

# شناسایی آزمایشگاهی سطح تسلیم مواد زائد سیلنتی اشباع

امیرعباس ریاحی خو<sup>۱</sup>، علی اخترپور<sup>۲\*</sup>

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

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

پست الکترونیکی نویسندگان:

amirabbas.riyahikho@mail.um.ac.ir - ۱

akhtarpour@um.ac.ir - ۲

## چکیده

شبیه‌سازی عددی رفتار تنش - کرنش مصالح در شرایط بارگذاری مختلف، نیازمند مدل رفتاری مناسب بوده که یکی از اجزای اصلی آن معیار یا سطح تسلیم می‌باشد. مطالعات گسترده‌ای برای شناسایی سطح تسلیم مصالح خاکی (ماسه و رس) به روش آزمایشگاهی انجام شده، اما تاکنون شناسایی سطح تسلیم مواد زائد کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، بررسی رفتار تنش-کرنش مواد زائد سیلنتی معدن مس سونگون دارای بیش تحکیمی سبک، به روش آزمایشگاهی در شرایط تنش اولیه همسان و اشباع با استفاده از آزمایش‌های سه محوری تنش کنترل زهکشی شده، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که سطح تسلیم حاصل در شرایط تنشی موجود، در قانون جریان غیروابسته قرار دارد، همچنین به تطابق خوبی بین سطح تسلیم آزمایشگاهی و پیشنهادی مدل ام-رز اشاره دارد. مشاهده روند خطی تغییرات تغییرشکل مصالح مورد آزمایش بعد از نقطه‌ی تسلیم، حکایت از نوعی سمانتاسیون سریع در این مصالح دارد.

**کلمات کلیدی:** مواد زائد معدنی، سطح تسلیم همسان، تنش برشی، کرنش پلاستیک، آزمایشات سه‌محوری

<sup>۲</sup> علی اخترپور، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد  
ایمیل: akhtarpour@um.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

# Experimental Study of yield surface of saturated silty tailings

Amir Abbas Riyahi khoo<sup>1</sup>, Ali Akhtarpour<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PhD student, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

## Abstract

Static liquefaction is one of the most important challenges for the stability of mining tailings dams. Several experimental studies have been conducted on this issue within the framework of critical state theory. Additionally, deformations such as tensile cracks and unusual static deformations of these dams are among the other issues related to the stability of these structures. Numerical simulation of the stress-strain behavior of materials under various loading conditions requires a suitable constitutive model, with one of its main components being the yield criterion. Extensive studies have been conducted to identify the yield surfaces of soil materials (sand and clay) through laboratory tests, but the identification of yield surfaces for tailing materials has received less attention. This study aims to identify the yield surface of silty tailing materials from the Sungun copper mine using laboratory experiments under initial isotropic stress and saturated conditions. For this purpose, all specimens with a similar stress history were initially consolidated under isotropic stress conditions and then unloaded up to 40% of the initial confining stress. The overconsolidation ratio (OCR) of these specimens was approximately set to be two. Subsequently, the specimens were subjected to stress-controlled radial stresses in the effective mean stress-deviatoric stress ( $p$ - $q$ ) space. The compatibility of the laboratory yield surface with the proposed yield surfaces of the Mroz constitutive model was examined. The results indicate that the obtained yield surface under existing stress conditions follows the non-associated flow rule. The proposed yield surface of the Mroz constitutive model, by considering appropriate constants, shows satisfactory agreement with the laboratory yield surface. The work input for each stress path demonstrates that at approximately 0.25 kJ/m<sup>3</sup>, the specimens reached yield conditions. The flow vector plots indicate that the obtained yield surface follows the non-associated flow rule. Observing linear trends in the deformation changes of the specimens after the yield point indicates rapid cementation in these materials.

**Keywords:** Mine Tailings, Isotropic Yield Curve, Shear Stress, Plastic Strain, Triaxial Stress Path Device

## ۱- مقدمه

مواد زائد معدنی، شامل پسماند حاصل از واحدهای تولیدی، فراوری، تصفیه و شستشوی مواد معدنی است. به بیان دیگر، این مواد، مخلوطی از سنگ خرد شده و مایعات فرآوری شده از آسیاب، مواد شوینده یا کنسانتره بوده که پس از استخراج فلزات گرانبها، مواد و سوخت‌های معدنی یا زغال سنگ، از منابع معدنی به جای می‌ماند [۱]. در حال حاضر، روش متداول انباشت مواد زائد به صورت تالاب یا همان سد باطله می‌باشد [۲].

طبق بررسی مطالعات پیشین، تاکنون پارامترهای عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی مواد زائد، به کمک آزمون‌های آزمایشگاهی نظیر تحکیم و سه محوری مشخص شده بطوریکه پژوهش‌های آزمایشگاهی زیادی در این خصوص قابل دسترسی است [۳-۵].

پدیده روانگرایی استاتیکی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پایداری سازه‌های سدهای باطله معدنی بوده و مطالعات آزمایشگاهی متعددی در خصوص این امر در چارچوب تئوری حالت بحرانی انجام شده است [۶، ۷]. یکی از معروفترین سدهای باطله که به علت پدیده روانگرایی استاتیکی دچار شکست شده‌اند، کالوراز<sup>۲</sup> می‌باشد [۸].

علاوه بر این، پدیده‌های تغییر شکلی نظیر ترک‌های کششی و تغییر شکل‌های استاتیکی نامتعارف این‌گونه سدها نیز، از دیگر مسائل مرتبط با پایداری این‌گونه سازه‌ها است. اما مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییر شکل این مصالح تحت بارگذاری‌های خاص این‌گونه سازه‌ها و حتی بررسی دقیق پدیده روانگرایی در مواد زائد معدنی، نیازمند در اختیار داشتن مدل‌های رفتاری مناسبی می‌باشد. ابهامات متعددی در خصوص استفاده از مدل‌های رفتاری متداول خاک‌ها نظیر کم کلی اصلاح شده، موه‌ر کلومب، دراکر پراگر و P<sub>2</sub>PSand جهت شبیه‌سازی رفتار این‌گونه مصالح وجود دارد [۹-۱۱]. لذا وجود یک مدل رفتاری مناسب که بتواند

به‌خوبی وضعیت تنش - کرنش این مصالح را شبیه‌سازی نماید، می‌تواند کمک شایانی به طراحی، ساخت و کنترل ایمنی این‌گونه سازه‌ها از خود نشان دهد.

سطح یا معیار تسلیم مصالح از اجزا اصلی هر مدل رفتاری است. شناسایی آزمایشگاهی سطح تسلیم مصالح خاکی در شرایط اشباع از دیرباز مورد توجه بوده است. به‌عنوان نمونه، گراهام<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۳ به روش آزمایشگاهی سطح تسلیم رس وینیپگ<sup>۴</sup> را با کمک آزمون‌های سه محوری مسیر تنش، تعیین نمودند [۱۲]. یاسوفوکا<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۱ برای ماسه‌ی اشباع آیو<sup>۶</sup> در شرایط بیش تحکیمی همسان و ناهمسان، سطح تسلیم را با کمک آزمون‌های سه محوری با مسیر تنش‌های شعاعی به نسبت تنش برشی ثابت تعیین نمودند [۱۳]. کووانا و جاردین<sup>۷</sup> در سال ۲۰۰۷ برای ماسه HRS تحقیقات مشابهی انجام داده و سطح تسلیم این مصالح را بدست آوردند [۱۴]. چو<sup>۸</sup> و همکاران سال ۲۰۱۰ سطح تسلیم رس یخچالی شیکاگو را با کمک آزمون‌های سه محوری در مسیر تنش‌های شعاعی را مورد بررسی قرار داده و همچنین سرعت موج‌برشی در داخل نمونه با استفاده از آزمایش المان خمشی را تعیین نمودند [۱۵]. ال‌شاراد<sup>۹</sup> و همکاران نیز مطالعه آزمایشگاهی گسترده‌ای جهت شناسایی سطح تسلیم رس کائولینی در شرایط اشباع و غیراشباع به کمک آزمون‌های سه محوری مسیر تنش انجام دادند [۱۶]. ویتوفسکی<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۳ سطح تسلیم خاکستر بادی کلسیمی حاصل از معدن روباز بلچاتوو<sup>۱۱</sup> در لهستان را در آزمایشگاه با کمک آزمون‌های سه‌محوری مسیر تنش شعاعی مورد بررسی قرار داده و سطح تسلیم این مصالح را استخراج نمودند [۱۷].

