ارزیابی پتانسیل روانگرایی بستر ساحل بستانو (باختر بندرعباس) بر اساس آزمایش نفوذ استاندارد(SPT) و پهنه‌بندی خطر

حمزه ترکمانی تمبکی[1*]، ماشااله خامه چیان[2]، مریم نظری[3]، شازدی صفری[4]

۱. دانشجوی دکترا زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳. کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بندرعباس، ایران
۴. کارشناس ارشد تکتونیک، دانشگاه هرمزگان، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۰۷/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵

چکیده

هدف پژوهش، بررسی خطر روانگرایی در سواحل بوستانو در باختر بندرعباس در استان هرمزگان است. روش تحقیق براساس روش تنش تناوبی جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی با تکیه بر روی داده‌ها حاصل از نفوذ استاندارد است. شتاب بیشینه ۰/۳۵g، به عنوان شتاب سنگ بستر انتخاب گردید. مقاطع عرضی توسط نرم افزار Rockwork، با تکیه بر روی خصوصیات نهشته‌های رسوبی از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی استخراج و سپس اطلاعات ژئوتکنیکی جمع‌آوری شده برای تهیه پروفیل‌های شاخص ژئوتکنیکی بررسی شد. از آنجا که محدوده مطالعاتی در منتهی الیه زاگرس چین خورده واقع شده است و به لحاظ لرزه‌خیزی دارای خصوصیات پهنه انتقالی زاگرس- مکران است، بیشترین انرژی را به رسوبات اشباع منطقه وارد می‌نماید. با توجه به جنبش نیرومند زمین در ایجاد روانگرایی، شتاب سنگ بستر لرزه‌ای (PGA) و بیشینه شتاب افقی در سطح زمین (a_{max}) آنالیز روانگرایی با نرم افزارLiqIT v.4.70 مورد ارزیابی قرارگرفت. نتایج حاکی از رسوبات ماسه‌ای و سیلتی محدوده مورد مطالعه که ماحصل فرآیندهای هوازدگی ارتفاعات شمالی منطقه می‌باشند، است. وجود رسوبات دانه‌ای در حد ماسه و سیلت در شرایطی مساعد با حضور سطح بالای آب زیرزمینی، کاملا مستعد اولیه پدیده روانگرایی در این منطقه تشخیص داده شد. نقشه‌های پهنه‌بندی شدت بروز روانگرایی در نقاط مختلف بوستانو و در عمق‌های سطحی و مستعد منطقه استخراج گردید که نشانگرکلاس‌های خطر مختلف وقوع روانگرایی در خاک این منطقه بود و در مجموع وقوع روانگرایی با شدت بروز بالا تا زیاد برای منطقه بوستانو پیش‌بینی شد.

کلید واژه‌ها: آزمون نفوذ استاندارد، بستانو، پهنه‌بندی خطر، روانگرایی.

مقدمه

هنگامی که نهشته‌های خاک در اثر حرکات لرزه‌ای به سرعت و به صورت دو سویه تحت برش قرار گیرند فشار آب در داخل خلل و فرج خاک نیز افزایش می‌یابد. در خاک‌های غیر چسبنده اشباع سست، فشار آب منفذی به سرعت افزایش یافته و ممکن است این مقدار به حدی برسد که ذرات به صورت مجزا از یکدیگر معلق شوند و برای لحظاتی مقاومت و سختی خاک

* نویسنده مسئول: torkamani2788@gmail.com

DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.3.1019051

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

به طور کامل از بین برود. این پدیده در اصطلاح روانگرایی خاک نامیده می‌شود (Kramer and Elgamal, 2001). روانگرایی شدن خاک در هنگام وقوع زمین‌لرزه، باعث از بین رفتن استحکام خاک خواهد شد. این عمل می‌تواند منجر به نشست سازه‌ها، وقوع زمین‌لغزش‌ها، تسریع گسیختگی‌های مربوط به سدهای خاکی یا بروز انواع دیگری از خطرها شود (Seed et al., 2003). روانگرایی معمولا با افزایش آب منفذی، جوشش ماسه و حالت‌های مختلف تغییر شکل همراه است. اما این تغییر شکل‌ها، تنها در زمانی که به اندازه کافی بزرگ بوده و به سازه‌ها آسیب برسانند، برای مهندسان معنی‌دار هستند (Yuanet al., 2010). در مجموع، تنها نهشته‌های اشباع یا نهشته‌هایی که قابلیت اشباع شدن با آب زیرزمینی را دارا باشند، به عنوان خاک‌های مستعد روانگرایی در نظر گرفته می‌شوند (Yuanet al., 2010). بنابراین، اغلب در مناطق ساحلی به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی، پتانسیل روانگرایی مشاهده می‌شود. ارزیابی تغییر شکل‌های زمین ناشی از روانگرایی از طریق روش‌های عددی و روش‌های تحلیلی، مدل‌سازی آزمایشگاهی و آزمایشی و روش‌هایی براساس آزمایش‌های صحرایی انجام می‌شود (Zhang et al., 2002). در سال‌های اخیر، روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی متعددی جهت ارزیابی مقاومت روانگرایی خاک‌ها ارائه شده است که می توان به روش‌های ارزیابی صحرایی با استفاده از آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) ، آزمایش نفوذ مخروط (CPT) و اندازه‌گیری سرعت موج برشی اشاره نمود.

خطر روانگرایی در بسیاری از پژوهش‌های داخلی و خارجی قابل رهگیری می‌باشد. در ادامه مختصری به تحقیقات گذشته در هرمزگان پرداخته خواهد شد. با استفاده از داده‌های ۵ گمانه و ۲۵ آزمون SPT با فرض حداکثر شتاب افقی زلزله ۰/۳۳g در سطح زمین و اشباع بودن خاک با بررسی نقشه‌های تهیه شده در شرایط محافظه کارانه برای جزیره قشم به این نتیجه رسیدند که محدوده شهر قشم در ساحل شرقی (امتداد بلوار ولیعصر) دارای بیشترین پتانسیل روانگرایی است (نجابت و همکاران، ۱۳۹۱). بر همین اساس، ارزیابی پتانسیل روانگرایی نهشته‌های ماسه‌ای شهر بندرعباس در ساحل خلیج فارس را با استفاده از داده‌های مقاومت نفوذ استاندارد ۴۵ گمانه و بیش از ۱۴۰ آزمون SPT انجام داده‌اند و پهنه‌بندی مقدماتی استعداد روانگرایی نهشته‌های کواترنری را ترسیم کرده‌اند که براساس بررسی نقشه پهنه‌بندی تهیه شده در شرایط محافظه کارانه به این نتیجه رسیده‌اند که بیشترین پتانسیل روانگرایی در نوار ساحلی از بلوار فرودگاه تا اسکله شهید باهنر می‌باشد (ایزدی‌فر و همکاران، ۱۳۹۳).

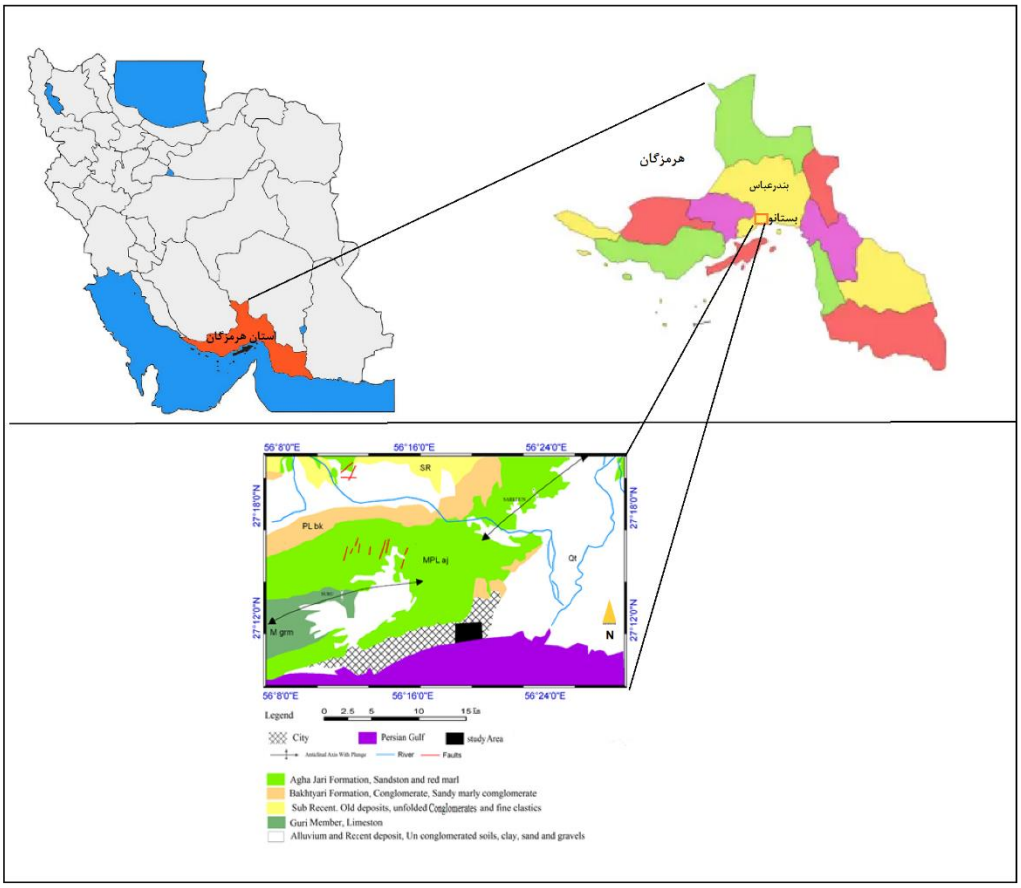
بر مبنای اطلاعات ژئوتکنیکی ۱۵۵گمانه و با استفاده از عمق سطح آب زیرزمینی موجود در لوگ گمانه‌های ژئوتکنیکی و نقشه سطح آب زیرزمینی محدوده شهر بندرعباس، نقشه پهنه‌بندی رونگرایی تهیه نمودند و به این نتیجه رسیدند که منطقه‌ی ساحلی دارای کمترین ضریب اطمینان برای روانگرایی می‌باشد و سطح آب زیرزمینی در قسمت ساحلی عمق آن کمتر از ۰/۵ متر می‌باشد (شمایل و همکاران، ۱۳۹۴).

در این پژوهش از روش مقاومت نفوذ استاندارد جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی بستر ساحل بستانو در باختر بندرعباس و از روش اصلاح شده Seed and Idriss(1971) برای ارزیابی روانگرایی خاک با استفاده از SPT استفاده گردیده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی ساحل بستانو

از لحاظ جغرافیایی، روستای بوستانو دارای موقعیت ساحلی می‌باشد. این روستا در عرض جغرافیایی ۲۷ درجه و ۵ دقیقه شمالی و ۵۶ درجه طول شرقی قرار دارد و از شمال به جاده بندرعباس – بندرخمیر، از جنوب به خلیج فارس، از غرب به کمپ مسکونی خلیج فارس و از شرق به اسکله و شهرک شهید رجایی محدود می‌باشد و فاصله آن تا بندرعباس ۲۷ کیلومتر می‌باشد (شکل۱).



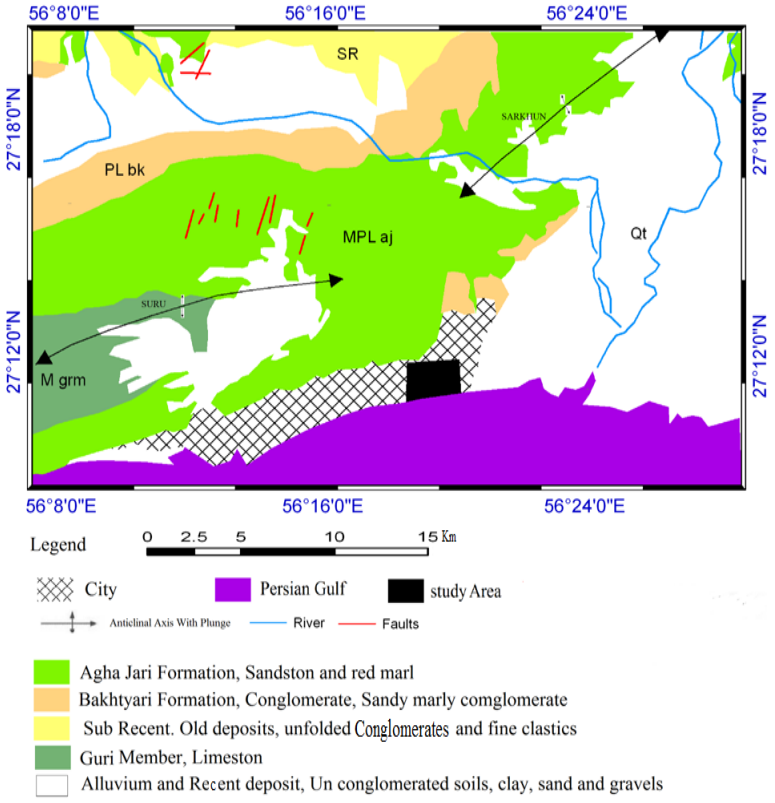
شکل۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (بستانو)

Fig. 1. Geographical location of the studied area (Bostano)

