



## مطالعه رفتار خاک ماسه‌ای گچ‌دار شهر نجف در حضور مکش بافتی با استفاده از دستگاه سه‌محوری غیر اشباع

مصطفی عبدالحسین<sup>۱</sup>، علی اخترپور<sup>۲\*</sup>، محمد محمود<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه کوفه، نجف، عراق

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۲۵

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۰۲

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۰۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۲۰

### کلمات کلیدی:

شهر نجف

خاک ماسه‌ای گچ‌دار

آزمون‌های غیر اشباع

مکش بافتی

آزمایش سه‌محوری

**خلاصه:** ساخت و ساز بر روی خاک‌های گچی در حالی که توده خاک در حالت غیر اشباع قرار دارد سبب بروز نشست‌های زیادی نمی‌شود اما افزایش رطوبت در این خاک‌ها سبب ایجاد تغییر شکل‌هایی در توده آن شده که حتی می‌تواند سبب فروریزش اسکلت خاک گردد. در این مطالعه تأثیر میزان اشباع شدگی بر تغییر شکل این نوع از خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی این رفتار، در این پژوهش خاک گچ‌دار شهر نجف، به عنوان یکی از مناطق دارای خاک با درصد گچ بالا در کشور عراق، مورد بررسی قرار گرفته است. لذا با استفاده از سیستم سه‌محوری ارتقا یافته با قابلیت انجام آزمون‌های غیر اشباع، نمونه‌هایی دست خورده با ۱۴٪ و ۲۹٪ گچ مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌اند. مکش‌های بافتی مورد بررسی شامل؛ ۱۰۰، ۶۰، ۳۰ و صفر درصد از مکش بافتی اولیه در محل خاک بوده است. مسیر تنش اعمال شده به نمونه‌ها به گونه‌ای بوده است که شرایط سازه از قبل ساخته شده بر روی خاکی با درجه اشباع معین را شبیه سازی نماید (مکش بافتی مشخص). همچنین دو آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده (CD) نیز بر روی نمونه‌ها، با استفاده از تنش‌های همه جانبه ذکر شده انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مکش بافتی در توده خاک، سختی و مقاومت برشی کاهش پیدا کرده و کرنش‌های حجمی ایجاد شده در خاک به شدت افزایش می‌یابد. این افزایش در مقدار کرنش‌ها به ترتیب برای هر دو گروه از خاک به میزان ۶۰ و ۵۰ درصد در تنش‌های همه جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بوده است. یافته‌های این مطالعه را می‌توان جهت تخمین نشست‌های این نوع خاک، ناشی از کاهش میزان مکش بافتی؛ به دلیل بالا آمدن سطح آب زیرزمینی یا پدیده‌های دیگری که سبب افت مکش بافتی شوند، مورد استفاده قرار داد.

اشباع، تنش نرمال خالص و مکش بافتی است که برای خاک در این حالت توسعه یافته است [۳، ۴]. محققین زیادی مقاومت برشی خاک غیر اشباع [۵-۷] منحنی نگه‌داشت آب - خاک (SWCC) [۸، ۹] و سختی وابسته به کرنش [۱۰، ۱۱] را در حالت غیر اشباع مورد بررسی قرار دادند. شن و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی پارامترهای مقاومتی خاک ماسه لای‌دار با توجه به تغییر مکش بافتی خاک پرداختند. آنها عنوان کردند که حالت "مکش بافتی بزرگتر" خاک زاویه اصطکاک داخلی اوج بیشتری را نسبت به حالت "مکش کمتر خاک" از خود نشان می‌دهد [۱۲]. حائری و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی خاک تپه‌های هزار پیچ، واقع شده در نزدیکی شهر گرگان، بیان کردند که

### ۱- مقدمه

تفاوت میان خاک‌های اشباع و غیر اشباع ناشی از رفتار خاک در این دو حالت بسیار اساسی است. خاک‌های غیر اشباع که بخش عمده‌ای از مصالح را تشکیل می‌دهند از رفتار خاک‌های اشباع تبعیت نمی‌کنند [۱]. در مقادیر پایین رطوبت موجود در خاک که سبب وجود مکش بافتی بالا در درون توده خاک می‌شود مکانیزم غالب تعیین کننده رفتار توده خاک، رژیم‌های جذب سطحی ذرات تشکیل دهنده خاک می‌باشند. از طرف دیگر، در مکش‌های کم، مکانیزم غالب ناشی از موئینگی است [۲]. متغیرهای حالت تنش برای خاک غیر

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: akhtarpour@um.ac.ir



نمونه‌های قرار گرفته در تنش نرمال خالص بالاتر در حالت تراندازی (Wetting)، فروریزش بیشتری را از خود نشان می‌دهند [۱۳].

فروریزش یا تورم خاک‌ها ناشی از فرایند تراندازی بافت خاک بوده که سبب تغییر شکل‌های حجمی و در نتیجه کاهش مقاومت برشی و در نتیجه سختی خاک می‌شود. خاک‌های فروریزشی عموماً در مناطق خشک با نرخ تبخیر بیشتر از بارش وجود دارند [۱۴]. انحلال گچ در خاک‌هایی که این ماده نقش متصل کننده میان ذرات را بر عهده‌دارد؛ سبب فروریزش اسکلت خاک، شسته شدن بافت ریزدانه و فرسایش داخلی و به بار آوردن خسارات فراوانی می‌شود [۱۵].

کلسیم سولفات دوآبه (گچ) با فرمول شیمیایی  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  به علت دارا بودن دو باند آب رفتار پایداری را در برابر انحلال پذیری دارد؛ این در حالی است که کلسیم سولفات نیم آبه با فرمول شیمیایی  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{mH}_2\text{O}$  که مقدار پارامتر m از صفر تا ۱/۵ متغیر است در برابر آبشستگی، حلال پذیری بیشتری را از خود نشان می‌دهد [۱۶].

فروریزش ناگهانی در خاک‌های گچی می‌تواند به محض ترشدگی بوقوع بپیوندد، بافت خاک موجود در شهر نجف عمدتاً خاک ماسه‌ای همراه با درصد‌های مختلفی از گچ می‌باشد که معمولاً خشک است [۱۷].

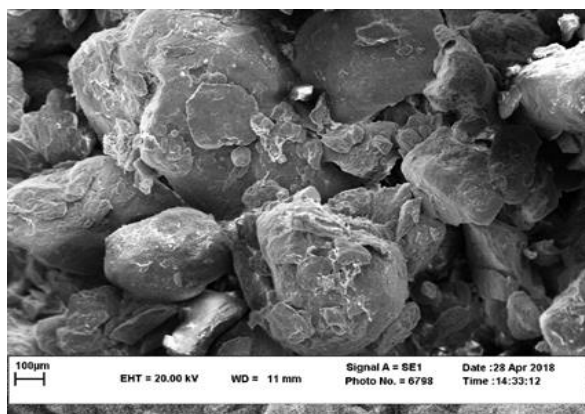
[۱۸]. با توجه به ماهیت قالب خاک‌های گچی در پهنه‌ای گسترده‌ای از کشور عراق، بسیاری از ساختمان‌ها قابلیت استفاده خود را در اثر این پدیده از دست می‌دهند یا ترک‌هایی متعددی را در ساختار خود نشان می‌دهند [۱۹]. پژوهشگران بسیاری بر روی اثر تراندازی با دامنه‌های زمانی متعدد بر روی خصوصیات خاک مانند مقاومت برشی، CBR و حداکثر وزن مخصوص خشک مطالعه کردند [۲۰-۲۳]. آنها بیان کردند که با افزایش زمان تراندازی در این نوع خاک، کاهش بیشتری در خصوصیات و پارامترهای مهندسی خاک دیده می‌شود. مطالعه بر روی چرخه‌های خشک اندازی (Drying) و تراندازی نشان می‌دهد که این چرخه‌های متوالی باعث ایجاد نوعی خستگی در بافت خاک شده که منجر به ضعیف‌تر شدن خاک در مقایسه با شرایط یکنواخت تراندازی در خاک می‌شود [۲۴، ۲۵]. در نواحی با آب و هوای خشک و نیمه خشک که خاک‌های گچی نیز مشاهده می‌شود، لایه‌های بالایی غالباً در ناحیه غیر اشباع قرار می‌گیرد. پتانسیل فروریزش (CP) خاک‌های ماسه‌ای با درصد گچ متوسط تا بالا، با افزایش میزان گچ افزایش یافته و چگالی نسبی کاهش می‌یابد. اما این مطلب در دوره زمانی کوتاه تراندازی (۳۰ دقیقه) مسئله ساز نخواهد بود. نتایج

پژوهش‌های دیگر نشان می‌دهد که خاک نجف با گچ کمتر از ۵ درصد، در بازه‌های زمانی تراندازی تا ۲ هفته تحت آزمایش آندومتری، پتانسیل فروریزشی از خود نشان نداده است [۲۳، ۲۶].