باتوجه به پژوهش‌های صورت گرفته، می‌توان بیان داشت تاکنون مطالعه‌ی آزمایشگاهی معتبری پیرامون شناسایی سطح تسلیم مواد زائد معدنی در شرایط بیش تحکیم یافتگی انجام نشده است.

<sup>۲</sup> Calaveras

<sup>۳</sup> Graham

<sup>۴</sup> Winnipeg

<sup>۵</sup> Yasufuka

<sup>۶</sup> Aio

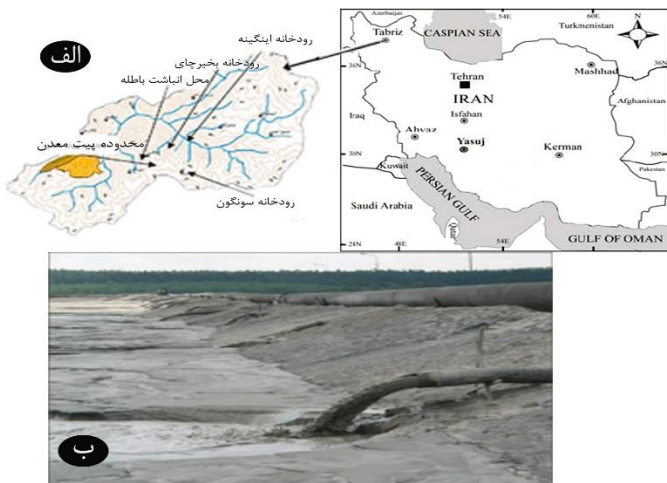
<sup>۷</sup> Kuwana and Jardine

<sup>۸</sup> Cho

<sup>۹</sup> AL-Sharrad

<sup>۱۰</sup> Witowski

<sup>۱۱</sup> Belchatow



شکل ۱- (الف) موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون و محل پیت معدن، (ب) لوله خروجی مواد زائد به سد باطله

بعد از خشک کردن مواد زائد دوغابی، تعدادی از آزمون‌های اولیه برای شناسایی خواص فیزیکی بر روی آن‌ها انجام شده که نتایج حاصل در جدول ۱ آورده شده است. مواد زائد مورد بررسی از نظر دانه‌بندی در گروه خاک‌های ریزدانه غیرخمیری قرار گرفته و شکل ۲ نشان‌دهنده منحنی دانه‌بندی این مواد براساس استاندارد ASTM D ۴۲۲-۴۳ می‌باشد [۱۶، ۲۰].

جدول ۱. خصوصیات خاک مورد بررسی

استاندارد	نتایج	خصوصیات خاک
ASTM D ۲۴۸۷	ML	نوع خاک
ASTM D ۲۴۸۷	۴۷-۵۴	درصد سیلت
ASTM D ۲۴۸۷	۱۱-۱۸	درصد رس
ASTM D ۲۴۸۷	۳۵	درصد ماسه
ASTM D ۴۳۱۸	۲۵	حد روانی (LL)
ASTM D ۴۳۱۸	۳	حد خمیری (PL)
ASTM D ۷۹۲	۲/۷۴	چگالی نسبی (Gs)
ASTM D ۴۲۵۴	۱۲/۶	حداقل دانسیته خشک (kN/m <sup>۳</sup> )
ASTM D ۴۲۵۳	۱۶/۲۹	حداکثر دانسیته خشک (kN/m <sup>۳</sup> )

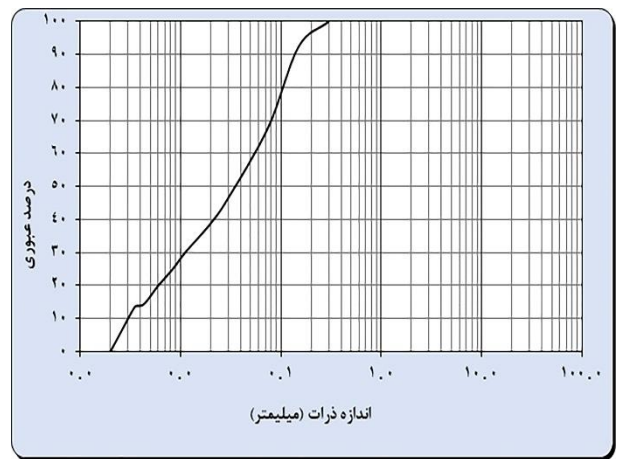
بر این اساس، هدف اصلی این مطالعه، برداشتن گامی مؤثر در جهت شناسایی سطح تسلیم مواد زائد معدنی است. مواد زائد مورد بررسی در این تحقیق، خروجی از کارخانه فراوری و تغلیظ معدن مس سونگون می‌باشند که از نظر دانه‌بندی در گروه خاک‌های ریزدانه غیر خمیری قرار می‌گیرند. در این پژوهش، سعی شده است با انجام یک‌سری آزمون‌های سه محوری تنش کنترل، سطح تسلیم این مصالح در شرایط اشباع و وضعیت تحکیمی اولیه ایزوتروپیک شناسایی گردد.

توقف عملیات طولانی مدت ریختن باطله‌های آبدار به داخل مخزن و همچنین شرایط آب و هوایی گرم، می‌تواند موجب خشک شدن لایه‌های فوقانی باطله و افزایش تنش مؤثر در لایه‌های اشباع زیرین گردد. در ادامه با بارش نزولات جوی و یا ریختن مجدد باطله‌های آبدار، باطله خشک شده‌ی سطحی مجدد اشباع می‌شوند. این فرآیند نوعی باربرداری از لایه‌های اشباع زیرین محسوب شده و موجب کاهش تنش مؤثر در آنها می‌گردد. چنین پدیده‌ای رفتار بیش تحکیمی در لایه‌های اشباع زیرین را ایجاد می‌نماید. علاوه بر این، اخیراً مطالعاتی در خصوص پیش بارگذاری مواد باطله به روش‌هایی همچون پیش بارگذاری با خلا و الکتروکنیتیک انجام شده است [۱۸، ۱۹]. با این روش‌ها نوعی بیش تحکیمی سبک به مصالح باطله اعمال می‌گردد. لذا در این مطالعه سطح تسلیم باطله معدنی موجود در لایه‌های سطحی کم عمق که همواره در شرایط اشباع بوده و تحت فرآیند بارگذاری و باربرداری مذکور دچار بیش تحکیمی سبک می‌شوند، مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات مصالح و آماده‌سازی نمونه

در حال حاضر، معدن مس سونگون دومین معدن بزرگ ایران بوده که در شمال غربی کشور واقع شده (شکل ۱ الف) و از سال ۱۳۸۵ تاکنون، مواد زائد کارخانه فراوری و تغلیظ این معدن به کمک لوله‌هایی به صورت دوغابی به داخل مخزن سدی سنگریزه‌ای با هسته رسی انتقال داده می‌شود (شکل ۱ ب). به علت بالا بودن سطح آب داخل مخزن، امکان نمونه‌گیری از داخل مخزن میسر نبوده و حجم مواد زائد مورد نیاز، به صورت دوغابی، مستقیماً از لوله خروجی مواد زائد به داخل مخزن گرفته شده است.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مواد زائد سیلتی مورد مطالعه

همان‌طور که بیان شد، با توجه به عدم امکان اخذ نمونه‌های دست نخورده، کلیه نمونه‌های آزمایش شده در این پژوهش از نوع بازسازی شده بوده که این امر خود همیشه بعنوان چالشی پیش‌روی محققین در یافتن مناسب‌ترین روش جهت بازسازی در محیط آزمایشگاهی این گونه مصالح بوده است [۲۱-۲۳]. روش تهنشست دوغابی<sup>۱۲</sup> (SD)، کوبش مرطوب<sup>۱۳</sup> (MT) و رسوب‌دهی در آب<sup>۱۴</sup> (WP) متداول‌ترین روش‌ها برای بازسازی نمونه‌های خاک می‌باشند.