محدوده مورد مطالعه در زاگرس چین‌خورده و زیرپهنه‌ی پس‌خشکی بندرعباس واقع شده است. براساس نقشه زمین‌شناسی (شکل۲) سازندهای زمین‌شناسی که در نزدیکی محدوده مورد مطالعه رخنمون دارند، شامل سازند میشان، که دارای مارن خاکستری با هوازدگی کم در تناوب با نوارهایی از سنگ‌آهک صدف‌دار و سازند آغاجاری که دارای ماسه‌سنگ آهکی، ژیپس، مارن قرمز و سیلتستون با هوازدگی کم، است. مارن‌های میشان و آغاجاری در باختر بندرعباس، دارای فرسایس سطحی و خندقی می‌باشند که مقدار گل در فرسایس سطحی نسبت به فرسایش خندقی بسیار بیشتر است، در فرسایش سطحی، مارن میشان نسبت به مارن آغاجاری دارای رس و سیلت بیشتری است و مقاومت آن در برابر فرسایش و انتقال رسوب بیشتر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

می‌باشد. با افزایش فرسایش خندقی در این دو سازند، استعداد روانگرایی افزایش می یابد. از نظر میزان تولید حجم روانآب در شیب‌های متفاوت و در فرسایش‌های نوع سطحی و خندقی، این دو سازند اختلاف مشخصی دارند. مارن آغاجاری در فرسایش سطحی با شیب ۱۰ درجه دارای بیشترین میزان حجم روانآب و سازند میشان با فرسایش خندقی دارای کمترین حجم روانآب است. مارن آغاجاری در فرسایش سطحی با شیب ۲۰ درجه دارای بیشترین میزان تولید رسوب و سازند میشان در فرسایش سطحی با شیب ۱۰ درجه دارای کمترین میزان تولید رسوب است. مارن آغاجاری در فرسایش سطحی با شیب ۱۰ درجه دارای بیشترین میزان ضریب روانآب و مارن میشان با فرسایش خندقی دارای کمترین میزان ضریب روانآب است. (مکی و همکاران، ۱۳۹۵) نهشته‌های کواترنری که در طی کواترنر گسترده‌ترین رسوبات پوششی بوده و عمدتاً از تخریب و فرسایش ارتفاعات به وجود آمده‌اند، در بین نهشته‌های کواترنری، نهشته‌های آبرفتی بیشترین سهم را دارند، که به صورت مواد فرسایشی هستند، که از دامنه ارتفاعات تا نواحی پست دشت‌ها گسترده‌اند و با دور شدن از ارتفاعات، درشتی دانه‌ها کاهش می‌یابد و به همین دلیل، به نام‌های مختلف دشت، هامون، جلگه، کفه، تگو، دَغ و شخ نامیده شده‌اند (نبوی، ۱۳۵۵). نتایج حاصل از گمانه‌های حفاری شده بیانگر آن است که در محدوده مورد مطالعه رسوبات شنی، ماسه‌ای، سیلتی و رسی وجود دارد که بیشترین اهمیت در مطالعه حاضر دارند.



شکل۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه بستانو، برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ بندرعباس (فخاری، ۱۳۷۴)

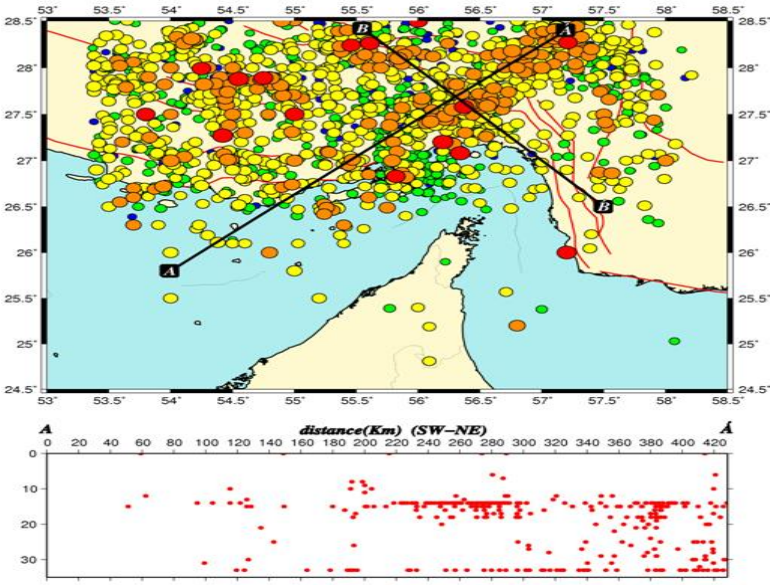
Fig. 2. Geological map of Bastano region, taken from Bandar Abbas map 1/250000 (Fakhari, 1995)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

لرزه‌خیزی منطقه مورد مطالعه

استان هرمزگان و مناطق همجوار آن با داشتن گسل‌های جنبا و بنیادی یکی از لرزه‌خیزترین مناطق کشور است (خسروی و همکاران، ۱۴۰۱) در صد و بیست سال اخیر، ۳۶۰ رویداد لرزه‌ای با بزرگای بیش از ۵ ریشتر در منطقه هرمزگان رخ داده است (بانک زمین لرزه‌های ایران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ،www.epp.iiees.ac.ir). محدوده مورد مطالعه در منتهی‌الیه زاگرس چین‌خورده واقع شده است و دارای خصوصیات لرزه‌خیزی پهنه انتقالی زاگرس-مکران است. بررسی توزیع مکانی رویدادهای لرزه‌ای یکصد سال اخیر منطقه به شعاع ۲۰۰ کیلومتر، حاکی از لرزه‌خیزی بالای این محدوده است. بررسی پروفیل AÁ، در شکل(۳) که در راستای جنوب باختر- شمال خاور قرار دارد و رویدادهای داخل خلیج‌فارس تا محل تلاقی مکران- زاگرس را در بر می‌گیرد، نشان می‌دهد که عمق اکثر رویدادها در امتداد این پروفیل در محدوده ۱۵-۱۰کیلومتری قرار می‌گیرد. اما تعدادی از این رویدادها در عمق بیش از ۳۰ کیلومتر واقع شده‌اند که غالباً مربوط به رویدادهای قبل از ۱۹۹۰ میلادی می‌باشند و در ناحیه مکران قرار دارند (حق شناس و همکاران،۱۳۸۸).



شکل۳. توزیع مکانی و بررسی عمق زمین لرزه ها (حق شناس و همکاران، ۱۳۸۸)

Fig. 3. Spatial distribution and investigation of the depth of earthquakes (Haqshanas et al., 2009)

بررسی زمین لرزه‌های تاریخی در این محدوده نشان دهنده فعالیت لرزه‌ای قابل توجه این منطقه در دوره‌های گذشته است. به منظور بررسی وضعیت لرزه‌خیزی تاریخی از کتاب تاریخ زمین لرزه‌های ایران آمبرسز و ملویل (Ambraseys and Melville, 1982) و گزارش مطالعات پهنه‌بندی خطر زلزله و مخاطرات ژئوتکنیک لرزه‌ای جزیره قشم که توسط حق شناس و همکاران (۱۳۸۸) انجام شده، استفاده گردیده است (جدول۱).

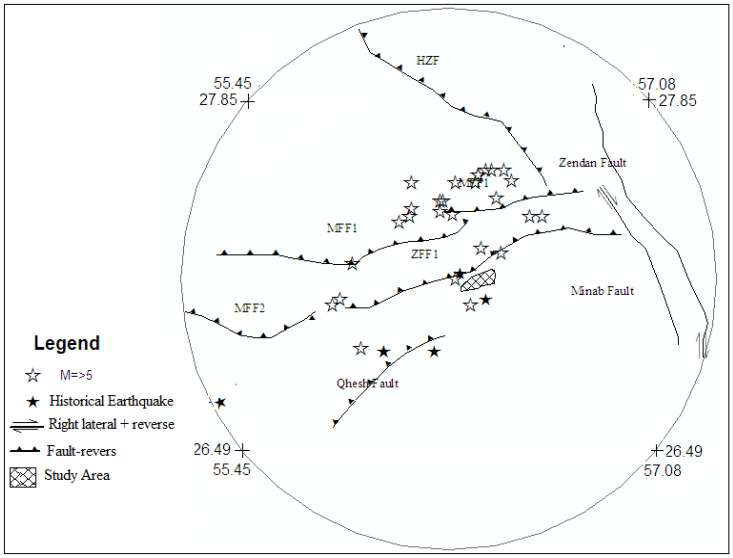
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

جدول۱. فهرست زمین لرزه‌های تاریخی گستره استان هرمزگان (Ambraseys and Melville, 1982)

Table 1. List of historical earthquakes in Hormozgan province (Ambraseys and Melville, 1982)

ردیف	تاریخ	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	بزرگا	منطقه	منبع
1	1336ه ش	-	-		جزیره قشم	نوربخش۱۳۶۹
2	1361م	56.2	26.9	5.3	جزیره قشم	AMB
3	1497م	56.3	27.2	-	هرمز	AMB
4	1922/10/04م	56.4	27.1	-	بندرعباس	AMB
5	1703م	54.9	26.6	6.8	قشم- هنگام	AMB
6	1829م	55.3	26.7	-	جزیره قشم	AMB
7	1849م	57.6	27.7	-	کهنوج	AMB
8	1888/05/19م	56	26.9	-	جزیره قشم	AMB
9	1897/01/10م	56	26.6	6.4	جزیره قشم	AMB

علاوه بر زمین لرزه‌های تاریخی، بررسی زلزله‌های دستگاهی استخراج شده از بانک اطلاعات لرزه‌ای پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) نشان می‌دهد که ۲۷ مورد زلزله با بزرگای بیشتر از ۵ ریشتر از محدوده مورد مطالعه به شعاع ۵۰ کیلومتر اتفاق افتاده است که عمق اکثر این زلزله‌ها کمتر از ۲۰ کیلومتر بوده و همچنین برخی از این زمین لرزه‌ها مانند زلزله سال۱۹۰۷ میلادی با بزرگای Ms=5/7 در شهر بندرعباس و زلزله سال ۱۹۰۲ میلادی با بزرگای Ms=6/4 در ۱۲ کیلومتری جنوب شهر بندرعباس اتفاق افتاده‌اند. در شکل (۴) نحوه توزیع زلزله‌های تاریخی و زلزله‌های بزرگتر از ۵ ریشتر در محدوده مورد مطالعه ارائه شده است.



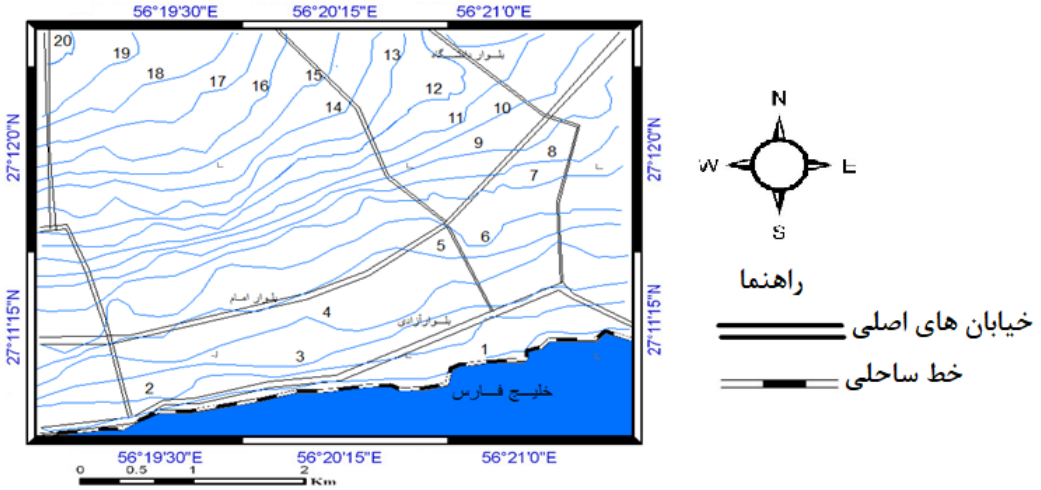
شکل۴. زلزله‌های تاریخی و دستگاهی محدوده مورد مطالعه به شعاع ۵۰ کیلومتر (میرمحمدحسینی و همکاران،۱۳۷۷)

Fig. 4. Historical and systematic earthquakes in the studied area with a radius of 50 km (Mirhosseini et al., 1998)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

سطح آب زیرزمینی

با توجه با این‌که پدیده روانگرایی در توده‌های اشباع به وقوع می‌پیوندد باید وضعیت آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعاتی به دقت مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد. سه عامل، آب‌های سطحی، فاضلاب شهری و آب‌های ساحلی، تغییرات سطح آب زیرزمینی شهر بندرعباس را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در حال حاضر در مناطق مختلف شهر بندرعباس آب‌های سطحی از طریق جوی‌ها و نهرها جمع‌آوری شده و به همراه کانال‌های فاضلاب احداث شده به دریا منتقل می‌شوند. دفع فاضلاب‌های خانگی توسط چاه‌های جذبی نیز باعث بالاترآمدن سطح آب زیرزمینی و اشباع شدن خاک‌ها در این محدوده می‌شود. این سیستم جمع‌آوری فاضلاب کامل نبوده و در شرایط بارندگی شدید و یا عدم توجه به دفع زباله‌ها، باعث جاری شدن سیلاب و آبگرفتگی در برخی از قسمت‌های شهر می‌شود. این شبکه‌های موجود در کنترل و ثابت نگه داشتن سطح آب زیرزمینی نقش بسزایی دارند. عامل دوم آب‌های ساحلی هستند که نوسانات سطح آب زیرزمینی را تحت تاثیر قرار خواهند داد. با توجه به این نوسانات نسبتاً زیاد آب دریا به صورت روزانه و فصلی، ممکن است سطح آب زیرزمینی نیز تا چندین متر جابه‌جا شود. نقشه سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد (شکل ۵) که رقم منحنی‌های هم سطح آب زیرزمینی از ۱ تا ۲۰ متر در محدوده مورد مطالعه متغیر می‌باشد که از جنوب به شمال با فاصله گرفتن از ساحل، سطح آب زیر زمینی پایین‌تر می‌رود و شرایط برای وقوع روانگرایی در این محدوده کاهش می‌یابد اما قسمت جنوبی مجاور ساحل، سطح آب زیرزمینی به عمق ۰/۵ تا ۱ متر و با فاصله گرفتن از ساحل، در باختر و شمال باختر بستانو به ۲۰-۱۵ متر نیز می‌رسد. و این منطقه را مستعد روانگرایی کرده است. نقشه سطح آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات سطح آب زیرزمینی گمانه‌های حفر شده و همچنین مشاهده صورت گرفته در محدوده مورد مطالعه که شامل چاه‌های حفر شده و پی ساختمان‌های در حال احداث می‌باشد، ترسیم شده است (سازمان آب منطقه‌ای هرمزگان، ۱۴۰۱).



