

## بررسی افت تنش در مصالح ماسه‌ای هنگام اشباع شدن

رضا مهین‌روستا<sup>۱\*</sup>، آرش پورجعفر<sup>۲</sup>

۱- مدیر بخش مکانیک خاک و سنگ، شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس

۲- کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

reza.mahinroosta@gmail.com

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۹/۹]

**چکیده:** در صورتی که مصالح دانه‌ای خشک، تحت شرایط محیطی، اشباع شوند کاهش تنش در توده خاک اتفاق افتاده و همراه آن نشست‌هایی در مصالح به وجود می‌آید که نشست ناگهانی نامیده می‌شود. در این مقاله تأثیر اشباع شدن مصالح ماسه‌ای روی پارامترهای مقاومت برشی این خاک و نیز عوامل مؤثر بر میزان افت تنش این مصالح به وسیله آزمایش دستگاه آزمایش سه محوری بررسی شده است. از این‌رو در ابتدا، آزمایش‌های اولیه برای تعیین خصوصیات فیزیکی خاک ماسه‌ای از جمله آزمایش دانه‌بندی، تعیین چگالی ویژه و دانسیته‌های کمینه و بیشینه صورت گرفت و پس از تهیه نمونه‌هایی با دانسیته نسبی مورد نظر، برای ارزیابی پارامترهای مقاومت برشی، آزمایش‌های خشک و اشباع در تنش‌های همه‌جانبه مختلف انجام شدند. برای بررسی افت تنش به دست آمده از اشباع شدن مصالح، ابتدا آزمایش سه محوری تحت شرایط خشک انجام شده سپس با ثابت نگه داشتن کرنش محوری، مصالح اشباع شد و پس از گذشت زمان کافی، بارگذاری در آزمایش سه‌محوری ادامه داده شد تا نمونه‌ها به گسیختگی برسند. بدین ترتیب اثر عواملی مانند میزان تنش همه جانبه، میزان سطح تنش برشی، دانسیته نسبی، درصد رطوبت اولیه و اثر ریزی و درشتی دانه‌ها بر افت تنش مصالح ماسه‌ای بررسی شدند.

**واژگان کلیدی:** نشست ناگهانی، ماسه، اشباع شدن، آزمایش سه محوری، مقاومت برشی

### ۱- مقدمه

وقوع پدیده‌ی نشست ناگهانی در خاک‌ها با دارا بودن این شرایط بیشتر می‌شود: ۱- دارا بودن یک ساختار غیر اشباع و غیر پایدار (نسبت تخلخل زیاد و دانسیته‌ی خشک پایین)، ۲- بار زیادی که منجر به بی‌ثباتی ساختار خاک شود ۳- پیوستگی یا چسبندگی کم بین ذرات و ۴- اضافه شدن آب به خاک که باعث شود عامل چسبندگی یا پیوندی کاهش یابد و تماس درون ذره‌ای در اثر برش از بین رود که این خود باعث کاهش حجم خاک می‌شود [۳]، ۴ و ۵]. عوامل مختلفی روی مقدار این پدیده تأثیر گذار است که از جمله‌ی این عوامل می‌توان به انرژی تراکم به کار رفته، دانسیته نسبی مصالح، درصد رطوبت اولیه، تنش همه جانبه، نوع دانه‌بندی و همچنین سطح تنش برشی اشاره کرد.

جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در پوسته بالادست سدهای خاکی مقداری نشست که با تغییرات سطح آب به چندین متر هم می‌رسد را نشان می‌دهد، که این رفتار به خصوص در طول اولین آبیگری و یا حتی در پوسته پایین دست نیز در صورت وقوع یک بارندگی شدید مشاهده می‌شود. سدهای خاکی به علت این تغییرات در رفتار مکانیکی خاک در طول اشباع شدن ممکن است گسیخته شوند [۱]. چنانچه خاکی تحت اثر اشباع شدن از خود کاهش حجم نشان دهد، این امر باعث نشست خاک مورد نظر شده و به آن نشست ناگهانی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. از ویژگی‌های اصلی خاک‌ها با این قابلیت می‌توان به خشک بودن در حالت طبیعی و داشتن ساختاری سست اشاره کرد [۲]. احتمال

برخی از پژوهشگران ملاک‌هایی را برای ارزیابی پتانسیل نشست ناگهانی خاک‌ها ارائه کردند. اساس بیشتر این ملاک‌ها بر مبنای تغییرات نسبت تخلخل است به گونه‌ای که روابط به دست آمده تغییرات این نسبت را قبل و بعد از اشباع شدن نشان می‌دهند. هر یک از پژوهشگران فوق با توجه به ملاک‌هایی ارائه شده محدودی خاصی را برای بیان پتانسیل نشست ناگهانی ارائه کردند، که چنانچه نسبت به دست آمده از این روابط از حد مجاز تجاوز نماید پتانسیل نشست ناگهانی خاک موجود بالا خواهد بود [۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰].

لی و همکاران در سال ۱۹۶۷ اثر رطوبت روی مقاومت و تغییرات حجمی ماسه شسته را با استفاده از آزمایش‌های فشاری سه محوری زهکشی شده بررسی کردند و با توجه به آزمایش دانه‌بندی بعد و قبل از انجام آزمایش مشخص شد که ذرات بیشتری در زمانی که نمونه‌ها در حالت اشباع آزمایش می‌شدند نسبت به حالت خشک شکسته شده بودند. بر اساس این اصل لی و همکارانش نتیجه گرفتند که شکستگی اضافی ذرات در اثر اشباع شدن فاکتور مهمی در تغییر رفتار مصالح است [۱۱].

استانکولسکو در سال ۱۹۶۷ تعدادی آزمایش سه محوری انجام داد که در آن نمونه‌ها تحت تنش‌های انحرافی و اکتاهدرال مختلف قرار گرفته و سپس اشباع شده بودند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که میزان تغییر حجم هنگام اشباع شدن با افزایش تنش انحرافی و تنش نرمال اکتاهدرال افزایش می‌یابد [۱۲].