روش رسوب‌دهی در آب، دقت مناسبی در شبیه‌سازی رفتار سخت‌شوندگی کرنش ماسه‌هایی که بصورت هیدرولیکی نهشته شده، از خود نشان داده است [۲۱، ۲۲]. مطابق با پژوهش‌های پیشین، می‌توان بیان داشت که مقایسه روش رسوب‌دهی در آب و روش کوبش مرطوب در ماسه سیلتی نشان‌دهنده این است که این دو روش آماده‌سازی در شبیه‌سازی رفتار برشی این مصالح، تقریباً یکسان عمل می‌نمایند [۲۴]. حال آنکه نمونه‌های ساخته شده با روش رسوب‌دهی در آب، نرم شوندگی کرنشی بیشتری نسبت به روش کوبش مرطوب از خود نشان داده‌اند [۲۴]. در همین راستا، هووگ<sup>۱۵</sup> و همکاران، به بررسی رفتار تنش - کرنش نمونه‌های دست‌نخورده اخذ شده با روش تیوبی از موادهای زائد ماسه سیلتی و نمونه‌های بازسازی شده با روش‌های کوبش مرطوب، رسوب‌دهی در آب و تهنشست دوغابی که دارای تخلخل یکسان با نمونه‌های دست‌نخورده بودند، پرداختند. نتایج حاصل نشان داد نمونه‌های دست‌نخورده، مقاوم‌تر و رفتار اتساعی قوی‌تری نسبت به نمونه‌های بازسازی شده با هر سه روش ذکر شده دارند. با این وجود رفتار تنش - کرنش نمونه‌های بازسازی شده با یکدیگر متفاوت است [۲۲]. همچنین چنگ<sup>۱۶</sup> و همکاران

از نمونه‌های دست‌نخورده‌ی بلوکی شکل مواد زائد سیلتی، با برش (کرگیری) نمونه آزمایشگاهی دست‌نخورده تهیه نمودند. همچنین نمونه‌های بازسازی شده از همین مواد با روش‌های کوبش مرطوب و تهنشست دوغابی که دارای تخلخل یکسان با نمونه‌ی دست‌نخورده بودند را، ساختند. نتایج حاصل نشان داد که هر یک از نمونه‌های بازسازی شده، خط حالت بحرانی متفاوتی با خط حالت بحرانی نمونه‌های دست‌نخورده از خود بروز می‌دهند [۲۵]. در مطالعه‌ای دیگر، ریید و فانی<sup>۱۷</sup> به بررسی رفتار مواد زائد سیلتی به وسیله انجام آزمون‌های سه محوری روی نمونه‌های دست‌نخورده تهیه شده با روش بلوکی و نمونه‌های بازسازی شده با روش کوبش مرطوب و تهنشست دوغابی پرداختند. نتایج حاصل بیانگر آنست که نمونه‌های بازسازی شده به روش کوبش مرطوب تقریباً خط حالت بحرانی یکسانی با نمونه‌های دست‌نخورده اخذ شده با روش بلوکی دارند. رفتار حاصل از نمونه‌های ساخته شده با روش تهنشست دوغابی متراکم‌تر از نمونه‌های دست‌نخورده بوده است. همچنین نمونه‌ها در سست‌ترین حالت، رفتار اتساعی از خود نشان داده‌اند که با رفتار برجای مصالح همخوانی لازم را نداشته، همچنین نتایج بیانگر آنست که روش کوبش مرطوب با وجود ارائه خط حالت بحرانی، قابل اعتمادتر ولی رفتاری تردتر و انقباضی‌تر نسبت به نمونه‌های دست‌نخورده دارند [۲۶]. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش‌های بیان شده می‌توان بیان داشت هر کدام از روش‌های نمونه‌سازی کوبش مرطوب و تهنشست دوغابی دارای مزایا و معایبی در شبیه‌سازی رفتار نمونه‌های دست‌نخورده مواد زائد سیلتی بوده و تاکنون روشی کارآمد که بتواند به‌خوبی تمام خواص رفتاری شرایط برجای (دانسیتته، بافت و ریزلایه‌های موجود) این نوع مصالح را با دقت شبیه‌سازی کند، ارائه نگردیده است.

در پژوهش حاضر، هدف شناسایی سطح تسلیم مواد زائد در عمق‌های سطحی بوده که در این وضعیت مصالح تقریباً در سست‌ترین حالت خود می‌باشند و با توجه به درصد ریزدانه بالای این مصالح و ابعاد کوچک نمونه‌های آزمایشگاهی، ساخت نمونه به روش تهنشست دوغابی دشوار بوده، لذا از روش کوبش مرطوب برای آماده‌سازی نمونه‌ها استفاده شده است. همچنین برای حذف تاثیر غیریکنواختی دانسیته در ارتفاع نمونه، از روش تراکم کاهشی استفاده شده است [۲۷]. به جهت اینکه نمونه در سطوح بالای کرنش، دارای تغییرشکل‌های یکنواخت و فاقد تمرکز برش

<sup>۱۵</sup> Høeg

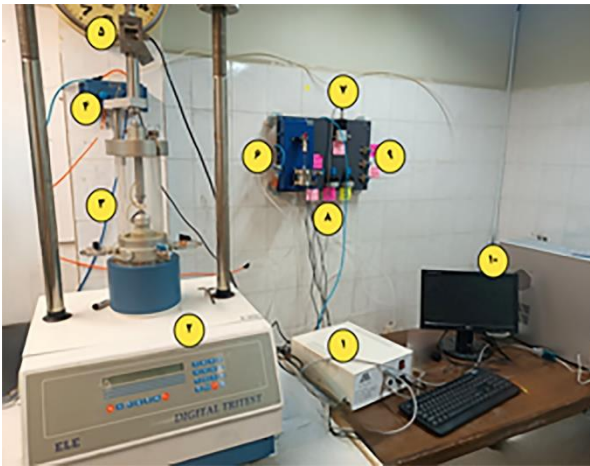
<sup>۱۶</sup> Chang

<sup>۱۷</sup> Ried and Fanni

<sup>۱۱</sup> Slurry Deposition

<sup>۱۲</sup> Moist Tamping

<sup>۱۳</sup> Water pluviation



شکل ۳- تجهیزات مورد استفاده شامل (۱) سیستم ثبت، کنترل و قرائت داده، (۲) جک برقی جهت اعمال نیروی محوری، (۳) سلول کاشت نمونه، (۴) کرنش سنج محوری نمونه، (۵) نیروسنج، (۶) کرنش سنج حجمی، (۷) رگلاتور برقی، (۸) رگلاتورهای دستی، (۹) حسگرهای فشارسنج و (۱۰) سیستم کامپیوتر مرکزی

### ۲-۳- متغیرها و پارامترهای مورد نیاز

متغیرهای اصلی تنش در خاک مطابق روابط (۱) و (۲) تعریف می‌شوند:

$$p'_n = \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right) - u_w \quad (1)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

در روابط فوق،  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  تنش‌های اصلی، متغیرهای  $q$  و  $p'_n$  نیز به ترتیب معرف تنش خالص میانگین موثر و تنش تفاضلی می‌باشند.

در این پژوهش برای بیان نسبت تنش‌های اعمالی به نمونه در شرایط تنش ناهمسان، از متغیر نسبت تنش برشی ( $\eta$ ) و همچنین شیب خط حالت بحرانی  $M_P$  و  $M_t$ ، به ترتیب به ازای آزمایش‌های سه محوری فشاری و کششی مطابق روابط (۳) الی (۵) استفاده شده است.

$$\eta = \frac{\Delta q}{\Delta p} \quad (3)$$

$$M_p = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (4)$$

$$M_t = \frac{6 \sin \phi'}{3 + \sin \phi'} \quad (5)$$

باشد، نمونه‌ها تا حد امکان، سست ساخته شده و دانسیته معادل با دانسیته نسبی ( $D_r$ ) ۳۰ درصد که معادل با وزن مخصوص خشک ۱۳/۵ کیلو نیوتن بر مترمکعب است، معرف شرایط تراکمی اولیه کلیه نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین، مطابق پیشنهاد های ارائه شده در روش تراکم کاهشی، برای رسیدن به این دانسیته، به مواد زائد سیلنتی حدود ۸ درصد وزنی، رطوبت افزوده شده، نمونه با ارتفاع ۷۲ میلی‌متر و قطر ۳۸ میلی‌متر در پنج لایه متراکم و بازسازی شده است.

### ۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

در پژوهش حاضر، به منظور انجام آزمایش‌های سه‌محوری اشباع مسیر تنش تحت شرایط تنش همسان، از دستگاه سه‌محوری ارتقاء یافته با قابلیت بارگذاری به صورت کرنش و تنش کنترل استفاده شده است (شکل ۳). دستگاه فوق دارای یک رگولاتور برقی (با قابلیت تنظیم فشار خودکار) و یک رگولاتور دستی بوده که از کمپرسوری با ظرفیت اسمی ۱۰ بار تغذیه می‌شود. این رگولاتورها به همراه دو دستگاه تبدیل فشار هوا به آب (بلادر)، وظیفه تأمین فشار هم‌جانبه و فشار برگشتی داخل نمونه را دارند. همچنین جهت اعمال تنش برشی اولیه، از جک برقی (با قابلیت تنظیم نیروی مورد نیاز به کمک کدنویسی) استفاده شده است. مقادیر تغییر حجم نمونه، تغییر شکل قائم و نیروی محوری در طی آزمایش توسط دو دستگاه اندازه‌گیری تغییر حجم اتوماتیک، حسگر نیرو و حسگر تغییر مکان اندازه‌گیری می‌شوند. کلیه رگلاتورهای برقی، جک برقی و حسگرهای دستگاه، به واحد قرائت، کنترل و ثبت داده، با قابلیت ثبت داده در هر ۳ ثانیه، متصل بوده و بدین ترتیب قابلیت اعمال مسیرهای تنش مختلف و ثبت داده‌های خروجی به صورت تمام اتوماتیک فراهم آمده است. با وجود رگلاتور برقی با قابلیت تنظیم خودکار فشار همه جانبه و همچنین جک دارای قابلیت تنظیم خودکار تنش انحرافی، در ادامه با تعریف کدهای دستوری مسیر تنش برای دستگاه کنترل‌گر، فرایند بارگذاری بر نمونه به نحوی کنترل و اعمال شده است که در حین هر آزمایش، مسیر تنش با نسبت تنش برشی اولیه تا رسیدن به نقطه تسلیم ادامه یابد. همچنین به علت اتصال کپ نمونه به میله بارگذاری قابلیت کاهش بار قائم انحرافی نیز در این دستگاه سه محوری ارتقا یافته وجود داشته و اعمال مسیرهای کششی میسر شده است.

مقادیر انرژی ناشی از کار توسعه یافته ( $W$ ) و طول بردار تنش ( $L$ ) در حین فرایند بارگذاری، مطابق روابط (۶) و (۷) بیان می-شوند [۱۲]:

$$W = \sum (\sigma'_1 \delta \varepsilon_a + 2\sigma'_3 \delta \varepsilon_r) \quad (6)$$

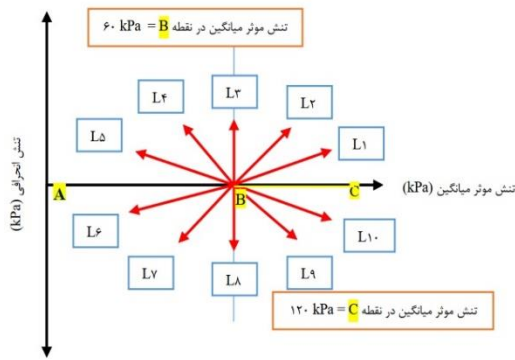
$$L = (\Delta \sigma'_1{}^2 + \Delta \sigma'_3{}^2)^{0.5} \quad (7)$$

که در روابط فوق،  $\varepsilon_a$  و  $\varepsilon_r$  به ترتیب کرنش محوری و شعاعی نمونه می-باشند.

### ۴-۲- فرایند انجام آزمایش‌های تنش و کرنش کنترل

در این پژوهش به منظور بررسی رفتار همسان اشباع نمونه‌های بازسازی شده از مواد زائد معدن مس سونگون، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری اشباع در شرایط همسان تحکیم شده، تحت مسیرهای بارگذاری کششی و فشاری متفاوت به صورت تنش کنترل انجام گردیده است.

پس از آماده‌سازی نمونه و نصب غشا مناسب، نمونه در داخل محفظه سل دستگاه سه محوری قرار داده شده و با فشار یک ۵۰ کیلوپاسکال اشباع گردیده است. سپس نمونه با نرخ ۵ کیلوپاسکال بر ساعت تا تنش همه جانبه‌ی ۱۲۰ کیلوپاسکال به صورت همسان تحکیم شده است (A تا C در شکل ۴). در ادامه، با همین نرخ تا تنش همه جانبه‌ی ۶۰ کیلوپاسکال بصورت ایزوتروپیک باربرداری انجام شده (C تا B در شکل ۴) و سپس در مسیرهای تنش  $L_1$  تا  $L_{10}$  بارگذاری در مسیرهای فشاری یا کششی با نسبت تنش برشی اولیه ثابت ( $\eta$ ) برای شناسایی سطح تسلیم با سرعت تغییرات تنشی ۵ kPa/hr ادامه یافته است. لازم به ذکر است که با فرض ثابت بودن سطح مقطع، اعداد جدول ۲ بیان گردیده‌اند که در ادامه آزمایشات، با نتایج کرنش حجمی و کرنش محوری، مقدار ( $\eta$ ) اصلاح می‌گردد. همچنین باید بیان داشت تا رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، فرض ( $\eta$ ) اولیه با تقریبی مناسب، نزدیک به ( $\eta$ ) مفروض شده بدست خواهد آمد، دلیل این امر آنست که تا رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، نتایج کرنش‌های محوری و حجمی مقادیر کوچکی می‌باشند اما پس از رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، مقادیر اصلاح شده جایگزین می‌گردد. همچنین باید توجه نمود که نرخ بارگذاری با توجه به توصیه‌های فنی معتبر در خصوص نرخ بارگذاری انحرافی [۲۸، ۲۹] به نحوی تنظیم گردیده تا بارگذاری در شرایط زهکشی شده قرار گیرد. مقادیر نسبت تنش برشی برای هر یک از مسیرهای نشان داده شده در شکل ۳ بصورت عددی در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۴- مسیر تنش اعمالی به نمونه‌ها

جدول ۲- آزمایش‌های مسیر تنش

شماره تست	نام مسیر تنش	$\eta$ اولیه
۱	$L_1$	۰/۵
۲	$L_2$	۱/۵
۳	$L_3$	مسیر قائم (رو به بالا)
۴	$L_4$	-۱/۵
۵	$L_5$	-۰/۵
۶	$L_6$	۰/۵
۷	$L_7$	۱/۵
۸	$L_8$	مسیر قائم (رو به پایین)
۹	$L_9$	-۱/۵
۱۰	$L_{10}$	-۰/۵

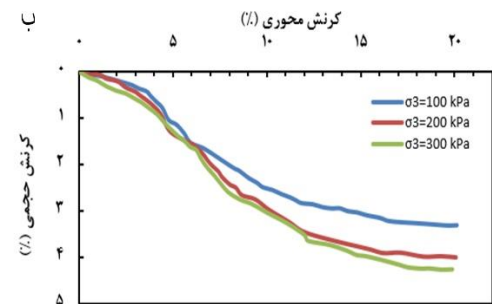
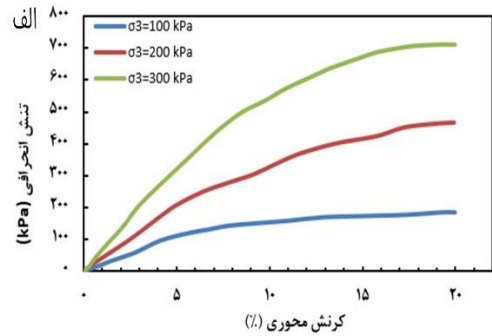
همچنین، علاوه بر آزمون‌های فوق، جهت تعیین شیب خط بحرانی در حالت کششی ( $M_t$ ) و فشاری ( $M_p$ )، سه آزمایش سه محوری زهکشی شده با کرنش کنترل در تنش‌های همه جانبه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بحث و بررسی نتایج آزمایشگاهی