شکل۵. نقشه سطح آب زیرزمینی، خیابان‌های اصلی و خط ساحلی در بستانو
Fig. 5. Map of underground water level, main streets and coastline in Bastano

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

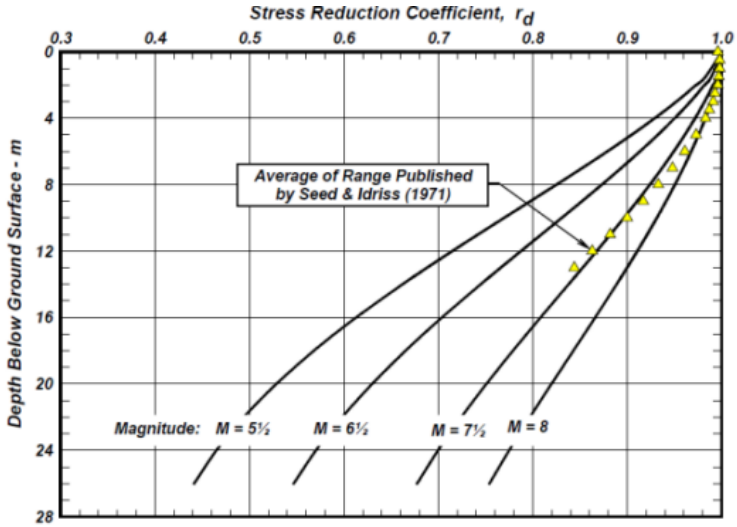
ارزیابی پتانسیل روانگرایی بر اساس نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد

در ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای بـا اسـتفاده از نتـایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد از روش ساده شده که ادریس و بولانجر در سال ۲۰۱۰ (Idriss and Boulanger, 2010) ارائه کرده‌اند استفاده شده است. به طوری که، ابتدا مقدار نسبت تنش تناوبی (CSR-Cyclic Stress Ratio) که بیان کننده میزان شدت بارگذاری لرزه‌ای در بزرگای ۷/۵ است با استفاده از رابطه (۱) برآورد شد.

$$\mathrm{CSR}_{7.5} = 0.65\frac{a_{max}}{g}.\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}.\gamma_d.\frac{1}{\mathrm{MSF}} \qquad (۱)$$

در این رابطه، a_{max} حداکثر شتاب سطحی، g شتاب ثقل، σ_v تنش کل در عمق بررسی شده، σ'_v تنش موثر در عمق بررسی شده، r_d ضریب کاهش تنش با استفاده از شکل (۶) برآورده شده و MSF (Magnitude Scale Factor) فاکتور مقیاس بزرگای زلزله است که براساس تحقیقات آندروس و استوکی در سال (Andrus and Stokoe, 1997) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود و در رابطه (۳) M_w بزرگای زلزله است.

$$\mathrm{MSF} = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{-3.3} \qquad (۲)$$



شکل۶. نحوه تعیین ضریب کاهش تنش (Idriss, 1999)

Fig. 6. How to determine the stress reduction factor (Idriss, 1999)

به منظور تعیین مقدار پارامتر نسبت مقاومت تناوبی خاک CRR (Cyclic Resistance Ratio) که بیان کننده مقاومت خاک در برابر وقوع روانگرایی است طبق روش ساده شده سید و ادریس در سال ۱۹۷۱ (Seed and Idriss, 1971) و ادریس و بولانجر در سال ۲۰۱۰ (Idriss and Boulanger, 2010)، از نتایج آزمون استاندارد براساس رابطه (۳) با کاربرد پارامترهای ارائه شده اسکمپتون در سال ۱۹۸۶ (Skempton, 1986) در جدول (۲) اصلاح می‌شود:

$$(N_1)_{60} = \mathrm{NSPT} \times C_N \times C_E \times C_S \times C_R \times C_B \qquad (۳)$$

در این رابطه N_{SPT} عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد، C_N ضریب اصلاح برای فشار سربار، C_E ضریب اصلاح انرژی چکش، C_S ضریب اصلاح قاشق نمونه‌گیر، C_B ضریب اصلاح قطر گمانه و C_R ضریب اصلاح طول میله و $(N_1)60$ عدد اصلاح شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

مقاومت نفوذ استاندارد است. سپس، براساس پیشنهاد ارائه شده ادریس و بولانجر (۲۰۱۰) (Idriss and Boulanger, 2010)، ضریب اصلاح شده فشار سربار (C_N) با کاربرد رابطه (۴) تعیین شود.

$$CN=\left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^{m} \leq 1.7 \text{ و } P_a = 100\text{kpa}$$
$$m = 0.768 - 0.00768\sqrt{(N_1)_{60}} \qquad (۴)$$

که در این رابطه، $P_a = 100kP_a$، فشار اتمسفر است و σ'_v تنش موثر در عمق بررسی شده و $(N_1)_{60}$ عدد اصلاح شده آزمون مقاومت نفوذ استاندارد است. پس از اصلاح عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد، مقدار معادل آن برای ماسه تمیز $(N_1)_{60CS}$ تعیین شده و با استفاده از مقدار نسبت مقاومت تناوبی با کاربرد رابطه‌های زیر برآورد می‌شود: در رابطه (۵)، FC درصد خاک ریزدانه در عمق بررسی شده در لایه خاکی است.

$$(N_1)_{60CS} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$
$$\Delta(N_1)_{60} = 1.63 + \exp\left(1 + \frac{9.7}{FC + 0.1}\right) - \left(\frac{15.7}{FC + 0.1}\right)^2 \qquad (۵)$$
$$CRR = \exp\left(\left(\frac{(N_1)60cs}{14.1}\right) + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right)$$

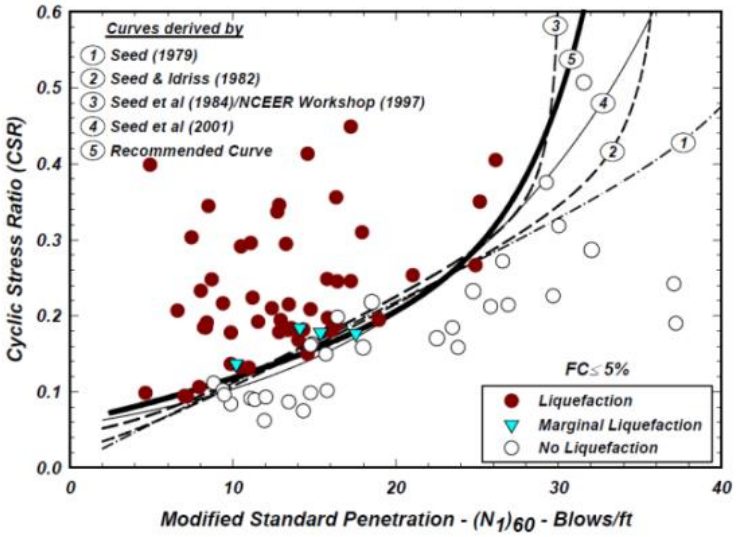
جدول۲. ضرایب اصلاحی عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد (Skempton, 1986)

Table 2. Correction coefficients of standard penetration resistance test number (Skempton, 1986)

ضریب‌ها	مشخصات تجهیزات	عبارت	ضریب تصحیح
نسبت انرژی	چکش دونات	C_E	0.5-1
	چکش Safety		1.2-1.7
	چکش دونات از نوع اتوماتیک		0.8-1.3
قطر گمانه	65-115	C_B	1
	115-150		1.05
	150-200		1.15
طول میله	3-4m	C_B	0.75
	4-6m		0.85
	6-10m		0.95
	10-30m		21
	$> 30m$		< 1
روش نمونه‌گیری	نمونه‌گیری استاندارد	C_s	1
	نمونه‌گیری بدون پوشش		1.1-1.3

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]



شکل۷. نمودار تعیین نسبت مقاومت تناوبی براساس نتایج آزمون نفوذ استاندارد اصلاح شده (Idriss and Boulanger, 2010)

Fig. 7. Chart for determination of periodic resistance ratio based on modified standard penetration test results (Idriss and Boulanger, 2010)

مواد و روش‌ها

به منظور تعیین و شناسایی خاک‌های مستعد روانگرایی، از اطلاعات ژئوتکنیکی ۴۰ گمانه حفاری شده در حوالی بستانو، جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفت. این گمانه‌ها بیشتر در گستره مناطق خاوری و باختری بستانو بوده و عمدتا به روش ماشینی حفر شده بودند. در بررسی‌های اولیه، از مجموع ۴۰ گمانه موجود، تعداد ۱۶ گمانه با توجه به جنس خاک (شنی و رسی) و ۷ گمانه به دلیل سطح پایین آب زیرزمینی، غیر مستعد برای روانگرایی تشخیص داده شدند و تعداد ۷ گمانه به جهت قابل اطمینان نبودن نتایج حذف گردیدند و در نهایت۱۰ گمانه با توجه به سطح آب زیرزمینی و نوع خاک (ماسه ای و لای‌دار) مورد ارزیابی قرار گرفتند و پروفیل‌های شاخص خاک با در نظر گرفتن وضعیت آب زیرزمینی با پیاده کردن موقعیت گمانه‌ها بر روی نقشه محدوده مطالعاتی و شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه به شبکه‌های منظم رستری با شبکه مربعی به ضلع ۵۰۰ متر تهیه گردید و سپس شبکه‌های فاقد اطلاعات با استفاده از اطلاعات شبکه‌های مجاور و همچنین نقشه بافت خاک زیرسطحی مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت با استفاده از آنالیزهای انجام شده برای هر شبکه شاخص پتانسیل روانگرایی تعیین گردید. شتاب PGA در سنگ بستر با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه در پهنه‌ای با خطر نسبی بالا قرار گرفته است. در این تحقیق از شتاب ۰/۳۵g، که آئین‌نامه ۲۸۰۰ طرح ساختمان‌ها برای شهر بندرعباس تعیین کرده، به عنوان شتاب سنگ بستر مورد استفاده قرار گرفته است. برای تخمین شتاب در سطح زمین با توجه به در دسترس نبودن پروفیل‌های سرعت موج برشی در محدوده مورد مطالعه، در این تحقیق از همبستگی بین عدد آزمایش نفوذ استاندارد (N-SPT) و سرعت موج برشی بر اساس رابطه یوما و همکاران برای بدست آوردن پروفیل سرعت موج برشی در هریک از گمانه‌ها استفاده گردیده است (رابطه۶). این رابطه توسط یوما و همکاران(۲۰۰۸) برای شهر ساحلی چنای (Chennai) در کشور هند ارائه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

این شهر به لحاظ زمین‌شناسی عمدتاً از نهشته‌های ماسه، ماسه‌سنگ و همچنین رس و شیل تشکیل شده و به دلیل مشابهت شرایط زمین‌شناسی با منطقه مورد مطالعه، بر رابطه‌های ارائه شده دیگر ترجیح داده شده است (Uma et al, 2008).

$$V_S = 95.64(N)^{0.301} \qquad r^2 = 0.83 \qquad (۶)$$

به منظور ارزیابی پتانسیل روانگرایی بر مبنای آزمایش نفوذ استاندارد از روش سید و ادریس (Seed and Idriss) استفاده گردید و کلیه محاسبات برای زلزله با برزگای ۷ ریشتر و دوره بازگشت ۴۷۵ سال انجام شد و در مرحله بعدی تاثیر مقدار ریزدانه‌ها را بر نسبت مقاومت دوره‌ای با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد. در این رابطه :

C_{FINES} ضریب اصلاح ریزدانه، FC مقدار ریزدانه، $N_{1,60}$ عدد استاندارد اصلاح شده است. در تمام محاسبات انجام شده از مقدار میانگین ضریب کاهش تنش استفاده شده است.

$$\begin{aligned} &N_{1.60,CS} = N_{1,60} C_{FINES} \\ &C_{FINES} = (1 + 0.004FC) + 0.05\left(\frac{FC}{N_{1.60}}\right) \\ &\lim: FC \geq 5\% \text{ and } FC \leq 35\% \end{aligned} \qquad (۷)$$

برای انجام آنالیز روانگرایی از نرم‌افزار LiqIT v.4.70 که به صورت آزمایشی در دسترس می‌باشد، استفاده گردیده است. این نرم‌افزار توسط پیتر روبرتسن (Robertson, 2007) بر مبنای آخرین دست آوردهایی که در زمینه ارزیابی پتانسیل روانگرایی ارائه شده، طراحی شده است. اطلاعات ورودی این نرم‌افزار می‌تواند شامل آزمایش‌های صحرایی SPT، CPT و Vs باشد. محیط نرم‌افزار مذکور دارای ۴ کاربرگ است. الف) کاربرگ تعریف داده‌های ورودیInput data definition است، در این کاربرگ باید خصوصیات گمانه که شامل عمق، تعداد ضربات نفوذ استاندارد، مقدار ریزدانه، وزن مخصوص است، به نرم‌افزار معرفی گردد. ب) کاربرگ پارامترهای کلی General parameters که این کار برگ شامل: بیشینه شتاب سطح زمین، تراز آب زیرزمینی و بزرگای زلزله مورد نظر است. ج) کاربرگ پارامترهای محاسبات نفوذ استاندارد SPT calculation parameters است که در این کاربرگ روش‌های مختلف ارزیابی پتانسیل روانگرایی، روش‌های اصلاح مقدار ریزدانه و فاکتور-های اصلاح تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد ارائه شده است. د) کاربرگ نتایج محاسبات Calculation results است.