زور در سال ۱۹۶۹ آزمایش‌های سه محوری‌ای روی نمونه‌هایی که تحت مقادیر گوناگون نسبت تنش‌های اصلی  $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$  و تنش نرمال اکتاهدرال تحکیم یافته بودند تعریف کرد، آزمایش‌های وی نیز مانند آزمایش‌های استانکولسکو نشان داد که میزان نشست ناگهانی با افزایش تنش همه جانبه افزایش می‌یابد. همین‌گونه برخلاف آزمایش‌های صورت گرفته به وسیله استانکولسکو، آزمایش‌های انجام شده به وسیله‌ی زور نشان داد که مقادیر تغییرات حجمی به علت اشباع شدن با افزایش نرخ تنش اصلی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد [۱۳].

از دیگر پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان به بررسی‌های نوبری و دانکن در سال ۱۹۷۲، روی مصالح سد پیرامید<sup>۱</sup> اشاره کرد. ایشان با انجام آزمایش‌های تک محوری مشاهده کردند که با افزایش دانسیته‌ی نسبی و افزایش رطوبت از میزان نشست ناگهانی مصالح کاسته می‌شود. همچنین با انجام آزمایش‌های سه محوری روی مصالح در حالات خشک، اشباع و نشست ناگهانی مشاهده کردند؛ که نرخ کرنش حجمی در نمونه‌ی آزمایش نشست ناگهانی با اشباع شدن نمونه افزایش یافته و پس از مدتی با کرنش حجمی نمونه در حالت آزمایشی که نمونه از ابتدا اشباع شده بود یکی شده است [۱۴].

پژوهشگران روی هر یک از فاکتورهای تأثیرگذار بر پدیده‌ی نشست ناگهانی پژوهش‌هایی انجام دادند که از جمله آن‌ها می‌توان به بررسی رابطه پتانسیل نشست ناگهانی در برابر وزن مخصوص خشک مصالح ماسه‌ای موجود در آفریقای جنوبی بر طبق پژوهش‌های برینک در سال ۱۹۸۵ اشاره کرد. او دو رابطه برای دو نوع خاک مختلف ارائه کرد که بر اساس این دو رابطه چنانچه وزن مخصوص خشک از حدی بالاتر رود امکان رخ دادن پدیده نشست ناگهانی در خاک‌های موجود در آن ناحیه وجود نخواهد داشت [۱۵].

نادریان و ویلیامز در سال ۱۹۹۷ با انجام آزمایش‌های تک محوری روی مصالح معدنی ماسه سنگ و رس سنگ به این نتیجه رسیدند که با افزایش تنش قائم میزان نشست ناگهانی مصالح زیاد می‌شود [۱۶].

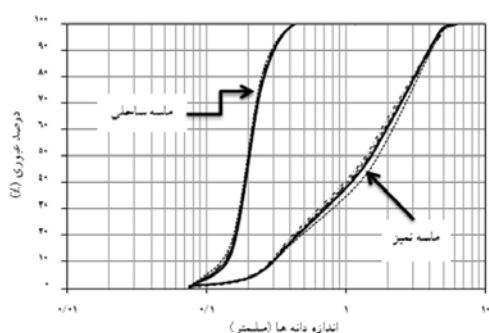
پژوهش‌های صورت گرفته برای نشان دادن اثر تر و خشک شدن دوره‌ای روی پتانسیل نشست ناگهانی خاک‌های واریزه‌ای نشان داد که تر و خشک شدن دوره‌ای باعث کاهش نسبت تخلخل نمونه‌ها می‌شود، و این مسئله باعث افزایش پتانسیل انبساط و کاهش پتانسیل نشست ناگهانی است [۱۷].

هدف از انجام این پژوهش بررسی میزان نشست پذیری خاک‌های ماسه‌ای تحت اثر اشباع شدن و بررسی عوامل تأثیرگذار بر این خاک‌ها است. از این رو در ابتدا

جدول ۱- طبقه بندی خاک‌های مورد استفاده

توصیف خاک	$C_u$	$C_c$	حداکثر قطر دانه (mm)	نوع مصالح
SP	۱/۵۷	۱/۱	۰/۴۲۵	ماسه ساحلی
SP	۶/۴۴	۰/۸۴	۶	ماسه تمیز
SP	۱/۵	۰/۷۸	۶	ماسه مخلوط
SP	۱/۵	۱/۰۴	۲	ماسه مخلوط

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی به کار رفته در این پژوهش، مصالح ماسه‌ی ساحلی، تمیز و مخلوط، آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین چگالی ویژه‌ی دانه‌ها، ( $G_s$ )، تعیین وزن مخصوص کیمه بر اساس استاندارد و تعیین وزن مخصوص بیشینه به روش میز لرزه انجام شدند که نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱- منحنی‌های دانه‌بندی برای ۵ نمونه از مصالح ماسه ساحلی و ماسه تمیز

## ۲-۱- روش انجام آزمایش

با توجه به مقادیر دانسیته‌ی کیمه و بیشینه به دست آمده، حجم قالب دستگاه سه محوری و در نظر داشتن دانسیته‌ی نسبی خاص برای انجام آزمایش‌ها، وزن خاک مورد نظر برای ساخت نمونه‌ها محاسبه شده و نمونه‌ها تهیه شدند. آزمایش‌های سه محوری مطابق با استاندارد در سه حالت خشک، اشباع، خشک سپس اشباع (نشست ناگهانی)، تهیه و آزمایش مقاومت برشی سه محوری بر روی آنها انجام شد. برای این منظور نمونه‌ها با دانسیته‌ی نسبی خاص ابتدا تحت تنش‌های همه جانبه‌ی ۱، ۳ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع قرار گرفتند، پس از آن به مدت ۱۰ دقیقه صبر شد تا نمونه‌ها تحت فشار همه جانبه به حالت پایداری برسند و

آزمایش‌هایی برای تعیین خصوصیات فیزیکی مصالح صورت گرفت و سپس برای به دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی مصالح ماسه‌ای آزمایش‌های خشک، اشباع و خشک-اشباع (نشست ناگهانی) با استفاده از دستگاه آزمایش مقاومت برشی سه محوری انجام شد. همچنین برای تشخیص بهتر این پدیده، اثر عوامل مختلف شامل تنش همه جانبه، سطح تنش برشی، دانسیته‌ی نسبی، درصد رطوبت اولیه و نوع دانه‌بندی مصالح به وسیله‌ی آزمایش‌های سه محوری در این پژوهش بررسی شد.

## ۲- دستگاه، مصالح و روش انجام آزمایش

در این پژوهش برای بررسی رفتار تغییر شکل پذیری و مقاومتی مصالح در حالت‌های خشک، اشباع و نشست ناگهانی هنگام اشباع شدن از دستگاه آزمایش مقاومت برشی سه محوری استفاده شده است. تمامی آزمایش‌های آورده شده در این بخش در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان انجام شده است.

