مقاله

تحلیل لرزه‌ای سکوهای پایه‌ثابت

محمدرضا تابش‌پور*
استادیار قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی
دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی شریف
tabeshpour@sharif.edu

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۲۹

چکیده

در این مقاله روش متعارف تحلیل لرزه‌ای سکوهای پایه‌ثابت ارائه شده است. اصولاً در مناطق لرزه‌خیز لازم است تا مقاومت لرزه‌ای و شکل‌پذیری این سازه‌ها کنترل شود. چون ماهیت شکل‌پذیری - که سبب بروز رفتار مناسب سازه‌ها در زلزله می‌شود - با آنچه درخصوص رفتار مناسب تحت بارهای باد و موج - که سبب ایجاد خستگی می‌شود - تفاوت دارد، کنترل رفتار قابل قبول در زلزله، برای مناطق لرزه‌خیز از اهمیت خاصی برخوردار است. چون تحریک زلزله از طرف زمین و شمع‌ها به سازه وارد می‌شود، شرایط خاک بستر در تقویت یا تشدید بار زلزله تأثیر بسزایی دارد. برای مدل‌سازی خاک در تحریک زلزله، می‌توان به روش‌های گوناگونی اثر خاک را بر سازه در نظر گرفت. تفاوت پاسخ سازه تحت تحریک زلزله با باد و موج در این است که معمولاً در زلزله‌های شدید، خاک یا شمع دچار رفتار غیرخطی می‌شود، اما در موج شدید بعید است که خاک وارد محدودهٔ غیرخطی شود و معمولاً اعضای فوقانی سازه بیشترین تنش را تحمل می‌کنند. آنچه در این مقاله ارائه می‌شود، کاربرد دینامیک سازه در تحلیل طیفی سازه است.

واژگان کلیدی: زلزله، سکو، طیف، تحلیل

۱. مقدمه

هرچند در اکثر موارد عواملی چون بارهای موج و باد و شرایط دریایی در فرایند طراحی سازه‌های دریایی نقش دارند، اما در مناطقی با لرزه‌خیزی شدید و براساس ملاحظات ژئوتکنیکی ممکن است مجموعهٔ سازه و شمع و خاک رفتاری بحرانی داشته باشد. سازه‌های فراساحلی که در مناطق زلزله‌خیز نصب شده‌اند، باید برای جلوگیری از فروریزش تحت بیشینهٔ زلزلهٔ ممکن[۱] - که احتمال دارد طی عمر مفید سازه رخ دهد - مقاومت و شکل‌پذیری لازم را داشته باشند. در تحلیل لرزه‌ای لازم است تا جرم و سختی سازه را به‌روش مناسبی مدل کرد. معمولاً نسبت میرایی پنج درصد در نظر گرفته می‌شود در مدل‌سازی جرم نیز باید علاوه بر جرم سازه، جرم افزوده و جرم سیال را نیز در نظر گرفت. تأکید این مقاله بر استفاده از روش‌های تحلیل خطی برای ارزیابی پاسخ سازه است. روش‌های غیرخطی

معمولاً برای کاهش میزان محافظه‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مقاله شامل شش بخش کلی است که به‌ترتیب عبارت‌اند از: فلسفهٔ طراحی، تئوری تحلیل سازه، داده‌های طراحی (تاریخچه‌های زمانی و طیف‌ها)، تعیین زلزلهٔ طرح (تحلیل خطر و خطرپذیری)، محاسبهٔ پاسخ سازه و نهایتاً پیکربندی سازه برای مقاومت لرزه‌ای. در ادامه این موارد شش‌گانهٔ فوق تشریح می‌شوند [۱].

۲. فلسفهٔ طراحی برای بارهای لرزه‌ای

هدف طرح لرزه‌ای، ایجاد یک سازهٔ ایمن با هزینه‌ای منطقی است. برای این منظور باید به نکات زیر توجه داشت:

الف: سطح مورد انتظار خطرپذیری زلزله

ب: ارزش سازه

ج: عواقب ناشی از شکست آن

بنابراین انتخاب فلسفهٔ طراحی، نوعی موازنه میان هزینه و ایمنی است. زلزله‌های شدید ممکن است بارهای بزرگی به سازه اعمال کنند، اما احتمال وقوع آنها اندک است (جدول ۱). قطعاً طراحی سازه به‌نحوی‌که تحت شدیدترین زلزله ممکن تسلیم نشود غیراقتصادی است.

امروزه رویکردی دوگانه در طراحی سازه‌های فراساحلی مقبولیت دارد و سازه تحت دو سطح زلزله به‌صورت زیر طراحی می‌شود:

الف: زلزلهٔ سطح طراحی[۲]، که یک رخداد ۱۰۰ تا ۲۰۰ ساله است. تحت تحریک این زلزله نباید هیچ نقطه‌ای در سازه تسلیم شود.

ب: زلزلهٔ سطح شکل‌پذیری[۳] که یک رخداد ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ ساله است. در تحلیل خطی، تنش از حد تسلیم بیش‌تر می‌شود، اما سازه فرو نمی‌ریزد. هرچند ممکن است شکست‌های موضعی رخ دهد.

این الزامات در جدول ۲ ذکر شده است. در زلزلهٔ سطح شکل‌پذیری محل مفاصل پلاستیک شناسایی و آن نقاط با ظرفیت مناسب طراحی و اجرا می‌شود. علاوه‌بر تحلیل سازه، باید شرایط ساختگاه سازه نیز برای ناپایداری روانگرایی[۴] و سایر ملاحظات ژئوتکنیکی بررسی شود.

جدول ۱. مقایسه بارهای زلزله با موج (دریای شمال) [۱]

	تنش مجاز	**رخداد در سال**	**دورهٔ بازگشت** (برحسب سال)
موج حدی	۰/۸ f_y	۰/۰۲ تا ۰/۰۱	۵۰ تا ۱۰۰
زلزلهٔ سطح مقاومت[۵]	f_y	۰/۰۰۵ تا ۰/۰۱	۱۰۰ تا ۲۰۰
زلزلهٔ سطح شکل‌پذیری	$f_y <$ اما فرو نمی‌ریزد	۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۰۲	۵۰۰ تا ۵۰۰۰

جدول ۲. مقایسهٔ تحلیل‌های سطح مقاومت و شکل‌پذیری [۱]

	زلزلهٔ سطح مقاومت	**زلزلهٔ سطح شکل‌پذیری**
دورهٔ بازگشت	۱۰۰ تا ۲۰۰ سال	۵۰۰ تا ۵۰۰۰ سال
معیار عملکرد	مقاومت (تنش‌ها کم‌تر از تسلیم)	آستانهٔ فروریزش (سازه نباید فرو بریزد)
شتاب بیشینه افقی (دریای شمال)	۰/۰۵ تا ۰/۱ g	۰/۱ تا ۰/۲ g
رفتار سازه	عمدتاً رفتار الاستیک	رفتار غیرخطی قابل‌ملاحظه
خرابی قابل قبول	جزئی (فقط اعضای غیرسازه‌ای)	قابل‌ملاحظه (اما ایمنی کلی نباید مختل شود)

۳. تئوری

چون تحریک زلزله در مدت زمان کوتاهی رخ می‌دهد (حدود ۱۵ ثانیه)، پاسخ سازه به حالت مانا نمی‌رسد. در نتیجه حتی اگر سازه میرایی ناچیزی داشته باشد، باز هم دامنهٔ حرکت مقدار محدودی خواهد بود. بنابراین برای تخمین پاسخ باید تحلیل تاریخچهٔ زمانی انجام شود.