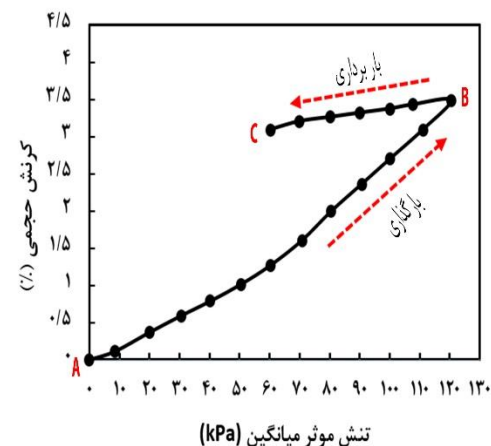
نمودارهای تنش انحرافی - کرنش محوری و کرنش حجمی - کرنش محوری برای آزمون‌های سه محوری زهکشی شده کنترل کرنش در شکل ۵ نشان داده شده است. در تمامی آزمایشات صورت گرفته و نمودارهای ارائه شده (شامل کنترل تنش یا کنترل کرنش)، علامت مثبت کرنش محوری و حجمی، به ترتیب

کاهش ارتفاع و کاهش حجم نمونه در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل، مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی زهکشی شده مصالح به ترتیب مقادیر ۳۰/۳۷ درجه و ۲ کیلوپاسکال و همچنین مطابق روابط (۴) و (۵) شیب خط حالت بحرانی کششی ( $M_t$ ) و فشاری ( $M_p$ ) به ترتیب ۰/۸۵ و ۱/۲۱۶ می‌باشند.



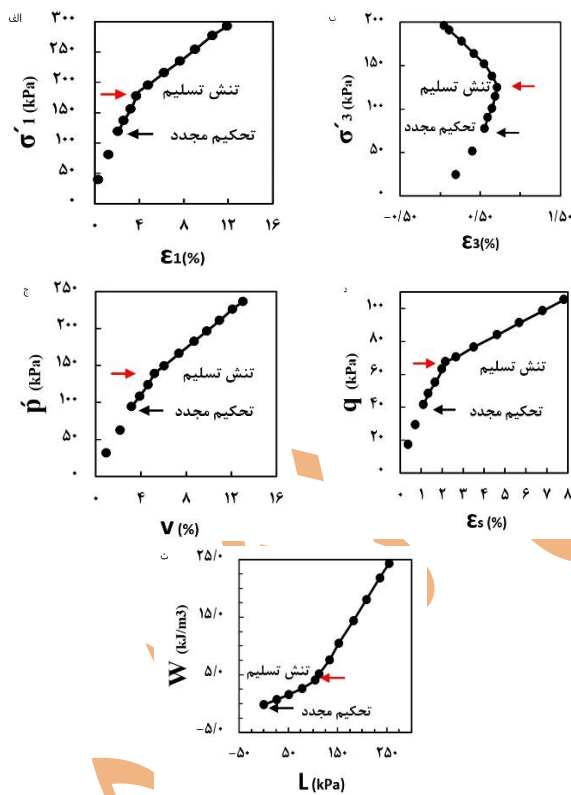
شکل ۵ - نتایج سه محوری (کرنش کنترل) زهکشی شده (الف) کرنش محوری برحسب تنش تفاضلی (ب) کرنش محوری برحسب کرنش حجمی

همچنین، کرنش حجمی نمونه مواد زائد در حین فرایند بارگذاری - باربرداری در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ - کرنش حجمی نمونه در حین فرایند باربرداری - بارگذاری

گراهام و همکاران [۱۲]، با توجه به ایده برآورد تنش تسلیم با تشخیص بصری نقطه حداکثر انحنای بر روی منحنی تراکم [۱۲] و ایده تقاطع دو خط [۱۲] در صفحه  $v: Ln\sigma'$  در آزمون‌های اِدئومتر و همچنین روش دوخطی گراهام و همکاران [۱۲] در تشخیص تنش تسلیم برای مجموعه آزمایش‌های سه محوری بر روی رس، با روش دوخطی، میزان تنش تسلیم را برای هر یک از نمودارهای شکل ۷ تعیین نموده و سپس میانگین تنش همه جانبه‌ی موثر ( $\bar{p}$ ) این نمودارها را بعنوان تنش موثر میانگین نمونه‌های ماسه بیش تحکیم یافته در لحظه‌ی تسلیم در نظر گرفتند [۱۲، ۳۰-۳۲].



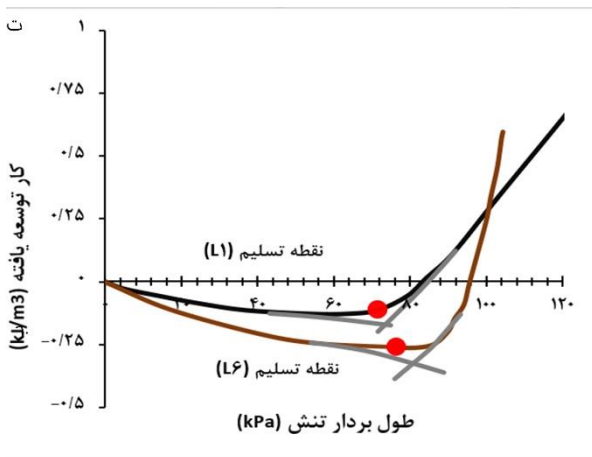
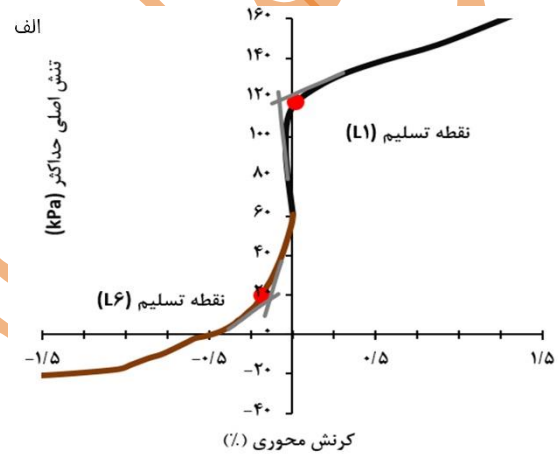
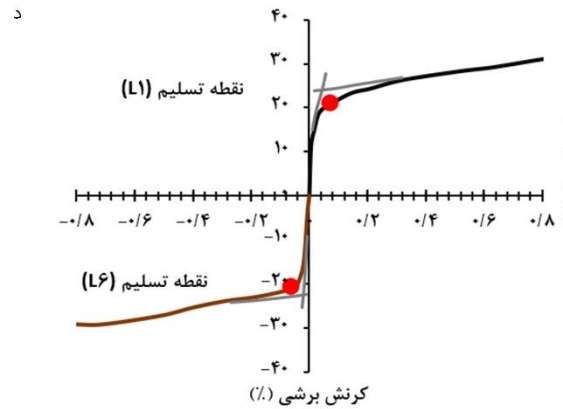
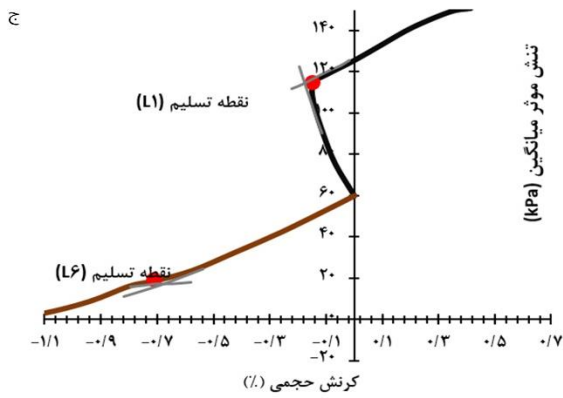
شکل ۷- منحنی‌های حاصل از نتایج گراهام و همکاران [۱۲]

خطای ذهنی موجود در شناسایی تنش تسلیم بویژه در بعضی مسیرها از معایب اصلی روش دوخطی بوده [۱۳، ۳۲، ۳۳]. همین امر باعث شده تا محققان دیگری سعی نمایند روش‌های جایگزینی نظیر استفاده سرعت موج برشی در حین بارگذاری برای شناسایی سطح تسلیم را مورد بررسی قرار دهند [۱۵].