مطالعه بر روی خاک‌های گچی در محدوده غیراشباع، که مشخصات خاک و قابلیت استفاده از آن تحت تاثیر وجود گچ در بافت خاک است، ممکن است بسیار متفاوت باشد [۲۷]. با بالا آمدن سطح آب زیر زمینی مصالح گچی موجود در خاک ممکن است دچار نرم شوندگی شوند [۲۸].

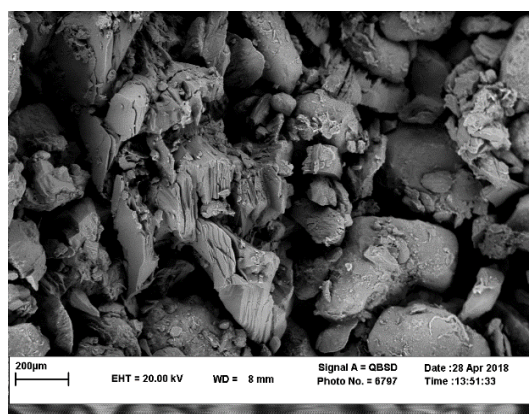
تجهیزات آزمایش سه‌محوری توسط بسیاری از محققین جهت انجام آزمون‌های غیر اشباع توسعه یافته است. آورسا و نیکوترا (۲۰۰۲)، دستگاهی را برای هر دو تست سه‌محوری و تحکیم در شرایط غیر اشباع طراحی کردند. اندازه‌گیری مقدار مکش بافتی خاک، کرنش شعاعی و تغییرات محتوای آب نمونه مورد آزمایش با استفاده از بورت‌های دوجداره قابل کنترل و اندازه‌گیری می‌باشد [۲۹]. این در حالی است که کابار کاپا و کوکویلو (۲۰۰۶) دستگاه سه‌محوری اتوماتیک با قابلیت آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی را برای اندازه‌گیری و کنترل دقیق نتایج توسعه دادند [۳۰]. پادیلو و همکاران (۲۰۰۶) سیستم اتوماتیکی را برای خارج کردن حباب‌های هوای خارج شده از دیسک‌های سرامیکی HAE در طول آزمون غیر اشباع ابداع کردند [۳۱]. حائری و همکاران (۲۰۱۴)، با توجه به روش انحراف محوری (هیلف؛ ۱۹۵۶) سلول سه‌محوری را با چرخه بسته‌ای از رگلاتورهای فشار و حسگرهایی در کنار سیستم اندازه‌گیری تغییر حجم سنج دیجیتالی توسعه دادند [۱۳]. به دلیل دشواری جهت تهیه نمونه‌های دست نخورده از خاک‌های فروریزشی، بسیاری از محققین پژوهش‌های خود را بر روی نمونه‌های ساخته شده درون قالب انجام دادند و از اثر حساسیت این نوع خاک بر دست‌خوردگی چشم پوشی کردند [۳۲].

تمامی تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی انجام گرفته بر روی فروریزش خاک گچ‌دار عراق با استفاده از تست‌های مرسوم سه‌محوری (اشباع) انجام گرفته است. این پژوهش به بررسی خصوصیات غیر اشباع خاک شهر نجف با درصد گچ‌های متفاوت می‌پردازد. آزمون‌های آزمایشگاهی این پژوهش بر اساس وضعیت خاک‌های غیر اشباع این شهر و گستردگی آنها در منطقه صورت پذیرفته است. برای این منظور نگارنده دستگاه سه‌محوری را با ساخت و اضافه کردن تجهیزات مناسب ارتقا داده است.



ب

(b) Grouped gypsum materials



الف

(a) Gypsum materials covered soil particles

شکل ۱. تصاویر SEM برای نمونه مورد آزمایش.

Fig. 1 Locations of the samples

قرار دارند. در حالت دیگر که در شکل (۱-ب) دیده می‌شود که ذرات گچ به صورت دسته‌های متصل به یکدیگر، سبب اتصال ذرات خاک شده‌اند. در هر دو حالت ذکر شده ذرات گچ سبب سیمانته شدن بافت خاک در حالت خشک می‌گردد. لذا خاک چسبندگی ظاهری را از خود نشان می‌دهد. با افزایش رطوبت و ترشدگی خاک این چسبندگی ظاهری از بین می‌رود و نرم شدگی گچ در اثر این افزایش رطوبت می‌تواند منجر به فروریزش در خاک شود.

### ۳- مصالح تجهیزات و روش پژوهش

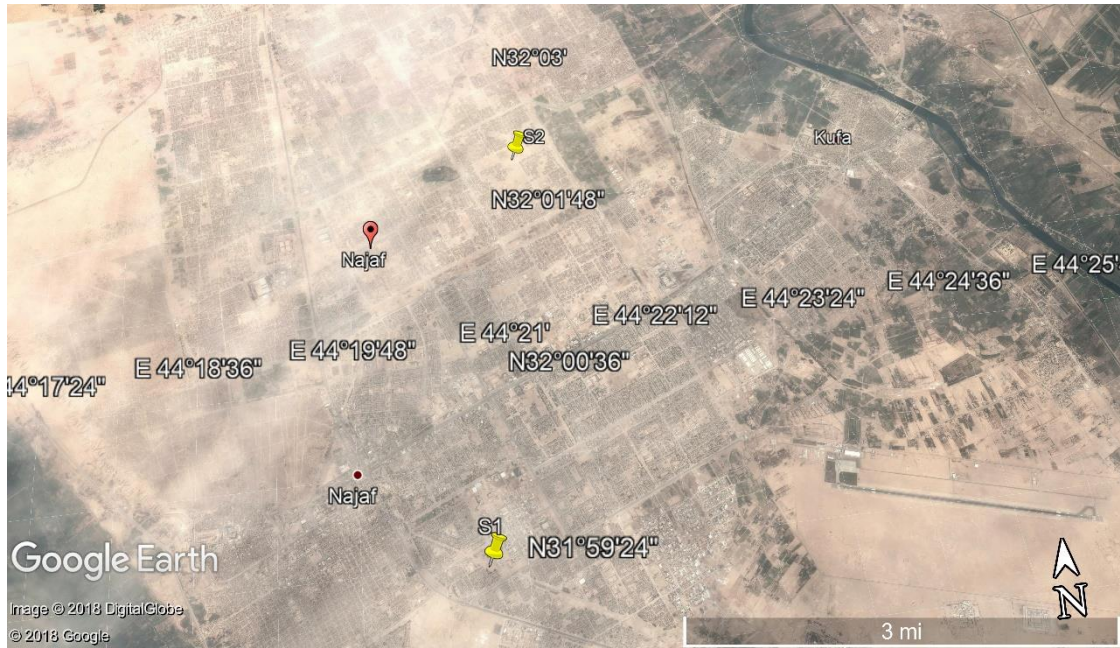
#### ۳-۱- محل نمونه‌برداری و خصوصیات خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش از دو محل معین در شهر نجف با درصد گچ ۱۴٪ (S۱) و ۲۹٪ (S۲) و از عمق نیم متری از سطح زمین بدست آمده است (شکل ۲). طبقه بندی این خاک‌ها با استفاده از سیستم متحد (USCS)، ماسه خوب دانه‌بندی شده (SW) نام گرفته است که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که ۷۰٪ ذرات این خاک از ماسه تشکیل شده است. همچنین با توجه به استاندارد ASTM D698-00a آزمایش تراکم پروکتور (Proctor) استاندارد انجام شده که نتایج آن در شکل ۳ آورده شده است. همچنین جدول ۲ خلاصه‌ای از ویژگی‌های خاک مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

طبقه بندی‌های مختلفی برای خاک‌های گچ‌دار بر اساس درصد گچ موجود در آنها و برای کاربردهای مختلفی از جمله کشاورزی،

### ۲- ساختار خاک

خاک گچ‌دار از خاک‌های مسئله دار محسوب می‌شود که در مواردی در زیرسازی راه‌ها، ساختمان‌ها و یا سایر سازه‌ها وجود دارد. خاک‌های گچی به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که درصدی از گچ درون بافت خاک وجود داشته باشد که بتواند رفتار و خصوصیات خاک را تحت تاثیر قرار دهد. این خاک‌ها به خودی خود، در هنگامی که در شرایط خشک هستند خصوصیات خوبی را از خود نشان می‌دهند. این در حالی است که مشکل در این خاک‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که این نوع از خاک‌ها در زیر ساختمان‌ها و یا سازه‌های هیدرولیکی قرار داشته باشد و شرایط رطوبتی خاک به سمت ترشدگی حرکت کند [۳۳]. همانگونه که برای مناطق مختلفی از عراق در خاک‌های مختلفی چون رس لای‌دار، ماسه و ماسه لای‌دار دیده شده است، حضور گچ در خاک موجب تاثیر بر روی فروریزش و تراکم پذیری خاک می‌گردد. بسیاری از محققین در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش میزان گچ در خاک، تخلخل در محل خاک و تراکم پذیری آن افزایش می‌یابد. علاوه بر این موضوع افزایش رطوبت و در نتیجه نرم شدگی در بافت گچ منجر به فروریزش در اینگونه از خاک‌ها می‌شود [۳۴]. نتایج حاصله از تصاویر اسکن الکترونی (SEM) بر روی نمونه‌های دست‌خورده بازسازی شده با رطوبت طبیعی در صورت کلی را برای حضور مصالح گچی در بافت خاک نشان می‌دهد؛ مطابق شکل (۱-الف)، اولین حالت به گونه‌ای است که لایه نازکی از گچ پیرامون ذرات خاک را احاطه کرده‌اند و به صورت مرزی در بین ذرات خاک



