

بررسی تأثیر اشباع شدن خاک دانه‌یی بر مقاومت و نشست ناگهانی آن در آزمایش برش مستقیم

رضا مهین‌روستا* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

وحید عشاقی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

مهندسی عمران: شریف
دوره‌ی ۲-۱۳۹۰، شماره‌ی ۱، ص. ۱۰۳-۱۱۳

هنگامی که مصالح دانه‌یی اشباع می‌شوند، به دلیل تغییر در حوزه‌ی تنش، جابجایی ذرات خاک اتفاق می‌افتد و در نهایت پدیده‌ی نشست ناگهانی به وجود می‌آید. در این نوشتار، تأثیر اشباع شدن مصالح شنی بر روی پارامترهای مقاومت برشی و نیز عوامل مؤثر بر میزان نشست ناگهانی این مصالح با دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا آزمایش‌های مشخص‌کننده‌ی خصوصیات فیزیکی و آزمایش‌های وزن مخصوص کمینه و بیشینه بر روی مصالح شنی انجام شده است. نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی بیانگر کاهش پارامترهای مقاومتی در وضعیت اشباع نسبت به خشک است. نشست ناگهانی در مصالح نیز با آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌ی خشک و سپس اشباع انجام و اثر عوامل مختلف بر آن بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش رطوبت و چگالی باعث کاهش نشست ناگهانی در مصالح می‌شوند، در حالی که افزایش سربار و سطح تنش برشی منجر به افزایش مقدار نشست ناگهانی می‌شوند.

واژگان کلیدی: نشست ناگهانی، مقاومت برشی، شن شسته، اشباع شدن، آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس.

reza.mahinroosta@gmail.com
oshtaghivahid@yahoo.com

۱. مقدمه

فشار محدودکننده وارده بر توده‌ی خاک، لغزش آسان‌تر ذرات به علت اثر روان‌کنندگی آب، شکستگی ذرات خاک به علت اندرکنش آب و ترک‌های ریزسطحی دانه‌ها،^[۵] عوامل مؤثر بر روی نشست ناگهانی مصالح شنی را می‌توان میزان تراکم و چگالی نسبی مصالح، سطح تنش اعمال شده بر روی نمونه، مسیر تنش، شکل ذرات و دانه‌بندی مصالح، نسبت رطوبت هنگام تراکم، و میزان تنش نام برد.^[۵]

از دهه‌ی ۱۹۶۰ با افزایش استفاده از مصالح شنی و سنگریز در ساخت سدها، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی به منظور درک بهتر از رفتار این مصالح هنگام اشباع شدن توسعه پیدا کرد که این آزمایش‌ها عمدتاً شامل آزمایش‌های تحکیم و سه محوری بود. از جمله‌ی این آزمایش‌ها می‌توان به آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح دانه‌یی حاصل از خاکریزهای ماسه‌سنگی و ماری اشاره کرد که در آن اثر سه عامل مقاومت فشاری دانه‌ها، نسبت منافذ، و درصد رطوبت مصالح در میزان نشست هنگام اشباع شدن بررسی و نتیجه گرفته شده است که افزایش مقاومت فشاری، افزایش درصد رطوبت مصالح، و کاهش نسبت منافذ منجر به کاهش میزان نشست هنگام اشباع شدن می‌شود.^[۶]

در سال ۱۹۷۲، آزمایش‌های سه محوری بر روی مصالح ماسه‌یی در شرایط نمونه‌ی خشک، خشک-اشباع و اشباع انجام و مشخص شد که بعد از مرطوب شدن، منحنی تنش محوری-کرنش محوری (برای آزمایش تک محوری) و تنش متوسط

مهم‌ترین عامل تغییر شکل مصالح دانه‌یی در پوسته‌ی سدهای خاکی و سنگریز هنگام آبگیری اولیه، شکست مصالح دانه‌یی در نقاط تماس است که این شکست تحت اثر افزایش بار در حین ساخت یا اشباع شدن مصالح در اثر آبگیری مخزن سد است.^[۳-۱] هرچند که آب‌دهی مصالح هنگام اجرا منجر به کاهش این پدیده می‌شود، ولی هیچ‌گاه آن را از بین نمی‌برد. این وضعیت باعث رخ دادن پدیده‌ی نشست ناگهانی می‌شود و ممکن است تغییر شکل‌های خیلی بزرگی را به دنبال داشته باشد، اما نرخ تغییر شکل مصالح پس از آبگیری اولیه کاهش چشمگیری دارد.^[۲]

این پدیده حتی در مصالحی که تراکم بالایی هم دارند، مشاهده شده است. در پژوهشی نشان داده شده است که حتی در ساخت‌گاه‌هایی که نتایج آزمایش‌های نفوذ استاندارد و نفوذ مخروطی بالاست، در آزمایش بارگذاری صفحه هنگام اشباع شدن، تغییر شکل‌های زیادی در پی مشاهده شده است؛ چرا که افزایش کمی در رطوبت مصالح منجر به کاهش شدید سختی و در نتیجه افزایش نشست پذیری مصالح می‌شود.^[۱]

سه دلیل باعث روی دادن پدیده‌ی نشست ناگهانی می‌شود: ۱. کاهش ناگهانی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۱۱/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۰/۸/۲۱، پذیرش ۱۳۹۰/۱۱/۳.

قائم، چگالی نسبی، درصد ماسه، میزان تنش برشی اولیه، و درصد رطوبت اولیه‌ی خاک بررسی شده است.

۲. دستگاه، مصالح و روش انجام آزمایش

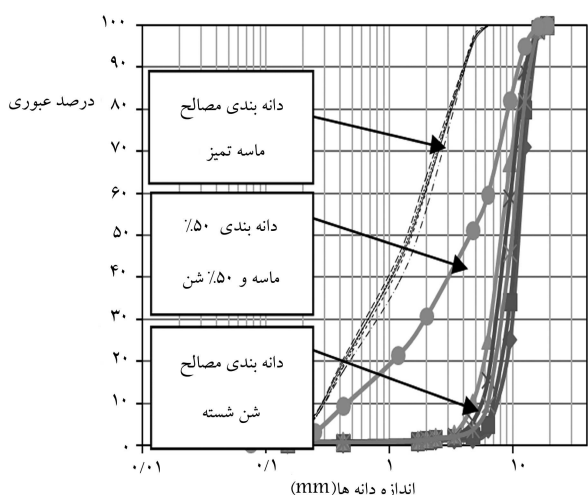
۱.۲. دستگاه

برای بررسی تأثیر اشباع شدن مصالح شنی بر روی پارامترهای مقاومت برشی و تحلیل پدیده‌ی نشست ناگهانی از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس استفاده شده است. در این آزمایش، ابتدا خاک تحت تنش قائم معینی قرار می‌گیرد و سپس تنش برشی با سرعت تنظیم شده به خاک وارد می‌شود تا نمونه گسیخته شود (آزمایش برش با کنترل کرنش). دستگاه برش شامل دو جعبه‌ی ثابت و متحرک است، که جعبه‌ی بالایی دستگاه، ثابت و جعبه‌ی پایینی با سیستم دیجیتالی که به منظور تنظیم سرعت دلخواه برش طراحی شده است، با حرکت افقی خود باعث برش خاک می‌شود.

۲.۲. مصالح

اغلب آزمایش‌های به‌کاررفته در این کار پژوهشی بر روی مصالح شن شسته‌ی نخودی است. نمونه‌ها از معدن شن و ماسه رودخانه‌یی از پادگانه‌های آبرفتی در فاصله‌ی ۸ کیلومتری غرب دانشگاه زنجان تهیه شده‌اند. این مصالح بدانه‌بندی شده‌اند و با توجه به دانه‌بندی یکنواخت آن‌ها امکان بروز پدیده‌ی نشست ناگهانی در آن‌ها زیاد است. از آنجایی که اثر ریزدانه‌گی، یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر نشست ناگهانی مصالح شنی است؛ تأثیر خاک ماسه‌یی تمیز بر نشست ناگهانی مصالح شن شسته نیز بررسی شده است.

آزمایش دانه‌بندی بر روی مصالح شنی و ماسه‌یی هر یک به تعداد ۵ بار انجام شد. با توجه به شکل ۱، از آنجایی که بین منحنی‌های دانه‌بندی هر یک از این ۵ نمونه‌ی مصالح، اختلاف چندانی وجود نداشت (۵ منحنی دانه‌بندی مربوط به هر یک از نمونه‌های شنی و ماسه‌یی تقریباً روی هم افتاده‌اند و پوش منحنی دانه‌بندی باریک است)، بنابراین در آزمایش برش مستقیم برای تهیه‌ی نمونه‌ی مصالح شنی و ماسه‌یی، نیازی به استفاده از منحنی دانه‌بندی میانگین نبود. برای بررسی نوع دانه‌بندی، آزمایش دانه‌بندی بر روی



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی و میانگین دانه‌بندی برای ۵ نمونه از مصالح شن شسته، مصالح ماسه‌یی تمیز و مصالح مخلوط ۵۰٪ شن و ۵۰٪ ماسه‌یی تمیز.

کرنش حجمی (مربوط به آزمایش سه محوری) مصالحی که در خلال بارگذاری اشباع می‌شوند با منحنی مربوط به خاکی که از ابتدا اشباع شده بود، مطابقت دارد.^[۷] همچنین نتیجه‌ی این آزمایش و آزمایش ادمتری پژوهشگران دیگر بر روی مصالح دانه‌یی بیان‌کننده‌ی این مطلب بود که ترشدگی نمونه‌های خشک در مدت بارگذاری، ابتدا باعث نشست و افت سطح تنش ناگهانی می‌شود و سپس با ادامه‌ی بارگذاری در وضعیت اشباع، نمونه‌ها فقط بخشی از سختی و مقاومت خود را به دست می‌آورند.^[۷-۱۲]

در سال ۲۰۰۳، آزمایش تک‌محوری با کنترل رطوبت به منظور بررسی عملکرد آب روی تراکم‌پذیری و نشست‌پذیری مصالح شنی که پیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌های آن ۴۰ میلی‌متر بود، انجام شد؛ و این نتایج به دست آمد که جهت روی دادن پدیده‌ی نشست ناگهانی به علت اشباع شدن، کمترین بار را بر روی نمونه باید قرار داد.^[۸] همچنین در مصالحی که به شدت پیش‌تحکیم‌یافته بودند، نشست ناگهانی مشاهده نشد. همچنین این آزمایش بر روی دو نمونه در یک تنش قائم خاص (یکی اشباع و دیگری نیمه اشباع) انجام و مشاهده شد که کرنش نهایی در هر دو نمونه یکسان است. به عبارتی برای رخ دادن پدیده‌ی نشست ناگهانی لازم نیست تا تمام حفره‌های بین ذرات از سیال اشباع شود، به همین دلیل در عملیات اجرایی پوسته‌ی سدهای خاکی مقداری آب (حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ لیتر در مترمکعب حجم مصالح) اضافه می‌شود تا تراکم مناسب در آن‌ها صورت گیرد و جلوی نشست‌های هنگام آبیگری نیز گرفته شود.

