح ذرات نسبتاً صاف به نظر می‌رسد. شکل ذرات به عنوان یکی از عوامل کلیدی موثر بر رفتار مکانیکی خاک‌ها در نظر گرفته شده است [۴۷]. محققین مطابق با آزمایشات خود دریافتند که زاویه اصطکاک داخلی با افزایش زاویه ذرات، روند افزایشی را نشان می‌دهد [۴۸]. با این حال، سهم شکل ذرات در مقاومت روانگرایی هنوز به خوبی درک نشده است [۴۹]. بنابراین مطابق با شکل مذکور پیش‌بینی می‌شود که مقاومت در برابر روانگرایی و نیز مقدار انرژی کرنشی مستهلک شده در این نوع از سیلت‌ها، به دلیل شکل زاویه‌دار بودن ذرات افزایشی باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۶: تصاویر میکروسکوپی خاک سیلتی سد باطله سونگون بزرگ‌نمایی (الف) ۲۰ میکرومتر، (ب) ۱۰ میکرومتر

تأثیر زیاد روش آماده‌سازی نمونه‌ها بر مقاومت روان‌گرایی توسط محققان متعددی نشان داده شده است [۵۰-۵۳]. رفتار نمونه‌های خاکی تحت بارگذاری زهکشی‌نشده به روش‌های استفاده شده برای ساخت، اشباع کردن و آزمایش بسیار حساس می‌باشد. تغییرات جزئی در ساختار، درجه اشباع و غیره می‌تواند تاثیر زیادی بر روی فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در حین آزمایش بگذارد [۵۴]. در نتیجه تفسیر و مقایسه نتایج آزمایش‌های مستقل بسیار دشوار می‌باشد، به این دلیل که روش‌های استفاده شده به ندرت یکسان است. همچنین تعیین روابط حالت پایدار برای ماسه نیز بسیار وابسته به روش‌های آزمایش است، زیرا شرایط تنش در کرنش‌های زیاد تحت تأثیر دانسیته، روش نمونه‌سازی، فشار محدودکننده و عواملی مانند آن می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت یکی از نگرانی‌های نمونه‌سازی به روش بازسازی شده، ساخت نمونه‌ای با تراکم یکنواخت و همگن است. روش‌های کوبش مرطوب^{۱۴}، روش رسوب دهی در آب^{۱۵} و روش بارش خشک^{۱۶} از روش‌های مرسوم نمونه‌سازی می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که روش نمونه‌سازی بازسازی شده می‌تواند مقاومت روانگرایی را تحت تأثیر قرار دهد [۵۵].

همان‌طور که در ادامه اشاره شده است، در انجام آزمایشات این پژوهش از روش نمونه‌سازی کوبش مرطوب جهت بازسازی نمونه‌ها استفاده شد. مزیت مهم این روش در مقایسه با سایر روش‌ها، امکان ساخت نمونه همگن‌تر و با تراکم‌های بالاتر و نیز رسیدن به تراکم مورد نظر می‌باشد. از دیگر مزیت‌های این روش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: (۱) نمونه‌سازی سریع و آسان، (۲) نمونه در طول خود دارای تراکم یکنواخت است، (۳) از این روش می‌توان جهت بازسازی نمونه‌های بزرگتر نیز استفاده نمود [۵۶].

۳- دستگاه آزمایش و آماده‌سازی نمونه‌ها

¹³ Scanning electron microscopy (SEM)

¹⁴ Moist Tamping (MT)

¹⁵ Wet Pluviation (WP)

¹⁶ Dry Pluviation (DP)

در انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر، از دستگاه سه محوری سیکلی استفاده شد. آزمایش سه محوری معمولی، آزمایشی چندکاره و یکی از رایج‌ترین آزمایش‌ها جهت اندازه‌گیری مشخصات مقاومتی تنش- کرنش خاک‌ها و سنگ‌ها استفاده می‌شود. در آزمایش سه محوری معمولی یک نمونه استوانه‌ای از خاک یا سنگ در معرض تنش‌های همه‌جانبه قرار گرفته سپس یک تنش محوری که با نرخ کرنش ثابت و یا تنش ثابت افزایش یافته تا نمونه گسیخته گردد. اگرچه خاک‌ها در صحرا به ندرت تحت شرایط تنش ایزوتروپیک قرار دارند، تست‌های معمول خاک قبل از برش تحت شرایط تنش ایزوتروپیک انجام می‌شوند. این شرایط آزمایش ممکن است تغییر شکل‌هایی که خیلی با شرایط صحرائی متفاوت هستند را تولید نمایند [۵۷]. لذا به منظور تخمین دقیق‌تر ماهیت تغییر شکل‌های درجا و مسیرهای تنش-کرنش نیازمند بهره‌گیری از یک دستگاه با قابلیت مدل‌سازی این مسیرها نزدیک به واقعیت است. وجود سیستم‌های سه محوری توانا به کنترل مسیر تنش یا کرنش، جهت اجرا پیچیده و گران هستند. مزایای موجود در تکنولوژی کامپیوتر این امر را ممکن می‌کند که با یک میکرو کامپیوتر ارزان را جهت انجام همه کارهای مورد نیاز به منظور نیل به کنترل بسیار دقیق برای محدوده وسیعی از تست‌های سه محوری برنامه‌ریزی کند.

در انجام آزمایش‌های این پژوهش از دستگاه سه محوری دینامیکی (الکترومکانیک-مسیر تنش) موجود در دانشگاه صنعتی امیرکبیر، واحد گرمسار که از نوع Global MTM می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه به همراه سیستم‌های کنترل کامپیوتری قادر است که برنامه‌های آزمایشی پیچیده‌تر و درعین حال واقع‌گرایانه‌تر را با هزینه اجرایی کمتر و همچنین حداقل اشتباهات اپراتوری را اجرا نماید. همچنین این دستگاه قابلیت اعمال دقیق مسیرهای تنش و کرنش را در حالت دینامیکی را نیز دارد. از دیگر ویژگی‌های مهم این دستگاه در حوزه نوع کنترل بارگذاری، کنترل تنش یا کرنش سیکلیک و یا مونوتونیک است. این دستگاه قابلیت اعمال بار یکنواخت و سیکلی تا فرکانس ۱۰ هرتز را نیز دارد. شکل ۷ دستگاه سه محوری دینامیکی را نشان می‌دهد. قطر نمونه‌ها در این دستگاه ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر است. از طرفی شایان ذکر است که این دستگاه بر مبنای استاندارد ASTM-D3999 در کشور ایران طراحی و ساخته شده است. ویژگی بارز این دستگاه، اعمال بارگذاری‌های دینامیکی و انواع مسیرهای تنش به نمونه خاک می‌باشد. همچنین این دستگاه قادر است بار محوری را تا بزرگی ۱۰ کیلو نیوتن را دارد. دقت اندازه‌گیری نیرو و تغییر مکان در دستگاه مذکور به ترتیب حدود ۱ نیوتن و ۰/۰۱ میلی‌متر است.

با توجه به اینکه موضوع اصلی مقاله حاضر ارزیابی پتانسیل روانگرایی سد باطله است، برنامه آزمایش‌ها در راستای نیل به اهداف پژوهش بوده که در بخش قبلی بدان اشاره گردید. آزمایش‌ها بر اساس دو پارامتر فشار محصورکننده و تنش برشی اولیه است. انتخاب این پارامترها بر اساس عدم قطعیت‌های موجود در مطالعات پیشین و همچنین، ارائه یک رابطه و مدلی کامل‌تر با در نظرگیری تعداد بیشتری از پارامترهای مهم و تأثیرگذارتر در جهت افزایش دقت و کارایی مدل نسبت به روابط ارائه شده در ادبیات فنی می‌باشد.

قابل ذکر است که در این مطالعه، شروع روانگرایی زمانی در نظر گرفته شد که افزایش فشار منفذی اضافی در طول بارگذاری سیکلی برابر با فشار محدود اولیه (تنش مؤثر صفر) می‌شود. به عبارتی، معیار روانگرایی به عنوان نسبت فشار منفذی یک ($r_u=1$) مشخص می‌شود [۵۸-۶۵].



(ب)



(الف)

شکل ۷: تصویر دستگاه سه محوری دینامیکی و نمونه سازی

آزمایش‌ها بر روی نمونه‌هایی به قطر ۵۰ میلی‌متر و به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر با استفاده از یک دستگاه سه محوری سیکلی انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از روش کوبش مرطوب تهیه شدند (شکل ۷). در این روش خاک موردنظر با رطوبت ۱۲ درصد در پنج لایه کوبیده شد تا تراکم موردنظر حاصل شود. وزن و ارتفاع هر لایه به‌طور جداگانه بسته به تعداد لایه‌ها با استفاده از روش کوبیدن مرطوب پیشنهاد شده توسط لاد [۶۶] اندازه‌گیری شد. مبنای انتخاب این درصد رطوبت، رسیدن به حد قابل قبول درجه اشباع براساس مطالعات انجام شده توسط لاد [۶۶] بوده که بین ۲۰ الی ۷۰ درصد پیشنهاد شده است. همچنین به منظور دست یابی به پیشنهاد مذکور، درصد تراکم اولیه و نهایی نمونه‌ها که در قسمت بعد توضیحات آن ارائه شده است، مد نظر قرار گرفته شد. به منظور تسریع اشباع‌سازی نمونه‌ها، دی‌اکسید کربن در ابتدا به مدت ۶۰ دقیقه به گردش درآمد و به دنبال آن آب بدون هوا تحت فشار (KPa) ۱۵ معادل دو برابر حجم نمونه عبور داده شد تا از اشباع بودن نمونه اطمینان حاصل شود که در حدود دو الی پنج ساعت به طول انجامید. فشار سلولی ۱۰ کیلو پاسکال برای جلوگیری از به هم پاشیدگی نمونه در طول گردش آب بدون هوا اعمال شد. نمونه‌ها کاملاً اشباع با مقدار B اسکمپتون برابر با ۰/۹۵ به دست آمد. پس از اشباع‌سازی، تمام نمونه‌ها تا فشار محصورکننده مؤثر موردنظر تحکیم شدند. مدت‌زمان تحکیم اغلب برای نمونه‌های سیلتی خالص دو ساعت به طول انجامید.