بیشتر آزمایش‌های صورت گرفته در این پروژه روی مصالح ماسه‌ی تهیه شده از ساحل چابکسر صورت گرفت، این مصالح دارای دانه‌بندی یکنواختی بوده ( $C_u=1/5$ ) و مستعد نشست ناگهانی است. نوع دیگر مصالح به کار رفته در این پژوهش که برای بررسی اثر درشتی و ریزی دانه‌ها بر نشست ناگهانی خاک مورد استفاده قرار گرفته است، ماسه‌ی تمیز با دانه‌بندی یکنواخت و درشت‌تر از ماسه‌ی ساحلی است که از بخشی در شهر زنجان تهیه شده است.

آزمایش دانه‌بندی روی مصالح ماسه‌ی ساحلی و تمیز هر یک به تعداد ۵ بار انجام شد برای بررسی اثر نوع دانه‌بندی نیز دو نمونه از ترکیب مصالح ساحلی و تمیز بر اساس دانه‌بندی فیلتر معمول در سدهای خاکی (سد شهیدان امیر تیموری در کرمان) ساخته شد؛ نمونه‌های تهیه شده دارای بیشینه قطر ۶ و ۲ میلی‌متر است. در جدول و شکل ۱ به ترتیب منحنی‌های دانه‌بندی و خواص اصلی دانه‌بندی مصالح بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد آمده است.

برای کنترل اشباع کامل نمونه‌ها، از ضریب  $B$  اسکمپتون استفاده شده است. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش با بهره‌گیری از قابلیت دستگاه سه محوری در اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای در هر لحظه و همچنین امکان استفاده از پس فشار اشباع شدند. برای اندازه‌گیری مقدار ضریب  $B$  اسکمپتون که به عبارتی می‌تواند بیانگر درصد اشباع نمونه‌ها نیز باشد به این طریق عمل شد که در ابتدا فشار همه جانبه‌ای برابر  $50$  کیلو پاسکال به نمونه خشک اعمال شد سپس پس فشاری به مقدار  $10$  تا  $15$  کیلو پاسکال کمتر از مقدار فشار همه جانبه اعمال شد پس از کمی انتظار برای پایداری بارهای وارد شده شیرهای ورودی فشار همه جانبه و پس فشار بسته شدند در این لحظه برای اندازه‌گیری پارامتر اسکمپتون فشار همه جانبه به مقدار  $50$  کیلو پاسکال زیاد شد و تغییرات فشار آب حفره‌ای ثبت شد در نتیجه از تقسیم مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای حاصل شده بر اضافه تنش همه جانبه‌ای اعمال شده مقدار پارامتر اسکمپتون به دست آمد. این روند در طول اشباع سازی یک نمونه چندین بار تکرار شد تا تغییرات  $B$  اسکمپتون ثبت شود. برای اطمینان از اشباع شدن نمونه‌ها درصد رطوبت تمامی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش سه محوری اندازه‌گیری شد و با توجه به مقدار  $G_s$  مصالح کنترل لازم انجام شد.

### ۳- بررسی آزمایش‌های مقاومت برشی بر

#### روی مصالح ماسه‌ای ساحلی

#### ۳-۱- آزمایش‌های سه محوری بر روی نمونه‌ها در

#### حالات خشک و اشباع

در شکل‌های ۲ و ۳ منحنی‌های مربوط به اضافه تنش محوری-کرنش محوری برای حالات خشک و اشباع برای نمونه‌های با دانسیته‌ی نسبی  $70\%$  تحت تنش‌های همه جانبه‌ی ۱، ۳ و ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع که به وسیله‌ی دستگاه سه محوری آزمایش شده‌اند نمایش داده شده است. همان‌گونه که از شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، هر چه تنش همه جانبه بیشتر می‌شود نمونه‌ها در کرنش محوری بزرگتری گسیخته می‌شوند و همچنین پس از گسیختگی

سپس در صورت انجام آزمایش خشک، نمونه‌ها تحت فشار قائم با سرعت بارگذاری  $0.05$  میلی‌متر بر دقیقه برش خوردند و در صورت انجام آزمایش اشباع، ابتدا نمونه‌ها تحکیم یافتند و سپس تحت همان نرخ بارگذاری ذکر شده تحت فشار قائم برش خوردند.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی مصالح ماسه‌ای

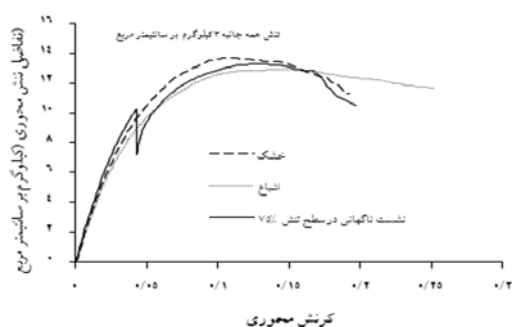
مصالح	حداکثر قطر دانه (mm)	دانسیته حداکثر ( $g/cm^3$ )	دانسیته حداقل ( $g/cm^3$ )	$G_s$
ساحلی	۰.۴۲۵	۱.۷۱	۱.۴۸	۲.۷۵
تمیز	۶	۱.۸۱	۱.۶۴	۲.۶۷
مخلوط	۶	۱.۷۹	۱.۵۸	۲.۶۵
مخلوط	۲	۱.۷۳	۱.۵۰	۲.۶۸

در حالت آزمایش‌های نشست ناگهانی، ابتدا نمونه‌ها تحت حالت خشک با نرخ بارگذاری مشابه حالت قبل برش خوردند تا آنکه بارگذاری به سطح تنش خاصی برسد و در آن سطح تنش، نمونه‌ها اشباع شدند و پس از آن تحت همان نرخ بارگذاری برش بر روی نمونه‌ها ادامه یافت.

در انتها عوامل تأثیرگذار بر مقدار نشست ناگهانی مصالح مانند تنش همه جانبه، سطح تنش برشی، دانسیته‌ی نسبی، سطح تنش، رطوبت اولیه، نوع دانه‌بندی، به وسیله‌ی دستگاه سه محوری بررسی شدند که در ادامه به شرح این موارد پرداخته شده است.

