



جمهوری اسلامی ایران

وزارت نفت

راهنمای طراحی لرزه‌های

سکوه‌های ثابت فراساحلی در صنعت نفت

(نسخه پیش‌نویس)

معاونت مهندسی، پژوهش و فناوری

اداره کل سیاستگذاری مهندسی و استانداردها

نشریه شماره ۵۲-

۱۳۹۵

به نام آفریدگار

# راهنمای طراحی لرزه‌ای سکوه‌های ثابت فراساحلی در صنعت نفت

(نشریه شماره ۰۵۲)

وزارت نفت

معاونت مهندسی، پژوهش و فناوری

اداره کل سیاستگذاری مهندسی و استانداردها

۱۳۹۵

## پیش‌گفتار

سکوه‌های ثابت نوع شابلونی که در مناطق فراساحلی و در دل دریا نصب می‌شوند، یکی از مهم‌ترین تأسیسات متعلق به شرکت ملی نفت ایران به شمار می‌آیند که برای مدتی معین وظیفه استخراج مواد هیدروکربوری و انتقال آن را بر عهده دارند. با توسعه میداین نفت و گاز کشور در مناطق فراساحلی خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر، همواره تعیین آثار زلزله وارد بر این سکوها در مراحل طراحی یکی از دغدغه‌های مهندسان مشاور و دستگاه‌های اجرایی تابعه وزارت نفت نظیر شرکت نفت و گاز پارس، شرکت نفت فلات قاره ایران و شرکت نفت خزر بوده است. با توجه به عمق آب خلیج فارس و دریای عمان، ساخت سکوه‌های دریایی با پایه ثابت (نوع جکت) در این مناطق به صرفه و متداول است. نخستین بار در سال ۱۳۸۵، آیین‌نامه طراحی بنادر و سازه‌های دریایی ایران در ۱۱ مجلد توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور منتشر گردید که جلد نهم آن مربوط به طراحی سازه‌های فراساحلی بود. از آن سال به بعد با توجه به گذشت بیش از ۱۰ سال و تغییرات ایجاد شده در متن ضوابط بین‌المللی، هیچ کارگروهی در آن سازمان اقدام به بروزرسانی نشریات مذکور یا انتشار آیین‌نامه یا ضابطه‌ای جدید نمود و از این رو، معاونت مهندسی، پژوهش و فناوری وزارت نفت بر آن شد تا بر اساس آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های جدید منتشر شده از سوی مراجع معتبر، تهیه ضوابطی در این خصوص را در دستور کار قرار دهد. در نخستین گام از این تلاش‌ها، اولین نشریه در این خصوص تحت عنوان *راهنمای طراحی لرزه‌ای سکوه‌های ثابت فراساحلی در صنعت نفت* (نشریه شماره ۰۵۲) منتشر می‌گردد تا مهندسان مشاور طراح این حوزه، از ضوابط آن بهره‌مند گردند. لازم به ذکر است که مرجع اصلی این راهنما، یکی از نشریات مؤسسه نفت ایالات متحده (American Petroleum Institute) با نام اصلی:

API 2EQ: Seismic Design Procedures and Criteria for Offshore Structures, 2014

می‌باشد که در کنار راهنمای اصلی طراحی سکوه‌های فراساحلی نفت و گاز (API RP2A) منتشر شده است. سعی بر آن بوده تا در تدوین این راهنما، شرایط محیطی ایران لحاظ گردد. شایان ذکر است که انتشار این راهنما رافع مسؤلیت کارفرمایان و مهندسان مشاور در زمینه تحلیل خطر لرزه‌ای ویژه ساختگاه نمی‌باشد.

از کلیه شرکت‌های وابسته، مجریان و مهندسان مشاور دست‌اندرکار طراحی سکوه‌های نفت و گاز فراساحلی تقاضا می‌شود، پیشنهادهای و نظرات خود را به دبیرخانه تدوین این نشریه مستقر در اداره کل سیاستگذاری مهندسی و استانداردها ارسال نمایند تا ضمن بررسی، اصلاحات لازم برای ویرایش‌های بعدی در صورت تصویب انجام پذیرد.

اداره کل سیاستگذاری مهندسی و استانداردها - زمستان ۱۳۹۵

### اعضای کارگروه تدوین‌کننده نشریه شماره ۵۲

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت	محل کار
۱	مهندس محمدرضا منشوری	رئیس تدوین مقررات مهندسی (رئیس کارگروه)	معاونت ضوابط فنی و مهندسی
۲	مهندس امید افشاریان زاده	مسئول مهندسی سازه (دبیر کارگروه) و تهیه‌کننده متن اولیه	معاونت ضوابط فنی و مهندسی
۳	مهندس علی طاهری	کارشناس ارشد مهندسی زلزله	معاونت ضوابط فنی و مهندسی
۴	دکتر سید رامین اسعد سجادی	رئیس گروه ساختمان	معاونت امور استانداردها

کارگروه تدوین‌کننده این نشریه، از زحمات جناب آقای مهندس فرشاد حسینی (کارشناس ارشد مهندسی عمران - سازه‌های دریایی) در بررسی علمی، ادبی و فنی این نشریه و ارائه نظرات کارشناسی ایشان سپاسگزاری می‌نماید.



## فهرست مطالب

۱- مقدمه .....	۵
۲- کلیات .....	۵
۳- اصول و روش‌های طراحی لرزه‌ای .....	۷
۱-۳ اصول طراحی .....	۷
۲-۳ روش‌های طراحی لرزه‌ای .....	۸
۱-۲-۳ کلیات .....	۸
۲-۲-۳ طراحی بر مبنای زلزله سطح خطر شدید (ELE) .....	۸
۳-۲-۳ طراحی بر مبنای زلزله سطح خطر نادر (ALE) .....	۱۱
۳-۳ اطلاعات شتاب طیفی .....	۱۲
۴-۳ رده خطرپذیری لرزه‌ای .....	۱۲
۵-۳ الزامات طراحی لرزه‌ای .....	۱۳
۴- روش تحلیل لرزه‌ای ساده شده .....	۱۴
۱-۴ طبقه‌بندی خاک و شکل طیفی .....	۱۴
۲-۴ روش اعمال زلزله .....	۱۸
۵- روش تفصیلی تعیین آثار زلزله .....	۲۰
۱-۵ ارزیابی خطر لرزه‌ای ویژه ساختگاه .....	۲۰
۲-۵ ارزیابی احتمالاتی خطر زلزله (PSHA) .....	۲۰
۳-۵ ارزیابی تعیینی خطر زلزله (DSHA) .....	۲۱
۴-۵ تعیین آثار زلزله .....	۲۱
۵-۵ تحلیل‌های پاسخ ویژه ساختگاه .....	۲۶
۶- الزامات عملکردی .....	۲۶
۱-۶ عملکرد در زلزله تراز ELE .....	۲۶
۲-۶ عملکرد در زلزله تراز ALE .....	۲۷
مراجع .....	۲۹

## ۱- مقدمه

این راهنما به تعیین آثار ناشی از زلزله روی سکوه‌های ثابت نفت و گاز در مناطق فراساحلی می‌پردازد. معیارهای طراحی لرزه‌ای به طور اساسی وابسته به مشاهدات زلزله‌های تاریخی با در نظر گرفتن شرایط لرزه‌زمین ساخت ساختمانی می‌باشد. در بسیاری از موارد ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای ویژه ساختمانی برای طراحی سکوه‌های جدید و ارزیابی سکوه‌های موجود الزامی است. در این راهنما، فرآیندهای عمومی تعیین آثار زلزله برای شرایط ساختمانی خلیج فارس و دریای عمان ارائه شده است.

## ۲- کلیات

طراحی لرزه‌ای بر مبنای دو سطح خطر زلزله، به ترتیب برای دو حالت حدی نهایی<sup>۱</sup> (ULS) برای مقاومت و سختی و حالت حدی تصادفی یا غیر عادی<sup>۲</sup> (ALS) برای اطمینان از برآورده شدن الزامات مربوط به مقاومت باقیمانده و استهلاک انرژی انجام می‌شود.

سطح خطر برای طراحی در حالت حدی نهایی، زلزله شدید<sup>۳</sup> (ELE) و برای طراحی در حالت حدی غیر عادی، زلزله نادر<sup>۴</sup> (ALE) تعریف می‌شود.

در این پیوست فقط جنبش‌های زمین ناشی از زلزله مورد بحث قرار می‌گیرد و سایر مخاطرات لرزه‌ای مانند روان‌گرایی، ناپایداری شیروانی، گسلش، سونامی، گل‌فشان و انتشار امواج لرزه‌ای درون آب تنها به اختصار بیان شده است.

ضوابط این فصل به منظور کاهش خطرپذیری افراد، محیط زیست و دارایی‌ها به حداقل ممکن تدوین شده است. این هدف با استفاده از روش‌های طراحی لرزه‌ای متناسب با تراز مواجهه سکوه<sup>۵</sup> با مخاطرات لرزه‌ای (که از این پس به اختصار تراز مواجهه نامیده خواهد شد) و شدت رخداد لرزه‌ای مورد انتظار قابل دسترسی است.

در مناطق دارای قابلیت لرزه خیزی زیاد و یا سازه‌های دارای خطرپذیری بالا لازم است تا مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای ویژه ساختمانی انجام گردد. روش احتمالاتی تحلیل خطر زلزله به طور خلاصه در این نشریه ارائه شده است.

