

# مطالعه آزمایشگاهی وضعیت انحلال‌پذیری و مقاومتی خاک‌های مجاور گنبد‌های نمکی

میثم محبوبی نیازمندی<sup>۱</sup> و سهراب میراثی<sup>۲</sup>

۱. استاد مدعو، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی مهرآیین، گیلان، ایران  
۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

## چکیده

یکی از مهم‌ترین منابع‌های بالقوه شوری در جنوب ایران، انحلال‌گنبد‌های نمکی می‌باشد. در بیشتر موارد موجب تخریب کیفیت آب‌های سطحی و آبخوان‌های کارستی و آبرفتی مجاور می‌شود. با وجودی که آب‌های کارستی و آبرفتی بیشتر دارای کیفیت مطلوبی می‌باشند، در موارد متعددی در جنوب کشور کیفیت این آب‌ها به دلیل تماس با گنبد‌های نمکی کاهش یافته است. نظر به اینکه برخی از نقاط استان هرمزگان همچون جزیره هرمز متشکل از خاک‌های انحلال‌پذیر نمکی و دارای درصد زیادی سولفات و گچ می‌باشد احتمال رخداد مشکلاتی چون انحلال‌پذیری زیاد می‌باشد. بنابراین، در این مقاله به بررسی و ارزیابی تعیین میزان انحلال‌پذیری و مشخصات مقاومتی خاک‌های پهنه‌های واقع در مجاورت گنبد‌های نمکی جزیره هرمز پرداخته شده است. تعیین مشخصات مقاومتی و انحلال‌پذیری بر اساس نتیجه آزمایش‌ها فیزیکی، شیمیایی، فنی و مکانیکی با استفاده از حفر گمانه‌ها و نمونه‌برداری انجام پذیرفته است. برخی از این ویژگی‌ها شامل طبقه‌بندی خاک، حدود اتربرگ خاک، درصد نمک، کلرور و فسفات، درصد تراکم حداکثر، زاویه اصطکاک، چسبندگی خاک و مدول الاستیسیته خاک می‌باشند. نتیجه‌های به دست آمده نشان دادند، وجود نمک، باعث کاهش پارامترهای مقاومتی (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) خاک شده است. همچنین وجود نمک، باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش قابل ملاحظه میزان دانسیته خشک حداکثر خاک‌های انحلال‌پذیر در مقایسه با نمونه خاک طبیعی می‌شود. در نهایت بر اساس داده‌های به دست آمده و شناسایی دقیق خاک‌های انحلال‌پذیر و نظر به ساخت و سازهای آبی در این پهنه‌ها، راهکارهای پیشنهادی برای جلوگیری و کنترل خسارت به سازه واقع بر روی این نوع خاک‌ها ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** انحلال‌پذیری، خاک‌های نمکی، گنبد‌های نمکی، جزیره هرمز، مقاومت خاک.

## مقدمه

در بسیاری از کشورهای جهان، به‌ویژه در خاورمیانه تعداد زیادی از گنبد‌های نمکی موجود می‌باشند به‌گونه‌ای که انحلال آنها می‌تواند مشکلات زیادی را در ساختمان‌سازی ایجاد کنند. انحلال‌پذیری خاک‌ها بویژه در مجاورت گنبد‌های نمکی، می‌تواند تاثیر به‌سزایی بر ساختمان‌ها و سازه‌های خاکی داشته باشد (Mirassi and Rahneam, 2020; Rahneam and Mirassi, 2012 and 2014).

\* نویسنده مرتبط: s.mirasi@sutech.ac.ir

دچار افت‌های شدید مقاومتی شده و حتی در برابر بارهای کوچک دچار فروریزش می‌شوند. بنابراین نمی‌توان به مقاومت ظاهری این خاک‌ها در حالت خشک اطمینان کرد (Rahnema and Mirassi, 2012).

مشکلات سازه‌های بنا شده روی زمین‌های گچی، اولین بار در سال ۱۹۲۷ در اسپانیا به دلیل تخریب کانال‌های تازه تأسیس، پیدا شد. در بسیاری از بخش‌ها، سازه فوقانی نشست کرده و در بعضی پهنه‌های تخریب شده یا پوشش کانال تغییر شکل داده بود (کارگر و همکاران، ۱۳۸۷). بعد از این رخداد، شکست سد سنت فرانسیس، تلفات شدید آب از مخازن سدهای اوکلاهاما و نیومکزیکو، ایجاد تونل‌های ناشی از آب‌شستگی در پی سدهای هندو، مکسی میلبان و ردراک (زندى و همکاران، ۱۳۹۸)، تخریب کانال سله‌بایه در حوزه فرات (عفیفی و کردوانی، ۱۳۸۷) و غیره سبب شد تا بعد از سال ۱۹۲۷ در طول قریب به ۴۰ سال در برخورد با هر پروژه‌ای، در پهنه‌های گچی واقع شده بود، یا اقدام به تعویض محل طرح شود و یا اینکه از اجرای پروژه در این محل‌ها خودداری شود. در ایران نیز در سال‌های اخیر، به علت مسائل به وجود آمده در پوشش بتنی کانال‌های بنا شده روی خاک‌های گچی (پروژه آبیاری و زهکشی نکوآباد و آبشار در اصفهان) بررسی‌ها و تحقیقات پراکنده‌ای به عمل آمده است (Carrilla et al., 2002). در ادامه به بررسی تعدادی از تحقیقات انجام شده در ارتباط با پروژه‌های مختلف عمرانی در سطح کشور پرداخته شده است.

بلوری یزاز و ساجدی (۱۳۸۳) با مطالعه خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی خاک‌های گچی متورم شونده، روش‌های بهسازی آنها را معرفی می‌کند. نتیجه‌های این تحقیق بیانگر تاثیر شدید گچ، میزان تراکم و میزان رطوبت بر پتانسیل و فشار تورم است. در عین حال برای بهسازی آنها روش تثبیت با سیمان را نسبت به سایر روش‌ها ارجح می‌داند. خاک گستره مسیر کانال انتقال آب خدا آفرین واقع در استان آذربایجان شرقی و استان اردبیل، دارای درصد زیادی سولفات و گچ است و مشکلاتی چون رمبندگی، واگرایی و انحلال‌پذیری را دارا است بر اساس نتیجه پژوهش‌ها، وجود گچ در خاک تا حدود سه درصد به هیچ‌وجه مخاطره

تعداد سازه‌هایی که به دلیل وجود گچ و انحلال‌پذیری خاک‌های موجود در گنبد‌های نمکی در سراسر دنیا تخریب شده و یا خسارت مالی و گاهی جانی قابل توجهی را به بار آورده‌اند، بسیار می‌باشد (زارعی و رئیسی، ۱۳۹۲؛ زندی‌فر و همکاران، ۱۳۹۸). اگرچه اولین مطالعات در خصوص مشکلات اجرایی سازه‌های آبی در خاک‌های انحلال‌پذیر مربوط به سال‌های ۱۹۲۷ به بعد است (عفیفی و کردوانی، ۱۳۸۷)، ولی بیشتر این مطالعات به صورت موردی و پراکنده بوده و در آنها به طور عمده به مسائل خاک‌شناسی توجه شده است.