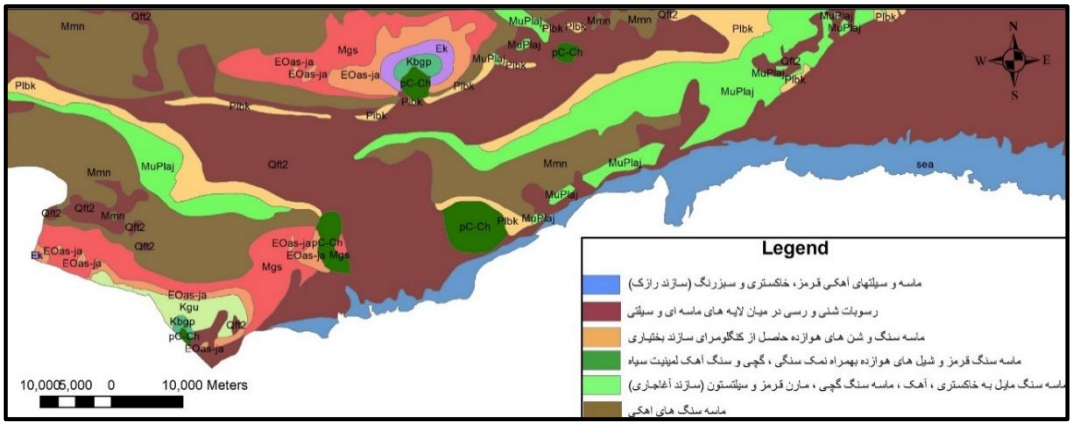
با توجه به تاریخچه‌ی شتاب ثبت شده در اثر زلزله، مقدار نسبت تنش تناوبی به وسیله‌ی روش سید و همکاران تخمین زده شد و سپس این مقدار تنش در برابر مقدار عدد نفوذ استاندارد رسم گردید. پس از استعدادیابی منطقه و بررسی روش‌های ارزیابی پتانسیل روانگرایی، اطلاعات ژئوتکنیکی جمع‌آوری گردید و به منظور بررسی شرایط خاک سطحی در محدوده مورد مطالعه، ابتدا نقشه اولیه‌ای از بافت خاک سطحی با استفاده از عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ و همچنین مقاطع عرضی توسط نرم افزار Rockwork ترسیم شد و در ادامه با توجه به اهمیت جنبش نیرومند زمین در ایجاد روانگرایی، شتاب سنگ بستر لرزه‌ای (PGA) و بیشینه شتاب افقی در سطح زمین (a_{max}) و همچنین روش مورد استفاده در آنالیز روانگرایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیزهای انجام شده در قالب جداولی ارائه شد و در نهایت نقشه خطر روانگرایی بر مبنای شاخص پتانسیل روانگرایی و همچنین بر مبنای کمترین ضریب اطمینان در هر گمانه ترسیم شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

نتایج و بحث

طبقه‌بندی رسوبات سطحی و زیرسطحی ساحلی در منطقه بستانو

براساس نقشه بافت خاک‌های سطحی ارائه شده در شکل (۸)، منطقه بوستانو بر روی رسوبات عهد حاضر واقع شده است. این رسوبات شامل نهشته‌های ساحلی، رسوبات بادی، تبخیری و رودخانه‌ای می‌باشند که عمدتا از سنگ‌های متشکله از ارتفاعات شمالی منطقه حاصل شده‌اند. قسمت عمده بافت خاک سطحی از نهشته‌های ماسه‌ای، ماسه‌ای شنی، سیلتی و سیلتی شنی همراه با لنزهای رسی تشکیل شده است. توالی ماسه‌ای، سیلتی به سمت ساحل گسترش بیشتری دارد و هرچه از ساحل فاصله می‌شود رسوبات شنی و رسی در میان لایه‌های ماسه‌ای و سیلتی قرار می‌گیرند. برای ارزیابی دقیق‌تر شرایط زیرسطحی و خصوصیات خاک، از مطالعات ژئوتکنیکی ۱۰ گمانه انجام شده توسط شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک اداره راه و شهرسازی استان هرمزگان در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است و طبقه بندی خاک‌ها براساس روش یونیفاید انجام شده است که در جدول‌های ۳ تا ۱۲ و شکل‌های (۹) و (۱۰) مشخصات خاک‌های موجود در گمانه‌های قسمت باختر منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۸. وضعیت خاک‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه (بوستانو)
Fig. 8. The condition of surface soils in the study area (Bostano)

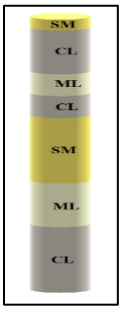
رسوبات قسمت باختر منطقه بوستانو از سمت ساحل با ماسه‌های لای‌دار همراه با شن به رنگ قرمز، رس با خاصیت خمیری کم شن‌دار در رنگ‌های قرمز و خاکستری و نهایتا لای همراه با ماسه به رنگ خاکستری شروع می‌شوند و در افق‌های دورتر از ساحل در مناطقی با وجود لنزهای رسی با خاصیت خمیری کم در رنگ‌های قرمز، قهوه‌ای روشن و خاکستری به نواحی مرتفع‌تر و تکرار توالی‌های عنوان شده ختم می‌شوند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

جدول ۳. گمانه شماره ۱ (گمانه اول پرشیا) (۳۹۹۸۵۸/۷۱ و ۲۹۹۵۳۳۸/۷)

Table 3. Borehole No. 1 (First Borehole of Persia) (399858/71 and 2995338/7)

from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	1	SM	Silty Sand
1	5	CL	Clay with low Plasticity
5	7	ML	Silt with low Plasticity
7	9	CL	Clay with low Plasticity
9	15	SM	Silty Sand
15	19	ML	Silt with low Plasticity
19	25	CL	Clay with low Plasticity



جدول ۴. گمانه شماره ۲ (گمانه ششم پرشیا) (۳۹۹۶۴۳/۱۶ و ۲۹۹۵۳۶۰/۰۱)

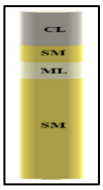
Table 4. Borehole No. 2 (۶th borehole of Persia) (399643/16 and 2995360/01)

from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	1	SM	Silty Sand
1	4	CL	Clay with Low Placticity
4	10	ML	Silt with low Plasticity
10	12	SM	Silty Sand
12	16	ML	Silt with low Plasticity
16	22	SM	Silty Sand
22	26	ML	Silt with low Plasticity

جدول ۵. گمانه شماره ۳ (گمانه سوم نیاک) (۴۰۰۲۵۹/۳۶ و ۲۹۹۶۰۳۴/۱۱)

Table 5. Borehole No. 3 (the third borehole of Niak) (400259/36 and 2996034/11)

from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	4	CL	Clay with low Plasticity
4	6	SM	Silty Sand
6	8	ML	Silt with low Plasticity
8	20	SM	Silty Sand



جدول ۶. گمانه شماره ۴ (گمانه هشتم نیاک) (۴۰۰۲۳۴/۴۸ و ۲۹۹۶۰۸۶/۷)

Table 6. Borehole No. 4 (eighth borehole of Niak) (400234/48 and 2996086/7)

from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	7	CL	Clay with low Plasticity
7	15	ML	Silt with low Plasticity

در منطقه مرکزی و خاور منطقه بوستانو توالی از رسوبات ماسه‌های شنی و سیلتی، شن‌های ماسه‌ای و سیلتی و لای‌های ماسه‌ای از مناطق ساحلی شروع می‌شود و در ادامه به سمت شمال منطقه علاوه بر رسوبات مذکور، نهشته‌ها و لنزهای رسی نیز در منطقه دیده می‌شوند. میزان رسوبات درشت‌دانه خصوصا خاک‌های شنی در این محدوده به مراتب بیشتر از قسمت باختر منطقه می‌باشد.

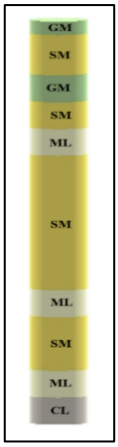
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

جدول ۷. گمانه شماره ۵ (گمانه اول رجا) (۴۰۲۴۰۲/۹۳ و ۲۹۹۶۴۸۸/۱۵)

Table 7. Borehole number ۵ (Raja first borehole) (402402/93 and 2996488/15)

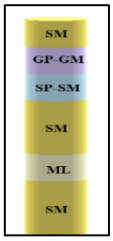
from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	1	GM	Gravel with Silt
1	4	SM	Silty Sand
4	6	GM	Gravel with Silt
6	8	SM	Silty Sand
8	10	ML	Silt with low Plasticity
10	20	SM	Silly Sand
20	22	ML	Silt with low Plasticity
22	26	SM	Silty Sand
26	28	ML	Silt with low Plasticity
28	30	CL	Clay with low Plasticity



جدول ۸. گمانه شماره ۶ (گمانه سوم سوله) (۴۰۲۴۰۷/۵۱ و ۲۹۹۶۶۹۸/۴۰)

Table 8. Borehole number 6 (the third borehole of Sule) (402407/51 and 2996698/40)

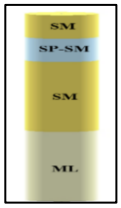
from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	2	SM	Silty Sand
2	4	GP-GM	Poor graded Gravel with Silt and Gravel
4	6	SP-SM	Poor graded Sand with Silt and Sand
6	10	SM	Silty Sand
10	12	ML	Silt with low Plasticity
12	16	SM	Silty Sand



جدول ۹.گمانه شماره ۷ (گمانه دوم تویا) (۴۰۲۷۵۰/۶۳ و ۲۹۹۷۵۸۰/۲۷)

Table 9. Sample number 7 (second sample of Toya) (2997580/27 and 402750/63)

from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	2	SM	Silty Sand
2	4	SP-SM	Poor Sand with Silt and Sand
4	10	SM	Silty Sand
10	16	ML	Silt with low Plasticity



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

جدول ۱۰. گمانه شماره ۸ (گمانه اول تویا) (۴۰۲۷۸۴/۲۱ و ۲۹۹۷۶۰۳/۸۱)

Table 10. Borehole number 8 (the first borehole of Toya) (402784/21 and 2997603/81)

from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	3	SM	Silty Sand
3	5	GP-GM	Poor graded Gravel with Silt and Sand
5	6	GM	Silty Gravel
6	8	GP-GM	Poor graded Gravel with Silt and Gravel
8	10	SM	Silty Sand
10	12	ML	Silt with low Plasticity
12	20	SM	Silly Sand
20	22	ML	Silt with low Plasticity
22	28	CL	Clay with low Plasticity

جدول ۱۱. گمانه شماره ۹ (گمانه سوم فروآلیاژ) (۳۹۹۹۴۹ و ۲۹۹۷۷۰۷)

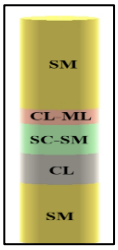
Table 11. Borehole No. 9 (third ferroalloy borehole) (399949 and 2997707)

from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	1	SM	Silty Sand
1	3	SW-SM	Well graded Sand with Silt and Sand
3	7	SM	Silty Sand
7	9	SW-SM	Well graded Sand with Silt and Sand
9	13	SM	Silty Sand
13	15	SP-SM	Poor graded Sand with Silt and Sand

جدول ۱۲. گمانه شماره ۱۰ (گمانه دوم فروآلیاژ) (۳۹۹۹۸۶ و ۲۹۹۷۷۲۰)

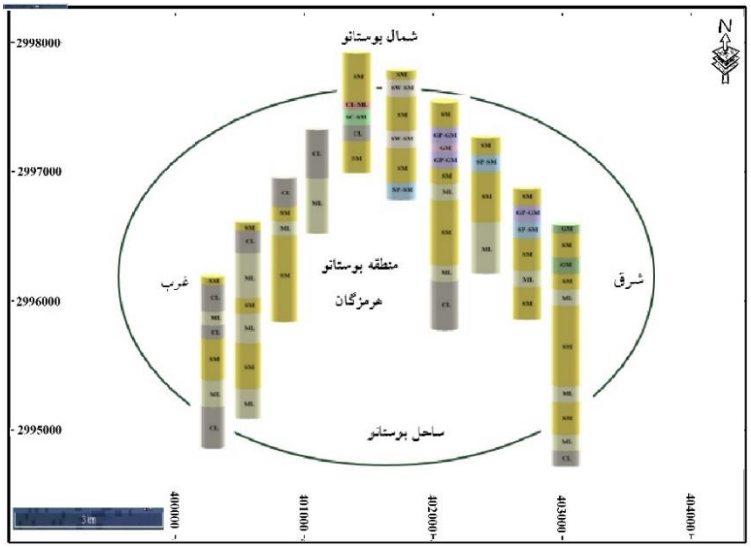
Table 12. Borehole No. 10 (second ferroalloy borehole) (399986 and 2997720)

from depth (m)	to the depth (m)	soil group	the name of the group
0	6	SM	Silty Sand
6	7	CL-ML	Clay with silt and Sand
7	9	SC-SM	Sand with Silt and Clay
9	11	CL	Clay with low Placticity
11	15	SM	Silty Sand