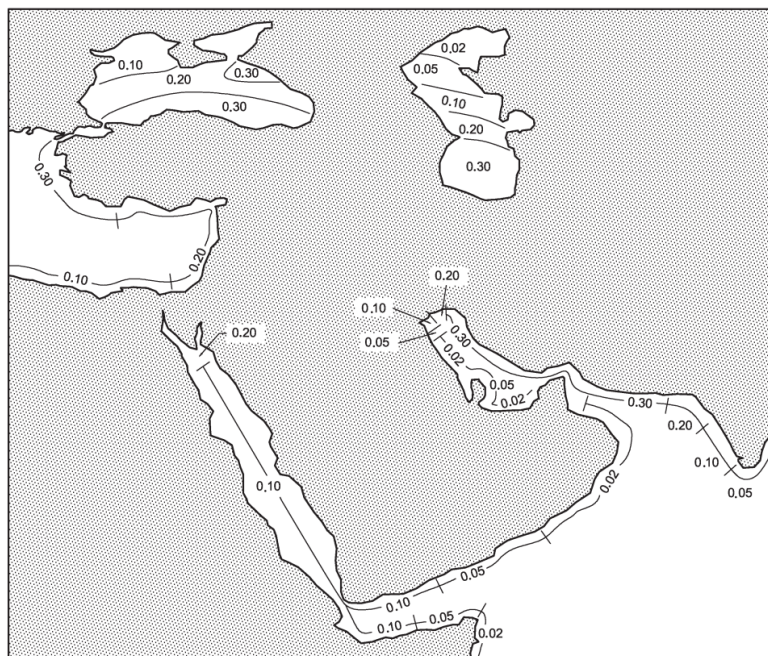
<sup>1</sup> Ultimate Limit State

<sup>2</sup> Abnormal Limit State

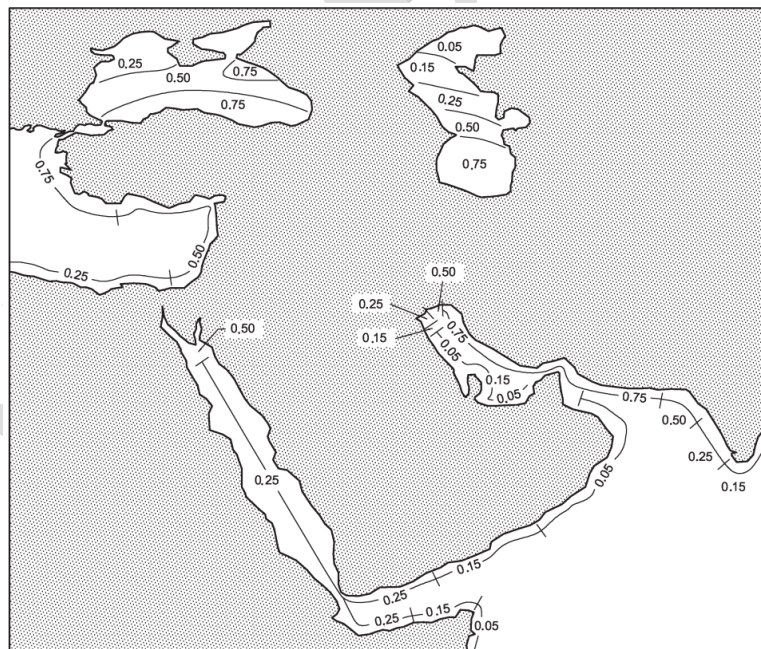
<sup>3</sup> Extreme Level Earthquake

<sup>4</sup> Abnormal Level Earthquake

<sup>5</sup> Exposure Level



شکل ۱ کانتور پارامتر شتاب طیفی (بر حسب  $g$ ) در زمان تناوب یک ثانیه برای آب‌های ایران در نسبت میرایی ۰.۵٪



شکل ۲ کانتور پارامتر شتاب طیفی (بر حسب  $g$ ) در زمان تناوب ۰.۲ ثانیه برای آب‌های ایران در نسبت میرایی ۰.۵٪

چنانچه استفاده از رویکرد طراحی ساده<sup>۱</sup> مجاز باشد می‌توان از نقشه پهنه‌بندی خطر (شکل ۱ و شکل ۲) برای زلزله با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال استفاده کرد. در این موارد باید با استفاده از ضرایب مقیاس مناسب برای تعیین آثار زلزله استفاده شود.

### ۳- اصول و روش‌های طراحی لرزه‌ای

#### ۳-۱ اصول طراحی

در این بخش، نحوه طراحی سازه فراساحلی برای تحریک پایه (شتاب، سرعت و جابجایی) ناشی از جنبش‌های زمین ارائه می‌گردد. سکوه‌ای واقع در مناطق دارای لرزه‌خیزی فعال باید برای زلزله سطح خطر شدید (ELE) با استفاده از حالت حدی نهایی (ULS) و زلزله سطح خطر نادر (ALE) با استفاده از حالت حدی غیر عادی (ALS) طراحی شوند.

ضوابط حالت حدی نهایی (ULS) برای تأمین ابعاد مناسب و همچنین سختی و مقاومت کافی منظور می‌شود تا هیچ گونه آسیب سازه‌ای جدی در تراز از خطر زلزله با احتمال کم فراگذشت در طی عمر بهره‌برداری سکو ایجاد نگردد. زلزله طراحی برای این حالت حدی، زلزله سطح خطر شدید (ELE) است. در این سطح خطر توقف فرآیند بهره‌برداری قابل پذیرش است اما سازه باید پس از رخداد این زلزله مورد بازرسی قرار گیرد.

ضوابط حالت حدی غیر عادی (ALS) برای اطمینان از وجود مقاومت باقی مانده کافی، ظرفیت جابجایی و استهلاک انرژی مناسب برای تحمل چرخه‌های تغییر مکان غیر ارتجاعی بدون از دست رفتن یکپارچگی سازه‌ای در سازه سکو و شالوده می‌باشد، اگرچه ممکن است آسیب سازه‌ای نیز رخ دهد. زلزله طراحی برای این حالت حدی، زلزله سطح خطر نادر (ALE) است. این سطح خطر بیانگر زلزله‌ای با شدت غیر عادی و احتمال وقوع بسیار ناچیز در طول عمر بهره‌برداری سکو می‌باشد. این تراز از زلزله می‌تواند موجب آسیب قابل توجه به سکو گردد، اگرچه طراحی سازه باید به نحوی صورت گیرد که یکپارچگی کلی سازه‌ای با هدف اجتناب از فروریزش سکو که منجر به خسارات جانی یا آسیب زیست محیطی عمده می‌گردد، حفظ شود.

دوره‌های بازگشت برای هر دو زلزله ELE و ALE وابسته به تراز مواجهه و شدت مورد انتظار از زلزله‌ها می‌باشد. احتمال خرابی سالانه شکست در بند ۳-۴ این راهنما ارائه شده است که می‌تواند توسط کارفرما و با توجه به اهداف عملکردی یا الزامات منطقه‌ای تغییر کند.

<sup>۱</sup> Simplified Design Approach

## ۲-۳ روش‌های طراحی لرزه‌ای

### ۲-۳-۱ کلیات

دو روش برای طراحی لرزه‌ای در این پیوست ارائه شده است. استفاده از روش اول که به روش ساده شده موسوم است، فقط در مواقعی مجاز است که آثار زلزله بر طراحی سکو حاکم نشود. روش دوم که روش تفصیلی<sup>۱</sup> نام دارد باید در مواردی که اثر زلزله حاکم بر طراحی سکو است مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب روش مناسب وابسته به تراز مواجهه سکو، شدت زلزله و مشخصات رخدادهای لرزه‌ای مورد انتظار است. در روش ساده شده، می‌توان از نقشه‌های پهنه‌بندی (شکل ۱ و شکل ۲) استفاده نمود در حالی که روش تفصیلی نیازمند انجام مطالعات ویژه ساختگاه می‌باشد. در هر دو مورد، می‌توان از روش ساده شده برای ارزیابی سکوه‌های موجود و غربال‌گری طرح توسعه سکوه‌های جدید استفاده کرد. در شکل ۳ روند انتخاب و گام‌های انجام هر دو روش ارائه شده است.

### ۲-۳-۲ طراحی بر مبنای زلزله سطح خطر شدید (ELE)

طی رخداد زلزله ELE، اجازه داده می‌شود اعضای سازه و اجزای شالوده به صورت موضعی و محدود شده رفتاری غیر ارتجاعی داشته باشند (به عنوان مثال رخداد تسلیم در فولاد و ترک‌خوردگی کششی در بتن). به این ترتیب، روند طراحی برای زلزله ELE اساساً بر مبنای روش‌های تحلیل خطی سازه است. به عنوان نمونه آثار غیر خطی اندرکنش خاک-سازه به صورت خطی منظور می‌شود. اما در صورتی که از جداساز لرزه‌ای یا سامانه‌های غیر فعال استهلاک انرژی استفاده شود، لازم است تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی انجام شود.

در سکوه‌های در معرض تحریک ناشی از زلزله، یکی از دو روش زیر را می‌توان برای کنترل طراحی سازه در برابر رخداد زلزله ELE به کار گرفت:

الف- روش تحلیل طیف پاسخ

ب- روش تحلیل تاریخچه زمانی

در هر دو روش، تحریک پایه باید ترکیبی از دو مؤلفه افقی و یک مؤلفه قائم باشد. مقادیر مناسب میرایی سازگار با سطوح تغییرشکل متناظر با زلزله ELE را باید در تحلیل منظور نمود. در مورد انتخاب نسبت میرایی مناسب، لازم است استاندارد قابل اعمال بر اساس نوع سازه فراساحلی در صورت وجود مورد استفاده قرار گیرد<sup>۲</sup>. مقادیر بزرگتر میرایی ناشی از هیدرودینامیک یا تغییرشکل خاک را باید با مطالعات ویژه تعیین نمود. می‌توان برای مدل‌سازی شالوده از فنرهای ارتجاعی معادل و در

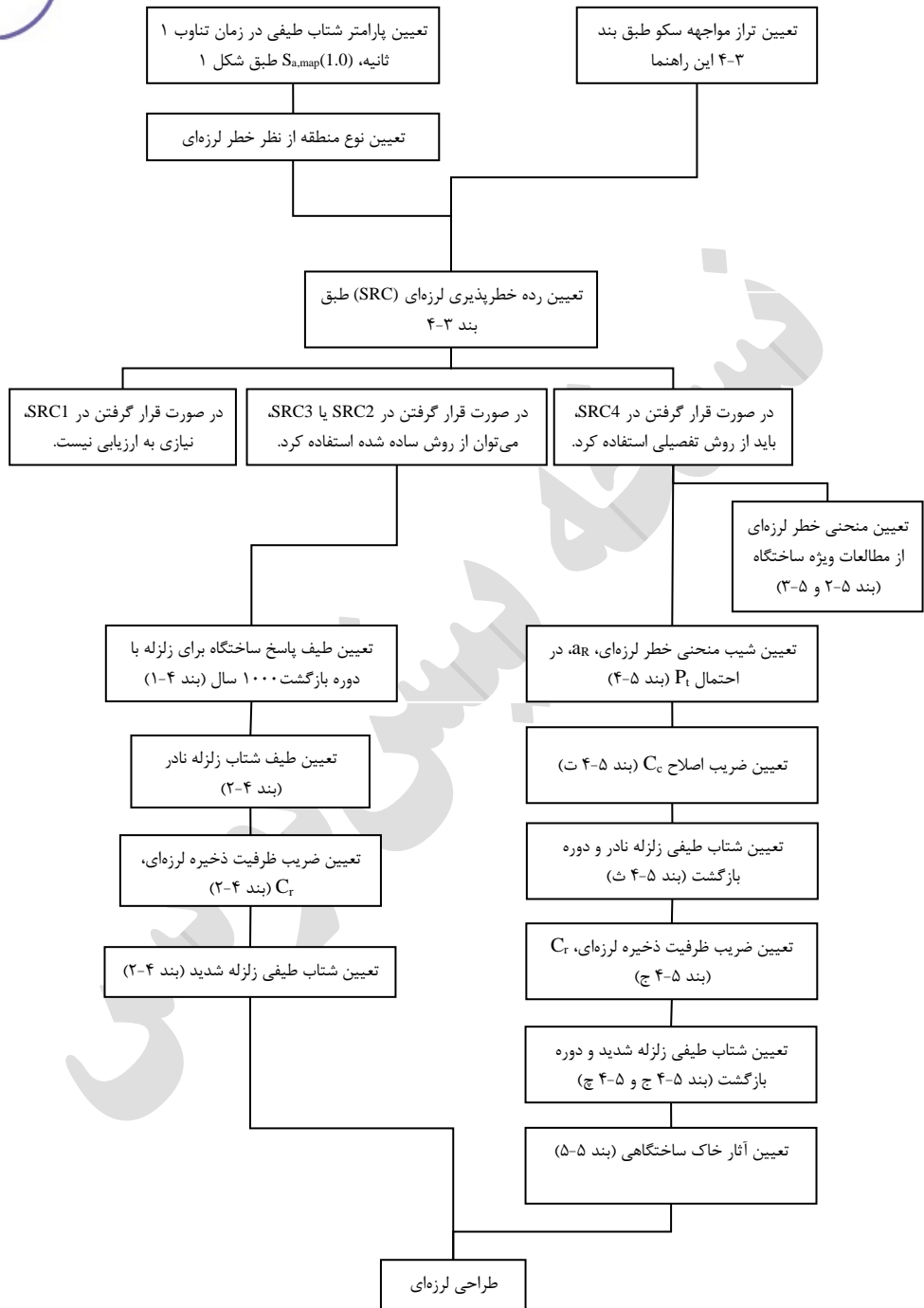
<sup>۱</sup> Detailed Method

<sup>۲</sup> استانداردهای مربوط به این بخش شامل ISO 19902، ISO 19903، API 2A-WSD، API 2N، ISO 19904 (تمام بخش‌ها)، ISO 19905 (تمام بخش‌ها) و ISO 19906 می‌باشد. به بند مراجع رجوع شود.

