

بررسی روش های ارزیابی لرزه ای پتانسیل روانگرایی در مجاورت سازه های دریایی

روزبه وکیلیⁱ, علیرضا صادقی عبداللهیⁱ, حمید علی الهیⁱⁱ, علی نورزادⁱⁱⁱ

چکیده

روانگرایی لرزه ای خاکهای ماسه ای و ماسه های سیلت دار اشباع در مناطق دریایی و بنادر سبب آسیب های جدی فراوانی گردیده است. در این مقاله روش های ارزیابی پتانسیل روانگرایی تحت بار لرزه ای با نگرش ویژه بر مراجع مربوط به سازه های دریایی مورد بازبینی قرار گرفته است. در ادامه با معرفی یکی از بنادر مهم ایران به بررسی پتانسیل روانگرایی این بندر با روش های ارایه شده در مراجع مربوطه و مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته شده است. با ارایه محاسبات انجام شده برای این بندر علاوه بر معرفی روش های موجود در این زمینه، توضیحات تکمیلی در خصوص استفاده مناسب از این مراجع برای بنادر ایران ارایه شده است. نتایج این مطالعه حاکی از تطابق مناسب روش های ارایه شده در مراجع مربوطه برای سازه های با اهمیت زیاد می باشد.

کلمات کلیدی: روانگرایی، زلزله، سازه های ساحلی، آیین نامه ها، خاک های ماسه ای، بنادر ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۸/۱۲/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۱۰/۱۵

ⁱ کارشناس ارشد؛ دانشگاه علم و صنعت ایران: alireza_sadeghi61@yahoo.com, roozbehvakili@hotmail.com

ⁱⁱ مربی؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، دانشکده مهندسی عمران: h.alielahi@seiau.ir

ⁱⁱⁱ استادیار؛ دانشگاه صنعت آب و برق، دانشکده مهندسی آب: noorzad@wrm.ir

۱- مقدمه

این سازه ها ایجاد می گردد. اگر چنانچه خاک محل در اثر این حرکات روانگرا گردد، پایداری کلی سازه ها تهدید خواهد شد و یا ممکن است تغییر مکان هایی بیش از حد مجاز ایجاد گردند. این مساله اهمیت ارزیابی پتانسیل روانگرایی را خصوصا در طراحی بر اساس عملکرد، نشان می دهد.

خسارات وارد بر سازه های دریایی در اثر روانگرایی بسیار سنگین و پر هزینه می باشد که از مهمترین مثال های خرابی در طی زلزله های گذشته می توان به خرابی های ایجاد شده در طی زلزله های نیونکای-چابا (۱۹۸۳)، کوبه (۱۹۹۵) و کوکایلی (۱۹۹۹) اشاره نمود. لازم به ذکر

تجربیات و خسارات حاصل از زلزله های گذشته مبین آن است که زلزله اثرات مستقیم و غیر مستقیمی را بر سازه های دریایی وارد می نماید. اثر مستقیم زلزله بر سازه های دریایی (از قبیل دیوارهای ساحلی، بندرگاه ها، دلفین ها، شمع های مدفون و سپرها و تانک های قرار گرفته در نواحی ساحلی) هنگامی که در نواحی نزدیک به مرکز زلزله قرار دارند، لرزش های شدیدی خواهد بود که می تواند نتایج فاجعه باری را به بار آورد. اثرات غیر مستقیم زلزله بر سازه های دریایی در اثر لرزش خاک نگهدارنده

است که روانگرایی در سازه های دریایی ممکن است در شرایط بارگذاری موج نیز ایجاد گردد که در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته و تنها به بحث روانگرایی خاک تحت بارگذاری لرزه ای پرداخته شده است.

در بسیاری از آیین نامه های متداول جهت انجام طراحی های لرزه ای، علی رغم اشاره به ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک، به طور مشخص به بحث روانگرایی سازه های دریایی پرداخته نشده است که از آن جمله می توان به آیین نامه اروپا [۱]، هند [۲] و آیین نامه ۲۸۰۰ ایران [۳] اشاره نمود. این در حالی است که تجربیات حاصل از زلزله های گذشته و همچنین اثرات روانگرایی ناشی از آنها منجر به ارایه آیین نامه ها و رهنمودهایی در این زمینه شده است که می توان به آیین نامه کارهای دریایی ژاپن [۴] به عنوان بارزترین آن اشاره نمود. علاوه بر آیین نامه مذکور، راهنماهای دیگری نیز نظیر ASCE [۵] و PIANC [۶] به بررسی دقیق مخاطرات روانگرایی در سازه های دریایی در دو حالت طراحی و روش تحلیل پرداخته اند. از جمله مهمترین آیین نامه ها و راهنماهای موجود، می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- American Society of Civil Engineering (ASCE), Seismic Guideline for Ports [5]
- The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (OCDI), Technical Standard and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan [4]
- Permanent International Association for Navigation Congresses (PIANC), Seismic Design Guidelines for Port Structures [6].

پراکندگی نظرات محققان مختلف در خصوص تعریف و تعیین پتانسیل روانگرایی سبب شده است تا این آیین نامه ها نیز روش های متفاوتی را برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی پیشنهاد دهند. پیچیدگی های استفاده از هر یک از این روش ها از یک سو و همچنین تفسیر نتایج حاصل از هر یک از این آیین نامه ها از طرف دیگر، سبب سردرگمی بیش از پیش مهندسان ژئوتکنیک در ارزیابی وقوع روانگرایی در سازه های دریایی با اهمیت زیاد شده است.

بازبینی آیین نامه های موجود در خصوص طراحی لرزه ای سازه های دریایی، حاکی از آن است که این آیین نامه ها اساساً بر مبنای روش تنش برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی قرار دارند چراکه تنها این روش دارای یک چهارچوب منطقی و در دسترس در مقاصد اجرایی می باشد. از این میان آیین نامه ASCE [۵] مشخصاً روش ساده شده را که ابتدا توسط سید و همکاران [۷] ارایه شد، پیشنهاد نموده اند. آیین نامه OCDI [۴] در ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک استفاده از شاخص نفوذ استاندارد و همچنین تحلیل پاسخ ساختگاه را پیشنهاد می نماید. استفاده از منحنی های دانه بندی به منظور تعیین استعداد روانگرایی خاک ها به همراه این تحلیل ها از ویژگی های خاص این آیین نامه می باشد که هم سبب دقیق تر و همچنین پیچیده تر شدن این ارزیابی گردیده است. این در حالی است که PIANC [۶] به هر دو روش فوق جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی اشاره نموده است.

در این مطالعه با معرفی یک ساختگاه ساحلی واقعی در جنوب ایران (بندر LNG) و بازبینی ریشه ای و شفاف سازی جنبه های مختلف در بکارگیری هر دو روش موجود در آیین نامه های معتبر دریایی در ارزیابی پتانسیل روانگرایی، به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری آیین نامه های مختلف پرداخته شده است. هر چند لازم به ذکر است که در خصوص روش ساده شده، نسخه تایید شده ای که توسط یاد و همکاران [۸] در قالب گزارش NCEER ارایه شده، مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت میزان محافظه کاری در هر یک از روش های پیشنهادی مزبور با توجه به تفسیر نتایج حاصل از برآورد روانگرایی در این ساختگاه پیشنهاد شده است.