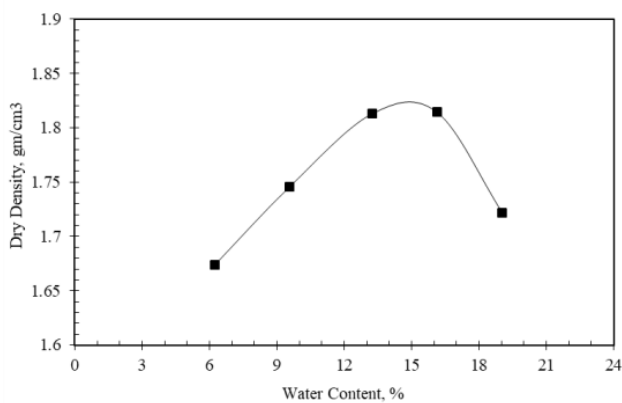
شکل ۲. محل برداشت نمونه‌های مورد آزمایش.

Fig. 2. SEM images for the tested specimens

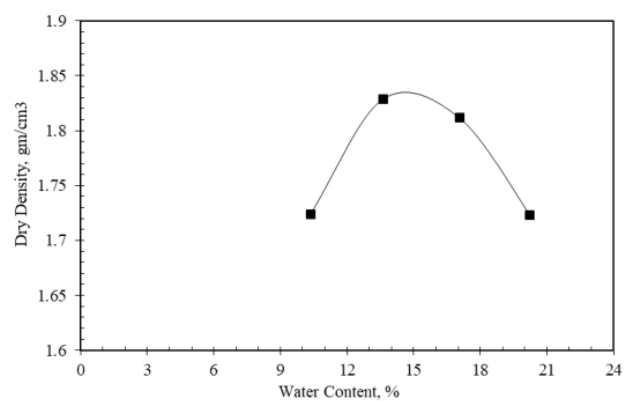
جدول ۱. طبقه‌بندی خاک برای نمونه‌های آزمایش شده.

Table 1. Soil classification of the tested specimens

نمونه خاک	سیلت، %	ماسه، %	شن، %	Cu/Cc	دانه بندی طبق استاندارد USCS
S1	۲	۷۸/۲	۱۹/۴	۷/۶	SW
S2	۱/۶	۶۷/۸	۳۰/۴	۷/۳	SW



ب: نمونه S2



الف: نمونه S1

شکل ۳. منحنی آزمایش پروکتور.

Fig.3. Proctor Tests Results

جدول ۲. ویژگی‌های خاک در سایت‌های انتخاب شده.

Table 2. Soil Properties of the selected sites

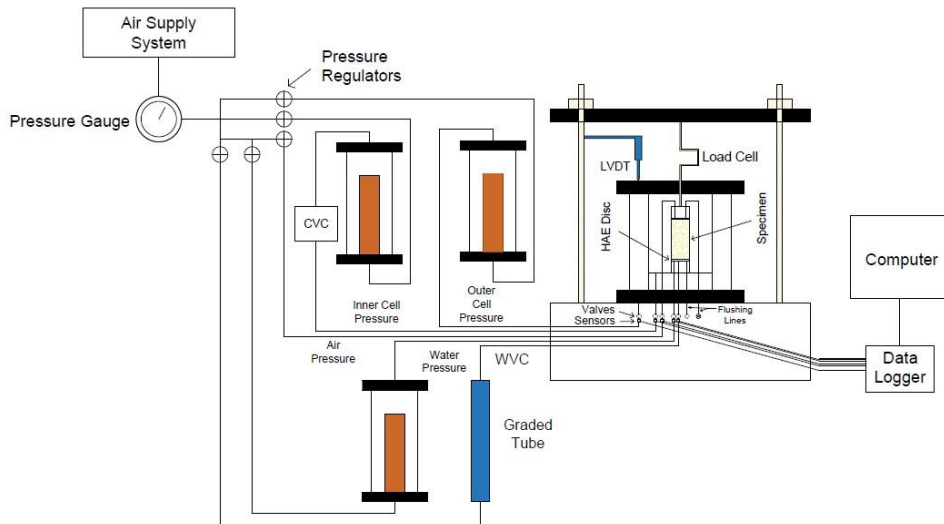
نمونه S2	نمونه S1	طبق اساندارد	آزمایش
SW	SW	ASTM C136/C136M-14	دانه بندی طبق استاندارد USCS
۲/۳۸	۲/۵	ASTM D854-14	توده ویژه خاک
۲۹	۱۴	ASTM C25-99	درصد گچ، %
۳	۳	ASTM D698-00a	درصد رطوبت طبیعی، %
۱/۸۲۹	۱/۸۲۴	ASTM D1556/D1556M-15 <sup>e1</sup>	چگالی در محل، گرم بر سانتی‌متر مکعب
۱/۸۲۵	۱/۸۴	ASTM D698-00a	حد اکثر چگالی خشک، گرم بر سانتی‌متر مکعب
۱۵	۱۴/۲	ASTM D698-00a	محتوای رطوبت بهینه، %

از تجهیزات اضافی مورد استفاده در این دستگاه شامل: دیسک‌های سرامیکی (HAE)، صفحه بالایی نمونه و سیستم کنترل فشار هوا و تغییر حجم سنج است. در این سیستم مطابق شکل (۵-الف) صفحه پایین و دیسک‌های مربوطه بر اساس نمونه با قطر ۷۰ میلی‌متر ساخته و مورد استفاده قرار گرفته است. در این دستگاه دیسک‌های سرامیکی بر روی یک پایه شیاردار نصب شده است (شکل ۵-ب). این شیارها به صورت مسیرهایی برای خروج حباب‌های هوای محبوس قبل از شروع آزمایش توسط خروجی مربوطه می‌باشد. فشار آب منفذی با استفاده از دیسک‌های سرامیکی که بر روی پایه نصب شده است و به وسیله اورینگ آب بندی شده به نمونه اعمال می‌گردد و هوا با استفاده از صفحه بالایی نمونه مطابق شکل (۵-ج) به نمونه اعمال گردیده است. دیسک سرامیکی با آستانه فشار هوای ۱ اتمسفر با توجه به رطوبت طبیعی خاک که معادل ۳۰ کیلوپاسکال با توجه به نمودار SWCC در هر دو خاک است در این تست‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش با این دستگاه دارای قطر ۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر بوده‌اند. مطابق شکل (۵-ج) و شکل (۵-د) این سیستم دارای سلول دوگانه است که با استفاده از سلول داخلی میزان تغییر حجم نمونه با اندازه‌گیری میزان آب ورودی و خروجی بدست می‌آید. این در حالی است که از سلول خارجی جهت جلوگیری از اعوجاج سلول داخلی بهره گرفته شده است. سنسور جابجایی مورد استفاده در این سیستم دارای دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و

نقشه برداری و مهندسی ارائه شده است [۳۴]. بر مبنای طبقه بندی ارائه شده توسط برزنجی [۳۵]، نمونه‌های S1 نیمه گچ‌دار و نمونه‌های S2 که در این پژوهش استفاده شده است بسیار گچ‌دار می‌باشد. همانطور که در جدول ۲ دیده می‌شود توده ویژه خاک برای نمونه‌های S2 کمتر از نمونه‌های S1 است. این کاهش بدلیل بیشتر بودن میزان گچ و سبک بودن این محتوا نسبت به ذرات خاک است. لذا درصد بالای گچ در خاک سبب تاثیر بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود. این نتایج به خوبی با پژوهش‌های دیگر محققان تطابق دارد [۳۶، ۳۷، ۱۹]. رطوبت در محل اندازه‌گیری شده برای این نمونه‌ها مقدار کمی را نشان داده است اما چگالی در محل آن مقدار بالایی بوده است. این در حالی است که رطوبت بهینه بدست آمده در آزمایش تراکم به ترتیب ۱۴/۲٪ و ۱۵٪ بوده است.

