

مدل آب زمین شناسی - مهندسی ناحیه فرونشست زمین در جنوب باختری تهران (دشت تهران - شهریار)

مسعود محمودپور^{۱*}، ماشاله خامه چیان^۲، محمدرضا نیکودل^۳، محمدرضا قاسمی^۴

پذیرش مقاله: ۹۵/۰۷/۰۷

دریافت مقاله: ۹۳/۱۱/۱۲

چکیده

فرونشست زمین یکی از مهم ترین مخاطرات زمین شناسی است که ارتباطی تنگاتنگ با توسعه نواحی شهری دارد. برداشت شدید آب زیرزمینی که در اثر توسعه اقتصادی و رشد جمعیت ایجاد می شود به عنوان دلیل اصلی فرونشست زمین در بیشتر شهرهای توسعه یافته بر روی آبخوانها شناخته شده است، به ویژه در مناطقی از نواحی شهری که دارای جمعیت متراکم تر و توسعه اقتصادی بیشتر می باشند. اولین گام در مطالعات پایه ای این پدیده، تهیه مدل آب زمین شناسی- مهندسی است. این مدل در ضمن نمایش واحدهای آب زمین شناسی و مرزهای آنها بیان کننده ویژگی های مکانیکی و فیزیکی آنها نیز می باشد. برای تفکیک و انطباق لایه های خاک از لاگ های زمین شناسی و ویژگی های ژئوتکنیکی آنها (حدود آتربرگ، رده بندی Unified و سرعت موج برشی) استفاده شده است. ثابت های الاستیک لایه های خاک (مدول برشی، مدول یانگ، مدول حجمی و نسبت پواسون) بر پایه دانسیته خاک برآورد شده و روابط تجربی متداول بدست آمده اند. سپس لایه های با ویژگی های مشابه در یک واحد آب زمین شناسی- مهندسی تعریف شده اند. بر پایه این مدل، سامانه آبخوان دشت جنوب باختری تهران چند لایه ای می باشد که دارای سه واحد آبخوان و سه واحد رسی با نفوذپذیری کم است. این پژوهش نشان می دهد که ناهمگنی لایه های خاک از یک ناحیه به ناحیه دیگر (در محدوده دشت تهران-شهریار، از شهریار تا اسلامشهر) تغییر می یابد.

کلید واژه ها: مدل آب زمین شناسی- مهندسی، فرونشست زمین، آبخوان چند لایه ای، دشت تهران- شهریار.

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استاد، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس khamechm@modares.ac.ir

۳. دانشیار، گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۴. دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

فرونشست زمین (land subsidence)، عبارت است از فروریزش یا پایین رفتن سطح زمین که به صورت تغییرات ارتفاعی عمودی سطح زمین قابل شناسایی می‌باشد و با جابه‌جایی‌های اندک افقی نیز همراه است. فرونشست زمین در اثر فرآیندهای طبیعی مانند آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته زمین و خروج گدازه از آن و یا فعالیت‌های انسانی (anthropogenic activities) مانند معدنکاری و برداشت سیالات زیرسطحی (آب‌های زیرزمینی، نفت و یا گاز) ایجاد می‌شود (Galloway, 2013).

فرونشست زمین یکی از مخاطرات زمین‌شناختی می‌باشد که با توسعه کشاورزی و صنعتی در شهرهای بزرگ جهان در چند دهه اخیر مشاهده شده است. امروزه رخدادهای فرونشست زمین در بیش از ۱۵۰ شهر مهم جهان گزارش شده است و در بسیاری از کشورها مانند مکزیک، استرالیا، کلمبیا، چین، آمریکا، تایلند، هند، ژاپن، ایتالیا، هلند، ونزوئلا، مصر، عربستان سعودی، انگلستان، فرانسه، لهستان، سوئد و ایران روی داده است (Hu et al., 2004, Hu, 2006).

یکی از مراحل مهم در بررسی و تعیین نرخ فرونشست زمین و پیش‌بینی وضعیت آینده آن در یک منطقه، مرحله مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی است. برای ورود به این مرحله می‌بایست مدل زمین‌شناسی حوضه رسوبی آبخوان منطقه تهیه شود. تهیه این مدل براساس برش‌های زمین‌شناسی و داده‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای (مانند ضرایب الاستیک خاک جهت انطباق برخی از لایه‌ها) لایه‌های زمین امکان‌پذیر است (Passadore et al., 2012). پارامترهایی مانند تغییر در ضخامت و ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی لایه‌های زمین تأثیر مستقیمی بر شکل و طرح فرونشست زمین دارند (Ma et al., 2006).

مدل آب زمین‌شناسی، می‌بایست زمین ناحیه مورد بررسی را به زون‌ها و یا لایه‌هایی که هر کدام دارای ویژگی‌های هیدرومکانیکی خاص خود می‌باشند تقسیم نماید. چنین مدلی می‌باید ضمن نشان دادن تغییرات لیتولوژیکی حوضه رسوبی آبخوان و تعیین مرز آن‌ها، در برگیرنده تفکیک جنس و بیانگر

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نهشته‌های رسوبی (رس،

سیلت، ماسه و شن) باشد (Price, 2009).

شناخت لایه‌های زمین و تعیین ویژگی‌های آن‌ها به جهت تهیه مدل زمین‌شناسی برای نواحی که فرونشست زمین در آن‌ها رخ داده است توسط بسیاری از محققین انجام شده است. مدل ارائه شده برای ناحیه Taiyuan در کشور چین نشان دهنده واحدهای رسوبی ناهمگن در منطقه می‌باشد که این ناهمگنی‌ها به صورت تغییر در ضخامت لایه‌ها و ویژگی‌های آن‌ها مشاهده می‌شوند (Ma et al., 2006).

برای مدل‌سازی آبخوان Samobor در کشور کرواسی، از داده‌های بدست آمده بر پایه اطلاعات ۱۲ گمانه ژئوتکنیکی استفاده شده است. ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی واحدهای تشکیل دهنده آبخوان مذکور در تفکیک این واحدها و ترسیم مدل آن نقش بسزایی داشته‌اند (Vlahovic et al., 2009).

برش‌های آب زمین‌شناسی تهیه شده در ناحیه Sohag کشور مصر نیز نشان دهنده ناهمگنی و تغییرات زیاد در ۶ واحد رسوبی تشکیل‌دهنده آبخوان این ناحیه است. این پدیده موجب تغییرات شاخص در میزان قابلیت هدایت هیدرولیکی آن‌ها گردیده است. این واحدها به طور عمده از ماسه، شن و رس تشکیل شده‌اند که در بین خود با عدسی‌هایی همراه هستند (Ahmed, 2009).

مدل ارائه شده برای ناحیه Jiangyin کشور چین بیانگر رخدادهای فرونشست زمین و شکل‌گیری شکاف‌های زمین در اثر ناهمگنی واحدهای رسوبی می‌باشد. داده‌های ژئوتکنیکی این واحدها از یک منطقه به منطقه دیگر به شدت متغیر می‌باشند (Wang et al., 2010).

شکاف‌های زمین ناشی از فرونشست در کشور مکزیک، به طور چشمگیری تحت کنترل ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها می‌باشند که در برش‌های آب زمین‌شناسی و زمین‌شناسی خود را نشان می‌دهند (Avila-Olivera and Garduno-Monroy, 2010).

مدل سه بعدی جریان آب زیرزمینی و مدل یک بعدی دگرشکلی‌های حاصل از فرونشست زمین در ناحیه Suzhou

محدوده با مساحتی برابر با ۴۱۶ کیلومترمربع، در حد فاصل ۵۰ و ۵۵ تا ۵۱ و ۲۳ طول شرقی و ۳۵ و ۳۰ تا ۳۵ و ۴۲ عرض شمالی و در منطقه‌ای خشک تا نیمه‌خشک واقع شده است (شکل ۱).

از دیدگاه زمین‌ساختی، حوضه آبریز دشت مذکور در واحد البرز مرکزی قرار دارد. این واحد از شمال به جنوب به چهار بخش البرز مرتفع، چین‌های حاشیه‌ای، کوهپایه - دشت (pediment) و آنتی البرز تقسیم می‌گردد. بخش البرز مرتفع به دلیل رخداد فازهای مختلف کوهزایی دارای چین‌خوردگی‌های شدیدی می‌باشد. بخش کوهپایه-دشت در برگرنده نهشته‌های آبرفتی است. نهشته‌های پلیوسن و پلیو-پلیستوسن با نفوذپذیری متوسط، کوهپایه را ایجاد نموده‌اند. به سمت جنوب، دشتی با نهشته‌های آبرفتی کواترنری قرار دارد. این نهشته‌ها به دلیل نفوذپذیری بالا، دربرگیرنده آبخوان‌های مهم و گسترده‌ای می‌باشند.

بر پایه داده‌های رسوب‌شناسی و چینه‌شناسی، نهشته‌های کواترنری به چهار بخش تقسیم شده‌اند (Rieben, 1955): آبرفت‌های بخش (A) که شمال تهران و البرز مرکزی را با برونزدهای کنگلومرایی در بر می‌گیرند. آبرفت بخش (B) که در جنوب تهران تشکیل سیلت‌های رسی کهریزک (Bs) را داده‌اند. آبرفت‌های بخش (C) که آبرفت‌های جوان مخروط افکنه‌ای می‌باشند و بخش هموار دشت تهران با آن پوشیده شده است. آبرفت‌های بخش (D) یا آبرفت‌های کنونی (هولوسن) که نهشته‌های جوان رودخانه‌ای یا سیلابی را شامل می‌شوند. در جنوب تهران، رسوبات دانه ریز (سیلت و رس) آن را تشکیل می‌دهند.

در محدوده فرونشست، سطح دشت از آبرفت‌های سیلتی - رسی سری B یا سازند کهریزک و آبرفت‌های سری C یا سازند آبرفتی تهران پوشیده شده است. سازند کهریزک که بوسیله مخروط افکنه‌های بزرگ سازند آبرفتی تهران پوشیده می‌شود، سازندی قدیمی‌تر از سازند آبرفتی تهران محسوب می‌گردد. آبرفت سازند C که بخش عمده‌ی دشت تهران را پوشانده است، قدرت ذخیره‌سازی، انتقال و قابلیت نفوذ بسیار

کشور چین بر پایه ویژگی‌های دگرشکلی‌ها در حالت‌های الاستیک، الاستوپلاستیک، ویسکوالاستوپلاستیک و اطلاعات حاصل از مدل زمین‌شناسی و برش‌های آب زمین‌شناسی بدست آمده است (Shi et al., 2012).