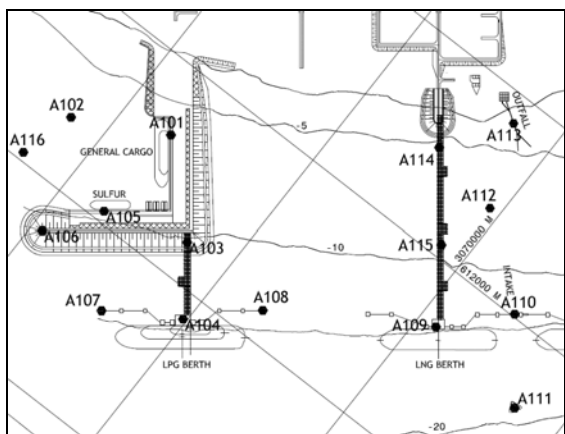
۲- معرفی پروژه LNG

شرکت ایران LNG برای ساخت واحد صنعتی LNG در قسمت جنوب غربی ساحل ایران واقع در منطقه تمبک اقدام به توسعه پایین دست پروژه، شامل واحد صنعتی LNG، مخازن ذخیره سازی و وسایل خدماتی نموده است. ساختگاه پروژه در نزدیکی تمبک و تقریباً در ۴۰ کیلومتری عسلویه و در روستایی در شمال غربی خلیج فارس و ۲۵۰ کیلومتری جنوب شرقی بندر بوشهر ایران و

متر می باشد. همچنین میان لایه‌هایی از جنس رس سیلت دار (CL-ML) و ماسه سیلت دار (SM) به ترتیب در لایه های اول و دوم مشاهده شده است.



شکل (۱): مراحل ساخت پروژه LNG



شکل (۲): محل گمانه های حفاری شده در محل پروژه LNG

بر طبق نتایج آزمایشات SPT، تراکم خاک از سست تا خیلی متراکم تغییر می کند. سیلت ماسه دار سست تنها در عمق های سطحی مشاهده می گردد. همانطور که در شکل

به ترتیب در عرض و طول جغرافیایی $27^{\circ} 44' 58''$ شمال و $52^{\circ} 8' 29''$ شرق قرار گرفته است. تجهیزات ساحلی در این بندرگاه شامل موارد زیر است:

- پهلوگیر های مختلف و موج شکن که موج شکن ها تقریباً به طول ۳۷۰ متر به سمت جنوب غربی و ۳۳۰ متر در جهت شمال غربی ادامه می یابد.
- اسکله LNG از نوع شمع و عرشه
- اسکله LPG از نوع شمع و عرشه
- اسکله های صادرات گوگرد، حمل محموله کشتی ها، بارگیری کشتی ها و اسکله کشتی های یدک کش از نوع شمع و عرشه
- سازه های دریایی ورودی و خروجی آبگیر
- خطوط لوله دریایی

لازم به ذکر است که این پروژه در حال حاضر (زمستان ۱۳۸۸ هجری شمسی) در حال ساخت می باشد که در شکل ۱ قسمت هایی از مراحل ساخت آن نمایش داده شده است.

۲-۱- شرایط ژئوتکنیکی محل پروژه LNG

مطالعات ژئوتکنیکی در محل پروژه LNG در سال ۲۰۰۷ میلادی توسط مهندسین مشاور ساحل به انجام رسیده است. این مطالعه شامل حفر ۹ گمانه دریایی با حداکثر عمق ۴۵ متر و ۵ آزمایش نفوذی پی‌زوکن در محل اسکله و بندرگاه می باشد. محل گمانه های حفاری شده در مطالعات ژئوتکنیکی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

آزمایش نفوذ استاندارد در تمامی گمانه های حفر شده توسط مهندسین مشاور ساحل در فواصل حدوداً ۱/۵ متری بر اساس استاندارد ASTM D1586-92 انجام شده است. تغییرات ضربات SPT با عمق در هر گمانه در شکل ۳ نمایش داده شده است.

بر اساس اطلاعات بدست آمده، بافت ژئوتکنیکی لایه های بستر دریا شامل دو لایه اصلی می باشد. لایه اول شامل سیلت ماسه دار سست تا تراکم متوسط به رنگ خاکستری تا سبز روشن (ML) به همراه مقداری صدف تا عمق حداکثر ۱۳/۵ متری و لایه دوم شامل شن رسی سیلت دار خیلی متراکم با رنگ قهوه ای روشن به همراه ماسه (GC-GM) و سنگ تا انتهای گمانه ها به عمق حداکثر آن ۴۵

۳- تحلیل پتانسیل روانگرایی بر اساس روش آیین نامه ASCE (روش ساده شده)

مبنای این آیین نامه برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی بر اساس روش ساده شده می باشد. سید و همکارانش [۷] با بهره گیری از رابطه ساده شده ی سید و ادیس [۹] به منظور تخمین تنش برشی ایجاد شده و استفاده از داده های تاریخی در ساختگاه هایی که روانگرایی در آنها رخ داده یا نداده بود، دستورالعملی کارا در ارزیابی پتانسیل روانگرایی با استفاده از آزمایش نفوذ استاندارد ارایه نمودند. این روش تا به امروز نیز پس از چندین بار بازبینی توسط محققان مختلف (ان.آرسی [۱۰]، یاد و ادیس [۱۱] و یاد و همکارانش [۸]) همچنان چهارچوب اصلی خود را حفظ نموده است. این روش بر اساس رابطه بین عدد اصلاح شده نفوذ استاندارد (SPT) برای تنش سربار موثر و انرژی $60(N_1)$ در مقابل شدت بار لرزه ای که تحت عنوان نسبت تنش دوره ای معادل (CSR_{eq}) معرفی می گردد، ارایه شده است. اولین نکته ای که در ارزیابی پتانسیل روانگرایی بر اساس این روش بایستی بدان توجه داشت آن است که این روش برای خاک های شنی ارایه نشده است و تنها می توان پتانسیل روانگرایی لایه اول از ساختگاه مورد نظر را از این روش محاسبه نمود و برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک های شنی بایستی از روش های دیگری استفاده نمود که در این مقاله به آن پرداخته نشده است.

تعیین ضریب اطمینان در مقابل روانگرایی در این روش شامل دو گام مهم می باشد:

۱- تعیین نسبت تنش دوره ای به موجب زلزله (CSR):

۲- تعیین ظرفیت مقاوم خاک در برابر روانگرایی که به صورت حداکثر نسبت تنش دوره ای پیش از شروع روانگرایی تعریف می گردد (CRR).