### ۲-۳- تجهیزات آزمایش

تجهیزات بسیاری جهت تبدیل آزمایش مرسوم سه‌محوری (اشباع) برای اندازه‌گیری و کنترل مکش بافتی و تبدیل این دستگاه به حالت غیر اشباع طراحی و ساخته شده است. دستگاه سه‌محوری موجود در آزمایشگاه خاک دانشگاه فردوسی مشهد جهت انجام آزمایش‌های غیر اشباع ارتقا یافته و با استفاده از این دستگاه نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. شکل ۴ نشان دهنده مسیره‌های موجود در این دستگاه ارتقا یافته است. بخشی

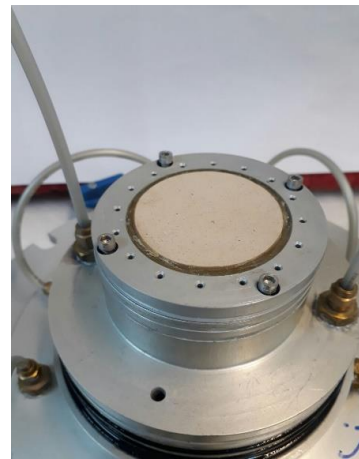


شکل ۴. شکل شیماتیک دستگاه سه محوری غیر اشباع.

Fig. 4. Schematic shape of the modified triaxial test device



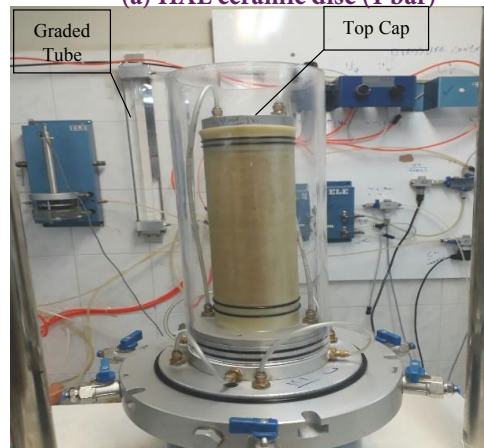
(ب): صفحه پایه حلزونی  
(b) Grooved base plate



(الف): دیسک سرامیکی ۱ بار  
(a) HAE ceramic disc (1 bar)



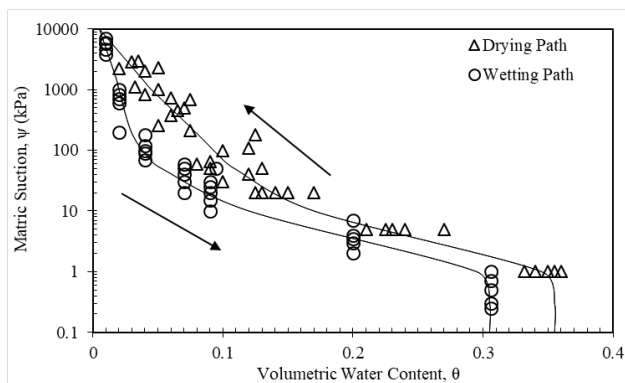
(د): سلول خارجی  
(d) Outer cell



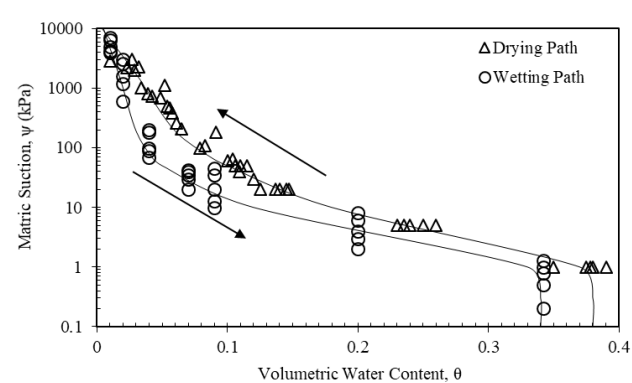
(ج): سلول داخلی  
(c) Inner cell

شکل ۵. جزئیات سلول نمونه مورد آزمایش.

Fig. 5. Details of the tested cell specimen



ب: نمونه S2  
(b) S2 Specimen



الف: نمونه S1  
(a) S1 Specimen

شکل ۶. منحنی مشخصه آب - خاک برای نمونه‌های تست شده.  
Fig. 6. Soil-Water Characteristic Curves for the tested specimens

باشد تا به تعادل رطوبتی برسد. پس از به تعادل رسیدن نمونه‌ها، پتانسیل مکشی نمونه خاک مرطوب (مکش بافتی خاک) با توجه به رطوبت جذب شده توسط کاغذ و با استفاده از روابط ارائه شده برای این کاغذ طبق استاندارد ASTM D5298-03 تعیین گردیده است. بر مبنای این استاندارد پس از اطمینان از متعادل شدن رطوبت در نمونه‌ها میزان رطوبت کاغذ با استفاده از گرمخانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تعیین گردیده است. سپس مکش معادل با این رطوبت در خاک با استفاده از منحنی "کالیبراسیون" خود کاغذ به دست می‌آید. در آزمایش خشک اندازی، از دستگاه صفحات فشاری با آستانه‌ی ورود هوای مختلف (۱، ۳، ۵ و ۱۵ بار) استفاده شده است. قبل از شروع آزمایش، جهت اشباع کردن دیسک‌های سرامیکی هر کدام به مدت ۲۴ ساعت داخل آب گذاشته شده است. همچنین لازم است نمونه‌های خاک قبل از قرار گرفتن درون دستگاه اشباع شده باشند. بعد از اتمام آزمایش و قطع نمودن فشار، نمونه‌ها بلا فاصله با استفاده از ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شده و پس از خشک کردن در گرمخانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تعیین رطوبت گردیده است. در ادامه، با استفاده از رطوبت تعیین شده برای هر نمونه مقدار آب حجمی (Volumetric Water Content) محاسبه شده است. منحنی آب - خاک به دست آمده برای این دو خاک در هر دو فرایند تراندازی و خشک اندازی در شکل ۶ آورده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که هر دو خاک بجز در محدوده اشباع رفتار مشابهی از خود نشان دادند. با توجه به شکل ۶، مکش معادل با رطوبت برجای هر دو

دامنه ۱۰ سانتی‌متر بوده است که بر وجه خارجی سلول جهت کنترل تغییر مکان محوری نصب شده است. حسگر نیرو با دقت ۱ نیوتون و ظرفیت ۵ کیلونیوتون جهت اندازه‌گیری میزان بار وارد به نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. تغییر حجم کلی نمونه با تلفیق تغییر حجم سنج دیجیتال و حسگر جابجایی اندازه‌گیری شده است. میزان آب خروجی از نمونه نیز با استفاده از سیستم تغییر حجم سنج موازی (WVC) مطابق شکل ۵ اندازه‌گیری شده است.

### ۳-۳- تعیین منحنی مشخصه آب - خاک (SWCC)

منحنی مشخصه آب - خاک یک منحنی پایه‌ای در مطالعات خاک غیر اشباع می‌باشد و بسیاری از خصوصیات و پارامترهای مطالعات خاک غیر اشباع بایستی با استفاده از این منحنی تعیین گردد. منحنی مشخصه آب - خاک برای نمونه‌های این پژوهش در حالت تراندازی (Wetting)، با استفاده از روش فیلتر کاغذی طبق استاندارد ASTM D5298-03 و در حالت خشک اندازی با استفاده از دستگاه صفحات فشاری بر مبنای استاندارد ASTM D2325-68 بدست آمده است. در آزمایش تراندازی از کاغذ واتمن شماره ۴۲ (Whatman® No ۴۲) در تعیین منحنی رطوبتی استفاده شده است. با استفاده از یک ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۱ گرم، حدود ۱۰۰ گرم از خاک عبوری از الک ۲ میلی‌متری با مقادیر متفاوت و مشخص آب مقطر مرطوب گردیده و اجازه داده می‌شود هر نمونه خاک مرطوب با کاغذ صافی واتمن حد اقل به مدت ۴۸ ساعت در تماس



ب



الف



د



ج

شکل ۷. مراحل ساخت نمونه مورد آزمایش.

Fig. 7. Procedure of Specimens preparation

در ۸ لایه با وزن یکسان مطابق شکل (ب-۷) ساخته می‌شود. سپس قالب مخصوص ساخت نمونه با امکان اعمال خلا در پشت غشای لاستیکی بر روی پدستال مطابق شکل (ج-۷) نصب شده و لایه‌ها به ترتیب ساخته می‌شوند. در نهایت مطابق شکل (د-۷) نمونه تکمیل شده و آماده انجام تست می‌گردد. مطابق این روش، ارتفاع اولیه لایه‌ها متفاوت بوده اما به گونه‌ای است که پس از کوبش آخرین لایه تمامی لایه‌ها دارای ارتفاع و در نتیجه تراکم برابر گردند. بر مبنای این روش نمونه ساخته شده از نظر تراکم در ارتفاع دارای بیشترین یکنواختی خواهد بود. بنابراین تغییر شکل‌های حجمی که اتفاق افتاده ناشی از تغییرات مکش در نمونه در ارتفاع آن به صورت یکنواخت ایجاد خواهد شد. به علت دشواری در تهیه نمونه‌های دست‌نخورده در خاک ماسه‌ای، در محل تست دانسیته انجام شده و تراکم در محل نمونه‌ها

گروه خاک مورد آزمایش مقدار متوسط ۳۰ کیلوپاسکال است.