در این پژوهش برای مواد زائد مورد مطالعه، نمودارهای  $\sigma_1 : \epsilon_1$  و  $\sigma_3 : \epsilon_3$ ،  $\bar{p} : v$ ،  $q : \epsilon_s$  و  $L : W$  در مسیرهای بارگذاری  $L_1$

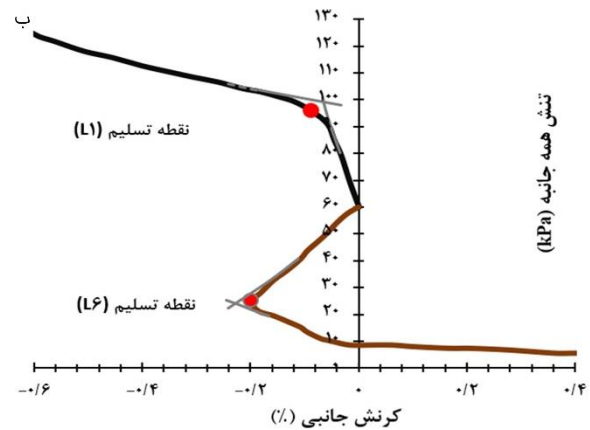


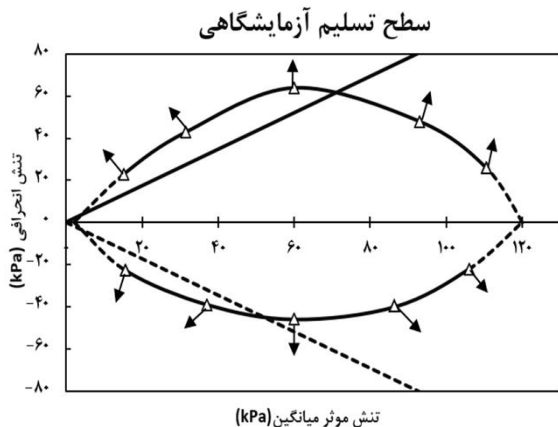
$L_6$  در شکل ۸ نشان داده شده است. با کمک روش دوخطی، تنش موثر میانگین تسلیم در هریک از نمودارهای شکل ۸ تعیین شده، سپس برای تمامی مسیرهای دیگر نیز به همین شیوه مقادیر تنش موثر میانگین تسلیم در کلیه نمودارهای مذکور تعیین گردیده است. لازم به ذکر است که در نمودارهای شکل ۸، متوسط تنش موثر میانگین در هر مسیر بعنوان تنش موثر میانگین نمونه در لحظه تسلیم در نظر گرفته شده است. مقدار تنش تفاضلی متناظر با تنش موثر میانگین مذکور، از داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده است. حال با داشتن زوج مقادیر حاصل در هر مسیر تنش، موقعیت سطح تسلیم در فضای  $p-q$  تعیین می‌گردد.



شکل ۸ - منحنی‌های حاصل از نتایج مسیرهای  $L_1$  و  $L_6$

در شکل ۹ تغییرات کار توسعه یافته در مقابل طول بردار تنش (مطابق روابط ۶ و ۷) و موقعیت نقطه تسلیم در هریک از مسیرها مشخص شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، مقادیر کار توسعه یافته برای همه مسیرها به جز  $L_1$  نقاط تسلیم در حدود  $0.25 \text{ KJ/m}^3$  بوده که این محدوده انرژی برای اکثر مسیرها می‌تواند بعنوان شاخصی در جهت شناسایی مناسب تر سطح تسلیم مدنظر قرار گیرد.





شکل ۱۰- بردار یکه جریان خمیری در محل نقطه‌ی تسلیم هریک از مسیرها

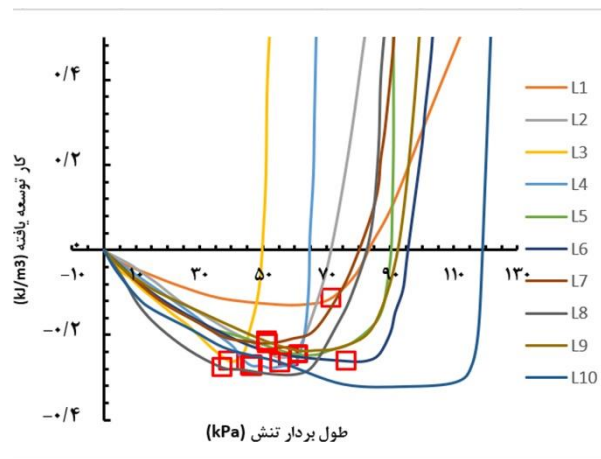
### ۳-۲- مقایسه‌ی سطح تسلیم حاصل از نتایج آزمایشگاهی با سطح تسلیم حاصل از مدل‌های رفتاری موجود

همانطور که پیشتر بیان گردید، هدف اصلی از شناسایی سطوح تسلیم مصالح، در نهایت، تعیین مدل رفتاری مناسب می‌باشد. استخراج معادله‌ی سطح تسلیمی که بتواند بخوبی رفتار این مواد زائد معدنی را شبیه‌سازی نماید، نیازمند آزمون‌های مختلف با تنش‌های بیش تحکیمی متفاوت می‌باشد. با این وجود، در این پژوهش به جهت ارائه طرحی اولیه، سطح تسلیم آزمایشگاهی حاصله با سطح تسلیم یک مدل رفتاری در شرایط تنشی مشابه مقایسه گردیده است.

ام-رز<sup>۱۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۳ فرمول‌بندی سه بعدی از یک مدل رفتاری با قانون جریان غیروابسته برای مصالح دانه‌ای شل و اشباع تحت بارگذاری مونوتونیک ارائه داده و این مدل را برای شبیه‌سازی پدیده روانگرایی استاتیکی در این مصالح پیشنهاد نمودند [۳۴].

رابطه‌ی منحنی تسلیم این مدل در شرایط بارگذاری سه محوری فشاری (رابطه ۸) و در شرایط بارگذاری سه محوری کششی (رابطه ۹) به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$F = q^2 - L^2 p'^2 \left[ \frac{1+s}{s} \left( 1 - \frac{p'}{p'_F} \right) \right]^{2s} = 0 \quad (8)$$



شکل ۹- تغییرات کار توسعه یافته در مقابل طول بردار تنش و موقعیت نقطه‌ی تسلیم

یکی از نکات قابل تامل برای مواد زائد مورد آزمایش این است که در نمودار شکل ۹ انتظار می‌رود با ادامه‌ی بارگذاری بعد از نقطه تسلیم، با افزایش سرعت توسعه کرنش‌های خمیری، شاهد تغییرات غیرخطی نمودارها باشیم، اما همانطور که از نتایج پیداست، مشاهده می‌شود تا مدتی بعد از نقطه‌ی تسلیم، همچنان نمودار حالت خطی خود را حفظ می‌نماید. چنین رفتاری در تحقیقات یوسوفوکا<sup>۱۸</sup> و همکاران که شامل مجموعه آزمایش‌های مسیر تنش بر روی نمونه‌های رس طبیعی بوده، مشاهده گردیده که نویسندگان چنین پدیده‌ای را به سمنتاسیون مصالح رسی درجا نسبت داده‌اند [۱۳]. در خصوص مواد زائد نیز با توجه به ترکیبات شیمیایی و مواد مصرفی موجود در فرایند فراوری، ممکن است پدیده‌ای مشابه سمنتاسیون البته با سرعت فرایندی سریع‌تر به وقوع بپیوندد ولی اظهارنظر قطعی در این خصوص نیازمند تحقیقات بیشتری است.

در شکل ۱۰ بردار جریان خمیری در محل نقطه‌ی تسلیم هریک از مسیرها نشان داده شده است. یکی از نکات قابل توجه در این نمودار، غیر عمود بودن این بردارها بر سطح تسلیم می‌باشد. هرچند قضاوت قطعی در خصوص وابسته یا غیروابسته بودن قانون جریان، نیازمند آزمون‌های بیشتر با تنش‌های بیش تحکیمی متعددی است اما نتایج آزمون‌های انجام شده نشان می‌دهد قانون جریان برای این شرایط بارگذاری غیروابسته می‌باشد.