سید و ادیس [۹] رابطه زیر را برای تعیین CSR پیشنهاد نمودند:

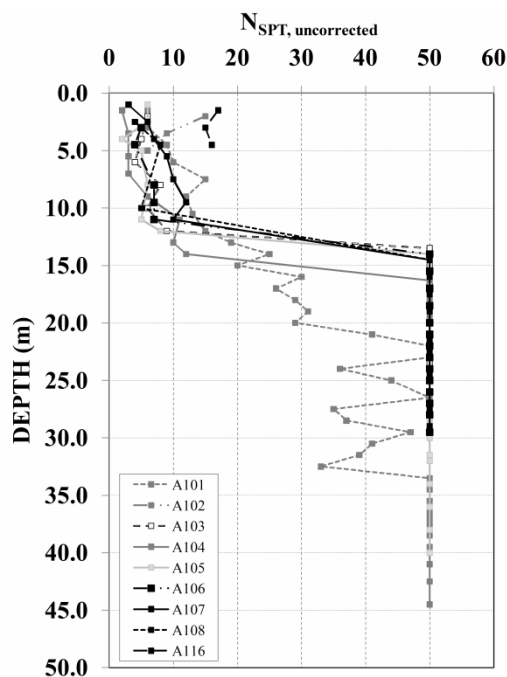
$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) r_d \quad (1)$$

که در این رابطه:

a_{max} : شتاب لرزه ای افقی حداکثر در سطح زمین؛

g : شتاب ثقل؛

مشخص است، تا عمق حدود ۱۰ تا ۱۵ متر از سطح کف دریا (لایه اول)، اعداد SPT کمتر از ۲۰ بوده که نشان از وجود استعداد روانگرایی در این ناحیه با توجه به لرزه خیز بودن منطقه دارد. اما در تمامی گمانه ها آزمایش SPT پس از برخورد به لایه دوم خیلی متراکم شرایط پس زنی^۱ را تجربه می کند که نشان از پتانسیل روانگرایی خیلی کم برای این لایه را دارد.



شکل (۳): تعداد ضربات اندازه گیری شده در آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در گمانه های مختلف

پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های خاک که در این مطالعه برای مناطق ساحلی در نظر گرفته شده است، مطابق با جدول ۱ می باشد.

جدول (۱): پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های خاک ساحلی

پارامتر	واحد	لایه اول	لایه دوم
عمق	m	۱۲/۵-۰	۱۲/۵>
طبقه بندی	-	ML	GC-GM
تراکم نسبی	%	۳۰	۷۵>
مقدار ریزدانه	%	۷۱	۲۵
وزن مخصوص خشک	ton/m ³	۱/۴۶	۲/۰۴
وزن مخصوص اشباع	ton/m ³	۱/۹	۲/۳

1-Refusal

σ_{v0} و σ'_{v0} : به ترتیب تنش کل و موثر خاک در عمق مورد نظر؛

r_d : ضریب کاهش تنش برشی در عمق (ضریب انعطاف پذیری) که خود از رابطه ۲ تعیین می‌گردد:

$$r_d = \frac{(1 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{1 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2} \quad (2)$$

Z: عمق در زیر سطح زمین بر حسب متر می‌باشد. برای تعیین نسبت تنش دوره‌ای بایستی ابتدا شتاب حداکثر زمین برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال تعیین گردد. مقدار شتاب حداکثر زمین (PGA) و بزرگای گشتاوری زلزله (Mw) در محل پروژه به ترتیب برابر با ۰/۲۷g و ۶/۳ می‌باشند. از طرف دیگر برای تعیین تنش موثر بایستی ارتفاع سطح آب زیرزمینی نیز در نظر گرفته شود که با توجه به مستغرق بودن گمانه‌ها در زیر آب، در محاسبات روانگرایی همواره سطح آب بر روی سطح زمین در نظر گرفته شده است.

به منظور تعیین CRR با استفاده از عدد نفوذ استاندارد نیاز است برخی اصلاحات بر روی عدد SPT صورت پذیرد. رابطه ۳ روش محاسبه عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده را به نمایش می‌گذارد:

$$(N_1)_{60} = N_m \times C_N \times C_E \times C_B \times C_R \times C_S \quad (3)$$

N_m : مقاومت نفوذ استاندارد اندازه‌گیری شده
 C_N : فاکتور هم پایه سازی برای تنش سربار موثر مرجع معمول (100kPa)

C_E : فاکتور اصلاح برای نسبت انرژی چکش (ER)

C_B : فاکتور اصلاح برای قطر گمانه

C_R : فاکتور اصلاح برای طول میله

C_S : فاکتور اصلاح برای نمونه گیرهای با یا بدون غلاف
 مقدار مقاومت دوره‌ای برای ماسه تمیز و برای زلزله‌ای به بزرگای گشتاوری ۷/۵ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \times (N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (4)$$

این رابطه در $(N_1)_{60} < 30$ معتبر است و در $(N_1)_{60} \geq 30$ خاک دانه‌ای تمیز، خیلی متراکم‌تر از آن است که روانگرا

گردد و بعنوان خاک غیرروانگرا طبقه‌بندی می‌گردد (مارکوسن و همکارانش [۱۲]).

اما برای تعیین $CRR_{7.5}$ برای خاک‌های حاوی ریزدانه ابتدا می‌باید مقدار عدد نفوذ استاندارد معادل ماسه تمیز $(N_1)_{60cs}$ تعیین و تصحیح گردد و سپس با استفاده از رابطه ۴ مقدار نسبت مقاومت دوره‌ای تعیین شود. تعیین مقدار ضریب اطمینان در مقابل روانگرایی با استفاده از رابطه زیر صورت می‌پذیرد:

$$FS = \left(\frac{CRR_{7.5}}{CSR} \right) \times MSF \times K_\sigma \quad (5)$$

MSF: فاکتور مقیاس نمودن بزرگای زلزله
 K_σ : فاکتور اصلاح تنش سربار (تنش همه جانبه یا دورگیر)

که در این رابطه ضریب اطمینان مجاز در برابر روانگرایی برای زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ سال برابر با ۱ می‌باشد.

کارگاه آموزشی NCEER برای زلزله‌های با بزرگی کمتر از ۷/۵ به جای ارایه یک نمودار، یک محدوده پیشنهادی برای MSF را پیشنهاد نمودند تا بدین وسیله کاربر آزادی عمل لازم را برای انتخاب فاکتور مورد نیاز سازگار با خطرپذیری پروژه را داشته باشد.

برای تعیین فاکتور اصلاح K_σ رابطه زیر ارایه شده است:

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right)^{(f-1)} \quad (6)$$

که در این رابطه σ'_{v0} تنش سربار موثر، P_a فشار اتمسفر و f توانی است که تابعی از مشخصات ساختگاه شامل تراکم نسبی، تاریخچه تنش، سن و نسبت بیش تحکیمی می‌باشد.

این تحلیل‌ها برای تمامی گمانه‌ها انجام شده است و در نهایت مقدار ضریب اطمینان حاصل در اعماق مختلف تا عمق حداکثر ۱۴ متر در مقایسه با ضریب اطمینان مجاز (FS=1) در شکل ۴ آورده شده است.

با توجه به عمق لایه‌های روانگرا که در شکل ۴ نمایش داده شده است، می‌توان عمق بهبود خاک یا تراز لایروبی مورد نیاز در کارهای دریایی را در محل هر گمانه مشخص نمود. لازم به ذکر است که در این محاسبات، عمقی از خاک که دارای ضریب اطمینان بزرگتر از ۱ بوده

به عنوان لایه غیر روانگرا در نظر گرفته شده و نتایج در جدول ۲ ارایه گردیده است.