صورت لزوم از اجزای جرم و میراگر استفاده کرد. لازم است وابستگی فرکانسی مودها مورد توجه قرار گیرد. مقادیر سختی و میرایی باید با سطوح تغییرشکل خاک در زلزله ELE سازگار باشد. در تحلیل طیف پاسخ، باید از روش‌های ترکیب پاسخ در سه راستای متعامد با لحاظ وابستگی بین مودهای نوسان استفاده کرد. در صورتی که پاسخ ناشی از هر مؤلفه زلزله به طور جداگانه محاسبه می‌شود، پاسخ‌های سه مؤلفه زلزله را می‌توان با استفاده از روش جذر مجموع مربعات (SRSS) تعیین کرد. به جای این روش می‌توان سه مؤلفه پاسخ را به طور خطی با هم ترکیب کرد، با این فرض که هنگامی که دو مؤلفه در ۴۰ درصد بیشینه مقدار خود هستند، مؤلفه سوم در بیشینه مقدار خود قرار داشته باشد (ترکیب به صورت ۱۰۰-۴۰-۴۰). در این روش، علامت هر پارامتر پاسخ را باید طوری انتخاب کرد که ترکیب پاسخ‌ها بیشینه گردد.

هنگامی که از تحلیل تاریخچه زمانی استفاده می‌شود، حداقل ۴ زوج شتابنگاشت باید برای منظور کردن آثار تصادفی جنبش‌های زمین مورد استفاده قرار گیرد. شتابنگاشت‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که نماینده رخداد غالب زلزله ELE باشند. در هر گام زمانی، تحلیل انجام می‌شود و کنترل‌های آیین‌نامه‌ای اجزای سازه در هر گام صورت می‌گیرد و بیشینه مقدار به دست آمده برای هر عضو طی تاریخچه زمانی پاسخ برای ارزیابی عملکرد عضو مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که برای نصف یا بیشتر از نصف رکوردها مقادیر بیشینه نسبت‌های تنش از ۱/۰ کوچکتر باشد، روش طراحی برای زلزله ELE قابل قبول است. در صورتی که تعداد زوج شتابنگاشت‌های مورد استفاده کمتر از ۷ باشد، لازم است ضریب ۱/۰۵ در مقادیر دامنه شتابنگاشت‌ها ضرب شود.

تجهیزات مستقر روی عرشه باید برای تحمل جنبش‌های زمین که به سازه وارد می‌شود طراحی شوند. حرکات عرشه می‌تواند از حرکت بستر دریا شدیدتر باشد. روش تحلیل تاریخچه زمانی برای تعیین جنبش‌های عرشه (به ویژه جنبش‌های نسبی) و طیف‌های پاسخ حرکت عرشه مورد استفاده قرار گیرد. آثار زلزله ELE روی خطوط لوله، لوله‌های هادی، رایزرها و سایر اجزای بحرانی ایمنی باید منظور گردد.



شکل ۳ فرآیند طراحی لرزه‌ای سکوه‌های فراساحلی

## ۳-۲-۳ طراحی بر مبنای زلزله سطح خطر نادر (ALE)

در بسیاری موارد، طراحی سازه برای مقاومت در برابر زلزله نادر بدون هیچگونه رفتار غیرخطی فاقد توجیه اقتصادی است. بنابراین در کنترل سازه برای زلزله سطح خطر نادر، می‌توان از روش‌های تحلیل غیرخطی، مثلاً امکان رفتار خمیری اعضا، رسیدن شمع‌ها به ظرفیت محوری خود یا توسعه رفتار خمیری در آنها، و ایجاد لغزش در شالوده‌های پیرامونی<sup>۱</sup> استفاده کرد. در عمل، طراحی بر اساس ترکیبی از مقاومت ذخیره، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی برای مقابله با آثار زلزله سطح خطر نادر انجام می‌شود.

مدل‌سازی سازه و شالوده برای تحلیل در این سطح خطر باید دربردارنده زوال احتمالی در سختی و مقاومت اجزا تحت رفت و برگشت بارهای چرخه‌ای باشد. تحلیل در این سطح خطر باید بر پایه دقیق‌ترین تخمین‌ها از پارامترهایی نظیر مقاومت مصالح، مقاومت خاک و سختی خاک باشد. بنابراین باید در رویکرد محافظه‌کارانه پیشین برای طراحی در زلزله سطح خطر شدید، ELE، تجدید نظر نمود.

در سازه‌های در معرض تحریک ناشی از زلزله، یکی از دو روش زیر را می‌توان برای طراحی سازه در برابر رخداد زلزله ALE به کار گرفت:

الف- روش تحلیل استاتیکی فزاینده خطی<sup>۲</sup> یا روش تغییرمکان حداکثر<sup>۳</sup>

ب- روش تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی

در بسیاری از موارد دو روش فوق مکمل یکدیگر هستند. الزامات بند ۳-۲-۲ درباره ترکیب تحریک پایه ناشی از سه مولفه متعامد و همچنین میرایی در این بخش نیز باید رعایت شود. از تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی می‌توان برای تعیین موقعیت‌های حاکم احتمالی ایجاد سازوکار خرابی، یا تعیین جابجایی کلی سکو (فراتر از زلزله سطح خطر شدید) سود برد. جابجایی کلی سازه را می‌توان با انجام تحلیل تحت جابجایی کنترل‌شده تعیین کرد. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، دقیق‌ترین روش برای تحلیل در زلزله سطح خطر نادر است. در این روش، حداقل ۴ زوج شتابنگاشت باید برای منظور کردن آثار تصادفی جنبش‌های زمین مورد استفاده قرار گیرد. شتابنگاشت‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که نماینده رخداد زلزله ALE باشند. در صورتی که تعداد زوج شتابنگاشت‌های مورد استفاده مساوی یا بیشتر از ۷ باشد، حفظ پایداری کلی سازه‌ای باید حداقل در نیمی از تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی تایید گردد. در صورت استفاده از کمتر از ۷ زوج شتابنگاشت، این پایداری باید در ۴ تحلیل محرز شود.

<sup>1</sup> Skirt Foundation

<sup>2</sup> Pushover Analysis

<sup>3</sup> Extreme displacement Method



برای ارزیابی پایداری سیستم‌های منعطف یا دارای اجزای نرم (مثلاً مهارها<sup>۱</sup> در سکوه‌های پایه کششی یا عملکرد قابی شالوده سکوی پایه کششی در بار جانبی)، می‌توان از روش‌های جابجایی حداکثر استفاده کرد. در این روش‌ها، سیستم در بیشینه جابجایی ناشی از زلزله سطح خطر نادر، شامل تاثیر بار روی سازه سیستم، ارزیابی می‌شود. بدنه سازه‌ای سکوی پایه کششی برای بارهای مربوطه و به صورت ارتجاعی طراحی می‌شود. تاثیر جابجایی‌های بزرگ سازه روی خطوط لوله، لوله‌های هادی، رایزرها و سایر تجهیزات مهم از لحاظ ایمنی به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۳ اطلاعات شتاب طیفی

پارامترهای شتاب طیفی ارائه شده در شکل ۱ و شکل ۲ روی سنگ بستر (خاک نوع A/B در بند ۴-۱) و برای دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال به دست آمده است. در صورتی که از روش ساده شده (بند ۴) در طراحی لرزه‌ای سکو استفاده شود، می‌توان از این پارامترهای شتاب طیفی استفاده کرد. در روش ساده شده نیز به جای این مقادیر می‌توان از نتایج مطالعات ویژه ساختگاه استفاده کرد.

### ۳-۴ رده خطرپذیری لرزه‌ای<sup>۲</sup>

پیچیدگی ارزیابی پاسخ لرزه‌ای و روش طراحی متناسب با آن وابسته به رده خطرپذیری لرزه‌ای سکو به شرح زیر می‌باشد. ساخت سکو با میزان تراز مواجهه L2 در نواحی لرزه‌خیز مجاز نیست، زیرا امکان تخلیه سکو قبل از وقوع زلزله وجود ندارد. سطوح شتاب طیفی، تعریف‌کننده مناطق لرزه‌ای برای تعیین روش طراحی لرزه‌ای مناسب می‌باشند. انتخاب روش طراحی وابسته به میزان تراز مواجهه سکو (تعریف شده در همین بند و دستورالعمل API-RP 2A) و شدت جنبش‌های زمین می‌باشند. برای تعیین رده خطرپذیری لرزه‌ای باید مراحل زیر طی شود:

الف- تعیین پارامترهای شتاب طیفی در زمان تناوب یک ثانیه،  $S_{a,map}(1.0)$  بر اساس منطقه خطر زلزله (از روی شکل ۱ و شکل ۲ یا مطالعات ویژه ساختگاه) و انتخاب کد منطقه با توجه به جدول ۱

جدول ۱ مشخص کردن کد منطقه خطر زلزله در ساختگاه مورد نظر

>0.45	0.26-0.45	0.11-0.25	0.03-0.10	<0.03	$S_{a,map}(1.0)$
۴	۳	۲	۱	۰	کد منطقه خطر زلزله

<sup>1</sup> Tethers

<sup>2</sup> Seismic Risk Category (SRC)

ب- تعیین تراز مواجهه سکو با مخاطرات: احتمال سالانه خرابی متناظر با هر میزان مواجهه در جدول ۲ ارائه شده است. این مقادیر در روش تفصیلی برای تعیین بارهای لرزه‌ای مورد نیاز است. در صورت درخواست کارفرما یا سایر مراجع ذیصلاح، استفاده از مقادیر احتمال دیگر در روش تفصیلی امکان‌پذیر است. روش ساده شده تحلیل لرزه‌ای به مقادیر احتمال هدف داده شده در جدول ۲ کالیبره شده است.