<sup>۱۹</sup> Mroze

<sup>۱۸</sup> Yasufuka

$$F = q^2 - \left( \frac{3L}{3+tM} \right)^2 p'^2 \left[ \frac{1+s}{s} \left( 1 - \frac{p'}{p'_F} \right) \right]^{2s} = 0 \quad (9)$$

مدل در پیش‌بینی نقاط تسلیم مواد زائد معدنی مورد مطالعه دارد. مواد زائد مورد مطالعه دارای تراکم نسبی پایین، غیرخمیری و درصد ماسه حدود ۳۵ درصد می‌باشد و سطح تسلیم آزمایشگاهی آن‌ها نیز در شرایط تنش آزمایش‌شده غیروابسته است. مدل رفتاری ام-رز نیز یک مدل رفتاری با قانون جریان غیر وابسته بوده که برای مصالح دانه‌ای، اشباع و با تراکم ضعیف پیشنهاد شده است، لذا انطباق مناسب بین سطح تسلیم آزمایشگاهی و سطح تسلیم مدل مذکور در این شرایط بارگذاری معقول می‌باشد. در مسیر تنش  $L_{10}$  حداکثر ۵٪ اختلاف بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌گردد. البته قضاوت قطعی در خصوص دقت این مدل برای پیش‌بینی سطح تسلیم مواد زائد معدنی سونگون نیازمند انجام مطالعات آزمایشگاهی مشابهی در سطوح تنش متفاوت و نسبت‌های بیش تحکیمی متعددی است. با این حال، با توجه به اینکه این مدل رفتاری برای پیش‌بینی پدیده روانگرایی استاتیکی در مصالح دانه‌ای شل ارائه شده است، در صورت اینکه این مدل رفتاری غیروابسته قابلیت پیش‌بینی مناسبی از نتایج مطالعات آزمایشگاهی داشته باشد، آنگاه ارزیابی پدیده روانگرایی استاتیکی مواد زائد بعنوان یکی از مهمترین پدیده‌های ناپایدارکننده در سد باطله سونگون با کمک این مدل رفتاری میسر خواهد بود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

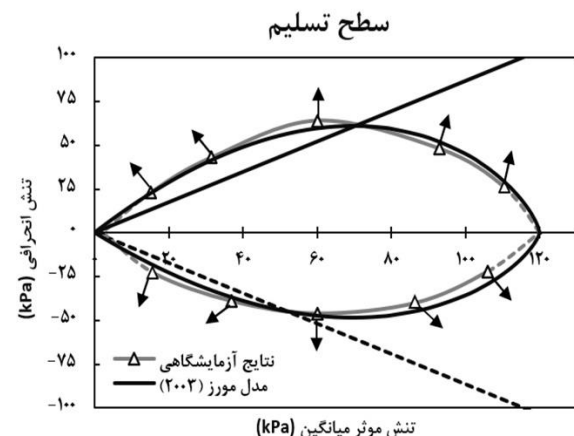
در این مطالعه آزمون‌های سه محوری مسیر تنش فشاری و کششی برای شناسایی سطح تسلیم مواد زائد معدنی اشباع خروجی از کارخانه فراوری معدن مس سونگون در شرایط تنش اولیه همسان و با نسبت بیش تحکیمی سبک ( $OCR=2$ ) انجام شده است. جهت حصول این هدف، به کمک دستگاه سه محوری تمام اتوماتیک، آزمون‌های سه محوری زهکشی شده در شرایط تنش کنترل در مسیرهای شعاعی انجام گردیده و بعد از انجام آزمون‌ها، با روش تقریب دو خط، تنش تسلیم در هر یک از مسیرها شناسایی و در ادامه سطح تسلیم این مصالح در فضای تنش مؤثر  $q:p'$  ترسیم شده است.

محاسبه کار توسعه یافته برای هر مسیر تنش نشان می‌دهد که در اکثر مسیرها به جز  $L_1$  در انرژی کار حدود ۰/۲۵ کیلوژول بر مترمکعب، نمونه‌ها به شرایط تسلیم رسیده و ترسیم بردارهای جریان نشان داد که سطح تسلیم حاصل، از قانون جریان غیروابسته تبعیت می‌کند.

مشاهده روند خطی تغییرات تغییرشکل مصالح مورد آزمایش بعد از نقطه تسلیم، حکایت از نوعی سمانتاسیون سریع در این

در روابط فوق  $M$  شیب خط حالت بحرانی در شرایط بارگذاری سه محوری فشاری در فضای  $q:p'$ ،  $L$  معادل با نسبت  $q$  به  $p'$  در بالاترین نقطه منحنی تسلیم و  $s$  ثابتی بدون بعد بین صفر و یک بوده که تحذب و تقعر منحنی تسلیم را کنترل می‌نماید. همچنین  $t$  ثابت مصالح بوده و بایستی با این شرط که  $t^*M$  کوچکتر یا مساوی ۳ باشد تعیین گردد.  $P_F$  محل تقاطع منحنی تسلیم با محور  $p'$  است. این کمیت، بزرگی منحنی تسلیم را نشان داده و معادل با همان حداکثر تنش میانگین ایزوتروپیک است که نمونه تحت آن تنش میانگین ایزوتروپیک تحکیم گردیده است. باید توجه نمود که قانون جریان این مدل از نوع غیروابسته می‌باشد.

پارامتر  $M$  یا شیب خط حالت بحرانی در شرایط بارگذاری محوری فشاری با کمک رابطه ۴ از نتایج آزمون‌های سه محوری کنترل کرنش معادل با ۱/۲۱۶ استخراج شده است.  $P_F$  و  $p'_F$  معادل با ۱۲۰ کیلوپاسکال می‌باشد. مقدار  $L$  برای سطح تسلیم حاصل، معادل با نسبت  $q$  به  $p'$  در نقطه تسلیم مسیر  $L_3$  معادل با ۱/۰۶۷ بوده و مقادیر  $s$  و  $t$  در شرایط حداکثر تطابق مدل رفتاری مورز به ترتیب معادل با ۰/۷ و ۱/۲۵ به دست آمده است. در شکل ۱۱ مقایسه‌ی سطح تسلیم آزمایشگاهی با سطح تسلیم پیشنهادی مدل ام-رز ارائه شده است.



شکل ۱۱- مقایسه‌ی سطح تسلیم آزمایشگاهی با سطح تسلیم پیشنهادی مدل مورز

با توجه به شکل ۱۱ مقایسه سطح تسلیم پیشنهادی مدل رفتاری ام-رز با سطح تسلیم آزمایشگاهی حکایت از دقت مناسب این

- [۱] Amezaga, J., Baresel, C., Destouni, G., Göbel, J., Gren, I.M., Hannerz, F., Larsén, L., Loredo, J., Malmström, M., Nuttall, C. and Santamaria, L., ۲۰۰۴. Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment-Focused Remediation. *Mine water and the environment*, 23(۱), pp. ۱-۸۰.
- [۲] Wieland, M. and Fan, B.H., ۲۰۰۴, August. The activities of the international commission on large dams (ICOLD) in the earthquake safety of large dams. In *Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering*.
- [۳] Bhanbhro, R., Auchar Zardari, M., Ahmed Memon, B., Ali Soomro, M., Edeskär, T. and Knutsson, S., ۲۰۲۱. Mechanical properties and particle breakage of uniform-sized tailings material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(۳), p. ۰۴۰۲۰۴۸۱.
- [۴] Ma, C., Li, R., Zhang, C., Guo, X. and Li, X., ۲۰۲۳. A study on compressibility and permeability of tailings with different particle sizes under high pressure. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(۴), p. ۱۰۶.
- [۵] Essayad, K. and Aubertin, M., ۲۰۲۱. Consolidation of hard rock tailings under positive and negative pore-water pressures: testing procedures and experimental results. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(۱), pp. ۴۹-۶۵. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0594>
- [۶] Baradaran, M.S., Qazanfari, R. and Baradaran, S., ۲۰۲۳. Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule. *Materials Research Express*, 10(۵), p. ۰۵۵۲۰۲. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af>
- [۷] Wagner, A.C., de Sousa Silva, J.P., de Azambuja Carvalho, J.V., Rissoli, A.L.C., Cacciari, P.P., Chaves, H.M., Scheuermann Filho, H.C. and Consoli, N.C., ۲۰۲۳. Mechanical behavior of iron ore tailings under standard compression and extension triaxial stress paths. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(۷), pp. ۱۸۸۳-۱۸۹۴. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.11.013>
- [۸] Mmbando, E., Fourie, A. and Reid, D., ۲۰۲۳. Mechanics of an Iron Ore Tailings Exhibiting Transitional Behaviour. *Geotechnical and Geological Engineering*, pp. ۱-۱۰.
- [۹] Halliday, A., Vulpe, C., Fourie, A. and Arenas, A., ۲۰۲۲, July. Limitations of Classic Constitutive Soil Models and Their Suitability to Represent Tailings Behaviour. In *International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics* (pp. ۱۰۲-۱۰۹). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-12851-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-12851-6_13)

مصالح دارد. با وجود مواد شیمیایی مورد استفاده در فرایند فراوری و موجود در آب، رخداد چنین پدیده‌ای امکان‌پذیر خواهد بود.