تنش هم‌جانبه نیز در میزان نشست هنگام اشباع شدن مصالح نقش دارد. در آزمایش‌های انجام شده در پژوهشی مشاهده شد که در دو سری نمونه‌ی خشک که هنگام آزمایش اشباع شدند، نمونه‌هایی که تحت تنش عمودی بالاتری اشباع می‌شدند، نشست بالاتری داشتند؛ در واقع در تنش‌های عمودی بالاتر، میزان نشست مصالح هنگام اشباع شدن بیشتر می‌شود.^[۱۳] در پژوهشی دیگر نیز این پدیده در آزمایش ادمتری بر روی مصالح دانه‌یی از نوع ماسه‌ی سنگ و رس سنگ نیز مشاهده شده است.^[۱۴]

یکی از آزمایش‌های سه‌محوری بزرگ‌مقیاس انجام شده در دانشگاه کالسروه‌ی آلمان، تخمین اثرات اشباع شدن مصالح پوسته‌ی سد گتوند علیا (احداث شده بر روی رودخانه‌ی کارون) بود که این مصالح پس از تحکیم و اعمال تنش در کرنش محوری خاصی اشباع می‌شدند. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های مصالح قرصه با قطر پیشینه‌ی دانه‌ی معادل ۱۵ سانتی‌متر انجام شدند و نمونه‌های آزمایش به صورت استوانه‌یی با ارتفاع ۸۰ و قطر ۸۰ سانتی‌متر تهیه شدند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که در اثر اشباع شدن نمونه‌ها، درصد قابل ملاحظه‌یی از تنش انحرافی وارده بر نمونه‌ی خشک آزاد می‌شود. در واقع به دلیل نفوذ آب به داخل نمونه و خاصیت روان‌کنندگی آن، دانه‌های خاک بر روی هم می‌لغزند و بازاریابی جدید دانه‌ها منجر به کاهش تنش اعمالی بر نمونه می‌شود. درصد آزادشدگی تنش متناسب با افزایش سطح تنش هم‌جانبه کاهش می‌یابد.^[۱۵]

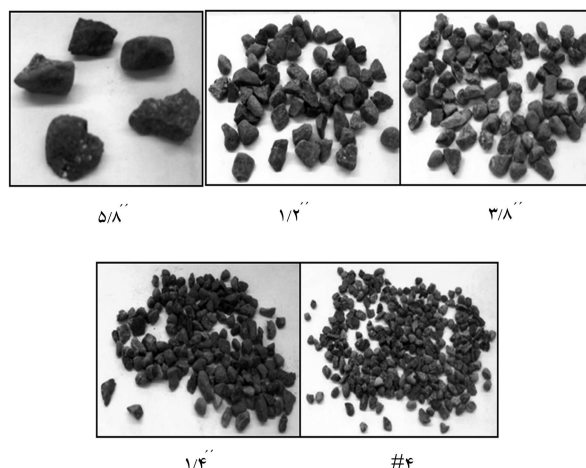
هدف اصلی این کار پژوهشی بررسی پدیده‌ی نشست ناگهانی خاک‌های شنی و ماسه‌یی و عوامل مؤثر بر آن است. به همین منظور در ابتدای کار، آزمایش‌های مشخص‌کننده‌ی خصوصیات فیزیکی مصالح انجام شد و سپس برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی مصالح در وضعیت خشک، اشباع، و خشک - اشباع، آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس ۳۰ × ۳۰ سانتی‌متر بر روی مصالح انجام شد تا تأثیر اشباع کردن نمونه‌های شنی خشک نیز مشخص شود. برای دستیابی به هدف موردنظر، قسمت اصلی کار به بررسی آزمایش‌های نشست ناگهانی بر روی مصالح شنی اختصاص یافته است. برای این منظور تأثیر عوامل مؤثر بر نشست ناگهانی، نظیر میزان تنش

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک‌های مورد استفاده از نتایج منحنی دانه‌بندی آن‌ها.

نوع مصالح	بیشینه قطر دانه (mm)	عموری از الک ۲۰۰٪ (%)	C_u	C_c	توصیف خاک
شن شسته	۱۶	۰٫۲	۱٫۷۴	۰٫۹۲	GP
ماسه‌ی تمیز	۴٫۷۵	۰٫۸	۶٫۴۴	۰٫۸۴	SP
مخلوط شن و ماسه‌ی تمیز	۱۶	۰٫۳	۱۴٫۲۲	۱٫۳۲	SW

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح شن شسته، ماسه‌ی تمیز و ترکیب شن و ماسه‌ی تمیز.

نوع مصالح	$(\gamma_d)_{max}$ (gr/cm ³)	$(\gamma_d)_{min}$ (gr/cm ³)	Gs	جذب آب (%)	سایش لسن آنجلس (%)
شن شسته	۱٫۷۲	۱٫۴۴	۲٫۷۱	۲٫۱	۲۰
ماسه‌ی تمیز	۱٫۸۱	۱٫۶۷	۲٫۶۷	۳	—
مخلوط شن و ماسه‌ی تمیز	۱٫۹۸	۱٫۷۱	۲٫۶۸	۲٫۸	۲۰



شکل ۲. اندازه‌های مختلف از شکل دانه‌های ذرات شن شسته و بزرگ‌تر از الک نمره‌ی ۴.

۳. آزمایش برش بر روی نمونه‌های شن در شرایط خشک و سپس اشباع انجام شد. بدین منظور نمونه‌هایی از مصالح شن شسته با دانسیته‌ی نسبی ۸۵٪ در جعبه‌ی آزمایش برش مستقیم تهیه شد تا این آزمایش با اعمال سه تنش قائم اولیه ۱، ۳ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (یا ۹۸/۱، ۲۹۴/۳ و ۴۹۰/۵ کیلوپاسکال) آغاز شود. پس از قرارگیری وزنه‌های مربوط به اعمال تنش عمودی، با انتخاب سرعت برشی برابر با ۱ میلی‌متر بر دقیقه، به نمونه اجازه‌ی برش داده شد و نیروی برشی تا مرحله‌ی بعد از گسیختگی نیز ادامه یافت. این روش انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی که در شرایط خشک و اشباع برش خورده‌اند، یکسان است و فقط در آزمایش در شرایط اشباع این تفاوت وجود دارد که نمونه پیش از برش کاملاً اشباع شد.

در روش سوم آزمایش‌ها، نمونه در ابتدا خشک بود و پس از اعمال بار قائم، بار برشی به صورت کنترل کرنش تا سطح مشخصی از تغییرمکان برشی (و یا سطح مشخصی از تنش برشی) اعمال شد. پس از این مرحله دستگاه متوقف و نمونه کاملاً اشباع شد. در این حین نمونه شروع به نشست کرد و تا ثابت شدن قرائت نشست، نمونه در همین وضعیت قرار گرفت. پس از آن مجدداً نمونه تحت برش قرار گرفت و مانند آزمایش‌های معمولی برش مستقیم به پایان رسید. جهت اختصار از این پس به این نوع آزمایش، آزمایش مقاومت برشی همراه با نشست ناگهانی و یا آزمایش نشست ناگهانی گفته می‌شود. در انتها عوامل مؤثر بر مقدار تغییر شکل‌پذیری مصالح شنی تحت اثر آگیری نظیر تنش قائم اولیه، دانسیته‌ی نسبی، تنش برشی اولیه، اثر ریزدانه‌ی و میزان رطوبت اولیه بررسی شد.

۳. بررسی آزمایش‌های مقاومت برشی مصالح شنی

۳.۱. آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های خشک و اشباع
شکل‌های ۳ و ۴، منحنی‌های تنش برشی برحسب تغییرمکان افقی (δ_h) و تغییرمکان عمودی (δ_v) برحسب تغییرمکان افقی مربوط به شرایطی که نمونه با چگالی نسبی ۸۵٪ و تحت تنش قائم اولیه ۱، ۳ و ۵ (Kg/cm^2) در حالت خشک و اشباع با دستگاه برش مستقیم برش خورده است، را نشان می‌دهد.

از منحنی‌های تنش برشی برحسب تغییرمکان افقی مصالح شنی (شکل‌های ۳الف و ۴الف) در شرایط خشک و اشباع می‌توان فهمید که مصالح پس از رسیدن به بیشینه‌ی تنش برشی که این مرحله با رفتار سخت‌شوندگی خاک همراه است، شاهد کاهش تنش برشی و در نهایت ثابت شدن آن هستیم که در این مرحله نیز خاک رفتاری نرم‌شونده را از خود نشان می‌دهد. البته این شکل از منحنی تنش برشی برحسب تغییرمکان افقی مربوط به مصالح متراکم است. همچنین در این منحنی‌ها

ترکیب مصالح شنی و ماسه‌ی به اندازه‌ی مساوی از ۵۰٪ ماسه و ۵۰٪ شن انجام شده است، که منحنی دانه‌بندی آن نیز در شکل ۱ نمایش داده شده است. در جدول ۱، خواص اصلی دانه‌بندی مصالح براساس سیستم طبقه‌بندی متحد آمده است. همچنین شکل ۲، اندازه‌های مختلفی از شکل ذرات دانه‌های شن شسته را نشان می‌دهد. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی مصالح شنی، ماسه‌ی، و مخلوط شن و ماسه، آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص کمینه به روش استاندارد ASTM D ۴۲۵۴-۹۱، وزن مخصوص بیشینه (برای مصالح شنی از روش آزمایش تراکم براساس استاندارد ASTM D ۱۵۵۷-۷۸، برای مصالح مخلوط شن و ماسه و نیز خاک ماسه‌ی به روش میز لرزه ASTM D ۴۲۵۳-۹۳)، چگالی دانه‌ها (Gs) براساس استاندارد ASTM C ۸۵۴-۸۷، درصد جذب آب براساس استاندارد ASTM C ۱۲۷-۱۲۸ و درصد سایش لسن آنجلس براساس استاندارد ASTM C ۱۳۱-۹۶ انجام شد که در جدول ۲ نتایج آن آمده است.