#### ۳-۴- روش انجام آزمایش سه‌محوری

جهت بررسی تاثیر تنش بر رفتار خاک، آزمایش‌ها به گونه‌ای انجام شده است که شرایط بارگذاری ناشی از ساخت و ساز در نظر گرفته شود (افزایش بار در مکش بافتی ثابت). ساخت نمونه‌ها با استفاده از روش تراکم کاهش یافته انجام شده است [۳۸]. تنش‌های همه جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ کیلوپاسکال برای مطالعه نشست زیر پی ساختمان انتخاب شده و با توجه به اینکه پی ساختمان فشار اضافی بر زمین اعمال خواهد کرد، اعداد مذکور جهت فشار جانبی متناسب با فشار وارده از پی ساختمان انتخاب شده است. مطابق شکل (الف-۷) ابتدا میزان مشخصی از آب به نمونه خاک خشک اضافه می‌گردد. تمامی نمونه‌ها



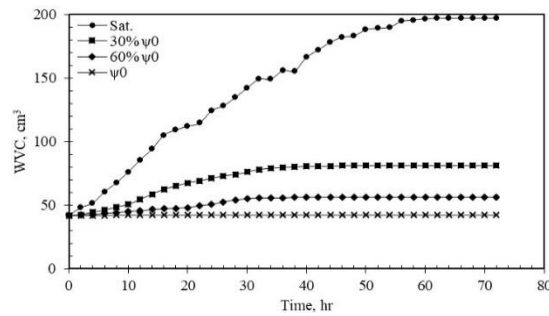
در آزمایش‌ها برای پوشش کامل منحنی مشخصه آب - خاک بدست آمده برای این دو خاک مورد بررسی قرار گرفت (منحنی خشک اندازه‌ی و تراندازی برای گروه S1 و S2). این مکش‌های بافتی شامل: مکش بافتی اولیه ( $\psi_0$ )، ۶۰٪ از مکش بافتی اولیه، ۳۰٪ از مکش بافتی اولیه و مکش بافتی صفر می‌باشد. سپس فشار هوا (Ua) تنظیم شده از بالای نمونه و فشار آب (Uw) از پایین و از طریق صفحه شیاردار به پایین نمونه اعمال می‌گردد. نمونه‌ها در این فرآیند جهت رسیدن به شرایط پایدار عدم ورود و خروج آب به داخل نمونه به مدت ۷۲ ساعت تحت شرایط اعمال مکش قرار گرفتند. پس از اطمینان از اعمال یکنواخت و کامل مکش بافتی به نمونه‌ها، هرکدام با نرخ سرعت بارگذاری ۰/۰۱ میلی‌متر بر دقیقه تحت برش قرار گرفتند. این نرخ بارگذاری به گونه‌ای انتخاب شده است تا از ثابت بودن مکش در طول

متناسب با تراکم ۹۰٪ حاصل از آزمون پروکتور بوده است. جدول ۳ برنامه آزمایشات سه‌محوری صورت گرفته در این پژوهش را نشان می‌دهد.

در این پژوهش برای هر کدام از دو نوع خاک، ۱۶ نمونه تحت آزمایش سه‌محوری غیراشباع قرار گرفت. تنش‌های همه جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بر ۸ نمونه در دو گروه اعمال گردید. همچنین آزمایش اشباع تحکیم یافته زهکشی شده بر روی چهار نمونه از هر خاک انجام شد. نمونه‌ها برای جلوگیری از تغییر شکل اولیه یا فروریزش ناشی از وزن و عدم محصور شدگی اولیه تحت تنش همه جانبه ۱۰ کیلوپاسکال قرار داده می‌شوند. تمامی آزمایش‌های غیر اشباع با مکش بافتی اولیه ( $\psi_0=30 \text{ kPa}$ ) که معادل رطوبت در محل خاک‌ها می‌باشد آغاز شده است. چهار مکش بافتی در نظر گرفته شده

جدول ۳. برنامه آزمایشات بارگذاری  
Table 3. Loading-path tests program

نمونه خاک	شماره آزمون	تنش همه جانبه، کیلوپاسکال	مکش بافتی، کیلوپاسکال	کرنش محوری نهایی
S1	۱	۱۰۰	۷۵	۲۰٪
	۲	۱۰۰	۶۰٪ از ۷۵	۲۰٪
	۳	۱۰۰	۳۰٪ از ۷۵	۲۰٪
	۴	۱۰۰	اشباع شده	۲۰٪
	۵	۱۰۰	CD	۲۰٪
	۶	۲۰۰	۷۵	۲۰٪
	۷	۲۰۰	۶۰٪ از ۷۵	۲۰٪
	۸	۲۰۰	۳۰٪ از ۷۵	۲۰٪
	۹	۲۰۰	اشباع شده	۲۰٪
	۱۰	۲۰۰	CD	۲۰٪
S2	۱	۱۰۰	۷۵	۲۰٪
	۲	۱۰۰	۶۰٪ از ۷۵	۲۰٪
	۳	۱۰۰	۳۰٪ از ۷۵	۲۰٪
	۴	۱۰۰	اشباع شده	۲۰٪
	۵	۱۰۰	CD	۲۰٪
	۶	۲۰۰	۷۵	۲۰٪
	۷	۲۰۰	۶۰٪ از ۷۵	۲۰٪
	۸	۲۰۰	۳۰٪ از ۷۵	۲۰٪
	۹	۲۰۰	اشباع شده	۲۰٪
	۱۰	۲۰۰	CD	۲۰٪



شکل ۸. تغییرات حجم آب (WVCs) در طول پروسه‌های تراندازی در مرحله تعادلی مکش بافتی برای نمونه S1 با تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال.  
**Fig. 8. Water Volume Changes (WVCs) during wetting process in matric suction equilibrium stage for S1 with  $\sigma_{100}=3$  kpa**

گچ نیز مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به شکل ۹، خاک S۲ انقباض بیشتری در کرنش حجمی، نسبت به خاک S۱ از خود نشان داده است که به دلیل درصد گچ بالاتر است.

#### ۴-۲- مرحله بارگذاری

شکل ۱۰، تغییرات تنش انحرافی و کرنش حجمی در برابر کرنش محوری برای خاک (S۱) که دارای درصد گچ کمتری می‌باشد را نشان می‌دهد. این شکل برای هردو فشار همه‌جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال با مکش‌های بافتی متفاوت است. مطابق شکل (۱۰-الف) تنش‌های گسیختگی حدوداً بین ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال محدود شده است. در شکل (۱۰-ب) کرنش حجمی به عنوان تابعی از کرنش محوری، بین ۰.۱٪ و ۰.۲۵٪ محدود شده است. برای دسته دوم آزمایش‌ها که در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام گرفته است، حد اکثر تنش انحرافی قابل تحمل توسط نمونه‌ها بین ۶۵۰ تا ۱۰۵۰ کیلوپاسکال محدود گردیده است (شکل ۱۰-ج). این در حالی است که کرنش‌های حجمی در این حالت به عنوان تابعی از کرنش محوری به سختی بین ۰.۱٪ تا ۰.۴٪ قرار می‌گیرد (شکل ۱۰-د). تنش انحرافی با کاهش مکش بافتی (افزایش درجه اشباع) اعمال شده به خاک افزایش می‌یابد.

یافته‌های قابل توجه در نمونه‌های با درصد گچ بالا (نمونه‌های S۲) نشان می‌دهد که مطابق شکل (۱۱-الف) تنش‌های گسیختگی در تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال تقریباً بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ کیلوپاسکال و برای تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال بین ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوپاسکال مطابق شکل (۱۱-ج) می‌باشد. در حالی که

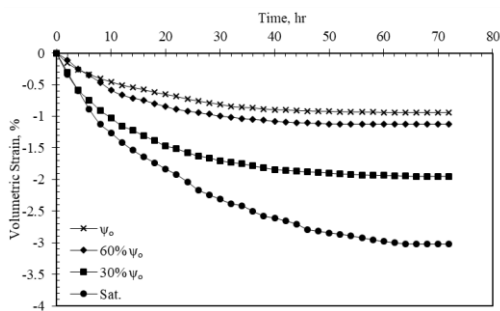
فرآیند بارگذاری اطمینان حاصل شود. لازم به ذکر است که اعمال نیرو تا رسیدن به کرنش محوری ۲۰٪ در نمونه‌ها ادامه یافته است. در طول مرحله بارگذاری، تغییر حجم (CVC) سلول داخلی جهت محاسبه کرنش حجمی پس از حذف اثر خمره‌ای شدن سلول خارجی استفاده شده است.