ناحیه دلتای رود زرد در کشور چین نیز از ۳ واحد آبخوان و ۴ واحد رسی ضخیم لایه با ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی متفاوت تشکیل شده است. این ناحیه از دهه ۱۹۵۰ میلادی شاهد رخداد فرونشست زمین بوده است و با ترسیم مدل زمین‌شناسی منطقه بر اساس برش‌های زمین‌شناسی و آب زمین‌شناسی آن، نقش اساسی واحدهای رسی مذکور در این رخداد اهمیت می‌یابد (Liu and Huang, 2013).

بر اساس اطلاعات ژئوتکنیکی ۶ گمانه حفر شده در دشت Hangzhou-Jiaxing-huzhou چین و مدل ارائه شده برای این ناحیه، ۶ واحد رسوبی آن را تشکیل داده‌اند که ۳ واحد آن آبخوان و ۳ واحد دیگر لایه‌های رسی با نفوذپذیری کم می‌باشند که دارای ویژگی‌های هیدرومکانیکی متفاوت بوده و یک سامانه آبخوان چند لایه‌ای را در این منطقه نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن تئوری تحکیم یک بعدی، مدل‌سازی عددی فرونشست زمین برای این دشت انجام شده است (Cao et al., 2013).

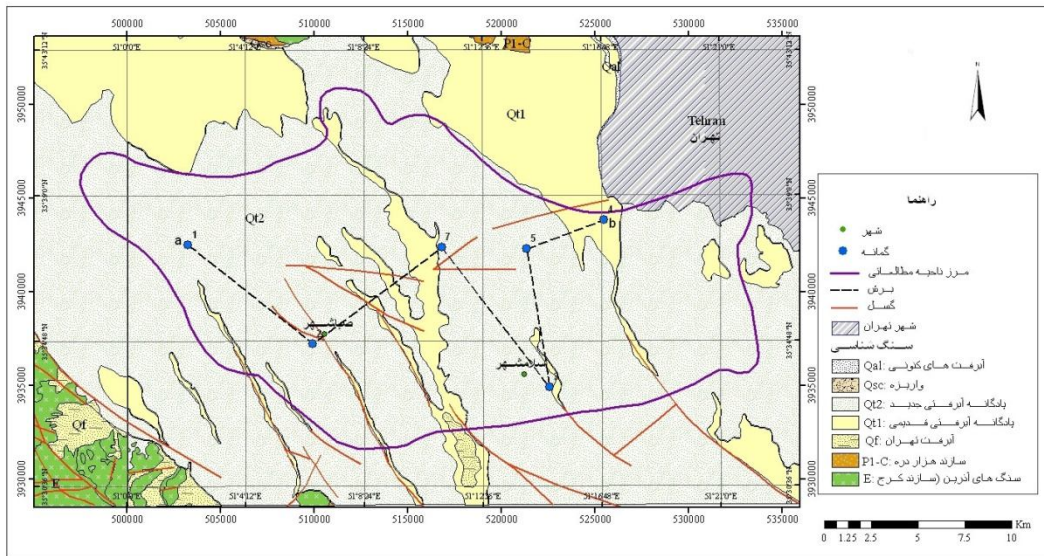
هدف از این پژوهش ارائه مدل آب زمین‌شناسی - مهندسی حوضه رسوبی ناحیه فرونشست زمین در جنوب غربی تهران در دشت تهران - شهریار (بر پایه داده‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، آب زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و لرزه‌شناسی منطقه)، و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی هر کدام از واحدهای معرفی شده در این مدل است.

۲. جایگاه زمین‌شناسی

محدوده مورد بررسی فرونشست زمین، در جنوب باختری تهران (دشت تهران - شهریار) واقع شده است. گستره این محدوده شرق شهرستان شهریار، کل وسعت شهرستان اسلامشهر و شمال شهرستان رباط‌کریم را در بر می‌گیرد. این

یافته است. شکل (۱) نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی به همراه محدوده فرونشست زمین در جنوب باختری تهران که برپایه بررسی‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) بدست آمده است را نشان می‌دهد.

خوبی دارد، به طوری که آبخوان اصلی دشت تهران در این آبرفت قرار دارد. در مجموع قسمت بالایی سازند A و سازندهای B، C و D دارای نفوذپذیری خوب تا بسیار خوبی می‌باشند و سفره آب زیرزمینی تهران در این رسوبات تشکیل



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی محدوده فرونشست زمین در گستره جنوب باختری تهران

متفاوت، ۳۹۹ آزمون توزیع اندازه ذرات و آزمون حدود آتبرگ، ۱۸ آزمون تحکیم و ۱۴ آزمون برش مستقیم انجام شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۷). پرواضح است که نتایج بدست آمده از آزمون‌های دانه‌بندی و تحکیم خاک نقش مهمی را در تحلیل وضعیت مناطق فرونشستی دارند. گمانه ۶ به دلیل قرار گرفتن در بیرون از منطقه فرونشست زمین، دانه درشت بودن مصالح تشکیل دهنده آن (به طور عمده شن) و نبود عوارض فرونشست در آن منطقه از دامنه داده‌ها حذف گردیده است.

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. داده‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک لرزه‌ای

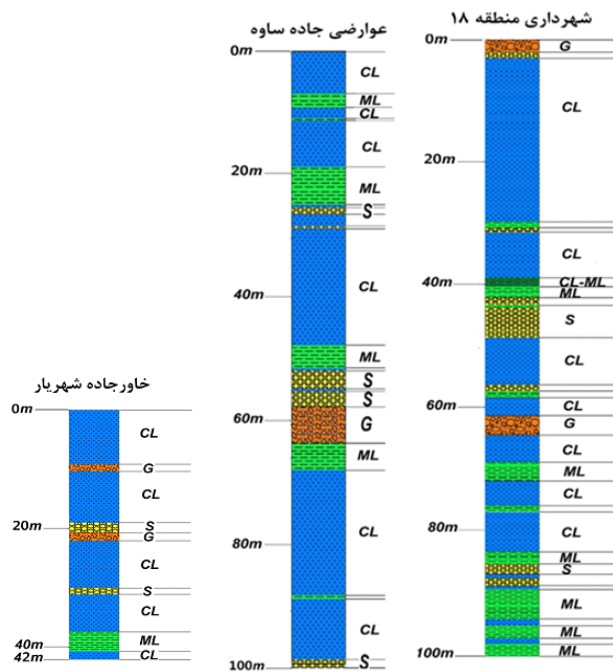
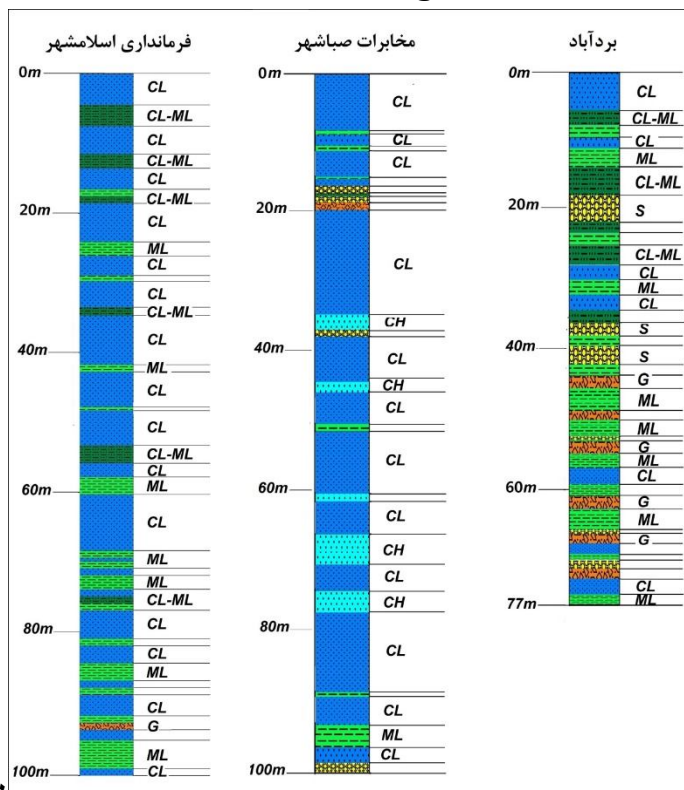
به منظور شناسایی واحدهای زیرسطحی و تعیین ویژگی‌های ژئوتکنیکی لایه‌های خاک در منطقه مورد بررسی، ۷ گمانه ژئوتکنیکی حفر گردیده است. چهار گمانه (BH2, BH3, BH4, BH5) تا عمق ۱۰۰ متری، یک گمانه (BH1) تا عمق ۷۷ متری و دو گمانه دیگر (BH6, BH7) به ترتیب تا عمق‌های ۴۲ و ۶۰ متری حفر گردیده‌اند (شکل ۱ و جدول ۱). بر روی نمونه‌های خاک گرفته شده از عمق‌های

جدول ۱. موقعیت و عمق گمانه‌های حفر شده در گستره جنوب باختری تهران

گمانه	نام محدوده	(UTM) موقعیت تقریبی		عمق گمانه (متر)
BH1	شهرداری بردآباد	X: 503252	Y: 3942527	۷۷
BH2	مخابرات صبا شهر	X: 509921	Y: 3937219	۱۰۰
BH3	فرمانداری اسلامشهر	X: 522608	Y: 3934932	۱۰۰
BH4	منطقه ۱۸ شهرداری تهران	X: 525503	Y: 3944766	۱۰۰
BH5	عوارضی جاده ساوه	X: 521352	Y: 3942313	۱۰۰
BH6	جهاد کشاورزی شهریار	X: 503878	Y: 3948782	۶۰
BH7	خاور جاده شهریار	X: 516811	Y: 3942382	۴۲

دانه درشت بیشتر بوده (BH1, BH4, BH5, BH7) و به سمت نواحی خروجی و جنوبی دشت و با دور شدن از محورهای رسوبگذاری به تدریج از قطر ذرات کاسته می شود (BH2, BH3).