جدول ۲ احتمال هدف شکست سالانه،  $P_f$

تراز مواجهه	$P_f$
L1	$4 \times 10^{-4} = 1/2500$
L3	$2.5 \times 10^{-3} = 1/400$

رده خطرپذیری لرزه‌ای (SRC) سکو بر اساس تراز مواجهه و منطقه لرزه‌ای ساختگاه از جدول ۳ تعیین می‌شود:

جدول ۳ رده خطرپذیری لرزه‌ای (SRC)

تراز مواجهه		منطقه لرزه‌ای ساختگاه
L3	L1	
SRC1	SRC1	۰
SRC2	SRC3	۱
SRC2	SRC4	۲
SRC2	SRC4	۳
SRC3	SRC4	۴

در صورتی که آثار جانبی لرزه‌ای طراحی کوچکتر از ۵ درصد کل آثار قائم شامل مجموع آثار دائمی و گذرا منهای آثار شناوری گردد، سکوه‌های دارای رده خطرپذیری لرزه‌ای ۳ و ۴ (SRC 3,4) را می‌توان به عنوان رده خطرپذیری ۲ منظور کرد.

### ۳-۵ الزامات طراحی لرزه‌ای

در جدول ۴، الزامات طراحی لرزه‌ای برای هر رده خطرپذیری ارائه شده است. این الزامات در شکل ۳ نیز نشان داده شده است.

در مناطق فعال لرزه‌ای، طراح باید سازه را به صورت مستحکم و شکل‌پذیر طرح کند به نحوی که قادر به مقاومت در برابر جابجایی‌های حداکثر فراتر از مقادیر معمول طراحی باشد. چنانچه برای یک سکوی مفروض امکان‌پذیر باشد، الزامات معماری، جزئیات طراحی و توصیه‌های طراحی شکل‌پذیر باید برای همه رده‌ها (غیر از SRC1) رعایت شود.

جدول ۴ الزامات طراحی لرزه‌ای

رده خطرپذیری لرزه‌ای	روش تحلیل	ارزیابی فعالیت لرزه‌ای	تحلیل غیر خطی ALE
۱	-	نقشه‌های ISO یا منطقه‌ای	-
۲	ساده شده	مطالعات ویژه ساختگاه، نقشه‌های ISO یا منطقه‌ای	مجاز
۳ <sup>۱</sup>	ساده شده	مطالعات ویژه ساختگاه	توصیه شده
	تفصیلی	مطالعات ویژه ساختگاه	توصیه شده
۴	تفصیلی	مطالعات ویژه ساختگاه	الزامی

<sup>۱</sup> در سکوه‌های SRC3، در اغلب موارد روش ساده شده محافظه‌کارانه‌تر از روش تفصیلی است. برای ارزیابی فعالیت لرزه‌ای، نتایج مطالعه احتمالاتی ویژه ساختگاه (PSHA) طبق بند ۵-۲ در صورت وجود، ترجیح داده شده، باید مورد استفاده قرار گیرد؛ در غیر این صورت می‌توان از نقشه‌های لرزه‌ای منطقه‌ای یا ISO استفاده کرد. فرآیند تفصیلی تحلیل لرزه‌ای نیاز به داشتن نتایج از مطالعات احتمالاتی ویژه ساختگاه دارد، در صورتی که روش ساده‌شده را می‌توان همراه با نتایج مطالعات احتمالاتی ویژه ساختگاه یا نقشه‌های لرزه‌ای (منطقه‌ای یا ISO) به کار گرفت.

#### ۴- روش تحلیل لرزه‌ای ساده شده<sup>۱</sup>

##### ۴-۱ طبقه‌بندی خاک و شکل طیفی

پس از تعیین شتاب‌های طیفی روی سنگ بستر در زمان تناوب  $0.2/S_{a, \text{map}}$  ثانیه، و  $1/0$  ثانیه،  $S_{a, \text{map}}(1.0)$ ، (با استفاده از شکل ۱ و شکل ۲ یا مطالعات ویژه ساختگاه) برای تعیین طیف پاسخ ساختگاه متناظر با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال باید مراحل زیر صورت پذیرد:

الف- تعیین طبقه خاک به شرح زیر:

طبقه خاک وابسته به خاک زیر بستر دریا است که سکو روی آن بنا می‌شود و تابعی از مشخصات میانگین ۳۰ متر فوقانی بستر دریا می‌باشد (جدول ب-۵)

سرعت میانگین موج برشی در ۳۰ متر فوقانی بستر مؤثر دریا،  $\bar{v}_s$ ، از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$\bar{v}_s = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{s,i}}} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن:

n: تعداد لایه‌های مجزای خاک در ۳۰ متر مؤثر فوقانی بستر دریا

$d_i$ : ضخامت لایه i

$v_{s,i}$ : سرعت موج برشی در لایه i

<sup>1</sup> Simplified Seismic Action Procedure

جدول ۵ تعیین رده ساختگاه

مشخصات میانگین در ۳۰ متر فوقانی بستر موثر دریا			جنس نیمرخ خاک	طبقه خاک
مقاومت برشی زهکشی نشده $\bar{c}_u$ در خاک رسی (kPa)	مقاومت نرمال شده نفوذ مخروط $\bar{q}_{cl}$ در خاک ماسه‌ای	سرعت موج برشی خاک، $\bar{v}_s$ (m/s)		
غیر قابل کاربرد	غیر قابل کاربرد	$\bar{v}_s > 750m/s$	سنگ سخت یا سنگ با ضخامت لایه رسوبی نرم کوچکتر از ۵ متر	A/B
$\bar{c}_u \geq 200$	$\bar{q}_{cl} \geq 200$	$350 < \bar{v}_s \leq 750m/s$	خاک بسیار متراکم و سنگ نرم	C
$80 \leq \bar{c}_u < 200$	$80 \leq \bar{q}_{cl} < 200$	$180 < \bar{v}_s \leq 350m/s$	خاک سخت تا بسیار سخت	D
$\bar{c}_u < 80$	$\bar{q}_{cl} < 80$	$120 < \bar{v}_s \leq 180m/s$	خاک نرم تا سخت	E
هر نیمرخ خاک که در طبقه A تا E قرار نگیرد و شامل یک یا بیشتر از موارد زیر باشد: $\bar{v}_s \leq 180m/s$ - خاک‌های آسیب‌پذیر در خرابی یا شکست احتمالی ناشی از مخاطرات لرزه‌ای نظیر خاک‌های روانگرا، رس‌های بسیار حساس، خاک‌های سیمانی شده ضعیف ریزشی - خاک لجنی <sup>۲</sup> با ضخامت بزرگتر از ۱۰ متر - لایه‌های خاک حاوی گاز پر فشار یا فشار حفره‌ای بیشتر از ۳۰ درصد نسبت به فشار لایه درجای سربار - لایه‌های با ضخامت بزرگتر از ۲ متر با اختلاف فاحش سرعت موج برشی (بیش از ۳۰ درصد) و یا مقاومت برشی زهکشی نشده (بیش از ۵۰ درصد) در مقایسه با لایه‌های مجاور			-	F
<sup>۱</sup> این پارامتر از رابطه $q_{cl} = (q_c/p_a) \times (p_a/\sigma'_{v0})^{0.5}$ به دست می‌آید که در آن: $q_c$ : مقاومت نفوذ مخروط $p_a$ : فشار اتمسفر برابر با ۱۰۰ کیلوپاسکال $\sigma'_{v0}$ : فشار موثر قائم <sup>۲</sup> رس حاوی بیشتر از ۳۰ درصد مصالح آهکی یا سیلیسی با منشأ آلی				

به گونه مشابه، میانگین مقاومت نفوذ مخروط،  $\bar{q}_{cl}$ ، یا مقاومت برشی زهکشی نشده،  $\bar{c}_u$ ، باید مطابق رابطه ۱ و با جایگزینی  $q_{cl}$  یا  $c_u$  به جای  $v_s$  تعیین شود. در طبقه‌بندی خاک برای شالوده‌های عمیق، باید ۳۰ متر خاکی که دقیقاً زیر ترازهای مقاومتی شمع، که عموماً برای آثار جانبی و قائم مقادیر متفاوتی است، منظور شود. در شالوده‌های عمیق تراز مقاومت باید در عمق مرکز سطح نمودار نیروهای مقاوم جانبی P-Y و نیروهای مقاوم قائم T-Z منظور گردد.

ب- تعیین ضرایب ساختگاهی  $C_a$  و  $C_v$  به شرح زیر:

- در شالوده‌های سطحی، ضرایب  $C_v$  و  $C_a$  از جدول ۶ و جدول ۷ به دست می‌آید. این ضرایب به رده ساختگاه، شتاب طیفی در زمان تناوب  $0.2$  ثانیه،  $S_{a,map}(0.2)$  و  $1/0$  ثانیه،  $S_{a,map}(1.0)$  وابسته است.
- در شالوده‌های عمیق، ضرایب  $C_v$  و  $C_a$  در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۶ مقادیر  $C_a$  برای شالوده‌های سطحی و شتاب طیفی در زمان تناوب  $0.2$  ثانیه

$S_{a,map}(0.2)$					رده ساختگاه
$\geq 1/25g$	$1/0g$	$0.75g$	$0.50g$	$\leq 0.25g$	
$1/0$	$1/0$	$1/0$	$1/0$	$1/0$	A/B
$1/0$	$1/0$	$1/1$	$1/2$	$1/2$	C
$1/0$	$1/1$	$1/2$	$1/4$	$1/6$	D
$0.9$	$0.9$	$1/2$	$1/7$	$2/5$	E
الف	الف	الف	الف	الف	F

الف مطالعات ژئوتکنیک ویژه ساختگاه و تحلیل دینامیکی پاسخ ساختگاه باید انجام شود.

جدول ۷ مقادیر  $C_v$  برای شالوده‌های سطحی و شتاب طیفی در زمان تناوب  $1/0$  ثانیه

$S_{a,map}(1.0)$					رده ساختگاه
$\geq 0.50g$	$0.40g$	$0.30g$	$0.20g$	$\leq 0.10g$	
$1/0$	$1/0$	$1/0$	$1/0$	$1/0$	A/B
$1/3$	$1/4$	$1/5$	$1/6$	$1/7$	C
$1/5$	$1/6$	$1/8$	$2/0$	$2/4$	D
$2/4$	$2/4$	$2/8$	$3/2$	$3/5$	E
الف	الف	الف	الف	الف	F

الف مطالعات ژئوتکنیک ویژه ساختگاه و تحلیل دینامیکی پاسخ ساختگاه باید انجام شود.

جدول ۸ مقادیر  $C_v$  و  $C_a$  برای شالوده‌های شمع عمیق

$C_v$	$C_a$	رده ساختگاه
$0.8$	$1/0$	A/B
$1/0$	$1/0$	C
$1/2$	$1/0$	D
$1/8$	$1/0$	E
الف	الف	F

پ- تعیین طیف شتاب افقی با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال در ساختگاه به شرح زیر:

۱- یک طیف شتاب لرزه‌ای باید بر اساس زمان‌های تناوب نوسان،  $T$ ، مشخص شده در شکل ۴ تعیین شود.