برای تهیه نمونه‌های کاملاً خشک، مصالح ماسه‌ای به وسیله‌ی دستگاه اون به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. برای اطمینان کامل از خشک شدن نمونه‌ها وزن نمونه‌ها پس از دو فاصله زمانی پشت سر هم (بیش از ۳۰ دقیقه) اندازه‌گیری شد که تغییرات ناچیزی حدود  $0.1$  درصد را نشان می‌دادند که قابل چشم پوشی بود. برای تراکم نمونه‌ها در قالب دستگاه سه محوری با توجه به استاندارد آزمایش، نمونه‌ها در کمیته ۷ لایه در درون قالب ریخته شدند و برای حاصل شدن وزن مخصوص مورد نظر در هر آزمایش تعداد ضربه‌ها و میزان نیرو در هر ضربه در هر لایه رعایت شد.

سطح تنش ۷۵ درصد یعنی لحظه‌ای که نمونه به ۷۵٪ از بیشینه مقاومت برشی خشک خود می‌رسد (تنش گسیختگی) و سپس اشباع می‌شود، آمده است. شکل ۴ نمودار اضافه تنش محوری-کرنش محوری را در شرایط خشک-اشباع (نشست ناگهانی) در سطح تنش ۷۵٪ نشان می‌دهد.



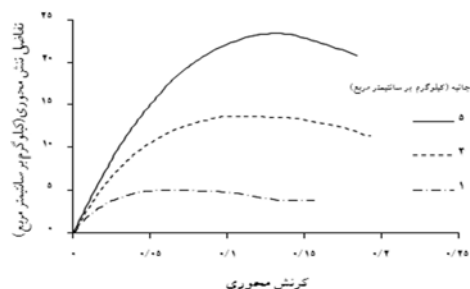
شکل ۴- نمودار تفاضل تنش محوری - کرنش محوری برای مصالح ماسه‌ای در حالت نشست ناگهانی

با مقایسه‌ی منحنی‌های خشک، اشباع و نشست ناگهانی در شکل ۴ مشاهده می‌شود که قسمت خشک نمودار نشست ناگهانی (قبل از اشباع کردن نمونه) رفتاری شبیه حالت خشک مصالح دارد. پس از اشباع نمودن مصالح، افت تنش ناگهانی در مصالح رخ داده و به عبارتی دیگر نشستی در مصالح رخ می‌دهد. پس از ثابت شدن افت تنش، نمونه دوباره تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرد، در این مرحله رفتار نمونه بیشتر شبیه رفتار نمونه در حالت اشباع است.

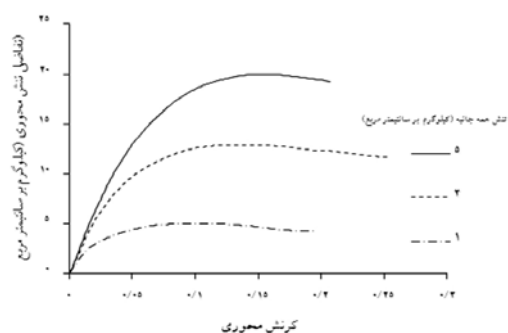
#### ۴- تأثیر عوامل مؤثر بر افت تنش در مصالح ماسه‌ی ساحلی

در شکل ۵، منحنی تنش-کرنش متعارف هنگام اشباع شدن مصالح در آزمایش مقاومت برشی سه محوری نمایش داده شده است. با رسیدن نمونه به سطح تنش  $\Delta\sigma_v$ ، نمونه اشباع می‌شود و پس از آن نمونه با افت تنشی روبرو شده و به سطح تنش  $\Delta\sigma_v$  می‌رسد. برای بررسی پدیده‌ی افت تنش ابتدا پارامترهای زیر تعریف می‌شوند:

در کرنش محوری بزرگتری شروع به ثابت شدن می‌نمایند. در تمامی آزمایش‌ها نمونه‌ها پس از گسیختگی رفتار نرم شوندگی از خود نشان می‌دهند.



شکل ۲- نمودار تفاضل تنش محوری-کرنش محوری برای مصالح ماسه ساحلی در حالت خشک



شکل ۳- نمودار تفاضل تنش محوری - کرنش محوری برای مصالح ماسه‌ای در حالت اشباع

#### ۲-۳- آزمایش‌های سه محوری روی نمونه‌ها در حالت خشک-اشباع (نشست ناگهانی)

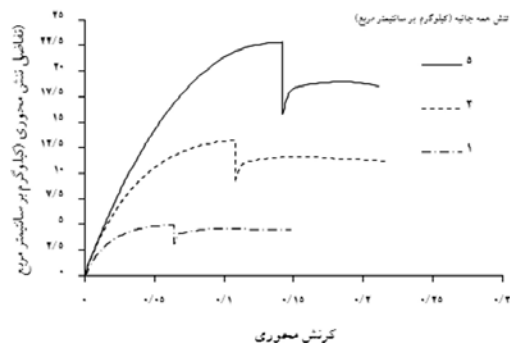
این آزمایش‌ها نیز روی نمونه‌هایی با دانسیته‌ی نسبی ۷۰٪ انجام شدند، ولی روند انجام آن‌ها با آزمایش‌های قبلی متفاوت است به گونه‌ای که ابتدا نمونه‌ها تحت تنش‌های همه جانبه‌ی مورد نظر قرار گرفتند سپس بارگذاری برشی با نرخ ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه‌ها اعمال شد. پس از رسیدن به سطح تنش برشی مورد نظر، بارگذاری متوقف گردید و نمونه‌ها اشباع شدند و مدتی در همین وضعیت قرار گرفتند تا تفاضل تنش محوری به یک مقدار ثابتی برسد. سپس مجدداً تحت بارگذاری قرار گرفتند. در این قسمت برای نمونه نتایج نشست ناگهانی مصالح در تنش همه جانبه‌ی ۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، اشباع شده در

$$C_{sr} = 1 - a/100 \quad (۴)$$

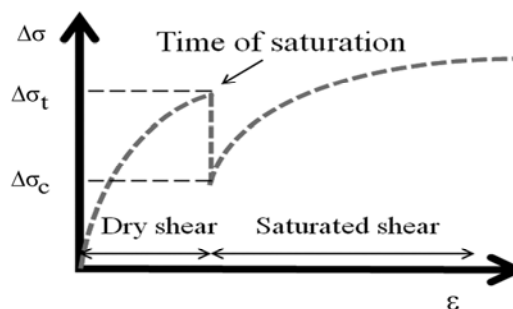
#### ۱-۴- اثر تنش همه جانبه بر افت تنش مصالح ماسه‌ی ساحلی

برای بررسی اثر تنش همه جانبه روی نشست ناگهانی مصالح، نمونه‌هایی با دانسیته‌ی نسبی ۷۰٪ تهیه شد و در تنش‌های ۱، ۳ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت بارگذاری قرار گرفتند زمانی که نمونه‌ها به مقاومت بیشینه خود رسیدند (سطح تنش برشی ۱۰۰٪) بارگذاری متوقف شد و نمونه‌ها اشباع شدند و پس از آن دوباره تحت بارگذاری قرار گرفتند. در شکل ۶ نمودار تفاضل تنش محوری در برابر کرنش محوری در سه تنش همه جانبه ذکر شده نشان داده شده‌اند.