۴- برنامه آزمایش‌ها

در مطالعه حاضر طیف وسیعی از آزمایش‌های سیکلی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی ماسه سیلتی انجام شد. تمامی تست‌های سیکلی بر روی نمونه‌هایی با تراکم نسبی اولیه ۳۰، ۲۵ و ۲۰ درصد انجام شد.

برای تمامی آزمایش‌ها، سه مسیر مختلف تنش تحکیم، شامل یک مسیر همسانگرد^{۱۷} و دو مسیر ناهمسانگرد^{۱۸} ($\alpha=0,0.2,0.4$) (معادله ۱) انتخاب شدند. تمامی آزمایش‌های این پژوهش که در جدول ۴ آورده شده است، با سه فشار محصورکننده مختلف شامل مقادیر ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال برای تحکیم همسانگرد و ناهمسانگرد انجام شد.

$$\alpha = \frac{\tau_s}{\sigma_{3c}} \quad , \quad \tau_s = \frac{q_s}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (1)$$

جهت دستیابی به اهداف این پژوهش، تعداد نه عدد آزمایش سیکلی به‌منظور ارزیابی پتانسیل روانگرایی نمونه‌های سیلت خالص و ارزیابی تأثیر تنش برشی استاتیکی اولیه بر رفتار سیکلی خاک‌های مذکور برنامه‌ریزی شد. تمامی آزمایش‌های سیکلی با بارگذاری نمونه در شرایط کرنش کنترل جهت تخمین انرژی ظرفیت و فشار منفذی باقیمانده انجام شد. جدول ۴ برنامه آزمایش‌های این پژوهش شامل پارامترهای فشار محصور کننده، تراکم نسبی نهایی نسبت تنش برشی استاتیکی اولیه را نشان می‌دهد.

جدول ۴: خلاصه‌ای از برنامه آزمایش‌ها در این پژوهش

شماره آزمایش	کد انجام آزمایش	فشار محصور کننده (KPa)	تراکم نسبی اولیه (%)	تراکم نسبی نهایی (%)	تنش برشی استاتیکی اولیه (α)	نوع بارگذاری	دامنه کرنش برشی (%)
۱	T50-50-0c	۵۰	۳۰	۵۳	۰	سیکلی	۰/۷۵
۲	T100-50-0c	۱۰۰	۲۵	۵۷	۰	سیکلی	۰/۷۵
۳	T150-50-0c	۱۵۰	۲۰	۶۰	۰	سیکلی	۰/۷۵

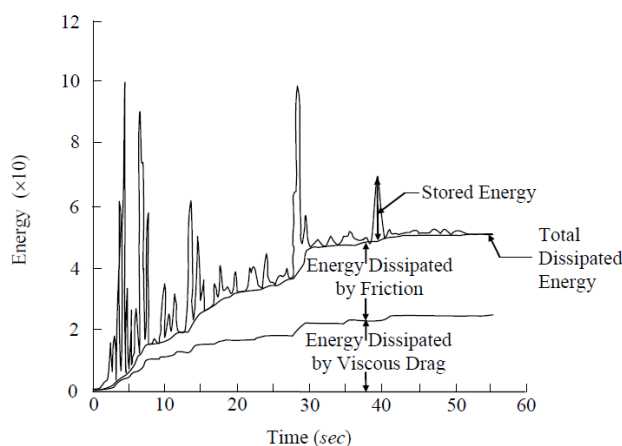
¹⁷ isotropic¹⁸ anisotropic

۰/۷۵	سیکلی	۰/۲	۴۸	۳۰	۵۰	T50-50-0.2c	۴
۰/۷۵	سیکلی	۰/۲	۵۳	۲۵	۱۰۰	T100-50-0.2c	۵
۰/۷۵	سیکلی	۰/۲	۵۷	۲۰	۱۵۰	T150-50-0.2c	۶
۰/۷۵	سیکلی	۰/۴	۵۰	۳۰	۵۰	T50-50-0.4c	۷
۰/۷۵	سیکلی	۰/۴	۴۷	۲۵	۱۰۰	T100-50-0.4c	۸
۰/۷۵	سیکلی	۰/۴	۴۸	۲۰	۱۵۰	T150-50-0.4c	۹

۵- سازوکار جذب انرژی در خاکها

در هنگام ورود امواج دینامیکی به درون یک توده خاک، بخشی از انرژی آن در خاک جذب شده که این عمل منجر به میرا شدن موج می شود. تقریباً همه روش های انرژی تخمین روانگرایی سعی در تخمین آن بخش جذب شده انرژی دارند که در ادبیات فنی به اصطلاح demand یا «کنش زلزله» نامیده می شود.

در خاک های دانه ای خشک، سازوکار اصلی جذب انرژی، اصطکاک و لغزش دانه ها نسبت به یکدیگر است [۶۷]. ولی اگر خاک اشباع باشد، کشیده شدن ویسکوز آب بر روی سطح دانه های خاک نیز یکی از عوامل جذب انرژی محسوب می شود. سازوکارهای دیگر که شامل شکستن دانه های خاک و اتلاف حرارتی هستند، در بسیاری از خاکها ناچیز بوده و به حساب نمی آیند. بخش کمی از انرژی داخلی در اثر تغییر شکل های الاستیک است که برگشت پذیر است و در واقع جذب خاک نمی شود. شکل ۸ سازوکارهای جذب انرژی را نشان می دهد. در این شکل بخش کشش ویسکوز برای بهتر دیده شدن، اغراق آمیز نمایش داده شده است. انرژی ذخیره شده معرف آن بخشی از انرژی ورودی است که همچنان از طریق ستون خاک انتشار پیدا کرده و بر این اساس، در پایان زمین لرزه، برابر با صفر است.

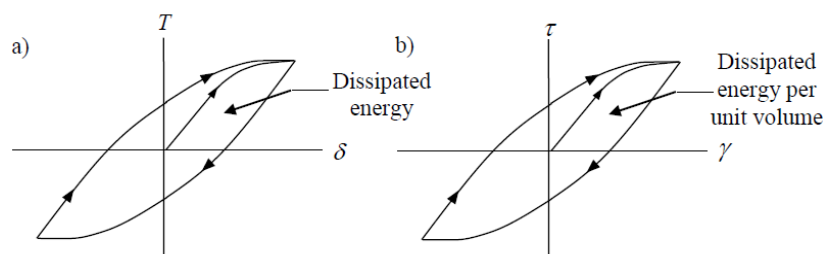


شکل ۸- نمایش انرژی جذب شده و برگشت پذیر در حین زلزله [۶۸]

در بحث روانگرایی، بخش اصطکاکی جذب انرژی بسیار قابل توجه است چون روانگرایی ذاتاً یک مسئله کرنش بزرگ بوده و در آن لغزش کامل دانه ها نسبت به هم رخ می دهد. این مسئله مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است [۶۹-۷۱]. بخش کشش ویسکوز جذب انرژی مقدار کمتری از انرژی جذبی را به خود اختصاص می دهد که با مقایسه مقدار جذب انرژی یک نمونه خاک خشک یا همان نمونه خاک در حالت اشباع قابل تخمین زدن است [۷۲، ۷۳]. مکانیزم های اصلی جذب و برگشت انرژی که در شکل ۶ نشان داده شده اند به لحاظ وابستگی به فرکانس بار ورودی قابل بحث هستند. از میان مکانیزم کشش ویسکوز و جذب اصطکاکی، تنها عامل اول تابع نرخ بارگذاری یا فرکانس است. از آنجایی که سهم این بخش در اتلاف انرژی بسیار ناچیز است لذا می توان گفت که رفتار خاک های دانه ای اشباع تا حد بسیار زیادی مستقل از نرخ یا فرکانس بارگذاری است [۶۷، ۷۴]. همچنین، مطابق با مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط دستگاه های برش حلقه و سه محوری سیکلی، تأثیر ناچیز فرکانس بارگذاری را بر مقاومت روان گرایی خاک های دانه ای را نشان داده اند [۷۵، ۷۶].