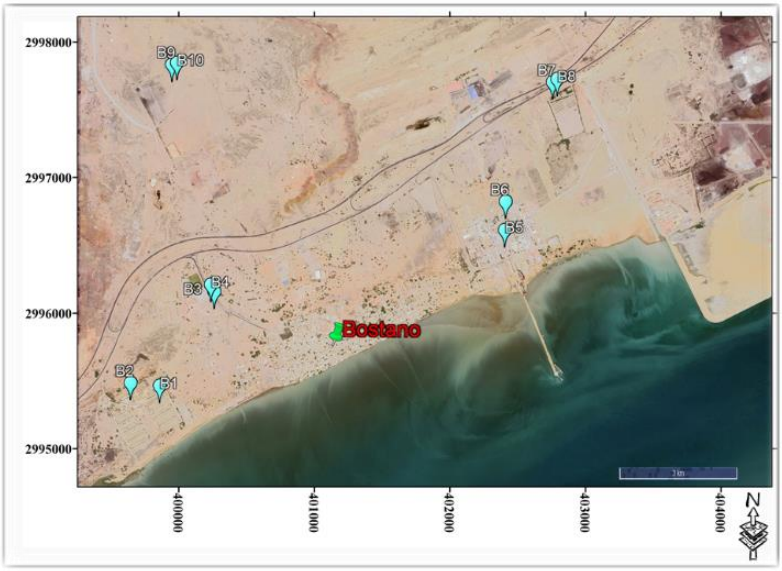


[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]



شکل ۹. یک نمای کلی از محدوده مورد مطالعه
Fig. 9. An overview of the study area



شکل ۱۰. جانمایی گمانه‌ها در محدوده بوستانو
Fig.10. Placement of boreholes in the area of Bostano

شکل‌های(۹) و (۱۰) یک نمای کلی از محدوده مورد مطالعه و شرایط زیرسطحی تقریبا همگنی از رسوبات ماسه‌ای و سیلتی را نشان می‌دهند. با توجه به وضعیت بافت سطحی خاک و گمانه‌های اکتشافی موجود در منطقه می‌توان نتیجه گرفت که بافت خاک محدوده مورد مطالعه عمدتا از نهشته‌های ماسه‌ای تشکیل شده است. از محدوده ساحلی تا محدوده مرکزی مورد مطالعه نهشته‌های ماسه‌ای بیشتر از نوع ماسه سیلتی (SM) می‌باشند. نهشته‌های ماسه‌ای (SP) و شن‌های ماسه‌ای در افق‌های بالاتر از ماسه‌های ساحلی دیده می‌شوند. در میان نهشته‌های ماسه‌ای حاصل از فرآیندهای آبی و بادی لنزهای رسی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

و سیلتی کاملا به چشم می‌خورند. با فاصله گرفتن از پهنه‌ی ساحلی و محدوده مرکزی مورد مطالعه به سمت شمال نهشته‌های ماسه‌ای قرمز رنگ سخت شده در میان لایه‌هایی با شن‌های بددانه‌بندی شده به چشم می‌خورند. وجود گمانه‌هایی با SPT بالا در افق‌های دور از ساحل موید وجود لایه‌های سخت‌تر به همراه میان لایه‌های شنی در این محدوده‌ها می‌باشد. قسمت‌های باختر و جنوب باختری منطقه بوستانو، از رسوبات با جنس ماسه‌ای لای‌دار با خاصیت خمیری کم (SM) تشکیل شده و به تدریج به رسوبات رس و لای‌دار (CL-ML) و بعضاً حاوی رسوبات با جنس رس با خاصیت خمیری پایین (CL) تغییر پیدا می‌کنند. عمده رسوبات ماسه‌ای لای‌دار (SM) و ماسه‌های بد دانه‌بندی شده لای‌دار (SP-SM) می‌باشند. بدین ترتیب قسمت‌های خاوری، عمدتاً از رسوبات لای غیرآلی با خاصیت خمیری کم (ML) و ماسه لای‌دار تشکیل شده که در قسمت‌های میانی به رسوبات ماسه‌ای تبدیل می‌شوند. در قسمت مرکزی منطقه، ماسه سنگ بددانه‌بندی شده و ماسه‌های رسی وجود دارد و این رسوبات در قسمت‌های خاوری به رسوبات درشت‌دانه شنی بددانه‌بندی شده و شن‌های لای‌دار تغییر می‌کنند. رسوبات رسی با خاصیت خمیری کم (CL) در بخش‌های محدودی از منطقه وجود دارد.

ارزیابی استعداد روانگرایی براساس نوع خاک و Susceptibility Index

یکی از عوامل مهم در میزان قابلیت روانگرا شدن خاک‌ها، ویژگی فیزیکی و مکانیکی آنها می‌باشد. خاک‌های ماسه‌ای و سیلت‌ها به دلیل نداشتن چسبندگی قابل ملاحظه و زهکشی ضعیف به هنگام زلزله، مستعد روانگرایی هستند ولی خاک‌های رسی غالبا به دلیل چسبندگی ذاتی و خاک‌های شنی به علت مستهلک شدن سریع فشار آب منفذی به هنگام زلزله، عمدتا از قابلیت روانگرایی برخوردار نیستند (عسکری و کسایی، ۱۳۸۲). شاخص حساسیت روانگرایی (Susceptibility Index Liquefaction) بر اساس نوع خاک و نسبت درصد رطوبت به حد روانی (Wc/LL) ارائه شده است، هرچه این شاخص به ۱ نزدیک باشد خاک ریزدانه رفتار ماسه‌ای و هر چه به صفر نزدیک باشد خاک دارای رفتار رسی می‌باشد. چنانچه متوسط این دو شاخص کوچکتر از ۰/۵ باشد، لایه مقاوم در برابر روانگرایی است و اگر این شاخص بیشتر از ۰/۵ باشد، لایه دارای استعداد روانگونگی است (Idriss and Boulanger, 2005). در جدول‌های ۱۳ تا ۲۲ روانگرایی در طول هر گمانه براساس نوع خاک و Liquefaction Susceptibility Index در محدوده مورد مطالعه مشخص شده است.

جدول ۱۳. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۱ (گمانه اول پرشیا)

Table 13. Liquefaction potential during borehole number 1 (first borehole of Pershia)

Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Susceptibility Index	Potential
1	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
2	CL	100	13	0.45	0.02	0.92	0.47	Not liquefaction
3	CL	100	12	0.62	0.03	0.97	0.50	Not liquefaction
4	CL	100	9	0.75	0.11	1	0.56	Susceptible to liquefaction
7	ML	80	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
9	CL	100	10	0.86	0.07	1	0.53	Susceptible to liquefaction
15	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

19	ML	80	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
21	CL	100	9	0.82	0.11	1	0.56	Susceptible to liquefaction
23	CL	100	12	0.77	0.03	0.96	0.49	Not liquefaction
25	CL	100	8	1.01	0.18	1	0.59	Susceptible to liquefaction

جدول ۱۴. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۲ (گمانه ششم پرشیا)

Table 14. Liquefaction potential during borehole number 2 (6th borehole of Pershia)

Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Susceptibility Index	Potential
1	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
2	CL	100	10	0.58	0.07	1.02	0.54	Susceptible to liquefaction
3	CL	100	12	0.74	0.03	0.96	0.50	Not liquefaction
4	CL	100	11	0.76	0.05	0.99	0.52	Susceptible to liquefaction
10	ML	80	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
12	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
16	ML	80	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
22	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
25	ML	80	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

جدول ۱۵. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۳ (گمانه سوم نیاک)

Table 15. Liquefaction potential along borehole number 3 (the third borehole of Niak)

Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Susceptibility Index	Potential
1	CL	100	11	0.9	0.05	0.99	0.52	Susceptible to liquefaction
3	CL	100	11	0.84	0.05	0.99	0.52	Susceptible to liquefaction
5	CL	100	11	0.88	0.05	0.99	0.52	Susceptible to liquefaction
6	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
8	ML	80	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
20	SM	100	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

جدول ۱۶. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۴ (گمانه هشتم نیاک)

Table 16. Liquefaction potential along borehole number 4 (8th borehole of Niak)

Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Susceptibility Index	Potential
1	CL	100	10	N.P	0.07	1	0.53	Susceptible to liquefaction
3	CL	100	15	N.P	0.01	0.49	0.25	Not liquefaction
5	CL	100	14	N.P	0.02	0.71	0.37	Not liquefaction

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

7	CL	100	12	N.P	0.03	0.95	0.49	Not liquefaction
15	ML	80	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

جدول۱۷. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۵ (گمانه اول رجا)

Table 17. Liquefaction potential along borehole number 5 (first borehole of Raja)

Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Susceptibility Index	Potential
3	GM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
4	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
6	GM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
8	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
10	ML	80	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
20	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

جدول ۱۸. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۶ (گمانه سوم تویا)

Table 18. Liquefaction potential along borehole No. 6 (third borehole of Toya)

Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Susceptibility Index	Potential
2	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
4	GP-GM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
6	SP-SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
8	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
10	ML	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
20	SM20	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

جدول ۱۹. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۷ (گمانه دوم تویا)

Table 19. Liquefaction potential along borehole number 7 (the second borehole of Toya)

Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Susceptibility Index	Potential
2	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
4	SP-SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
10	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
16	ML	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

جدول ۲۰. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۸ (گمانه اول تویا)

Table 20. Liquefaction potential along borehole number 8 (first borehole of Toya)

Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Suscep.Index	Potential
3	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
5	GP-GM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
6	GP	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
8	GP-GM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
11	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
12	ML	80	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
20	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

جدول ۲۱. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۹ (گمانه سوم فروآلیاژ)

Table 21. Liquefaction potential during borehole number 9 (third ferroalloy borehole)

Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Susceptibility Index	Potential
1	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
3	SW-SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
7	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
9	SW-SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
13	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
15	SP-SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

جدول ۲۲. پتانسیل روانگرایی در طول گمانه شماره ۱۰ (گمانه دوم فروآلیاژ)

Table 22. Liquefaction potential during borehole number 10 (second ferroalloy borehole)

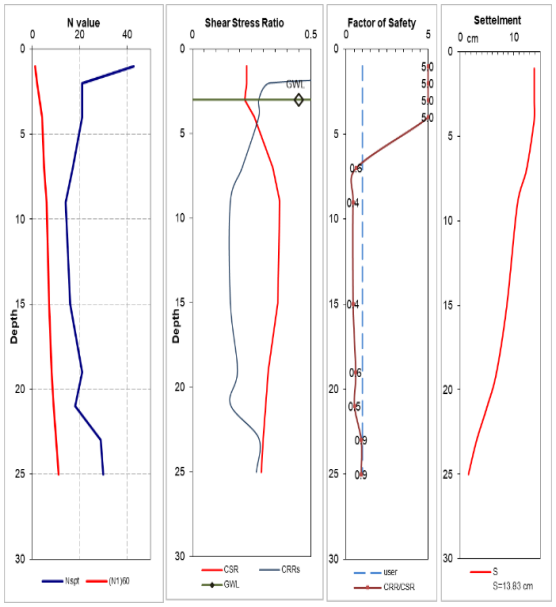
Depth	Soil type	FC (%)	PI	Wc/LL	Boulanger and Idriss	Bray and sancio	Susceptibility Index	Potential
6	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction
7	CL-SM	20	6	0.29	0.44	1.15	0.80	Susceptible to liquefaction
9	SC-SM	20	5	0.39	0.64	1.07	0.86	Susceptible to liquefaction
11	CL	20	8	0.32	0.18	1.12	0.65	Susceptible to liquefaction
15	SM	20	N.P	N.P	N.P	N.P	1	Susceptible to liquefaction

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

نتایج آزمون نفوذ استاندارد در خاک‌های ساحل بوستانو

به منظور برآورد پتانسیل روانگرایی منطقه بستانو، اطلاعات ژئوتکنیکی ۱۰ گمانه در قسمت های مختلف منطقه مورد استفاده قرار گرفت، در منطقه باختر و جنوب باختری و بخش شمال باختری تا عمق ۱۰ متری عدد نفوذ استاندارد بین ۱ تا ۲۰ بوده و در قسمت‌های خاوری عدد نفوذ استاندار عموماً بالاتر از ۲۰ می‌باشد. در قسمت‌های مرکزی منطقه بستانو رسوبات متراکم عدد نفوذ استاندارد آنها بین ۳۰ تا ۴۰ بود. عمدتاً با افزایش عمق، عدد نفوذ استاندارد رسوبات افزایش یافته است. در جنوب خاوری منطقه که منطقه طغیان آب بوده و سطح آب زیر زمینی بالا می‌باشد، رسوبات سست و عدد نفوذ استاندارد پایین است. در منطقه بوستانو رسوبات در سواحل شمالی و باختری به استثنای مناطقی که از ماسه سنگ متراکم تشکیل شده‌اند، عدد نفوذ استاندارد پایینی دارند. همچنین با توجه به جداول تهیه شده براساس روش Idriss و Seed در عمق‌های مختلف خاک، در عمق ۲ تا ۷ متر در بخش‌های مرکزی و خاوری پتانسیل روانگرایی زیاد می‌باشد. در عمق ۱تا۷ متر و در بخش‌های مرکزی و باختری پتانسیل روانگرایی بالا بوده و در بقیه بخش‌های منطقه وضعیت روانگرایی متوسط و کم می‌باشد. در عمق‌های ۱ تا ۹ و ۸ تا ۹ متر، بیشتر بخش‌های شمالی، باختری و مرکزی و بخش‌هایی از مناطق جنوبی بستانو دارای روانگرایی خیلی زیاد بوده که باید نکات ایمنی جهت مقابله با پدیده روانگرایی در این مناطق حتماً رعایت شود. در عمق ۸ تا ۹ متری نیز همانند عمق‌های ۱ تا ۹ متر، در بخش‌های مرکزی، شمالی، باختری و جنوبی منطقه روانگرایی خیلی زیاد می‌باشد. به طور کلی بر اساس روش Idriss و Seed در اکثر منطقه، بخصوص بخش‌های شمال باختر، مرکز و جنوب، میزان روانگرایی زیاد و خیلی زیاد بوده که نیاز به مطالعات دقیق برای انواع سازه‌ها می‌باشد و می‌باید از روش‌های کاهش مخاطرات روانگرایی استفاده شود. نتایج آزمون نفوذ استاندارد در عمق‌های مختلف خاک منطقه بستانو در شکل‌های (۱۱) تا (۲۰) نشان داده شده است.

