

## ارزیابی توان روان‌گرایی نهشته‌های کواترنری بندر امام خمینی

مهدی تلخابلو\*، استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی  
سید محمود فاطمی عقدا، دانشیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی  
میلاذ معتمدی، کارشناس ارشد، زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه خوارزمی  
زمان مهرگان، کارشناس ارشد، زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه خوارزمی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۲

### چکیده

ارزیابی توان روان‌گرایی نهشته‌های کواترنری محدوده بندر امام خمینی با استفاده از دو روش صحرایی آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) و اندازه‌گیری سرعت موج برشی (Vs) و مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها در این مطالعه تحلیل و بررسی شد. خرابی بناها، جاده‌ها، نشست زمین و حتی تلفات جانی از جمله خطرات پدیدۀ روان‌گرایی محسوب می‌شود. بندر امام خمینی بخشی از شهرستان ماهشهر در استان خوزستان است که از لحاظ تقسیم‌بندی ساختمانی- رسوبی در زون زاگرس قرار گرفته است. برای ارزیابی قابلیت روان‌گرایی نهشته‌های کواترنری با استفاده از آزمایش SPT از طرح ساده‌شده سید- ادریس و ارزیابی سرعت موج برشی از طرح انستیتو تحقیقات امریکا استفاده شده است. مقایسه این نتایج همخوانی با یکدیگر را نشان می‌دهد. کاربرد این نتایج نشانگر قابلیت بالای روش نفوذ استاندارد در پیش‌بینی روان‌گرایی در اعماق کم و کاربرد بالای روش موج برشی در اعماق بالا برای ماسه سنگ سیلتی محل است. با استفاده از نرم‌افزار GIS نقشه هجوم آب دریا به سمت خشکی تهیه و آب‌شستگی ذرات ریزدانه عامل روان‌گرایی معرفی شده است. در نهایت، با تحلیل نتایج و لحاظ کردن شرایط لرزه‌خیزی منطقه، وضعیت روان‌گرایی در حد بحرانی تشخیص داده شد و لزوم انجام اقدامات احتیاطی را ضروری می‌سازد. این اقدامات به صورت حفر گالری و تراکم خاک پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: بندر امام خمینی، توان روان‌گرایی، روش سید- ادریس، طرح انستیتو تحقیقات امریکا، نهشته‌های کواترنری.

### مقدمه

به سازوکار گسیختگی ماسه‌های خوب‌دانه‌بندی‌شده اشباع از آب روان‌گرایی<sup>۱</sup> می‌گویند. این پدیده نتیجه تجدید آرایش ذرات ماسه‌ای است (فاطمی‌عقدا و همکاران، ۱۳۸۷). ذرات خاک تماس پایداری بین یکدیگر دارند، اما در این نوع خاک‌ها، پیش از اینکه زمین‌لرزه و نیروی ناشی از آن از طریق تماس بین ذرات منتقل شود، روان‌گرایی صورت گرفته است. هنگامی که این خاک در اثر تنش‌های برشی ناشی از زلزله تغییر شکل می‌دهد، این پدیده تماس بین ذرات از بین می‌رود. در نهایت، نیروهای که اصولاً با تماس ذرات در امتداد قائم تحمل می‌شود به آب منفذی انتقال می‌یابد که این امر، همان بروز حالت روان‌گرایی است (برزگری و ارومیه‌ای، ۱۳۸۷).

از نمونه مطالعات روان‌گرایی در کشورمان می‌توان به ارزیابی توان روان‌گرایی آبرفت‌های جنوب تهران با استفاده از دو روش صحرایی آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)<sup>۲</sup> و اندازه‌گیری سرعت موج برشی (Vs)<sup>۳</sup> اشاره کرد که شاخص

talkhablou@khu.ac.ir

۱. liquefaction

۲. Standard Penetration Test

۳. Shear Wave Velocity

\* نویسنده مسئول: ۸۳۰۹۲۹۳

پتانسیل روان‌گرایی محاسبه‌شده در روش مقاومت نفوذ استاندارد نسبت به روش سرعت موج‌برشی کمتر است (عسگری و همکاران، ۱۳۸۵).

روش‌های گوناگونی برای ارزیابی روان‌گرایی وجود دارد که از مهم‌ترین این روش‌ها آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) است. اما آزمایش‌های لرزه‌ای روشی نوین در ارزیابی روان‌گرایی به شمار می‌آید. در این تحقیق ضمن بیان خلاصه‌ای از دو روش مقاومت نفوذ استاندارد و اندازه‌گیری سرعت موج‌برشی در برآورد توان روان‌گرایی، نتایج دو روش مذکور در محدوده مورد مطالعه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین، برخی عواملی که سبب بروز این پدیده می‌شوند نیز برای ماسه‌سنگ سیلتی محل معرفی شده است. گالاوی و همکاران (۲۰۱۳) در یکی از جدیدترین مطالعاتی که در کشور هلند صورت گرفته با قراردادن نتایج آزمایشگاهی با عنوان پارامترهای ورودی در نرم‌افزار عددی به تحلیل پدیده روان‌گرایی پرداخته‌اند.

انستیتو ملی تحقیقات و تکنولوژی آمریکا با مقایسه نتایج حاصل از روابط بین نسبت مقاومت تناوبی و سرعت موج‌برشی اصلاحی که روبرتسون و همکاران (۱۹۹۲)، کاین و همکاران (۱۹۹۲)، لودژ (۱۹۹۴) و آندروس و استوکو (۱۹۹۷) به‌دست‌آوردند، نمودارهایی را برای ارزیابی توان روان‌گرایی ارائه کرده است.

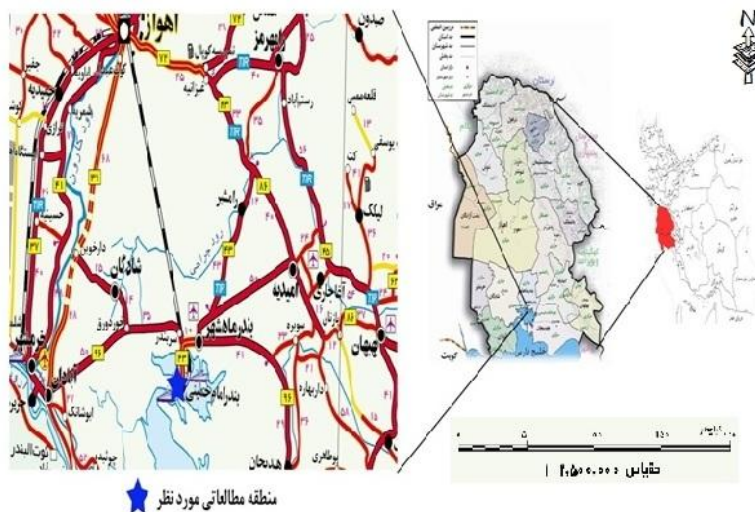
قهرمانی و همکاران (۱۳۸۵) تأثیر ریزدانه‌های پلاستیک بر مقاومت روان‌گرایی ماسه اشباع در درصد‌های متفاوت را آزمودند و در انتها این نتیجه حاصل شد که نخست، حضور ریزدانه‌ها در ماسه باعث تمایل خاک به انقباض و انقباض می‌شود و این امر سبب افزایش فشار آب حفره‌ای و تغییر در مقاومت روان‌گرایی می‌شود؛ دوم، رس موجود به دلیل افزایش چسبندگی ذاتی باعث انتقال این ویژگی به ماسه‌های اطراف می‌شود که این امر افزایش مقاومت روان‌گرایی را به دنبال دارد.

مرتضایی و کرمی (۱۳۹۲) احتمال پدیده روان‌گرایی با افزایش درصد ریزدانه‌ها را بررسی کردند. نتیجه این بررسی نشان داد که با افزایش درصد ریزدانه‌های غیرچسبیده به بیش از ۳۵ درصد، مقاومت برشی خاک افزایش و به همین میزان احتمال روان‌گرایی نیز کاهش می‌یابد.