۶- لوپ‌های هیستریزیس

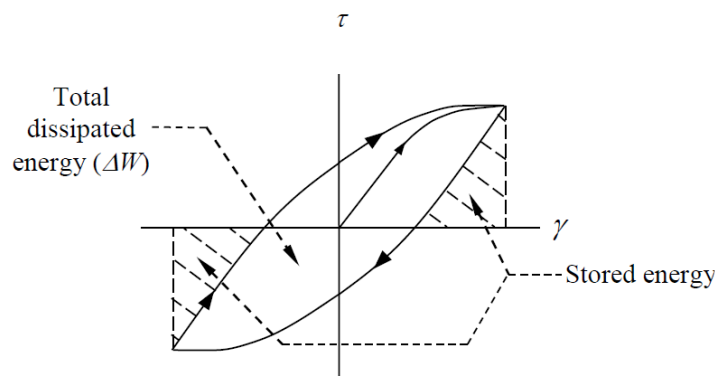
در اثر اعمال بار، حذف و سپس بارگذاری مجدد، رابطه نیرو-تغییر مکان یک حلقه هیستریزیس مانند شکل ۹ ایجاد می‌گردد.



شکل ۹- حلقه‌های هیستریزیس ناشی از اعمال و حذف بارگذاری [۶۸]. (a) در محیط نیرو (b) در محیط تنش برشی

مطابق با شکل ۱۰، مساحت محصور شده توسط حلقه هیستریزیس، انرژی تلف شده را به ازای هر واحد حجم آن مصالح بیان می‌نماید. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که شکل حلقه هیستریزیس مستقل از نرخ بارگذاری برای خاک‌های ماسه‌ای خشک می‌باشد. این بدان معنی است که برای یک دامنه مشخص بارگذاری، مقدار انرژی حاصل از ساز و کار اصطکاک، مستقل از فرکانس بارگذاری است [۷۴]. در نقطه مقابل، انرژی تلف شده توسط ساز و کار ویسکوز، به طور مستقیم با فرکانس بارگذاری متناسب هستند. برای نمونه‌های اشباع و زهکشی نشده، مساحت محدود شده توسط حلقه‌های هیستریزیس معرف انرژی تلف شده ناشی از تمامی ساز و کارهای مذکور بوده و نمی‌توان به راحتی سهم ناشی از اصطکاک و ویسکوزیته را مشخص نمود [۶۸].

همان‌طور که بیان گردید، در مصالح با تغییر شکل‌های ماندگار همانند خاک، سطح بین لوپ‌ها معرف اتلاف انرژی خارجی بوده که این انرژی به نوبه خود هم حاوی خواص بارگذاری و هم حاوی خواص مصالح است؛ بنابراین، در این تحقیق منظور از انرژی جذب شده در هر لحظه همان سطح تجمعی لوپ‌های هیستریزیس در هر لحظه است. در ادبیات فنی معمولاً این انرژی را در واحد حجم مصالح ارائه می‌دهند که در واقع سطح لوپ‌های هیستریزیس در نمودار تنش- کرنش است و واحد آن J/m^3 بوده که از نظر ابعادی هم بُعد با تنش می‌باشد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- مفهوم انرژی ذخیره شده و تلف شده [۶۸]

روابط انرژی تلف شده در آزمایش‌های زهکشی نشده سیکلی با استفاده از تانسور تنش‌های حاکم بر یک المان سه بعدی قابل دستیابی هستند. در هر یک از آزمایش‌های سیکلی مساحت لوب‌ها با استفاده از روابط سری وار زیر در دستگاه سه محوری سیکلی قابل محاسبه اند (معادله ۲):

$$\Delta w = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\sigma_{d,i+1} + \sigma_{d,i}) (\varepsilon_{a,i+1} - \varepsilon_{a,i}) \quad (2)$$

در روابط فوق n تعداد رکوردهای ثبت شده تا روانگرایی، تنش برشی τ_i و کرنش برشی می‌باشند. از طرفی σ_d و ε_a به ترتیب بیانگر تنش انحرافی و کرنش محوری است.

در این پژوهش، انرژی تلف شده در واحد حجم مصالح و در هر لحظه را با Δw و این پارامتر در شروع روانگرایی اولیه با W_{iiq} یا W_L نشان داده می‌شود که در واقع سطح جمعی حلقه‌های هیستریزاس از شروع بارگذاری تا شروع روانگرایی است.

۷- نتایج آزمایش‌های سیکلی

مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه سه محوری سیکلی به منظور ارزیابی رفتار سیکلی خاک سیلتی غیر پلاستیک انجام شد. آزمایش‌های مذکور با روش کنترل کرنش انجام و نتایج آن برای تعیین مقاومت روانگرایی و ایجاد فشار منفذی با استفاده از رویکرد مبتنی بر انرژی کرنش استفاده شد. در این روش مقدار انرژی مستهلک شده در واحد حجم خاک که به عنوان چگالی انرژی یا واحد انرژی نیز شناخته می‌شود به عنوان شاخصی مفید برای ارزیابی رفتار سیکلی سیلت‌ها معرفی شده است [۱۳، ۷۷]. پارامترهای اصلی رویکرد انرژی کرنش شامل چگالی انرژی تلف شده ϵ_a ، انرژی ظرفیت ϵ_c و نسبت انرژی کرنش ϵ_c/ϵ_a است [۱۳، ۱۵]. لازم به ذکر است که علاوه بر خاک و محیط متخلخل، این رویکرد به طور موثر برای بررسی رفتار سیکلی عناصر سازه‌ای (به عنوان مثال، صفحات فولادی [۷۸]؛ بتن مسلح [۷۹]؛ تیرهای آلیاژی [۸۰]) در شرایط زلزله اعمال می‌شود. در این آزمایش‌ها، تأثیر تنش برشی استاتیکی اولیه و فشار محصورکننده بر رفتار روان‌گرایی مواد باطله سد ارزیابی شد. آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش می‌تواند چگونگی تأثیر σ'_{3c} و τ_s بر پاسخ روان‌گرایی را ارائه دهند.

همانطور که قبلاً توضیح داده شد، نمونه‌ها با استفاده از روش کوبش مرطوب با در نظر گرفتن ضریب کم تراکم پیشنهاد شده توسط لاد تهیه شدند [۸۱]. تراکم نسبی اولیه نمونه‌ها با توجه به فشار محصور کننده موثر آنها انتخاب شد، به طوری که تراکم نهایی آنها پس از تحکیم به مقدار نسبتاً مشابه تقریباً ۵۰ الی ۶۰ درصد رسید. آزمایش‌های زهکشی نشده (CU) روی نمونه‌های سست با تراکم نسبی اولیه ۳۰، ۲۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برای فشارهای محدود ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال انجام شد. در حالی که تحکیم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال بر روی نمونه‌ها اعمال شد، تراکم نسبی سیلت غیر پلاستیک به طور متوسط به ترتیب ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد افزایش یافت. به نظر می‌رسد این افزایش در تراکم نسبی سیلت‌ها با اعمال فشار محصور کننده، به طور قابل توجهی بیش‌تر از آنچه که در ماسه‌ها در فرایند تحکیم در شرایط مشابه تجربه کردند باشد [۸۲].

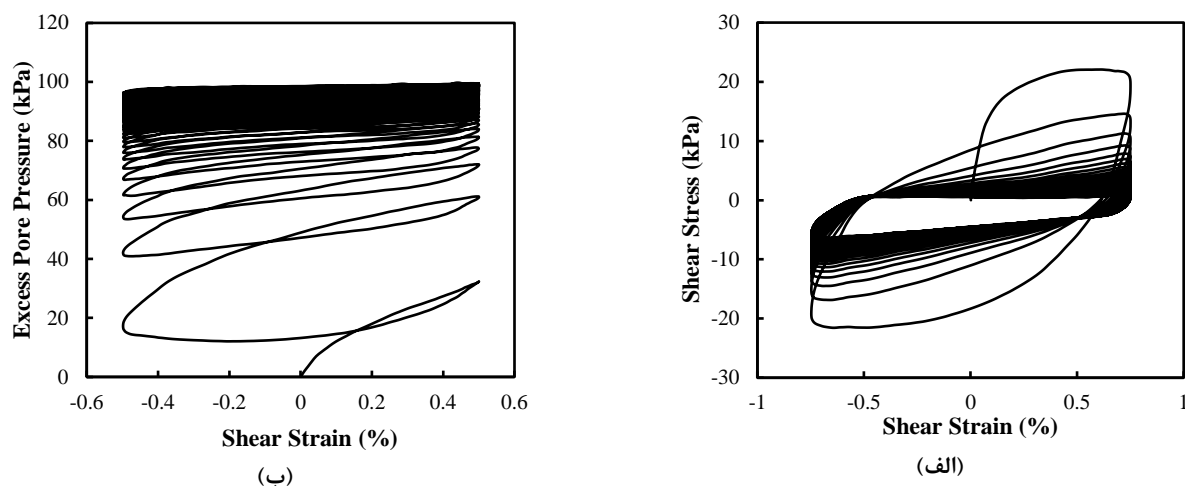
در مطالعه حاضر، تمامی آزمایش‌های سیکلی با دامنه برش ۰/۷۵ درصد و فرکانس ۰/۳ هرتز انجام شد. مقادیر این پارامترها براساس مطالعات و آزمایشات انجام شده توسط محققان پیشین انتخاب شده تا امکان مقایسه و تحلیل نتایج فراهم شود [۱۳، ۱۵، ۸۳]. شکل ۱۱ حلقه‌های تنش-کرنش و اضافه فشار منفذی-کرنش را در یک آزمایش سیکلی با فشار محصور کننده مؤثر ۱۰۰ کیلو پاسکال و

¹⁹ energy density dissipated (W)