خاک‌های انحلال‌پذیر خاک‌هایی هستند که اجزای تشکیل‌دهنده آنها مواد تبخیری انحلال‌پذیر می‌باشند. خاک‌های انحلال‌پذیر از عوامل مختلفی از قبیل نمک، گچ، آهک و دولومیت تشکیل شده‌اند که بسته به نوع ماده تشکیل‌دهنده رفتار این‌گونه خاک‌ها نیز متفاوت است و فرآیند انحلال‌پذیری آنها متأثر از مقدار این مواد و وجود یک یا چند نوع از عوامل فوق می‌باشد (اقبالی و همکاران، ۱۳۹۱؛ سلحشور و زمانی، ۱۳۹۳). وجود مواد انحلال‌پذیر نظیر نمک طعام و گچ موجب می‌شود تا بر اثر تماس این خاک‌ها با آب، این مواد در آب حل شده و بخشی از ذرات جامد موجود در توده خاک ضمن انحلال خارج شوند. این پدیده در صورت تداوم می‌تواند موجب افزایش تخلخل و پوک شدن خاک گردد و در نهایت با ایجاد نشست‌های قابل ملاحظه، تخریب ساختمان خاک را موجب شود (صفویان و رضایی، ۱۳۸۹؛ خاکسار نجفی و همکاران، ۱۳۸۹). همچنین انحلال و خروج ذرات جامد گچ، موجب جایگزین شدن آب با ذرات آب و در نتیجه افزایش رطوبت خاک می‌شود، این نیز خود باعث کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود. انحلال‌پذیری، واگرایی و رمبندگی از پدیده‌های مهم در خاک‌های مساله‌دار می‌باشند (زارعی و رئیسی، ۱۳۹۲). خاک‌های انحلال‌پذیر ممکن است در شرایط عادی (خشک) مقاومت و مشخصات مکانیکی خوبی داشته باشند، به طوری که استفاده از این خاک‌ها در پروژه‌های عمرانی مناسب تشخیص داده شود و لیکن بیشتر در برخورد با رطوبت به دلیل آب‌دوستی بیشتر خاک‌های شور نسبت به خاک‌های رسی معمولی

(رحیمی و نژادهاشمی، ۱۳۷۸). پتانسیل تورم و نیز فشار برکنشی که این گونه خاک‌ها اعمال می‌کنند به نوع کانی، میزان تراکم و مقدار رطوبت بستگی دارد. یکی از انواع خاک‌های متورم شونده خاک‌های ریزدانه گچی و حاوی نمک موجود در گنبد‌های نمکی است، در بسیاری از پهنه‌های شهری به دلیل مشکلاتی که برای ساختمان‌ها ایجاد کرده‌اند مسئله‌ساز هستند و مطالعه آنها ضروری می‌باشد (Azma and Abduljawad, 2000). یکی از جمله عارضه‌های مشهود در اراضی شهرها و روستاهای واقع در سواحل خلیج فارس به‌ویژه در جزایر استان هرمزگان وجود خاک‌های انحلال‌پذیر است، در اثر وجود مواد انحلال‌پذیر نظیر نمک و گچ موجب شده تا بر اثر تماس این خاک‌ها با آب مواد مذکور در آب حل شده و در نهایت باعث ایجاد خسارت در ساختمان خاک و فروریزش آن شود. حال این سؤال مطرح می‌شود: «انحلال‌پذیری گنبد‌های نمکی چه نقشی در مشخصات مقاومتی خاک دارند؟» نظر به اینکه برخی از نقطه‌های استان هرمزگان و شهرستان بندرلنگه متشکل از خاک‌های گچی و نمکی می‌باشد، بنابراین در پهنه‌هایی که سطح آب‌های زیرزمینی بالا است و به‌ویژه در زمین‌های واقع در سواحل خلیج فارس این موضوع دارای اهمیت می‌باشد و با توجه به نتیجه‌های مطالعه‌های صورت گرفته خاک دارای مشکلاتی چون رمبندگی، واگرایی و انحلال‌پذیری می‌باشد (عفیفی و کردوانی، ۱۳۸۷).

## گنبد‌های نمکی در ایران

گنبد‌های نمکی ناشی از حرکات و بالا آمدن نمک، به‌عنوان برجستگی‌های شکل گرفته توسط فشارها و نیروهای داخلی شناخته می‌شوند. این گنبد‌ها بستگی به نوع سنگ‌های پوششی و فشارهای داخلی دارند و اشکال خارجی متفاوتی دارند. از نظر زمین‌شناسی، گنبد‌های نمکی ساختمان‌های زمین‌شناسی گنبدی هستند، هسته آنها از نمک تشکیل شده است. تغییر شکل این گنبد‌ها از نوع پلاستیکی است و حرکت مواد پلاستیکی باعث ایجاد چین‌ها و دی‌پیرها می‌شود (عباس‌نژاد، ۱۳۶۲). این ساختارها از نیروهای قائم از پایین به بالا تحت تأثیر قرار می‌گیرند و

انگیز نبوده و حتی در کانال‌های با ابعاد کوچک این مقدار تا چند درصد بیشتر (پنج تا هفت درصد) هم قابل قبول است همچنین با ریزتر شدن بافت خاک و کاهش سرعت نفوذ آب، سرعت انحلال گچ نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. بر این اساس خاک‌های درشت بافت‌تر نظیر ماسه در صورت وجود گچ دارای خطر آب‌شستگی بیشتری نسبت به خاک‌های رسی یا رسی سیلتی حاوی گچ می‌باشند البته آب‌گذرنده از داخل کانال (آب رودخانه‌ی ارس) در صورت نشست از کانال، کلوخه‌های گچ را حل کرده به تدریج می‌تواند باعث نشست پوشش و در نتیجه تخریب کانال شود (دبیری و همکاران، ۱۳۹۱).

گستره قرقی در شمال شرق شهر مشهد برای احداث مجتمع‌های مسکونی مناسب است. این گستره بر روی رسوبات حاصل از فرسایش سنگ‌های کپه‌داغ، بیشتر از آهک و ماسه سنگ تشکیل شده، واقع شده است. خاک‌های گچی این گستره دارای گچ بالایی هستند و در صورت نبود بهسازی، ممکن است باعث نشست ساختمان‌ها شوند. واکنش‌های هیدراسیون گچ و آب باعث سفت شدن خاک و در نتیجه خشک و متراکم شدن آن می‌شود. بنابراین، در صورت نبود بهسازی، مقاومت بالای این نوع خاک در حالت خشک ممکن است منجر به شکست و خرابی سازه‌ها شود (قالیباف و همکاران، ۱۳۸۹).

شبکه آبیاری دشت مهبیار در استان اصفهان، در ۳۰ کیلومتری جنوب شهر اصفهان واقع شده و از رودخانه زاینده‌رود آب گرفته و به گستره جرقویه منتقل می‌شود. نفوذ آب از کانال به داخل زمین، باعث فروریزش خاک زیرکانال شده و بخش زیادی از این شبکه بر روی خاک‌های انحلال‌پذیر احداث شده است. نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان دادند، حضور لنزهای گچ ممکن است باعث نشست کانال و ترک‌خوردگی پوشش بتنی آن شود (Rahnema and Mirassi, 2014). خاک‌های انحلال‌پذیر حاوی نمک و در مجاورت گنبد‌های نمکی در سراسر جهان مشکلات زیادی را برای مهندسی عمران فراهم کرده که مهم‌ترین آنها خسارت به سازه‌ها، روسازی جاده‌ها و کف‌سازی‌ها می‌باشد و این خود موجب فراهم آمدن زمینه‌های بهسازی آنها شده است

زمین و پدیده‌های ژئومورفولوژیکی کارستی مانند تشکیل فروچاله‌ها مشکلات رایجی هستند و ممکن است باعث خسارات مالی و جانی شوند. فرونشست به علت گسیختگی در سنگ‌های انحلال‌پذیر در برخی پهنه‌های شهری رخ می‌دهد. گستره‌های شهری به دلیل تراکم جمعیت و وجود ساختمان‌ها، به‌خصوص در معرض فرونشست قرار دارند و ممکن است باعث آسیب‌هایی در زیرساخت‌ها و سازه‌ها شوند. وجود نمک نزدیک به گنبد‌های نمکی، موجب انحلال و خروج نمک و گچ از خاک شده و باعث افزایش تخلخل و نشست خاک می‌شود (کرباسی معروف و همکاران، ۱۴۰۲؛ کمال خدایی و همکاران، ۱۳۹۴).