انصاری (۱۳۸۹) احتمال پدیده روان‌گرایی را بررسی کرد و حضور اجزای ریزدانه کمتر از ۱۵ درصد و حد مایع کمتر از ۳۵ درصد و رطوبت را عوامل تشدید این پدیده می‌داند.

## مواد و روش‌ها

منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی در محدوده‌ای به مساحت ۲۶۰۰ هکتار در شهرستان ماهشهر و در مجاورت بندر امام خمینی واقع شده است. در شکل ۱ راه‌های دسترسی به منطقه نشان داده شده است.



شکل ۱. راه‌های دسترسی به بندر امام خمینی

در ارزیابی توان روان‌گرایی نهشته‌های کواترنری با استفاده از نتایج SPT، ابتدا مقدار نسبت مقاومت برشی توده خاک CRR پس از انجام اصلاحات مربوط محاسبه شد. در مرحله بعدی، ارزیابی توان روان‌گرایی، نسبت تنش برشی تناوبی توده خاک<sup>۱</sup> CSR ایجاد شده در اثر زلزله محاسبه و نسبت مقاومت برشی توده خاک به تنش برشی تناوبی توده خاک و معرف ضریب اطمینان بیان شده است. به منظور محاسبه سرعت موج برشی حاصل از نتایج نمونه‌برداری در بررسی‌های صحرایی، اقدام به اصلاح سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در عمق‌های مختلف شد. سپس، مشابه با روش عدد نفوذ استاندارد، CSR و CRR محاسبه شد. همچنین، ضریب اطمینان به دست آمده از روش موج برشی بیان شده است. در انتها ضریب اطمینان حاصل از این دو روش جهت برآورد شدت روان‌گرایی احتمالی در محدوده مورد مطالعه استفاده شد. برآورد داده‌های لرزه‌خیزی منطقه در چند سال اخیر نیز عاملی جهت تشدید این موضوع بررسی شده است. همچنین، بالابودن سطح آب زیرزمینی و هجوم آب شور نیز که احتمالاً در روان‌گرایی تأثیرگذار خواهد بود مطالعه و بررسی شد. در نهایت، مجموعه عواملی که باعث رخداد این پدیده مخاطره‌آمیز می‌شود و پیشنهادهایی در جهت کاهش نرخ بروز این پدیده بیان می‌شود.

### ارزیابی توان روان‌گرایی با استفاده از روش مقاومت نفوذ استاندارد (SPT)

در این تحقیق به منظور بررسی توان روان‌گرایی، ابتدا ضریب تصحیح بر مبنای نسبت انرژی ۶۰ درصد محاسبه شد. مقادیر هر کدام از این پارامترها با استفاده از جدول ۱ به دست آمد. همچنین، ضریب تصحیح فشار روباره با کمک روابط ارائه شده در پیوست محاسبه شد. محاسبه مقدار ضریب کاهش تنش و تنش برشی واقعی خاک در عمق نیز صورت گرفت.

جدول ۱. ضرایب اصلاح برای اعداد آزمون نفوذ استاندارد (نسیر، ۲۰۰۱)

ضریب تصحیح	متغیرها	علامت	فاکتور
۱-۰/۵	چکش حلقوی		
۱/۲-۰/۷	چکش ایمنی	C <sub>E</sub>	نسبت انرژی
۱/۳-۰/۸	چکش ایمنی-اتوماتیکی		
۱	۶۵-۱۱۵ میلی‌متر		
۱/۰۵	۱۵۰ میلی‌متر	C <sub>B</sub>	قطر گمانه
۱/۱۵	۲۰۰ میلی‌متر		
۰/۷۵	۳ متر <		
۰/۸	۴-۳		
۰/۸۵	۶-۴	C <sub>R</sub>	طول میله حفاری
۰/۹۵	۶-۱۰		
۱	۱۰-۳۰		
۱	نمونه‌گیر استاندارد		
		C <sub>S</sub>	شرایط نمونه‌گیری
۱/۱-۱/۳	بدون آستری		

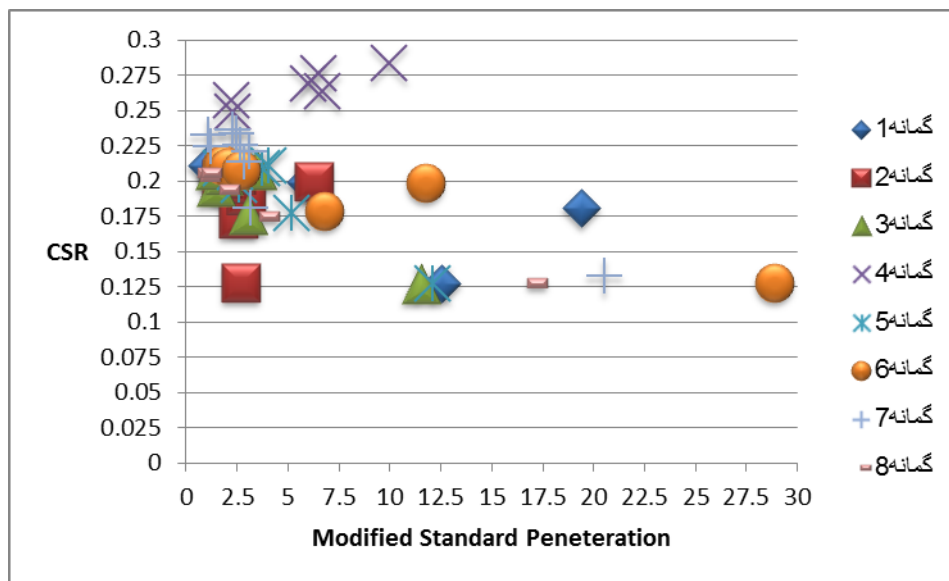
تاریخچه زمان واقعی تنش برشی حین زمین‌لرزه در هر ژرفای نهشته خاکی نامنظم است و لازم است که تنش برشی یکنواخت میانگین معادله از آن تعیین شود. سید و همکاران (۱۹۸۳) ۰/۶۵ تنش برشی بیشینه را پیشنهاد کرده‌اند.

۱. cyclic stress ratio

اگر تنش برشی میانگین با تقسیم شدن بر تنش مؤثر ناشی از ستون خاک به هنجار شود، نسبت تنش دوره‌ای قابل پیش بینی از زمین لرزه (CSR) به دست می‌آید (شکل ۲). اما تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی CRR نام دارد. پس با تقسیم تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی بر تنش دوره‌ای قابل پیش‌بینی از زلزله ضریب اطمینان در برابر روان‌گرایی تعیین می‌شود.

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \quad \text{رابطه (۱)}$$

شتاب بیشینه ناشی از زلزله در طرح  $g/2$  و بیشینه بزرگی ناشی از زلزله  $7/1$  در نظر گرفته شده است. در برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی به روش احتمالاتی مشخص شد که برای سازه‌های دارای عمر مفید پنجاه سال و ریسک خطر  $10\%$  (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) بزرگی زلزله احتمالی برابر  $Ms=6/6$  است که توانایی تحمیل شتابی حدود  $a = (g) 0/23$  را بر محل طرح خواهد داشت. اگر برای سازه‌ای با عمر مفید پنجاه سال، ریسک خطر مبنای طرح  $(37\%)$  باشد و بزرگی زلزله احتمالی (مورد انتظار) تقریباً  $Ms=6$ ، توانایی تحمیل شتابی حدود  $a = (g) 0/23$  طرح را خواهد داشت. در آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش سال ۸۴)، منطقه مورد مطالعه دارای خطر نسبی پایین در نظر گرفته شده و عدد  $(g) a = 0/2$  برای آن پیشنهاد شده است که این مقدار نیز برای سازه‌های دارای عمر مفید پنجاه سال و ریسک خطر  $10\%$  (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) است. پس با اعمال این شرایط، ضریب تصحیح  $1/15$  برای مقاومت برشی توده خاک به دست آمده است.