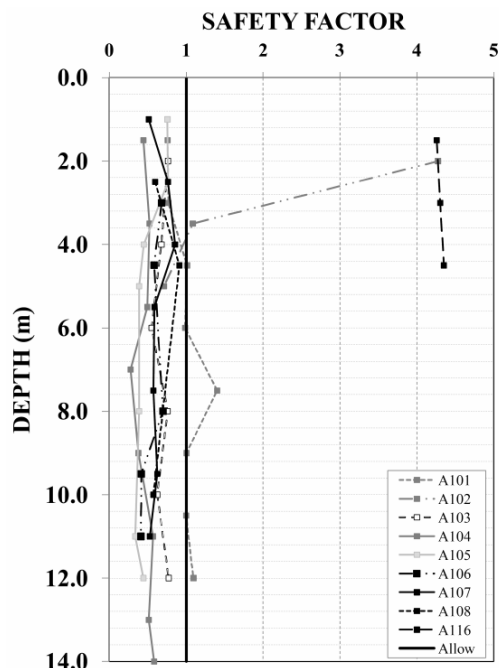
زمین و یا بستر دریا محدود می نماید مگر آنکه پیش بینی شود که سازه از وقوع روانگرایی در اعماق بیشتر از ۲۰ متر آسیب های جدی می بیند و یا آنکه لایه خاک مستعد روانگرایی در پایین تر از عمق ۲۰ متر نیز ادامه یابد. در این روش ابتدا می باید به کمک منحنی دانه بندی خاک و محدوده پیشنهاد شده بوسیله آیین نامه OCDI استعداد خاک جهت وقوع روانگرایی مورد بررسی قرار گیرد. این شکل با توجه به ضریب یکنواختی خاک (UC) به دو قسمت تقسیم شده است. مقدار آستانه ضریب یکنواختی برابر با ۳/۵ بوده و از رابطه زیر تعیین می گردد.

$$U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (7)$$

که در این رابطه D_{60} و D_{10} به ترتیب اندازه ای از ذرات خاک می باشند که ۶۰ و ۱۰ درصد دانه ها از این مقدار کوچکتر هستند.

در صورتی که منحنی دانه بندی خاک مورد بررسی، در خارج از محدوده ی محتمل روانگرایی ۲ قرار گیرد، خاک غیر روانگرا تشخیص داده می شود. در غیر این صورت، روش مناسبی برای تعیین امکان وقوع روانگرایی مورد نیاز است. برای بخش ریزدانه های درشت می باید آزمایش سه محوری سیکلیک انجام پذیرد، شن های درشت با ضریب نفوذپذیری بزرگتر یا مساوی ۳cm/s به عنوان غیر روانگرا طبقه بندی می گردند و در دیگر موارد تحلیل های تفصیلی به منظور ارزیابی پتانسیل روانگرایی بایستی صورت پذیرد که در ادامه به آن اشاره می گردد.

لذا برای قضاوت در خصوص استعداد روانگرایی خاک منطقه مورد بحث، از منحنی های دانه بندی حاصل از آزمایشات دانه بندی در گمانه های مذکور در هر عمق بطور جداگانه استفاده شده است. بدین منظور مقدار U_c خاک برای تمامی اعماق و همه گمانه ها با توجه به منحنی دانه بندی آنها تعیین گردیده است که در تمامی موارد مقدار $U_c \geq 3.5$ را نشان می دهد. نکته قابل توجه اینکه در اعماقی که آزمایش نفوذ استاندارد دچار پس زدگی شده است، به علت تراکم بالای خاک و عدم امکان وقوع روانگرایی، این بررسی انجام نپذیرفته و تمرکز فقط بر روی لایه اول بوده است. در شکل ۵ منحنی مرجع پیشنهادی برای شرایط $U_c \geq 3.5$ به همراه نحوه قرار



شکل (۴): نمایش ضریب اطمینان محاسبه شده در مقایسه با ضریب اطمینان مجاز در برابر روانگرایی در تمامی گمانه های بندر LNG

جدول (۲): حداکثر عمق روانگرایی در هر گمانه بر اساس روش

ساده شده	
شماره گمانه	حداکثر عمق روانگرایی (m)
A101	۱۰/۵
A102	۵
A103	۱۲
A104	۱۴
A105	۱۲
A106	۱۱
A107	۱۱
A108	۱۰
A116	۰

۴- تحلیل پتانسیل روانگرایی بر اساس روش آیین نامه کارهای دریایی ژاپن (OCDI)

این روش بر خلاف روش ساده شده مقدار ضریب اطمینان در برابر وقوع روانگرایی را تعیین نمی نماید و در واقع بر اساس نمودار ناحیه بندی شده ای، احتمال وقوع روانگرایی را پیش بینی می کند و سپس بر اساس اهمیت سازه در خصوص وقوع روانگرایی قضاوت می نماید. این آیین نامه پیش بینی روانگرایی را تا عمق ۲۰ متر از سطح

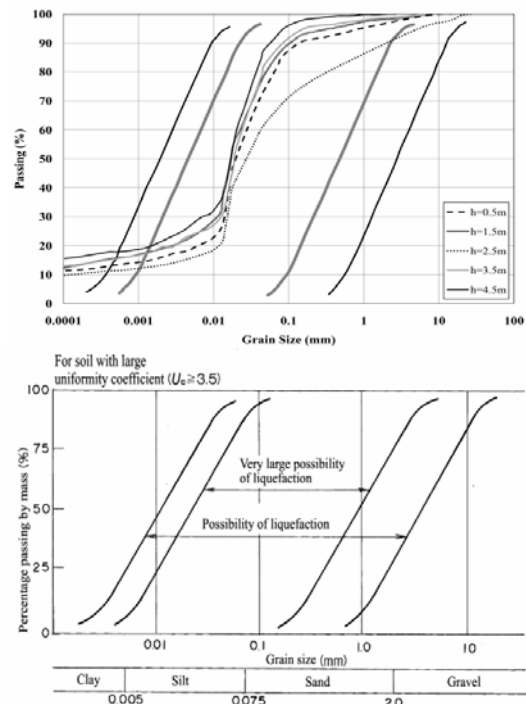
و همکاریانش [۱۳] و نسخه به روز شده‌ی آن به وسیله ادریس و سان [۱۴] ایجاد گردید) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این در حالی است که می‌توان تحلیل‌های پیشرفته یک بعدی غیرخطی از قبیل نرم افزار DESRA [۱۵]، دو بعدی خطی معادل مانند QUAD4 [۱۶]، FLUSH [۱۷] و TELDYN [۱۸] و دو بعدی غیرخطی از قبیل DYNAFLOW [۱۹] و کاندال و بورد [۲۰] نیز مورد استفاده قرار گیرد. از میان این روش‌ها، تحلیل‌های یک بعدی خطی معادل معمول‌ترین روش نزد مهندسان در مقاصد پاسخ لرزه‌ای ساختگاه می‌باشند. همچنین بایستی به این نکته توجه داشت که به علت اعمال تغییرات میرایی با کرنش برشی در تحلیل غیرخطی، همواره از تحلیل‌های خطی معادل مقادیر محافظه‌کارانه تری بدست می‌آید. از این رو، نرم افزار PROSHAKE Ver. 1.11 که به نظر متداول‌ترین برنامه کامپیوتری برای تحلیل‌های لرزه‌ای پاسخ ساختگاه می‌باشد، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. پروفیل خاک به همراه خصوصیات مصالح در گام نخستین برای این نرم افزار معرفی می‌گردد، سپس تنها ورودی مورد نیاز موج لرزه‌ای می‌باشد. جدول (۳): اعماق مستعد روانگرایی در هر گمانه بر اساس روش

OCIDI [۴] با استفاده از محدوده منحنی دانه بندی

شماره گمانه	عمق مستعد روانگرایی (m)
A101	۱۰/۵
A102	۴/۵ ≤
A103	۱۲
A104	۱۱
A105	۱۲
A106	۱۱
A107	۱۱
A108	۱۰
A116	۵

مشخصات لایه‌های خاک به نرم افزار مربوطه مستقیماً معرفی شده که یکی از این پارامترها سرعت موج برشی حداکثر متوسط در هر لایه‌ی خاک می‌باشد. بدین منظور، به علت عدم انجام آزمایش مستقیم تعیین سرعت موج برشی در ساختگاه از ارتباط بین عدد نفوذ استاندارد (SPT) و سرعت موج برشی (Vs) استفاده شده است. رایج روابطی از این دست، سابقه تاریخی بیش از ۳۰ سال دارند و غالباً به صورت تابعی از عدد SPT و نوع خاک

گیری منحنی‌های دانه بندی برای گمانه A 102 به عنوان نمونه نسبت به محدوده مذکور نمایش داده شده است.