با توجه به شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تنش همه جانبه، میزان افت تنش برشی در نمونه‌ها زیاد می‌شود. همچنین با توجه به رابطه‌ی ۲ ضریب وارفنگی تنش نیز افزایش می‌یابد. این مسئله با نتایج آزمایش‌های انجام شده به وسیله‌ی پژوهشگران دیگر هماهنگی دارد [۱۶، ۱۹]. نادریان و عشتاقی نیز ملاحظه کردند که با افزایش تنش همه‌جانبه میزان نشست حاصل از اشباع شدن مصالح بیشتر می‌شود. به عبارتی دیگر مکانیزم پدیده‌ی نشست ناگهانی به این صورت است که در اثر فشار اعمال شده در چگونگی قرارگیری ذرات تغییراتی ایجاد می‌شود و در اثر اشباع شدن خاک پیوندهای درون ذرات دچار از هم گسستگی می‌شوند، این عوامل با افزایش فشار همه جانبه، شدیدتر شده و باعث افزایش میزان افت تنش برشی می‌شوند.



شکل ۶- نمودار تفاضل تنش محوری - کرنش محوری در حالت نشست ناگهانی در سطح تنش ۱۰۰٪



شکل ۵- مسیر تنش در آزمایش نشست ناگهانی

۱- میزان افت تنش برشی ( $\Delta\sigma_{tc}$ ):

پس از اشباع سازی نمونه همان‌گونه که در شکل (۵) مشخص است اختلاف تنشی به علت ورود آب به داخل نمونه پدید می‌آید که به وسیله‌ی رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$\Delta\sigma_{tc} = \Delta\sigma_t - \Delta\sigma_c \quad (۱)$$

در رابطه‌ی فوق همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است،  $\Delta\sigma_t$  مقدار تنش در لحظه‌ی اشباع سازی مصالح و  $\Delta\sigma_c$  مقدار تنش پس از اشباع سازی مصالح است که به آن تنش وارفته<sup>۱</sup> گفته می‌شود.

۲- ضریب وارفنگی تنش ( $C_{sr}$ ):

ضریبی است که برای مدلسازی کاهش تنشی که در اثر اشباع شدن نمونه‌ها به وجود می‌آید به کار می‌رود که با ضرب کردن این ضریب در تنش موجود در لحظه‌ی اشباع کردن، ( $\Delta\sigma_t$ )، تنش وارفته ( $\Delta\sigma_c$ )، به دست می‌آید، این ضریب از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$C_{sr} = \Delta\sigma_c / \Delta\sigma_t \quad (۲)$$

۳- درصد آزاد شدگی تنش یا ضریب کاهش تنش (a):

این ضریب نشان دهنده‌ی این است که چند درصد از تنش‌های موجود در حالت خشک آزاد شده و به حالت اشباع می‌رسند، این ضریب از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$a = (\Delta\sigma_t - \Delta\sigma_c) / \Delta\sigma_t \times 100 \quad (۳)$$

همچنین می‌توان رابطه‌ی بین ضریب وارفنگی تنش با درصد آزاد شدگی تنش را به صورت زیر نوشت:

سطوح تنش بالاتر است که به این معنی است که نمونه‌های اشباع شده در سطوح تنش پایین‌تر نشست ناگهانی کمتری از خود نشان می‌دهند.

#### ۴-۲- اثر دانسیته‌ی نسبی روی افت تنش در مصالح

##### ماسه‌ی ساحلی

برای بررسی اثر تراکم مصالح بر میزان افت تنش، نمونه‌هایی در سه دانسیته‌ی نسبی ۵۰٪، ۷۰٪ و ۸۵٪ در تنش همه‌جانبه‌ی ۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت بارگذاری قرار گرفتند و پس از رسیدن به ۷۵٪ از سطح تنش حداکثرشان بارگذاری متوقف شده و نمونه‌ها اشباع و پس از آن دوباره بارگذاری شدند. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۴ و شکل ۸ آمده است.

با توجه به شکل‌های ۸ و جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که افت تنش برشی با افزایش دانسیته‌ی نسبی کاهش می‌یابد، همین‌طور مقادیر ضریب وارفتگی تنش برای سه دانسیته‌ی ذکر شده مقایسه شدند و نتایج نشان دهنده‌ی این است که مصالح با دانسیته‌ی نسبی کمتر دارای ضریب وارفتگی تنش کمتری نسبت به مصالحی که دانسیته‌ی نسبی بیشتری دارند می‌باشند، همچنین درصد آزادشدگی تنش برای مصالح با دانسیته‌ی نسبی بیشتر، کمتر از مقدار آن برای مصالح با دانسیته‌ی نسبی بالاتر است.

تمامی این نتایج با نتایج پژوهش‌های دانکن و نوبری روی مصالح ماسه‌ای سد پیرامید و آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس صورت گرفته به وسیله‌ی عشتاقی مطابقت دارند [۱۴، ۱۹].