شکل ۲. ارتباط بین CSR با عدد نفوذ استاندارد

### ارزیابی توان روان‌گرایی با استفاده از اندازه‌گیری سرعت موج برشی

ارزیابی خاک‌های مستعد روان‌گرایی نسبت به روش آزمایش نفوذ استاندارد روش جدیدتری است. سرعت موج برشی پارامتری کلیدی برای ارزیابی توان روان‌گرایی خاک است. مقدار سرعت موج برشی با آزمایش‌های صحرائی انکساری، درون چاهی و آنالیز طیفی امواج سطحی به دست می‌آید. مطابق طرح مذکور، مقدار سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در عمق‌های مورد مطالعه باید اصلاح شود. در نهایت، مقدار ضریب روان‌گرایی به صورت رابطه (۴) به دست می‌آید. در انتها نیز با جایگزینی ضریب ایمنی روان‌گرایی به دست آمده برای عمق مورد نظر در رابطه (۲)، شاخص توان روان‌گرایی با کمک جدول ۲ پیش‌بینی می‌شود که توصیفی از شدت روان‌گرایی احتمالی در محدوده مورد مطالعه است (هاتر و متردین، ۲۰۰۷).

$$P_L = \int_0^{20} (1 - FS)(10 - 0.5Z)dZ \quad \text{رابطه ۲}$$

که  $P_L$  شاخص توان روان‌گرایی و  $FS$  ضریب ایمنی در مقابل روان‌گرایی در عمق  $Z$  است.

#### جدول ۲. تعیین میزان خطر روان‌گرایی بر اساس شاخص روان‌گرایی (PL) (هانتز و متزین، ۲۰۰۷)

$PL=0$	خطر روان‌گرایی خیلی کم است و عموماً نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق نیست.
$0 < PL \leq 5$	خطر روان‌گرایی کم است، با این حال به تحقیقات و مطالعات دقیق برای سازه‌های مهم نیاز است.
$5 < PL \leq 15$	خطر روان‌گرایی زیاد است و نیاز به تحقیقات دقیق برای انواع سازه دارد. استفاده از روش‌های کاهش مخاطرات روان‌گرایی ضرورت دارد.
$PL > 15$	خطر روان‌گرایی خیلی زیاد است و نیاز به تحقیقات دقیق دارد. استفاده از روش‌های کاهش مخاطرات روان‌گرایی ضروری است.

### زمین‌شناسی منطقه

بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه بر اساس تقسیم‌بندی ساختمانی - رسوبی انجام شده برای کشور ایران، حاکی از آن است که محدوده مورد مطالعه در زون زاگرس قرار دارد. این واحد شامل سه زیرواحد جداگانه دشت خوزستان، زاگرس چین‌خورده و زاگرس مرتفع است. محدوده مورد مطالعه در دشت خوزستان قرار گرفته است. این دشت در ادامه دشت وسیع بین‌النهرین است که با نهشته‌های کواترنری پوشیده شده و از نظر ساختمانی ساده و منحصر به چین‌خوردگی‌های بسیار ملایم با محور شمالی - جنوبی است (آقابی، ۱۳۸۳). به دلیل پوشش آبرفتی جوان و ضخیم دشت آبادان، دانسته‌های زمین‌شناختی به نتایج حاصل از حفاری نفتی و مطالعه ژئوفیزیکی محدود است. این داده‌ها نشان می‌دهد که در زیر رسوبات پوششی، نهشته‌های دوران اول و دوم در روند شمالی - جنوبی به‌طور ملایم چین‌خورده‌اند و گذر از رخساره‌های تخریبی و کم‌ضخامت دشت آبادان به رخساره‌های دریایی و ستر زاگرس چین‌خورده تدریجی است. محدوده بندر امام در بخش انتهایی خلیج فارس و در مصب رودخانه جراحی قرار دارد. شاخه‌های رودخانه در ناحیه مصب تشکیل دلتاهای متعددی می‌دهد. این رودخانه که از ارتفاعات سرچشمه می‌گیرد در این محل منشعب می‌شود و شروع به رسوب‌گذاری ذرات ریزدانه اعم از رس و لای می‌کند. از طرفی، بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه روی رسوبات دوران چهارم زمین‌شناسی واقع شده است. منطقه مورد نظر در محدوده جزر و مدی آب دریا قرار دارد و در مواقع مد به زیر آب می‌رفته است. در نتیجه، با توجه به مدل‌های دلتایی موجود، این منطقه در اثر رسوب‌گذاری مخلوطی از فرایندهای سازنده (رودخانه‌ای) و مخرب (جزر و مدی) به وجود آمده است.

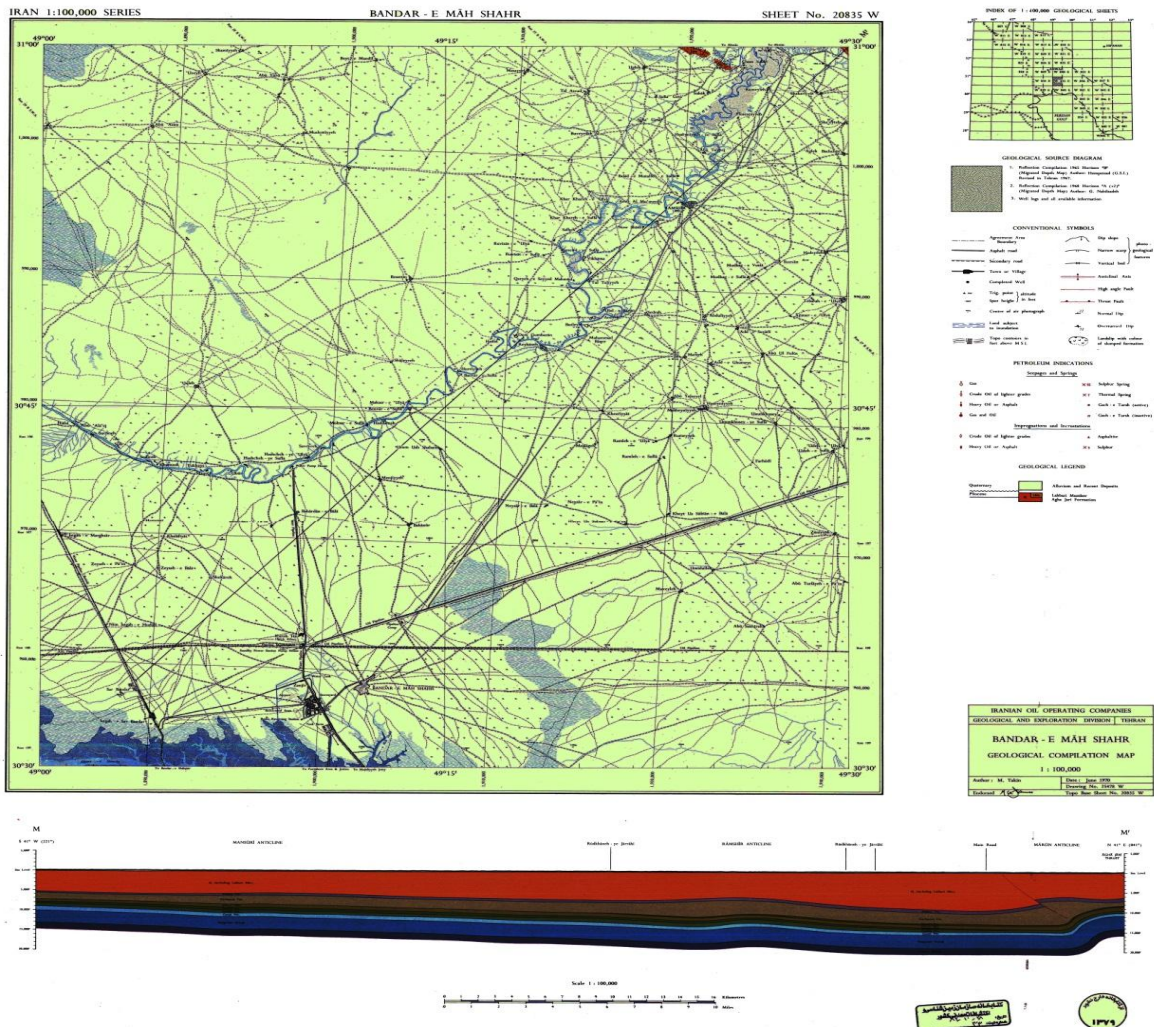
صدمه به دیوارهای نگه‌دارنده بندرها و باراندازها، نشست زیاد، چرخش، کج شدن، خرابی بناها، جاده‌ها و در مواردی تلفات جانی از عواقب روان‌گرایی است که این آثار در مناطق نزدیک سواحل، رودخانه‌ها و خلیج‌ها بیشتر است (اونق و همکاران، ۱۳۹۲). با توجه به قرارگیری محدوده مطالعاتی در نواحی ساحلی و بالای بودن سطح آب زیرزمینی مناطق ساحلی، بندر امام توان روان‌گرایی از خود نشان می‌دهد، ولی بررسی نقشه‌ها بیانگر این موضوع بود که تنها در مناطق خاصی از طرح نهشته‌های دانه‌ای کواترنری روان‌گرایی وجود دارد (گزارش مطالعات ژئوتکنیکی بندر امام خمینی). در نهایت، با توجه به اینکه در مجموع ۱۴۰ گمانه در این محدوده حفاری شده است، تعداد هشت گمانه با توجه به دارا بودن شرایطی مثل دانه‌ای بودن نهشته‌ها، بالا بودن سطح آب و نزدیکی به گسل احتمال وقوع خطر را از خود نشان می‌دادند. با لحاظ کردن شرایط فوق، همچنین در نظر گرفتن آزمایش‌های سرعت موج، مقایسه این دو روش با یکدیگر در برآورد روان‌گرایی بررسی شده است. نقشه زمین‌شناسی در شکل ۳ آمده است.