شکل (۵): نحوه قرار گیری منحنی دانه بندی خاک در گمانه A 102 در اعماق مختلف در مقایسه با منحنی‌های معیار ارایه شده برای تشخیص اولیه استعداد وقوع روانگرایی

نتایج بررسی‌های مذکور برای تعیین اعماقی از خاک که در آنها استعداد وقوع روانگرایی وجود دارد در جدول ۳ آورده شده است.

به منظور ارزیابی پتانسیل روانگرایی در اعماقی که استعداد وقوع روانگرایی را دارا هستند ابتدا باید مقدار شتاب معادل از رابطه زیر تعیین گردد:

$$\alpha_{eq} = 0.7 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{v0}} g \quad (۸)$$

α_{eq} : شتاب معادل (Gal)

τ_{max} : تنش برشی حداکثر در لایه مورد نظر که با استفاده از تحلیل‌های پاسخ لرزه‌ای تعیین می‌گردد.
 σ'_{v0} : فشار سربار موثر (kN/m²) (فشار سربار موثر بایستی بر اساس تراز زمین در لحظه وقوع زلزله تعیین گردد).

g: شتاب ثقل (980 Gal)

به منظور انجام تحلیل‌های پاسخ زمین در کارهای عملی عموماً تحلیل‌های خطی معادل یک بعدی ساختگاه (به طور مثال نرم افزار PROSHAKE که در ابتدا به وسیله اشنبل

معرفی شده‌اند. در این مطالعه سعی شده است تا از روابط موجود که متناسب با خاک ساختگاه مورد نظر باشد، استفاده گردد. روابط مورد استفاده قرار گرفته برای لایه‌های ۱ و ۲ که به ترتیب به وسیله لی [۲۱] و سیکورا و استوکی [۲۲] پیشنهاد شده اند، به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Silty Soils: } v_s = 106 \times N^{0.32} \quad (9)$$

$$\text{Granular Soils: } v_s = 100 \times N^{0.29} \quad (10)$$

به منظور تعیین سرعت موج برشی متوسط در هر لایه ابتدا بایستی عدد نفوذ استاندارد متوسط معادل در هر لایه و تا عمق ۳۰ متر تعیین گردد. بررسی لوگ گمانه‌ها حاکی از عدد نفوذ استاندارد متوسط برابر ۹ در لایه اول و ۹۲ در لایه دوم می‌باشد. لذا سرعت موج برشی متوسط در هر لایه به ترتیب برابر با 209m/s و 371m/s به دست می‌آید.

پس از تعیین سرعت موج برشی متوسط، انتخاب شتاب نگاشت مناسب و اعمال آن به شرایط ساختگاه بایستی صورت پذیرد. شتاب نگاشت‌ها یا تاریخچه زمانی معمولاً بیان کننده حرکات زمین به صورت ثبت شتاب مطابق با زمان می‌باشد. تاریخچه زمانی شتاب باید به صورتی توسعه و مقیاس شود که طیف پاسخ آنها سازگار با طیف پاسخ طراحی ساختگاه باشد. همچنین تاریخچه زمانی بایستی دارای مدت حرکات شدید مناسب با زلزله طرح باشد. دو روش اولیه برای ایجاد تاریخچه زمانی شتاب وجود دارد: ۱) انتخاب مجموعه‌ای از شتاب‌های ثبت شده و در صورت نیاز اصلاح آنها و ۲) ایجاد یک تاریخچه شتاب مصنوعی. در این مطالعه روش اول مورد استفاده قرار گرفته است.

در انتخاب شتاب نگاشت‌ها بایستی دقت شود که برخی شتاب‌های ثبت شده در موقعیت‌های مشابه با مشخصات ساختگاه جهت مقیاس کردن انتخاب گردند. انتخاب شتاب ثبت شده بایستی بر اساس حالت لرزه‌ای و زمین‌شناسی محل پروژه صورت پذیرد. بدین منظور پارامترهای زیر بایستی در نظر گرفته شوند:

- بزرگای زلزله

- عمق کانونی^۲ و فاصله تا مرکز زلزله^۳
- مشخصات ژئوتکنیکی محل ثبت
- مکانیزم گسلش
- توپوگرافی محل ثبت

بر اساس شرایط ذکر شده در فوق و با استفاده از پایگاه لرزه‌نگاری ایران، دو زلزله برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال انتخاب شده‌اند که مشخصات این زلزله‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

جدول (۴): مشخصات زلزله‌های ثبت شده انتخابی

نام ایستگاه	مشخصات زلزله	
	نام	زمان
Suza	قشم	۲۰۰۵/۱۱/۲۷
Bam	بم	۲۰۰۳/۱۲/۲۶

مراحل روش استفاده شده برای مقیاس کردن شتاب نگاشت‌ها به صورت زیر است:

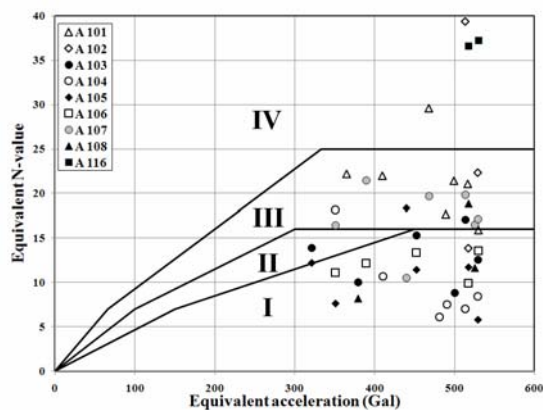
۱. شتاب حداکثر شتاب نگاشت به مقدار تخمین زده شده برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال تغییر می‌کند.
 ۲. طیف فوریه و طیف پاسخ شتاب نگار با میرایی ۵٪ ایجاد می‌گردد.
 ۳. نسبت طیف طراحی و طیف پاسخ شتاب نگاشت برای هر فرکانس تعیین می‌شود.
 ۴. نسبت به دست آمده در طیف انتقال فوریه ضرب می‌شود و معکوس آن بدست می‌آید.
- بدین وسیله تطابق خوبی بین طیف پاسخ شتاب نگار انتخاب شده با طیف طراحی ارایه شده برقرار می‌گردد. شکل ۶ تاریخچه شتاب و طیف پاسخ اولیه و مقیاس شده را برای زلزله Suza نمایش می‌دهد.
- شتاب مقیاس شده حاصل از این مطالعات به عنوان ورودی در تحلیل پاسخ زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از اعمال شتاب‌ها به پروفیل خاک و با استفاده از برنامه PROSHAKE مقادیر پاسخ زمین (تنش برشی حداکثر) حاصل از هر یک از تاریخچه‌های شتاب معرفی شده در لایه اول مطابق با شکل ۷ بدست آمده است.
- مقدار شتاب حداکثر حاصل از این دو بار لرزه‌ای، به عنوان ورودی در تحلیل روانگرایی خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

2- Hypocentral
3- Epicentral distance

این قسمت می باید با توجه به تراز زمین در زمان انجام آزمایش نفوذ استاندارد تعیین گردد).

