

فصل ۴

طیف پاسخ و طیف طرح

۴-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا روش محاسبه طیف پاسخ سازه های یکدرجه آزاد خطی توضیح داده می شود. از طیف پاسخ می توان برای محاسبه حداکثر پاسخ سازه شامل تغییر مکان، سرعت، شتاب، نیروی ارتجاعی، نیروی میرایی، نیروی اینرسی، نیروی برش پایه و ... تحت اثر یک زلزله خاص استفاده نمود. این طیف برای طراحی سازه مناسب نیست و باید طیف های طراحی را بدست آورد. روش محاسبه طیف های طراحی و یکی از مشهورترین طیف های طراحی به نام طیف طرح نیومارک نیز توضیح داده شده است. همچنین طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ نیز به اجمال آورده شده است.

۴-۲ طیف های پاسخ

معادله حرکت یک سیستم یک درجه آزاد در برابر شتاب زلزله به صورت زیر است:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g(t) \quad (۱-۴)$$

این معادله را می توان با روش های مختلف از جمله روش های گام به گام زمانی و انتگرال دو هامل حل نمود. جواب این معادله از روش انتگرال دو هامل به صورت زیر است:

$$u(t) = \frac{1}{\omega} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin\omega(t-\tau) d\tau \quad (۲-۴)$$

در این رابطه عبارت انتگرال را $V(t)$ می نامیم.

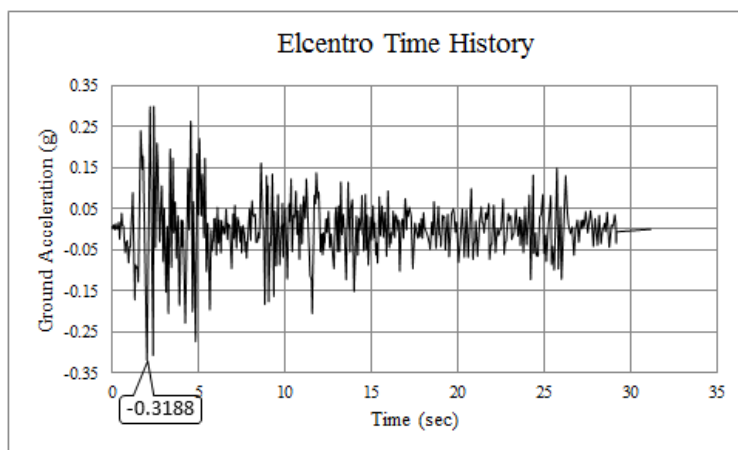
$$V(t) = \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin\omega(t-\tau) d\tau \quad (۳-۴)$$

توجه شود که بعد $V(t)$ سرعت می باشد. بنابراین رابطه (۲-۴) را به صورت زیر نیز می توان نوشت:

$$u(t) = \frac{1}{\omega} V(t) \quad (۴-۴)$$

در واقع $u(t)$ تابع تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی سیستم یک درجه آزاد با فرکانس ω و نسبت میرایی ξ تحت اثر شتاب زلزله $\ddot{u}_g(t)$ می باشد. ملاحظه می شود که تاریخچه زمانی تابع پارامترهای شتاب زلزله $\ddot{u}_g(t)$ و زمان t ، نسبت میرایی ξ و زمان تناوب T (و یا فرکانس ω) سازه می باشد.

برای یک زلزله معین، پاسخ سازه فقط به زمان و زمان تناوب و نسبت میرایی سازه بستگی دارد. به عنوان مثال زلزله السترو را در نظر بگیرید. شتاب این زلزله در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. اگر نسبت میرایی نیز ثابت در نظر گرفته شود آنگاه پاسخ سازه فقط به زمان و زمان تناوب سازه بستگی دارد. در شکل (۴-۲) پاسخ سازه های با نسبت میرایی ۵ درصد و زمان تناوب های مختلف تحت اثر زلزله السترو ترسیم داده شده است. نکته ای که در این شکل



شکل (۴-۱) شتاب زلزله السترو

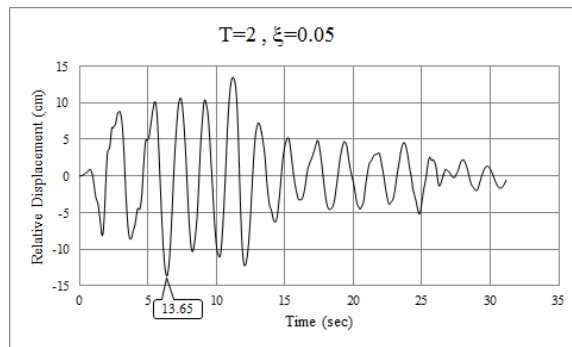
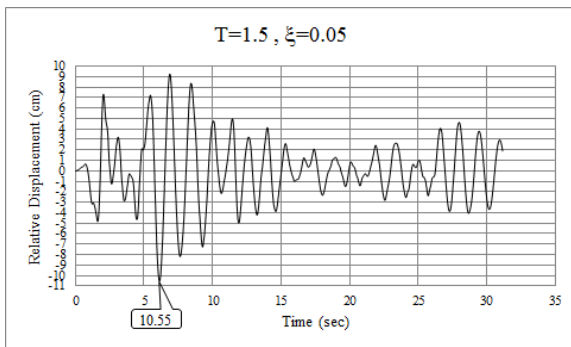
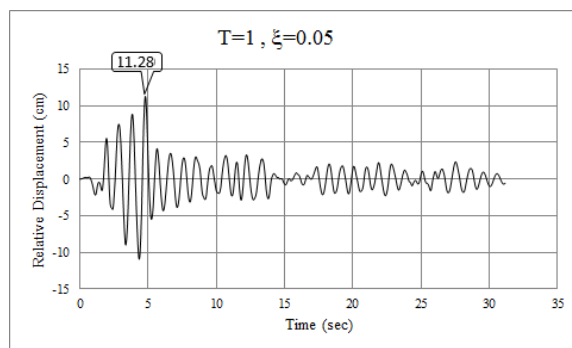
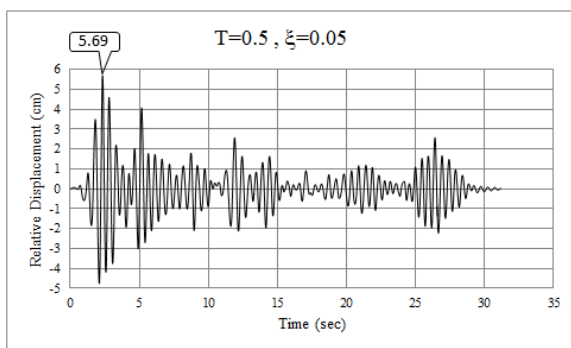
دیده می شود اینستکه زمان تناوب پاسخ سازه با زمان تناوب سازه تقریباً مساوی است. این نکته بیانگر اینستکه سازه فرکانس ارتعاشات ورودی را فیلتر می کند. به این معنی که ارتعاشاتی که هم فرکانس با سازه باشند از سازه عبور می کنند ولی ارتعاشاتی که فرکانس آنها با فرکانس سازه مساوی نباشد از سازه عبور نمی کند. به عبارت دیگر سازه مثل یک الک فرکانسی عمل می کند.

همچنین در شکل (۴-۲) مقادیر حداکثر تغییر مکان نسبی نیز نشان داده شده است. این مقادیر برای زمان تناوب های ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ ثانیه به ترتیب ۵/۶۹، ۱۱/۲۸، ۱۰/۵۵ و ۱۳/۶۵ سانتیمتر می باشد. این چنین تحلیلی برای زمان تناوب های دیگر نیز انجام شده است و مقادیر حداکثر تغییر مکان نسبی در جدول (۴-۱) آورده شده است.

مقادیر این جدول را می توان در نموداری که محور افقی آن زمان تناوب و محور عمودی آن حداکثر تغییر مکان نسبی است ترسیم نمود. این نمودار در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. به این نمودار طیف تغییر مکان نسبی زلزله الاسترو برای میرایی ۵ درصد گفته می شود. معمولاً طیف پاسخ تغییر مکان نسبی با S_d نشان داده می شود.

$$S_d = u_{\max} \quad (۴-۵)$$

واضح است که S_d تابعی از زمان تناوب و میرایی سازه و البته شتاب زلزله می باشد.