جدول ۴- مقادیر  $\Delta\sigma_{TC}$ ،  $C_{SF}$  و  $a$  برای ماسه‌ی ساحلی با دانسیته‌های

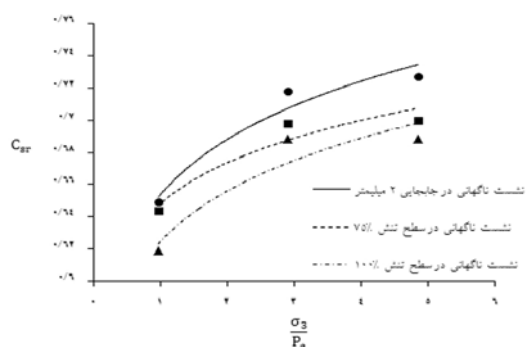
نسبی ۵۰٪، ۷۰٪ و ۸۵٪

سطح تنش (%)	تنش همه‌جانبه (Kg/cm <sup>2</sup> )	دانسیته‌ی نسبی (%)	$\Delta\sigma_{TC}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$C_{SF}$	$a$ (%)
۷۵	۳	۵۰	۳.۳۱	۰.۶۵۰	۳۵.۰
		۷۰	۳.۰۹	۰.۷۰۰	۳۰.۰
		۸۵	۲.۹۶	۰.۷۳۰	۲۷.۰

با توجه به روابط گفته شده در بخش ۴ مقادیر ضریب وارفتگی تنش برای حالات مختلف از سطوح تنش محاسبه شد و برای نشان دادن رابطه‌ی بین ضریب وارفتگی تنش و تنش همه‌جانبه‌ی غیر خطی ۵ به صورت زیر بیان شد:

$$C_{SF} = \alpha(\sigma_3 / Pa)^\beta \quad (5)$$

که در آن  $\alpha$  مقدار ضریب وارفتگی تنش در فشار ۱ اتمسفر و  $\beta$  ضریب توان است. در شکل ۷ می‌توان رابطه‌ی غیرخطی بین ضریب وارفتگی تنش و تنش همه‌جانبه را مشاهده کرد. در جدول ۳ نیز مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  برای خاک ماسه‌ی ساحلی با دانسیته‌ی ۷۰٪ در سه تنش همه‌جانبه‌ی ۱، ۳ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در دو سطح تنش مختلف و یک جابه‌جایی  $\delta=2\text{mm}$  آمده است.

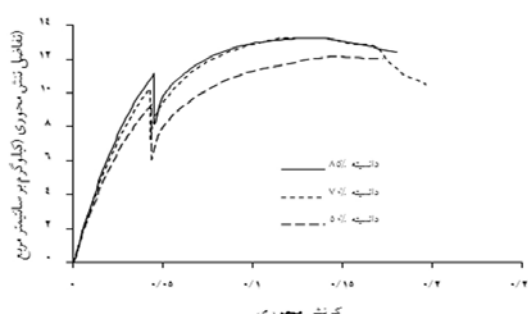
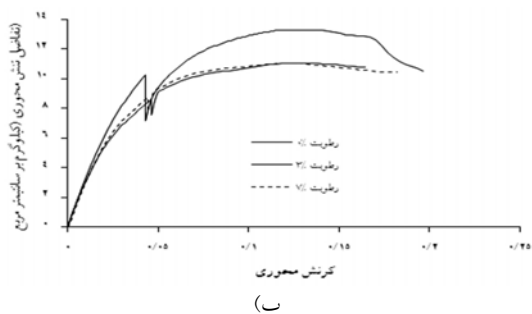
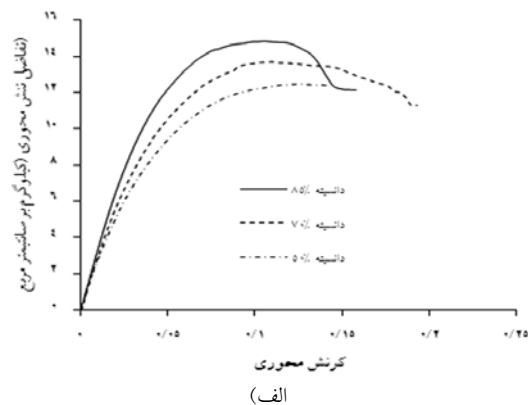
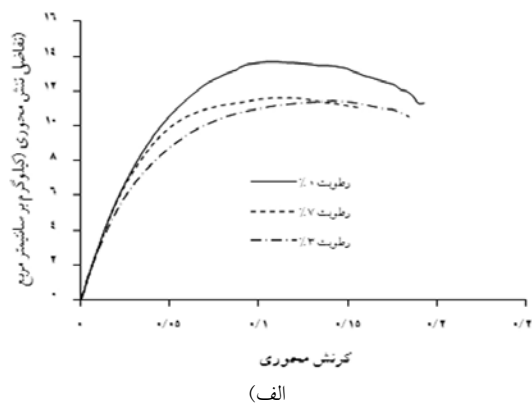


شکل ۷- نمودار ضریب وارفتگی تنش در برابر تنش همه‌جانبه برای ماسه ساحلی اشباع شده در سه سطح تنش مختلف

جدول ۳- مقادیر  $\alpha$ ،  $\beta$  به دست آمده از رابطه‌ی ۸ برای ماسه‌ی ساحلی با دانسیته‌ی ۷۰٪ در سطوح تنش ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪

نوع آزمایش	$\alpha$	$\beta$
نشست ناگهانی در سطح تنش ۵۰٪ معادل جابه‌جایی ۲ میلی‌متر	۰.۶۵۴	۰.۰۷۴
نشست ناگهانی در سطح تنش ۷۵٪	۰.۶۴۸	۰.۰۵۵
نشست ناگهانی در سطح تنش ۱۰۰٪	۰.۶۲۵	۰.۰۷۱

با توجه به شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تنش همه‌جانبه، ضریب وارفتگی تنش به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد، همچنین مشاهده می‌شود که مقدار ضریب وارفتگی تنش هنگامی که نمونه در سطح تنش پایین‌تری اشباع می‌شود بالاتر از این مقادیر در شرایط اشباع شدن در



شکل ۹- اثر رطوبت مصالح بر نمودار نفاصل تنش محوری- کرنش محوری برای ماسه ساحلی در حالات: الف) خشک، و ب) وارفنگی هنگام اشباع شدن

شکل ۸- اثر دانسیته مصالح بر نمودار نفاصل تنش محوری- کرنش محوری برای ماسه ساحلی در حالات: الف) خشک، و ب) وارفنگی هنگام اشباع شدن