#### ۴-۱ نتایج و تحلیل

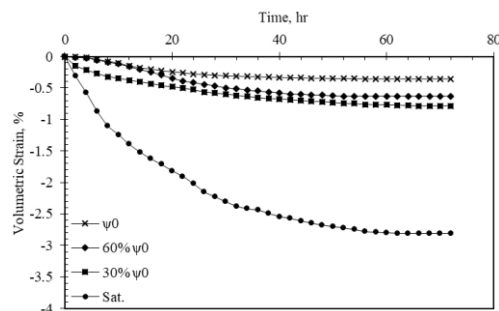
##### ۴-۱- تعادل تنش همه‌جانبه و مکش بافتی

در این تحقیق، اعمال مکش و تنش همه‌جانبه به جهت جلوگیری از تغییر شکل ناشی از هرکدام از این عوامل به صورت همزمان بوده است. شکل ۸ نشان دهنده تغییر حجم رخ داده در حالت غیر اشباع برای نمونه S۱ در تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال است. عدد مثبت در این نمودار نشان دهنده آب ورودی به نمونه است. مقادیر تغییر حجم (WVC) جهت کنترل درجه اشباع و اطمینان از رسیدن به محتوای حجمی آب ( $\theta$ ) متناظر با آن مکش است که ثابت شدن این پارامتر تعادل مکش در نمونه برقرار شده است. این زمان تعادل برای رسیدن مکش بافتی اولیه به مکش بافتی صفر، ۷۲ ساعت بوده است. این زمان در تمامی تست‌ها جهت رعایت شرایط مشترک در تست‌ها مورد توجه نیز قرار گرفته است.

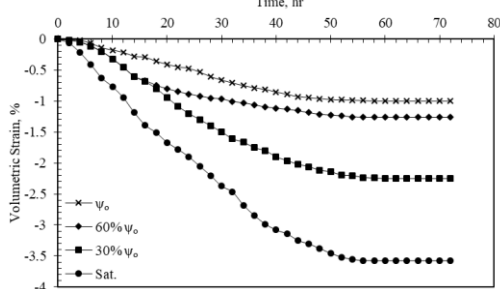
شکل ۹ نشان دهنده کرنش‌های حجمی نمونه با استفاده از سیستم تغییر حجمی سلولی می‌باشد که در روند تراندازی برای رسیدن به شرایط مکش بافتی صفر قبل از اعمال مرحله بارگذاری می‌باشد. همچنین این تغییر حجم‌ها جهت توضیح تغییرات کرنش حجمی در برابر درجه اشباع، تنش همه‌جانبه، مکش بافتی و درصد



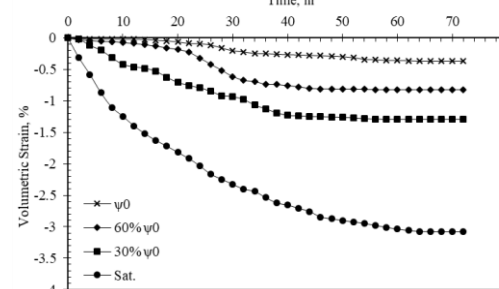
ب: نمونه S1 با تنش هم‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال  
(b) Specimen S1 with  $\sigma_{200}=3$  kpa



الف: نمونه S1 با تنش هم‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال  
(a) Specimen S1 with  $\sigma_{100}=3$  kpa



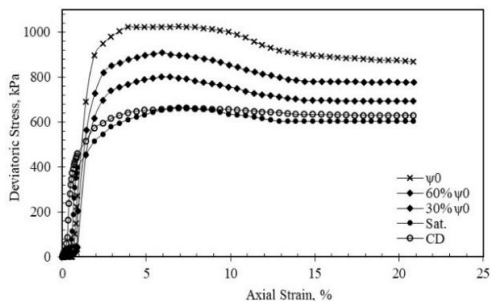
د: نمونه S2 با تنش هم‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال  
(d) Specimen S2 with  $\sigma_{200}=3$  kpa



ج: نمونه S2 با تنش هم‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال  
(c) Specimen S2 with  $\sigma_{100}=3$  kpa

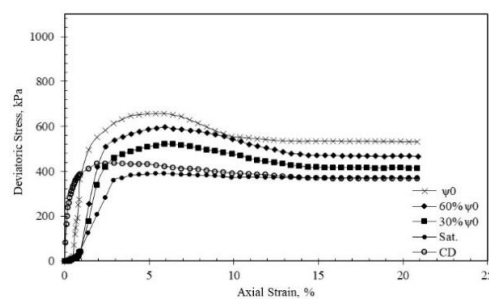
شکل ۹. کرنش‌های حجمی در طول پروسه‌های تراندازی در مرحله تعادلی مکش بافتی.

Fig. 9. Volumetric Strains During Wetting Process



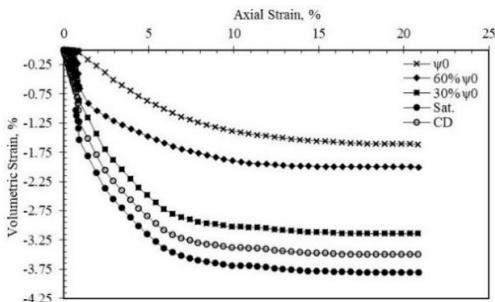
ج: تنش انحرافی در برابر کرنش محوری تحت تنش هم‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

(b) Volumetric stress- Axial Strain for Specimen S1 with  $\sigma_3=100$  kpa



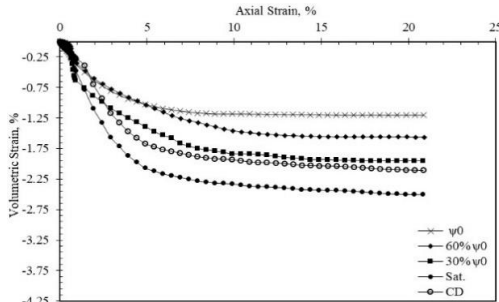
الف: تنش انحرافی در برابر کرنش محوری تحت تنش هم‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال

(a) Deviatoric stress- Axial Strain for Specimen S1 with  $\sigma_3=100$  kpa



د: کرنش انحرافی در برابر کرنش محوری تحت تنش هم‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

(d) Volumetric stress- Axial Strain for Specimen S1 with  $\sigma_3=200$  kpa

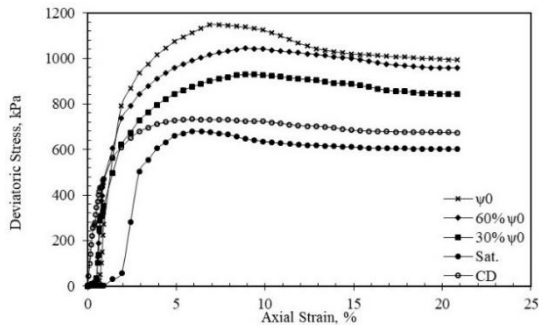


ب: کرنش انحرافی در برابر کرنش محوری تحت تنش هم‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال

(c) Deviatoric stress- Axial Strain for Specimen S1 with  $\sigma_3=200$  kpa

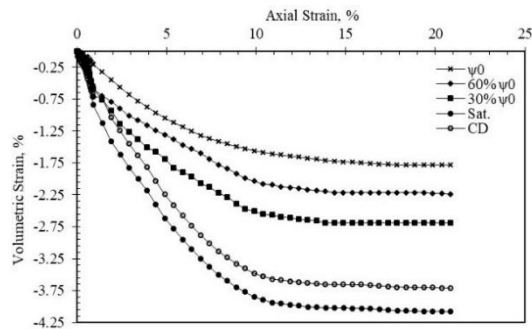
شکل ۱۰. تنش‌های انحرافی و کرنش‌های حجمی برای نمونه S1.

Fig. 10. Deviatoric and Volumetric Strains for S1 Specimens



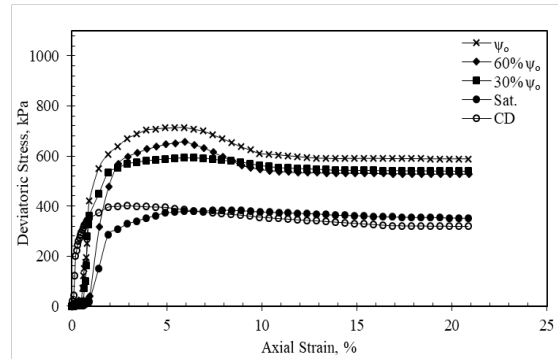
ج: تنش انحرافی در برابر کرنش محوری تحت تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

(c) Deviatoric stress- Axial Strain for Specimen S2 with  $\sigma_{200}=3$  kpa



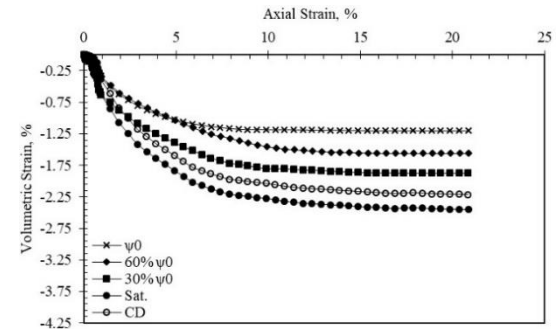
د: کرنش انحرافی در برابر کرنش محوری تحت تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

(d) Volumetric stress- Axial Strain for Specimen S2 with  $\sigma_{200}=3$  kpa



الف: تنش انحرافی در برابر کرنش محوری تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال

(a) Deviatoric stress- Axial Strain for Specimen S2 with  $\sigma_{100}=3$  kpa



ب: کرنش انحرافی در برابر کرنش محوری تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال

(b) Volumetric stress- Axial Strain for Specimen S2 with  $\sigma_{100}=3$  kpa

شکل ۱۱. تنش‌های انحرافی و کرنش‌های حجمی برای نمونه S2.  
Fig. 11. Deviatoric and Volumetric Strains for S2 Specimens

### ۵- بحث

در این مقاله تاثیر حضور گچ بر رفتار کرنشی خاک ماسه‌ای با درصد گچ مختلف (۱۴٪ و ۲۹٪) در حالت غیر اشباع با استفاده از دستگاه سه‌محوری ارتقا یافته و در حالت اشباع با دو حالت مکش بافتی صفر و حالت اشباع متداول مورد بررسی قرار گرفت.