۳.۲. روش انجام آزمایش

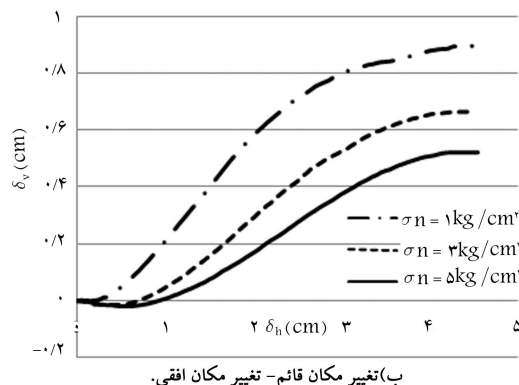
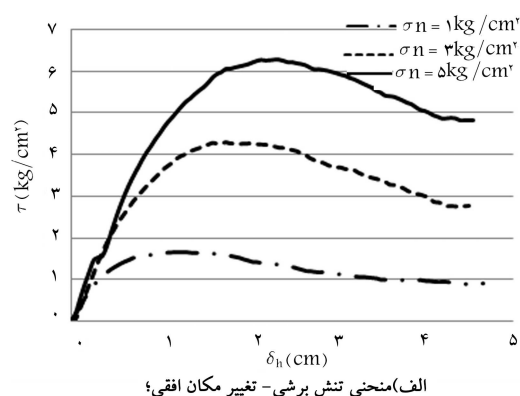
با توجه به مقادیر وزن مخصوص کمینه و بیشینه و چگالی نسبی مورد نظر، وزن مصالحی که باید در داخل جعبه‌ی برش مستقیم قرار گیرند و برای رسیدن به آن چگالی مهیا شوند، به دست آمد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، جهت بررسی تأثیر اشباع شدن مصالح شنی بر روی پارامترهای مقاومتی آن، آزمایش‌های برش مستقیم (مطابق با استاندارد ASTM D ۳۰۸۰) در سه حالت: ۱. آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی نمونه‌های خشک، ۲. آزمایش برش بر روی نمونه‌های شن اشباع،

دیده می‌شود، نمونه‌هایی که تحت تنش قائم اولیه کوچک‌تر ($\sigma_n = 1 \text{ Kg/cm}^2$) قرار گرفته‌اند؛ پس از رسیدن به بیشینه‌ی تنش برشی، در تغییر مکان افقی کوچک‌تری به مقدار تقریباً ثابتی از تنش برشی می‌رسند. در منحنی تغییر مکان قائم بر حسب تغییر مکان افقی در وضعیت خشک و اشباع (شکل‌های ۳ و ۴ ب) نیز مشاهده می‌شود که مصالح پس از مقدار کمی نشست قائم، رفتاری اتساعی را از خود بروز می‌دهند.

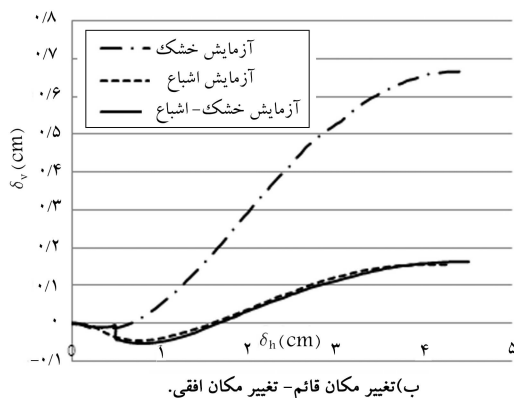
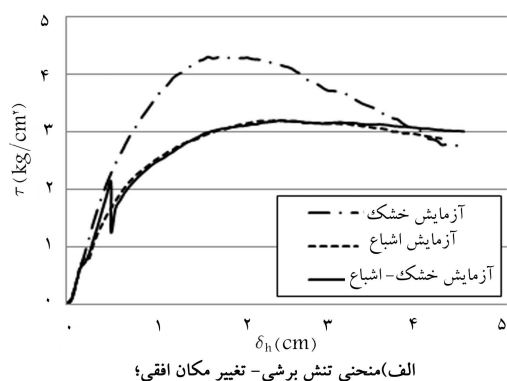
۲.۳. آزمایش‌های برش مستقیم همراه با نشست ناگهانی

این آزمایش با میزان تراکم مشابهی که در آزمایش‌های برش خشک و اشباع به کار رفته بود، برای سه تنش قائم اولیه ۱، ۳ و ۵ (Kg/cm^2) تکرار شد. مثلاً شکل ۵، برای تنش قائم اولیه ۳ Kg/cm^2 ، منحنی‌های تنش (شکل ۵الف) و کرنش (شکل ۵ب) در سه حالت آزمایش برش خشک، اشباع، و نشست ناگهانی را نمایش می‌دهد. در این آزمایش، اشباع‌سازی نمونه‌ی شنی در جابجایی افقی ۵ میلی‌متر صورت گرفته است.

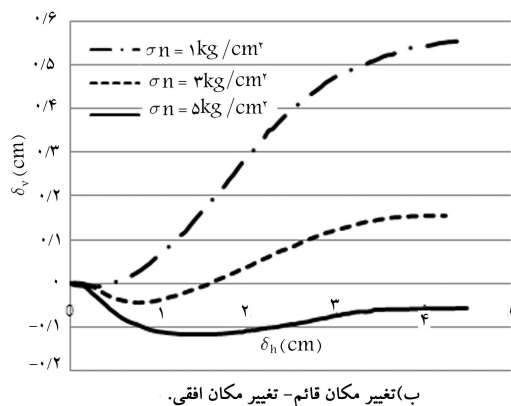
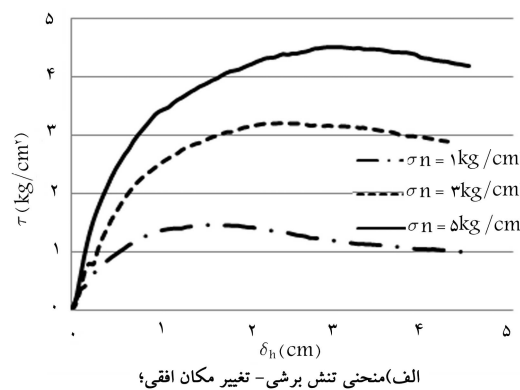
مقایسه‌ی بین منحنی‌های خشک، اشباع، و نشست ناگهانی مصالح شنی نشان می‌دهد که در قسمت اول منحنی نشست ناگهانی رفتار خاک (مربوط به برش در شرایط خشک) مشابه حالت خشک مصالح است. بعد از توقف برش و آبیگری نمونه‌ی شنی، افت شدیدی در تنش برشی اتفاق افتاده و نشست ناگهانی به وجود آمده است و پس از آن با اعمال نیروی برشی مجدد بر روی نمونه، رفتار منحنی‌های مقاومت برشی با شرایطی که نمونه از ابتدا در شرایط اشباع برش خورده بود، یکسان شده است.



شکل ۳. رفتار مصالح شن شسته در شرایط خشک تحت تنش‌های قائم ۱، ۳ و ۵ (Kg/cm^2).



شکل ۵. رفتار مصالح شن شسته در شرایط خشک، اشباع، و نشست ناگهانی تحت تنش قائم ۳ (Kg/cm^2).

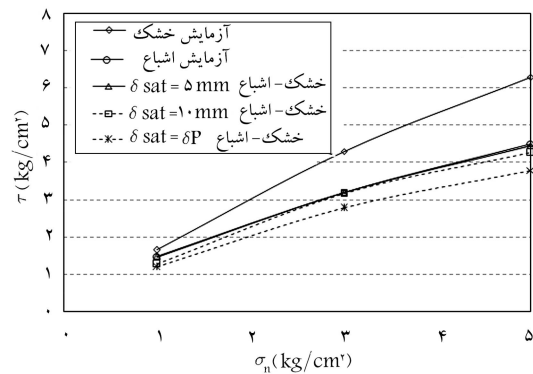


شکل ۴. رفتار مصالح شن شسته در شرایط اشباع تحت تنش‌های قائم ۱، ۳ و ۵ (Kg/cm^2).

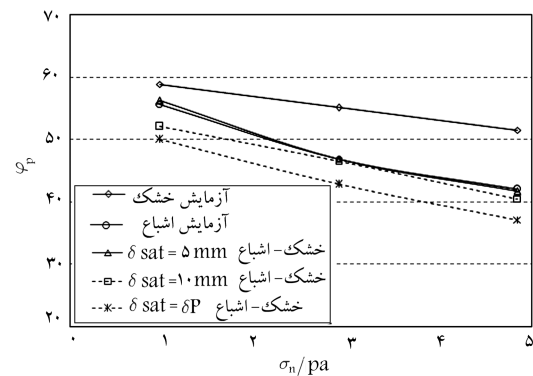
۳.۳. تحلیل نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی

۱.۳.۳. پوش گسیختگی، زاویه‌ی اصطکاک مصالح شنی در شرایط خشک، اشباع، و نشست ناگهانی

در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب منحنی تغییرات تنش برشی بیشینه برحسب تنش قائم و زاویه‌ی اصطکاک بیشینه برحسب نسبت تنش قائم بر فشار اتمسفر (P_a) برای مصالح شن شسته در حالت خشک، اشباع، و نشست ناگهانی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای مقایسه‌ی بهتر نتایج، آزمایش نشست ناگهانی در سه حالت اشباع‌سازی در تغییرمکان‌های افقی ۵، ۱۰ میلی‌متر و متناظر با بیشینه‌ی تنش برشی خشک مصالح انجام شده است. در این شکل‌ها، δp و δsat به ترتیب مقادیر تغییرمکان افقی در هنگام اشباع‌کردن مصالح و تغییرمکان افقی متناظر با بیشینه‌ی مقاومت برشی خشک نمونه است.



شکل ۶. پوش گسیختگی تنش برشی برحسب تنش قائم برای مصالح شن شسته در شرایط خشک، اشباع، و نشست ناگهانی.