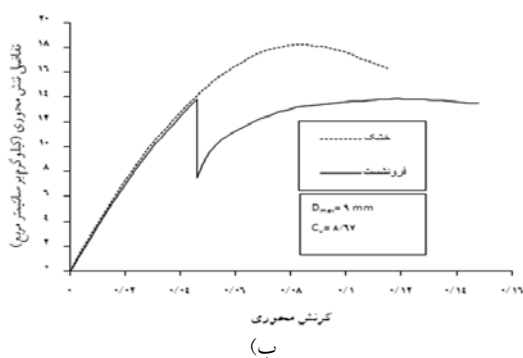
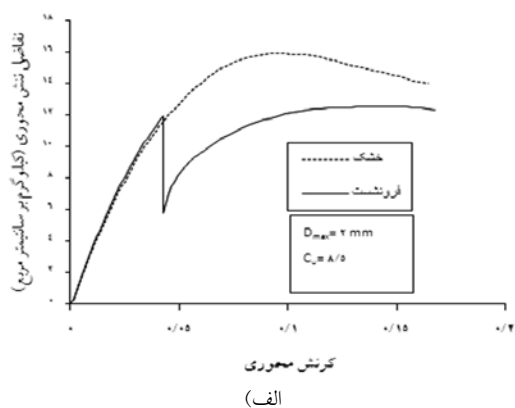
همان‌گونه که از شکل‌های ۹ و جدول ۵ مشخص است با اضافه شدن آب به خاک و ایجاد رطوبت ۳٪ در خاک از میزان افت تنش در خاک هنگام اشباع شدن به شدت کاسته می‌شود و ضریب وارفنگی تنش و درصد آزادشدگی تنش به ترتیب زیاد و کم می‌شوند. با افزایش درصد رطوبت از ۳٪ به ۷٪ روند بالا تکرار می‌شود با این تفاوت که با افزایش رطوبت، تغییر کوچکی در ضرایب بالا نسبت به رطوبت ۳٪ ایجاد می‌شود.

از هر دو آزمایش با درصد رطوبت‌های مختلف این نتیجه حاصل می‌شود که با ایجاد رطوبت در نمونه‌های خاک، اختلاف تنش در دو حالت قبل و پس از اشباع کردن در آزمایش نشست ناگهانی به شدت کم می‌شود که علت این امر را می‌توان به خاصیت روان کنندگی آب نسبت داد که در اثر ایجاد رطوبت در نمونه، عمل تراکم بهتر صورت گرفته و به عبارتی خاک متراکم‌تر می‌شود به همین دلیل در زمان اشباع کردن، مصالح نیز نشست کوچکتری از خود نشان می‌دهند.

### ۳-۴- اثر درصد رطوبت اولیه بر روی وارفنگی تنش در مصالح ماسه‌ای ساحلی

برای نشان دادن اثر رطوبت بر وارفنگی تنش مصالح ماسه‌ای ساحلی دو نمونه از این خاک با دانسیته‌ی نسبی ۷۰٪ و با رطوبت‌های ۳٪ و ۷٪ تهیه شد و در دستگاه سه محوری تحت تنش همه جانبه‌ی ۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بارگذاری شده و در سطح تنش ۷۵٪ اشباع شد و پس از آن تا مرحله گسیختگی بارگذاری دوباره روی آن‌ها صورت گرفت. در شکل‌های ۹ (الف) و (ب) نمودار تفاضل تنش محوری در برابر کرنش محوری برای آزمایش‌های نشست ناگهانی در حالت‌های خشک (رطوبت ۰٪)، رطوبت ۳٪ و رطوبت ۷٪ نشان داده شده‌اند، مقادیر  $C_{Sr}$  و  $a$  نیز در جدول ۵ آمده‌اند.





شکل ۱۰- اثر حداکثر قطر دانه بر نمودار تفاضل تنش محوری- کرنش محوری برای ماسه مخلوط

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که نمونه‌هایی که دارای دانه‌بندی درشت‌تری است هم در حالت خشک و هم در حالت اشباع مقاومت بیشتری دارند. همچنین مقادیر درصد آزادشدگی تنش برای نمونه‌های با بیشینه قطر ۶ mm کمتر از مقادیر آن برای نمونه‌های با بیشینه قطر ۲ mm است و ضریب وارفتگی تنش بر عکس است.

همچنین مشاهده می‌شود که در مصالح با ضریب یکنواختی یکسان هر چه قطر بیشینه بزرگتر باشد، ضریب وارفتگی تنش بیشتر می‌شود و درصد آزادشدگی تنش کاهش می‌یابد و در نتیجه نشست ناگهانی کمتری اتفاق می‌افتد.

## ۵- نتیجه گیری

با انجام آزمایش‌های مقاومت برشی سه محوری در شرایط خشک، اشباع و خشک-اشباع روی مصالح ماسه‌ی ساحلی و همچنین بررسی عوامل تأثیرگذار بر نشست ناگهانی مصالح نتایج زیر به دست آمد:

جدول ۵- مقادیر  $C_{sr}$  و  $a$  برای ماسه‌ی ساحلی، در رطوبت‌های ۰٪، ۳٪ و ۷٪

تنش همه‌جانبه (Kg/cm <sup>2</sup> )	درصد رطوبت (%)	$\Delta\sigma_{tc}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$C_{sr}$	$a$ (%)
۳	۰	۱۰.۲۶	۰.۶۹۸	۳۰.۱
	۳	۸.۵۹	۰.۸۸۴	۱۱.۶
	۷	۸.۷۱	۰.۸۹۶	۱۰.۳

## ۴-۴- اثر نوع دانه‌بندی روی وارفتگی تنش در مصالح ماسه‌ای

با توجه به توضیحات بخش ۲، نمونه‌هایی از ترکیب ماسه‌ی ساحلی و ماسه‌ی تمیز با بیشینه قطر ۲mm و ۶mm هر کدام با ضریب یکنواختی‌ای بالاتر از ضریب یکنواختی ماسه‌ی ساحلی ساخته شدند. نمونه‌ها ابتدا تحت آزمایش خشک در دانسیته‌ی نسبی ۷۰٪ با تنش همه‌جانبه‌ی ۳ MPa و نرخ بارگذاری ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند تا بیشینه تنشی که می‌توانند تحمل کنند، مشخص شود. پس از آن نمونه‌ها برای انجام آزمایش به همراه اشباع شدن در همان دانسیته‌ی نسبی، تنش همه‌جانبه و سرعت بارگذاری آماده شدند، پس از بارگذاری تا سطح تنش ۷۵٪، بارگذاری متوقف شد و نمونه‌ها اشباع شدند و بعد از اتمام این مرحله بارگذاری تا مرحله‌ی گسیختگی ادامه یافت. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۱۰ و جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- مقادیر  $C_{sr}$  و  $a$  برای ماسه‌ی مخلوط (ماسه‌ی ساحلی و تمیز)، اشباع شده در سطح تنش ۷۵٪ تحت تنش همه‌جانبه‌ی ۳ MPa، با دانسیته‌ی نسبی ۷۰٪