۲- در زمان‌های تناوب،  $T$ ، کوچکتر یا مساوی با ۰/۲ ثانیه مقدار شتاب طیفی،  $S_{a,site}(T)$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

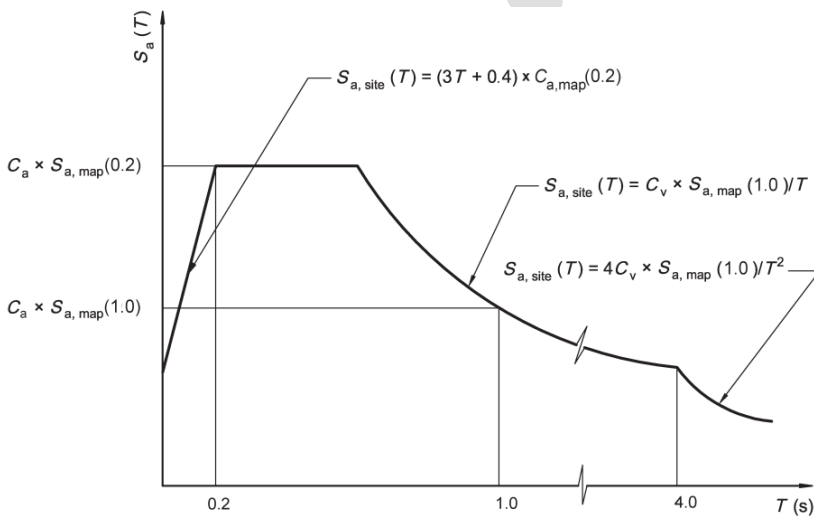
$$S_{a,site}(T) = (3T + 0.4)C_a \times S_{a,map}(0.2) \quad \text{رابطه ۲}$$

۳- در زمان‌های تناوب،  $T$ ، بزرگتر از ۰/۲ ثانیه و کوچکتر یا مساوی با ۴ ثانیه، مقدار شتاب طیفی،  $S_{a,site}(T)$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_{a,site}(T) = C_v \times S_{a,map}(1.0)/T \leq C_a \times S_{a,map}(0.2) \quad \text{رابطه ۳}$$

۴- در زمان‌های تناوب،  $T$ ، بزرگتر از ۴ ثانیه، می‌توان فرض کرد که کاهش شتاب طیفی به جای  $1/T$  با  $1/T^2$  صورت می‌گیرد یعنی:

$$S_{a,site}(T) = 4C_v \times S_{a,map}(1.0)/T^2 \quad \text{رابطه ۴}$$



شکل ۴ طیف شتاب زلزله با نسبت میرایی ۵ درصد

$T$ : زمان تناوب طبیعی سازه یک درجه آزادی

$C_a$  و  $C_v$ : ضرایب ساختگاهی

$S_a(T)$ : شتاب طیفی

$S_{a,site}(T)$ : شتاب طیفی ساختگاه متناظر با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال و زمان تناوب طبیعی نوسان  $T$

برای یک سازه با یک درجه آزادی

$S_{a, \text{map}}(1.0)$ : شتاب طیفی ساختگاه متناظر با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال و زمان تناوب طبیعی نوسان ۱/۰ ثانیه برای یک سازه با یک درجه آزادی برگرفته از نقشه شکل ۱

$S_{a, \text{map}}(0.2)$ : شتاب طیفی ساختگاه متناظر با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال و زمان تناوب طبیعی نوسان ۰/۲ ثانیه برای یک سازه با یک درجه آزادی برگرفته از نقشه شکل ۲

ت- شتاب طیفی قائم در ساختگاه در زمان تناوب  $T$  برابر با نصف شتاب متناظر افقی منظور شود. طیف قائم نباید به علت آثار عمق آب کاهش داده شود.

ث- طیف شتابی که با استفاده از مراحل فوق به دست آمده است متناظر با نسبت میرایی ۵ درصد می‌باشد. برای به دست آوردن طیف متناظر با سایر نسبت‌های میرایی دامنه‌های آن را می‌توان با اعمال ضریب اصلاح  $D$  به شرح زیر مقیاس نمود:

$$D = \frac{\ln(100/\eta)}{\ln(20)} \quad \text{رابطه ۵}$$

که  $\eta$  نسبت میرایی بر حسب درصد می‌باشد.

به عنوان جایگزینی برای روش ارائه شده در بند الف تا ث، طیف با خطر یکنواخت که از فرآیند تحلیل خطر احتمالاتی (PSHA) به دست می‌آید را می‌توان برای تعیین طیف طراحی ویژه ساختگاه با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال از طریق تحلیل تفصیلی دینامیکی پاسخ ساختگاه اصلاح نمود.

## ۴-۲ روش اعمال زلزله

طیف‌های شتاب لرزه‌ای طرح که به سازه اعمال می‌شود باید به شرح زیر تعیین گردد:

برای هر زمان تناوب نوسان،  $T$ ، شتاب‌های طیفی افقی و قائم در زلزله نادر، از مقادیر متناظر شتاب طیفی با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال (مطابق ردیف‌های پ و ت از بند ۴-۱) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S_{a, \text{ALE}}(T) = N_{\text{ALE}} \times S_{a, \text{site}}(T) \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن ضریب مقیاس،  $N_{\text{ALE}}$ ، ضریبی است که وابسته به تراز مواجهه سکو می‌باشد و از جدول ۹ به دست می‌آید.

جدول ۹ ضرایب مقیاس برای طیف زلزله نادر

تراز مواجهه سکو	ضریب مقیاس، $N_{\text{ALE}}$
L3	۰/۸۵
L1	۱/۶۰

شتاب‌های طیفی افقی و قائم در زمان تناوب نوسان،  $T$ ، در زلزله شدید (ELE) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{a, \text{ELE}}(T) = S_{a, \text{ALE}}(T)/C_r \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن  $C_r$  ضریب ظرفیت ذخیره لرزه‌ای برای سیستم سازه‌ای است که منظورکننده مقاومت ذخیره استاتیکی و قابلیت تحمل تغییرشکل‌های غیرارتجاعی بزرگ برای هر نوع سکو است (به عنوان مثال، فولاد در برابر بتن مسلح). ضریب  $C_r$  بیانگر نسبت شتاب طیفی ایجادکننده شکست فاجعه‌بار سیستم سازه‌ای به شتاب طیفی زلزله شدید (ELE) است. مقدار  $C_r$ ، باید قبل از طراحی سکو به گونه‌ای تعیین شود تا طرح سازه اقتصادی گردد و در برابر آسیب‌های ناشی از زلزله شدید (ELE) مقاومت کرده، همزمان الزامات عملکردی مربوط به زلزله نادر (ALE) را برآورده نماید. مقادیر  $C_r$ ، را می‌توان با ارزیابی تفصیلی سازه‌های مشابه طراحی شده قبلی، تخمین زد. مقادیر  $C_r$ ، برای سکوه‌های فولادی ثابت در جدول ۱۰ آمده است. مقادیر  $C_r$  به غیر از مقادیر توصیه شده این نشریه را می‌توان از سایر استانداردهای موجود برای طراحی انواع مختلف سازه‌های فراساحلی<sup>۱</sup> به کار گرفت ولی این مقادیر باید با استفاده از یک تحلیل ALE صحت‌سنجی شود.

برای اجتناب از دوره‌های بازگشت بسیار کوتاه زلزله شدید (ELE)، مقادیر  $C_r$ ، برای سکوه‌های L1 نباید از ۲/۸ و برای سکوه‌های L3 نباید از ۲/۱۰ بزرگتر منظور شود.

جدول ۱۰ ضرایب  $C_r$  در جکت فولادی سکوه‌های فراساحلی ثابت

$C_r$	مشخصات طراحی سازه
حداکثر برابر با ۲/۸۰ تأیید شده با تحلیل	به توصیه‌های طراحی شکل‌پذیر مطابق بند 5.3.6.4.3 نشریه API RP2A عمل شده، تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) با توجه به توصیه‌های مندرج در این راهنما به منظور صحت‌سنجی عملکرد کلی سکو در شرایط زلزله نادر (ALE) انجام شده است.
حداکثر برابر با ۲/۱۰ تأیید شده با تحلیل	به توصیه‌های طراحی شکل‌پذیر مطابق بند 5.3.6.4.3 نشریه API RP2A عمل شده، اما تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) به منظور صحت‌سنجی عملکرد کلی سکو در شرایط زلزله نادر (ALE) انجام نشده است.
۱/۴۰	سکو حداقل دارای سه پایه است و الگوی مهاربندی آن شامل اعضای قطری از پایه به پایه همراه با اعضای افقی، یا مهاربندی‌های ضربدری بدون اعضای افقی باشد. نسبت لاغری (KL/r) مهاربندی قطری در قاب‌های قائم به کوچکتر از ۸۰ محدود شده، همچنین رابطه $F_y D/Et \leq 0.069$ برقرار باشد. در مهاربندی‌های ضربدری قاب‌های قائم نیز این محدودیت‌ها برقرار است و طول L مورد استفاده وابسته به الگوی بار وارد بر مهاربند ضربدری است. تحلیل غیرخطی برای صحت‌سنجی عملکرد تراز شکل‌پذیری انجام نمی‌پذیرد.
۱/۱۰	در سایر موارد

<sup>۱</sup> استانداردهای قابل کاربرد برای طراحی انواع سازه‌های فراساحلی شامل ISO 19902، ISO 19903، API 2A-WSD، تمام بخش‌های ISO 19904 و ISO 19905 و همچنین ISO 19906 می‌باشد.





## ۵- روش تفصیلی تعیین آثار زلزله

### ۵-۱ ارزیابی خطر لرزه‌ای ویژه ساختگاه

طیف شتاب طرح، پرکاربردترین متغیر ورودی لرزه‌ای برای تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌های فراساحلی است. در مطالعات ویژه ساختگاه، طیف شتاب طرح معمولاً از طیف شتابی که از تحلیل احتمالاتی خطر زلزله (PSHA) با برخی اصلاحات احتمالی بر اساس شرایط خاک ساختگاه محاسبه می‌شود به دست می‌آید. تحلیل تعیینی خطر زلزله (DSHA) را می‌توان برای تکمیل نتایج تحلیل خطر احتمالاتی به کار گرفت. این تحلیل‌ها در بندهای ۵-۲ تا ۵-۵ تشریح شده‌اند.

### ۵-۲ ارزیابی احتمالاتی خطر زلزله (PSHA)

مراحل انجام تحلیل خطر احتمالاتی زلزله در شکل ۵ نشان داده شده است. در روش احتمالاتی، جنبش‌های زمین در ساختگاه مشخص با منظور کردن احتمال رخداد زلزله‌ها با بزرگای متفاوت روی همه چشمه‌های لرزه‌زای محتمل (چشمه‌های خطی یا سطحی) که می‌توانند روی ساختگاه تأثیر بگذارند، تخمین زده می‌شود (شکل ۵ الف). در یک تحلیل PSHA، تصادفی بودن کاهندگی امواج لرزه‌ای گذرنده از چشمه لرزه‌زا تا ساختگاه نیز مد نظر قرار می‌گیرد (شکل ۵ ب). تجمیع احتمالات روی چشمه‌های لرزه‌زای گوناگون، احتمال کلی فراگذشت سالانه برای سطح مشخصی از بیشینه شتاب لرزه‌ای زمین (PGA) یا شتاب طیفی را به دست می‌دهد (شکل ۵ پ). منحنی احتمال فراگذشت در برابر بیشینه شتاب زمین (PGA) یا پاسخ یک نوسان‌گر یک درجه آزادی (به عنوان مثال شتاب طیفی، سرعت طیفی، یا تغییرمکان طیفی) معمولاً با عنوان "منحنی خطر" شناخته می‌شود. پاسخ طیفی با زمان تناوب طبیعی نوسانگر متغیر است، بنابراین گروهی از منحنی‌های خطر برای زمان‌های تناوب متفاوت T به دست می‌آید (شکل ۵ پ).