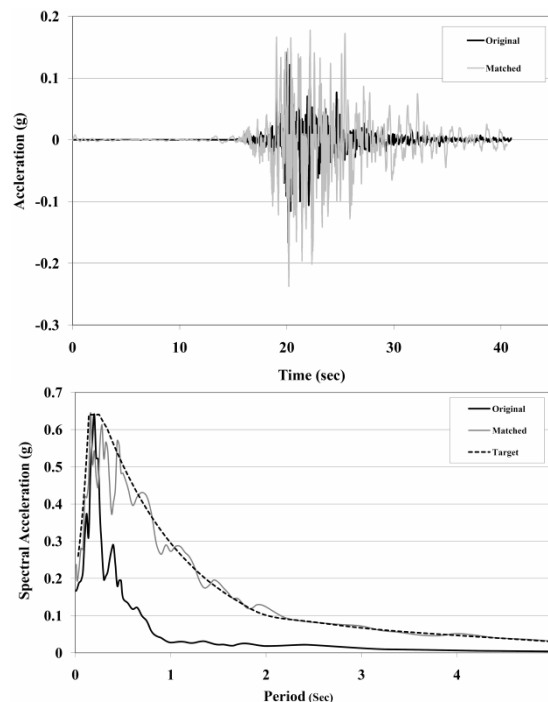
این آیین نامه جهت پیش بینی پتانسیل روانگرایی خاک بر اساس شتاب و عدد نفوذ استاندارد معادل تعیین شده از شکل ناحیه بندی شده شماره ۸ استفاده می نماید. در این شکل علاوه بر نواحی پیشنهادی، نتایج تحلیل روانگرایی در هر یک از گمانه ها با استفاده از روش پیشنهادی آیین نامه دریایی ژاپن نیز نمایش داده شده است.

در این شکل قرار گرفتن داده ها در منطقه I و II به ترتیب به مفهوم احتمال وقوع روانگرایی بسیار بالا و بالا می باشد. این در حالی است که منطقه III نشان دهنده وقوع روانگرایی کم بوده و در منطقه IV احتمال وقوع روانگرایی بسیار کم است. بر اساس تعاریف ارائه شده در آیین نامه OCDI، برای سازه های با درجه اهمیت متوسط، در صورتی که نقطه در مناطق I و یا II قرار بگیرد روانگرایی اتفاق خواهد افتاد؛ اما برای سازه های با اهمیت بالا قرار گرفتن نقاط در مناطق I، II و یا III به مفهوم وقوع روانگرایی خواهد بود. نکته قابل توجه در این جدول آن است که چنانچه اهمیت سازه زیاد باشد، ناحیه III به مفهوم وقوع روانگرایی خواهد بود و یا اینکه ارزیابی نهایی می باید با استفاده از نتایج آزمون های تکمیلی سه محوری سیکلیک صورت پذیرد.

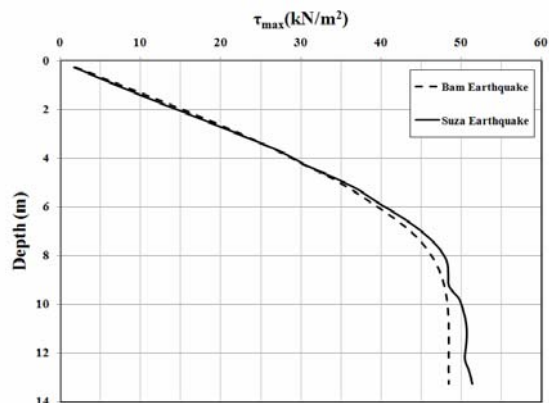


شکل (۸): موقعیت قرار گیری نقاط حاصل از گمانه های مختلف در مناطق مختلف جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی

با تحلیل محل قرارگیری داده های مربوط به گمانه های مختلف و استفاده از تعاریف ارائه شده برای هر یک از این مناطق، می توان حداکثر عمق روانگرایی در هر گمانه را



شکل (۶): شتاب لرزه ای واقعی و مقیاس شده ایستگاه Suza در ژاپن برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال



شکل (۷): مقدار تنش حداکثر محاسبه شده در لایه اول حاصل از تحلیل های PROSHAKE

در ادامه جهت تعیین عدد نفوذ استاندارد معادل، عدد نفوذ استاندارد برای سربار موثر ۶۵ کیلو پاسکال (N_{65}) مطابق رابطه زیر تصحیح می گردد.

$$(N)_{65} = \frac{N - 0.019(\sigma'_v - 65)}{0.0041(\sigma'_v - 65) + 1.0} \quad (11)$$

$(N)_{65}$: عدد نفوذ استاندارد معادل

N : عدد نفوذ استاندارد در لایه خاک مورد بررسی

σ'_v : فشار سربار موثر در لایه خاک مورد بررسی (kN/m^2) (فشار سربار موثر مورد استفاده قرار گرفته در

تعیین نمود. با توجه به اهمیت سازه مورد بررسی از لحاظ وجود لوله‌های گاز و تجهیزات پتروشیمی، احتمال روانگرایی کم (منطقه III) به عنوان معیار وقوع روانگرایی در نظر گرفته شده است. نتایج این بررسی حداکثر عمق وقوع روانگرایی را در هر گمانه در پروژه LNG نشان می‌دهد که در جدول ۵ ارایه گردیده است.

۵- مقایسه و تفسیر نتایج حاصل از تحلیل

پتانسیل روانگرایی

جهت مقایسه نتایج حاصل از ارزیابی پتانسیل روانگرایی از روش ساده شده با روش ارایه شده در آیین‌نامه کارهای دریایی ژاپن، بایستی حداکثر عمق روانگرایی حاصل از هر دو روش با یکدیگر مقایسه گردد. همانطور که پیش از این نیز اشاره شد، درجه اهمیت سازه در روش OCDI در تعیین عمق حداکثر روانگرایی تاثیرگذار است. با توجه به این نکته که بندر پتروشیمی LNG با دارا بودن مخازن و خطوط لوله متعدد از درجه اهمیت خاصی برخوردار است، احتمال روانگرایی کم (منطقه III) به عنوان معیار وقوع روانگرایی در نظر گرفته شده است. با توجه به این فرض و در نظر گرفتن ضریب اطمینان کوچکتر یا مساوی ۱ برای روش ساده شده به عنوان معیار وقوع روانگرایی، حداکثر اعماق روانگرایی حاصل از این دو روش در جدول ۶ با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۵) نتایج احتمال وقوع روانگرایی در تمامی گمانه‌ها بر

اساس آیین‌نامه کارهای دریایی ژاپن	
شماره گمانه	حداکثر عمق روانگرایی (m)
A101	۱۰/۵
A102	۵
A103	۱۲
A104	۱۱
A105	۱۲
A106	۱۱
A107	۱۱
A108	۱۰
A116	.