با ترسیم لاگ گمانه های حفاری شده (شکل ۲) مشاهده می شود که مصالح تشکیل دهنده آبخوان با نسبت های متفاوتی از رس، ماسه، شن و قلوه سنگ تشکیل یافته اند که به طور عمومی در نواحی ورودی و در شمال دشت درصد مصالح



شکل ۲. مقاطع استراتیگرافی گمانه های ژئوتکنیکی حفاری شده در محدوده فرونشست دشت تهران

می‌باشند (شکل ۵). همچنین چاه پیزومتری گلدسته (مایین گمانه‌های BH4 و BH5) و چاه پیزومتری نصیر آباد (در نزدیکی گمانه BH7) نیز از چنین وضعیتی برخوردارند. با در نظر گرفتن وضعیت لاگ‌های گمانه‌های ژئوتکنیکی و چاه‌های مشاهده‌ای موجود، برخی از ویژگی‌های آبخوان در محدوده مطالعاتی عبارتند از:

- تنوع و تکرار در واحدهای لیتولوژیکی آبخوان مورد مطالعه مشهود است، به طوری که تغییر از نهشته‌های دانه درشت به سمت نهشته‌های دانه‌ریز در برخی از مناطق روندی تدریجی را نشان نمی‌دهد (تشکیل باندهای لایه نازک در بین لایه‌های درشت دانه).
- از شمال به جنوب ناحیه مطالعاتی بر ضخامت واحدهای دانه‌ریز رسی افزوده می‌شود و از ضخامت واحدهای دانه‌درشت شنی کاسته شده است که با در نظر گرفتن طبیعت و سرشت آبخوان مذکور، امری طبیعی است.
- در برخی از نواحی شمالی، باختری و شمال خاوری مانند نواحی باغستان، نصیرآباد و گلدسته، واحدهای رسی ریزدانه از ضخامت بیشتری نسبت به نواحی هم‌جوار خود برخوردار می‌باشند.

جدول ۲. موقعیت و نام چاه‌های مشاهده‌ای در نزدیکی

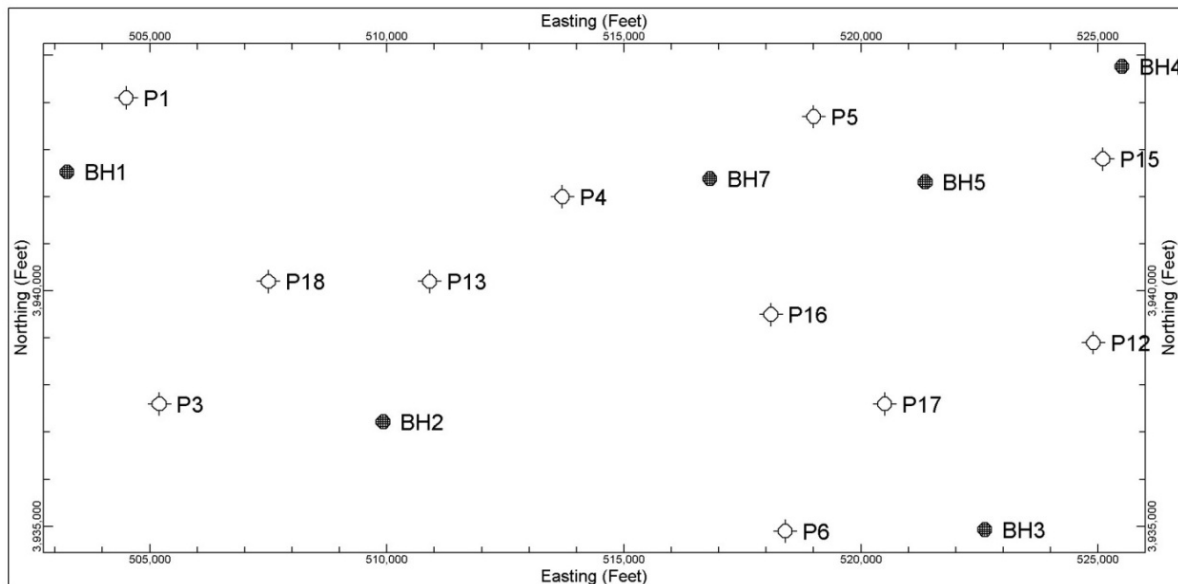
گمانه‌های ژئوتکنیکی

شماره چاه	نام	X (UTM)	Y (UTM)	عمق (متر)
P1	حصارک زیرک	۵۰۴۵۰۰	۳۹۴۴۱۰۰	۵۰
P3	یوسف آباد	۵۰۵۲۰۰	۳۹۳۷۶۰۰	۷۰
P4	نصیر آباد	۵۱۳۷۰۰	۳۹۴۲۰۰۰	۵۸
P5	احمد آباد مستوفی	۵۱۹۰۰۰	۳۹۴۳۷۰۰	۶۰
P6	چیچکلو	۵۱۸۴۰۰	۳۹۳۴۹۰۰	۶۱
P12	گلدسته	۵۲۴۹۰۰	۳۹۳۸۹۰۰	۵۶
P13	اسکمان	۵۱۰۹۰۰	۳۹۴۰۲۰۰	۶۵
P15	شمس آباد	۵۲۵۱۰۰	۳۹۴۲۸۰۰	۵۵
P16	بهمن آباد	۵۱۸۱۰۰	۳۹۳۹۵۰۰	۶۰
P17	موسی آباد	۵۲۰۵۰۰	۳۹۳۷۶۰۰	۵۳
P18	امامزاده جعفر	۵۰۷۵۰۰	۳۹۴۰۲۰۰	۶۴

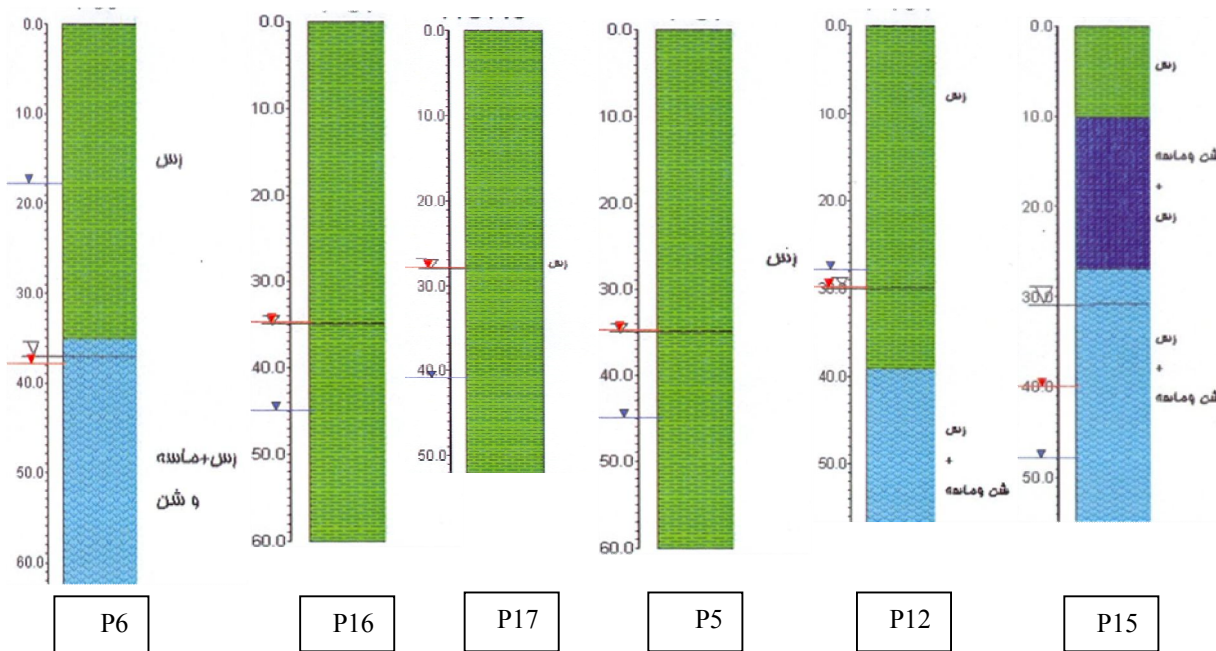
بررسی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن رده‌بندی Unified، خاک‌های شنی (GC, GW, GM)، ماسه‌ای (SC, SM, SP)، سیلتی (ML)، رسی (CL) و سیلتی-رسی (ML-CL)، لایه‌های خاک را تا عمق ۱۰۰ متری (به طور متناوب) در محدوده مطالعاتی تشکیل می‌دهند.

از آنجا که موقعیت مکانی گمانه‌های ژئوتکنیکی حفاری شده در ناحیه مطالعاتی پراکنده است، جهت ارزیابی دقیق‌تر وضعیت لایه‌های زیرسطحی از اطلاعات لاگ ۱۱ چاه مشاهده‌ای که در نزدیکی گمانه‌های مذکور واقع شده‌اند استفاده شده است (جدول ۲ و شکل ۳). عمق چاه‌های مشاهده‌ای بین ۵۰ تا ۷۰ متر متغیر است. بررسی لاگ آن‌ها نشان می‌دهد که اولین لایه از سطح زمین به عمق، یک لایه رسی است. برای مثال بیش از ۱۴ متر ابتدای چاه مشاهده‌ای حصارک زیرک (P1) که در نزدیکی گمانه شهرداری بردآباد (BH1) قرار گرفته است را مصالح رسی ریزدانه تشکیل داده‌اند و از این عمق تا ۶۰ متری را مصالح رسی-ماسه‌ای در بر گرفته است (شکل ۴). همین وضعیت برای چاه‌های مشاهده‌ای اسکمان و نصیرآباد P13 و P4 که در نزدیکی گمانه خاور جاده شهریار (BH7) هستند مشاهده می‌شود به طوری که به ترتیب بیش از ۱۵ و ۳۳ متر ابتدای آن‌ها را مصالح رسی تشکیل داده‌اند (شکل ۴). ۲۰ متر ابتدای گمانه خاور جاده شهریار را نیز واحد رسی (CL) در بر گرفته است. از سوی دیگر در زیر این واحد رسی، ۳ تا ۴ واحد دیگر قرار گرفته است که به طور عمده از بالا به پایین لایه رسی به همراه ماسه، لایه شنی و ماسه‌ای و لایه رسی به همراه ماسه و شن می‌باشند. هرچند در این لاگ‌ها تفکیک دقیقی برای لایه‌ها انجام نشده است اما تناوب لایه‌های رسی (و یا رسی به همراه شن و ماسه) و ماسه‌ای (و یا همراه با شن و رس) در آن‌ها مشهود است.