²⁰ capacity energy (W_{iiq})

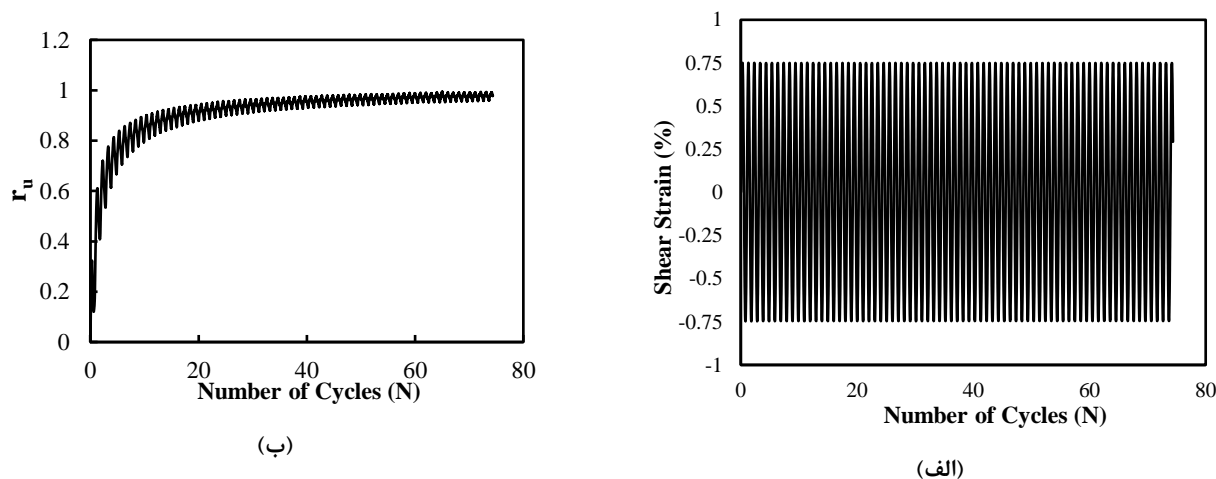
²¹ strain energy ratio (W/W_{iiq})

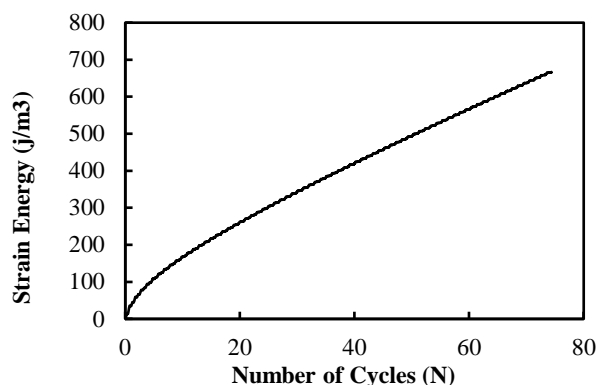
تراکم ۵۰ درصد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، بیش‌ترین مقدار انرژی مستهلک شده در سیکل اول رخ می‌دهد، جایی که دارای بیش‌ترین میزان سختی را دارد. علاوه بر این، حداکثر مقدار اضافه فشار منفذی اضافی در اولین سیکل‌ها اتفاق می‌افتد، حداکثر کاهش مدول برشی و همچنین سختی نیز در این قسمت از آزمایش ثبت می‌شود.



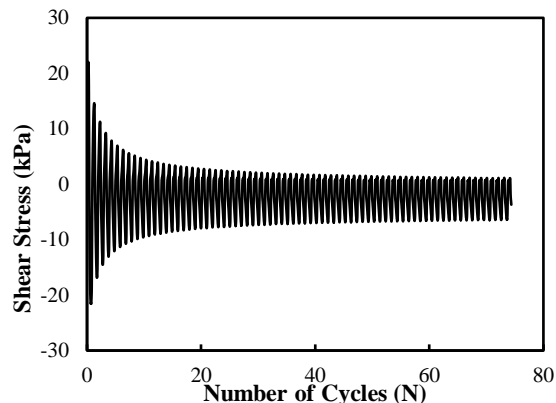
شکل ۱۱: حلقه‌های (الف) تنش برشی- کرنش برشی و (ب) فشار منفذی اضافی- کرنش برشی برای سیلت خالص سونگون

شکل ۱۲ (الف تا د) تاریخچه زمانی تنش برشی، کرنش برشی، نسبت فشار منفذی اضافی و انرژی کرنش را برای سیلت خالص سونگون در تراکم ۵۰٪، تنش محدود موثر ۱۰۰ کیلو پاسکال نشان می‌دهد. همان‌طور که در اینجا مشاهده می‌شود، اعمال بارگذاری کنترل کرنش سیکلی، فشار منفذی اضافی را فوراً افزایش داده و در نتیجه ظرفیت تنش برشی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، انرژی کرنش تا زمان شکست خاک به طور یکنواخت افزایش پیدا می‌کند.





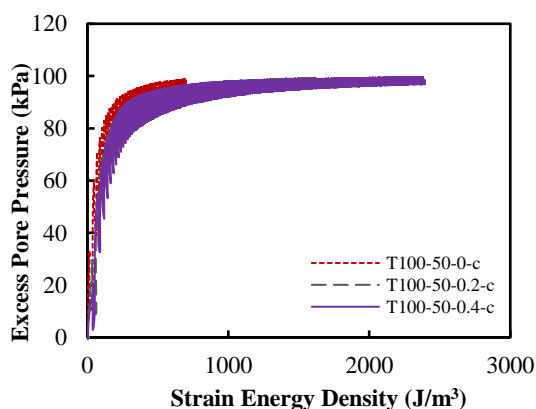
(د)



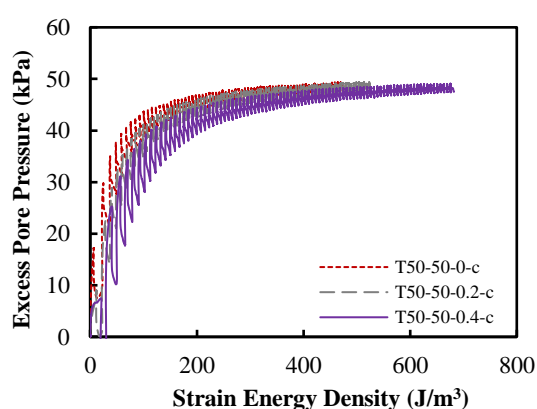
(ه)

شکل ۱۲- تاریخچه زمانی (الف) کرنش برشی، (ب) نسبت فشار منفذی اضافی، (ج) تنش برشی و (د) انرژی کرنشی برای سیلت خالص سونگون $\sigma'_c = 100$ (kPa) ، $D = 50$ (%)

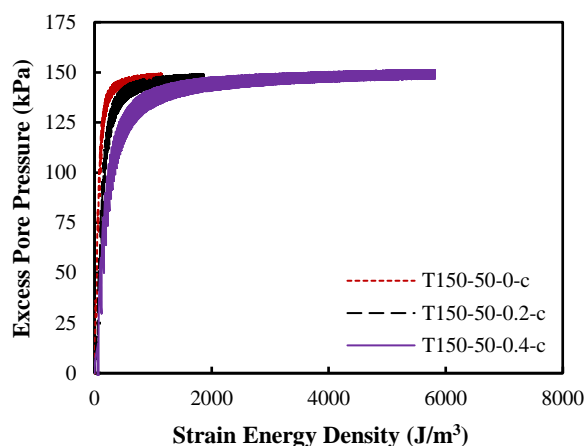
این بخش از مقاله در نظر دارد تأثیر تنش برشی استاتیکی در محل حاصل از قسمت‌های شیب‌دار سد را بر افزایش فشار منفذی، چگالی انرژی و در نتیجه پتانسیل روان‌گرایی سد باطله فعلی ارزیابی کند. مقدار چگالی انرژی کرنش مستهلک در واحد حجم خاک که به عنوان چگالی انرژی (W) نیز شناخته می‌شود، مناطق محصور تجمعی حلقه‌های تنش-کرنش برشی است [۱۳]. در این بخش، یک سری مقایسه برای ارزیابی وجود تنش‌های برشی اولیه مختلف نشان داده شده است. در ابتدا، تغییر فشار منفذی اضافی در مقابل انرژی کرنش برای تنش‌های متوسط مؤثر ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال و سه نسبت تنش برشی اولیه ۰، ۰/۲ و ۰/۴ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. واضح است که بین افزایش فشار منفذی و چگالی انرژی مستهلک شده در شرایط مختلف، رابطه منطقی وجود دارد. پس از ارزیابی نتایج آزمایش‌ها، مشاهده می‌شود که چگالی انرژی قابل توجهی برای فشار محصورکننده بالاتر و نسبت تنش برشی اولیه بیشتر جهت بروز پدیده روانگرایی مورد نیاز است. به عبارت دیگر، هر چه فشار محصورکننده و تنش برشی استاتیکی اولیه بیش‌تری به نمونه اعمال شود، چگالی انرژی بیشتری در زمان وقوع روانگرایی مورد نیاز است. در نتیجه، فشار محصورکننده و نسبت تنش برشی اولیه از نظر مقاومت روانگرایی تأثیر زیادی بر روی این سیلت خالص خاص دارد. تمام آزمایش‌ها تا عدد سیکل روانگرایی رسم شد.