شکل (۴-۲) تغییر مکان نسبی سازه های یکدرجه آزاد با نسبت میرایی ۵ درصد در برابر زلزله الاسترو

جدول (۴-۱) حداکثر تغییر مکان سیستم های یکدرجه آزاد با میرایی ۵ درصد و زمان تناوب های مختلف تحت اثر زلزله السنترو

حداکثر تغییر مکان (سانتی متر)	زمان تناوب (ثانیه)	حداکثر تغییر مکان (سانتی متر)	زمان تناوب (ثانیه)
0.1509	0.1	11.6923	1.6
0.7875	0.2	11.6032	1.7
1.6665	0.3	12.2274	1.8
3.0034	0.4	13.6542	1.9
5.6892	0.5	13.6472	2
6.8496	0.6	16.7521	2.1
6.3826	0.7	19.9081	2.2
7.886	0.8	22.5886	2.3
10.7849	0.9	25.0846	2.4
11.2806	1	27.6888	2.5
9.8997	1.1	29.1729	2.6
9.2179	1.2	29.6391	2.7
8.9617	1.3	30.0282	2.8
8.8892	1.4	28.7188	2.9
10.5512	1.5	27.4676	3

همچنین با استفاده از روش های عددی توابع تاریخچه زمانی سرعت نسبی، شتاب نسبی و شتاب کل سیستم یکدرجه آزاد محاسبه شده است که با استفاده از آنها می توان حداکثر این توابع را بدست آورد. نتایج محاسبه حداکثر این مقادیر در جدول (۴-۲) آورده شده است. نمودار این مقادیر در شکل های (۴-۳) تا (۴-۳) نشان داده است.

تا اینجا ۴ تابع طیفی تغییر مکان نسبی، سرعت نسبی، شتاب نسبی و شتاب مطلق معرفی شدند. یک تابع طیفی معروف دیگر، تابع شبه سرعت طیفی (Pseudo Velocity) می باشد. شبه سرعت طیفی، حداکثر تابع $V(t)$ که در رابطه (۴-۴) معرفی شد، می باشد و با S_v نشان داده می شود.

$$S_v = V_{\max} \quad (۴-۷)$$

با توجه به رابطه (۴-۴) مشخص است که :

$$u_{\max} = \frac{1}{\omega} V_{\max} \Rightarrow S_d = \frac{1}{\omega} S_v \Rightarrow S_v = \omega S_d \quad (۴-۸)$$

ملاحظه می شود که برای محاسبه این تابع، کافیت تابع طیف تغییر مکان نسبی را داشته باشیم و در فرکانس ضرب نماییم.

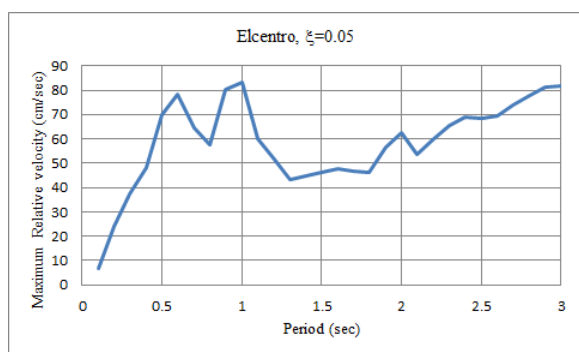
آخرین تابع طیفی که معرفی می شود تابع شبه شتاب طیفی (Pseudo Acceleration) می باشد. این تابع از ضرب تابع شبه سرعت در فرکانس بدست می آید و با S_a نشان داده می شود.

$$S_a = \omega S_v \Rightarrow S_a = \omega^2 S_d \quad (9-4)$$

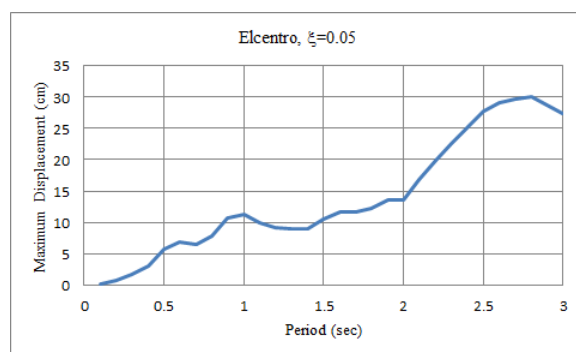
جدول (۴-۲) حداکثر سرعت نسبی، شتاب نسبی و شتاب کل سیستم های یکدرجه آزاد با میرایی ۵ درصد و زمان تناوب های مختلف

تحت اثر زلزله السترو

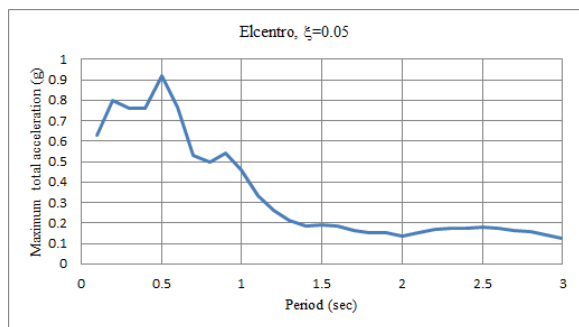
حداکثر شتاب مطلق (ساینتر بر معذور ثابیه)	حداکثر شتاب نسبی (ساینتر بر معذور ثابیه)	حداکثر سرعت نسبی (ساینتر بر ثابیه)	زمان تناوب (ثابیه)
614.1376	394.6793	6.6856	0.1
782.82	723.0932	24.0576	0.2
744.3915	937.9098	37.3207	0.3
743.965	856.752	48.1782	0.4
902.8303	1054.2158	69.995	0.5
751.6144	938.283	78.4139	0.6
520.5795	813.1808	64.7001	0.7
487.6755	606.5382	57.8273	0.8
528.0336	673.7772	80.0472	0.9
449.1866	690.1436	83.1528	1
324.5681	500.518	59.8365	1.1
254.1198	493.5101	52.3825	1.2
210.1559	482.7516	43.0427	1.3
180.0018	465.011	44.6786	1.4
186.3344	443.3143	46.3517	1.5
181.2442	420.5268	47.7722	1.6
159.7531	398.6549	46.9468	1.7
149.9413	378.8378	46.3751	1.8
150.4075	365.6452	56.4055	1.9
135.4747	359.4074	62.571	2
150.6401	351.4553	53.3998	2.1
163.188	342.8462	60.2146	2.2
169.5906	336.7035	65.2469	2.3
173.0402	356.7143	68.9535	2.4
176.4104	370.5179	68.6485	2.5
172.1205	380.6317	69.3496	2.6
161.6157	385.1666	73.7506	2.7
152.5309	384.8789	78.0366	2.8
136.3493	380.7505	81.2012	2.9
121.0472	373.7876	81.9267	3



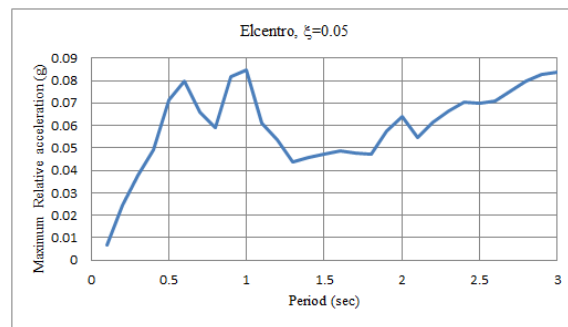
(ب) طیف پاسخ سرعت نسبی



(الف) طیف پاسخ تغییر مکان نسبی



(ت) طیف پاسخ شتاب کل



(پ) طیف پاسخ شتاب نسبی

شکل (۳-۴) طیف های پاسخ زلزله السترو

مقادیر طیف های تغییر مکان، شبه سرعت و شبه شتاب در جدول (۳-۴) و نمودار طیف های شبه سرعت و شبه شتاب در شکل (۴-۴) نشان داده شده است.

در اینجا ذکر چند نکته ضروری است. اول اینکه طیف هایی که بدست آمدند برای زلزله ال سنترو و نسبت میرایی ۵ درصد هستند. برای هر زلزله می توان چنین تحلیل هایی انجام داد و طیف های پاسخ را محاسبه نمود. بنابراین زلزله های مختلف طیف های پاسخ متفاوتی دارند. همچنین می توان نسبت های میرایی را نیز تغییر داد و مجدداً طیف های پاسخ را محاسبه نمود.

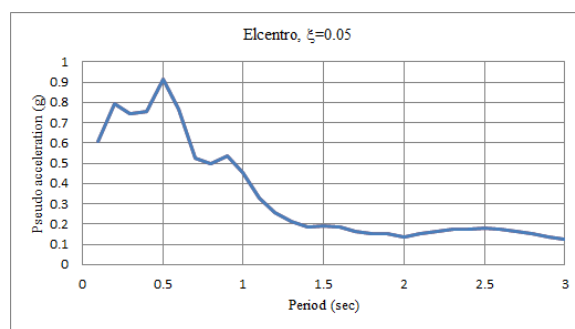
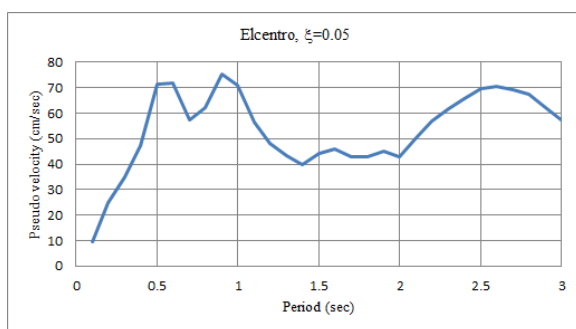
نکته دیگر اینکه محور طیف هایی که رسم شدند معمولی (و یا حسابی) هستند. این طیف ها را می توان روی محورهای لگاریتمی نیز ترسیم نمود.

آخرین نکته اینکه محور افقی طیف هایی که رسم شدند زمان تناوب می باشد. محور افقی را می توان بجای زمان تناوب، فرکانس زاویه ای (ω) و یا فرکانس دایره ای (f) را نیز انتخاب نمود.

جدول (۳-۴) مقادیر طیف تغییر مکان، شبه سرعت و شبه شتاب زلزله ال سنترو، نسبت میرایی ۵ درصد

T (sec)	ω (rad/sec)	Sd (cm)	Sv (cm/sec)	Sa (cm/sec ²)
0.1	62.8319	0.1509	9.482	595.7726
0.2	31.4159	0.7875	24.7388	777.1915
0.3	20.9440	1.6665	34.9032	731.011
0.4	15.7080	3.0034	47.1777	741.0648
0.5	12.5664	5.6892	71.4925	898.4015
0.6	10.4720	6.8496	71.7292	751.1466
0.7	8.9760	6.3826	57.2902	514.2352
0.8	7.8540	7.886	61.9365	486.448
0.9	6.9813	10.7849	75.2927	525.6419
1	6.2832	11.2806	70.8783	445.3413
1.1	5.7120	9.8997	56.5468	322.9945
1.2	5.2360	9.2179	48.2646	252.7128
1.3	4.8332	8.9617	43.3137	209.3448
1.4	4.4880	8.8892	39.8947	179.0472
1.5	4.1888	10.5512	44.1967	185.1307
1.6	3.9270	11.6923	45.9156	180.3103
1.7	3.6960	11.6032	42.8854	158.5042
1.8	3.4907	12.2274	42.6817	148.9874
1.9	3.3069	13.6542	45.1537	149.3205

2	3.1416	13.6472	42.8739	134.6923
2.1	2.9920	16.7521	50.1222	149.9653
2.2	2.8560	19.9081	56.8573	162.384
2.3	2.7318	22.5886	61.7079	168.575
2.4	2.6180	25.0846	65.6712	171.9268
2.5	2.5133	27.6888	69.5895	174.8974
2.6	2.4166	29.1729	70.4996	170.37
2.7	2.3271	29.6391	68.9733	160.5082
2.8	2.2440	30.0282	67.3831	151.2072
2.9	2.1666	28.7188	62.2227	134.8127
3	2.0944	27.4676	57.528	120.4864



شکل (۴-۴) طیف های شبه سرعت و شبه شتاب زلزله السنترو، نسبت میرایی ۵ درصد

۴-۳ نیروهای حداکثر

کاربرد مهم طیف پاسخ پیدا کردن پاسخ های حداکثر سازه ها در برابر یک زلزله خاص است. برای محاسبه حداکثر تغییر مکان نسبی، سرعت نسبی، شتاب نسبی و شتاب کل مستقیماً می توان از نمودارهای طیف استفاده کرد. برای محاسبه نیروهای حداکثر از روابط زیر استفاده می شود.

نیروی ارتجاعی

تاریخچه زمانی نیروی ارتجاعی از رابطه زیر بدست می آید:

$$f_s(t) = ku(t) \quad (۴-۱۰)$$

بنابراین حداکثر نیروی ارتجاعی برابر است با:

$$f_{s,max} = ku_{max} = kS_d \quad (۱۱-۴)$$

چون $k = m\omega^2$ و $S_a = \omega^2 S_d$ پس:

$$f_{s,max} = mS_a \quad (۱۲-۴)$$

ملاحظه می شود که برای محاسبه حداکثر نیروی ارتجاعی می بایست از تابع شبه شتاب طیفی استفاده نمود.

نیروی میرایی

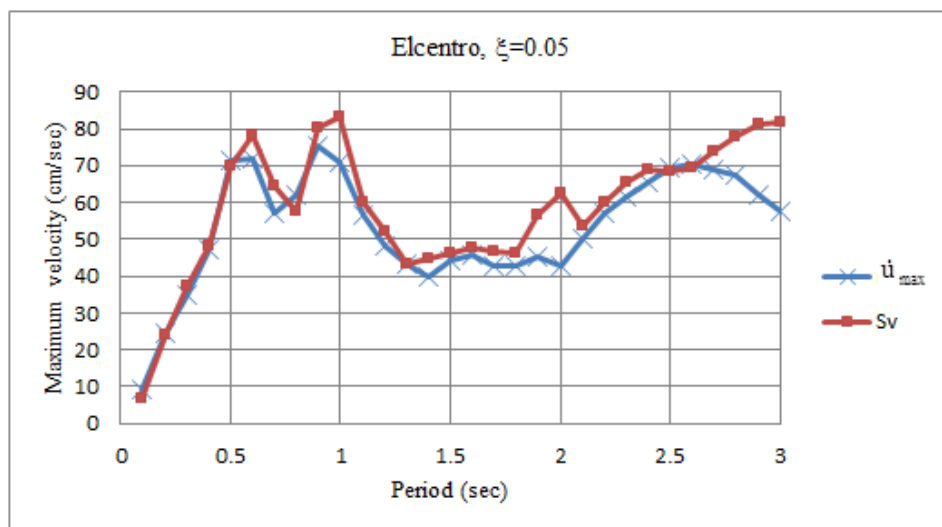
تاریخچه زمانی نیروی میرایی از رابطه زیر بدست می آید:

$$f_D(t) = C\dot{u}(t) \quad (۱۳-۴)$$

بنابراین حداکثر نیروی میرایی برابر است با:

$$f_{D,max} = C\dot{u}_{max} \quad (۱۴-۴)$$

ملاحظه می شود که برای محاسبه حداکثر نیروی میرایی می بایست از طیف سرعت نسبی استفاده نمود. لیکن طیف سرعت نسبی با طیف شبه سرعت تقریباً مساوی هستند. این مسئله در شکل (۵-۴) نشان داده شده است. در این شکل طیف پاسخ سرعت نسبی و شبه سرعت برای زلزله السنترو روی یک نمودار ترسیم شده است. ملاحظه می شود که این دو نمودار تقریباً روی یکدیگر قرار گرفته اند. توجه شود که سازه های متعارف زمان تناوب های کوچکی دارند که در این محدوده انطباق این دو طیف بیشتر است. بنابراین رابطه (۱۴-۴) را می توان به صورت رابطه (۱۵-۴) نوشت:



شکل (۴-۵) مقایسه طیف سرعت نسبی و شبه سرعت

$$f_{D,max} = CS_v = 2\xi m\omega S_v = 2\xi mS_a = 2\xi f_{s,max} \quad (۴-۱۵)$$

از این رابطه می توان برای محاسبه حداکثر نیروی میرایی استفاده نمود. با توجه به اینکه نسبت میرایی عدد کوچکی است، ملاحظه می شود که نیروی میرایی خیلی کوچک تر از نیروی ارتجاعی می باشد.

نیروی اینرسی

تاریخچه زمانی نیروی اینرسی از رابطه زیر بدست می آید:

$$f_I(t) = m\ddot{u}^t(t) \quad (۴-۱۶)$$

بنابراین حداکثر نیروی اینرسی برابر است با:

$$f_{I,max} = m\ddot{u}_{max}^t \quad (۴-۱۷)$$

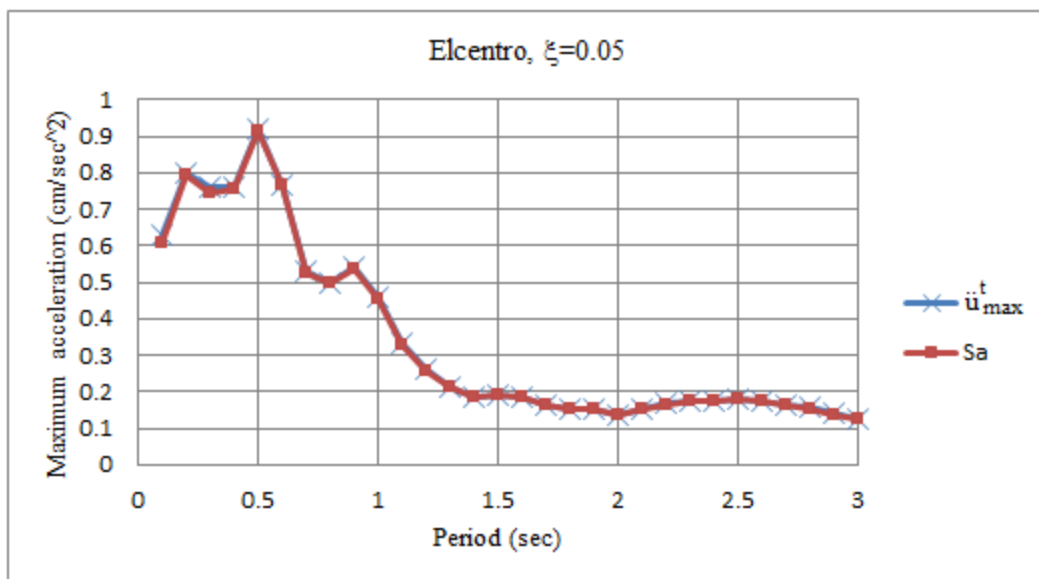
ملاحظه می شود که برای محاسبه حداکثر نیروی اینرسی باید از طیف شتاب کل استفاده شود. لیکن طیف شتاب کل با طیف شبه شتاب بسیار نزدیک هستند. در جدول (۴-۴) مقادیر طیف شتاب کل و طیف شبه شتاب برای زلزله

السترو آورده شده و نمودار آنها در شکل (۴-۶) ترسیم شده است. انطباق این دو طیف از این جدول و شکل بخوبی آشکار می باشد. بنابراین حداکثر نیروی اینرسی را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$f_{L,max} = mS_a \quad (۴-۱۸)$$

جدول (۴-۴) مقایسه طیف شتاب کل و شبه شتاب

T (sec)	\ddot{u}^t_{max} (g)	Sa (g)	T (sec)	\ddot{u}^t_{max} (g)	Sa (g)
0.1	0.626	0.608	1.6	0.185	0.184
0.2	0.798	0.793	1.7	0.163	0.162
0.3	0.759	0.745	1.8	0.153	0.152
0.4	0.759	0.756	1.9	0.153	0.152
0.5	0.921	0.916	2	0.138	0.137
0.6	0.766	0.766	2.1	0.154	0.153
0.7	0.531	0.524	2.2	0.166	0.166
0.8	0.497	0.496	2.3	0.173	0.172
0.9	0.538	0.536	2.4	0.176	0.175
1	0.458	0.454	2.5	0.180	0.178
1.1	0.331	0.329	2.6	0.176	0.174
1.2	0.259	0.258	2.7	0.165	0.164
1.3	0.214	0.213	2.8	0.156	0.154
1.4	0.184	0.183	2.9	0.139	0.137
1.5	0.190	0.189	3	0.123	0.123



شکل (۴-۶) مقایسه طیف شتاب کل و شبه شتاب

برش پایه

برای یک سیستم یکدرجه آزاد که تحت اثر شتاب زلزله قرار گرفته است، برش پایه برابر است با:

$$V_b(t) = f_s(t) + f_D(t) = f_I(t) \quad (۴-۱۹)$$

بنابراین حداکثر نیروی برش از رابطه زیر بدست می آید:

$$V_{b,max} = f_{I,max} = mS_a \quad (۴-۲۰)$$

این رابطه را به صورت زیر نیز می توان نوشت:

$$V_{b,max} = \left(\frac{S_a}{g} \right) (mg) = CW \quad (۴-۲۱)$$

که در آن W وزن سازه است و C ضریب زلزله نامیده می شود.

$$C = \frac{S_a}{g} \quad (۲۲-۴)$$

به عبارتی ضریب زلزله برابر است با طیف پاسخ شبه شتاب زلزله که برای شتاب $1.0g$ همپایه شده باشد.

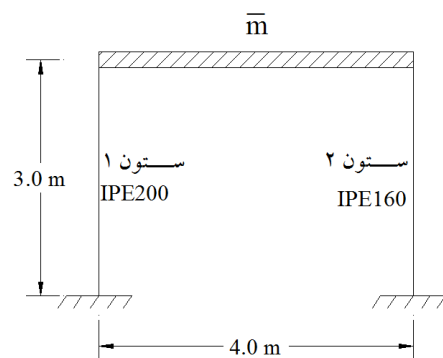
مثال - یکی از ستون های سازه یک طبقه نشان داده IPE160 و دیگری IPE200 می باشد. مطلوبست محاسبه مقادیر زیر با استفاده از طیف پاسخ زلزله السنترو برای نسبت میرایی ۵ درصد. (الف) حداکثر تغییر مکان (ب) حداکثر نیروی هر یک از ستون ها (پ) حداکثر برش پایه (ت) حداکثر لنگر خمشی هر یک از ستون ها (ث) حداکثر تنش خمشی در هر یک از ستون ها

$$\text{IPE200: } I = 1940 \text{ cm}^4, S = 194 \text{ cm}^3$$

$$\text{IPE160: } I = 869 \text{ cm}^4, S = 109 \text{ cm}^3$$

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{m} = 1500 \text{ kg/m}$$



$$k_1 = 12 \frac{EI}{L^3} = 12 \times \frac{210 \times 10^9 \times 1940 \times 10^{-8}}{3^3} = 1810667 \text{ N/m}$$

سختی ستون ها :

$$k_2 = 12 \times \frac{210 \times 10^9 \times 869 \times 10^{-8}}{3^3} = 811067 \text{ N/m}$$

$$k = k_1 + k_2 = 2621733 \text{ N/m} \quad \text{سختی سازه:}$$

$$m = 1500 \times 4 = 6000 \text{ kg} \quad \text{جرم سازه:}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{2621733}{6000}} = 20.903 \text{ rad/sec} \quad \text{فرکانس سازه:}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 0.30 \text{ sec} \quad \text{زمان تناوب سازه:}$$

با استفاده از طیف شبه شتاب زلزله السنترو (شکل ۴-۶) داریم: $S_a = 0.745g$

$$u_{\max} = \frac{S_a}{\omega^2} = \frac{0.745 \times 9.8}{20.903^2} = 0.0167 \text{ m} = 1.67 \text{ cm} \quad \text{(الف) حداکثر تغییر مکان}$$

(ب)

$$f_{s1,\max} = k_1 u_{\max} = 1810667 \times 0.0167 = 30254 \text{ N} = 30.25 \text{ KN} \quad \text{حداکثر نیروی ستون ۱}$$

$$f_{s2,\max} = k_2 u_{\max} = 8110667 \times 0.0167 = 13552 \text{ N} = 13.55 \text{ KN} \quad \text{حداکثر نیروی ستون ۲}$$

ملاحظه می شود که نیروی ستون ۱ به مراتب بیشتر از نیروی ستون ۲ است. در واقع این یک مسئله کلی است که هر عضوی از سازه که قویتر باشد نیروی بیشتری تحمل می کند.

$$V_{b,\max} = k u_{\max} = 2621733 \times 0.0167 = 43806 \text{ N} = 43.8 \text{ KN} \quad \text{(پ) حداکثر برش پایه}$$

نیروی برش پایه را می توان از جمع نیروهای ستون ها نیز بدست آورد.

(ت) حداکثر لنگر خمشی ستون ها

$$M_{AB} = M_{BA} = \frac{F_{AB}}{2} h$$

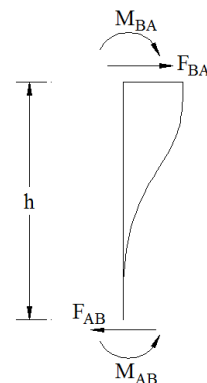
با توجه به نمودار جسم آزاد ستون داریم :

$$M_1 = \frac{30.25}{2} \times 3.0 = 45.38 \text{ KN.m}$$

لنگر ستون ۱ :

$$M_2 = \frac{13.55}{2} \times 3.0 = 20.33 \text{ KN.m}$$

لنگر ستون ۲ :



$$\sigma_1 = \frac{M_1}{S_1} = \frac{45.38 \times 10^3}{194 \times 10^{-6}} = 233.9 \times 10^6 \text{ Pa}$$

(ث) حداکثر تنش خمشی ستون ۱ :

$$\sigma_2 = \frac{M_2}{S_2} = \frac{20.33 \times 10^3}{109 \times 10^{-6}} = 186.9 \times 10^6 \text{ Pa}$$

حداکثر تنش خمشی ستون ۲ :

۴-۴ طیف طرح

استفاده از طیف پاسخ برای طراحی سازه دو اشکال مهم دارد. اول اینکه طیف فقط برای یک زلزله خاص بدست می آید. این زلزله در گذشته اتفاق افتاده است. احتمال اینکه این زلزله با تمام ویژگیهایی که دارد در آینده نیز اتفاق بیفتد تقریباً صفر است. در حالیکه سازه باید برای زلزله ای که در آینده اتفاق می افتد طراحی شود. دوم اینکه طیف پاسخ دارای نقاط تیزی است. این مسئله سبب می شود که خطای کوچکی در محاسبه زمان تناوب سازه باعث تغییر بزرگی در برآورد پاسخ سازه می شود.

برای غلبه بر این دو مشکل به صورت زیر می توان عمل نمود.

۱- تعدادی شتاب نگاشت انتخاب شود. در انتخاب شتاب نگاشت ها باید مسائل ژئوتکنیکی و لرزه خیزی منطقه از قبیل نوع گسل های موجود در منطقه، سابقه فعال بودن آنها، فاصله سایت مورد نظر تا گسل ها و ... مورد نظر قرار گیرد. هر چه تعداد شتاب نگاشت های انتخاب شده بیشتر باشد بهتر است.

۲- شتاب نگاشت های انتخاب شده به حداکثر شتاب موجود در آن همپایه شود. به این ترتیب حداکثر شتاب کلیه شتابنگاشت های انتخاب شده 1.0g می شود.

۳- برای شتاب نگاشت های انتخاب شده طیف پاسخ محاسبه گردد.

۴- میانگین و انحراف معیار طیف های پاسخ در هر زمان تناوب بدست آید.

۵- طیف میانگین و میانگین به اضافه یک انحراف معیار ترسیم شود.

به این ترتیب اشکال اول برطرف می شود. یعنی بجای اینکه پاسخ سازه فقط بر اثر یک زلزله معین بدست آید بر اثر تعدادی زلزله محاسبه می شود. اگر از طیف میانگین استفاده شود احتمال اینکه پاسخ سازه بیش از مقدار محاسبه شده شود ۵۰ درصد است ولی اگر از طیف میانگین به اضافه یک انحراف معیار استفاده شود به احتمال ۸۴/۱ درصد پاسخ سازه از مقدار محاسبه شده بیشتر نخواهد شد.

طیف های میانگین و میانگین به اضافه یک انحراف معیار تا حدودی نرمتر از طیف پاسخ یک زلزله می باشد یعنی تا حدودی از تیزی های موجود در طیف پاسخ یک زلزله خاص کاسته می شود لیکن هنوز برای طراحی مناسب نیستند. برای اینکه منحنی های کاملاً نرم (smooth) بدست آید باید از طیف های میانگین و یا میانگین به اضافه یک انحراف معیار با استفاده از روش برازش بهترین نمودار گذرانده شود.

۴-۵ نواحی طیفی

با بررسی طیف های پاسخ زلزله های مختلف مشاهده می شود که سه ناحیه متفاوت وجود دارد

۱- ناحیه شتاب ثابت، (محدوده فرکانس های خیلی بزرگ یا زمان تناوب های خیلی کوتاه)

اگر زمان تناوب سازه خیلی کوتاه (فرکانس سازه خیلی بزرگ) باشد، حرکات سازه با زمین برابر می شود. در نتیجه شتاب سازه با شتاب زمین مساوی است. بنابراین حداکثر شتاب سازه (S_a) با حداکثر شتاب زمین (Peak Ground Acceleration, PGA) برابر می شود.

$$S_a = PGA$$

۲- ناحیه تغییر مکان ثابت (محدوده فرکانس های خیلی کوچک یا زمان تناوب های خیلی بلند)

اگر زمان تناوب سازه خیلی بلند (فرکانس سازه خیلی کوچک) باشد، حرکات زمین روی سازه تأثیری ندارد. یعنی در حالیکه زمین حرکت می کند سازه ثابت است. این نکته به این مفهوم است که تغییر مکان نسبی سازه نسبت به زمین برابر با تغییر مکان زمین است. به همین دلیل حداکثر تغییر مکان سازه (S_d) با حداکثر تغییر مکان زمین (Peak Ground Displacement) برابر می شود. پس در این ناحیه می توان نوشت:

$$S_d = PGD$$

۳- ناحیه سرعت ثابت

در محدوده زمان تناوب های متوسط حداکثر سرعت سازه (S_v) با حداکثر سرعت زمین (Peak Ground Velocity) برابر است.

$$S_v = PGV$$

۴-۶ طیف طرح نیومارک

برای ترسیم طیف طرح نیومارک (شکل ۴-۷) به ترتیب زیر عمل می شود.

۱- روی محورهای ۴ لگاریتمی حداکثر شتاب (PGA)، سرعت (PGV) و تغییر مکان زمین (PGD) رسم شود.

$$2- \text{ برای سازه های با زمان تناوب } T < T_a \text{ (سازه های خیلی صلب) } T_a = \frac{1}{33} \text{ sec}$$

برای این سازه ها حداکثر شتاب سازه با حداکثر شتاب زمین برابر است. بنابراین در این محدوده خطی به موازات محور شتاب و به اندازه PGA ترسیم می شود.

$$3- \text{ برای سازه های با زمان تناوب } T_b < T < T_c \text{ (} T_b = \frac{1}{8} \text{ sec)}$$

برای این سازه هایی که زمان تناوب آنها در این محدوده قرار می گیرد، حداکثر شتاب سازه مقدار ثابتی است ولی بزرگتر از حداکثر شتاب زمین است. نسبت حداکثر شتاب سازه به حداکثر شتاب زمین، ضریب بزرگنمایی شتاب نامیده می شود. این ضریب در جدول (۴-۵) داده شده است. بنابراین برای محاسبه حداکثر شتاب سازه کافیست، حداکثر شتاب زمین در ضریب بزرگنمایی شتاب ضرب شود.

$$A = \alpha_A (PGA)$$

بنابراین در این محدوده خطی به موازات محور شتاب و به مقدار $\alpha_A (PGA)$ ترسیم می شود.

$$4- \text{ برای سازه های با زمان تناوب } T_a < T < T_b$$

در گام های قبلی مختصات نقاط a و b بدست آمد. نمودار طیف در محورهای لگاریتمی در محدوده بین a تا b به صورت خطی تغییر می کند.

$$5- \text{ برای سازه های با زمان تناوب } T_c < T < T_d$$

در این محدوده حداکثر سرعت سازه مقدار ثابتی است ولی نسبت به حداکثر سرعت زمین بزرگتر می باشد. نسبت حداکثر سرعت سازه به حداکثر سرعت زمین، ضریب بزرگنمایی سرعت نامیده می شود. این ضریب در جدول (۴-۵) داده شده است. بنابراین برای محاسبه حداکثر سرعت سازه کافیست، حداکثر سرعت زمین در ضریب بزرگنمایی سرعت ضرب شود.

$$V = \alpha_v(PGV)$$

برای محاسبه زمان تناوب نقطه C ملاحظه می شود که شتاب این نقطه $A_c = \alpha_A(PGA)$ و سرعت این نقطه

$V_c = \alpha_v(PGV)$ می باشد. همچنین بین سرعت و شتاب طیفی این نقطه رابطه زیر برقرار است:

$$A_c = \omega_c \times V_c \Rightarrow \alpha_A(PGA) = \frac{2\pi}{T_c} \alpha_v(PGV)$$

$$T_c = 2\pi \times \frac{\alpha_v(PGV)}{\alpha_A(PGA)} \quad \text{بنابراین}$$

۶- برای سازه های با زمان تناوب $T_d < T < T_e$ ($T_e = 10 \text{ sec}$)

در این محدوده حداکثر تغییرمکان سازه مقدار ثابتی است ولی بزرگتر از حداکثر سرعت زمین می باشد. نسبت حداکثر تغییرمکان سازه به حداکثر تغییرمکان زمین، ضریب بزرگنمایی تغییرمکان نامیده می شود. این ضریب در جدول (۴-۵) داده شده است. بنابراین برای محاسبه حداکثر تغییرمکان سازه کافیست، حداکثر تغییرمکان زمین در ضریب بزرگنمایی تغییرمکان ضرب شود.

$$D = \alpha_D(PGD)$$

برای محاسبه زمان تناوب نقطه d ملاحظه می شود که سرعت این نقطه $V_d = \alpha_v(PGV)$ و تغییرمکان این نقطه

$D_d = \alpha_D(PGD)$ می باشد. همچنین بین تغییرمکان و سرعت طیفی این نقطه رابطه زیر برقرار است:

$$V_d = \omega_d \times D_d \Rightarrow \alpha_v(PGV) = \frac{2\pi}{T_d} \alpha_D(PGD)$$

$$T_d = 2\pi \times \frac{\alpha_D(PGD)}{\alpha_v(PGV)} \quad \text{بنابراین}$$

۷- برای سازه های با زمان تناوب $T > T_f$ (سازه های خیلی نرم) ($T_f = 33 \text{ sec}$)

برای این سازه ها حداکثر تغییرمکان سازه با حداکثر تغییرمکان زمین برابر است. بنابراین در این محدوده خطی به موازات محور تغییرمکان و به اندازه PGD ترسیم می شود.

۸- در گام های قبل مختصات نقاط e و f بدست آمد. نمودار طیف بین این دو نقطه در محور لگاریتمی به صورت خطی تغییر می کند.

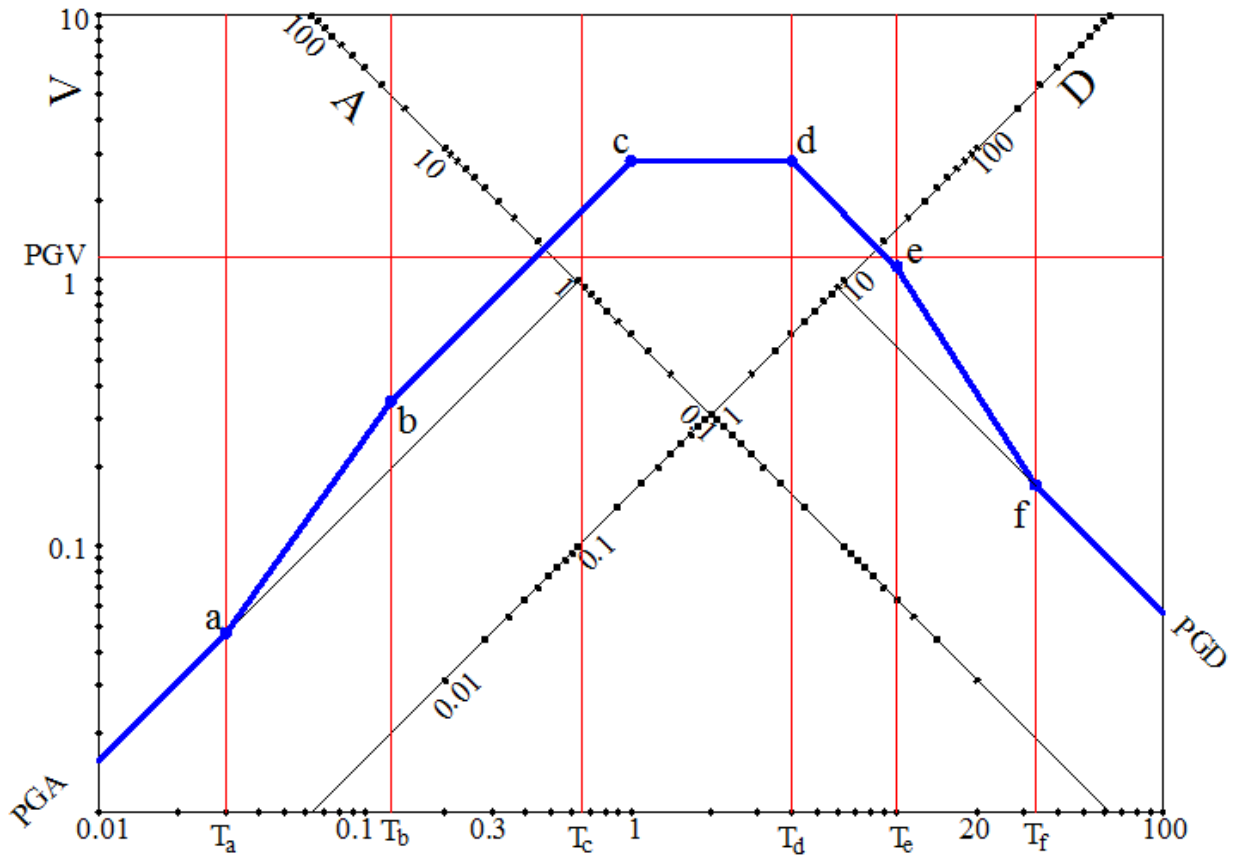
ملاحظه می شود که برای ترسیم نمودار طیف طرح نیومارک به مقادیر حداکثر شتاب زمین (PGA)، حداکثر سرعت زمین (PGV) و حداکثر تغییر مکان زمین (PGD) نیاز است. این مقادیر را می توان از مطالعات ژئوتکنیکی و لرزه خیزی منطقه بدست آورد. در صورت عدم انجام چنین مطالعاتی می توان از آیین نامه های زلزله (در ایران استاندارد ۲۸۰۰ و یا مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان) استفاده نمود. لیکن در این آیین نامه ها معمولاً مقادیر حداکثر شتاب زمین ارائه شده است. در این صورت می توان از روابط تقریبی زیر که برای زمین های سخت بدست آمده برای محاسبه حداکثر سرعت و حداکثر تغییر مکان زمین استفاده نمود. برای سایر زمین ها می توان از روابط مشابه استفاده نمود.

$$\frac{(PGV)}{(PGA)} = \frac{1.22}{g} \quad \frac{(PGA) \times (PGD)}{(PGV)^2} = 6$$

که در این روابط PGA حداکثر شتاب زمین بر حسب g ، PGV حداکثر سرعت زمین بر حسب m/sec و PGD حداکثر تغییر مکان زمین بر حسب متر می باشد.

جدول (۴-۵) ضرایب بزرگنمایی شتاب، سرعت و تغییر مکان

ضرایب بزرگنمایی	طیف میانگین (احتمال ۵۰٪)	طیف میانگین به اضافه یک انحراف معیار (احتمال ۸۴/۱٪)
ضریب بزرگنمایی شتاب α_A	$3.21 - 0.68 \ln \xi$	$4.38 - 1.04 \ln \xi$
ضریب بزرگنمایی سرعت α_V	$2.31 - 0.41 \ln \xi$	$3.38 - 0.67 \ln \xi$
ضریب بزرگنمایی تغییر مکان α_D	$1.82 - 0.27 \ln \xi$	$2.73 - 0.45 \ln \xi$



شکل (۷-۴) طیف طرح نیومارک

مثال - طیف طرح نیومارک را برای $PGA = 1.0g$ و $\xi = 5\%$ و احتمال میانگین به اضافه یک انحراف معیار بدست آورید.

حل -

حداکثر شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین

$$PGA = 1.0g = 10 \text{ m/sec}^2$$

$$PGV = \frac{PGA}{g} \times 1.22 = 1.22 \text{ m/sec}$$

$$PGD = \frac{6(PGV)^2}{PGA} = 0.893 \text{ m}$$

ضرایب بزرگنمایی

$$\alpha_A = 4.38 - 1.04 \ln \xi = 2.706$$

$$\alpha_V = 3.38 - 0.67 \ln \xi = 2.302$$

$$\alpha_D = 1.82 - 0.27 \ln \xi = 2.006$$

مختصات نقاط طیفنقطه a

$$T_a = \frac{1}{33} \text{ sec} = 0.0303 \text{ sec}$$

$$A_a = PGA = 10 \text{ m/sec}^2$$

$$V_a = \omega_a A_a = \frac{A_a \times T_a}{2\pi} = 0.0482 \text{ m/sec}$$

$$D_a = \omega_a V_a = \frac{V_a \times T_a}{2\pi} = 0.0002326 \text{ m}$$

نقطه b

$$T_b = \frac{1}{8} \text{ sec} = 0.125 \text{ sec}$$

$$A_b = \alpha_A PGA = 27.0618 \text{ m/sec}^2$$

$$V_b = \frac{A_b \times T_b}{2\pi} = 0.5384 \text{ m/sec}$$

$$D_b = \frac{V_b \times T_b}{2\pi} = 0.0107 \text{ m}$$

نقطه c

$$T_c = 2\pi \times \frac{\alpha_v(PGV)}{\alpha_A(PGA)} = 0.6520 \text{ sec}$$

$$A_c = \alpha_A PGA = 27.0618 \text{ m/sec}^2$$

$$V_c = \frac{A_c \times T_c}{2\pi} = 2.8080 \text{ m/sec}$$

$$D_c = \frac{V_c \times T_c}{2\pi} = 0.2914 \text{ m}$$

نقطه d

$$T_d = 2\pi \times \frac{\alpha_D(PGD)}{\alpha_v(PGV)} = 4.0080 \text{ sec}$$

$$V_d = \alpha_v PGV = 2.8080 \text{ m/sec}$$

$$A_d = \frac{2\pi \times V_d}{T_d} = 4.4021 \text{ m/sec}^2$$

$$D_d = \frac{V_d \times T_d}{2\pi} = 1.7912 \text{ m}$$

نقطه e

$$T_e = 10.0 \text{ sec}$$

$$D_e = \alpha_D PGD = 1.7912 \text{ m}$$

$$V_e = \frac{2\pi \times D_e}{T_e} = 1.1255 \text{ m/sec}$$

$$A_e = \frac{2\pi \times V_e}{T_e} = 0.7071 \text{ m}$$

نقطه f

$$T_f = 33.0 \text{ sec}$$

$$D_f = PGD = 0.8930 \text{ m}$$

$$V_f = \frac{2\pi \times D_f}{T_f} = 0.1700 \text{ m/sec}$$

$$A_f = \frac{2\pi \times V_f}{T_f} = 0.0324 \text{ m}$$

معادلات طیف در محدوده های مختلف

$$\underline{T < T_a}$$

$$A = PGA = 1.0g = 10 \text{ m/sec}^2$$

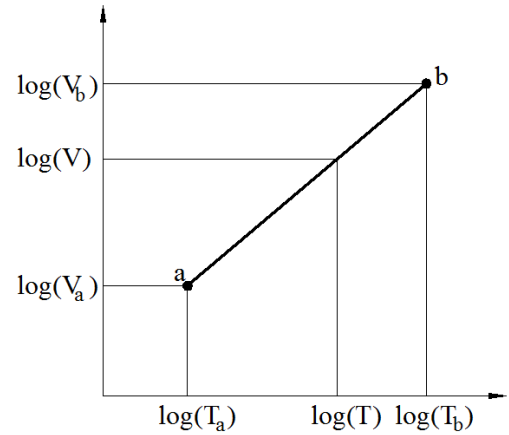
$$V = \frac{T}{2\pi} A = 1.5915T$$

$$D = \frac{T}{2\pi} V = 0.2533T^2$$

$$\underline{T_a \leq T < T_b}$$

در این محدوده نمودار طیف در محورهای لگاریتمی به صورت خطی تغییر می کند. معادله خط در محورهای لگاریتمی به صورت زیر می باشد.

$$\log(V) = \log(V_a) + \frac{\log(V_b) - \log(V_a)}{\log(T_b) - \log(T_a)} [\log(T) - \log(T_a)]$$



$$\log(V) = -1.3167 + 1.7025[\log(T) + 1.5185] = 1.2686 + \log(T^{1.7025}) = \log(18.5623T^{1.7025})$$

$$V = 18.5623T^{1.7025}$$

$$A = \frac{2\pi}{T} V = 116.6301T^{0.7025}$$

$$D = \frac{T}{2\pi} V = 2.9543T^{2.7025}$$

$$\underline{T_b \leq T < T_c}$$

$$A = \alpha_A PGA = 27.0618 \text{ m/sec}^2$$

$$V = \frac{T}{2\pi} A = 4.3070T$$

$$D = \frac{T}{2\pi} V = 0.6855T^2$$

$$\underline{T_c \leq T < T_d}$$

$$V = \alpha_V PGV = 2.8080 \text{ m/sec}^2$$

$$A = \frac{2\pi}{T} V = 17.6432T^{-1}$$

$$D = \frac{T}{2\pi} V = 0.4469T$$

$$\underline{T_d \leq T < T_e}$$

$$D = \alpha_D PGD = 1.7912 \text{ m/sec}^2$$

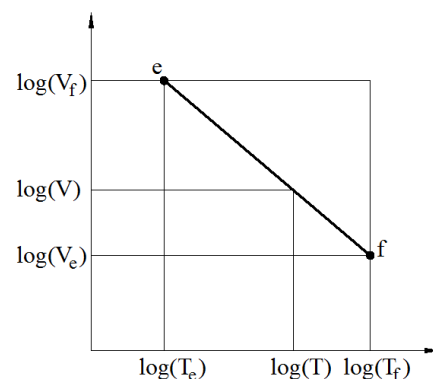
$$V = \frac{2\pi}{T} D = 11.2546T^{-1}$$

$$A = \frac{2\pi}{T} V = 70.7144T^{-2}$$

$$\underline{T_e \leq T < T_f}$$

در این محدوده نیز نمودار طیف در محورهای لگاریتمی به صورت خطی تغییر می کند. معادله این خط در محورهای لگاریتمی به صورت زیر می باشد:

$$\log(V) = \log(V_e) + \frac{\log(V_e) - \log(V_f)}{\log(T_e) - \log(T_f)} [\log(T) - \log(T_e)]$$



$$\log(V) = 0.0513 - 1.5830[\log(T) + 1.0] = -1.5316 + \log(T^{-1.5830}) = \log(0.294T^{-1.5830})$$

$$V = 0.294T^{-1.5830}$$

$$A = \frac{2\pi}{T} V = 0.1847T^{-2.5830}$$

$$D = \frac{T}{2\pi} V = 0.0047T^{-0.5830}$$

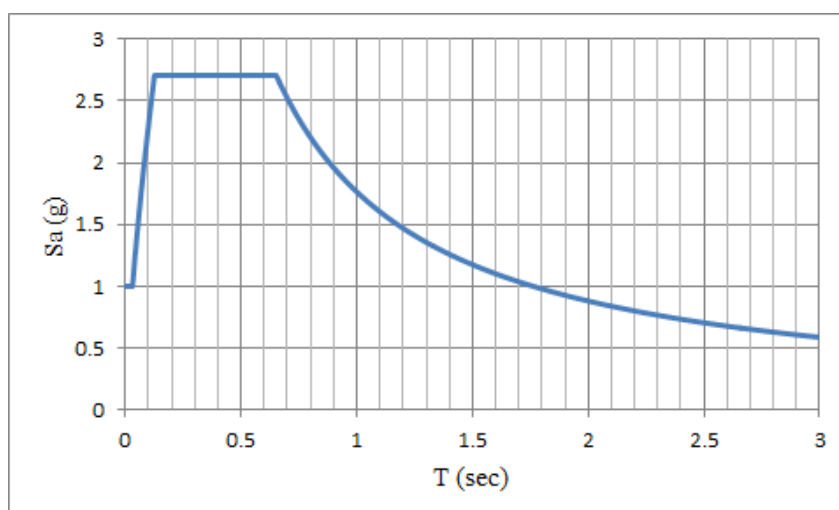
$$\underline{T > T_f}$$

$$D = PGD = 0.8930 \text{ m}$$

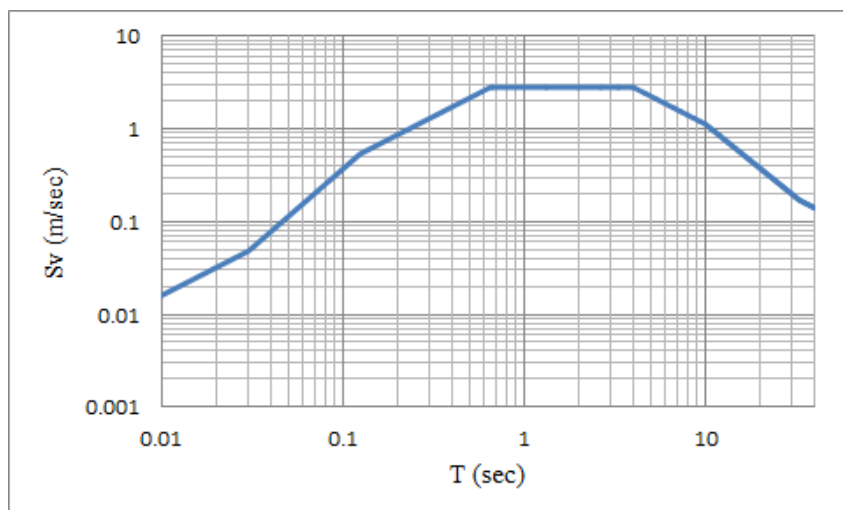
$$V = \frac{2\pi}{T} D = 5.6111T^{-1}$$

$$A = \frac{2\pi}{T} V = 35.2558T^{-2}$$

در شکل (۴-۸) نمودار طیف شبه شتاب در محورهای معمولی و در شکل (۴-۹) طیف شبه سرعت در محورهای لگاریتمی ترسیم شده است. چنانچه ملاحظه می شود طیف شبه سرعت در نمودار لگاریتمی از تعدادی خط مستقیم تشکیل شده است. همچنین طیف شبه شتاب در محورهای معمولی شبیه به طیف بازتاب طرح در استاندارد ۲۸۰۰ می باشد.



شکل (۸-۴) نمودار طیف شبه شتاب در محورهای معمولی



شکل (۹-۴) نمودار طیف شبه سرعت در محورهای معمولی

۷-۴ طیف استاندارد ۲۸۰۰

طیف طراحی در استاندارد ۲۸۰۰، ضریب بازتاب ساختمان نامیده شده و با B نشان داده می شود. چنانچه در بخش قبل هم دیده شد این ضریب به نوع خاک بستگی دارد. مقدار این ضریب از رابطه زیر بدست می آید:

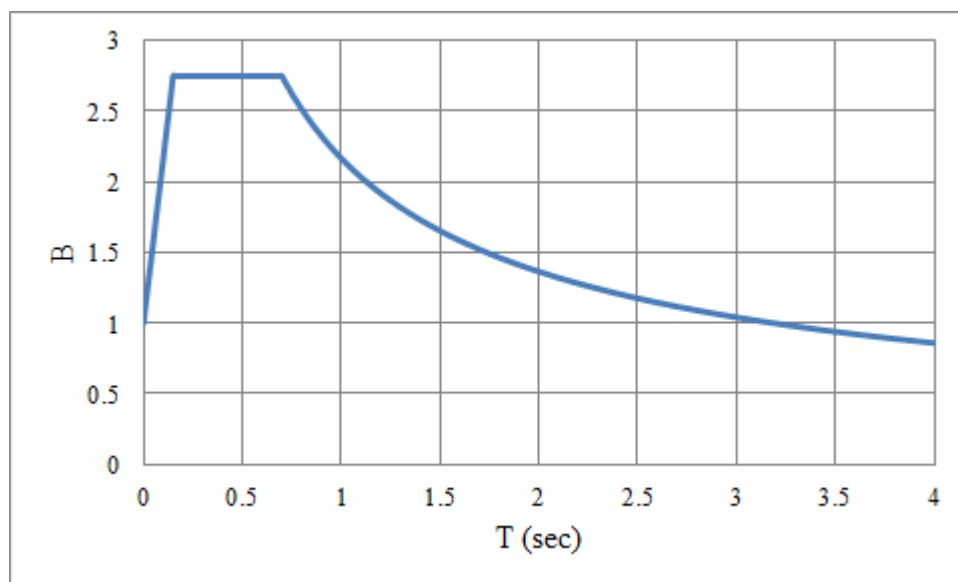
$$B = \begin{cases} 1 + S \times \frac{T}{T_0} & 0 \leq T \leq T_0 \\ S + 1 & T_0 \leq T \leq T_s \\ (S + 1) \left(\frac{T_s}{T} \right)^{2/3} & T \geq T_s \end{cases} \quad (۲۳-۴)$$

T_0 ، T_s و S پارامترهایی هستند که به نوع زمین و میزان خطر لرزه خیزی منطقه بستگی دارند و از جدول (۴-۶) بدست می آیند.

جدول (۴-۶) ضرایب مربوط به نوع زمین

نوع زمین	T_0	T_s	S	
			خطر نسبی کم و متوسط	خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد
I	۰/۱	۰/۴	۱/۵	۱/۵
II	۰/۱	۰/۵	۱/۵	۱/۵
III	۰/۱۵	۰/۷	۱/۷۵	۱/۷۵
IV	۰/۱۵	۱/۰	۲/۲۵	۱/۷۵

نمودار این طیف برای خاک نوع III در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۰) طیف استاندارد ۲۸۰۰ برای خاک نوع III

این طیف برای حداکثر شتاب زمین 1.0g بدست آمده است. بنابراین می بایست در حداکثر شتاب محتمل زمین ضرب شود. این ضریب در استاندارد ۲۸۰۰، شتاب مبنای طرح نامیده شده و با A نشان داده می شود. مقدار این ضریب برای مناطق مختلف کشور بسته به میزان لرزه خیزی آنها بدست آمده و در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۷-۴) ضریب شتاب مبنای طرح

منطقه	توصیف	نسبت شتاب مبنای طرح A
۱	پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد	۰/۳۵
۲	پهنه با خطر نسبی زیاد	۰/۳۰
۳	پهنه با خطر نسبی متوسط	۰/۲۵
۴	پهنه با خطر نسبی کم	۰/۲۰

ساختمان های مهم باید برای نیروی بیشتری نسبت به ساختمان های کم اهمیت طراحی شوند. به همین دلیل در استاندارد ۲۸۰۰ ضریب I به نام ضریب اهمیت ساختمان در مقدار طیف ضرب می شود. مقدار این ضریب در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۸-۴) ضریب اهمیت ساختمان

گروه بندی ساختمان بر اساس اهمیت	مثال	ضریب I
با اهمیت خیلی زیاد	بیمارستان، درمانگاه، آتش نشانی، مراکز آبرسانی، نیروگاه برق، برج مراقبت فرودگاه، مخابرات، رادیو و تلویزیون، مراکز انتظامی، مراکز امداد و کمک رسانی	۱/۴
با اهمیت زیاد	(الف) مدارس، مساجد، استادیوم، سینما، تئاتر، سالن اجتماعات،	۱/۲

	فروشگاههای بزرگ، ترمینال های مسافری، فضاهایی که بیش از ۳۰۰ نفر در آن اجتماع می کنند. (ب) موزه ها، کتابخانه ها، (پ) پالایشگاه ها، انبارهای سوخت، مراکز گازرسانی	
۱/۰	ساختمان های مسکونی، اداری و تجاری، هتل ها، پارکینگ های طبقاتی، انبارها، کارگاه ها، ساختمان های صنعتی	با اهمیت متوسط
۰/۸	(الف) انبارهای کشاورزی، سالن های مرغداری (ب) ساختمان های موقت	با اهمیت کم

همچنین طیف استاندارد ۲۸۰۰ برای رفتار ارتجاعی و خطی سازه بدست آمده است در صورتیکه در غالب زلزله ها رفتار سازه از این حالت بیرون آمده و وارد رفتار غیر خطی می شود. اگر رفتار سازه به صورت غیرخطی باشد مقداری از انرژی زلزله توسط مفاصل پلاستیک جذب می شود، بنابراین مقدار نیروی وارد بر سازه کمتر از حالت رفتار خطی است. این موضوع در فصل ۶ به تفصیل شرح داده شده است. در استاندارد ۲۸۰۰ ضریبی به نام ضریب رفتار سازه وجود دارد که اثرات غیرخطی بودن رفتار سازه را در بر می گیرد و R نامیده می شود.

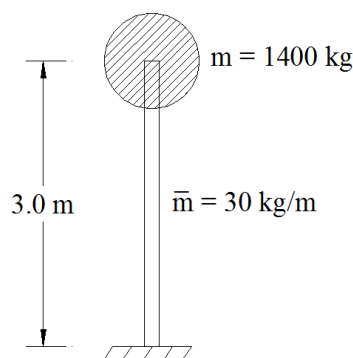
چنانچه در بخش ۳-۴ دیده شد ضریب زلزله از رابطه $C = \frac{S_a}{g}$ بدست می آید. با توجه به نکات فوق این ضریب برابر است با:

$$C = \frac{S_a}{g} = \frac{ABI}{R} \quad (۲۴-۴)$$

تمرینات

- ۱- فرض کنید شتاب زمین را بتوان با رابطه $\ddot{u}_g(t) = \ddot{u}_{g0} \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right)$ بیان نمود که در آن \ddot{u}_{g0} حداکثر شتاب زمین و T_0 زمان تناوب زمین می باشد. (الف) معادلات S_a و \ddot{u}_{\max}^t را بر حسب زمان تناوب T و نسبت میرایی سازه ξ بدست آورید. فقط پاسخ دائمی را در نظر بگیرید. (ب) نمودار $\frac{S_a}{\ddot{u}_{g0}}$ و $\frac{\ddot{u}_{\max}^t}{\ddot{u}_{g0}}$ را بر حسب $\frac{T}{T_0}$ برای نسبت میرایی های صفر، ۲، ۵، و ۱۰ درصد رسم نمایید.

- ۲- یک مخزن ذخیره آب به ارتفاع ۳/۰ متر و جرم متمرکز ۱۴۰۰ کیلوگرم بر روی یک ستون فولادی لوله ای قرار گرفته است. مشخصات ستون عبارت است از:



قطر خارجی لوله ۱۷۰ میلیمتر

ضخامت جداره لوله ۷ میلیمتر

جرم واحد طول لوله ۳۰ کیلوگرم بر متر

ضریب الاستیسیته لوله ۲۱۰ گیگاپاسکال

حداکثر تغییرمکان جانبی، برش پایه و تنش خمشی در ستون را با استفاده از طیف استاندارد ۲۸۰۰ و برای خاک نوع

III بدست آورید. $A = 0.35$, $R = 1$

- ۳- یک مخزن ذخیره آب روی یک برج به ارتفاع ۲۴ متر قرار گرفته است. این سازه را می توان به صورت یک سیستم یک درجه آزاد به جرم ۴۵ تن، سختی ۷ کیلونیوتن بر متر و نسبت میرایی ۵ درصد مدل نمود. این مخزن می بایست برای طیف طرح نیومارک (شکل ۴-۸ یا ۴-۹) و برای حداکثر شتاب زمین $0.5g$ طرح شود.

(الف) تغییر مکان جانبی و برش پایه را حساب کنید.

(ب) تغییر مکان جانبی محاسبه شده در قسمت (الف) کمی زیاد به نظر می رسد بنابراین طراح تصمیم می گیرد که سختی سیستم را به ۱۴ کیلونیوتن بر متر افزایش دهد. تغییر مکان جانبی و برش پایه را در این حالت محاسبه کرده و روی تأثیر افزایش سختی روی تغییر مکان جانبی و برش پایه بحث کنید.

(پ) اگر جرم سیستم سخت شده (قسمت ب) ۹۰ تن افزایش یابد، مجدداً تغییر فرم جانبی و برش پایه را حساب کرده و روی تأثیر افزایش جرم روی این پارامترها بحث کنید.

۴- یک قاب یک طبقه بتنی به صورت یک سیستم یک درجه آزاد با جرم متمرکز ۴/۵ تن در تراز تیر مدل شده است. دهانه قاب ۷/۲ متر و ارتفاع آن ۳/۶ متر می باشد. پای ستون ها گیردار و سطح مقطع آنها مربع به ابعاد ۲۵ سانتی متر است. ضریب الاستیسیته ۲۰ گیگاپاسکال و نسبت میرایی ۵ درصد می باشد. با استفاده از طیف طرح نیومارک (شکل ۴-۸ یا ۴-۹) و برای حداکثر شتاب زمین $0.35g$ تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی پای ستونها را در دو حالت زیر حساب کنید.

(الف) تیر قاب را صلب فرض کنید.

(ب) سختی خمشی تیر قاب صفر در نظر بگیرید.

۵- قسمت (الف) مسئله ۵ (تیر صلب) را با فرض اینکه تکیه گاه ستون های قاب ساده باشد حل کنید.

۶- برای یک زلزله طرَح در یک منطقه مقادیر حداکثر شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین به صورت زیر بدست آمده است.

$$PGA = 0.5g \quad , \quad PGV = 60 \text{ cm/sec} \quad , \quad PGD = 45 \text{ cm}$$

برای سیستم های با میرایی 2%:

(الف) مختصات نقاط طیفی و معادلات طیف های میانگین و میانگین به اضافه یک انحراف معیار را بدست آورید.

(ب) هر دو طیف را روی محورهای ۴ لگاریتمی رسم کنید.

(پ) طیف میانگین به اضافه یک انحراف معیار را برای شبه شتاب روی محورهای لگاریتمی رسم کنید.

(ت) طیف میانگین به اضافه یک انحراف معیار را برای شبه شتاب روی محورهای خطی رسم کنید.