شکل ۷. منحنی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه برحسب تنش قائم برای مصالح شن شسته در شرایط خشک، اشباع، و نشست ناگهانی.

باتوجه به شکل ۶، پوش گسیختگی مصالح شنی تقریباً غیرخطی است و این غیرخطی بودن در سطح تنش پایین تر خود را بیشتر نشان می‌دهد. درحقیقت دلیل غیرخطی بودن پوش گسیختگی مصالح شنی و سنگریز کاهش نرخ افزایش حجم و اتساع مصالح (به علت شکسته شدن ذرات)، با بالا رفتن سطح تنش است. بنابراین معیار خطی موهر-کولمب ($\tau_p = c + \sigma_n \tan \varphi$) برای تعریف کردن رفتار دقیق این مصالح مناسب نیست. مطابق شکل ۶ و مطالعه‌های پژوهشگران دیگر، رابطه‌ی ۱ برای پوش گسیختگی مصالح شنی پیشنهاد می‌شود: [۱۶]

$$\tau_p = A \sigma_n^b \quad (1)$$

که در این رابطه، A و b وابسته به نوع مصالح از منحنی پوش گسیختگی تعیین می‌شوند. در جدول ۳، مقادیر A و b برای مصالح شنی مورد استفاده در سه حالت خشک، اشباع، و نشست ناگهانی ارائه شده‌اند. نکته‌ی قابل ذکر در مورد شکل ۶ این است که نمونه‌های شنی در حالت اشباع نسبت به وضعیت خشک تحت تنش برشی پایین تری به گسیختگی می‌رسند و با بالا رفتن تنش عمودی اولیه، اختلاف میان پوش گسیختگی مصالح در حالت‌های خشک و اشباع بیشتر شده است. همچنین ملاحظه می‌شود که اختلاف چندانی میان پوش گسیختگی مصالح در آزمایش‌های اشباع و نشست ناگهانی وجود ندارد. البته در آزمایش نشست ناگهانی، با آنگیری مصالح در جابجایی افقی بیشتر یا سطح تنش برشی بالاتر، اختلاف پوش گسیختگی میان این آزمایش و آزمایش اشباع کمی بیشتر شده است، و به طور کلی مقدار بیشینه‌ی تنش برشی در آزمایش نشست ناگهانی تا حدود بسیار کمی پایین تر از آزمایش اشباع است. زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی مصالح شنی (φ_p) نیز از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$\varphi_p = \tan^{-1} \left[\frac{\tau_p}{\sigma_n} \right] \quad (2)$$

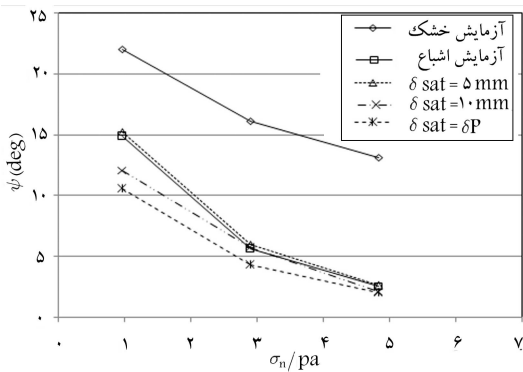
در شکل ۷، دیده می‌شود که زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی مصالح شن شسته برای هر سه حالت خشک، اشباع، و نشست ناگهانی رابطه‌ی غیرخطی با تنش قائم دارد و با افزایش تنش عمودی علاوه بر کاهش زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی مصالح شنی، اختلاف میان زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی مصالح خشک با اشباع بیشتر می‌شود. با توجه به شکل ۷، زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی مصالح اشباع کمتر از مصالح خشک به دست آمده است.

چنانچه پوش گسیختگی مصالح شنی به صورت خطی رسم شود، با توجه به رابطه‌ی خطی موهر-کولمب، شیب آن خط، مقدار تانژانت زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح (φ) را بیان می‌کند که در جدول ۳ این مقادیر برای آزمایش‌های خشک، اشباع، و نشست ناگهانی ثبت شده است.

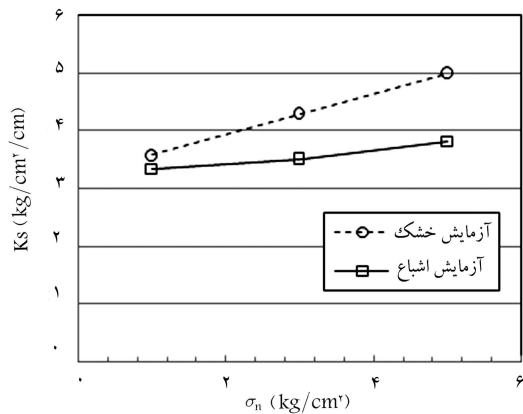
مقادیر به دست آمده در جدول ۳ نشان می‌دهد که زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح شنی در وضعیت خشک بیشتر از حالت اشباع است. این مسئله به این

جدول ۳. پارامترهای رابطه‌های ۳ و ۴ و مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی (از پوش خطی موهر-کولمب) مصالح شن شسته تحت شرایط خشک، اشباع، و فرونشست.

نوع آزمایش	A	b	D	φ_0 (°) از رابطه ۳	φ_0 (°) از رابطه ۴	$\Delta \varphi$ (°)	φ (°)
خشک	۳٫۵۴	۰٫۸۴	-۰٫۰۷	۵۹٫۰	۵۹٫۰	۱۰٫۱	۴۹٫۲
اشباع	۵٫۸۱	۰٫۷	-۰٫۱۸	۵۶٫۲	۵۵٫۵	۱۹٫۴	۳۷٫۲
نشست ناگهانی ($\delta sat = 5 \text{ mm}$)	۶٫۵۲	۰٫۶۸	-۰٫۱۷	۵۵٫۶	۵۶٫۱	۲۰٫۶	۳۶٫۵
نشست ناگهانی ($\delta sat = 10 \text{ mm}$)	۳٫۹۴	۰٫۷۶	-۰٫۱۴	۵۲٫۴	۵۲٫۳	۱۵٫۸	۳۶٫۷
نشست ناگهانی ($\delta sat = \delta p$)	۴٫۲۴	۰٫۷۳	-۰٫۱۷	۵۰٫۲	۵۰٫۱	۱۷٫۹	۳۲٫۹



شکل ۸. تغییرات زاویه‌ی اتساع با نسبت تنش قائم اولیه مصالح شن شسته در وضعیت‌های برش خشک، اشباع، و نشست ناگهانی.



شکل ۹. تغییرات سختی برشی با نسبت تنش قائم اولیه مصالح شن شسته در وضعیت‌های برش خشک و اشباع.

ناگهانی انجام شد، کم‌تر از نمونه‌های از ابتدا اشباع بود. همچنین مقدار سختی برشی با افزایش تنش قائم به صورت خطی به این دلیل بیشتر شده است که با بالا رفتن تنش قائم اولیه، مصالح سخت‌تر می‌شوند. با مقایسه‌ی نمودارهای سختی برشی و زاویه‌ی اتساع مربوط به شرایط برش خشک و اشباع که نسبت به تنش قائم اولیه ترسیم شده‌اند، این نتیجه به دست می‌آید که مصالح خشک مقدار سختی برشی و زاویه‌ی اتساع بیشتری نسبت به مصالح اشباع از خود نشان می‌دهند.

۴. تأثیر عوامل مؤثر بر نشست ناگهانی مصالح شنی

شکل ۱۰، مسیر تنش تقریبی را برای مصالح دانه‌ی در آزمایش نشست ناگهانی نشان می‌دهد که پس از اشباع نمونه، مقدار تنش برشی موجود در آن که برابر T_t است، به تنش برشی کاهش یافته یعنی T_c می‌رسد. برای بررسی پدیده‌ی نشست ناگهانی، پارامترهای نشست ناگهانی به این ترتیب تعریف می‌شوند:

— میزان افت تنش برشی ΔT_c : مقدار اختلاف یا کاهش شدید در تنش برشی مصالح خشک به سبب ورود آب به مجموعه‌ی دانه‌ها، مقدار افت تنش برشی نام دارد (رابطه‌ی ۷).

$$\Delta T_c = T_t - T_c \quad (7)$$

که در این رابطه، T_c و T_t تنش برشی مصالح در شرایط خشک (دقیقاً قبل از لحظه‌ی اشباع‌سازی نمونه) و تنش برشی پس از خیس شدن مصالح است. این

دلیل است که در نمونه‌های اشباع به دلیل اثر روان‌کنندگی آب در نقاط تماس بین دانه، اصطکاک بین ذرات خاک در زمان برش و تماس آن‌ها کاهش می‌یابد و دانه‌ها راحت‌تر بر روی هم حرکت می‌کنند. همچنین در آزمایش نشست ناگهانی با اشباع کردن مصالح در تغییرمکان افقی یا تنش برشی بالاتر، اختلاف ناچیزی که بین زاویه‌ی اصطکاک داخلی این آزمایش و آزمایش اشباع بود، بیشتر شده است و شاهد کاهش بیشتر زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح هستیم. درحقیقت در آزمایش نشست ناگهانی با بالا رفتن تغییرمکان برشی به دلیل ترک‌ها و شکستگی بیشتر دانه‌های خشک در زمان اشباع کردن، مقادیر آب بیشتری در بین دانه‌ها قرار گرفته است و اثر روان‌کنندگی آب در بین آن‌ها بیشتر خود را نشان می‌دهد، که منجر به کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی شده است. براساس شکل ۷، رابطه‌ی ۳ ارتباط بین زاویه‌ی اصطکاک بیشینه و تنش قائم را بیان می‌کند:

$$\varphi_p = \varphi_0 \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{-D} \quad (3)$$

در این رابطه، φ_0 زاویه‌ی اصطکاک مصالح به ازای فشار قائم مساوی با ۱ اتمسفر بر روی نمونه، و D مقداری ثابت براساس نوع مصالح انتخاب می‌شود که این دو پارامتر را می‌توان از روابط غیرخطی به دست آمده از شکل ۷ نیز به دست آورد. پژوهشگران علاوه بر رابطه‌ی ۳، رابطه‌ی ۴ را نیز برای ارتباط زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با تنش قائم بر روی نمونه‌های شنی و سنگریز ارائه داده‌اند: [۱۲]

$$\varphi_p = \varphi_0 - \Delta\varphi \log \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right] \quad (4)$$

که در این رابطه، $\Delta\varphi$ مقدار کاهش زاویه‌ی اصطکاک مصالح به ازای ۱۰ برابر افزایش تنش قائم بر روی آن است. در جدول ۳، مقادیر D و $\Delta\varphi$ برای مصالح شنی مورد استفاده در سه حالت خشک، اشباع، و نشست ناگهانی ارائه شده است. همچنین برای مقایسه‌ی مقدار φ_0 به دست آمده از دو رابطه‌ی ۳ و ۴، می‌توان به جدول ۳ مراجعه کرد.