نتایج یک PSHA، برای تعیین طیف با خطر یکنواخت (شکل ۵ ت)، که در آن تمام نقاط روی طیف متناظر با احتمال فراگذشت سالانه یکسانی می‌باشند، استفاده می‌شود. رابطه میان دوره بازگشت یک طیف با خطر یکنواخت و احتمال فراگذشت سالانه،  $P_e$ ، عبارت است از:

$$T_{return} = \frac{-1}{\ln(1 - P_e)}$$

رابطه ۸

که در آن  $T_{return}$  دوره بازگشت بر حسب سال است.

از آنجا که PSHA، روشی مبتنی بر احتمالات است، منظور کردن عدم قطعیت در تعریف مقادیر ورودی مانند بیشینه بزرگای یک چشمه مشخص، رابطه بازرخداد بزرگا، رابطه کاهندگی و حدود جغرافیایی تعیین محل یک چشمه دارای اهمیت است.

نتایج تحلیل خطر احتمالاتی (PSHA) مجموعه‌ای از منحنی‌های خطر هستند که هر یک مربوط به شتاب طیفی متناظر با زمان تناوب طبیعی سازه نظیر  $T_1, T_2, \dots, T_N$  می‌باشد (شکل ۵ پ). به علت وجود عدم قطعیت در مقادیر ورودی PSHA، هریک از این منحنی‌های خطر دارای محدوده‌ای از عدم قطعیت است. میانگین (یا مقدار مورد انتظار) هر منحنی خطر باید برای تهیه یک طیف خطر یکنواخت متناظر با یک احتمال فراگذشت مشخص،  $P_e$ ، استفاده شود (شکل ۵ ت). در بند ۴-۵ منظور از منحنی خطر، مقادیر میانگین آن می‌باشد.

### ۳-۵ ارزیابی تعیینی خطر زلزله (DSHA)

مقادیر تعیینی پیشینه جنبش زمین در هر ساختمان با در نظر گرفتن یک رخداد با بزرگای مشخص و فاصله معین از ساختمان به دست می‌آید. برای انجام تحلیل خطر تعیینی، اطلاعات زیر مورد نیاز است:

- تعریف چشمه لرزه‌زا (به عنوان مثال گسل شناخته شده) و موقعیت آن نسبت به ساختمان
- تعریف بزرگای زلزله طرح که آن چشمه لرزه‌زا قادر به ایجاد آن باشد
- یک رابطه کاهندگی میان بزرگا و فاصله

ممکن است در مجاورت یک ساختمان چندین گسل شناخته شده فعال وجود داشته باشد. برای هر گسل یک مقدار پیشینه بزرگا تعریف می‌شود. این مقدار تابعی از طول گسل و داده‌های تاریخی مربوط به زلزله‌های گذشته ویژه آن چشمه خاص می‌باشد.

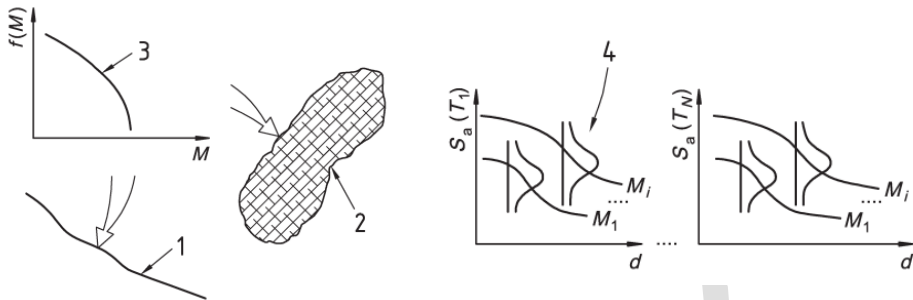
تخمین‌های تعیینی جنبش زمین مرتبط با یک دوره بازگشت مشخص، مثلاً ۱۰۰۰ سال، نمی‌باشد؛ اگرچه رخداد مشخص زلزله مورد استفاده می‌تواند دوره بازگشت مرتبط با خود را داشته باشد. دوره بازگشت رخداد پیشینه برای یک گسل مشخص می‌تواند از چند صد سال تا چند هزار سال، بسته به نرخ فعالیت گسل، متغیر باشد.

برای تکمیل نتایج PSHA، می‌توان از تحلیل خطر لرزه‌ای تعیینی استفاده نمود.

### ۴-۵ تعیین آثار زلزله

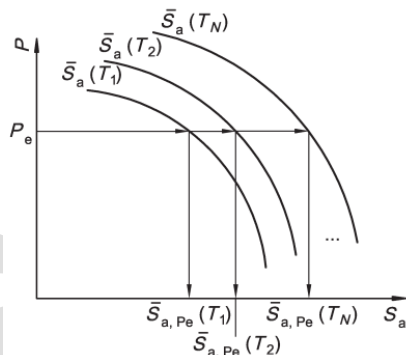
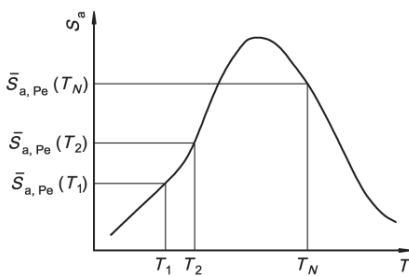
مبنای این فرآیند، نتایج حاصل از تحلیل خطر احتمالاتی زلزله (بند ۲-۵ و شکل ۵) می‌باشد. منحنی خطر لرزه‌ای ویژه ساختمان باید بر حسب احتمال فراگذشت سالانه یک شتاب طیفی متناظر با زمان تناوب اصلی نوسان سازه،  $\bar{S}_a(T_{dom})$ ، تعیین شود. چنین منحنی‌هایی در شکل ۵ پ نشان داده شده است. در غیاب اطلاعات ویژه بیشتر در مورد زمان تناوب غالب نوسان سازه، منحنی خطر لرزه‌ای را می‌توان برای شتاب طیفی در زمان تناوب یک ثانیه،  $\bar{S}_a(1.0)$ ، تعیین نمود.

شتاب‌های طیفی زلزله ALE، از منحنی خطر ویژه ساختمان و احتمال فراگذشت سالانه شکست،  $P_f$  مطابق جدول ۲ تعیین می‌شود. مراحل مشخص تعیین رخداد‌های ALE و ELE در شکل ۴ ارائه شده و در ادامه تشریح می‌گردد.



ب- تعریف روابط کاهندگی برای شتاب‌های طیفی در زمان‌های تناوب  $T_1$  الی  $T_N$

الف- تعریف لرزه‌خیزی چشمه لرزه‌زا و هندسه آن



ب- ترسیم منحنی‌های خطر لرزه‌ای برای شتاب‌های طیفی در هر زمان تناوب و احتمال فراگذشت سالانه مورد نظر از روی بخش الف و ب، و تعیین شتاب‌های طیفی میانگین با خطر یکنواخت  $\bar{S}_a(T_1)$  الی  $\bar{S}_a(T_N)$

- ۱: چشمه خطی (گسل)  
 ۲: چشمه سطحی  
 ۳: توانر سالانه تجمعی رخداد با بزرگای  $M$   
 ۴: عدم قطعیت در کاهندگی  
 $M$ : بزرگا  
 $P_e$ : تراز مورد نظر از احتمال فراگذشت سالانه  
 $f(M)$ : توانر  
 $T_i$ : زمان تناوب نوسانگرهای یک درجه آزادی  
 $S_a(T_i)$ : شتاب طیفی مربوط نوسانگر یک درجه آزادی با زمان تناوب  $T_i$   
 $d$ : فاصله از چشمه  
 $P$ : احتمال فراگذشت سالانه  
 $\bar{S}_{a,Pe}(T_i)$ : شتاب طیفی میانگین به ازای زمان تناوب نوسانگر برابر با  $T_i$  در احتمال فراگذشت سالانه مورد نظر

شکل ۵ فرآیند تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالی

الف- رسم منحنی خطر ویژه ساختگاه برای زمان تناوب  $T=T_{dom}$  (مشابه منحنی به نمایش در آمده در شکل ۵ پ) در مقیاس دو لگاریتمی در مبنای ۱۰ که نشان‌دهنده توزیع احتمال پارامتر می‌باشد (شکل ۶ الف)

ب- انتخاب احتمال سالانه شکست مورد نظر،  $P_f$ ، به شکل تابعی از تراز مواجهه طبق جدول ۲ و تعیین شتاب طیفی ویژه ساختگاه برای  $P_f$ ، از شکل ۶ الف

پ- تعیین شیب منحنی خطر لرزه‌ای،  $a_{AR}$ ، در منطقه مجاور  $P_f$ ، با کشیدن یک خط مماس بر منحنی خطر لرزه‌ای در  $P_f$  شیب  $a_{AR}$ ، به عنوان نسبت شتاب‌های طیفی متناظر با دو مقدار احتمالاتی که هر یک در یک سمت  $P_f$  قرار دارد و یک مرتبه لگاریتمی با هم اختلاف دارند ( $P_1$  و  $P_2$  در الف)؛ ترجیحا  $P_1$  باید به  $P_f$  نزدیک باشد.

ت- از جدول ۱۱ ضریب اصلاح،  $C_c$ ، متناظر با  $a_{AR}$  به دست می‌آید. این ضریب اصلاح، منعکس‌کننده عدم قطعیت‌هایی است که در منحنی خطر لرزه‌ای لحاظ نشده است.

جدول ۱۱ ضرایب اصلاح،  $C_c$

۳/۵	۳/۰	۲/۵	۲/۰	۱/۷۵	$a_{AR}$
۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۲	۱/۱۵	۱/۲۰	ضریب اصلاح، $C_c$

ث- تعیین شتاب طیفی ALE با اعمال ضریب اصلاح،  $C_c$ ، به  $\bar{S}_{a,Pf}(T_{dom})$  شتاب طیفی ویژه ساختگاه در  $P_f$  مورد نیاز و زمان تناوب سازه‌ای حاکم،  $T_{dom}$ :

$$\bar{S}_{a,ALE}(T_{dom}) = C_c \times \bar{S}_{a,Pf}(T_{dom}) \quad \text{رابطه ۹}$$

سپس احتمال فراگذشت سالانه رخداد ALE ( $P_{ALE}$ ) به طور مستقیم از منحنی خطر لرزه‌ای مطابق شکل ۶ ب به دست می‌آید. دوره بازگشت رخداد ALE از احتمال فراگذشت سالانه با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود. مقدار  $P_{ALE}$  از  $P_f$  کوچکتر است تا عدم قطعیت‌های تجمعی در ارزیابی کنش‌ها و مقاومت‌ها که در منحنی خطر لرزه‌ای منظور نشده است را شامل شود (این موضوع با ضریب اصلاح،  $C_c$ ، لحاظ می‌گردد).