## روش مطالعه

### پهنه مورد مطالعه

جزیره هرمز، جزیره‌ای بیضی شکل، نوعی گنبد نمکی است به مساحت ۴۲ کیلومتر مربع در ورودی خلیج فارس در هشت کیلومتری بندرعباس است (شکل ۱). این جزیره را به علت موقعیت جغرافیایی آن و مجاورت با تنگه هرمز، کلید خلیج فارس می‌دانند. گنبد نمکی جزیره هرمز در استان هرمزگان واقع است (شکل ۲). جزیره هرمز در حقیقت یک دیپیر نمکی است که در انتهای شرق خلیج فارس و نزدیکی تنگه هرمز قرار گرفته است. گنبد‌های نمکی هرمز اولین بار توسط پیلگریم (۱۹۰۸، ۱۹۲۲ و ۱۹۴۲) شناسایی شدند. سازند هرمز، تشکیلات تبخیری و به‌ویژه نمکی به نسبت ضخیمی است، از جمله‌ی قدیمی‌ترین سنگ‌های تبخیری در ایران به شمار می‌رود (زارعی و رئیسی، ۱۳۹۲). با تحقیقاتی که لیز روی سازند هرمز انجام داده و یافتن تریلوبیت‌های کامبرین میانی در داخل شیله‌ای سازند هرمز، زمین‌شناسان سن نمک‌های هرمز را کامبرین و اینفراکامبرین دانستند (درویش‌زاده، ۱۳۸۲؛ فرخی دودوئی و علی‌پور اصل، ۱۳۹۹). در نمک‌های سازند هرمز، سنگ‌های آتش فشانی متنوع شامل، ریولیت، ایگنیمرت، آندزیت و حتی بازالت و اسپلیت، سنگ‌های رسوبی نظیر دولومیت، ماسه سنگ، شیل، آهک و غیره دیده می‌شود (زارعی و رئیسی، ۱۳۹۲).

گنبد‌های نمکی به دلیل ناپایداری ثقلی لایه‌های با چگالی کمتر توسط سنگ‌های چگال‌تر پوشیده شده‌اند، شکل می‌گیرند (بلوری بزاز و ساجدی، ۱۳۸۳). گنبد‌های نمکی در ایران، به‌خصوص در پهنه خلیج فارس و زاگرس، به دلیل وجود منابع نفت، سولفید پتاس، آهن و نمک، ارزش اقتصادی دارند. عوامل مختلفی برای بالا آمدن گنبد‌های نمکی وجود دارد که شامل نیروهای تکتونیکی، اختلاف چگالی بین نمک و سنگ‌های مجاور، و هر دو پدیده می‌باشد. گنبد‌های نمکی در استان‌های فارس، هرمزگان، خوزستان و سمنان یافت می‌شوند و تأثیرات آنها بر کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی قابل مشاهده است. علت پیدایش گنبد‌های نمکی به پایین بودن وزن مخصوص نمک و حرکت تحت فشار و گرما می‌باشد (اقبالی و جهانشاهی، ۱۳۹۱).

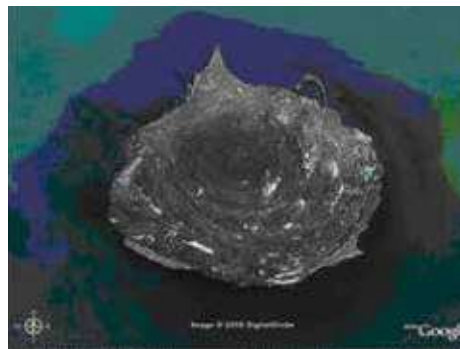
### عارضه‌ها و آسیب‌های ناشی از خاک‌های انحلال‌پذیر

از جمله عارضه‌های ناشی از وجود خاک‌های انحلال‌پذیر، می‌توان به ایجاد پدیده فرونشست، فروچاله، رسوبات تبخیری و گنبد‌های نمکی اشاره کرد. زمانی که سطح آب‌های زیرزمینی بالا باشد و خاک لایه‌های بالایی نیز انحلال‌پذیر باشد، این موضوع موجب انحلال خاک و یا سنگ می‌شود و در صورت کاهش سطح آب زیرزمینی، ناگهان لایه سطحی دچار ریزش خواهند شد، به دنبال آن باعث وارد آمدن صدمات و آسیب‌های قابل توجه به سازه‌ها و اسکلت ساختمان‌های ساخته شده در آن مکان می‌گردد (Mirassi and Rahnema, 2014؛ زندی فر و همکاران، ۱۳۹۸).

سنگ‌های انحلال‌پذیر (سنگ آهک، دولومیت، گچ و نمک)، توسط نهشته‌های تحکیم نیافته مدفون شده‌اند، یا فروچاله‌های کهن پر شده با نهشته‌های تحکیم نیافت که، فشار هیدرواستاتیکی رو به بالا آب زیرزمینی در نگهداری آنها موثر است (زندى فر و همکاران، ۱۳۹۸). کارست‌های نوع فرونشست‌های آنی و سریع، تنها کارست‌های خطرناکی هستند که همیشه باعث مرگ انسان‌ها می‌شوند (Mirassi and Rahnema, 2014؛ زندی فر و همکاران، ۱۳۹۸). در پروژه‌های مهندسی در پهنه‌های کارستی، نشست



شکل ۲. تصویری از گنبدهای نمکی جزیره هرمز



شکل ۱. تصویری ماهواره‌ای از پراکندگی گنبدهای نمکی در جزیره هرمز (عباس‌نژاد، ۱۳۶۲)

### مشاهده‌های صحرایی

۳ تا ۶). ۲- نفوذ آب به خاک‌های نمکی باعث انحلال و فرونشست آنها شده و خسارات در سطح شهر هرمز ایجاد می‌کند. شناسایی و تعیین مشخصات خاک‌های نمکی بسیار دارای اهمیت است و برای طراحی فونداسیون باید آزمایش‌های صحرایی انجام شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد وجود نمک در خاک تا حدود ۳٪ به‌هیچ‌وجه مخاطره‌آمیز نیست و حتی در کانال‌های کوچک مقدار بیشتری (تا ۷٪) هم قابل قبول است (رحیمی و نژادهاشمی، ۱۳۷۸).