بررسی این جدول نشان می‌دهد که در صورتی که احتمال روانگرایی کم در آیین‌نامه کارهای دریایی ژاپن به عنوان معیار روانگرایی در نظر گرفته شود یا به عبارت دیگر سازه ساخته شده بر لایه مستعد روانگرایی دارای اهمیت زیادی باشد، تطبیق بسیار مناسبی بین این روش با روش ساده شده (پیشنهادی آیین‌نامه‌های [۵] و [۱]) وجود خواهد داشت. تنها تفاوت موجود در گمانه A 104 مشاهده می‌گردد که در این گمانه منحنی دانه بندی ارایه شده در آیین‌نامه OCDI [۴] میان لایه رسی (CL) موجود در عمق ۱۴ متری را دارای استعداد روانگرایی تشخیص نمی‌دهد در حالی که نتایج روش ساده شده حاکی از ضریب اطمینانی کمتر از ۱ در این عمق می‌باشد هر چند که ارایه ضریب اطمینان برای خاک‌های رسی (CL) با استفاده از روش ساده شده ممکن است از قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار نباشد.

این در حالی است که برای تمامی پروژه‌های دریایی نیازی نیست تا احتمال روانگرایی کم به عنوان معیار روانگرایی در نظر گرفته شود. به طور مثال در بنادر صیادی و یا بنداری با درجه اهمیت کمتر می‌توان احتمال روانگرایی زیاد (منطقه II) را به عنوان معیار روانگرایی در نظر گرفت و به نتایج اقتصادی‌تری در روش پیشنهادی OCDI دست یافت. به منظور روشن شدن این مساله، عمق حداکثر روانگرایی حاصل از روش ساده شده با روش OCDI در شرایطی که احتمال روانگرایی زیاد به عنوان معیار در نظر گرفته شود، در جدول ۷ نمایش داده شده است.

مقایسه این دو روش برای پروژه LNG حاکی از آن است که نتایج روش ساده شده به روش پیشنهادی OCDI در شرایطی که منطقه III به عنوان معیار روانگرایی در نظر گرفته می‌شود، بسیار به هم نزدیک می‌باشد؛ در حالیکه در شرایط در نظر گرفتن منطقه II به عنوان معیار روانگرایی، روش ساده شده منجر به نتایج محافظه کارانه‌تری می‌گردد. این مساله در جدول ۷ و در گمانه‌های A 101، A 104 و A 107 به روشنی قابل مشاهده است.

جدول ۶) مقایسه ضریب اطمینان حاصل از روش ساده شده با نتایج حاصل از روش OCDI [۴] در صورت در نظر گرفتن احتمال

روانگرایی کم به عنوان معیار روانگرایی

بر اساس روش OCDI		بر اساس روش ASCE		شماره گمانه
پیش بینی وقوع روانگرایی در عمق حداکثر	حداکثر عمق روانگرایی (m)	ضریب اطمینان	حداکثر عمق روانگرایی (m)	
احتمال وقوع روانگرایی کم است	۱۰/۵	۱/۰۰	۱۰/۵	A101
احتمال وقوع روانگرایی خیلی زیاد است	۵	۰/۷۱	۵	A102
احتمال وقوع روانگرایی زیاد است	۱۲	۰/۷۷	۱۲	A103
احتمال وقوع روانگرایی کم است	۱۱	۰/۹۱	۱۴	A104
احتمال وقوع روانگرایی زیاد است	۱۲	۰/۷۲	۱۲	A105
احتمال وقوع روانگرایی خیلی زیاد است	۱۱	۰/۶۸	۱۱	A106
احتمال وقوع روانگرایی کم است	۱۱	۰/۸۴	۱۱	A107
احتمال وقوع روانگرایی خیلی زیاد است	۱۰	۰/۵۷	۱۰	A108
احتمال وقوع روانگرایی خیلی کم است	۰	۴/۲۶	۰	A116

جدول ۷) مقایسه ضریب اطمینان حاصل از روش ساده شده با نتایج حاصل از روش OCDI [۴] در صورت در نظر گرفتن احتمال

روانگرایی زیاد به عنوان معیار روانگرایی

بر اساس روش OCDI		بر اساس روش ASCE		شماره گمانه
پیش بینی وقوع روانگرایی در عمق حداکثر	حداکثر عمق روانگرایی (m)	ضریب اطمینان	حداکثر عمق روانگرایی (m)	
احتمال وقوع روانگرایی خیلی زیاد است	۳	۱	۱۰/۵	A101
احتمال وقوع روانگرایی خیلی زیاد است	۵	۰/۷۱	۵	A102
احتمال وقوع روانگرایی زیاد است	۱۲	۰/۷۷	۱۲	A103
احتمال وقوع روانگرایی خیلی زیاد است	۹	۰/۹۱	۱۴	A104
احتمال وقوع روانگرایی زیاد است	۱۲	۰/۷۲	۱۲	A105
احتمال وقوع روانگرایی خیلی زیاد است	۱۱	۰/۶۸	۱۱	A106
احتمال وقوع روانگرایی خیلی زیاد است	۱	۰/۸۴	۱۱	A107
احتمال وقوع روانگرایی خیلی زیاد است	۱۰	۰/۵۷	۱۰	A108
احتمال وقوع روانگرایی خیلی کم است	۰	۴/۲۶	۰	A116

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

های متداول جهت انجام طراحی های لرزه ای، به طور مستقیم به برآورد روانگرایی در سازه های ساحلی پرداخته نشده است که از آن جمله می توان به آیین نامه اروپا [۱]، هند [۲] و آیین نامه ۲۸۰۰ ایران [۳] اشاره نمود. بررسی مراجع دریایی حاکی از وجود دو روش کلی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی می باشد که آنها را می توان به صورت زیر معرفی نمود:

۱) روش پیشنهادی آیین نامه ASCE (روش ساده شده) بر اساس شاخص مقاومت نفوذ و نسبت تنش سیکلیک و ۲) روش ارایه شده در آیین نامه کارهای دریایی ژاپن (OCDI) بر اساس تعیین استعداد روانگرایی خاک به وسیله منحنی دانه بندی و تشخیص پتانسیل روانگرایی بر

بارهای ناشی از زلزله همواره می توانند به عنوان یک تهدید جدی برای سازه های دریایی به حساب آیند چراکه وقوع روانگرایی در خاک زیر این سازه ها می تواند پایداری کلی سازه را تحت تاثیر قرار دهد و یا منجر به تغییر مکان هایی بیشتر از حد مجاز گردد. روند کنونی در هر دو شاخه مهندسی زلزله و ژئوتکنیک بر طراحی بر اساس عملکرد تاکید دارند، لذا ارزیابی قابل اطمینان از پتانسیل روانگرایی می تواند اولین قدم در طراحی این نوع از سازه ها باشد. از این رو تمامی مراجع و آیین نامه های دریایی به طور خاص به این مطلب اشاره کرده و روش های مختلفی را برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی ارایه نموده اند. این در حالی است که در بسیاری از آیین نامه

بسیار مناسبی میان نتایج این دو روش مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است که تطابق مناسب میان این دو روش در این مورد خاص، به مفهوم عدم نیاز به استفاده از هر دو روش ذکر شده نبوده و از اهمیت روش پیشنهادی آیین نامه OCDI نمی‌کاهد چراکه انجام تحلیل‌های پاسخ ساختگاه می‌تواند منجر به تخمین صحیح تاریخچه شتاب و در پی آن تنش برشی حداکثر در عمق گردد که کاملاً به موج لرزه‌ای و مشخصات ساختگاه وابسته است. از این رو بر اساس نتایج حاصل، استفاده از هر دو روش به منظور دستیابی به تخمینی قطعی‌تر از پتانسیل روانگرایی در ساختگاه‌های ساحلی، پیشنهادی منطقی و محافظه کارانه می‌باشد. هر چند که روش پیشنهادی آیین‌نامه OCDI به علت در نظر گرفتن اهمیت سازه می‌تواند در طراحی بر اساس عملکرد سازه‌ها کارایی بیشتری داشته باشد.