(ب)



(ف)



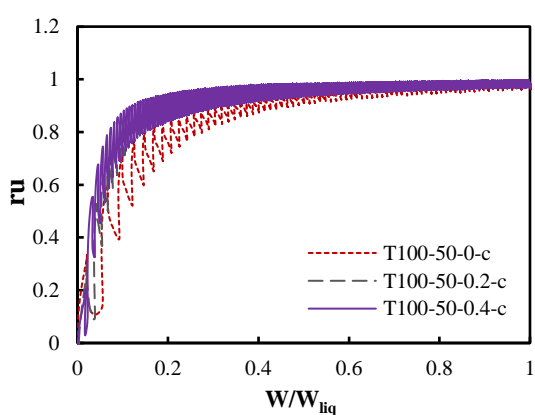
(ج)

شکل ۱۳- اضافه فشار منفذی اضافی سیلت سونگون در مقابل نسبت انرژی کرنشی در شرایط؛

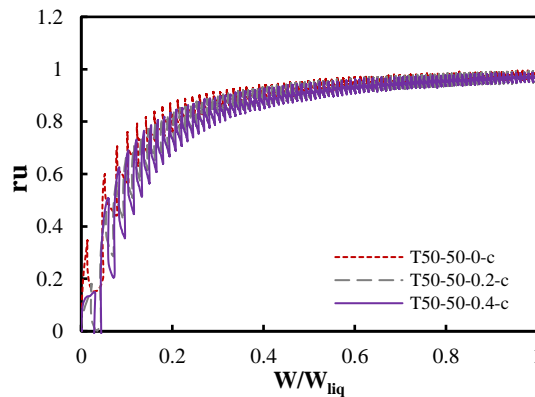
الف) $\sigma'_c = 50 (KPa), a = 0, 0.2, 0.4$ ب) $\sigma'_c = 100 (KPa), a = 0, 0.2, 0.4$ ج) $\sigma'_c = 150 (KPa), a = 0, 0.2, 0.4$

از سوی دیگر، تغییرات $ru-W/W_{liq}$ در شکل ۱۴ برای تنش‌های برشی اولیه و فشارهای محصورکننده مختلف ترسیم شده است که در آن ru مخفف نسبت اضافه فشار حفره‌ای است که با فشار محصورکننده مؤثر نرمالیزه شده است. علاوه بر این، W_{liq} و W/W_{liq} به ترتیب «انرژی ظرفیت» و «نسبت انرژی کرنش» نامیده می‌شوند که به ترتیب به‌عنوان «چگالی انرژی موردنیاز برای شروع روان‌گرایی» و «انرژی کرنشی مستهلک شده آبی (W) نرمال شده با انرژی ظرفیت» (W_{liq}) شناخته می‌شوند [۱۳، ۱۵].

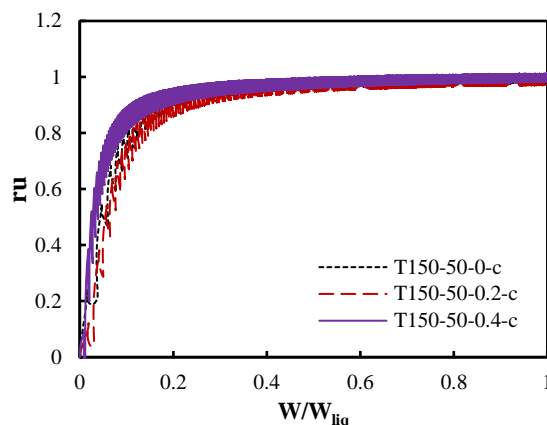
شکل ۱۴ مقایسه اثر تنش برشی اولیه برای سه فشار محصورکننده بر حسب $ru-W/W_{liq}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در اینجا مشاهده می‌شود، تفاوت اساسی در روند و بزرگی همه نمودارها وجود ندارد. به‌عبارت‌دیگر، تغییر در تنش برشی اولیه تأثیر کمی بر رابطه بین نسبت فشار منفذی اضافی و نسبت انرژی کرنش دارد. این روند توسط جعفریان و همکاران [۱۳] بر روی ماسه تپورا مشاهده شد. آن‌ها توضیح دادند که این منحصربه‌فرد بودن $ru-W/W_{liq}$ ممکن است به دلیل نرمال کردن انرژی کرنش (W) توسط انرژی ظرفیت (W_{liq}) باشد؛ یعنی تنش برشی استاتیکی اولیه به‌طور هم‌زمان هم بر انرژی کرنش و هم انرژی ظرفیت تأثیر می‌گذارد و در نتیجه تأثیر آن اساساً کاهش می‌یابد.



(ب)



(الف)

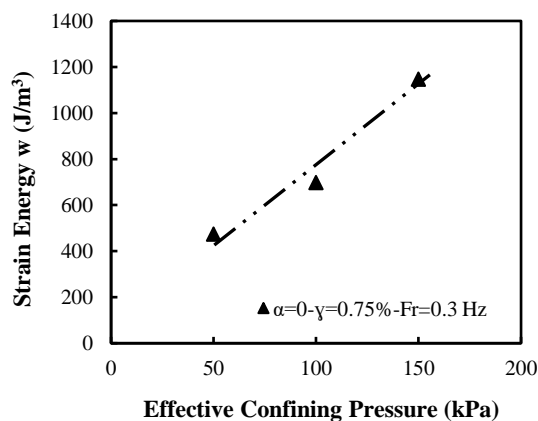


(ج)

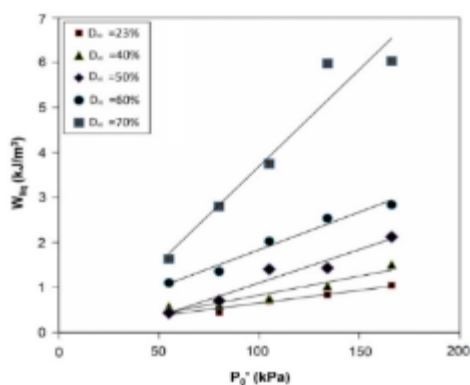
شکل ۱۴- نسبت فشار منفذی اضافی در مقابل نسبت انرژی کرنشی در شرایط:

الف) $\sigma'_c = 50 \text{ (KPa)}, a = 0, 0.2, 0.4$ ب) $\sigma'_c = 100 \text{ (KPa)}, a = 0, 0.2, 0.4$ ج) $\sigma'_c = 150 \text{ (KPa)}, a = 0, 0.2, 0.4$

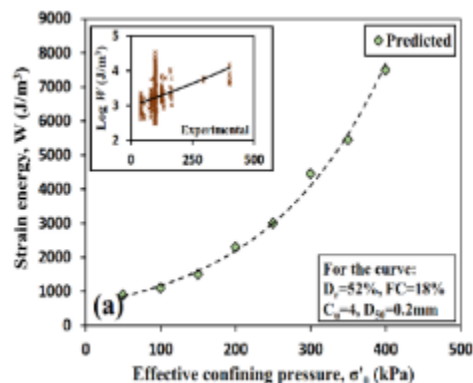
برای نشان دادن تأثیر فشار محصور کننده و تنش برشی اولیه، مجموعه‌ای از نمودارها انرژی ظرفیت نمونه‌ها را در زمان روانگرایی مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، تأثیر فشار محدودکننده کاملاً بر روی مقدار انرژی کرنش مشهود است. هر چه فشار محصورکننده بیشتر اعمال شود، سطح انرژی کرنش بیشتری به دست می‌آید. می‌توان این‌طور بیان نمود درحالی‌که دو نمونه دارای تراکم نسبی مشابهی باشند، نمونه سخت‌تر (نمونه دارای فشار محصورکننده بالاتر) جهت روانگرا شدن به انرژی چگالی بیشتری نیاز دارد. این روند با یافته‌های دیگر محققان سابق برای روش‌های آزمایشگاهی و عددی مطابقت دارد که در شکل ۱۶ نشان داده شده است [۱۳، ۱۴، ۴۱، ۵۹].



شکل ۱۵- تغییرات انرژی کرنش موردنیاز برای روانگرایی در برابر مطالعه فشار محصورکننده مؤثر



(الف)

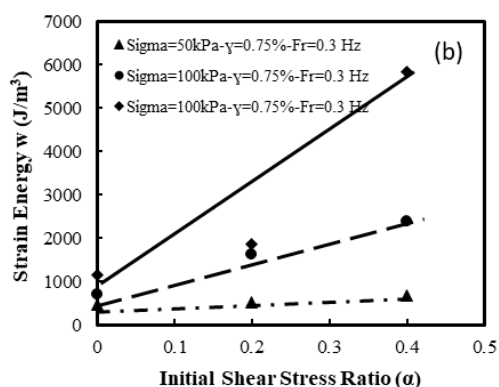


(ب)

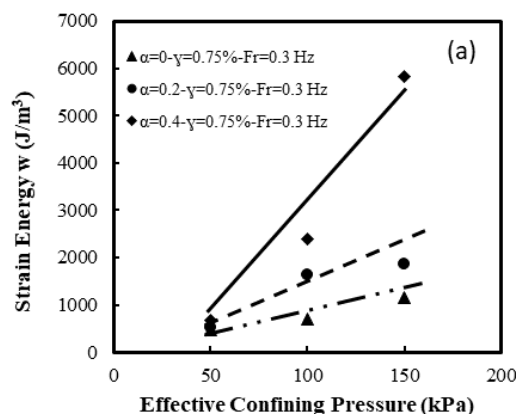
شکل ۱۶- تغییرات انرژی کرنشی موردنیاز برای روانگرایی در برابر (الف) تنش مؤثر متوسط [۵۹] و (ب) فشار محصورکننده متوسط [۱۳]

شکل ۱۷-الف سه خط که بیانگر سه مقدار مختلف نسبت تنش برشی استاتیکی اولیه (α) است را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود هر چه نسبت تنش برشی استاتیکی اولیه افزایش یابد، نرخ چگالی انرژی مستهلک‌شده به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر، درحالی‌که مقدار چگالی انرژی از $474(j/m^3)$ به $1147/4(j/m^3)$ در شرایط $\alpha=0$ افزایش می‌یابد، نرخ افزایش بسیار بیشتری را از $682(j/m^3)$ به $5839(j/m^3)$ در شرایط $\alpha=0.4$ تجربه می‌کند.