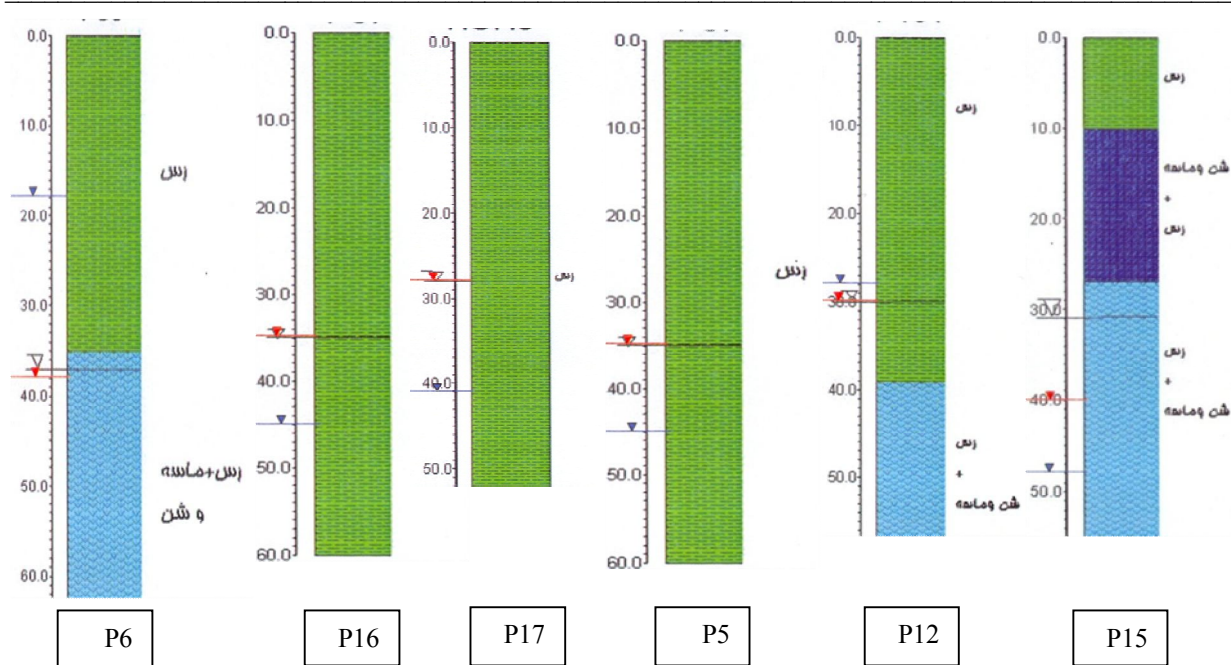
لاگ چاه‌های مشاهده‌ای موسی آباد، بهمین آباد و چیچکلو (در جنوب ناحیه مورد مطالعه) نیز نشان دهنده لایه‌های رسی ریزدانه با ضخامت‌های بیشتری نسبت به دیگر گمانه‌ها



شکل ۳. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک به گمانه‌های ژئوتکنیکی در محدوده مطالعاتی



شکل ۴. لاگ چاه‌های پیزومتری واقع شده در بخش باختری محدوده مطالعاتی



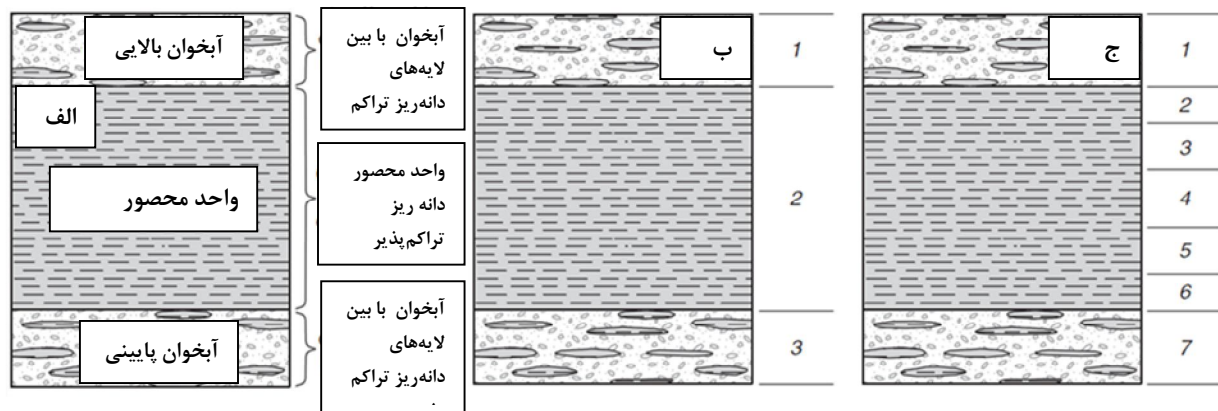
شکل ۵. لاگ چاه‌های پیزومتری واقع شده در بخش خاوری محدوده مطالعاتی

مرزها و محدوده آن‌ها با مشکل مواجه است، لذا می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر نمود. در این حالت هر واحد آبخوان به صورت یک واحد یک‌دست و مجزا در نظر گرفته می‌شود. - برای واحدهای رسی ریزدانه با نفوذپذیری کم که در بین واحدهای آبخوان محصور می‌باشند دو حالت می‌توان در نظر گرفت. حالت اول آن است که واحد مذکور را به صورت واحدی یک‌دست در نظر گرفت که در این صورت تغییرات ضریب ذخیره و جریان آب زیرزمینی در آن یکسان فرض می‌شود (شکل ۶. ب). در حالت دوم، یک واحد رسی ریزدانه با نفوذپذیری کم خود می‌تواند در برگرفته تعدادی از واحدهای رسی ریز دانه باشد که هر کدام دارای ویژگی‌های متفاوت و مختص به خود هستند و در ایجاد مدل باید در نظر گرفته شوند (شکل ۶. ج)

یکی از معضلات موجود در آبخوان‌هایی که با تعدد لایه‌ها و یا تداخل‌های بین لایه‌ای روبرو هستند این است که ویژگی‌هایی مانند تغییرات جنس و ضخامت لایه‌ها در آن‌ها از پیوستگی و یا مشابهت زیادی برخوردار نیستند. در این حالت در بحث انجام انطباق لایه‌ها با همدیگر مطرح می‌باشد. در چنین حالتی از روش تلفیق لایه‌ها برای ایجاد لایه‌های برگرفته یک آبخوان اصلی و پیوسته جهت مدل‌سازی می‌بایست استفاده نمود (مجیدی و میرزایی، ۱۳۹۳).

از سوی دیگر برای ایجاد مدلی پیوسته در یک سیستم آبخوان چند لایه‌ای که هر واحد آبخوان آن دارای تداخل‌هایی از لایه‌های رسی ریزدانه می‌باشد (شکل ۶. الف)، راهکارهای زیر پیشنهاد شده‌اند (Hoffmann et al., 2003):

- از آن جا که شبیه‌سازی تغییرات ضریب ذخیره و جریان آب زیرزمینی در واحدهای نازک لایه‌ی رسی که در واحدهای آبخوان قرار گرفته‌اند امکان‌پذیر نیست و تعیین



شکل ۶. مدل‌های پیشنهادی برای انطباق لایه‌های تراکم پذیر در یک سیستم آبخوان با نهشته‌های تراکم پذیر، (ب) مدل تک لایه‌ای واحد محصور دانه ریز تراکم پذیر، (ج) مدل چند لایه‌ای واحد محصور دانه ریز تراکم پذیر (Hoffmann et al., 2003).

تلفیق شوند تا همان طور که گفته شد بتوان مدل مورد نظر محدوده مطالعاتی را تعریف نمود. برای مثال رده خاک‌های CL و ML که در خیلی از موارد به صورت ML-CL گزارش شده‌اند. همچنین در مورد نهشته‌های دانه درشت مانند SM و SC و یا SP که به جهت حصول نتیجه در یک لایه منظور گردیده‌اند.

- در گمانه‌های بردآباد، منطقه ۱۸ شهرداری و عوارضی جاده ساوه (به ترتیب BH1، BH4 و BH5) افق‌هایی از مصالح شنی (GM, GC) مشاهده می‌شود که ضخامتی از یک متر تا حدود دو متر دارند (ضخامت بیشتر در گمانه بردآباد دیده می‌شود) که از آن‌ها صرف نظر شده است.

- برای مدل ارائه شده، واحدهای رسی ریزدانه با نفوذپذیری کم که در بین واحدهای آبخوان محصور می‌باشند به صورت تک لایه‌ای در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۶.ب).

بدین ترتیب مرزهایی برای سه واحد رسی ریزدانه با نفوذپذیری کم و سه واحد آبخوان در ناحیه مطالعاتی تعریف شده و در نظر گرفته شده‌اند. ضخامت واحدهای رسی ریزدانه در گمانه‌ها متفاوت است و به طور کلی از سوی شمال به جنوب و از سوی غرب به شرق محدوده مطالعاتی بیشتر می‌شوند. بیشترین ضخامت را واحد رسی ریزدانه سوم در

جهت ارائه مدل آب زمین‌شناسی - مهندسی ناحیه مطالعاتی در ابتدا تفکیکی از واحدهای آب زمین‌شناسی سیستم آبخوان صورت گرفته است. همانگونه که پیشتر گفته شد به جهت موقعیت مکانی پراکنده گمانه‌های ژئوتکنیکی در راستای برش ab (شکل ۱) و با مد نظر قرار دادن نکاتی که در زیر آمده‌اند مدل مذکور ارائه شده است:

- از نهشته‌های نازک لایه تا حد امکان (با در نظر گرفتن وضعیت افق‌های خاکی در بالا و پایین آن‌ها) صرف نظر گردیده است. برای چنین واحدهایی با توجه به کمبود داده‌ها و اطلاعات لازم نمی‌توان پارامترهای لازم جهت تفکیک و مجزاسازی لایه‌ها را تعریف نمود و به ناچار می‌بایست از راهکار تلفیق لایه‌ها و یکپارچه در نظر گرفتن آن‌ها استفاده نمود.