باید توجه نمود که سطح تسلیم مدل رفتاری ام-رز که دارای قانون جریان غیروابسته بوده، با دقت مناسبی با سطح تسلیم آزمایشگاهی مواد زائد در شرایط تنشی مذکور تطابق دارد.

با توجه به قابلیت مدل رفتاری ام-رز در پیش‌بینی پدیده روانگرایی استاتیکی مصالح دانه‌ای اشباع، در صورت مطالعات آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی دقت این مدل رفتاری، امکان استفاده از این مدل رفتاری در ارزیابی روانگرایی استاتیکی مواد زائد سد سونگون با دقت مناسبی وجود دارد.

### فهرست علائم

$c$	چسبندگی، kPa
$G_s$	چگالی ویژه خاک
$LL$	حد روانی، درصد
$\dot{p}$	تنش موثر میانگین، kPa
$PI$	نشان خمیری، درصد
$PL$	حد خمیری، درصد
$p_n$	تنش خالص میانگین، kPa
$q$	تنش تفاضلی، kPa
$S_r$	درجه اشباع
$w_i$	رطوبت اولیه، درصد
$M_p$	شیب خط حالت بحرانی در آزمایش - های سه محوری فشاری
$M_t$	شیب خط حالت بحرانی در آزمایش - های سه محوری کششی
$L$	طول بردار تنش
$W$	تغییرات کار توسعه یافته
$k$	نسبت تنش‌های اصلی
$\sigma_1$	تنش‌های اصلی، kPa
$\sigma_2$	
$\sigma_3$	
$\varepsilon_v$	کرنش حجمی
$\varepsilon_1$	کرنش محوری
$\varepsilon_2$	کرنش جانبی
$\sigma_{3n}$	تنش همه جانبه خالص، kPa
$\phi'$	زاویه اصطکاک داخلی خاک، درجه
$\eta$	نسبت تنش‌های برشی
$\tau$	مقاومت برشی، kPa

### مراجع

- [21] Been, K., Jefferies, M.G. and Hachey, J., 1992. Discussion: The critical state of sands. *Geotechnique*, 42(4), pp.655-663.
- [22] Høeg, K., Dyvik, R. and Sandbækken, G., 2000. Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(7), pp.69-77. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-2441\(2000\)126:7\(69\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-2441(2000)126:7(69))
- [23] Daliri, F., Simms, P. and Sivathayalan, S., 2015. Discussion of "Stiffness and strength governing the static liquefaction of tailings" by F. Schnaid, J. Bedin, AJP Viana da Fonseca, and L. de Moura Costa Filho. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(9), p.07015023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606,0001328](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606,0001328).
- [24] Murthy, T.G., Loukidis, D., Carraro, J.A.H., Prezzi, M. and Salgado, R., 2007. Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Géotechnique*, 57(3), pp.273-288. <https://doi.org/10.1688/geot.2007.57.3.273>
- [25] Chang, N., Heymann, G. and Clayton, C., 2011. The effect of fabric on the behaviour of gold tailings. *Géotechnique*, 61(3), pp.187-197. <https://doi.org/10.1688/geot.9.P.099>
- [26] Reid, D. and Fanni, R., 2022. A comparison of intact and reconstituted samples of a silt tailings. *Géotechnique*, 72(2), pp.176-188. <https://doi.org/10.1688/geot.20.P.020>
- [27] Ladd, R.S., 1978. Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical testing journal*, 1(1), pp.19-23. <https://doi.org/10.1520/GTJ10364J>
- [28] Lade, P.V., *Triaxial testing of soils*. 2016: John Wiley & Sons.
- [29] Head, K.H., *Manual of soil laboratory testing. Volume 3: effective stress tests*. 1998: John Wiley & Sons.
- [30] Casagrande, A., 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech.* (pp. 3-6).
- [31] Butterfield, R., 1979. A natural compression law for soils (an advance on  $e-\log p'$ ). *Géotechnique*, 29(4), pp.469-480. <https://doi.org/10.1688/geot.1979.29.4.469>
- [32] Graham, J., Pinkney, R.B., Lew, K.V. and Trainor, P.G.S., 1982. Curve-fitting and laboratory data. *Canadian Geotechnical Journal*, 19(2), pp.201-205. <https://doi.org/10.1139/t82-023>
- [33] Roscoe, K. and Burland, J.B., 1968. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. [10] Carneiro, J.J.V., Faria, A.D.O. and Júnior, M.P.D.S., 2022. Calibration of Modified Cam-Clay Parameters for Red Mud Tailings: A Case Study. <https://doi.org/10.14288/10.438106>
- [11] Mánica, M.A., Arroyo, M., Gens, A. and Monforte, L., 2022. Application of a critical state model to the Merriespruit tailings dam failure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 175(2), pp.151-165. <https://doi.org/10.1688/jgeen.21,0001>
- [12] Graham, J., Noonan, M.L. and Lew, K.V., 1983. Yield states and stress-strain relationships in a natural plastic clay. *Canadian geotechnical journal*, 20(3), pp.52-59. <https://doi.org/10.1139/t83-058>
- [13] Yasufuku, N., Murata, H. and Hyodo, M., 1991. Yield characteristics of anisotropically consolidated sand under low and high stresses. *Soils and Foundations*, 31(1), pp.95-109. <https://doi.org/10.3208/sandf.31.95>
- [14] Kuwano, R. and Jardine, R.J., 2007. A triaxial investigation of kinematic yielding in sand. *Géotechnique*, 57(7), pp.663-679. <https://doi.org/10.1688/geot.2007.57.7.663>
- [15] Cho, W. and Finno, R.J., 2010. Stress-strain responses of block samples of compressible Chicago glacial clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), pp.178-188. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606,000186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606,000186).
- [16] Al-Sharrad, M.A., Gallipoli, D. and Wheeler, S.J., 2017. Experimental investigation of evolving anisotropy in unsaturated soils. *Géotechnique*, 67(12), pp.133-149. <https://doi.org/10.1688/geot.15.P.279>
- [17] Witowski, M., Zabielska-Adamska, K. and Łukasik, S., 2023. Stress-Strain Responses of Calcium Fly Ash. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(11), p.04023108. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-9968>
- [18] Ahmadi, A. and J.B. Bazaz, A new analytical model to predict the effect of suction removal on vacuum preloading of fine copper tailings. *Engineering Geology*, 2023. 322: p. 107176.
- [19] Ahmadi, A. and J.B. Bazaz, A comprehensive study on the effects of initial water content, suction magnitude, and drainage zone size on self-weight consolidation and vacuum preloading of soft soils and slurried mine tailings. 2024.
- [20] Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M. and Maleki, A., 2024. Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. *Case Studies in Construction Materials*, 20, p.e02740. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740>

*Geomechanics*, 3(2), pp. ۱۳۳-۱۴۴.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2003\)2:2\(133\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2003)2:2(133))

[۳۴] Mróz, Z., Boukpeti, N. and Drescher, A., ۲۰۰۳. Constitutive model for static liquefaction. *International Journal of*

فصلنامه علمی پژوهشی