علاوه بر این؛ شکل ۱۷-ب تغییرات انرژی کرنش مستهلک‌شده در مقابل نسبت تنش برشی استاتیک اولیه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که انرژی موردنیاز برای روانگرایی با افزایش نسبت تنش برشی استاتیک اولیه (α) افزایش می‌یابد. باین‌حال، نرخ افزایش چگالی انرژی برای فشارهای محصورکننده متفاوت کاملاً متغیر است. به‌عنوان‌مثال، برای کمترین فشار محصورکننده (۵۰ کیلو پاسکال)، زمانی که تنش برشی اولیه از صفر به $0/4$ افزایش یافت، رشد چگالی انرژی تقریباً $204(j/m^3)$ بود، درحالی‌که افزایش فشار محصورکننده به 150 کیلو پاسکال، رشد چگالی انرژی را به $4690(j/m^3)$ افزایش داد. به‌عبارت‌دیگر، اگرچه تنش برشی استاتیکی اولیه بر انرژی مستهلک‌شده برای روانگرایی کاملاً مؤثر است، اما نرخ افزایش کاملاً به مقدار فشار محصورکننده بستگی دارد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۷- تغییرات انرژی کرنشی موردنیاز برای روانگرایی در برابر (a) فشار محصورکننده متوسط و (b) نسبت تنش برشی استاتیکی بر روی سیلت سونگون

۹- نتیجه گیری

تمرکز اصلی این مطالعه بررسی پتانسیل روانگرایی سیلت خالص مورد استفاده به عنوان بخشی از مواد باطله در سد مس سونگون بود. دو جنبه متمایز این مطالعه، برخلاف مطالعات قبلی، مواد و روش مورد استفاده در این تحقیق بود. سیلت‌های خالص در تحقیقات قبلی کمتر از ماسه‌ها و ماسه‌های سیلته‌ی مورد بررسی قرار گرفتند. اکثر محققان پتانسیل روانگرایی مخلوط‌های مختلف ماسه و سیلت را قبلاً بررسی کرده‌اند. باین‌حال، تعداد زیادی از نتایج در مورد سیلت خالص در مقایسه با ماسه تمیز یا ماسه سیلته وجود ندارد. علاوه بر این، استفاده از روش انرژی کرنش که شامل تأثیر تنش و کرنش در ارزیابی روانگرایی به‌طور هم‌زمان است، به‌اندازه کافی بر روی سیلت‌های خالص در نظر گرفته نشده است.

تغییرات تراکم نسبی پس از تحکیم حتی برای فشارهای محدود مؤثر کم (مثلاً ۲۰ درصد برای ۵۰ کیلو پاسکال) نسبتاً زیاد بود، برخلاف آنچه توسط سایر محققان در خاک‌های دانه‌ای مشاهده شده است. کاهش ناچیز فشار منافذی که باعث اتساع جزئی حتی در نمونه‌های متراکم می‌شود، ممکن است ناشی از اندازه بسیار کوچک ذرات و زبری کم ذرات سیلت باشد.

مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه محوری تحت شرایط مختلف برای بررسی تأثیر بارگذاری دینامیکی بر روی سیلت باطله سونگون انجام شد. این آزمایش‌ها با استفاده از روش مبتنی بر انرژی کرنشی برای ارزیابی تأثیر عوامل مختلف بر روانگرایی خاک سیلته انجام شد. نتایج نشان داد که انرژی کرنش مورد نیاز برای روانگرایی با افزایش فشار محصورکننده و تنش برشی استاتیکی اولیه افزایش آید. هر چه تنش محصورکننده بیشتر باشد، نمونه سخت‌تر و در نتیجه چگالی انرژی بیشتری برای روانگرایی مورد نیاز است. علاوه بر این؛ افزایش تنش برشی استاتیکی اولیه منجر به انرژی ظرفیت بالاتر برای سیلت خالص سونگون شد. به‌عبارت‌دیگر، در شیب‌هایی که خاک تنش برشی اولیه را تجربه کرده است، پتانسیل روانگرایی کاهش می‌یابد.

هدف اصلی این مقاله ارزیابی نقش تنش برشی استاتیکی اولیه و نیز فشار محصورکننده بر روی سیلت خاص در یک مطالعه موردی در طول بارگذاری‌های دینامیکی است. بر اساس نتایج آزمون سیکلی ارائه شده در این مقاله و مورد بحث، نتایج اصلی علاوه بر موارد ذکر شده در قبل، می‌توان به شرح زیر فهرست کرد:

- آزمایش‌ها نشان داد که چگالی انرژی مورد نیاز برای روانگرایی سیلت خالص سونگون کاملاً به فشارهای محصورکننده و نسبت تنش برشی اولیه وابسته است.

- مطابق با نتایج آزمایشات، با افزایش فشار محصورکننده، انرژی ظرفیت به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، برای یک مقدار مشخص از فشار محصورکننده، افزایش تنش برشی اولیه نیاز به چگالی انرژی بیشتری جهت شروع روانگرایی دارد.

- نتایج آزمایش‌های سیکلی نشان داد که در فشارهای محصورکننده بالاتر، نرخ رشد انرژی ظرفیت به‌طور چشمگیری با افزایش تنش برشی اولیه افزایش یافت. از طرفی حداکثر فشار اضافی آب منفذی با افزایش فشار محصورکننده سیکلی افزایش یافت که مطابق با نتایج ارائه شده توسط محققین مختلف است [۸۴، ۸۵]. البته افزایش مقاومت روانگرایی با افزایش فشار محدودکننده در نگاه اول با نتیجه برخی از مطالعات پیشین مغایرت دارد [۸۶]. علت این تفاوت نحوه محاسبه مقاومت روانگرایی با استفاده از نسبت تنش سیکلی در آزمایش‌های تنش کنترل است. برای آزمایش‌های تنش کنترل معیار متداول برای ارزیابی مقاومت روانگرایی نسبت تنش سیکلی است. از آنجا که نسبت تنش سیکلی بوسیله فشار محدودکننده نرمالیزه می‌شود، در نتیجه برای نمونه‌هایی با تنش فشار محصورکننده بالا، مقدار نسبت تنش سیکلی بیشتر کاهش می‌یابد. بنابراین طبیعی است که با استفاده از این تعریف، افزایش فشار محدودکننده سبب کاهش نسبت تنش سیکلی شود.

- برای مقادیر α بالاتر، نرخ رشد انرژی ظرفیت با افزایش فشار محصورکننده بیشتر می‌باشد. مطابق با پژوهش انجام شده، بیشترین اتلاف انرژی در اولین سیکل با بالاترین سختی رخ می‌دهد. در شرایط مسیر همسانگرد نرخ رشد انرژی ظرفیت تقریباً از $474(j/m^3)$ به $1147/4(j/m^3)$ به میزان $1/4$ برابر افزایش داشته ما در شرایط مسیر ناهمسانگرد این رشد از $682(j/m^3)$ به $5839(j/m^3)$ و

به میزان تقریباً ۷/۵ برابر بوده است. این در حالی است که مطابق پژوهش‌های انجام شده توسط جعفریان و همکاران [۱۳] بیان داشتند که تنش برشی استاتیکی بر انرژی ظرفیت و انرژی کرنش جمعی تأثیرگذار بوده که خود تأییدی بر نتایج این پژوهش است.

- تأثیر تنش برش اولیه بر مقاومت روانگرایی موضوعی پیچیده در میان محققین است [۸۷]. مطالعه بر روی این پارامتر با استفاده از در نظر گرفتن انرژی کرنش نیاز به یک کار تجربی دقیق دارد و ممکن است به نتایج قابل اجرا منجر شود. مشخص شد که اگرچه وجود تنش برش استاتیک بر مقادیر W و W_{liq} تأثیر می‌گذارد، تأثیر آن بر رابطه $r_u - W/W_{liq}$ به دلیل نرمال‌سازی انرژی کرنش فعلی (W) توسط انرژی ظرفیت جزئی است [۱۳]. اما مطابق با نتایج به دست آمده، با افزایش تنش برشی از $\alpha = 0$ به $\alpha = 0.4$ مقدار رشد انرژی ظرفیت (W) در فشار محصورکننده ۵۰ (KPa) تقریباً $204(j/m^3)$ و نیز در فشار محصورکننده ۱۵۰ (KPa) معادل با $4690(j/m^3)$ به دست آمده است.