ج- در انواع شناخته‌شده سازه‌ها که مشخصات شکل‌پذیری و مقاومت ذخیره مشخص است، شتاب طیفی ELE از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\bar{S}_{a,ELE}(T_{dom}) = \frac{\bar{S}_{a,ALE}(T_{dom})}{C_r} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن  $C_r$  ضریب ظرفیت ذخیره لرزه‌ای برای سیستم سازه‌ای است که منظور کننده ظرفیت ذخیره استاتیکی و قابلیت تحمل تغییرشکل‌های غیرخطی بزرگ برای هر نوع سازه (مثلا فولاد یا بتن مسلح) می‌باشد. ضریب  $C_r$  منظورکننده نسبت شتاب طیفی مسبب شکست فاجعه‌آمیز سیستم سازه به شتاب طیفی ELE است. این ضریب باید قبل از طراحی تخمین زده شود تا دستیابی به یک طرح اقتصادی امکان‌پذیر گردد که در عین حال این طرح بتواند در برابر آسیب در زلزله ELE مقاومت کند و در عین

حال الزامات عملکردی زلزله ALE را نیز برآورده نماید. مقادیر  $C_T$  را می‌توان با استفاده از ارزیابی تفصیلی گذشته روی سازه‌های مشابه مورد اصلاح قرار داد. مقادیر  $C_T$  برای سکوه‌های فولادی با پایه ثابت در جدول ۱۰ آمده است. می‌توان از مقادیر دیگری برای  $C_T$  به جز مقادیری که در استانداردهای قابل کاربرد در سازه‌های فراساحلی ارائه شده است<sup>۱</sup> هم در طراحی استفاده نمود؛ اما این مقادیر را باید با یک تحلیل ALE صحت‌سنجی کرد.

چ- در این گام، احتمال سالانه فراگذشت در رخدادهای ELE ( $P_{ELE}$ ) را می‌توان از منحنی خطر یکنواخت (مطابق شکل ۶ ب) تعیین کرد. دوره بازگشت ELE از احتمال سالانه فراگذشت با استفاده از رابطه ۸ به دست می‌آید. با داشتن مقادیر دوره بازگشت ALE و ELE، شتاب‌های طیفی ALE و ELE برای سایر زمان‌های تناوب طبیعی (مقادیر  $\bar{S}_{a,ALE}(T)$  و  $\bar{S}_{a,ELE}(T)$ ) از نتایج تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ای حاصل می‌شود.

ح- اصلاحات طیف‌های شتاب برای ALE و ELE در ساختگاه مورد نظر و با توجه به شرایط خاک و زمین‌شناسی منطقه، با استفاده از تحلیل پاسخ ساختگاه (بند ۵-۵) صورت می‌پذیرد.

در سکوه‌های شناور (نظیر سکوه‌های پایه کششی<sup>۲</sup>) و سایر انواع سکو که مقدار  $C_T$  به درستی تعریف نمی‌شود، یک فرآیند طراحی که مستقیماً از شکست فاجعه‌بار سیستم در زلزله ALE جلوگیری نماید پیشنهاد می‌گردد. برای طراحی سیستم پهلوگیری<sup>۳</sup> تغییرمکان‌های شدید و امواج ضربه‌ای<sup>۴</sup>، در این بحث باید مورد توجه قرار گیرد. سازه پوسته<sup>۵</sup> برای کنش‌های متناظر، به صورت ارتجاعی طرح می‌گردد.

حداقل دوره بازگشت ELE در جدول ۱۲ آمده است تا از صحت طراحی اقتصادی به عنوان تابعی از تراز مواجهه اطمینان حاصل گردد. در صورتی که دوره بازگشت ELE به دست آمده از روش ارائه شده در این بند از دوره بازگشت متناظر در جدول ۱۲ کوچکتر شود، دوره بازگشت جدول ۱۲ باید در تعیین  $\bar{S}_{a,ELE}(T)$  ملاک عمل قرار گیرد.

جدول ۱۲ حداقل دوره‌های بازگشت برای زلزله تراز ELE

تراز مواجهه	دوره بازگشت (سال)
L3	۵۰
L1	۲۰۰

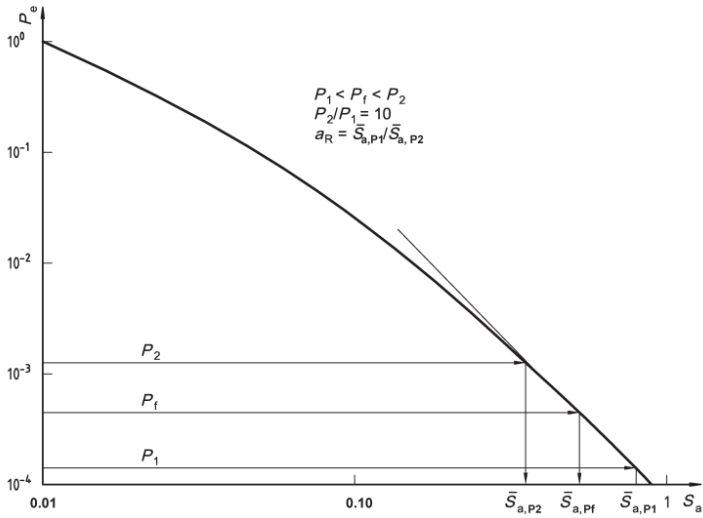
<sup>۱</sup> استانداردهای مربوط به این بخش شامل ISO 19902, ISO 19903, API 2A-WSD, API 2N, ISO 19904 (تمام بخش‌ها)، ISO 19905 (تمام بخش‌ها) و ISO 19906 می‌باشد. به بند مراجع رجوع شود.

<sup>۲</sup> Tension Leg Platform

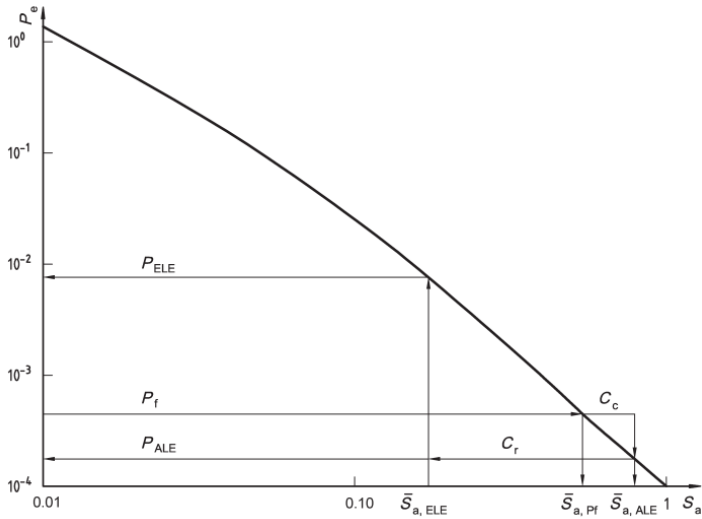
<sup>۳</sup> Mooring System

<sup>۴</sup> Shock Wave

<sup>۵</sup> Hull Structure



الف- تعیین شیب منحنی خطر لرزه‌ای،  $a_R$  به ازای  $T=T_{dom}$



ب- تعیین شتاب‌های طیفی و احتمالات فراگذشت برای رخداد‌های ALE و ELE

$P_e$ : احتمال فراگذشت سالانه

$S_a$ : شتاب طیفی (g)

شکل ۶ نمونه‌ای از منحنی خطر لرزه‌ای

## ۵-۵ تحلیل‌های پاسخ ویژه ساختگاه

در فرآیند تفصیلی تعیین کنش‌های لرزه‌ای (بند ۵-۴)، شتاب‌های طیفی طراحی تراز ALE و ELE (یعنی پارامترهای  $\bar{S}_{a,ALE}(T)$  و  $\bar{S}_{a,ELE}(T)$ ) بر اساس منحنی‌های خطر یکنواخت که در آن تمامی نقاط روی منحنی دارای یک دوره بازگشت یکسان هستند به دست می‌آیند. دوره‌های بازگشت برای رخدادهای ALE و ELE مطابق روش ارائه شده در بند ۵-۴ تعیین می‌گردد. تحلیل‌های خطر لرزه‌ای احتمالاتی و تعیینی که در بندهای ۵-۲ و ۵-۳ ذکر گردید، جنبش‌های زمین مورد استفاده برای ساختگاه‌های دارای خاک با سفتی متوسط، سفت یا بستر سنگی را به دست می‌دهد؛ اما بسیاری از ساختگاه‌های فراساحلی شامل لایه سطحی متشکل از خاک نرم مستقر بر مصالح سخت‌تر می‌باشد. لذا باید شتاب‌های طیفی ALE و ELE را برای شرایط خاک ساختگاهی اصلاح نمود. برای اصلاح مقادیر شتاب طیفی در تراز ALE و ELE، می‌توان یک تحلیل دینامیکی پاسخ ساختگاه با استفاده از مدل‌های خطی یا غیرخطی بیانگر شرایط خاک زیرسطحی را به کار برد و شتاب‌های طیفی ویژه ساختگاه را برای طراحی تعیین نمود.

به عنوان روشی دیگر برای انجام تحلیل پاسخ دینامیکی ساختگاه، رویه ارائه شده در بند ۴-۱ برای اصلاح طیف‌های شتاب قابل کاربرد است. مطابق آن بند، یک طیف تشدید از نسبت شتاب طیفی متناظر با رده خاک ساختگاه به رده خاک سفت یا بستر سنگی قابل تعیین است. طیف تشدید را می‌توان برای اصلاح طیف‌های شتاب به دست آمده از تحلیل PSHA متناظر با خاک سفت یا بستر سنگی به کار برد.

## ۶- الزامات عملکردی

### ۶-۱ عملکرد در زلزله تراز ELE

هدف از طراحی در برابر زلزله تراز ELE اطمینان از آن است که طی رخداد این تراز از زمین‌لرزه، سکو بدون آسیب بماند یا آسیب ناچیزی به آن وارد شود و همچنین حاشیه ایمنی کافی در برابر شکست‌های جدی طی رخداد زلزله‌های شدیدتر تأمین گردد. الزامات عملکردی زیر باید در برابر تراز ELE تأیید شود:

- تمامی اجزای اصلی سازه‌ای و شالوده باید در برابر زلزله ELE سالم بمانند یا آسیب ناچیزی را تجربه نمایند. رفتار غیرخطی محدود (مثلاً تسلیم در فولاد یا ایجاد ترک کششی در بتن) قابل پذیرش است، اما از تنزل مقاومت به صورت ترد (مثلاً ایجاد کماتش موضعی در اجزای فولادی یا ریختن پوشش<sup>۱</sup> در اجزای بتنی) باید جلوگیری به عمل آید.