۷- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از تمامی همکاران در گروه دریایی مهندسین مشاور ساحل خصوصاً مهندس کامی محمدی، مراتب تقدیر و تشکر را به عمل می‌آوریم.

۸- مراجع

- [۱] European Committee for Standardization (CEN). "Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures, Part 1-1— General rules for structures (ENV-1998-1-1); Part 5—Formations, retaining structures and geotechnical aspects (ENV 1998-5, 1994.
- [۲] Indian Standards Institution. "Criteria for earthquake resistant design of structures", Rev. 4. UDC 699-841; 624-042-7, New Delhi, 1986.
- [۳] Iranian Code of Practice for Seismic Design of Building (Standard 2800), Third edition.
- [۴] Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan. The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (OCDI), Tokyo, 2002.
- [۵] ASCE. *Seismic guidelines for ports*, Ports Committee of the Technical Council on Lifetime Earthquake Engineering, Monograph No. 12. S. D. Werner, ed., New York, 1998.

اساس تحلیل لرزه‌ای پاسخ ساختگاه و مقاومت نفوذ استاندارد خاک می‌باشند.

روش ساده شده در طی چند دهه گذشته به طور متعدد توسط کارگروه‌های تخصصی مختلف مورد بازبینی و اصلاح قرار گرفته است. این روش به سبب بهره‌گیری از موارد تاریخی روانگرایی گسترده، دارا بودن یک چهارچوب ساده محاسباتی و نهایتاً ارایه ضریب اطمینان در مقابل روانگرایی، از محبوبیت مناسبی میان مهندسان ژئوتکنیک در مقاصد معمول برخوردار می‌باشد. هرچند همواره انتقادهای وسیعی به این روش به سبب در نظر نگرفتن مناسب اثر ساختگاه وارد می‌گردد.

روش پیشنهادی OCDI دارای سه ویژگی بسیار مناسب است که عبارتند از: ۱) استفاده از منحنی‌های دانه‌بندی جهت تعیین استعداد وقوع روانگرایی در خاک در گام اول که بر اساس این نوع منحنی‌ها می‌توان از این روش برای تخمین احتمال وقوع روانگرایی حتی در خاک‌های شنی و رسی هم استفاده نمود، ۲) در نظر گرفتن اثر شرایط خاک محل به حرکات لرزه‌ای زمین با توجه به انجام تحلیل پاسخ ساختگاه و ۳) وارد کردن اهمیت سازه در تعیین وقوع روانگرایی که این خصوصیت، کاربرد این روش را در پروژه‌هایی که بر اساس عملکرد طراحی می‌شوند، افزایش می‌دهد. این ویژگی‌ها در کنار این واقعیت که آیین نامه کارهای دریایی ژاپن معتبرترین آیین نامه موجود در این زمینه می‌باشد، اهمیت استفاده از این روش در تحلیل‌های روانگرایی را بیش از پیش نشان می‌دهد. این در حالی است که این روش به علت نیاز به انجام تحلیل پاسخ زمین و عدم ارایه ضریب اطمینان از محبوبیت کمتری بین طراحان برخوردار است.

در این مطالعه علاوه بر معرفی و بررسی نکات موجود در این دو روش، با مطالعه موردی به ارزیابی پتانسیل روانگرایی بندر LNG پرداخته شده است. ارزیابی پتانسیل روانگرایی برای یک مورد واقعی این امکان را ایجاد می‌نماید تا نتایج حاصل از این دو روش شامل حداکثر عمق لایه روانگرا با یکدیگر مقایسه گردند. با در نظر گرفتن احتمال روانگرایی کم به عنوان معیار روانگرایی (به بیان دیگر سازه‌هایی با اهمیت زیاد) در روش پیشنهادی آیین‌نامه کارهای دریایی ژاپن، تطبیق

Series No. 36, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 60 p, 1978.

Idriss, I.M., Lysmer, J., Hwang, R. and Seed, H.B., "QUAD4 - A Computer Program for Evaluating the Seismic Response of Soil Structures by Variable Damping Finite Element Procedures", Report No. EERC 73-16, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 67 p, 1973.

Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.F. and Seed, H.B. "FLUSH - A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems", Report No. EERC-75/30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.

Pyke, R. "TELDYN - User's Manual", TAGA Engineering Systems & Software, Lafayette, California, 1995.

Prevost, J.H. "DYNAFLOW: A Nonlinear Transient Finite Element Analysis Program", Department of Civil Engineering and Operational Research, Princeton University, (Last update January 1994), 1981.

Cundall, P.A. and Board, M. "A Microcomputer Program for Modelling Large-Strain Plasticity Problems", In: Numerical Methods in Geomechanics, C. Swoboda, Ed., A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 2101-2108, 1988.

Lee, S. H. H. "Regression models of shear wave velocities", J. Chinese Institute of Engineers, 13, 515-532, 1990.

Sykora, D.W., Stokoe, K.H., II "Correlations of In Situ Measurements in Sands of Shear Wave Velocity, Soil Characteristics, and Site Conditions", Geotechnical Eng. Report, GR83-33, The University of Texas, Austin, 1983.

PIANC. "Seismic design guidelines for port structures", Working Group No. 34 of the Maritime Navigation Commission, International Navigation Association, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 2001

Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M. "The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations", J. Geotech. Engrg. ASCE, 111(12), 1425-1445, 1985.

Youd, T. L., et al. "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127(10), 817-833, 2001.

Seed, H. B., and Idriss, I. M. "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 97(9), 1249-1273, 1971.

NRC. "Liquefaction of Soils During Earthquakes", National Research Council, Committee on Earthquake Engineering, Washington, District of Columbia, 1985.

Youd, T. L., and Idriss, I. M., eds. Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York at Buffalo, 1997.

Marcuson, W.F., III, Hynes, M.E. and Franklin, A.G. "Evaluation and Use of Residual Strength in Seismic Safety Analysis of Embankments", Earthquake Spectra, Vol. 6, No.3, pp. 529-572, 1990.

Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1972.

Idriss, I.M. and Sun, J.I. "User's Manual for SHAKE91", Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, California, 13 p. (plus Appendices), 1992.

Lee, M.K.W. and Finn, W.D.L. "DESRA-2, Dynamic Effective Stress Response Analysis of Soil Deposits with Energy Transmitting Boundary Including Assessment of Liquefaction Potential", Soil Mechanics