- بنابراین مطابق با پژوهش انجام شده، دو پارامتر فشار محصورکننده و نیز تنش برشی استاتیکی اولیه تأثیر قابل توجهی بر انرژی ظرفیت مواد باطله تأثیرگذار هستند. یکی از دلایلی که می‌توان به افزایش نرخ رشد انرژی ظرفیت بر اثر اعمال پارامترهای مذکور نسبت به تحقیقات مشابه پیشین [۱۳، ۸۸]، بدان اشاره نمود، شکل ذرات مواد باطله می‌باشد. مطابق با شکل ۶ ذرات زاویه و دارای سطح نسبتاً صافی هستند. همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، شکل ذرات یکی از عوامل مؤثر بر رفتار مکانیکی خاک‌ها می‌باشد. تأیید این نتیجه مطابق با پژوهش‌های انجام شده در این حوزه است. اشاره شده است شکل ذرات با تأثیر بر چگالی خاک و نیز قفل و بست ذرات، تأثیر بسزایی بر مقاومت برشی دارد و نیز این تأثیر شکل ذرات بیش‌تر از زبری سطح دانه‌ها می‌باشد [۴۹، ۸۹، ۹۰].

۱۰- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه صنعتی امیرکبیر، واحد گرمسار به خاطر در اختیار قرار دادن محیط آزمایشگاه و نیز دستگاه سه محوری سیکلی به تیم پژوهشی این مقاله و نیز از حمایت‌های معنوی دلگرم‌کننده اساتید آن دانشگاه صمیمانه سپاسگزاری می‌نماید.

۱۱ - عبارات مخفف

جدول عبارات خلاصه و مخفف‌ها

عبارت مخفف	توضیحات	عبارت مخفف	توضیحات
r_u	نسبت اضافه فشار آب منفذی	α	نسبت تنش برشی استاتیکی اولیه
CU	آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده (آزمایش سه محوری)	τ_s	تنش برشی استاتیکی اولیه
W	چگالی انرژی	σ'_{3c}	فشار محصورکننده مؤثر
W_{liq}	چگالی (انرژی) ظرفیت	σ_1	تنش اصلی بزرگتر
W/W_{liq}	نسبت انرژی کرنشی	σ_3	تنش اصلی کوچکتر
Dr	تراکم نسبی نمونه‌ها	q_s	تنش انحرافی

مراجع

- Jafarzadeh Marandi, M., V. Ghiasi, and K. Badv, *Numerical Evaluation of Two-dimensional Multi-layer Cover System to Regulate Acid Mine Drainage of Tailing Dams*. International Journal of Engineering, 2023. 36(10): p. 1839-1856.
- USCOLD, T.D.I., *US Committee on Large Dams (USCOLD)*. Denver, Colorado, 1994.
- Koketsu, K. and H. Miyake, *A seismological overview of long-period ground motion*. Journal of Seismology, 2008. 12(2): p. 133-143.

4. Xu, B. and Y. Wang, *Stability analysis of the Lingshan gold mine tailings dam under conditions of a raised dam height*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015. **74**(1): p. 151-161.
5. Hamed Sangari, A. and S.M. Marandi, *Laboratory Studies on the Effect of Vertical Gravel Column Drains on Liquefaction Potential*. International Journal of Engineering, 2011. **24**(3): p. 209-226.
6. Hanindya, K., L. Makrup, and R. Paulus, *Deterministic Seismic Hazard Analysis to Determine Liquefaction Potential Due to Earthquake*. Civil Engineering Journal, 2023. **9**(5): p. 1203-1216.
7. Latifi, F.E., et al., *Evaluation of Liquefaction Potential based on Cone Penetration Test (CPT) and Semi-empirical Methods*. Civil Engineering Journal, 2023. **9**(2): p. 423-436.
8. Özcan Çakır and N. Coşkun, *Dispersion of Rayleigh Surface Waves and Electrical Resistivities Utilized to Invert Near Surface Structural Heterogeneities*. Journal of Human, Earth, and Future, 2022. **3**(1): p. 1-16.
9. Seed, H.B. and I.M. Idriss, *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, 1971. **97**(9): p. 1249-1273.
10. Ishihara, K., *Liquefaction and flow failure during earthquakes*. Geotechnique, 1993. **43**(3): p. 351-451.
11. Vaid, Y. and S. Sivathayalan, *Static and cyclic liquefaction potential of Fraser Delta sand in simple shear and triaxial tests*. Canadian Geotechnical Journal, 1996. **33**(2): p. 281-289.
12. Nemat-Nasser, S. and A. Shokooh, *A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing*. Canadian Geotechnical Journal, 1979. **16**(4): p. 659-678.
13. Jafarian, Y., et al., *Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012. **35**: p. 13-28.
14. Baziar, M. and H. Sharafi, *Assessment of silty sand liquefaction potential using hollow torsional tests—An energy approach*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011. **31**(7): p. 857-865.
15. Baziar, M. and Y. Jafarian, *Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model: capacity energy*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007. **27**(12): p. 1056-1072.
16. Zhang, W., et al., *Assessment of soil liquefaction based on capacity energy concept and multivariate adaptive regression splines*. Engineering Geology, 2015. **188**: p. 29-37.
17. Liang, L., *Development of an energy method for evaluating the liquefaction potential of a soil deposit*. 1995, Case Western Reserve University.
18. Towhata, I. and K. Ishihara, *Shear work and pore water pressure in undrained shear*. Soils and foundations, 1985. **25**(3): p. 73-84.
19. Jafarian, Y., et al., *Probabilistic correlation between laboratory and field liquefaction potentials using relative state parameter index (ζR)*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010. **30**(10): p. 1061-1072.
20. Lee, K.L. and H.B. Seed, *Cyclic Stress Conditions Causing Liquefaction of Sand*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967. **93**(1): p. 47-70.
21. Jafarian, Y., et al., *On the efficiency and predictability of strain energy for the evaluation of liquefaction potential: A numerical study*. Computers and Geotechnics, 2011. **38**(6): p. 800-808.
22. Elgamal, A., Z. Yang, and E. Parra, *Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002. **22**(4): p. 259-271.
23. Youd, T.L., et al., *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001. **127**(10): p. 817-833.
24. Dobry, R., et al., *Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method*. Vol. 138. 1982: National Bureau of Standards Gaithersburg, MD.
25. Ladd, R.S., et al., *Pore-water pressure buildup in clean sands because of cyclic straining*. Geotechnical Testing Journal, 1989. **12**(1): p. 77-86.
26. Vucetic, M., *Cyclic threshold shear strains in soils*. Journal of Geotechnical engineering, 1994. **120**(12): p. 2208-2228.

27. Wang, G., J. Takemura, and J. Kuwano, *Evaluation of excess pore water pressures of intermediate soils due to cyclic loading by energy method*. Computer methods and advances in geomechanics, 1997: p. 2215-2220.
28. Green RA, *Energy based evaluation and remediation of liquefiable soils*. Phd Thesis., in Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. 2001.
29. Kanagalingam T, *Liquefaction resistance of granular mixes based on contact density and energy considerations*. Phd dissertation., in University at Buffalo. 2006.
30. Polito Carmine, P., A. Green Russell, and J. Lee, *Pore Pressure Generation Models for Sands and Silty Soils Subjected to Cyclic Loading*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008. **134**(10): p. 1490-1500.
31. Liang, L., J.L. Figueroa, and S. Saada Adel, "*Liquefaction under Random Loading: Unit Energy Approach*,". Journal of Geotechnical Engineering, 1995. **121**(11): p. 776-781.
32. J.L. Figueroa, et al., "*Evaluation of soil liquefaction by energy principles*,". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1994. **20**(9): p. 1554-1569.
33. M.D. Rokoff, "*The influence of grain-size characteristics in determining the liquefaction potential of a soil deposit by the energy method*,". 1999: M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, OH. .
34. Boulanger, R.W. and R.B. Seed, *Liquefaction of sand under bidirectional monotonic and cyclic loading*. Journal of geotechnical engineering, 1995. **121**(12): p. 870-878.
35. Hosono, Y. and M. Yoshimine, *Effects of anisotropic consolidation and initial shear load on liquefaction resistance of sand in simple shear condition*. Geotechnical engineering for disaster mitigation and rehabilitation, 2008: p. 352-358.
36. Wei, X. and J. Yang, *Cyclic behavior and liquefaction resistance of silty sands with presence of initial static shear stress*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019. **122**: p. 274-289.
37. Pan, K. and Z. Yang, *Effects of initial static shear on cyclic resistance and pore pressure generation of saturated sand*. Acta Geotechnica, 2018. **13**(2): p. 473-487.
38. Marandi, S.M. and A.R. Rasti, *Parametric Study of the Covering Soil of Tunnels Constructed in Liquefiable Soil*. International Journal of Engineering, 2012. **25**(4): p. 333-346.
39. Iraj, A., *Evaluating Finn-Byrne Model in Liquefaction Analysis of Quay Wall and Cantilevered Retaining Wall Models*. International Journal of Engineering, 2023. **36**(6): p. 1075-1091.
40. Hoseini, M.H., A. Noorzad, and M. Zamanian, *Physical Modelling of a Strip Footing on a Geosynthetic Reinforced Soil Wall Containing Tire Shred Subjected to Monotonic and Cyclic Loading*. International Journal of Engineering, 2021. **34**(10): p. 2266-2279.
41. Lee, K.L. and H.B. Seed, *Dynamic strength of anisotropically consolidated sand*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967. **93**(5): p. 169-190.
42. Seed, H.B., *Earthquake-resistant design of earth dams*. 1981.
43. Vaid, Y.P. and J.-C. Chern, *Effect of static shear on resistance to liquefaction*. Soils and foundations, 1983. **23**(1): p. 47-60.
44. Liang, L., "*Development of an energy method for evaluating the liquefaction potential of a soil deposit*,". 1995, Case Western Reserve University School of Graduate Studies: Doctor of Philosophy, Case Western Reserve University, Civil Engineering.
45. H.M. Dief and J.L. Figueroa, "*Liquefaction assessment by the energy method through centrifuge modeling*," in In: Zeng, X.W. (Ed.), *Proceedings of the NSF International Workshop on Earthquake Simulation in Geotechnical Engineering*. CWRU, Cleveland, OH, . 2001.
46. Jafarian, Y., et al., "*Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments*,". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012. **35**(-): p. 13-28.
47. Shinohara, K., M. Oida, and B. Golman, *Effect of particle shape on angle of internal friction by triaxial compression test*. Powder Technology, 2000. **107**(1): p. 131-136.