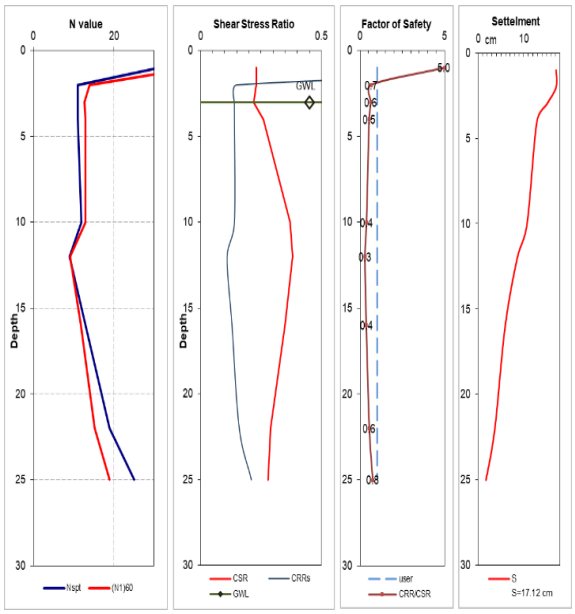


شکل ۱۱. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۱ به روش سید و ادریس

Fig.11. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.1 by Seed and Idriss method

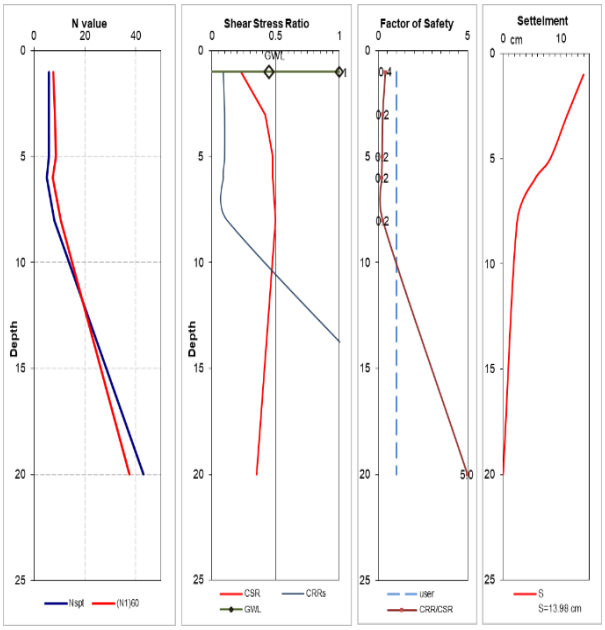
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]



شکل۱۲. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۲ به روش سید و ادریس

Fig. 12. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.2 by Seed and Idriss method

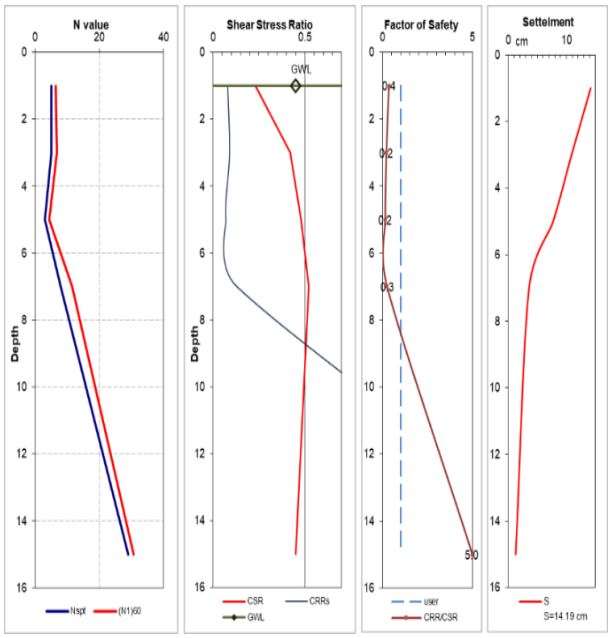


شکل ۱۳. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۳ به روش سید و ادریس

Fig. 13. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.3 by Seed and Idriss method

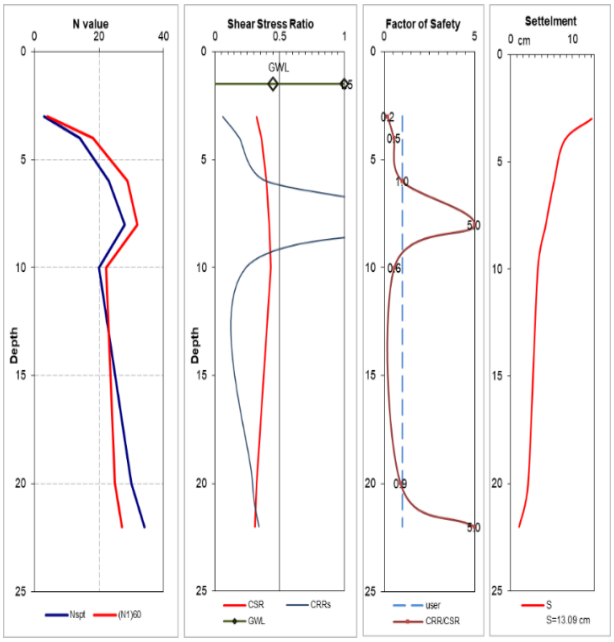
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]



شکل ۱۴. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۴ به روش سید و ادریس

Fig. 14. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.4 by Seed and Idriss method

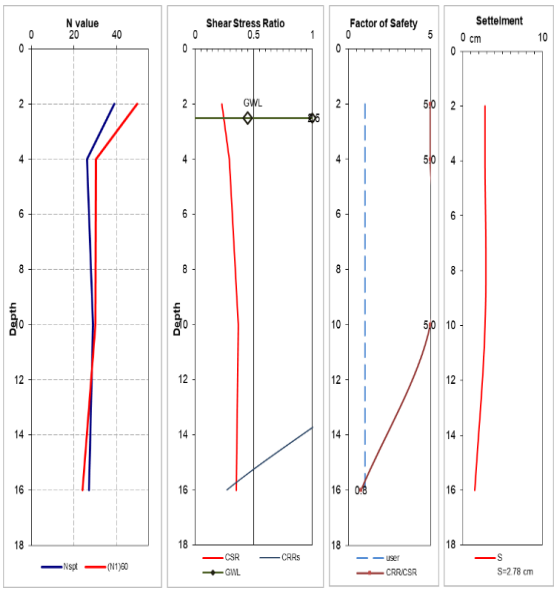


شکل ۱۵. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۵ به روش سید و ادریس

Fig. 15. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.5 by Seed and Idriss method

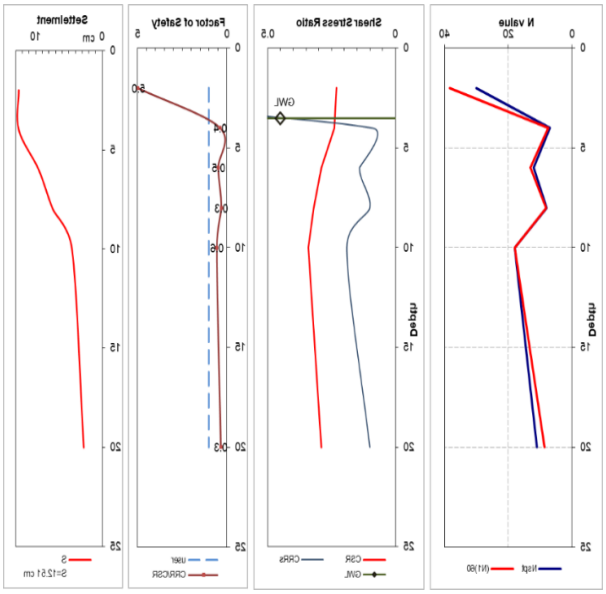
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]



شکل ۱۶. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۶ به روش سید و ادریس

Fig. 16. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.6 by Seed and Idriss method

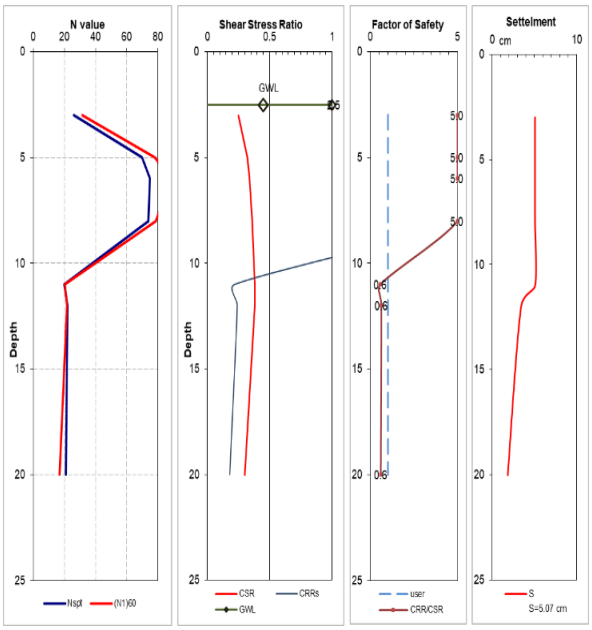


شکل ۱۷. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۷ به روش سید و ادریس

Fig. 17. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.7 by Seed and Idriss method

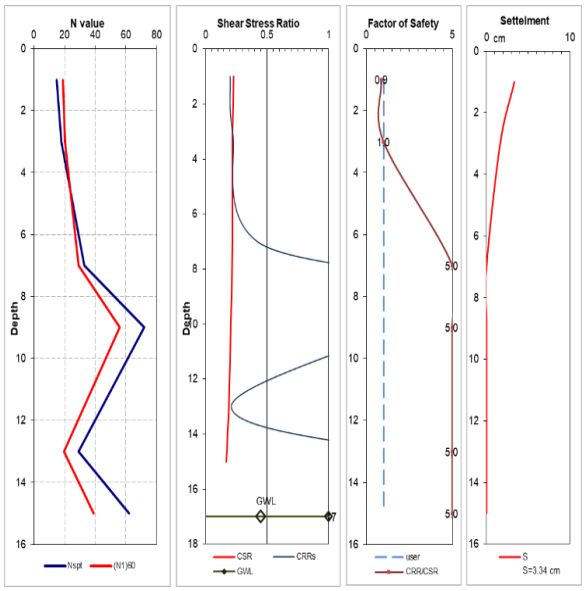
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.10190051]



شکل ۱۸. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۸ به روش سید و ادریس

Fig. 18. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.8 by Seed and Idriss method

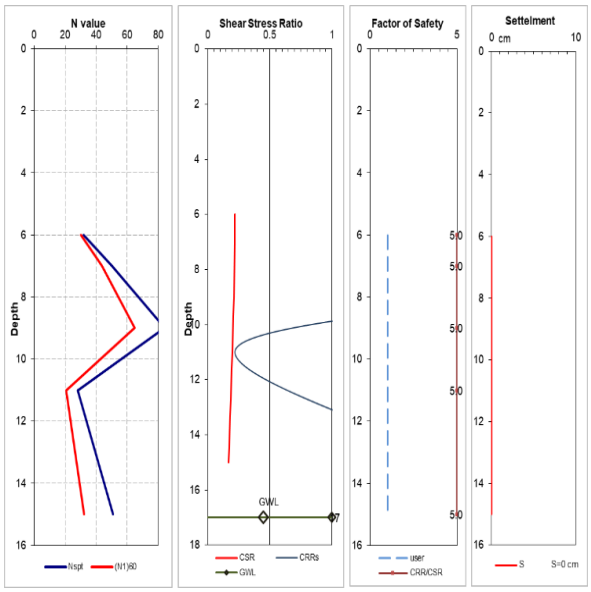


شکل ۱۹. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۹ به روش سید و ادریس

Fig. 19. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.9 by Seed and Idriss method

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]



شکل ۲۰. شرایط عدد SPT، نسبت تنش برشی، وضعیت روانگرایی و نشست در گمانه شماره ۱۰ به روش سید و ادریس

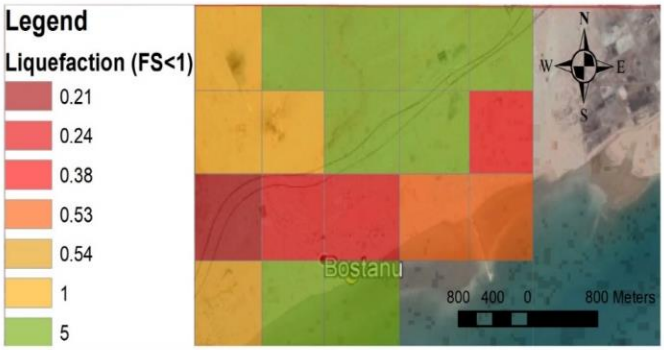
Fig. 20. The Conditions of SPT number, shear stress ratio, and liquefaction and settlement condition in borehole No.10 by Seed and Idriss method