حداکثر قطر (mm)	$C_u$	$\Delta\sigma_{tc}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$C_{sr}$	$a$ (%)
۲	۸.۵	۶.۱۹	۰.۴۸۲	۵۲.۸۴
۶	۸.۶۷	۶.۳۶	۰.۵۴	۳۵.۹۹

## ۷- مراجع

1. Feitosa, J. H., "Numerical Analysis of the Mechanical Behavior of Collapsing Earth Dams During First Reservoir Filling", Doctor of philosophy thesis, University of Saskatchewan, (1996).
2. Day, R. W., "Soil Testing Manual. 1<sup>st</sup> Edn", McGrawHill, New York, ISBN 0-07-136363-7, (2001).
3. Fookes, P. G., "Tropical Residual Soils," A geological society engineering group working party revised report, The Geological Society, London, (1997).
4. Mitchell, J. K. "Fundamental Soil Behavior," Wiley, NY, (1993).
5. Rogers, C. D. F. "Types and Distribution of Collapsible Soils". Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Genesis and Properties of Collapsible Soils, Loughborough, U.K, (1995), pp: 1 – 17.
6. Denisov, N.Y., "About the Nature of High Sensitivity of Quick Clays," Osnov. Fudam. Mekh. Grunt, 5, (1963), pp: 5-8.
7. Abelev, Y. M., "The Essentials of Designing and Building on Microporous Soils," Stroitel'naya Promyshl'mast, (1984), No. 10.
8. Clevenger, W. A., "Experiences with Loess as a Foundation Material," Transactions American Society for Civil Engineers, 123, (1985), pp: 51-80.
9. Feda, J., "Collapse of Loess upon Wetting," Engineering Geology, 25, (1988), pp: 263-269.
10. Lin, Z. G. and Wang, S. J. "Collapsibility and Deformation Characteristics of Deep-Seated Loess in China," Engineering Geology, 25, (1988), pp: 271-282.
11. Lee, K. L., Seed, H. B. and Dunlop, P., "Effect of Moisture on the Strength of a Clean sand," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM6, Proc. Paper 5551, (1967), pp. 17-40.
12. Stanculescu, I., "Active Zone Settlement for Shallow Foundations on Loessial Soils," Proceedings, 5<sup>th</sup> Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Auckland, New Zealand, (1967).
13. Zur, A., "The Study of the Collapse Phenomenon in Partially and Fully Saturated Loess," Thesis for the degree of Doctor of Science in Technology, Israel Institute of Technology, Haifa, August, (1969).
14. Nobari, E.S. and Duncan, J.M., "Effect of Reservoir Filling on Stresses and Movements in Earth and Rockfill dams," Contract report S-72-2 U.S. Army Engineers Waterways Experimental Station, Vicksburg Mississippi, (1972).
15. Brink, A. B. A., "Engineering geology of South Africa," Volume 4, Silverton: Building Publications, (1985).

- با انجام آزمایش‌های سه محوری خشک-اشباع مشخص شد که با افزایش تنش همه جانبه، میزان افت تنش برشی و ضریب وارفتگی تنش مصالح افزایش یافتند و درصد آزادشدگی تنش کاهش پیدا کرده است.
- با انجام آزمایش‌هایی در سه دانسیته‌ی نسبی ۵۰٪، ۷۰٪ و ۸۵٪ مشاهده شد که با افزایش دانسیته‌ی نسبی، افت تنش برشی و درصد آزادشدگی تنش کاهش یافتند ولی ضریب وارفتگی تنش افزایش داشت. این امر بیانگر تأثیر مثبت افزایش دانسیته در کنترل این پدیده است.
- برای مطالعه‌ی درصد رطوبت بر نشست ناگهانی مصالح سه آزمایش در درصد رطوبت‌های ۰٪، ۳٪ و ۷٪ بر روی مصالح ماسه‌ی ساحلی صورت گرفت. مشاهده شد که با اضافه کردن مقداری رطوبت (۳٪) به مصالح، مقادیر افت تنش برشی و درصد آزادشدگی تنش به شدت کاهش پیدا کردند و ضریب وارفتگی تنش به شدت افزایش داشت، ولی با افزایش درصد رطوبت از ۳٪ به ۷٪ مقادیر گفته شده تغییر کوچکی داشتند. این نکته تأییدی بر آبریزی در مصالح دانه‌ای هنگام تراکم آنها می‌باشد که بیشتر در هنگام ساخت و سازهای ژئوتکنیکی باید رعایت شود.
- اثر اندازه‌ی نوع دانه‌بندی نیز بر نشست ناگهانی مصالح بررسی شد. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته مشخص شد که در صورت ثابت بودن ضریب یکنواختی، با افزایش قطر بیشینه دانه‌ها، ضریب وارفتگی تنش افزایش و درصد آزادشدگی تنش کاهش می‌یابد و این امر به معنی نشست ناگهانی کمتر است.

## ۶- پیشنهاد

- باتوجه به استفاده از دستگاه آزمایش سه‌محوری رایج در پژوهش حاضر، تغییرات حجمی در نمونه‌های خشک اندازه‌گیری نشده است. توصیه می‌شود در پژوهش، برای اندازه‌گیری میزان تغییرات حجمی از رینگ‌های شعاعی مخصوص استفاده شد و یا آنکه از دستگاه آزمایش سه‌محوری غیر اشباع استفاده شود.

16. Naderian, A.R. and Williams D.J., "Bearing Capacity of Open-cut Coal-mine Backfill Materials," Technical note published in Trans. Instn Min. Metall, (Set. A: Min. industry), 106, January-April (1997).

17. Sudhakar, M. Rao. and Revanasiddappa, K., "Influence of Cyclic Wetting Drying on Collapse Behaviour of Compacted Residual Soil," Geotechnical and Geological Engineering 24: 725-734, DOI 10.1007/s10760-004-5077-4, Springer 2006.

18. Duncan, J. M. and Chang, C-Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM5, Proc. Paper 7513, September, 1970, pp. 1629-1653.

۱۹- عشتاقی، وحید، "بررسی نشست پذیری مصالح شنی هنگام اشباع شدن با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه زنجان، ۱۳۸۹.