48. Maeda, K., et al., *Stress-chain based micromechanics of sand with grain shape effect*. Granular Matter, 2010. **12**: p. 499-505.
49. Rui, S., et al., *Effect of particle shape on the liquefaction resistance of calcareous sands*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020. **137**: p. 106302.
50. Yamashita, S. and S. Toki, *Effects of Fabric Anisotropy of Sand on Cyclic Undrained Triaxial and Torsional Strengths*. Soils and Foundations, 1993. **33**(3): p. 92-104.
51. Wijewickreme, D., S. Sriskandakumar, and P. Byrne, *Cyclic loading response of loose air-pluviated Fraser River sand for validation of numerical models simulating centrifuge tests*. Canadian Geotechnical Journal, 2011. **42**: p. 550-561.
52. Sze, H. and J. Yang, *Failure Modes of Sand in Undrained Cyclic Loading: Impact of Sample Preparation*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014. **140**: p. 152-169.
53. Wichtmann, T., et al., *An experimental parametric study on the liquefaction resistance of sands in spreader dumps of lignite opencast mines*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019. **122**: p. 290-309.
54. Miura, S. and S. Toki, *"A Sample Preparation Method and its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand."*. Soils and Foundations, 1982. **22**(1): p. 61-77.
55. J.P. Mulilis, et al., *"Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction"*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE., 1977. **103**(2): p. 91-108.
56. Bradshaw, A. and C. Baxter, *"Sample Preparation of Silts for Liquefaction Testing"*. Geotechnical Testing Journal, 2007. **30**(4): p. 324-332.
57. J.E. Atkinson, J.S. Evans, and C.R. Scott, *"Developments in microcomputer controlled stress path testing equipment for measurement of soil parameters"*. Ground Engineering, 1985. **18**(1): p. 15-22.
58. Hazirbaba, K. and M. Omarow, *Strain-based assessment of liquefaction and seismic settlement of saturated sand*. Cogent Engineering, 2019. **6**(1): p. 1573788.
59. Javdanian, H., *Evaluation of soil liquefaction potential using energy approach: experimental and statistical investigation*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019. **78**(3): p. 1697-1708.
60. Basu, D. and D. Wijewickreme, *Numerical Framework to Evaluate Liquefaction-Induced Pipe Uplift*.
61. *Uncertainty in Liquefaction-Induced Settlement in Numerical Simulations due to Model Calibration*, in *Geo-Risk 2023*. p. 296-306.
62. Prihatiningsih, A., A. Iskandar, and V. Veronica. *Dynamic pore water pressure in saturated soil due to turbine engine's vibration*. in *E3S Web of Conferences*. 2023. EDP Sciences.
63. Marzuni, S.S., et al., *Effect of Cyclic Stress Ratio and Non-Plastic Fines Content on the Liquefaction Potential of Sandy and Silty Soil in Cyclic Triaxial Testing*. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2022. **58**(6): p. 467-473.
64. Jafari, N., R. Noorzad, and B. Tanegonbadi, *Liquefaction potential of reinforced sand with plastic wastes*. Scientia Iranica, 2022. **29**(6): p. 2850-2867.
65. Khair, A., et al., *Liquefaction Assessment of Zefta Barrage in Egypt*. Indian Geotechnical Journal, 2023. **53**(5): p. 975-994.
66. R.S. Ladd, *"Preparing Test Specimens Using Undercompaction"*. Geotechnical Testing Journal, 1978. **1**(1): p. 16-23.
67. Whitman, R.V. and R. Dobry, *"Modulus and damping for large strains"*. 1993, Chapter 14, Soil Dynamics (draft), Wiley Publishing, (used as course notes for CE1.331 Soil Dynamics, MIT, Spring,).
68. R.A. Green., *"Energy-based evaluation and remediation of liquefiable soils"*. 2001: Ph.D. Dissertation, Virginia polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia,.
69. Mindlin, R.D., *Compliance of elastic bodies in contact*, *Transportations of the American Society of Mechanical Engineers*,. 1949. **71**(-): p. 259-268.
70. Dobry, R., et al., *"Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method"*. 1982: National Bureau of Standards Building Science Series, 138, U.S. Dept. of Commerce.

71. Deresiewicz, H., "Bodies in contact with application to granular media, in R.D.," in *Mindlin and Applied Mechanics* (Herrmann, ed.), Pergamon Press, Inc. New York, pp105-147., 1974.
72. Hall, J.R. and F.E. Richart, "Dissipation of elastic wave energy in granular soils,". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1963. **89**(SM6): p. 27-56.
73. Hall, J.R., "Effects of amplitude on damping and wave propagation in granular materials,". 1962: Ph.D. Thesis (F.E. Rishart, Advisor), University of Florida.
74. Hardin, B.O., "The nature of damping in sands,,". *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions*, 1965. **91**(SM1): p. 63-97.
75. Yoshimi, Y. and H. Oh-oka, *Influence of Degree of Shear Stress Reversal on the Liquefaction Potential of Saturated Sand*. *Soils and Foundations*, 1975. **15**(3): p. 27-40.
76. Wong, R.T., H.B. Seed, and C.K. Chan, *Cyclic loading liquefaction of gravelly soils*. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1975. **101**(6): p. 571-583.
77. Nadjafi, M. and P. Gholami, *Reliability Analysis of Notched Plates under Anisotropic Damage Based on Uniaxial Loading Using Continuum Damage Mechanics Approach*. *International Journal of Engineering*, 2021. **34**(1): p. 253-262.
78. Labibi, H., M. Gerami, and M. Hosseini, *Sensitivity Analysis of Behavior of Simple Trapezoidal Steel Plates to Introduce a New Yielding Damper*. *International Journal of Engineering*, 2021. **34**(10): p. 2302-2312.
79. Ravikumar, S. and S. Kothandaraman, *Experimental Study on Performance of Ductile and Non-ductile Reinforced Concrete Exterior Beam-column Joint*. *International Journal of Engineering*, 2022. **35**(7): p. 1237-1245.
80. Danesh, N., M.J. Mahmoodabadi, and A.R. Fathi, *Investigation of the Damping Performance of a Shape Memory Alloy Beam*. *International Journal of Engineering*, 2023. **36**(7): p. 1369-1382.
81. Ladd, R., *Preparing test specimens using undercompaction*. *Geotechnical testing journal*, 1978. **1**(1): p. 16-23.
82. Karim, M.E. and M. Alam, *Effect of nonplastic silt content on undrained shear strength of sand-silt mixtures*. *International Journal of Geo-Engineering*, 2017. **8**(1): p. 1-26.
83. Rasouli, M.R., M. Moradi, and A. Ghalandarzadeh, *Effects of initial static shear stress orientation on cyclic behavior of calcareous sand*. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2020. **39**: p. 1-15.
84. Huang, J., et al., *Impacts of Initial Deviator Stress and Cyclic Confining Pressure on Mechanical Behaviors of Ningbo Clay under Cyclic Loading*. *International Journal of Geomechanics*, 2021. **21**(4): p. 06021004.
85. Sun, Q., et al., *Effect of variable confining pressure on cyclic behaviour of granular soil under triaxial tests*. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017. **54**(6): p. 768-777.
86. Darisi, D.P., T. Munaga, and K.K. Gonavaram, *Laboratory investigation on liquefaction of sands and cemented sand mixes*. *Geomechanics and Geoengineering*: p. 1-13.
87. Youd, T.L. and I.M. Idriss, *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001. **127**(4): p. 297-313.
88. Jafarian, Y., et al., *On the efficiency and predictability of strain energy for the evaluation of liquefaction potential: A numerical study*. *Computers and Geotechnics*, 2011. **38**(6): p. 800-808.
89. O'Sullivan, C., C. Mr, and I. Cavarretta, *The influence of particle characteristics on the behavior of coarse grained soils*. *Geotechnique*, 2010. **60**: p. 413-423.
90. Altuhafi, F.N., M.R. Coop, and V.N. Georgiannou, *Effect of Particle Shape on the Mechanical Behavior of Natural Sands*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016. **142**(12): p. 04016071.