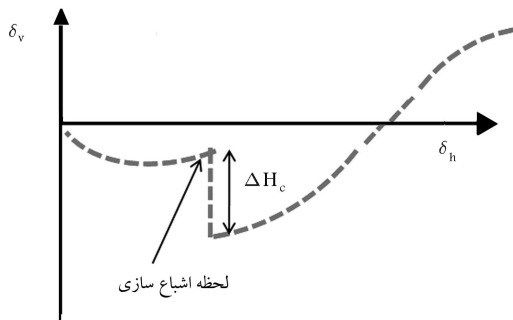
۲.۳.۳. زاویه‌ی اتساع و سختی برشی مصالح شنی در شرایط خشک، اشباع و نشست ناگهانی

با مراجعه به نمودارهای به دست آمده از آزمایش، می‌توان دو پارامتر سختی برشی (K_s) و زاویه‌ی اتساع (Ψ) را مطابق رابطه‌های ۵ و ۶ بیان کرد:

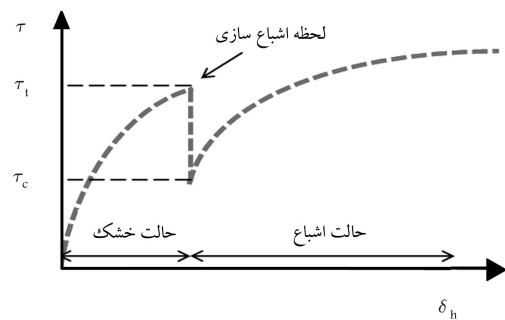
$$K_s = \left. \frac{d\tau}{d(\delta_h)} \right|_{\delta_h=0} \quad (5)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left[\frac{d(\delta_v)}{d(\delta_h)} \right]_{\max} \quad (6)$$

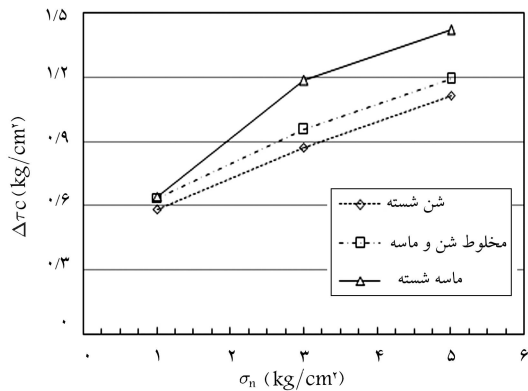
شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات زاویه‌ی اتساع و سختی برشی برحسب تنش قائم اولیه برای نمونه‌های شنی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش تنش قائم اولیه بر روی نمونه، زاویه‌ی اتساع به صورت غیرخطی کاهش یافته است، به طوری که مقدار آن از 21.9° به 12.8° در آزمایش خشک و از 14.8° به 2.6° در آزمایش اشباع رسیده است. البته مشاهده می‌شود که در آزمایش نشست ناگهانی با اشباع‌سازی مصالح در تغییرمکان افقی یا سطح تنش برشی بالاتر، مقدار زاویه‌ی اتساع کاهش بیشتری نسبت به حالت اشباع می‌یابد. در واقع، زاویه‌ی اتساع مصالح در حالت خشک نسبت به حالت اشباع آن‌ها بین 7° تا 10° درجه بیشتر است. این مطلب با توجه به تأثیر مثبت زاویه‌ی اتساع در مقاومت برشی مصالح تأیید می‌شود. همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، مقاومت برشی مصالح که در آن‌ها آزمایش نشست



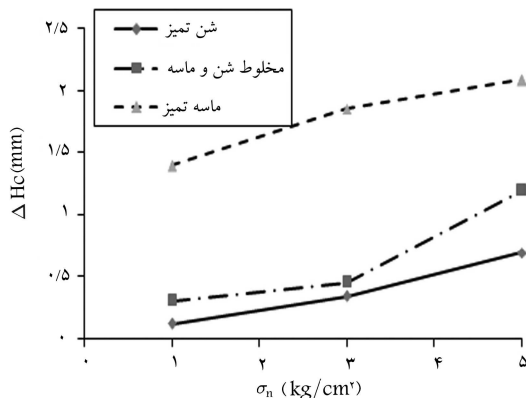
شکل ۱۱. تعریف پارامتر میزان نشست ناگهانی در منحنی تغییر مکان قائم-تغییر مکان افقی.



شکل ۱۰. مسیر تنش در آزمایش برش مستقیم به منظور بررسی نشست ناگهانی.



شکل ۱۲. تغییرات افت تنش برشی در لحظه‌ی اشباع‌سازی برحسب تنش قائم اولیه.



شکل ۱۳. تغییرات مقدار نشست ناگهانی برحسب تنش قائم اولیه.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش تنش قائم میزان افت تنش برشی در زمان خیس‌شدن مصالح و مقدار نشست ناگهانی افزایش یافته است. تغییر شکل در داخل مجموعه‌ی ذرات شنی اتفاق می‌افتد و مقدار این تغییر شکل با میزان تنش اعمال‌شده و نسبت رطوبت اولیه‌ی موجود در خلل و فرج یا حفره‌های هر دانه کنترل می‌شود. [۱-۸] در حقیقت پدیده‌ی نشست ناگهانی مصالح شنی، کاهش مقاومت فشاری ذرات و دانه‌ها در اثر اشباع‌سازی است که موجب شکستگی در نقاط تماس بین دانه‌های با تنش بالا در توده‌ی این مصالح می‌شود. [۳-۴] بنابراین با افزایش میزان تنش قائم اولیه، این نقاط تماسی تحت تنش عمودی بالاتری قرار می‌گیرند و در زمان اشباع مصالح، شکستگی بین دانه‌ها به علت اثر روان‌کنندگی آب شدیدتر می‌شود. به همین دلیل

مقادیر در شکل ۱۰ بر روی مسیر تنش نمونه‌ها که آزمایش نشست ناگهانی بر روی آن‌ها انجام شده است، نشان داده شده‌اند.

-- ضریب کاهش تنش (CSR): این ضریب را می‌توان برای مدل‌سازی کاهش تنشی که در هنگام اشباع‌شدن توده‌ی خاک دانه‌پی رخ می‌دهد به‌کار برد. بنابراین ضریب کاهش تنش در واقع همان ضریب کاهش یا آزادسازی تنش است که در مؤلفه‌های تنش موجود در توده‌ی خاک در شرایط خشک یا قبل از خیس‌شدگی ضرب می‌شود تا مؤلفه‌های تنش درست در لحظه‌ی اشباع را پدید آورد. ضریب کاهش تنش را می‌توان مطابق رابطه‌ی ۸ محاسبه کرد:

$$CSR = \frac{\tau_c}{\tau_t} \quad (8)$$

-- درصد آزادشدگی تنش (a): همچنین می‌توان پارامتر دیگری را در مورد پدیده‌ی نشست ناگهانی معرفی کرد که با رابطه‌ی ۹ بیان می‌شود.

$$a = \frac{\tau_t - \tau_c}{\tau_t} \times 100 \quad (9)$$

در این رابطه، a درصد آزادسازی تنش است که نشان می‌دهد در زمان اشباع‌سازی چند درصد از تنش‌های موجود در نمونه‌های خشک آزاد می‌شوند و به تنش در شرایط اشباع می‌رسند. رابطه‌ی ۱۰ ارتباط ضریب کاهش تنش با درصد آزادشدگی تنش را بیان می‌کند:

$$CSR = 1 - \frac{a}{100} \quad (10)$$

-- مقدار نشست ناگهانی (delta H_c): در آزمایش نشست ناگهانی در زمان اشباع‌کردن نمونه‌های شنی، کاهش زیاد و ناگهانی در ارتفاع نمونه‌ی قرار داده‌شده در جعبه‌ی دستگاه برش مستقیم روی می‌دهد و سبب نشست شدید مصالح می‌شود. میزان این کاهش ارتفاع نمونه، به نام مقدار نشست ناگهانی تعریف می‌شود. در شکل ۱۱، پارامتر مقدار نشست ناگهانی در منحنی تغییر مکان قائم برحسب تغییر مکان افقی دیده می‌شود.

۱.۴. اثر تنش قائم بر نشست ناگهانی خاک شنی

جهت بررسی اثر تنش قائم، آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس در وضعیت نشست ناگهانی برای نمونه با چگالی نسبی ۰.۸۵، با اعمال سه تنش قائم ۱، ۳ و ۵ (kg/cm²) و اشباع‌سازی نمونه پس از جابجایی افقی به اندازه‌ی ۵ میلی‌متر انجام شده است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب اثر تنش قائم بر میزان افت تنش برشی در لحظه‌ی آبیگری و مقدار نشست ناگهانی با سه نوع مصالح شن شسته، مخلوط شن و ۵٪ ماسه‌ی شسته، و همچنین ماسه‌ی تمیز نشان داده شده است.

شسته، و ماسه‌ی تمیز ارائه شده است (لازم به ذکر است که در این روابط، اشباع‌سازی آزمایش نشست ناگهانی در تغییرمکان افقی 5mm صورت گرفته است).

۲.۴. اثر میزان خاک ماسه‌ی بر نشست ناگهانی خاک شنی

در این مرحله یک بار ۵۰٪ وزنی از خاک شنی با ۵۰٪ وزنی از ماسه، مخلوط و آزمایش‌های نشست ناگهانی تحت تنش قائم اولیه ۱، ۳ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع با چگالی نسبی ۸۵٪ و اشباع‌سازی در تغییرمکان افقی ۵ میلی‌متر انجام شد و بار دیگر ماسه به تهنایی تحت آزمایش نشست ناگهانی قرار گرفت. در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب تأثیر درصد‌های مختلف خاک ماسه‌ی (۵۰٪ و ۱۰۰٪) نسبت به خاک شنی بر روی میزان افت تنش برشی در زمان اشباع‌سازی، میزان نشست ناگهانی، و ضریب کاهش تنش مصالح شنی تحت تنش‌های قائم متفاوت نشان داده شده است.