- ناحیه مورد مطالعه، بخشی از محدوده آبخوان‌های دشتهای تهران - شهریار و کرج می‌باشد و در مجموع یک واحد پیچیده هیدروژئولوژیکی را شکل داده است که در ارتباط با همدیگر می‌باشند ولی از عدم قطعیت‌های بسیاری در تفکیک لایه‌ها و مرزها برخوردارند.

- برخی از لایه‌های خاک را با در نظر گرفتن ویژگیهای فیزیکی و ژئوتکنیکی آن‌ها می‌بایستی در هم ادغام و یا

گمانه‌های صباشهر و اسلامشهر (BH3, BH2) دارد. ویژگی‌های ژئوتکنیکی مانند دامنه حدود روانی و خمیری واحدهای رسی

ریزدانه با نفوذپذیری کم در گمانه‌های اکتشافی و برای هر کدام از واحدها به تفکیک تعیین شده‌اند (جدول‌های ۳ و ۴).

جدول ۳. دامنه حدود روانی و خمیری واحدهای رسی در گمانه‌ها (حدود خمیری داخل پراتنز قرار دارند)

گمانه	BH1 (پردآباد)	BH2 (مخابرات صباشهر)	BH3 (اسلامشهر)	BH4 (شهرداری منطقه ۱۸)	BH5 (جاده ساوه)	BH7 (خاور جاده شهریار)
رس ریزدانه (۱)	۲۸/۱-۳۰/۶	۳۳/۵-۴۶/۳	۲۴/۷-۴۳/۸	۳۱/۵-۳۹/۵	۲۷/۹-۳۶/۳	۳۰/۹-۴۴/۶
(%80CL, %20ML)	(۱۷-۱۹/۵)	(۱۸-۲۹/۳)	(۱۸-۲۳/۲)	(۱۸/۲-۲۱/۷)	(۲۰/۹-۲۵/۲)	(۱۹/۵-۲۲/۸)
رس ریزدانه (۲)	۲۷/۱-۳۶	۳۷/۵-۴۵/۳	۲۸/۷-۳۴	۳۰/۷-۳۷/۷	۳۲/۳-۳۸/۷	۳۱/۵-۴۶/۸
(%92CL, %8ML)	(۲۰-۲۲/۶)	(۲۲/۷-۲۵/۳)	(۱۴/۸-۲۶/۲)	(۱۹/۱-۲۲/۶)	(۲۲/۳-۲۳/۷)	(۱۹/۷-۲۴/۸)
رس ریزدانه (۳)	۲۷-۳۱/۹	۳۶/۱-۴۹	۲۳-۲۷/۳	۳۴/۵-۴۸/۵	۲۹/۷-۴۷/۴	CL
(%90CL, %10ML)	(۱۸-۱۸/۸)	(۲۰/۲-۳۲/۴)	(۱۰-۱۶/۴۷)	(۱۶/۷-۲۷/۲)	(۱۴/۶-۲۹/۲)	-
	ML-CL	ML-CL	CL-ML	CL-ML	CL-ML	CL-ML

جدول ۴. دامنه حدود روانی، خمیری و نسبت پوکی اولیه برای سه واحد رسی ریزدانه

حدود آتربرگ واحد	حد روانی (%)	حد خمیری (%)	نسبت پوکی اولیه
رس ریزدانه (۱)	۲۴/۷-۴۶/۳	۱۷-۲۹/۳	۰/۵۸-۰/۷۵
رس ریزدانه (۲)	۲۷-۴۶/۸	۱۴/۸-۲۶/۲	۰/۵۲-۰/۷۶
رس ریزدانه (۳)	۲۳-۴۹	۱۰-۳۲/۴	۰/۶۴-۰/۸۲

اندازه‌گیری و محاسبه فرکانس طبیعی زمین و سرعت امواج برشی و تراکمی در اعماق مختلف زمین انجام شده است که در مرحله اول اندازه‌گیری و تفسیر ریزلرزه‌ها و نوفه‌های طبیعی (مایکروترمورها) با روش تک ایستگاهی انجام شده است. تعداد ایستگاه‌های مورد برداشت در این روش، ۶۲۰ ایستگاه بوده است. در مرحله دوم از روش آرایه‌ها (array) استفاده شده که تعداد ۱۷۶ ایستگاه برداشت شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۶ الف). برای برآورد دانسیته خاک از دو روش به شرح زیر استفاده شده است و میانگین عددی حاصل از دو روش جهت محاسبات بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. روش اول: تعیین دانسیته خاک بر پایه سرعت موج برشی (V_s) روابط تجربی معتبری بین سرعت موج برشی و عدد نفوذ استاندارد (N_{SPT}) وجود دارد (جدول ۵).

برخی از پارامترهای مهندسی لایه‌های خاک در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و شبیه‌سازی آن مؤثر می‌باشند. از سوی دیگر پارامترهایی مانند دانسیته، نسبت پواسون و مدول الاستیسیته لایه‌های خاک در شبیه‌سازی فرونشست ناحیه‌ای نیاز است. بر این اساس ضرایب الاستیکی خاک مانند مدول برشی، مدول یانگ، مدول حجمی و نسبت پواسون برای افق‌های خاکی مشخص شده‌اند. برآورد این پارامترها در کنار دیگر ویژگی‌های ژئوتکنیکی لایه‌های خاکی، شناخت بهتری را از وضعیت لایه‌های زیرسطحی بدست می‌دهد و در تفکیک آن‌ها از هم نیز تأثیرگذار هستند. پارامتر اساسی که برای تعیین ضرایب الاستیک خاک مورد نیاز است، دانسیته خاک می‌باشد. از سوی دیگر برای تعیین دانسیته لایه‌های خاک نیاز به سرعت موج‌های برشی و تراکمی است. بررسی‌های لرزه‌ای در دشت تهران - شهریار به منظور

جدول ۵. روابط متداول بین سرعت موج برشی و عدد نفوذ استاندارد (Akin et al, 2011)

V_s (m/s)	پژوهشگر
	Kanai (1966)
	Imai and Yoshimura (1970)
	Ohba and Toriumi (1970)
	Fujiwara (1972)
	Imai et al. (1975)
	Ohta and Goto (1978)
	Seed and Idriss (1981)
	Imai and Tonouchi (1982)
	Yokota et al. (1991)
	Kalteziotis et al. (1992)
	Sisman (1995)
	Iyisan (1996)
	Jafari et al. (1997)
	Kiku et al. (2001)

در مواردی که سرعت موج برشی بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه بوده است، از رابطه (۳)، جهت برآورد دانسیته خاک استفاده شده است (Brocher, 2005).

(۳)

روش دوم: تعیین دانسیته خاک بر پایه سرعت موج تراکمی (V_p) رابطه مستقیمی بین دانسیته خاک و سرعت موج تراکمی (Tezcan et al, 2006) وجود دارد (رابطه ۴).

$$\gamma_p = \gamma_o + 0.002 V_p \quad (۴)$$

که:

$$V_p = \text{سرعت موج تراکمی (m/s)}$$

γ_o = دانسیته مرجع (reference density)، که برای ماسه‌های سست (loose sand) و خاک‌های سیلتی و رسی برابر با ۱۶ می‌باشد.

$$\gamma_p = \text{دانسیته خاک (KN/m}^3\text{) می‌باشند.}$$

برای نمونه این محاسبات برای عمق‌های مختلف در ایستگاه (A105) انجام شده‌اند و در جدول (۶) تنظیم گردیده‌اند. [نشانه‌های (*) و (***) در این جدول به ترتیب مقادیر تعیین

به دلیل نبود رابطه معتبر بین سرعت موج برشی و دانسیته طبیعی خاک برای عمق‌هایی که سرعت موج برشی در آن‌ها کمتر یا برابر با ۷۵۰ متر بر ثانیه بوده است (مرز سنگ کف لرزه‌ای بر پایه رده‌بندی زمین بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران و آیین‌نامه ارتعاشات (CEN) ابتدا می‌تواند از رابطه‌های جدول (۵) استفاده شود. در این پژوهش از رابطه (۱)، (Iyisan, 1996) که برای همه خاک‌ها و بویژه خاک‌های رسی و ماسه‌ای معتبر می‌باشد استفاده شده است.

$$(۱) V_s = 51.5N^{0.516}$$

پس از برآورد اعداد N_{SPT} برای افق‌های مختلف خاک (بر پایه سرعت موج برشی)، برای تبدیل آن‌ها به دانسیته طبیعی، از رابطه تجربی که از مقایسه نتایج آزمایش‌های نفوذ استاندارد (N) و دانسیته طبیعی (γ) بدست آمده، استفاده شده است. در هر یک از گمانه‌های حفاری شده، بین مقادیر SPT و دانسیته، برازش خطی داده شده است و ضریب برازش منحنی مذکور محاسبه گردیده است. از آنجا که برازش حاصل از داده‌های گمانه BH1، دارای بالاترین ضریب همبستگی ($R^2 = 0.8128$) است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۷)، لذا جهت محاسبه دانسیته طبیعی (γ)، از رابطه برازش مذکور (رابطه ۲) استفاده شده است.

$$\gamma = 2.9185N + 1566 \quad (۲)$$

برای مثال در گمانه خاور جاده شهریار (BH7) از داده‌های ایستگاه‌های آرایه‌ای A121, A105, A90, A91, A106, A107, A92, A90 M565, M537, M538, M539, M512, M594, M593, M592, M536, M510, M537 که به گمانه مذکور نزدیک‌تر بوده‌اند و عمق بیشتری را نیز داشته‌اند، استفاده شده است (شکل ۷). برای نمونه با روش توصیف شده، ضرایب الاستیک برای ایستگاه A105 در اعماق مختلف تعیین شده‌اند (جدول ۶). بدین ترتیب ضرایب الاستیک برای لایه‌های خاک در گمانه BH7 محاسبه و تعیین شده‌اند (جدول ۷). ضرایب الاستیک برای لایه‌های خاک در گمانه‌های دیگر نیز با استفاده از این روش محاسبه شده‌اند. با بررسی نتایج آن‌ها و با در نظر گرفتن ویژگی‌های مهندسی لایه‌ها به یک زون‌بندی با افزایش عمق می‌توان دست یافت (جدول ۸).