رابطه قابل قبولی در متون پژوهشی دیگر میان درصد گچ و پارامترهای دیگر خاک ذکر شده است که با استفاده از تست‌های مرسوم بدست آمده است. اما همانطور که در قسمت مقدمه نیز بیان گردید، پژوهش‌های کمی در زمینه بررسی رفتار خاک ماسه‌ای گچ‌دار خصوصاً در کشور عراق صورت گرفته است. همچنین تحقیقات اندکی پیرامون واکاوی تاثیر تراندازی بر روی این رفتار در خاک‌های گچ‌دار انجام شده است.

در مکش‌های بافتی بالا، نقطه حداکثری تنش انحرافی در نمودارها

کرنش‌های حجمی با توجه به کرنش‌های محوری در تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال بین ۱/۲۵٪- و ۲/۷۵٪- محدود شده (شکل ۱۱-ب) و برای تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال کرنش‌های حجمی بین ۱/۵٪- تا ۴/۲۵٪- محدود شده است (شکل ۱۱-د). همانطور که در آزمایشات نمونه‌های S2 مشخص است؛ فاصله‌ای میان مقادیر تنش‌های انحرافی در حالت اشباع و غیراشباع (مکش بافتی صفر و ۳۰٪ از  $\psi_0$ ) در هر دو تنش همه‌جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال وجود دارد. بعلاوه کرنش‌های حجمی نشان دهنده رفتار مشابهی برای تنش‌های انحرافی است.

با توجه به این شکل‌ها، حداکثر مقدار تنش‌های انحرافی در تمامی آزمایشات با افزایش تنش همه‌جانبه و مکش چه به صورت همزمان و چه به صورت مستقل، افزایش می‌یابد. در تمام تست‌ها، نمونه‌ها با کرنش محوری کم حد اکثر مقاومت برشی را از خود نشان می‌دهد.

جدول ۴. حد اکثر تنش انحرافی و کرنش حجمی نهایی برای نمونه‌های آزمایش شده.

Table 4. Peak deviatoric stress and final volumetric strain of the tested specimens in loading-path

کرنش حجمی نهایی، %		حد اکثر تنش انحرافی، کیلوپاسکال		نوع آزمون		نمونه خاک
		تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال	تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال			
-۱/۵۶۴	-۱/۵۶۰	۱۰۲۳	۶۵۷	ψ <sub>0</sub>	کنترل مکش بافتی	S1
-۳/۱۲۷	-۲/۱۹۱	۹۰۷	۵۹۷	ψ <sub>0</sub> از ۶۰٪		
-۵/۰۹۰	-۲/۷۳۳	۸۰۰	۵۲۰	ψ <sub>0</sub> از ۳۰٪		
-۶/۸۲۶	-۵/۳۱۱	۶۶۵	۳۹۱	اشباع شده		
-۳/۴۹۶	-۲/۱۰۶	۶۲۲/۶	۴۳۸/۸	CD		
-۲/۷۸۱	-۱/۵۷۴	۱۱۴۸	۷۱۳	ψ <sub>0</sub>	کنترل مکش بافتی	S2
-۳/۵۰۲	-۲/۳۸۳	۱۰۴۳	۶۵۶	ψ <sub>0</sub> از ۶۰٪		
-۴/۹۳۷	-۳/۱۶۹	۹۳۰	۵۹۳	ψ <sub>0</sub> از ۳۰٪		
-۷/۶۶۲	-۵/۵۳۳	۶۸۰	۳۸۳	اشباع شده		
-۳/۷۱۲	-۲/۲۱۳	۷۳۲/۴۸	۴۰۱/۴	CD		

قرار گرفته‌اند، نسبت به نمونه‌های اشباع، کرنش حجمی بیشتری را از خود نشان داده‌اند. این یافته می‌تواند به علت نرم شوندگی تدریجی در مصالح گچی باشد. به بیان دیگر؛ در حالت غیراشباع، مصالح گچی زمان کافی برای رسیدن به نرم شوندگی بیشتر را دارا می‌باشند. این مطالعه بیان می‌کند که کرنش‌ها به عواملی از جمله: درصد گچ موجود در خاک، مکش بافتی و تنش همه‌جانبه وابستگی دارند.

#### ۶- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی رفتار کرنشی خاک ماسه گچ‌دار در شرایط غیر اشباع بوده است. تست‌های غیر اشباع در این پژوهش برای مکش‌های بافتی مختلف صورت گرفته است. این مکش‌ها از مقدار معادل با رطوبت برجا تا مکش صفر به نمونه اعمال شده است. بر مبنای نتایج بدست آمده، مقدار کرنش ایجاد شده در نمونه غیر اشباع در مکش بافتی صفر بیشتر از مقادیر کرنش ایجاد شده برای نمونه اشباع شده به روش مرسوم است. این افزایش در مقدار کرنش‌ها به ترتیب برای هر دو گروه از خاک به میزان ۶۰ و ۵۰ درصد در تنش‌های همه جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بوده است. مقادیر

مشخص است. اما با کاهش مکش؛ تا رسیدن به حالت مکش صفر، این مقدار حد اکثری اختلاف چشم‌گیر خود را از دست می‌دهد. به بیان دیگر؛ نرم شوندگی، مطابق آنچه که از شکل‌های (۱۰-الف)، (۱۰-ج)، (۱۱-الف) و (۱۱-ج) استنباط می‌شود در هر دو تست اشباع و غیر اشباع اتفاق می‌افتد. جدول ۴ خلاصه‌ای از داده‌هایی از جمله تنش انحرافی حد اکثر و کرنش حجمی نهایی را با توجه به مکش‌های بافتی، برای نمونه‌های با تنش همه جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. در حالت غیر اشباع، حد اکثر مقدار تنش‌های انحرافی از مقادیر زیاد در مکش‌های بالا شروع شده و با کاهش مکش، این مقدار به دلیل رخ دادن نرم شدگی، کاهش می‌یابد. به طور کلی؛ آزمایش تحکیم یافته - زهکشی شده در حالت اشباع مقادیر بالاتری از تنش انحرافی را نسبت به شرایط غیر اشباع نشان می‌دهد. به عبارت دیگر؛ روند انجام آزمایش غیراشباع با افزایش دوره‌های تراندازی سبب ضعیف شدن بافت خاک می‌شود. از مقایسه مقادیر نهایی کرنش حجمی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای مقادیر متفاوت درصد گچ و فشارهای جانبی آورده شده مشخص می‌شود که کرنش حجمی نمونه‌هایی که در حالت غیر اشباع تحت مکش بافتی صفر

- 4(1), pp. 466-470.
- [5] Escario, V., and Saez, J. 1986. "The shear strength of partly saturated soils". *Geotechnique*, 36(3), pp. 453-456.
- [6] Rassam, D. W., and Freeman, C. 2002. "Predicting the shear strength envelope of unsaturated soils". *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 25(2), pp. 215–220, DOI: org/10.1520/GTJ11365J
- [7] Guan, G. S., Rahardjo, H., and Choon, L. E. 2009. "Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(4), pp. 594-606, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000261
- [8] Tami, D., Rahardjo, H., and Leong, E. C. 2007. "Characteristics of scanning curves of two soils". *Soils and Foundations*, 47(1), pp. 97-108, DOI: org/10.3208/sandf.47.97
- [9] Liu, Q., Yasufuku, N., Omine, K., and Hazarika, H. 2012. "Automatic soil water retention test system with volume change measurement for sandy and silty soils". *Soils and Foundations*, 52(2), pp. 368-380, DOI:10.1016/j.sandf.2012.02.012.
- [10] [Mendoza, C. and Colmenares, J. (2006). "Influence of the suction on the stiffness at very small strains." 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, ASCE, pp. 529-540, DOI: 10.1061/40802(189)40
- [11] Nyunt, T. T., Leong, E. C., and Rahardjo, H. 2011. "Strength and small-strain stiffness characteristics of unsaturated sand". *Geotechnical Testing Journal*, 34(5), pp. 551-561, DOI: 10.1520/GTJ103589, ISSN 0149-6115
- [12] Shen, Z., Jiang, M., and Thornton, C. 2016. "Shear strength of unsaturated granular soils: three-dimensional discrete element analyses". *Granular Matter*, Springer, 18(3), pp. 37, DOI: 10.1007/s10035-016-0645-x
- [13] Haeri, S. M., Garakani, A. A., Khosravi, A., and Meehan, Ch. L. 2014. "Assessing the hydro mechanical behavior of collapsible soils using a modified triaxial test device". *Geotechnical Testing Journal*, 37(2), pp. 190–204, DOI: 10.1520/GTJ20130034, ISSN 0149-6115
- [14] Ng, Ch. W. W. and Menzies, B. 2007. *Advanced unsaturated soil mechanics and engineering*, 1st ed.,