با توجه به این شکل‌ها، نکته‌ی قابل ذکر آن است که مصالح شنی کمترین و مصالح ماسه‌ی بیشترین میزان افت تنش برشی و مقدار نشست ناگهانی را داشته‌اند؛ در حالی‌که مصالح شن و ماسه، میزان افت تنش برشی و مقدار نشست ناگهانی بینابین داشته‌اند. بنابراین با افزایش درصد ماسه و خاک‌های ریزدانه در مصالح شنی، تمایل مصالح به نشست ناگهانی بیشتر و افت تنش برشی در زمان آنگیری افزایش می‌یابد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). شکل ۱۴ نیز نشان می‌دهد ضریبی که در تنش توده‌ی مصالح خشک ضرب شده است تا تنش اشباع مصالح را به وجود آورد، با افزایش درصد خاک ماسه‌ی نسبت به مصالح شنی افزایش می‌یابد. مقادیر α و β در جدول ۴، برای مصالح مخلوط شن و ماسه‌ی شسته و خاک ماسه‌ی تمیز نیز همین امر را تصدیق می‌کند.

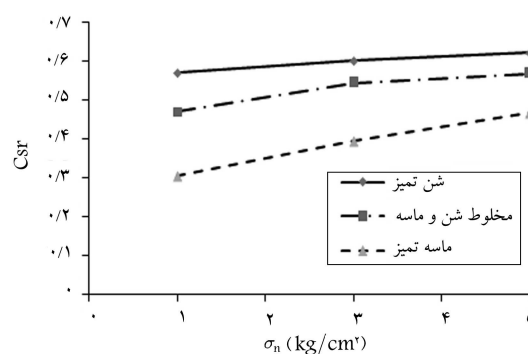
۳.۴. اثر چگالی نسبی بر نشست ناگهانی خاک شنی

آزمایش نشست ناگهانی برای مصالح با چگالی نسبی ۶۰٪ نیز انجام شد. در اینجا نیز اشباع نمونه‌ها در تغییرمکان افقی ۵ میلی‌متر و تحت سه تنش قائم اولیه ۱، ۳ و ۵ (Kg/cm^۲) انجام شد. در شکل ۱۵، نمودارهای افت تنش برشی، مقدار نشست ناگهانی، و ضریب کاهش تنش در زمان آنگیری مصالح برحسب سه تنش قائم ۱، ۳ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع که برای دو نمونه‌ی که تحت چگالی‌های نسبی ۸۵ و ۶۰ درصد تهیه شده بودند، ارائه شده است.

نتایج شکل ۱۵ بیانگر این مطلب است که با کاهش چگالی نسبی، میزان افت تنش برشی و نشست مصالح در لحظه‌ی اشباع‌سازی نمونه، افزایش و مقدار ضریب کاهش تنش به میزان بسیار کمی کاهش یافته است. درحقیقت کاهش چگالی نسبی با کاهش میزان تراکم همراه است که سبب افزایش تغییرشکل و تمایل مصالح به نشست ناگهانی بیشتر شده است؛ [۱۱، ۱۵، ۱۶] در جدول ۵، اثر چگالی نسبی بر مقادیر α و β مربوط به رابطه‌ی ۱۱ برای مصالح شن شسته ارائه شده است.

۴.۴. تأثیر میزان رطوبت اولیه بر نشست ناگهانی خاک

در این کار پژوهشی برای اینکه بتوان اثر رطوبت اولیه بر نشست ناگهانی نشان داد، نمونه‌ی راکه از مخلوط ۵۰٪ شن و ۵۰٪ ماسه تهیه شده بود با مقدار رطوبت اولیه ۴٪ و با چگالی نسبی ۸۵٪ درون جعبه‌ی برش مستقیم قرار داده و آزمایش‌های نشست ناگهانی در شرایط اشباع‌سازی نمونه در جابجایی افقی 5mm و تحت



شکل ۱۴. تغییرات ضریب کاهش تنش برحسب تنش قائم اولیه.

مقدار نشست ناگهانی و میزان افت تنش برشی در لحظه‌ی اشباع‌سازی بیشتر می‌شود. [۱۱، ۱۲، ۱۳]

در شکل ۱۴، تغییرات ضریب کاهش تنش برحسب تنش قائم در آزمایش نشست ناگهانی نمونه‌های شن شسته، مخلوط شن و ماسه‌ی تمیز و همچنین ماسه‌ی شسته نشان داده شده است.

منحنی تنش برشی برحسب تغییرمکان افقی و نیز پوش گسیختگی مصالح شنی در شرایط خشک نشان می‌دهد که با افزایش تنش قائم اولیه بر روی نمونه‌ها، مصالح دیرتر به گسیختگی می‌رسند (یا در تغییرمکان افقی بیشتری نمونه گسیخته می‌شود). حال با توجه به اینکه در شکل ۱۴ منحنی تغییرات ضریب کاهش تنش برحسب تنش قائم مربوط به اشباع‌سازی در یک تغییرمکان افقی خاص (5mm) ترسیم شده است، بنابراین نمونه‌هایی که تحت تنش عمودی بالاتری در این تغییرمکان افقی خاص اشباع می‌شود، نسبت به بیشینه‌ی تنش برشی خود در سطح تنش پایین‌تری اشباع شده‌اند، (مثلاً در مورد اشباع‌سازی نمونه‌های شنی در تغییرمکان افقی 5mm، این تغییرمکان افقی برای نمونه‌هایی که تحت تنش قائم اولیه ۱، ۳ و ۵ (Kg/cm^۲) قرار گرفته‌اند، به ترتیب متناظر با آنگیری در سطوح تنش برشی ۸۵٪، ۴۹٪ و ۴۷٪ است). بنابراین با توجه به دلایل عنوان شده، اگرچه با افزایش تنش قائم اولیه، تنش عمودی در نقاط تماس بین دانه‌ها بیشتر و مقدار انرژی آزاد شده از تنش در زمان اشباع مصالح بالاست، اما درصد تنش آزاد شده نسبت به شرایط خشک نمونه پایین می‌آید و ضریب کاهش تنش زیاد می‌شود. این مطلب در آزمایش‌های بزرگ مقیاس بر روی مصالح سنگ‌ریز نیز مشاهده شده است. [۱۵]

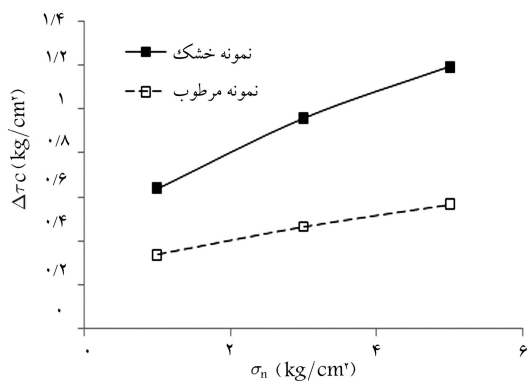
با توجه به شکل ۱۴، رابطه‌ی غیرخطی برای ضریب کاهش تنش نسبت به تنش قائم به دست می‌آید که به صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:

$$CSF = \alpha \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right]^\beta \quad (11)$$

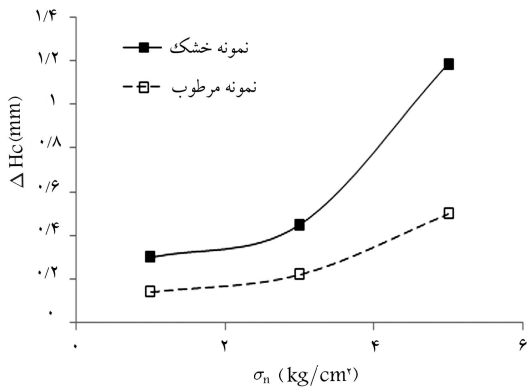
در رابطه‌ی ۱۱، مقادیر α و β از منحنی شکل ۱۴ برای هر کدام از مصالح به دست می‌آید. در جدول ۴، این مقادیر برای مصالح شن شسته، مخلوط شن و ماسه‌ی

جدول ۴. روابط مقادیر α و β از رابطه‌ی ۱۱ برای مصالح شن شسته تحت شرایط خشک، اشباع، و نشست ناگهانی.

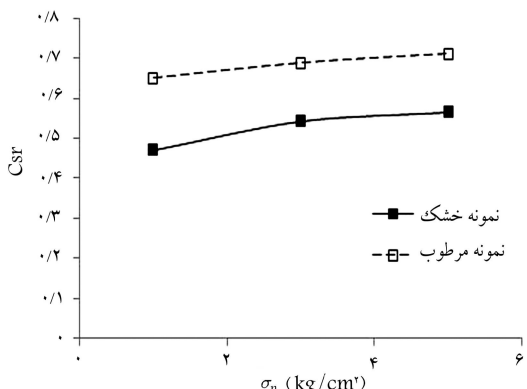
نوع مصالح	α	β
شن شسته	۰٫۵۸	۰٫۰۳
مخلوط شن و ماسه‌ی شسته	۰٫۴۷	۰٫۱۲
ماسه‌ی تمیز	۰٫۳۰	۰٫۲۶



الف) میزان تغییرات افت تنش برشی در زمان اشباع سازی؛



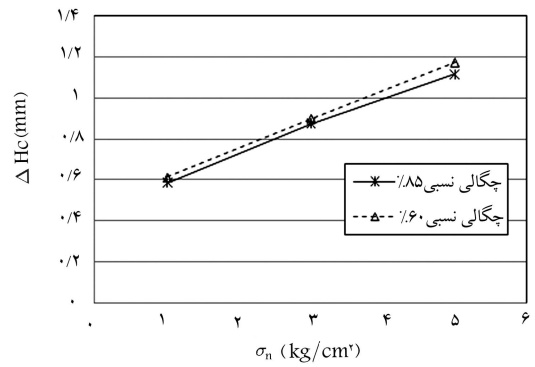
ب) مقدار نشست ناگهانی؛



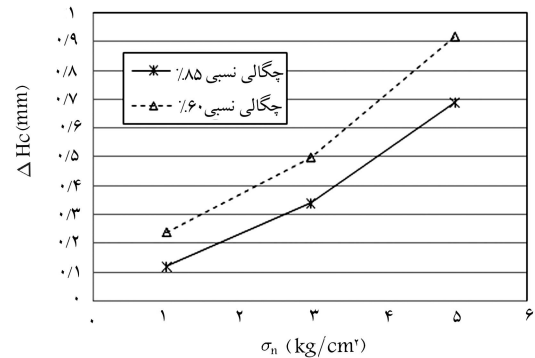
ج) ضریب کاهش تنش.