شده دانسیته‌های بدست آمده برای عمق‌های مختلف خاک با روش‌های اول و دوم گفته شده می‌باشند].

جهت تعیین ضرایب الاستیک افق‌های خاک از روابط تجربی (۵, ۶, ۷, ۸) استفاده شده است (Kramer, 1996).

- مدول برشی (Shear modulus, G)

$$G = \gamma/g \cdot V_s^2 \quad (5)$$

- مدول یانگ (Young's modulus, E)

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (6)$$

- مدول حجمی (Bulk modulus, K)

$$K = 2G(1 + \mu)/[3(1 - 2\mu)] \quad (7)$$

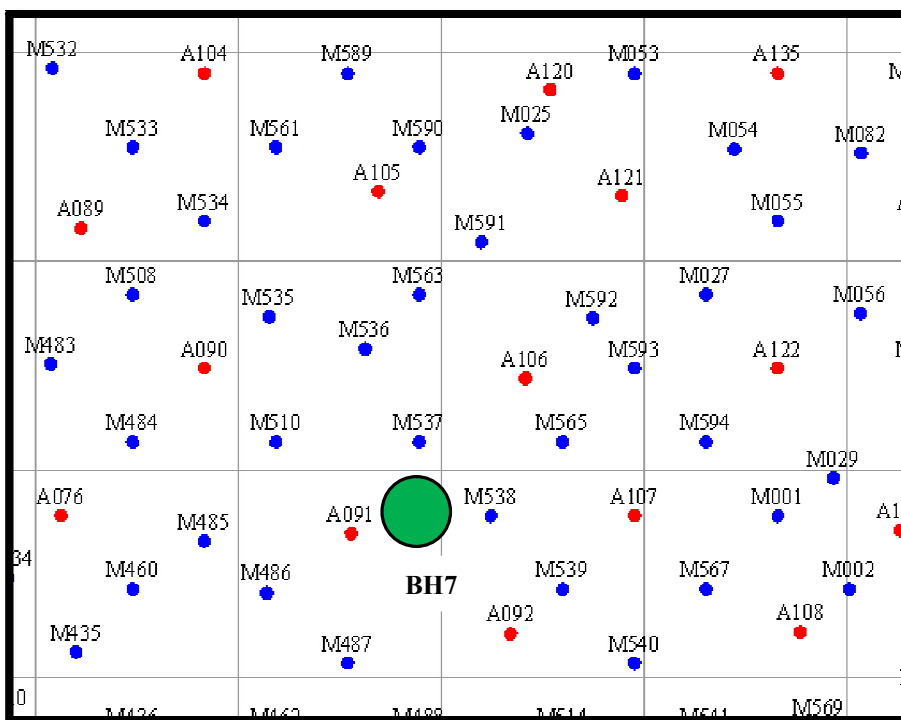
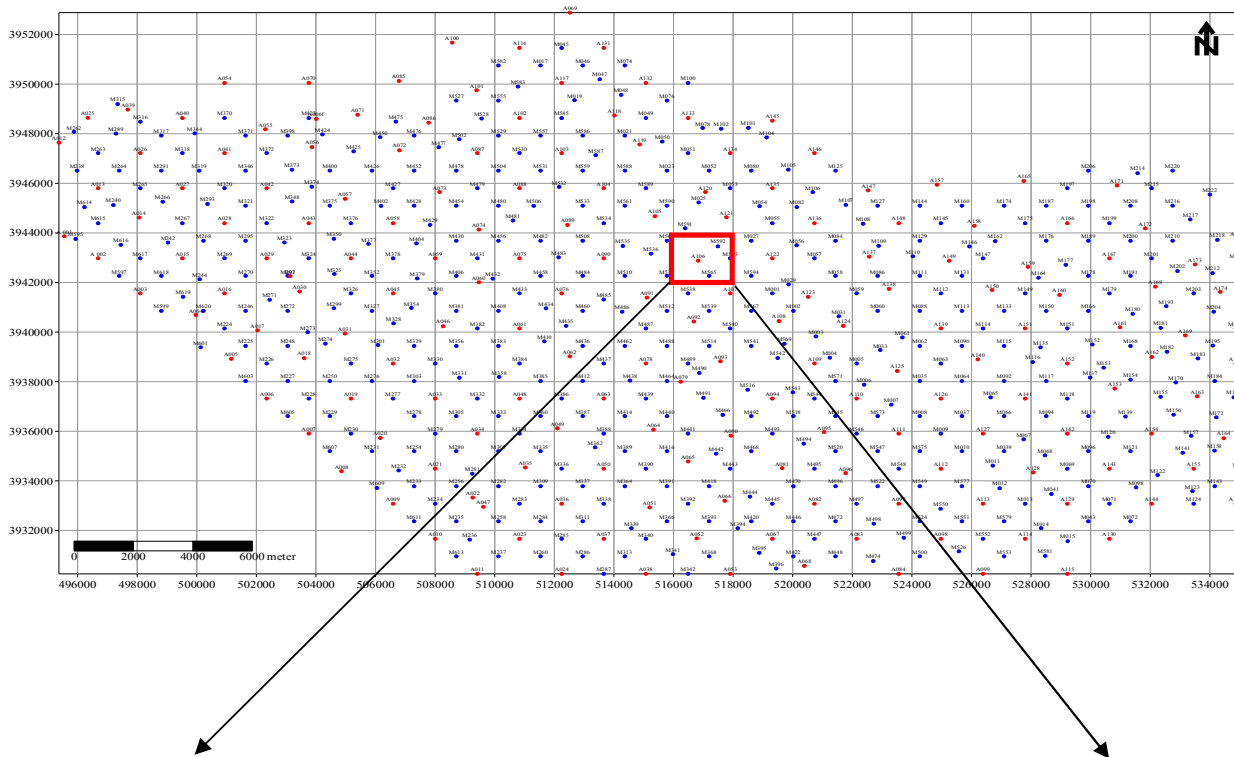
- نسبت پواسون (Poisson's ratio)

$$\mu = [(V_p/V_s)^2 - 2]/[2(V_p/V_s)^2 - 2] \quad (8)$$

همچنین از اطلاعات ایستگاه‌های برداشت شده نزدیک به هر کدام از گمانه‌های ژئوتکنیکی برای تفسیر و انطباق ویژگی‌های مهندسی زمین با افزایش عمق استفاده شده است.

جدول ۶. مقادیر سرعت موج های P و S، مدول های الاستیک و دانسیته خاک (ایستگاه A105)

عمق (m)	عدد نفوذ استاندارد	دانسیته (*) (KN/m ³)	دانسیته (***) (KN/m ³)	سرعت موج برشی (m/s)	سرعت موج تراکمی (m/s)	مدول برشی (GPa)	مدول یانگ (GPa)	مدول حجمی (GPa)	نسبت پواسون (-)
۰-۵	۲۷	۱۶/۴۵	۱۷/۱۵	۲۸۱/۷۰	۵۷۷/۱۰	۰/۱۳	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۳۴
۵-۱۰	۲۷	۱۶/۴۵	۱۷/۱۵	۲۸۱/۷۰	۵۷۷/۱۰	۰/۱۳	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۳۴
۱۰-۱۵	۳۹	۱۶/۸۰	۱۷/۳۸	۳۴۱/۸۳	۶۹۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۳۴
۱۵-۲۰	۳۹	۱۶/۸۰	۱۷/۳۸	۳۴۱/۸۳	۶۹۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۳۴
۲۰-۲۵	۳۹	۱۶/۸۰	۱۷/۳۸	۳۴۱/۸۳	۶۹۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۳۴
۲۵-۳۰	۳۹	۱۶/۸۰	۱۷/۳۸	۳۴۱/۸۳	۶۹۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۳۴
۳۰-۳۵	۳۹	۱۶/۸۰	۱۷/۳۸	۳۴۱/۸۳	۶۹۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۳۴
۳۵-۴۰	۳۹	۱۶/۸۰	۱۷/۳۸	۳۴۱/۸۳	۶۹۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۳۴
۴۰-۴۵	۶۷	۱۷/۶۱	۱۷/۷۸	۴۵۰/۴۶	۸۹۲/۱۴	۰/۳۶	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۳۳
۴۵-۵۰	۶۷	۱۷/۶۱	۱۷/۷۸	۴۵۰/۴۶	۸۹۲/۱۴	۰/۳۶	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۳۳
۵۰-۵۵	۶۷	۱۷/۶۱	۱۷/۷۸	۴۵۰/۴۶	۸۹۲/۱۴	۰/۳۶	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۳۳
۵۵-۶۰	۶۷	۱۷/۶۱	۱۷/۷۸	۴۵۰/۴۶	۸۹۲/۱۴	۰/۳۶	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۳۳
۶۰-۶۵	۶۷	۱۷/۶۱	۱۷/۷۸	۴۵۰/۴۶	۸۹۲/۱۴	۰/۳۶	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۳۳
۶۵-۷۰	۶۷	۱۷/۶۱	۱۷/۷۸	۴۵۰/۴۶	۸۹۲/۱۴	۰/۳۶	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۳۳
۷۰-۷۵	۷۲	۱۷/۷۵	۱۷/۸۴	۴۶۶/۷۰	۹۲۱/۹۶	۰/۳۹	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۳۳
۷۵-۸۰	۷۲	۱۷/۷۵	۱۷/۸۴	۴۶۶/۷۰	۹۲۱/۹۶	۰/۳۹	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۳۳
۸۰-۸۵	۷۲	۱۷/۷۵	۱۷/۸۴	۴۶۶/۷۰	۹۲۱/۹۶	۰/۳۹	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۳۳
۸۵-۹۰	۷۲	۱۷/۷۵	۱۷/۸۴	۴۶۶/۷۰	۹۲۱/۹۶	۰/۳۹	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۳۳
۹۰-۹۵	۷۲	۱۷/۷۵	۱۷/۸۴	۴۶۶/۷۰	۹۲۱/۹۶	۰/۳۹	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۳۳