پهنه‌بندی روانگرایی در منطقه بستانو

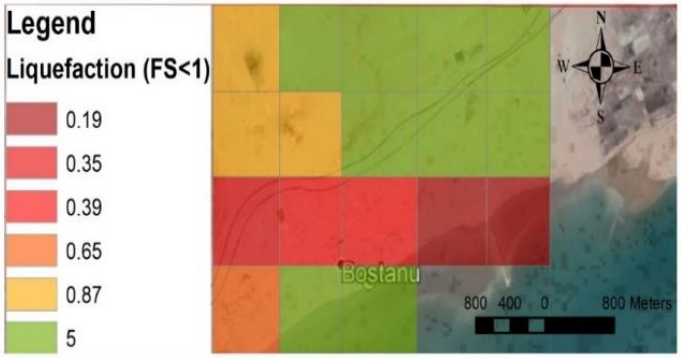
با استفاده از داده‌های سنجش از دور تصاویر ماهواره‌ایIRS (۲۰۰۳، قدرت تفکیک ۶ متر) و Landsat، نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی خاک در محدوده مورد مطالعه براساس روش Idriss و Seed در محیط نرم افزاری در کلاس‌های مختلف روانگرایی ترسیم شد. مناطقی که ضریب اطمینان کمتر از یک هستند به عنوان مناطق بحرانی و مناطقی که ضریب اطمینان آن‌ها در محدوده ۱/۵-۱ قرار دارد به عنوان مناطق شبه بحرانی در نظر گرفته شده‌اند. ضریب اطمینان بالاتر از از ۱/۵ نیز نشان دهنده پایدار بودن منطقه می‌باشد. بر این اساس نقشه‌های پهنه‌بندی ترسیم شده در عمق های مختلف، ۸/۸۸ درصد از مساحت محدوده مورد مطالعه در منطقه خطر روانگرایی بحرانی، ۷/۷۷ درصد در محدوده خطر بسیار بالا، ۴۱ درصد در محدوده خطر بالا، به عبارتی مناطق مستعد خطر روانگرایی تقریبا ۵۸ درصد منطقه را در برگرفته‌اند که اکثر در قسمت مرکزی منطقه می‌باشند. مابقی مناطق در محدوده خطر کلاس صفر قرار می‌گیرند. شکل‌های (۲۱) تا (۲۵) نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی را به صورت موضعی در عمق‌های خاص از یک گمانه را نشان می‌دهند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

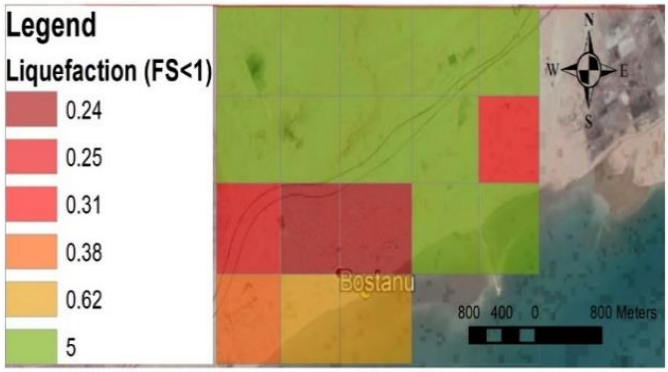
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]



شکل ۲۱. پهنه‌بندی خطر روانگرایی در عمق ۴ متری زمین منطقه بوستانو، استان هرمزگان
Fig. 21. Zoning of risk of liquefaction in 4 meters depth of the ground in Bostano area, Hormozgan province

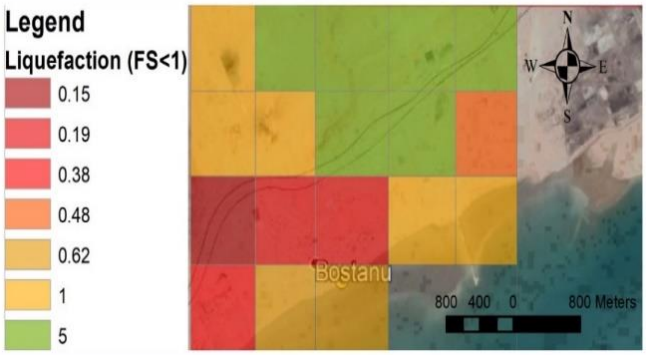


شکل۲۲. پهنه‌بندی خطر روانگرایی در عمق ۲ متری زمین منطقه بوستانو، استان هرمزگان
Fig. 22. Zoning of risk of liquefaction in 2 meters depth of the ground in Bostano area, Hormozgan province

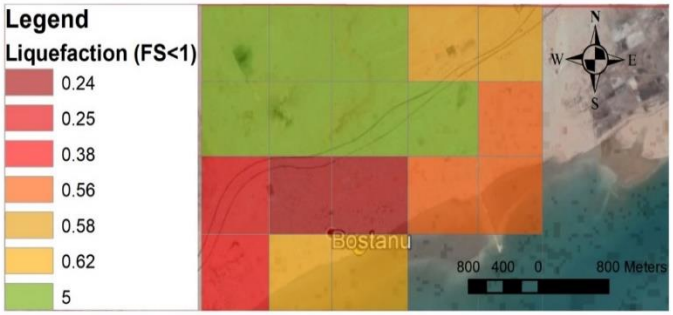


شکل ۲۳. پهنه‌بندی خطر روانگرایی در عمق ۸ متری زمین منطقه بوستانو، استان هرمزگان
Fig. 23. Zoning of risk of liquefaction at the depth of 8 meters of the ground in Bostano area, Hormozgan province

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]



شکل ۲۴. پهنه‌بندی خطر روانگرایی در عمق ۶ متری زمین منطقه بوستانو، استان هرمزگان
Fig. 24. Zoning of risk of liquefaction at the depth of 6 meters in the ground of Bostano region, Hormozgan province



شکل۲۵. پهنه‌بندی خطر روانگرایی در عمق ۱۰ متری زمین منطقه بوستانو، استان هرمزگان
Fig. 25. Liquefaction risk zoning in the 10meter depth of the ground in Bostano region, Hormozgan province

نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها

نتایج حاصل از تحقیق حاضر بدین صورت می‌توان اشاره کرد:

۱. بررسی وضعیت زمین‌شناسی آبرفت و مقاطع عرضی نشان داد که بافت غالب خاک منطقه ماسه‌ای می‌باشد. در پهنه‌ی ساحلی تا محدوده مرکزی مورد مطالعه این ماسه‌ها بیشتر از نوع SP و SM بوده، و از محدوده مرکزی به سمت شمال منطقه ماسه‌ها غالباً از نوع SM می‌باشند.

۲. تغییرات سطح آب زیرزمینی این منطقه متأثر از سه عامل آب‌های ساحلی، آب‌های سطحی و فاضلاب شهری می‌باشد نقشه سطح آب زیرزمینی ترسیم شده حاکی تغییرات زیاد آب در این محدوده است به طوری که در نزدیکی ساحل این سطح آب ۰/۵ تا ۱ متر بوده ولی در قسمت‌های باختری و شمال باختری به ۱۵ تا ۲۰ متر نیز می‌رسد.

۳. محدوده مطالعاتی در منتهی‌الیه زاگرس چین‌خورده واقع شده است و به لحاظ لرزه‌خیزی دارای خصوصیات پهنه انتقالی زاگرس- مکران است. بررسی زمین لرزه‌های تاریخی و توزیع مکانی رویدادهای لرزه‌ای یکصد سال اخیر منطقه، بیانگر لرزه-خیزی بالای این محدود می‌باشد بیشتر این زلزله‌ها کم‌عمق بوده و دارای عمقی بین ۱۵-۱۰ کیلومتر هستند در مطالعه حاضر تحلیل خطر زلزله بصورت جداگانه انجام نشده است و شتاب افقی ۰/۳۵ شتاب ثقل که در آئین‌نامه ۲۸۰۰ معرفی شده مورد استفاده قرار گرفته است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

۴. ارزیابی صورت گرفته نشان داد محدوده‌ای که بین خط ساحلی تا محدوده مرکزی مورد مطالعه قرار دارد ضریب اطمینان آن کمتر از ۱ می‌باشد و از خطر روانگرایی بالایی برخودار است بنابراین نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق برای انواع سازها می‌باشد و استفاده از روش‌های کاهش مخاطرات روانگرایی ضرورت دارد.

۵. از محدوه مرکزی به سمت شمال منطقه مطالعاتی ضریب اطمینان بالاتر از ۵ بوده و پتانسیل خطر روانگرایی صفر می‌باشد و عموماً نیازی به تحقیقات و مطالعات دقیق نمی‌باشد.

۶. در نقشه تهیه شده توسط حق‌شناس و همکارن (۱۳۸۹) بلوک بندرعباس به عنوان پهنه‌ی با خطر روانگرایی بالا برآورد شده بود نقشه‌های تهیه شده در این تحقیق نشان داد فقط محدوده‌ی که در پهنه‌ی ساحلی و مرکزی منطقه قرار دارد از پتانسیل روانگرایی بالایی برخوردار بوده و در سایر مناطق پتانسیل روانگرایی صفر می‌باشد.

نتیجه گیری

هدف اصلی در تحقیق حاضر، ارزیابی پتانسیل روانگرایی و پهنه بندی خطر بر مبنای استفاده از نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد SPT در بستر ساحل بستانو در غرب بندرعباس است. به منظور ارزیابی خطر روانگرایی ابتدا بر اساس روش تعیینی سید و همکاران (Seed et al.2003) در هر گمانه ضریب اطمینان در برابر روانگرایی برای اعماق مختلف و سپس شاخص پتانسیل روانگرایی بر اساس رابطه ایواساکی و همکاران (Iwasaki et al.1982) برای اعماق مختلف در هر گمانه محاسبه شد. براساس نتایج آنالیزهای انجام شده نقشه پتانسیل خطر روانگرایی بر مبنای شاخص پتانسیل خطر روانگرایی و همچنین نقشه پتانسیل خطر روانگرایی بر مبنای کمترین ضریب اطمینان محاسبه شده در هر گمانه ترسیم شد. ارزیابی‌های صورت گرفته نشان داد محدوده بین خط ساحلی تا قسمت مرکزی مورد مطالعه از خطر روانگرایی بالایی برخوردار است بیشتر شبکه‌هایی که در این محدوده قرار گرفته‌اند دارای ضریب اطمینان کمتر از ۱ بوده و فقط تعدادی از شبکه‌ها داری ضریب اطمینان بیشتر از ۱ می باشند (شکل های ۲۳ تا ۲۷). با توجه به اینکه این محدوده در مجاورت ساحل قرار دارد، سطح آب زیرزمینی آن بیشتر تحت تاثیر دریا بوده و تغییرات آن زیاد می‌باشد طبق نقشه سطح آب زیرزمینی که در شکل (۵) ارائه شده است در بیشتر شبکه‌هایی که در این محدوه قرار دارند حداکثر سطح آب زیرزمینی ۵ متر و حداقل آن که در نزدیک ساحل ۱ متر می‌باشد همچنین با توجه به نقشه بافت خاک و پروفیل‌های ترسیم شده، در این محدوده بافت ماسه‌ای بوده و بیشتر از نوع SP و SM می‌باشد و یکسری میان لایه‌های سیلتی- رسی نیز در آنها وجود دارد این عامل نیز می‌توان در بالابردن پتانسیل روانگرایی این محدوده بسیار تأثیر گذار باشد از قسمت مرکزی محدوده مطالعاتی به سمت شمال، ضریب اطمینان بالا بوده و خطر روانگرایی وجود این منطقه را تهدید نمی‌کند.. بافت خاک این محدوده از دو بخش تشکیل شده است قسمتی ماسه‌ای و از نوع SM بوده و در قسمتی دیگر شامل نهشته‌های ماسه‌ای سخت شده می‌باشد گمانه‌هایی که در این قسمت حفر شده‌اند دارای عدد SPT بالایی بوده و صحتی بر این موضوع می‌باشد.

منابع

ایزدی‌فر، ح.، کنگی، ع.، احمدی‌مقدم، الف.، ۱۳۹۳. پهنه‌بندی پتانسیل روانگرایی شهر بندرعباس براساس آزمایش نفوذ استاندارد (SPT). اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

حق‌شناس، ا.، گریوانی، ه.، عسگری، ف.، ۱۳۸۸. پهنه‌بندی خطر روانگرایی در جزیره قشم و ریزپهنه‌بندی آن در شهرهای قشم و درگهان. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، ۲ (۳ و۴): ۶۸-۵۳.

سازمان آب منطقه‌ای استان هرمزگان، ۱۴۰۱. گزارش وضعیت آب زیرزمینی، ۴ (۲): ۳۵-۳۰.

شمایل، س.، طباطبایی‌عقدا، س‌ط.، مهرنهاد، ح.، ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر روانگرایی در شهر بندرعباس. دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی، قم، ایران.

عسکری، ف.، کسایی، م.،۱۳۸۲. ارزیابی پتانسیل روانگرایی در بخشی از نواحی جنوب شرقی تهران. نشریه دانشکده فنی، ۳۷ (۲): ۲۵۷- ۲۶۸.

فخاری، م.، ۱۳۷۴. نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ بندرعباس. اداره کل زمین شناسی اکتشافات شرکت ملی نفت ایران.

مکی، س.، رضائی، پ.، پیروان، ح.، ۱۳۹۵. بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش آبی در رسوبات مارنی سازندهای میشان و آغاجاری در باختر بندرعباس. پژوهش های فرسایش محیطی، ۶ (۱) :۵۱-۳۰.

میرمحمدحسینی، س، م.، عارف‌پور، ب.، قاسمی، م، م.، ۱۳۷۷. راهنمای پهنه‌بندی مخاطرات ژئوتکنیک لرزه‌ای. جهاد دانشگاهی، واحد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۲۴۰ص.