<sup>۱</sup> Spalling

- اجزای سازه‌ای ثانویه نظیر پانل‌های استقرار لوله‌های هادی<sup>۱</sup>، باید همان ضوابط سخت‌گیرانه مربوط به اجزای اصلی را در زلزله ELE برآورده نمایند.
  - نیروهای داخلی در اتصالات نباید از مقاومت اتصال محاسبه شده بر اساس نیروها و لنگرهای ارتجاعی تجاوز کند.
  - کنترل شالوده باید هم به صورت جزء به جزء و هم به صورت کلی انجام گردد. در سطح اجزا، حاشیه ایمنی کافی باید بر حسب شکست محوری و جانبی شمع‌ها یا شکست قائم و لغزشی سایر اجزای شالوده صورت پذیرد. در سطح کلی سیستم نیز، یک حاشیه ایمنی کافی باید بر حسب سازوکار تغییرشکل زیاد که منجر به آسیب یا تنزل مقاومت و نیاز به تعمیرات در سکو و متعلقات آن (نظیر خطوط لوله و لوله‌های هادی) می‌گردد تأمین شود.
  - در تراز ELE نباید هیچ‌گونه اختلالی در سیستم‌های ایمنی یا سیستم‌های فرار و خروج اضطراری پدیدار گردد.
  - دکل‌ها<sup>۲</sup>، جرثقیل‌ها<sup>۳</sup> و سازه‌های مشعل<sup>۴</sup> باید قادر باشند جنبش‌های منتقل شده از سکو را بدون آسیب یا با آسیب اندک تحمل کنند. در طراحی باید قیدهایی برای جلوگیری از فروافتادن اجزای روسازه و سینی‌های کابل دیده شود. لوله‌کشی‌ها باید برای جابجایی‌های ناهمسان ناشی از حرکت تکیه‌گاه‌ها طراحی شوند و تکیه‌گاه‌های لغزشی باید به گونه‌ای نگهداری شوند که همان‌گونه که طراحی شده‌اند عمل نمایند. طرح باید به گونه‌ای پیاده شود که احتمال خطر فروافتادن تجهیزات و متعلقات طی رخداد زلزله تراز ELE کمینه گردد.
- الزامات مکمل در خصوص سکوه‌های دارای پایه‌های نوع جکت فولادی در بیست و دومین نسخه از نشریه API RP2A-WSD ارائه شده است.

## ۶-۲ عملکرد در زلزله تراز ALE

هدف از طراحی سکو در برابر رخداد زلزله ALE، اطمینان از آن است که موده‌های خرابی کلی که منجر به ایجاد حوادث فاجعه‌آمیز نظیر به خطر افتادن جان پرسنل یا آسیب‌های جدی زیست‌محیطی در این تراز از زمین‌لرزه می‌گردد به وقوع نپیوندد. در این خصوص، باید از رعایت الزامات عملکردی زیر اطمینان حاصل کرد:

<sup>1</sup> Conductor Guide Panel

<sup>2</sup> Masts

<sup>3</sup> Derricks

<sup>4</sup> Flare Structures



- رفتار خمیری تنزل‌یابنده برای اجزای سازه‌ای مجاز است (مثلا ایجاد کمانش موضعی در اجزای فولادی یا ریختن پوشش در اجزای بتنی)، اما شکست‌های فاجعه‌آمیز نظیر فروریزش کلی یا شکست بخش طره‌ای عرشه نباید رخ دهد.
  - ایجاد سازوکارهای خمیری پایدار در شالوده‌ها مجاز است، اما از موده‌های شکست فاجعه‌آمیز نظیر ناپایداری و فروریزش باید جلوگیری به عمل آید.
  - رفتار خمیری محدود در اتصالات مجاز است، اما اتصالات باید در محدوده مقاومت‌های نهایی خود باقی بمانند. به جای آن، در صورتی که ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ در اتصالات مورد انتظار باشد، باید آنها را به گونه‌ای طرح نمود که شکل‌پذیر بوده، در ترازهای تغییرشکل‌های پیش‌بینی شده دارای مقاومت باقی‌مانده باشند.
  - سامانه‌های ایمنی و همچنین سیستم‌های فرار و خروج اضطراری باید پس از رخداد زلزله تراز ALE قابل بهره‌برداری باقی بمانند.
  - شکست تجهیزات در روسازه، نباید موجب اختلال در سیستم‌های ایمنی- اضطراری سکو گردد. از فروریزش بخش مسکونی<sup>۱</sup>، دکل‌ها، جرثقیل‌ها، سازه‌های مشعل و سایر تجهیزات مهم روسازه باید جلوگیری گردد.
  - هر گونه ضوابط مقاومت فراتر از زلزله‌های با تراز ALE در استانداردهای مربوط به سازه‌های فراساحلی<sup>۲</sup> نیز قابل اعمال است.
- الزامات مکمل در خصوص سکوه‌های دارای پایه‌های نوع جکت فولادی در بیست و دومین نسخه از نشریه API RP2A-WSD ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Living Quarters

<sup>۲</sup> استانداردهای مربوط به این بخش شامل ISO 19902، ISO 19903، API 2A-WSD، API 2N، ISO 19904 (تمام بخش‌ها)، ISO 19905 (تمام بخش‌ها) و ISO 19906 می‌باشد. به بند مراجع رجوع شود.

## مراجع

1. ISO 19901-3, Petroleum and natural gas industries—Specific requirements for offshore structures—Part 3: Topsides structure.
2. ISO 19902, Petroleum and natural gas industries—Fixed steel offshore structures.
3. ISO 19904 [all parts], Petroleum and natural gas industries—Floating offshore structures.
4. ISO 19905 [all parts], Petroleum and natural gas industries—Site-specific assessment of mobile offshore units.
5. ISO 19906, Petroleum and natural gas industries—Arctic offshore structures.
6. Banon, H., Cornell, C. A., Crouse, C. B., Marshall, P. W., Nadim, F., and Younan, A. H., ISO Seismic Design Guidelines for Offshore Platforms, Proc. 20th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conf. (OMAE) June 2001.
7. Harmsen, S., Perkins, D., and Franke, A., Deaggregation of Probabilistic Ground Motions in the Central and Eastern United States, Bulletin of the Seismological Society of America, 89, 1999, pp. 1–13.
8. Bernreuter, D. L., Determining the Controlling Earthquake from Probabilistic Hazards for the Proposed Appendix B, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-111964, 1992.
9. Chapman, M. C., A Probabilistic Approach for Ground Motion Selection for Engineering Design, Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 1995, pp. 937–942.
10. McGuire, R. K., Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop, Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 1995, pp. 1275–1284.
11. Bazzurro, P. and Cornell, C. A., Disaggregation of Seismic Hazard, Bulletin of the Seismological Society of America, 89, 1999, pp. 501–520.
12. Frankel, A. D. and Leyendecker, E. V., USGS Seismic-Hazard Lookup Programs and Map-Viewing Applications, U.S. Geological Survey CD, January 1998.
13. NEHRP, Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, U.S. Federal Emergency Management Agency, 1997 Edition.
14. NORSAR and NGI, Development of a Seismic Zonation for Norway, Report prepared for Norwegian Council for Building Standardization (NBR), Oslo, Norway, March 1998.
15. Geological Survey of Canada, Web site: [http://seismo.nrcan.gc.ca/index\\_e.php](http://seismo.nrcan.gc.ca/index_e.php)
16. Stokoe, K. H. and Rosenblad, B. L., Offshore Geotechnical Investigations with Shear Waves, Proc. 31<sup>st</sup> Offshore Technology Conf., OTC 10823, Houston, TX, May 3–6, 1999.
17. Stokoe, K. H., Wright, S. W., Bay, J. A., and Roesset, J. M., Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method, ISSMFE Technical Committee #10 for XII ICMFE, Geotechnical Characteristics of Sites, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam & Brookfield, Netherlands, 1994, 46 pp.
18. Richart, F. E., Hall, J. R., and Woods, R. D., Vibration of Soils and Foundations, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1970, 414 pp.
19. Hardin, B. O., Nature of Stress-Strain Behavior for Soils, Proc. ASCE Specialty Conf. on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1, Pasadena, 1978, pp. 3–90.
20. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P., Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98(SM7), July 1972, pp. 667–692.
21. Seed, H. B. and Idriss, I. M., Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Soil Response, Report EERC 70-10, University of California, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, Dec. 1970.



- API RP 2A-LRFD Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, American Petroleum Institute, July 1993, 1st Edition.
23. Werner, S. D. (Ed.), Seismic Guidelines for Ports, American Society of Civil Engineers (ASCE), March 1988.
  24. Cornell, C. A., Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of Seismological Society of America, 58, 1968, pp. 1583–1606.
  25. Der Kiureghian, A. and Ang A. H-S., A Fault-Rupture Model for Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 67, 1977, pp.1173–1194.
  26. McGuire, R. K., Effects of Uncertainty in Seismicity on Estimates of Seismic Hazard for the East Coast of the United States, Bulletin of the Seismological Society of America, 67, 1977, pp. 827–848.
  27. Campbell, K. W., Bayesian Analysis of Extreme Earthquake Occurrences: Part I, Probabilistic Seismic Hazard Model, Bulletin of the Seismological Society of America, 72, 1982, pp. 1689–1706.
  28. Kramer, S. L., Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1996.
  29. Cornell, C. A., Calculating Building Seismic Performance Reliability: A Basis for Multi-Level Design Norms, Proceeding of 11th World Conf. on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, June 1996.
  30. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B., Shake; A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA, 1972.
  31. Seed, H. B., Ugas, C., and Lysmer, J., Site-Dependent Spectra for Earthquake Resistant Design, Bulletin of the Seismological Society of America, 66, 1976, pp. 1323–1342.
  32. Idriss, I. M., Dobry, R. E., Doyle, H., and Singh, R. D., Behavior of Soft Clays Under Earthquake Loading Conditions, Proc. 8<sup>th</sup> Offshore Technology Conf., Houston, Texas, OTC Paper No. 2671, 1976.
  33. Streeter, V. L., Wylie, E. B., and Richart, F. E., Soil Motion Computations by Characteristic Method, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 100(GT3), 1974, pp. 247–263.
  34. [34] Finn, W. D. L., Lee, K. W., and Martin, G. R., An Effective Stress Model for Liquefaction, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 103(GT6), 1977, pp. 517–533.
  35. Tsai, C. F., Lam, I., and Martin G. R., Seismic Response of Cohesive Soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 106(GT19), 1980, pp. 997–1012.
  36. Chen, A. T. F., MULAP2: A Multi-Linear Analysis Program for Ground Motion Studies of Horizontally Layered Systems, Report No. PB-229016, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, USA, 1980.
  37. Joyner, W. B. A., Fortran Program for Calculating Nonlinear Seismic Ground Response, Open File Report 77-671, U.S. Geological Survey, 1977.
  38. Marshall, P. W., Earthquake Considerations for Structural Design, Proc. BOSS-1997, Delft.
  39. Rijken, O. and Leverette, S., Tension Leg Platform Response to Earthquake in the Gulf of Mexico, Proc. ISOPE-2007, Lisbon.
  40. Younan, A. H. and Puskar, F. J., API RP 2EQ, Seismic Design Procedures and Criteria for Offshore Structures, OTC 21047, Houston, TX, May 2010.
  41. Peng, B. F., Chang, B., Leow, B.-L., and Nandlal, S., Nonlinear Dynamic Soil-Pile Structure—Interaction Analysis of Offshore Platforms for Ductility Level Earthquake under Soil Liquefaction Conditions; the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 2008.
  42. API RP 2N, Planning, Designing, and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions.