

ارزیابی زمین شناسی مهندسی و پهنه بندی ظرفیت باربری خاک های گچ دار سازند گچساران با استفاده از نتایج آزمون SPT، محدوده پتروشیمی مسجدسلیمان

محمدحسین جوکار^۱، ماشاله خامه چیان^{۲*}، محمدرضا نیکودل^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

چکیده

خاک های گچی چالش برانگیزترین و پیچیده ترین عضو خانواده خاک های مسئله دار می باشند که اطلاعات در خصوص رفتار مهندسی آن ها با توجه به محدودیت های پژوهش در زمینه آن ها، در مقایسه با بقیه بسیار کم است. بنابراین در این پژوهش، جهت رفع این محدودیت ها در گام اول با استفاده از نتایج آزمایش SPT در بالغ بر ۸۰ گمانه حفر شده در پتروشیمی مسجدسلیمان، نقشه های پهنه بندی ظرفیت باربری در حدفاصل عمق های هر ۱/۵ متر تا سطح آب زیرزمینی تهیه و با نقشه های سطح و جهت آب زیرزمینی حاصل از آزمایش عمق یاب با سنسور الکتریکی و نقشه کارست های گچی (حاصل تلفیق روش های ژئوفیزیکی (GPR) و ژئوتکنیکی (گمانه ها)) مقایسه گردید. تا بر اساس آن ها بتوان به نوعی پیش آگاهی در خصوص شرایط پهنه های مختلف منطقه دست یافت و همچنین نوعی دورنما از نقاط مستعد برای اجرای پروژه را ارائه کرد. در گام دوم با انجام آزمایش های مکانیک خاک به صورت آزمایشگاهی و برجا (شامل ۶ مورد PLT در شرایط خشک و اشباع)، و تلفیق آن با شرایط زمین شناسی و ساختگاه سازه های حساس پتروشیمی، محدوده مورد مطالعه به دو قسمت مجزا تقسیم و برای هر کدام ظرفیت باربری مجزا پی های منفرد و گسترده (با توجه به مقاومت برشی خاک) محاسبه گردید. با توجه به نتایج آزمون SPT، یکنواختی تقریبی در بافت لایه های زیرسطحی و تلفیق نقشه های پهنه بندی ظرفیت باربری با نقشه کارست های گچی در اعماق مختلف، تغییرات ظرفیت باربری را می توان به وجود میان لایه هایی با مقاومت پایین، انحلال و آبشویی گچ (تحت تأثیر نفوذ آب سطحی و تغییرات آب زیرزمینی) و در نهایت تشکیل کارست های گچی در طول زمان انسانی (به عنوان مشکل اصلی منطقه) نسبت داد.

کلیدواژه ها: ظرفیت باربری، خاک های گچی، پتروشیمی مسجدسلیمان، آزمون SPT، سازند گچساران

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. استاد گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، *khamechm@modares.ac.ir

۳. استاد گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۱. مقدمه

خاک‌های گچی در سراسر جهان در اقلیم خشک و نیمه‌خشک گسترده شده‌اند به طوری که حدود ۱/۵ درصد (حدود ۱۸۶ تا ۲۰۷ میلیون هکتار) از خاک جهان را با مقدار گچ بین ۵ تا ۵۰٪ تشکیل می‌دهند (Eswaran and Zi-thong, 1991; FAO, 1993; Al-Banna, 2004; Adams et al., 2008; AL-Dabbas et al., 2012; Al-Riahi et al., 2023). کشور ایران نیز با دارا بودن ۲۸ میلیون هکتار اراضی گچی، معادل ۱۷/۵ درصد مساحت کشور، بیشترین وسعت اراضی گچی دنیا را دارا می‌باشد (تومانیان، ۱۳۹۰؛ یغمائیان مهابادی و گیوی، ۱۳۸۶). با توجه به زمین‌شناسی کشور ایران، سازند گچساران به‌عنوان اولین سازند گروه فارس به شمار می‌آید که سنگ‌شناسی کلی آن در فروفاتادگی دزفول مشتمل بر حدود ۱/۶ کیلومتر نمک، انیدریت، مارن‌های رنگارنگ، سنگ‌آهک و یک لایه شیل بیتومین دار است و در سطح زمین به‌جای انیدریت بیشتر ژپس دیده می‌شود و نمک نیز به‌ندرت در سطح زمین یافت می‌شود (امیری بختیار و نورانی نژاد، ۱۳۹۳). اگرچه این سازند با ایجاد سنگ پوش برای سازند نفتی آسماری نقش مهمی ایفا می‌کند اما حضور گچ علاوه بر ایجاد مشکلاتی برای رشد گیاه و حاصلخیزی خاک (Azizi et al., 2011)، اثرات مخربی بر سازه‌های مهندسی دارد و انجام پروژه بر روی این خاک‌ها بدون در نظر گرفتن و پیش‌بینی تغییر شکل آن‌ها می‌تواند منجر به بروز یک فاجعه گردد (Jabar and Salman, 2024; Al-sauodi et al., 2013). چراکه، در حالت خشک چون به‌صورت سیمان عمل می‌کنند خصوصیات مهندسی خوبی از خود نشان می‌دهند اما مشکل از زمانی شروع می‌شود که در اثر بارش یا تغییر سطح آب زیرزمینی مرطوب شوند در این حالت نمک و املاح شسته و حل می‌شوند (Fauziah et al., 2012). انحلال انواع مختلف نمک‌های موجود در داخل توده خاک گچ دار منافذ جدیدی را در داخل اسکلت خاک تولید می‌کند و اتصال بین سیمان و ذرات خاک را می‌تواند سست کند (Al-Sauodi et al., 2013). چنانچه حضور گچ و کانی‌های تبخیری باعث ایجاد مشکل در ساختگاه ۲۴ سد شده که ۱۴ مورد از آن‌ها در ایالات متحده

می‌باشد. در این میان شکست فاجعه‌بار سد سنت فرانسیس در لس‌آنجلس، کالیفرنیا، در سال ۱۹۲۸ یکی از بزرگ‌ترین بلایای مهندسی است که در این خصوص رخ داده است و منجر به مرگ ۴۰۰ نفر شد (Yilmaz, 2001). از دیگر موارد چالش‌های خاک گچی می‌توان به نشت آب از تکیه‌گاه سمت چپ سد مک میلان (McMillan) در نیومکزیکو (Brune, 1965)، تشکیل حفره‌هایی با قطر ۸۰ متر و عمق ۳۰ متر و فرونشست ناشی از انحلال گچ در منطقه ریپون در یورکشایر، انگلستان (Ripon in Yorkshire, England) (Cooper and Calow, 1998; Waltham, 2008)، ایجاد تغییرات هیدروژئولوژیکی و تشکیل کارست‌های گچی منطقه لسینا مارینا، استان فوجیا، ایتالیا (Lesina Marina area Foggia Province, Italy) (Fidelibus et al., 2011)، نشت قابل‌ملاحظه آب در سد مخزنی قیصرآغ تبریز (Fakhri et al., 2008) تخریب کانال‌های آبیاری و انتقال آب نکوآباد و کانال مهیار در حوضه رودخانه زاینده‌رود در اصفهان، کانال اصلی شبکه آبیاری بهبهان، کانال شهید چمران اهواز، کانال انتقال آب خدا آفرین در استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل (پورمهر و درگاهی، ۱۳۸۱؛ عباسپور و همکاران، ۱۳۸۷؛ مکوندی و اعتضادی، ۱۳۹۰) و تغییر فرم سازند گچساران و فرونشست حدود ۵۳ سانتی‌متر ناشی از انحلال در محدوده معدن نمک عنبل واقع در سد گتوند علیا (هاشمی فرد و همکاران، ۱۳۹۷)، ایجاد فرسایش شدید در مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان به دلیل حضور و انحلال‌پذیری خاک‌های گچی (جوکار و همکاران، ۱۳۹۸) اشاره کرد. حال‌آنکه، خاک‌های گچی به‌عنوان پیچیده‌ترین و مشکل‌آفرین‌ترین خاک در گروه خاک‌های مسئله‌دار، به دلایل گستردگی عوامل تأثیرگذار بر کیفیت و کمیت انحلال آن‌ها، همچون نوع گچ، بافت خاک، میزان گچ موجود در خاک، شیب هیدرولیکی و دمای محیط و آب جاری از محیط خاک گچی، نوع و غلظت دیگر کاتیون‌های موجود در خاک، نوع و غلظت کاتیون‌های موجود در آب منفذی و یا آبی که توسط پدیده نشست به خاک وارد خواهد شد، درجه اشباع خاک، درصد تراکم خاک، درصد تحکیم خاک، وضعیت تنش‌های اعمالی بر

خاک، شیب هیدرولیکی، اسیدیته خاک و آب موجود در آن رفتار مهندسی یکسانی از خود نشان نمی‌دهند (منصوری کیا و همکاران، ۱۳۷۹؛ عباسی و افشاریان، ۱۳۹۷؛ Al-Sauodi et al., 2013). بنابراین ارزیابی این نوع خاک‌ها و مطالعه رفتار مهندسی آن‌ها به یک چالش برای پژوهشگران تبدیل شده است. چون خاک باید بدون آنکه دچار گسیختگی برشی شود، توانایی و ظرفیت تحمل بار ناشی از سازه احداث شده را داشته باشد و در ضمن نشست‌های حاصل در حد تحمل سازه باشد. گسیختگی برشی خاک و نشست‌های بیش از حد می‌تواند منجر به تغییر شکل شدید سازه و حتی فروریختن آن، آسیب‌دیدگی اسکلت ساختمان، ترک خوردگی و یا خرابی تجهیزات می‌گردد. آزمایش نفوذ استاندارد SPT یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین آزمایش‌ها در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک می‌باشد که در حال حاضر به‌طور گسترده در سراسر دنیا مورد توجه قرار دارد. این آزمایش مطابق با استاندارد (ASTM D1586-11, 2022) در داخل گمانه انجام می‌گردد. طبق این استاندارد، آزمایش نفوذ استاندارد به انواع لایه‌های غیرسنگی و خاک‌های با قطر حداکثر کمتر از نصف قطر نمونه‌گیر دستگاه محدود می‌شود. در این آزمایش به‌طور خلاصه تعداد سقوط چکش استاندارد به وزن 140 ± 2 پوند معادل 623 ± 9 نیوتون یا $63/5$ کیلوگرم از ارتفاع 30 ± 1 اینچ معادل $0/76 \pm 0/03$ متر به‌صورت آزاد به همراه میله حفاری روی نمونه‌گیر را در سه مرحله نفوذ و برای هر مرحله $0/5$ فوت نفوذ یعنی $0/15$ متر در خاک شمارش می‌شود. نتیجه آزمایش، عدد N از جمع تعداد ضربات لازم برای نفوذ ۱۵ سانتی‌مترهای دوم و سوم به دست می‌آید. از مزایای این آزمایش می‌توان به راحتی انجام، تجهیزات ساده و استفاده از آن در انواع مختلف خاک‌ها اشاره کرد (علیزاده مجدی و دبیری، ۱۳۹۸؛ مظاهری و همکاران، ۱۳۹۹). با این حال، اعداد SPT، بسته به برخی شرایط آزمایش و تنوع تجهیزات به‌کاررفته، تغییرات قابل توجهی نشان می‌دهد بنابراین لازم است پس از انجام هر آزمایش، جهت کاربرد در طراحی به مقادیر نفوذ استاندارد معادل تبدیل شوند (اجل لوئیان و صداقت، ۱۳۹۴).

که بدین منظور اعداد SPT نسبت به ۶۰ درصد انرژی (N60)، نسبت به سربار مؤثر ((N1(60) و فشار آب منفذی (N) (با توجه به وجود آب زیرزمینی) تصحیح می‌گردند (Robertson and Wirde, 1997; Liao and Whitman, 1986; Skempton, 1986; Terzaghi et al., 1996). تاکنون از نتایج آزمایش SPT به‌طور گسترده‌ای جهت محاسبه ظرفیت باربری پی‌ها استفاده شده است. بدین منظور، آزمایش معمولاً در عمق بین $0/75$ تا $1/5$ متر زیر سطح پی انجام می‌گیرد و تعداد ضربات بیش از ۲۵ در خاک چسبنده بیانگر ظرفیت باربری عالی و تعداد ضربات کمتر از ۱۰ بیانگر باربری ضعیف است. خاک‌های چسبنده اشباع و سخت و خاک‌های متراکم با چسبندگی کم قادر به تحمل بارهای سنگین تا خیلی سنگین هستند (اجل لوئیان و صداقت، ۱۳۹۴). با توجه به کاربرد وسیع آزمایش SPT، پیشینه این آزمایش در تحقیقات و حتی پروژه‌های اجرایی خیلی گسترده است ولی اکثر آن‌ها به‌منظور دستیابی به روابط تجربی بین نتایج نفوذ استاندارد و پارامترهای خاک یا روانگرایی خاک و غیره بوده و گزارش‌ها در مورد انجام این آزمایش بر روی خاک‌های گچی بسیار محدود می‌باشد. بنابراین خلاصه‌ای از سوابق مرتبط با موضوع تحقیق حاضر با عنوان ارزیابی ظرفیت باربری خاک‌های گچی ارائه می‌شود. العبیدی و المفرغی (Al-Obaidi and Al-Mafragei, 2016) جهت ارزیابی ظرفیت باربری خاک‌های گچی در ۵ نقطه از استان صلاح‌الدین عراق گمانه‌هایی با عمق ۵-۱ متر را حفر و در آن‌ها آزمون SPT را انجام داده و همچنین جهت ارزیابی نشست پذیری خاک‌های گچی در شرایط خشک و اشباع در هر سایت آزمون PLT را انجام و گزارش کردند نشست خاک‌های گچی در شرایط خشک کمتر از خاک‌های مشابه است چنانچه خاک ماسه‌ای با محتوای گچ $60/7$ ، مقدار $0/3$ میلی‌متر نشست داشته ولی همان خاک در شرایط اشباع کوتاه‌مدت $34/41$ میلی‌متر نشست می‌کند. العبیدی و محمد (Al-Obaidi and Mohammed, 2017) جهت ارزیابی ظرفیت باربری خاک‌های گچی از داده‌های ۸۴ گمانه از ۱۰ سایت استان صلاح‌الدین عراق با درصد گچ بین $51-8$ استفاده کرده و بر اساس آزمون نفوذ استاندارد (SPT) ظرفیت باربری مجاز خاک

خاک، شیب هیدرولیکی، اسیدیته خاک و آب موجود در آن رفتار مهندسی یکسانی از خود نشان نمی‌دهند (منصوری کیا و همکاران، ۱۳۷۹؛ عباسی و افشاریان، ۱۳۹۷؛ Al-Sauodi et al., 2013). بنابراین ارزیابی این نوع خاک‌ها و مطالعه رفتار مهندسی آن‌ها به یک چالش برای پژوهشگران تبدیل شده است. چون خاک باید بدون آنکه دچار گسیختگی برشی شود، توانایی و ظرفیت تحمل بار ناشی از سازه احداث شده را داشته باشد و در ضمن نشست‌های حاصل در حد تحمل سازه باشد. گسیختگی برشی خاک و نشست‌های بیش از حد می‌تواند منجر به تغییر شکل شدید سازه و حتی فروریختن آن، آسیب‌دیدگی اسکلت ساختمان، ترک خوردگی و یا خرابی تجهیزات می‌گردد. آزمایش نفوذ استاندارد SPT یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین آزمایش‌ها در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک می‌باشد که در حال حاضر به‌طور گسترده در سراسر دنیا مورد توجه قرار دارد. این آزمایش مطابق با استاندارد (ASTM D1586-11, 2022) در داخل گمانه انجام می‌گردد. طبق این استاندارد، آزمایش نفوذ استاندارد به انواع لایه‌های غیرسنگی و خاک‌های با قطر حداکثر کمتر از نصف قطر نمونه‌گیر دستگاه محدود می‌شود. در این آزمایش به‌طور خلاصه تعداد سقوط چکش استاندارد به وزن 140 ± 2 پوند معادل 623 ± 9 نیوتون یا $63/5$ کیلوگرم از ارتفاع 30 ± 1 اینچ معادل $0/76 \pm 0/03$ متر به‌صورت آزاد به همراه میله حفاری روی نمونه‌گیر را در سه مرحله نفوذ و برای هر مرحله $0/5$ فوت نفوذ یعنی $0/15$ متر در خاک شمارش می‌شود. نتیجه آزمایش، عدد N از جمع تعداد ضربات لازم برای نفوذ ۱۵ سانتی‌مترهای دوم و سوم به دست می‌آید. از مزایای این آزمایش می‌توان به راحتی انجام، تجهیزات ساده و استفاده از آن در انواع مختلف خاک‌ها اشاره کرد (علیزاده مجدی و دبیری، ۱۳۹۸؛ مظاهری و همکاران، ۱۳۹۹). با این حال، اعداد SPT، بسته به برخی شرایط آزمایش و تنوع تجهیزات به‌کاررفته، تغییرات قابل توجهی نشان می‌دهد بنابراین لازم است پس از انجام هر آزمایش، جهت کاربرد در طراحی به مقادیر نفوذ استاندارد معادل تبدیل شوند (اجل لوئیان و صداقت، ۱۳۹۴).

ظرفیت باربری پی‌های سطحی روی حفره‌ها پرداخته و گزارش کردند با افزایش اندازه حفره، ظرفیت باربری حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین هندسه حفره عامل مهمی در تحلیل پایداری است. توفیق (Tawfeeq, 2025) ضمن تحلیل نسبت ظرفیت باربری خاک گچی مستعد کارستی شدن، انحلال تدریجی خاک‌های گچی و عدم وجود مدل‌های ریاضی معتبر برای تخمین ظرفیت باربری آن‌ها را همچنان نگرانی بزرگی دانسته و به بررسی رابطه بین نسبت ظرفیت باربری و پارامترهای کلیدی همچون نسبت عرض به عمق، سطوح انحلال و فاصله حفره افقی از مرکز فونداسیون در خاک‌های غنی از گچ با استفاده مدل‌سازی المان محدود و تحلیل‌های رگرسیون چندگانه پرداخته و گزارش کرد نوع خاک و سطوح انحلال، مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده نسبت ظرفیت باربری هستند و با تجزیه و تحلیل رگرسیونی می‌توان امکان ایجاد یک رابطه پیش‌بینی کننده را فراهم کرد که عوامل ضروری، مانند نسبت‌های هندسی و انحلال گچ را شامل شود.

متأسفانه در ایران علیرغم گسترش وسیع سازند گچساران در بخش جنوب غربی کشور پژوهش جامع و مشخصی در زمینه ظرفیت باربری صورت نگرفته است و عمده پژوهش‌ها مرتبط پهنه‌بندی پارامترهای ژئوتکنیکی بوده، چنانچه عساکره و مصفا (۱۳۹۹) با جمع‌آوری اطلاعات ژئوتکنیکی حاصل از ۲۴۱ گمانه حفاری شده تا عمق ۱۵ متری و با به‌کارگیری نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) به پهنه‌بندی پارامترهای ژئوتکنیکی شهر بندرعباس پرداخته و گزارش کردند بیش از ۸۵ درصد منطقه دارای لایه‌های خاک درشت‌دانه بوده و عموم لایه‌های خاک از ۶ متر و پایین‌تر اشباع و با رطوبت طبیعی حداکثر ۳۰ درصد می‌باشند. صابریلیزی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از اطلاعات ۱۷۰ گمانه حفاری شده در شهر رشت، به پهنه‌بندی عدد SPT و زاویه اصطکاک داخلی خاک با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS) پرداخته و گزارش کردند عموم خاک‌های منطقه دارای بافت ماسه‌ای با عدد SPT بیش از ۱۰ می‌باشند که از نظر پایداری در خاک‌های سفت و خیلی سفت قرار دارند. پزشکیان و همکاران (۱۴۰۴) با ارزیابی

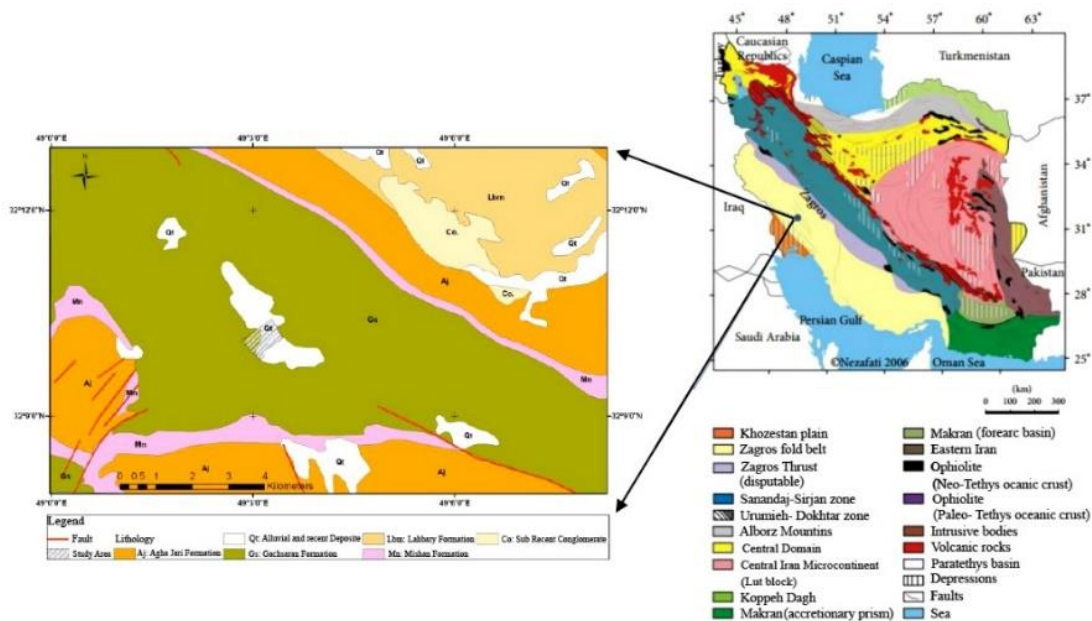
را محاسبه کردند. حسین و اسنودی (Hussein and Snodi, 2020) با کمک نرم‌افزار PLAXIS 3D به روش المان محدود به مطالعه و بررسی حفره‌ها و کارست‌های گچی در نتیجه انحلال گچ زیر پی مربعی پرداخته و گزارش کردند که خطرناک‌ترین حالت زمانی پیدا می‌شود که حفره و کارست در مرکز پی قرار گیرد. در این حالت ظرفیت باربری به ترتیب به میزان ۱۴، ۳۷ و ۶۹ درصد برای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد انحلال گچ کاهش یافت. محمود و همکاران (Mahmood et al, 2020) برای به دست آوردن حداکثر ظرفیت باربری فونداسیون‌های لبه‌دار (skirted foundation) در خاک‌های گچی در حالت اشباع، نتایج تجربی با عنوان نسبت طول به قطر بهینه ارائه کردند. فخرالدین (Fakhraldin, 2020) به بررسی تأثیر حالت مرطوب و اشباع شدن بر ظرفیت باربری و نشست خاک‌های گچی با کمک آزمون PLT پرداخته و گزارش کرد ظرفیت باربری نهایی خاک گچی در شرایط خیس‌اندن کاهش می‌یابد و همچنین ظرفیت باربری نهایی خاک گچی از معادله ترازقی با نتایج آزمایش‌های میدانی دارای اختلاف می‌باشد. محسن و همکاران (Mohsen et al., 2022) با توجه به کاهش قابل توجه ظرفیت باربری خاک‌های گچی در فرآیندهای بارگذاری و یا خیس شدن به دلیل انحلال پیوندهای سیمانی گچی، از مواد ژئوستتیک در الگوهای توزیع تک، دو تایی و سه‌گانه با هدف بهبود ظرفیت باربری خاک استفاده کردند و افزایش قابل توجه ظرفیت باربری در هنگام استفاده از الگوی سه فاز برای خاک گچی مسلح به‌ویژه با افزایش لایه‌های تقویت‌کننده در الگوی تقویت‌کننده سه‌گانه، را گزارش کردند. نظاری و همکاران (Nezari et al., 2024) تأثیر حفره‌های نامنظم در خاک‌های کارستی را با استفاده نرم‌افزار Plaxis 2D مدل‌سازی و گزارش کردند تشکیل و وجود حفرات در مکان‌های کم‌عمق در مقایسه با شرایط بدون حفره ظرفیت باربری پی را ممکن است تا ۴۰ درصد کاهش دهد. با این حال، این کاهش را می‌توان با استفاده از ژئوگرید تا ۲۵ درصد کاهش داد. لوکوتا و ایزوبه (Lukueta and Isobe, 2024) با روش المان محدود پلاستیک صلب (Rigid Plastic Finite Element Method, RPFEM) به تحلیل

۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

مجتمع پتروشیمی اوره و آمونیاک مسجدسلیمان با مساحت حدود ۵۱۰ هزار مترمربع در منطقه‌ای با طول و عرض جغرافیایی ۴۹/۰۵ و ۳۲/۱۶ در سی و پنج کیلومتری شمال غربی شهرستان مسجدسلیمان در استان خوزستان، در مجاورت روستای هفت شهیدان واقع شده است. سایت پتروشیمی در زمان بازدید و اجرای عملیات ژئوتکنیک در ۲ ارتفاع مختلف (۱۹۸۶ و ۱۹۸۲ متر) مسطح گردیده که این اختلاف ارتفاع یک رمپ ۴ متری در ساختگاه ایجاد کرده بود. همچنین منطقه مورد مطالعه مطابق شکل ۱ در پهنه زمین‌شناسی فروافتادگی دزفول و بر سازند زمین‌شناسی گچساران (حاوی خاک‌های ریزدانه گچ دار و سنگ‌های تبخیری) و نهشته‌های کوترنری قرار گرفته است در این منطقه رشته‌کوه‌های زاگرس هماهنگ با عناصر ساختاری اصلی این پهنه زمین‌ساخت در راستای شمال غرب، جنوب شرق کشیده شده‌اند. شیب توپوگرافی دامنه‌ها و دیواره آبراهه‌ها متأثر از وجود سازندهای ضعیف گچساران در منطقه عموماً کم است. تکتونیک منطقه به همراه عملکرد پدیده‌های فرسایش، از اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار در ریخت‌شناسی منطقه هستند.

ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای متراکم با حفرات دوتایی گزارش کردند حفره‌های نزدیک به هم (به‌ویژه آن‌هایی که در راستای تنش‌ها قرار دارند) ممکن است ظرفیت باربری را تا ۵۰ درصد کاهش دهند. که این یافته‌ها بر اهمیت استفاده از روش‌های آماری پیشرفته برای ارزیابی تأثیر توزیع حفره بر پایداری فونداسیون‌ها تأکید می‌کند.

با توجه به مقدمه و پیشینه ارائه‌شده از خاک‌های گچی می‌توان هم به صورت یک مشکل، و هم به صورت یک معما نام برد که ارزیابی ویژگی‌های مهندسی آن‌ها چالش خاص خود را دارد (Casby-Horton et al., 2015). از این رو، اجرای پروژه‌های مهم بر روی آن‌ها، همچون پتروشیمی‌ها؛ به دلیل وجود سازه‌های حساس مانند مخازن و انبارهای مواد شیمیایی نیازمند مطالعات دقیق شرایط زمین‌شناسی و کسب پارامترهای مهندسی مصالح ساختگاه توسط روش‌های ژئوفیزیکی (GPR)؛ صحرائی (SPT, PLT) و آزمایشگاهی (مکانیک خاک) به منظور بررسی بدترین سناریو مرتبط با آن‌ها (همچون اشباع شدن خاک گچی و وجود کارست‌های گچی در منطقه) و در نهایت تعیین ظرفیت باربری مجاز و پهنه‌بندی آن، جهت جلوگیری از نشست سازه‌های حساس موجود در پتروشیمی می‌باشد.

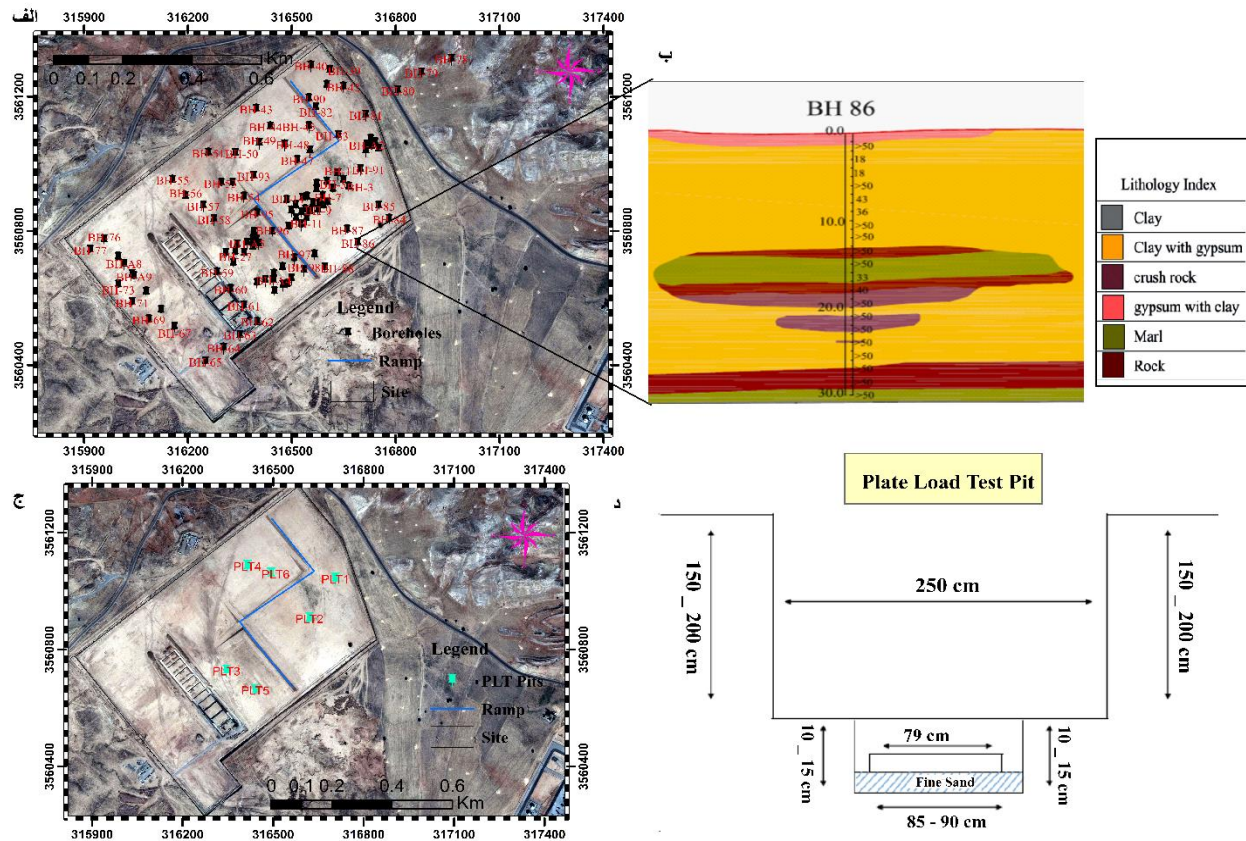


شکل ۱. موقعیت و نقشه زمین‌شناسی مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان

۳. مواد و روش‌ها

در این پژوهش جهت ارزیابی مصالح ساختمانی و زمین‌شناسی لایه‌های زیرسطحی در مساحت ۵۱۰ هزار مترمربع سایت پتروشیمی مسجدسلیمان، تعداد ۱۱۳ گمانه در عمق‌های ۴۰ - ۲۰ متری (توسط ۶ ماشین حفاری) حفر شد، که در ۸۰ مورد از آن‌ها در زمان حفر (شکل ۲-الف)، آزمون SPT، در گام‌های ۱/۵ متری به روش استاندارد (ASTM D1586-11, 2022) انجام شد (شرکت زمین فیزیک پویا، ۱۳۹۴)، که تغییرات عدد SPT اصلاح‌شده نسبت به عمق در لیتولوژی‌های مختلف به‌طور مثال در گمانه BH-86، در شکل ۲-ب قابل مشاهده است. جهت ارزیابی و پهنه‌بندی ظرفیت باربری، در ابتدا جهت شناسایی مصالحی که در عمق بر روی آن‌ها آزمایش برجا SPT انجام‌شده، با استفاده از نرم‌افزارهای ROCKWORKS و ArcGIS (به کمک انطباق اطلاعات گمانه‌های هم‌جوار) نقشه‌های توزیع و گسترده‌گی مصالح در زیر سطح زمین و پروفیل‌های زمین‌شناسی لایه‌های زیرسطحی در ترازهای مختلف ترسیم گردید. سپس جهت ارزیابی تغییرات نشست پذیری خاک‌های گچی سازند گچساران در شرایط خشک و اشباع با توجه به مکان‌یابی صورت گرفته جهت استقرار مخازن و سازه‌های حساس پتروشیمی مسجدسلیمان (شکل ۲-ج) تعداد ۶ چاهک با عمق حدود ۱/۵ تا ۲ متر و طول و عرض ۲/۵ متر که درون آن‌ها نیز چاهک کوچک‌تری جهت قرارگیری صفحه بارگذاری به قطرهای ۷۹ و ۵۹ سانتی‌متر ایجاد شده بود، مطابق شکل ۲-د طراحی و در لایه سیلت و رس گچ‌دار سازند گچساران حفر و اجرا گردید. سپس به‌منظور ارزیابی اثر آب‌شویی و انحلال گچ به روش‌های خشک و اشباع تحت بار بالغ بر ۴۰ تن (جهت شبیه‌سازی مخازن پتروشیمی) آزمایش بارگذاری صفحه‌ای PLT بر اساس استاندارد (ASTM-D1195, 2021) صورت پذیرفت. این آزمایش اگرچه از هزینه‌ی بالایی برخوردار بوده و وقت‌گیر می‌باشد ولی به نتایج دقیق‌تری در مسئله نشست منتهی می‌شود (بلوری بزاز و همکاران، ۱۳۸۹). به‌منظور اجرای آزمایش در محیط اشباع بعد

از اتمام آزمایش در حالت خشک، به‌وسیله یک تانکر در محل، به مدت ۱۲ ساعت آب به‌آرامی در اطراف صفحه بارگذاری جریان یافته تا جایگزین هوا مابین ذرات خاک گردد و خاک زیر و اطراف صفحه، با اندازه‌گیری محتوای رطوبت، کاملاً زیر آب اشباع شوند. سربار اعمالی در این آزمایش حدود ۴۰ تن بوده است و حداکثر تنش اعمال‌شده در این آزمایش‌ها 40 kN/m^2 بود که پس از آماده‌سازی، جاگذاری و تنظیم سربارها با کمک جرثقیل در محل چاهک‌ها و نصب کرنش‌سنج‌ها، این آزمایش در شرایط خشک و اشباع اجرا گردید. در مجموع اگرچه جهت محاسبه ظرفیت باربری روابط متعددی همچون ترزاقی و همکاران (Terzaghi et al., 1996)، مایرهوف (Meyerhof, 1956, 1974)، هانسن (Hansen, 1970) و وسیک (Vesic, 1975) ارائه‌شده است ولی بر اساس مشاهدات صحرایی، روابط ارائه‌شده بسیار محافظه‌کارانه بوده و بنابراین باولز (Bowles, 2001) با اصلاح روابط ارائه‌شده توسط مایرهوف (Meyerhof, 1956, 1974) دقت محاسبه ظرفیت باربری مجاز پی را به میزان ۵۰٪ افزایش داد (اطیابی، ۱۳۹۲). بنابراین در گام اول، پس از انجام تصحیحات نسبت به درصد انرژي، سربار مؤثر و فشار آب منفذی بر روی اعداد SPT، ظرفیت باربری برای نشست ۲۵ میلی‌متر با کمک روابط باولز (Bowles, 2001) محاسبه گردید. بدین منظور پی به‌صورت مربعی با عرض ۳ متر فرض شد و مقادیر ضریب F2 و F3 به ترتیب ۰/۷۲ و ۱ می‌باشد که مقدار F2 برای N60 نسبت به N55 و N70 محاسبه شد. همچنین با توجه به اینکه آزمایش SPT بر روی سنگ انجام نمی‌پذیرد، بنابراین برای سنگ ژئوپس در گمانه‌ها عدد SPT، بیش از ۵۰ در نظر گرفته شد. سپس جهت مشاهده چگونگی توزیع ظرفیت باربری مصالح در نقاط و اعماق مختلف و ارزیابی نقش سطح آب زیرزمینی و حضور کارست‌های گچی بر روی آن، نقشه‌های پهنه‌بندی ظرفیت باربری مصالح با کمک نرم‌افزارهای Rockworks و ArcGIS از سطح زمین، با فواصل ۱/۵ متری تا عمق ۱۰/۵ متری ترسیم گردید. چراکه عمده چالش خاک گچی در شرایط اشباع بوده که منجر به انحلال و تشکیل کارست‌های گچی می‌گردد.



شکل ۲. الف) موقعیت گمانه‌های حفاری شده جهت آزمون برجا SPT، ب) تغییرات عدد SPT اصلاح شده نسبت به عمق در

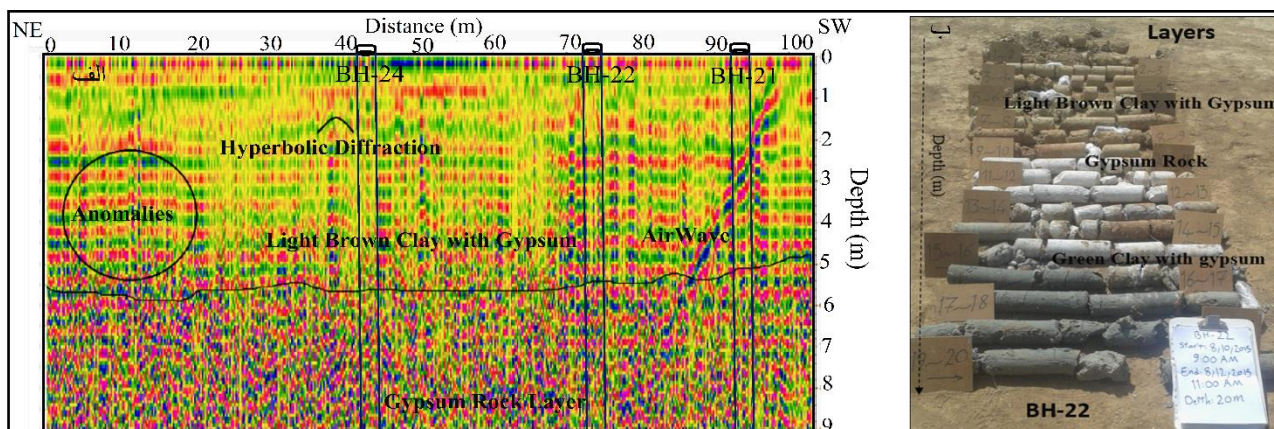
لیتولوژی‌های مختلف، گمانه BH-86، ج) موقعیت چاهک‌های PLT در سایت، و د) ابعاد چاهک‌های PLT

لایه‌بندی و حضور کارست‌های گچی زیر سطحی (به صورت هذلولی شکل) در محدوده پتروشیمی مورد بررسی و شناسایی قرار گرفتند (شکل ۳). سپس در گام دوم، به منظور ارزیابی ظرفیت باربری در محدوده پتروشیمی مسجدسلیمان آزمایش‌های مکانیک خاک همچون آزمایش دانه‌بندی خاک به روش‌های الک و هیدرومتری، حدود اتربرگ، تعیین GS خاک، برش مستقیم خاک به ترتیب بر اساس استانداردهای (D422-63, 2007)، (D421-85, 2007)، (D4318, 2018)، (D854, 2023)، (ASTM (D3080-04, 2012) و آزمایش درون گمانه‌ای دانهول (DownHole) بر اساس استاندارد (ASTM (D7400, 2019) صورت پذیرفته و نتایج جمع‌بندی گردید. چون‌که با توجه به ماهیت متغیر و پیچیده سازند گچساران در محدوده مورد مطالعه در نظر گرفتن یک مجموعه لایه‌بندی و انتخاب پارامترهای آن برای ارزیابی ظرفیت باربری عملی نبوده بنابراین با کنار هم گذاشتن داده‌ها و نتایج آزمون‌های

در ادامه، ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی منطقه همچون نقشه‌های سطح و جهت آب زیرزمینی که با استفاده از آزمایش عمق یاب با سنسور الکتریکی در گمانه‌ها و نقشه کارست‌های گچی که با استفاده از تلفیق و تفسیر برداشت‌های ژئوفیزیکی غیر مخرب GPR با نتایج اطلاعات حفاری گمانه‌هایی که در آن‌ها کارست گزارش شده، ترسیم شدند. سپس این نقشه‌ها به صورت رقومی با اطلاعات و نقشه‌های پهنه‌بندی ظرفیت باربری به دست آمده، جهت ارزیابی نقش این عوامل بر ظرفیت باربری مورد بررسی قرار گرفتند. شایان ذکر است پروفیل‌های GPR با استفاده از آنتن امواج فرستنده ۵۰ و ۲۵۰ مگاهرتز ساخت شرکت مالا در ۲۴ پروفیل به طول کل ۲۳۰۷ متر (مجموع دو آنتن) در منطقه برداشت شده و سپس با استفاده از نرم افزار Reflexw داده‌های آن تصحیح و پردازش (شکل ۳-ب) و با کمک اطلاعات زمین‌شناسی گمانه‌های حفاری شده در طول مسیر برداشت ژئوفیزیکی (شکل ۳-ب)، تغییرات

می‌شود. بنابراین استفاده از ضریب اطمینان برای پی‌های منفرد ۲-۳ و برای پی‌های گسترده ۲/۵-۱/۷ توصیه شده است (Bowls, 2001). که در این پژوهش از ضریب اطمینان ۳ به دلیل آبشویی، انحلال گچ و وجود کارست‌های در حضور آب زیرزمینی جهت محاسبه ظرفیت باربری استفاده و در نهایت با مقایسه ظرفیت باربری مجاز با مقادیر به دست آمده از مقاومت برشی خاک، حداقل مقدار به عنوان ظرفیت باربری مجاز پی گزارش شد.

مکانیک خاک به روش‌های آزمایشگاهی و برجا، آزمایش‌های ژئوفیزیکی و همچنین موقعیت قرارگیری سازه‌های حساس پتروشیمی، محدوده مورد مطالعه به ۲ پهنه تقسیم شده و ظرفیت باربری مجاز هر کدام از پهنه‌ها با کمک رابطه هانسن (Hansen, 1970) که به طور ضمنی در آن هر نسبت (D/B) مجاز است و بنابراین می‌توان از آن برای پی سطحی و عمیق استفاده کرد، مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور با توجه به اینکه تمرکز تنش و شرایط محیطی غیرقابل پیش‌بینی باعث در نظر گرفتن ضریب اطمینان در محاسبات ظرفیت باربری پی



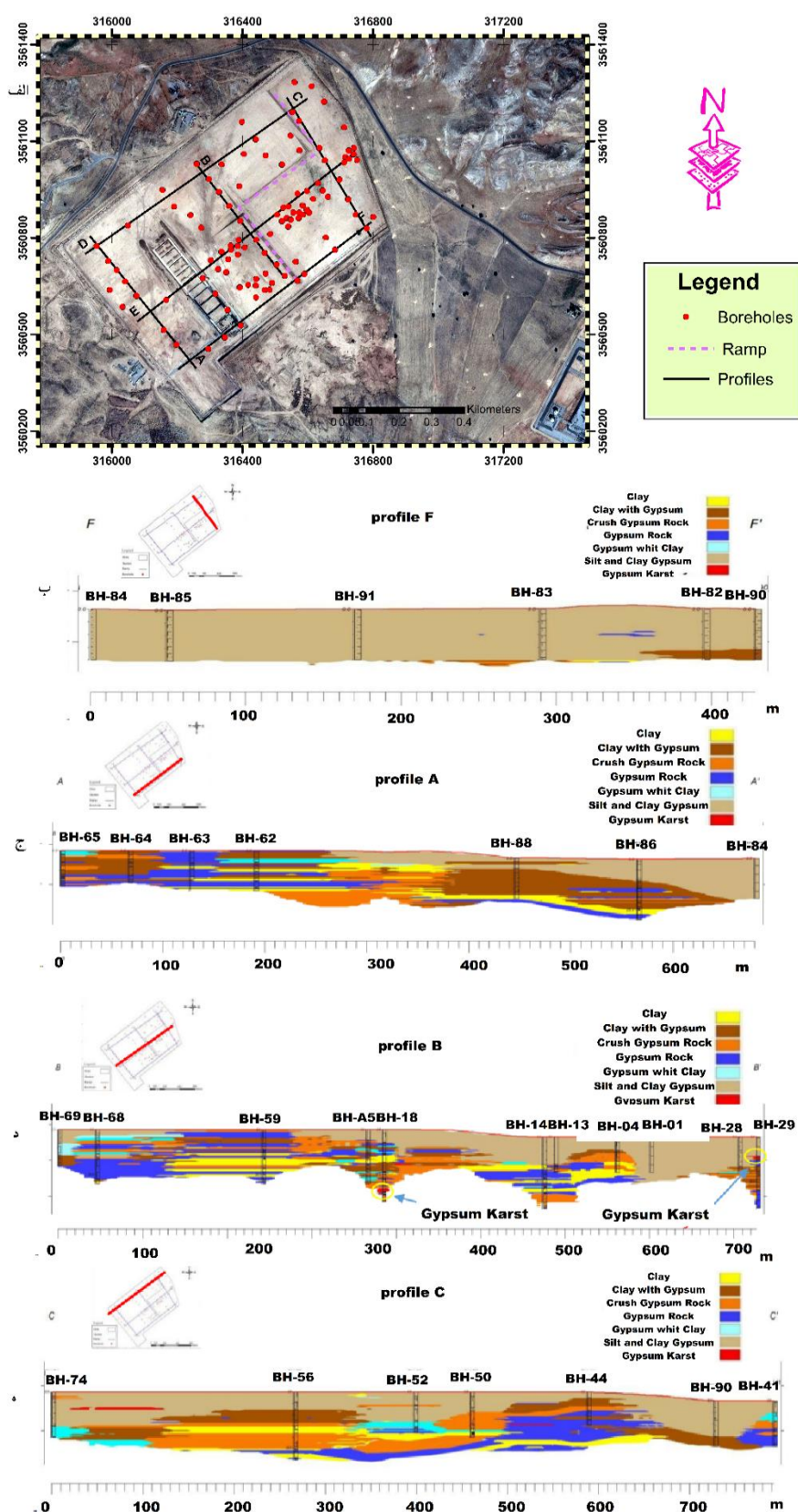
شکل ۳. الف) تفسیر نگاشت راداری با فرکانس 250 HZ، مقطع شماره ۱۵ برداشت GPR، ب) با کمک اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه‌ها

همچنین سنگ‌های خرد شده گچ در بخش جنوبی و رس گچ دار در قسمت جنوب غربی سایت پتروشیمی و در اعماق گمانه‌ها گسترش بیشتری دارند. پروفیل B، به موازات قسمت مرکزی سایت پتروشیمی ترسیم شده است و مطابق شکل ۴-د مصالح متنوعی درون گمانه‌های آن گزارش شده است. چنانچه خاک سیلت و رس گچ دار عمدتاً در ۱۵ متر بالایی گمانه‌ها و سنگ ژپس در قسمت شرقی در اعماق و در قسمت غربی در سطح و عمق گمانه‌ها دیده می‌شود همچنین در برخی گمانه‌های موجود در این پروفیل کارست‌های گچی ناشی از فرایند انحلال توسط آب زیرزمینی قابل مشاهده هستند. پروفیل C، به موازات قسمت شمالی سایت پتروشیمی ترسیم شده است و مطابق شکل ۴-ه خاک سیلت و رس گچ دار عمده مصالح موجود در گمانه‌های این مقطع را تشکیل می‌دهند و سنگ ژپس عمدتاً در اعماق گمانه‌ها مشاهده می‌شود.

۴. یافته‌ها و نتایج

۴-۱. ترسیم پروفیل‌های زمین‌شناسی

به منظور بررسی لایه‌های زیر سطحی سایت پتروشیمی، به کمک انطباق گمانه‌های هم‌جوار چندین پروفیل زمین‌شناسی به صورت طولی و عرضی در جهات مختلف محدوده مورد مطالعه مطابق شکل (۴-الف) با نرم‌افزارهای Rockworks و ArcGIS ترسیم گردید. پروفیل F، در مجاورت حد شرقی پتروشیمی واقع شده است و عمده مصالح تشکیل دهنده این مقطع تا عمق گمانه‌ها از نوع سیلت و رس گچ دار می‌باشد (شکل ۴-ب). پروفیل A، به موازات قسمت جنوبی سایت پتروشیمی ترسیم شده است. در این مقطع مطابق شکل ۴-ج سیلت و رس گچ دار در برخی از گمانه‌ها از سطح زمین تا اعماق گمانه‌ها گسترش دارد. ضخامت این لایه به سمت قسمت جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه افزایش می‌یابد.

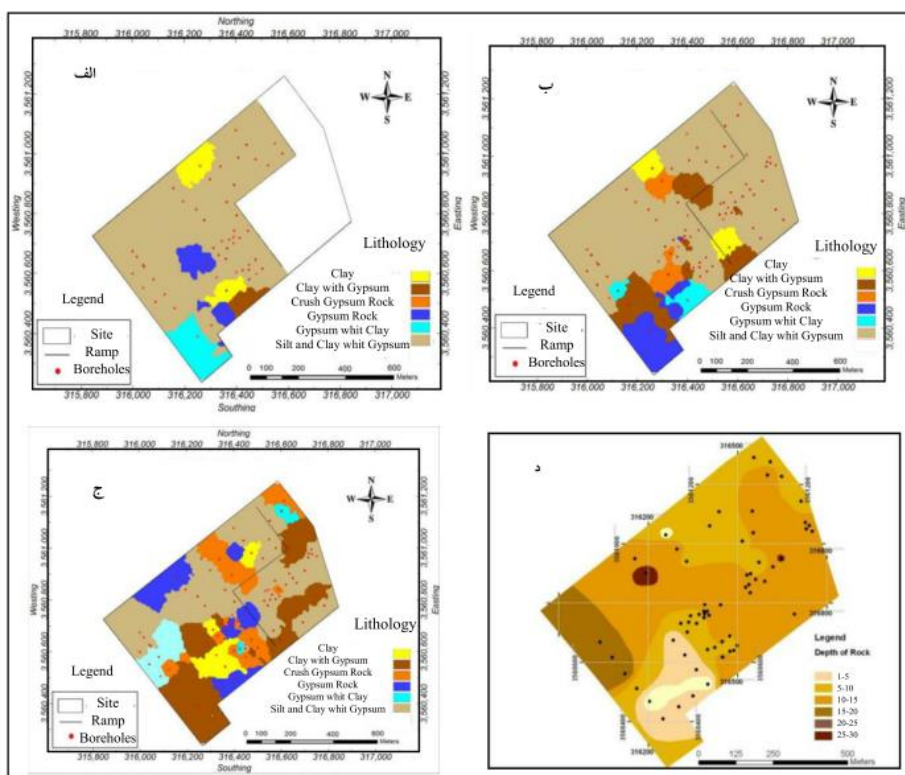


شکل ۴. الف) مقاطع پروفیل‌های زمین‌شناسی پتروشیمی مسجدسلیمان، ب) پروفیل زمین‌شناسی مقطع F، ج) پروفیل زمین‌شناسی مقطع A، د) پروفیل زمین‌شناسی مقطع B، و ه) پروفیل زمین‌شناسی مقطع C

گردید. مطابق شکل ۵-الف عمده مصالح تشکیل‌دهنده سایت پتروشیمی از نوع سیلت و رس گچ‌دار است که با افزایش عمق و قرارگیری کل محدوده پتروشیمی در یک تراز ارتفاعی، به تدریج (شکل ۵-ب)، از میزان گستردگی این لیتولوژی کاسته می‌شود و جای خود را به سنگ ژئپس سازند گچساران می‌دهد (شکل ۵-ج)، به نحوی که به دلیل لایه‌بندی پیچیده سازند گچساران در محدوده مورد مطالعه عمق سنگ‌بستر در جنوب غربی سایت کمتر از ۱۰ متر، در شمال غربی بالای ۲۰ متر و در مرکز سایت بین ۲۰ تا ۱۰ متر می‌باشد (شکل ۵-د).

۲-۴. ترسیم نقشه‌های زمین‌شناسی زیرسطحی

به منظور بررسی توزیع و گستردگی لایه‌های زمین‌شناسی و مصالح زیرسطحی سایت پتروشیمی، با کمک اطلاعات گمانه‌ها و نرم‌افزارهای Rockworks و ArcGIS نقشه‌های زمین‌شناسی زیرسطحی ترسیم گردید (شکل ۵). با توجه به اینکه آزمایش نفوذ استاندارد در فواصل ۱/۵ متر در گمانه‌ها انجام شده، این نقشه‌ها کمک شایانی به شناسایی موقعیت و گستردگی هر یک از مصالح در ترازهای که آزمون SPT بر روی آن صورت گرفته و بعلاوه صحت سنجی اعداد آن را می‌کند. بنابراین این نقشه‌های با حداثه ۱/۵ متر با اطلاعات کلیه گمانه‌ها ترسیم



شکل ۵. الف) نقشه زیرسطحی زمین‌شناسی در تراز ارتفاعی ۱۹۸۴/۵ متر، ب) نقشه زیرسطحی زمین‌شناسی در تراز ارتفاعی ۱۹۸۰، ج) نقشه زیرسطحی زمین‌شناسی در تراز ارتفاعی ۱۹۷۴، و د) عمق سنگ‌بستر در محدوده پتروشیمی

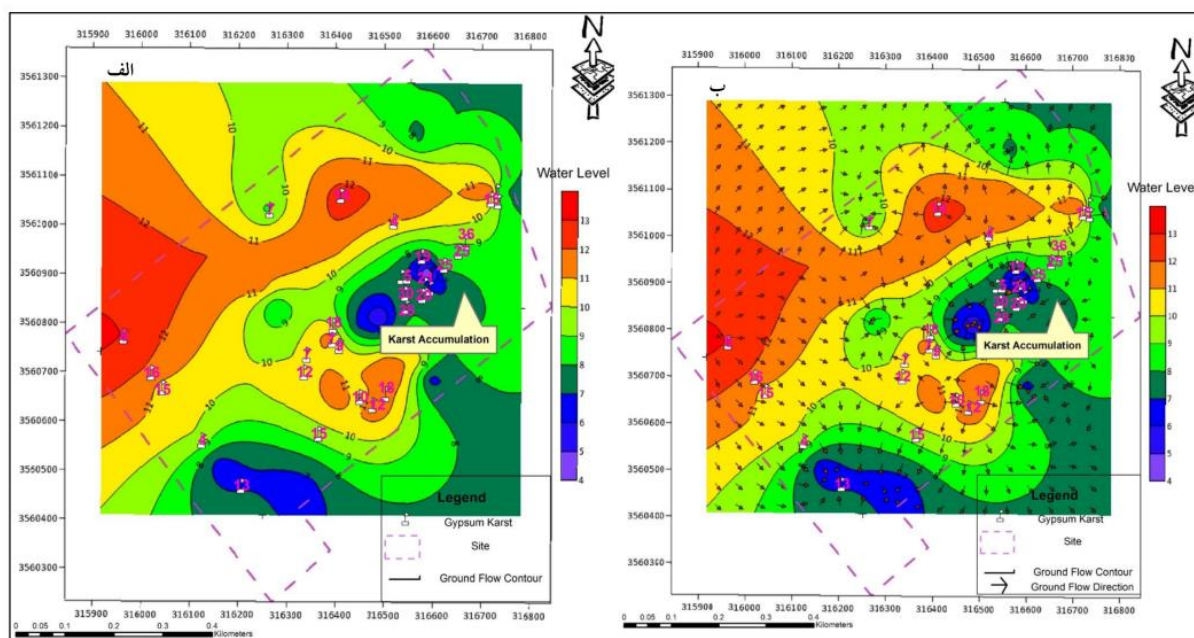
۳-۴. ترسیم و انطباق نقشه آب زیرزمینی و کارست‌های گچی

با انجام آزمون عمقیاب با سنسور الکتریکی در گمانه‌های حفاری شده مشخص گردید که جریان آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه نسبتاً پیچیده و سطح آب زیرزمینی در عمق متوسط ۹-۱۰ متر می‌باشد. همچنین تلفیق داده‌های ژئوتکنیکی (GPR) و حفاری گمانه‌ها، حاکی از وجود ۳۲

کارست‌های گچی در اعماق مختلف بود که موقعیت آن‌ها با عمق برخورد به کارست‌ها در شکل ۶ قابل مشاهده است. با توجه به قرارگیری و تجمع بالغ بر ۲۳ حفره کارستی در زیر تراز سطح آب زیرزمینی (Under Ground Water Level) (شکل ۶-الف) و تشکیل آن‌ها در

به طوری که در لایه‌های سخت‌تر موجب شکستگی و انقطاع، و در لایه‌های نرم‌تر و شکل‌پذیر باعث چین‌خوردگی محلی شده است. به همین دلیل این سازند را در ساختگاه نمی‌توان به صورت لایه مشخصی تعقیب نمود. علاوه بر این وجود گچ، انیدریت و نمک در این سازند که دارای پتانسیل انحلال و افزایش حجم می‌باشند، موجب به هم‌ریختگی بیشتر سنگ‌ها، انقطاع لایه‌ها و ایجاد عوارض کارستی به صورت فروچاله‌ها، کانال‌های مدفون در طی زمان شده است.

محل تجمع جهت جریان آب زیرزمینی (Under Ground Water Flow Direction, (UGWFD)) (شکل ۶-ب) به نظر می‌رسد نقش آب زیرزمینی و تغییرات آن در منطقه پررنگ‌تر از سایر عوامل می‌باشد. در واقع هر جا که لایه‌های گچ‌دار نزدیک سطح زمین قرار گرفته باشند احتمال حفره‌دار شدن و به دنبال آن ریزش بخش‌های رویی به داخل حفره‌ها بیشتر می‌شود. سازند گچساران به دلیل دارا بودن ماهیت شکل‌پذیری، تحت فازه‌های تکتونیکی به هم‌ریخته و تغییر شکل یافته است



شکل ۶. الف) ارتباط کارست‌های گچی با تراز سطح آب زیرزمینی و ب) قرارگیری محل تجمع کارست گچی در محدوده جهت جریان آب زیرزمینی

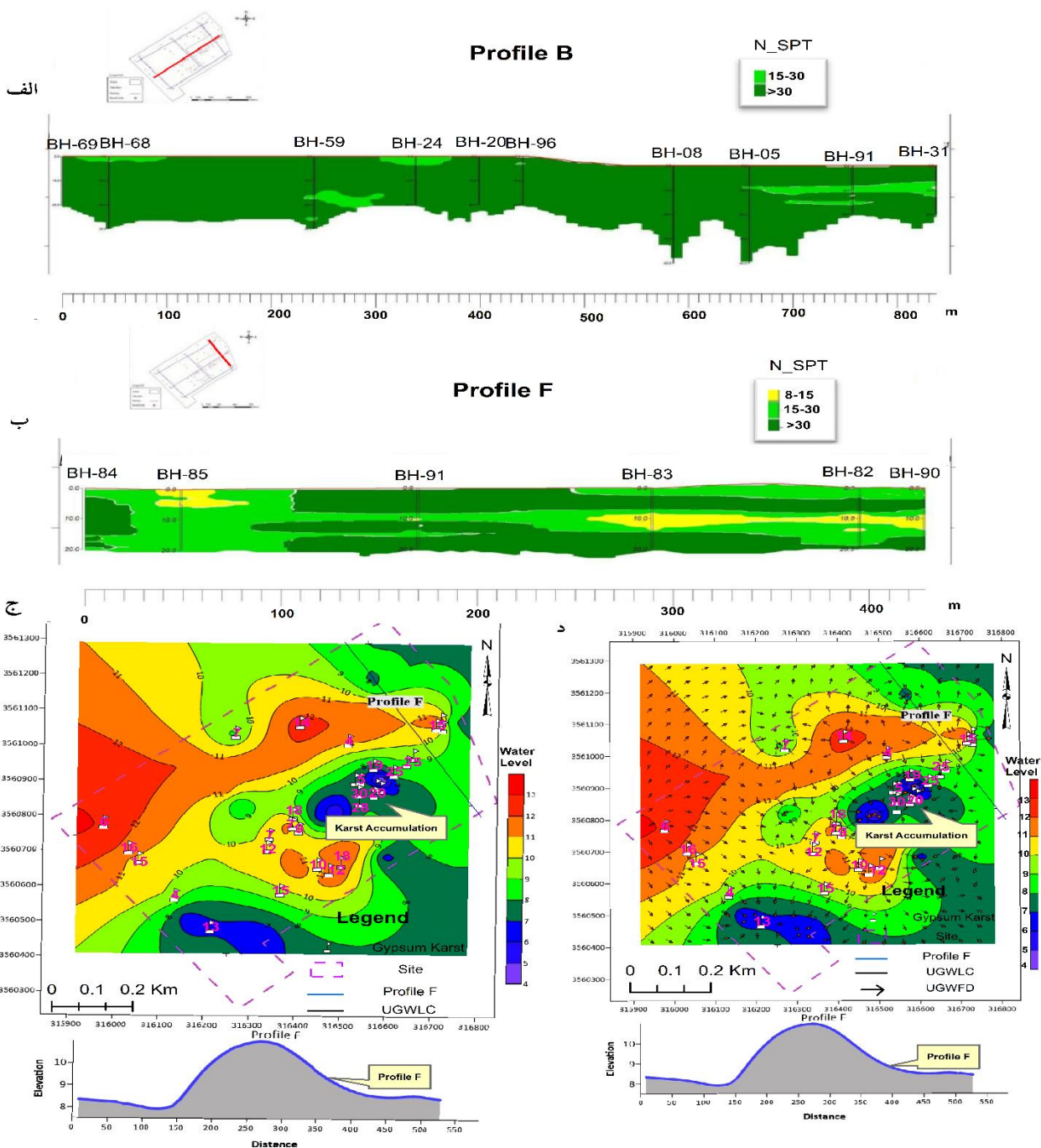
کارست‌های گچی در عمق ۱۶ متری در میان مصالح سنگ ژپس، در همه مقاطع مصالح ساختگاه عمدتاً از نوع سفت و خیلی سفت است (شکل ۷-الف). تنها در مقطع F (شکل ۷-ب)، در گمانه‌های ۸۲، ۸۳، ۸۵ و ۹۰ عدد SPT تا عمق ۱۰ متر، زیر ۱۵ می‌باشد. که با توجه به شکل ۴-ب می‌توان گفت در این مقطع، لیتولوژی عمدتاً سیلت و رس گچ‌دار بوده و تفاوت چندانی در بافت و نوع خاک وجود ندارد. بعلاوه برخلاف سایر مقاطع، در این مقطع مصالح خردسنگی وجود نداشته و تماماً از خاک تشکیل شده است. بنابراین مقاومت در برابر نفوذ در آن کمتر می‌باشد. همچنین پیاده‌سازی آن مقطع بر روی نقشه‌های تراز و جهت جریان آب زیرزمینی، کارست‌های گچی

۴-۴. آزمون نفوذ/استاندارد SPT

با توجه به اینکه سایت پتروشیمی در زمان اجرای عملیات ژئوتکنیک در دو سطح با اختلاف ارتفاع ۴ تا ۶ متر مسطح شده و این اختلاف ارتفاع باعث می‌شد که عدد SPT در عمق ۱۰/۵ متر در بخش مرتفع‌تر با SPT انجام شده در عمق ۶ متر در ناحیه با ارتفاع کمتر در یک تراز قرار گیرند. از این رو در کلیه محاسبات و نقشه‌ها از تراز انجام SPT استفاده گردید. سپس با انجام آزمون SPT، تغییرات عدد آن با توجه به معیار طبقه‌بندی خاک بر اساس مقاومت نفوذ به دست آمده از اعداد SPT (Murthy, 2007; Rogers, 2006)، جدول شماره ۱، در ۶ مقطع مورد ارزیابی قرار گرفت که با توجه به قرارگیری عمده

یافته‌اند، فاصله دارد ولی تراز سطح آب زیرزمینی در آن مقطع متغیر بوده به نحوی که در مرکز آن مقطع به عمق ۱۰ متری می‌رسد.

زیرسطحی و نیمرخ سطح آب زیرزمینی (شکل‌های ۷-ج، د) حاکی از آن است که اگرچه مقطع F از محل تجمع کارست‌های گچی در منطقه که عمدتاً در جهت جریان آب زیرزمینی تشکیل



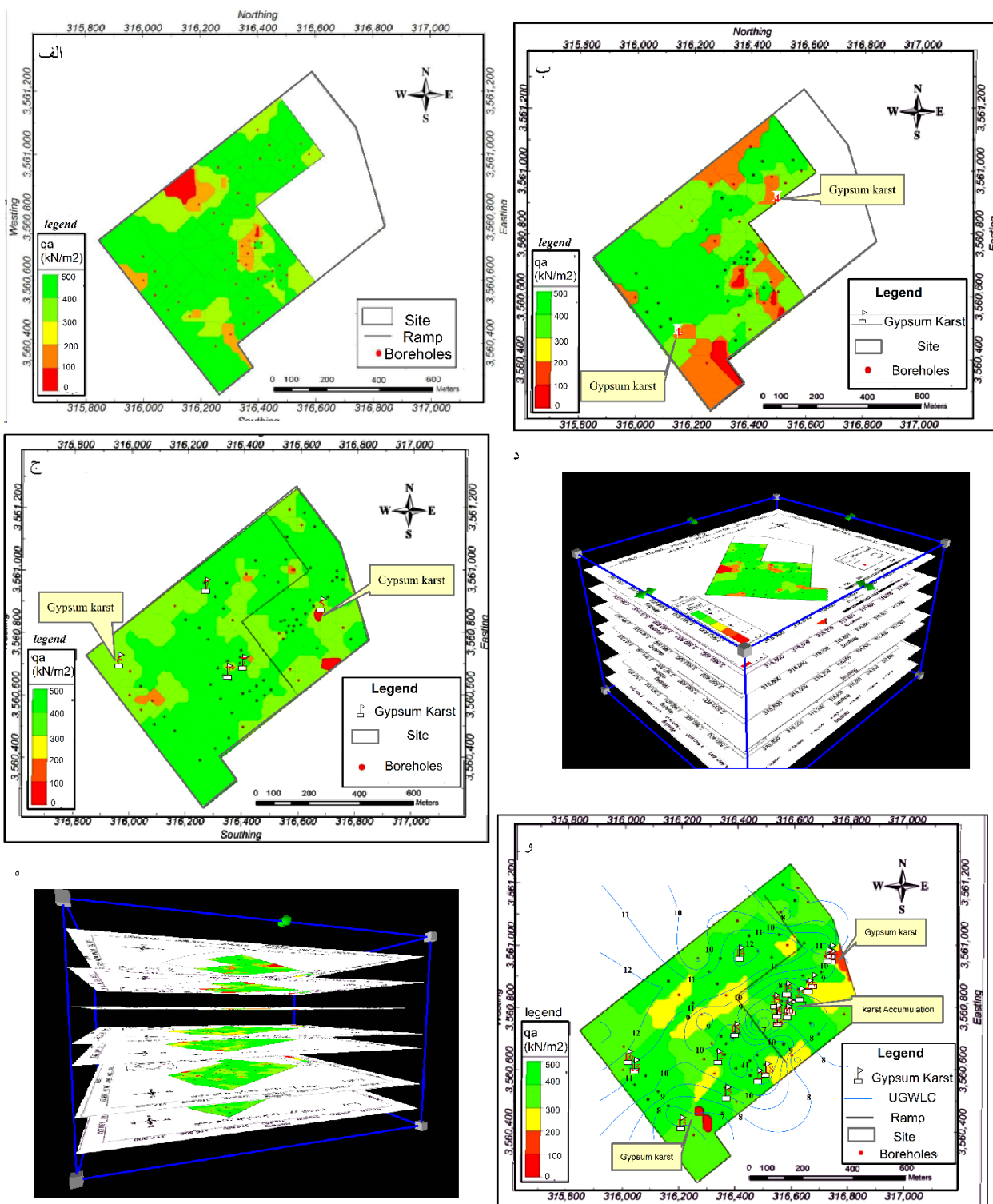
شکل ۷. الف) پروفیل تغییرات عدد N-SPT در مقطع B، ب) پروفیل تغییرات عدد N-SPT در مقطع F، ج) پیاده‌سازی مقطع F در نقشه تراز سطح آب زیرزمینی و ترسیم نیمرخ سطح آب، و د) پیاده‌سازی مقطع F در نقشه جهت جریان آب زیرزمینی و ترسیم نیمرخ سطح آب

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک‌های ریزدانه بر اساس عدد SPT (Rogers, 2006; Murthy, 2007).

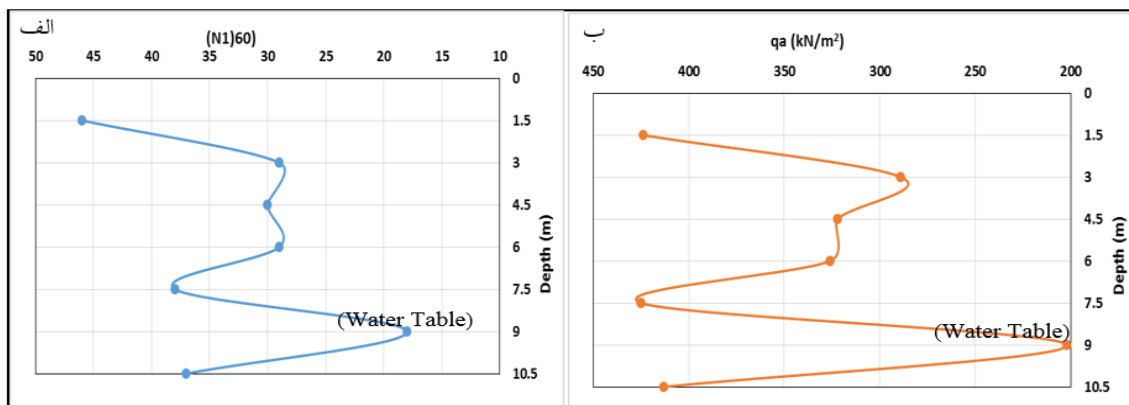
Soil	N SPT	Physical description of soil
Cohesive Soils	<2	Very Soft
	2-4	Soft
	4-8	Firm
	8-15	Stiff
	15-30	Very Stiff
	>30	Hard

پس از آن جهت مشاهده چگونگی توزیع ظرفیت باربری مصالح در نقاط مختلف نقشه‌های پهنه‌بندی ظرفیت باربری مصالح با کمک نرم‌افزارهای Rockworks و ArcGIS از سطح زمین، با فواصل ۱/۵ متری تا عمق ۱۰/۵ متری ترسیم گردید (شکل‌های ۸-الف، ب، ج، و). سپس نقش عوامل متفاوت همچون لایه‌های زمین‌شناسی، سطح آب زیرزمینی (شکل‌های ۸-و و ۹-ب) و کارست‌های گچی (که موقعیت آن‌ها با عمق برخورد به کارست‌ها) در شکل‌های ۸-ب، ج، و قابل مشاهده است بر کاهش ظرفیت باربری با کمک نرم‌افزارهای SURFER و ArcGIS مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر آن تغییرات ظرفیت باربری در اعماق مختلف (شکل‌های ۸-د، ه) نیز با کمک نرم‌افزار Arc Scene 10.5 مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. چنانچه با توجه به نقشه‌های زیرسطحی زمین‌شناسی (شکل ۵) تا اعماق ۹-۱۰ متری سطح زمین خصوصاً در بخش میانی و شمالی، مصالح ساختگاه عمدتاً به صورت یکپارچه از خاک سیلت و رس گچ دار سازند گچساران تشکیل شده و در سایر نقاط که از گستردگی سیلت و رس گچ‌دار کاسته شده، تناوبی از لایه‌بندی پیچیده ژئیس و انیدریت وجود دارد که عمدتاً میزان ظرفیت باربری بالایی دارند. بعلاوه جمع‌بندی کارست‌های گچی شناسایی شده از روش‌های ژئوفیزیکی (GPR) و ژئوتکنیکی (گمانه‌هایی که در آن‌ها کارست گچی گزارش شده) مشخص گردید که حفرات و کارست‌های گچی منطقه در اعماق ۳۶-۴ متری سطح زمین با عمق میانگین ۱۶ متری تشکیل شده‌اند که از مجموع ۳۲ حفره و کارست شناسایی شده تعداد ۲۳ مورد از آن‌ها با عمق میانگین ۱۹/۶ در گچی مشاهده گردید (شکل ۸-و).

زیر سطح آب زیرزمینی واقع شده‌اند و تعداد ۹ مورد از آن‌ها با عمق میانگین ۶/۵ متر بالای سطح آب زیرزمینی تشکیل شده‌اند. در مجموع تلفیق نقشه‌های زمین‌شناسی، کارست‌های گچی و نقشه‌های پهنه‌بندی ظرفیت باربری در اعماق مختلف حاکمی وجود مقادیر متفاوتی از میزان ظرفیت باربری در محدوده مورد مطالعه به دلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی، وجود کارست‌های گچی و لایه‌بندی پیچیده سازند گچساران می‌باشد. زیرا لایه‌های گچ‌دار سازند گچساران در حالت خشک (در ۱۰ متر زیر سطح زمین) ظرفیت باربری خوبی از خود نشان می‌دهند ولی در عمق ۱۰ متر ظرفیت باربری به دلیل وجود آب زیرزمینی دچار تغییر می‌گردد. اگرچه تنش مؤثر آب منفذی از پیش در محاسبات SPT در اعماق مختلف دخالت داده شده و مقادیر آن تصحیح شده است، با این حال در شکل ۹ به وضوح کاهش مقادیر نفوذ SPT و ظرفیت باربری مجاز محاسبه شده در سطح آب زیرزمینی (عمق ۹ متری) برای گمانه شماره ۱۰، به‌طور مثال قابل مشاهده است. در ادامه با ورود لایه‌های ظرفیت باربری نرم‌افزار Arc Scene 10.5 (شکل ۸-د)، تغییرات ظرفیت باربری در اعماق مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید با افزایش عمق میزان ظرفیت باربری در مجموع افزایش می‌یابد (شکل ۸-ه). در نهایت نیز با توجه به تشکیل قابل توجه کارست‌های گچی در زیر سطح ایستابی، موقعیت و عمق برخورد به آن‌ها بر روی نقشه پهنه‌بندی ظرفیت باربری بر روی سطح ایستابی پیاده‌سازی شد و کاهش محسوسی در میزان ظرفیت باربری در اعماق به دلیل وجود کارست‌های گچی مشاهده گردید (شکل ۸-و).



شکل ۸. الف) نقشه پهنه‌بندی ظرفیت باربری مجاز در ۱/۵ متر پایین‌تر از سطح زمین، ب) نقشه پهنه‌بندی ظرفیت باربری مجاز در ۴/۵ متر پایین‌تر از سطح زمین به همراه کارست‌های گچی شناسایی شده در این عمق، ج) نقشه پهنه‌بندی ظرفیت باربری مجاز در ۷/۵ متر پایین‌تر از سطح زمین به همراه کارست‌های گچی شناسایی شده در این عمق، د) واردکردن نقشه‌های ظرفیت باربری در نرم‌افزار Arc Scene 10.5، ه) بررسی تغییرات ظرفیت باربری با عمق در محدوده مورد مطالعه، و) نقشه پهنه‌بندی تغییرات ظرفیت باربری در تراز سطح آب زیرزمینی به همراه موقعیت کارست‌های گچی و عمق برخورد به آن‌ها در زیر سطح آب زیرزمینی



شکل ۹. تغییرات عمق لایه‌ها در گمانه BH-10، نسبت به الف) اعداد (N1)60 آزمون SPT و ب) ظرفیت باربری مجاز لایه‌ها

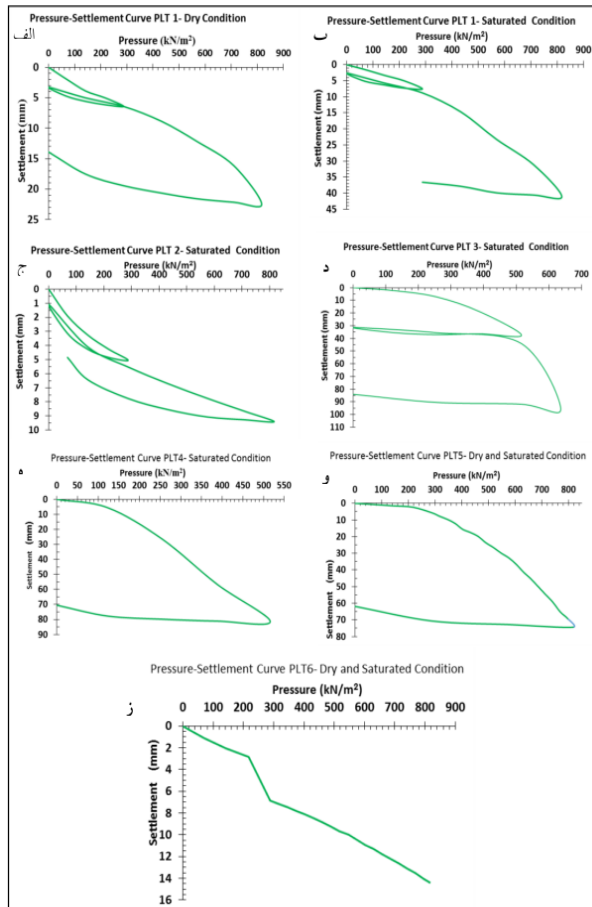
۵-۴. آزمون بارگذاری صفحه PLT

با توجه به ویژگی‌های خاک مسئله‌دار گچی سازند گچساران به منظور بررسی بدترین احتمال نشست پذیری ممکن در محل پروژه پس از حفر چاهک‌ها و جاگذاری، آماده‌سازی و تنظیم سربارها در محل با کمک جرثقیل (شکل‌های ۱۰-الف، ب)، سربار اعمالی نهایی (با وزن ۴۰ تن) را به صورت دوره‌های بارگذاری و باربرداری وارد (شکل‌های ۱۰-ب و ج) و با کمک گچ‌های اندازه‌گیری کرنش (شکل ۱۰-د) آزمون بارگذاری صفحه PLT در شرایط خشک (رطوبت طبیعی خاک) (شکل ۱۰-ه) و اشباع (رطوبت خاک در حالت اشباع) (شکل ۱۰-و) انجام گرفت. بدین منظور نخست آزمایش PLT در چاهک شماره ۱ به صورت خشک و اشباع به صورت مجزا انجام شد، که نشست نهایی تقریباً ۲ برابری در شرایط اشباع نسبت به شرایط خشک اندازه‌گیری گردید. بنابراین با توجه به حساسیت پروژه، جهت مطالعه و ارزیابی رفتار دقیق نشست پذیری خاک‌های گچی سازند گچساران در زمان قرارگیری مخازن بزرگ و حساس پتروشیمی و اندازه‌گیری بیشترین مقدار نشست در بدترین شرایط تحت تأثیر فرایندهای آبشویی و انحلال گچ، آزمایش برجا بارگذاری صفحه‌ای (PLT) در چاهک‌های شماره ۲، ۳، ۴ به صورت اشباع و در چاهک‌های شماره ۵ و ۶ به صورت خشک و اشباع ترکیبی انجام پذیرفت. در حالت خشک و اشباع ترکیبی آزمایش ابتدا در محیط خشک آغاز شده و سپس هم‌زمان با چهارمین گام بارگذاری، بدون متوقف کردن آزمایش جهت اشباع کردن محیط، جریان آب در

اطراف صفحه بارگذاری قرار گرفت. که نتایج آزمایش با توجه به منحنی‌های فشار - نشست هر کدام از چاهک‌ها (شکل ۱۱) حاکی از آن بود خاک گچی در شرایط خشک رفتاری مشابه خاک معمولی دارد ولی با اشباع شدن محیط رفتار خاک ناشی از انحلال و آبشویی تغییر کرده و نرخ نشست‌ها به خصوص در چاهک‌های PL3 و PL4 با بافت سیلتی به شدت افزایش یافته است. چون که ذرات ماسه و سیلت چسبندگی پایین تری در مقایسه با ذرات رسی داشته و در این نوع خاک‌ها ذرات توسط پیوندهای رسی یا سیلتی به یکدیگر چسبیده‌اند و ساختمان متخلخلی شکل گرفته است و با اشباع خاک گچی، دانه‌های ماسه و سیلت در اثر خمیری شدن رس بر روی یکدیگر می‌لغزند و در فضای خالی بین دانه‌ای (با توجه به نسبت پوکی بالای این نوع خاک‌ها به دلیل از دست رفت جرم ناشی از آبشویی و انحلال گچ) فرومی‌ریزند و در نتیجه خاک کاهش حجم پیدا می‌کند. همچنین با توجه به پایین بودن مدول الاستیسته و مدول عکس‌العمل بستر در این شرایط، خاک نرم‌تر و ضعیف‌تر بوده و تمایل بیشتری به تغییر شکل و نشست دارد. بنابراین نمی‌تواند بارهای اعمال شده را از سازه‌ها را به خوبی تحمل و منتقل کند. این موضوع منجر به نشست زیاد، تغییر شکل بیش‌ازحد و حتی گسیختگی خاک گچی در زیر فونداسیون را در پی دارد که باعث کاهش پایداری و ایمنی سازه‌های پتروشیمی می‌شود (جدول ۲). علاوه بر این نتایج حاصل از آزمایش PLT نشان داد، با افزایش میزان بار، میزان نشست صفحه به‌طور یکنواخت در حال افزایش است. از آنجاکه

میزان ظرفیت باربری مجاز در آن محدوده‌ها برای پی منفرد و گسترده بیش از 816 kN/m^2 می‌باشد (جدول ۲).

میزان نشست صفحه پس از اعمال بار نهایی در PLT_1 در شرایط خشک، PLT_2 در شرایط اشباع و PLT_6 در شرایط خشک و اشباع ترکیبی کمتر از ۲۵ میلی‌متر می‌باشد بنابراین



شکل ۱۰. الف) آماده‌سازی و جاگذاری سربارها در محل چاهک مورد آزمایش، ب) آماده‌سازی و تنظیم سربارها با کمک جرتقیل، ج) سربار اعمالی نهایی با وزن ۴۰ تن، د) گنج‌های اندازه‌گیری کرنش، ه) انجام آزمایش در شرایط خشک، و) انجام آزمایش در شرایط اشباع

شکل ۱۱. منحنی بار- نشست در حالت، الف) خشک PLT_1 ، ب) اشباع PLT_1 ، ج) اشباع PLT_2 ، د) اشباع PLT_3 ، ه) اشباع PLT_4 ، و) خشک و اشباع PLT_5 ، ز) در حالت خشک و اشباع PLT_6

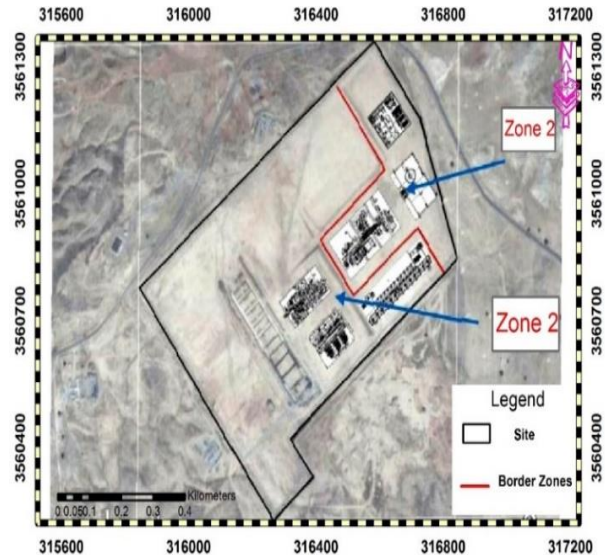
جدول ۲. نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در محدوده مورد مطالعه

PLT	Soil class	Time Duration (hr)	Condition	Settlement (mm)	Ultimate Bearing Capacity (kPa)	SF	Allowable Bearing Capacity (kPa)	Modules of Elasticity (MPa)	K_s (kN/m^3)
PLT_1	CL	5.5	Dry	25	>816	2	408	11.31	32640
PLT_1	CL	15.5	Saturated	25	620	2	310	6.05	24800
PLT_2	CL	8	Saturated	25	>816	2	408	27.69	32640
PLT_3	ML	3.30	Saturated	25	450	2	225	2.04	18000
PLT_4	ML	3.30	Saturated	25	245	2	122	2.31	9800
PLT_5	CL	26.2	Dry and Saturated	25	500	2	250	3.47	20000
PLT_6	CL	33.5	Dry and Saturated	25	>816	2	408	17.95	32640

متر) امتداد دارد و مقدار عدد SPT در این لایه از ۱۴ تا ۳۲ در این لایه متفاوت است. لایه ۲: این لایه عموماً از خاک سیلت و رس سخت و گاه‌آمارن و سنگ‌های ضعیف و خرد شده ژپس تشکیل شده است که در تمام گمانه‌های زیر لایه ۱، تا عمق حدود ۲۰ متر با مقادیر SPT، ۳۲-۵۰ تشکیل شده است. ۴-۶-۲. مشخصات پهنه دوم

در این لایه نیز خاک از ذرات سیلت و رس گچ دار سازند گچساران شکل گرفته است و در مجموع بر اساس نتایج آزمون‌های ژئوتکنیک (آزمایش‌های برجا، آزمایش‌گاهی و ژئوفیزیکی) (جدول ۳) بافت زیرسطحی در این پهنه شامل یک‌لایه اصلی و یک میان لایه می‌باشد. لایه اصلی، تشکیل شده از خاک سخت، سیلت و رس گچ دار تا عمق ۱۰ تا ۱۸ متر (۱۵ به‌طور متوسط) و مقدار SPT در این لایه بالای ۵۰ می‌باشد. میان لایه نیز، با ضخامت محدود (حداکثر ۲ متر) و مقادیر SPT حدود ۲۸-۳۰ و گاهی کمتر از ۲۰ به دلیل عدم استحکام کافی در اثر وجود کارست‌های گچی می‌باشد که عمق این لایه در گمانه‌ها نیز متفاوت است اما بیشتر در عمق ۸ تا ۱۰ متر (تراز سطح آب زیرزمینی) مشاهده گردید. در نهایت با توجه پیچیدگی رفتار خاک گچی، مقادیر G_s و LL و غیره مستقیم از آزمایش‌های مکانیک خاک به دست آمد ولی برای تعیین مدول الاستیسته جهت دستیابی به بهترین مقادیر طراحی که ایمن و اقتصادی باشد از روش همبستگی استفاده گردید. بدین منظور به‌طور مثال آیین‌نامه FHWA، مقدار مدول الاستیسته را برای خاک سیلتی برابر 400NSPT می‌داند (Sabatini et al., 2002). بعلاوه این پارامتر می‌تواند از آزمایش بارگذاری صفحه نیز به دست آید. بنابراین جهت تعیین دقیق مدول الاستیسته خاک‌های گچی هرکدام از پهنه‌ها مقدار آن با نتایج SPT گمانه‌های مجاور آن، نظیر نتایج SPT گمانه‌های 4, 5, 6, 12 BH و نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای PLT2 تطبیق داده شد و سپس به‌عنوان مقدار مدول الاستیسته نهایی در طراحی لحاظ گردید.

۴-۶. پهنه‌بندی سایت پتروشیمی مسجدسلیمان بر اساس نتایج آزمایش‌ها جهت ارزیابی ظرفیت باربری
در ادامه با توجه به نقش فوق‌العاده صنایع پتروشیمی در اقتصاد کشور و ماهیت متغیر و پیچیده سازند گچساران در محدوده مورد مطالعه جهت افزایش دقت در تخمین ظرفیت باربری، داده‌ها و نتایج آزمون‌های مکانیک خاک به روش‌های آزمایشگاهی و برجا، آزمایش‌های ژئوفیزیکی و همچنین موقعیت قرارگیری سازه‌های حساس پتروشیمی کنار همدیگر گذاشته شده و محدوده مورد مطالعه به ۲ پهنه تقسیم شده (شکل ۱۲) و ظرفیت باربری مجاز هرکدام از پهنه‌ها جهت طراحی و مکان‌یابی مناسب سازه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۱۲. پهنه‌بندی سایت پتروشیمی با توجه با پارامترهای ژئوتکنیکی و موقعیت قرارگیری سازه‌ها

۴-۶-۱. مشخصات پهنه اول

همانند کل سایت، خاک رس و سیلت گچ دار سازند گچساران، بافت اصلی زیرسطحی این پهنه است اما در برخی از گمانه‌ها نیز مارن و سنگ گچ خرد شده مشاهده گردید و در مجموع بر اساس نتایج آزمون‌های ژئوتکنیک (آزمایش‌های برجا، آزمایشگاهی و ژئوفیزیکی) (جدول ۳) بافت زیرسطحی در این پهنه شامل ۲ لایه اصلی می‌باشد. لایه ۱، لایه خاک سیلت و رس گچ دار که در سه گمانه (BH-84,87,89) تا عمق ۴-۷ متر ولی در گمانه BH-85 تا انتهای گمانه (عمق ۲۰

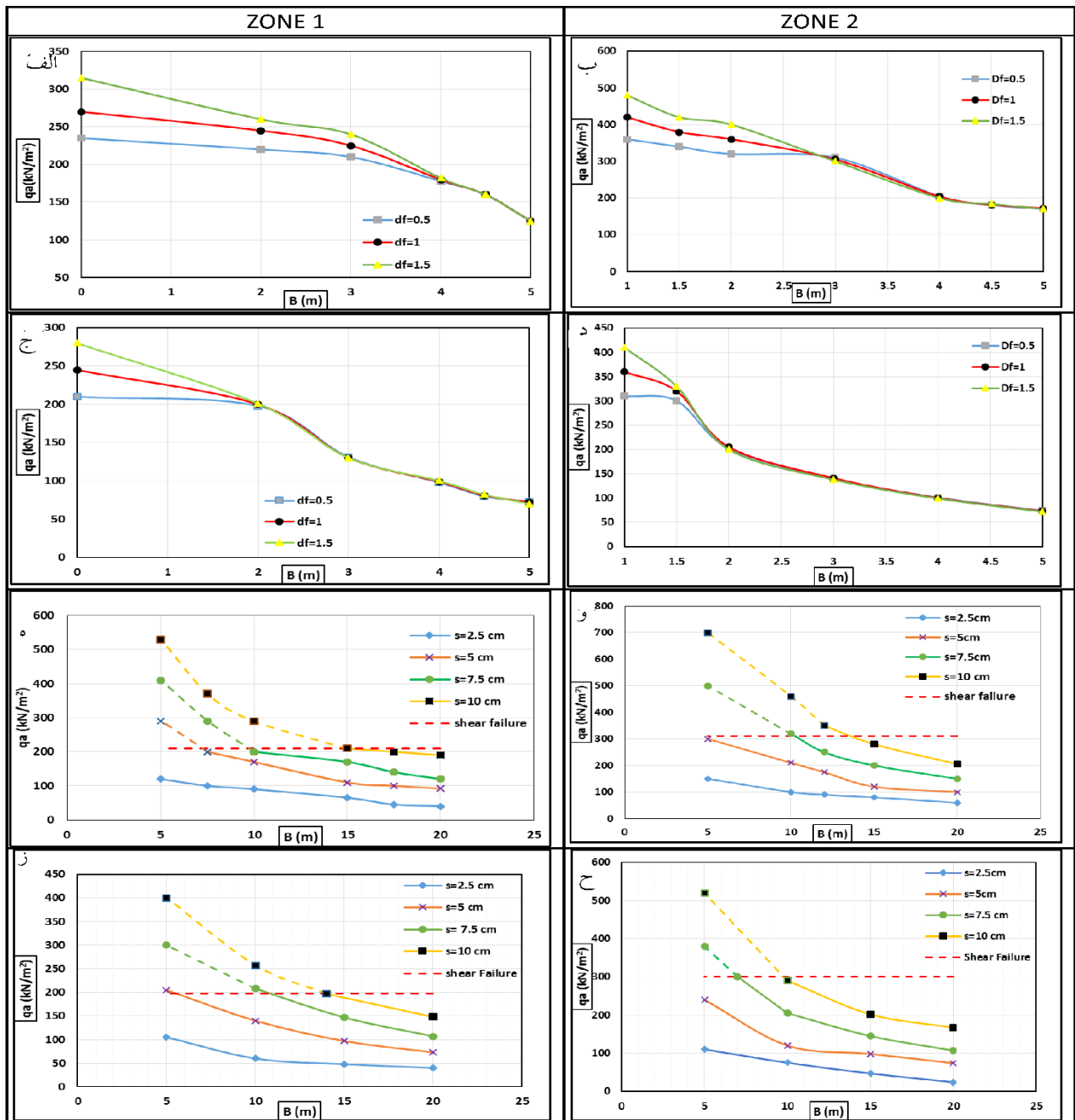
جدول ۳. پارامترهای ژئوتکنیکی پهنه‌های ۱ و ۲ محدوده مورد مطالعه

Geometric Parameter	Zone 1		Zone 2	
	Layer1	Layer2	Layer 1	Inter layer
Depth (m)	0-7	7-20	0-15	8-10
Soil Class	ML/CL/CL-ML	ML/CL/CL-ML	ML/CL/CL-ML	ML/CL/CL-ML
Stiffness	Stiff to v. Stiff	Hard	Hard	Stiff to v. Stiff
N SPT	14-32	>32	>50	28-30
w (%)	12-13	8-19	5-16	13
e (%)	0.7	0.65	0.54-61	-
γ (KN/m ³)	18.5	19.5	19.9	19
LL	33-36	28-42	30-42	40
PI	9-13	6-17	5-19	19
GS	2.67	2.68	2.68	2.67
ϕ (deg)	24	-	25	-
C (ton/m ²)	17	-	3	-
E(ton/m ²)	2600	4000	4000	2600
ν	0.4	0.45	0.45	0.45
C _c	0.17	0.15	0.125	-
C _s	0.04	0.04	0.04	-
OCR	>5	>2	>5	-

تقریباً برابر شده است. علاوه بر آن مقاومت برشی خاک، شاخص اصلی و حیاتی برای تعیین ظرفیت باربری پی گسترده بوده و لازم است ظرفیت باربری در پهنه‌ها، از مقاومت برشی محاسبه شده تجاوز نکند تا از گسیختگی برشی خاک جلوگیری شود. همچنین با توجه به اینکه جهت محاسبه ظرفیت باربری بر مبنای عدد SPT با استفاده از روش باولز (Bowles, 2001) پی مربعی با عرض و طول ۳ متر فرض شد که مقایسه آن با ظرفیت باربری محاسبه شده برای پی مربعی با همان عرض که توسط روابط تحلیلی هانسن (Hansen, 1970) بر اساس پارامترهای خاک همچون چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در پهنه‌های مختلف انجام شده، حاکی از آن است که ظرفیت باربری محاسبه شده از طریق رابطه هانسن (Hansen, 1970) به دلیل تکیه بر پارامترهای مکانیکی خاک واقع بینانه‌تر و ظرفیت باربری به دست آمده بر اساس داده‌های SPT به دلیل تکیه بر روابط تجربی محافظه کارانه‌تر است. هرچند استفاده از هر دو روش به صورت مکمل برای طراحی مطمئن تر است. در مجموع به دلیل قرارگیری کارست‌های گچی در اعماق و در میان لایه‌های خرده‌سنگی از ژئیس و انیدریت و قرارگیری سطح آب زیرزمینی در عمق ۱۰-۹ متر، ظرفیت باربری پهنه شماره ۲ بیشتر از پهنه شماره ۱ می‌باشد.

با توجه به شرایط زمین‌شناسی پروژه و گسترش لایه‌های رسی تا اعماق، عمق تحت تأثیر تنش به اندازه 2B و 4B در زیر سطح فونداسیون به ترتیب برای پی‌های مربعی و نواری در نظر گرفته شد و همچنین با توجه به اینکه نشست تحکیمی محاسبه شده طبق روش ادنومتری، یک‌بعدی است و نشست واقعی نسبت به نشست تک‌بعدی کمتر است بر مبنای نوع خاک رس پیش تحکیمی در این پژوهش ضریب اصلاح 0.4 فرض شد (Skempton and Bjerrum, 1957). بعلاوه مقدار نشست مجاز پی منفرد و نواری، ۱ اینچ (۲/۵۴ سانتی‌متر)، در نظر گرفته شد و ظرفیت باربری مجاز برای پی‌های منفرد مربعی (شکل‌های ۱۳، الف و ب) و نواری (شکل ۱۳، ج و د)، برای هر دو پهنه در عمق و عرض‌های مختلف و برای پی گسترده تحت نشست‌های مختلف در هر دو پهنه با مقادیر $L/B=1$ و $L/B=2$ به ترتیب در شکل‌های ۱۳-ه، و، و ۱۳-ز، محاسبه گردید. در نهایت نیز با مقایسه آن با مقادیر به دست آمده از مقاومت برشی خاک، حداقل مقدار به عنوان ظرفیت باربری مجاز پی گزارش شد.

با توجه به شکل ۱۳ نتایج حاکی از آن است با افزایش عمق مؤثر پی، ظرفیت باربری افزایش یافته است و همچنین زمانی که عرض پی بزرگ‌تر می‌شود، توزیع تنش و ضریب اثر عمق در پی تغییر کرده به نحوی که در عرض‌های بزرگ‌تر، یکسان یا



شکل ۱۳. الف) ظرفیت باربری مجاز پی منفرد مربعی ($L/B=1$) در عمق‌های مختلف (نشست مجاز = ۱ اینچ) در پهنه ۱، ب) ظرفیت باربری مجاز پی منفرد مربعی ($L/B=1$) در عمق‌های مختلف (نشست مجاز = ۱ اینچ) در پهنه ۲، ج) ظرفیت باربری مجاز پی منفرد نواری ($L/B>5$) در عمق‌های مختلف (نشست مجاز = ۱ اینچ) در پهنه ۱، د) ظرفیت باربری مجاز پی منفرد نواری ($L/B>5$) در عمق‌های مختلف (نشست مجاز = ۱ اینچ) در پهنه ۲، ه) ظرفیت باربری مجاز پی گسترده مربعی ($L/B=1$) بر مبنای نشست مجاز و گسیختگی برشی (به‌عنوان عامل محدودکننده) در پهنه ۱، و) ظرفیت باربری مجاز پی گسترده ($L/B=1$) بر مبنای نشست مجاز و گسیختگی برشی (به‌عنوان عامل محدودکننده) در پهنه ۲، ز) ظرفیت باربری مجاز پی گسترده ($L/B=2$) بر مبنای نشست مجاز و گسیختگی برشی (به‌عنوان عامل محدودکننده) در پهنه ۱، ح) ظرفیت باربری مجاز پی گسترده ($L/B=2$) بر مبنای نشست مجاز و گسیختگی برشی (به‌عنوان عامل محدودکننده) در پهنه ۲

۵. نتایج

خاک‌های گچی به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی گچ در خاک دارای پیچیدگی‌های خاص خود می‌باشند. این نوع خاک‌ها در شرایط خشک مقاومت و خصوصیات مهندسی مناسبی داشته اما در مواجهه با آب و رطوبت، به دلیل حل شدن گچ و از دست رفت جرم خاک، دچار کاهش شدید مقاومت خاک و در نتیجه منجر به نشست قابل توجه سازه‌ها می‌شوند. در واقع در این نوع خاک‌ها، انحلال ذرات گچ باعث افزایش تخلخل و پوکی خاک می‌شود که در نتیجه آن ظرفیت باربری کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه وجود محدودیت‌هایی نظیر ۱- تغییر ماهیت رفتار مهندسی خاک گچی در شرایط اشباع نسبت به حالت خشک ناشی از فرایندهای انحلال و آبشویی، ۲- گسترده‌گی عوامل تأثیرگذار بر کیفیت و کمیت انحلال خاک‌های گچی و برهم‌کنش این عوامل بر یکدیگر و ۳- نبود دستورالعمل‌های مشخص و استاندارد در خصوص روش برخورد با خاک گچی در پروژه‌های مهندسی (از نحوه انجام آزمایش‌های مکانیک خاک بر روی آن‌ها تا تثبیت و مقابله با آن‌ها) باعث شده این نوع خاک‌ها حالت معماگونه داشته و پژوهش‌ها بر روی آن‌ها بسیار محدودتر از سایر خاک‌های مسئله‌دار صورت پذیرد. بنابراین در این پژوهش جهت رفع این محدودیت‌ها با توجه به حساسیت پروژه از نقشه‌های پهنه‌بندی جهت فراهم کردن اطلاعات تفصیلی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی زمین استفاده گردید. این نقشه‌ها علاوه بر ارائه پیش‌آگاهی در خصوص شرایط پهنه‌های مختلف، می‌توانند دورنمایی از نقاط مستعد برای اجرای مخازن و تأسیسات سنگین پتروشیمی با کمک اطلاعاتی همچون جنس، عمق و بافت خاک، سطح آب زیرزمینی، حضور کارست‌های گچی در محیط نرم‌افزارهای Rockworks و ArcGIS ارائه کنند و منجر به کاهش هزینه انجام مطالعات شوند. علی‌هذا با توجه به مشاهدات صحرائی، نقشه‌ها و پروفیل‌های ترسیم شده مشخص گردید که سایت پتروشیمی مسجدسلیمان دارای لایه‌بندی کاملاً پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی شامل خاک‌های ریزدانه همچون رس و سیلت با مقادیر

مختلفی از گچ و سنگ ژپس (در اعماق) سازند گچساران می‌باشد. مصالح سایت از لحاظ سختی عمدتاً بسیار سفت و سخت هستند و عدد SPT در مصالح ساختگاه عمدتاً بیش از ۳۰ می‌باشد. در ناحیه شمال شرقی ساختگاه (مقطع F) مصالح به دلیل تغییرات آب زیرزمینی دارای سختی کمتری نسبت به سایر نقاط می‌باشند. در ادامه با انجام آزمون عمق‌یاب با سنسور الکتریکی در گمانه‌های حفاری شده مشخص گردید سطح آب زیرزمینی در عمق متوسط ۹-۱۰ متر می‌باشد. همچنین تلفیق داده‌های ژئوتکنیکی (GPR) و حفاری (گمانه‌ها) حاکی از وجود ۳۲ کارست‌های گچی در اعماق مختلف بود که با توجه به قرارگیری و تجمع بالغ‌بر ۲۳ حفره کارستی در زیر تراز سطح آب زیرزمینی و تشکیل آن‌ها در محل تجمع جهت جریان آب زیرزمینی به نظر می‌رسد نقش آب زیرزمینی و تغییرات آن در منطقه پررنگ‌تر از سایر عوامل می‌باشد.

با توجه به نتایج آزمون SPT و یکنواختی تقریبی در بافت لایه‌های زیرسطحی، با پیاده‌سازی نقشه کارست‌های گچی در اعماق مختلف بر روی نقشه‌های پهنه‌بندی ظرفیت باربری، تغییرات آن را می‌توان به وجود میان لایه‌ها و لایه‌هایی با مقاومت پایین، انحلال و آبشویی گچ از خاک تحت تأثیر نفوذ آب سطحی، تغییرات آب زیرزمینی و در نهایت تشکیل کارست‌های گچی در طول زمان انسانی به‌عنوان مشکل اصلی در منطقه مورد مطالعه نسبت داد. چراکه کارست‌های گچی موجب کاهش مقاومت زمین‌شناسی و ظرفیت باربری شده و احتمال نشست و جابه‌جایی را افزایش می‌دهند.

چنانچه آزمایش بارگذاری صفحه در شرایط اشباع نشان داد رفتار خاک ناشی از انحلال و آبشویی تغییر کرده و نرخ نشست‌ها به‌خصوص در چاهک‌های PL3 و PL4 با بافت سیلتی به‌شدت افزایش یافته است. چراکه ذرات ماسه و سیلت چسبندگی پایین‌تری در مقایسه با ذرات رسی داشته و در این نوع خاک‌ها ذرات توسط پیوندهای رسی یا سیلتی به یکدیگر چسبیده‌اند و ساختمان متخلخلی شکل گرفته است و با اشباع خاک گچی، دانه‌های ماسه و سیلت در اثر خمیری شدن رس

خالی بالقوه را پر می‌کنند و خاک سست را فشرده و جامد می‌کنند. در نتیجه، آن‌ها کمترین تعامل را با محیط اطراف دارند و پس از تنظیم بی‌اثر می‌مانند و آن‌ها را به گزینه‌ای پایدار تبدیل می‌کند. همچنین در محیط طرح‌های فونداسیونی ترکیبی یعنی پی‌های منفرد یا نواری (که عمق نفوذ محدودی دارند) همراه پی‌های شمعی، به‌خصوص در مکان‌های بحرانی با تجمع کارست گچی، با توجه به نقشه‌های سنگ‌بستر و کارست گچی (حاصل از تلفیق روش‌های ژئوفیزیکی (GPR) و ژئوتکنیکی (گمانه‌ها)) استفاده شود تا ضمن توزیع بار، آن را به لایه‌های پایدار عمیق‌تر منتقل کند. بدین‌وسیله از خرابی فاجعه‌بار ناشی از دست دادن تکیه‌گاه موضعی جلوگیری می‌شود.

علاوه بر این ضروری است عملیات تثبیت لایه‌های سطحی با کمک مواد افزودنی در محدوده مورد مطالعه صورت گرفته و زهکش‌های سطحی مناسب در سایت پتروشیمی مسجدسلیمان تعبیه گردد. در نهایت با شناسایی کارست‌های گچی در منطقه و اثرگذاری آن‌ها بر ظرفیت باربری لازم است ضمن خودداری از اجرای سازه‌های حساس بر روی کارست‌های گچی زیرسطحی (به‌خصوص در محل تجمع آن‌ها در منطقه) در ادامه این پژوهش، اثرات هندسه کارست‌ها، عمق کارست‌ها، توزیع و موقعیت آن‌ها نسبت به مرکز فونداسیون در درجات مختلف انحلال و آبشویی در منطقه مورد مطالعه به روش المان محدود جهت کارایی بهتر طراحی، بهینه‌سازی نسبت‌های هندسی در سازه‌های فونداسیون، پیش‌بینی و کاهش شکست فونداسیون و کاهش سایر خطرات مرتبط با خاک‌های گچی مورد مطالعه قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

در پایان از دانشگاه تربیت مدرس و شرکت زمین فیزیک پویا که امکان انجام این پژوهش را فراهم آورده و ما را در انجام آن یاری نموده تشکر و قدردانی می‌گردد.

بر روی یکدیگر می‌لغزند و در فضای خالی بین‌دانه‌ای (با توجه به نسبت پوکی بالای این نوع خاک‌ها به دلیل از دست رفت جرم ناشی از آبشویی و انحلال گچ) فرومی‌ریزند و در نتیجه خاک کاهش حجم پیدا می‌کند. همچنین با توجه به پایین بودن مدول الاستیسته و مدول عکس‌العمل بستر در این شرایط، خاک نرم‌تر و ضعیف‌تر بوده و تمایل بیشتری به تغییر شکل و نشست دارد. بنابراین نمی‌تواند بارهای اعمال شده را از سازه‌ها را به‌خوبی تحمل و منتقل کند. این موضوع منجر به نشست زیاد، تغییر شکل بیش‌ازحد و حتی گسیختگی خاک گچی در زیر فونداسیون را در پی دارد که باعث کاهش پایداری و ایمنی سازه‌های پتروشیمی می‌شود.

بنابراین در گام دوم این پژوهش جهت محاسبه ظرفیت باربری با کنار هم گذاشتن پارامترهای آزمون‌های ژئوتکنیکی (آزمایش‌گاهی، بر جا و ژئوفیزیکی) و موقعیت قرارگیری سازه‌های حساس پتروشیمی، سایت پتروشیمی به دو پهنه مجزا تقسیم، و در هر پهنه ظرفیت باربری پی‌های منفرد مربعی، نواری و گسترده محاسبه و مشخص گردید ظرفیت باربری در پهنه شماره ۲ به دلیل قرارگیری کارست‌های گچی در اعماق و در میان لایه‌های خرده‌سنگی از ژپس و انیدریت و قرارگیری سطح آب زیرزمینی در عمق ۹-۱۰ متر، بیشتر از پهنه شماره ۱ می‌باشد. همچنین ضروری است ظرفیت باربری در پهنه‌ها، از مقاومت برشی محاسبه‌شده تجاوز نکند تا از گسیختگی برشی خاک جلوگیری شود. در نهایت با توجه به وجود ۲۳ مورد کارست گچی با عمق میانگین ۱۹/۶ متر در زیر سطح آب زیرزمینی منطقه، پیشنهاد می‌گردد جهت افزایش ضریب ایمنی و پیشگیری از هرگونه خسارت احتمالی کارست‌های گچی شناسایی شده با تزریق ملات کم‌تحرك در لایه‌های زیرسطحی تثبیت گردند، این نوع ملات که به ملات خشک ویسکوزیته بالا گفته می‌شود با خاک ترکیب نمی‌شوند و نفوذپذیری آن را تغییر نمی‌دهند یا باعث شکستگی نمی‌شوند. در عوض، توده‌های متمرکزی را تشکیل می‌دهند که در فشارهای بسیار بالا تا ۶۰ بار تزریق می‌شوند، فضاهای

منابع

- اجل لوثیان، ر.، صداقت، م.، ۱۳۹۴. کاربرد آزمون‌های صحرایی در ژئوتکنیک، انتشارات قرارگاه سازندگی و جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر.
- اطیابی، ا.، ۱۳۹۲. تحلیل و طراحی پی، تألیف: بولز، انتشارات اشراقی.
- امیری بختیار، ح.، نورانی نژاد، خ.، ۱۳۹۳. بازننگری چینه‌شناسی زاگرس: سازندهای گچساران، ماهنامه اکتشاف و تولید و نفت و گاز، پیاپی ۱۱۱، صفحات ۴۵-۴۰.
- بلوری یزاز، ج.، ملاحسنی، ع.، حسینی، س. م.، ۱۳۸۹. بررسی رابطه بین ضرایب تغییر شکل خاک تعیین شده با استفاده از آزمایشات بارگذاری صفحه برج و آزمایشگاهی، نشریه مهندسی عمران فردوسی، سال ۲۲، شماره ۱، صفحات ۶۲-۴۵.
- پزشکیان، پ.، کاظم زاده، م.، علی‌زاده، ا.، یزدی، م.، ۱۴۰۴. ارزیابی آزمایشگاهی رفتار ماسه مسلح شده به ژئوگرید قرار گرفته بالای حفرات دو قلو، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۵۵، شماره ۱۱۸، صفحات ۵۲-۳۸.
- پورمهر، ب.، درگاهی، ج.، ۱۳۸۱. غرقاب کانال جهت مقابله با خاک مسئله‌دار، دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، بهمن‌ماه. تومانیان، ن.، ۱۳۹۰. خاک‌های گچی (ویژگی و کاربرد)، انتشارات پلک، چاپ اول، ۲۱۰ صفحه.
- جوکار، م. ح.، خامه چیان، م.، نیکودل، م. ر.، ۱۳۹۸. بررسی علل فرسایش شدید خاک‌های گچ دار مجتمع پتروشیمی مسجد سلیمان با تأکید بر واگرایی و انحلال‌پذیری، نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۲، شماره ۱، صفحات ۹۲-۷۵.
- شرکت زمین فیزیک پویا. ۱۳۹۴. گزارش نهایی بررسی خاک پروژه پتروشیمی مسجد سلیمان، ۱۴۵ ص.
- صابرلیزی، ن.، کریمپور فرد، م.، عفتی، م.، ۱۴۰۰. پهنه‌بندی پارامترهای مقاومتی خاک شهر رشت با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۸، صفحات ۳۳۳۴-۳۳۱۷.
- عباسپور، س.، دعاوی، ح.، فیلی، ج.، ۱۳۸۷. روش اجرایی علاج بخشی کانال‌های ساخته‌شده در خاک‌های گچی شبکه‌های آبیاری در حال بهره‌برداری (مطالعه موردی کانال A شبکه آبیاری بهبهان)، اولین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، خردادماه.
- عباسی، ن.، افشاریان، ع. ع.، ۱۳۹۷. ارزیابی تأثیر برخی عوامل محیطی بر میزان انحلال گچ در خاک‌های گچی، نشریه علوم آب‌و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال ۲۲، شماره ۱، صفحات ۱۳-۱.
- علیزاده مجدی، ع.، دبیری، ر.، ۱۳۹۸. تخمین نتایج آزمایش SPT با استفاده از روش‌های احتمالاتی و شبکه عصبی در لایه‌های رسی (مطالعه موردی: لایه‌های رسی تبریز)، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۳۱، صفحات ۷۴-۶۲.
- عساکره، ع.، مصفا، م.، ۱۳۹۹. پهنه‌بندی پارامترهای مقاومتی خاک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS (مطالعه موردی شهر بندرعباس)، نشریه علمی پژوهشی سازه و ساخت، دوره ۷، شماره ویژه ۲، صفحات ۴۰-۲۲.
- مظاهری، ا. ر.، خزایی، ج.، نجف پور، ح. ر.، ۱۳۹۹. ارائه رابطه‌ای جدید و کاربردی جهت تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های درشت‌دانه با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد، نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، جلد ۵۰، شماره ۳، صفحات ۱۰۰-۸۴.
- مکوندی، ا.، اعتضادی، پ.، ۱۳۹۰. کاربرد عایق‌های ژئوسنتتیک (ژئوممبرین‌های HDPE) جهت پوشش کانال‌های آبیاری و زهکشی (کانال شهید چمران)، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق‌آبی، بهمن‌ماه.
- منصوری کیا، م. ت.، کیامنش، ح.، شاهرخ، ب.، ۱۳۷۹. ساخت کانال‌های آبیاری در خاک‌های گچ دار، محدودیت‌ها و راهکارها، کارگاه فنی - تخصصی ساخت کانال‌ها، محدودیت‌ها و راهکارها، بهمن‌ماه.
- هاشمی فرد، ا.، کردوانی، پ.، اسدیان، ف.، ۱۳۹۷. بررسی تغییر فرم سازند گچساران در محدوده سد گتوند علیا با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور راداری، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال ۱۱، شماره ۴۰، صفحات ۶۲-۴۹.
- یغمائیان مهابادی، ن.، گیوی، ج.، ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری گچ در برخی خاک‌های اصفهان، نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال ۱۱، شماره ۴۲ (ب)، صفحات ۵۷۶-۵۶۵.

- Adams, A. G., Dukes, O. M., Tabet, W., Cerato, A. B., Miller, G., A., 2008. Sulfate induced heave in Oklahoma soils due to lime stabilization. In *Geo Congress 2008: Characterization, Monitoring, and Modeling of Geo Systems*. P. 444- 451.
- Al-Banna, L., 2004. Effect of Soaking and Leaching on the Dissolution of Al-Dour Gypsums Soil. M.Sc. Thesis, Building and Construction Department University of Technology, Baghdad, Iraq.
- Al-Dabbas, M., Schanz, T., Yassen, M., 2012. Proposed engineering of gypsiferous soil classification. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(1): 87-94.
- Al-Obaidi, A. A. H., Mohammed, S. M., 2017. Estimate of bearing capacity of gypseous soils from field data. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, P. 1-20.
- Al-Obaidi, A. A., Al-Mafragei, I. H., 2016. Settlement and collapse of gypseous soils. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 23(1): 20-31.
- Al-Riahi, S. M. H., Pauzi, N. I. M., Fattah, M. Y., 2023. Compressibility characteristics of collapsible gypseous soil: A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1205(1): 012068. IOP Publishing.
- Al-Saoudi, N., Al-Khafaji, A. N., Al-Mosawi, M. J., 2013. Challenging problems of gypseous soils in Iraq. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (P. 479-482). Paris: Presses des Ponts.
- ASTM D1586-11, 2022. Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils, ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D422-63, 2007. Standard Test Method for Particle Size Analysis, ASTM International.
- ASTM D421-85, 2007. Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants, ASTM International.
- ASTM D4318, 2018. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International.
- ASTM D854, 2023. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method. ASTM International.
- ASTM D3080-04, 2012. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions. ASTM International.
- ASTM D1195, 2021. Standard Test Method for Repetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. ASTM International.
- ASTM D7400, 2019. Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing. ASTM International.
- Azizi, P., Mahmoodi, S., Torabi, H., Masihabadi, M. H., Homaei, M., 2011. Morphological, physico-chemical and clay mineralogy investigation on gypsiferous soils in southern of Tehran, Iran. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 7(2): 153-161.
- Bowles, J. E., 2001. *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition, McGraw-Hill, New York.
- Brune, G., 1965. Anhydrite and gypsum problems in engineering geology. *Engineering Geology*, 2(1): 26-38.
- Casby-Horton, S., Herrero, J., Rolong, N. A., 2015. Gypsum soils—their morphology, classification, function, and landscapes. *Advances in agronomy*, 130: 231-290.
- Cooper, A. H., Calow, R. C., 1998. *Avoiding Gypsum Geohazards: Guidance For Planning And Construction*. Nottingham: British Geological Society
- Eswaran, H., Zi-Tong, G., 1991. Properties, genesis, classification, and distribution of soils with gypsum. Occurrence, characteristics, and genesis of carbonate, gypsum, and silica accumulations in soils, 26: 89-119.
- Fakhri, B., Sadr Karimi, J., Kiyani, M., 2008. Gypsum dissolution effects on the performance of a large dam. *International Journal of Engineering*, 21(2): 143-150.
- Fakhraldin, M. K., 2020. A Field Study on Bearing Capacity of Al-Najaf Sandy Gypseous Soil. *Key Engineering Materials*, 857: 179-187.
- FAO. 1993. *Agriculture: Toward 2010*. Rome. Italy.
- Fauziah, A, M. Azlin, D. M, Lamyaa, N., 2012. Effect of leaching and gypsum content on proportion of gypsum soil. *International Journal of scientific and research publications*, 2(9):1-5.
- Fidelibus, M. D., Gutiérrez, F., Spilotro, G., 2011. Human-induced hydrogeological changes and sinkholes in the coastal gypsum karst of Lesina Marina area (Foggia Province, Italy). *Engineering Geology*, 118(1-2): 1-19.

- Jabar, Y., Salman, A. D., 2024. Properties of Gypseous Soil. *Current Trends in Civil Engineering and Engineering Sciences 2024, Vol 1: Proceedings of 4ICGE-Iraq*.
- Hansen, J. B., 1970. A revised and extended formula for bearing capacity, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, 28:1- 21.
- Hussein, I. S., Snodi, L. N., 2020. Effect of Cavities from Gypsum Dissolution on Bearing Capacity of Soil under Square Footing. *Key Engineering Materials*, 857: 221-227.
- Liao, S. S., Whitman, R. V., 1986. Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(3): 373-377.
- Lukueta, E. K., Isobe, K., 2024. Bearing Capacity of a Shallow Foundation above the Soil with a Cavity Based on Rigid Plastic Finite Element Method, *Applied Sciences*, 14(5): 1975.
- Mahmood, M. R., Fattah, M. Y., Khalaf, A., 2020. Experimental investigation on the bearing capacity of skirted foundations on submerged gypseous soil. *Marine Georesources & Geotechnology*, 38(10): 1151-1162.
- Meyerhof, G. G., 1956. Penetration tests and bearing capacity of cohesion less soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 82(1): 1-19.
- Meyerhof, G. G., 1974. Penetration testing outside Europe. General report. In *Proc. European Symposium on Penetration Testing*, 2(1): 40-48.
- Mohsen, M. K., Al-Obaidi, Q. A., Asker, A. O., 2022. Improving the gypseous soil bearing capacity using geotextile reinforcement under dry condition. In *Geotechnical Engineering and Sustainable Construction: Sustainable Geotechnical Engineering*, P. 3-13. Singapore: Springer Singapore.
- Murthy, V., 2007. *Advanced Foundation Engineering*, CBS, Publishers & Distributors.
- Nezari, A., Boufarh, R., Mansouri, T., 2024. Numerical Investigation of Bearing Capacity of Centrally and Eccentrically Loaded Surface Footing on Sand-Clay with Void Using Plaxis 2D, *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 10(3): 17506.
- Robertson, P. K., Wride, C. E., 1997. Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT: Seismic Short Course on Evaluation and Mitigation of Earthquake Induced Liquefaction Hazards. In *NCEER Workshop, San Francisco, CA*. P. 41-87.
- Rogers, J. D., 2006. Subsurface exploration using the standard penetration test and the cone penetrometer test. *Environmental & Engineering Geoscience*, 12(2): 161-179.
- Sabatini, P. J., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, J. A., Zettler, T. E., 2002. FHWA-IF-02-034: geotechnical engineering circular no. 5 evaluation of soil and rock properties. Federal Highway Administration, US Department of Transportation Office of Bridge Technology Federal Highway Administration, P. 400.
- Skempton, A. W., 1986. Standard penetration test procedures and the effects in sands of Overburden pressure, relative density, particle size, ageing and over consolidation. *Geotechnique*, 36(3): 425-447.
- Skempton, A. W., Bjerrum, L., 1957. A contribution to the settlement analysis of foundations on clay. *Geotechnique*, 7(4): 168-178.
- Tawfeeq, S. S., 2025. An Analysis of the Bearing Capacity Ratio of the Cavitation-Prone Gypsum Soil. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(4): 25235-25243.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G., 1996. *Soil mechanics in engineering practice*. John wiley & sons.
- Vesic, A. S., 1975. Chap. 3: *Foundation Engineering Handbook*, 1st ed., ed. Winterkorn and Fang, Van Nostrand Reinhold, 751 pp.
- Waltham, T., 2008. Sinkhole Hazard Case Histories in Karst Terrains. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41: 291-300.
- Yilmaz, I., 2001. Gypsum/Anhydrite: Some Engineering Problems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59: 227-230.