شکل ۱۶. اثر درصد رطوبت اولیه می مصالح شنی تحت تنش‌های قائم اولیه ۱، ۳ و ۵ (Kg/cm²)

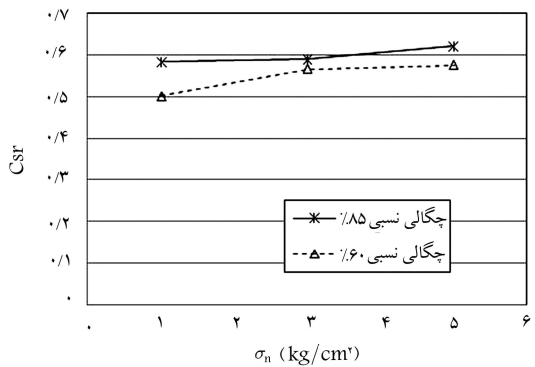
مقداری رطوبت به خاک در زمان تراکم آن افزایش می‌یابد، و بنابراین ضریب بالاتری باید در تنش‌های موجود مصالح مرطوب ضرب شود تا حالت تنش مصالح اشباع مشخص شود. این مسئله نشان می‌دهد اختلاف میان تنش در شرایط خشک و اشباع با افزوده شدن رطوبت اولیه در زمان تراکم مصالح، نسبت به حالتی که مصالح به صورت خشک متراکم می‌شود، کاهش می‌یابد. این نتیجه در مصالح دانه‌ی دیگری نیز مشاهده شده است؛ مثلاً می‌توان به نتایج پژوهشی [۴] اشاره کرد که با استفاده از دستگاه آزمایش سه‌محوری بر روی مصالح ماسه‌ی انجام و در آن مشاهده شده است که میزان نشست ناگهانی با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد؛ مثلاً کرنش ناگهانی از ۰.۷٪ در نمونه با رطوبت اولیه‌ی ۰.۴٪ به ۰.۳٪ در رطوبت ۰.۵٪ می‌رسد و عملاً بعد از رطوبت اولیه‌ی ۰.۶/۳٪ تقریباً کرنش ناگهانی اتفاق نمی‌افتد.



الف) میزان تغییرات افت تنش برشی در لحظه‌ی اشباع سازی؛



ب) مقدار نشست ناگهانی؛



ج) ضریب کاهش تنش.

شکل ۱۵. اثر چگالی نسبی مصالح شنی.

جدول ۵. روابط مقادیر α و β از رابطه‌ی ۱۱ برای مصالح شنی شسته تحت شرایط خشک با چگالی نسبی ۶۰٪ و ۸۵٪.

نوع دانسیته (%)	α	β
۶۰	۰٫۵۸	۰٫۰۳
۸۵	۰٫۵۱	۰٫۰۹

تنش‌های قائم اولیه ۱، ۳ و ۵ (Kg/cm²) انجام شد. در شکل ۱۶ تغییرات افت تنش برشی در زمان اشباع‌سازی، مقدار نشست ناگهانی و ضریب کاهش تنش بر حسب تنش قائم اولیه برای مصالح مخلوط شن و ماسه در شرایط نمونه‌ی خشک و با درصد رطوبت ۰.۴٪ نشان داده شده است.

همان‌طور که نتایج شکل ۱۶ نشان می‌دهد، وجود مقداری رطوبت در زمان تراکم مصالح مخلوط شن و ماسه، در کاهش افت تنش برشی در لحظه‌ی اشباع‌سازی و میزان نشست ناگهانی بسیار مهم است. ضریب کاهش تنش نیز با اضافه شدن

جدول ۶. روابط مقادیر α و β از رابطه‌ی ۱۱ برای مصالح مخلوط شن و ماسه‌ی شسته تحت شرایط خشک و مرطوب.

شرایط مصالح	α	β
خشک	0.47°	0.12°
مرطوب	0.65°	0.06°

با افزایش میزان رطوبت اولیه در زمان تراکم خاک، دانه‌های خاک به دلیل اثر روان‌کنندگی آب، بهتر در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و منجر به قفل و بست بیشتر مصالح می‌شود. به همین دلیل در زمان اشباع‌کردن مصالح نیز نشست کوچک‌تری را از خود نشان می‌دهند؛^[۱۶،۵۳] لذا هنگام تراکم مصالح شنی و سنگریز توصیه می‌شود مقداری آب به مصالح اضافه شود. در جدول ۶، اثر میزان رطوبت بر مقادیر α و β مربوط به رابطه‌ی ۱۱ برای مصالح مخلوط شن و ماسه‌ی شسته ارائه شده است.

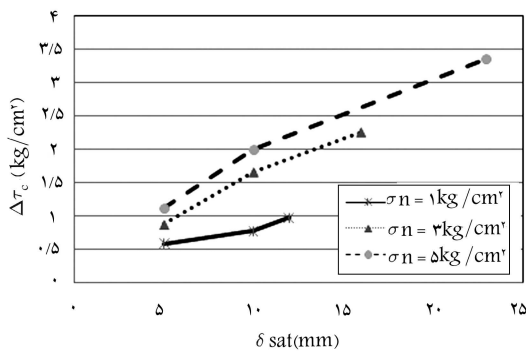
۵.۴. اثر سطح تنش برشی اولیه بر نشست ناگهانی مصالح

شیروانی‌های بالادست سدهای خاکی قبل از آبرگیری دارای تنش‌های برشی اولیه هستند که می‌تواند در میزان تغییرمکان هنگام آبرگیری مؤثر باشد. تکیه‌گاه‌ها و دامنه‌های طبیعی در مخازن سدها نیز تنش برشی اولیه دارند و گاهی تراکم مناسبی ندارند و عملاً دارای پتانسیل نشست ناگهانی هستند. بدین ترتیب لازم است این مسئله مورد بررسی قرار گیرد.

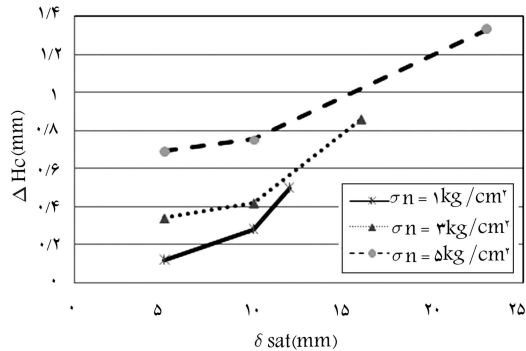
به منظور بررسی اثر تنش برشی اولیه بر نشست ناگهانی خاک شن شسته، اشباع‌سازی نمونه‌ی خشک در تغییرمکان افقی ۵ و ۱۰ میلی‌متر و تغییرمکان افقی متناظر با بیشینه‌ی تنش برشی خشک مصالح (δp) انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۷ برای تنش قائم 5 Kg/cm^2 نشان داده شده است.

شکل ۱۷ نشان می‌دهد در صورتی که اشباع‌سازی در تغییرمکان افقی یا برشی بالاتری اتفاق افتد، مقدار نشست و میزان افت تنش برشی در لحظه‌ی آبرگیری افزایش می‌یابد؛ به این دلیل که وقتی برش در مصالح بیشتر می‌شود، آن‌ها به آستانه‌ی مقاومتی خود نزدیک‌تر می‌شوند و در جایی که نمونه به وضعیت گسیختگی نزدیک‌تر می‌شود (تغییرمکان برشی افزایش می‌یابد)، وجود ترک‌های ریز و درشت در دانه‌ها بیشتر می‌شود. این امر منجر به آسان‌تر شدن نفوذ آب به داخل ترک‌ها، شکسته شدن ذرات خاک و کاهش بیشتر مقاومت و مدول تغییرشکل مصالح پس از اشباع شدن می‌شود.

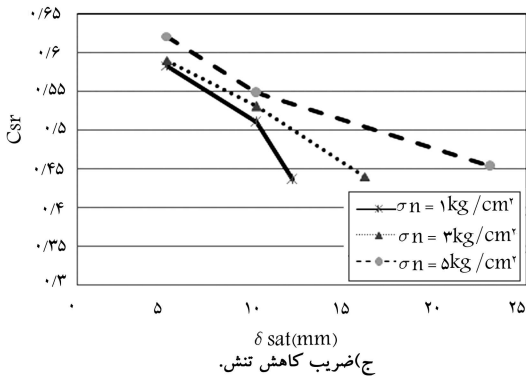
با توجه به آزمایش‌های انجام شده در تنش‌های مختلف قائم و اشباع‌سازی نمونه‌ها در سطوح تنش برشی متفاوت، تغییرات افت تنش برشی، میزان نشست ناگهانی، و ضریب افت تنش برشی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افت تنش برشی مصالح شن شسته در زمان خیس شدن، به طور غیرخطی با نرخ‌های نسبت به تغییرمکان برشی اولیه و با نرخ‌های افزایشی نسبت به سطح تنش برشی اولیه در تغییر است. همچنین با افزایش تغییرمکان برشی یا سطح تنش



الف) افت تنش برشی در زمان اشباع‌سازی؛

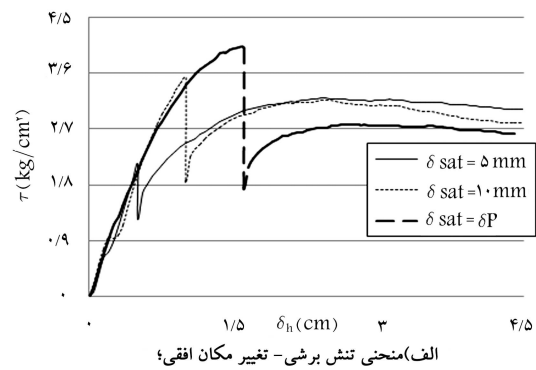


ب) مقدار نشست ناگهانی؛

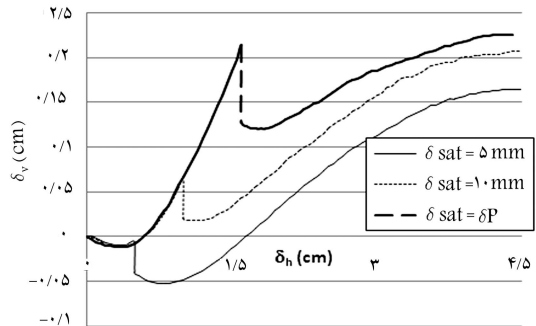


ج) ضریب کاهش تنش.