با وجود کوه آهکی در نزدیکی جزیره، مردم جزیره هرمز از سنگ آهک به‌عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌کنند. این استفاده جلوگیری از ورود موریانه و حشرات به ساختمان‌ها را هدف قرار داده است، اما سنگ‌آهک‌های استفاده شده دارای دوام کمی هستند و باعث خسارت‌هایی به ساختمان‌ها شده‌اند. خسارات به دلیل وجود خاک‌های انحلال‌پذیر می‌تواند از دو منظر تحلیل شود. ۱- وجود خاک‌های نمکی و شور باعث فرونشست خاک و سطح زیرین آن می‌شود (شکل



شکل ۴. تصویری از خالی شدن زیر فونداسیون ناشی از واگرایی خاک انحلال‌پذیر



شکل ۳. تصویری از ترک‌های دیوار آشپزخانه در خانه‌های جزیره هرمز ناشی از واگرایی خاک گنبدهای نمکی



شکل ۶. خسارت وارده به فونداسیون ساختمان مسکن مهر به علت درصد بالای نمک خاک محل احداث



شکل ۵. تصویری از ترک‌خوردگی دیوار ساختمان‌های مسکونی جزیره در اثر فرونشست خاک زیر پی

## عملیات صحرایی و نمونه برداری

بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی، گنبد‌های نمکی در جزیره هرمز در عمق متوسط چهار متری از سطح زمین طبیعی قرار دارد، ترکیب اصلی آن‌ها کلرور سدیم (در حدود ۹۶ درصد) می‌باشد، در صورت بالآمدگی آب دریا خطر انحلال و آب‌شستگی وجود دارد و در این صورت هر نوع سازه‌ای را در زمان بهره‌برداری با مشکل شدید سازه‌ای مواجه خواهد ساخت (قالیباف و همکاران، ۱۳۸۹).

در این مقاله، دو نقطه از شهر هرمز که بر اساس شواهد عینی ساختمان‌های مجاور آن دچار آسیب شده و یا جزو اراضی جدید توسعه شهر منظور شده است، با فاصله تقریبی ۱۵۰۰ متر به‌عنوان محل نمونه‌برداری انتخاب شد. محل ذکر شده برای گمانه‌زنی بر روی نقشه شکل ۹ مشخص شده است. محل گمانه شماره یک در بخش جنوب غربی شهر هرمز در محله صحرا (یکی از محله‌های قدیمی و دارای آسیب‌های زیاد جزیره است) در نزدیکی مکتب‌خانه قدیم و در جنوب مسجد امام حسن واقع شده است. محل گمانه شماره دو در بخش شرقی شهر هرمز در مجاورت محل احداث مجتمع مسکونی مهر و اراضی تفکیکی شهرداری (توسعه مسکونی شهر به آن سمت می‌باشد) می‌باشد (شکل ۷).



شکل ۷. محل انتخاب گمانه‌ها بر روی نقشه هوایی

به‌منظور نمونه‌برداری از نقطه‌های تعیین شده اقدام به حفر گمانه دستی شد. در گمانه شماره یک سطح آب زیرزمینی در عمق ۶/۳۰ متر از سطح محل حفر گمانه قرار داشته است. در این گمانه دو نمونه (نمونه خاک به شماره ۵۹۲۸ از عمق ۱/۵۰ متری و نمونه سنگ بستر به شماره ۵۹۲۹ از عمق ۶/۳۰ متری) تهیه شد. در گمانه شماره دو

با عنایت به موقعیت آن که در فاصله کمتری از ساحل قرار داشت، حفاری در عمق ۴/۱۰ متر به سطح آب زیرزمینی رسید. در این گمانه سه نمونه (نمونه خاک به شماره ۵۹۳۰ از عمق یک متری سطح محل حفر گمانه و نمونه سنگ آهکی به شماره ۵۹۳۱ از عمق ۲/۵ متری و همچنین نمونه سنگ بستر به شماره ۵۹۳۲ از عمق ۴/۱۰ متری) انتخاب شد. علاوه بر این لازم به ذکر است که نمونه‌های خاک طبیعی حاصل از گمانه BH از گمانه دستی به عمق پنج متری از سطح طبیعی زمین برداشته شد.

## بحث

با توجه به اینکه گستره مورد مطالعه در مجاورت گنبد‌های نمکی جزیره هرمز می‌باشد و در آینده برای احداث مجتمع‌های مسکونی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین، بررسی و شناسایی خاک به دلیل شرایط ویژه ژئوتکنیکی پهنه برای جلوگیری از بروز خسارات احتمالی، بیش از هر عامل دیگری ضروری به نظر می‌رسید. به همین منظور اقدام به حفر تعدادی گمانه ژئوتکنیکی شد. پس از انجام مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک، مشکلات مختلف خاک گستره مورد مطالعه به لحاظ مقادیر مقاومتی خاک، درصد نمک، چسبندگی و غیره ارزیابی شده است.

خاک‌های انحلال‌پذیر نمکی به علت وجود ذرات نمک فراوان به‌طور معمول پوک است و وزن مخصوص طبیعی بسیار کمی نیز برای آنها گزارش شده است. بنابراین خاک‌های نمکی که نمک بالایی داشته و در نتیجه دارای وزن مخصوص کم هستند، اگر بهسازی نشوند، نشست فونداسیون زیر ساختمان را به دنبال خواهند داشت و اگر متراکم شوند و یا هنگام متراکم کردن به آنها آهک افزوده شود، تورم را به همراه دارند. تاکنون راه‌حل‌های مختلفی برای رفع مشکل بالا پیشنهاد شده است که به دلیل نبود پیشینه تاریخی اجرایی آنها نیاز به تحقیق‌های وسیعی دارند. بیشتر این راه‌حل‌ها گران هستند و اگر قبل از استفاده در محل به‌طور دقیق ارزیابی نشوند، زیان آنها می‌تواند بیشتر باشد. از این‌رو در این بخش از طریق آزمایش‌های مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی ویژگی‌های مختلف خاک در مجاورت گنبد‌های نمکی جزیره هرمز مورد مطالعه قرار گرفته است.

لای دار با دانه بندی بد و یکنواخت (SP-SM) می باشد. پس از ارائه نتیجه های آزمایش دانه بندی و هیدرومتری، در ادامه، نتیجه های آزمایش های تعیین مشخصات عمومی شامل ویژگی های مکانیکی و آنالیز شیمیایی نمونه های مورد آزمایش، ارائه شده است (جدول ۱). ویژگی های مکانیکی و همچنین آنالیز شیمیایی نمونه های انتخابی از خاک های به دست آمده از گمانه های اکتشافی تعیین و به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در طی فرآیند انجام آزمایش ها، شرایط محیطی آزمایشگاه مطابق شرایط استاندارد و در دمای ۲۲ درجه سانتی گراد و رطوبت ۵۳ درصد است.

بر اساس جدول ۱ هر دو نوع خاک در مقادیر حد روانی، شاخص خمیری، وزن مخصوص و درصد رطوبتی مشابه می باشد. آنالیز شیمیایی نمونه های خاک و سنگ بستر در جدول ۲ نشان می دهد درصد نمک در مقایسه با درصد کلرور و سولفات به شکل چشمگیری زیاد می باشد به نحوی که درصد نمک در خاک گمانه کم و بیش ۱۵٪ می باشد و بیشترین درصد نمک مربوط به سنگ نمکی BH2 با درصد ۱۸/۸ می باشد.

به بیان دیگر، خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک های انحلال پذیر مجاور گندهای نمکی جزیره هرمز در مقایسه با نمونه خاک طبیعی با انجام آزمایش های مختلف بر روی نمونه ها ارزیابی و تعیین شده است.