### یافته‌های پژوهش

#### ارتباط بین نفوذ آب شور با روان‌گرایی

در این قسمت از تحقیق با استفاده از اطلاعات شانزده گمانه حفر شده (شکل ۴) و داده‌های EC و CL این گمانه‌ها، و در نظر گرفتن این موضوع که حضور CL نشانگر هجوم آب شور است، اقدام به درون‌یابی در ناحیه مورد نظر شد. درون‌یابی

صورت گرفته به روش IDW در نرم افزار GIS نشانگر هجوم آب شور و بالا بردن سطح آب زیرزمینی بوده است. به دلیل تخلخل بالای خاک منطقه، شیب محل، همچنین برداشت بی رویه از چاه‌های منطقه، آب شور در مساحت بیشتری گسترش یافته است. حل شدن لایه نمکی موجود در منطقه از یک سو و آب شستگی ناشی از نوسان سطح آب دریا و



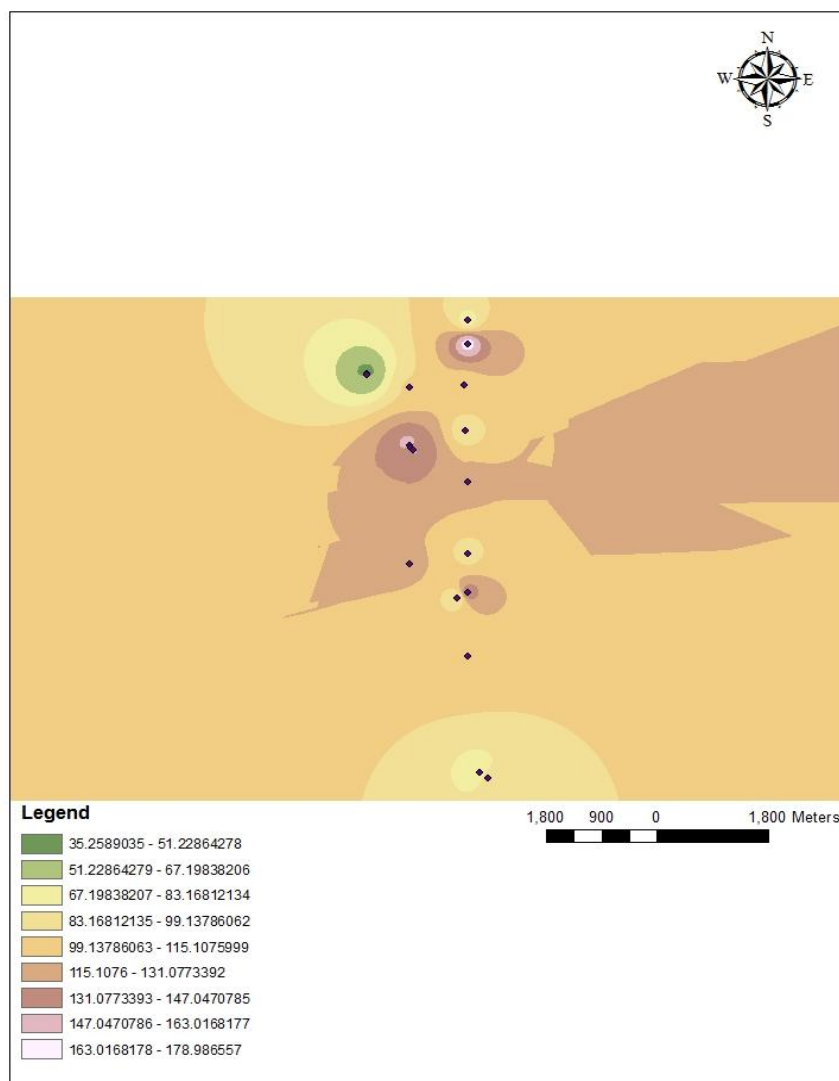
شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی بندر امام خمینی (گزارش مطالعات ژئوتکنیکی بندر امام خمینی)

انتقال ذرات ریزدانه سیلتی از طرف دیگر، باعث ایجاد فضای خالی شده و در اثر این عمل فشار مؤثر بین ذرات حذف شده است و مقاومت برشی توده خاک از بین می‌رود و ناگهان توده خاک بدون هیچ گونه مقاومت برشی به صورت مایع درمی‌آید و موجب تخریب سازه ساخته شده روی آن می‌گردد.

### ارتباط بین تخلخل و سرعت موج برشی با روان‌گرایی

در چند دهه گذشته، روابط تجربی متعددی برای تخمین سرعت موج برشی بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ به‌ویژه سرعت موج برشی و تخلخل ارائه شده است، از جمله رمونی و همکاران (۲۰۱۳) (جدول ۳).

از نتایج بررسی‌های بالا و روابط استخراج شده این نتیجه حاصل می‌شود که از سایر عوامل تأثیرگذار بر روان‌گرایی منطقه مطالعاتی رابطه بین افزایش تخلخل و سرعت موج برشی است که تأکیدی است بر این نکته که وجود جریان‌های جذر و مدی که باعث آب شستگی ذرات ریز و بالا بردن درصد نهشته‌های دانه‌ای کواترنری شده است باعث بالا بردن تخلخل موجود در محیط نیز می‌شود. آزمایش‌های صحرائی موج برشی نیز این موضوع را اثبات می‌کند.



شکل ۴. نقشه موقعیت گمانه‌ها (نقاط سیاه‌رنگ) و هجوم آب دریا به سمت خشکی

جدول ۳. روابط سرعت- تخلخل برای ماسه آبدار

سرعت موج برشی	سرعت موج فشاری	سال	دانشمند
$V_s=4.4008-0.0224n$	$V_p=4.3239-0.21n$	۲۰۱۳	رحمونی و همکاران
$V_s=3860-71.43n$	$V_p=5850-117.2n$	۲۰۱۳	کوت و همکاران

همچنین، به منظور بررسی روابط بین سرعت موج فشاری و برشی، افراد مختلف مطالعات گسترده‌ای انجام داده‌اند. وجه مشترک همه این مطالعات روابط مختلف برای لیتولوژی‌های مختلف است. همچنین، تمامی این روابط برای حالت اشباع سنگ از سیال آب شور است (پیرایه‌گر و همکاران، ۱۳۸۸). مجموعه روابط افراد مختلف برای لیتولوژی‌های متفاوت در جدول ۴ ارائه شده است. برای منطقه مطالعاتی مورد نظر که جنس ماسه سیلتی در اکثر نقاط غالب بوده است روابط ارتباط سرعت موج برشی با موج فشاری، همچنین ارتباط تخلخل با سرعت موج برشی به کمک رگرسیون خطی به صورت روابط ۱ و ۲ استخراج شده است.

پس به طور کلی کاهش سرعت موج برشی در برخی نقاط نشانگر افزایش تخلخل است که در منطقه حاضر آب شستگی دلیل افزایش میزان تخلخل دانسته شده است که این پدیده نیز به نوبه خود بر شدت روان گرایمی منطقه می افزاید. رابطه بین سرعت موج برشی با موج فشاری نیز نشان می دهد در نقاطی که سرعت موج برشی کم است، سرعت موج فشاری نیز کم و در نتیجه تخلخل بالا خواهد بود. این روابط برای سایر مطالعات منطقه، همچنین درک شرایط روان گرایمی نهشته های کواترنری گسترش یافته در منطقه مفید است.

جدول ۴. روابط تجربی سرعت موج برشی و فشاری برای لیتولوژی های مختلف

لیتولوژی	دانشمند	رابطه تجربی
آهک	آخوندی و همکاران (۲۰۱۴)	$0.018 - V_S = 534 V_P$
آهک	اسکندری و همکاران (۲۰۰۳)	$V_S = -1.6126 V_P - 2.3057$

$$V_S = 114.11n + 92.109 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$V_S = -0.0285 V_P + 208.91 \quad \text{رابطه (۲)}$$

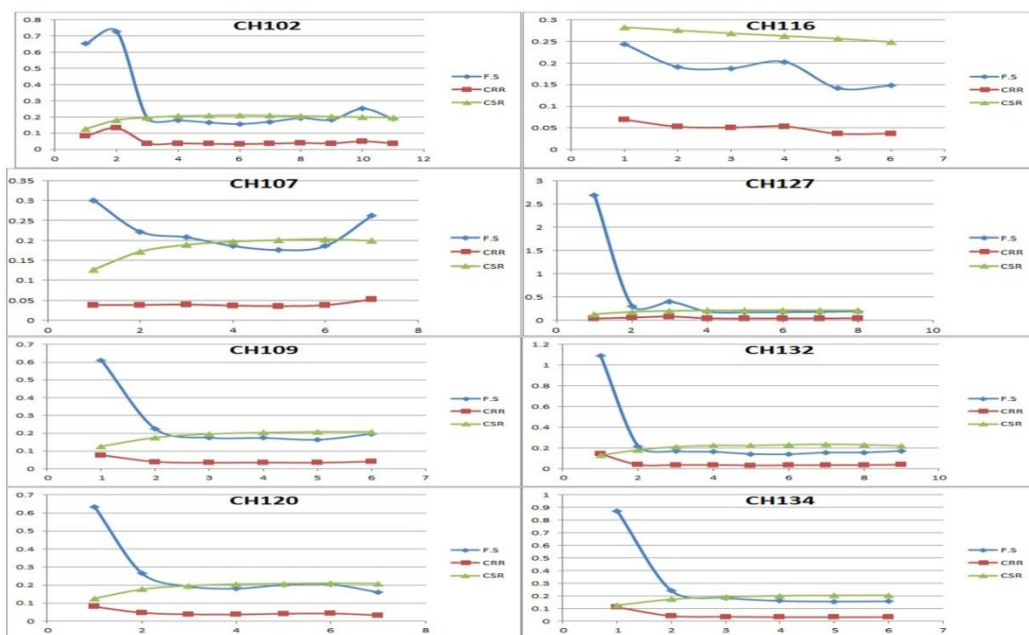
### بحث و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر دو روش صحرایی ارزیابی توان روان گرایمی شامل مقاومت نفوذ استاندارد و اندازه گیری سرعت موج برشی برای ماسه سنگ های سیلتی کواترنری بندر امام خمینی بررسی شد. مقایسه ضرایب اطمینان و شاخص پتانسیل روان گرایمی این دو روش حاکی از آن است که به طور کلی شاخص توان روان گرایمی محاسبه شده در روش مقاومت نفوذ استاندارد در اعماق کم نسبت به روش سرعت موج برشی کمتر است و نتایج محتاطانه تری ارائه می دهد. همین طور روش موج برشی در اعماق زیاد نسبت به روش نفوذ استاندارد برای ماسه سنگ های سیلتی محل حاضر ارجحیت دارد. نتایج تحقیقات صورت گرفته با استفاده از روش نفوذ استاندارد، روش سرعت موج برشی و ضرایب اطمینان مربوط به آنها به طور کامل در شکل ۵ و ۶ برای ماسه سنگ های سیلتی نشان داده شده است. همچنین، تغییرات شاخص روان گرایمی با عمق به روش های نفوذ استاندارد و موج برشی در شکل ۷ ارائه شده است.

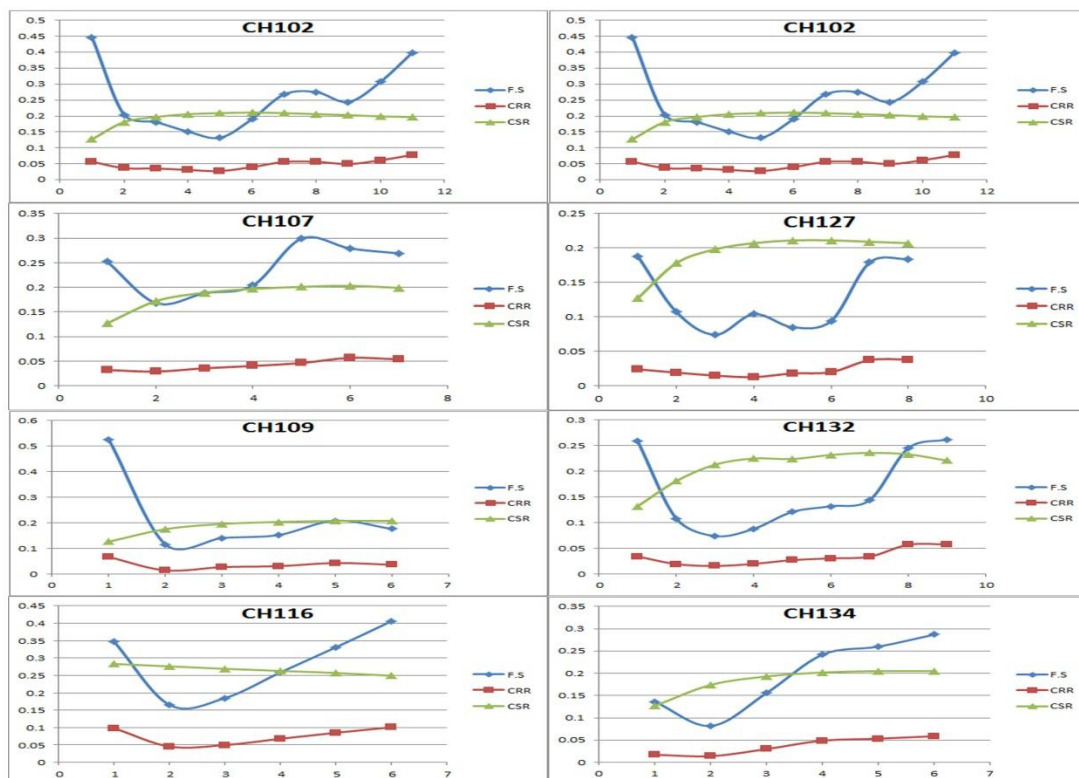
از دیگر عوامل تأثیرگذار بر روان گرایمی منطقه، نفوذ آب شور است که نقشه آن با استفاده از نرم افزار GIS ترسیم شد (شکل ۴). به دلیل تخلخل بالای خاک منطقه، شیب محل، همچنین برداشت بی رویه از چاه های منطقه، آب شور به سمت خشکی هجوم آورده است. بدین ترتیب، نفوذ آب شور در منطقه از یک سو و آب شستگی ناشی از نوسان سطح آب دریا و انتقال ذرات ریزدانه سیلتی از طرف دیگر باعث ایجاد فضای خالی شده است که این عوامل با از بین بردن مقاومت برشی خاک ها به پدیده روان گرایمی کمک می کند. در شکل ۸ نقشه هم عمق لایه مقاوم بر اساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) با استفاده از GIS ارائه شده است. بررسی انجام شده نشانگر بالا بودن ضخامت خاک در مناطق ساحلی و قرارگیری توده سنگ مورد نظر در عمق بیشتر بوده است که این موضوع تأکیدی است بر وقوع آب شستگی در ماسه سنگ های سیلتی مورد مطالعه.

از سایر عوامل تأثیرگذار بر روان گرایمی منطقه مطالعاتی رابطه بین افزایش تخلخل با سرعت موج برشی است که ناشی از وجود جریان های جذرومدی و آب شستگی ذرات ریز سیلتی و بالا بردن درصد نهشته های ماسه ای کواترنری است. این ارتباط به صورت روابط ۱ و ۲ برای ماسه سنگ های سیلتی نهشته های کواترنری استخراج شده است. این روابط برای سایر ماسه سنگ های سیلتی نهشته های حاضر که در منطقه گسترش دارند قابل استفاده خواهد بود.

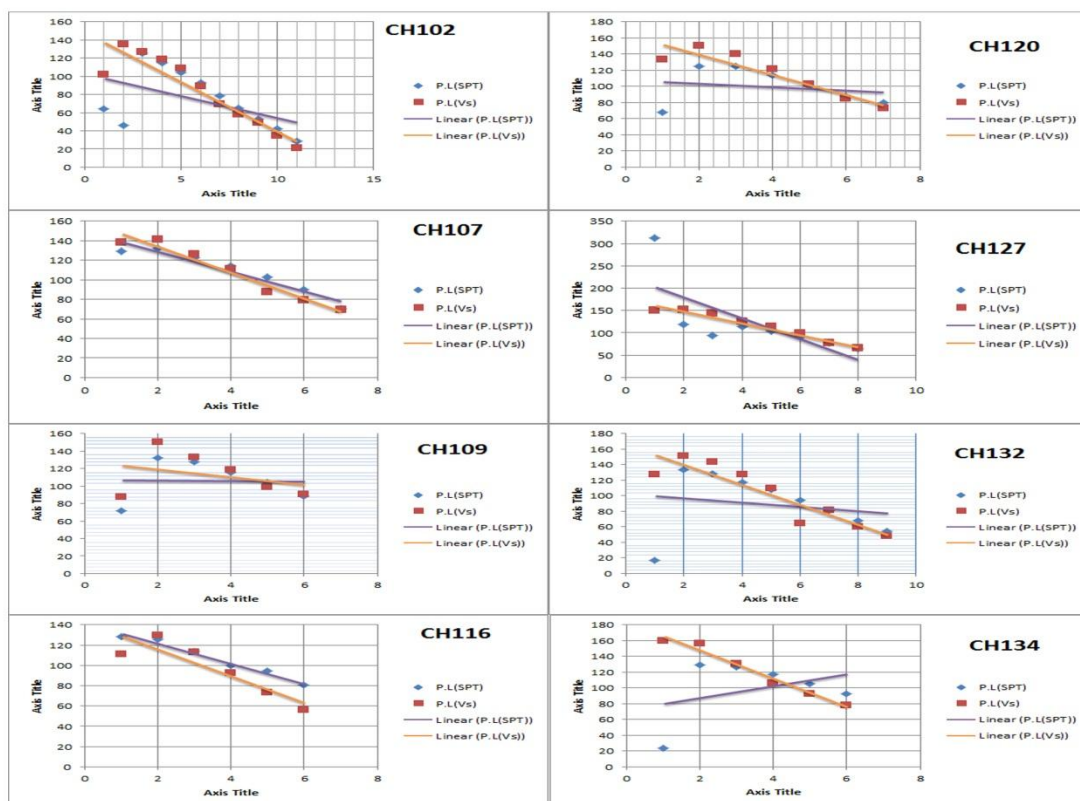
با توجه به شرایط لرزه خیزی و احتمال رخداد آن، ضریب اطمینان در اکثر نقاط دارای مقداری کمتر از میزان مجاز بوده است که با توجه به نتایج به دست آمده منطقه را در حد بحرانی روان گرا نشان می دهد. با توجه به شرایط موجود پیشنهاد می شود که پیش از اجرای سازه های مهندسی در منطقه تا حد امکان نسبت به به سازی شرایط موجود اقدام شود. از جمله این اقدامات عبارت است از حفر گالری و تراکم خاک. انجام مطالعه حاضر این نکته را یادآور می سازد که بررسی مطالعات روان گرایمی در مناطق مستعد، همانند منطقه حاضر از ضروریات است و باید در مطالعات پیش از طرح مانند سایر مطالعات دیگر گنجانده شود.



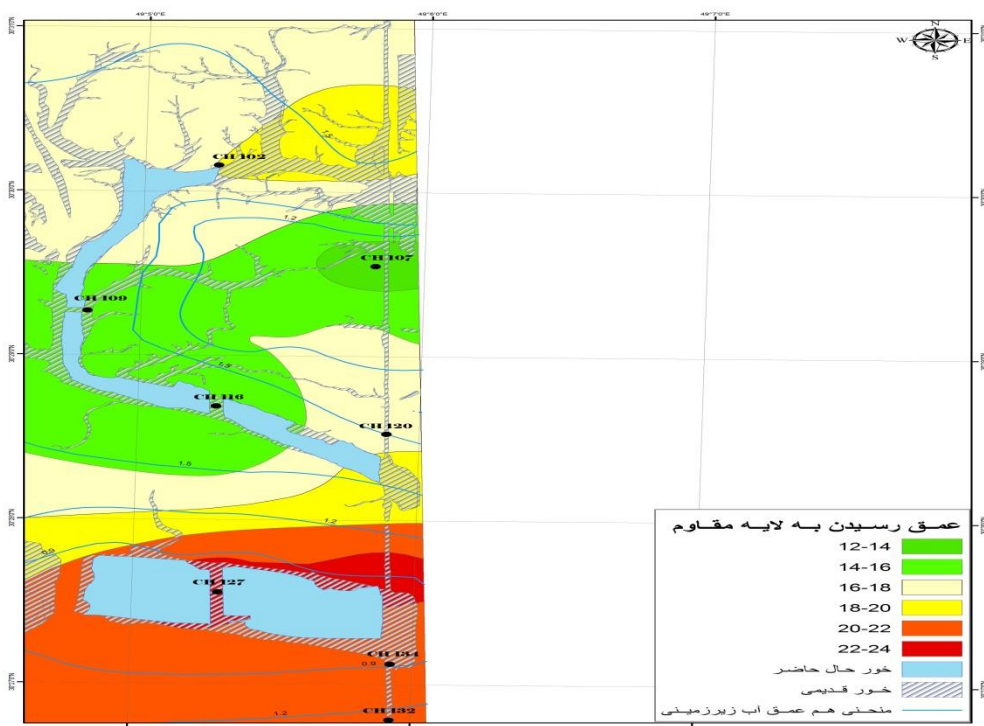
شکل ۵. تغییرات تنش برشی، مقاومت برشی و ضریب اطمینان با عمق به کمک داده‌های (SPT)



شکل ۶. تغییرات تنش برشی، مقاومت برشی و ضریب اطمینان با عمق به کمک داده‌های (Vs)



شکل ۷. تغییرات شاخص روان گرایی با عمق به کمک داده‌های (SPT) و (Vs) برای گمانه‌ها



شکل ۸. نقشه هم عمق لایه مقاوم بر اساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

## منابع

- آقائباتی، س.ع.، (۱۳۸۳)، زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- انصاری، ز. (۱۳۸۹). ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی در خاک‌های رسی مطالعه موردی: سایت اجرایی ایستگاه پمپاژ جزیره مینو. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
- اونق، م.، عبدالله زاده، ع.، و مصطفی زاده، ر. (۱۳۹۲). ارزیابی خطر و خسارت ناشی از پدیده روان‌گرایی خاک مطالعه موردی شهرستان گرگان در استان گلستان. مدیریت بحران، شماره ۴.
- برزگری، ق.، و ارومیه‌ای، ع. (۱۳۸۷). ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی پی‌آبرفتی ساختمان سد مخزنی چپرآباد بر اساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد. علوم زمین، سال ۱۷، شماره ۶۸.
- پیرایه گر، آ.، مهرگینی، ب.، و معماریان، ح. (۱۳۸۸). نگاهی بر گستره روش‌های تخمین سرعت موج‌برشی از روابط تجربی تا محاسبات هوشمند. اکتشاف و تولید، شماره ۶۳.
- عسگری، ف.، دبیری، ر. و بخشایش، م. (۱۳۸۵). مقایسه ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی با روش‌های مقاومت نفوذ استاندارد و اندازه‌گیری سرعت موج‌برشی در جنوب تهران. زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال ۸، شماره ۲.
- فاطمی‌عقدا، م.، رضایی، ب. و نوری‌زاده، م. (۱۳۸۷). زمین‌شناسی مهندسی. انتشارات هرمزگان، ص ۱۶۰-۱۶۱.
- قهرمانی، م.، قلندرزاده، ع.، و مرادی، م. (۱۳۸۵). بررسی تأثیر ریزدانه‌های پلاستیک بر مقاومت روان‌گرایی ماسه اشباع. زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال ۸، شماره ۲.
- گزارش مطالعات ژئوتکنیکی بندر امام خمینی (ره)، شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار.
- مرتضایی، م.، و کریمی، م.ح. (۱۳۹۲). بررسی اثر درصد ریزدانه خاک روی روان‌گرایی. هفتمین کنگره مهندسی عمران، زاهدان.
- Aghanabati, S.A., (2004). Iran geology, Geological survey of Iran.
- Akhundi, H., Ghafoori, M. and Lashkaripour, G. (2014). Prediction of shear wave velocity using artificial neural network technique, multiple regression and petrophysical data: A case study in Asmari Reservoir (SW Iran). Open Journal of Geology, Scientific Research, Vol. 4, pp. 303-313.
- Andrus, R.D., Stokoe K.H., and Chung, R.M. (1999). Draft guidelines for valuating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedures. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology (NIST).
- Andrus, R.D. and Stokoe, K.H. (1997). Liquefaction resistance based on shear wave velocity. NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils, Technical Report NCEER- 97-0022. T.L. Youd and I.M. Idriss, Eds., 4-5 Jan. 1996, Nat. Ctr. For Earthquake Eng. Res., Buffalo, NY, pp. 89-128.
- Ansari, Z., (2010). Liquefaction assessment in clay soils, case study pumping station in Minoos Island, Fifth National Congress on Civil Engineering, Mashad University, Iran.
- Askari, F., Dabiri, R. and Bakhsheh, M. (2006). Liquefaction evaluation by standard penetration tests and shear wave velocity measurements in South of Tehran. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, No.2
- Barzegari, GH, and Uromeihy, A. (2008). Liquefaction assessment Chaparabad alluvial dam reservoir on the results of standard penetration test. Journal of earth science. No.67.
- Eskandari, H., Rezaee, M.R., Javaherian, A., and Mohammadian, M. (2003). Shear wave velocity estimate utilizing wireline logs for a carbonate reservoir, South-West Iran. Iranian Int. J. Sci. Vol. 4, No. 2, pp. 209-221.
- Fatemiaghda, M., Rezaei, P. and Noorzadeh, M. (2008). Engineering geology, Hormozgan publications, p 160-162.
- Galavi, V., Petalas, A. and Brinkgreve, R.B.J. (2013). Finite element modelling of seismic liquefaction in soils. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA.
- Geotechnical Report of Imam Khomeini Port. Pazhohesh Omran Rahvar Consulting Eng.
- Ghahramani, M., Ghalandarzadeh, A. and Moradi, M. (2006). Effect of plastic granules on liquefaction resistance of saturated sand. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, No.2.
- Hunter, J.A., and Motezadian, D. (2007). Shear wave velocity measurement for soft soil earthquake response evaluation in the Eastern Ottawa Region, Ontario, Canada, J. of the Soil Mechanics and Found. Div.
- Kayen, R.E., Mitchell, J.K., Seed, R.B., Lodge, A., Nishio, S. and Coutinho, R. (1992). Evaluation of SPT, CPT, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma- Prieta data. Proc. Fourth Japan- U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-92-0019, M. Hamada and T.D. O'Rourke, Eds., Held 27-29 May, Honolulu, Hawaii, Nat. CTR. For Earthquake Eng. Res. Res. Buffalo, NY, I, 177-204.
- Kohout, T., Karlqvist, R., Eskelinen, J., and Hortling, A. (2013). Ultrasonic determination of porosity in homogeneous ceramic samples. Geophysica, Vol. 49, Vol. 1-2, pp. 25-32.
- Lodge, A.L. (1994). Shear wave velocity measurements for subsurface characterization. Ph.D. Dissertation, Univ. of Calif. at Berkeley
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J. (1998). The rock physics handbook. Cambridge University Press.
- Mortezaei, M. and Karami, MH. (2013). Effect of fine soil liquefaction. Seventh Congress of Civil Engineering. Zahedan. Iran
- NCEER "Proceeding of the NCEER / New workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 27, no.10, October, 2001
- Onagh, M., Abdollahzadeh, A and Mostafazadeh, R (2013). Risk assessment and damage caused by liquefaction, case study Gorgan city, Journal of Crisis Management, No.4.
- Pirayegar, A., Mehrgini, B. and Memarian, H. (2009). Looking at the range of shear wave velocity estimation of correlations to Smart Computing. Journal of Exploration and Production, No.63.
- Rahmouni, A., Boulanouar, A., Boukalouch, M. and Sebbani, J. (2013). Prediction of prosity and density of

- calcarene rocks from p-wave velocity measurements. International Journal of Geosciences, Vol. 4, pp. 1292-1299.
- Robertson, P.K., Woeller, D.J., and Finn, W.D.L. (1992). Seismic Cone Penetration Test for Evaluating Liquefaction Potential Under Cyclic Loading. Canadian Geotech. J., 29, 686-695
- Seed, H.B., Idriss, I.M., and Arango, I. (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. J. of Geotech. Eng., ASCE, 109(3), pp. 458-482.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. J. of the Soil Mechanics and Found. Div., ASCE, 97(SM9), pp. 1249-1273.

### پیوست (محاسبات)

در این مطالعه جهت بررسی پتانسیل روان گرایی ابتدا ضریب تصحیح بر مبنای نسبت انرژی ۶۰ درصد با کمک رابطه (پ ۱) محاسبه شد.

$$(N_1)_{60} = N_{spt} \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_R \quad \text{رابطه پ ۱}$$

که به ترتیب  $C_R$  ضریب تصحیح طول میله حفاری،  $C_S$  ضریب تصحیح شرایط نمونه گیر،  $C_B$  ضریب تصحیح قطر گمانه،  $C_E$  ضریب تصحیح نسبت انرژی چکش،  $C_N$  ضریب تصحیح فشار روباره و  $N_{spt}$  عدد نفوذ اصلاح نشده است. مقادیر هر کدام از این پارامترها با استفاده از جدول ۲ حاصل شده‌اند. همچنین، ضریب تصحیح فشار روباره با کمک رابطه (پ ۲) تغییر می‌کند.

$$C_N = \left( \frac{P_a}{\sigma_0} \right)^\alpha \leq 1.7$$

$$\alpha = 0.784 - 0.0768 \sqrt{(N_1)_{60}} \quad \text{رابطه پ ۲}$$

که پارامترهای این رابطه  $P_a$  فشار اتمسفر و  $\sigma_0$  فشار روباره مؤثر تعریف شده‌اند. محاسبه تنش برشی واقعی خاک در عمق با استفاده از رابطه (پ ۳) صورت گرفته است.

رابطه پ ۳

$$\tau_{Max} = r_d \frac{\sigma_0}{g} \cdot a_{Max} \quad (۲)$$

که  $r_d$  ضریب کاهش تنش و  $\sigma_0$  نیز تنش ناشی از ستون خاک است. مقدار ضریب کاهش تنش نیز با استفاده از رابطه (پ ۴) محاسبه می‌شود.

$$r_d = \frac{1.0 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052 + 0.001753z^{1.5}}{1.0 - 0.4177z^{0.5} - 0.006205z^{1.5} + 0.05729z + 0.00121z^2} \quad \text{رابطه پ ۴}$$

تاریخچه زمان واقعی تنش برشی حین زمین لرزه در هر ژرفای نهشته خاکی نامنظم است و لازم است که تنش برشی یکنواخت میانگین معادله از آن تعیین شود. سید و ادريس (۱۹۷۱)، ۰/۶۵ تنش برشی بیشینه را پیشنهاد کرده‌اند، بنابراین:

$$\tau_{ave} = (0.65) \cdot r_d \frac{\sigma_{max}}{g} \cdot \sigma_0 \quad \text{رابطه پ ۵}$$

اگر تنش برشی میانگین با تقسیم شدن بر تنش مؤثر ناشی از ستون خاک به هنجار شود، نسبت تنش دوره‌ای قابل پیش بینی از زمین لرزه (CSR) به دست می‌آید.

$$CSR = \left\{ \frac{\tau_{ave}}{\sigma_v^t} \right\} = 0.65 \left\{ \frac{a_{max}}{g} \right\} \left\{ \frac{\sigma_v^t}{\sigma_v^t} \right\} * r_d \quad \text{رابطه پ ۶}$$

$a_{max}$  شتاب بیشینه ناشی از زلزله،  $\sigma_v^t$  تنش سربار کل،  $\sigma_v^t$  تنش سربار مؤثر و  $r_d$  ضریب کاهش تنش است. این نسبت یکی از متغیرهای لازم برای ارزیابی روان گرایی خاک است.

اما تنش لازم برای ایجاد روان گرایی CRR نام دارد. پس، در نهایت با تقسیم تنش لازم برای ایجاد روان گرایی بر

تنش دوره‌ای قابل‌پیش‌بینی از زلزله ضریب اطمینان در برابر روان‌گرایی تعیین می‌شود.

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \quad \text{رابطه پ ۷}$$

اما از روش‌های برآورد نسبت تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی (CRR)، برای زمین‌لرزه‌ای با بزرگی  $M=7/5$  و فشار روباره  $\sigma_0=1 \text{ atm}$ ، استفاده از عدد نفوذ استاندارد اصلاح‌شده  $(N1)_{60}$  طبقه رابطه (پ ۸) است.

$$CRR = \exp \left\{ \frac{(N1)_{60} CS}{14.1} + \left[ \frac{(N1)_{60} CS}{126} \right]^2 - \left[ \frac{(N1)_{60} CS}{23.6} \right]^3 + \left[ \frac{(N1)_{60} CS}{25.4} \right]^4 - 2.8 \right\} \quad \text{رابطه پ ۸}$$

همان‌گونه که بیان شد، CRR به‌دست‌آمده برای شرایط خاص تعریف شده است. حال اگر بزرگی زلزله تغییر کند، ضریب تصحیح به‌صورت رابطه (پ ۹) بیان می‌شود.

$$CRR = CRR_{M=7.5} * MSF \quad \text{رابطه پ ۹}$$

طبق تحقیقات لرزه‌خیزی منطقه شتاب بیشینه ناشی از زلزله در طرح  $0.2g$  و بیشینه بزرگی ناشی از زلزله  $7/1$  در نظر گرفته شده است. پس با اعمال این شرایط ضریب تصحیح  $1/15$  به‌دست می‌آید.

روش پیشنهادی سید و همکاران (۱۹۸۴) برای اعماق کمتر از ۱۵ متر است و برای اعماق بیش از ۱۵ متر از ضریب تصحیحی به نام  $K_\sigma$  استفاده می‌شود. این ضریب به‌صورت رابطه (پ ۱۰) تعریف می‌شود.

$$K_\sigma = 1 - C_\alpha \ln \left( \frac{\sigma_v}{p_0} \right) \leq 1.0 \quad \text{رابطه پ ۱۰}$$

$$C_\alpha = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N1)_{60}}}$$

پس از محاسبه این ضریب، CRR نهایی به‌صورت رابطه (پ ۱۱) محاسبه می‌شود.

$$CRR = CRR_{M=7.5} * MSF * K_\sigma \quad \text{رابطه پ ۱۱}$$

در تحقیق حاضر، مقدار سرعت موج‌برشی اندازه‌گیری شده در عمق‌های مورد مطالعه باید با استفاده رابطه (پ ۱۲) نسبت به تنش مؤثر قائم در عمق مورد نظر اصلاح شود.

$$V_{SI} = V_S \left( \frac{P_a}{\sigma_v} \right)^{0.25} \quad \text{رابطه پ ۱۲}$$

در رابطه بالا،  $V_{SI}$  سرعت موج‌برشی اصلاح‌شده،  $P_a$  فشار اتمسفر ( $100 \text{ kpa}$ ) و  $\sigma_v$  مقدار تنش مؤثر قائم در هر عمقی است.

مقدار مقاومت برشی تناوبی (CRR) نیز با استفاده از رابطه (پ ۱۳) محاسبه می‌شود.

$$CRR = 0.022 \left\{ \left( \frac{cV_{SI}}{100} \right)^2 + 2.8 \left( \frac{1}{V * SI - cV_{SI}} - \frac{1}{V * SI} \right) \right\} MSF \quad \text{رابطه پ ۱۳}$$

که  $V * SI$  حداکثر سرعت موج‌برشی برای وقوع روان‌گرایی است که با توجه به درصد ریزدانه  $\geq 35\%$  (FC) این پارامتر  $200$  متر بر ثانیه خواهد بود.

ضریب تصحیح بزرگی زلزله نیز به کمک رابطه (پ ۱۴) محاسبه می‌شود.

$$MSF = \left( \frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56} \quad \text{رابطه پ ۱۴}$$

با قراردادن  $M_w=7/5$  ضریب تصحیح برابر ۱ محاسبه خواهد شد. اما ضریب C پارامتری است که با درجه سیمانی شدن خاک ارتباط دارد. این ضریب نیز با توجه به سن بیش از ۱۰۰۰۰ سال و سیمانی شدن خاک موردنظر با مقدار  $0.7$  در محاسبات لحاظ شده است.

تنش برشی تناوبی خاک نیز با استفاده از رابطه (پ۱۵) محاسبه می‌شود. محاسبه این پارامتر همان‌طور که مشاهده می‌شود مانند روش نفوذ استاندارد است.

$$\text{CSR} = \left\{ \frac{\tau_{ave}}{\sigma_v^t} \right\} = 0.65 \left\{ \frac{a_{max}}{g} \right\} \left\{ \frac{\sigma_v}{\sigma_v^t} \right\} * r_d \quad (\text{رابطه پ۱۵})$$

در نهایت، مقدار ضریب روان‌گرایی با توجه به محاسبات صورت گرفته به صورت رابطه (پ۱۶) به دست می‌آید.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (\text{رابطه پ۱۶})$$

در انتها نیز با جایگزینی ضریب ایمنی روان‌گرایی به دست آمده برای عمق مورد نظر در رابطه (پ۱۷)، شاخص توان روان‌گرایی پیش‌بینی‌پذیر است که توصیفی است از شدت روان‌گرایی احتمالی در محدوده مورد مطالعه.

$$P_L = \int_0^{20} (1 - FS)(10 - 0.5Z) dZ \quad (\text{رابطه پ۱۷})$$

در رابطه بالا،  $P_L$  شاخص توان روان‌گرایی و  $FS$  ضریب ایمنی در مقابل روان‌گرایی در عمق  $Z$  است.