این کرنش‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. با افزایش مکش بافتی در توده خاک، سختی و مقاومت برشی کاهش پیدا کرده و کرنش‌های حجمی ایجاد شده در خاک به شدت افزایش داشته است. نتایج بدست آمده از این مطالعه را می‌توان جهت تخمین نشست‌های این نوع خاک، ناشی از کاهش میزان مکش بافتی؛ به دلیل بالا آمدن سطح آب زیرزمینی یا پدیده‌های دیگری که سبب افت مکش بافتی شوند، مورد استفاده قرار داد.

این تحقیق به درک بهتری از مقدار نشست سازه‌ای احداث شده بر روی این نوع خاک، کمک می‌کند. مطالعه حاضر می‌تواند زمینه پژوهش‌های آتی بر روی انواع خاک‌ها در شرایط غیراشباع برای دیگر فرآیندهای تراندازی را فراهم آورد.

یکی از محدودیت‌های این تحقیق ماسه‌ای بودن نوع خاک و دست خورده بودن نمونه‌های مورد آزمایش است. پژوهش‌های دیگری بر روی دیگر خاک‌ها و نمونه‌های دست نخورده باید انجام گیرد تا قابل تعمیم بودن این نتایج بررسی گردد.

جهت استفاده از این نتایج در معیارهای سازه‌ای، نیاز است که تغییراتی در تحلیل این نوع خاک به کار بسته شود.

### تشکر و قدردانی

پژوهش انجام گرفته در قالب مقاله پیشرو، با حمایت مالی آزمایشگاه دانشگاه فردوسی مشهد صورت پذیرفته است. همچنین لازم می‌دانم که از تلاش‌های دوست عزیزم؛ جناب آقای تهما رسولی تبار که در انجام این پژوهش مرا یاری نمودند نهایت قدردانی را بعمل بیاورم.

### منابع و مراجع

- [1] Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, Canada.
- [2] Lu, N. and Likos, W. J. 2004. *Unsaturated soil mechanics*, 1st ed, Wiley, Canada.
- [3] Fredlund, D. G., and Morgenstern, N. R. 1977. "Stress state variables for unsaturated soils". *Journal of Geotechnical Division*, 103(5), pp. 447-466.
- [4] Handoko, L., Yasufuku, N., Omine, K., and Hazarika, H. 2013. "Suction controlled triaxial apparatus for saturated-unsaturated soil test". *International Journal of Geomate*,

- pp. 933-939, DOI:10.1080/10298436.2014.893326
- [25] Razouki, S. S., and Salem, B. M. 2015. "Impact of soaking-drying cycles on gypsum sand roadbed soil". *Transportation Geotechnics*, 2, pp. 78-85, DOI:10.1016/j.trgeo.2014.11.003
- [26] Akhtarpour, A., Mahmood, M. Sh., Almahmodi, R. and Abdal Husain, M. M. (2018). "Settlement of gypseous sand upon short-term wetting" *Proc. Int. Cong. on Engineering and Architecture*, Alanya, Turkey, pp. 1807-1820.
- [27] Ahmed, K. I., 2013. "Effect of gypsum on the hydro-mechanical characteristics of partially saturated sandy soil". PhD Thesis, Cardiff University, UK.
- [28] Abdal Husain, M. M., Akhtarpour, A. and Mahmood, M. Sh. 2018. "Wetting challenges on the gypsiferous soils." *Proc. 4th Int. Cong. on Sustainable Development*, Shiraz, Iran.
- [29] Aversa, S., and Nicotera, M. 2002. "A triaxial and oedometer apparatus for testing unsaturated soils". *Geotechnical Testing Journal*, 25(1), pp. 3-15, DOI: 10.1520/GTJ11075J, ISSN 0149-6115
- [30] Cabarkapa, Z., and Cuccovillo, T. 2006. "Automated triaxial apparatus for testing unsaturated soils". *Geotechnical Testing Journal*, 29(1), pp. 21-29, DOI: org /10.1520/GTJ12310. ISSN 0149-6115
- [31] Padilla , J. M., Houston, W. N., Lawrence, C. A., Fredlund, D. G., Houston, S. L. and Perez, N. P. (2006). "An automated triaxial testing device for unsaturated soils." *4th Int. Conf. on Unsaturated Soils*, ASCE, pp. 1775-1786, DOI: 10.1061/40802(189)149
- [32] Haeri S.M., Zamani A. and Garakani A.A. 2012. "Collapse potential and permeability of undisturbed and remolded loessial soil samples". *Unsaturated Soils: Research and Applications*, Springer, Berlin, Germany, pp. 301-308, DOI: 10.1007/978-3-642-31116-1\_41
- [33] Ahmad, F., Said, M. A., and Najah, L. 2012. "Effect of leaching and gypsum content on properties of gypseous soil". *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(9), pp. 1-5.
- [34] Al-Dabbas, M. A., Schanz, T., and Yassen, M. J. 2010. Taylor & Francis Group, Canada.
- [15] Aldaood, A., Bouasker, M. and Al-Mukhtar, M. 2013. "Stability behavior of lime stabilized gypseous soil under long-term soaking". *2nd Int. Conf. on Geotechnical and Earthquake Engineering*, pp. 170-177.
- [16] Solis, R. and Zhang, J. (2007). "Gypsiferous soils: an engineering problem." *11th Multidisciplinary Conf. on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, ASCE, Florida, U.S.A., DOI: 10.1061/41003(327)72
- [17] Al-Shakerchy, M. Sh. M., 2007. "Geotechnical properties of Al Najaf city soil with emphasis on the infiltration and strength characteristics". PhD Thesis, Building and Construction Dept., University of Technology, Baghdad, Iraq.
- [18] Al-Saoudi, N. K. S. and Al-Shakerchy, M. Sh. M. (2010). "Statistical analysis of some geotechnical properties of Najaf city." *Proc. Int. Geotechnical Conference*, Vol. 3, Moscow, Russia, pp. 1173-1180.
- [19] Al-Saoudi, N., Al-Khafaji, A. and Al-Mosawi, M. (2013). "Challenging problems of gypseous soils in Iraq." *Proc. 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, France, pp. 479-482.
- [20] Razouki, S. S., and Al-Azawi, M. S. 2003. "Long-term soaking effect on strength and deformation characteristics of a gypsiferous subgrade soil". *Engineering Journal of the University of Qatar*, 16, pp. 49-60.
- [21] Salman, A. D. 2011. "Soaking effects on the shear strength parameters and bearing capacity of soil". *Eng. & Tech. Journal*, University of Technology, Baghdad, Iraq, 29(6), pp. 1107-1123.
- [22] Mahmood, M. Sh. 2017. "Effect of time-based soaking on shear strength parameters of sand soils". *Applied Research Journal*, Iran, 3(5), pp. 142-149.
- [23] Mahmood, M. Sh. 2018. "Effect of soaking on the compaction characteristics of Al-Najaf sand soil". *Kufa Journal of Engineering*, Iraq, 9(2), pp. 1-12.
- [24] Razouki, S. S., and Salem, B. M. 2014. "Soaking-drying frequency effect on gypsum-rich roadbed sand". *International Journal of Pavement Engineering*, 15(10),

Baghdad, Iraq.

[37] Al- Mufty A. A., 1997. "Effect of gypsum dissolution on the mechanical behavior of gypseous soils". PhD Thesis, University of Baghdad, Baghdad, Iraq.

[38] Ladd, R. S. 1978. "Preparing test specimens using undercompaction". *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 1(1), pp. 16-23.

"Comparison of gypsiferous soils in Samarra and Karbala areas, Iraq". *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*, 6(2), pp. 115- 126.

[35] Barazanji, A. F., 1973. "Gypsiferous soils of Iraq". DSc Thesis; State University of Ghent, Belgium.

[36] Nashat, I. H., 1990. "Engineering characteristics of some gypseous soil in Iraq". PhD Thesis, University of Baghdad,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.M. Abdalhusein, A. Akhtarpour, M.Sh. Mahmood, Behavior Study of the Gypsiferous Sand Soil of AlNajaf City with Presence of Matric Suction Using Unsaturated Triaxial Device, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(10) (2021) 2435-2450.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16339.6194](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16339.6194)