### آزمایش های تعیین ویژگی های خاک

اولین آزمایش انجام شده برای شناسایی اسم و ماهیت خاک آزمایش دانه بندی و آزمایش هیدرومتری است. هدف از آزمایش دانه بندی خاک، تعیین توزیع دانه های خاک در اندازه های مختلف می باشد تا بر اساس اندازه دانه ها، خاک طبقه بندی و تشریح شود. بر این اساس از نمونه های به دست آمده از خاک محل ساختگاه و دو گمانه حفاری شده BH1 و BH2، برای تعیین نوع خاک و پارامترهای مرتبط به دانه بندی اقدام به انجام آزمایش الک به روش ASTM D422 و در ادامه برای تکمیل دانه بندی، آزمایش هیدرومتری به روش ASTM D422 به عمل آمد. بر اساس نتایج حاصله از آزمایش دانه بندی و هیدرومتری بر روی نمونه های خاک هر دو گمانه بر اساس طبقه بندی یونیفاید مشخص شد که نمونه خاک مورد مطالعه در گمانه BH1 از نوع ماسه لای دار (SM) و در گمانه BH2 از نوع ماسه

جدول ۱. ویژگی های مکانیکی نمونه خاک های به دست آمده از گمانه های اکتشافی

شماره گمانه	طبقه بندی یونیفاید	حد روانی (%)	شاخص خمیری (%)	وزن مخصوص طبیعی (gr/cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص خشک (gr/cm <sup>3</sup> )	درصد رطوبت (%)	عمق گمانه (متر)	نشانه تورم آزاد (%)
BH1	SM	۳۳ الی ۳۵	۸/۳	۱/۵۴	۱/۴۱	۹	۶/۳	۴/۶ الی ۴/۸
BH2	SP-SM	۳۰	۹/۳	۱/۶	۱/۴۶	۹/۵	۵	۴/۶

جدول ۲. آنالیز شیمیایی نمونه های انتخابی

شماره نمونه	عمق نمونه (متر)	مشخصات نمونه	نوع آزمون	درصد کلرورها	سولفات قابل حل در آب (SO <sub>3</sub> (%))	درصد نمک	PH	مواد آلی خاک
۱	۵۹۲۸	۱/۵	شماره استاندارد	B.S 1377	B.S 1377	B.S 1377	B.S 1377	ASTM-C40
۲	۵۹۲۹	۶/۳	خاک گمانه BH1	۰/۰۱	۰/۱۸	۱۴/۱۴۳	۸/۹۳	-
۳	۵۹۳۰	۱/۰۰	سنگ بستر گمانه BH1	۰/۰۱	۰/۰۵	۷/۵۶	۸/۲۹	-
۴	۵۹۳۱	۲/۵	خاک گمانه BH2	۱/۹۵	۰/۱۴	۱۵/۵۴	۸/۰۷	-
۵	۵۹۳۲	۴/۱	سنگ آهکی گمانه BH2	۱/۰۹	۰/۲۲	۹/۹۵۱	۷/۰۲	-
			سنگ نمکی گمانه BH2	۱/۵۰	۱/۴۷	۱۸/۸۹۷	۸/۰۳	-

آن با ذرات خاک باعث کاهش وزن مخصوص خشک شده است. با توجه سفت شدن نمونه‌ها در طی فرآیند آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که واکنش‌های هیدراسیون نمک و آب به مرور زمان باعث سفت شدن مخلوط خاک و در نتیجه باعث خشک و متراکم شدن خاک پهنه شده است. به بیان دیگر وجود مقاومت بالای این نوع خاک در حالت خشک، در صورت نبود بهسازی، طرح را به اشتباه انداخته و در نهایت منجر به شکست و خرابی سازه و فونداسیون زیر آن می‌شود. برای تعیین حد روانی<sup>۱</sup> (LL)، حد خمیری<sup>۲</sup> (PL) و دامنه خمیری<sup>۳</sup> (PI) خاک از آزمایش اتربرگ استفاده شده است. حدود اتربرگ از شاخص‌های مهم شناسایی و توصیف خاک می‌باشد. بر اساس نتایج این آزمایش و آزمایش دانه‌بندی، طبقه‌بندی خاک (روش Unified) صورت می‌گیرد. به منظور تعیین مقادیر حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های حاصل از حفاری‌های ژئوتکنیکی در گمانه BH1 و BH2 به ترتیب حاوی ۱۴/۱۴۳ و ۱۵/۵۴ درصد نمک، آزمایش تعیین حدود اتربرگ مطابق استاندارد ASTM D4318، انجام شد. لازم به ذکر است که نتیجه‌های حاصل از این نمونه‌ها برای مقایسه با یک نوع نمونه خاک طبیعی بدون درصد نمک آمده است. نتیجه‌های مربوط به این آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

مطابق جدول‌های ۱ و ۲، برای بررسی خواص نمکی اقدام به حفر گمانه‌های اکتشافی در پهنه شد. عمق نمونه‌گیری، پس از برداشت خاک سطحی، در گمانه BH1 از عمق ۱/۵ تا ۶/۳ متری و در گمانه BH2 از عمق یک تا ۴/۱ متری است. با وجود این حقیقت، خاک‌های موجود در گنبد‌های نمکی تراکم‌پذیر هستند، اما به هنگام تماس با آب متورم شده و گاهی درصد تورم به ۱۵ درصد طول نمونه نیز می‌رسد. با توجه به اینکه نمک موجود در نمونه‌های مورد آزمایش طبیعی است، اندازه‌گیری چگالی نمک در خاک به‌عنوان یک ماده ممکن نبود. بنابراین، چگالی ویژه نمونه‌های آزمایشی کاهش یافته است. اگرچه تغییرات چگالی ویژه با افزایش میزان نمک تا حدود ۲۰ درصد بسیار اندک و حداکثر تا ۰/۱۵ می‌باشد، اما با توجه به شکل نشانه خمیری و وزن مخصوص خشک خاک مورد آزمایش نیز با افزایش مقدار نمک کاهش می‌یابد، بیانگر تاثیرپذیری خاصیت خمیری خاک از میزان نمک است. به نظر می‌رسد علت این موضوع، درصدی از ذرات نمک به‌طور معمول با چگالی ۲/۰۲ به‌جای ذرات خاک با چگالی ۲/۷۲ قرار گرفته‌اند؛ بنابراین وزن مخصوص خشک مخلوط کاهش می‌یابد. همچنین چون نمک برای هیدراسیون به آب نیاز دارد، وجود آب بیشتر در اثر بارش‌های سالانه و جایگزینی

جدول ۳. مقادیر حدود اتربرگ نمونه‌های حاصل از حفاری در گمانه‌های مختلف با درصد‌های مختلف نمک

ردیف	مشخصات نمونه	درصد نمک	حدود اتربرگ		
			LL	PL	PI
۱	نمونه خاک طبیعی بدون نمک	۰	۳۶	۱۶	۲۰
۲	نمونه خاک گمانه BH1	۱۴/۱۴۳	۲۶	۱۳	۱۳
۳	نمونه خاک گمانه BH2	۱۵/۵۴	۲۵	۱۱	۱۴

BH2 به ترتیب ۶۵ و ۷۰ درصد نسبت به نمونه خاک طبیعی کاهش یافته است.

مطابق جدول فوق، می‌توان دریافت، وجود ۱۴/۱۴۳ و ۱۵/۵۴ درصد نمک در نمونه خاک حاصل از گمانه‌های BH1 و BH2 در مقایسه با نمونه خاک طبیعی بدون نمک، باعث کاهش شدید دامنه خمیری شده است. بر این اساس می‌توان دریافت، دامنه خمیری نمونه خاک گمانه BH1 و

1. Liquid Limit  
2. Plastic Limit  
3. Plasticity Index



## تأثیر نمک بر درصد رطوبت خاک

در بسیاری از خاک‌ها، درصد رطوبت طبیعی یکی از خواص فیزیکی مهم خاک می‌باشد. به‌منظور تعیین درصد رطوبت خاک گستره و نمونه‌های خاک بر روی دو نمونه خاک حاصل از حفاری‌های ژئوتکنیکی از گمانه‌های BH1 و BH2 به ترتیب با ۱۴/۱۴۳ و ۱۵/۵۴ درصد نمک مطابق با استاندارد ASTM D2216 و در مدت زمان‌های مختلف عمل‌آوری هفت، ۲۸ و ۵۶ روزه انجام شد. نتیجه‌های حاصل از این آزمایش در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. تغییرات درصد رطوبت بر اساس درصد نمک و مدت زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های حاصل از آزمایش مقاومت فشاری

ردیف	مشخصات نمونه	درصد نمک	رطوبت (%)		
			عمل‌آوری ۷ روزه	عمل‌آوری ۲۸ روزه	عمل‌آوری ۵۶ روزه
۱	نمونه خاک طبیعی بدون نمک	۰	۲	۴	۷
۲	نمونه خاک گمانه BH1	۱۴/۱۴۳	۱۷	۲۱	۱۹
۳	نمونه خاک گمانه BH2	۱۵/۵۴	۱۹	۲۲	۱۸

## آزمایش تراکم

برای تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر خاک و رطوبت بهینه بر روی نمونه خاک طبیعی و نمونه خاک‌های حاوی ۱۴/۱۴۳ و ۱۵/۵۴ درصد نمک حاصل از حفاری‌های ژئوتکنیکی در گمانه‌های BH1 و BH2، آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D698 بر روی نمونه خاک طبیعی و نمونه‌های با درصدهای متفاوت نمک حاصل از گمانه‌های BH1 و BH2 انجام شد. بر اساس

نتیجه‌های به دست آمده از جدول ۵، مشاهده می‌شود که وجود نمک در نمونه‌های حاصل از گمانه‌ها، میزان دانسیته خشک حداکثر خاک‌های انحلال‌پذیر را نسبت به خاک طبیعی، با کاهش قابل ملاحظه‌ای روبرو شده است. علاوه بر این نتیجه‌ها حاکی از آن است که وجود نمک باعث افزایش درصد رطوبت بهینه نمونه‌های خاک حاوی نمک در مقایسه با نمونه خاک طبیعی شده است.

جدول ۵. مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک نمونه خاک طبیعی و نمونه‌های حاوی نمک با درصدهای مختلف نمک حاصل از گمانه‌ها

ردیف	مشخصات نمونه	درصد نمک	رطوبت بهینه (%)	دانسیته خشک حداکثر (گرم بر سانتیمتر مکعب)
۱	نمونه خاک طبیعی بدون نمک	۰	۱۹	۱/۷۶
۲	نمونه خاک گمانه BH1	۱۴/۱۴۳	۲۳	۱/۶۳
۳	نمونه خاک گمانه BH2	۱۵/۵۴	۲۲	۱/۶۱

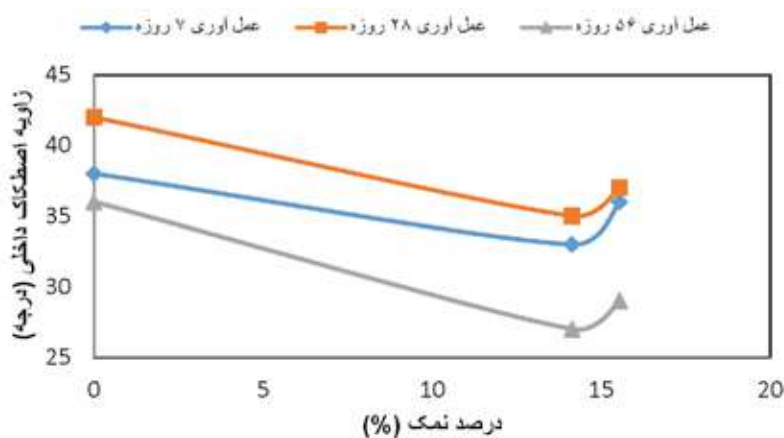
## آزمایش برش مستقیم

نمک در جدول ۶ و شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. بر اساس نتیجه‌های به دست آمده می‌توان دریافت، با گذشت زمان عمل‌آوری، در تمامی نمونه‌ها، ابتدا پارامترهای مقاومتی خاک (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) کاهش می‌دهد، وجود نمک، باعث کاهش پارامترهای مقاومتی خاک شده است. این کاهش در پارامتر چسبندگی نمونه‌های حاوی نمک در مقایسه با نمونه خاک طبیعی بدون نمک، واضح‌تر می‌باشد. لازم به ذکر است که در تمامی موارد و در تمام زمان‌های مختلف عمل‌آوری، وجود نمک منجر به کاهش پارامترهای مقاومتی نمونه‌های حاوی نمک حاصل از گمانه‌های BH1 و BH2 در مقایسه با نمونه خاک طبیعی شده است.

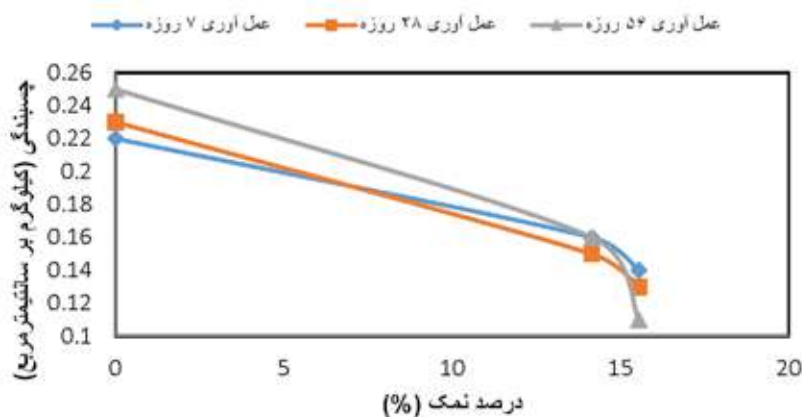
برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک پهنه مورد مطالعه، آزمایش برش مستقیم مطابق استاندارد ASTM D3080 بر روی نمونه‌های دست‌خورده با قالب ۱۰ در ۱۰ سانتیمتر مربع انجام پذیرفت. از آنجایی که مقادیر تنش قائم برای هر آزمایش باید متناسب با فشار سربار باشد، این آزمایش بر روی نمونه خاک طبیعی و همچنین نمونه‌های خاک حاوی نمک حاصل از گمانه‌های BH1 و BH2 و برای روزهای عمل‌آوری هفت، ۲۸ و ۵۶ روزه، با سه تنش قائم متفاوت (۰/۵، یک و دو کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) انجام شد. نتیجه‌های تغییرهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مختلف خاک طبیعی و حاوی نمک حاصل از گمانه‌های BH1 و BH2 با درصد‌های مختلف

جدول ۶. پارامترهای حاصله از آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه خاک طبیعی و نمونه‌های انحلال‌پذیر حاوی نمک

ردیف	مشخصات نمونه	درصد نمک	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)			چسبندگی (kg/cm <sup>2</sup> )		
			عمل‌آوری ۷ روزه	عمل‌آوری ۲۸ روزه	عمل‌آوری ۵۶ روزه	عمل‌آوری ۷ روزه	عمل‌آوری ۲۸ روزه	عمل‌آوری ۵۶ روزه
۱	نمونه خاک طبیعی بدون نمک	۰	۳۸	۴۲	۳۶	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۵
۲	نمونه خاک گمانه BH1	۱۴/۱۴۳	۳۳	۳۵	۲۷	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶
۳	نمونه خاک گمانه BH2	۱۵/۵۴	۳۶	۳۷	۲۹	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۱



شکل ۸. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصد‌های مختلف نمک بر روی نمونه خاک طبیعی و نمونه‌های خاک انحلال‌پذیر حاوی نمک و در زمان‌های عمل‌آوری هفت، ۲۸ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم



شکل ۹. تغییرات چسبندگی با درصدهای مختلف نمک بر روی نمونه خاک طبیعی و نمونه‌های خاک انحلال پذیر حاوی نمک و در زمان‌های عمل‌آوری هفت، ۲۸ و ۵۶ روزه در آزمایش برش مستقیم

در ادامه نتیجه‌های مربوط به آزمایش مشخصات و حفاری‌های ژئوتکنیکی در محل پروژه، به صورت میانگین در پارامترهای مقاومتی نمونه‌های مورد آزمایش حاصل از جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۷. پارامترهای مکانیکی خاک در نمونه‌های حاصل از حفاری

نمونه خاک BH2	نمونه خاک BH1	نمونه خاک طبیعی	پارامترهای مکانیکی خاک
۳۸	۳۲	۳۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۰/۱۳	۰/۱۵۷	۰/۲۳	چسبندگی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)
۱/۹۳	۱/۸۹	۲/۰۵	وزن مخصوص طبیعی خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۲۵۰	۲۳۳	۳۴۰	مدول الاستیسیته خاک (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)
۰/۲۸	۰/۳	۰/۳۱	نسبت پواسون

استفاده می‌شود، اما در صورت وجود بافت‌های ریزدانه در خاک، ممکن است به طور ناقص عمل کند.

#### تثبیت خاک

افزودن آهک، باعث کاهش نشست خاک می‌شود و با افزایش درصد آهک، زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش مقدار آهک، وزن مخصوص خشک و نشانه خمیری خاک‌های انحلال‌پذیر نمکی کاهش می‌یابد. یکی از راه‌حل‌های مناسب برای کم کردن مشکلات خاک‌های انحلال‌پذیر رسی و حاوی نمک تثبیت شده با آهک، اضافه کردن خاک دانه‌ای به این نوع خاک‌ها می‌باشد.

#### استفاده از لایه‌های ژئوسنتیک و ژئوممبرین

استفاده از مواد ژئوسنتیک در مهندسی عمران، به ویژه در ژئوتکنیک و مهندسی هیدرولیک، امروزه بسیار مهم است. این مواد به عنوان راهکارهای موثر برای حل مشکلات

#### راهکارهای پیشنهادی برای کنترل انحلال‌پذیری

##### خاک‌های مجاور گنبد‌های نمکی جزیره هرمز

در این بخش از پژوهش به ارائه راهکارهایی برای کاهش انحلال‌پذیری این نوع خاک‌های نمکی برای جلوگیری از بروز خسارت به سازه‌های واقع بر روی این دسته از خاک‌ها در پهنه مورد مطالعه پرداخته شده است.

#### تعویض و ترمیم خاک

تعویض خاک ممکن است برای لایه‌های نازک و سازه‌های کوچک مناسب باشد، اما هزینه‌ی بالای آن در پروژه‌های وسیع مقرون به صرفه نیست. حذف خاک موجود و جایگزینی آن با خاک مناسب و با تراکم بالا، روش مطمئن‌تری برای حل مشکلات خاک می‌باشد. ترمیم خاک ممکن است برای سازه‌های سبک و یا جلوگیری از نشست پی سازه استفاده شود. روش تزریق نیز برای تقویت بخش‌های ضعیف خاک

BH2، بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید در نمونه خاک گمانه BH1 از نوع ماسه لای‌دار (SM) و در گمانه BH2 از نوع ماسه لای‌دار با دانه‌بندی بد و یکنواخت (SP-SM) می‌باشد. نتیجه‌ها نشان دادند با اینکه خاک‌های موجود در گنبد‌های نمکی تراکم‌پذیر هستند، اما به هنگام تماس با آب متورم شده و گاهی درصد تورم به ۱۵ درصد طول نمونه نیز می‌رسد. همچنین نشانه خمیری و وزن مخصوص خشک خاک مورد آزمایش نیز با افزایش مقدار نمک کاهش می‌یابد، بیانگر تاثیرپذیری خاصیت خمیری خاک از میزان نمک است.

با توجه سفت شدن نمونه‌ها در طی فرآیند آزمایش در نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت، واکنش‌های هیدراسیون نمک و آب به مرور زمان باعث سفت شدن مخلوط خاک و در نتیجه باعث خشک و متراکم شدن خاک پهنه شده است. به بیان دیگر وجود مقاومت‌های بالای این نوع خاک در حالت خشک، طراح را به اشتباه می‌اندازد و در نهایت منجر به شکست و خرابی سازه و فونداسیون زیر آن می‌شود.

نتیجه‌های آزمایش تراکم نشان داد، وجود ۱۴/۱۴۳ و ۱۵/۵۴ درصد نمک در نمونه خاک حاصل از گمانه‌های BH1 و BH2 در مقایسه با نمونه خاک طبیعی بدون نمک، باعث کاهش شدید دامنه خمیری شده است. بر این اساس می‌توان دریافت که دامنه خمیری نمونه خاک گمانه BH1 و BH2 به ترتیب ۶۵ و ۷۰ درصد نسبت به نمونه خاک طبیعی کاهش یافته است.

نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک نشان داد، وجود نمک در نمونه‌های خاک، باعث افزایش درصد رطوبت نسبت به رطوبت خاک طبیعی شده است. این میزان افزایش درصد رطوبت نمونه‌های حاوی نمک در طی مدت زمان عمل‌آوری هفت، ۲۸ و ۵۶ روزه، به ترتیب در نمونه اول (BH1) برابر با ۸۵، ۵۲/۵ و ۲۷ درصد و همچنین در نمونه دوم (BH2) برابر با ۹۵، ۵۵ و ۲۶ درصد است.

نتیجه‌های آزمایش تعیین درصد رطوبت نشان داد وجود نمک در نمونه‌های حاصل از گمانه‌ها، میزان دانسیته خشک حداکثر خاک‌های انحلال پذیر را نسبت به خاک

خاک‌های انحلال‌پذیر در مجاورت گنبد‌های نمکی و زیر پی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ژئوممبرین‌ها از رسیدن آب به اطرافیان و جلوگیری از شستشوی خاک‌های انحلال‌پذیر نمکی و ناپایداری شیب‌ها و مقاطع نمکی جلوگیری می‌کنند. این مواد همچنین از شکستن لاینینگ کانال و سایر مشکلات زیر فونداسیون سازه‌ها جلوگیری می‌کنند.

### شمع‌گذاری

در مواجهه با خاک‌های انحلال‌پذیر نمکی، یکی از راه‌حل‌های مهم برای مهندسین ژئوتکنیک، استفاده از شمع و ریزشمع برای انتقال بار از لایه‌های سست به لایه‌های مقاوم است. این روش بار وارده از سازه‌های فوقانی را به لایه‌های مناسب‌تر در بستر انتقال می‌دهد. استفاده از این روش در سازه‌های متمرکز بر روی خاک‌های انحلال‌پذیر نمکی مناسب است، اما در پروژه‌های خطی مانند کانال‌های انتقال آب از نظر اقتصادی ممکن است مناسب نباشد.

### ایجاد زهکشی و هدایت آب‌های سطحی مجاور

این روش‌ها شامل جلوگیری از نفوذ و دسترسی آب به لایه‌های مختلف خاک، آب‌بندی در گستره‌های کارستی، استفاده از پرده‌های تزریق برای کنترل تراوش و نشت در پی و دیواره‌های سازه‌ها در گستره‌های کارستی می‌شود. این روش‌ها نیازمند روش‌های خاص برای اجرا هستند و باید به‌دقت اجرا شوند.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی میزان انحلال‌پذیری و مشخصات مقاومتی خاک‌های پهنه‌های واقع در مجاورت گنبد‌های نمکی جزیره هرمز پرداخته شده است. مشخصات مقاومتی و انحلال‌پذیری حاصل از نتیجه‌های آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی، فنی و مکانیکی که طریق حفر گمانه‌ها و نمونه‌برداری انجام پذیرفته است را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

نتیجه‌های حاصل از آزمایش دانه‌بندی خاک در پهنه مورد مطالعه نشان داد که از نمونه‌های به دست آمده از خاک محل ساختگاه و در دو گمانه حفاری شده BH1 و

در خاک بستر کانال بتنی انتقال آب خدا آفرین، پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور، کرمان.

- درویش زاده، ع.، ۱۳۸۲. زمین شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، ۴۳۴-۱.

- رحیمی، ح. و نژادهاشمی، ا.، ۱۳۷۸. بررسی اثر آشوبی بر تحکیم پذیری خاک‌های گچی. مجله علوم کشاورزی ایران، دانشکده فنی، ۲، ۲، (۳)، ۲-۲۱.

- زارعی، م. و رئیسی، ع.، ۱۳۹۲. برآورد نرخ انحلال گنبد‌های نمکی در جنوب ایران. گنبد نمکی کنارسایه فیروزآباد. زمین شناسی ایران، ۷(۲۶)، ۴۵-۵۵.

- زندی فر، س.، نعیمی، م. و ابراهیمی خوسفی، ز.، ۱۳۹۸. اثر یویایی ساختاری گنبد نمکی بر شوری اراضی پیرامون آن. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، (۱) ۲۷، ۱۴۴-۱۵۸.

- سلحشور، ج. و زمانی، م.، ۱۳۹۳. بررسی نقش مدیریت بحران در پروژه‌های عمرانی مدیریت بحران نشست زمین در منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی ماهشهر، اولین همایش ملی عمران، معماری و توسعه پایدار، یزد.

- صفویان، م. و رضایی، م.، ۱۳۸۹. بررسی مشکلات احداث کانال‌های انتقال آب بر روی خاک‌های گچ‌دار- مطالعه موردی شبکه آبیاری دشت مهبیار. دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی.

- عباس نژاد، ا.، ۱۳۶۲. بررسی آب‌های زیرزمینی منطقه هرمزگان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، ۱-۱۴۲.

- عقیفی، م. ا. و کردوانی، پ.، ۱۳۸۷. گنبد‌های نمکی بستک هرمزگان و تاثیر آن بر منابع آب و خاک. جغرافیایی سرزمین، ۵، ۲، (۱۸)، ۷۰-۵۵.

- فخری دودوئی، ع. و علی پوراصل، م.، ۱۳۹۹. کانی‌شناسی، ژئوشیمی، میانبار سیال و ژنز کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت در جنوب غرب جزیره هرمز، ایران، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۴، (۵۶)، ۱-۱۹.

- قالیباف، ح.، بلوری بزاز، ج. و باقرپور مقدم، ا.، ۱۳۸۹. بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های گچی شمال شرق مشهد و راهکارهای بهسازی آن. مقاله ۴۱۳، چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران.

- کارگر، س.، رحیمی، ح. و رئیسی، ع.، ۱۳۸۷.

طبیعی، با کاهش قابل ملاحظه‌ای روبرو نموده است. علاوه بر این نتیجه‌ها حاکی از آن است، وجود نمک باعث افزایش درصد رطوبت بهینه نمونه‌های خاک حاوی نمک در مقایسه با نمونه خاک طبیعی شده است.

نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش برش مستقیم نشان داده است، با گذشت زمان عمل‌آوری، در تمامی نمونه‌ها، ابتدا پارامترهای مقاومتی خاک (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) کاهش و سپس افزایش یافته است. همچنین نتیجه‌ها نشان می‌دهد، وجود نمک، باعث کاهش پارامترهای مقاومتی خاک شده است. این کاهش در پارامتر چسبندگی نمونه‌های حاوی نمک در مقایسه با نمونه خاک طبیعی بدون نمک، نمایان‌تر می‌باشد. لازم به ذکر است که در تمامی موارد و در تمام زمان‌های مختلف عمل‌آوری، وجود نمک منجر به کاهش پارامترهای مقاومتی نمونه‌های حاوی نمک حاصل از گمانه‌های BH1 و BH2 در مقایسه با نمونه خاک طبیعی شده است.

## منابع

- اقبالی، م.، مقدم، ف. و جهانشاهی، م.، ۱۳۹۱. بررسی فنی و اقتصادی احداث خاکریزها با خاک مسئله دار-مطالعه موردی ناحیه دو رامهرمز، سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی.

- بلوری بزاز، ج. و ساجدی، ک.، ۱۳۸۳. رفتار خاک‌های گچی و اثرات سیکل‌های تر و خشک شدن و بارگذاری و باربرداری بر خواص آنها، مجله دانشکده فنی تهران، ۳، ۳۶، ۱-۱۳.

- خاکسار نجفی، ا.، اسلامی، ا. و چگینی، ا.، ۱۳۸۹. بررسی صدمات حاصل از اندرکنش آب و خاک بر روی ابنیه فنی و شیوه بهینه کنترل آن. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

- خدایی، ک.، ناصری، ح.، اکبر شهسواری، ع.، هاتفی، ر. و اسدیان، ف.، ۱۳۹۴. تعیین عوامل موثر بر کیفیت و آلودگی آب زیرزمینی دشت دز فول-اندیمشک با استفاده از روش تحلیل عاملی، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۹(۳۴)، ۱-۱۸.

- دبیری، ر.، مهاری، ر. و صهبافر، ن.، ۱۳۹۱. کاربرد لایه ژئوسنتتیک برای مقابله با خطر انحلال گچ

and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosi Basin, Mexico. *J. Hydrology*, 261, 2447.

- Mirassi, S. and Rahnema, H., 2020. Deep cavity detection using propagation of seismic waves in homogenous half-space and layered soil media. *Asian J Civ Eng*, 21, 1431-1441.

- Rahnema, H. and Mirasi, S., 2012. Seismic and geotechnical study of land subsidence and vulnerability of rural buildings. *International Journal of Geosciences*, 3(04), 878.

- Rahnema, H. and Mirassi, S., 2014. Crisis management concerning underground water falling and land subsidence occurrence in the plains of Iran. *Advances in Environmental Biology*, 1453-1466.

بررسی اثر گچ بر برخی خصوصیات خاک‌های رسی. اولین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی.

- کرباسی معروف، م.، ناصری، ح. و علیجانی، ف.، ۱۴۰۲. نشت آب و تاثیر انحلال در پایداری سد بار نیشابور، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۷، (۶۵)، ۱۹-۳۲.

- Azma, S. and Abduljawwad, S. N., 2000. Influence of Gypsification on Engineering Behavior of Expansive Clay, *journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126, 6.

- Banks, D., Reimann, C. and Skarphagen, H., 1998. The comparative hydrochemistry of two granitic island aquifers: The Isles of Stilly, UK and the Hvaler Islands, Norway. *The Science of the Total Environment*, 209, 169183.

- Carrilla-Rivera, J. J., Cardona, A. and Edmunds, W. M., 2002. Use of abstraction regime