۳-۱. روش طیف پاسخ

این روش شامل دو مرحله است: مرحلهٔ اول، تحلیل مجموعهٔ مشخصی از تاریخچه‌های زمانی زلزله‌ها و ارائهٔ نتایج به‌شکل طیف‌های پاسخ است که وارد آئین‌نامه‌های طراحی می‌شوند. در مرحلهٔ دوم، طراح از طیف‌های پاسخ برای انجام تحلیل‌های ساده برای هر سازهٔ مشخص استفاده می‌کند. در شکل ۱ نحوهٔ ساخت و استفاده از طیف نمایش داده شده است.

٤. محاسبهٔ پاسخ سازه

پاسخ سازه براساس مدل سازه - پی محاسبه می‌شود. اثر خاک پی بر رفتار سازه به دو صورت است (شکل ۳):

الف: افزایش نرمی و در نتیجه افزایش پریود. انعطاف‌پذیری خاک ممکن است پریود سازه‌های وزنی بتنی را بیش از دو برابر افزایش دهد، حال آنکه این اثر در جکت‌ها سبب افزایش ۱۵ تا ۲۰ درصدی در پریود سازه می‌شود.

ب: خاک پی باعث افزایش میرایی و در نتیجه کاهش پاسخ می‌شود.

به این ترتیب، خاک و سازه برهم اثر دارند و این رفتار با نام برهم‌کنش خاک - سازه شناخته می‌شود. این برهم‌کنش را می‌توان به یکی از دو روش کلی زیر تحلیل کرد:

الف: روش‌های دوگامی. در گام نخست رفتار خاک - پی برای به‌دست آوردن مدل فنر و میراگر معادل تحلیل می‌شود و در گام دوم این فنر و میراگر به مدل سازه‌ای اضافه می‌شود.

ب: روش‌های یک‌گامی. تمام مدل سازه - پی - خاک استفاده و پاسخ کلی مستقیماً محاسبه می‌شود. معمولاً روش‌های دوگامی برای طراحی سازه به‌کار می‌روند، اما روش‌های یک‌گامی اغلب برای طراحی ژئوتکنیکی استفاده می‌شوند.

٤-۱. مدل سازه

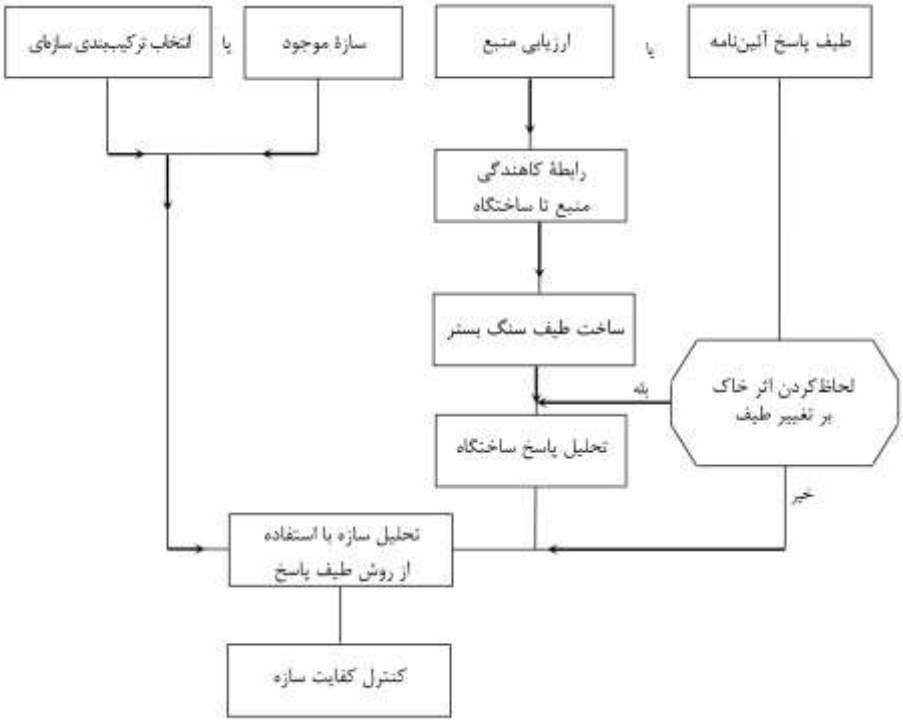
معمولاً سازه در دو مرحله مدل می‌شود. ابتدا یک مدل کلی برای محاسبهٔ پاسخ سیستم پی - سازه استفاده می‌شود، که به آن سازهٔ اولیه می‌گویند. خروجی پاسخ این مدل به‌عنوان داده‌های بار برای مدل‌های موضعی (اتصالات، تجهیزات، بوم مشعل و جز این‌ها) استفاده می‌شود. این به نام سازهٔ ثانویه است.

٤-۱-۱. سختی

معمولاً مدل سازه به‌صورت المان‌های تیر است. برای بررسی ارتعاشات موضعی در اعضای بلند و لاغر باید آنها را به چند المان تقسیم کرد. هادی‌ها تأثیری در سختی سیستم ندارند. در سازه‌های ثقلی، پایه‌ها باید به چند المان تیر تقسیم شوند تا خمش در آنها با دقت مدل شود.

٤-۱-۲. جرم

جرم را می‌توان به صورت‌های گسترده یا متمرکز مدل کرد. در حالت مدل جرم متمرکز باید مقدار کل و مرکز اثر جرم با حالت جرم گسترده یکسان باشد و هرگونه عدم تقارن در جرم و سختی مدل شود. معمولاً تجهیزات حفاری مرکز ثقلی بالاتر از فراز عرشه دارند و در انتقال به مرکز جرم، اینرسی چرخشی بزرگی نیز در گره‌های عرشه ایجاد می‌کند. جرم شامل مواردی چون وزن سازه، هادی‌ها و رایزرها، تجهیزات و الحاقات ثانویه، جرم افزودهٔ هیدرودینامیکی، گیاهان دریایی و نهایتاً سیال درونی (پایه‌های مغروق یا مخازن سیالات) می‌شود. باید توجه داشت که جرم افزودهٔ هیدرودینامیکی به‌علت حرکت نسبی سیال و عضو در جهت عرضی است و در نتیجه چنین جرمی در امتداد طولی پایه (راستای قائم) وجود ندارد. بنابراین جرم کلی سازه در امتداد قائم کم‌تر از دو جهت افقی (عرضی) است.



شکل ۱. تحلیل پاسخ لرزه‌ای (روش طیف پاسخ) [۱]

٤-۱-۳. میرایی

در جدول ۳ منابع گوناگون میرایی در یک سازهٔ فراساحلی ذکر داده شده است. براساس این جدول ملاحظه می‌شود که منابع مختلفی برای میرایی وجود دارد. در طراحی، انواع میرایی‌ها به‌صورت میرایی لزج معادل می‌شوند. مقادیر نسبت میرایی در تحلیل لرزه‌ای در جدول ۴ داده شده است. باید توجه داشت که این مقادیر تنها برای تحلیل لرزه‌ای است و از مقادیر متناظر در سایر تحریک‌های دینامیکی (مانند موج) بیش‌تر است؛ زیرا سطح کرنش‌ها تحت بارهای زلزله بیش‌تر از بارهای موج است.

جدول ۳. منابع اتلاف انرژی در زلزله [۱]

نوع	سازوکار	توصیف
سازه‌ای		
میرایی ماده	چرخه در مادهٔ سازه	میرایی سازه‌ای اصلی
میرایی مکانیکی	اصطکاک در اتصالات سازه	
رفتار غیرخطی	تسلیم‌شدن ماده (مفاصل پلاستیک)	قابل مدل‌سازی با فنرهای غیرخطی
هیدرودینامیکی		
میرایی تشعشعی	ارتعاش سازه سبب ایجاد امواج فشاری در سیال می‌شود	در سازه‌های با قطر بزرگ اهمیت دارد
میرایی سیال	حرکت نسبی بین سیال و سازه	به‌صورت میرایی لزج معادل مدل می‌شود
خاک		
میرایی تشعشعی	ارتعاش سازه سبب ایجاد امواج فشاری در خاک می‌شود	برای سازه‌های وزنی اهمیت دارد
میرایی ماده	رفتار اصطکاکی و غیرخطی در خاک	میرایی اصلی در خاک، که ممکن است در میرایی سازه‌ای لحاظ شود

جدول ٤. نسبت‌های میرایی برای تحلیل لرزه‌ای [۱]

	میرایی (درصد)		
	رفتار الاستیک		رفتار غیرالاستیک
	تنش‌ها کم‌تر از تسلیم هستند	تنش‌ها نزدیک به تسلیم هستند	
جکت‌های فولادی دارای شمع			
میرایی سازه‌ای (۱)	0.5	1	2 2
میرایی هیدرودینامیکی	0.5	1	1+
میرایی خاک	1	>2	3 >5
جمع (۴)	2	4	10
سکوهای وزنی بتنی (۵)			
میرایی سازه‌ای (۱)	1	2	2 3
میرایی هیدرودینامیکی	0.5	0.5	0.5
میرایی خاک	محاسبه شود	محاسبه شود	محاسبه شود
جمع (۴)	2	3	4

(۱) فقط میرایی مکانیکی و داخلی

(۲) میرایی مربوط به مفاصل پلاستیک باید با استفاده از مدل سختی چرخه‌ای غیرخطی مقطع لحاظ شود.

(۳) این عدد با فرض رفتار غیرخطی شدید خاک است و باید با احتیاط به‌کار رود.

(۴) میرایی لزج معادل برای سیستم سازه - پی

(۵) از مدل میرایی پی مجزا استفاده کنید؛ زیرا میرایی شدیداً به فرکانس و شکل مودی بستگی دارد.

میرایی تشعشعی پی - حاصل از تحلیل ویسکوالاستیک (نیم - فضا یا المان محدود)

میرایی مادهٔ خاک

الف. کرنش پایین: ۱٪ (ماسه)، ۳٪ (رس) در تحلیل ویسکوالاستیک

ب. کرنش بالا: از رابطه تنش - کرنش غیرخطی برای رفتار چرخه‌ای استفاده شود.

(۶) میرایی لزج معادل فقط برای سازه

(۷) میرایی از یک سازه به سازه دیگر تغییر می‌کند در نتیجه برای آن باید یک محدوده در نظر گرفت نه یک مقدار مشخص

٤-۲. روش‌های تحلیل

روش‌های تحلیل لرزه‌ای به سه دستهٔ کلی تقسیم می‌شود:

الف. روش‌های ساده

۱. روش ضرایب استاتیکی: این روش معمولاً با دست قابل انجام است و تخمین قابل لمسی از پاسخ را به‌دست می‌دهد.

ب. روش‌های خطی

۱.تحلیل طیف پاسخ

۲.تحلیل حوزهٔ زمان

از این روش‌ها در تحلیل‌های دینامیکی استفاده می‌شود. اهمیت روش طیف پاسخ به این است که جواب‌های سریع و قابل لمسی به‌دست می‌دهد؛ جواب‌هایی که در صحت‌سنجی‌ها کاربرد دارند. تحلیل تاریخچهٔ زمانی وقتی به‌کار می‌رود که روش طیفی قادر به تعیین پاسخ مناسب نباشد.

ج. روش‌های غیرخطی

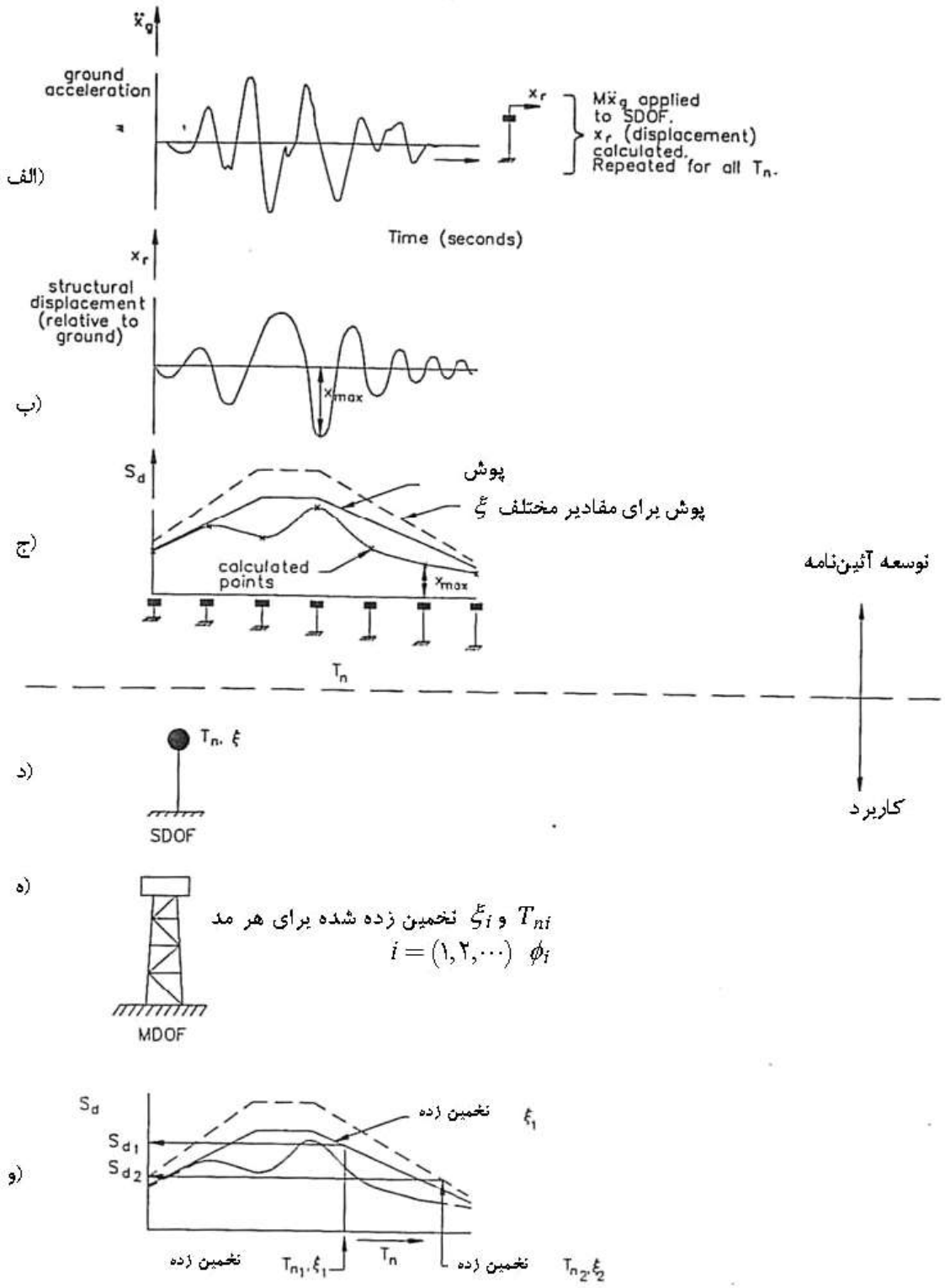
۱. تحلیل پوش – اور

۲. تحلیل غیرخطی تاریخچهٔ زمانی

معمولاً این تحلیل‌ها پیچیده‌اند و وقتی به‌کار می‌روند که تحلیل‌های خطی کفایت نکنند. در جدول ۵ مقایسهٔ روش‌های تحلیل لرزه‌ای ارائه شده است.

۴-۳. روش ضرایب استاتیکی

این روش سازه معمولاً محافظه‌کارانه بوده، روند آن در شکل ۴ نمایش داده شده است. اگر بارهای زلزله حاکم بر طراحی نباشد، این روش در تحلیل اولیه بسیار مفید است.



بیشینه تغییرشکل برای هر مود i و جهت شتاب زلزله α را محاسبه کنید:

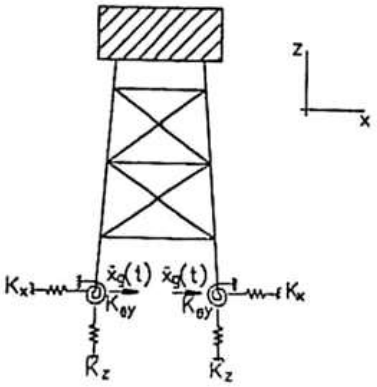
$$x_{max_{i\alpha}} = \Phi_i \frac{L_{i\alpha}}{M_i} S_{di\alpha}$$

پاسخ تمام مودها را ترکیب کنید.

پاسخ جهت‌های x ، y و z را ترکیب کنید.

شکل ۲. طیف‌های پاسخ (توسعه و استفاده) [۱]

روش‌های دو-گامی



میرایی معادل- سازه+ هیدرودینامیک+پی

تحلیل‌های مورد نیاز،

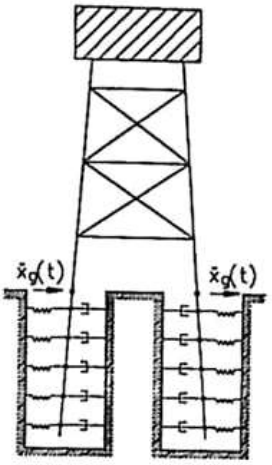
- تحلیل طیف پاسخ
- تحلیل مود نرمال
- تحلیل مستقیم در حوزه هرکانس
- انتگرال‌گیری مستقیم (سیستم خطی)
- انتگرال‌گیری مستقیم (سیستم غیرخطی)

نمی‌تواند اثرات سیکلی را مدل کند

رویکرد تکراری (Iterative)

پی‌های شمعی- مدل متمرکز

روش‌های یک-گامی



برای واضح بودن شکل، فنرها و میراگرها در جهت z (K_z, C_z) نشان داده نشده است.

میرایی معادل- سازه+ هیدرودینامیک

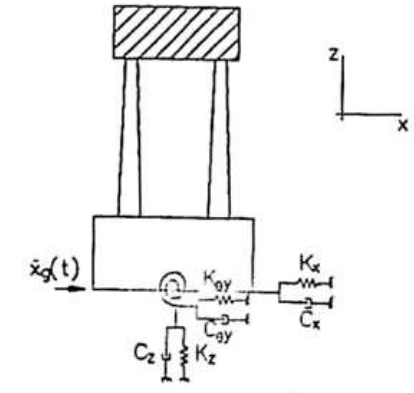
تحلیل‌های مورد نیاز،

- انتگرال‌گیری مستقیم (سیستم غیرخطی)

نمی‌تواند اثرات سیکلی را مدل کند

نیازی به تکرار (Iteration) نیست.

پی‌های شمعی- مدل کامل غیرخطی



میرایی معادل- سازه+ هیدرودینامیک

تحلیل‌های مورد نیاز،

(۱) تحلیل مستقیم در حوزه هرکانس (سیستم خطی)

K- سختی خطی براساس کرنش میانگین (تقریبی)

C- میرایی پی وابسته به هرکانس (دقیق)

(۲) انتگرال‌گیری مستقیم (سیستم غیرخطی)

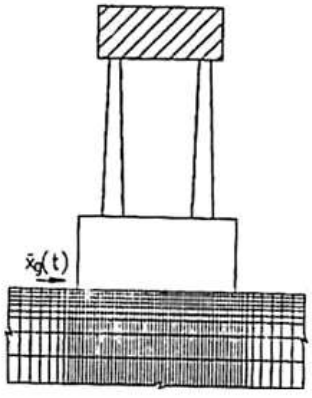
K- سختی غیرخطی از کرنش واقعی (دقیق)

C- میرایی غیروابسته به هرکانس براساس هرکانس میانگین (تقریبی)

نمی‌تواند اثرات سیکلی را مدل کند

رویکرد تکراری (Iterative)

پی‌های وزنی- مدل متمرکز



برای واضح بودن شکل، فنرها و میراگرها در جهت z (K_z, C_z) نشان داده نشده است.

میرایی معادل- سازه+ هیدرودینامیک

تحلیل‌های مورد نیاز،

- انتگرال‌گیری مستقیم (سیستم غیرخطی)

نمی‌تواند اثرات سیکلی را مدل کند

نیازی به تکرار (Iteration) نیست.

پی‌های وزنی- مدل کامل غیرخطی

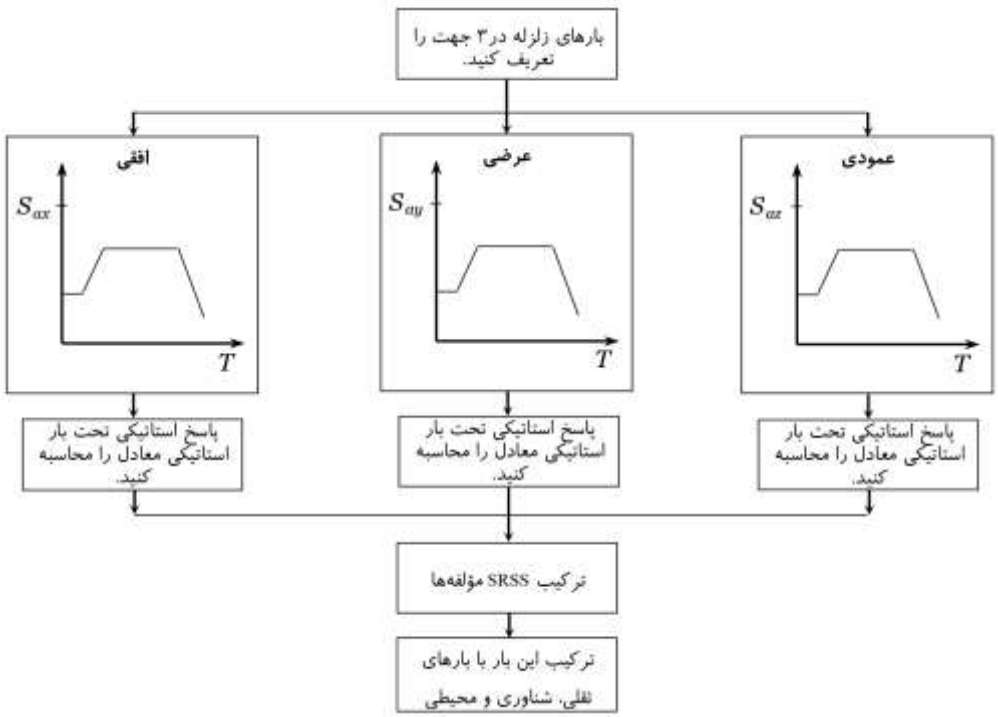
شکل ۳. مدل‌های پی [۱]

٤-٤. روش طیف پاسخ: ترکیب مودی

این روش پر استفاده‌ترین روش تحلیل لرزه‌ای سازه‌های چند درجه آزادی است و روند آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. باید توجه داشت که این روش فقط پاسخ بیشینه در هر مود را نشان می‌دهد و پاسخ بیشینهٔ کلی از ترکیب بیشینه‌ها در مودهای مختلف محاسبه می‌شود. معمولاً بیشینه مودهای مختلف همزمان نیستند.

جدول ۵. مقایسهٔ روش‌های تحلیل لرزه‌ای [۱]

روش	داده‌های طرح	روش تحلیل	مدل‌کردن شکل‌پذیری	توصیه‌ها
روش‌های ساده				
ضرایب استاتیکی	طیف پاسخ	استاتیکی	خیر	روشی بسیار کار آمد و ساده ولی محافظه‌کارانه
روش‌های خطی				
طیف پاسخ	پاسخ	دینامیکی	خیر	برای تحلیل‌های خطی
حوزهٔ زمان	تاریخچه زمانی	دینامیکی	خیر	معمولاً وقتی به‌کار می‌رود که تاریخچهٔ پاسخ نیاز باشد. از سه شتاب‌نگاشت استفاده شود.
طیف پاسخ اصلاح‌شدهٔ شکل‌پذیری	طیف پاسخ	دینامیکی	بله	روشی مفید برای لحاظ‌کردن شکل‌پذیری بدون تحلیل غیرخطی
روش‌های غیرخطی				
تحلیل استاتیکی پوش‌اور	طیف پاسخ	استاتیکی	بله	تحلیل نسبتاً پیچیده که معمولاً به‌صورت دوبعدی برای تعیین شرایط فروریزش انجام می‌شود.
تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی	تاریخچه زمانی	دینامیکی	بله	نیاز به مهارت مدل‌سازی دارد و تحلیل پیچیده‌ای است. حداقل۳ شتاب‌نگاشت نیاز دارد.



شکل ٤. روش تحلیل ضریب استاتیکی [۱]

۵. روش برهم‌نهی مودها

تحلیل پاسخ دینامیکی با استفاده از روش برهم‌نهی مودها به دو عامل اصلی بستگی دارد [۲]:

۱. پریود ارتعاش

۲. شکل مودی مفروض

بنابراین گام نخست عبارت است از تحلیل ارتعاش آزاد تعیین پریودهای اصلی و شکل‌های مودی. رفتار ارتعاش آزاد سازه بدون میرایی و بار خارجی بررسی می‌شود.

$$[M]\{\ddot{x}\}+[K]\{x\}=0 \qquad (۱)$$

در این‌صورت پاسخ سازه هارمونیک است و معادلهٔ مشخصه عبارت است از:

$$[K]\{v\}=\omega^2[M]\{v\} \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه v دامنهٔ حرکت ارتعاشی و ω فرکانس زاویه‌ای است. برای یک سیستم n درجه آزادی، برای n مود می‌توان فرکانس‌های ω_n یا پریود $T_n=2\pi/\omega_n$ و شکل مودی ϕ_n را بدست آورد. با استفاده از خواص تعامد مودها نسبت به جرم و سختی می‌توان معادلات را ساده‌تر نوشت [۳]:

$$[\phi_n^T][M][\phi_m]=0 \quad (m\neq n) \qquad (۳)$$

$$[\phi_n^T][K][\phi_m]=0 \quad (m\neq n) \qquad (۴)$$

در یک سیستم n درجه آزادی n شکل مستقل وجود دارد. فرض کنید y_n دامنهٔ مود n باشد، حال می‌توان جابه‌جایی را به‌صورت معادلهٔ ۵ نوشت.

$$\{X\}=[\phi]\{Y\} \qquad (۵)$$

با مشتق‌گیری از معادلهٔ ۵ می‌توان معادلهٔ دیفرانسیل حرکت را به‌صورت ۶ نوشت.

$$[M][\phi]\{\ddot{Y}\}+[C][\phi]\{\dot{Y}\}+[K][\phi]\{Y\}=\{F\} \qquad (۶)$$

فرض می‌شود که تعامد مودها نسبت به ماتریس میرایی نیز برقرار باشد. در این‌صورت داریم:

$$[\phi_n^T][C][\phi_m]=0 \quad (m\neq n) \qquad (۷)$$

با ضرب طرفین معادلهٔ ۷ در ترانهادهٔ ϕ_n داریم:

$$[\phi_n^T][M][\phi_n]\{\ddot{Y}\}+[\phi_n^T][C][\phi_n]\{\dot{Y}\}+ \\ +[\phi_n^T][K][\phi_n]\{Y\}=[\phi_n^T]\{F\} \qquad (۸)$$

با توجه به فرض‌های ذیل می‌توان معادلهٔ ۸ را به‌صورت معادلهٔ ۹ بازنویسی کرد.

$$M'=[\phi_n^T][M][\phi_n]$$
$$C'=[\phi_n^T][C][\phi_n]$$
$$K'=[\phi_n^T][K][\phi_n]$$
$$F'=[\phi_n^T]\{F\}$$
$$M'\ddot{Y}_n+C'\dot{Y}_n+K'Y_n=F' \qquad (۹)$$

مقدار $\ddot{x}_g$ در مورد تحریک زلزله، برادر نیرو به‌صورت زیر است:

$$\{F\}=[M][l]\ddot{x}_g$$

باید توجه داشت که می‌توان سمت راست معادلهٔ اخیر را با علامت منفی نیز در نظر گرفت که در آن‌صورت $[l]$ بردار یکه با بعد N است و داریم:

$$\{F'\}=[\phi_n^T][M][l]\ddot{x}_g=L_n\ddot{x}_g \qquad (۱۰)$$

به‌طوری‌که در این رابطه L_n ضریب مشارکت مود n است. حال می‌توان معادلهٔ ۹ را به‌صورت ۱۱ نوشت:

$$M'\ddot{Y}_n+C'\dot{Y}_n+K'Y_n=L_n\ddot{x}_g \qquad (۱۱)$$

و یا:

$$\ddot{Y}_n+2\xi\omega_n\dot{Y}_n+\omega_n^2Y_n=\frac{L_n}{M'}\ddot{x}_g \qquad (۱۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه داریم:

$$C'=2\xi\omega_nM' \qquad (۱۳)$$
$$K'=\omega_n^2M'$$

پاسخ لرزه‌ای سازه مربوط به مود nام در لحظهٔ t را می‌توان با استفاده از انتگرال دوهامل بدست آورد:

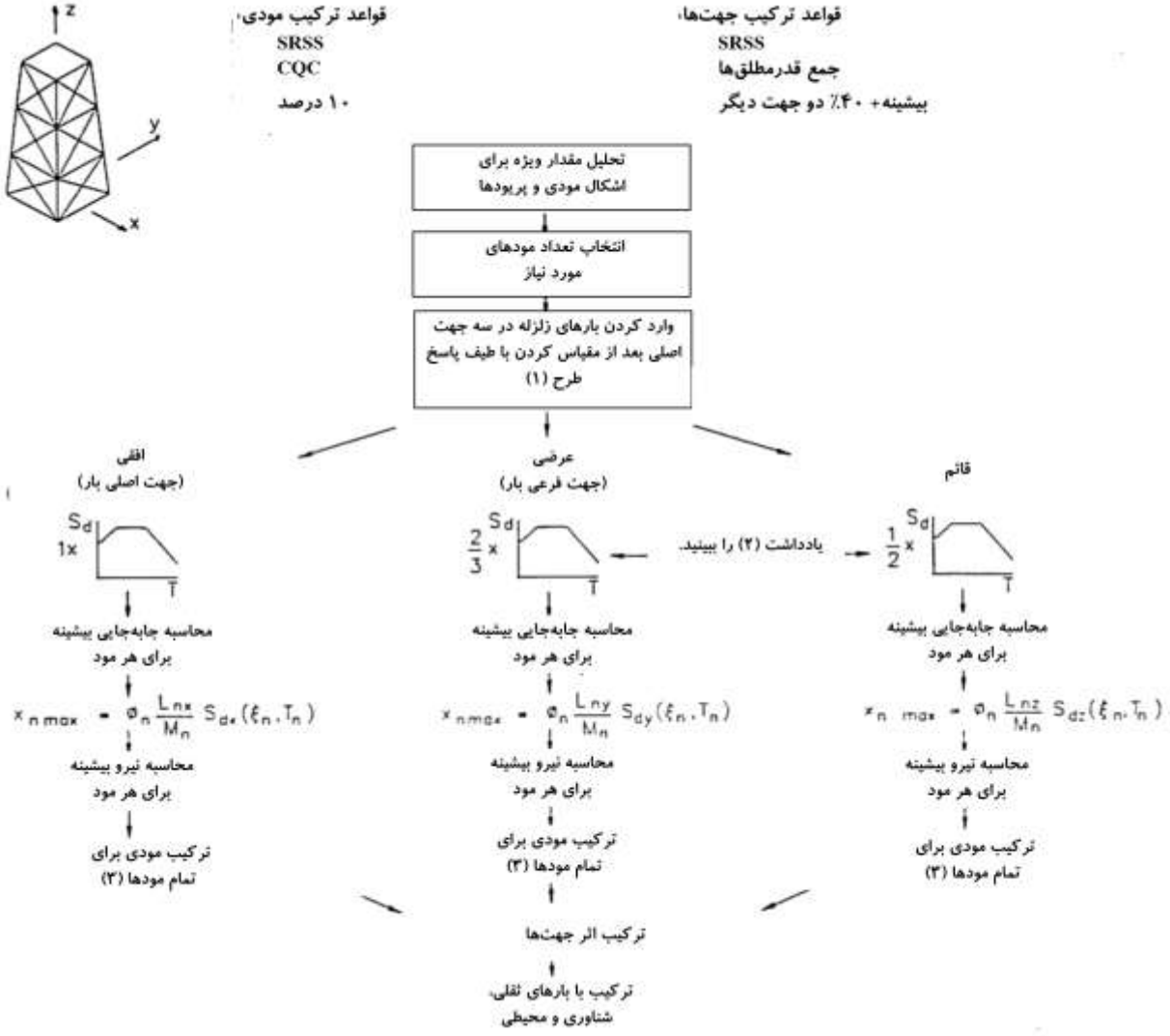
$$Y_n=\frac{L_n}{M'\omega_n}\int_0^t\ddot{x}_g(\tau)e^{-\xi\omega_n(t-\tau)}\sin\omega(t-\tau)\,d\tau$$

با نمایش V_n به‌جای مقدار انتگرال تقسیم بر ω_n داریم:

$$Y_n=\frac{L_n}{M'\omega_n}V_n \qquad (۱۴)$$

از برهم‌نهی تمام مودها جابه‌جایی کل سازه در لحظهٔ t بدست می‌آید.

$$\{x\} = [\phi]\{Y\}$$



(۱) بارهای زلزله باید در امتداد محورهای اصلی سازه وارد شود و تحلیل باید برای بار اصلی در هر دو امتداد x و y انجام شود

(۲) مقادیر API-RP-2A

(۳) روش CQC توصیه می‌شود

(۴) معمولا برای ترکیب مؤلفه‌های متعامد از SRSS استفاده می‌شود

(۵) این تحلیل برای سازه‌های وزنی مناسب نیست

شکل ۵. تحلیل طیف پاسخ [۱]

٦. روش طیف پاسخ

طیف پاسخ برای یک زلزلهٔ مشخص، نموداری است که بیشینهٔ پاسخ مستقیم یک درجه آزادی تحت تحریک شتاب پایه را برحسب پریود طبیعی نشان می‌دهد. با استفاده از انتگرال دوهامل پاسخ سیستم یک درجه آزادی تحت تحریک شتاب پایه را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۳]:

$$x(t) = \frac{1}{\omega}\int_0^t \ddot{x}_g(\tau)\, e^{-\xi\omega\,(t-\tau)} \sin\omega(t-\tau)\, d\tau \quad (۱۵)$$

با اتخاذ فرض زیر داریم:

$$V(t) = \int_0^t \ddot{x}_g(\tau)\, e^{-\xi\omega\,(t-\tau)} \sin\omega(t-\tau)\, d\tau$$

$$x(t) = \frac{V(t)}{\omega} \quad (۱۶)$$

بیشینهٔ پاسخ جابه‌جایی با بیشینهٔ مقدار $V(t)$ متناظر است. مقدار بیشینهٔ تابع پاسخ $V(t)$ سرعت طیفی نامیده می‌شود و آن را با نماد S_V نشان می‌دهند. بنابراین داریم:

$$S_V = V_{\max}$$

با توجه به معادلات ۱۶ و نمایش بیشینهٔ پاسخ جابه‌جایی با S_d می‌توان نوشت:

$$S_d = \frac{V_{\max}}{\omega} = \frac{S_V}{\omega} \qquad (۱۷)$$

باید توجه داشت S_d جابه‌جایی طیفی نامیده می‌شود. نیروهای اینرسی را می‌توان با حاصل‌ضرب جرم در شتاب مؤثر $\ddot{x}_e(t)$ به‌دست آورد. شتاب مؤثر به‌صورت رابطهٔ ۱۸ تعریف می‌شود.

$$\ddot{x}_e(t) = \omega^2 x(t) \qquad (۱۸)$$

با ترکیب معادلات ۱۶ و ۱۸ می‌توان نیروی اینرسی را به‌صورت رابطهٔ ۱۹ نوشت.

$$Q(t) = M\omega V(t) \qquad (۱۹)$$

شتاب مؤثر بیشینه نیروی اینرسی بیشینه را تولید خواهد کرد. شتاب مؤثر بیشینه به نام شتاب طیفی خوانده می‌شود و آن را با نماد S_a نمایش می‌دهند. بنابراین داریم:

$$S_a = \omega S_V \qquad (۲۰)$$

بیشینهٔ نیروی اینرسی در زلزله را نیز می‌توان به‌صورت رابطهٔ ۲۱ تعیین کرد:

$$Q_{\max} = MS_a \qquad (۲۱)$$

برای سیستم مختصات یافته بیشینهٔ پاسخ مود n به‌صورت رابطهٔ ۲۲ است.

$$Y_{n_{\max}} = \frac{L_n}{M'} S_{vn} \qquad (۲۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه S_{vn} سرعت طیفی برای مود n است. بنابراین می‌توان نوشت:

$$x_{n_{\max}} = \phi_n Y_{n_{\max}} = \phi_n \frac{L_n}{M'} S_{vn} \qquad (۲۳)$$

به‌طور مشابه، اگر S_{an} شتاب طیفی برای مود n باشد، بیشینهٔ نیروی اینرسی زلزله در مود n برابر است با:

$$q_{n_{\max}} = M\phi_n \frac{L_n}{M'} S_{an} \qquad (۲۴)$$

مؤسسهٔ نفت امریکا[۶] در *توصیه‌هایی برای برنامه ریزی، طراحی و ساخت سکوهای فراساحلی ثابت*[۷] مجموعه‌ای از منحنی‌های طیف پاسخ (طرح) را ارائه می‌کند [۴]. این طیف‌ها به شتاب ثقل واحد هم‌پایه شده‌اند. این مقادیر باید در شتاب بیشینهٔ G مربوط به ساختگاه سکو ضرب شوند. براساس توصیهٔ مؤسسهٔ نفت امریکا، همزمان با اعمال زلزله در یک جهت اصلی لازم است تا دو سوم شتاب طیف مورد نظر در جهت عمود و نصف آن در جهت قائم لحاظ شود [۵].

۷. مطالعهٔ موردی

مطابق شکل ۶ سکویی با جرم‌های متمرکز در پنج تراز مدل شده است. وزن ترازها به‌ترتیب ۶۰۰، ۸۰۰، ۷۵۰، ۵۰۰ و ۴۰۰۰ کیلو پوند فورس است. پریود سازه برابر با ۰/۷ ثانیه و خاک از نوع G است. شتاب بیشینه g ۰/۲۵ است (ناحیهٔ ۴). حال با استفاده از طیف API جابه‌جایی بیشینه در عرشه و برش پایه محاسبه می‌شود. برای این منظور فرض می‌شود که:

$$\psi(z) = 1 - \cos\frac{\pi}{2}\frac{z}{L}$$

$$\psi(5) = 0.1$$

$$\psi(4) = 0.6$$

$$\psi(3) = 0.34$$

$$\psi(2) = 0.13$$

$$\psi(1) = 0.01$$

W_i	M_i	ψ_i	$M_i\psi_i$	$M_i\psi_i^2$
4,000	124.22	1.00	124.22	124.22
500	15.53	0.61	9.47	5.78
750	23.29	0.34	7.92	2.69
800	24.84	0.13	3.23	0.42
600	18.63	0.01	0.19	0.002
6,650			145.03	133.11

$$T = 0.7\,\text{sec}ond$$

$$S_a = 2.5g \times 0.25 = \frac{20.125\,ft}{\sec^2}$$

$$S_d = 3.0in$$

مؤسسهٔ نفت امریکا توصیه می‌کند که دو سوم طیف شتاب برای جهت متعامد در نظر گرفته شود.

$$\delta_{\max} = 3.27 \times \sqrt{1 + 0.67^2} = 3.936\ in$$

$$Q_{\max} = 3{,}182 \times \sqrt{1+0.67^2} = 3{,}830\ kips$$

بیشینهٔ جابه‌جایی در هر تراز به‌صورت زیر است:

$$\delta_n = \psi(n)\delta_{\max}$$

$$\delta_5 = 1 \times 3.27 = 3.27\ in$$

$$\delta_4 = 0.61 \times 3.27 = 1.99\ in$$

$$\delta_3 = 0.34 \times 3.27 = 1.11\ in$$

$$\delta_2 = 0.13 \times 3.27 = 0.43\ in$$

$$\delta_1 = 0.01 \times 3.27 = 0.327\ in$$

$$q_1 = 0.19 \times 145.03 \times \frac{20.125}{133.11} = 4.20$$

$$\overline{3{,}180.23\ kips}$$

بیشینهٔ نیروی اینرسی در هر تراز به‌صورت زیر است:

$$q_n = M\psi(n)\frac{L}{M'}S_a$$

$$q_5 = 124.22 \times 145.03 \times \frac{20.125}{133.11} = 2{,}723.80 kips$$

$$q_4 = 9.47 \times 145.03 \times \frac{20.125}{133.11} = 207.70$$

$$q_3 = 7.92 \times 145.03 \times \frac{20.125}{133.11} = 173.70$$

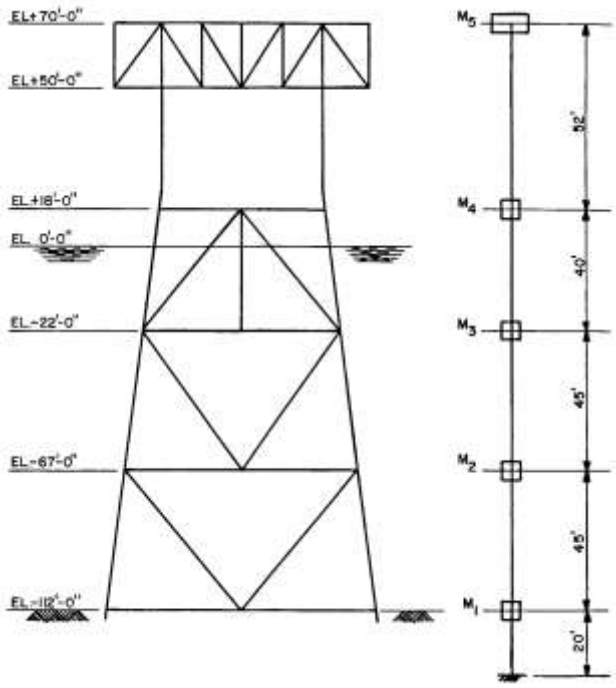
$$q_2 = 3.23 \times 145.03 \times \frac{20.125}{133.11} = 70.83$$

$$q_1 = 0.19 \times 145.03 \times \frac{20.125}{133.11} = 4.20$$

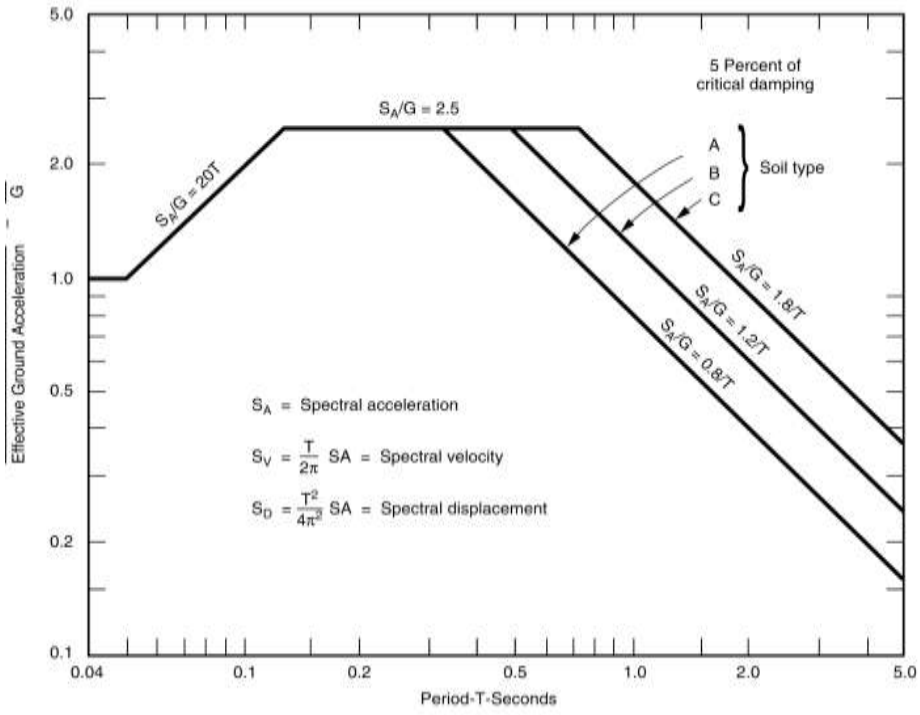
$$\overline{3{,}180.23\ kips}$$

۸. جمع‌بندی

هرچند پدیدهٔ حاکم بر فرایند طراحی سکوهای فراساحلی آثار امواج و خستگی است، اما در صورت لرزه‌خیزی منطقه و امکان رخداد زلزله‌های شدید، رفتار غیرخطی این سازه‌ها در زلزله اهمیت پیدا می‌کند. نرمی خاک و عمق زیاد شمع‌ها سبب برهم‌کنش شدید خاک و شمع با سازه می‌شود. در چنین مواردی باید بارگذاری لرزه‌ای با دقت انجام و سازه برای آن طرح شود. یک روش ساده و قدرتمند برای این کار تحلیل طیفی است که در این مقاله بررسی شد. در مناطق لرزه‌خیز علاوه بر مقاومت لرزه‌ای باید شکل‌پذیری سکوهای پایه‌ثابت نیز کنترل شود. در این مقاله مروری بر تحلیل طیفی سکوی پایه‌ثابت برای تعیین پاسخ لرزه‌ای سازه ارائه شد.



شکل ٦. سازهٔ مطرح‌شده در مطالعهٔ موردی



نوع خاک:

A سنگ و خاک بسیار سخت، سرعت موج برشی بیشتر از ۹۰۰ متربرثانیه

B خاک سخت

C خاک نرم

شکل ٦. طیف طرح آیین‌نامهٔ انستیتو نفت امریکا [٤]

۹. مآخذ

[1] Barltrop N.D.P., A.J. Adams. *Dynamics of Fixed Marine Structures*, Butterworth Heinemann, 1991.

[2] Wilson, E.L., R.W. Clough. "Dynamic Response by step-by-step Matrix Analysis." *Symposium on the Use of Computers in Civil Engineering*, October 1962.

[3] Hsu, Teng. *Applied Offshore* Structural Engineering, Gulf Pub., 1984.

[4] American Petroleum Institute, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, API RP 2A, January1982, pp.21-23.

[۵] تابش‌پور، محمدرضا. *مهندسی فراساحلی کاربردی*، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۲.

پی‌نوشت

1. Maximum Considered Earthquake or Maximum Considered Event (MCE)
2. Design Base Earthquake (DBE)
3. Ductility Level Earthquake (DLE)
4. Liquefaction
5. Strength Level Earthquake (SLE)
6. American Petroleum Institute (API)
7. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, API RP 2A