شکل ۱۸. اثر تنش قائم و تغییرمکان هنگام اشباع‌سازی مصالح.



الف) منحنی تنش برشی - تغییر مکان افقی؛



ب) منحنی تغییر مکان قائم - تغییر مکان افقی در مصالح شن شسته تحت تنش قائم 5 kg/cm^2 .

شکل ۱۷. اثر سطح تنش اولیه.

به وجود می‌آید، به طوری که مقدار آن از مقادیر پارامترهای مقاومت برشی مصالح اشباع کمی کمتر می‌شود.

-- با افزایش تنش عمودی بر روی نمونه‌های شنی، مقدار افت تنش برشی در زمان اشباع‌سازی، میزان نشست ناگهانی و ضریب کاهش تنش افزایش پیدا می‌کنند.

-- با افزایش درصد ماسه در نمونه‌ها، تمایل مصالح به نشست ناگهانی بیشتر می‌شود؛ به طوری که میزان افت تنش برشی در زمان اشباع‌سازی و میزان فرونشست افزایش و ضریب کاهش تنش کاهش می‌یابد.

-- چنانچه مصالح شنی ریخته شده در جعبه‌ی آزمایش برش مستقیم با چگالی بالایی تهیه شود، در آزمایش نشست ناگهانی هنگام اشباع‌سازی این نمونه‌ها، میزان افت تنش برشی و نشست ناگهانی کمتر می‌شود و ضریب کاهش تنش افزایش می‌یابد.

-- اضافه کردن درصد رطوبت به نمونه‌های شنی، تمایل این مصالح را به تغییر شکل در زمان آبیگری کاهش می‌دهد و سبب می‌شود که میزان افت تنش برشی در زمان آبیگری نمونه‌ها و مقدار نشست ناگهانی کاهش یابد و نتیجتاً باعث افزایش ضریب کاهش تنش شود.

-- با انتخاب تغییرمکان‌های برشی اولیه یا سطوح تنش برشی متفاوت در نمونه‌های شن شسته، تأثیر میزان سطح تنش برشی بر نشست ناگهانی بررسی شد. نتایج این آزمایش‌ها، افزایش میزان افت تنش برشی و مقدار نشست ناگهانی در زمان خیس شدن با افزایش میزان سطح تنش برشی مربوط به لحظه‌ی آبیگری را نشان دادند.

برشی اولیه هنگام اشباع شدن مصالح، مقدار نشست مصالح در زمان اشباع شدن افزایش می‌یابد و این در حالی است که میزان ضریب افت تنش، رفتاری کاهنده با سطح تنش برشی اولیه دارد.

۵. نتیجه‌گیری

آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی نمونه‌هایی از مصالح شن شسته، مخلوط شن و ماسه‌ی شسته و نیز خاک ماسه‌یی تمیز در سه وضعیت برش خشک، اشباع، و نشست ناگهانی تحت تنش قائم اولیه‌ی مختلف، انجام شد. اثر اشباع کردن مصالح بر پارامترهای مقاومت برشی آن بررسی شد و عوامل مؤثر بر روی پدیده‌ی نشست ناگهانی مصالح شنی مورد آزمایش قرار گرفتند. برخی از نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده به این شرح است:

-- مقاومت برشی، زاویه‌ی اتساع، و سختی برشی مصالح خشک تماماً بیشتر از همین پارامترها در مصالح اشباع هستند.

-- آزمایش نشست ناگهانی نشان داد در زمان اشباع شدن خاک خشک تحت تغییرمکان برشی خاص و ادامه‌ی مجدد به بارگذاری تحت برش، منحنی‌ها و پارامترهای مقاومت برشی از مرحله‌ی اشباع‌سازی به بعد رفتاری مشابه با مصالحی را دارند که از ابتدا در شرایط اشباع تحت برش قرار گرفته‌اند. البته در آزمایش نشست ناگهانی با اشباع‌سازی مصالح در تغییرمکان برشی بالاتر (افزایش سطح تنش برشی)، کاهش بیشتری در مقادیر پارامترهای مقاومت برشی

پانویس

1. Coefficient of stress release

منابع (References)

1. Galloway, J.D. "The design of rockfill dams", *ASCE, Transactions*, **104**, pp. 1-24 (1939).
2. Morris, S.B. "Discussion on galloway paper: The design of rockfill dams", *ASCE, Transactions*, **104**, pp. 35-38 (1939).
3. Hunter, G. and Fell, R., "The Deformation behavior of rockfill", UNICIV Report No. 405, The University of New South Wales, Sydney (2002).
4. Rust, E.; Heymann, G. and Jones, G.A. "Collapse potential of partly saturated sandy soils from Mozal, Mozambique", *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, **47**(1), pp. 8-14 (2005).

5. Soroush, A. and Aghaei Araei, A. "Uncertainties in mechanical behavior of rockfill during first impounding of rockfill dams", 73rd Annual Meeting of Icold, Tehran, Iran (2005).
6. Egretli, I. and Singh, R.N. "A laboratory investigation into the effects of air void and water saturation on the collapse settlement of opencast mine backfill", *Mining Science and Technology*, (7), pp. 87-97 (1988).
7. Nobari, E.S. and Duncan, J.M. "Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams", University of California, Berkeley, Geotechnical Engineering Report No. TE-72-1 (1972).
8. Alonso, E.E. "Exploring the limits of unsaturated soil mechanics: The behavior of coarse granular soil and rockfill", *The Eleventh Spencer Journal Buchanan Lecture*, College Station Hilton, pp. 1-53 (2003).
9. Soroush, A. and Aghaei Araei, A. "Analysis of behavior of a high rockfill dam", *Proceedings of the Institution of Civil Engineering (GEI), Geotechnical Engineering*, **159**(1), pp. 49-59 (January 2006).

10. Asadzadeh, M. and Soroush, A. "Direct shear testing on a rockfill material", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, **34**(2B), pp. 379-396 (2009).
11. Oshtaghi, V. and Mahin Roosta, R. "Changes in the stress and strain state in dry gravelly material due to saturation", *4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, Iran, Paper No. TVTMAH 190, (2010).
12. Oshtaghi, V., *Evaluation of Collapse Settlement in Gravelly Material Due to Saturation*, M.Sc Thesis, Civil Engineering Department Zanjan University, Zanjan, Iran (2011).
13. Frassoni, A., Hegg, U. and Rossi, P.P. "Large-scale laboratory tests for the mechanical characterization of granular materials for the embankment dams", Commission International DES GRANDS BARRAGES, Rio de Janeiro (1982).
14. Naderian, A.R. and Williams, D.J. "Bearing capacity of open-mine backfill materials" , *Technical note published in Trans. Instn Min. Metall. (Set. A: Min. industry)*, **106**, The Institution of Mining and Metallurgy (January-April 1997).
15. "Mahab ghodss consulting engineering corporation", Report of borrow resources of Gotvand embankment dam, Report No. 3382030 (2007).
16. Charles, J.A. and Watts, K.S. "The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill", *Geotechnique*, **30**(4), pp. 353-367 (1980).

EFFECT OF SATURATION ON THE SHEAR STRENGTH AND COLLAPSE SETTLEMENT OF GRAVELLY MATERIAL USING DIRECT SHEAR TEST APPARATUS

R. Mahin Roosta(corresponding author)

reza.mahinroosta@gmail.com

Dept. of Civil and Environ Mental Engineering
Tarbiat Modares University

V. Oshtaghi

oshtaghivahid@yahoo.com

Faculty of Engineering
University of Zanjan

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 1, Page 103-114, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 30 January 2011; received in revised form 12 November 2011; accepted 23 January 2012.

Abstract

Dried granular material subjected to saturation under certain vertical stresses, results in collapse settlement, due to sliding in the grain contacts, particle rearrangement and breakage. In this research, the effects of saturation on shear strength parameters and the collapse behavior of clean gravels are investigated via a large scale direct shear test. For instance, first, all physical properties of the gravelly material were evaluated via some specific laboratory tests, including grading analysis, specific gravity of soil solids, unit weight of soils and Los Angeles abrasion tests. Maximum and minimum densities were determined in order to provide samples in a specific relative density. The materials, which were selected for collapse tests were classified as GP and SP, due to their potential for collapse during saturation. In order to compare the shear strength parameters in dry and wet states, large-scale direct shear test apparatus with a sample dimension of $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}$ was used, and strain control tests were done on the saturated and dried samples. Vertical stresses of 1, 3 and 5 Kg/cm^2 were applied to the samples and shearing continued until 4.5 cm shear displacement. Collapse tests were done by the direct shear apparatus on the initially dry samples, which were flooded during shearing at the specific strain or in the specific shear stress levels. Result of laboratory tests showed that in most samples, shear strength parameters decreased with inundating the material, whereas the parameters in collapse and saturated tests were close to each other.

An important part of this paper is studying the effect of different parameters on the collapse phenomenon in gravelly material. Specific parameters were selected as vertical stress, soil density, coarseness or fineness of par-

ticles, initial water content, and shear displacement or shear stress level. Vertical stress and shear stress levels had a direct effect on the collapse settlement; in fact, an increase in vertical and shear stress levels results in more collapse settlement and more stress release during saturation. Another factor is sand content in the whole sample. It was shown that although sand particles were not prone to crack due to their small size, the collapse potential in the sand samples was much higher than gravelly material. In fact, particle rearrangement was the fundamental cause of collapse in sandy soils, while particle breakage in gravelly material is another reason for the collapse. Also, experimental results indicated that addition of moisture content, even in small amounts, would cause a high reduction in collapse settlement. Furthermore, the effect of soil density was studied in the collapse settlement and it was observed that collapse decreases with an increase in relative density. Thus, in order to decrease collapse settlement in the compacted material, soil mass must be well compacted and prepared in a wet state.

Key Words: Collapse settlement, shear strength, clean gravel, saturation, large scale direct shear test.