شکل ۷. موقعیت ایستگاه‌های مایکروترموار با روش‌های ایستگاهی (نقاط آبی رنگ) و آرایه‌ای (نقاط قرمز رنگ) در اطراف گمانه BH7 (نقطه سبز رنگ)

جدول ۷. دامنه تغییرات سرعت موج‌های P و S، مدول‌های الاستیک و دانسیته خاک (گمانه BH7)

عمق (m)	عدد نفوذ استاندارد	دانسیته (KN/m ³)	سرعت موج برشی (m/s)	سرعت موج تراکمی (m/s)	مدول برشی (GPa)	مدول یانگ (GPa)	مدول حجمی (GPa)	نسبت پواسون (-)
۵-۱۰	۱۸-۴۸	۱۶/۱۹-۱۷/۰۷	۲۲۸-۳۸۰	۴۷۵-۷۶۲	۰/۰۸-۰/۳۵	۰/۲۳-۰/۶۶	۰/۲۵-۰/۶۶	۰/۳۳-۰/۳۵
۱۰-۱۵	۲۳-۲۷	۱۶/۳۴-۱۶/۴۵	۲۶۲-۲۸۱	۵۳۹-۵۷۶	۰/۱۱-۰/۱۳	۰/۳۰-۰/۳۵	۰/۳۳-۰/۳۷	۰/۳۴-۰/۳۵
۱۵-۳۰	۲۴-۲۸	۱۶/۴۵-۱۶/۶۴	۲۶۱-۲۸۱	۵۳۸-۵۷۶	۰/۱۱-۰/۱۳	۰/۳۰-۰/۳۵	۰/۳۳-۰/۳۷	۰/۳۴-۰/۳۵
۳۰-۵۵	۱۷۰	۲۰/۶۲	۷۲۸	۱۳۹۳	۱/۰۹	۲/۸۷	۲/۵۵	۰/۳۱
۵۵-۶۵	۱۷۰-۱۷۸	۲۰/۶۲-۲۰/۸۶	۷۴۶-۷۲۸	۱۳۹۳-۱۴۲۵	۱/۰۹-۱/۱۶	۲/۸۷-۳/۰۵	۲/۵۵-۲/۶۹	۰/۳۱-۰/۳۲
۶۵-۷۰	۱۷۸	۲۰/۸۶	۷۴۶	۱۴۲۵	۱/۱۶	۳/۰۵	۲/۶۴	۰/۳۱

جدول ۸. دامنه تغییرات سرعت موج‌های P و S، مدول‌های الاستیک و دانسیته خاک در واحدهای مختلف

واحد	دانسیته (KN/m ³)	سرعت موج برشی (m/s)	سرعت موج تراکمی (m/s)	مدول برشی (GPa)	مدول یانگ (GPa)	مدول حجمی (GPa)	نسبت پواسون (-)
رس ریزدانه (۱)	۱۶/۱۹-۱۶/۹۰	۲۲۸-۳۴۸	۴۷۵-۷۰۱	۰/۰۸-۰/۲۲	۰/۲۳-۰/۵۸	۰/۲۵-۰/۵۹	۰/۳۴-۰/۳۵
آبخوان (۱)	۱۶/۳۸-۱۶/۵۳	۲۶۶-۲۹۷	۵۴۷-۶۰۵	۰/۱۱-۰/۱۵	۰/۳۱-۰/۴۰	۰/۳۳-۰/۴۱	۰/۳۴-۰/۳۵
رس ریزدانه (۲)	۱۶/۲۲-۱۷/۵۴	۲۳۵-۳۹۸	۴۸۷-۹۷۳	۰/۱۰-۰/۴۸	۰/۲۴-۱/۴۳	۰/۲۶-۲/۲۸	۰/۳۴-۰/۳۵
آبخوان (۲)	۱۸/۸۶-۲۰/۸۸	۶۲۶-۸۳۰	۱۳۹۴-۲۶۷۳	۰/۹۷-۱/۴۵	۲/۷۴-۳/۹۹	۲/۵۵-۶/۷۲	۰/۳۱-۰/۳۸
رس ریزدانه (۳)	۲۰/۱۵-۲۰/۸۸	۷۹۴-۹۰۷	۲۰۲۷-۲۴۸۹	۱/۳۵-۱/۵۵	۳/۸۲-۴/۹۳	۷/۶۴-۱۰/۶۵	۰/۳۹-۰/۴۲
آبخوان (۳)	۲۱/۱۲-۲۲/۴۱	۴۳۷-۱۵۳۶	۸۶۷-۳۰۹۸	۰/۳۳-۰/۳۰	۴/۰۳-۱۴/۱۷	۵/۸۷-۱۴/۴۹	۰/۳۳-۰/۴۲

۴. مدل آب زمین‌شناسی - مهندسی ناحیه مطالعاتی

همانگونه که گفته شد هدف از ارائه مدل آب زمین‌شناسی - مهندسی در یک منطقه برای مطالعات فرونشست زمین، تفکیک واحدهای دربرگیرنده زمین بر پایه ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و آب زمین‌شناسی آن‌ها می‌باشد. بر این اساس، دشت تهران - شهریار دارای شش واحد می‌باشد که از سطح به عمق عبارتند از: واحد رسی ریزدانه (۱)، واحد آبخوان (۱)، واحد رسی ریزدانه (۲)، واحد آبخوان (۲)، واحد رسی ریزدانه (۳) و واحد آبخوان (۳). این واحدها دارای منشأ سیلابی - رودخانه‌ای می‌باشند و در آبرفت C تهران قرار دارند (شکل ۸).

خاک واحدهای رسی ریزدانه (با نفوذپذیری کم) در رده خاک‌های CL-ML و CL قرار دارند. در منطقه صباشهر (گمانه BH2) رده خاک در برخی از عمق‌ها از CL به CH تغییر می‌یابد. سه واحد رسی ریزدانه به طور متناوب در بین واحدهای آبخوان قرار گرفته‌اند. وزن واحد حجم این خاک‌ها

دامنه پارامترهای مورد نظر برای اعماق مختلف در جدول (۸) نشان داده شده‌اند. تغییرات بیشتر در دامنه مقادیر مورد بحث با عمق (نسبت به اعماق کمتر) تا حدودی نشان‌دهنده تغییرات شدیدتر در وضعیت لیتولوژیکی افق‌های تشکیل دهنده حوضه رسوبی آبخوان است. این حالت در اعماق بیش از ۳۰ متر، بیشتر دیده می‌شود.

بدین ترتیب زون‌هایی با ویژگی‌های فیزیکی و ژئوتکنیکی یکنواخت‌تر و مشابه‌تر در گستره مورد مطالعه شکل گرفته‌اند و ۶ واحد مشخص از هم تفکیک شده‌اند. پارامترهای نهایی مهندسی واحدهای آبخوان و واحدهای رسی ریزدانه با نفوذپذیری کم برای مدل آب زمین‌شناسی - مهندسی ناحیه فرونشست زمین در جنوب باختری تهران در شکل (۸) ارائه شده‌اند.

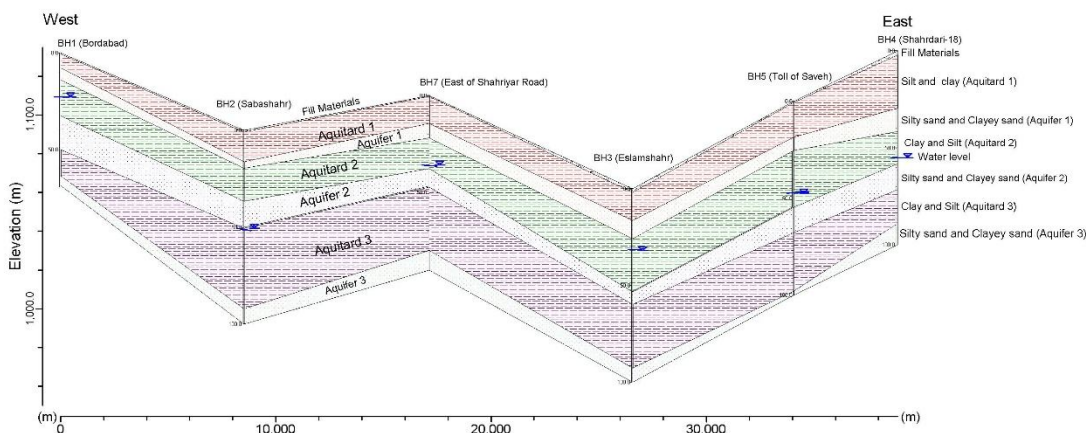
به‌طور کلی می‌توان گفت که در مصالح تشکیل دهنده افق‌های خاک، با افزایش عمق، سرعت امواج لرزه‌ای افزایش یافته است و دانسیته و ضرایب الاستیک آن‌ها نیز افزایش می‌یابند.

واحد رسی ریزدانه (۱، ۲، ۳) به ترتیب ۱۵-۲۹، ۱۹-۲۲ و ۱۰-۱۷ درجه می باشد.

رده خاک در سه واحد آبخوان از نوع SM-SC است. اعداد SPT برای این سه واحد از سطح به عمق به ترتیب، ۸-۲۴، ۱۵-۳۴ و ۲۴-۳۲ می باشد. این خاکها در رده ماسه های با تراکم متوسط قرار دارند. در مناطقی میان لایه های از نهشته های درشت دانه تر مانند شن های لای دار و ماسه های همراه با قلوه سنگ، (GP-GM, GC, GM) وجود دارند. این حالت در گمانه های BH1, BH5, BH7 مشاهده می شود.

سطح آب نمایش داده شده در مدل مذکور، مربوط به سال آبی ۱۳۹۰ (مهرماه) می باشد. همانگونه که در شکل (۸) مشاهده می شود واحد آبخوان (۱) در حال حاضر خشک می باشد و برداشت آب زیرزمینی از دو آبخوان دیگر انجام می شود.