نجابت، ل.، ۱۳۹۱. ارزیابی خطر زمین‌لرزه در جزیره قشم و ارتباط آن با پتانسیل روانگرایی شهر قشم. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، ۱۴۱ص.

نبوی، م، ح.، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران، ۱۰۹ص.

Ambraseys, N. N., Melville, C.P., 1982. History of Persian Earthquakes, Cambridge Univ, Press, New York. 219 p.

Idriss, I. M., Boulanger, R. W., 2010. SPT -based liquefaction triggering procedures, Report no. UCD/CGM - 10/02, Center for Geotechnical Modeling. University of California, Davis.

Idriss, I. M., 1999. An update to the Seed -Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. In: Proceedings, TRB workshop on new approaches to liquefaction, publication no. FHWARD -Federal Highway Administration, 99 -165.

Idriss, I. M., Boulanger, R. W., 2005. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering , 26(2), 115–130.

Kramer, S. L., Elgamal, A. W., 2001. Modeling soil liquefaction hazards for performance-based earthquake engineering. pacific Earthquake Engineering Research Center, 165 p.

seed, R. B., Cetin, K.O., Moss, R. E. S., Kammerer, A., Wu, J., Pestana, J., Riemer, M., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., Faris, A., 2003. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. Technical Report No, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 72 p.

Seed, H. B., Idriss, I. M., 1971. Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97 (9), 1249–1273.

Seed, H. B., Idriss, I. M., Arango, I., 1983.Evaluation of liquefaction potential using field performance Data. Journal of Geotech. Eng., ASCE, 109 (3), 458-482.

Skempton A. K., 1986. Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Partical Size, Aging and over consolidation. Journal of Geotechnique, 36(3, 425 -447.

Uma, M. R., Boominathan, A., Dodagoudar, G, R., 2008. Development of empirical Correlation between Shear Wawe Velocity and Standard Penetration Resistance in Soils of Chennai City. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

Yuan X. M., Sun R, Chen L., Tang, F., 2010. A method for detecting site liquefaction by seismic records. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 5(3), 270–279.

Zhang, G., Robertson, P. K., Brachman, R. W. L., 2002. Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. Canadian Geotechnical Journal, 39(2), 1168–1180.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

Evaluation of the Liquefaction Potential of Bustano Beach (West of Bandar Abbas) based on Standard Penetration Test (SPT) and Risk Zoning

Hamzeh Torkmanitombeki[1*], Mashalah Khamehchiyan[2] ,Maryam Nazari[3], Shazdi Safari[4]

1. PhD student in engineering geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3. Master Engineering Geology, Islamic Azad University, Bandar Abbas Branch, Iran
4. Master of Tectonics, Hormozgan University, Iran

Received: 25 Sep 2023 Accepted: 30 Nov 2023

Abstract

The purpose of the research is to investigate the risk of liquefaction risk at the beaches of Bustano in the western part of Bandar Abbas in Hormozgan province. The periodic stress method was used as the method to evaluate the liquefaction potential based on the data obtained from Standard Penetration Test (SPT). The acceleration of 0.35 g was chosen as the maximum acceleration of the bedrock, and cross sections were extracted using Rockwork software. From an engineering geological point of view, the characteristics of the sedimentary deposits and the collected geotechnical information were analyzed to generate geotechnical index profiles. As the study area is located at the edge of the folded Zagros, seismically it has the characteristics of the Zagros-Makran transition zone which basically exerts the most pressure on the saturated sediments of the area. Due to the strong movement of the earth in generating liquefaction, the seismic bedrock acceleration (PGA) and the maximum horizontal acceleration at the ground surface (amax) were evaluated by liquefaction analysis using LiqIT v.4.70 software. The results indicate that the sandy and silty sediments of the study area are the outcome of the weather changing processes at the northern altitudes of the region. Granular sand and silt sediments were found under favorable conditions with high groundwater level, confirming the presence of liquefaction phenomenon in the area. Zoning maps of the intensity of liquefaction were extracted at the surface and at depth were obtained in different parts of the Bustano, indicating the different classes of risk of liquefaction in the soil of this area. In general, the occurrence of liquefaction with high intensity liquefaction was predicted for the Bustano area.

Keywords: Standard Penetration Test, Bustano, risk zoning, liquefaction.

Introduction

If the soil sediments are quickly sheared in two directions by seismic movements, the water pressure in the soil pores will also increase. In loosely saturated non-adhesive soils, the pore water pressure increases rapidly. In principle,, this value can reach a level where the particles are suspended separately from each other and then the strength and hardness of the soil are temporarily lost which is called soil liquefaction (Kramer and Elgamal, 2001). During an earthquake, soil liquefaction causes the loss of soil strength. This can lead to the settlement of structures, the occurrence of landslides, the acceleration of failures associated withdusty dams, or the occurrence of other types of potential hazards (Seed et al., 2003).

*Corresponding author: torkamani2788@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.3.1019051

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

In general, only saturated sediments can be saturated with those groundwater which are considered to be liquefaction-prone soils (Yuan et al., 2010). Therefore, liquefaction potential is often observed in coastal areas due to the high groundwater levels. The evaluation of land deformations caused by liquefaction is done through numerical and analytical methods, laboratory and experimental modelling and methods based on field tests (Zhang et al., 2002). In recent years, several laboratory and field methods have been used to evaluate the liquefaction resistance of soils, which can be compared with field evaluation methods using standard penetration test (SPT), cone penetration test (CPT) and size Shear wave velocity measurement.

Geographically, the village of Bustano has a coastal location. This village is located at 27 degrees north latitude and 56 degrees east longitude, from the north is bounded by the Bandar Abbas- Bandar-Khamir Road, from the south to the Persian Gulf, from the west to the residential camp of the Persian Gulf, from the east to the Shahid Rajaee Shahrek and its distance from Bandar Abbas is 27 km. The study area is located in folded Zagros and the sub-arid subzone of Bandar Abbas.

Materials and Methods

To determine and identify the soils prone to liquefaction, the collected geotechnical boreholes obtained from the existing geotechnical reports of the Soil Mechanics and Technical Laboratory Company of the Hormozgan Road and Urban Development Department and private laboratory companies were used. The soil index profiles were prepared by taking into account the groundwater situation, implementing the location of the boreholes on the map of the study area, gridding the study area into regular grids with a square grid of 500 meters. The grids without information were evaluated by using the information from adjacent networks as well as the subsurface soil texture map. Finally, the liquefaction potential index was determined for each network by using the analyses which are performed. Due to the coastal nature of the studied area, the parts of the area which are near the coastal line have a high underground water level of about 0.5 meters, and with the distance from the coast in the northern parts, the underground water level arrives between 15 to 20. Therefore, the underground water level in the event of liquefaction risk was considered to be 20 meters, and the boreholes in which the underground water level was more than 20 meters were removed. In this research, according to the regulations of building design for Bandar Abbas city, the acceleration of 0.35 g was used as the acceleration of the bedrock. Based on Yuma et al.'s the correlation between the number of standard penetration tests (N-SPT) and the shear wave velocity has been used to obtain the shear wave velocity profile in each borehole.

The standard penetration test was performed by Seed and Idriss to evaluate the liquefaction potential and LiqIT v.4.70 software was used to consider liquefaction analysis. After identifying the potential of the area and examining the liquefaction potential evaluation methods, geotechnical information was collected. And then, the surface soil texture map was drawn using aerial photos and cross sections by Rockwork software, and after considering the importance of the strong movement of the earth in creating liquefaction, seismic bedrock acceleration (PGA) and maximum horizontal acceleration on the ground surface (amax) as well as the method used in liquefaction analysis were investigated. Finally, the liquefaction risk map based on the liquefaction potential index and the lowest confidence factor was drawn in each borehole.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

Results and Discussion

The Bustano area is lies on the sediments of the present era, which include coastal sediments, wind, evaporite and river sediments, and it is also mainly originated from the rocks of the northern altitudes of the region. The main part of the surface soil texture consists of sandy, sandy, silty and sandy silty sediments with clay lenses. The sandy and silty sequence extends further towards the coast, and further away from the coast, the sandy and clay sediments are placed between the sandy and silty layers. Preliminary observations have shown that out of 40 existing boreholes, 16 boreholes were found to be unsuitable for liquefaction because of the soil type (sand and clay) 7 boreholes due to the low level of underground water, and 7 boreholes are unreliable.

In addition, 10 boreholes were analyzed according to the groundwater level and the type of soil (sandy and silty) 10 boreholes were evaluated. The sediments of the western part of the Bustano area start from the beachside with layered sands with red sand, clay with a slightly sandy paste in red and grey colours, silt with grey sand and in the horizons further away from the coast in areas with clay lenses with low pasty properties in red, light brown and grey colours ends in higher areas and repeating the mentioned sequences.

In the central and eastern part of the Bustano region, a sequence of sandy and silty sand sediments, sandy and silty sands, sand layers has been observed starting from the coastal areas, and further to the north of the region. In addition to the aforementioned sediments, clay sediments and lenses are also seen in this region. The number of coarse-grained sediments, especially sandy soils, in this area is much higher than in the western part of the region.

According to the exploratory boreholes, the soil texture of the studied area is mainly composed of sand sediments. From the coastal part to the central area under study, the sand sediments are mostly of silty sand (SM) type. Sandy sediments (SP) and sandy loams are seen in higher horizons than beach sands. Clay and silty lenses are clearly visible among the sand deposits resulting from water and wind processes.

By moving away from the coastal and the central area under study towards the north, red hard sand deposits can be seen among the layers with poorly-grained sand. The presence of boreholes with high SPT in horizons far from the coast confirms the presence of harder layers along with sandy interlayers in these areas.

The western and southwestern parts of the Bustano region are composed of sediments with layered sand with low pasty properties (SM) and gradually change to clayey and silty sediments (CL-ML) and sometimes contain clayey sediments with low pasty properties. The main sediments are silty sand (SM) and poorly graded silty sand (SP-SM). In this way, the eastern parts are mainly composed of inorganic clay sediments with low pasty properties (ML) and layered sand, which turn into sandy sediments in the middle parts. In the central part of the region, there are poorly graded sandstones and clayey sands which sediments in the eastern parts alert to poorly graded coarse sand sediments and layered sands. There are clay sediments with low pasty properties (CL) in limited parts of the region.

To estimate the liquefaction potential of the Bustano Beach, the geotechnical data of 10 boreholes in different parts of the region were used, in the western, southwestern and the northwestern part up to a depth of 10 meters which the standard penetration number is between 1 and 20and in the eastern parts the penetration number is generally above 20. In the central parts of the dense sediments, their standard penetration number was between 30 and 40. Mainly, with the increase in depth, the standard

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]

penetration number of sediments has increased. In the southeast of the region, which is the flood zone and the underground water level is high, the sediments are loose and the standard penetration number is also low. In the Bustano area, the sediments on the north and west coasts have a low standard penetration number, except for the dense sandstone areas. In different depths of the soil, at the depth of 2 to 7 meters, in the central and eastern parts, the liquefaction potential is high. At a depth of 7 to 1 meter in the central and western parts, the liquefaction potential is high, and in the rest of the region, the liquefaction situation is moderate and low. In the depths of 1 to 9 and 9 to 8 meters, most of the northern, western and central parts and parts of the southern areas of the city have very high liquefaction, so safety tips must be taken to deal with the phenomenon of liquefaction in these areas. In the depths of 8 to 9 meters, as well as in the depths of 1 to 9 meters, the liquefaction is very high in the central, northern, western and southern parts of the region. In general, according to the method of Idriss and Seed, in most areas of the city, especially in the north-west, center and south parts, the amount of liquefaction is very high, which requires more specific studies for all types of structures, and it should be one of the methods to reduce the risk of liquefaction. According to the liquefaction risk zoning map, 88.8% of the studied area is in the critical liquefaction risk area, 7.7% is in the very high-risk area, and 41% is in the high-risk area. In other words, the liquefaction-prone areas are approximately 58% of the region. The rest of the areas are in the danger zone of class zero.

Conclusions

The main objective of the current research is to evaluate the liquefaction potential and risk zoning based on the results of the standard SPT penetration test in the Bustano beach bed in the western part of Bandar Abbas. To evaluate the risk of liquefaction, first, based on the determination method of Seed and colleagues (Seed et al. 2003) in each well, the coefficient of confidence against liquefaction for different depths and the liquefaction potential index based on the relationship of Iwasaki and colleagues (Iwasaki et al. 1982) for different depths were calculated in each borehole. Based on the results of the analysis, the liquefaction risk potential map was drawn on the liquefaction risk potential index and also the liquefaction risk potential map was considered in the lowest confidence coefficient calculated in each borehole. The evaluations showed that the area between the coastline and the central part of the study has a high risk of liquefaction, most of the networks that are located in this area have a reliability coefficient of less than 1, and only a few networks have a reliability coefficient of more than 1 (Figures 23 to 27).

According to the map of the underground water level presented in Figure (5) in most of the networks located in this area near the coast, its underground water level is more affected by the sea and its changes are very impressive. They have the maximum underground water level of 5 meters and the minimum one near the coast is 1 meter. Also, by considering the soil texture map and drawn profiles, the texture is sandy in this area and it mostly belongs to SP and SM types. And there are a series of silty-clay intermediate layers in them, this factor can be very effective in increasing the liquefaction potential of this area. From the central part of the study area to the north, the reliability coefficient is high and the risk of liquefaction does not threaten the existence of this area. The soil texture of this area consists of two parts, one part is sandy and of SM type, and the other part contains hardened sand sediments. The boreholes in this region have a high SPT which confirms the authenticity of this issue.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.1019051]