با عمق افزایش می یابد، به طوری که از میانگین ۱۶/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب در واحد رسی ریزدانه (۱) به ۲۰/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب در واحد رسی ریزدانه (۳) افزایش می یابد. با توجه به نتایج آزمون نفوذ استاندارد، اعداد SPT در این واحدها بین ۷-۲۸ در واحدهای رسی ریزدانه (۱ و ۲) و برای واحد رسی ریزدانه (۳) بین ۱۰-۳۸ می باشد. این خاکها در رده رس های سخت (stiff) تا خیلی سخت (very stiff) قرار دارند. نتایج بدست آمده از آزمون برش مستقیم بر روی نمونه های خاک در رده های CL تا CL-ML نشان می دهد که میزان چسبندگی خاک در واحد رسی ریزدانه (۳) از دیگر واحدهای رسی بیشتر است (۰/۵۳- ۰/۱۷۶ کیلوگرم بر سانتی متر مربع). این ویژگی برای واحدهای رسی اول و دوم به ترتیب ۰/۶۱- ۰/۲۲ و ۰/۳۳۶- ۰/۰۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است. زاویه اصطکاک داخلی خاکها برای سه



شکل ۸. مدل آب زمین شناسی - مهندسی ناحیه مورد مطالعه

واحد	لیتولوژی	ضخامت (m)	رده بندی خاک	وزن واحد حجم (kN/m ³)	حد روانی (%)	شاخص خمیری (%)	نسبت پوکی (-)	رطوبت (%)
رسی ریزدانه (۱)	رس و سیلت	۷-۲۷	CL,ML	۱۶۲-۱۶۹	۲۴/۷-۴۴/۶	۴-۲۱/۸	۰/۵۸-۰/۷۵	۲۲/۶-۲۹
آبخوان (۱)	ماسه لای دار و ماسه رسی	۳-۱۲	SM,SC	۱۶۴-۱۶۵	۲۰/۱-۳۷/۵	۶/۰-۱۰/۵	۰/۲۵-۰/۳۲	-
رسی ریزدانه (۲)	رس و در مواردی سیلت	۱۶-۲۹	CL	۱۶-۱۷/۵	۲۷-۴۶/۸	۸-۲۲	۰/۵۲-۰/۷۶	۲۱-۲۹/۷
آبخوان (۲)	ماسه، ماسه لای دار و ماسه رسی	۶-۱۸	SM,SC, SP	۱۸/۹-۲۱	۲۲/۴-۳۱/۵	۱۰/۹-۱۴/۹	۰/۲۵-۰/۳۴	-
رسی ریزدانه (۳)	رس و سیلت	۹-۴۱	CL,ML	۲۰/۱-۲۰/۹	۲۳/۳-۴۸/۸	۶/۶-۲۲/۱	۰/۶۴-۰/۸۲	۲۰-۳۳/۸
آبخوان (۳)	ماسه لای دار و ماسه رسی	۲-۲۰	SM,SC	۲۱/۱-۲۲/۴	۲۲/۶-۳۹/۴	۱۲/۱-۱۹/۸	۰/۲۵-۰/۳۴	-

۵. نتیجه‌گیری

لایه‌های رسی ریز دانه با نفوذپذیری کم، در تفکیک و انطباق مرزهای لیتولوژیکی، نقش لایه‌های کلیدی را ایفا می‌کنند. ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن‌ها مانند حدود روانی و خمیری، رده بندی مهندسی خاک‌ها و ضرایب الاستیک می‌توانند در جهت انطباق لایه‌ها برای ایجاد مدل آب زمین‌شناسی - مهندسی کمک نمایند.

ویژگی‌های ژئوتکنیکی افق‌های خاک در حوضه رسوبی دشت جنوب باختری تهران از یک منطقه به منطقه دیگر تغییر می‌نمایند. تناوب لیتولوژیکی نهشته‌های آبرفتی و تغییر در ضخامت آن‌ها، نشان دهنده تغییرات زیاد در حوضه رسوبی دشت مذکور با در نظر گرفتن منشأ رودخانه‌ای - سیلابی آن می‌باشد. انطباق و ارتباط لایه‌ها در این نوع از آبخوان‌ها پیچیده است که با بهره‌گیری از روش تلفیق لایه‌ها در جهت ایجاد مدلی پیوسته در آن‌ها امکان‌پذیر می‌باشد.

گستره فرونشست زمین در دشت جنوب باختری تهران در برگیرنده شش واحد آب زمین‌شناسی تفکیک شده است که سه واحد آن، آبخوان بوده و سه واحد دیگر آن را، واحدهای رسی ریز دانه با نفوذپذیری کم تشکیل داده‌اند. بر این اساس، دشت جنوب باختری تهران دارای شش واحد است که از سطح به عمق عبارتند از: واحد رسی ریزدانه (۱)، واحد

آبخوان (۱)، واحد رسی ریزدانه (۲)، واحد آبخوان (۲)، واحد رسی ریزدانه (۳) و واحد آبخوان (۳). این وضعیت نشان می‌دهد که محدوده مورد بررسی در برگزیده یک سامانه آبخوان چند لایه‌ای با تداخل‌های بین لایه‌ای و همراه با ناهمگنی‌های محلی است.

واحدهای رسی ریزدانه با نفوذپذیری کم در سامانه آبخوان دشت تهران - شهریار رفتاری آب زمین‌شناسی مهندسی بر پایه مدل تک‌لایه‌ای واحد محصور دانه‌ریز رسی خواهند داشت. این نکته بدین معنی خواهد بود که هر واحد رسی دانه‌ریز با نفوذپذیری کم، یک واحد مجزا و یک دست است که تغییرات ضریب ذخیره و جریان آب زیرزمینی در آن یکسان می‌باشد.

از آن جا که ضخامت واحدهای رسی ریز دانه با نفوذپذیری کم در بخش‌های جنوبی دشت و همچنین از سوی باختر به خاور افزایش می‌یابد که این افزایش همراه با افزایش حدود روانی و خمیری خاک‌ها است، و با در نظر داشتن نقش واحدهای مذکور به عنوان یکی از عوامل مهم در بروز پدیده فرونشست زمین، می‌توان پیش‌بینی نمود که میزان نرخ فرونشست زمین به ترتیب در بخش‌های جنوبی و خاوری نسبت به بخش‌های شمالی و باختری دشت بیشتر باشد.

منابع

آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران)، کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۸۴، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۷، گزارش مطالعات ژئوتکنیک در گستره دشت جنوب غربی تهران، ۵۴۳ صفحه.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۶، گزارش مطالعات لرزه‌شناسی در گستره جنوب غرب تهران، تجزیه و تحلیل مایکروترمورها با روش آرایه، جلد چهارم، ۴۲۶ صفحه.

مجیدی، علیرضا. میرزایی، مهدی. ۱۳۹۳، مدیریت به هم پیوسته منابع آب با تلفیق مدل‌های عددی و یکپارچه، همایش مدیریت منابع و مصارف آب (با تکیه بر توسعه پایدار منطقه البرز مرکزی: چالش‌ها، راهبردها و رویکردهای نو)؛ ۳۰ صفحه.

Ahmed, A.A., 2009. Using lithologic modeling techniques for aquifer characterization and groundwater flow modeling of the Sohag area, Egypt, *Hydrogeology Journal*, 17:1189-1201.

Akin, M.K., Kramer, S.L., Topal, T., 2011. Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey), *Engineering Geology* 119, 1-17.

- Avila-Olivera, J.A., Garduno-Monroy, V.H., 2010. Conceptual model of land subsidence with structural control, Land subsidence, Associated hazards and the role of natural resources development (proceeding of EISOLS, Queretaro, Mexico, IAHS publ. 339, 195-197.
- Brocher, T., 2005. Compressional and shear wave velocity versus Depth in the San Francisco Bay Area, California: Rules for USGS Bay Area Velocity Model 05.0.0., USGS open-file report 05-1317.
- Cao, G., Han, D., Moser, J., 2013. Groundwater exploitation management under land subsidence constraint: Empirical evidence from the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou plain, China, *Environmental Management* 51: 1109-1125.
- CEN, 2004-BS EN, 1998-1: 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance- part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization. ISBN: 0580458725.
- Galloway, D.L., 2013. Subsidence induced by underground extraction, in: Bobrowsky, P.T. (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards*, Springer, pp. 979-985.
- Hoffmann, J., Galloway, D.L., Zebker, H.A., 2003. Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. *Water Resources Research*, 39(2), 1031. 5(1-13).
- Hu, R.L., 2006. Urban land subsidence in China, IAEG, Paper No. 786, 8P.
- Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C., Wang, S.J., 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China, *Engineering Geology*, vol. 76, 65- 77.
- Iyisan, R., 1996. Correlation between shear wave velocity and in-situ penetration test results. *Digest* 96, 371-374.
- Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, 653 p.
- Liu, Y., Huang, H., 2013. Characterization and mechanism of regional land subsidence in the Yellow River Delta, China, *Nat Hazards*, 68: 687-709.
- Ma, R., Wang, Y., Ma, T., Sun, Z., Yan, S., 2006. The effect of stratigraphic heterogeneity on areal distribution of land subsidence at Taiyuan, northern China, *Environmental Geology*, 50: 551-568.
- Passadore, G., Monego, M., Altissimo, L., Sattani, A., Putti, M., Rinaldo, A., 2012. Alternative conceptual models and robustness of groundwater management scenarios in the multi-aquifer system of the Central Veneto Basin, Italy, *Hydrogeology Journal*, 20:419-433.
- Price, D.G., 2009. *Engineering geology, Principles and practice*, Springer-Verlag, 460 p.
- Rieben, H., 1955. The geology of the Tehran plain, *American Journal of Science*, pp. 617-639.
- Shi, X., Fang, R., Wu, J., Xu, H., Sun, Y., Yu, J., 2012. Sustainable development and utilization of groundwater resources considering land subsidence in Suzhou, China, *Engineering Geology*, 124: 77-89.
- Tezcan, S.S., Keceli, A., Ozdemir, Z., 2006. Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity, *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 24: 203-218.
- Vlahovic, T., Bacani, A., Posavec, K., 2009. Hydrogeochemical stratification of the unconfined Samobor aquifer (Zagreb, Croatia), *Environmental Geology*, 57:1707-1722.
- Wang, G.Y., You, G.G., Shi, B., Wu, S.L., Wu, J.Q., 2010. Large Differential land subsidence and earth fissures in Jiangyin, China, *Environmental Earth Science*, 61:1085-1093.